5.6 調査結果・大洋州

5.6.1 パラオ

5.6.1.1 概要

パラオの現地調査における調査期間と調査メンバーは以下の通りである。表 5.6.1 に調査スケジュールを示す。

調査期間　　：令和 6 年 9 月 27 日～10 月 4 日

調査メンバー　　：宮原 義人、髙柳 雅樹

表 5.6.1 調査スケジュール（パラオ）

日時		内容
9/28		現場:バベルダオブ島およびコロール内の道路状況
9/30	AM	JICA パラオ事務所
	PM	公共事業産業省　土地・測量局（Ministry of Public Infrastructure and Industries, Bureau of Land and Survey） コロール州公共事業局（Koror State Public Works）
10/1		民間調査会社・KJI & Associates
10/2	AM	政府機関 Palau Automated Land and Resource Information System Office（PALARIS） 民間建設会社・Surangel and Sons Construction パラオコミュニティカレッジ　Research and Extension Office（PCC RE）
	PM	コロール州リサイクルセンター（Koror State Recycling Center） コロール州建築区画整理局（Koror State Building and Zoning）
10/3	AM	現場:サンゴ由来材料浚渫場（コロール、アイライ）
	PM	環境保全局（Environmental Quality Protection Board: EQPB） パラオ国際サンゴ礁センター（PICRC）
10/4		現場:マレキョク周辺のサンゴ由来材料浚渫場等

出典：JICA 調査団

5.6.1.2 ヒアリング調査

表 5.6.2 にパラオで実施した関係機関とのヒアリング調査結果を取りまとめた。

表 5.6.2 ヒアリング調査結果（パラオ）

ヒアリング調査先	要旨
公共事業産業省　土地・測量局（Ministry of Public Infrastructure and Industries, Bureau of Land and Survey）	● サンゴ由来の材料は安価であり、埋め立ての材料として使用してきた。 ● 骨材の調達は Surangel 社がほとんど行っている。現地骨材の強度が足りない場合はフィリピンから骨材を輸入している。 ● 家屋建設の際には、地主が地盤の整備を行い、施工計画などを添えて National Development Bank にローンの申請を行う。銀行が検査員を派遣するが、構造的な照査などは行わない。検査後、土地は施工業者に引き渡される。 ● 建築に関する設計基準はパラオ国内で整備されておらず、国際的な設

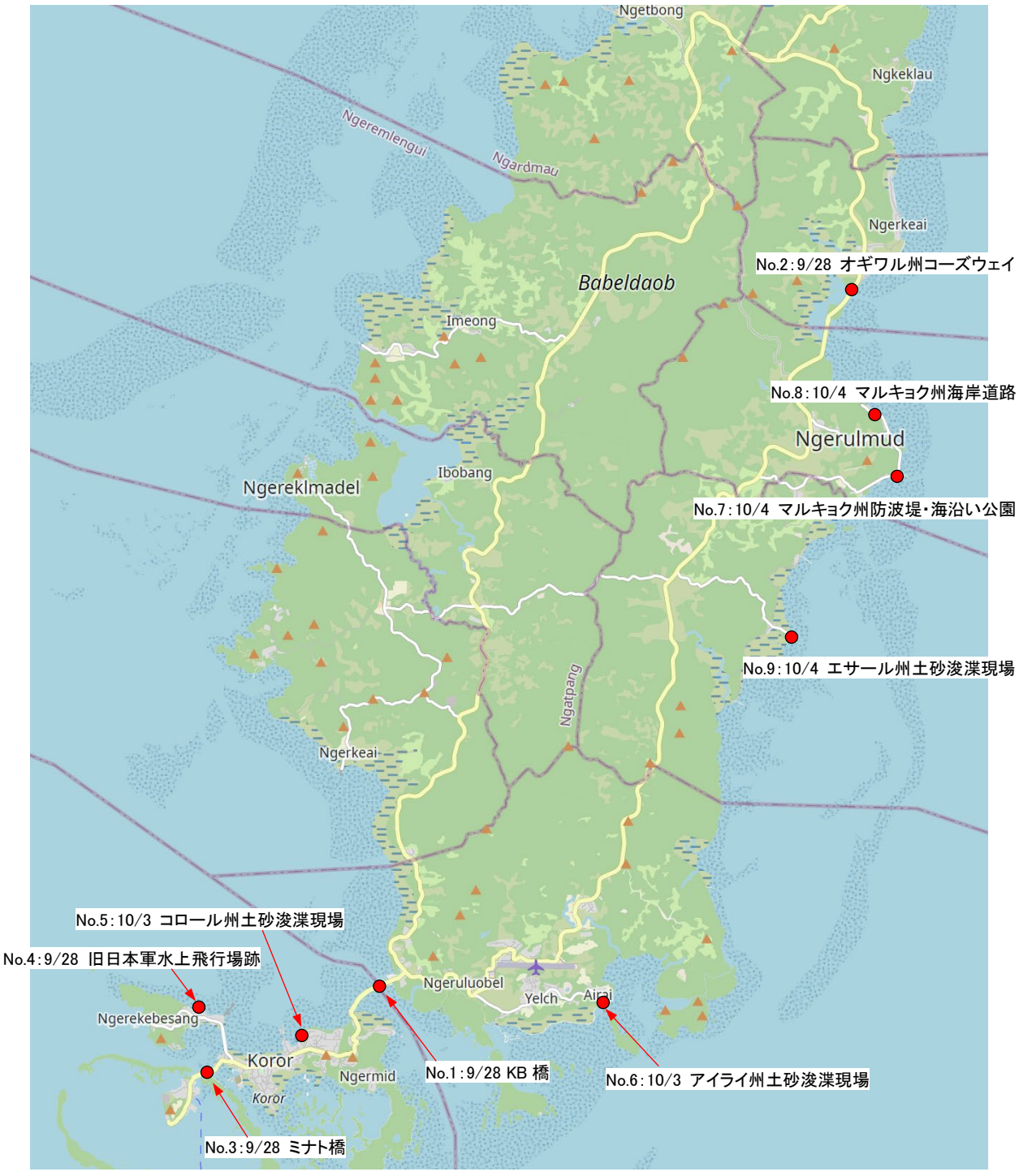
ヒアリング調査先	要旨
	計基準が使用されている。国際基準を使用すると建設費が高くなってしまう。
コロール州公共事業局（Koror State Public Works）	● 現在サンゴ由来材料の採掘がおこなわれている現場は Ngatpang, Ngeremlengui, Ngchesar, Airai にある。この採掘場から取れた材料は道路の応急処置や埋め立てに使用され、建築物には使用されない。 ● サンゴ由来材料の採掘には年間ライセンスが必要である。 ● コンクリートの材料として海砂を混ぜていた時期があった。塩分を取り除くための洗浄が不十分だったため、そのようなコンクリートで作られた家屋などの建築物は鉄筋腐食によるひび割れが生じてしまった。 ● 道路建設にはアスファルト舗装でもコンクリート舗装でもサンゴ由来材料は使用されていないが、海砂は使用されている可能性はある。 ● パラオの土は粘土が多く、水が流れると地すべりが発生しやすい。 ● 政府機関に土木技術者が派遣してもらいたいが、雇うお金は無い。ボランティアで派遣されている専門家は数人いる。
民間調査会社・KJI & Associates	● 土質試験はフィリピンで実施している。 ● サンゴ由来材料の工学的特性は玄武岩より良質。しかし、密度は低く舗装や構造部材には適さない。 ● 石灰岩は上部工にも適している。 ● 採掘現場は政府や州が所有しており、業者は土地を借りる必要がある。 ● サンゴ由来材料だけが原因となって道路が損傷するとは断定できない。通常は地下水が原因である。適切な締固めも損傷に影響する。 ● 材料試験は ASTM に準拠しており、International Building Code (IBC)、AASHTO、ACI、AISC なども使用している。 ● 交通量や交通荷重が小さいため、まだ大きな問題が生じていないとも考えられる（特に粘土が多い箇所は懸念される）。 ● 国の設計基準やエンジニアリングボードを政府が整備できるとよい。現地で取れる材料の性質は変わることは無いが、それを取り巻く環境や人材は変えることができる。
政府機関 Palau Automated Land and Resource Information System Office（PALARIS）	● 米国軍のプロジェクトでは国内調達の骨材は強度が足りず、骨材を海外から輸入する。 ● 岩礁の沈殿物はサンゴ由来の石灰質岩および砂である。 ● コロールのほとんどは湿地（Marsh）であったため、道路や建物に適さなかった。建設を進めるために湿地をサンゴ由来の材料によって置換/埋め立てを行った。 ● 締固めが不十分のため、埋め立て地の沈下が問題となっている箇所がある（PRR Hotel, Surangel Store）。対策として矢板を支持層まで 40～50m 埋め込んだ。 ● コロールとバベルダオブで取れる岩はほとんど玄武岩である。ペリリュー島はほとんど石灰岩である。 ● バベルダオブのほとんどの土は農業に適していない。pH 調整のためにサンゴ由来材料を混ぜている。 ● ユーティリティに関する情報のレポジトリがあると、建設のたびに調査を行わなくて済むので整備したい。
民間建設会社・Surangel and Sons Construction	● 採掘しているサンゴ由来材料は路盤材よりも盛土（structural fill）に適していることがある。 ● EQPB から採掘の認可を得ることが難しくなっている。 ● 設計者は路盤材や路床材には砕石を利用するが、サンゴ由来材料が入

ヒアリング調査先	要旨
	手しづらいためである。 ● コンクリート用の砂と礫は石灰岩や玄武岩を使用する。 ● サンゴ由来材料について、土質試験から得られる結果の一部が分からないため、設計が安全寄りになりコストが高くなる。設計に必要な試験結果を全て把握できるようにしたい。
パラオコミュニティカレッジ Research and Extension Office（PCCRE	● 農業や畜産、水産に関するテーマを主として地元の児童/学生と研究を行っている。 ● 気象観測に関する研究では、パラオ国内各地およびマーシャル諸島など海外に観測機器を設置して気象データや土の温度/湿度を観測しデータを収集している。
コロール州リサイクルセンター（Koror State Recycling Center）	● 2006 年に建設予定地にあるマングローブの埋め立てを行い、2008 年から運営を開始。運営開始後も増設を繰り返しているがひび割れや沈下などは生じていない。 ● ボーリング調査は実施していないが岩盤があることは分かっており、地盤は問題無いと判断している。 ● 基礎は直接基礎(フーチング基礎)がほとんどであるが、特に問題は発生していない。 ● EQPB の Environment Regulation は古く、時代に合わせた改良が必要。 ● 建築基準の整備は必要だが、同時に、その基準をもとに判断できる技術力を持つ人材が建設関係者側で必要。
コロール州建築区画整理局（Koror State Building and Zoning）	● 2019 頃、コロール市内において斜面上に建設された二階建てのコンクリート家屋が倒壊する事故があった。基礎は十分な強さを持っていると考えられたが、基礎が傾いて倒壊してしまった。重さを考慮し、立て替える家屋は木造になる予定。 ● 締固めが十分でなかったため、沈下が生じて倒壊したとみられる。建設許可にあたり、締固めをはじめ耐久性や建設位置、地盤状態などは確認されない。 ● ユーティリティ工事の際、欠陥があるとみられる箇所をピンポイントでしか修復せず、周辺の異常まで確認しない。
環境保全局（Environmental Quality Protection Board: EQPB）	● 建設に使用される岩は試験を実施していない。そのため、空港整備事業では材料を輸入している。 ● サンゴ由来材料採掘の許認可については、採掘による周辺環境への影響を主として審査する。地主の土地利用権利、作業計画、図面等が採掘の申請に必要である。 ● 採掘を許可した後、業者の採掘量に関してモニタリングできる手法が無く把握できないことが課題である。 ● 地下水位が 4 feet(1.2m)以内で発生した場合は建設する上で EQPB の基準を満たさない。地下水位が分かるようなデータを提供いただけるとよい。
パラオ国際サンゴ礁センター（PICRC）	● 本来であれば生態系の面ではサンゴは取らない方がいいが、島嶼国の事情も踏まえると使わざるを得ないこともある。 ● EQPB の古い基準は厳しいうえに施行されていない。現状に合った制度作りが望まれる。 ● 事前にアセスメントを行っても、その後の長期的なモニタリングは実施していない。

出典：JICA 調査団

5.6.1.3 フィールド調査

パラオの事業や道路などのインフラ施設の状況を確認するため、フィールド調査を実施した。調査位置を図 5.6.1 に示す。



出典：OpenStreetMap に加筆

図 5.6.1 フィールド調査位置図（パラオ）

表 5.6.3 フィールド調査結果（パラオ）

No.	写真	概要
1	 KB 橋全景  橋台付近  橋上部の状況  支承部の状況	【KB 橋(日本・パラオ友好の橋)】 ● KB 橋：通称日本・パラオ友好の橋を視察した。 ● 2002 年 1 月竣工であるが構造物の状態は良好であった。

No.	写真	概要
2	 コーズウェイ全景  コーズウェイの護岸・舗装状況	【オギワル州　コーズウェイ】 ● バベルダオブ島オギワル州のコーズウェイを視察した。 ● 他の箇所のコーズウェイでも見られたが、コーズウェイ構造を主体として、必要最低限の長さを橋梁としている。 ● 護岸の捨石、アスファルト舗装ともに良好な状態であった。
3	 ミナト橋全景  ミナト橋の舗装等の状況	【ミナト橋】 ● コロール島とマラカル島を結ぶミナト橋を視察した。 ● コロール州に位置し、交通量は比較的多い状況であったが、構造物や道路の舗装の状況は良好であった。

No.	写真	概要
4	 護岸の劣化・損傷の状況  背面の陥没・吸出し状況  陥没箇所の裏込め土状況  補修跡の状況	【旧日本軍水上飛行場跡（現在は船着き場と公園）】 ● 戦時中の旧日本軍が水上飛行場として利用していた跡地であり、現在は船着き場および公園として利用されている。 ● 護岸は波浪や経年劣化の影響と思われるひび割れ等の損傷や、背面の陥没・吸出しが見られた。 ● 損傷部の反対側では修復箇所も見られた。

No.	写真	概要
5	 浚渫現場全景  浚渫土砂状況①  浚渫土砂状況②  浚渫箇所	【コロール州　土砂浚渫現場】 ● コロール州の土砂浚渫現場を視察した。 ● 採取されている土は、礫混じり土砂状を呈しており、細粒分は少ないように見受けられた。 ● 礫はサンゴ由来であると想定された。

No.	写真	概要
6	 浚渫現場全景  浚渫土砂状況①  浚渫土砂状況②  浚渫土砂状況③	【アイライ州　土砂浚渫現場】 ● バベルダオブ島のアイライ州の土砂浚渫現場を視察した。 ● コロール州の現場同様に、採取されている土は、礫混じり土砂状を呈しており、細粒分は少ないように見受けられた。 ● 礫はサンゴ由来であると想定され、比較的大きなサンゴ礫も確認された。

No.	写真	概要
7	 防波堤の状況  小型のコンクリート橋の状況  護岸の損傷状況  背面の陥没・ひび割れ状況	【マルキョク州　防波堤・海沿い公園】 ● バベルダオブ島のマルキョク州の防波堤・海沿い公園を視察した。 ● 護岸はサンゴ由来の捨石で構成されていた。 ● 波浪による劣化を受けた小型のコンクリート橋があり、鉄筋がむき出しとなっている部分もあった。 ● 海沿い公園の護岸で、一部劣化損傷が見られた。背面土砂が吸出しを受けて、陥没やひび割れが見られる箇所もあった。

No.	写真	概要
8	 全景  道路の陥没・ひび割れ状況  道路護岸の損傷状況  道路の状況	【マルキョク州　海岸道路】 ● バベルダオブ島のマルキョク州の海岸沿い道路を視察した。 ● サンゴ由来の材料を使用したと思われる護岸（ふとんかご、捨石護岸）が損傷や一部崩落している部分が見られた。 ● 背面の道路に一部ひび割れも見られたは、大きな沈下や段差が発生するまでに至ってなく、走行性に問題は無かった。 ● 捨石護岸は、捨石を積み上げ、間隙をモルタルで埋めた構造であった。

No.	写真	概要
9	 浚渫現場全景  浚渫土置場  浚渫土砂状況  露岩の状況	【エサール州　土砂浚渫現場】 ● バベルダオブ島のエサール州の土砂浚渫現場を視察した。 ● 浚渫土砂が山積みとなっておいた。 ● コロール州の現場同様に、採取されている土は、礫混じり土砂状を呈しており、細粒分は少ないように見受けられた。 ● 礫はサンゴ由来であると想定され、比較的大きなサンゴ礫も確認された。 ● 周辺で、海に近いところであるが露岩している状況も見受けられた。岩は非常に硬く、安山岩などの火山岩と推定される。

出典：JICA 調査団

5.6.1.4 パラオの特殊土と建設事業における扱い・留意事項

(1) 特殊土に係るパラオの基礎情報

1) 気象条件

パラオは、熱帯海洋性気候で年間平均気温が 28℃前後と、一年を通してほぼ一定である。雨季（5 月～10 月）と乾季（11 月～4 月）に分かれているが、乾季でも雨が激しく降ることがあり、年間を通じて湿度が高い環境にある。[1]

コロール市の平均気温は 27℃、平均湿度は 83％であり、一年を通じて気象の変化が少ない海洋性熱帯気候である。乾季においても雨量が 200mm を超える月がある。年間降雨量は 3,800mm と多い。雨の降る日が多く、0.254mm（0.01 インチ）以上は年間 240 日程度、2.54mm（0.1 インチ）以上は 150 日程度と言われており、これに伴う土砂崩れによる道路災害も発生している。[2]

【参考文献】

[1] 厚生労働省：検疫所 FORTH
https://www.forth.go.jp/destinations/country/palau.html（2024 年 12 月確認）
[2] JICA 報告書：パラオ共和国　橋梁セクター情報収集・確認調査（2022 年）

2) 地質

パラオ諸島は、北からバベルダオブ島、コロール島、アラカベサソ島、マラカル島、ペリリュー島に至る北北東一南南西に延びる長さ約 115km、最大幅約 30km の大塗礁(パラオ塁礁,Palauan barrier reef:田山,1952)およびそれに隣接する小環礁(カヤソゲル島など)と裾礁(アンガウル島)からなっている。パラオ塗礁の形態は島の南西側に広く発達し、東側では殆ど裾礁の状態を示している。

パラオ塗礁に散在する島々のうち最大の島はバベルダオブ島で、諸島全体の 5 分の 4 の面積をもっている。

バベルダオブ島の大部分は主に火山岩および火山砕屑岩からなる火山島で、本島の南端部アイライ地区にわずかに石灰岩が存在する。それに続くコロール島東半部以南はいわゆる"ロック・アイランズ"で、その数 300 に達する石灰岩島からなっている。したがって、この火山島と石灰岩島では地形的にも大きく趣を異にしている。例えば、海岸線でみられるノッチ(notch)は石灰岩島ではすこぶる良く連続的に発達し、奥行は 1～3m,小さな岩島ではキノコ状岩を呈している。それに対して、火山島ではノッチの発達は一般に悪く、奥行も浅い。マングローブ地帯の発達状況でもこの二者では大きな違いがみられ、火山島ではマングローブはきわめて広く連続的であるが、石灰岩島では小局部に存在するのみである。内陸部には湖沼が存在するが、火山島のバベルダオブ島にあるガルドック湖(長さ 900m、幅 290m、水深 5m、水面海抜高度 25m)は淡水であるのに対して、石灰岩島中のものはすべて塩水湖で、湖岸にノッチの発達のあることなど、根本的に異なっている。石灰岩島にはカルスト地形が発達し、石灰洞も所々に存在する。

田山(1935)は、予察的ではあるがパラオ諸島中の主要な島々の地形、地質ならびに珊瑚礁につ

いてかなり詳細に記述している。その後、田山(1952)はバベルダオブ島を精査し、10 層群を区別し層序を立てた。USGS(1956)はパラオ諸島における火山砕屑岩とそれに挟在する凝灰岩は、BabelthuapFormation, Airneliik Formation, Ngeremlengui Formation からなり、また火山岩類は主として玄武岩、安山岩、石英安山岩で、始薪世から恐らく漸新世にかけて噴出したものであり、ほとんどは海底噴出で後に隆起して島を形成した、としている。浅野(1939)はバベルダオブ島アイライ村の道沿いの石灰岩から有孔虫 Pellatispira を発見した。また,COLE(1950)は Aimeliik Formation から始新世を指示する有孔虫の化石を報告している。

出典：パラオ諸島の歴史と地質,地学雑誌,99 巻(1990)3 号, 1990 年 6 月.

表 5.6.4 パラオの地質層序表

表 6　パラオ諸島の地質層序区分対比表（田山，1952；USGS，1956による）
Table 6　Stratigraphic correlation in Palau Islands

	田山(1952)	USGS (1956)	
現　世	現世石灰岩 隆起汀堆積層 ガルキョク石灰岩	Palau Ls. Peleliu Ls.	Allvium beach deposits
更新世	ペリリュー石灰岩 段丘れき層 パラオ石灰岩		Terrace gravels
鮮新世	アイライ夾亜炭層		Airai clay
中新世			
漸新世	アルモノグイ集塊岩		
始新世	アイミリーキ集塊岩 ガルドック集塊岩 バベルダオブ集塊岩 ガムセツ層	Ngeremlengui Formation	
		Aimeliik Formation Babelthuap Formation	
前第三紀？	(閃緑岩れき)	？ unexposure	

出典：パラオ諸島の歴史と地質,地学雑誌,99 巻(1990)3 号, 1990 年 6 月.

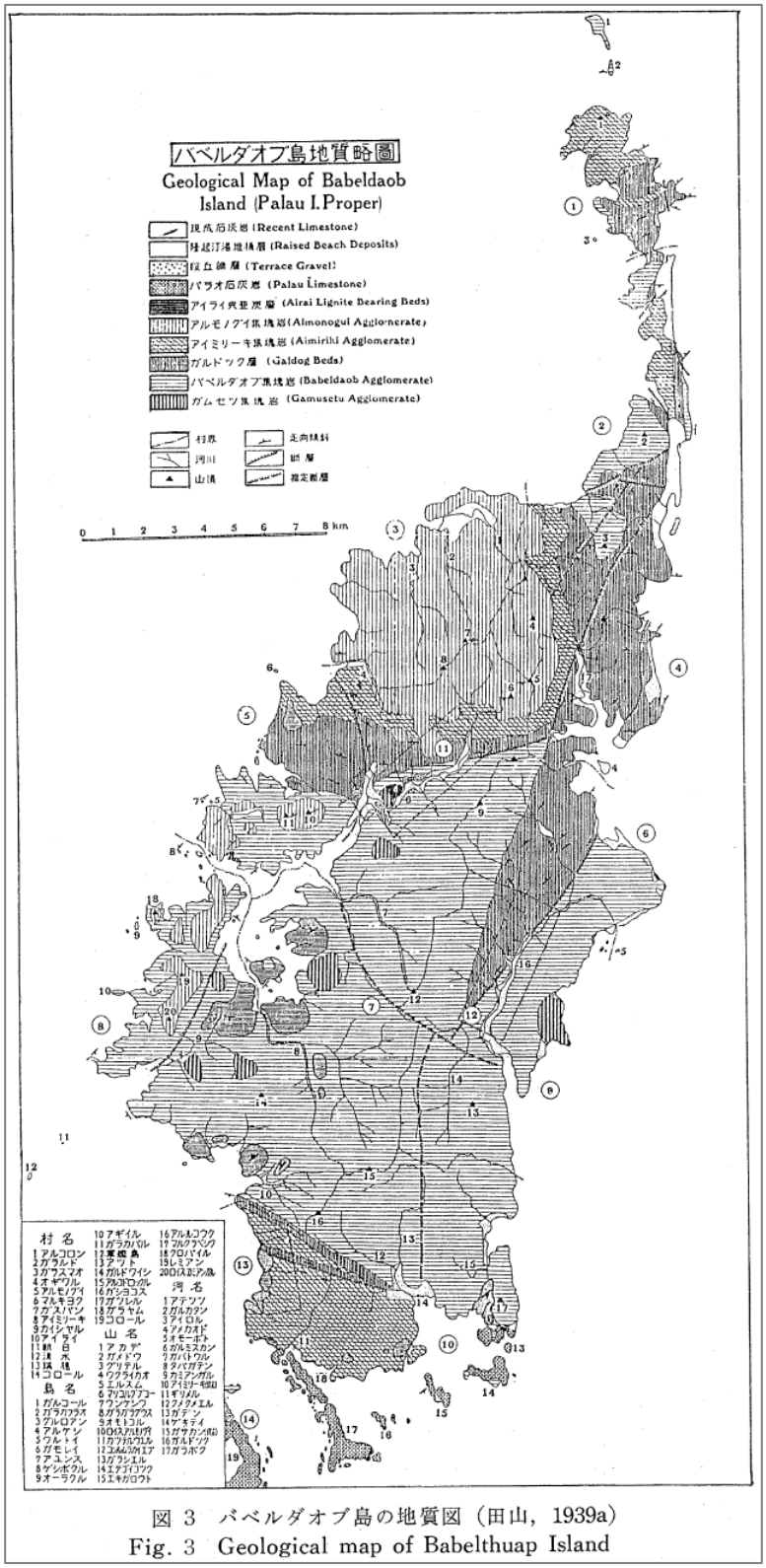


図 3　パベルダオブ島の地質図（田山，1939a）
Fig. 3　Geological map of Babelthuap Island

出典：パラオ諸島の歴史と地質,地学雑誌,99 巻(1990)3 号, 1990 年 6 月.

図 5.6.2　パラオの地質図

(2) 建設事業における扱いと留意事項

1) 問題となる特殊土について

サンゴ礫混じりの土については路盤材や埋め立てに使用されているが、現状特に問題は発生していない。

海沿いの護岸構造物で、損傷や陥没などが見られる箇所があったが、背面の道路などの機能に直ちに影響するようなものでなく、補修等で対応可能と想定された。損傷や陥没の要因としては、経年的な劣化による影響が大きいと推察される。

2) 現地におけるサンゴ由来材料の取り扱い

高い強度の骨材が必要とされる舗装等の特定の構造物には現地で調達されるサンゴ由来材料等は使用されていない。サンゴ由来材料は主に埋め立てや路盤材として使用されており、その用途では国内において良質な材料として採用されている。しかし、サンゴ礫については工学的特性が全て把握されていないまま使用されている。

3) 基準の整備状況

建設・建築基準はパラオ国内で整備されておらず、基本的に AASHTO や ASTM、設計・施工会社の国で使用される海外基準によって建設が行われる。

5.6.1.5 推奨される支援事業

海外基準による構造物の設計は要求性能が高くなり、事業費のコスト増につながる。現地に適合した国内基準の整備は今後の開発に備えて必要性が高い。また、国内に試験設備を設けるなどサンゴ由来材料の物理的・工学的特性を現地政府機関や民間建設会社が把握した上で建設工事に使用できるような環境整備が推奨される。

このことから、サンゴ由来の適切な利用、マニュアル作り、試験設備の供与などを含めた技術協力プロジェクトが今後推奨される支援事業として挙げられる。

今後適用可能性のある本邦地盤関連技術としては、骨材材料として安価に、安定的な品質で珊瑚礁由来の材料を用いるための技術があげられる。

5.6.2 マーシャル諸島

5.6.2.1 概要

マーシャル諸島の現地調査における調査期間と調査メンバーは以下の通りである。表 5.6.5 に調査スケジュールを示す。

調査期間　　：令和 6 年 10 月 26 日～11 月 2 日

調査メンバー　JICA　：恒岡伸幸、橋本弾

日本工営：下倉 宏、宮原 義人、髙柳 雅樹

表 5.6.5 調査スケジュール（マーシャル諸島）

日時		内容
10/28	AM	外務省 Ministry of Foreign Affairs and Trade（MOFAT）
	PM	JICA マーシャル支所 現場：マジュロ橋
10/29	AM	民間建設会社・Pacific International Inc.（PII）
	PM	アジア開発銀行 RMI Pacific Country Office
10/30	AM	現場：PII サンゴ由来材料採石場 民間建設会社・大日本土木
	PM	民間会社・Marshalls-Japan Construction Company（MJCC） 環境保護局 Environmental Protection Authority（EPA） 公共インフラ省 Ministry of Public Works, Infrastructures, and Utilities（MPWIU）
10/31	AM	海洋資源局 Marshall Islands Marine Resources Authority（MIMRA）
	PM	運輸通信省 Ministry of Transportation, Communications and Information Technology マーシャル諸島短期大学（CMI） 民間建設会社・A/C Construction
11/1	AM	アメリカ海洋大気庁 National Oceanic and Atmospheric Administration（NOAA） National Weather Service 資源商務省 Ministry of Natural Resources and Commerce（MNRC）
	PM	世界銀行 Urban Resilience Project（URP）Project Implementation Unit（PIU） 民間コンサル会社・オリエンタルコンサルタンツグローバル 在マーシャル日本大使館（EOJ）

出典：JICA 調査団

5.6.2.2 ヒアリング調査

表 5.6.6 にマーシャル諸島で実施した関係機関とのヒアリング調査結果を取りまとめた。

表 5.6.6 ヒアリング調査結果（マーシャル諸島）

ヒアリング調査先	要旨
外務省 Ministry of Foreign Affairs and Trade（MOFAT）	● ラグーン側の浚渫については他国で進行中のプロジェクトの動向をモニタリングしている。 ● Secretariat of the Pacific Community (SPC)がラグーンにおける浚渫が環

ヒアリング調査先	要旨
	境的に安全な方法と報告しているが、土地のかさ上げ等に適しているかなど工学的な観点では適切か分からない。
民間建設会社・Pacific International Inc.（PII）	● ラグーン側で浚渫されるサンゴ由来の材料は外洋側の材料と比べて強度が弱いことが知られている。前者は比重 2.3～2.4、後者は比重 2.5～2.6 ほど（特に硬い場合は 2.6～2.7）。 ● コンクリートの圧縮試験で得られる強度はラグーン側で 4000psi(27.5MPa)、外洋側で 6000psi(41MPa)。埋め立て等にはラグーン側材料を使用して問題無いが、建築物におけるコンクリートなどは外洋側材料を使用する。 ● アスファルト舗装の材料として使用する場合、瀝青の割合は外洋側材料で 7～8%、ラグーン側材料は 10%～13%必要とされる。空港整備案件では Spec 上最大 7%と指定されているため、輸入材に頼るしかない。 ● 採掘は Environment Protection Authority (EPA)が許可をする。国家プロジェクトでは許可は降りやすい。 ● RMI では水が貴重なため、骨材洗浄は砂を取り除くにとどまっており、塩分除去には足りない。 ● 塩害対策のため、鉄筋はエポキシ樹脂で覆う ● コンクリートの混和剤として可塑剤と減水剤が強度確保のために使用される。 ● 骨材の物理試験は採掘地点ごとに行っている。 ● 学校はニュージーランド基準で建設され、フィリピンの設計者はフィリピン基準と US 基準を併用している ● **塩害環境が強く、ガラス繊維も腐食してしまう。**
アジア開発銀行 RMI Pacific Country Office	● 教育、エネルギー、水資源、ごみ処理に関する案件など、RMI 全体で約 1 億 USD の規模で案件が進行中である。 ● エネルギー案件では防潮堤建設が予定されているが、輸入材を使用する予定である。 ● 防潮堤の建設コストは大きい。輸入材は扱いやすいがコストが高く、現地材料も代替案として検討できるとよい。 ● 排気ガスの懸念があるため、焼却施設の建設は EPA より懸念されており埋め立てによるゴミ捨て場の増築が推奨されている。 ● RMI において国有地は無く、すべての土地は個人によって所有されており、インフラ開発における課題である。ADB は土地所有権の登録システムの枠組みを構築した。しかし、登録義務が無いため現在の登録数は 35 件にとどまっている。
民間建設会社・大日本土木	● マジュロ国際空港付近で貯水池整備事業（JICA 無償資金協力）が進行中。 ● 現在はコンクリートの現場打設前の段階。コンクリートの試験練りにおいて、現地のサンゴ由来の骨材を使った材料で所定の強度は確認できている。 ● PII と一緒に仕事していく中で、外海と内海でサンゴの硬さが違い、外海のサンゴの方が硬いと聞いており、骨材としても外界の材料を使用するということが、対策の一つであると認識している。 ● 骨材について、比重と吸水率のみ得ている状態。骨材の強度としては特に確認していない。 ● コンクリートとしての強度が出るかどうかは確認した上で、試験練りを実施している。目標強度は 30MPa である。

ヒアリング調査先	要旨
	● 鉄筋を使用するのは一部の構造物(護岸面や貯水池天端の擁壁等)であり、鉄筋の保護剤であるエポキシ樹脂は日本製のものを使用する。 ● 試験結果が出るのはこれからだが、速報として、日本の一般的なものより水セメント比が若干高く、セメント割合が多い状況である。 ● 減水剤などの混和剤は特に使っていない。手に入りにくかったり、コストが高いという事情が考えられる。現状の設計、施工においては特に問題は無いという認識。 ● 土堤の材料は、外海のセグメント層を利用。材料の粒度分布は直接試験していない。最大寸法は採取場所によって異なる。バックフィル部分は最大寸法 20 ㎝以下、それ以外は 10cm 以下で考えている。細粒分はほとんど無い。 ● 環境アセスメントを実施し、モニタリングは不要になった。 ● 現地のサンゴ由来の材料を盛土材とした場合の問題もほとんど無いという認識。 ● 護岸堤防の高さについては、潮位の上昇と将来的な海面上昇を見込んでいたと思われる。
民間会社・Marshalls-Japan Construction Company（MJCC）	● 建設・建築用のコンクリートブロックの製造をしており、材料用の砂利を PII や A/C より購入している。 ● コンクリートブロックの強度については、ハワイにブロックを送付して強度を確認している。アメリカの基準を満たしていることを確認している。マーシャル国内に試験機材は無いという認識である。 ● 骨材の提供できる会社、ほぼ PII と A/C の 2 社に限られているが、決して独占的ではない。事業のためには免許が必要であり、免許があれば誰でも事業できる。ただし、その免許にかかる費用が高い模様である。免許の更新費用で 1 万～2 万ドル/年程度かかるため、自前で材料を調達できる施工機械を持っているような大きな会社しかメリットが無いと考えられる。 ● マーシャル国内での土地の売買は特に問題無いはずだが、土地の所有者や独自の文化的な理由などで、非常に複雑であり、実質、土地の売買はできないと考えた方が良い。
環境保護局 Environmental Protection Authority（EPA）	● サンゴ由来材料採掘の申請において環境への影響評価とは申請者の方で行われる。申請内容を確認の上、EPA は EIA など必要な手続きを申請者に対して指示する。 ● 申請者は土地所有者からの許可も取得する必要がある。 ● 防潮堤や護岸に関する申請は四半期ごとに 15 件、その他小規模な採掘に関する申請は 20 件ほど（うち新規申請は 4、5 件） ● 採掘量のモニタリングが課題。SPC が採掘後の穴の体積を解析できる機材/手法を提供することを計画している。Secretariat of the Pacific Community（SPC）が採掘後の穴の体積を解析できる機材・手法を提供することを計画している。 ● EPA はインフラ開発等に対して前向きではあるが、同時に環境への影響を評価することも考慮したい。 ● EPA の海岸部門職員 3 名と海洋生物学のバックグラウンドを持つ職員 1 名が採掘許認可の申請内容を審査している。採掘に関して EPA 側で調査を行うには資金と人材が足りていない。
公共インフラ省 Ministry of Public Works,	● 1994 年、2004 年、2023 年にサンゴ由来骨材の調達に関する調査結果が SPC によって公表されている。そこで示されている採掘場は環境への

ヒアリング調査先	要旨
Infrastructures, and Utilities（MPWIU）	影響が少ないと考えられている。 ● サンゴ由来材料を使用したことにより、他の特殊土の例で見られるような事故は起きていない。 ● 課題は塩害環境である。真水を使用した骨材の洗浄はコストがかかり、降雨による塩分の削減、もしくは一回程度の洗浄にとどまっている。 ● 防潮堤の建設には 4000psi(27.5MPa)のコンクリート圧縮強度が要求され、現地材料でも建設可能である。 ● 舗装は hot mix は輸入材を使用する。修復用の cold mix には現地材料を使用しても良い。 ● 材料試験はグアムやハワイで行われている。施工業者にはサンゴ由来材料の試験を行うように指示している。 ● 防潮堤等の建設に使用する材料や鉄筋の施工方法などを規定した設計基準がある。
海洋資源局 Marshall Islands Marine Resources Authority（MIMRA）	● 年に一度、マジュロのラグーンおよび外洋における海洋生物調査を行っている。サンゴの分布調査も含まれている。資金は NOAA。 ● Halimeda という海藻が死滅したときに生じる石灰質の砂を材料として注目している。 ● 採掘許認可を申請した個人や企業から EIA レポートに関する調査について相談され、業務外で職員が対応することがある。 ● 国内の小規模な工事は資金が無いため輸入材料を購入できず、現地材料を使用している。MIMRA 本部の建物も現地材料により建設された。
運輸通信省 Ministry of Transportation, Communications and Information Technology	● 海面上昇により、波が護岸工や擁壁を超えて貯水池の水に侵入する恐れがある。波の侵食による護岸工の耐久性も懸念される。 ● サンゴ由来材料採掘に関しては EPA からの許認可の他、史跡については Ministry of Cultural and Internal Affairs の下の Historical Preservation Office (HPO)の法律をクリアしなければならない。 ● 空港の滑走路整備事業は米国政府が資金源だが、基準を見たいしているか確認する期間は米国 Federal Aviation Authority (FAA)である。 ● WB の基準にしたがって環境社会配慮を考慮しなければならない。 ● 政府機関の中には国有企業として独立した機関もあるが、国内で事業が発足すると各機関から人材を招集して協同して事業推進していくための委員会が設置される。
マーシャル諸島短期大学（CMI）	● CMI には 2004 年ごろまで工学部門が存在していた。工学の必要性から、現在政府内で工学部門の再設立が検討されている。 ● サンゴ由来の現地材料は問題や課題があるため、ドナー機関は使用したくない。本校舎付近の海岸にも防潮堤が輸入材で建設される予定。 ● 空港付近の骨材や砂がシートなどで覆われずにさらされている状態だった。輸入材を調達しても、適切な品質管理がされずに空気にさらされていると塩分が飛来して結局塩害のおこしやすい材料となってしまう。 ● 定期的に点検/修復を行わずに建物の損傷を数年放置してしまうと建物の新設費用を修理代が上回ってしまう。 ● 土地の所有や継承については代々引き継がれてきた伝統的な慣習により管理されている。そのため、政府が整備した土地所有の登録システムに自発的に参加する地主は少ない。
民間建設会社・A/C Construction	● マジュロの外洋側に自社の採掘場があり、イバイでの採掘は現地の会社に砂と礫の採掘を依頼する。マジュロ採掘現場は所有している土地と借りている土地がある。

ヒアリング調査先	要旨
	● 採掘した材料は降雨によって塩分を除いている。 ● サンゴ由来材料を使用するのは主に家屋と防潮堤の建設。 ● 防潮堤には 3500psi(25MPa)、家屋には 3000psi(20MPa)のコンクリートが使用される。 ● イバイの防潮堤は RC 構造（エポキシ樹脂を鉄筋のコーティング材として使用） ● WB のプロジェクトで輸入骨材を使用しているが、コストは現地材料の 8 倍ほどである。 ● プロジェクトで使用される基準にしたがって材料試験を行う。
アメリカ海洋大気庁 National Oceanic and Atmospheric Administration（NOAA） National Weather Service	● マジュロとクワジェリンの気象観測を 1954 年から行っている。 ● タイドゲージがオーストラリアの Bureau of Meteorology の資金で Uliga Dock に設置された。 ● RMI の降雨量はわずかに減少傾向にある。 ● Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)の記事によると RMI では年間 2cm ほど海面が上昇している。 ● 国連環境計画（UNEP）のプロジェクトの一環で自動気象観測ステーションが 24 箇所、RMI の各環礁に設置される予定である。
資源商務省 Ministry of Natural Resources and Commerce（MNRC）	● 海岸侵食によって防風林が減少してしまう。 ● ミクロネシア連邦の周辺の海底で中国が採掘を行おうとしているが、その採掘するエリアが RMI の環礁のうち一つの付近である。Coastal Management Advisory Council は本件について懸念している。 ● 輸入材を管理しているのは財務省（Ministry of Finance）である。 ● 農業支援のためにオーストラリアから土質の専門家がボランティアで派遣されている。技術協力のために専門家を雇うには資金が足りない。
世界銀行 Urban Resilience Project（URP） Project Implementation Unit（PIU）	● 2022 年に RMI 内閣によって採択された National Building Code を MPWIU の Building Safety Regulation（BSR）部門が施行する。その施行に関して PIU より支援を行う。 ● WB 基準の環境面の要求事項が厳しいため、イバイの防潮堤建設事業等ではドバイより骨材を輸入する（強度が理由ではない）。JICA の貯水池整備事業のような WB 資金源でないプロジェクトでは現地材料が使用されることもある。 ● ドバイで調達される骨材はフィジー産等の材料より品質が良く、数量も十分供給可能である。 ● URP 事業において、規制を緩和して現地材料を非構造部工事に使えるか検討している。 ● 建物の建設は施工計画、技術仕様書、構造計算結果等を提出して施工許可をもらった上で実施する。 ● MPWIU のプロジェクトでは施工業者に骨材やコンクリートの試験結果を提出させている。国内の試験環境は十分でないため、PII はグアムで試験を行っている。コンクリートの圧縮試験は PII が国内で実施できる。 ● 小規模な建設プロジェクトでは Scala Penetrometer Test を実施する。10 回の落下で 6 inch(15cm)貫入すると、柔らかく不適切な材料と判断する。
民間コンサル会社・オリエンタルコンサルタンツグローバル	● 空港ターミナルの整備事業の詳細設計を実施中 ● 骨材は基本的に現地材料を使う予定。PII が採掘し、粒度調整したものを調達する予定。 ● 海水で洗うため、塩分量が懸念される。長期的に強度が低下する可能性

ヒアリング調査先	要旨
	があり、強度の減少率が分からない。 ● 水セメント比の調整が難しく、他の島での施工事例では練り混ぜに時間がかかった。 ● 平屋の一階建てのため、基礎は直接基礎を採用して軽量となるようにする。重機も施工場所に入らない予定。 ● 海面上昇を 50 年分考慮。空港と他の整備事業との整合性を取りつつ上昇率を検討した。津波は堤防で防ぐ設計。 ● ボーリング調査は改修地域の箇所、駐車場で 3 箇所実施。全て埋立地であり、柔らかい砂礫、支持層まで 20m 以上。 ● ターミナル建設予定地の下は地下水位が高く、コアが取れていないところもある。サンプルが取れたところは物理試験を行っている。

出典：JICA 調査団

5.6.2.3 フィールド調査

マーシャル諸島(マジュロ環礁)の事業や道路などのインフラ施設の状況を確認するため、フィールド調査を実施した。調査位置を図 5.6.3 に示す。

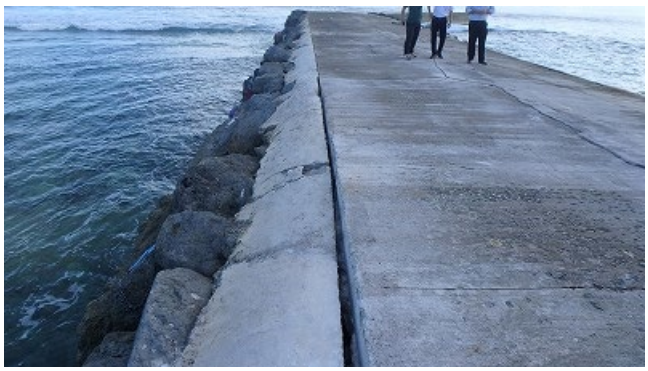


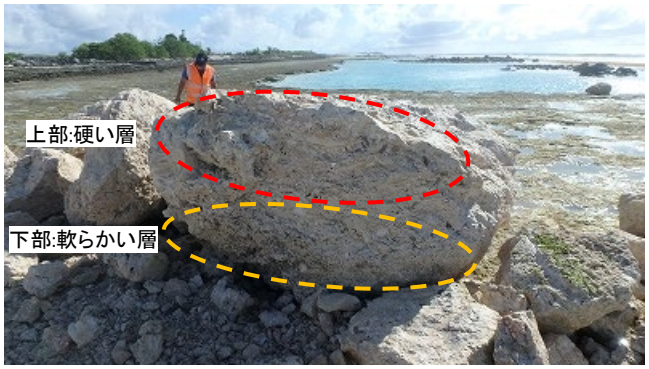
出典：OpenStreetMap に加筆

図 5.6.3 フィールド調査位置図（マーシャル諸島(マジュロ環礁)）

表 5.6.7 フィールド調査結果（マーシャル諸島）

No.	写真	概要
1	 マジュロ橋全景  マジュロ橋上部の状況  マジュロ橋の状況  護岸捨石の状況	【マジュロ橋】 ● マーシャル諸島(マジュロ環礁)唯一の橋梁であるマジュロ橋を視察した。 ● 潮位や波浪を非常に受けやすい箇所であるが、各構造は良好な状態であった。 ● 下部工周りの護岸にサンゴ礁由来の捨石が使用されており、波浪による浸食が若干見られた。

No.	写真	概要
2	 防波堤上部の状況①  防波堤上部の状況②  護岸部の状況  防波堤全景	【マジュロ橋近傍の防波堤】 ● マジュロ橋近傍にある防波堤を視察した。 ● 経年劣化の影響と想定されるひび割れ等が見受けられた。 ● 護岸捨石の大きな崩壊は見られなかったが、背面の吸出しを受けていると想定される、空隙が見受けられた。

No.	写真	概要
3	 サンゴ採石場全景  サンゴ掘削部  採掘されたサンゴ岩石  サンゴ礁の状況	【PII サンゴ採石場】 ● 環礁の外海部に位置するサンゴ採石場を視察した。 ● 採掘後の大小さまざまなサンゴ礫が積まれていた。 ● サンゴの上部は比較的硬く、良質材として利用され、下部にかけてやや土砂化し軟らかくなり、盛土材として利用される。

No.	写真	概要
4	 道路(擁壁)状況  護岸状況(ラグーン側)	【マジュロ環礁道路護岸】 ● サンゴ採石場に近い、マジュロ環礁道路の護岸状況を視察した。 ● 護岸はコンクリート擁壁構造であり、それより海側にサンゴ由来の捨石工がなされていた。 ● 構造物の状態は良好であった。
5	 貯水池事業施工現場全景  掘削土状況	【貯水池事業施工現場】 ● 貯水池事業の施工現場を視察した。 ● 海側の堤防に盛り立てている材料は、サンゴ由来であり、比較的大きく硬い岩石を捨石工に、比較的細かくて柔らかい材料は盛土材として利用されていた。

No.	写真	概要
	 材料のふるい分け  サンゴ岩石利用状況  サンゴ岩石利用状況（護岸）	

5.6.2.4 マーシャル諸島の特殊土と建設事業における扱い・留意事項

(1) 特殊土に係るマーシャル諸島の基礎情報

1) 気象条件

ミクロネシアは、太平洋のメラネシアの北側にある島々の総称である。海洋性熱帯気候で、気温は年間を通じほぼ一定の 27 度である。マーシャル諸島は雨季（10 月～11 月）と乾季（12 月～4 月）に分かれ、雨季の月間平均降水量は約 300mm、乾季は 200mm 未満と降水量は少ない。[1]

マジュロは、熱帯雨林気候で、気温は平均 27 ℃で年間を通して比較的均一である。季節は 12 月から 4 月の乾季と 5 月から 11 月の雨季に分かれている。2018 年の年間降水量は約 3,200 mm で、年間を通して大雨が降る。エルニーニョ現象は約 3 年毎に発生し、干ばつを引き起こす。北東貿易風は 12 月から 4 月にかけて優勢で、他の月々の大部分は東風または南東風が吹いている。[2]

【参考文献】

[1] 厚生労働省：検疫所 FORTH
https://www.forth.go.jp/destinations/country/palau.html（2024 年 12 月確認）
[2] JICA 報告書：マジュロ環礁貯水能力改善計画準備調査報告書(先行公開版)（2020 年）

2) 地質

マーシャル諸島は、約 1,225 の島々（individual islands と islets を包含する）から成り、29 の環礁（atoll）と 5 の単独で存在し低い珊瑚礁からなる島（solitary low coral islands）を形成している。2 つの列島（chain）間は約 200km 離れており、諸島全体では、ハワイとオーストラリアの中間に位置している。

マーシャル諸島の平均標高は海抜約 2.0m である。標高の最低値は海抜 0m、最高値はリキエップ（Likiep）環礁の 10.0m である。領土には肥沃な土壌、河川は一切存在しない。

マジュロ環礁は 57 の小島がおよそ 100km にわたってつながる細長い楕円形で、その約半周に及ぶ 50km が舗装道路で結ばれ、 1 つの長い島を形成している。島の幅は 500m から 7m ほどであり、標高は海抜 2m から 3m と平坦な地形をなし、河川、湖沼及び地下水の湧水などはない。

マジュロ環礁の土質は強いアルカリ性土質である。植生も自生の強いヤシなど限られた種類しか見られず、農業栽培には厳しい状況にあり、ローラ地区で僅かに野菜の生産が行なわれている程度である。また、島の構造としては、内海・外洋（lagoon、ocean）、礁部（reef flat）、平地（beachstrand）、低地（marsh）の 4 つに大きく分けることができる。

ア．内海及び外洋
珊瑚礁岩で構成され、一部に珊瑚、シルト、軽石を含む。砂が見られる。20%以上の勾配があり、常時海水中に位置する。

イ．礁部
珊瑚礁岩で構成され、砂、軽石が点在する。10%以上勾配があり、干潮時露出する。

ウ．平坦部

珊瑚砂で構成され、10%以下の勾配である。

エ．低地部

黒色土層から成り、10%以下の勾配である。

マジュロ環礁の地質概況は以下のとおりである。

ア．ライロック（Rairok）地区

当地区の地質は地表の腐植土（約 15cm）の下に砂、礫（約 5 から 30cm 程度）混りの砂、又は砂混り礫層が存在し、島幅の狭い約 1.5km 区間で地表より約 80cm 程度で軟岩又は風化岩が出現する。

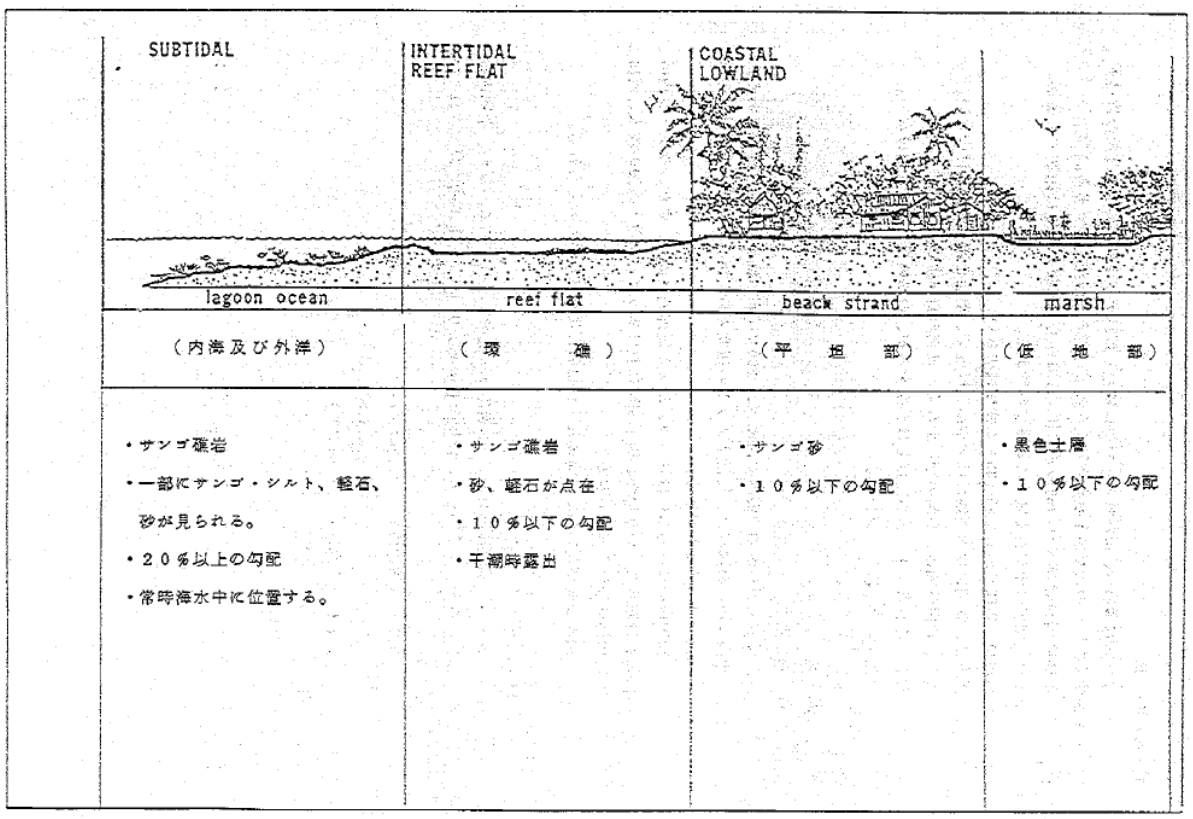
イ．DUD 地区

DUD 地区の地質は砂層及び礫混り砂層であり、約 1.2m の深さまでは軟岩及び風化岩とも出現しないと判断される。なお、地質が砂層のため透水係数が高く、地下水位が海面水位と連動して時間差・水位差がほとんどない状態で変動している。

ウ．ローラ地区

ローラ地区には帯水層があり、石灰質の堆積層と石灰岩から構成されている。内海側では細かい堆積層が見られ、外洋側では、透水性の高いきめの粗い堆積層がある。

出典：JICA 報告書：マジュロ環礁水供給システム改善計画予備調査報告書（2006 年）



出典：JICA 報告書：マーシャル諸島共和国マジュロ環礁水道設備改善計画基本設計調査（1986 年）

図 5.6.4 マーシャル諸島(マジュロ環礁)の島の構造分類図

マーシャル諸島は、7000 万年前に火山活動によって姿を現したといわれている。約 4000 万年前、太平洋プレートが北西にゆっくり動くにつれて、火山島は沈んでいった。3000 年前までには、さらに火山島が沈んでいく中で、火山島の周りでサンゴが礁を形成し、輪っかのような環礁ができあがったとされる。

(2) 建設事業における扱いと留意事項

1) 問題となる特殊土について

サンゴ礫交じりの土や礫については路盤材や埋め立て、骨材や捨て石に使用されているが、物理的特性による現状特に問題は発生していない。

2) 現地におけるサンゴ由来材料の取り扱い

高い強度の骨材が必要とされる特定の構造物には現地で調達されるサンゴ由来材料等は使用されていない。マジュロの環礁内側（ラグーン側）で採掘されるサンゴ由来材料は主に埋め立てや路盤材として使用されており、環礁外側（外洋側）は捨て石やコンクリートに使用される。工事においては MPWIU より材料の試験結果提出が義務付けられている。

塩害による構造物の耐久性低下が課題であり、骨材の洗浄不足による塩分残存も一つの要因である。骨材を輸入しても保管状態が悪いと塩分が飛来し塩害につながる。構造物施工前後で対策が必要である。

3) 基準の整備状況

建築基準は 2022 年に閣議決定された National Building Code を使用している。本基準にはサンゴ由来材料に関する記述は無く、サンゴ由来材料に関するマニュアル等は現状無い。

5.6.2.5 推奨される支援事業

コンクリートや舗装において強度の面で輸入骨材が採用されているが、現地調達のサンゴ由来材料でも所定の強度を発現できる技術があると事業費を検討する際に骨材の現地調達が一つのオプションとなりうるため導入できるとよい。それ以外の用途でもサンゴ由来材料が工学的に適切か判断できる環境整備や専門家派遣等による技術協力、塩害対策について支援することも推奨される。

今後適用可能性のある本邦地盤関連技術としては、骨材材料として安価に、安定的な品質で珊瑚礁由来の材料を用いるための技術があげられる。

第6章 意見交換会／JICA 内部説明会

6.1 第 1 回意見交換会

(1) 開催スケジュール

表 6.1.1 に示す構成で 2024 年 5 月 16 日に開催した。JICA 本部（麹町）の会議室および Teams 会議によるハイブリッド開催とした。

表 6.1.1 第 1 回意見交換会スケジュール

時間	内容
13:00	開会の挨拶（JICA 資金協力業務部実施管理第一課 斉藤課長）＋各委員の紹介
13:10	①本研究の概要説明（野末）＋②特殊土概論（下倉）＋質疑応答
13:45	③ODA 事業等に係る特殊土壌に遭遇した事例調査（夏）＋質疑応答
14:05	④本邦地盤改良工法・のり面処理技術の開発の動向と海外展開に係る情報（宮原・福田）＋質疑応答
14:30	⑤海外現地調査計画（高柳）
14:40	⑥今後の調査の進め方（野末）＋意見聴取
14:55	閉会の挨拶（JICA 資金協力業務部実施管理第一課　斉藤課長）

出典：JICA 調査団

(2) 委員構成

JICA のコメントや団内の協議の結果選定した委員の構成を下記に示す。

表 6.1.2 意見交換会 委員構成（敬称略・五十音順）

役割	氏名	所属先/職位	専門／特殊土関連研究	参加方法
委員長	末政 直晃	東京都市大学　教授	地盤工学、補強土、地盤改良	WEB
委員	石原 雅規	国立研究開発法人　土木研究所 上席研究員	地盤工学、河川堤防強化・補強	WEB
委員	伊藤 和也	東京都市大学　教授	地盤工学、補強土、斜面防災	対面
委員	折原 敬二	基礎地盤コンサルタンツ株式会社 顧問	地盤工学、東南アジアを拠点に各種地盤問題を経験	WEB
委員	菊本 統	国立大学法人　横浜国立大学 教授	地盤工学、崩壊性土、破砕性土	WEB
委員	澤村 康生	国立大学法人　京都大学 准教授	地盤工学、SATREPS MNGD メンバー、ブラックコットンソイルの改質に関する研究	WEB
委員	野津 光夫	株式会社　不動テトラ 顧問	地盤工学、地盤改良、海外の膨張性粘土に対する深層混合処理工法	対面
委員	林　宏親	寒地土木研究所 上席研究員	地盤工学、北海道泥炭地盤、日本の地盤改良技術をインドネシアへ移転	後日 意見聴取

役割	氏名	所属先/職位	専門／特殊土関連研究	参加方法
委員	堀 俊和	国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究部門　農地基盤情報研究領域長	地盤工学、灌漑水路等農業施設の地盤技術アドバイザー等	対面
委員	渡部 要一	国立大学法人　北海道大学　教授	地盤工学、サンゴ礫混じり土の工学的性質	対面

出典：JICA 調査団

(3) 実施状況

調査団が行った①本研究の概要説明、②特殊土概論、③ODA 事業等に係る特殊土壌に遭遇した事例調査、④本邦地盤改良工法・のり面処理技術の開発の動向と海外展開に係る情報、⑤海外現地調査計画、⑥今後の調査の進め方の説明に対する委員 9 名、JICA 資金協力業務部およびインフラ技術業務部からの参加者のコメントを下記に示す。

表 6.1.3 第 1 回意見交換会 コメント一覧

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
1	① P6	特殊土壌マニュアルの説明の中で「問題のメカニズム、原因、事象の明確なイメージを取りまとめるとあるが、問題を見る時の多角的な視点（ex.時間的な要素も特殊土の変状で重要な視点の一つとなる）をもってとりまとめを行う必要がある。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
2	② P12	・膨潤性土と崩壊性土は関連性（ex.スメクタイト系膨潤性土によりスレーキングが早くなる）があるので注意が必要である。 ・特殊土の文献検索の際、クレイストンの他、マッドロック、マッドストーン、ウィークロックなどの表現を使用していることもあるので、キーワードを広げて調べるとよい。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
3	② 全般	特殊土の整理の際は、特殊土の起源も含めて整理されるとよい。上流の火山地域で生成され川によって運ばれて下流に堆積しているものもあるのではないか？（特に米国南部周辺）	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
4	② 全般	１）膨潤性土と崩壊性土は関連性があり、重複もあると思われる。膨潤性土は粘土鉱物の膨潤性に大きく依存する話と思われるが、崩壊性土は堆積等による固結構造と粘土鉱物の膨潤性の兼ね合いで生じるものが多い。 ２）破砕性土について、個々の粒子の破砕に対する強さ（脆さ）も重要であるが、破砕を生じたあとの力学特性への影響を考えると粒子内部に空隙を含む多孔質な粒子は破砕しやすく、かつ破砕後の圧縮性も高まりや	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		すい。火山灰質土では粒子内部の空隙率にばらつきが多いので、どの程度かといった情報は非常に参考になるであろう。 ３）堆積性の脆弱岩は clay stone, clay rock, mud rock, mud stone, weak rock など様々な呼ばれ方をしているので、文献調査時にはワードを変えながら調べるとよいと思われる。場合によっては shale も確認するとよいのでは。 ４）膨潤性土については盤膨れ等、国内でも問題になっている。国内外の文献を広く探して頂けるとよいし、本事業の成果は国内技術者に対しても貴重な成果になりうると思われる。 ５）Na、Ca スメクタイトはイオン交換によって互いの性質を行き来することもあるので留意が必要。	
5	③ P41	特殊土の試験について、現地で簡単に出来るような試験方法を調査・取りまとめるとよい。	指摘事項を意識した整理･とりまとめを行う。
6	③ P41	長く膨潤するような土の場合、セメント改良しても時間の経過によって強度が変化する可能性があるため、時間変化の影響についても調査の際、考慮されるとよい。	指摘事項を意識した整理･とりまとめを行う。
7	③ P41	カンダルスタンの膨潤性土はセメント改良しても、土と同量のセメントを配合するまで全く固まらなかった。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
8	③ 全般	現場によって、同じ原因であっても同じ対策が適用できないことも想定されるため、取りまとめの際に配慮されるとよい。	指摘事項を意識した整理･とりまとめを行う。
9	③ 全般	３．成功と失敗 情報収集, あるいは現地調査に当たり, 失敗事例は必要な情報ですが，一方で成功事例も集められてはいかがでしょうか？膨張性土壌の地域なのに，かなり時間がたってもわだちがあまり大きくない道路とか，分散性粘土地帯なのにドラゴンホールみたいなのがない, とかです. 単にその部分だけその土がないだけかもしれませんが，成功事例かもしれません.	意見を踏まえ、継続して事例調査や現地ヒアリング等を行い、失敗事例だけでなく成功事例もあれば整理・とりまとめを行う。
10	③ 全般	最近、海外業務で遭遇した特殊土の事例を以下に記す。 １．膨張土と浸水崩壊土については、ASTM D4546 に標準試験が規定され、米国などでは一般的に実施されています。ところが、水の影響を排除して採取すべき試料が、循環水を使ったボーリング孔から採取されたた	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。 ヒアリングの実施を検討する。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		め、試験結果の信頼性を損なう事例が多々あります。不正確な試験の実施は、膨張土や崩壊土の判定を誤ることにつながります。 ２．浸水崩壊は、土だけでなく風化岩でも発生した事例があります。タイの造成団地で、風化花崗岩が浸水崩壊により、緩い斜面の崩壊、フーチングの支持力不足と過大沈下が発生しました。インドやシンガポールなどでも、崩壊土を含む盛土で降雨による強度低下や過大沈下が発生しています。 ３．インドネシアジャカルタの膨張土では、大口径の場所打ち杭の施工で、削孔からコンクリート打設まで時間を要したため、周面摩擦力度が極端に低下する事例が発生し、所定の支持力が得られなかった事例が発生しました。	
11	③ 全般	・体系化された情報が無い土壌については、事例集をマニュアルの巻末にまとめるだけでも情報として十分意義があるので掲載できるとよい。 ・情報は様々なフォーマットで存在するが、極力一つのフォーマットにまとめておくと読み手に親切である。発生した問題点、想定される原因と対応に加え、得られた教訓について詳細に記載した事例集があるとよい。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
12	④ P56	・ベトナムで地盤改良（セメント固化）した際、膨潤性粘土により品質にばらつきが出た経験あり。室内で混合してもすぐに凝集凝結する。これは膨張性粘土がマイナスイオンに帯電しており、セメントのカルシウムイオンとすぐにイオン交換して凝集するものと思われる。 ・流動化剤（遅延剤）を用いることでセメント混合の品質が改善した例がある。これはセメントのカルシウムイオンに膜を作り、凝集を遅らせて混合をスムーズにできた結果と考えられる。 ・普通ポルトランドセメントより高炉スラグセメントを使うと強度が比較的発現する。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
13	④ P59	４．情報提供依頼先 会議で発言したことと同じです．海外工事で，土の特性に困った時には，よく添加剤等を製造する化学メーカーにお尋ねすることがあるそうです．ライオンとか花王とかです．研究所には化学屋が多いので別の視点を与えてくれます．海外の Jet Grout の現場	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		で土が粘りすぎて削れない現象が起こった時に, Grout 材に混和剤を加えたらスムーズに削孔出来たと聞いています．イオンの働きをコントロールすることに長けているのでしょうね. ５．セメント ベトナムのセメントは生成温度が低いために固まりにくい，あるいは固まっても強度が低いと言われています．生成のための脱炭素反応に高い温度と比較的長い時間が必要な CaO や MgO の割合が低いためと考えられます．他国の状況も同じようかもしれません．地盤改良の課題を整理する際にはこちらの側面の記述も必要です.	
14	④ P59	・海外の場合、調整温度が低く、初期の強度が発現しにくい問題がある。 ・混和剤の専門家を有する花王・ライオンなどにヒアリングするとよい。	・指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。 ・混和剤メーカー（花王、ライオンなど）へのヒアリングを適宜実施し、取りまとめの際に反映する。
15	④ P59	資料の文言の修正を以下の通りお願いしたい。 ・日本国内で通常使用している施工機械（撹拌翼）が国内では考えられないような状況に遭遇して、使えなくなった。 →日本国内で通常使用している施工機械（撹拌翼）が国内では考えられないような状況（撹拌翼への絡みつき）に遭遇して、改造を余儀なくされたことがある。 ・施工単価は、日本国内の倍程度以上となる。 →施工単価は、施工方法の変更等により日本国内を上回ることもある。	指摘事項を踏まえ、資料を修正する。
16	④ P62	・特殊土壌の対策は地盤改良だけではなく、調査設計手法の解決方法の一つとして位置づけられるため、取りまとめの際に再度ご検討いただけるとよい。 ・特殊土の試験に特化して整理されているので、一般的な土質試験法の特殊土に対する適用事例・失敗事例なども含めて調査・取りまとめをされるとよい。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
17	④ P62	・一次元膨潤圧試験は、確実に膨張性を評価できる方法であるが、時間を要すること、載荷装置が必要なことから、現地で実用化することには課題がある。 ・自由膨張率試験は、粉末にする必要があり、堆積構造を完全に崩しているため、現地にある膨潤性土とは少し違うことが分かっ	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		ている。スメクタイト系を多く含む土は、懸濁液を作った後に沈殿物が出てこない場合もあり、適用できないケースもある。 ・メチレンブルー吸着量試験は、スメクタイト系の土の場合、含有率と膨張率の相関性が低く、力学的な評価まで繋がっていない問題がある。	
18	④ P62	1）一次元膨潤圧試験は研究、詳細検討の用途では有用であるが実施に時間がかかり、載荷装置も必要になる。 2）メスシリンダーでの自由膨張率試験は再構成試料の一次元膨潤性試験と相応に相関はある。ただし、粉末状の試料を用いて実施するので、堆積構造（固結構造）のある不撹乱試料よりも膨潤性がより顕著に生じる傾向にある。また、膨潤性粘土鉱物を含む土の場合、懸濁液がいつまでも懸濁していて沈殿物の体積を読み取れないことも多い。 3）メチレンブルー吸着試験は簡易で、込み入った装置は必要なく、スメクタイト含有量との相関はあるものの、実際の土の膨潤性とは必ずしも一致しない。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
19	④ P62	1．簡易な見分け方(1) 細粒分含有率や初期含水比, 比重など, 比較的簡単に測れそうなデータがまずあった方が良いでしょう. もちろん, 初期含水比などにも幅があることは理解しますが，幅があることもまず大事な情報ですので. 2．簡易な見分け方(2) 膨潤や分散は物理化学反応なので，化学分析が役に立つかもしれません．菊本先生が仰っていたように，メチレンブルーはあまりよくないかもしれませんが，他の方法もあるようです.	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
20	④ P67	・構造物工の海外展開に関する情報が出てこなかったが事情について説明されたい。	・現時点で構造物工に関するヒアリングに協力した協会・業者はおらず、今後ヒアリングを実施する。
21	④ P67	・日本地すべり学会が海外展開するために委員会を作っており、何年も検討されているため、そちらにヒアリングをされた方が具体的な結果が出てくる可能性がある。	・提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。 ・日本地すべり学会へのヒアリングを適宜実施し、取りまとめの際に反映する。
22	④ 全般	・インドネシアの場合、政府直轄の事業に日本の技術、工法を持ち込もうとすると、その工法に関して国が認めた技術基準が無ければ使えなかったということがあった。ワイビーエムは現地の国交省にあたる機関のコードライターへアプローチして基準整備にあたり、今年の 1 月に基準が承認された。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		・本邦企業が参入しやすいように各国の技術基準整備を支援するのも良い。本邦企業からすれば、施工機械や工法についてなじみのある内容が当該国の基準に盛り込まれることになり、海外進出の後押しになる。 ・セメント系の地盤改良はセメントの種類と品質に左右されるが、国内のセメントを輸出するのは非経済的である。現地のセメントが改良材として使えるか、混和剤を国内から輸出するかが考えられる。現地で日本の混和剤を製造することは花王やライオンが取り組んでおり、太平洋セメントは現地に合弁会社を設立して事業展開しようとしている。	
23	⑤ 全般	・現地調査において、現地で安価に土質試験を実施できる再委託先を分かればご教示いただきたい。	・現地調査にあたっては、現地で安く、簡易に試験ができる場所の有無等も含めて検討・整理し、取りまとめる。
24	⑤ 全般	・特殊土壌の調査方法については本研究事業の対象外か。	・本プロジェクト研究の目的の一つに、特殊土壌対策マニュアル作成することがあり、ODA 無償事業等において遭遇した事例を調査・対策を含め整理・取りまとめることが重要であると認識している。取りまとめにあたっては、特殊土壌の調査方法についても、文献調査、現地ヒアリング、現地簡易試験などを実施することにより、整理・取りまとめる予定である。
25	⑤ 全般	・西アフリカの渡航予定国は発展度合いが低い国が 2 つ、ガーナのようにフランス語圏でない国も入っているが、フランス語圏での技術を調べるのであれば、セネガルかコートジボワールが良いのではないか。	・セネガルやコートジボワールについても状況を整理し、現地渡航対象国の最終化にあたって考慮する。
26	⑤ 全般	・各調査対象国におけるマニュアルの拘束力（参考程度の資料なのか、記載の無い工法は認めない旨記載があるか）について調査頂きたい。拘束力が強いと、日本の技術参入の余地が無い。 ・ジャカルタの公共事業省に JICA 専門家が赴いている（NEXCO から出向） ・バンドンに公共事業省のコードライター部門がある。コンタクトできる人を紹介可能である。（組織改正のため、IRE から他の名称に代わっている）	提供情報を踏まえて、現地渡航計画・現地調査を実施する。

出典：JICA 調査団

6.2 第 2 回意見交換会

(1) 開催スケジュール

表 6.2.1 に示す構成で 2025 年 2 月 20 日に開催した。JICA 本部（麹町）の会議室および Teams 会議によるハイブリッド開催とした。

表 6.2.1 第 2 回意見交換会スケジュール

時間	内容
13:00	委員長挨拶（東京都市大学　末政委員長）
13:05	①第 1 回意見交換会の概要（夏）＋②開発途上国における特殊土壌対策の調査結果（野末・福田）＋質疑応答
13:50	③ハンドブック作成のための整理分析（福田）＋④本邦技術海外展開への助言（宮原）＋質疑応答
14:30	⑤特殊土壌対策ハンドブック（案）について（野末）＋質疑応答＋意見聴取
14:55	閉会の挨拶（JICA 資金協力業務部実施管理第一課　斉藤課長）

出典：JICA 調査団

(2) 委員構成

JICA のコメントや団内の協議の結果選定した委員の構成を下記に示す。

表 6.2.2 意見交換会 委員構成（敬称略・五十音順）

役割	氏名	所属先/職位	専門/特殊土関連研究	参加方法
委員長	末政 直晃	東京都市大学　教授	地盤工学、補強土、地盤改良	対面
委員	石原 雅規	国立研究開発法人　土木研究所 上席研究員	地盤工学、河川堤防強化・補強	対面
委員	伊藤 和也	東京都市大学　教授	地盤工学、補強土、斜面防災	WEB
委員	折原 敬二	基礎地盤コンサルタンツ株式会社 顧問	地盤工学、東南アジアを拠点に各種地盤問題を経験	WEB
委員	菊本 統	国立大学法人　横浜国立大学 教授	地盤工学、崩壊性土、破砕性土	対面
委員	澤村 康生	国立大学法人　京都大学　准教授	地盤工学、SATREPS MNGD メンバー、ブラックコットンソイルの改質に関する研究	対面
委員	野津 光夫	株式会社　不動テトラ　顧問	地盤工学、地盤改良、海外の膨張性粘土に対する深層混合処理工法	対面
委員	林　宏親	寒地土木研究所　上席研究員	地盤工学、北海道泥炭地盤、日本の地盤改良技術をインドネシアへ移転	対面
委員	堀 俊和	国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究部門　農地基盤情報研究領域長	地盤工学、灌漑水路等農業施設の地盤技術アドバイザー等	後日 意見聴取
委員	渡部 要一	国立大学法人　北海道大学　教授	地盤工学、サンゴ礫混じり土の工学的性質	対面

出典：JICA 調査団

(3) 実施状況

調査団が行った①第 1 回意見交換会の概要、②開発途上国における特殊土壌対策の調査結果、③ハンドブック作成のための整理分析、④本邦技術海外展開への助言、⑤特殊土壌対策ハンドブック（案）に対する委員 9 名、JICA 資金協力業務部およびインフラ技術業務部からの参加者のコメントを下記に示す。

表 6.2.3 第 2 回意見交換会 コメント一覧

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
1	② P27	【質問】ラテライトに関して、問題が発生する原因について知見が得られているか？	ラテライトにはばらつきが大きいことが認識されており、使用材料の適切な選定が問題となる可能性がある。ただし、舗装破損区間で不適切材料が使われたかは不明。また、ラテライトの一部に膨潤性が見られる可能性も指摘されているが、現地データが不足しており、詳細な原因は不明であり、今後の研究が必要と考えられる。
2	② 全般	気候や季節などの情報と特殊土とのリンクがあると理解が深まりやすい。	現地調査と併せて文献調査も実施しており、各国の気象条件についても整理を進めている。その結果、対象地域間に一定の関連性が見られると考えている。ラテライトは主に熱帯地域に発達する土壌であり、今回調査した地域も似たような気候条件下にあることが確認された。指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
3	② P39	特殊土の呼び方について、成り立ちから呼ばれている分類と力学的な性質から呼ばれている分類は別である。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
4	④ 全般	本邦技術の紹介について、主要道路と住民による道路補修とでは、カテゴリが異なると思われるため、カテゴリを分けて取りまとめると有益である。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
5	② P39	珊瑚礁を起源とするライムストーン土壌について、今回調査した国では問題が見られなかったとのことだが、アメリカのフロリダ州のサンゴを含む土の事例では、大規模陥没などの問題が発生しているため、危険な地盤であるという認識を持っている。以前フロリダ州の空港滑走路で実施した締固め工事では、基礎地盤にユニークな空洞形状があり大変苦労した。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
6	② 全般	各調査国において、参照されている試験コードを構造物毎に整理されると体系的にまとまって分かりやすい。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
7	④ 全般	取りまとめの際に、海外の事例のみでなく、国内で通常適用している技術の情報なども踏まえて整理されると読み手にとって受け	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		入れやすい。	
8	④ 全般	膨潤性土と崩壊性土については、実務上 ASTM などアメリカの基準を使うことが多いため、この知見もハンドブックに反映させると使い勝手が良い。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
9	⑤ P83	【質問】ラテライトは、良質材として建築・建設材料に多く用いられているという認識だが、Problematic soil という認識で正しいのか？	ラテライトは層によって性質が異なり、特に下層の細粒部が問題となる。試験法が未確立で工学的扱いが難しく、現在は「Problem soil」とされている。
10	⑤ P86	ハンドブックの章立てにおいて、力学的性質から３つ、その他から１つをピックアップしているが、ロジックとして違和感がある。例えば、サンゴ礫混じり土の章で、性質として破砕性に留意する記載があると良い。または、破砕性土という章立ての場合、その中にサンゴ礫混じり土や火山灰質土が入っていると良い。ピックアップする特殊土の位置付け・分類方法を明確にされたい。	当初は力学的性質を念頭に置いた三つの土壌を主な対象としてプロジェクトを開始していた。ご助言のような整理の仕方についても、今後の記述において考慮し、説明を加える方向で検討したいと考えている。
11	⑤ 全般	特殊土に対して、分かっていないことを明記することは良いが、分かっている情報もあるため、この辺りの情報については漏れなく記載する必要がある。	指摘事項を意識した整理・とりまとめを行う。
12	⑤ P97	ハンドブックは地盤技術者以外の土木技術者も参照するため、事例集については、可能な範囲でボリュームを多くしてあげると良い。	指摘事項を踏まえて、ハンドブックの巻末資料に事例集を追加する。
13	⑤ P98	その他の特殊土について、「泥炭」も取り上げて欲しい。実際に「泥炭」も問題になっている。	指摘事項を踏まえて、「泥炭」については、追記する。
14	⑤ 全般	３章の構成に沿って、４章も記載していくと３章との関係も分かりやすくなり、全般的に理解が進むと思われる。	第三章では、全体を俯瞰的に整理して記載する。一方、第四章以降では各論として、膨潤性土の起源や生成プロセス、膨潤性土自体が抱える問題要因などを整理し、掲載することを想定している。指摘事項を踏まえて、３章と４章の関係性がわかるように整理・とりまとめを行う。
15	⑤ 全般	ベトナムの膨張性粘土では圧密強度増加が少ないなど、国によって特殊土の特徴があると思われるのでそのあたりを考慮すると良い。また、旧土質工学ハンドブックには膨張性粘土（モンモリロナイト）の圧密強度増加率が比較的小さいとの記載があるため、参考になる。 特殊土については現在でも土質力学的な研究があまり進んでいないと思う。（意見交換会後に、参考文献をご提供）。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
16	⑤ 全般	３章から読み手の興味に応じた各論の４章へ進むという構成であるため、３章を読み	指摘事項をを踏まえて、整理・とりまとめを行う。

No.	対象 資料頁	コメント	調査団コメント 対応方針
		やすい形で作成することに留意すると良い。	
17	全般	①章立ての方法について再検討されたい。②３章の記載方法を工夫する。③分かっている情報は漏れなく記載する。④事例集を厚くする。⑤設計では、対策工法において載荷重のレベル vs 耐力レベルのため、対策工法のカテゴリを整理する。⑥日本の既存の技術情報も考慮する。	指摘事項をを踏まえて、整理・とりまとめを行う。
18	全般	ハンドブックは、一つのフォーマットにまとめて辞書的に使うと使いやすいが、詳細の事例や検討、対策などの情報にリンクして飛べるような形式がよい。	指摘事項をを踏まえて、追加する。
19	全般	特殊土壌とは少しずれるが、地盤改良の際に、現地のセメントで固まらない場合がある。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
20	全般	「問題を見る時に多角的視点を持つ」と記載されている点は重要である。膨潤性土と分散性土が混在している現場もあり、事前の聞き取り情報で、片方の特殊土を固定化してしまうと、別の特殊土の問題を見落としてしまう可能性がある。地域に応じて、調査・検討のリストやフローチャートがあるとよいと思う。P55 に膨潤制土と分散性土の関連性を扱う項目があるため、そういった点を記載していただきたい	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
21	全般	一般的な判定方法や対策方法の記載は重要であり参考になるが、特殊土の性質（膨潤率の違いなど）によっては、その方法が適用できない場合もある。例外についても記載すべき。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
22	全般	膨潤性土が硬化しないのは、混合がうまくいかないからである可能性が高い。カンボジアのカンダルスタンの膨潤土では、土を乾燥させた上でミキサーで混ぜると固化する（現実的ではないため、固化の対策は断念し、購入土の置き換えを行った）。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
23	全般	同様に、ケニアのブラックコットンソイルで道路やため池の施工に、土壌硬化材（STEIN：株式会社 SPEC 製で現地生産、経産省プロジェクト）を用いた例があるが、①土によって固化のしやすに差がある、②攪拌が重要である、との報告がある。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。
24	全般	特殊土の対策、試験については現地の技術者の協力が欠かせない。現地技術者の人材育成、必要な調査・試験機材等についても記載いただけるとありがたい。	提供情報を踏まえて、整理・とりまとめを行う。

出典：JICA 調査団

6.3 JICA 内部説明会

本案件の最終成果報告及び特殊土壌ハンドブックの活用に向けた説明会を、2025 年 5 月 20 日に表 6.3.1 に示す構成で開催した。説明会は、JICA 本部（麹町）の会議室および Teams 会議によるハイブリッド形式で実施した。調査団は説明会資料の準備ならびに当日の説明（ハンドブックの概要、活用方法、質の高いインフラ輸出について）を担当した。

参加部署：JICA 資金協力業務部・社会基盤部・インフラ技術部・経済開発部・地球環境部他

表 6.3.1 JICA 内部説明会スケジュール

時間	内容
15:00	開会の挨拶（JICA 資金協力業務部実施管理第一課 田中課長）＋出席者の紹介
15:05	ハンドブックの概要
15:10	ハンドブックの活用方法（膨張性土・分散性土・崩壊性土・ラテライトの事例）
15:40	質の高いインフラ輸出について
15:45	質疑応答
16:00	閉会

出典：JICA 調査団

第7章 特殊土対策ハンドブックの作成

第 7 章では、JICA の無償資金協力事業や円借款等における建設工事の特殊土に対するリスク低減や品質確保を目的として、建設工事で特殊土に遭遇する可能性のある開発途上国の特殊土対策に係るハンドブックを作成した。

特殊土対策ハンドブック（以降、ハンドブック）の読み手としては、JICA 無償資金協力事業や円借款等に従事する建設コンサルタント、施工業者、JICA 職員、開発途上国のカウンターパートの他、開発途上国でインフラ整備事業・建築事業に従事する日本の建設コンサルタント技術者や施工業者を想定している。

ハンドブックには、特殊土のリスクマネジメントに係る基本的な考え方や特殊土の基礎知識の他、世界に広く分布している「膨潤性土」、「分散性土」、「崩壊性土」、「ラテライト」については、計画調査段階、設計施工段階、および維持管理段階における対応方法や特殊土対策に係る概要を可能な範囲で網羅的に取りまとめた。また、注意喚起を目的として、上記特殊土以外の特殊土の概要についても取りまとめた。ハンドブックの巻末資料には、特殊土の中でも特に分布域が広い膨潤性土の土質特性による判定方法、化学的指標による膨潤性土・分散性土の判定、各種の試験に関する日米英の試験基準、特殊土に関する Q&A、特殊土に関する事例集、記号一覧、略語一覧、参考文献を取りまとめた。

これらの情報は文献調査結果や当該プロジェクト研究内で実施した開発途上国の現地調査結果に基づいている。ハンドブックは、事業推進者やエンジニアが特殊土に対峙した時の問題解決の糸口や情報を提供する位置付けで作成されたものであり、指針や技術基準ではないことに留意されたい。したがって、最終的な問題解決のための判断は事業推進者やエンジニアが実施することになる。

第8章 特殊土対策

本章では、文献調査結果や開発途上国における現地調査結果をもとに、各特殊土についての特徴、起源、生成プロセス、分布域、判定方法、工学的問題点、対策方法（知見が少ない一部の特殊土を除く）等について取りまとめた。

8.1 膨潤性土

8.1.1 特徴

膨潤性土は、工学的に代表的な特殊土（問題を引き起こす土）の一つであり、特徴的な膨潤性を有する。雨期に水分を吸収すると膨張し、逆に水分を失うと収縮し、大きなクラックを発生する。通常の粘性土もこの特性を有しているが、それらと比べて膨潤挙動の影響が大きいため、種々の問題を引き起こす。膨潤と収縮の挙動を示す多くの土質には水を吸収するスメクタイトなどの膨張粘土鉱物が含まれている。土に含まれるこの粘土鉱物が多いほど、膨潤の可能性が高くなり、より多くの水を吸収する。その結果、膨潤性土は濡れると体積が増加し、乾燥すると収縮する。吸収する水が多ければ多いほど、体積は増える。膨潤性が高い粘土では 10%以上の膨潤は珍しくない。図 8.1.1 に季節変動によるスメクタイトの膨潤と収縮の模式図を示す。

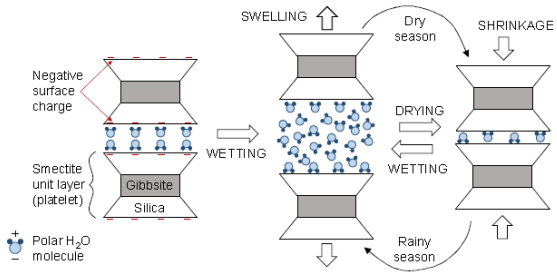
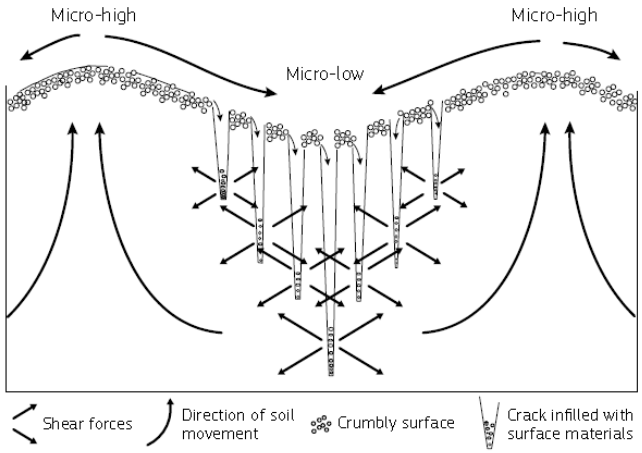


Fig. 1. Microstructural swelling and shrinkage of smectites (after [10]).

出典: Drying and wetting soil–water retention behaviour of a highly expansive clay under varying initial density, Ruan A. Murison, SW Jacobsz, Tiago A.V. Gaspar, Talia S. da Silva Burke, Ashraf S. Osman, 2023

図 8.1.1 季節変動によるスメクタイトの膨潤と収縮の模式図

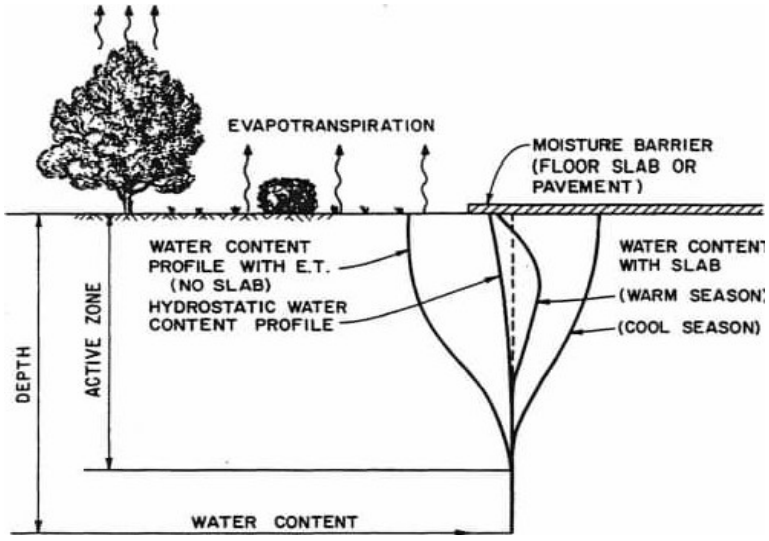
膨潤と収縮は完全に可逆的なプロセスにならない。乾期の収縮の過程で亀裂が発生し、雨期の降雨時にはそのひび割れに上部の膨潤性の土と水分を多く取り込み、亀裂底部で膨潤圧が発生し、その圧力によりせん断が生じ土の攪乱が生じる。次の乾期に更に深い亀裂となり、降雨に取り込んだ膨潤性土が深いところで膨れ、せん断が発達する。このように土に亀裂が発生すると、亀裂は元に戻ることができなくなり、膨潤圧力が増加する。このように膨潤性土は乾期と雨期を有する乾燥地域や半乾燥地域に発達して広く分布する。図 8.1.2 に膨潤性土のクラックの発達の模式図を示す。



出典: EUR 27236 EN – Global Soil Biodiversity Atlas, Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I. et al., 201

図 8.1.2 膨潤性土のクラックの発達

膨潤性土の厚さは最大 20m の深さまでなることがあるが、膨潤土が問題となるのは雨期や乾期で含水比が変化する深さである。一般には地下水が深ければ、含水比の変化する深さ（Active zone）は 3m 程度である。気候条件により、それより深くなることもある。また、地下水の位置が浅いと膨潤挙動を示す深さは浅くなる。図 8.1.3 に膨潤性土による含水比が変動する範囲を示す。逆に含水比の変化が少ない所では膨潤・収縮に伴う問題は発生しない。もし、膨潤性土が地下水以下にある場合には膨潤挙動は生じない。このため、膨潤性土の対策方法の一つとして遮水シートなどで膨潤性土を被覆して、含水状態の変動が少なくする方法が用いられる。



出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Mille, JOHN WILEY & SONS, INC., 1992

図 8.1.3 含水比が変動する範囲(Active zone)

8.1.2 膨潤と収縮に影響する要因

膨潤性粘土の膨張のメカニズムは複雑で、多くの要因に影響される。膨張は内部の応力平衡を乱す土の水分の変化により生じる。

水の量や化学組成の変化によって土の水質が変化すると、粒子間力場が変化する。その結果生じる内部力の変化が、外部から加えられる応力状態の対応する変化と釣り合わなければ、粒子間隔は、平衡に達するまで粒子間力を調整するように変化する。図 8.1.4 には膨潤性粘土粒子間にあった交換性 Na+が Ca^{2+}に変化した時のイメージを示すが、電価の大きいイオンに交換すると粒子間の距離が小さくなり、この粒子間隔の変化は収縮や膨潤として現れる。これは膨潤性土の石灰処理により膨潤特性が小さくなる原理となっている。

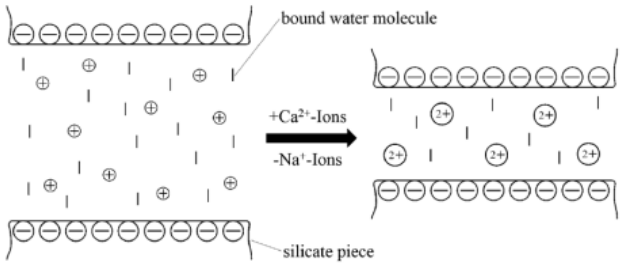


Figure 6. Ion exchange of monovalent sodium ions against bivalent calcium ions in bentonite (modified from Egloffstein, 2001) [59].

出典: State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners, De-Jun Kong, Huai-Na Wu, Jin-Chun Chai, Arul Arulrajah, 2017

図 8.1.4 Na+と Ca2+のイオン交換による収縮と特性変化

膨潤のメカニズムに影響を与える要因の多くは、可塑性や密度などの土質特性に影響を与えるか、または影響を受ける。収縮・膨潤挙動に影響する土質特性および環境因子を表 8.1.1 と表 8.1.2 にそれぞれ示す。

表 8.1.1 収縮･膨張ポテンシャルに影響する土質特性

因子	説明	参考文献
粘土鉱物学	一般的に土の体積変化を引き起こす粘土鉱物は、モンモリロナイト、バーミキュライト、およびいくつかの混合層鉱物である。イライトやカオリナイトが膨張性を示すことは稀であるが、粒子径が非常に細かい（数十分の一ミクロン以下）場合に体積変化を引き起こすことがある。	Grim (1968); Mitchell (1973,1976); Snethen et al. (1977)
土の水化学	膨潤は、陽イオン濃度の上昇と陽イオンの価数の上昇によって抑制される。例えば、土水中の 2 価の Mg2+陽イオンは、Na+陽イオンよりも膨潤が小さくなる。	Mitchell (1976)
土の吸引	土吸引力は独立した有効応力変数であり、不飽和土の負の間隙水圧で表される。土の吸引力は、飽和度、重力、間隙の大きさと形状、表面張力、土粒子と水の電気的･化学的特性に関連している。	Snethen (1980); Fredlund and Morgenstern (1977); Johnson (1973); Olsen and Langfelder (1965); Aitchison et al. (1965)

因子	説明	参考文献
塑性	一般に、含水比の広い範囲で塑性挙動を示し、液性限界の高い土は、膨潤や収縮の可能性が大きい。塑性は膨潤ポテンシャルの指標である。	
土構造と土組織	凝集粘土は分散粘土よりも膨張性が高い傾向がある。セメント粒子は膨潤を抑える。土組織と土構造は、高い含水比での締め固めや再成形によって変化する。混練締固めは、低含水率で静的に締固めた土よりも膨張性の低い分散構造を作ることが示されている。	Johnson and Snethen (1978)；Seed 他 (1962a)
乾燥密度	密度が高いほど粒子の間隔が狭いことを意味し、これは粒子間の反発力が大きく、膨潤ポテンシャルが大きいことを意味する。	Chen (1973) Komomik, David (1969); Uppal (1965)

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Mille, JOHN WILEY & SONS, INC.（1992）

表 8.1.2 収縮・膨潤の可能性に影響する環境条件［John D. Nelson D. J., 1992］

因子	説明	参考文献
1.初期水分条件	乾燥した膨張性の土は、含水率が高く吸引力が低い同じ土よりも、水に対する親和性、すなわち吸引力が高くなる。逆に，湿潤な土は，乾燥の影響に曝される と，比較的乾燥した初期の土よりも容易に水を吸収し，より収縮する。初期の土の吸引力は，予想される最終的な吸引力の状況の範囲と併せて考慮する必要がある。	
2.水分の変動	プロフィールの上部付近のアクティブゾーンにおける水分の変化は、主に膨潤を決定する。水分と体積の変化が最も大きくなるのはこれらの層である。	Johnson (1969)
2.1 気候	降水量と蒸発散の量と変動は、水分の利用可能性と季節的な水分変動の深さに大きく影響する。季節変動が最も大きいのは、顕著で短い湿潤期間がある半乾燥気候である。	Holland and Lawrence (1980)
2.2 地下水	浅い水位は水分の供給源となり、変動する水位は水分の原因となる。	
2.3 排水と人工水源	勾配が不十分な家屋の基礎の周囲に溜まった水など、地表の排水機能は、地表に水源を提供する。	Krazynsk (1980); Donaldson (1965)
2.4 植生	樹木、低木、草は蒸散によって土から水分を奪い、植生が異なる場所では土の湿潤度が異なる。	Buckley（1974）
2.5 透水性	透水性の高い土、特に畑の土塊の亀裂やひび割れによって、水の移動が速くなり、膨潤速度が速くなる。	Wise and Hudson (1971); De Bruijn (1965)
2.6 温度	気温の上昇により、水分が舗装や建物の下の低温の場所に拡散する。	Johnson and Stroman (1976); Hamilton (1969)
3.ストレス条件		
3.1 ストレス歴	過圧密土は、同じ空隙比の土よりも膨張性が高いが、通常は圧密されている。圧縮された粘土の膨潤圧は経年変化により増大する可能性があるが、軽荷重下での膨潤量は経年変化の影響を受けないことが示されている。実験室のサンプルでは、湿潤と乾燥が繰り返されると膨潤が減少する傾向があるが、湿潤と乾燥のサイクルを一定回数繰り返すと、膨潤は影響を受けなくなる。	Mitchell (1976); Kassiff and Balcer (1971)
3.2 現場条件	土に荷重をかけたり、土中の水分環境を変化させたりした場合の結果を評価するためには、土の初期応力状態を推定する必要がある。初期有効応力は、実験室でのサンプリングや試験、あるいは現場での測定	

因子	説明	参考文献
	や観察によっておおまかに決定することができる。	
3.3 載荷重	載荷重の大きさは、与えられた含水率と密度に対して生じる体積変化の量を決定する。外部から加えられる荷重は、粒子間の反発力のバランスをとり、膨潤を減少させる。	Holtz (1959)
3.4 土プロファイル	地層中の膨潤性の可能性のある層の厚さと位置は、潜在的な移動にかなり影響する。最も大きな移動が生じるのは、膨張性の粘土が地表から活動帯の下の深さまで広がっている地形である。膨張性の土が非膨張性の物質と重なっているか、または浅い深さで岩盤の上にある場合は、移動は少ない。	Holland and Lawrence (1980)

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Mille, JOHN WILEY & SONS, INC.（1992）

8.1.3 膨潤性土の起源、母材

膨潤土は沖積堆積物、崩積堆積物、湖沼堆積物、泥灰岩、その他の石灰質岩、塩基性の火成岩、変成岩、火山岩など様々な母材から発生する。母材のすべて地質学的起源は様々であるが、長石や鉄マグネシウム鉱物に富み、風化により粘土残留物が生じ、塩基性の環境で発達する。母材が塩基性でない場合は、浸透や洪水によってアルカリ土類元素が加えられることがある。

熱帯（アフリカ）の黒色粘土のほとんどは、玄武岩などの塩基性岩石の風化によって残留形成されたものである。インドの黒綿土 Black cotton soil（BCS）は多くの研究者が述べているが、主にデカン玄武岩系列の塩基性火山岩の上に形成されるとしている。しかし、インドでは BCS は酸性の岩石からは生成されないとされている。インドネシアの膨潤性土はクリーム色から明灰色を呈しており BCS と違っている。BCS の母材が火山岩の玄武岩に対して、インドネシアの母材が堆積岩の粘土岩 Clay stone、粘土頁岩 Clay shale と違うためと考えられる。

アフリカの BCS の母材、由来をとりまとめると表 8.1.3 の通りである。多くは玄武岩を由来とし、次に塩基性岩となっている。地溝帯周辺由来のものがあるのが一つの特徴である。また、湖沼、沖積土に由来するものがある。そのほかに石灰岩、変成岩（片岩と片麻岩）、頁岩に由来するものがある。その他の地域における膨潤性土の母材、由来を表 8.1.4～表 8.1.6 に示す。

膨潤性土の母材は大分すると火山岩の玄武岩、堆積岩の粘土岩、粘土頁岩、変成岩の片岩、片麻岩と火山灰系に分けられる。それらの風化物が河川等で運ばれ沖積堆積物、湖沼堆積物が膨潤性土になると考えられる。なお、酸性土壌では膨潤性土は発達しないものと考えられている。

表 8.1.3 アフリカの BCS の母材、由来

地域	地域	母材、由来等
西アフリカ（ベナン、ガーナ、コートジボワール、ナイジェリア、セネガル、トーゴ、ブルキナファソ）	ガーナ、トーゴ、ベナン	先カンブリア時代の変成岩（片岩と片麻岩）
	コートジボワールとボルタ上流	富栄養化した褐色土（問題なし）
	セネガルのベルデ岬半島	黒色粘土がわずかに産出。小さな塩基性貫入体の上に残留
	ナイジェリア	残留鉱床と沖積鉱床、北東部のビウとメリンガ周辺では第三紀以前の火山体、玄武岩流の侵食残骸が点在、ニジェール川との合流点より上のベヌエ川流域では黒い沖積土、チャド盆地内では湖成堆積物と沖積堆積、北東部のバウチイ-ゴンベ・ヨラ間の道路では石灰質岩に由来
東アフリカ	エチオピア	地溝帯の地形、火山岩
	ケニア	火山岩、熱帯は塩基性火山岩
	マラウィ、ザンビア	地溝帯の地形
	タンザニア	地溝帯の地形、熱帯は塩基性火山岩
	ウガンダ	熱帯は塩基性火山岩に由来、低地は、地溝帯の湖と関連
	スーダン	地溝帯の地形、火山岩、白ナイルと青ナイルの氾濫原（湖成土か沖積）
	ソマリア	高原玄武岩
中央アフリカ（ナイジェリア北東部、カメルーン北部、チャド南部の大部分を占めるチャド盆地）	ナイジェリア北東部、カメルーン北部、チャド南部	湖沼か沖積土
	カメルーン北部とナイジェリア北東部	塩基性貫入岩
	コンゴ地溝帯周辺	
	アンゴラ	南部では塩基性岩
	ルアンダ	石灰質岩
南部アフリカ	南アフリカとローデシア	塩基性の貫入岩または噴出岩に由来 ノライト（斑れい岩）、玄武岩、ドレライト
	ボツワナ	沖積堆積物や沼沢地、塩基性岩
	レソト、スワジランド	玄武岩
	ローデシア	Karroo 火山
	マラガサイ	玄武岩、沖積堆積物
北アフリカ	モロッコ	頁岩などの細粒堆積岩に由来、沖積土

出典：JICA 調査団

表 8.1.4 アジアの膨潤性土の母材、由来

国名	地域	母材、由来等
インド	デカン高原	デカントラップの玄武岩、片麻岩
	グジャラート州	
	西部ラージャスターン州	
インドネシア	ジャワ島中部・東部	粘土岩 Clay stone、粘土質頁岩 Clay shale、頁岩 Shale、 火山灰 Volcanic ash
	スラウェシ島	古い火山活動

国名	地域	母材、由来等
中国	四川盆地	泥岩、頁岩
	華南地域	熱帯・亜熱帯気候下での風化過程により形成。火山灰や火山岩（特に安山岩や玄武岩）
	黄河流域	黄土高原
	新疆ウイグル自治区	乾燥地域の堆積岩、塩湖堆積物
パキスタン	インダス川流域やパンジャブ地方	河川堆積物や火山起源
オマーン	オマーン山脈の麓とドゥクム周辺地域	ベントナイト泥岩、泥灰岩とシルト質泥岩、粘土質ドロマイト石灰岩、変質礫岩
イラン、イラク、トルコ	中央高原地帯やカスピ海沿岸	塩湖や乾燥地帯の堆積物
オーストラリア		玄武岩

出典：JICA 調査団

表 8.1.5　アメリカ大陸の膨潤性土の母材、由来

国名	地域	母材、由来等
米国	テキサス州、オクラホマ州、コロラド州、カリフォルニア州、ユタ州、アリゾナ州、ミズーリ州、カンザス州	火山灰堆積物、頁岩
カナダ	アルバータ州、サスカチュワン州、マニトバ州	河川や氷河堆積物、粘土頁岩（Clay shale）
メキシコ	メキシコ中部高原、バハ・カリフォルニア州、北部の乾燥地帯。	火山性堆積物、乾燥地域堆積物。
ブラジル	セントラル高原（Cerrado）、ミナスジェライス州	山岩や堆積岩
アルゼンチン	パンパ地域やパタゴニア	河川堆積物や乾燥地帯堆積物
ボリビア	アルティプラーノ高原	塩湖堆積物や乾燥地域粘土鉱物
コロンビア	アンデス山脈の谷間や熱帯湿潤地域	火山灰由来

出典：JICA 調査団

表 8.1.6 ヨーロッパの膨潤性土の母材、由来

国名	地域	母材、由来等
フランス、イタリア、スペイン、イギリス、ドイツ、ハンガリー、ポーランド、ルーマニア		火山灰、堆積岩（泥岩）、河川堆積物、塩湖堆積物 スウェーデン：氷河堆積物

出典：JICA 調査団

8.1.4 粘土鉱物

粘土鉱物は母材となる岩石に由来して形成されるが、膨潤土は形成される粘土鉱物により膨潤特性が支配される。粘土粒子は非常に小さく、その形状は、それらが形成する薄い結晶格子層の配置と、粘土鉱物構造に組み込まれる可能性のある他の多くの元素（水素、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム、硫黄）によって決まる。これらの溶存イオンの存在と存在量は、粘土鉱物の挙動に大きな影響を与える可能性がある。膨潤性土では、これらの粘土結晶シート（板）の分子構造と配置は、強く結合した「サンドイッチ」の結晶層の間に水分子を引き付けて保持する特定の親和性を持っている。水分子の電気双極子構造のため、それらは微細な粘土シートに電気化学的引力を持つ。これらの分子が互いに結合するメカニズムは吸着と呼ばれる。層状粘土鉱物は大分して、カオリン鉱物（カオリナイト）、雲母粘土鉱物（イライト）、スメクタイト系粘土鉱物、混合層鉱物と 4 種類で、そのうちカオリン鉱物（カオリナイト）、雲母粘土鉱物（イライト）、スメクタイト系粘土鉱物の特徴は表 8.1.7 のようにまとめられる。

表 8.1.7 層状粘土鉱物の特徴

特徴	カオリン鉱物	雲母粘土鉱物	スメクタイト系粘土鉱物
代表的鉱物	カオリナイト	イライト	モンモリロナイト
層状構造	1:1 型	2:1 型	2:1 型
基底間隔(A)	14.4	10	9.6
粒子の厚さ（μm）	0.1~0.2	0.003~10	0.001~10
形状	厚く、剛、六角形	薄い、積み重なった板	薄い、フィルム状
層間境界	強固な水素結合	比較的強いカリウム結合	非常に弱いファンデールワール結合
比表面積(m2/g)	10~20	65~100	700~840
収縮限界 SL(%)	25~29	15~17	8.5~15
液性限界 LL(%)	30~100	60~120	100~900
塑性限界 PL(%)	20~40	35~60	50~100
活性度 Ac	0.38	0.9	7.2
主な特徴	白色で柔らかい、化学的に安定、酸や塩基に対して耐性	層状結晶で光沢がある、化学的に安定で耐候性が高い	面積が非常に大きい、水や有機物をよく吸収し、ゲル状になる
膨潤性	低い	中程度	非常に高い
吸着性	低い	中程度	非常に高い
風化のしやすさ	風化しにくい(安定)	風化中程度	風化しやすい
風化の特徴	層間に水が入りにくく、化学変化を受けにくい。主に酸性環境で生成・安定(例:熱帯地域の強風化土)。	層間に K^+が固定されており、膨潤しにくいため風化しにくい。風化が進むと、イライト→スメクタイトやカオリン化する。	風化によって層間イオンが交換され、より安定したカオリン鉱物や酸化鉄鉱物に変化する。アルカリ性環境では安定しやすいが、酸性環境では分解されやすい。
主な用途	陶器、紙、化粧品	塗料、化粧品	環境保全、医薬品

吸着性: 他の物質(イオン、有機分子、金属イオンなど)を表面や層間に取り込む性質

出典:JICA 調査団

粘土鉱物の自由膨張率は表 8.1.8 に示すように Na^+モンモリロナイトと Na^+ヘクトライトが他の粘土鉱物よりも極めて大きく、同じモンモリロナイトの Ca^+モンモリロナイトの自由膨張率は Na^+モンモリロナイトより一桁小さくなる。Na^+が多いほど膨潤性が高くなるが、Ca^{2+}や Mg^{2+}が多くなると結合力が大きくなり、膨潤性は低くなる。XRD でモンモリロナイトが確認されても、モンモリロナイトの存在だけで膨潤性土と評価できない。Na^+がモンモリロナイトの層間に多くなると分散性が大きくなり、先に分散性土になるが、同時に膨潤性も高くなり、Na+が更に増えると膨潤性土になる。膨潤性土と分散性土は色々な影響に変化するので、一つの指標だけで判定できないので留意が必要である。酸性では膨潤性も分散性も押さえられる。pH の違いにより膨潤性と分散性の現れ方が表 8.1.9 のように変化する。ただし、イライトは膨潤性を示すが大きくなく、カオリナイトは膨潤性をほとんど示さない。

表 8.1.8 粘土鉱物の自由膨潤量

粘土鉱物	自由膨潤量(%)
Ca^+モンモリロナイト	45～145
Na^+モンモリロナイト	1,400～1,600
Na^+ヘクトライト	1,600～2,000
バーミキュライト	100～300
イライト	15～120
カオリナイト	5～60
ハロサイト	70
クロライト	0～5

出典：JICA 調査団

表 8.1.9 アルカリ度（pH）による膨潤性土と分散性土の挙動

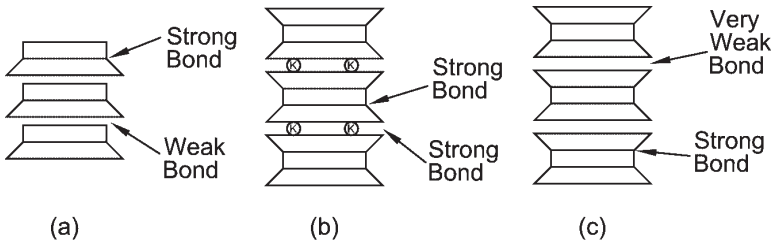
pH	特性	膨潤性土	分散性土
<5	酸性	膨潤性が低下し、粘土粒子が凝集しやすい	分散しにくくなる
6～7	弱酸性～中性	膨潤が始まるが、最大にはならない	分散がやや抑制される
7～9	中性～弱アルカリ性	**膨潤性が最大**	分散しやすくなる
9～10	アルカリ性	Na^+型モンモリロナイトは膨潤し続ける	**分散性が最大**
>10	強アルカリ性	Ca^{2+}型モンモリロナイトは膨潤性が減少する	非常に分散しやすい

出典：JICA 調査団

スメクタイト系の一部である粘土鉱物モンモリロナイトは、粘土シート間の非常に大量の水分子を吸着できるため、大きな収縮（膨潤）の可能性がある。モンモリロナイトの代表的な材料はベントナイトである。膨潤性土が飽和状態になると粘土層間でより多くの水分子が吸収され、土の体積が増加または膨潤し、粘土間の結合が弱まり、土の強度が低下する。一方、蒸発や重力によって水分が除去されると、粘土板の間の水分が放出され、土の全体的な体積が減少または収縮し、空隙や乾燥亀裂などが発生する。

膨潤性土は粘土分の割合により特定される。粘土粒子のサイズは 2μm 未満であると考えられているが（日本 JIS では 5μm 以下）、粘土とシルトの違いは起源と粒子の形状に関係している。シルト粒子（一般に石英粒子を含む）は侵食による生成物だが、粘土粒子は化学風化の生成物であり、シートの構造と構造によって特徴付けられる。このため、粘土分はシルト分より化学的な性質を有しているため、膨潤性を示す可能性が高くなる。

表 8.1.10 に示すように、国毎に膨潤性土の粘土鉱物の割合は異なり、それにより膨潤性特性に違いが生じる。これは膨潤性の母材と同様に国毎に膨潤性土の特性が異なり、粒度やアッターベルグ限界などの粘性土の物理特性だけで膨潤性土を特定できない一因となっている。



出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons (2015)

図 8.1.5 粘土鉱物の概念図

表 8.1.10 膨潤土の主要な粘土鉱物

国名	粘土鉱物
カンボジア	主にモンモリロナイトとイライト、次いでカオリナイト、石英、塩酸塩
日本	モンモリロナイト、絹雲母、塩化物、混合層鉱物など
中国	モンモリロナイト 10~15%、石英 35~45%、長石 10~15%、カオリナイト/緑泥石 5~15%、雲母 5~15、方解石、沸石
インド	モンモリロナイト 10%-80%、イライト 10%-75%、ビーライト 2%-15%
イスラエル	モンモリロナイト 40%～80%、カオリナイト 2%～10%、石英 10%～20%、長石 5%
ガーナ（アクラ）	カオリナイト 63%、石英 33%、ハイドロマイカ 4%、マイクロバッチ酸化鉄
ルーマニア	モンモリロナイト 40~80%、イライト 20~60%
ロシア	イライトとモンモリロナイトを主とし、カオリナイトやその他の鉱物を含む
米国	モンモリロナイト、最大 45~90%
カナダ（西洋）	モンモリロナイトを主とし、イライトを含む
オーストラリア	イライトを主成分とし、モンモリロナイトを含む

出典：JICA 調査団（引用元:新建時速 200 公里鉄路 改良膨張土路基施工技术，李庆鸿，王炳龙，俞峰.编著，李庆鸿主编，2007）

8.1.5 膨潤性土の生成プロセス

膨潤性土の代表的な土壌分類のひとつである Vertisols で議論されている最も一般的な土壌形成プロセスは、①ひび割れと膨張、②セルフマルチング Self-mulching、③土壌攪拌 Churning、④スリッケンサイド slickenside、スフェノイド sphenoid およびボウル構造の形成、⑤カンカル Kankar 形成、⑥暗色化 dark coloration、⑦スメクタイト粘土の形成、⑧粘土の移動 clay translocation である。表 8.1.11 に膨潤性土の一般的な土壌形成プロセスとその説明を取りまとめる。

表 8.1.11 膨潤性土（Vertisols）の一般的な土壌形成プロセス

土壌形成プロセス	説明
ひび割れと膨張	乾期と雨期の繰返しにより、多角形の深く広いひび割れが発生
セルフマルチング	亀裂や膨張の繰返しにより、表層土が自然に細かい粒状や塊状（クラム）に分解され、土壌表面が緩やかに覆われること
土壌撹拌	セルフマルチングとの組み合わせで発生し、土壌上部にある土壌物質を均質化する機械的プロセス
スリッケンサイド、スフェノイドおよびボウル構造の形成	湿潤時の亀裂部のせん断により発生する滑らかな表面（スリッケンサイド（図 8.1.6）、スフェノイド）。塑性状態の場合に発生
カンカル形成	Vertisols に見られる石灰の団塊
暗色化	窪地や雨期の一部で水浸し状態になる環境で、有機物の吸着により発生
スメクタイト粘土の形成	土壌に十分な Ca2+と Mg2+があり pH が高い場合、スメクタイトが形成
粘土の移動	比表面積が大きい細粒のスメクタイト粘土は、Vertisols の地下層で分散、移動、蓄積

出典：JICA 調査団



出典: https://www.uidaho.edu/cals/soil-orders/vertisols

図 8.1.6 スリッケンサイド

8.1.6 膨潤性土の地域名

膨潤性土はインドで黒綿土（Black cotton soil, Regur）と呼ばれるように色々な名称で呼ばれる。そのような名称は Margallitic soil （インドネシア）、 Chernozem（中央アフリカ）、Badob soil（スーダン）、Vlei soil（南アフリカ）、Tir（北アフリカ）、Barros（ポルトガル）、Smonitza/Smolnitza （バルカン）、Black soils（オーストラリア）、Grumsol（米国）などがある。

8.1.7 膨潤性土の分布域

膨潤性土は世界中に広く分布している。特に乾燥地域や半乾燥地域、また長期間の干ばつ（乾期）の後に湿潤状態（雨期）が発生する地域など、世界中の多くの地域で見られる。その分布は地質（母材）、気候、水文学、地形、植生によって異なる。多くの地域では蒸発率が年間降雨量よりも高いため、通常土の水分が不足している。その結果、雨が降ると地面が膨らみ、隆起が発生する可能性が高くなる。半乾燥地域では、短期間の降雨の後に長い乾燥期間（干ばつ）が続くパターンが発生し、季節的な膨張と収縮のサイクルが生じることがある。

膨潤土が分布する国は米国（テキサス州、カリフォルニア州）、インド（デカン高原、ブラックコットンソイル）、オーストラリア、アフリカ（ナイジェリア央部および北部地域、スーダンナイル川流域、東アフリカ）、南アメリカ（ベネズエラオリノコ川流域）、中国（四川盆地、黄土高原の一部地域）、ヨーロッパ（フランス）などがある。膨潤性土の地域毎の分布はファイナルレポートの巻末資料を参照されたい。膨潤性土の世界的な分布図を図 8.1.7 に示す。

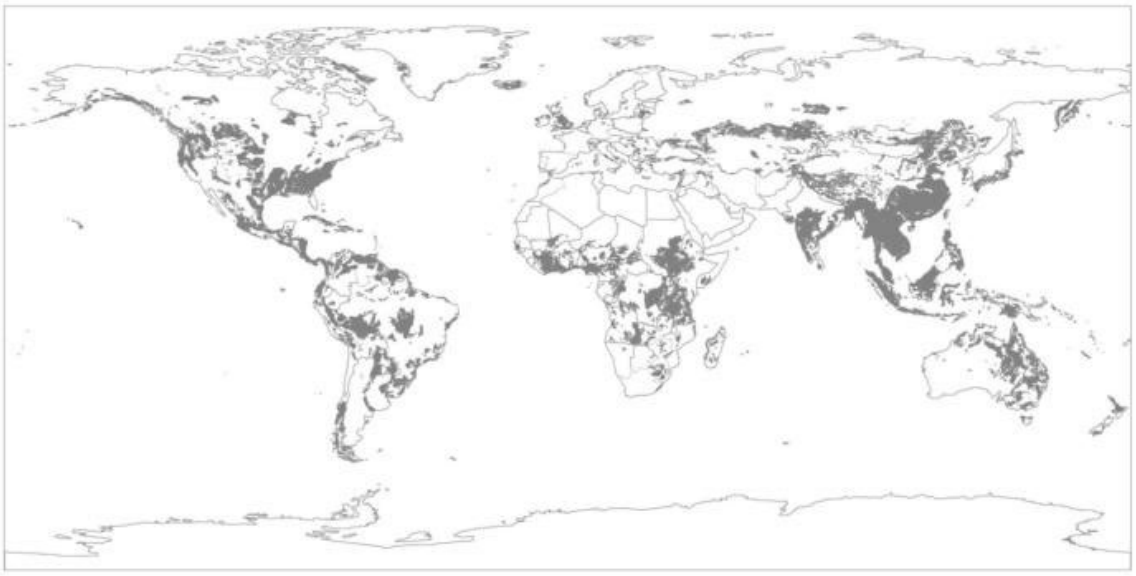
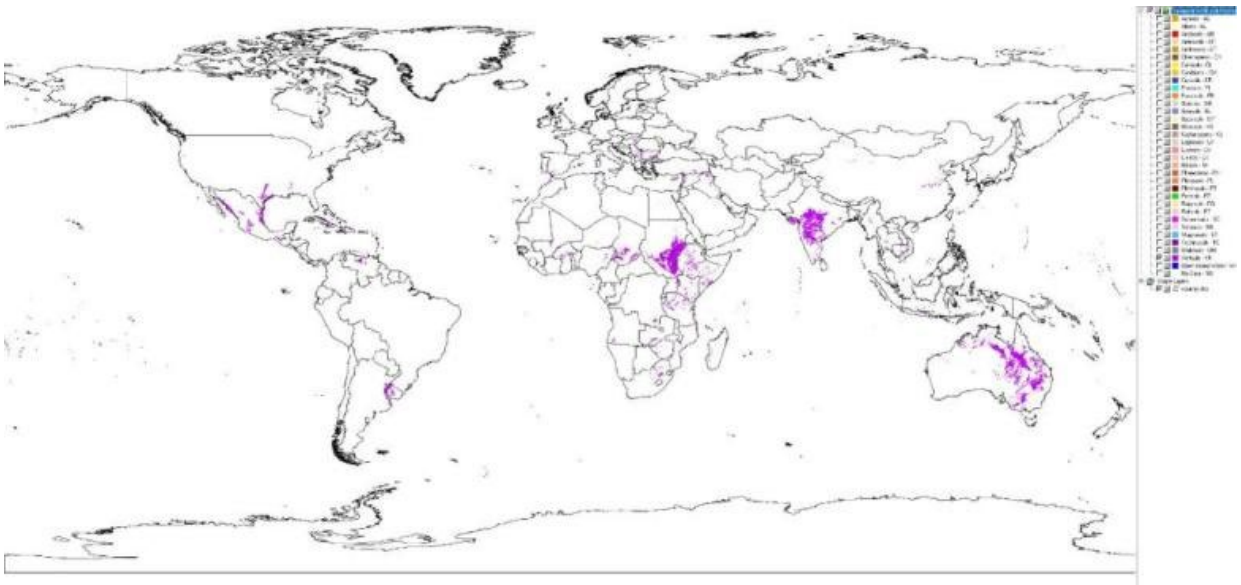


Figure 1 – Global distribution of shrink–swell soil where major construction costs occur (by region)

出典：Swelling and shrinking soils, Jones, Lee; Banks, Vanessa; Jefferson, Ian. 2020

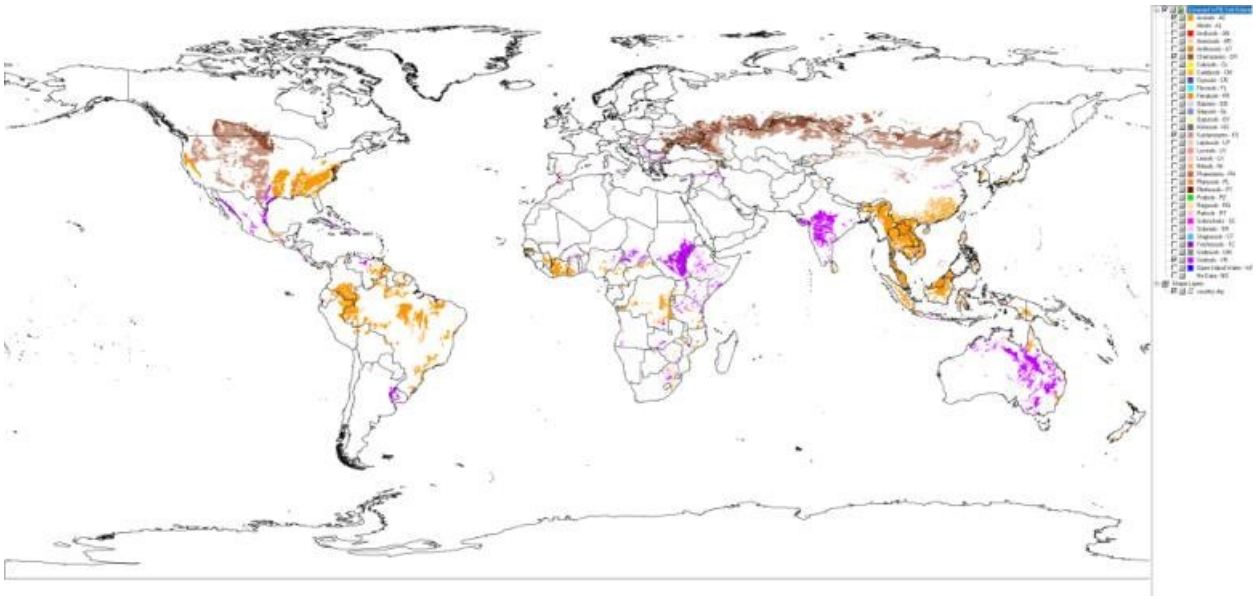
図 8.1.7 膨潤性土の世界的分布図

HWSD で黒綿土として分類されるのは Vertisols である。その分布図は図 8.1.8 となる。Vertisols 以外に膨潤性土になる可能性のある土壌は Acrisols、Chenmnozems、Kastanozems があり、それらを含めた膨潤性土としての可能性のある分布図は図 8.1.9 の通りで、これらは極めて似ている。



出典：HWSD Ver.2.0

図 8.1.8 Vertisols の世界的分布図（HWSD）



出典：HWSD Ver.2.0

図 8.1.9 膨潤性土の可能性のある土壌
（Acrisols, Chenmnozems, Kastanozems, Vertisols）の世界的分布図（HWSD）

8.1.8 膨潤性土の判定方法

膨潤性土を正しく判定する方法は、力学的に膨潤量を測定する試験、膨潤圧を測定する試験となる。しかし、実際には調査地点で全ての土に対して力学試験を実施することはサンプリングの量、試験費、試験時間等の関係で困難となる。

現場踏査段階では現場で簡易に判定する手法、広範囲の地質調査が行われる予備調査段階では、室内土質試験の物理特性から判定する方法が望まれ、その中で膨潤性が疑われる土に対しては、力学特性から判定することが望ましい。

8.1.8.1 現場踏査段階の判定方法

膨潤性土は乾期には亀甲状のクラックが大きく発達する（図 8.1.10）。クラックの深さは数 10cm に及ぶ。また、地形的にはギルガイと呼ばれる地表の形状を有する（図 8.1.11）。ギルガイ地形は、石灰質土の膨張と収縮によって形成された地形で、円形の径 1m の丘と 1.5m の窪みでできており、オーストラリア起源の語である。ギルガイは全ての膨潤性土に出来るとは限らないし、ギルガイが形成されない膨潤性土もある。

現場踏査段階では建設地点の近場で土取場等、直接土を観察できる地点を探し、土を観察することがポイントとなる。膨潤性土は深くても 3m 位しかないので、観察が出来ない場合は、オーガーボーリングで試料採取して観察するのも良いし、小さなテストピットを掘って試料観察することが良い。土層断面を観察できるときはひび割れ以外に、スリッケンサイド、スフェノイド等の特徴のある構造

があるかで膨潤性土か判定できる。

膨潤性土の判定はブラックコットンソイル BCS があると考えられる地域で、土の色が暗黒色か観察し、細粒分が卓越しているか触手して判断する。膨潤性土の場合は極めて粘り気が多いので、それで判定する。粘土頁岩などの堆積岩を母材とする膨潤性土の場合は、暗黒色とはならないので、当該地点で代表的な膨潤性土を色調で見分ける経験を聞き込むのが重要となる。最終的には BCS と同様に粘土分の多さと粘り気があるかで判定する。なお、乾期の調査では土が乾燥しているので、土に十分水分を加えて触手することがポイントである。水分を与えることで土の色も変わるので、写真を残す場合は断面については霧吹き、水かけ等を行い、湿らした状態で記録を残すと良い。

膨潤性が特に疑われる試料については、手に水分がつかなくなる程度の含水比で調整して、透明なグラスに採取した試料を詰め込み、その後それに水を入れて、翌日までに膨張しているか確認するのもひとつの方法である。土塊を容器に入れて観察する場合は、写真を撮るときスケールを入れると体積変化が確認できる場合がある。



出典：
https://www.indianafoundation.com/services/foundation-repair/causes/expansive-soils/

図 8.1.10 膨潤性土のクラック



出典：https://geoffpark.wordpress.com/2012/10/19/gilgai-makes-perfect-habitat/

図 8.1.11 ギルガイの地形

8.1.8.2 物理特性による判定方法

(1) 判定に用いる試験方法

膨潤特性に関係する土質試験の物理特性パラメータは、自然含水比 w_0 or w_n、乾燥密度 ρ_d、アッターベルグ限界（収縮限界 SL or w_s、塑性限界 PL or w_p、液性限界 LL or w_L、塑性指数 Ip or PI）、粒度特性（細粒分含有量 Fc、粘土分含有量 CF）、自由膨張率（DFS）がある。これらの中で日本の基準 JIS もしくは JGS（地盤工学会）の基準にないのは自由膨張率試験である。自由膨張率試験はインドの基準（IS）である。表 8.1.12 に膨潤性判定に用いる物理試験基準を示す。

表 8.1.12 膨潤性判定に用いる物理試験基準

	日本（JIS/JGS）	ASTM	BS	その他
含水率試験	JIS A1203	ASTM D2216	BS 1377-2	-
密度試験	JIS A1224	ASTM D2166	BS 1377-2	-
収縮限界試験	JIS A1209	ASTM D4943	BS 1337-T-5	-
塑性･液性限界試験	JIS A1205	ASTM D4318	BS 1337-T2, T-4	-
粒度試験	JIS A1204	ASTM D422	BS 1377-2	-
自由膨張率試験	-	-	-	IS: 2720（Part40）

出典：JICA 調査団

(2) 自由膨潤率試験

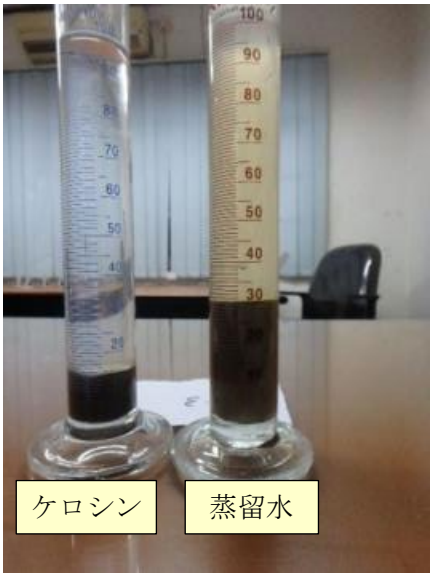
試験に用いる試料は炉乾燥した土を 0.425mm のふるいで通過させた試料である。試料が固結しているときは、すり鉢で乳棒を用いて細かくして試料を得る。可能な場合は粒度試験で 0.425mm 以下の割合を測定する。100ml のメスシリンダー2 本に、ひとつは蒸留水、もう一つにはケロシンをそれぞれ 100ml ずつ入れる。土試料を両方メスシリンダー内に 10g ずつ入れ、空気を除去するように十分攪拌する。攪拌後 24 時間土試料を沈降させる。※試料を先に入れ後から水を入れると表面が粘土状に固まり、攪拌できなくなるので注意する。また、試料を水に入れるときは一度に落とすのではなく、ゆっくり入れるのが良い。自由膨張率 DFS は次式で求める。

$$\text{自由膨張率 } DFS\ (\%) = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100$$

ここに、

V_d=蒸留水に入れた沈降後の試料の体積（ml）

V_k=ケロシンに入れた沈降後の試料の体積（ml）



出典:JICA 調査団

図 8.1.12 自由膨張率試験

(3) 物理特性による判定方法

物理特性による判定方法は、多くの研究者により提案されている。判定方法の例は、別添 特殊土ハンドブックの巻末資料に取りまとめている。

膨張度（Swelling degree）／膨潤度（Expansive degree）もしくは膨張／膨潤ポテンシャル（Expansive potential）で膨潤性について区分している。それらの区分は「低い」、「中くらい」、「高い」、「非常に高い」の 4 つの区分でとりまとめる。

一番多く用いられている土質特性パラメータは塑性指数と液性限界であるが、単独で判定するのではなく、複数のパラメータを勘案して判定するのが妥当と考えられる。塑性図のように液性限界と塑性指数の図中に区分線をいれるような 2 つのパラメータで判定するのが単独で判断するよりも妥当と考えられる。

1) 膨潤率 Sp と膨潤圧 ps

膨潤性土のランク分けとしては膨潤率と膨潤圧が工学的に意味を有すると考えられる。膨潤率と膨潤圧の求め方は試験条件（密度、含水比、載荷荷重、不攪乱／再成形）により異なる。また、母材によって膨潤特性は大きく変わる。

表 8.1.13 は各研究者の膨潤率による判定方法を取りまとめたものである。膨潤率は小さい方のグループは不攪乱状態のものと考えられ、大きいものは攪乱試料の試験結果から設定されたものと考えられる。

表 8.1.13 膨潤率 Sp(%)による判定方法とりまとめ

膨潤度	Altmeyer	Holtz	Holtz	Seed et al.	Snethen	Neil	Chen	Carter
	1955	1956	1959	1962	1977	1980	1988M	1991
低い	<0.5	<10	<11	0~1.5	<0.5	<0.5	<1	0~1.5
中くらい	0.5~1.5	10~30	7~12	1.5~5	0.5~1.5	0.5~1.5	1~5	1.5~5
高い	>1.5	20~30	10~16	5~25	>1.5	>1.5	3~10	5~25
非常に高い	-	>30	>15	>25			>10	>25
載荷重等		7kPa		7kPa				

膨潤度	CAGE	CAGE	劉特洪	USBR	鄧家喜	Sridharan	李生林	CMC
	1996	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004
低い	0~3	0~2	<2	<10	2~4	1~5	0.7~2	<10
中くらい	3~5	2~4	2~4	10~30	4~5	5~15	2~4	10~20
高い	5~8	4~6	>4	20~30	>6	15~25	4~6	20~30
非常に高い	>8	>6		>30		>25	>6	>30
載荷重等	σ v=30kPa	σ v=48kPa		Holtz		7kPa		

膨潤度	ACPA	公路膨張土工程	ACPA	公路膨張土工程
	2008	2009	2008	2009
低い	<10	2~5	<10	2~5
中くらい	10~20	5~8	10~20	5~8
高い	20~30	8~11	20~30	8~11
非常に高い	>30	>11	>30	>11
載荷重等	乾燥→飽和	線形収縮率	乾燥→飽和	線形収縮率

出典:JICA 調査団

表 8.1.14 は各研究者の膨潤圧による判定方法をとりまとめたものである。研究例が少ないので更なる検討が必要と考えられる。

表 8.1.14 膨潤圧 ps(kPa)による判定方法とりまとめ

膨潤度	Chen	Chen	劉特洪	Claudial	MUSSO	提案される判定方法	
	1988	1988M	1997	2000	2006	小さめ	大きめ
低い	<50	<50	<40	0~100	<75	<50	<100
中くらい	150~250	140~240	40~120	100~300	75~200	50~100	100~250
高い	250~1000	240~960	>120	300~500	200~500	100~250	250~500
非常に高い	>1000	>960		>500	>500	>250	>500

出典:JICA 調査団

2) 収縮限界 LS、収縮指数 SI

表 8.1.15 は収縮限界による判定方法、表 8.1.16 は収縮指数の判定方法をとりまとめたものである。

表 8.1.15 −収縮限界 SL(%)による判定方法とりまとめ

膨潤度	Altmeyer	Holtz	Sowers	IS 1498	Chen	USBR	Sridharan	CMC	ACPA
	1955	1956	1970	1970	1987	1998	2000	2004	2008
低い	>12	>15	>13	<15	>15	>15	>13	>15	<15
中くらい	10~12	10~16	8~18	10~15	10~15	10~16	8~18	10~16	10~16
高い	<10	7~12	6~12	<10	7~12	7~12	6~12	7~12	7~12
非常に高い	-	<11	<10			<11		<11	>11

出典:JICA 調査団

表 8.1.16 −線収縮率と収縮指数による判定方法とりまとめ

収縮指数 Is(%)=PL-SL			
膨潤度	Rangnatham	Raman	Sridharan
	1965	1967	2000
低い	0~20	<15	<15
中くらい	20~30	15~30	15~30
高い	30~60	30~60	30~60
非常に高い	>60	>60	>60

出典:JICA 調査団

3) 液性限界 LL

液性限界は膨潤性の判定でよく使用されるパラメータのひとつである。表 8.1.17 は液性限界による判定方法をとりまとめたものである。

表 8.1.17 液性限界による判定方法とりまとめ

膨潤度	Ladd	IS 1498	Snethen	Williams	Neil	Chen	Chen
	1961	1970	1977	1977	1980	1975, 1987	1988+M
低い	20~35	20~35	<50	<50	<50	20~35	<30
中くらい	35~50	35~50	50~60	50~60	50~60	35~50	30~40
高い	50~70	50~70	>60	>60	>60	50~70	40~60
非常に高い	70~90	70~90					>60

膨潤度	劉特洪	鄧家喜	李生林	公路膨張土工程
	1997	1999	2003	2009
低い	15~45	40~55	40~45	<40
中くらい	45~50	55~65	45~50	40~48
高い	>50	>65	50~55	>48
非常に高い			>55	

出典:JICA 調査団

4) 塑性指数 Ip

塑性指数は膨潤性土の判定で一番用いられているパラメータである。表 8.1.18 は塑性指数で判定する方法をとりまとめたものである。

表 8.1.18 塑性指数による判定方法とりまとめ

膨潤度	Holtz 1956	Holtz 1956	Holtz 1959	Seed et al. 1962	Sowers 1970	IS 1498 1970	Peck et al. 1974	Snethen 1977
低い	<18	<20	<18	0~10	<12	<12	0~15	<25
中くらい	15~28	12~34	15~28	10~20	12~23	12~23	0~35	25~35
高い	25~41	23~45	25~41	20~35	23~32	23~32	20~55	>35
非常に高い	>35	>32	>35		>32	>32	>35	

膨潤度	Neil 1980	Chen 1987	Chen 1975	Cater 1991	Cater 1991	BRE 1993	劉特洪 1997	USBR 1998
低い	<25	<18	0~15	0~15	0~15	<20	<18	<18
中くらい	25~35	15~25	10~35	10~30	15~24	20~40	18~25	15~28
高い	>35	>35	20~55	20~55	25~46	40~60	>25	25~41
非常に高い			>35	>40	>46	>60		>35

膨潤度	鄧家喜 1999	Claudial 2000	Bekkouche 2001	李生林 2003	CMC 2004	CMC 2004	交通部標準 2004	ACPA 2008
低い	<20	<12	<18	<18	<18	<15	15~28	< 8
中くらい	20~26	12~35	18~22	18~25	15~28	15~28	28~40	15~28
高い	>26	35~45	22~35	25~35	25~41	28~40	>40	24~41
非常に高い		>45	>35	>35	>35	> 40		>35

膨潤度	公路膨張土工程 2009	NHBC 2011	Kumar 2011
低い	<18	10~20	0~15
中くらい	18~25	20~40	15~35
高い	>25	>40	35~55
非常に高い			>55

出典:JICA 調査団

5) 自由膨張率 DFS（%）

自由膨張率は膨潤性土の判定で塑性指数の次に用いられているパラメータである。表 8.1.19 は自由膨張率で判定する方法をとりまとめたものである。

表 8.1.19 自由膨張率による判定方法とりまとめ

膨潤度	IS1498	IS1498	劉特洪	Sridharan	李生林	CMC
	1970	1997	1997	2000	2003	2004
低い	<50	<20	40~65	<50	40~55	< 40
中くらい	50~100	20~35	65~90	50~100	55~70	40~60
高い	100~200	35~50	>90	100~200	70~85	60~90
非常に高い	>200	>50		>200	>85	> 90

膨潤度	公路膨張の工程	交通部標準	
	2009	2004	
低い	40~65	30~50	40~60
中くらい	65~90	50~80	60~90
高い	>90	>80	>90
非常に高い			

出典:JICA 調査団

(4) 提案された判定方法

以上、提案された判定方法を整理すると表 8.1.20 のようになる。同表にはメチレンブルーや自然含水比による判定方法も追加している。膨潤率と膨張圧は力学的特性であるが、物理特性に基づく推定式から得られた値から判定することができる。

表 8.1.20 その他のパラメータによる判定方法とりまとめ

膨潤度	膨潤率(%)			膨潤圧(kPa)		液性限界	塑性指数 Ip(%)	
	不攪乱	中程度	大きめ	小さめ	大きめ	LL(%)	小さめ	大きめ
低い	<0.5	<4	<10	<50	<100	30	<10	<20
中くらい	0.5~1.5	4~8	10~20	50~100	100~250	30~40	10~20	20~40
高い	1.5~4.5	8~16	20~30	100~250	250~500	40~60	20~35	40~60
非常に高い	>4.5	>16	>30	>250	>500	>60	>35	>60

膨潤度	自由膨張率 DFS (%)		収縮限界	メチレンブルー	自然含水比	収縮指数
	小さめ	大きめ	LS(%)	VB	w_0(%)	SI(%)
低い	<20	<50	>15	<2.5	>35	<15
中くらい	20~35	50~100	12~15	2.5~4.5	25~35	15~30
高い	35~50	100~200	11~12	4.5~9	15~25	30~60
非常に高い	>50	>200	<11	>9	<15	<60

出典:JICA 調査団

(5) グラフ用いた判定方法

グラフを用いた判定方法は 2 つ以上のパラメータで膨潤性を判定できるため、単独のパラメータによる判定よりも精度が高いと考えられる。Seed ら（1960）は図 8.1.13 に示す粘土分 CC と塑性指数 Ip と活性度 Ac を用いて判定している。Seed ら（1962）は図 8.1.14 に示す粘土分 CC と活性度 Ac による判定方法も発表している。これらの方法は論文でよく用いられている。Van Der Merwe（1964）は 0.425mm 以下の含有率で図 8.1.13 の Seed ら（1960）の方法に補正することを提案している（図 8.1.15）。その他、図 8.1.16 や図 8.1.17 の提案もされている。

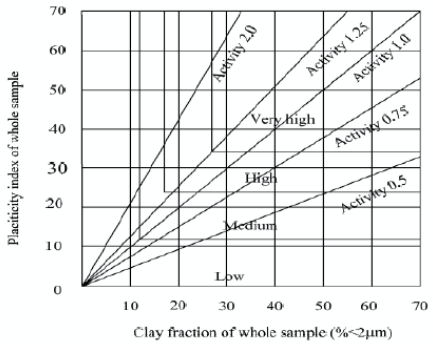


Figure (2.5): Swell potential as function of colloids content and Activity (Seed et al., 1960)

出典: SWELLING PERFORMANCE OF SOME EXPANSIVE SOIL TREATMENT TECHNIQUES, Mohamed Youssef Abd El-Latif, 2008

図 8.1.13 粘土分含有量と塑性指数による判定（Seed et al., 1960）

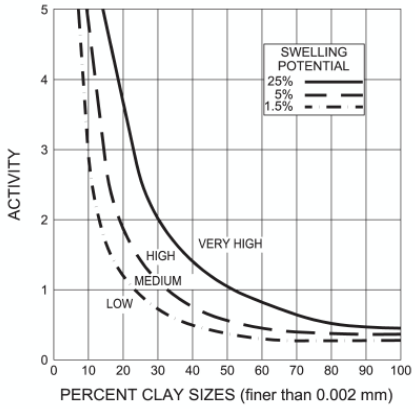


FIGURE 9.2. Swelling potential for compacted clays based on activity and percent clay (Seed, Woodward, and Lundgren 1962).

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons, 2015

図 8.1.14 粘土分含有量と活性度による判定（Seed et al., 1962）

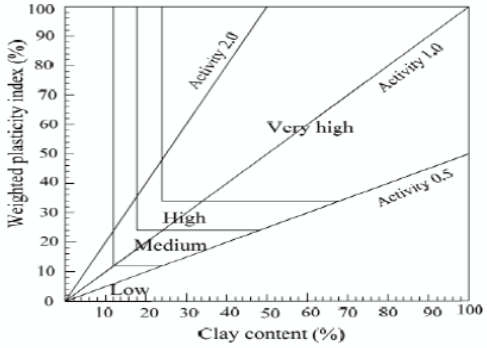


Figure (2.6b): Potential severity of volume change for clay soils (Van Der Merwe, 1964).

出典: SWELLING PERFORMANCE OF SOME EXPANSIVE SOIL TREATMENT TECHNIQUES, Mohamed Youssef Abd El-Latif, 2008

図 8.1.15　粘土分含有量と塑性指数による判定（Van Der Merwe, 1964）

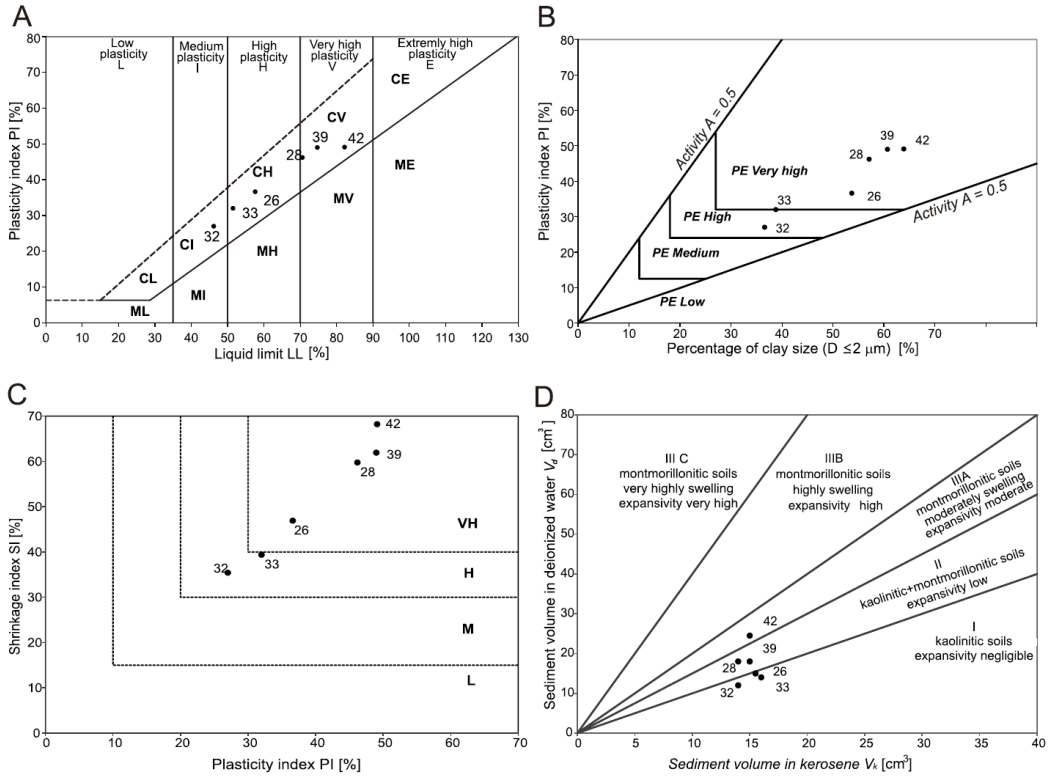
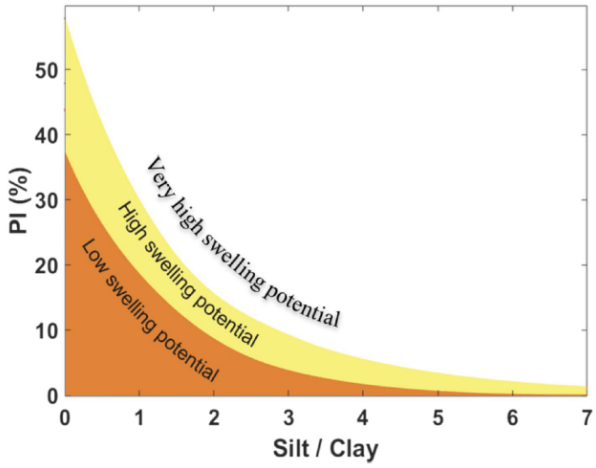


Fig. 3. Classification of soils used in the present study based on classification schemes proposed by: A – Casagrande chart by Head (1992); B – Van der Merwe (1964); C – Raman (1967); D – Prakash and Sridharan (2004)

A – CL – clays of low plasticity, CI – clays of medium plasticity, CH – clays of high plasticity, CV – clays of very high plasticity, CV – clays of extremely high plasticity, ML – silts of low plasticity, MI – silts of medium plasticity, MH – silts of high plasticity, MV – silts of very high plasticity, MV – silts of extremely high plasticity; **C** – L – low expansivity, M – medium expansivity, H – high expansivity, VH – very high expansivity

出典: Determination of swell index and swelling pressure from suction tests–a case study of Neogene clays from Warsaw（Poland）, Emilia WÓJCIK, Ireneusz GAWRIUCZENKOW, 2017

図 8.1.16　Free swell ratio による膨潤性判定



出典: Predicting Soil Swelling Potential Using Soil Classification Properties, Victor H. R. Barbosa, Maria E. S. Marques, Antônio C. R. Guimarães, 2023

図 8.1.17 シルト／粘土と PI による膨潤度判定

8.1.8.3 粘土鉱物による判定方法

土中のモンモリロナイトの存在を特定することは、その土が膨張性である可能性を特定する 1 つの手段である。粘土の鉱物学的性質は、結晶構造に基づいて、または化学分析によって特定することができる。一般的な鉱物同定法には、X 線回折法（XRD）、示差熱分析法（DTA）、電子顕微鏡法などがある。

XRD は、結晶の周囲で回折される X 線の量によって基底面間隔を測定するという原理で鉱物を特定する。DTA は、粘土のサンプルと不活性物質を同時に加熱し、測定されたサーモグラム（加えられた熱に対する温度差のプロット）を純粋な鉱物のサーモグラムと比較して、鉱物判定される。これは各鉱物がサーモグラム上で特徴的な吸熱反応と発熱反応を利用している。電子顕微鏡法は、粘土粒子を直接観察し、粒子のサイズと形状に基づいて定性的な識別を行う。

モンモリロナイト含有量 MMc を推定する方法として、図 8.1.18～図 8.1.21 に示す関係が提案されている。

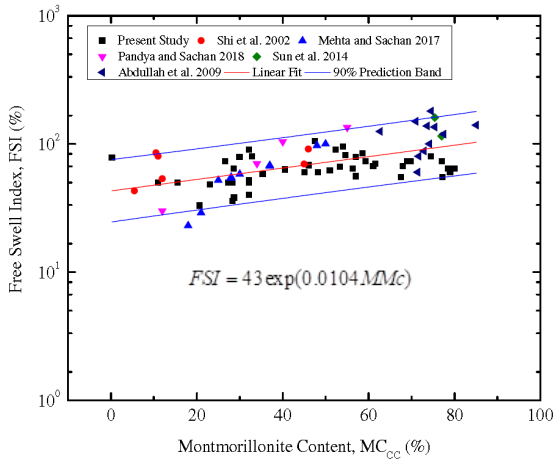


Fig. 4 Influence of MC_{CC} on the FSI

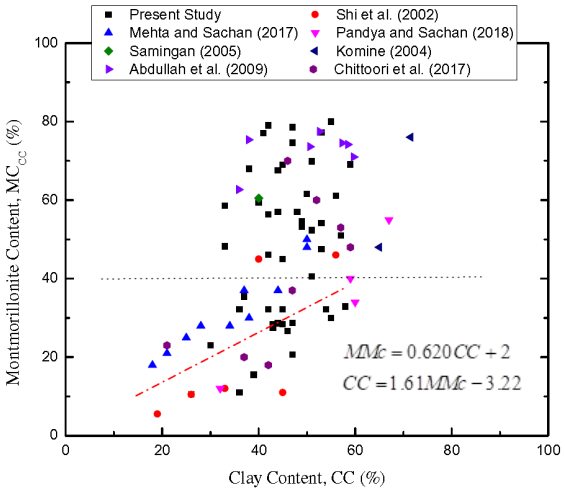


Fig. 5 Variation of MC_{CC} with CC of expansive soils

出典: Influence of Clay Content and Montmorillonite Content on Swelling Behavior of Expansive Soils, Peddireddy Sreekanth Reddy, Bijayananda Mohanty, Bendadi Hanumantha Rao, 2020

図 8.1.18 モンモリロナイト含有量と自由膨潤率、粘土含有率との関係

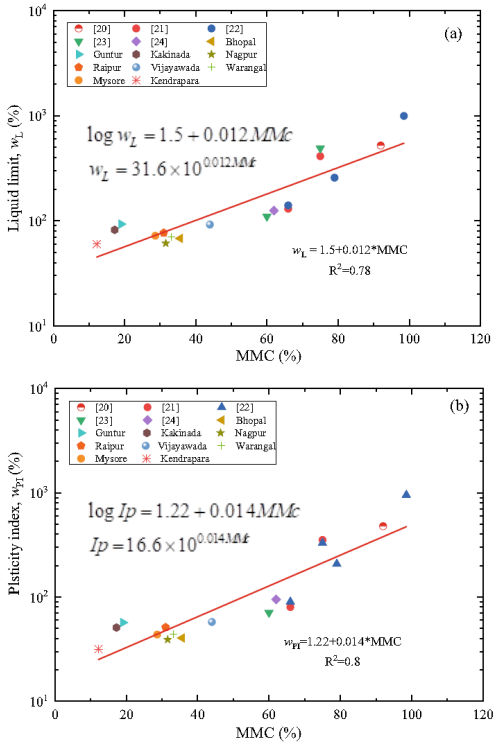


Fig. 1 Influence of MMC on liquid limit and plasticity index of soils used in the study

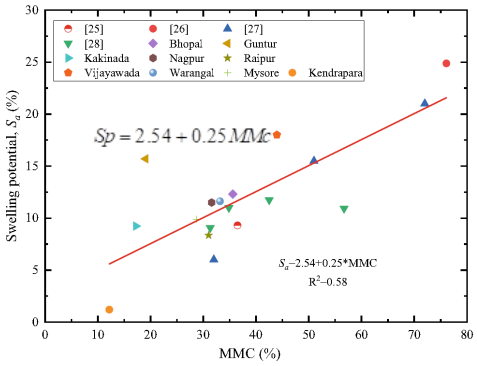


Fig. 4 Variation of swelling potential with MMC of soils used in the study

出典: Montmorillonite Content of Expansive Soils and Its Relationship with Swelling and Consistency Properties, P. Sreekanth Reddy, Bijayananda Mohanty, and B. Hanumantha Rao, 2022

図 8.1.19 モンモリロナイト含有量と液性限界、塑性指数、膨潤率との関係

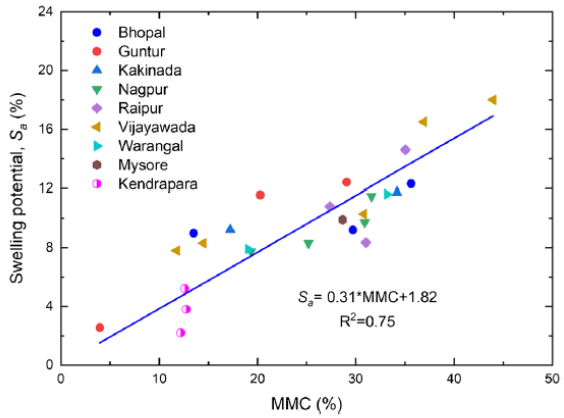


Fig. 7 Influence of MMC on swelling potential of expansive soils measured by 1-D consolidometer method

出典: Assessment of testing method influence on swelling characteristics of expansive soils of India, Peddireddy Sreekanth Reddy, Yu-ling Yang, Bijayananda Mohanty, Bendadi Hanumantha Rao, 2022

図 8.1.20 モンモリロナイト含有量と自由膨潤率との関係

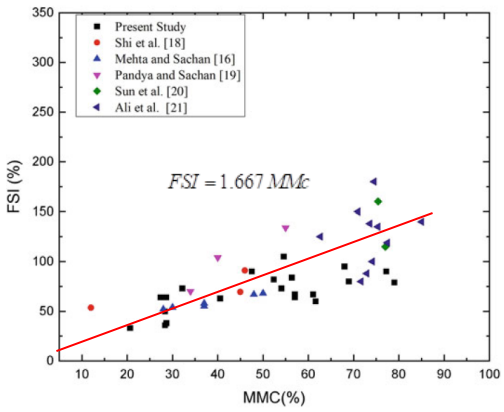


Fig. 3 Variation of FSI with MMC of CH soils

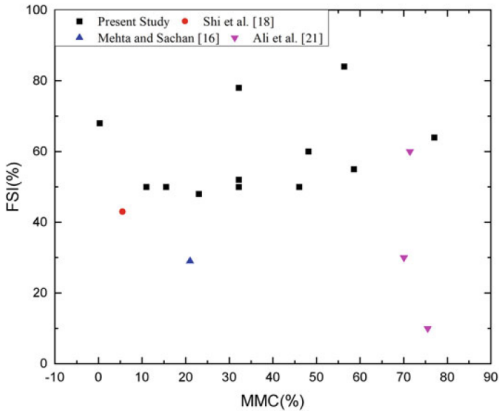


Fig. 4 Variation of FSI with MMC of CL soils used in the study

出典: Evaluating the Influence of Montmorillonite Content on Swelling Behaviour in Relation to Its Plasticity, Peddireddy Sreekanth Reddy, V. Suryaprakash Reddy, Bendadi Hanumantha Rao, Bijayananda Mohanty, 20024

図 8.1.21 モンモリロナイト含有量と自由膨潤率との関係

8.1.8.4 化学的分析による判定方法

粘土鉱物の同定に用いられる最も一般的な化学的手法には、陽イオン交換容量（CEC）、比表面積（SSA）、全カリウム（TP）の測定がある。

(1) 陽イオン交換容量（CEC）

CEC は、粘土粒子表面の負電荷のバランスをとるために必要な交換性陽イオンの総数である。CEC は乾燥粘土 100g 当たりのミリ当量（meq）で表される。試験手順では、まず土中の過剰な塩類を除去し、土の交換サイトを既知の陽イオンで飽和させることで、吸着した陽イオンを交換する。交換部位を飽和させるのに必要な既知の陽イオンの量は、表面電荷のアンバランスが大きい鉱物ほど多くなる。除去された陽イオン複合体の組成は、抽出液の化学分析によって求めることができる。

CEC は粘土鉱物学と関連している。CEC の値が高いほど、モンモリロナイトのような活性の高い粘土鉱物が存在することを示し、CEC が低いほど、カオリナイトのような非膨張性の粘土鉱物が存在することを示す。一般に、膨張係数は CEC が高くなるにつれて増加する。基本的な粘土鉱物の CEC の代表的な値を表 8.1.21 に示す（Mitchell and Soga 2005）。

表 8.1.22 に示すように CEC と ESP による判定は膨潤性土と分散性土の判定と同じとなるため、CEC と他の指標と組み合わせないと判定が難しいと考えられる。

表 8.1.21 粘土鉱物の CEC、SSA、TP の代表的な値（Mitchell and Soga 2005）

粘土鉱物	陽イオン交換容量（CEC）（meq/100 g）	比表面積（SSA）(m^2/g)	総カリウム（TP）（%）
カオリナイト	1-6	5-55	0
イライト	15-50	80-120	6
モンモリロナイト	80-150	600-800	0

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons (2015)

表 8.1.22 CEC による膨潤性土と分散性土の判定

CEC（%）	膨潤土	分散性土
<10	ほぼなし	ほぼなし
10~30	低い	低い
30~50	中程度	中程度
50~80	高い	高い
>80	非常に高い	非常に高い

出典: JICA 調査団

(2) Na+イオン量（ESP, SAR）

膨潤性土は交換性陽イオンの内、Na+イオンが多いと膨潤性と判定される。ESP は土の陽イオン交換容量（CEC）に占める交換性ナトリウムの割合を示す指標である。

$$\mathrm{ESP} = \frac{\text{交換性}\mathrm{Na}^{+}}{\text{全交換陽イオン容量（CEC）}} \times 100$$

ここに、

交換性 Na^+（meq/100g 土）：土粒子表面に吸着されたナトリウムの量

全交換性陽イオン容量（CEC）（meq/100g 土）：土が保持できる全ての陽イオン（Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ など）の総量

ESP による膨潤性土の判定は表 8.1.23 のようになるが、これは分散性土の判定と同じとなるため、CEC と他の指標と組み合わせないと判定が難しいと考えられる。

表 8.1.23 ESP による膨潤土と分散性土の判定

ESP（%）	膨潤土判定	分散土判定
<5	ほぼなし	非分散性
5~15	低～中程度	部分分散性
15~25	強い	分散性土
25~40	非常に強い	分散性強い
>40	極めて強い	分散性極めて強い

出典: JICA 調査団

SAR（ナトリウム吸着比）は土水中のナトリウム（Na^+）の濃度が、カルシウム（Ca^{2+}）およびマグネシウム（Mg^{2+}）濃度に対してどれだけ高いかを示す指標である。SAR は Ca^{2+}と Mg^{2+}の割合に着目した値となっており、Ca^{2+}と Mg^{2+}は土粒子間の結合力を強化して分散性を抑える役割を果たすため、ESP より精度の高い判定指標となっている。

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Na^+: ナトリウム濃度（meq/L, ミリ当量/L）

Ca^{2+}: カルシウム濃度（meq/L）

Mg^{2+}: マグネシウム濃度（meq/L）

Na+が多いと膨潤性が大きくなるが、分散性も大きくなる。表 8.1.24 に SAR による膨潤性と分散性の判定基準を示す。

表 8.1.24 SAR による膨潤性と分散性の判定

SAR	膨潤性	SAR	分散性
		< 6	しない
<10	弱い	6~12（13）	弱い
10~20	中程度	12（13）~20	中程度
>20	高い	> 20	高い

出典: JICA 調査団

(3) pH

pH は土の環境条件で異なる。膨潤性土と分散性土は酸性の環境では発達しないので、他の指標と組み合わせて存在の有無について判定できる。また、膨潤性土と分散性土ではモンモリロナイトの活性状況が少し異なり、膨潤性土は中性から弱アルカリで発現しやすい。分散性土は膨潤性土よりもアルカリ性で最大となる。

表 8.1.25 アルカリ度（pH）による膨潤性土と分散性土の挙動（表 8.1.9 の再掲）

pH	特性	膨潤性土	分散性土
<5	酸性	膨潤性が低下し、粘土粒子が凝集しやすい	分散しにくくなる
6～7	弱酸性～中性	膨潤が始まるが、最大にはならない	分散がやや抑制される
7～9	中性～弱アルカリ性	**膨潤性が最大**	分散しやすくなる
9～10	アルカリ性	Na^+型モンモリロナイトは膨潤し続ける	**分散性が最大**
>10	強アルカリ性	Ca^{2+}型モンモリロナイトは膨潤性が減少する	非常に分散しやすい

出典：JICA 調査団

(4) 比表面積（SSA）

土の比表面積（SSA）は、単位質量の土に含まれる土粒子の全表面積として定義される。表 8.1.21 に示すように、モンモリロナイトの比表面積はカオリナイトの比表面積よりもはるかに大きい。SSA が高い粘土質土は、保水力が高く、膨張能も高い（Chittoori and Puppala 2011）。しかし、SSA が高いだけで、必ずしも膨潤性土であるとは限らない。例えば、有機分率が高い土の場合、その分率は、比表面積の高い物質と同様の特性を持つ、反応性の高い表面を持つ可能性がある（Jury, Gardner, and Gardner 1991）。

土の比表面積を測定する方法はいくつか開発されている。最も一般的な方法は、エチレングリコールのような極性分子を粘土鉱物表面に吸着させる方法である。

表 8.1.21 に 3 つの基本粘土鉱物の SSA の典型的な値を示す。モンモリロナイトの SSA はカオリナイトの約 10 倍である。典型的な SSA 値の範囲は、同じ鉱物グループ内で 100%以上変化する可能性があるが、モンモリロナイトの場合、SSA の値が非常に大きいため、鉱物の識別が可能となる。SSA により粘土粒子が何であるか推定できるが、膨潤性土か分散性土かの判定では両者ともモンモリロナイトに影響するため、SSA による判定は表 8.1.26 に示すように両者とも同じになる。

表 8.1.26 SSA による膨潤土と分散性土の判定

SSA（m^2/g）	膨潤土判定	分散土判定	主な粘土鉱物
<10	ほぼなし	ほぼなし	カオリナイト
10~50	低い	低い	イライト
50~100	中程度	中程度	イライト＋モンモリロナイト
150~700	高い	高い	モンモリロナイト
>700	非常に高い	非常に高い	ナトリウムモンモリロナイ

出典: JICA 調査団

(5) 総カリウム（TP）

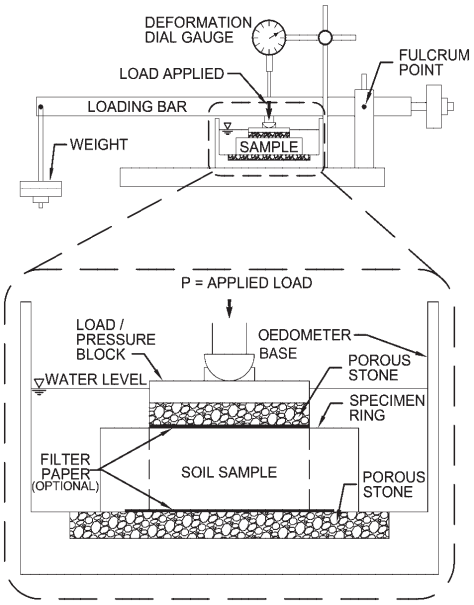
構造中にカリウムを含む粘土鉱物はイライトだけである。そのため、土中のカリウムイオンの量は、イライトの存在を示す直接的な指標となる（Chittoori and Puppala 2011）。表 8.1.21 はイライトと他の 2 つの鉱物とのカリウム総量の違いを示している。したがって、カリウムの含有量が多ければ、膨張の可能性が低いことを示している。

8.1.8.5 力学試験による膨潤度測定試験

(1) 圧密試験

圧密試験は土の圧密・沈下特性を測定する試験方法である。典型的な圧密試験機を図 8.1.22 に示す。最も一般的な試験方法は圧密（Consolidation）-膨潤（Swelling）試験（CS）で、試料は最初に圧密試験機内で所定の垂直応力を載荷し、その垂直応力下で浸水する。湿潤によって発生するひずみ膨潤率 ε_s もしくは膨潤ポテンシャル Sp を測定する。膨潤が完了した後に、追加の垂直荷重を載荷し、試料を元の高さに戻すために必要な膨潤圧 σ_{cs}'' もしくは p_s を求める。

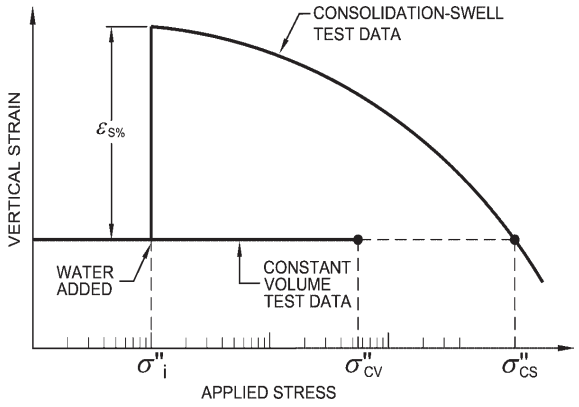
定体積（Constant volume）（CV）膨潤試験も代表的な試験方法である。この試験では、最初に試料に所定の垂直応力をかけ、その後浸水させる。浸水中に試料が膨張しないように閉じ込め、膨張を防ぐために必要な応力を測定する。この応力は「定体積」膨潤圧 σ_{cv}'' とする。



出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons (2015)

図 8.1.22 圧密試験の装置 [J. D. Nelson, 2015]

図 8.1.23 にはひずみ膨潤率 ε_s、「圧密膨潤」膨潤圧 σ_{cs}''、「定体積」膨潤圧 σ_{cv}''の関係を示す。

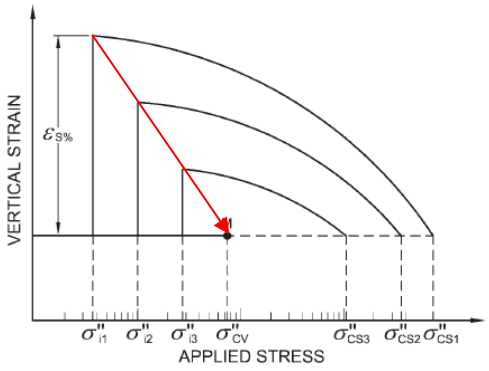


出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons (2015)

図 8.1.23 圧密試験の試験結果 [J. D. Nelson, 2015]

膨潤ポテンシャルを測定するための圧密試験の基準は、ASTM D4546 に規定されている。この ASTM D4546 は、通常の圧密試験法 ASTM D2435/D2435M とは違って、膨潤性土用に開発されたものである。この試験において、最終的な応力条件はマトリックス吸引がゼロまで減少し、膨潤量が最大になるようにすることが前提としている。ε_s、σ_{cs}''、σ_{cv}'' の結果を使用する際は、現場と試験条件の違いを認識し、実際の応力状態条件を考慮する必要がある。

「圧密膨潤」膨潤圧 σ_{cs}'' とひずみ膨潤率 ε_s は浸水させる載荷応力 σ_i'' が変わると変化する。このため、現場で設計検討するときは浸水前の応力状態を考慮しなければならない。一方、「定体積」膨潤圧 σ_{cv}'' は初期の応力条件 σ_i'' の影響を受けない一定値となる。



※赤線は JICA 調査団加筆

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, J. D. Nelson, K. C.（Geoff）Chao, D. D. Overton, E. J. Nelson, John Wiley & Sons (2015)

図 8.1.24 浸水時の載荷応力が異なる膨潤試験結果［J. D. Nelson, 2015］

土圧のような膨潤圧を考慮する場合は「定体積」膨潤圧 σ_{cv}'' を用いて検討するのが正しいことになる。設計検討では「圧密膨潤」膨潤圧を用いることは少ないと考えられる。「圧密膨潤」膨潤圧は土の膨潤性を判定するためのパラメータとして使用されている。多くの研究者が報告している膨潤圧は「圧密膨潤」膨潤圧と考えられる。「定体積」膨潤圧を通常の圧密試験機を用いて求めるためには試験器を改良しなければならないため、開発途上国では「定体積」膨潤圧を行うことは難しい。もし、通常の試験器で「定体積」膨潤圧を求めるためには、図 8.1.24 の赤線で示したように、浸水膨潤後のひずみ膨潤率 ε_s の点を結んで、浸水前のひずみと交差する点が「定体積」膨潤圧 σ_{cv}'' となる可能性があるため、浸水前の載荷圧を変えた試験を最小 2 つ以上行えば、「定体積」膨潤圧を求めることができると考えられる。もし、「圧密膨潤」膨潤圧が先行圧密荷重 pc 以上の場合は浸水時の載荷重を変えても同じ「圧密膨潤」膨潤圧が正規圧密状態の曲線状となり、同じ膨潤圧が求められる可能性がある。

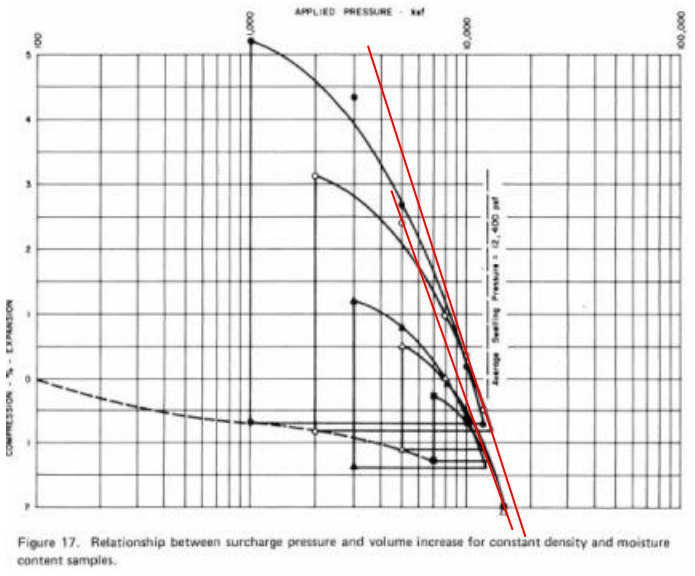


Figure 17. Relationship between surcharge pressure and volume increase for constant density and moisture content samples.

※赤線: JICA 調査団追記

出典: Foundations on Expansive Soils, F. H. Chen, Elsevier Scientific Publishing, 1975

図 8.1.25 「圧密膨潤」膨潤圧が正規圧密線状にある場合［Chen, 1975］

(2) COLE を求める試験

線伸張係数（COLE）は土の重要な工学特性の 1 つであり、撹乱されていないサンプルの粘土含有量とコンシステンシーに関係し、土の収縮膨張挙動を特徴づける。COLE はサンプルの寸法が湿潤状態から乾燥状態まで変化する尺度である。これは、土の収縮膨張挙動を特徴付けるために、35kPa（5psi）のマトリックポテンシャルで、樹脂で覆われた土塊の体積変化によって決定される。これは、乾燥または膨張と収縮による土の体積変化の 3 乗根に関連する収縮膨張ポテンシャルの指標となる。収縮膨張ポテンシャルは粘土含有量と相関するため、粘土含有量が多い土は収縮膨張ポテンシャルが高くなる。スメクタイトと粘土の含有量が増加すると土の COLE 値と収縮膨張ポテンシャルが増加する。

試料は 2mm 以下のものを使用し、重さ約 100～200g の土塊をプラチック樹脂でコーティングする。樹脂は水を通さないが水蒸気を通すものを用いる。吸引器を用いて土塊を 35kPa のサクションにかけ、空気中と水中で重量を測定し、アルキメデスの原理を用いて重量と体積を求める。この土塊をオーブン中で乾燥させ、重量と体積を再度測定する。乾燥による樹脂の重量損失を 10%と仮定して、35kPa とオーブン乾燥の両方で土塊の密度を計算する。

礫分が入った COLE は次式で計算する。

$$COLE_{WS} = \left[\frac{1}{C_m\left(\frac{\gamma_{d32<2mm}}{\gamma_{d<2mm}}\right) + (1 - C_m)}\right]^{1/3} - 1$$

ここに、

$COLE_{WS}$=土全体の線膨張係数（cm cm^{-1}）

$\gamma_{d\,33<\,2mm}$=35kPa 保水時の乾燥密度（g/cm^3）

$\gamma_{d<\,2mm}$= 乾燥密度（g/cm^3）

C_m=換算係数

C_m は以下のように計算される：

C_m=2mm 以下の土の湿潤させた体積/礫分を含む土の湿潤させた体積（cm^3）

または C_m =（100-vol>2 mm）/100

ここで、vol>2mm= 2mm 以下の体積%。

礫がない場合、C_m=1 となり、前式は次式となる。

$$COLE_{WS} = \left(\frac{\gamma_{d32<2mm}}{\gamma_{d<2mm}}\right)^{1/3} - 1$$

試験基準は下記の USDA にある。ASTM には無い。

U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. National soil survey handbook（2024）

表 8.1.27 COLE による膨潤ポテンシャル［Lucian, 2016］

土膨潤収縮ポテンシャル	COLE
低い	<0.03
中くらい	0.03-0.06
高い	0.06-0.09
非常に高い	>0.09

出典: Prediction of expansive soil based on the coefficient of linear extensibility（COLE）, Charles Lucian, 2016

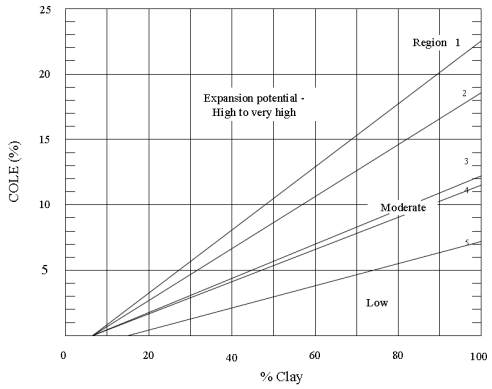


FIGURE 1: EXPANSION POTENTIAL AS A FUNCTION OF COLLOIDS AND COLE (HARDCASTLE, 2003)

出典: Prediction of expansive soil based on the coefficient of linear extensibility（COLE）, Charles Lucian（2016）

図 8.1.26 粘土分と COLE による膨潤ポテンシャルの判定［Lucian, 2016］

(3) 膨潤指数 EI を求める試験

本試験は ASTM D4829 "Standard Test Method for Expansion Index of Soils"に規格されている。本試験は蒸留水で浸水させたときの土の膨潤ポテンシャルを測定するもので、試験で得られた膨潤指数 EI を用いて土の膨潤ポテンシャルを評価するための、簡便かつ高感度な方法である。

図 8.1.27 に示す装置を用いて、飽和度 50±2 %の土を 2 層に均等に締め固めて供試体を作成する。供試体の径は 101.9mm、高さは 50.8mm である。作成した供試体を載荷装置にセットし、6.9kPa の鉛直拘束圧をかける。供試体を蒸留水で浸漬し、膨潤する高さを 24 時間または変形速度が 0.005mm/h 未満になるまで測定する。膨潤指数 EI は次式でもとめられる。

$$\text{膨潤指数} \quad EI = \frac{\Delta H}{H_1} \times 1000$$

ここに

ΔH=膨潤量

H_1=供試体の初期高さ

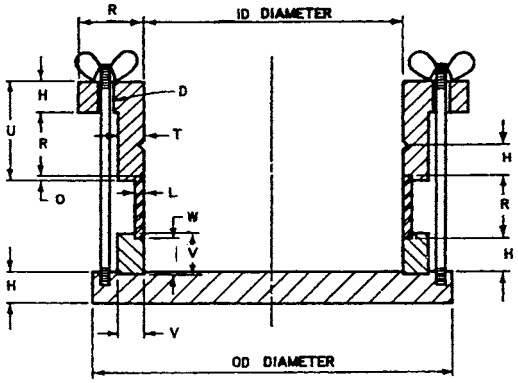
膨潤指数 EI による膨潤ポテンシャルは表 8.1.28 のように求められる。

表 8.1.28 EI による膨潤ポテンシャルの分類
[ASTM D4829 ″Standard Test Method for Expansion Index of Soils″]

膨潤指数 EI	膨潤ポテンシャル
0~20	非常に低い
21~50	低い
51~90	中くらい
91~130	高い
>130	非常に高い

出典: ASTM D4829 ″Standard Test Method for Expansion Index of Soils″

本試験は日本では規格されていない。試験装置と試験用具は本試験専用のものであり、試験を実施できる試験室は極めて限られる。



Letter	in.	Tolerances (in.)	mm	Tolerances (mm)
ID	4.010	± 0.005	101.9	± 0.1
OD	6.00	± 1.01	152.4	± 0.2
H	0.50	± 0.01	12.7	± 0.2
D (Hole)	7/32	+ 1/64	5.5	+ 0.2
U	1.625	± 0.01	41.3	±0.2
T	0.325	± 0.01	9.5	± 0.2
O	0.125	± 0.004	3.2	± 0.1
R	1.00	± 0.01	25.4	± 0.2
W	0.563	± 0.004	14.3	± 0.1
V	0.688	± 0.01	17.5	± 0.2
L	0.120	± 0.000	3.05	± 0.0

出典: ASTM D4829 "Standard Test Method for Expansion Index of Soils"

図 8.1.27 膨潤試験装置［ASTM D4829 "Standard Test Method for Expansion Index of Soils"］

8.1.9 膨潤性土の工学的問題点

膨潤性土は世界中の色々な国に分布し、多くの町、都市、交通路、サービス、建物は膨潤性土の上に築かれている。膨潤性土は通常含水比の季節変動によって引き起こされる膨潤または収縮することで、構造物に甚大な被害が生じる可能性がある。

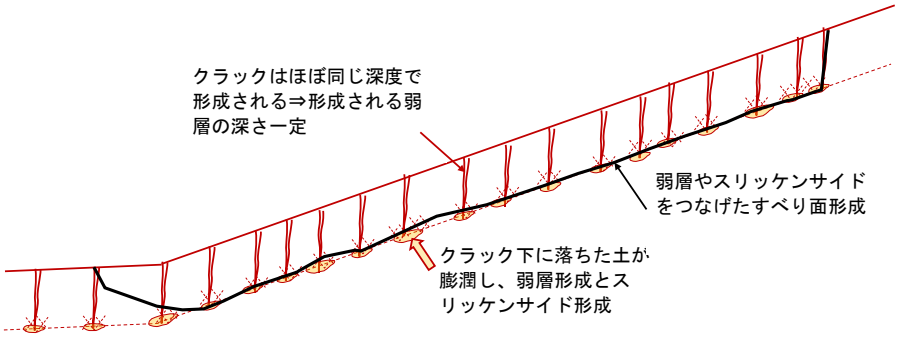
米国では 4 軒に 1 軒は膨潤性土の浮き上がりによる建築構造物のひび割れの被害を受けているとされており、その被害は地震、洪水、台風、竜巻を合わせたよりも大きな経済的な損害を与えると推定されている。英国保険協会（ABI）は、縮小・うねりに関連した地盤沈下の平均コストは年間 4 億ユーロ以上（660 億円、2000 年）、米国では、建物やインフラへの推定損害額は年間 150 億ドル（1 兆 6 千万円、1992 年）を超えると報告されている。南アフリカでの膨潤性土による建築物の損傷の修復費用は年間 1 億ランド（8.1 億円、1985 年）と推定されている。

土木工事では道路の起伏、舗装のクラック、道路の轍などの報告が多い。また、膨潤性土により構造物が浮き上がり、杭基礎に引張外力が作用する被害も報告されている。

膨潤性土によって引き起こされる損傷を最も受けやすい構造物は構造が軽量なもので、住宅やその他の低層ビルの基礎や壁、パイプライン、鉄塔、舗装、浅い埋設物などは、重構造よりも不同変位を生じやすくなる。膨潤性土は湿潤して膨張するため、浮き上がり、基礎を損傷する可能性がある。膨張した土は荷重が軽い連続帯状基礎を持ち上げてひび割れさせ、床スラブに損傷を引き起こすこ

とがよくある。膨潤性土が大きく膨潤すると密度が小さくなるとともにせん断抵抗力が小さくなる。それにより支持力が低くなり、コンクリートやその他の柔軟性のない建築材料で作られた構造物の破損につながる。建物の基礎（地下室）、道路や歩道の安定性と機能性は膨潤性土の内部の隆起・沈下運動によって損なわれる。

河川堤防は特に飽和状態にある場合、弱い面に沿った内部滑りによって破損しやすくなる。切土斜面では乾期に生じた亀裂に降雨により水が浸入し、クラックの底の膨潤性土に流れ込み、そこで膨潤して軟弱化した層を形成し、切土勾配の緩急に関係なく斜面すべりが生じる。



出典: JICA 調査団

図 8.1.28 膨潤性土の切土面におけるすべり形成のメカニズム

膨潤性土は自然状態よりも盛土された土の方が、膨潤性が大きくなる。このため、盛土面に遮水処置をしていないと、切土と同様にクラック発生に伴うすべり破壊が生じる。膨潤性土による問題は、建設から数か月以内に発生する場合もあれば、3～5 年かけてゆっくりと発生する場合、土の水分含有量を変化させる何かが起こるまで隠れたままになる場合もある。一般的に建設後しばらくしてから問題が明らかになる事例が多い。膨潤性土による被害はメンテナンス上の問題が軽微な場合もあるが、多くの場合はるかに深刻で構造上の大きな損傷を引き起こすので注意しなければならない。

膨潤性土の対策は多くの場合､依然として過去の経験と土質特性に基づいているため、確立された対策方法がなく、試行を繰り返すため、困難で費用がかかる。技術者は地元の知識や経験的に導き出された方法を用いたりして対策しているが、その効果に関する情報が集積されていないため、普遍的に信頼できる対策方法となっていない。また、膨潤性土の研究は多くなされているが、国や地域で膨潤特性が大きく変わるため、全ての地域に適用できる設計方法、対策工が築かれていない。

8.1.9.1 住宅

住宅、モーテル、ガレージなど、荷重の軽いスラブや基礎の上に建てられた多くの建物はコーナーダウン型の沈下、壁の中央付近の上向きの隆起、ステムウォールのわずかな回転、外側への水平移動、垂直軸を中心としたコーナーのわずかな回転など、不規則なひび割れが発生している。膨潤性土上の建物で観察される主な動きは上向きの隆起またはドーム型の隆起であり、最大の上向きの動きは建物の中央で発生する。結果として生じるひび割れパターンはコーナーダウンの歪みのように見える（図 8.1.29）。コーナーの応力は窓やドアが後者の上に開いているため、縦方向の基礎の残りの部分よりも比較的高くなる。したがって、基礎のコーナーは中央よりも沈下する。

夏の間に膨潤性土は乾燥により収縮する。コーナーの周りの土は家の側面よりも乾燥にさらされるため、コーナーのほうが基礎の中央よりも収縮が大きくなる。その後、膨潤性土が降雨または家庭散水によって湿ると、基礎の中央はコーナーよりも膨張する。これは前者に対する上乗せ荷重が小さいためである。その結果、コーナーと基礎の中央の間の差動移動（例:不同沈下）が大きく、コーナーの標高が低くなる（図 8.1.30）。

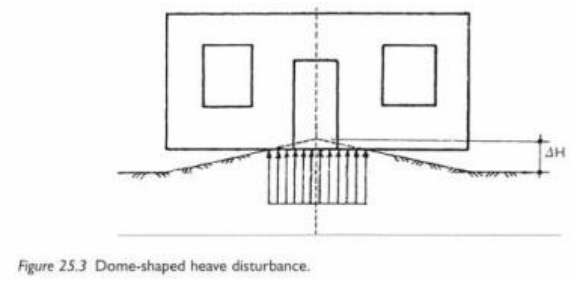


Figure 25.3 Dome-shaped heave disturbance.

出典: Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali AI-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, 2006

図 8.1.29 ドーム状の隆起変状［Amer Ali AI-Rawas, 2006］

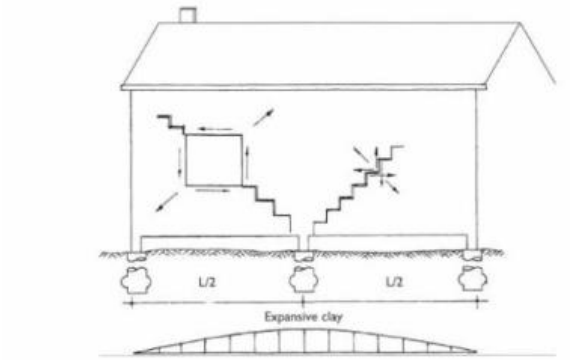


Figure 25.4 Differential heave disturbance (structure subjected to center column heave).

出典: Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali AI-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, 2006

図 8.1.30 ドーム状の隆起による住宅の被害パターン［Amer Ali AI-Rawas, 2006］



出典：Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali Al-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, Taylor & Francis（2006）

図 8.1.31 家屋の被害例（壁のクラック）[Amer Ali Al-Rawas, 2006]



出典: https://www.hie-ce.com/blog/is-your-home-built-on-expansive-soil

図 8.1.32 家屋の被害例（基礎のクラック）[https://www.hie-ce.com/blog/is-your-home-built-on-expansive-soil]

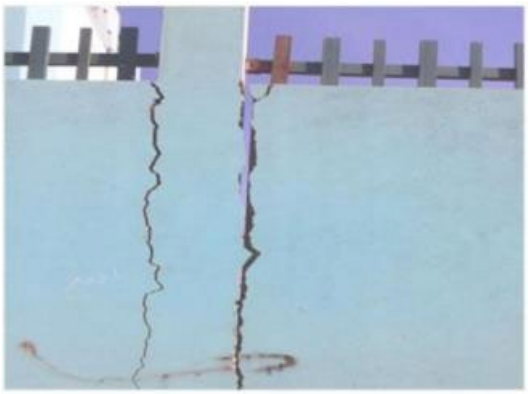


Figure 3 Sever vertical cracks appeared at the joint between column and masonry wall of the fence

出典：Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance, Magdi M. E. Zumrawi, Asim O. Abdelmarouf, and Abubakr E. A. Gameil, 2017

図 8.1.33 家屋の被害例（壁のクラック）[Magdi M. E. Zumrawi, 2017]



Figure 6 Serious cracks around window in the interior wall

出典：Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance, Magdi M. E. Zumrawi, Asim O. Abdelmarouf, and Abubakr E. A. Gameil, 2017

図 8.1.34 家屋の被害例（壁のクラック）[Magdi M. E. Zumrawi, 2017]



Figure 5 Foundation wall partially settled around the corner due to trees nearby the building

出典：Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance, Magdi M. E. Zumrawi, Asim O. Abdelmarouf, and Abubakr E. A. Gameil, 2017

図 8.1.35 家屋の被害例（基礎）[Magdi M. E. Zumrawi, 2017]



Figure 7 Floor heave resulted in considerable difference in level about 5.5 cm

出典：Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance, Magdi M. E. Zumrawi, Asim O. Abdelmarouf, and Abubakr E. A. Gameil, 2017

図 8.1.36 家屋の被害例（床）[Magdi M. E. Zumrawi, 2017]

英国では、膨潤性土による住宅への被害について、膨潤よりも収縮による被害が問題となっている。これは住宅付近の主に樹木の根が生長により広がり、住宅下まで伸び、そこの含水比低下に伴い膨潤性土が大きな沈下を引き起こすことである（図 8.1.37）。

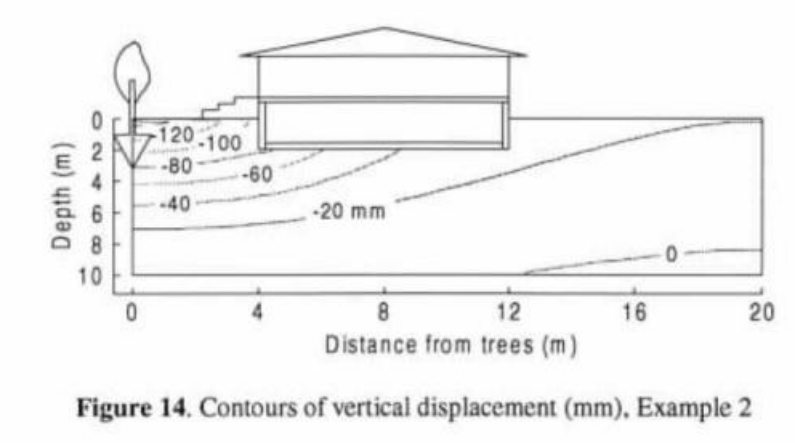


Figure 14. Contours of vertical displacement (mm), Example 2

出典: EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, C. Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen, 2001

図 8.1.37 英国における樹根の水分吸収による家屋の沈下 [C. Vipulanandan, EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, 2001]

8.1.9.2 道路の被害

水に敏感な膨潤性土の上に道路を建設するとしばしば大きな問題が生じる。道路表面の動きの程度は軽量の建物で観察されるものとほぼ同様で、歪みも非常に似ている。膨潤性土の層の厚さの変化、樹木、または水分濃度によって、異なる変状が発生する。

図 8.1.38 には膨潤性土上に建設された道路の変状の進行に関する模式図である。

変状は次のような要因で発生する：

- 膨潤性土層の厚さの不均一性
- 樹木による水分吸収
- 水分濃度の空間的変化
- 降雨・散水などにより地盤が局所的に膨潤
- 道路端部の隆起
- 時間の経過とともに道路中央部の含水率が上昇
- 乾季になると端部は乾燥して沈下し、中央部は水分保持により隆起継続
- この繰り返しで、中央が最も高くなるドーム状変形が進行

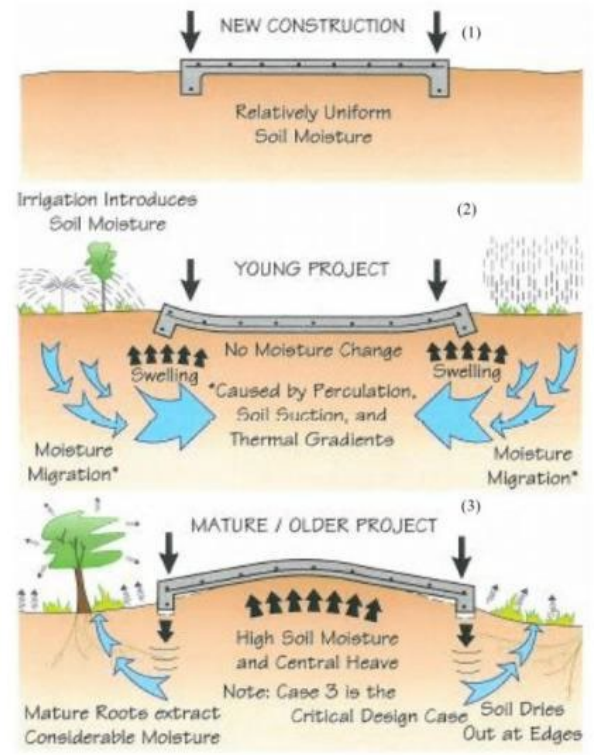


Figure 2.5 Damage progression under expansive soil. (1) New foundation construction above expansive soil, which often has relatively uniform soil moisture. (2) Water from irrigation and rainfall moves under the perimeter of the foundation, resulting in edge lift. (3) Many years after construction, the water will eventually transfer under the centre of the foundation, resulting in centre lift (Day 2010).

出典: Adverse Effects of Expansive Soils on Road Infrastructure and Evaluation of Chemical Remediation Techniques, Hayder Abbas Hasan, 2019

図 8.1.38 道路の変状の進行 [Hasan, 2019]



出典: Enhancing the Engineering Properties of Subgrade Materials Using Processed Waste: A Review, I. Y. Amakye, S. J. Abbey, C. A. Booth, D. Mahamadu, 2021

図 8.1.39 道路の被害事例(うねり)
[I. Y. Amakye, 2021]



出典: https://mintekresources.com/expansive-soils/

図 8.1.40 道路の被害事例(クラック)
[https://mintekresources.com/expansive-soils/]



Fig. 3. Crack propagation in shoulder

出典: Evaluation of Damage to a Road and Sports Complex on Expansive Clays, M. B. Mgangira, P. Paige-Green, 2008

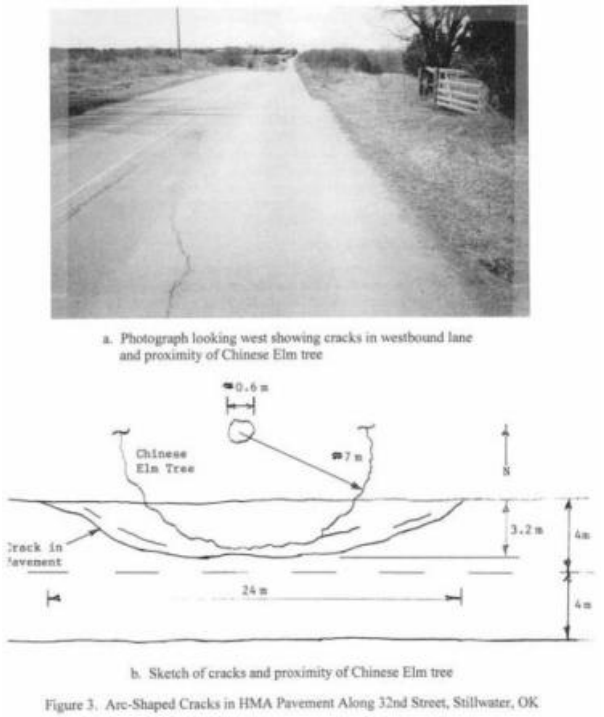
図 8.1.41 道路クラックの断面
[M. B. Mgangira, 2008]



Fig. 4. Crack propagation in outer wheel track

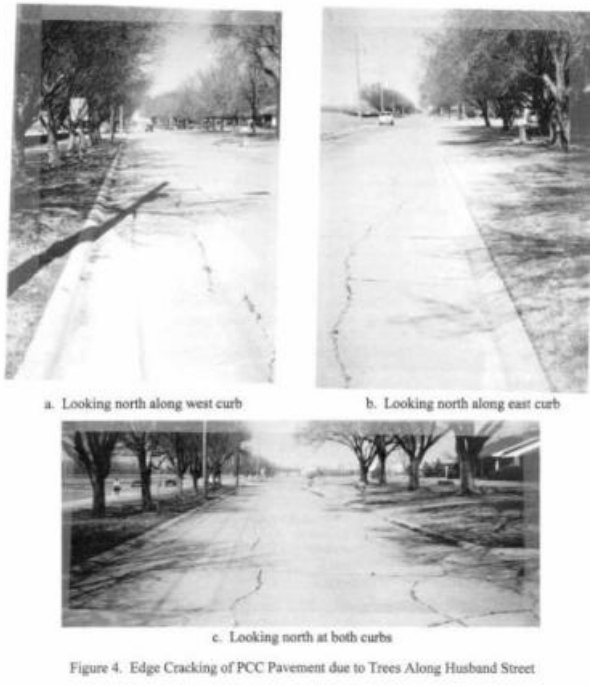
出典: Evaluation of Damage to a Road and Sports Complex on Expansive Clays, M. B. Mgangira, P. Paige-Green, 2008

図 8.1.42 クラックの深度方向伝搬
[M. B. Mgangira, 2008]



出典: EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, C. Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen, 2001

図 8.1.43 樹根による道路のクラック
[C. Vipulanandan, EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, 2001]



出典: EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, C. Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen, 2001

図 8.1.44 樹根による道路のクラック
[C. Vipulanandan, EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, 2001]


Figure 2-2: An entirely impassable section of an earth road (northwestern Ethiopia), due to soil expansiveness during rain periods leading to costly maintenance requirements.

出典: REMOTE SENSING AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF EXPANSIVE SOILS, Fekerte Arega Yitagesu, 2012

図 8.1.45 未舗装道路の泥濘化 [Yitagesu, REMOTE SENSING AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF EXPANSIVE SOILS, 2012]

※人間も土が柔らかく、靴が泥に入り込み、粘り気の多い土のため、靴が抜け出させず、歩行困難となる

8.1.9.3 盛土

図 8.1.46 に示すインドネシアの工業団地では法面掘削に伴い泥岩がスレーキングして斜面崩壊が生じた。斜面崩壊対策として抑え盛土の対策が行われたが、膨潤土の抑え盛土は乾期に大きなひび割れが発生した。暫定対策としてひび割れた斜面にブルーシートで保護を行ったが、雨期に盛土はほぼ全壊するすべりが生じた。膨潤性土は原位置の膨潤性よりも盛土材にした方が 5~10 倍大きくなると言われ、盛土材と使用する場合は十分注意しなければならない。

図 8.1.47 に示すインドの鉄道盛土では盛土下部と多分盛土も含めた膨潤性土の膨潤による軌道の変状が見られた。軌道の変状が大きくなるとバラストによる修復が繰り返し行われている。バラストは毎年盛土内に食い込み、膨潤性土とバラストが混合され、変状は少しずつ少なくなる。混合された箇所の膨潤性は小さくなるが、バラストから水分供給されて強度が弱くなるため、最終的には置換する対策が必要となる。



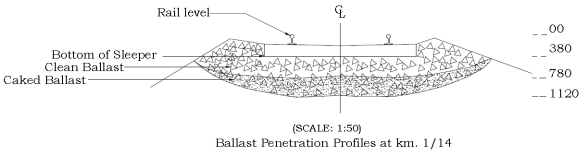
出典：JICA 調査団

図 8.1.46 盛土斜面の被害（インドネシア）



出典：JICA 調査団

図 8.1.47 膨潤性土による鉄道軌道の変状（インド）



出典: Consultancy Report On Rehabilitation Of Weak Formation Between Miraj and Kolhapur Stations, Pune Division : Central Railway, 2007

図 8.1.48 インド鉄道のバラスト貫入 [Consultancy Report On Rehabilitation Of Weak Formation Between Miraj and Kolhapur Stations, Pune Division : Central Railway, 2007]

8.1.9.4 斜面

一般に切土すると斜面付近では大気圧の影響で地下水が上昇する。そこに膨潤性土があると元々乾燥していて強度があった膨潤性土が浸透水により膨潤して強度が低下し、斜面のすべり破壊が生じる可能性がある。自然の地山斜面は長年の膨潤・収縮を繰り返して安定した勾配を有する斜面となるが、道路工事による地下水状況の変化やそれまで経験しなかったような強い降雨を受けると斜面内の地下水が上昇し、それにより膨潤した土が強度の弱いゾーンを形成してすべり破壊を生じさせる可能性がある。すべりが生じてから対策を考えれば良いと考えていても、想定外に大きな地すべりを誘発させると膨大な対策工が必要となる場合があるので注意する必要がある。

インドネシアでは粘土頁岩（Clay shale）が分布しており、この層を切土すると数日でスレーキング風化が始まり、切土前はN値が60以上で粘着力が80～90kPaあったものがほぼゼロに低下し、内部摩擦角も41°から9°まで低下する。粘土頁岩は乾湿繰り返しの風化により膨潤性土となるので留意する必要がある。



出典: REMOTE SENSING AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF EXPANSIVE SOILS, Fekerte Arega Yitagesu, 2012

図 8.1.49 切り土斜面の崩壊 [Yitagesu, REMOTE SENSING AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF EXPANSIVE SOILS, 2012]



出典: Mitigation of Expansive Soils Damages, Joseph Muhirwa, Richard Benda, Robert Sargent

図 8.1.50 斜面の崩壊 [Joseph Muhirwa]



FIGURE 1: Cracking and collapse of expansive soil slopes.

出典: Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, Zhen Huang, Hang Shi, Wei Zhang, Shaokun Ma, Feng Gao, Min Ma, 2022

図 8.1.51 斜面の崩壊 [Zhen Huang, Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, 2022]



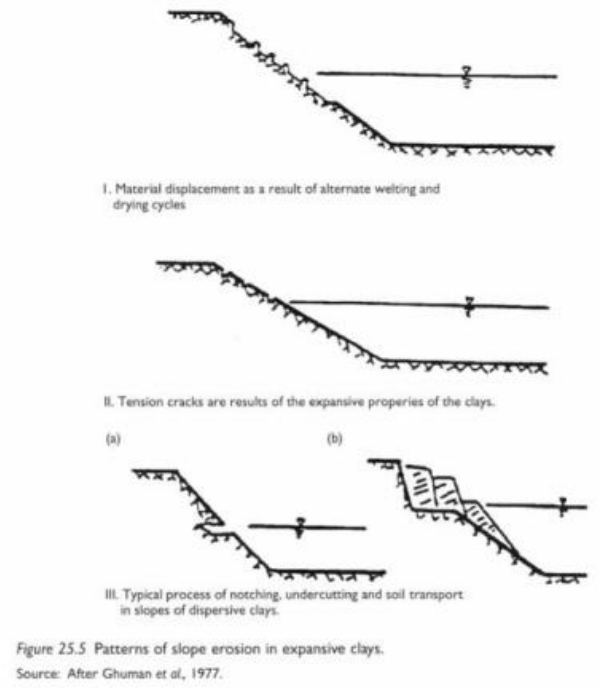
Figure 2 Slope failure at Toll Road Semarang-Bawen, Central Java, Indonesia (Himawan, 2011).

出典: Shear Strength and Durability Behaviors of Compacted Weathered Clay shale Mixture Using Portland Cement, Pintor Tua Simatupang, Idrus M. Alatas, Ayu K. Redyananda, Eko A. Purnomo, 2022

図 8.1.52 Clay shale 切土斜面の崩壊 [Pintor Tua Simatupang, 2022]

8.1.9.5 アースダム

アースダム区域に膨潤性土があると、コンクリート部分または斜面のいずれかに問題が発生する可能性がある。斜面が膨潤性土で作られている場合、（十分に圧縮されている場合でも、水と接触すると膨張し、せん断強度のすべて（Na-モンモリロナイト分散）または一部（Ca-モンモリロナイト）を失い、図 8.1.53 のような問題を起こす可能性がある。この強度の低下は必ずしも瞬時に起こるわけではなく、貯水池区域の水位の変動に伴い進行する。



出典: Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali AI-Rawas, Mattheus F.A. Goosen（2006）

図 8.1.53 膨潤性粘性土によるアースダム斜面の変状パターン［Amer Ali AI-Rawas, 2006］

8.1.9.6 灌漑水路、運河

膨潤性土の運河の典型的な傾斜条件は図 8.1.54 に示すように地下水位飽和線による３つの安定ゾーンに分けられる。

- 1 番目のゾーン：飽和線より下のすべり円弧の底部（先端）の粘着力 c1 の部分である。すべり強度は飽和条件、低土被り圧および乾燥と再飽和の可能性によって影響を受ける。
- 2 番目のゾーン：1 番目より上側の飽和線より下のゾーンである。土は飽和し、中程度の土被り圧がかかり、激しい湿潤と乾燥のサイクルを受ける可能性が低い。したがって、このゾーンの粘着力 c2 は c1 よりも大きくなる。
- 3 番目のゾーン：飽和線より上で自由水条件は存在せず、土の粘着力 c3 は毛細管力やその他の張力の影響を受け、非常に高くなることがある（より安定した状態)。

乾燥収縮亀裂は 3 番目のゾーンでは数 m の深さまで開くことが多いため、膨潤性土が非常に乾燥すると、すべり面の最上部は亀裂により強度がない状態となる。

一方、コンクリートで覆われた運河では、堤防に沿って深い縦方向の乾燥収縮亀裂が発生する可能性があり、斜面の上部の粘土は柔らかくなる。もし、コンクリートにその重量以上の膨潤圧が作用すると、コンクリート面には不規則な亀裂や隆起が生じる。

カンボジア国の灌漑水路では当該地点がカンボジアで問題となる分散性土の地域であるため、その対策のため、図 8.1.56 に示すようにコンクリートパネルライニングの背面を良質土で置換する対策工としていた。特殊土がある地域ではそれが広範に分布していることが多いため、良質土が現場付近で得られない可能性がある。設計では 20km 離れた地域から良質土（ラテライト）を得る計画としていたが、施工業者よりもっと近場に良質土があるとして提案を受けた。施工業者からの提案された土に対して、分散性土の試験方法であるクラム試験を行い、分散性土でないことを確認して施工を行った。完成後、現場から複数箇所でコンクリートパネルが壊れている、孕んでいることの報告を受けた。コンクリートパネル背面の置換土を確認したところ、分散性土はないが、膨潤性土が使用されていることが判明した。カンボジア工科大学の地盤の専門家の教授に確認したところ、膨潤性土についてはカンボジアでは確認されていないと説明を受けた。極めて想定外での膨潤性土の使用であったが、膨潤性土があるところでは分散性土がある可能性があり、その逆もあることに留意する必要がある。

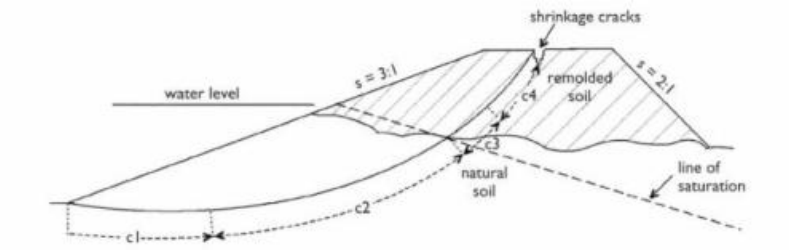


Figure 25.6 Disturbance of cohesion (internal strength) and stability conditions of a slope in canal due to presence of expansive soils.

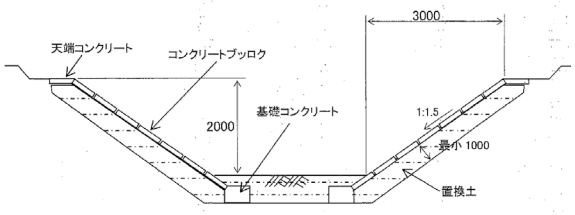
出典: Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali AI-Rawas, Mattheus F.A. Goosen（2006）

図 8.1.54 運河水路の強度状態 [Amer Ali AI-Rawas, 2006]



出典: JICA 調査団

図 8.1.55 灌漑水路の被害（カンボジア国）



出典: JICA 調査団

図 8.1.56 水路の設計断面

8.1.9.7 擁壁と埋設構造物

一般の構造物は通常、垂直方向の膨張力のみを受けるが、擁壁や暗渠やシェルターなどの埋設構造物は水平方向と垂直方向の膨張力の両方を受ける。これらの水平方向の膨潤力は極めて大きくなり、擁壁の大きな変状や構造物のひび割れを引き起こす。図 8.1.57 は工業団地の排水路の被害例である。排水路は通常の土圧しか想定していないため、極めて薄いコンクリート構造となっていた。この水路は先に掘削し、現地土で水路作成後に背面を埋め戻している。自然地盤より盛土した土の膨潤性が大きいため、想定外の膨潤土圧が作用し、水路に損傷を与えている。他の箇所では膨潤土圧と団地盛土からのすべりが生じて水路が倒れ込んでいる。インドの鉄道盛土を横断するボックスカルバートの被害例を図 8.1.60 に示す。側壁部では膨潤圧による変状が見られた。雨期には変状が大きくなり、乾期に膨潤性土が収縮しても元に戻らないことが観察された。この変状は毎年繰り返されていると考えられる。



出典: JICA 調査団

図 8.1.57 排水施設の被害（インドネシア）



出典: JICA 調査団

図 8.1.58 排水施設の設計断面図



出典: JICA 調査団

図 8.1.59 排水施設の被害（インドネシア）



（a）乾期　　（b）雨期

出典: JICA 調査団

図 8.1.60 鉄道盛土のカルバート側壁の膨潤圧による変状（インド）

8.1.10 膨潤性土の対策方法

8.1.10.1 一般的な考慮事項

膨潤性土の対策としては、まず分布する地域を回避することが考えられるが、通常は膨潤性土が分布する地域は広いことが通常なので何らかの対策を検討することになる。構造物や高速道路の建設工事における膨潤性土の対策方法としては図 8.1.61 のようなものがある。また、表 8.1.29 に膨潤性土に適用される安定処理方法の一覧を示す。

(1) 調査時の留意点

適切な対策工を選択する前に、予備的な立地調査と土質調査を行う必要がある。調査にあたっては、排水路の破損、地域的な散水方法、地表水の排水不良、地域的な蒸散特性、暖炉のような熱源の位置など、気候・微気候条件（排水不良、散水、熱源など）も膨潤に影響を及ぼすため、これらの影響要因も考慮する必要がある。また、原位置試験・室内土質試験により膨潤性土の特性と影響範囲を特定することも必要である。

(2) 設計時の留意点

計画する対象施設の調査結果より、膨潤性土が存在することが確認された場合は、膨潤性土の膨張ポテンシャルを評価し、設計に反映する必要がある。膨潤性土の影響を考慮した設計を実施することで、調査・設計・施工まで時間を要することが予想されるが、事前対策により再設計のリスクとコストを回避できることを考慮する必要がある。

(3) 対策工法選定の判断基準

対策工法の選定においては、以下の要素を考慮する。

- プロジェクトの規模や資金の段階投入
- 用途（滑走路、道路等）と性能要求
- 他工法との経済性比較
- 現場土質の経験的判断と施工技術の適用限界

(4) モニタリングと評価

モニタリングと評価にあたっては、事前に現場データをモニタリングし、対策効果を定量的に評価できるようにしておく。また、有識者による現地観察も有効であるが、客観的なデータに基づいた工学的判断により評価することが重要である。

(5) 対策方法の有効性を評価する上でのポイント

対策方法の有効性を評価する上でのポイントは以下の通りである。

- 含水比と体積変化の抑制：季節変動の影響、処理区間と未処理区間の比較により評価
- 地盤の強度：対策方法の強度低下の有無
- 地表面の変形：レベル測量による地表面変化の確認
- 舗装性能：不陸や亀裂の有無など

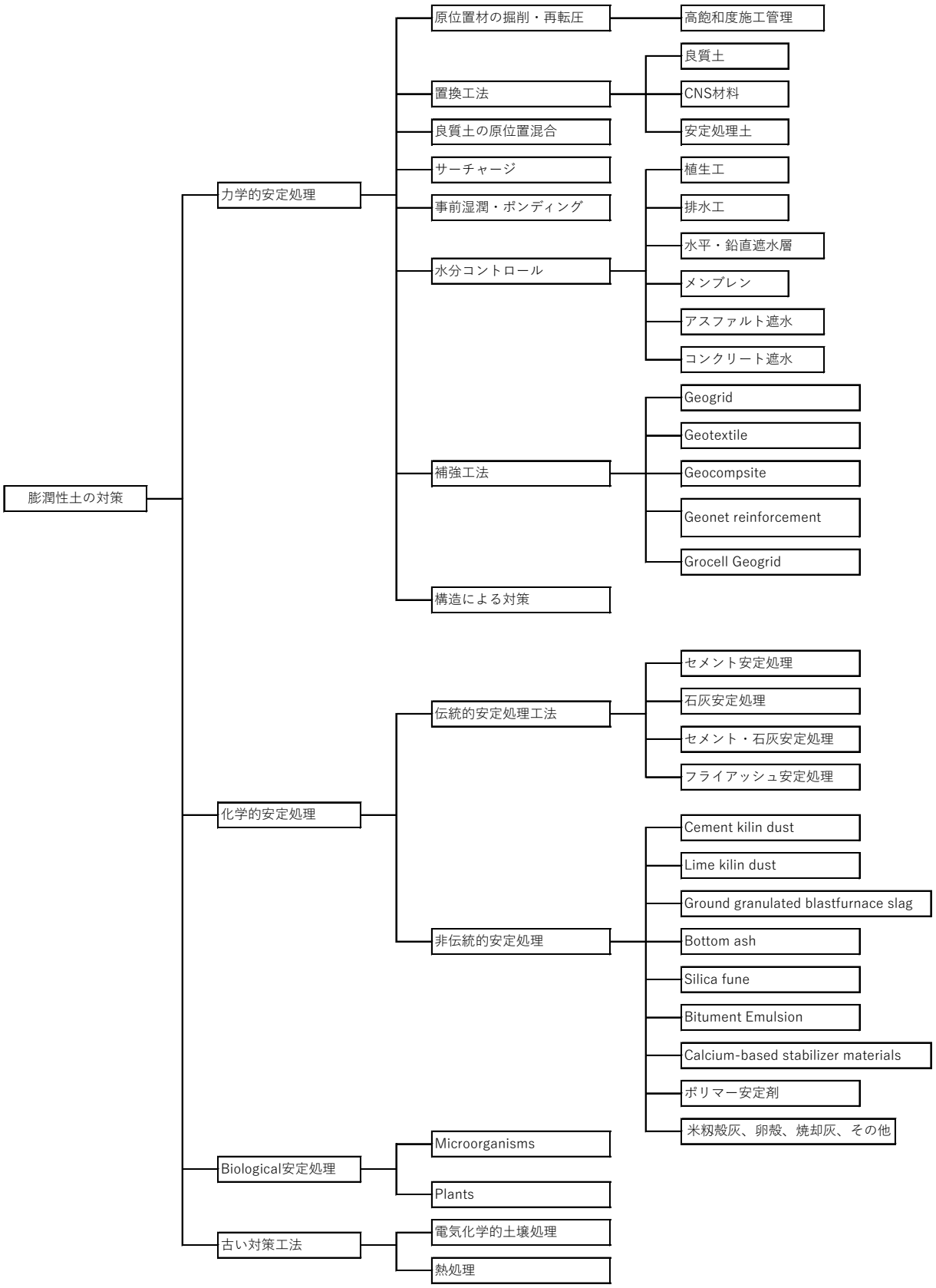


図 8.1.61 膨潤性土の対策工法

出典: JICA 調査団

表 8.1.29 膨潤性土に適用される安定処理方法（Nelson and Miller, 1992）

安定処理方法	処理法概要	利点	欠点
原位置材の掘削・再転圧	最適含水比を超える含水比で低い密度に転圧した土は、高密度および最適含水比未満の土よりも膨潤が少なくなる。 目標密度を達成するには、一般的な転圧方法と施工管理を使用できる。	現場の粘土を使用するので、置換材費用が不要となる。 比較的不浸透性の置換層が形成して、水の浸入を最小限に抑えられる。 余分な水を導入することなく、膨潤の可能性が低減する。	低密度の転圧なので支持力に悪影響を与える可能性がある。 膨潤性の可能性が高い土には効果がない可能性がある。 綿密で注意深い品質管理が必要となる。
置換工法	膨潤性土を除去し、過度の隆起を防ぐために必要な深さまで非膨潤性土で置き換える。 深さは隆起を防ぎ、不同移動を緩和するために必要な重量によって決まる。 Chen（1988）は最低 1～1.3m を提案している。	非膨潤置換は支持力の向上を達成できる。 シンプルで簡単に実施できる。 多くの場合、他の方法よりも迅速である。	水の浸入を防ぐために不浸透性の置換材を使用することが望ましいが、これは高価になる可能性がある。 必要な厚さは実用的ではない場合がある。 水の浸入により建設中に損傷する可能性がある。
CNS 材による対策	インドで基準化されている他対策工で、構造物と膨潤性土の間にクッションとして CNS 材を配置する。 CNS は膨潤性を示さない粘性土で、乾期でもクラックが深く入らないで、膨潤土まで水を浸透させない層として働く。	CNS が入手できれば置換工法と同程度の安価な工法である。 作業が簡単で、施工時間が短い。 置換工法よりも薄い層厚で対策できる。 地中構造物の膨潤圧を低減できる。	膨潤性土がある地域では近場で CNS 材の土取場がなく、遠方からの運搬コストが高くなる。
サーチャージ工法	膨潤性が比較的小さい膨潤性土では、膨潤圧に対抗する盛土を行うことで膨潤量を抑制できる。	膨潤圧が小さい場合は小さな盛土で対策できる。 経済的で、施工も容易。 使用する材料は粒状土、不透水性材料と何でも使用できる。	膨潤圧が大きいと採用できない。 検討時は膨潤性が小さくても、膨潤性土の含水状態の繰り返しの変化を与えると膨潤性が大きくなり、対策効果がなくなる可能性がある。
事前湿潤、ポンデング	建設前に水分含有量を増やして隆起を促進する。 堤防または土手を造成して池に水を貯め、土を湿潤させる。 代わりに、溝を使用したり、垂直排水溝を使用して土への水の浸透を早めたりする。	土の透水性が十分に高く、比較的速やかに水が浸透する場合（例えば亀裂が多い粘土）に効果となる。	十分な湿潤を得るには数年かかる場合がある。 強度の低下や破損が発生する場合がある。 湿潤はアクティブゾーンより浅い深さに限定される。 建設後に水の再分配が発生し、隆起を引き起こす可能性がある。
化学的安定処理	石灰（重量比 3～8%）、セメント（重量比 2～6%）と併用されることが多く、塩、フライアッシュ、有機化合物はあまり使用されない。	すべての細粒土は化学安定剤で処理できる。 膨潤性土の塑性と膨潤の可能性を低下させるのに効果的である。	土の化学特性は化学処理に悪影響を及ぼす可能性がある。 化学安定剤は潜在的なリスクを伴うため、健康と安全を

安定処理方法	処理法概要	利点	欠点
	通常、石灰は表面（約 30cm）に混ぜられ、密封、硬化、圧縮される。 石灰はスラリーの形で注入されることもある。 石灰は、塑性の高い粘土を扱う場合に最適となる。		慎重に考慮する必要がある。 環境リスクも発生する可能性がある。たとえば、生石灰は特に反応性が高く、低温では硬化が阻害される。
水分コートロール工法	膨潤性土に水分が入らないように水平方向、鉛直方向に遮水層／膜／構造を作る。	適宜に対策工を採用すると比較的高額にならない対策工とすることができる。	道路や空港のように面積が広いところでは対策費用が高くなる。 対策の想定範囲外から水が浸透すると対策効果がなくなる。 遮水効果を高い材料を用いるほど高価な対策となる。

出典: JICA 調査団

8.1.10.2 準備工ですべき事項

(1) 敷地整備の重要性

プロジェクトの敷地の整備（整地・切土・盛土）は構造物の性能全体に影響を与える重要な工程であり、作業中に事前調査では判明しなかった地盤特性が明らかになることがある。地盤技術者が整地や掘削の後に現場を検査し、調査結果を再評価・修正することは重要である。検査にあたっては予備調査を行った技術者が行うことが望ましい。特に重要なことは薄いレンズのような土の不規則性、予備調査で指摘されたものとは異なる層やポケットの存在を確認することである。

(2) 植生の影響と処理

植生も土中水分に影響を及ぼし、その結果、建設現場の地盤特性や支持力にも影響を及ぼす。樹木や低木の根は土を 5m 以上の深さまで乾燥させることがある。また、コンクリート舗装に沿って草が繁茂している場合でも下層の土の水分が失われ、収縮や支持力の低下を引き起こす可能性がある。直径 12～25mm を超える主要な根系は除去することが推奨される。原則として、高さ約 2m 以上の植物は除去することが望まれる。

8.1.10.3 対策方法の概要

本項では、「8.1.10.1 一般的な考慮事項」で挙げた膨潤性土の対策方法のうち、主要な対策方法についてピックアップし、以降に概要を整理した。

(1) 原位置材の掘削・再転圧

1) 基本原理

膨潤性土の影響は乾燥密度を下げることによって減少させることができる。図 8.1.62 に様々な含水比と密度状態における膨潤率を示す。同じ密度でも最適含水比より高い含水比で締固めた方が膨潤率は小さくなる。したがって、高含水比×低密度での締固めが膨潤性土の膨張抑制には有効である。

2) 実施上の留意点

室内土質試験による評価は、現場条件を正確に再現するように配慮する必要がある。含水比と密度の管理が重要であるため、品質管理試験は頻繁に実施し、盛土の品質を確保することが重要である。この方法は、最適含水比より湿潤側で管理するので、透水性は低く、強度は小さくなるため、設計上、考慮する必要がある。

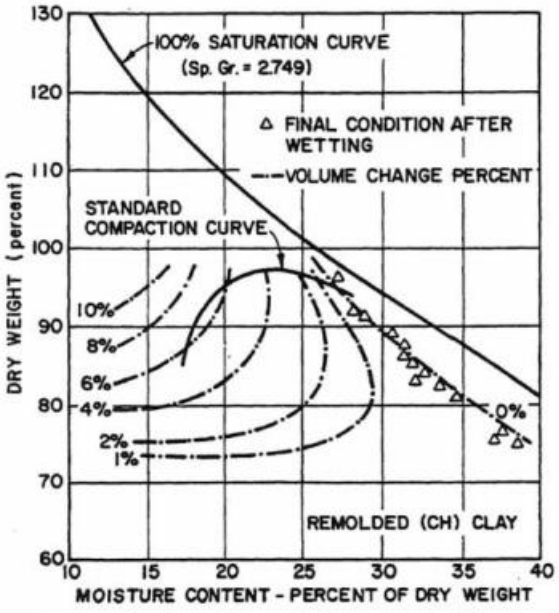


FIGURE 6.1. Percent expansion for various soil placement conditions under a load of 1 psi (Holtz, 1959).

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, John Wileyey, 1992

図 8.1.62 様々な土の水分･密度条件に対する膨潤率（7kPa 載荷時）[John D. Nelson D. J., 1992]

3) 本工法の適用可能なケース

本工法が適用できるケースは次の通りである。

・ある程度の変形や低強度が許容可能な場合（例：住宅地の盛土、地方道路など）
・土が乾燥していないこと
・長期間を要する施工において、含水比の管理が適切に実施できること

4) 本工法の長所・短所

表 8.1.30 に置換工法の長所・短所を示す。

表 8.1.30 置換工法の長所･短所

項目	説明
長所	･現場の粘土を再利用可能→土の運搬費不要 ･適切に締固めれば下層土への水分移動を防止できる ･土を掘削･粉砕･再転圧するだけで経済的に施工可能
短所	･低密度の締固めでは地耐力が不足する可能性 （ただし、軽量構造物なら問題なし） ･土質によっては体積変化が抑えられず、置換が必要な場合がある ･品質確保のため試験頻度が高くなり、コスト･時間が増大

出典: JICA 調査団

5) 施工効果を高めるための工夫

本工法は、適切に含水比と密度を管理することで施工効果を高めることができる。また、必要に応じて石灰安定化や良質土への置換との併用も有効である。

本工法は自然状態での乾燥密度が高い乾燥した土に対して特に効果的で、ひび割れを有する土では均一で不透水な表面層の形成が有効である。

(2) 置換工法

1) 基本原理

置換工法は、膨潤性土を除去し、非膨潤性土で置換する工法である。本工法は、安定した基礎材料を提供する経済性の優れた対策工である。工事の施工費に大きな影響を与えない場合は、膨潤性土を完全に除去することが望ましい。しかし、一般的には膨潤性土の地層は深い位置まで分布しているため、完全な除去と置換を行うことは経済性の観点で困難となることが多い。その場合には、過度の隆起を防ぐために合理的な掘削・置換深さの設定が必要である。

2) 掘削・置換の深さの設定

膨潤量の推定には、乱れの少ないサンプリングで試験を実施する。掘削深さは「膨潤圧と同等以上の埋戻し重量」や「不同沈下抑制に必要な深さ」を考慮して、設定する。表 8.1.31 に塑性指数に応じた撤去厚さの目安を示す。

表 8.1.31 塑性指数に応じた撤去厚さ［T. Ashok Kumar, 2020］

塑性指数 IP(%)	撤去厚さ	
	(ft)	(m)
10~20	2	0.6
20~30	3	0.9
30~40	4	1.2
40~50	5	1.5
>50	6	1.8

出典: A Critical Review on Stabilisation of Expansive Soils With Compensating Materials, T. Ashok Kumar, T. Thyagaraj, R.G. Robinson, 2020

3) 効果と留意点

置換によって膨潤性土の体積を減らすことで、地表変形の抑制が可能である。ただし、下層の膨潤性土が高い膨潤性を示す場合は、置換しても表面変状を完全には抑えきれないことに留意する。また、地表からの水の侵入（表面流出、水道破損など）によって、置換下層に再膨潤が生じるリスクもある。

4) 長所・短所

表 8.1.32 に置換工法の長所・短所を示す。

表 8.1.32 置換工法の長所･短所

項目	説明
長所	･高密度転圧が可能で、高い支持力が得られる ･特別な建設機械が不要で、経済的である ･施工遅延が少なく、他工法より効率的である
短所	･非膨潤性･非透水性材料の入手が課題（遠方で入手する場合、コスト増） ･必要な置換厚さが大き過ぎる場合、現実的でない ･粒状材料は浸透源となる可能性があり、長期的な水供給源となり得る

出典: JICA 調査団

(3) サーチャージ

1) 基本原理

サーチャージは膨潤性土の膨潤圧を打ち消す荷重を事前にかけて膨張を防ぐ手法である。低～中程度の膨潤性土に適用できる。

2) 留意点

適用の可否を判断するため、原位置試験および室内土質試験を実施し、膨潤圧を正確に評価する必要がある。試験中は現場での条件をほぼ再現する必要がある。膨潤圧が大きくなると、圧力と膨潤の関係が非線形になるため、サーチャージの使用は非効率的である。

多くの膨潤性土は通常のサーチャージ荷重だけでは制御できないほど高い膨潤圧を示す。約 25kPa までの膨潤圧であれば、1.3m 盛土とコンクリート基礎でコントロールできる。しかし、土によっては 400kPa もの高い膨潤圧を持つものもあり、その場合、盛土は 20m 以上必要となるので、盛土の安定性と必要土量を考慮すると、適用が難しい。

3) 適用条件

サーチャージ工法が最も効果的なのは地方道路等の建設プロジェクトで多少の隆起が許容できる場合である。高い基礎圧力を伴う大規模プロジェクトで、予測される膨潤圧が低いか中程度である場合にもこの方法が有効である。

(4) 事前湿潤 prewetting

1) 基本原理

本対策は、施工前に膨潤性土の含水比を上げてあらかじめ膨潤を発生させ、施工後の変形を抑制・回避するものである。高含水比を維持できれば、それ以上の膨潤による損傷は発生しないという前提に基づいている。

2) 代表的な方法

本対策の代表的なものとしては、表 8.1.33 が挙げられる。

表 8.1.33 事前湿潤の代表的な方法

項目	説明
湛水（Ponding）	堤防や土塁で水域を形成し、水を貯留して浸透させる
トレンチ併用湛水	基礎直下に掘削された溝に湛水
サンドドレーン併用	垂直に設置された砂柱で浸透促進（Blight & deWet, 1965）
界面活性剤・凝集除去剤	透水性の改善を目的とした添加剤の使用

出典: JICA 調査団

3) 留意点

本対策の留意点を表 8.1.34 に取りまとめる。本対策の効果の発現には長期間が必要で、高透水性・多亀裂土で有効など効果が限定的である。また、工期・施工安定性の面で他の工法（置換、化学安定処理等）に劣るため、補助工法としての活用や予算・コストに余裕があるプロジェクトでの採用が現実的である。

表 8.1.34 事前湿潤の留意点

項目	内容
適用できる土	土にある程度の透水性や亀裂があることが望ましい
湿潤深度の限界	湿潤前線はアクティブゾーン全体まで届かない可能性がある
含水率と膨潤	初期含水率と目標含水率の差が膨潤量に影響
湛水期間の目安	1ヶ月～1 年以上（高密度粘土では長期化）
強度低下の懸念	長期湛水により支持力の低下、施工困難、斜面不安定が生じやすい
適用対象	膨潤圧が低～中程度の地盤に限定される

出典: JICA 調査団

(5) 水平および垂直防湿バリアによる水分コントロール

1) 基本原理

水平および垂直防湿バリアは、膨潤性土の膨張の原因となる地表の水分変化を遮断し、下層の含水比の変動を緩和・均一化させることを目的とする。構造物直下の含水比の変動を遅延・拡散させることによって、隆起をゆっくり・均一に抑制することができる。他の対策（置換工など）と併用することで、効果が増幅する。本対策の意義は、構造物の縁部で発生しやすい極端な含水比変動（エッジ効果）の影響を基礎や舗装から遠ざけることにある。本対策により、水の移動経路が長くなり、拡散時間が延びること、毛細管現象による水分の分散が促進されることが期待される。防湿バリアはシンプルながらも含水比制御という膨潤対策の本質的要因に直接働きかけるため、コスト効率に優れた対策手段として注目されている。

2) 設計・施工上の留意点

防湿バリアの設計・施工上の留意点として、以下が挙げられる。

- バリアの接合部（シーム）：目地や裂け目、穴を丁寧に密閉することが重要
- 植物の配置　　：根が深く伸びる植物はバリアから十分離して植える
- 適用時期　　：新設前の予防措置にも、修復手段として利用可能

3) 水平防湿バリア

建物の周囲や道路の路肩に設置される水平防湿バリアは覆われた領域への水分の移動を制限する。Woodward-Clyde-Sherard（1968）および Hammitt と Ahlvin（1973）により水平防湿バリアの適用方法のガイドラインが作成されている。水平防湿バリアはメンブレン、剛なバリア（コンクリートなど）、フレキシブルなバリア（アスファルトなど）に分類できる。バリアの幅は少なくともエッジ距離以上としなければならない。また幅に何らかの安全係数を加えるのが適切である。

a) メンブレン

メンブレン（geomembrane）は不透水性の薄膜シートであり、膨潤性土中の水分移動を遮断する目的で、建物の基礎や道路舗装などに利用される。

① 材料と仕様

- 主に使用される素材：ポリエチレン、PVC（ポリ塩化ビニル）、ポリプロピレン、高密度ポリエチレン（HDPE）
- 厚さ：4～20 mil（0.1～0.5 mm）
- 厚さ 10mil（0.25 mm）以下の薄膜は破損リスクが高いため特別な施工管理が必要

② 施工時の留意点

- 施工面の整地と鋭利な突起物・有機物の除去が必要
- メンブレンは紫外線や物理的損傷に弱いため、覆土などで保護層を設ける
- 端部の密閉（シーリング）が重要：漏水や膨潤防止のため、接着剤・シーラント等で固定
- 根の侵入対策：大きな植物はメンブレンから植物高さの 1～1.5 倍以上の距離を確保
- 外縁での水の滞留を防ぐため、排水溝（サブドレーン）の設置が推奨される

図 8.1.63 は、典型的な建物の基礎防湿壁を示す。

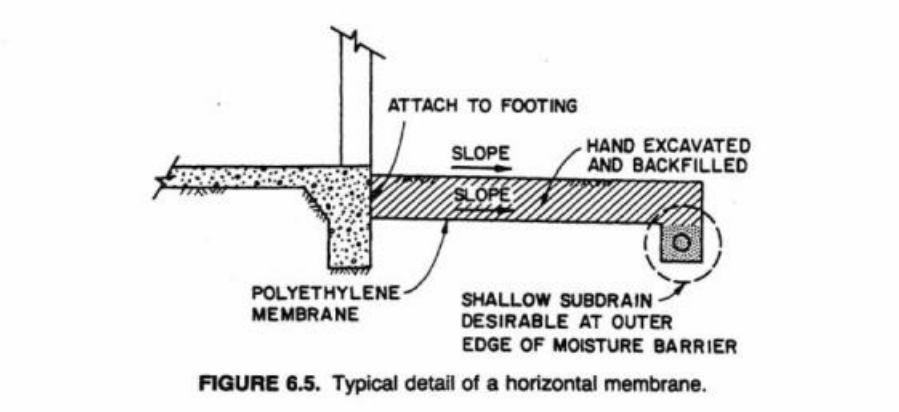


図 8.1.63 水平メンブレンの典型的な詳細 [John D. Nelson D. J., 1992]

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller（John Wileyey, 1992）

③ 適用事例

メンブレン封入土層（MESL）は、あらかじめ作製されたメンブレンを利用するもので、体積変化を制御するために米国陸軍工兵水路実験場で適用された。この方法では土の膨潤電位は高いままであるが、封じ込められた土層への水の移動が阻止されるため、膨潤性が活性化することはなかった。メンブレンの構成を図 8.1.64 に示す。薄い層から中程度の厚さの問題土であれば、この技術を使って安定化させることができる。

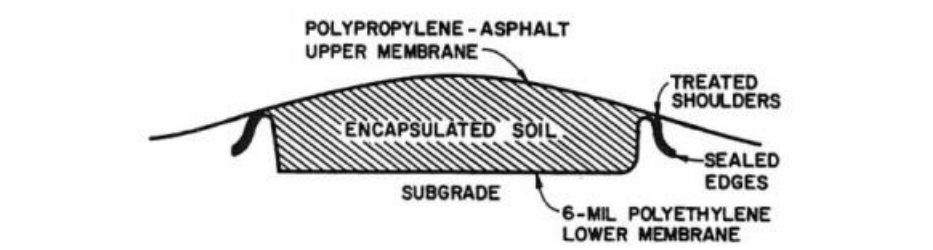


FIGURE 6.6. Typical cross section of a membrane encapsulated soil layer for airfields (Hamitt and Ahlvin, 1973).

図 8.1.64 飛行場のメンブレンによる典型的対策断面 [John D. Nelson D. J., 1992]

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller（John Wileyey, 1992）

b) アスファルト

アスファルトは路面水の下層への浸透を防ぐ不透水性の膜材として、道路建設や基礎構造物で広く使用されている。特に膨潤性土への水分供給を遮断し、膨張・変形の抑制に効果的である。

① 材料および施工方法

- 吹き付けアスファルト：現場で液状のアスファルトを直接散布（標準量：5.9 L/m²）
- プレハブアスファルトシート：厚さ 12 mm 以下のものが使用される
- アスファルトゴム乳剤・ロードタール：柔軟性のある防水膜として利用される

② 特徴

- 防水性：表面水の浸透を強力にブロック。コンクリートよりひび割れが少ないため効果的
- 柔軟性：膨潤性土による地盤変位に追随しやすく、重大な損傷を起こしにくい
- 施工性・補修性：現場での補修が容易で経済的

③ 使用上の留意点

- 敷設面は平滑で清掃されている必要がある
- 支柱や排水構造物との接合部は完全に密閉する
- 周辺からの水の侵入に対しても、端部の対策が重要
- アスファルトは表面の凹凸や不陸に弱く、均一な散布が困難になることがある
  （例：砂層上での散布失敗例あり）
- 吹き付け量の調整
  （例：ロードタールは 3L/m²と 2L/m²で同様の防水効果を得たという実証あり）

④ 適用事例

下地と側溝の上に吹き付け膜とアスファルト舗装の様々な組み合わせが使用されている。アスファルト舗装は溝のインバートから約 40cm または舗装の完成勾配から約 25cm の垂直距離で、下地、縁の斜面、および裏斜面全体に適用されるべきである。図 8.1.65 は連続吹き付けアスファルト膜とフルデプスアスファルト舗装の例を示している。経済的に可能であれば 4 車線の高速道路の中央分離帯も幅が 2 車線以下であれば、アスファルト膜処理に含めるべきである。

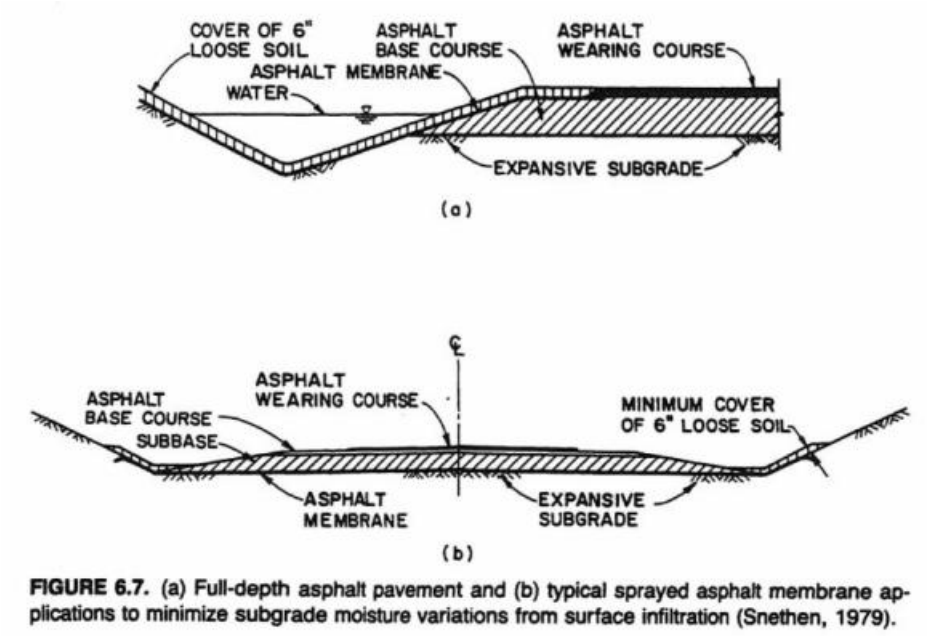


FIGURE 6.7. (a) Full-depth asphalt pavement and (b) typical sprayed asphalt membrane applications to minimize subgrade moisture variations from surface infiltration (Snethen, 1979).

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, John Wileyey, 1992

図 8.1.65 (a)全面アスファルト舗装と(b)表面浸透による下層水分の変化を最小化するための典型的な吹き付けアスファルト膜の適用（Snethen, 1979）[John D. Nelson D. J., 1992]

c) 硬質バリア

硬質バリアは建物基礎周囲に設置されるコンクリート製の防湿・防水構造（例：エプロン・歩道）であり、地盤への水分侵入を防ぎ、含水比の安定化を目的とした対策法の一つである。

コンクリートによる硬質バリアは構造的信頼性が高く、膨潤性土の水分制御に有効となるが、接合部の柔軟性確保・排水計画・膨潤対策の適切な設計が不可欠である。アスファルトやメンブレンなど柔軟バリアとの併用でより高い効果が期待される。

① 材料と構成例

- コンクリートエプロン（apron）
- 歩道（sidewalk）
- 剛性のある舗装構造

これらは単独でも、あるいはアスファルト膜や柔軟なジオメンブレンと組み合わせて使用されることで効果が高まる。

② 機能と効果

- 水分遮断：建物基礎周辺の水の侵入を抑制し、含水比を一定に保つ
- 地盤の安定化：膨潤や収縮による不同沈下を防止
- 長寿命・堅牢性：耐久性に優れ、物理的損傷に強い構造

③ 設計・施工上の留意点

- 継目（ジョイント）とシーリング
  - 剛性が高いため、熱膨張・収縮や地盤の動きによる亀裂が生じやすい
  - 柔軟なシール材で密閉されたジョイントが必要
- ヒービング（heaving）対策
  - エプロン端部で膨潤による「持ち上がり（ヒービング)」が生じる可能性あり
  - バリアが建物方向に傾斜してしまうと排水不良・浸透リスクが高まる
- 構造との接合
  - 歩道・エプロンは継手棒（dowel bars）でしっかり構造物に固定
  - 特に浮き・沈下による離脱を防ぐ
- 勾配設計
  - バリア表面は外側へ水が流れるように勾配設計
  - 表面に水たまりができないように排水工を併設

4) 縦型防湿バリア

垂直防湿バリア（Vertical Moisture Barrier）は建築物・舗装の端部や側部に地中へ設置される不透水性のバリア（遮水壁）であり、地中水の横方向移動を抑制し、地盤の膨張や不同沈下（ヒービング）を防止することを目的とする。

① 期待される効果

- 隆起速度の抑制：地中水分の移動速度を制御し、膨張挙動を遅らせる
- 含水比の均一化：建物や舗装下の水分分布を均一に保ち、不同隆起を軽減
- エッジ効果の抑制：特に構造物の端部（エッジ）での効果が顕著

② 設計・施工上の要点

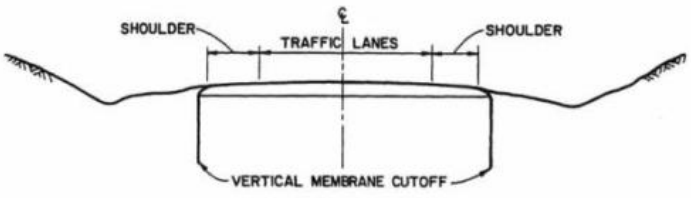
・ 推奨設置深度
- 「アクティブゾーン（地表の季節変動帯)」の深さ 4～5m に基づく設計
- 理想：アクティブゾーン全体、推奨：1/2～2/3 深さ
- 0.6～1.0m 未満では効果が乏しい

・ 材料
- ポリエチレン（HDPE 等）不透水膜
- コンクリート、貧コンクリート
- アスファルト＋ゴムタイヤ
- セメント混合スラリー
- 毛細管遮断剤（粗粒石灰岩など）

・ 留意点
- 砂埋戻しは NG：貯水層化し、漏水のリスクあり
- 表面排水の確保で性能が向上
- 掘削できない場合：構造物から 0.6～1.0m 離して設置＋水平バリアで接続

③ 適用事例

垂直バリアは道路建設に適用できる。バリアがない場合、含水比は中央部に向かって増加し、端部では減少するため、下層が高膨潤性土の場合は舗装の歪みの原因となる。図 8.1.66 は、典型的な高速道路への適用例を示している。



NOTE: THE DEPTH OF THE MEMBRANE CUTOFF SHOULD EXTEND TO THE DEPTH OF ACTIVE ZONE; HOWEVER, IF THE SOIL CONDITIONS AND THE PRACTICALITY AND ECONOMICS OF THE INSTALLATION ARE NOT FAVORABLE THEN THE DEPTH SHOULD BE REDUCED TO FACILITATE INSTALLATION.

FIGURE 6.9. Example of a vertical membrane cutoff in highway construction (Snethen, 1979).

注：バリアのカットオフの深さは、アクティブゾーンの深さまで延長すべきである。しかし、そのような条件や、設置の実用性や経済性が好ましくない場合は、設置を容易にするために深さを減らすべきである。

図 8.1.66 高速道路建設における垂直メンブレーンカットオフの例 [John D. Nelson D. J., 1992]

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller（John Wileyey, 1992）

(6) 地下排水路

ペリメータドレーンは建物基礎の周囲に設けられる排水システムであり、自由水の侵入を防ぎ、土中の水分状態を制御することで、膨潤性土による基礎の変形や隆起を抑制する目的で用いられる。

1)主な目的と効果

粘土層や粘土岩盤上の透水性材料と組み合わせることで、地下水の停滞や侵入を防止することができる。しかし、ペリメータドレーンは基礎直下の水分には影響が小さく、完全な対策にはならないため、基礎下部の隆起防止には限定的である。

2)構成

図 8.1.67 にペリメータドレーンの構成を示す。主な構成は、有効パイプ（perforated pipe）、砕石・砂利、ジオテキスタイルである。設置位置について、外側（図 8.1.67(a)）は基礎外部からの水をブロックでき、効果が高いため推奨される。一方、内側（図 8.1.67(b)）は改修時などに使用されるが、浸透水を完全に遮断できない。

3)設計上の留意点

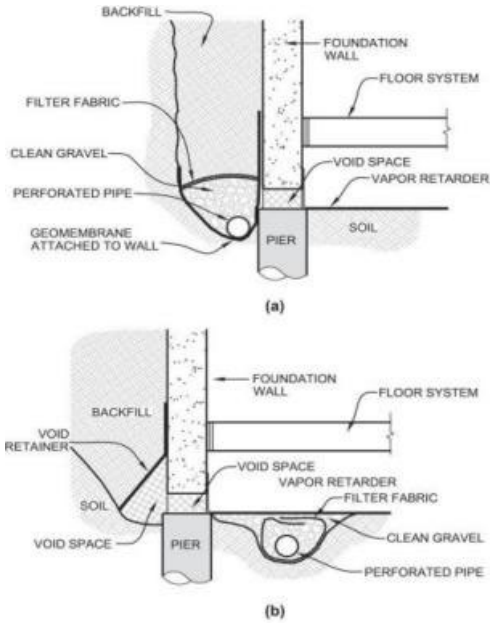
- パイプの高さ　：基礎底またはスラブレベルの数インチ下
- 勾配　：2%程度の安定した勾配が望ましい
- パイプ種類　：たるみ防止のため硬質パイプを使用
- 排水先　：重力排水・エリアドレーン・排水溜りなどへ排出

地下排水路は特に、①過剰掘削後に再圧縮された膨潤性土、②浅い基礎構造に対して水の蓄積・過飽和リスクが高く、事前の水分状態の予測と適切な排水設計が不可欠となる。

4)よくある問題と対策

① ポンプの未設置：多くの事例では排水ポンプが設置されておらず、機能不全であるため、確実なポンプの設置が必要である。

② 再浸透のリスク：排出先が基礎や埋戻しゾーンに近すぎると再侵入のおそれがある。



出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh（Geoff）Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson, Wiley, 2015

図 8.1.67 ペリメータードレーン［John D. Nelson K. C., 2015］

(a)は外部、(b)は内部

脚注: Perimeter drains は、家の基礎の周りを囲むパイプのシステムで、雨水や雪解け水などを基礎から遠ざけて、地下室や床下を乾燥させる役割を担う。Weeping tile や French drain とも呼ばれる。

(7) 補強工法

鉄道や道路では線形的に盛土区間が必要となるが、膨潤性土は広い地域に分布しているため、近場から良質な盛土材料を確保することが難しい場合が多い。

盛土全体を膨潤性土で構築した場合、自然地盤の場合よりも大きな膨潤特性を示すため、大きなひび割れが生じ、雨期に崩壊が生じる可能性がある。

膨潤性土の盛土の対策としては、CNS 層のような土で膨潤性土を被覆する方法、膨潤性土に良質土を混合して盛土する方法、膨潤性土を安定化処理して盛土する方法などがある。膨潤性土上に直接盛土する場合には、盛土下部に浸透水が入らないように鉛直遮水層を設ける対策も必要となる。

安定処理して盛土する方法の場合、膨潤性土の良質材としての混合材料は粘性土となる可能性があるため、高盛土では強度の点で問題となる。また、限界盛土高さで盛土ができたとしても、少しでも水が浸透するような施工不良箇所がある場合、膨潤して隆起やすべり破壊が生じる可能性がある。

盛土構造物の補強対策として、ジオグリッド等を用いた対策が行われる場合がある（図 8.1.68～図 8.1.70）。

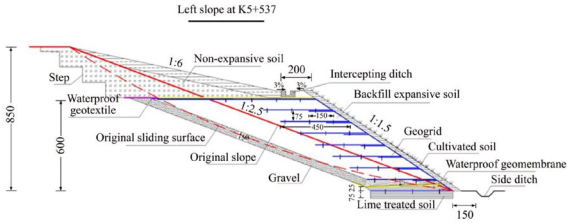


Figure 12 Structural design diagram of geogrid reinforced cut slope (unit: cm)



Figure 13 Photographs taken in construction process: (a) Compaction; (b) Geogrid back-wrapping

（A） 設計断面　　（B） 施工状況

出典: Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application, ZHANG Rui, LONG Ming-xu, LAN Tian, ZHENG Jian-long, GEOFF Chao, 2020

図 8.1.68 Geogrid を用いた施工断面と施工状況 [ZHANG Rui, 2020]

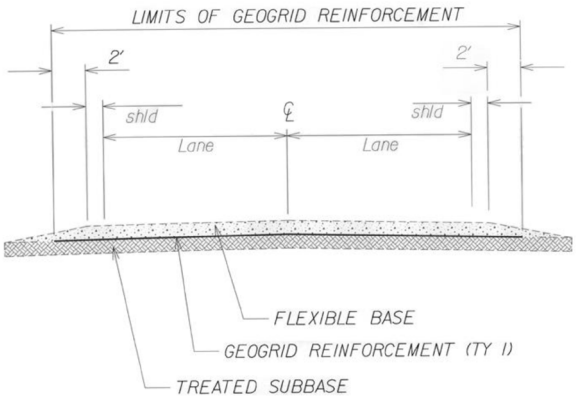
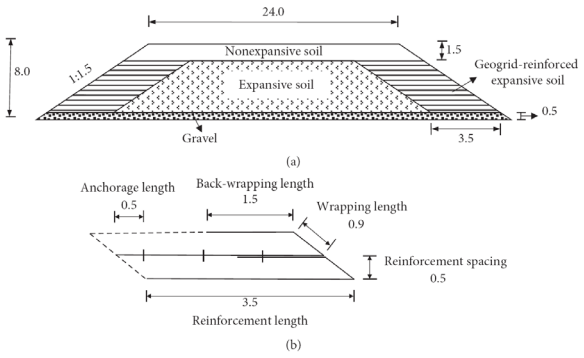


Figure 3: Expansive soil geogrid reinforcement
Source: Cabalar, Karabash and Mustafa (2014)

出典: The Role of Mathematical Models in Responding To Pavement Failures and Distresses in Texas, Azhar A. Majeed, Enstar M. Kafi, 2019

図 8.1.69 ジオグリッドを用いた道路の補強 [Azhar A. Majeed, 2019]



出典: Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes, Rui Zhang, Mingxu Long, Jianlong Zheng, 2019

図 8.1.70 ジオグリッドを用いた道路盛土の補強 [Rui Zhang, 2019]

(8) 構造による対策

膨潤性土の基礎の対策には、構造的対策（例: 補強されたラフト)、地盤改良による対策と両方の組み合わせた対策がある。

基礎の対策の主な目的は主に差動による動きの影響を最小限に抑えることである。膨潤性土を扱う際には以下の２つの方策がある。

- 構造を土の動きから分離する
- 膨潤の挙動に耐える基礎を設計する

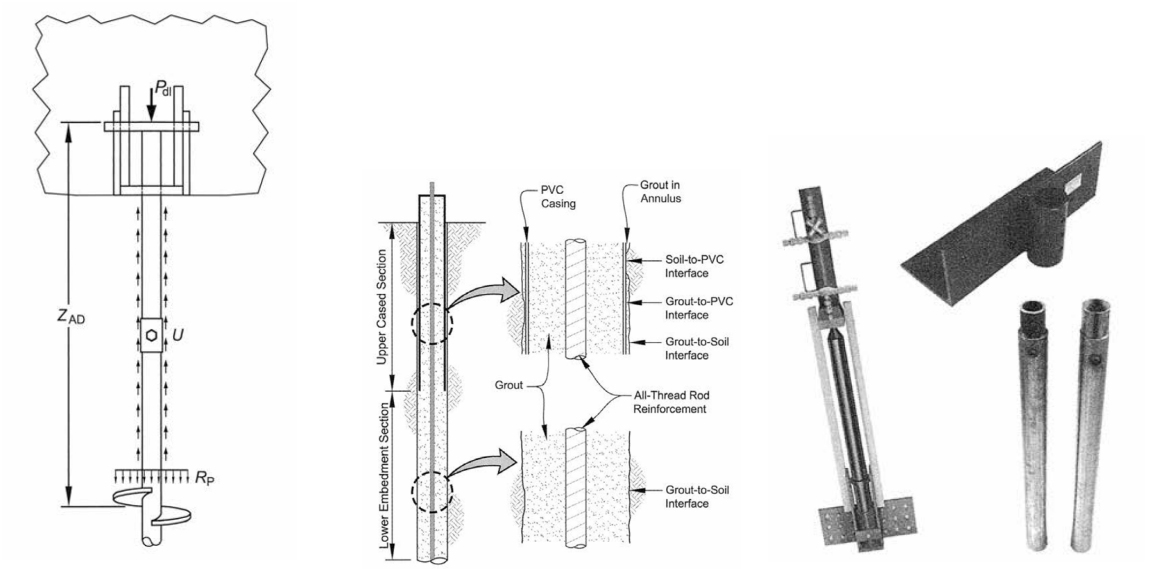
世界中で膨潤性土に対して使用されている主な基礎の種類は表 8.1.35 の通りである。

表 8.1.35 基礎設計の対策方法 [John D. Nelson K. C., 2015]

基礎のタイプ	設計概念	長所	短所	リスク評価
修正された連続外周直接基礎	不均一な土の動きに抵抗する堅固な基礎を用意する。 支持圧力を上げて隆起を減らす。	シンプルな構造 特別な設備は不要	膨潤ポテンシャルが非常に低い土でのみ有効。	膨潤性が非常に低い土の場合、リスクは低から中程度。 膨潤性が中程度から高い土の場合、リスクは高い。
掘削杭と地盤梁基礎	膨潤性土から構造物を隔離する。	長年にわたる実績がある。 様々な土タイプで使用できる。 膨潤の可能性の高い土に信頼性が高い。	厳密な設計と建設が必要。 建設コストが高くなる可能性がある。	適切に設計・構築されるとリスクは低い。
特許杭	膨潤性土から構造物を隔離する	膨潤性土上の構造物の修復によく使用される。 アクセスが制限されたエリアの天井高の低い用途にも設置できる。 膨潤性の高い土に信頼性が高い。 基礎の横方向の荷重に耐えられるように、傾斜を付けて設置できる。	厳密な設計と施工が必要 専門業者が必要。 設置性と耐荷重性を確認するために現場での試験用桟橋が必要になる場合がある。 垂直に設置された特許取得済みの橋脚は横方向の力に対する抵抗力がほとんどない。	適切に設計・構築されるとリスクが低い。
補強された地上スラブ（ポストテンションスラブを含む)	土の不均一な動きに抵抗する強固な基礎を提供する。	深基礎よりも早く建設できる。 低～中程度の膨張力を持つ土に信頼性が高い。	適切な設計と施工品質管理が行われていない場合、パフォーマンスが低下したことがある。 建物の構成は比較的単純である必要がある。 ポストテンションスラブのテンドンまたはアンカーが破損した場合、修復のために追加の操作が必要となる。	低から中程度の膨潤ポテンシャルを持つ土の場合、低から中程度のリスク。 高膨潤ポテンシャルを持つ土の場合、中から高程度のリスク。

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh（Geoff）Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson, Wiley, 2015

脚注：特許杭 PATENTED PIERS
特許杭（らせん杭、マイクロ杭、押し込み杭など）は耐えられない隆起を経験した膨潤性土の基礎の修復によく使用される。これらは新築にも使用されるが、従来の掘削杭ほど頻繁ではない。掘削機器のサイズが小さく、作業用地要件が低いため、特許取得済みの杭は床下空間やガレージなどの限られたエリアでの使用に適している。



らせん杭 **マイクロ杭** **押し込み杭**

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh（Geoff）Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson, Wiley, 2015

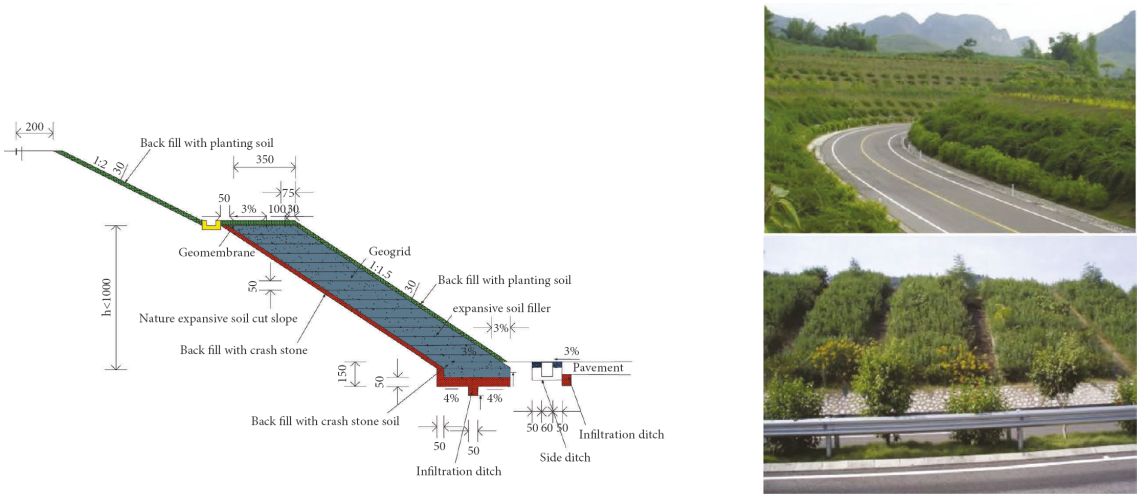
図 8.1.71 特許杭［John D. Nelson K. C., 2015］

(9) 斜面対策工

中国で採用されている柔軟支持構造総合防護システムを図 8.1.72 に示す。システムは以下の 3 つの部分から構成される。

- **柔軟な支持構造**: 切土法面をオーバーカットし(オーバーカットの深さは乾湿サイクルの重要な影響領域と法面勾配によって決定する)、その後ジオグリッドを層状に敷いて膨潤性土を包み、柔軟性が高い支持構造を形成する。
- **排水工**: 法面上部の遮断溝と浸透溝、壁裏の浸透層、壁底部の排水クッション層、壁のつま先外側と壁のかかとの排水層。
- **法面保後**: 法面上部のジオテキスタイル防水シーリング層と法面植生保護層。法面保護と排水の役割も果たす。

図 8.1.73 は植物性の土嚢とジオメンブレンを用いた水路と切土斜面の対策である。土嚢をサーチャージとしても機能させている。



出典: Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, Zhen Huang, Hang Shi, Wei Zhang, Shaokun Ma, Feng Gao, Min Ma, 2022

図 8.1.72 柔軟支持構造総合防護システム [Zhen Huang, Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, 2022]

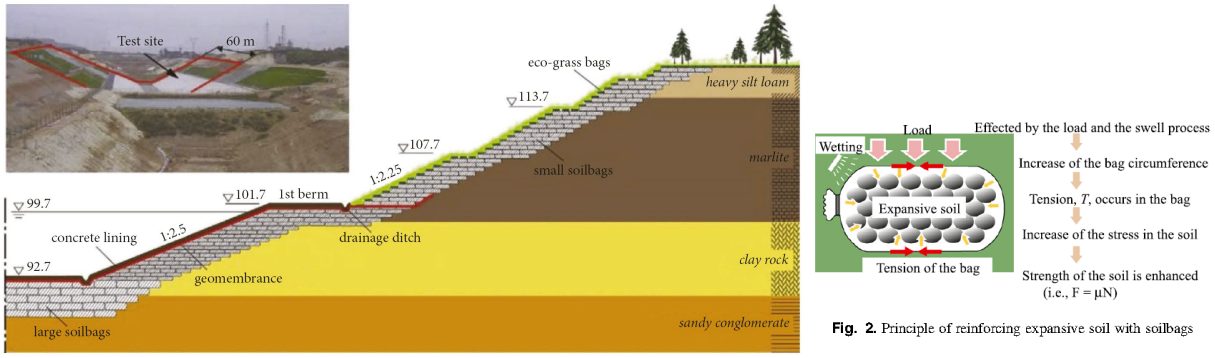


FIGURE 15: Treatment of expansive soil/rock channel slopes with soil bags.

Fig. 2. Principle of reinforcing expansive soil with soilbags

出典: Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, Zhen Huang, Hang Shi, Wei Zhang, Shaokun Ma, Feng Gao, Min Ma, 2022, Treatment for Expansive Soil Channel Slope with Soilbags, Sihong Liu, Fuqing Bai, Yisen Wang, Shan Wang, Zhuo Li, 2013

図 8.1.73 植物性土嚢を用いた水路と切土斜面の対策 [Zhen Huang, Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology: A Systematic Review, 2022]

(10) 化学的な安定処理

1) 石灰安定処理

石灰安定処理は、一般に 3～8%の重量割合の消石灰を土の上部に薄く添加する。また、トラフィカビリティの性能向上や、処理層の下からの毛細管上昇を防ぐために、湛水方処理に使用されている（McDowell, 1965; Teng et al. 1973）。石灰反応のメカニズムを表 8.1.36 に、土の石灰反応性に影響を及ぼす要因を表 8.1.37 に示す。

表 8.1.36 石灰反応のメカニズム

反応	説明
陽イオン交換	粘土粒子の表面電荷を中和し、凝集性が増す
フロック形成・凝集	土粒子が集合し、可塑性が減少
炭酸化	石灰が炭酸カルシウムに変化し強化
ポゾラン反応	石灰とシリカ・アルミナとの反応でセメント質を形成

出典: JICA 調査団

表 8.1.37 石灰反応性に影響を及ぼす要因

要因	効果
pH が高い（7 以上）	反応良好
有機物が多い	反応を遅らせる
水はけが悪い	反応しやすい傾向
硫酸塩・石膏・Fe 化合物	反応を阻害する可能性
Ca/Mg 比が低い･塩基飽和度が低い	風化が進んでいることを示す。反応性が低い傾向

出典: JICA 調査団

2) 石灰の種類と量

表 8.1.38 に、添加剤として使用される石灰の種類をいくつか挙げる（Winterkom, 1975）。高カルシウムの消石灰は効果がやや高いが、石灰の種類は塑性、加工性、膨張性に大きな影響を与えない（Thompson, 1968）。粘土質礫、シルト質粘土、および粘土のおおよその消石灰と生石灰の含有率を表 8.1.39 に示す（Currin ら、1976）。

表 8.1.38 建設に使用される石灰材料［John D. Nelson D. J., 1992］

タイプ	化学式
カルシア（高カルシウム生石灰）	CaO
和高カルシウム消石灰	Ca（OH）$_2$
消石灰	CaO+ MgO
ドロマイト消石灰	Ca（OH）2 MgO+
加圧含水または脱水ドロマイト石灰	Ca（OH）2+ Mg（OH）i

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, John Wiley, 1992

表 8.1.39 様々な土質における石灰含有量の目安［John D. Nelson D. J., 1992］

土質	土の重量によるおおよその処理率	
	消石灰	生石灰
粘土質礫（GC、GMGC）（A-2-6、A-2-7）	2-4	2-3
シルト質粘土（CL）（A-6、A-7-6）	5-10	3-8
粘土（CH）（A-6, A-7-6）	3-8	3-6

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, John Wiley, 1992

a) 養生条件

強度は、温度と時間に影響する。土の温度が 16～21℃未満の場合、化学反応は進行が抑制される。寒冷な環境条件が予想される場合は、別の安定処理方法を使用こと も考慮する。養生期間は、少なくとも 10～14 日間とし、施工は夏期が望ましい。

b) 適用方法

適用方法の種類とその概要については以下の通りである。

・現位置混合し、再転圧

- 一般的に使用される方法で効果的
- 施工手順・品質管理が重要（含水比、混合均一性、締固め密度）

・石灰ドリル孔工法（Drill Hole Lime）

- 石灰スラリーを穿孔箇所に注入
- 効果が安定せず、非推奨

・石灰加圧注入法（PIL、LSPI）

- 注入圧力による拡散を促進
- 乾期・亀裂の多い土で有効

3) セメント安定処理

ポルトランドセメントの安定処理は、水とのポゾラン反応により複雑なゲルや化合物を生成し、土を安定化させる。土と混合することで、以下の効果が得られる。

- 液性限界・塑性指数・体積変化の可能性：低下
- 収縮限界・せん断強度：増加

表 8.1.40 にセメントと石灰の比較を示す。

表 8.1.40 セメントと石灰の比較

項目	セメント	石灰
塑性の高い粘土への効果	効果は限定的	より効果的
反応の速さ	速い（水和・凝結が早い）	やや遅い
施工手順	石灰と類似だが、混合時間が短くて済む	通常の混合時間が必要
安定化対象	石灰非反応性の土に有効	石灰反応性がある土向き
ひび割れのリスク	高い（硬化収縮や乾燥収縮）	比較的低い
費用	材料価格や流通に依存（石灰と同程度）	同左

出典: JICA 調査団

表 8.1.41 にセメント処理における利点と留意点を示す。セメント安定処理は、石灰で効果が不十分な場合の代替または補完的処理方法として有用される。また、施工時間が短く、早期強度が得られる一方で、ひび割れへの配慮や対象土の選定が重要となる。セメント安定処理の選定にあたっては、コストや材料の入手性、施工現場の条件に応じて、石灰安定処理と適切に使い分けることが求められる。

表 8.1.41 セメント処理における利点と留意点

利点	留意点
✓ 2～6%のセメント混合率で半硬質スラブが形成可能 ✓ スラブ全体にわたって膨張が均一に分散される ✓ 強度向上により、舗装・構造スラブとして有効	✓ 塑性の高い粘性土には反応しにくい場合がある（親水性が強いため） ✓ ひび割れの発生に注意し、使用前に膨張性や亀裂リスクの評価が必要 ✓ AASHTO 分類におけるセメント使用基準があり、設計上の適用確認が必要

出典: JICA 調査団

4) 塩処理

塩処理は、土の性質改善のために使用される化学的安定処理の一つである。主に使用される塩は、「塩化ナトリウム（NaCl)」と「塩化カルシウム（$CaCl_2$)」の 2 種類である。表 8.1.42 に塩の効果と作用を示す。塩化カルシウムは、乾燥重量に対して約 1%の塩化カルシウムでほとんどの土を安定化させることができる。塩化カルシウムの主な欠点としては、土から溶出しやすいことがあり、定期的に塩処理を繰り返す必要がある。したがって、維持費が高くなる場合があり、経済性の面で不適となる可能性がある。

表 8.1.42 塩の効果と作用

塩の種類	主な効果	備考
塩化ナトリウム（NaCl）	・ 液性限界の高い土で効果大 ・ 収縮限界とせん断強度の増加 凍土の隆起抑制にも効果あり（特定土）	効果は土の種類に依存
塩化カルシウム（$CaCl_2$）	・ 含水比の変動を抑制 ・ 体積変化を軽減	1920 年代から使用実績あり

5) フライアッシュによる安定処理

フライアッシュは、ポゾラン反応の促進や粒度改善のために、石灰処理土に添加されるものである。フライアッシュには主に 2 つの種類（①無煙炭や瀝青炭の燃焼から発生するクラス F フライアッシュ、②褐炭や亜瀝青炭の燃焼から発生するクラス C フライアッシュ）がある。どちらのクラスのフライアッシュもポゾランであるが、クラス C のフライアッシュはセメント質であり、クラス F よりも高レベルの硫酸塩を含むことが多い。

フライアッシュは、土の塑性指数、透水性、膨張性を低下させ、剛性、強度、凍結融解抵抗性を向上させることができる。フライアッシュを添加することにより、膨潤性土の膨潤性が約 60~70%程度減少できる可能性がある。

6) 有機化合物

有機化合物は、主に防水性の向上、水分吸着の抑制、樹脂による土の硬化を目的に、安定剤として試みられてきた。しかし、石灰ほど効果的でなく、かつ不経済であるため、有機化合物の使用による成功例は限られている。

7) 注入工法

化学薬液注入工法は、土の膨潤性の低減を目的に実施される。薬液の効果は、陽イオンの性質や土との反応性に依存する。単なる水和反応よりも複雑なイオン交換や鉱物変化を伴うことが特徴である。

薬液の代表として、塩化カリウムがある。カリウムベースの薬剤注入は、土の鉱物学的特性を変化させるカリウムイオンで土塊を飽和させることによって機能する。しかし、注入工法による土の安定処理は、事前湿潤 prewetting 工法と同じ制約がある。ほとんどの膨潤性土は比較的不透水性であるため、粘土質土に化学物質を注入することは困難であることが多い。

8.1.10.4 対策法を適用させる留意点

Nelson と Miller（1992）は膨潤性土の各種安定処理工法について、表 8.1.43 のような表をまとめている。全ての対策工を網羅していないが、対策工を選定する際の参考資料とすることができる。

ある対策方法案と他の対策方法との優劣に関する価値判断は、成功例の多さ、施工の容易性、対策効果の確実性、工法の経済性等を総合評価して決められる。

表 8.1.43 膨潤性土の適用を成功させるための留意点 [John D. Nelson D. J., 1992]

対策方法	要点
置換工法	非膨張性で不透水性の盛土が入手可能で、経済的でなければならない。 非膨潤性土は膨張性粘土よりも高い密度で圧縮することができ、高い支持力を生み出す。 粒状置換材を使用する場合は、水が透水性材料に溜まらないように、充填材からの排水を制御するための特別な予防措置を講じる必要がある。 安全なスラブ・オン・グレードの建設が可能となる。 膨潤性の材料は、適度な深さまで掘り下げ、その後、垂直または水平、もしくは両方向のメンブレンで保護する。吹き付けアスファルト膜は、高速道路建設で効果的に使用されている。
原位置材の掘削・再転圧	膨潤の可能性が低く、乾燥密度が高く、自然含水率が低く、亀裂のある土に有効である。 石灰反応が良好であれば、生石灰で処理した膨潤の可能性が高い土を完全に砕いて締め固めることができる。 石灰を使用しない場合、再転圧された土の支持力は通常低くなる。 品質管理は不可欠である。 アクティブゾーンが深い場合は、排水コントロールが特に重要となる。 指定された水分密度条件は建設が始まるまで維持し、建設前にチェックすべきである。
サーチャージ	膨潤圧が低く、ある程度の変形を許容できる場合は、サーチャージ荷重が効果的な場合がある。 アクティブゾーンの深さと、打ち消すべき最大膨潤圧を決定するための土質試験が必要である。 サーチャージを使用する場合、排水のコントロールが重要となる。水分の移動は垂直方向と水平方向の両方方向がある。

対策方法	要点
事前湿潤	アクティブゾーンの含水率を高めるには、最長で 1 年以上の期間が必要な場合がある グリッド状に掘削された垂直サンドドレーンは、湿潤時間が短くできる可能性がある。 亀裂が深く乾燥した土は事前湿潤に有利となる 含水率は、塑性限界より少なくとも 2～3%高くする。 界面活性剤は浸透率を高める可能性がある。 期待される膨潤をもたらすのに必要な時間は、含水率を高める時間よりもかなり長くなるかもしれない。 密度の高く、亀裂のない粘土を十分に予湿することはほとんど不可能となる。 土の上層部に余分な水分が残っていると後日、より深い層が膨張する可能性がある。 事前湿潤の経済性は他の方法に比べて有利だが、プロジェクトの早い段階で資金を確保する必要がある。 事前湿潤後に表土を石灰処理することで、土の強度を高めて、重機作業を可能とすることができる。 石灰処理を行わないと、土の強度が著しくする可能性があり、表面が濡れていると重機作業が困難となる。 表面は蒸発や表面スレーキングから保護する。 品質管理がパフォーマンスを向上させる。
石灰安定処理	土の強度を増すには、最低でも 10～14 日間、21℃以上の温度を維持することが必要となる。温度が高ければ、より高い強度が得られる。 有機物、硫酸塩、いくつかの鉄化合物は、石灰のポゾラン反応を遅らせる。 石膏やアンモニウム肥料は、土に必要な石灰を増加させる可能性がある。 石灰質とアルカリ性の土は反応性が高い。 水はけの悪い土は、水はけの良い土よりも反応性が高い。 通常 2~10%の石灰混合で土を安定させることができる。 土の石灰反応性を試験し、必要な石灰の割合を調べる。 混合深さは通常 30～45cm に制限されるが、リッパーブレード付きの大型トラクターでは、60cm の土をその場で混合することに成功している。 石灰は乾燥した状態でも、スラリー状でも施用できるが、反応に必要な水分が含んでいなければならない。 適用開始と最終混合に若干の遅れがあることで、作業性と転圧を向上できる。 品質管理は、粉砕、混合、締固めにおいて特に重要である。 石灰処理した土は、地表水や地下水から保護する必要がある。飽和状態になると石灰が溶出し、土の強度が低下する可能性がある。 ドリル孔からの石灰の分散は、土に広範な亀裂ネットワークがない限り、一般的に効果がない。 ドリル孔による応力解放は隆起を抑える要因になる可能性がある ドリル孔の直径が小さいとスラリーに接触する表面積が小さくなる。 加圧注入した石灰の浸透は、石灰の拡散速度の遅さ、土中の亀裂の多さ、粘土の間隙の小ささによって制限される。 石灰の加圧注入は、ミックス・イン・プレース法よりも深い層を処理するのに有効である。
セメント安定処理	ポルトランドセメント（4～6%）は体積変化の可能性を減らす。結果は石灰と同様だが、収縮はセメントの方が大きい。 散布方法は場所打ち石灰処理と同様だが、散布から最終的な敷設までの時間遅れが大幅に少ない。 ポルトランドセメントは塑性の高い粘土の処理には石灰ほど効果的ではないかも

対策方法	要点
	しれない。 石灰に反応しない土の処理にはポルトランドセメントがより効果的になるかもしれない。 セメントを使用するとより高い強度が得られる可能性がある。 セメントで安定化された材料はひび割れを起こしやすいので、事前に評価する必要がある。
塩処理	NaCl または CaCl2 以外の塩の使用が経済的に正当であるという根拠はない。 塩分が容易に溶出する可能性がある。処理に永続性がないため、塩処理が不経済になる可能性がある。 CaCl2 を使用する前に、土の相対湿度が少なくとも 30%なければならない。 塩化カルシウムと塩化ナトリウムは、水の凝固点を低下させることにより、凍傷を軽減することができる。 CaCl2、硫黄分を多く含む土を安定させるのに有用である。
フライアッシュ	フライアッシュはシルト質粘土のポゾラン反応を促進することができる。 粒状土の粒度を改善することができる。
有機化合物	多くの有機化合物は水溶性ではなく、反応が早く不可逆的である。有機化合物は石灰より効果的とは思われない。石灰ほど経済的で効果的なものはない。
水平防湿バリア	防湿バリアは、道路や基礎から十分な距離をとり、基礎への水分の水平移動を防ぐ必要がある。 バリアを基礎にしっかりと取り付け、継ぎ目をシールし、バリアを傾斜させて構造物から離すように細心の注意を払う。 バリア材は耐久性があり、非分解性でなければならない。 膜を構造物に取り付ける継ぎ目や、入念に固定し、防水性を高める必要がある。 低木や大きな植物は、バリアから十分 離れて植えるべきである。 表面の排水を膜の端から遠ざける。
アスファルト	高速道路建設に使用する場合は、下地と側溝の上に連続した膜を設置する。 コンクリート舗装より複雑ではないかもしれない。 未処理の粒状ベースよりも舗装の強度が向上する。 スラブ・オン・グレード構造で使用すると効果的である。
硬質バリア	コンクリート製の歩道は補強すること。 歩道と基礎をフレキシブルジョイントでつなぐこと。 バリアは定期的に点検し、亀裂や漏れがないことを確認する。
垂直防湿バリア	配置は可能な限り深くまで行うべきであるが、機器の制限により深さが制限されることが多い。最低でも活性ゾーンの半分を使用すべきである。 トレンチの埋め戻し材は不浸透性でなければならない。 含水率の可能なバリアにはキャピラリーバリア（粗石灰岩）、リーンコンクリート、アスファルト、粉砕タイヤ、ポリエチレン、半硬化スラリーなどがある。 溝を掘るには、バックホーよりもトレンチ掘削機の方が効果的である。
メンブレン	継ぎ目は注意深く密閉されなければならない。 バリア材は、設置に耐える耐久性がなければならない。 バリアが損傷しないように、底部バリアの上に最初の土の層を置くことを管理しなければならない。

出典: EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, JOHN WILEY & SONS, INC., 1992

8.1.10.5 膨潤性土の設計基準、参考図書

膨潤性土の具体的な設計方法を記載した基準はあまりない。中国は高速道路、鉄道、新幹線の基準があり内容も充実している。International Building Code – Chapter 18 Soils And Foundations では膨潤性土の記載があるが、特に設計方法を具体的に述べてはいない。表 8.1.44 に膨潤性土に関する設計基準を、表 8.1.45 に膨潤性土の設計に関する参考文献をそれぞれ示す。

表 8.1.44 膨潤性土に関する設計基準

国	基準、ガイドライン
World	International Building Code – Chapter 18 Soils and Foundations
India	IS 9451.1994 GUIDELINES FOR LINING OF CANALS IN EXPANSIVE SOILS（1994） Expansive Soil Guidelines
Indonesia	PEDOMAN Konstruksi dan Bangunan Pd T-11-2004-B, Penanganan tanah ekspansif dengan geomembran Sebagai penghalang kelembaban vertikal, DEPARTEMEN PERMUKIMAN DAN PRASARANA WILAYAH（建設および建築ガイドライン Pd T-11-2004-B、垂直防湿層としてのジオメンブレンを使用した膨潤性土の取り扱い、居住および地域インフラ部門）
US Army	TM 5-818-7 TECHNICAL MANUAL FOUNDATIONS IN EXPANSIVE SOILS, HEADQUARTERS, DEPARTMENT O F THE ARMY, SEPTEMBER 1983
Australia	Guideline Western Queensland Best Practice Guidelines, WQ35 Paving Materials and Type Cross Sections for Roads on Expansive Soils in Western Queensland, September 2014
Australia	TECHNICAL NOTE SWQ37, WESTERN QUEENSLAND , BEST PRACTICE GUIDELINES-DRAINAGE STRUCTURES ON EXPANSIVE SOILS IN WESTERN QUEENSLAND
中国	公路膨張土工程, 鄭健龍、楊和平著, 人民交通出版社（2009） Expansive Soil Engineering in Highway
中国	鉄路弱膨張土路基填筑工艺试验工作指南, 上海鉄路局著, 中国铁道出版社（2012）
中国	新建时速 200 公里鉄路 改良膨張土路基施工技术, 李庆鸿, 王炳龙, 俞峰编著, 李庆鸿主编, 中国铁道出版社（2007）
New Zealand	NZS3604, IDENTIFICATION AND ASSEMENT OF EXPANSIVE SOIL IN NEW ZEALAND
米国	FOUNDATION REQUIREMENTS ON EXPANSIVE SOIL, BUILDING CODE MANUAL COUNTY OF LOS ANGELES DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS BUILDING AND SAFETY DIVISION（1983）
米国	County of San Diego, Planning & Development Services, EXPANSIVE SOIL FOUNDATION DESIGN（2023）
米国	ROANOKE COUNTY COMMUNITY DEVELOPMENT, Office of Building Safety, COUNTY EXPANSIVE SOILS POLICY & PROCEDURES, Commercial & Residential Projects
米国	Las Vegas and Henderson Building Code 2021, Chapter 18 Soils and Foundations 1803.5.3 Expansive Soil 1808.6 Design for Expansive Soils
米国	BUILDING CODE MANUAL COUNTY OF LOS ANGELES DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS BUILDING AND SAFETY DIVISION, 1805.8 Article 1 5-13-09 Page 1 of 3, FOUNDATION REQUIREMENTS ON EXPANSIVE SOIL

出典: JICA 調査団

表 8.1.45 膨潤性土の設計に関する参考図書

参考図書	出版社
2021 International Tiny House Provisions: Code, Commentary and Standards for Design, Construction and Compliance R403.1.8Foundations on expansive soils., R403.1.8.1Expansive soils classifications.	ITHP
EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller（1992）	JOHN WILEY & SONS
Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh（Geoff）Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson（2015）	WILEY
FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, FU HUA CHEN（1975）	ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING
TEXT BBOOK of SOIL MECHANICS and FOUNDATION ENGINEEMING, V.N.S. Marthy, CHAPTER 24 FOUNDATIONS ON COLLAPSIBLE AND EXPANSIVE SOILS（2012）	CBS Publishers
CONSTRUCTION OF BUILDINGS ON EXPANSIVE SOILS, E.A. SOROCHAN（1991）	CRC Press

出典: JICA 調査団

8.2 分散性土

8.2.1 特徴

分散性土は水に触れると粘土粒子が水に溶け出し、水中に浮遊する土である。土中の分散は粘土粒子間の反発力が引力を超えたときに起こり、その結果凝集が解け、比較的純粋な水が存在すると粒子が互いに反発してコロイド懸濁液を形成する。非分散性土では個々の粒子は互いにくっつき、流水による侵食が起こらない閾値速度が存在し、ある一定の侵食エネルギーで流れる水によってのみ除去される。対照的に分散性土には閾値速度がなく、コロイド粘土粒子は静かな水中でも懸濁状態になるため、侵食やパイピングの影響を受けやすい。分散性土は粘土分含有量が中～高程度含まれるが、分散性土と非分散性土の粘土分率に大きな違いはない。分散性土は通常の土よりも間隙水中に溶解したナトリウムの含有量が高い（最大 12%）。塩分含有量の高い土の粘土粒子はシルトや砂粒子の周囲に凝集体やコーティングとして存在し、土は凝集している。

分散性土が侵食されるメカニズムは、分散性土の構造および間隙と侵食流体の相互作用の特性が関係している。侵食が開始されるために必要な応力は、存在する粘土鉱物の種類、pH 値、有機物、温度、水分含有量、チキソトロピー、間隙と侵食流体のイオンの種類と濃度によって影響を受けると思われる。土の構造と粘土粒子の表面に生じる浸透圧の影響により、粒子表面に膨潤が生じる。この膨潤により粒子間の結合力が低下することで、水による侵食の重要な要因となる。分散性粘土は通常の粘土よりも間隙水に溶存ナトリウムの割合が高いため、侵食性が高い。支配的なナトリウムイオンの存在は個々の粘土粒子を囲む拡散二重水層の厚さを増加させ、反発力が引力を上回り、個々の粘土粒子が水の存在下で懸濁状態になる。分散性粘土は粒子の大きさが比較的小さく、粒子の挙動が独特であるため、実際には静止した水でも侵食性が高くなる。

土が分散性土であるかどうか、また、どの程度分散性であるかは、様々な特性に影響される。陽イオンバランス（特に交換性ナトリウムパーセント（ESP））、塩分、OM、粘土含有量、粘土鉱物学が分散性に影響する。一般に以下のような土は分散しやすいと考えられる。

- 30 パーセント以上の粘土（粘土が 15%未満の土は砂が多すぎて分散できない）
- ESP＞5
- 電気化学的安定性指数（ESI） ＜0.02 or 0.05
- 塩分（ECe）＞2（dS/m）
- 凝集体を結合する有機物が不十分
- イライト粘土は他の粘土タイプよりも分散しやすい（Sumner 1993）;
  交換性マグネシウム（Mg^{+}）の量が多く、特にイライト質粘土がある場合は分散性を悪化させる可能性があるが、交換性ナトリウム（Na^{+}）に比べれば二次的な問題である
- pH の上昇

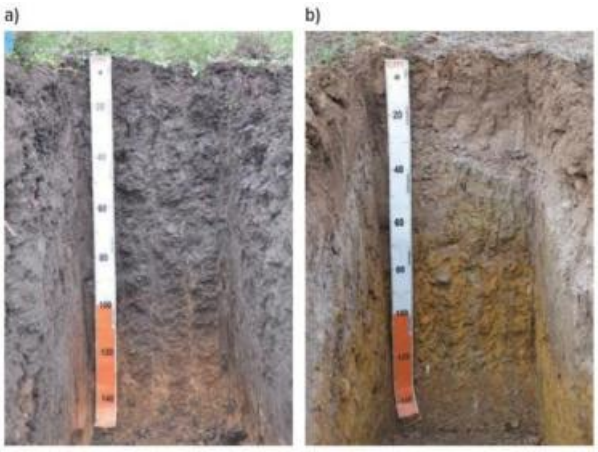
モンモリロナイト粘土鉱物を多く有している土は膨潤性土と考えられているが、Na^{+}溶融イオンが多い場合に分散性土になることがある。逆に Na^{+}が多くてもモンモリロナイトが無いと分散性を示さないという報告があり、X 線分析によるモンモリロナイトの特定がただちに膨潤性土の特定になら

ないことを注意する必要がある。

分散性土は侵食性地盤に含まれる可能性があるが、侵食性地盤は降雨等により土粒子が流れ出し、ガリ侵食を起こすものである。分散性土は化学的に水に溶け出すのに対して、侵食性地盤は土粒子間の結合力が弱く、水の流れにより結合部が破壊される現象である。また、可溶性土は石灰岩や石膏が水に溶け出す現象は似ているが、分散性土の方が水に直ぐに溶け出すのに対し、可溶性地盤は時間をかけながら溶け出し、溶けるところと溶けないところがあり空洞ができるところが異なる。粘土塊を水に入れると徐々に砕けて細流化していくが、これは分散性土の現象ではない。粘土が溶けて水に浮遊し粘土より細かいものが薄く広がって沈降するのが分散性土である。砂糖のように完全には溶けるのではなく分散性土は 0.005mm 以下の粘土粒子となって残る。

分散性土は視覚的に分類したり、アッターバーグ限界や粒度などの物理特性で分散性土と通常の侵食に耐性のある粘土を区別することが容易にできない。このため、現状、ピンホール試験とダブルハイドロメーター試験が分散性土を識別するための唯一の試験と言われている。また、クラム（Crumb）試験は土の侵食の潜在的傾向について良い指標を提供するが、十分な判定方法では無いことを注意する必要がある。

オーストラリアでは国内の土壌分類システムにおいて、分散性土は「灰色 Vertosols（Vertisols とは少し違う名称）」と「Sodosols」に分類されている。Vertisols は通常黒色土であるが、オーストラリアでは黒色の Vertosols と灰色の Vertisols がある。黒色の Vertosols は Vertisols と同じ膨潤性を有するが、灰色の Vertisols は塩分が多いため灰色を呈し、分散性を示す。Sodosols は Sodic 土壌（塩類土壌のソーダ土壌）で分散性土である。オーストラリアの一部の Vertosols の粘土粒子は交換性ナトリウム濃度が高く分散する。一部の天然粘土は比較的純粋な水の存在下で分散または解凝集するため、侵食やパイピングの影響を非常に受けやすくなっている。粘土の量と種類、pH、有機物、温度、水分含有量、シキソトロピーおよび間隙と侵食流体のイオンの種類と濃度は侵食を開始するための臨界せん断応力に影響を与える。そのため、分散性粘土は乾燥層による亀裂、収縮亀裂、水圧破砕による亀裂または土塊内の他の高浸透性の水道（みずみち）から始まる浸透水で侵食される。分散性粘土は交換性ナトリウムの割合が高いのに対し、他の非分散性粘土は間隙水中にカルシウム、カリウム、マグネシウムの陽イオンが優勢である可能性がある。



出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce (2023)

図 8.2.1 オーストラリア分散性土（David McKenzie, Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, 2023）

a）Sodic な下層土を持つ灰色の Vertosols、b）黄色の Sodosols。Sodosols はアルカリ性で層が急激に変わる Sodic 土壌である。Vertosols はクラックが生じやすい粘土である。

アルカリ性は粘土粒子の負電荷に影響し、分散を悪化させる可能性がある。粘土粒子の負電荷が高くなると他の粘土粒子と反発しやすくなる。ある研究では同じ ESP において、pH 9 の土壌は pH 6 の土壌よりも 2～3 倍分散しやすかったとしている。

注釈: ECe（Electrical Conductivity of the Saturation Extract, 飽和抽出液の電気伝導率）

ECe（dS/m）	塩分濃度の区分	影響
0～2	非塩性土 （Non-saline soil）	作物の成長に影響なし。
2～4	軽度塩性土 （Slightly saline soil）	塩分に敏感な作物に影響を与える可能性あり。
4～8	中度塩性土 （Moderately saline soil）	塩分に耐性のない作物に大きな影響を与える。
8～16	強度塩性土 （Strongly saline soil）	大多数の作物で成長が困難になる。
16	極度塩性土 （Extremely saline soil）	塩分耐性作物以外では成長がほぼ不可能。

dS/m: デシジーメンス毎 m

出典: JICA 調査団

8.2.2 分散性土の起源・母材

分散性土に含まれる粘土鉱物には雲母、カオリナイト、バーミキュライト、モンモリロナイトなどがある。これらの鉱物は土の物理的特性に大きく影響を与え、特に雲母はすべり面の形成に関与しているとされている。また、粘土鉱物の種類と粘土粒子の配向状態は土の残留強度に影響を与える。土中の粘土鉱物は環境や土の生成因子によって異なり、土の分類や分布にも影響を及ぼす。例えば、カオリナイトは風化が進んだ熱帯の土に多く含まれ、オキシソルやアルティソルの一部に見られる。粘土鉱物は土の化学的機能に加えて物理的機能も持ち、土の水の流れや生物に供給する水の保持にも関与している。

分散性土についてはいくつかの地域で研究されており、母岩・母材について以下のように示されている。

- 浸透が著しく、浸透水の SAR 値が高い低地。特に影響を受けやすいのはワイナートの気候的 N 値が 2 から 10 の範囲にある地域となる。花崗岩由来の土は高い ESP 値を示す傾向が強く、そのため分散性になる。これらの岩石の耐候性主要鉱物（正長石、アルバイト、白雲母）には、Ca^{2+}イオンと Mg^{2+}イオンの濃度が低いため、高い SAR 値を示しやすくなる。
- 運搬された土の母材に大量のイライトと ESP 値が高いその他の 2:1 粘土が含まれている地域。気候的 N 値が 2 から 10 の範囲にある白亜紀の泥岩、上部ボーフォート グループの泥岩、およびカルースーパーグループのモルテノ層に相当する。これらの層の低地の土はほぼ常に分散性となる。
- 気候的 N 値が 10 を超える乾燥した地域。飽和抽出物内の SAR 値が高いにもかかわらず、遊離塩は分散特性の発達を制限するが、遊離塩が浸出すると分散性土が形成される可能性がある。
- 花崗岩または泥岩から得られた土は ESP 値が 5 未満の場合でも分散特性を示す可能性がある。これは Ca^{2+}と比較して Mg^{2+}の濃度が高いためであると考えられている。

注釈: ワイナートの気候的 N 値

ワイナートの気候的 N 値計算方法は地域や研究者によって異なる場合があるが、一般的には以下のような式で計算される。

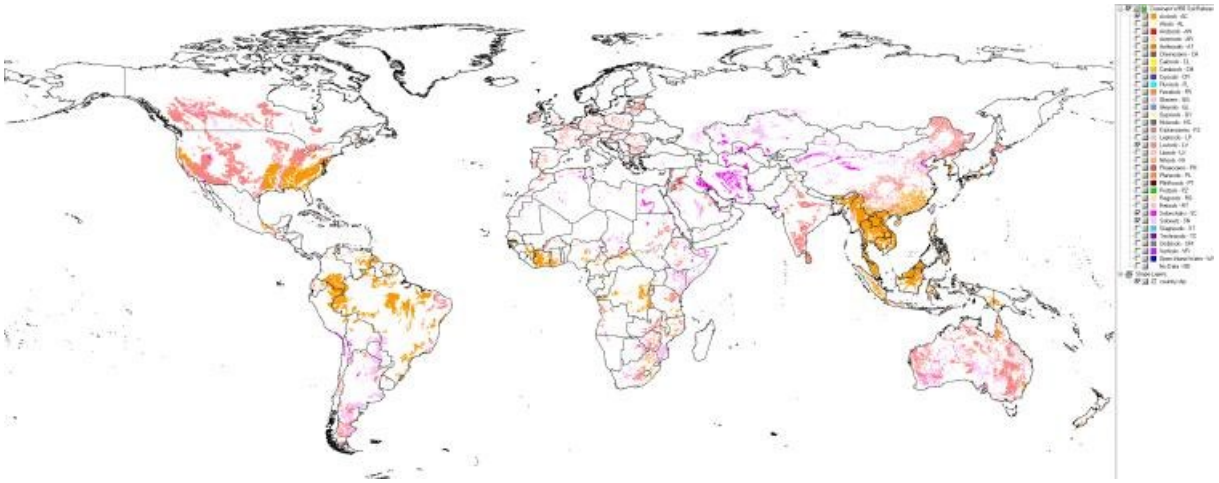
$N=a\cdot T+b\cdot R+c\cdot S$

T：平均気温、R：降水量、S：日射量、a、b、c：気候要素に対する重み付け

8.2.3 分散性土の分布地域

分散性土の世界的な分布域を示した文献は特に無い状況にある。分散性土が分布する国はカンボジア（メコン川とトンレサップ湖の河川流域や湿地が広がっている沖積層）、オーストラリア（タスマニア州）、タイ（北東部）、南アフリカ（Senekal dam）、米国（五大湖近辺やプレーリー地帯）、ギリ

シャ、インド（湿潤な気候や河川流域地域）、ラテンアメリカ、インドネシア（ジャワ島やスマトラ島などの河川流域地域）、ジンバブエ、中国（長江流域や黄河流域）、バングラデシュ（ガンジス川やブラマプトラ川のデルタ地帯）、ナイジェリア（ナイジェリア川やベニ川の流域）、イスラエル（地中海沿岸地域やヨルダン川流域など）、イラン、スペイン、ウクライナ（黒海からチェルノブイリ周辺）、ブラジル、ニュージーランド、メキシコ、ベトナムなどがある。HWSD で分散性土となる可能性の高い土壌は Solonetz が一番で、次に塩類土壌である Solonchak、また、Vertisols は膨潤性土であるが Na+が多くなると分散性土となる。そのほかに可能性がある土壌としては Luvisols、Acrisols、Alfisols がある。Vertisols で分散性となることが報告されているのはオーストラリアだけである。分散性土が多く分布するカンボジアを考慮すると Acrisols が分散性土なる可能性が高いと想定される。以上のことから、分散性土となる可能性が高いと考えられる Solonetz、Solonchak、Acrisols の分布図は図 8.2.2 のようになる。なお、担当地域で分散性土か更なる検証するためには HWSD の SMU table を確認して、ESP（Exchangeable sodium percentage）の値が 15%を超えているか確認して、分散性土か判定するのが良い。中程度は 6~15%なのでその場合は注意すると良い。



出典：HWSD Ver.2.0

図 8.2.2 HWSD の Solonetz、Solonchak、Acrisols の分布図

FAO/UNESCO の土壌分類から塩類土壌（Saline soil と Sodic soil）の分散性土はアジア、環太平洋とオーストラリアが 5.5%以上と多く分布しており、全世界では 6.5%占めると報告されている。また、侵食は分散性とは直接関係ないが、分散性土がある理由で侵食が大きくなる可能性があると考えられるため参考となる。日本では特に火山灰を母材とする土や湿潤な気候条件下で発達した土など様々なタイプの分散性土があり、沖縄の国頭マージが分散性土して有名である。

表 8.2.1 塩類土壌の地域毎の面積割合

Table 1. Frequency and spreading of dispersive soils in the world (FAO/UNESCO, 1976).

Regions	Total area	Saline soils	%	Sodic soils	%
Africa	1899.1	38.7	2.0	33.5	1.8
Asia, the pacific and Australia	3107.2	195.1	6.3	248.6	8.0
Europe	2010.8	6.7	0.3	72.7	3.6
Latin America	2038.6	60.5	3.0	50.9	2.5
Near East	1801.9	91.5	5.1	14.1	0.8
North America	1923.7	4.6	0.2	14.5	0.8
Total	12781.3	397.1	3.1%	434.3	3.4%

出典: Characterization of Dispersive Problematic Soils and Engineering Improvements: A Review, Hakime Abbaslou, Hojat Hadifarda, Amir Poorgohardia（2016）

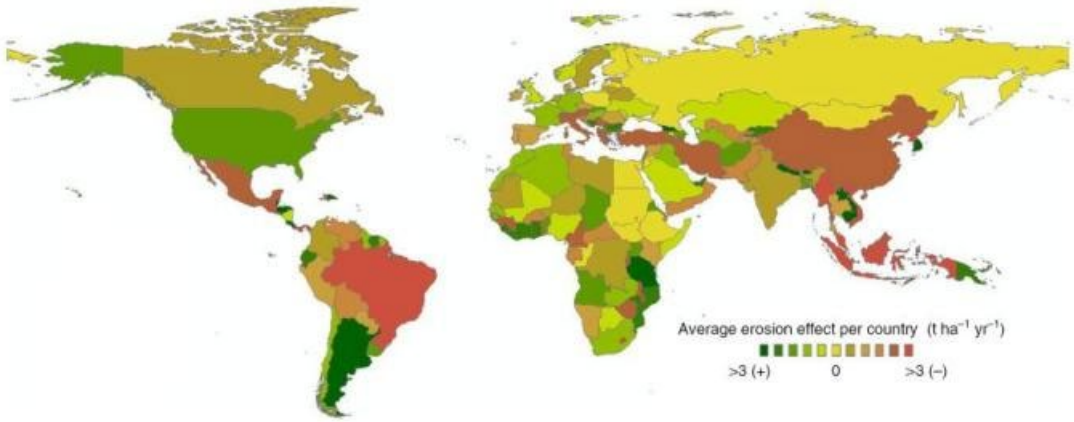


Fig. 3 | A global map of countries' soil erosion performance. The map is based on soil erosion discontinuities between each country and all of its neighbours (unweighted). Darker green indicates that a country has a more positive impact on the global rate of soil erosion than its neighbours (that is, it has a dampening effect), and darker red indicates that a country has a more negative impact on the global rate of soil erosion (that is, it has higher erosion rates). For all countries that perform more poorly than their neighbours, the map shows how much soil erosion they could mitigate (per hectare and year) just by catching up to their neighbours. Even the better performing countries could probably further improve their impact, so this map probably presents a lower bound for countries' erosion mitigation potential—especially in regions where soil erosion is high. For reference, the global average soil erosion rate is 2.4 t ha^{-1} yr^{-1}, and we estimate the average country discontinuity at 1.4 t ha^{-1} yr^{-1}.

出典: Countries and the global rate of soil erosion, David Wuepper, Pasquale Borrelli and Robert Finger（2020）

図 8.2.3 世界の侵食性の程度を表す分布図

8.2.4 分散性土の判定方法

分散性粘土を判定する試験方法は 4 つの試験がある。分散性を判定できる試験はピンホール試験が一番正しく、次にダブルハイドロメーター試験と言われている。化学分析による方法がダブルハイドロメーター試験より正しいという研究者もいるが土木技術者には化学分析はなじみが少ないので余り利用されないのが現状である。クラム試験は簡易な試験方法であるが、判定精度は高くないので一次判定に使用するのが良い。すべての試験法において決定力があるわけでは無いため、可能であれば 4 つの試験を行って判定するなど複数試験の併用が望ましい。ピンホール試験は特種な試験器を用いるので設備を備えており実施できる試験室は限られる。最小限としてダブルハイドロメーター試験とクラム試験は行い、化学分析ができる試験室を利用できる場合は化学分析を追加することが望ましい。なお、試験試料は信頼性の高い結果を得るために、自然水分含有量で収集および維持する必要がある。試料の出荷および保管時には適切な防湿容器に密封する必要がある。

表 8.2.2 分散性を判定する試験方法

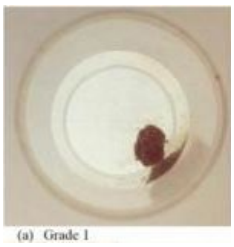
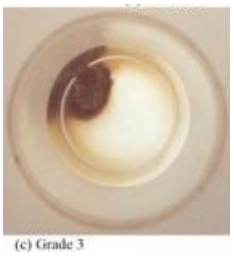
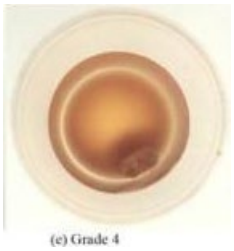
試験名	試験基準
ピンホール試験	ASTM D4647: Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test
間隙水抽出化学分析	ASTM D6919: Standard Test Method for Determination of Dissolved Alkali and Alkaline Earth Cations in Water by Ion Chromatography
ダブルハイドロメーター試験	ASTM D4221 Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer
クラム試験	ASTM D6572 Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test

出典: JICA 調査団

8.2.4.1 クラム試験による判定

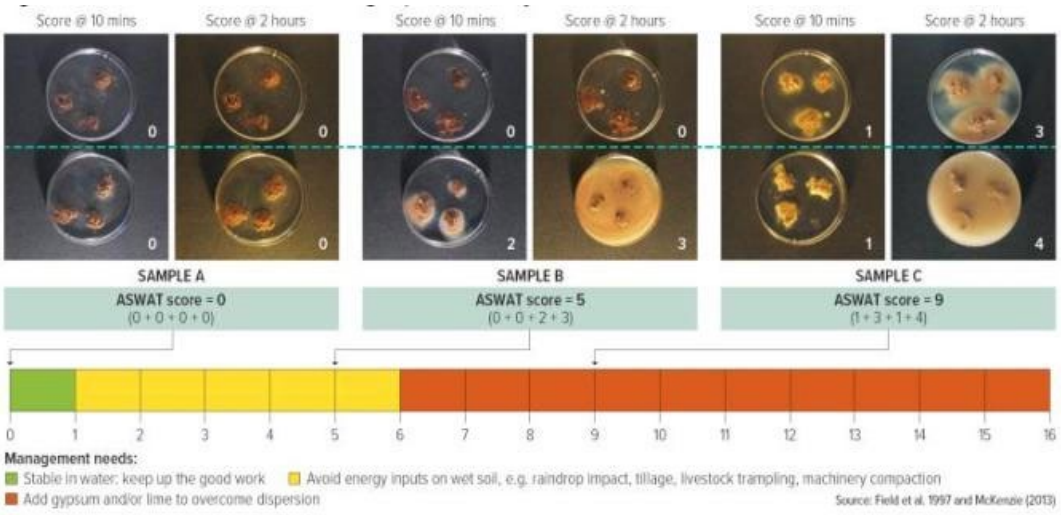
クラム試験は現場または実験室で分散性粘性土を同定するための簡単で迅速な方法である。16x6.5mm の立方体の試料を作成し、蒸留水の中にいれて分散状況を観察する簡易な試験である。攪乱試料の場合は 0.425mm 以下にふるい分けした土を使って固めて供試体を作成する。クラム試験はもともと Emerson（1967）によって開発されたもので、Sherard(1976) により簡素化され 4 段階評価方式が普及している。クラム試験は土に分散性があることを示す指標であるが、土が分散性ではないことを示す信頼できる指標ではないことに留意する必要がある。

表 8.2.3 クラム試験の分散性度判定方法

分散性判定	分散状況	分散程度	ASTM 記載の分散性判定
非分散性 （Non-Dispersive） （Grade1）	 (a) Grade 1	塊が安定し、水が透明を維持	土は崩れ、沈降し、拡散し、広がるかもしれませんが、水中に浮遊するコロイドによって濁った水は生成されません。すべての粒子は最初の 1 時間以内に沈降します。
弱分散性 （Low Dispersive） （Grade2）	 (b) Grade 2	ゆっくりと崩壊し、水がわずかに濁る	Grade 2 は移行グレードです。かすかでほとんど見えないコロイド懸濁液が土粒子の表面付近で濁水を引き起こします。雲が簡単に見える場合は、Grade 3 を割り当てます。雲が 1 つの小さな領域でかすかに見える場合は、Grade 1 を割り当てます。
中程度分散性 （Moderately Dispersive） （Grade3）	 (c) Grade 3	崩壊が比較的速く、水が中程度に濁る	土粒子の表面の外側には、粘土コロイドが浮遊した雲が容易に観察できます。雲は、皿の底に沿って土粒子の塊から最大 10mm 離れたところまで広がることがあります。
高分散性 （Highly Dispersive） （Grade4）	 (d) Grade 4  (e) Grade 4	素早く崩壊し、水が非常に濁る	粘土コロイドの濃密で豊富な雲が皿の底全体に見られます。時には、土のかけらの分散が広範囲に及ぶため、元の土のかけらとコロイド懸濁液の界面を特定するのが困難です。多くの場合、コロイド懸濁液は皿の側面で簡単に確認できます。

出典: JICA 調査団

オーストラリアでは１個の試料による判定はばらつきが多いので４個の試料の判定グレードを点数化して、その合計で判定する方法を行っている。



出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce (2023)

図 8.2.4 オーストラリアのクラム試験による判定方法 [David McKenzie, Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, 2023]

8.2.4.1 ダブルハイドロメーター試験による分散性判定

ダブルハイドロメーター試験は粒度試験で沈降分析すると分散剤を用いた場合と用いなかった場合の試験を行い、0.005mm 以下の粒径のパーセント（粘土分含有量）の比を求めて分散土を求めるものである。

$$分散度DR(\%) = \frac{分散剤を用いないときの粒径5\mu m通過パーセント}{分散剤を用いたときの粒径5\mu m通過パーセント} \times 100$$

本試験による分散性の判定は Elges（1985）が決めた表 8.2.4 に示す判定が使われているが、研究者によって判定の基準値は異なり、現在、分散性判定の標準基準は設定されていない状況にある。本試験方法は分散性の予測に約 85%の信頼性がある（分散性粘土の 85%は 35%を超える分散を示す）が、すべての分散性粘土を特定できない可能性があるため注意が必要である。他のクラム試験、ピンホール試験、間隙水抽出物の分析を併用して判定するのが良い。また、この試験方法の精度は試験を実施する人の能力と使用する機器および施設の適合性に依存するため、有能な試験機関／会社を利用することを勧める。

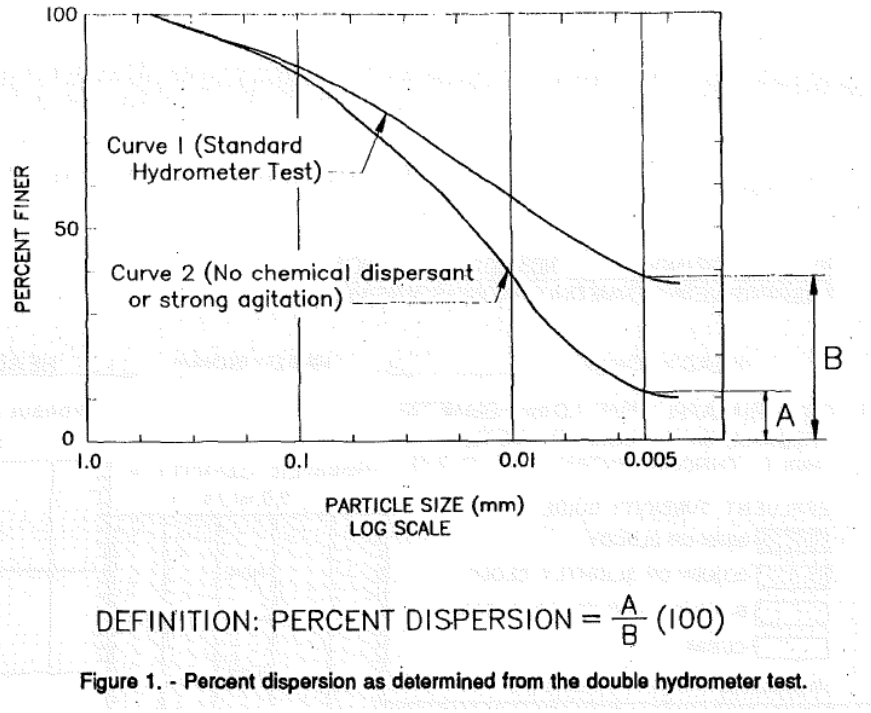


Figure 1. - Percent dispersion as determined from the double hydrometer test.

出典: CHARACTERISTICS AND PROBLEMS OF DISPERSIVE CLAY SOILS, Paul C. Knode, U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR Bureau of Reclamation, 1991

図 8.2.5 ダブルハイドロ試験の分散率の求め方 [Knode, 1991]

表 8.2.4 ダブルハイドロ試験による分散性判定

DR （%）	分散度
<15	非分散
15~30	わずかに分散性
30~50	中くらいの分散性
>50	分散性高い

出典: JICA 調査団

8.2.4.1 化学分析による分散性の判定

分散性土の判定には化学分析による方法も有効である。主に、土中の陽イオンバランスや塩分濃度（EC）を分析し、物理的試験と併用して評価する。ただし、膨潤性土と分散性土では、化学的判定基準がほぼ共通のため、単独では判定しきれない場合がある。

(1) ESP による分散性の判定

ESP は土の陽イオン交換容量（CEC）に占める交換性ナトリウムの割合を示す指標である。

$$ESP = \frac{交換性Na^{+}}{全交換陽イオン容量（CEC）} \times 100$$

ここで、

・交換性 Na^{+}（meq/100g 土）：土粒子表面に吸着されたナトリウムイオンの量

・全交換性陽イオン容量（CEC）（meq/100g 土）：土が保持できる全ての陽イオン（Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}など）の総量

ESP による評価基準を表 8.2.5 に示す。ESP は分散性の有力な指標だが、単独では信頼性に限界がある。より確実な判定には、pH・EC（電気伝導率）との組み合わせ評価が有効と考えられる。実務では ESP＋ピンホール試験やダブルハイドロ試験との併用が望ましい。また、ESP により表 8.2.6 のように分類される。ESP>15 以上の土壌はアルカリ土壌やソーダ(Sodic)土壌に分類される。

表 8.2.5 ESP による分散性判定基準

ESP （%）	判定	特徴
<5	非分散性土 （Non-Dispersive Soil）	土粒子間の結合が安定しており、侵食や分散のリスクが低い。
5~15	部分分散性土 （Partially Dispersive Soil）	土の一部が分散する可能性がある。流速や水の組成によって分散が進む場合あり。
15~25	分散性土 （Dispersive Soil）	土粒子間の結合が弱く、分散性が明確となる
25~40	分散性土 （High Dispersive Soil）	分散性が高く、パイピングや侵食のリスクが高い
>40	分散性土 （Extreme Dispersive Soil）	完全な分散性土で、大規模な侵食が生じる可能性がある。ソーダ土壌。

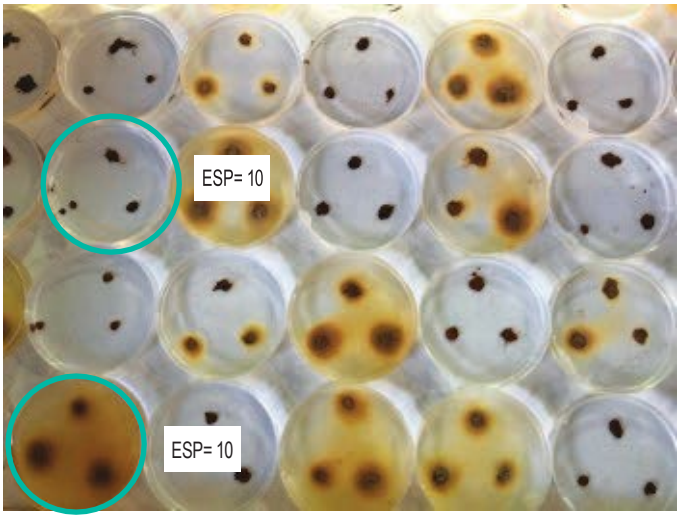
出典: JICA 調査団

表 8.2.6 ESP による土壌分類

ESP （%）	分類	特徴
<15%	正常土 （Non-saline soil）	ナトリウム濃度が低く、作物の成長に影響を与えない。
15~40%	アルカリ土 （Alkali soil）	高ナトリウム濃度により土の透水性が低下。作物への悪影響が出やすい。
>40%	ソーダ土 （Sodic soil）	非常に高いナトリウム濃度が原因で、土構造が崩壊し、排水性が悪化。地力が低く、特別な改良が必要。

出典: JICA 調査団

オーストラリアでは伝統的に ESP が 5 または 6 を超える土は Sodic 土壌とみなし、ESP が 15 を超える土は強 Sodic 土壌とみなされる。「Sodic 土壌」と「分散性土」という用語は、しばしば同じ意味で使われるが同義ではない。すべての Sodic 土壌が分散するわけではなく、土が分散する決定的な ESP は存在しない。オーストラリアでは ESP を拡散の尺度として使用することは推奨しておらず、ニューサウスウェールズ州北部とクイーンズランド州南部の土のサンプル 980 個を検査したところ、ESP が 5 以上の 737 個のサンプルのうち 38%が拡散しない結果が得られている。また、ESP が 26 の土でも分散しない結果が得られている。



出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce (2023)

図 8.2.6 ESP 値=10 で分散した場合と分散しなかった事例（オーストラリア北部地域）[David McKenzie, Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, 2023]

(2) ESI（Electrochemical Stability Index）による分散性の判定

土の塩分濃度とナトリウムの割合に基づいて、土の化学的および物理的安定性を評価するための指標である。この指数は土の電気伝導率（EC）と交換性ナトリウム百分率（ESP）を組み合わせたもので、土の分散性や膨潤性、透水性の低下リスクを示す。

$$ESI = \frac{EC_{1.5}\ \left(\frac{dS}{m}\right)}{ESP\ (\%)}$$

ここで、

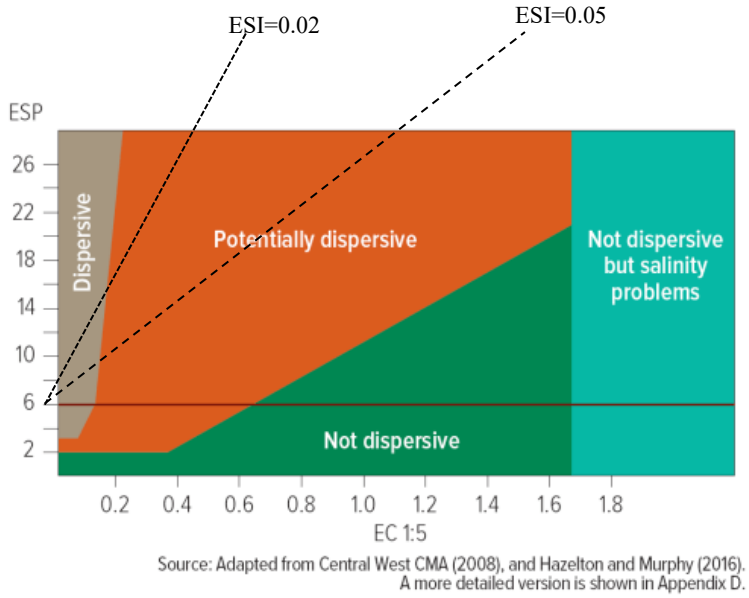
・EC1.5：土と水を 1:5 の比率で混ぜた溶液の電気伝導率（単位：dS/m）。

表 8.2.7 ESI による分散性判定基準

ESI	土の安定性	特徴と影響
＞0.1	安定 （Stable soil）	土粒子が安定し、透水性や構造が良好。
0.05-0.1	中程度の安定性 （Moderately stable）	軽度の分散や透水性低下が見られる可能性あり。
＜0.05	不安定 （Unstable soil）	土が分散しやすく、透水性の大幅な低下や膨潤が発生するリスクが高い。

出典: JICA 調査団

ESI は 0.05 以下になるとは土が分散性であることを示唆し、0.02 以下は強い分散性を示すことが多い。ESI は ESP よりも効果的な判定指標になると言われている。Central West CMA（2008）、Hazelton and Murphy（2016）は図 8.2.7 に示す塩分濃度 EC1.5 と ESP の関係図で分散性を判定している。ESI 単独よりも細かい判定ができている。



出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce (2023)に JICA 調査団が ESI の線加筆

図 8.2.7 ESP と EC を使った分散予測［David McKenzie, Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, 2023］

(3) SAR による分散性の判定

SAR（ナトリウム吸着比）は土水中のナトリウム（Na^+）の濃度が、カルシウム（Ca^{2+}）およびマグネシウム（Mg^{2+}）濃度に対してどれだけ高いかを示す指標である。ESP は全交換陽イオン容量（CEC）の Na+の割合であるが、SAR は Ca^{2+}と Mg^{2+}の割合に着目した値となっている。Ca^{2+}と Mg^{2+}は土粒子間の結合力を強化して分散性を抑える役割を果たす。SAR が高い土では交換性ナトリウムが過剰で土粒子が分散しやすくなり、透水性や構造の劣化が進行するリスクがある。SAR の値による分散性の判定基準は表 8.2.8 のとおりである。SAR > 13 であれば、分散性のリスクが高く、慎重な設計・対策が必要と言える。土の初期診断として、簡易分析でも把握可能な指標のため、広く使われている。ただし、単独判定では限界があるため、ESP・EC・ESI などとの併用による多角的な評価が望ましい。

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

ここで、

Na^+: ナトリウム濃度（meq/L, ミリ当量/L）

Ca^{2+}: カルシウム濃度（meq/L）

Mg^{2+}: マグネシウム濃度（meq/L）

表 8.2.8 SAR による分散性判定基準

SAR	分散性評価	特徴
<6	非分散性 （Non-Dispersive）	土構造が安定し、分散や侵食のリスクが低い
6~12（13）	弱分散性 （Low Dispersive）	土が一部で分散を示す可能性がある。条件によっては構造が不安定化することも。
12（13）~20	中程度分散性 （Moderately Dispersive）	分散性が高まり、土粒子が水中で離散しやすい。侵食リスクが増加。
>20	高分散性 （Highly Dispersive）	土構造が非常に不安定で、パイピングや侵食が発生しやすい。強化対策が必要。

出典: JICA 調査団

(4) CROSS による分散性の判定

主要な陽イオンである Ca、Mg、Na、K は粘土を安定化させる凝集力が異なる。陽イオンの相対的な凝集力は、Na =1、K =1.8、Mg =27、Ca =5 となる。しかし、ESP と SAR の計算では K が考慮されてなく、Mg は Ca と同等の凝集力を持つと仮定されている。このような現実の土壌化学をより正確に反映するために、Rengasamy & Marchuk（2016） によって提案されたのが、CROSS（Cation Ratio of Soil Structural Stability）である。CROSS は以下のように主要陽イオンの相対的凝集力を考慮して計

算される。Mg^{2+}はCa^{2+}よりも粒子間凝集力が強いとされ、K^{+}もNa^{+}よりわずかに高い凝集力を持つ。

$$CROSS = \frac{Na + 0.56K}{\sqrt{Ca + 0.6Mg}}$$

CROSS を用いた判定基準は表 8.2.9 の通りとなる。CROSS はK^{+}の影響を考慮できる唯一の化学指標となる。Mg^{2+}とCa^{2+}の凝集力の差を反映することで、実際の土の挙動により忠実である。また、ESP や SAR と異なり、化学的構造安定性の"質"の評価が可能である。よって、分散性土の評価においては単独ではなく、EC、ESP、SAR、ESI 等との併用により、信頼性の高い診断が可能となる。

表 8.2.9 CROSS による分散性判定基準

CROSS	分散性の判定	特徴と影響
>10	安定（Stable soil）	土は非常に安定しており、分散のリスクはほぼない。
5~10	やや安定（Moderately stable）	条件によって分散が起こる可能性があるが、通常は安定している。
2~5	分散のリスクあり（Dispersive）	土が分散し始める傾向があり、団粒構造が失われるリスクがある。
<2	高度に分散（Highly dispersive）	土粒子が分散しやすく、透水性や構造が大幅に低下する。

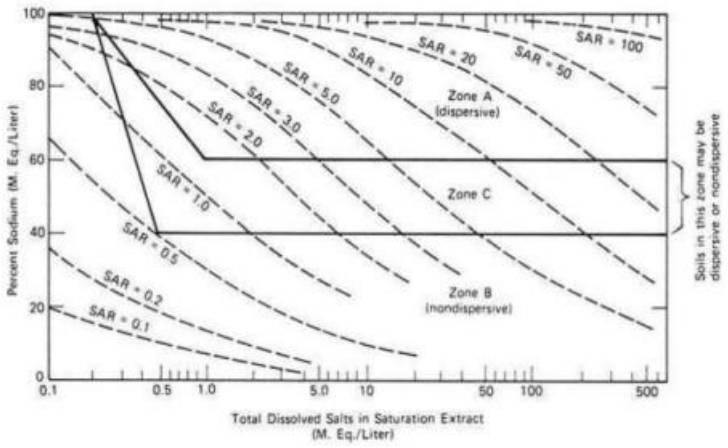
出典: JICA 調査団

(5) 図による分散性判定

Sherard（1976）によると、カルシウム、マグネシウム、ナトリウム、カリウムの総溶解塩量（TDS）に対するナトリウムの割合と総溶解塩（TDS）の関係から図 8.2.8 ように分散性を判定できる。

$$Percent\ Solution\ (\%) = \frac{Na^{+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}} \times 100 = \frac{Na^{+}}{TDS} \times 100$$

Figure 4: Determination of dispersive soil in Chemical test



出典: A State of Art Review of Dispersive Soils: Identification Methods Perspective, Hassan Shoghi, Mahmoud Ghazavi, Sina Kazemian, Hossein Moayedi（2013）

図 8.2.8 総溶解塩（TDS）と Na+/TDS による分散性判定図 [Hassan Shoghi, 2013]

Gerber と Harmse（1987）は図 8.2.9 のように CEC と EPS 関係図から分散度を判定する方法を提案している。また、彼らは図 8.2.10 に示すフローで判定する方法も提案している。

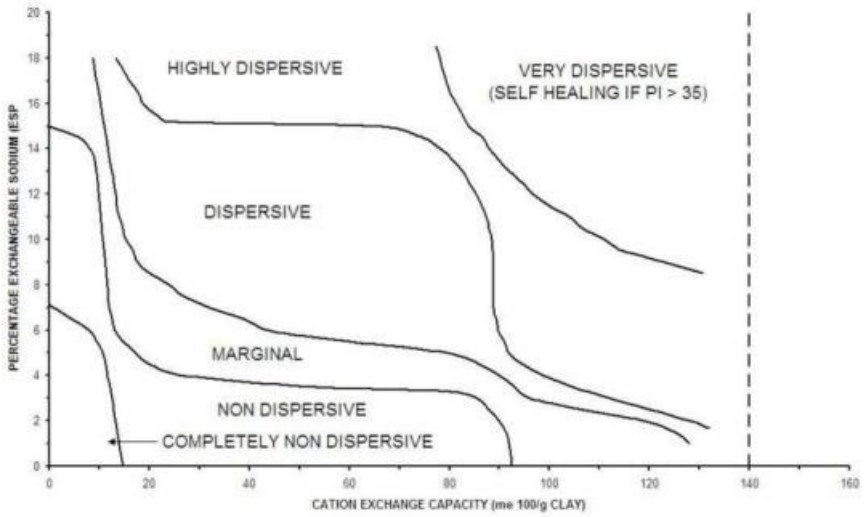


Figure 2-8: Diagram of determination of dispersion potential as a function of ESP and CEC (Gerber and Harmse, 1987)

出典: THE EVAULATION OF TEST PROTOCOLS FOR DISPERSIVE SOIL IDENTIFICATION IN SOUTHERN AFRICA, AMRITA MAHARAJ（2023）

図 8.2.9 粘土の CEC と ESP からの分散性判定図 [MAHARAJ, 2023]

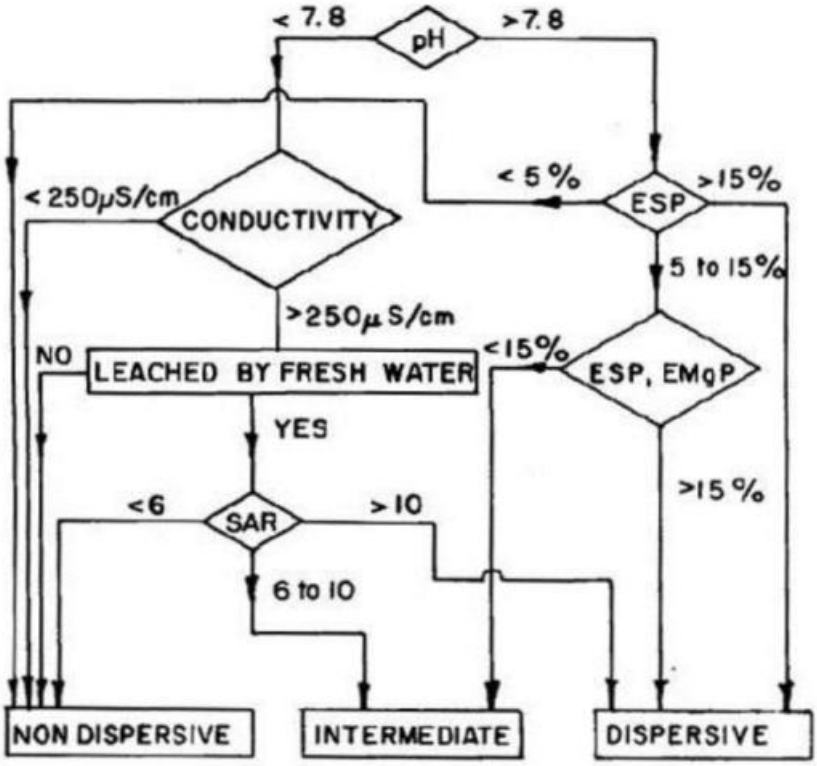


Figure 2-9: Alternative procedure for identification of dispersive soils. (Gerber and Harmse, 1987)

出典: THE EVAULATION OF TEST PROTOCOLS FOR DISPERSIVE SOIL IDENTIFICATION IN SOUTHERN AFRICA, AMRITA MAHARAJ (2023)

図 8.2.10 Gerber と Harmse（1987）の分散性判定フロー図［MAHARAJ, 2023］

(6) 複数の試験結果の点数合計による分散性判定

Waker（2000）は化学分析とピンホール試験を点数化して、その総合点で分散性を判定する方法（表 8.2.10）を提案している。

表 8.2.10 Waker(2000)による総得点による分散性判定法 [MAHARAJ, 2023]

Table 6-4: Rating system for the identification of dispersive soils (Walker, 1997; Bell and Walker, 2000)

Test	Class & weighting	Description of dispersivity			
Pinhole test	Class Rating	Dispersive 5	Moderate 3	Slightly 1	Non-dispersive 0
CEC vs. ESP	Class Rating	Highly 4	Dispersive 3	Marginal 1	Non-dispersive 0
Crumb test	Class Rating	Strong reaction 3	Moderate 2	Slight 1	No reaction 0
SAR	Class Rating	> 2 2	1.5 - 2.0 1		< 1.5 0
TDS vs. %Na	Class Rating	Dispersive 2	Intermediate 1		Non-dispersive 0
Total Dispersivity Rating		**Highly > 12**	**Moderately 8 – 11**	**Slightly 5 - 7**	**Non-dispersive < 4**

出典: THE EVAULATION OF TEST PROTOCOLS FOR DISPERSIVE SOIL IDENTIFICATION IN SOUTHERN AFRICA, AMRITA MAHARAJ (2023)

8.2.4.2 ピンホールによる分散性の判定

ピンホール試験は分散性粘性土の識別に用いられる物理的直接試験である。堤防・水路・アースダムなどの構造物に用いられる粘性土のコロイド侵食性（パイピング）を評価するために開発された。この試験方法と評価基準は、Sherard らが自然界で実際に侵食を受けた／耐えた構造物の粘性土を対象に行った数百の試験結果に基づいて確立されている。試験方法により、表 8.2.11 のようにカテゴリーで分散性が判定される。

表 8.2.11 試験方法による分散性判定カテゴリー

分散性判定	方法 A と方法 C	方法 B
非分散性	ND2、ND1	ND
やや分散性	ND4、ND3	SD
分散性	D1、D2	D

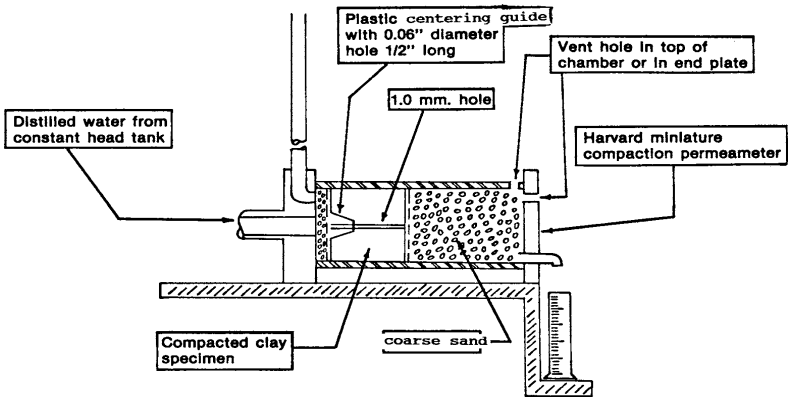
出典: JICA 調査団

ピンホール試験法は盛土の亀裂に沿って流れる水の作用をモデル化したものである。ピンホール試験と他の間接的な試験の結果を数百のサンプルで比較した結果、ピンホール試験の結果が自然界における粘土土の侵食性能と最もよく相関することが示されている。ピンホール試験は相似性の理論が用いられていないため、定量的なデータは得られない。そのため、ピンホールを通過する流量、土侵食量、土侵食速度を実際の現場条件に外挿するべきではない。しかし、このようなデータはダムの決壊、人命や財産の損失という観点から、このような侵食がもたらす結果を定性的に評価するのに有用である。ま

た、分散性粘土による決壊の影響を最小化するために必要な防御設計対策の費用対効果を検討する際にも利用できる。例えば、ND2（ごくわずかな分散性）に分類される土で発生するコロイド侵食の量は比較的長い期間にわたって非常に少量である。このような侵食は公共の安全が関係しないプロジェクトや、通常の維持管理手順で問題が処理されるプロジェクトでは、費用便益関係を評価する上で重要ではないかもしれない。このような場合、ピンホール試験の方法 B を用いて土を ND（非分散性）に分類することで十分である。

ピンホール試験の結果、土がわずかに分散性（方法 A または方法 C による ND3、または方法 B による SD）に分類された場合、構造物の設計または安定性において考慮すべき重大な問題については不確実性が高いことを示している。このような場合、問題評価のための十分な統計的サンプルを作成するために、同じ地域から他の多くの土を再サンプリングして試験することが望ましい。

ピンホール試験の供試体は直径 30～38mm、長さ 38mm である。直径の規定はなく、試験装置に合わせる。ピンホール試験の供試体は 6.8kg のバネ仕掛けのタンパーを使用してリフトごとに 16 回の締め固め、5 リフトで作成する。その密度は最大乾燥単位重量の約 95%に相当する乾燥単位重量となる。試験結果は乾燥単位重量の影響を受けないため、厳密な密度に設定する必要はないとされている。供試体に 1mm の穴が開け、50mm、180mm、380mm および 1020 mm の水頭で蒸留水を穴に通水する。排水の濁度、最終穴径、および流量に基づいて分散性を分類する。



出典: ASTM D4647

図 8.2.11 ピンホール試験装置の概略図（ASTM D4647）[ASTM D4647/D4647M Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test]

試験手順は方法 A、方法 B、方法 C は同じで判定する基準が違う（表 8.2.12、表 8.2.13、表 8.2.14）。方法 A および方法 C では土の分散特性を分類するために、流出水の濁度、ピンホールの最終的な大きさ、およびピンホールを通過する流量を測定するが、B 法では流量を測定しない。

細粒分（<0.005 mm）が 12%未満で、塑性指数が 4 以下の土には適用できない。このような土は分散特性に関係なく、一般に侵食に対する抵抗性が低い。なお、間隙水に含まれる全可溶性塩が 0.4meq/L 未満で、80%以上がナトリウム塩である分散性粘土ではピンホール試験で同定できなかった例がいくつか報告されている。

表 8.2.12 方法 A による分散性判定

分類	分散性度	判定方法
D1、D2	分散性	50mm の水頭で急速に破壊する
ND4、ND3	軽度から中程度	50mm または 180mm の水頭でゆっくりと侵食される。
ND2、ND1	非分散性	380mm または 1020mm の水頭下でのコロイド侵食はごくわずかか全くない。

出典: JICA 調査団

表 8.2.13 方法 B による分散性判定

分類	分散性度	判定方法
D	分散性	50mm の水頭で急速に侵食される
SD	わずかに分散性	180mm の水頭では侵食が遅い。
ND	非分散性	380mm の水頭下でコロイドの侵食をごくわずかに示すか、全く示さない。

注2-粘性土の分散性を分類する方法Bは、方法Aのカテゴリーを以下のように組み合わせたものである：D= D1、D2、ND4；SD = ND3；およびND = ND2、ND1。

出典: JICA 調査団

表 8.2.14 方法 C による分散性判定

分類	分散性度	判定方法
D1、D2	分散性	50mm の水頭で急速に破壊する
ND4、ND3	軽度から中程度	50mm、180mm または 380mm の水頭でゆっくりと侵食する
ND2、ND1	非分散性	380mm の水頭下においてコロイド侵食はごくわずかか全くない。

出典: JICA 調査団

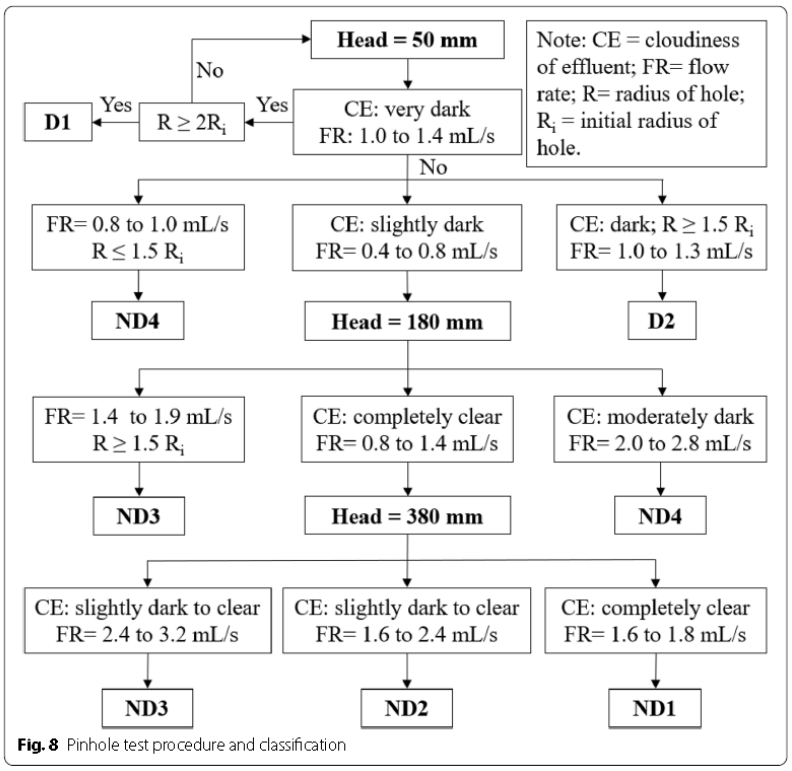
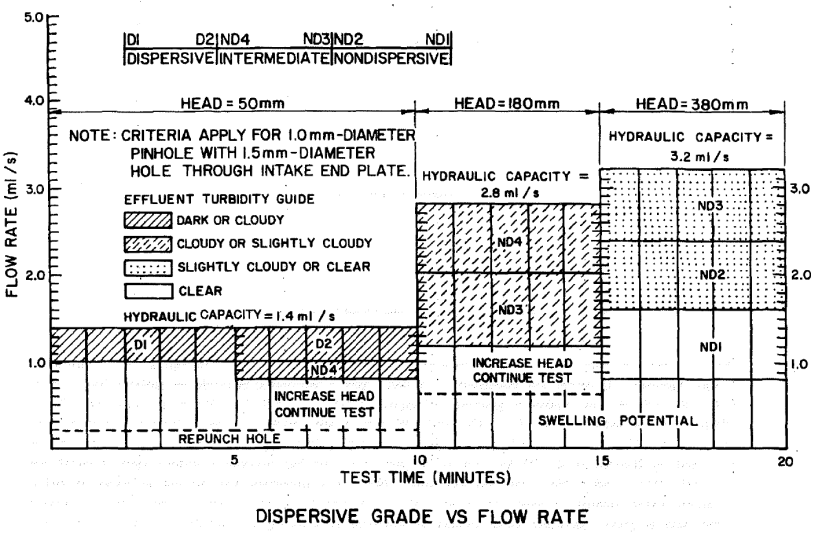


Fig. 8 Pinhole test procedure and classification

出典: Evaluation of erosion characteristics of soils using the pinhole test, Ba Huu Dinh, Anh-Dan Nguyen, Seo-Yong Jang, Young-Sang Kim（2021）

図 8.2.12 ピンホール試験の判定方法 [Ba Huu Dinh, 2021]



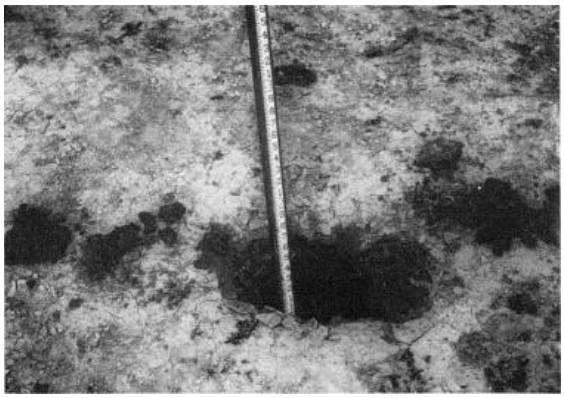
出典: CHARACTERISTICS AND PROBLEMS OF DISPERSIVE CLAY SOILS, Paul C. Knode, U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR Bureau of Reclamation, 1991

図 8.2.13 ピンホール試験の判定方法 [Knode, 1991]

8.2.5 分散性土の工学的問題点

内部侵食破壊と深刻な表面侵食は分散性粘土を水理構造物に使用されるときに特定される主要な問題である。分散性粘土は一般に透水性が低いか非常に低いため、内部を通過する水の速度は非常に高い水頭差になっても、土粒子の移動を引き起こさない。しかし、ひび割れなどの開口部が発生すると、分散した粘土粒子は懸濁状態となって開口部を通って移動する水とともに簡単に運ばれる。分散した粘土は乾燥亀裂の影響を受けやすくなる粘土鉱物をかなりの量含んでいる。ダムの亀裂は沈下差または水圧破砕の結果としても発生する可能性がある。特に導管などの不連続性の近くまたは周辺で締め固めが不十分なゾーンがあると開口部が生じる可能性がある。分散性の粘土で作られたアースダムは非常に低い水頭差でも亀裂やその他の開口部からの内部侵食によって非常に急速に決壊する可能性がある。

分散性粘土に関連する 2 つ目の問題は堤防や切土斜面の露出面に垂直または垂直に近いトンネル、「ドラゴンホール」が発達することである。ドラゴンホールは文献では「jugs」と記載されている（jug は水入れ、水差し、つぼ、ジョッキを意味する）。カンボジアでは道路や灌漑水路の脇にできる同様な穴をドラゴンホールと称しており、分かり易いのでそれを用いる。ドラゴンホールは小さな乾燥亀裂、もぐらの穴、腐敗した根、動物や車両の足跡によって作成された開口部、または降雨や地表流出水が集まる小さな表面のくぼみから発生する可能性がある。ドラゴンホールは深さ 3m まで伸び、底の直径は 1m 弱である。上部の開口部の直径は様々だが、多くの場合、初期は 25mm 未満である。ドラゴンホールは侵食があるポイントの大きさに達するとしばしば崩壊したり陥没したりする。斜面では激しい rilling（小さな溝）やガリの発達も発生する。修理せずに放置すると、道路では大きな陥没が生じたり、堤防ではパイピングホール、溝やガリが生じたりして浸透破壊を起こす可能性もある。しっかり植えられ成長した植生があったとしても、分散性粘土でパイピングやガリ等の表面侵食が発生するのを防ぐことはできない。



出典: ENGINEERING ASPECTS OF SOIL EROSION, DISPERSIVE CLAYS AND LOESS, C.W. Lovel, Richard L. Wiltshire（1987）

図 8.2.14 典型的なパイピングホール［C.W. Lovel, 1987］



出典: カンボジア国既設道路の陥没の原因となる降雨浸透水を排除する機能性を有した排水シート敷設案件化調査, JICA

図 8.2.15 ドラゴンホールによる陥没［JICA］



出典：JICA 調査団

図 8.2.16 トンレサップ灌漑事業（カンボジア, NK）



Figure 2. Failure of embankment constructed on dispersive soil (Missipi, USA)

出典：STABILIZATION OF DISPERSIVE SOIL BY USING FLY ASH, Md. Omar Faruk, Mohammad Shariful Islam, Mohammad Ziaul Hoque, Marzia Ashraf Shorno, 2019

図 8.2.17 ダムのパイピングによる崩壊［Md., 2019］



出典：Landslide Failure Mechanisms of Dispersive Soil Slopes in Seasonally Frozen Regions, Lixiang Wang, Xiaoming Yuan and Miao Wang, 2020

図 8.2.18 色々な分散土崩壊事例［Lixiang Wang, 2020］



Figure 5. Piping failure or tunnel erosion in a dam constructed from soils derived from Permian mudstone. This dam is known to have failed on first filling. The image was taken from the dam floor.

出典：Dispersive Soils and their Management Technical Reference Manual, Tasmania, 2009

図 8.2.19 ダムのパイピング、トンネル侵食 [Tasmania, 2009]



Figure 6 (a). Tunnel erosion resulting from construction of a culvert in dispersive clay (b). Tunnel erosion caused by installation of optical fibre cable in dispersive soil.

出典：Dispersive Soils and their Management Technical Reference Manual, Tasmania, 2009

図 8.2.20 トンネル侵食 [Tasmania, 2009]
(a)暗渠建設、(b)光ファイバーケーブル敷設

8.2.6　分散性土の対策方法

分散性土の対策方法について、体系的対策マニュアルや分散性土に特化した図書や文献は無く、複数の分野にまたがる知見と技術の組み合わせで対応しているのが現状である。事例等から、分散性土の対策工法として考えられるものを図 8.2.21 に示す。

力学的対策としては河川堤防やダムで行われる適切なフィルター材の配置である。灌漑水路や運河の水理構造物の対策としてはコンクリートやアスファルトを用いた法面保護やメンブレンや遮水シートの対策がある。分散性土の分散性を抑制するために、石灰、セメント、フライアッシュ、石膏、ポゾラン等の伝統的な材料を用いて安定処理が行われてきているが、セメントや石灰は高価な

ため、廃棄していた材料などを混合する方法や、環境に対して優しいポリマー安定処理の使用が検討されている。侵食防止で藻類などの植物を原料にした材料も検討されている。



出典: JICA 調査団

図 8.2.21 分散性土の対策工法

表 8.2.15 分散性土に適用される主な対策方法

安定処理方法	処理法概要	利点	欠点
分散性土撤去置換工法	分散性土を除去し、非分散性土で置き換える。	シンプルで簡単に実施できる。 多くの場合、他の方法よりも迅速である。 最も確実かつ効果の高い対策と言える。	必要な範囲や厚さによっては実用的ではない場合がある。 掘削時の水の浸入により建設中に損傷する可能性がある。 置換できる良質材の確保が難しい地域や状況では適用が難しい。
フィルター層配置	砂のフィルター材を敷設することで、分散性粘土の漏水を封鎖して制御する。	施工は容易である。 砂のフィルターはシルトサイズの粒子が水の流れとともに運ばれるのを防ぐことが	フィルター材は懸濁液中のコロイド粘土粒子が通過するのを防ぐことはできないため、完全な分散性対策には

安定処理方法	処理法概要	利点	欠点
		できる。	ならない。 フィルター材料は亀裂を効果的に封じ込めるために非粘着性でなければならない。
浸透/侵食水流路遮断	分散性土盛土等の上部や側面を各種材料や構造物で被覆し、雨水等の浸透防止と乾燥亀裂の発生を抑制する。	工法としてはシンプルである。 変状要因となる水の侵入自体を抑止することができるため、効果が確実である。	保護工設置前の分散性土盛土中に材料や斜面を乾燥させると乾燥による亀裂が生じる可能性があるので注意が必要。 材料によってはコンクリートブロック等の構造物工となりコストがかかる。
力学的補強材	舗装路盤等において、フィブリル化ポリプロピレン繊維、CBR ポリプロピレン繊維強化剤、天然繊維、グラスファイバーなどの添加により再成形土を改善する。	粒子間のせん断強度の向上が期待できる。 凝集性を高めることにより安定化効果を期待できる。 天然繊維など、現地調達が可能な材料を用いることができる可能性がある。	繊維の現場混合性（均一性）に課題がある。 粗粒材料では効果が大きいが、粘性土単独では限界があるため、化学安定処理と組み合わせて使用するのが有効。
化学的安定処理	化学反応や陽イオン交換を利用して、分散性土の物理化学的性質を改良する。	置換材が不足する地域で経済的に有利と考えられる。 分散性土は消石灰（水酸化カルシウム）、石膏（硫酸カルシウム）、ミョウバン（硫酸アルミニウム）、フライアッシュ、農業用石灰、塩化マグネシウム、消石灰と農業用石灰の混合、糖蜜、アスファルト溶剤、ポリマーなどの化学改質剤を添加することで、完全に非分散性土に変換できる。	不純物を多く含む改良材の品質が低い。 改良材が入手しにくい、 産業部門での改良材の競合需要と環境目的での改良材の使用に対する政府補助金の大幅な削減やコストの増加。

出典: JICA 調査団

8.2.6.1 化学的安定処理

置換材の入手が困難となる地域の場合は化学的安定処理が経済的に有利な対策方法となる。

分散性土は消石灰（水酸化カルシウム）、石膏（硫酸カルシウム）、ミョウバン（硫酸アルミニウム）、フライアッシュ、農業用石灰、塩化マグネシウム、消石灰と農業用石灰の混合、糖蜜、アスファルト溶剤、ポリマーなどの化学改質剤を添加することで、完全に非分散性土に変換できる。これらの化学物質は陽イオン交換複合体内のナトリウム Na^{+}を置き換えるカルシウム Ca^{2+}（またはアルミニウム Mg^{2+}）源として使用され、粘土間の距離を大幅に短縮する。石灰、石膏、ミョウバンを散布すると、土溶液の電解質濃度と土内の交換可能なカルシウムのレベルの両方が増加する。これにより粒子間の膨張圧が低下し、分散の可能性が低下する。石灰は溶解性が高く、コストがセメント

と比べて安いため、最も一般的に使用される化学的安定処理材となる。石膏は電解質含有量が高いため、土の分散性を下げるのに一般的に効果的であるが、溶解性が低く、コストが高いため、石膏の使用は制限される。実験室では粘土の質量に対して石灰または石膏を 0.2%添加することで分散性を抑制できるが、建設現場では混合を改善し、土全体に適切かつ均一に分散させるために通常最低 2%が使用される。いくつかの開発途上国では分散性土の化学的改良に下記のようないくつかの制約があった。

1. 不純物を多く含む改良材の品質が低い
2. 改良材が入手しにくい
3. 産業部門での改良材の競合需要と環境目的での改良材の使用に対する政府補助金の大幅な削減やコストの増加

このため、コストが安く入手が容易な材料、廃棄物として処分されていたような材料を石灰やセメントと混合して安定処理に使用する研究が検討されている。

(1) フライアッシュ [Hasan Savaş, 2018]

フライアッシュ（Fly Ash）は火力発電所からの副産物であり、ポゾラン反応を活用した安定処理材として注目されている。特に化学的改良が求められる分散性土に対し、環境的・経済的に持続可能な安定処理材として研究が進められている。

Hasan Savaş ら（2018）は、2 つの異なるクラス（F および C）のフライアッシュを分散土に使用した場合、クラス C フライアッシュはクラス F フライアッシュよりもはるかに分散性に効率的であることを報告した。この違いはクラス C フライアッシュの方が石灰含有量が高いためである。対照的にクラス F フライアッシュは分散性土の安定化に単独で使用すべきでないと報告されている。ただし強度の向上には両方のフライアッシュが添加剤比率の増加に応じて強度を増加できたが、クラス C フライアッシュの方がかなり高い強度値が得られた。

出典: Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils, Hasan Savaş, Murat Türköz, Evren Seyrek, Emin Ünver, 2018

(2) ミョウバンと石灰混合

ミョウバン（硫酸アルミニウム）は分散粘土を安定化するために使用されている。ミョウバンと石灰を混合することにより分散性土が改善させることが可能である。結果は以下のとおりである

1. ミョウバンを添加すると土の分散が制御され、せん断強度が最大 50%向上した。
2. ミョウバン含有量を 1%にすると粘着力が最大 61%向上したが、それ以上では粘着力が低下した。
3. ミョウバン含有量が 0.6%のとき内部摩擦角が最少になることが分かった。
4. 石灰またはミョウバンの添加により分散性粘土の強度と剛性の両方の評価が向上した。
5. 石灰含有量 5%で一軸強度が最大となり未処理粘土の約 2 倍となった。
6. 石灰含有量 3%で弾性係数の最大となり未処理粘土の 5 倍となった。

出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics - Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce, 2023

(3) 石膏

石膏（$CaSO_4.2H_2O$）などの改良剤は土溶液に可溶性の Ca^{2+}源を供給し、交換複合体上の過剰な Na^+を置き換える。硫酸（H_2SO_4）などの他の改良剤は方解石の溶解速度を速めて溶液に十分な量の Ca^{2+}を放出するのに役立つ。1 世紀にわたるソーダ土壌管理の実践から、世界の様々な地域で化学的改良剤特に石膏が広く使用されている。

出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics - Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce, 2023

(4) ポゾラン

ポゾランは細かく分割された珪質、または珪質とアルミニウムの混合物質であるが、それ自体ではセメントとしての価値はまったくない。ただし水分が存在すると、常温で石灰と化学反応を起こし、セメント化合物を形成する。天然ポゾランは異なる地域毎に特有な化学組成があるために多様な特性を持ち、それらの添加材で処理された土は様々な結果をもたらす可能性がある。

セメントはポゾランに比べてコストが高いため、セメントの一部をポゾランに置き換えることには利点がある。1.5 パーセントのセメントと 5 パーセントのポゾランが分散性粘土の処理に有益な結果をもたらすことが報告されている。

出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics - Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce, 2023

(5) 化学的処理に対する留意点

石灰安定処理は土に硫酸イオンが含まれているような場合、石灰により膨潤性が増加し、土の強度が低下する。

分散性粘土を安定化させる添加剤としてポルトランドセメントを単独で使用した場合、セメントは石灰よりも優れているとは言えない。

分散や侵食に対して最も耐性のある安定処理された粘土は物理的ストレスに対して必ずしも最も耐性があるわけではない。

8.2.6.2 建設工事における対策

建設工事においては特にダムのパイピングが人命及び経済的損出に大きな影響を与えるため多くの研究と対策が試みられている。

分散性土を置換して対策するのが一番効果的で、施工速度、経済性で優れているが、置換する材料の入手が困難な場合は化学的安定処理も検討され、そのほかに固有な問題に応じた対策も検討されている。分散性土の実験的な研究報告は多いが、対策事例の報告は少ないのが現状である。

(1) ダムのパイピング対策

国際大規模ダム委員会（ICOLD）は一定の予防措置を講じれば、分散性粘土を使用してダムを建設できると報告している。

分散性土はアースダム建設に使用する場合に特別な処理が必要となる。Elges（1985）は脱凝集によるパイピングを回避するには締固めた材料の透水性が 10^{-5}cm/sec を超えてはならないと述べている。10^{-6}cm/sec の透水性が透水性の下限とされているが、小規模ダムの排水経路が短い場合は、10^{-7}cm/sec の透水性が下限としなければならない。したがって、分散性粘土をアースダムに用いる場合は、透水性の範囲を 10^{-5}～10^{-7}cm/sec となるようにしなければならない。砂のフィルター材は分散性粘土の漏水を封鎖して制御できることがよくある。砂のフィルターはシルトサイズの粒子が水の流れとともに運ばれるのを防ぐ。シルトサイズの粒子は漏水路に保持され、その後漏水を封鎖する。ただし、フィルター材は懸濁液中のコロイド粘土粒子が通過するのを防ぐことはできない。フィルター材料は亀裂を効果的に封じ込めるためには非粘着性でなければならない。材料が粘着性を有する場合、崩壊することなく「open flood crack （sic)」が発生する可能性があるので注意しなければならない。

別な対策方法としてはブチルゴム、ポリエチレンシート、ベントナイトなどの遮水膜／層用いた上流ライニング保護工である。

限られた期間貯水池の水の電解質濃度を石膏や石灰などの化学物質を用いて高め、その浸透により土の分散性を抑制する例がある。

ダムの構造的対策としてはチムニーフィルターがある。チムニーフィルターは堤防内の垂直ゾーンとして設計され、中央コア設計ではダムの中心線近くに配置し、約 0.6～1.0m で掘削部分の下から計画最大水位まで伸ばす。

土取場の材料が完全に分散性または非分散性であると明確に識別できる場合には、分散性粘土は浸透や内部侵食に問題が少ないコアの上流の土堰の内部に配置する。非分散性または分散性の低い土は堤防の表面を覆う。この被覆は下にある分散性粘土が乾燥による亀裂を生じるのを防ぎ、それによって浸透水の揺れ（jugging）を減らすことができる。

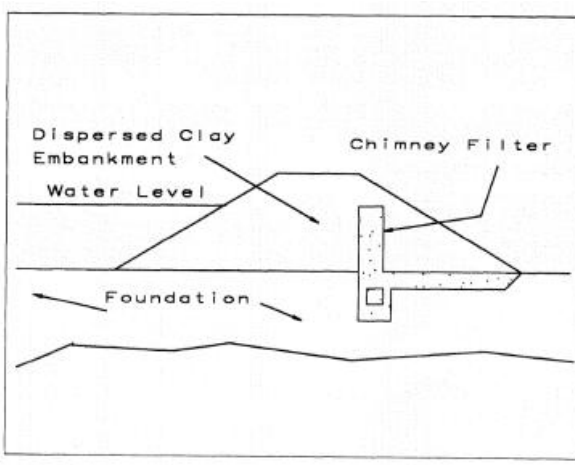


Figure 10. Chimney Filter in Embankment of Dispersive Clay

出典:SOIL MECHANICS NOTE NO. 13 DISPERSIVE CLAYS,
U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service
Engineering Division, 1991

図 8.2.22 チムニーフィルターによる対策［U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division, 1991］

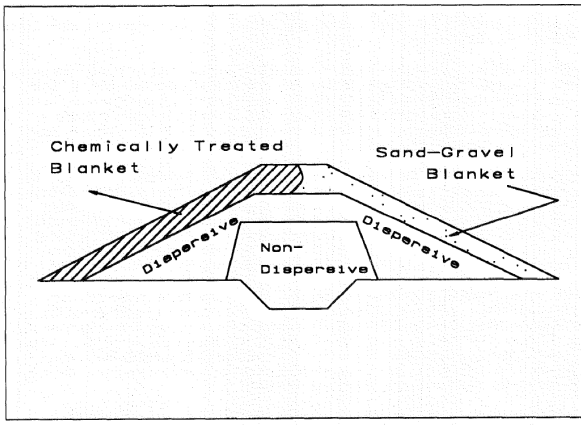


Figure 9. Blanket Treatment of Slopes and Zoning Plan for Dispersive Clays.

出典:SOIL MECHANICS NOTE NO. 13 DISPERSIVE CLAYS,
U.S. Department of Agriculture Soil 8 onservation Service
Engineering Division, 1991

図 8.2.23 安定処理したブランケットによる対策［U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division, 1991］

(2) 道路舗装

舗装路盤では個別のフィブリル化ポリプロピレン繊維の混入による力学的安定化や CBR ポリプロピレン繊維強化剤の添加による再成形土の改善などが行われている。このメカニズムの主な懸念事項は、粘土への繊維の現場混合性である。力学的補強材はポリマーやプラスチックから作られるのが最も一般的であるが、木質繊維やガラス繊維（グラスファイバーなど）から作ることもできる。ポリマーは粘土鉱物とポリマーの極性末端基との結合により顕著な土の安定化効果を示す。様々な研究で土にポリマーを添加すると隣接する骨材間の結合が改善され、安定化と粘土の凝集につながることが報告されている。

力学的補強を単独の安定剤として使用するのは摩擦特性が高いので粗粒材料に限られる。粘土質土は石灰またはセメント安定化と組み合わせた力学的補強で安定化できる。組み合わせて使用する場合は石灰またはセメントなど様々な化学添加物を適用させている。

Bisrat Gissila Gidday ら（2020）は路床舗装の等級に高い強度と品質を与えるための石灰混合量は乾燥土重量の 7%～9%であると報告している。

Batool ら（2015）はパキスタンの Khushab 土と言われる不安定な分散性土について石灰とセメントを異なる割合で添加して、添加量を 6%にした時 CBR が一番向上したため、道路に使用できると報告している。

(3) 斜面対策

切土と盛土で分散性土が斜面に露出する場合は法面の侵食を防ぐために分散性材料を処理するか除去する必要がある。分散性のない土で保護することもある。盛土ダムの建設と同様に側面と上部をより適切な材料で囲み、分散性土を盛土の中心に取り囲む方法もある。盛土中に材料を乾燥させると乾燥による亀裂が生じる可能性があるので注意する。スルホン化石油製品（SPP）処理を用いて粘土中のナトリウムを置き換えて材料を安定処理する方法もある。藻類を利用した斜面侵食対策も検討されている。

(4) 灌漑事業

ゴトヴァンド灌漑プロジェクト（イラン）で土の安定化のために石灰を加える効果を研究して、石灰を 3%加えると分散性土が非分散性の安定土に変わることを報告されている。少量の石灰乳を加えると土の強度がわずかに高まり、分散が大幅に減少することも報告されている。添加量が 6%のときに最大の効果が得られ、その後は逆の現象が起こる。ピンホールテストによると、土に 6%を超える量で石灰処理すると土壌侵食に対する耐性が高まるが、これは小さな水頭の場合のみで、より大きい水頭では突然強度が低下すると報告している。これは 6%を超える量の使用は危険である可能性があることを意味し、堤防に突然の破損が発生し、構造物の安全性にとって非常に危険になる可能性がある。そのため、5%の石灰乳の添加が推奨されている。

8.2.7 分散性土の設計基準、ガイドライン

分散性土に関する正式な国際的設計基準や統一規格は存在しない。そのため、分散性土の対策は一般に個別プロジェクトの現地条件と経験的な対処法に基づいて進められている。ただし、分散性土の研究はオーストラリアでよく行われており、以下の２つの地域で分散性土の管理方法のガイドラインが作成されている。設計基準というよりは分散性とで問題になったときの管理方法について述べられている。両者は極めて似ているが、新しく策定された Ipswich 市のガイドラインには有用な管理方法が述べられているので情報を説明する。

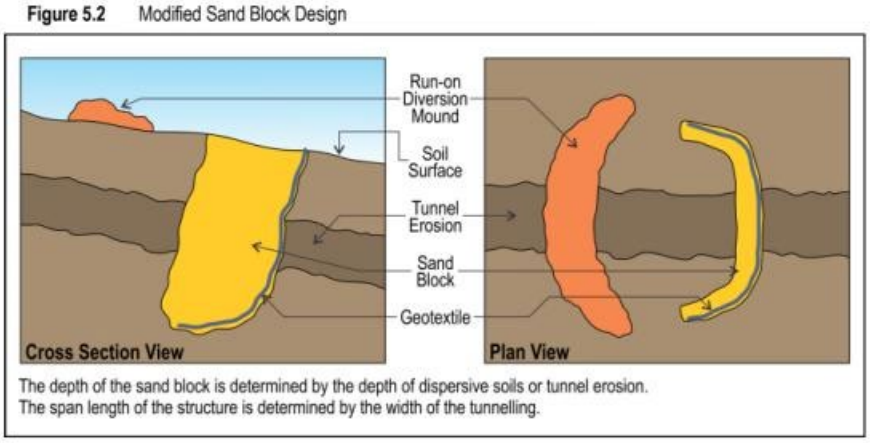
- Dispersive Soils and their Management Technical Reference Manual, Tasmania（2009）
- IMPLEMENTATION GUIDELINE NO. 28, Ipswich planning Scheme（2016）

8.2.7.1 Ipswich 市の分散性土の管理方法のガイドライン

オーストラリアの Ipswich 市では分散性土の管理方法のガイドラインを作成している（2016）。それによると侵食の防止と管理は次のものを組み合わせて行うことができるとされている。

- 分散性土の特定と回避
- 土の再圧縮

・ 化学的改良
・ 砂ブロックと障壁の使用（図 8.2.24 を参照）
・ 非分散性表土の使用と植生の再生



出典: IMPLEMENTATION GUIDELINE NO. 28, Ipswich planning Scheme（2016）

図 8.2.24 砂ブロックと障壁［Ipswich planning Scheme, 2016］

次のチェックリストを使用して土の分散のリスクを軽減できるとされている。

- 分散性の可能性がある土に石膏を塗布する。注: 石膏を含む化学処理の適用は、特に水路に近い場合（例: 堤防の上から 20 m）、pH レベルの有害な変化を回避する必要がある。樹木/植生の保持を目的としたエリアでは化学的改良の機械的な適用も避ける必要がある。
- 土地が露出する時間を最小限に抑える（例: 段階的な開発）。
- 雨水や流出水を分散性土から離れた比較的侵食に強い地域（石膏を混ぜた花壇、十分な表土のある既存の植生の豊かな地域、石の多い高台など）に排出する。注:雨水の排出は、河岸や水路の通路に悪影響を与えてはならない。
- 屋根や建物からの流出水を捕集するために雨水タンクを使用し、比較的侵食に強い地域にパイプで流す。
- 露出した分散性土を表土（少なくとも 150 mm の深さ）で覆い、ジオテキスタイルバリアを使用する。
- 露出した地域、特に急斜面の地域に植生を回復させる。
- 捕集した流出水はできるだけ広い範囲に分散させ、拡散させる必要がある。

8.3 ラテライト

8.3.1 特徴

ラテライトは鉄とアルミニウムが豊富な土で、一般的に高温多湿な熱帯地域で形成される。酸化鉄の含有量が高いため、ほぼすべてのラテライトは錆びた赤色を呈する。

ラテライトは湿潤期と乾期が交互に繰り返される高温と大雨の条件下で、母岩が集中的かつ長期の風化によって発達する。形成のプロセスはラテリゼーションと呼ばれる。

熱帯風化は、化学風化の長期にわたるプロセスであり、結果として生じる土の厚さ、粒度、化学的性質、鉱物学的性質の変化に影響を及ぼす。

歴史的にはラテライトはレンガのような形にカットされ、記念碑の建設に使用されていた。西暦1000 年以降のアンコールワットや他の東南アジアの遺跡の建設は、ラテライト、レンガ、石で作られている。アンコールワットから東に約 60km にあるプラプトス橋（図 8.3.1）はラテライトの石橋として、12 世紀後半～13 世紀初頭にかけて建設され、現在も国道 6 号線として使用されている。

Wooltorton（1975）はインド、アフリカ、米国、オーストラリアでの経験に基づいて、ラテライトが problematic soil であると報告した。また、Terzaghi はケニアの Sasumua Dam の「赤土 red soil」を試験前に炉乾燥すると、極端に液性限界と塑性限界が変わることに気づき、ラテライトが従来の土と異なるため、problem soils に分類した。



図 8.3.1 ラテライトで建造されたプラプトス橋（カンボジア）

出典: 建設コンサルタンツ協会『Consultant』編集部『土木遺産 II アジア編』(2007)

8.3.2 ラテライトの定義

ラテライトの定義は化学的な定義、形態的な定義、農業・土壌学的定義、鉱床・資源工学的定義、工学的定義がある。

8.3.2.1 化学的な定義

ラテライトの化学的な定義として、アルミナ（Al_2O_3）含有量や三二酸化物（Fe_2O_3＋Al_2O_3）成分から定義する方法がある。この方法ではシリカと三二酸化物比（SiO_2 ／ R_2O_3）に基づいてラテライトを 3 種類に分類するもので、表 8.3.1 のように分類する。

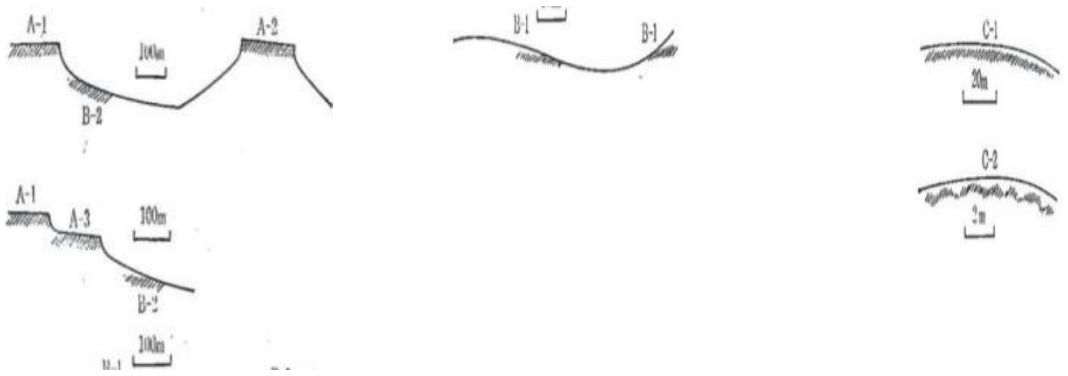
表 8.3.1 ラテライトの化学的定義

SiO_2 / R_2O_3 の比	SiO_2 / Fe_2O_3 の比	定義
＜1.33	＞0.5	真のラテライト
1.33～2.0	0.2～0.5	ラテライト性土（Lateritic Soil）
＞2.0	0.2＜	ラテライト性でない熱帯風化土

出典: JICA 調査団

8.3.2.2 地形・形態的な定義

ラテライトが分布する地形は、形態的にいくつかの特徴があり、Young はそれらを図 8.3.2 に示す 3 つのタイプに分類した。



台地ラテライト（A）
（Plateau Laterite）

谷地形ラテライト（B）
（Valley Laterite）

地形に沿った土層中に存在するラテライト（C）
（Laterite as a soil horizon following the relief）

図 8.3.2 ラテライトの地形的特徴

出典: Tropical Soils and Soil Survey, Young. A（1976）

台地ラテライト（A）は厚い硬殻として存在し，頂部は侵食に耐えて残留した形になっている。頂部は水平に見えるが、2°以内のゆるい傾きを呈している。このような硬殻は地形学的には風化に抵抗する岩の一種で、台地状の残積物、岩台、険しい岩山とその崩積斜面という特徴的な地形となっている。斜面には粒状ラテライトか再固結ラテライトがあり、2 種類の硬殻を持つ場合もある。薄いラテライトの水平層が台地地形から始まり、谷地形でなくなっている場合もある。この硬い風化殻は，Duricrust の名称が使われることもあり、鉄分が多い場合は Ferricrete と呼ばれる。

谷地形ラテライト（B）は谷地形床の端部や急斜面下部に存在する。このような谷地形ラテライトは、サバンナ気候地域のゆるやかな起伏の平原にある谷地形において、地下水のしみ出している位置と同じになっている。

地形に沿った土層中に存在するラテライト（C）は台地や谷地形の端部に見られるのではなく、地形に沿った土層中に存在する。20～100cm 程度の厚さの粒状ラテライトを持つ場合が多く、しばしば土と完全に風化したサプロライト（Saprolite、岩石が化学的な風化を受けて形成された風化層の一部）の間に存在する。

形態的には以下の４つの特徴を有している。

- 斑紋を有する未固結の粘土で、地表に曝されると不可逆的に硬盤（hard pan あるいは crust）に変化する
- 嚢胞状構造をもつ硬盤（cellular あるいは vesicular laterite crust）
- 非固結マトリックス中の結核（concretion）や瘤塊（nodule）
- これらの結核や瘤塊の連結された固塊

8.3.2.3 農業・土壌学的な定義

農業・土壌学の分野では，FAO（国連食料農業機関）や USDA（米国農務省）の土壌（土質）分類が有名である。FAO の土壌分類では熱帯地域に広く分布する赤色土はフェラリソル（Ferralsols）、アクリソル（Acrisols）、およびルビソル（Luvisols）に相当する。

ラテライトとして代表的な Ferralsols は熱帯地域の赤色土で、植物のよく繁茂している湿気の多い地域に分布している。粘土分の中に三二酸化物を含む土であり、カオリナイトとシリカも含む。土層断面にプリンサイト（斑状）層を含むことがある。

8.3.2.4 鉱床・資源工学的な定義

ラテライトは、最初鉄成分を多く含むため、鉄鉱石原料として位置付けされ、20 世紀前半から世界各国で鉱物資源として研究が進んだ。

ラテライトは本来化学的・鉱物学的に何ら意味のない名前であって主としてカオリンと酸化鉄からなる土のことを指していた。しかし、熱帯土の研究が進むにつれて酸化アルミニウムと酸化鉄を相当量含有し、建設材料と関係ない土もラテライトと称するようになった。現在ではラテライトの定義

は必ずしも明確ではないが、laterization と呼ばれる風化作用により生成された土で、主として鉄・アルミニウムの酸化物、カオリンなどによって構成される土をラテライトとしている。

なお、同様な過程で生成された土でアルミニウムに富むものをボーキサイト aluminous laterite、鉄に富むものをラテライト ferruginous laterite と称している。

世界のラテライト鉱床は熱帯地域で超塩基性～塩基性岩類として分布し，地形的に平坦なところで生成されている。

8.3.2.5 工学的定義

母岩の風化によって形成される土の土層断面は、その地方の気候に強く影響される。風化残積土の土質特性は気候の影響を強く受けるため、温帯地方の特性とは異なる。

ラテライトの分類法はいくつか提案されているが、現在まで定義や分類の最終的なコンセンサスは得られていない。

Young は「ラテライトは鉄の酸化物が豊富な硬い物質で、その硬さは水に浸潤させても乾燥粘土の強度以上に保持される。壊すのにハンマーやピックが必要であり、その鉄成分はゲーサイト、ヘマタイト、アモルファス状鉄酸化物が主であり、鉄石、フェリクリートや赤土と同義語である。ラテライトは明赤褐色（5YR5/6）で比較的大きな密度 2.5~3.6g/cm^3 を有し、アルミニウムの二次鉱物や石英やカオリンを含み、他の型のシリカ成分は少ない。交換性塩基や腐食はない。」としている。そして、Young はラテライトを表 8.3.2 のように 5 種類に分類している.

表 8.3.2 Young によるラテライトの分類

(1) 塊状ラテライト (Massive Laterite)	連続した固い構造を持っている。時々完全に均質であるが、普通は空洞か土で満たされた空洞を含むことが多い。しばしば石英粒子や他の岩石と合体していることがあるが岩の構造は見ることができない。 ✓ セルラーラテライト（Cellular Laterite）： 空洞はほぼ円まっており、それらは互いにつながっていないか、部分的につながっている。 ✓ ベシキュラーラテライト（Vesicular Laterite）： 空洞が主に管状になっている.
(2) 粒状ラテライト (Nodular Laterite)	個々のほぼ円い粒状ラテライトで（ピゾリス状ラテライトpeaironとも呼ばれている）。 ✓ 固結粒状ラテライト（Cemented Nodular Laterite）： 個々の粒々は見えるが、同じ鉄石材料で一緒に強く固結しているもの。 ✓ 部分固結粒状ラテライト（Partly-Cemented Nodular Laterite） ✓ 未固結粒状ラテライト（Non-Cemented Nodular Laterite）： 粒々は完全に未固結であるが近接している。全体の重量の60%以上が粒状を形成している（Packed Nodular Lateriteとも呼ばれる）。 ✓ 鉄石（Iron Concretions）： 土の間に粒状の石が存在し、土層の重量の60%以下が鉄石である（Spaced Nodular Lateriteとも呼ばれる）。
(3) 固結ラテライト	塊状ラテライト（Massive Laterite）や鉄化岩（Ferruginlzed Rock）の破片を

（Recemented Laterite）	含む。部分的または全体的に固結している場合もあるし、破壊している場合もある。
(4) 鉄化石 （Ferruginized Rock）	岩の構造は残っていて見ることができるが、鉄にかなりの部分が置き代わっている。
(5) 軟質ラテライト （Soft Laterite）	鉄分の多い斑状粘土であり、空気に曝すもしくは乾湿の繰り返しにより固結するもの。

出典: ラテライトの定義について—その歴史的変遷も含めて、末岡徹（2021）

8.3.2.6 定義のとりまとめ

ラテライトは以下の 4 つの条件を満足している風化生成物である。

- 熱帯・亜熱帯地域に分布している（古気候を含む）。
- 地形的特徴がある。
- 硬盤や塊状・粒状などの建設材料としての強度・固結度が存在する。
- 含有化学成分としてアルミや鉄などの三二酸化物を多く含む。

8.3.3 ラテライト化 Lateritization

ラテライト化とは熱帯・亜熱帯のような高温で、かつ雨量の多いところで行われる土の生成作用である。高温多湿なため、一次鉱物の加水分解が急激に進行する。さらに、二次鉱物も不安定になる。これらの鉱物を分解するために、アルカリおよびアルカリ土類が絶えず土中に供給される結果、土は中性から塩基性反応の下で風化を受けることになり、ケイ酸は可溶性となり溶脱し、ヘマタイト（Fe_2O_3）、ゲーサイト（Fe_2O_3・H_2O），ベーマイト（Al_2O_3・H2O）、ギブサイト（Al_2O_3・$3H_2O$）など Fe、Al の三二酸化物ができる。このヘマタイトなど三二酸化物のために、土層は赤色を示している。

8.3.4 ラテライトの特徴

ラテライトは主に熱帯地域で見られる特殊な土で、赤褐色や赤色を呈している。これは酸化鉄や酸化アルミニウムが豊富に含まれているためである。ラテライトは風化の途中段階であるため、岩石から土までがあり、Crust（地殻）、礫、粘性土に分類される。ラテライトは風化状態によって材質が変化する。硬く堅固な表面を持っているものは建設材料や舗装材料として利用される。表 8.3.3 にラテライトの特徴を示す。

表 8.3.3 ラテライトの特徴

外観	赤色または錆色で、スラグ状またはスコリア状の外観
組成	酸化鉄鉱物、酸化チタン、アルミニウムの水和酸化物を含む
用途	道路建設、堤防、アースダム、飛行場の舗装に使用される 鉄鉱石やニッケルの供給源としても使用されている
特性	砕けやすい土から硬い岩石まで様々である 圧縮されたラテライトは、最大 200MPa 以上の強度を持つことがある

出典: JICA 調査団

8.3.5 ラテライトの形成

8.3.5.1 完全な風化プロファイル（完全風化プロセス）

完全風化プロファイルは、岩石が物理的・化学的な風化を受ける過程で形成される層状の構造を指す。このプロファイルは、母岩から表層土までの垂直的な風化構造を示し、ラテライトの形成過程において重要となる。風化プロファイルは表 8.3.4 の層に分けられる。図 8.3.3 には、ラテライトの形成モデルを示す。

表 8.3.4 ラテライトの風化プロファイル

層構成	特徴
未風化岩 Fresh Bedrock	風化プロファイルの最下層で、母岩がそのままの状態で残っている 岩石の構造がはっきりと確認できる
部分風化層 Saprolite	母岩が化学的風化を受け、鉱物が部分的に分解している層 原始的な岩の構造が残るが、成分の変化が進行している
完全風化層 Lateritic Zone or Oxidized Zone	鉄やアルミニウムの酸化物が集積し、赤色または黄色の層を形成 この層がラテライトの主要部分で、鉄やアルミニウムが豊富に含まれる
表層土 Topsoil or Humus Layer	有機物や砂、シルトが含まれる最表層 農業や植生に直接関係する部分

出典: JICA 調査団

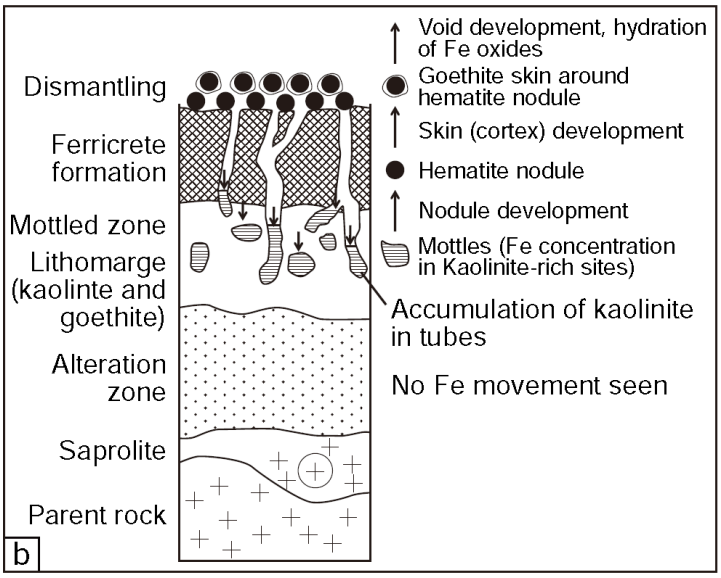


図 8.3.3 ラテライトの連続的な形成モデル

出典: Characterization and evolution of primary and secondary laterites in northwestern Bengal Basin, West Bengal, India, Sandipan Ghosh, Sanat K. Guchhait（2015）

8.3.5.2 ラテライトの形成プロセス

ラテライトは湿潤な熱帯地域での風化プロセスによって形成され、そのプロセスは表 8.3.5 のようなステップで進行する。

表 8.3.5 ラテライト形成プロセス

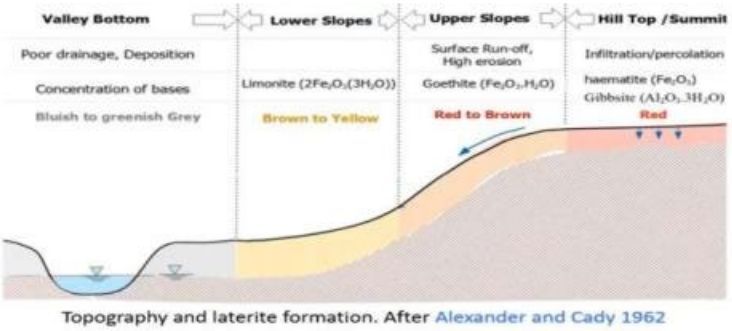
風化プロセス	説明
化学風化の開始	・温暖で湿潤な環境下で、母岩中の鉱物が水、二酸化炭素、および酸素による化学反応を受けて分解 ・ケイ酸塩鉱物（例：長石、輝石など）が水和・加水分解され、ケイ酸分が溶脱
溶脱 Leaching	・水に溶解したケイ酸や塩基性元素（カリウム、カルシウム、ナトリウム、マグネシウムなど）が降雨によって下方へ流出 ・鉄（Fe）やアルミニウム（Al）の酸化物が残留
集積 Accumulation	・鉄やアルミニウムが酸化・硬化し、赤色の酸化物を形成 ・鉄鉱床（Fe_2O_3）やボーキサイト（Al_2O_3）の基盤になる
硬化 Induration	・長期間の乾燥と湿潤の繰返しにより、鉄やアルミニウムの酸化物がセメントのように結合し、硬い層を形成

出典: JICA 調査団

8.3.5.3 ラテライト形成に影響を与える要因

ラテライトの形成に影響を与える要因は表 8.3.6 のようにまとめられる。

表 8.3.6 ラテライト形成に影響を与える要因

要因	説明
気候条件	・高温多湿な環境が化学反応を加速する。 ・季節的な降雨と乾燥のサイクルがラテライトの硬化を促進する。 ・Niger デルタ周辺のアフリカ中部地域では年間降水量が 3,200mm と高く、低い所から西に向かうギニアでは 6,000mm にも達する。アフリカのほとんどの地域では、年間平均気温が 20℃を超える日が 9 カ月以上続く。
母岩	・初期段階のみ重要となる。ラテライトは基本的な火成岩と堆積岩の上に分布する。 ・例外はケニアやインドネシアの一部に見られる火山起源の新しい堆積物である。 ・ケイ酸塩鉱物を多く含む母岩がラテライトの形成に適している。 ・ドレライト dolerite 母岩は組成が劇的に変化する。シリカは浸出して 35%減る。塩基は浸出して CaO、MgO が 15%減る。三二酸化物（Al_2O_3 および $FeO+Fe_2O_3$）は 30%蓄積される。
地形・排水条件	・表面流出水または土に浸透する水の量により風化の速度が変わる。 ・十分な排水があると溶脱を促進するが、排水が悪い場合はラテライトの形成が抑制される。 ・土内部で起こる水分の移動の種類によって粘土のミネラル含有量が決まる。  地形の違いによるラテライトの地層 出典：Laterites and lateritic soil and the potential use of the Dynamic Cone Penetrometer, Samuel Innocent Kofi Ampadu, 2015
植生環境	・植生が厚いと蒸発は減るが、溶解酸の形成に必要な有機物が供給され、風化を促進する低 pH（3.5~5.5）環境が生まれる。
時間	・ラテライトの形成には数千年から数百万年の長期間が必要

※ドレライト（dolerite）とは、玄武岩質のマグマが地下に貫入してゆっくり冷えたときにできる半深成岩で、粗粒玄武岩とも呼ばれる。斜長石（白色）、角閃石・輝石（黒色）、かんらん石（濃緑色）を主体としており、有色鉱物の割合が高く（50%程度）変質作用によって緑色の岩石になると輝緑岩と呼ばれる。

出典: JICA 調査団

8.3.5.4 温帯と熱帯の風化土

ラテライトは主に熱帯で風化して形成されるが、温帯でも形成され、異なった特性を有する。表 8.3.7 に温帯堆積土と熱帯風化土の違いを示す。

表 8.3.7 温帯堆積土と熱帯風化土の違い

項目	温帯堆積土	熱帯風化土
土の形成	侵食、輸送、堆積、圧密によって形成される	熱帯気候条件下での風化によりその場で形成される
主な粘土鉱物	イライト、カオリナイト、緑泥石、時にはモンモリロナイトである	カオリナイト、鉄およびアルミニウムの酸化物である
物理的指標	再現性と一貫性のある結果をもたらし、土構造と塑性図を使用して分類できる	標準的なサンプル方法や試験手順を使用しても物理試験結果の再現性がなく、一貫性がない
現場挙動の予測	土構造と塑性分類方法を用いて予測できる	粒度と塑性パラメータのみでは分類できない
挙動に影響するもの	応力履歴は変形特性に影響を与える	応力履歴ではなく、粒子間の結合による結合構造に影響され、挙動の程度は気候条件によって変わる

出典: JICA 調査団

8.3.5.5 気候の環境

ラテライトの形成環境には、表 8.3.8 に示す 2 つの典型的な気候タイプがある。気候タイプが土の構造・強度・安定性に大きな影響を及ぼす。

表 8.3.8 ラテライトの形成に係る 2 つの典型的な気候タイプ

項目	継続的に湿潤な気候環境	雨期と乾期がはっきりした環境
水の移動	土には常に水が加えられ、蒸発は非常に少ない。水の正味の動きは下向きである。浸出は継続し、ラテライゼーションが促進される。	水分が下向きに動き、その後蒸発により上向きに動く
塑性	高い塑性パラメータ（LL および PI）を持ち、乾燥すると不可逆な変化が起こる	水分含有量が少なく塑性が低い生成物
形成物	セスキ酸化物は水和した形態である：ゲータイト（Fe2O3.H20）、リモナイト limonite（2Fe2O3（3H2O））、ギブサイト Gibbsite（Al2O3.3H2O）	コンクリーションとセメント層中の鉄とアルミニウムの濃度が大きい
乾燥の影響	乾燥すると材料特性が大きく変化し、塑性が低下し、粘土粒子が凝集する	乾燥による影響が少ない

出典: JICA 調査団

8.3.6 ラテライトの分類（Classification）

ラテライトの分類方法として、表 8.3.9 に示す「シリカと三二酸化物の比 SR（Morin et al. 1971）による分類」、表 8.3.10 に示す「ラテライトの化学的分類（Morin et al. 1971）」、表 8.3.11 に示す「TRL Classification System （Charman, 1995）の分類」方法が提案されている。

表 8.3.9 ラテライトの SR による分類（Morin et al. 1971）

SR	分類
<1.33	True laterites
1.33~2.0	lateritic soils
>2.0	Non-lateritic soils

$$SR = \frac{S_iO_2}{Fe_2O_3 + Al_2O_3}$$

表 8.3.10 ラテライトの化学的分類（D'Hoore, 1964）

分類	形成される物質	平均 pH
中程度の浸出（Frruginous）	ヘマタイト（Fe_2O_3）、ゲータイト（$Fe_2O3.H_2O$）、カオリナイト、ごく少量の有機物	6.3
激しい浸出（Ferrallitic）	ギブサイト（$Al_2O_3.3H_2O$）、ゲータイト（Fe_2O3H_2O）、カオリナイト、有機物	4.0
激しい浸出（Ferrisols）	カオリナイト ゲータイト （$Fe_2O_3.H_2O$）	5.9

表 8.3.11 ラテライトの TRL による分類（Charman, 1995）

年台	指定	特徴
未熟（若い）	プリンタイト	土組織にはラテライト物質がかなり含まれる。一部の物質を犠牲にして水和酸化物が存在する。硬化しておらず、団塊は存在しないが、コンクリーション形成のわずかな証拠が残る可能性がある。
	結節性ラテライト	明確な硬い結節が「分離された」粒子として存在する。
	ハニカムラテライト	コンクリートが凝集して多孔質構造を形成し、そこに物質が詰まっている可能性がある。
	ハードパンラテライト	硬化したラテライト層、重厚で強靭。
古い（成熟した）	二次ラテライト	結節状、蜂の巣状、硬盤状である可能性があるが、既存の層の侵食の結果であり、角礫状の外観を呈する場合がある。

8.3.7 ラテライトの起源、母材

一般的にラテライトは、特定の風化条件下で湿潤な熱帯および亜熱帯地域で形成されると考えられているが、その生成と進化につながる土の形成要因の正確な組み合わせは、十分には特定されていない。ラテライトは、頁岩、砂岩、および石灰岩を含むその他の堆積岩で観察されている他、沖積土および崩積土でも発見されている。ラテライトの原料に関わらず、鉄・アルミニウム酸化物（セスキ酸化物）が供給されれば、あらゆる母岩の上に形成される。

8.3.8 ラテライトの分布地域

8.3.8.1 世界的分布地域

ラテライトは主に熱帯および亜熱帯地域に分布し、多くは北緯 35° ～南緯 35° に分布する。
図 8.3.4 にラテライトの分布図を示す。

分布する国はアフリカ（ガーナ、ナイジェリア、コートジボワール、カメルーン、コンゴ共和国、アンゴラ、ケニア、ウガンダ、タンザニア)、アジア（インド、スリランカ、タイ、ベトナム、カンボジア、ラオス、マレーシア、インドネシア)、オーストラリア、南アメリカ（ブラジル、コロンビア、ベネズエラ、中央アメリカおよびカリブ（メキシコ、キューバ、ジャマイカ、ハイチ、ドミニカ共和国)、パプアニューギニアなどがある。

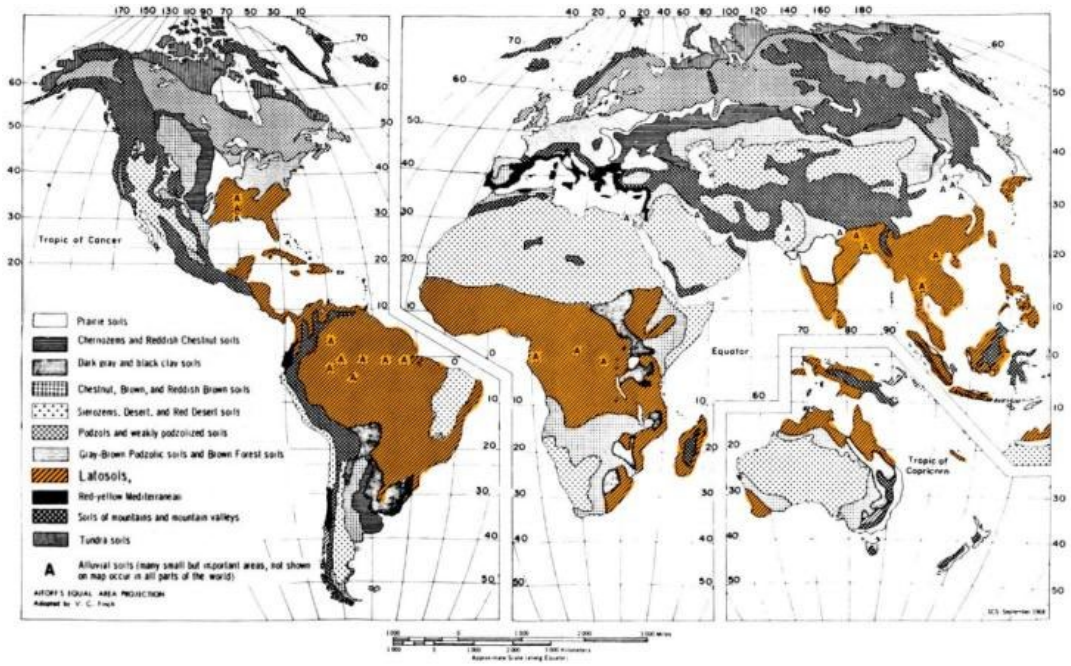
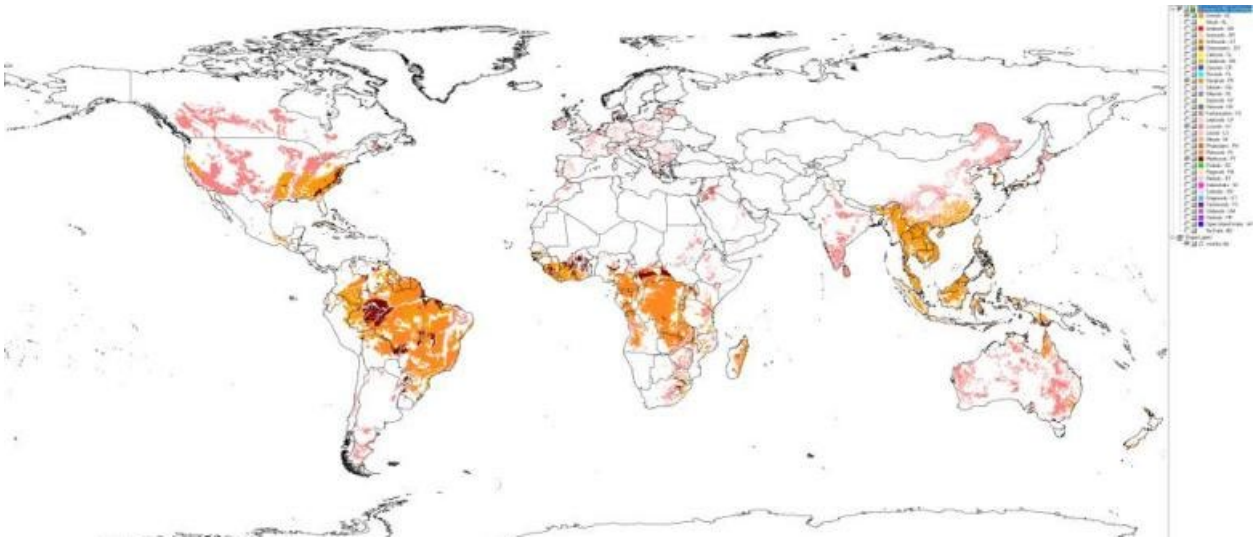


Figure 2.6: Latosol soil (collective laterite) world distribution (http://www.nzdl.org)

出典：AN INVESTIGATION INTO THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PROPERTIES OF LATERITE SOILS IN NILAI, MALAYSIA, Ahmed Sujeeth（2015）

図 8.3.4 ラテライトの世界的分布図

土壌学では、ラテライトは Ferralsols、Acrisols、Luvisols、および Plinthosols に相当する。
図 8.3.5 は HWSD ver2.0 を用いて作成したこれらの土壌の分布域である。



出典：JICA 調査団（HWSD Ver.2.0 を用いて作成）

図 8.3.5 HWSD から推定されるラテライトが分布する地域

8.3.9 ラテライトの土質特性

8.3.9.1 粒度分布

ラテライトの粒度分布は極めて多様で不規則であり、粘土から礫、巨岩まで、あらゆる大きさのものを含んでいる。ラテライトの中には、比較的弱い構造で劣化しやすいものがあるため、試験前の前処理や試験手順によって、粒度分布が影響を受けることがある。図 8.3.6 に基盤に適さないラテライト礫と適するラテライト礫の勾配特性を示す。

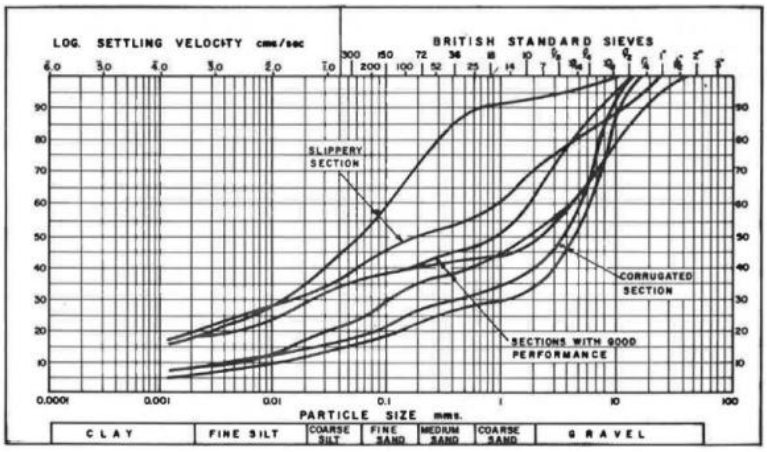


図 8.3.6 基盤に適さないラテライト礫と適するラテライト礫の勾配特性

出典: dentification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering – A Review, M. D. Gidigasu（1975）

8.3.9.2 活性度

ラテライトの活性度は一般的に低い。例えば、残留ラテライトでは 0.4～1.0 であり、沖積粘土や熱帯黒色粘土では 1.0 以上である。

8.3.9.3 アッターベルグ限界

ラテライトの中には、アッターベルグ限界試験は試験前の準備や試験手順に大きく影響されるため、再現性のある結果が得られない場合がある。問題のあるラテライトはカサグランデ・チャートの A ラインより下に位置し、液性限界は一般に 50%以上、塑性指数は 20%以上であることが判明している（図 8.3.7）。

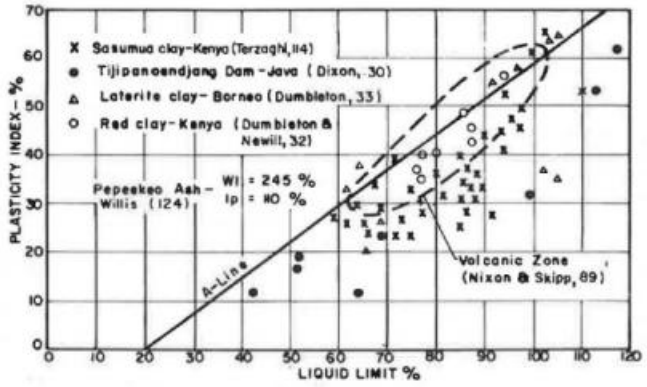


図 8.3.7 典型的な問題土となるラテライトの塑性特性

出典: dentification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering – A Review, M. D. Gidigasu（1975）

8.3.9.4 含水比、密度、間隙比

ラテライトの自然含水率はラテライト岩石で 3%という低いものから、含水ハロイサイトおよび火山性赤色粘土で 200%を超えるものまで様々である。問題のあるラテライトの自然含水比は一般的に非常に高く、塑性限界をはるかに超え、多くの場合、液体限界さえ超えることがある。ラテライトの原位置での乾燥密度は、均質なラテライト岩石では 2.08～2.56g/m^3 と高いものから、火山性の赤色粘土では 0.32～0.96g/m^3 と低いものまである。風化花崗岩の間隙比は密で 0.3～0.7、中で 0.7～1.1、低で 1.1～1.5 である。したがって、含水比、密度、間隙比は、いくつかのラテライトの判定と分類に重要な特性となる。

8.3.9.5 締固め特性

ラテライトの締固め特性のばらつきが大きいのは不均質性、風化の程度、成形水分に対する感受性、粗粒子の強度のばらつき、試験前の準備の影響によるものである。

自然状態で土の水分が不十分な場合、水を加えて比較的高い最大乾燥密度を得ることができる。一方、含水比が高く、締固め前に土を乾燥させる場合、同じ締固め力でも乾燥密度が低くなる。ラテライト礫は乾燥状態では高い CBR 値を示すが、水を吸収すると強度が急激に低下する。含水比の変化に対して CBR が非常に敏感となる。

締固めエネルギーが高いほど、含水比の増加に伴う強度低下の程度は高くなる。もう一つの重要な要因は、凝結した粒子の強度である。一般にラテライト礫には非常に硬いものから非常に軟らかいものまで、様々な凝結した粒子が含まれている。弱い凝結粒子は転圧や交通によって破壊され、その結果、土中の細粒分が増加する。一方、硬い凝結粒子は一部の国ではアスファルト表層改良の配合材料として有用である。

8.3.9.6 強度と力学特性

室内および現場での強度試験は未固結ラテライトの強度と支持力特性を評価するために利用されている。せん断パラメータは不撹乱の細粒ラテライトの方が高く、母岩の種類、風化の程度、飽和の程度に大きく依存する。ラテライトの強度特性は、母岩、水位深度、地形、分解、ラテライト化、乾燥の程度、鉱物組成などの影響により、深さによってかなり異なる。

8.3.10 ラテライトの用途

ラテライトは、様々な用途の原材料として使用されている。道路材料としての用途が一番多いが、以降はそれ以外の用途について説明する。

8.3.10.1 レンガ製造の原材料

ラテライトは焼成レンガと非焼成レンガの製造の原材料として使用されている。ラテライトレンガは社会的および生態学的利点があるため、壁構成部品として利用されている。

高温で 8 時間焼成されたラテライトレンガは低温で 8 時間焼成されたものよりも高い強度特性、高い弾性係数、および低い吸収性を有する。975℃の焼成温度で 90 分間焼成したレンガは、975℃未満で焼成したレンガよりも強度が高い。

セメントや石灰などの従来の石灰質結合剤は、一般的にラテライト未焼成レンガの安定剤として使用されている。未焼成レンガの性能は、結合剤の配合量が増えるにつれて向上する。石灰安定剤はラテライト製品の強度と膨張特性の耐久性に良い効果を与えるが、ラテライト製品の膨張特性はモンモリロナイト鉱物の存在によるものである。

8.3.10.2 モルタルとコンクリートの骨材

モルタルとコンクリートの高性能が必ずしも必須ではない場合、天然砂を節約するために、ラテライトをモルタルとコンクリートの製造用の砂の代替資源として利用することもある。ラテライトをモルタル/コンクリートの製造用の骨材の一部または全部の代替として使用する場合、ラテライト化モルタル/ラテライト化コンクリートと呼ばれる。ラテライトに粘土が含まれているとモルタルとコンクリートの品質に影響を及ぼす。インドの基準では、砂の粒度分布は IS 383:1970 に従って、ゾーンⅠ、ゾーンⅡ、ゾーンⅢ、ゾーンⅣの４つに分類される（図 8.3.8 参照）。ゾーンⅢとゾーンⅣの細粒の砂を使用したモルタルは対照モルタルと同等の圧縮強度を示したが、ゾーンⅠとゾーンⅡの粗い砂を使用したモルタルはコンクリートよりも圧縮強度が低くなった。モルタルにより細かいラテライトを使用するとモルタルの強度特性が向上する。ただし、ラテライトを使用したモルタルは、通常のモルタルと比較して吸水性が高く、乾燥密度が低くなる。ゾーンⅢおよびゾーンⅣのラテライトをコンクリートの製造に使用すると、フレッシュ状態と硬化状態の両方で満足のいく性能が得られる。

粒径(mm)	Zone Ⅰ		Zone Ⅱ		Zone Ⅲ		Zone Ⅳ	
0.075		0	0	0		0		0
0.15	0	10	5	10	0	10	0	15
0.3	5	20	8	30	12	40	15	50
0.6	15	34	35	59	60	79	65	85
1.18	30	70	55	90	75	100	80	100
2.36	60	95	75	100	85		90	
4.75	90	100	90		90		95	
10	100		100		100		100	
粒子の粗さ	最も粗い砂		中庸（標準的な砂）		やや細かい砂		最も細かい砂	
主な用途	強度が必要な基礎や土木工事		一般的なコンクリート工事		仕上げやレンガ用モルタル		微細仕上げ作業や軽量モルタル	

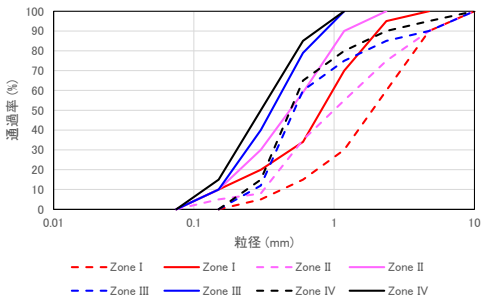


図 8.3.8 インド基準の砂の粒径のゾーン

出典: JICA 調査団

8.3.10.3 ジオポリマー製造の代替材料

生のラテライトを用いたジオポリマーは、60℃までの長時間硬化下では強度増加がほとんど見られない。ラテライトを焼成するとジオポリマー反応により十分な硬化が得られる。温度が 20℃から 80℃に上昇すると Al、Si、Fe などの元素の溶解度が増加し、ジオポリマーネットワークがさらに形成されてその性能が向上する。スラグと混合したラテライトは方解石と混合したものよりも強度が高くなることが分かっている。アルカリ溶液と比較して、リン酸の使用は無機ポリマーの力学特性を向上させる。また、鉄分含有量の多いラテライトに混合したポリマーは、鉄分含有量の少ないラテライトに混合したものよりも優れた強度特性を有する。

8.3.10.4 その他の用途

ラテライトは、埋め戻し材、ヒ素吸収剤、染料分解および脱フッ素化用凝固剤など、他の用途にも使用されている。

- ラテライトは Cs および Se（放射性不純物）の吸着能力が高く、放射性不純物を地中水および海水から除去できる。
- 最適化された酸および塩基処理で活性化したラテライトはヒ素吸着剤として使用できる。鉄とアルミニウムの組成が高いラテライトは比表面積（130～180m^2/g）と細孔容積（0.28～0.35 mL/g）が高いため、ヒ素の吸着容量が高い。
- ラテライトを天然の凝集剤として使用することで染料を分解できるため、廃水処理でメチレンブルー（カチオン染料）とメチルオレンジ（アニオン染料）の分解に利用されている。
- ラテライトは染料の大きな構造分子をより小さな分子構造に分解し、低汚泥にできる。
- 飲料水の脱フッ素に用いられている。pH、イオン強度、およびアニオン干渉もラテライトのフッ素除去効率に重要な役割を果たす。

8.3.11 ラテライトの工学的評価方法

報告されているラテライトの地盤工学的特性の大半は舗装建設に適しており、いくつかの重要な指標と工学的特性を原位置での挙動と関連付けている。表 8.3.12 にアスファルト舗装の下で使用するラテライトの判定方法を、表 8.3.13 に西アフリカの舗装ラテライト骨材の方法を、表 8.3.14 に標準路盤・下層路盤材料の一般的要件を、表 8.3.15 にラテライトの工学的評価をそれぞれ示す。

表 8.3.12 アスファルト舗装の下で使用するラテライトの判定方法（Dreyfus）

土質特性	良い	平均	悪い
線収縮率(%)	0～4	4～6	＞6
塑性指数(%)	0～6	6～8	＞**12**
液体限界(%)	14～21	22～30	＞30
CBR試験による膨張率(%)	0～0.2	0.3～0.4	＞0.4
最適含水比(%)	-	8～0	-

表 8.3.13 西アフリカの舗装ラテライト骨材の方法（Bhatia and Hammond）

比重	24時間浸漬後の吸水率(%)	骨材衝撃指数(%)	ロサンゼルス磨耗値(%)	判定
＞2.85	＜4	＜30	＜40	非常に良い
2.85～2.75	4～6	30～40	40～50	良い
2.75～2.58	6～8	40～50	50～60	普通
＜2.58	＞8	＞50	＞60	悪い

表 8.3.14 標準路盤･下層路盤材料の一般的要件

土質特性	Malaysia: Jabatan Kerja Raya Malaysia（JKR）	Thailand: Department of Highways	Brazil: Brazilian National Highway Department	Nigeria: Federal Ministry of Works and Housing	推奨基準
CBR（%）	≥30	≥25	≥60	≥20	≥25
粒度（%）	4号ふるい≥45	-	<70	≤12（0.075mm）	-
液体限界（%）	-	≤35	<40	≤25	-
塑性指数 PI(%)	≤12	≤11	<12	≤6	≥25
ロサンゼルス摩耗率（%）	-	≤60	<65	-	-
膨潤度（%）	-	-	<65	-	-

CBR：カリフォルニア州支持率；PI：塑性指数；LAA：ロサンゼルス摩耗率

出典: A state of review: challenges and techniques of laterite soil stabilisation using chemical, economical, and eco-friendly materials, Ali Muftah Abdussalam Ezreig, Mohd Ashraf Mohamad Ismail, Khaled Ibrahim Azarroug Ehwailat（2022）

表 8.3.15 ラテライトの工学的評価

土質特性			予想される工学的挙動とフィールド性能				
室内試験	平均値の範囲		乾燥の敏感	練り返しに対する構造の敏感さ	自己安定化の可能性	現場締固めの問題	走行中および締固め中の粒子破砕
	好ましくない	好ましい					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
平均衝撃率（%）	>50	<30					☑
吸水率(%)	>8	<4					☑
自然含水比（%）	>液体限界	<塑性限界	☑	☑		☑	
線形収縮率（%）	>6	<4				☑	
膨潤ポテンシャル（%）	>11	<10			☑		
優勢な粘土鉱物	モンモリロナイト、含水ハロイサイト	カオリナイト、クロライト	☑	☑		☑	
雲母含有率（%）	>10	<10				☑	
凝集度指数	>2	÷1	☑	☑			

出典: JICA 調査団

8.3.12 ラテライトの工学的問題点

ラテライトは大きく「試験する材料の準備方法や試験方法により、得られる特性が変化し、それらに対する試験方法が完全に定まっていない問題（試験上の問題）」と「道路の基礎や材料としての土質特性上の問題（土質特性上の問題）」との２つの工学的問題を有する。

8.3.12.1 ラテライトの試験上の問題

ラテライトは現在の試験方法で定められている 110℃で炉乾燥すると塑性特性や粒度特性が変化し、結果として力学的特性も大きく変化する。また、加水も繰り返すと土質特性が変化する。そのため、現場の使用する条件を考慮した試料の準備が必要となる。ラテライトを盛土材料として用いた道路の施工管理では、締固め試験、CBR 試験が一番多く使用されている。図 8.3.9 に試料準備方法の違いによる締固め試験結果を示す。

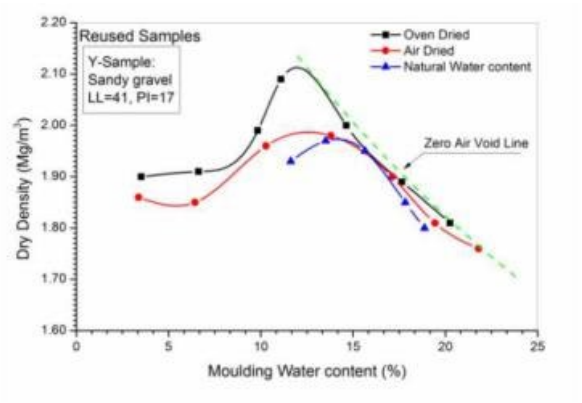


Figure 1. Compaction Characteristics of Reused Samples for Various Pretreatments.

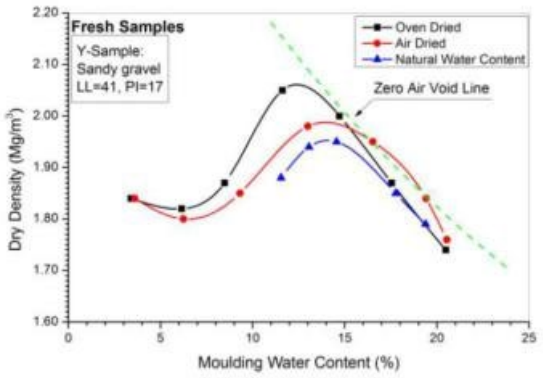


Figure 2. Compaction Characteristics of Fresh Samples for Various Pretreatments.

(a) 再利用 (b) 新鮮な試料

図 8.3.9 試料準備方法の違いによる締固め試験結果

出典: The Effect of Pretreatment on Compaction Characteristics of a Lateritic Gravel, Priscilla Ackah, Ampadu S, Owusu-Nimo F and Ayeh F., 2014

8.3.12.2 ラテライトの土質特性上の問題

ラテライトは形成過程で、図 8.3.10 に示すような鉄やアルミが硬化した硬い層を上層に有し、その下に礫や小石混じりや砂層と移行し、移行層を挟んで最終的に粘土層になるパターンがある。硬く硬化した層は掘削時に大きな塊となり、道路材料に適さない場合があるが、破砕できれば礫や小石混じりの層までは良質な盛土材料となる。良質な材料の下には Mottled zone と呼ばれる斑点を有した移行層がよく見られ、その下は粘土層（Pallid zone）となる。

ラテライトは通常 20～30m の壁を形成し、ギニアでは 40～60m になることもある。風化が長期間にわたって進行したところでは 100m 以上になることがある。コートジボアールでの建設現場（図 8.3.11）では 10m 以上の鉛直に掘削した壁が壊れないで残されていた。鉛直に切ると降雨の浸透能が形成した状態と大きく変わらないため、健全な状態が維持されるが、斜めに勾配をつけて切土すると新しい風化が進行し、特に下部の方の粘性土層が弱くなり、すべり崩壊を引き起こす可能性がある。

ラテライトは厚い堆積層があっても、盛土材料等で使用する良質土となる材料は上層しかなく、大量の材料を確保できない可能性がある。西アフリカでは観察されたラテライトの土取場 10m 以内の浅い材料採取で取り残されているものが多く見られた（図 8.3.12）。良質なラテライトが少ない地域では土取場の採取深度は浅くなる傾向が見られた。

良質なラテライトには図 8.3.13 に示す鉄やアルミがセメンテーションしてできた礫や小粒の礫が多く残されているものがあるが、砂分が少なく、それ以外は細粒分になっているものもある。礫混じりのため良質に見えても、砂分が少なく細粒分が多くなると、交通荷重等で流動した変形（大きな轍）を起こす可能性もある。表層が平らなレンガ状に固結したラテライトもあり、これは鉄やアルミが多く固結したものよりは硬度が無いため、転圧時に破砕して良い材料になる可能性がある（図 8.3.14）。

表層が硬いラテライトでも道路の線形上掘削すると下層のラテライトは路床として問題となる土となる可能性がある。掘削して未舗装のままにして交通を許可している道路が西アフリカでは多く見られたが（図 8.3.15）、大きな陥没、轍、うねりがあり、時速 10km の走行ができないところも多くあった。また、ギニア国では国道 1 号線、国道 2 号線の長区間で道路損傷が起きていて、時速 20km の走行ができないところがあった（図 8.3.16）。

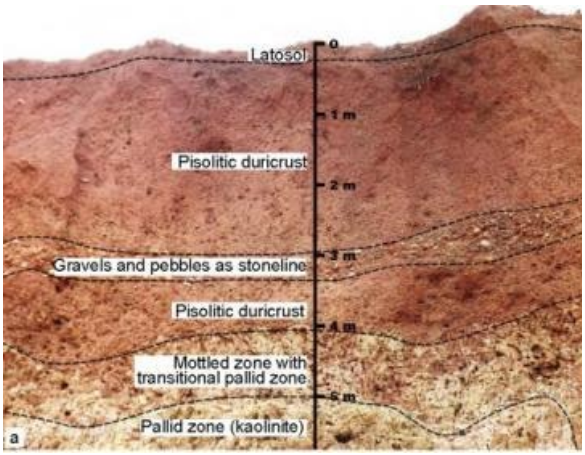


図 8.3.10 硬い上部から下部の粘性土に移行する土層（表土、硬化層（Pisolitic duricrust）、礫層、移行ゾーン、粘性土（カオリナイト），インド）

出典: Characterization and evolution of primary and secondary laterites in northwestern Bengal Basin, West Bengal, India, Sandipan Ghosh, Sanat K. Guchhait（2015）

表 8.3.16 Mottled zone と Pallid zone の説明

項目	Mottled zone	Pallid zone
色	赤、黄、褐色（酸化鉄）と白、灰色の斑点	白色、淡黄色、灰色
風化状態	部分的に風化が進行	完全に風化が進行
主な構成物質	酸化鉄、粘土鉱物、未風化鉱物	カオリナイトや他の粘土鉱物
形成メカニズム	酸化還元反応、局所的な風化	鉄やアルミニウムの溶脱、風化の進行
位置	風化プロファイルの中間層	風化プロファイルの下部層

出典: JICA 調査団



図 8.3.11 10m 位鉛直に切土して安定している斜面（コートジボアール）

出典: JICA 調査団



図 8.3.12 上層 5m 位まで材料採取した土取場跡地（ギニア）

出典: JICA 調査団



図 8.3.13 鉄やアルミがセメンテーションした硬い礫や小粒の礫（ギニア）

出典: JICA 調査団



図 8.3.14 レンガ状のラテライト

出典: JICA 調査団



図 8.3.15 未舗装のラテライト道路の変状（ギニア）

出典: JICA 調査団



図 8.3.16 ギニア国国道1号線の道路被害

出典: JICA 調査団

8.3.12.3 ラテライトの課題

ラテライトの課題としては以下の 6 つが挙げられる。

① 地質および大気条件、またはラテライトの風化の程度に応じたラテライトの適切な分類方法の開発
② ラテライトの割合、結合剤、含水比などの様々な要因を考慮して分類したラテライトの建物および道路構成材料としての性能との相関関係の開発と非構造建築製品におけるラテライトの性能調査
③ ラテライトの利用を高めるため、実現可能で経済的かつ環境に優しいラテライトの安定化

処理方法の確立

④ ラテライトの使用が漆喰、モルタル、コンクリート、グラウトなどの特性に与える影響に関する研究

⑤ 埋め戻し材としてのラテライトの低強度材料に関する研究

⑥ ラテライトを用いるための適切な規制、基準、仕様、ガイドラインなどの策定

8.3.13 ラテライトの対策方法

ラテライトは良好材として道路材料として用いることができるものがあるが、深度方向に品質の悪い土質に変化するものもある。ラテライトの土質特性が悪い場合には、置換工法が使用され、適切な置換材料が得られない場合には、安定処理工法が試みられている。ラテライトは N 値が極めて小さい軟弱地盤よりは良い地盤であるため、軟弱地盤で行われる深層混合処理工法のような対策は行われていない。日本で行われている地盤改良工法を行う場合、施工機械や改良材の輸入を行わなければならず、運搬時間と輸入手続きの問題が施工技術の適用に係る問題になると考えられる。

以降は、ラテライトが分布している国で採用可能となる置換工法と安定処理工法について概説する。

8.3.13.1 置換工法

ラテライトの対策方法として置換工法が一番利用されている。置換工法は、ラテライトの中に良質材として使用できる材料があるため経済的で、施工が容易、かつ工期短縮を図れる対策方法である。しかし、ラテライトの置換厚さに対する設計方法はなく、地域毎に経験的な方法が用いられている。

良質なラテライトが少ない場合は、良質なラテライトと品質の悪いラテライトを混合して用いる場合がある。ラテライトは表層が硬化した硬い層があっても、下層に行くほど細粒化し、強度が少ない土層となり、置換工を採用した対策工を行っても置換厚が薄いと、供用後に変状の問題を起こすことがある。そのため、西アフリカの国では掘削底部に砕石を入れた対策を行っている。

8.3.13.2 安定処理工法

道路建設における安定処理工法の適用は、ここ数十年で多くの国が実施している。道路用途の性能を高めるために採用された方法としては、表 8.3.17 のようにまとめられる。使用に当たってはその地域で安価で大量に得られる材料がある場合は、室内試験で配合量を決めて、試験施工などを行い、最適な工法を選定すると良い。

表 8.3.17 道路工事採用された方法

文献	材料と方法	結果	地域
Attoh-Okine et al., 1995	高速道路の舗装工事で路盤と路盤下層に石灰を最大 10%含むラテライトを使用	ラテライトに石灰を混ぜると、セカント係数が上昇し、土層の荷重分散能力が向上し、せん断強度も向上した。 石灰によるラテライトの安定化により、土の特性が向上した。	Miami, USA
Mahalinga-Iyer et al., 1997	ラテライトを舗装工事の路盤に使用。最初に最適な水分含有量まで水で湿らせ、振動ローラーで締め固めた。締固め後、通路は 14 日間まで交通が利用できるように開放し、その後、道路舗装の耐久性を確保するためにシーリングした。	ラテライトの CBR は 35～90%の範囲。 ラテライトの収縮性能は、モンモリロナイト、イライト、カオリナイトをベースとした粘土含有量の増加とともに増加した。	Australia
Alhassan and Mustapha, 2007	道路建設に籾殻灰（最大 8%）とセメント（最大 8%）を含むラテライトを使用。	最大乾燥密度（1.55～1.40 Mg/m^3）、最適水分含有量（22～32%）、CBR 値（30～140%）、一軸圧縮強度（7 日間養生で最大 1300KN/m^2、14 日間養生で最大 1700KN/m^2、28 日間養生で 2400KN/m^2 指定されたセメント含有量に対して籾殻灰を増やすと、二次セメント質材料である石灰と粒子間結合の反応により、CBR 値が増加した。	Nigeria
Li et al., 2012	生のラテライトに 3%の最適水分量を加えて、OMC 値を 19.6%に維持し、その後、5%のセメントを含むラテライトを締固め度が 96%、93%、90%になるまで転圧した。セメントで安定処理したラテライトを道路建設の路床に使用した。	圧縮下における土の変形は圧縮度、土の飽和状態、および土塊の内部構造に依存する。 土にセメントを混入すると、土内部構造に影響を与え、土の耐水性および圧縮性が向上した。	China
Edeh et al., 2012	建設に採用された混合物は、ラテライト 40%、再生アスファルト 58%、セメント 2%でした。ラテライトは、道路建設の路床および路盤材料として使用された。	設計された混合物は 24 時間後に 55%の CBR 値に達するため、生の混合物は高速道路舗装工事の路床および路盤プロファイルに使用できた。 ラテライトにセメントと再生アスファルトを組み込むことで、混合物の結合特性が向上した。	Nigeria
Biswal et al., 2015	ラテライトは、シルト含有量が 30%未満の舗装路盤材として利用された。	ラテライトの弾性性能は最適水分含有量の増加とともに増加した。 弾性係数は応力が 275Kpa までは増加しましたが、その後は減少した。 ラテライト舗装は三軸圧縮試験でわずかに変形した。 CBR は 20～30%の範囲であった。	Odisha
Kariyawasam et al., 2016	舗装工事の路盤には、砂質ラテライト、粘土質ラテライト、細粒分含有量が 25～35%の砂利質ラテライトの 3 種類のラテライトが使用した。ラテライトは、10%のセメントを混合して安定処理した。建設には、6～8mm サイズのチップが使用した。	舗装の吸水性はセメント含有量の増加とともに減少した。 チップを追加する目的は車両の安全な移動のために道路表面の抵抗を高めるためである。	Sri lanka
Saing et al., 2018	石灰を Cao 97.8%、SiO2 2.2%の組成を持つラテライト処理に使用	層の垂直変形は石灰含有量と荷重圧力に依存し、3.3～8.2mm の範囲で混合物中の	Indonesia

文献	材料と方法	結果	地域
	した。石灰含有量は必要な最大乾燥密度に応じて水とともに追加した。この混合物は、道路建設の路盤に使用された。	石灰含有量が 10%の場合に発生した。安定処理された土の垂直変形は未処理土の最大 3 倍に減少した。石灰安定処理された土の路床係数と弾性係数は大幅に増加したため、石灰安定処理されたラテライトは道路建設に大きな可能性を示した。	

出典: Characterization of laterite soil and its use in construction applications – A review, G. Santha Kumar（2022）, P.K. Saini, Rajesh Deoliya, Aman Kumar Mishra, S.K. Negi（2022）

8.3.14 ラテライトに関する設計基準

ラテライトに関する独自の設計基準はまだ確認されていないが、エチオピアの道路に係る基準とインド基準にはラテライトを用いたレンガの基準が定められている。

■エチオピアの道路に係る基準

Development of Pavement Design Standards for Low-Volume Roads in Ethiopia AFCAP/ETH/005/A - Assosa – Kurmuk Laterite Base Trials: Design and Construction Report CPR 1578, A. Otto, P.A.K. Greening, 2012

■インド基準

IS:3620 - 1979 SPECIFICATION FOR LATERITE STONE BLOCK FOR MASONRY

8.4 崩壊性土

8.4.1 特徴

崩壊性土は様々な地質学的・地形学的過程によって自然に形成されることもあれば、人間活動の結果として形成されることもある。これらの過程は異なるが、崩壊性堆積物の形成の必須条件であるオープンな構造（土粒子が密接に詰まっていない空隙率が高い状態）と準安定構造（一見安定しているように見えるが、水分の侵入や荷重の増加の外的要因によって構造が崩れる可能性のある状態）を形成する。発生する体積変化は圧密過程で経験する体積変化よりも急激である。初期には低い粘着力で結合された粒子によって比較的大きな空隙が形成されており、乾燥している。崩壊性土の大部分は乾燥地域に見られ、乾燥環境が崩壊性土の形成を育んでいる。自然界に存在する崩壊性土は、岩屑流（沖積扇状地など）、風で飛ばされた堆積物（黄土など）、セメントで固められた高塩分準安定土（サブカなど）、熱帯残土などから形成される。さらに、崩壊性土は締固めが不十分であったり、廃棄されたままであったりする時にも形成される。ほとんど全ての崩壊性土に共通するのは、低密度であり、乾燥すると比較的硬く、強い状態になることである（**図** 8.4.1 参照）。



図 8.4.1 崩壊前の乾燥した黄土は比較的硬い軟岩となり洞窟の形成を可能にする（スロバキア）

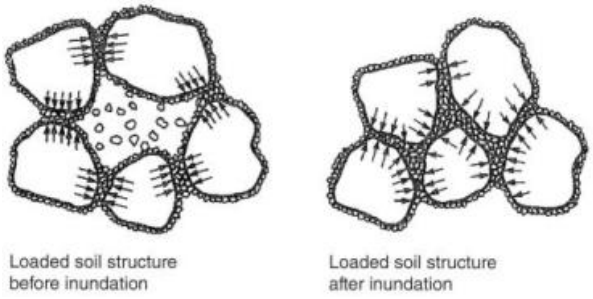
出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

崩壊性土の典型的な特徴は以下となる。

- オープンな準安定構造
- 高い空隙比と低い乾燥密度
- 高い空隙率
- 地質学的に若い、あるいは最近変質した堆積物
- 高感度の堆積物

・ 粒子間結合強度が本質的に低い土が含まれる。

粒子間の結合は、毛管力や微量の化学沈着物（炭酸カルシウムなど）に依存しており、湿潤条件下で容易に崩壊する。粒子間の接合材はシルトもしくはシルトが卓越した粘性土が多い。土が結合材の降伏強度を超えて荷重を受けると崩壊が起こり、その結果、粒子が再配列され、より密度の高い安定した配置が形成される（図 8.4.2 参照）。水が浸透して、接合材の含水比が増大すると、強度が低下し、水分と土粒子の自重で接合部の破壊が起こり、前記と同じパターンで破壊する。接合材のシルトは塑性が低く、水分の変化に対して乾きやすく、濡れやすい。そのために乾期には乾いて硬くなり、逆に少しの水分供給で水分を内部まで吸い込み、含水比が低下して強度が低下する。崩壊は多くの場合、応力（荷重）の増大と、飽和度の増大につながる水の添加の組み合わせによって引き起こされる。しかし、崩壊は含水量の増加によって引き起こされることが最も多い。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

図 8.4.2 浸水による崩壊の説明図

図 8.4.3 は、崩壊性土を生み出す様々な形成過程を示している。

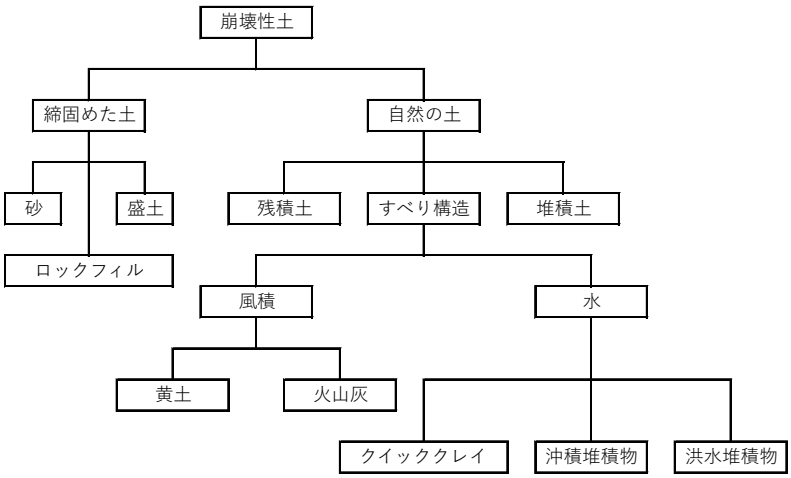


図 8.4.3 崩壊性土の分類（Rogers, 1995）

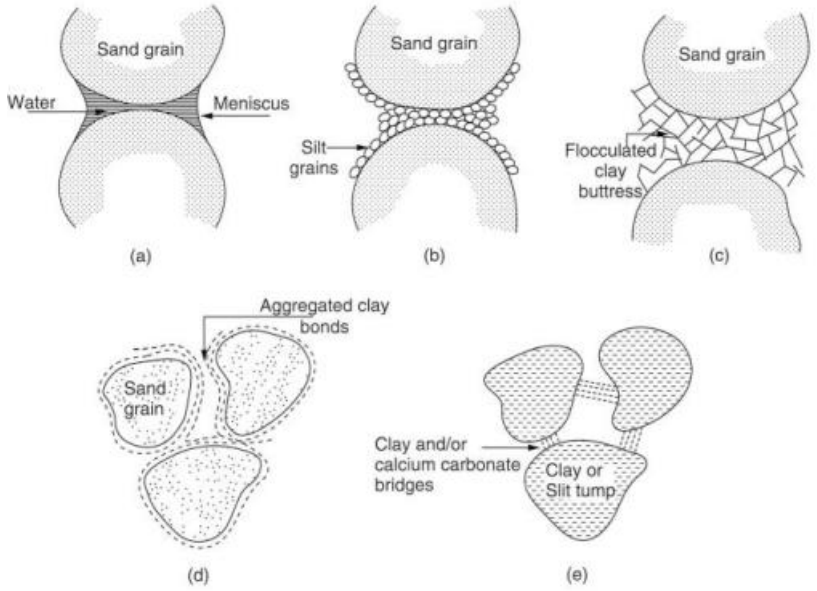
出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

締固めが不十分な盛土のような人為的な緩い構造の状態になっている土は崩壊性土とされるが、締め固められた土でも拘束圧が十分に高ければ崩壊を示すことがある。

8.4.1.1 接着メカニズムと構造（fabric）

崩壊が起こるためには、比較的大きな空隙を持つオープンな構造が現在の応力環境に伴うせん断力に抵抗して土粒子を所定の位置に保持する強度源とともに存在しなければならない。これを達成するためには、十分な強度を持つ粒子間または粒間の結合が必要であり、この結合が水の添加や追加荷重によって弱まると、粒子が互いに滑り落ちて崩壊に至る。一般に、崩壊性土には 3 つの主な結合メカニズムがあると考えられている

- 毛細管力またはマトリック吸引力（suction）（ 図 8.4.4（a）参照）
- 粗い粒子接触部における粘土とシルト粒子（図 8.4.4（b）-（d）参照）
- 炭酸塩や酸化物などのセメンテーション（図 8.4.4（e）参照）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

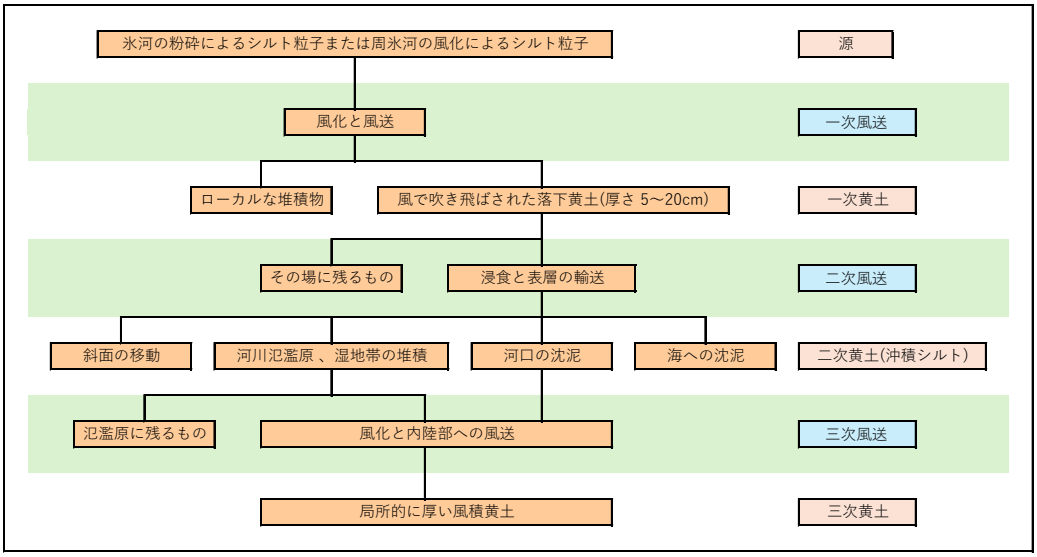
図 8.4.4 崩壊性土で形成される典型的な結合構造

崩壊性土の構造は粒（黄土の場合は一般に石英）と微小集合体（黄土の場合は粘土または粘土質シルト粒子の集合体）からなる緩い骨格の形をとる。黄土のような一部の土では、炭酸塩の斜縁がシルト粒間のメニスカス粘土ブリッジを強化し、崩壊の可能性に影響を及ぼす。粘土ブリッジには 3 つの種類があることが示唆されている。

1. 単純な粘土メニスカス膜
2. 繊維状の方解石からなる以前のメニスカスの足場上に発達した粘土膜
3. 微結晶方解石および／またはドロマイトによって浸透または包埋された粘土膜。

したがって、比較的短い距離で横方向にも縦方向にも強度が変化する。

複数回堆積を経験した黄土（図 8.4.5 参照）のミクロ構造はしばしば異方性であり、その結果崩壊しにくい構造となる。さらに、他の崩壊性土と同様にペレット化した物質が形成され、ゆるい枠組みの中に配置されることもある。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

図 8.4.5 黄土の地形形成モデル

前述のメカニズムとは全く違う崩壊性土として、主にカナダ、アラスカ、スカンジナビアで見られる氷河性堆積物の「クイッククレイ」がある。クイッククレイは堆積時に海水中の塩分で粘土粒子が結合して安定しているが、地下水の流入や降雨で塩分が洗い流され、粒子間結合力が弱い状態で存在する。ある外力が加わると不安定な構造が壊れ、泥水のように強度を失い、突然大移動を伴う地すべりが発生する。炭酸塩（$CaCO_3$、$MgCO_3$）、硫酸塩（$CaSO_4$、Na_2SO_4）、塩化物（NaCl）等が集積した塩類土壌では粒子が粗に配列した準安定構造を有し、乾燥時には安定しているが、水分が供給されると急激に崩壊する。泥岩などの軟岩で盛土すると「浸透沈下」と称される沈下が生じる。泥岩などの盛土材は礫同士が接触して荷重に耐えている。しかし、風化しやすい泥岩では、降雨等で水が浸透すると泥岩のスレーキングが生じ、接触面の所が細流化して強度を失い、細かくなった粒子が隙間に落ち込み、沈下を引き起こす。これによる沈下は軟岩のスレーキングの速さに依存するため早く現象が出る場合もあるが、ゆっくり沈下することもある。

8.4.1.2 崩壊性土の起源・母材

崩壊性土は以下の４つに分けられる。

- **黄土 Loess**：風成堆積物に由来。
- **砂質ローム（Sandy Loam）**：砂質土とシルト質土の混合。
- **火山灰由来土**：火山噴出物が母材。
- **洪積層由来土**：河川堆積物に由来。

黄土は基本的にシルトサイズ（通常 20～30pm）の一次石英粒子からなり、氷河の粉砕や寒冷地での風化など、高エネルギーの地表面プロセスの結果として形成される。これらの粒子は源流から河川によって運ばれる。その後の河川の氾濫によって石英シルト粒子は氾濫原に堆積する。乾燥するとそれらの粒子は剥離し、卓越風によって数十キロから数百キロの風下に堆積するまで運ばれる。セメンテーション物質は堆積後に添加されるか、溶解して粒子接触部で再沈殿することが多い。氷河による岩石の粉砕では土粒子が角張った形状となり、空隙率の高い蜂の巣構造を形成しやすい。洪積層由来土である河川堆積物は、洪積平野や氾濫原で堆積した細粒の土（砂やシルト）が母材で、水分の増加や振動で空隙構造が崩れる。沖積平野において飽和状態で緩い状態で堆積している砂は地震で液状化を引き起こす。火山灰由来土は、火山灰や軽石が風によって運ばれ堆積したもので、土粒子自体が軽量で､角張っている形状をしているため、粒子間に多くの空隙を形成して緩い状態で堆積する。乾いていると固結しているが、水分に弱い。日本では降下火山灰、シラス、未固結の凝灰岩が崩壊性土となる。

また、氷河性堆積物は、黄土と同じく氷河によって運ばれた岩粉や細粒の堆積物で、融解後に風で運ばれ堆積したものが崩壊性土となる場合がある。黄土より北部に堆積している。砂漠由来の堆積物は乾燥地帯で風によって運ばれた砂やシルトが堆積したもので、粒子間の結合が非常に弱く、水分を含むと容易に崩壊する。その他のものとして、分解片麻岩、分解花崗岩、花崗片麻岩、ラテライト土等の残積土、崩壊性礫、南アフリカの花崗岩質砂（日本のマサ)、南部アフリカ東海岸の崩壊性砂が崩壊性の挙動を示すことがある。

崩壊性土の母材は主に以下の堆積物からなる。崩壊性土は氷河、河川、火山活動、風などによって堆積した土粒子なので、母岩として特定の岩種はない。

- 石英（SiO_2）：非常に硬く風化しにくい主成分。
- 長石（$KAlSi_3O_8$ など）：比較的風化しやすい。
- カルシウム炭酸塩（$CaCO_3$）：特に乾燥地域の Loess に多く含まれる。
- 粘土鉱物（カオリナイト、モンモリロナイトなど）：風化や二次鉱物として存在。

8.4.1.3 黄土の形成プロセス

黄土のような堆積物は何千年もかけて形成され、その間に気候条件はかなり変化した。その結果、黄土の土の列は、黄土の層（寒冷期に形成された）と粘土を多く含むパレオゾル（温暖期に形成され

た）の層が交互に形成されている。黄土層が交互に形成される性質は、工学的挙動、ひいては崩壊の性質、崩壊が起こる場所（深さ）に大きく影響する。これは、土中への水の浸透パターンの性質を決定し、その結果、予期せぬ場所で崩壊が発生する可能性がある。さらに、このことは崩壊性を除去するために用いられる地盤改良手法の有効性にも影響する。

黄土の形成に関わる様々な地形学的プロセスの結果、これらの堆積物には通常相対的に崩壊しやすい 3 つのゾーンがある。

- ゾーン 1：残土圧により崩壊した深部のゾーン。
- ゾーン 2：崩壊性ゾーン。
- ゾーン 3：表層地殻（崩壊を引き起こすにはさらなる荷重が必要）。

このため、黄土が広く堆積している国（東欧や旧ソ連を含む）は、荷重を受けた基礎の崩壊に関連する分類スキームを開発した（図 8.4.6）。このようなスキームでは、2 種類の崩壊性が生じる。

- タイプ I：主に荷重による崩壊性（5cm 未満の上載圧下での崩壊変形）
- タイプ II：主に無荷重崩壊性（δn＞5cm、δn は崩壊変形）。

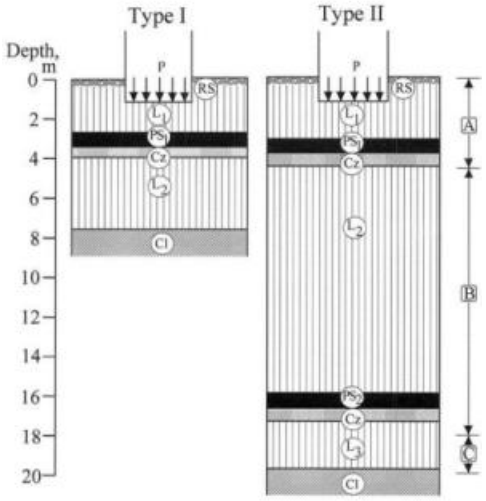


図 8.4.6　崩壊しやすい黄土の種類（Jefferson et al.）

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

タイプ I の黄土は、通常厚さが薄く、1 つまたは 2 つのパレオゾル palaeosols（PS）と、それに付随する炭酸塩層（Cz）を含んでいる。崩壊は応力がある臨界応力を超えた時に発生する。この臨界応力は室内試験や現場試験によって決定することができる。タイプ II の黄土の厚さは、タイプ I より厚く、最大 50m 以上となる。図 8.4.6 は約 20m の黄土が堆積したダヌビア Danubian の段丘（ドナウ河）の典型的な事例を示している。この事例では、3 つの黄土層（L1、L2、L3）が 2 つの古層（PS1 と

PS2）によって隔てられている。タイプ II の黄土では更に 3 つのゾーンに区別される。

- 上部ゾーン A: 無荷重崩壊性はないが、潜在的な荷重崩壊性がある。
- 中間ゾーン B: 無負荷の可倒性
- 下部ゾーン C: 崩壊不可能（または崩壊している）。

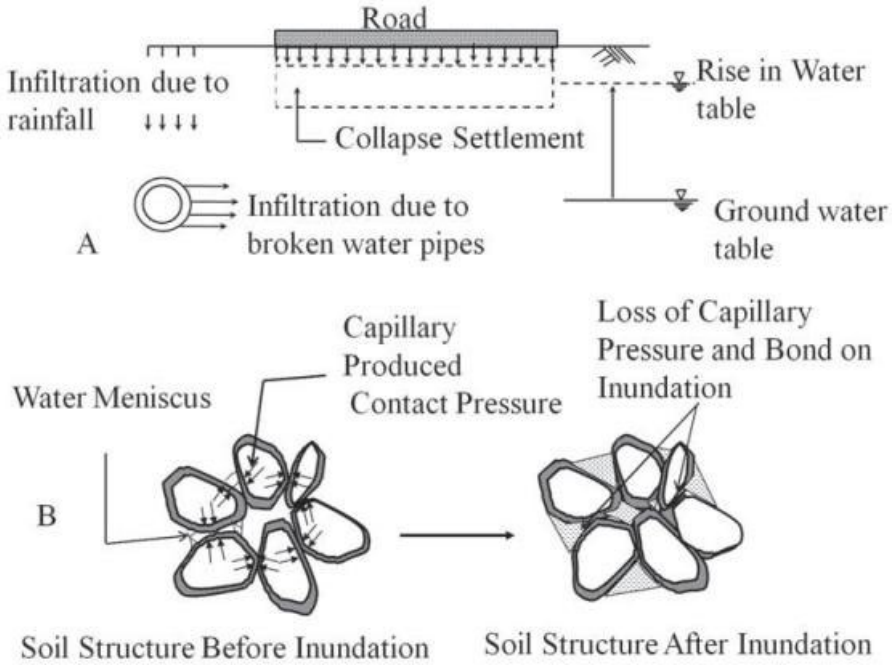
ゾーン C の黄土は以前に残土圧力で崩壊したことがあるため崩壊が生じない。ゾーン A の黄土は上載圧（自重）が小さいため無荷重では崩壊しないが、追加荷重がかかると崩壊しやすくなる。ゾーン B では、無荷重の崩壊が発生する可能性がある。ゾーン B は密度が低く、空隙率 n が高い（すなわち、$n > 50\%$）厚い黄土層を含むことが多く、ゾーン C よりもシルト含有率が高い。

8.4.1.4 崩壊のメカニズム

セメンテーションされた崩壊性土の崩壊は 3 つの結合タイプの全てで破壊を伴う。対照的に、セメンテーションされていない乾燥土の崩壊は毛管力の破壊のみによるものである。毛管力とセメンテーションに由来する強度は同様の方法で特徴付けることができる。しかし、湿潤時には毛管力が失われるのに対し、化学結合は毛管力の変化による影響を受けにくいと考えられる。しかし、粒子接触部で生じる塩結合や粘土結合は、浸水後に除去されるか、弱くなる傾向があり、その結果、崩壊が起こる。

(1) 緩い崩壊性土における結合破壊

緩い崩壊性土の崩壊現象は土の開放構造に関連している。土の細粒分の一部が粗粒分の結合材として機能し、これらの結合が隣接する粒間の小さな隙間で局所的な圧縮を受け、その結果強度が発現する。自然含水比状態では建設荷重による上載圧の増加によりわずかに圧縮されるが、構造はほとんど変化しない。荷重を受けた土が水分にさらされ、ある臨界含水率を超えると、セメンテーションを提供するシルトや粘土のブリッジが除去され、弱くなり、あるいは溶解することで、最終的に結合材は変形力に抵抗できない段階に達し、図 8.4.7 に示すように構造物は崩壊する。



出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, Ahmed Al-Janabi（2014）

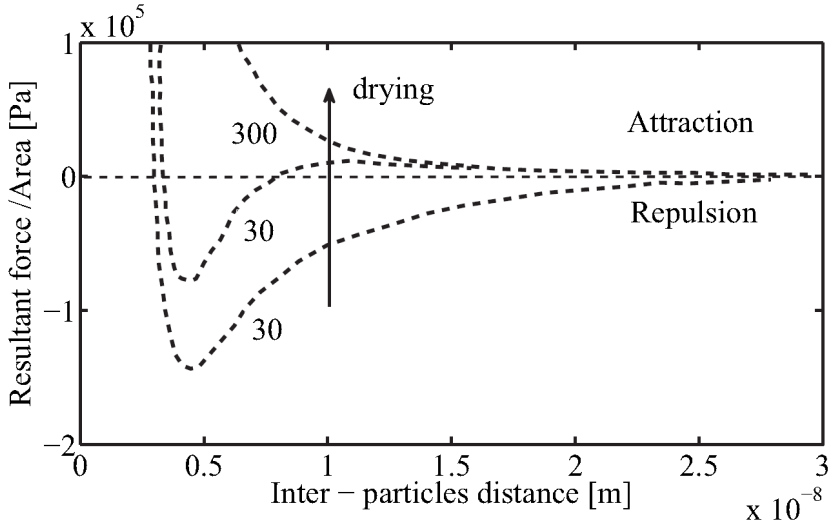
図 8.4.7　緩い崩壊性土の崩壊現象（A: 巨視的効果、B: 崩壊時の微視的現象）

(2) 圧縮崩壊性土における粘土粒子の物理化学的力の変化

圧縮崩壊性土における崩壊のメカニズムは含水比と土中の鉱物の化学反応に依存する。含水比が低下すると、間隙水中のイオン濃度が上昇し、二重層の厚さは縮小し、ファンデルワールス引力が二重層の斥力よりも強くなる。このような粒子間電気力の変化を図 8.4.8 に示す。粒子間力のバランスが引力に支配されるようになると、粘土粒子の凝集が接触点に粘土ブリッジとバットレスを形成する。含水率がさらに低下すると、二重層中の水和陽イオンが脱水し、連続する 2 つの粘土粒子をイオン結合させる。その間に塩の濃度は飽和に達し、塩が結晶として析出して土構造を強化する。

1. 可溶性塩が潤いを与え、柔らかくする。
2. 液中のイオン濃度は含水量の増加とともに減少し続ける。
3. イオン濃度が低ければ低いほど粒子の周囲に形成される二重層は厚くなる（これは粘土ブリッジやバットレスで経験する粘土粒子の局所的な結合が低いために悪化する）。粘土層のせん断剛性と強度は水和層の厚さが増すにつれて低下する。

反発力が支配的になると粘土粒子が分散することもある。



出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, Ahmed Al-Janabi（2014）

図 8.4.8　粒子間の距離と変化含水比による粒子間引力

(3) 崩壊性石膏土における化学的セメンテーション結合の溶解

崩壊性石膏土は崩壊性土の一種であり、乾燥または半乾燥地域に広く分布している。石膏土とは水和硫酸カルシウム（$CaSO_4.2H_2O$）を 2%以上含む土を指し、石膏と呼ばれる。石膏は土粒子間の結合材として働き、乾燥した状態では土を非常に硬くする。湿潤時にはこの一部が溶解し、土が軟らかく、非常に圧縮されやすくなり、土構造の崩壊に起因する基礎問題につながる。

石膏（$CaSO_4.2H_2O$）は最も重要で豊富な含水硫酸塩である。石膏の脱水の結果、石膏中の最初の 1.5 分子の水は、0℃から 65℃の間で比較的連続的に失われ、バッサナイト（$CaSO_4.1/2H_2O$）になる。約 70℃ではバッサナイトの残りの（$1/2H_2O$）分子はまだ比較的強く保持されているが、約 95℃では失われ、無水亜硫酸 $CaSO_4$ の構造に変化する。25℃、全圧 1bar、pH 値 7 における純水への石膏の溶解度は 2.1kg/m3 ある。石膏土は特に石膏による土粒子のセメンテーションのため乾燥状態では硬いが、これらの土が完全にまたは部分的に飽和すると、強度が大きく低下し、圧縮性が急激に増大する。固化している石膏の溶解は土の大きな軟化を引き起こし、地下水が石膏土の中を流れ、石膏の溶出や移動を引き起こすと、問題はさらに複雑になる。軟化に加えて土の固形分の損失が起こるため、石膏土は連続的に崩壊する。

(4) 黄土の崩壊

セメンテーションした黄土の崩壊は 3 段階で起こる。

1. 第 1 段階 : 緩く詰まったシルト粒の間にある粘土のブリッジやバットレスが分散・破壊さ

れ、団塊間のマトリックスが最初に急速に崩壊する。

2. 第 2 段階：隣接するコンパクトなシルト団塊同士の接触によって荷重を受け、より緊密なパッキングへと再配列する。
3. 第 3 段階：荷重の増加に伴い、団塊の漸進的な変形とせん断が起こり、その結果、団塊が分解し、シルト粒子が支持されなくなった間隙に崩壊・移動することで、さらに崩壊が進む。

(5) 締固められた土の崩壊

締固められた土壌の崩壊プロセスに関して同様の見解がされており、そのプロセスは以下のように説明されている。

1. フェーズ 1（崩壊前）：高いマトリック吸引力（毛管力）により準安定構造が生成され、吸引力が低下すると体積変形が小さくなる。粒子のスリップは起こらず、構造は無傷のままである。
2. フェーズ 2（崩壊）：中間のマトリックス吸引力と体積の大幅な減少が起こり、結合の破壊によって構造が変化する。
3. フェーズ 3（崩壊後）：飽和に近づき、それ以上の容積減少（または母体吸引力の低下）は起こらない。

拘束圧が高くなるにつれて、湿潤による崩壊が大きくなり、フェーズ 1 と 3 のマトリック吸引力が高くなるとされている。小さな土塊の数が多い締固め土ほど崩壊が大きく、崩壊は土塊間および土塊内の間隙分布に大きく依存する。土塊が最適含水量よりも乾燥した状態にあると高い強度となり、土構造全体が崩壊しにくくなる。盛土材料によっては母材が強度を失ったり、盛土内の骨材が含水量の増加に伴って軟化したりして崩壊の可能性が生じるものもある。

締固められた土の崩壊は下記のような重要な特徴がある。

- どのような種類の土でも最適含水比より乾いて圧縮されると崩壊が起こる可能性がある。
- 毛細管現象の結合による高いミクロの力が存在する。
- 飽和過程で崩壊性土は圧縮性が徐々に上昇し、せん断強度は徐々に低下する。
- 土の崩壊は飽和度の増加とともに進行する。しかし、臨界飽和度を超えるとそれ以上の崩壊は起こらない。
- 崩壊は局所的なせん断破壊として生じる。
- 一定荷重と異方圧密条件下での湿潤による崩壊過程では水平応力が増加する。
- 三軸条件下の全応力の主応力状態では応力比が増加するにつれて軸方向崩壊の大きさは増加し、半径方向崩壊の大きさは減少する。

盛土の崩壊の可能性は配置条件、含水履歴、応力履歴によって変わる。崩壊の過程で細孔の性質も変化する。黄土に関する研究ではマクロ孔（100～500 μ m）のほとんどが破壊され、より小さな粒間孔や集合体間孔（8～100 μ m）が取り残される。

8.4.2 崩壊性土の分布地域

崩壊性土が分布する地域は全世界の 10%程度を占め、世界には 5 つの主要な黄土地域がある。北米中西部（プレーリー地域）、南米、ヨーロッパ（ドイツ、東欧、ロシア西部を含む）、中央アジア、中国である。それ以外ではナイジェリア、カザフスタン、オーストラリア、南アフリカ、ローデシア、エジプト、イランなどがある。黄土地域は人口の多い地域や主要なインフラストラクチャーの地下に多くあり、崩壊に対して脆弱であるため問題化し始めている。最も懸念されている地域は東ヨーロッパ、ロシアと拡大しつつある中国となっている。崩壊性度の土毎に地域区分すると以下のようになる。

表 8.4.1 崩壊性土の分布する主な地域

分類	主な地域
風成堆積物 （黄土 Loess）	中国の黄土高原（中国、モンゴル） 中央アジア（カザフスタン、ウズベキスタン、キルギス、タジキスタン） イラン、イラク 北米中西部（プレーリー地域） ヨーロッパ（ドイツ、東欧など） アフリカ（エジプト、スーダン、アルジェリア、モロッコ、南アフリカ、ナイジェリア、エチオピア、ケニア）
河川性堆積物	アジアの大河流域（ガンジス川、メコン川など） 欧州の大河川流域（ドナウ川、ライン川、イル川など） 米国の大河川流域（ミシシッピ川、コロラド川） 南米の大河川流域（アマゾン川）
火山性堆積物	日本（関東ローム層など） インドネシア、フィリピンなど火山活動が活発な地域
氷河性堆積物	北欧（ノルウェー、スウェーデン） カナダ北部、アラスカ
砂漠由来の堆積物	ゴビ砂漠、サハラ砂漠周辺 中東地域 オーストラリア（グレートサンディ砂漠、シンプソン砂漠）
その他	南アフリカ Calcrete（石灰岩の風化生成物） 塩類土壌（塩湖周辺）

出典: JICA 調査団

崩壊性土の世界的分布図を図 8.4.9 に示す。HWSD で崩壊性土と考えられる土壌は Andosols、Arenosols（黄土）、Calcisols、Gypsisols（石膏）なので、それらで分布図を作成すると図 8.4.10 となる。

黄土の世界的分布図を図 8.4.11 に示す。また、崩壊性土のひとつである石膏質土の分図を図 8.4.12 に示す。

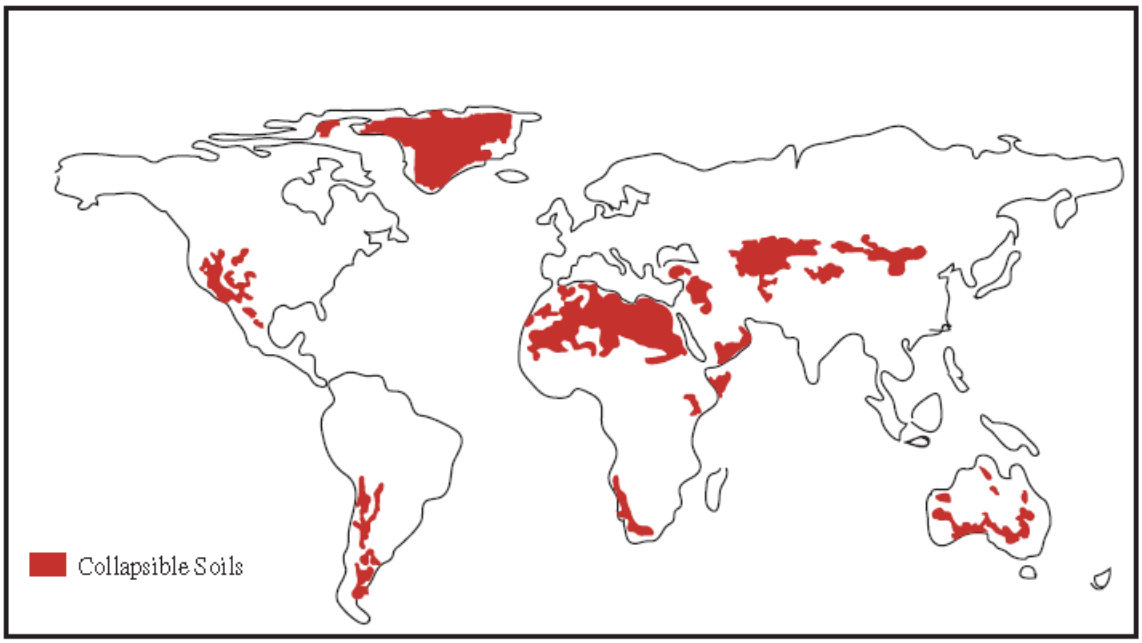
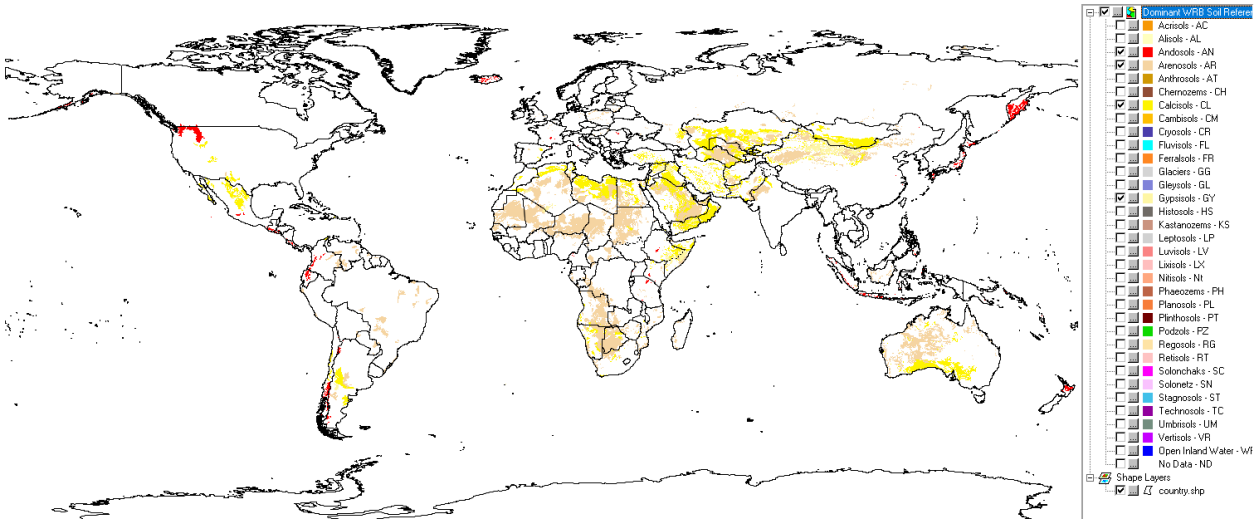


Figure 1.1: World distribution of collapsible soils, modified after [FAO, 1990].

出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, AhmedAl-anabi(2014)

図 8.4.9 崩壊性土の世界的分布図



出典：HWSD Ver.2.0

図 8.4.10 HWSD から推定される崩壊性土の分布図（Andosols、Arenosols（黄土）、Calcisols、Gypsisols（石膏））

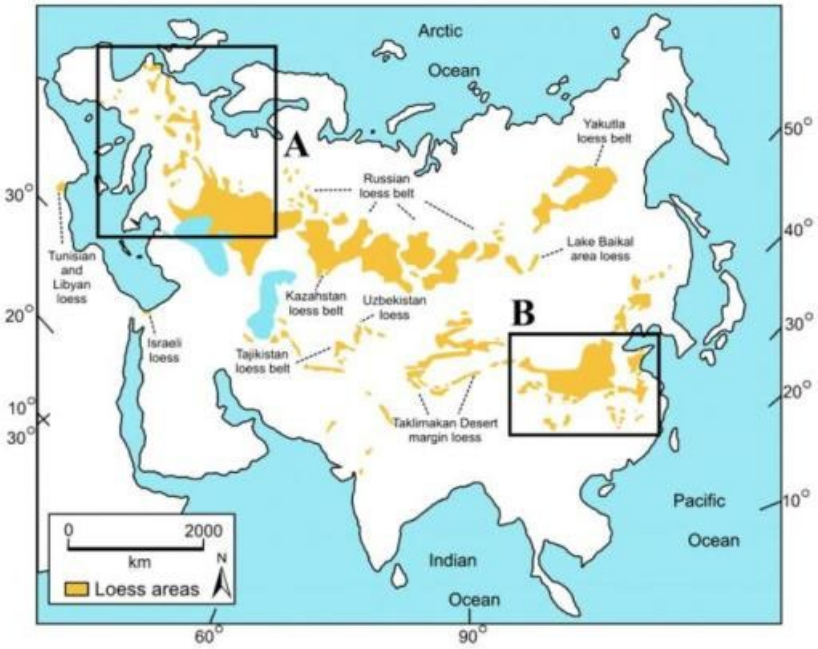


Fig. 1. Distribution of loess in Eurasia with the localities and areas of thickest loess deposition according to Muhs (2007, modified) with locations indicated the European Loess Belt (A) and the Chinese Loess Plateau (B).

出典: Loess–palaeosol sequences in China and Europe: Common values and geoconservation issues, Djordjije A. Vasiljević, Slobodan B. Marković, Thomas A. Hose, Zhongli Ding et al.(2014)

図 8.4.11 黄土の世界的分布図

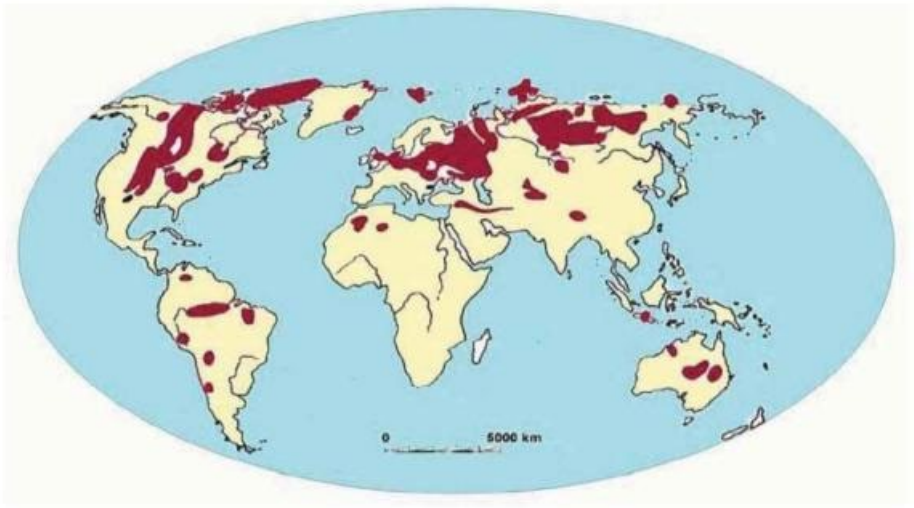


Figure 2.3: Distribution of gypseous soils in the world as mensioned by red area on the map (after FAO,1990)

出典: EFFECT OF MATRIC SUCTION ON THE BEHAVIOUR OF UNSATURATED GYPSEOUS SOIL, Ali Abdulkadhim Jasim Al-Shamoosi (2019)

図 8.4.12 石膏質土の世界的分布図

8.4.3 崩壊性土の判定方法

経済的かつ効率的な対策工を検討するためには 4 つのステップを踏む必要がある。

1. 特定 Identification：崩壊性土が存在するかどうかを特定する。
2. 分類 Classification：崩壊性土の問題程度を分類する
3. 定量化 Quantification：崩壊の程度を評価する。
4. 評価 Evaluation:：設計による対策方法を評価する。

崩壊性地盤の最大の問題の一つはその存在と崩壊の可能性の程度が建設前に認識されないことがあることである。そのため、特に水に影響を受けやすい土を含む土地ではまず崩壊性の可能性がある土を特定し、次にその崩壊の可能性を推定することが重要となる。技術者は崩壊性土の存在の有無を間違う、あるいはそもそも認識していないことが多い。技術者が使用する現行の土の評価基準はすべての細かい物質（例えば、シルトや粘土）を共通の記述子の下にグループ化する傾向があるが、崩壊性土を見いだす上では役に立たない。このようなグループ分けだけに頼ると技術者が問題のある土を特定し、評価する能力を低下させる可能性がある。

崩壊性土の判定と特性評価を行うためには以下の段階を踏むことが適当となる。

1. 崩壊性土を探す予備調査
2. パラメータによる判定
3. 室内試験
4. 現場実験

8.4.3.1 予備調査

有用な地質学的・地形学的情報を収集することは何に注意すべきかを知る手がかりとなり、崩壊性土の予測に役立つ。このため、技術者は土質工学だけでなく、地質学・地形学的な知識を理解することも必要である。地質と地形学的情報から崩壊性土の存在する分布域を推定できる可能性がある。特殊土としては、土壌学が世界中の何処でも研究されているので、特殊土を見いだすための有用な参考情報となる。全ての特殊土の可能性を示す大きな手がかりは過去の情報とその経験から得ることができる。崩壊性土の代表である黄土の崩壊は年代、上載圧、飽和と吸引の程度に影響されるため、土が崩壊しやすいかどうかを判断することを難しくしている。崩壊性土を評価する際には、下記の側面にも注意する必要がある。

- 内部要因
- 粒子鉱物学
- 粒子の形状と分布
- 粒子間結合／セメンティングの性質
- 土構造
- 初期乾燥密度（低いことが多い）

- 初期含水率
- 外部要因
- 水の供給の可能性と性質
- 載荷圧
- 水が浸透に要する時間
- 応力履歴
- 気候

8.4.3.2 パラメータによる判定

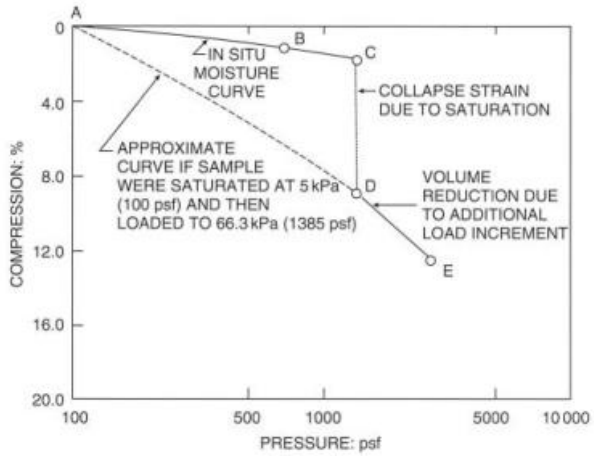
黄土の崩壊性を判定する崩壊係数が提案されており、そのパラメータは増え続けている。しかし、最近の研究の中には不必要に複雑なものもあり、古くから用いられている方法が比較的単純で優れている場合がある。

自然含水比、空隙比、アッターベルグ特性などの土質特性による崩壊土の可能性を評価する多くの基準値や相関関係が提案されている。しかし、それらは試験室で再成型された土の土質特性に基づいていることが多いため、誤解を招く可能性があり、不適切な評価が行われることがある。利用可能な相関関係の多くは相関関係が小さく、ばらつきが大きいため、判定精度はあまり高くない。従って、崩壊性土の可能性を評価する際には室内試験か現場試験のどちらかを用いるのが効率的で経済的であると考えられる。室内試験あるいは現場試験を実施することは、崩壊性土の判定だけでなく、崩壊性土の影響を評価するデータも得られるという利点もある。

8.4.3.3 室内試験

崩壊性を調べる最も効果的な方法は崩壊試験である。実際の崩壊ポテンシャルは圧密試験器を用いて測定される。ある圧力下で試験片を浸水させたときに発生する崩壊ひずみの量は試料の崩壊しやすさを示す。

図 8.4.13 は典型的な崩壊性土の圧密沈下挙動を示している。供試体をセットして初期荷重 5kPa（104psf）の載荷をかけてから試験を開始する。初期圧縮曲線 A-B-C は原位置含水比のままの土の荷重・沈下曲線を示している。現場で予想される応力と同等になる C 点まで圧力をかけ、この時点で試料を浸水させ、圧縮を測定する（**図** 8.4.13 の C-D）。その後、線 D-E に相当する更なる荷重を加える。層の崩壊量は層の厚さに崩壊ひずみを掛け合わせることによって求める。このとき、問題のゾーンの中点における最終応力に対応する値を使用する。ダブル圧密試験はほぼ同一の 2 つの土の試験片を使用し、一方の試験片には自然状態で、もう一方の試験片には通常 5kPa の載荷厚で直ちに飽和させた状態で応力をさせる。ダブル圧密試験に基づき崩壊性の程度を評価し、崩壊の潜在的な深刻さの指標を提供するために使用することができる。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

図 8.4.13 圧密試験を用いた崩壊試験の圧縮・沈下曲線

表 8.4.2 は、Jennings and Knight （1975）が提案した崩壊度による判定で 1%の崩壊は準安定とみなすことができることを示している。しかし、崩壊度の最小値は世界各地で異なっており、中国では 1.5%（Lin と Wang、1988）、米国では 2%を超える値が崩壊性土を示すために用いられている。ASTM D5333 では崩壊度による程度を**表 8.4.3** にしており、Jennings and Knight （1975）と異なる数値となっている。また、室内試験と現場試験の Cp は現場の方が室内より 15%程度低くなるという報告がある。

$$崩壊度Cp(\%) = \frac{\Delta e}{1+e} \times 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100$$

ここで、e は間隙比、Δe は浸水に伴う間隙比の変化

表 8.4.2 潜在的なリスク指標としての崩壊率（Lutenegger と Haliberg、1988）

崩壊度 Cp（%）	問題の程度
0~1	問題なし
1~5	中程度の問題
5~10	問題
10~20	シビアな問題
>20	非常にシビアな問題

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

表 8.4.3 潜在的なリスク指標としての崩壊率（ASTM D5333）

崩壊度 Cp（%）	崩壊性度
0	なし
0.1~2.0	少し
2.1~6.0	中くらい
6.1~10.0	中くらいのシビア
>10	シビア

出典: ASTM D5333 2003 Standard Test Methods for Measurement of Collapse Potential of Soils.

A.R. Reginatto, J.C. Ferrero（1973）は飽和状態と自然状態の崩壊性試験を行い、図 8.4.14 の判定方法を提案した。また、現場の崩壊度は室内試験による崩壊度の 84%となることを示した。

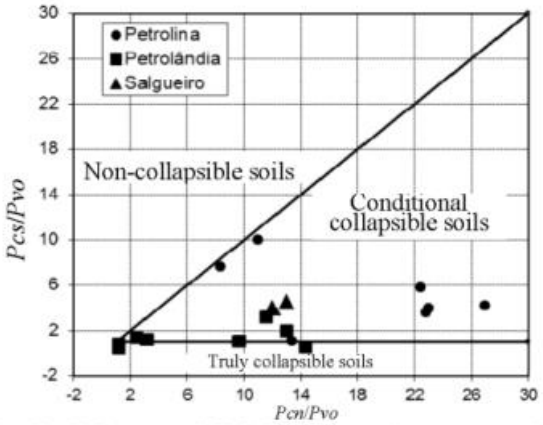


Fig. 5 Judgment of Ref. [1] (*Pcs*—collapse stress for saturated soil, *Pcn*—collapse stress for soil at natural moisture content, *Pvo*—vertical stress due to overburden stress).

図 8.4.14 崩壊性土の判定図（A.R. Reginatto, J.C. Ferrero, 1973）

Pcs: 飽和時の崩壊応力、Pcn: 自然状態の崩壊応力、Pv0: 先行密応力

出典: Evaluation of the Collapsibility of Soils in the Semiarid Region of Pernambuco, Brazil, Silvio Romero de Melo Ferreira, Stela Fucale (2014)

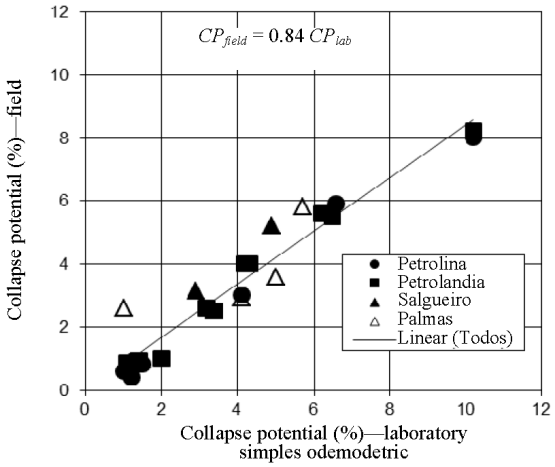


Fig. 8　Relationship between collapse potential obtained in field and laboratory tests.

図 8.4.15 現場試験と室内試験の崩壊度の関係図（A.R. Reginatto, J.C. Ferrero, 1973）

出典: Evaluation of the Collapsibility of Soils in the Semiarid Region of Pernambuco, Brazil, Silvio Romero de Melo Ferreira, Stela Fucale (2014)

Denisov は沈下係数による崩壊性土の分類を**表 8.4.4** のように提案した。

$$沈下係数 \quad K = \frac{e_{LL}}{e_N}$$

ここに、e_{LL}: 液性限界の間隙比、e_N: 自然間隙比

表 8.4.4 沈下率係数による土質分類（Denisov, 1951）

沈下係数 K（%）	土質分類
0.5~0.75	非常に高い崩壊性土
1.0	崩壊性でないローム
1.5~2.0	非崩壊性土

出典: A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction, Mohammed Shakir Mahmood, Mustafa Jamal Abrahim（2020）

Feda （1988）は飽和度 100%以下で K_L>0.85 ならば崩壊性土とした。

$$K_L = \frac{\left[\left(\frac{w_n}{S_r}\right) - PL\right]}{I_p}$$

ここに、wn:自然含水比、Sr:飽和度、PL:塑性限界、Ip:塑性指数

Handy （1973）は粘土分で崩壊性土の判定を提案した。

表 8.4.5 Handy（1973）による崩壊性土判定

粘土分(%)	崩壊性度
<16	非常に高い
16~20	崩壊性
24~32	50%が崩壊性土
>32	非崩壊性土

出典: LABORATORY SIMULATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IRRIGATION-INDUCED SETTLEMENTS OF BUILT ENVIRONMENT OVERLYING COLLAPSIBLE SOIL STRATA IN UNITED ARAB EMIRATES, Ramesh VANDANAPU（2019）

Zur and Wiseman （1973）は ρ_d/ρ_{dL} <1.1 の時崩壊性とした。（ρ_d:乾燥密度、ρ_{dL}:液性限界の乾燥密度）

Lin and Wang （1988）は IXZ による判定方法を示した。

$$I_{CZ} = \frac{h_z - h_{CZ}}{h_1}$$

ここに、h_1:初期高さ、h_Z:土被り圧の高さ、h_{ZS}:土被り圧で飽和させたときの高さ

表 8.4.6 Handy（1973）による崩壊性土判定

I_{CZ}	崩壊性度
0~1	非崩壊性
1~5	中くらい
5~10	高い
10~20	非常に高い
>20	極めて高い

出典: LABORATORY SIMULATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IRRIGATION-INDUCED SETTLEMENTS OF BUILT ENVIRONMENT OVERLYING COLLAPSIBLE SOIL STRATA IN UNITED ARAB EMIRATES, Ramesh VANDANAPU（2019）

Priklonski は沈下係数を以下の式で定義して、土質分類を**表 8.4.7** のようにした

$$\textit{沈下係数} K = \frac{w_0 - PL}{I_p}$$

ここに、w0: 自然含水比、PL: 塑性限界、Ip: 塑性指数

表 8.4.7 沈下率係数による土質分類（Priklonski）

沈下係数 K(%)	土質分類
<0	非常に高い崩壊性土
>0.5	非崩壊性土
>1.0	膨潤性土

出典: A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction, Mohammed Shakir Mahmood, Mustafa Jamal Abrahim（2020）

崩壊性土のひとつである石膏については石膏の含有量で判定する方法がある。

表 8.4.8 石膏質土の分類(Barazanji, 1973)

Table 2.2: Classification of gypseous soils according to (Barazanji, 1973)

Gypsum content, %	Classification
0-0.3	Non- gypsiferous
0.3-3	Very- slightly gypsiferous
3-10	Slightly gypsiferous
10-25	Moderately gypsiferous
25-50	Highly gypsiferous
> 50	Gypsiferous soil to be described by the other fraction such as sandy gypsiferous soil

出典: EFFECT OF MATRIC SUCTION ON THE BEHAVIOUR OF UNSATURATED GYPSEOUS SOIL, Ali Abdulkadhim Jasim Al-Shamoosi (2019)

おおよその目安に過ぎないが、ダブル圧密試験は崩壊の定性的な兆候を高く評価することができる。多くの場合、実際に発生する崩壊量よりも大きな崩壊リスクを評価することの方が重要となる。しかし、圧密試験による崩壊試験はサンプルの撹乱に影響されるので、ブロックサンプリングや高性能のチューブサンプリングを使用することが勧められる。圧密試験による崩壊試験は脆性指標試験と考えるべきであり、完全な崩壊評価のためには現場実験を実施すべきである。崩壊沈下量を推定する場合、土が浸水により部分的にしか崩壊していない可能性があるので注意する。崩壊性を評価するために、サクションを測定できる圧密試験機、Rowe cells、三軸崩壊試験等が提案されている。ダブルハイドロメーター試験で崩壊性土を判定することも提案されているが、分散性土が崩壊性土と似たような現象を起こすためと考えられる。

8.4.3.4 現場試験

(1) Sausage test

現場で簡易に崩壊性土を判定する方法として Sausage test（Clemence and Finbarr 1981）がある。試験坑から約 500cm^3 の土塊を採取し、2 つに割って、体積がほぼ等しくなるまでそれぞれを切り詰める。次に、片方の試料を水で濡らし手のひらで成形して湿ったボールを作る。このボールの体積を乱されていない試料の体積と比較する。湿ったボールの方が明らかに小さい場合は、崩壊が疑われる。この試験は、土が崩壊するかどうかの目安に過ぎない。

(2) 平板載荷試験

平板載荷試験は基礎の許容支持力を評価するための最も一般的な現場試験である。これらの試験は通常、地表近くで実施される。崩壊性を判定するための平板載荷試験では、載荷された地盤に水が導入され、その結果生じる湿潤による沈下を測定する。試験中に水で浸透させるため、ピットの中で試験するのが良いが、測定装置が濡れないような工夫が要る。ピットを掘らないで直接水をかけても良いが、浸透状況が分からない。基本的には圧密試験と同じような荷重・沈下曲線が得られる。試験方法は ASTM の ASTM D1194、日本では JIS A 1215 である。

(3) 電気式コーン貫入試験

Northmore ら（2008）は電気式コーン貫入試験を用いて、2～3m に崩壊性堆積物が存在することを飽和度の低下で予測できるとしている。（図 8.4.16 参照）。

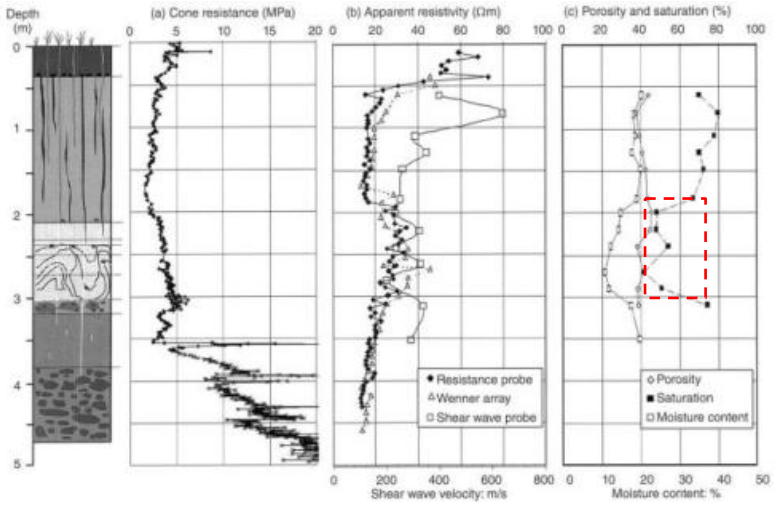
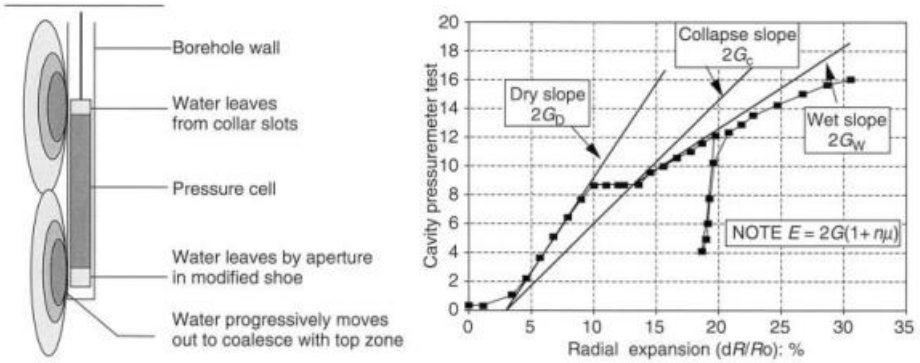


図 8.4.16　電気式コーン貫入試験による崩壊性土の特定（崩壊性土は 2～3m に堆積）

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

(4) 孔内水平載荷試験

Smith と Rollins（1997）は乾燥土壌の崩壊可能性を調査するために孔内載荷試験を使用することを検討した。目的の深さで乾燥状態の弾性率（E_D）を測定し、その後、水を圧力計から周辺地盤に排出し、崩壊時の弾性率（E_c）と崩壊後の湿潤弾性率（E_w）を測定する（図 8.4.17 参照）弾性率比 E_c/E_D と E_w/E_D を用いて、崩壊可能性のある土の崩壊性を予測することができると提案している（**表 8.4.9**）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

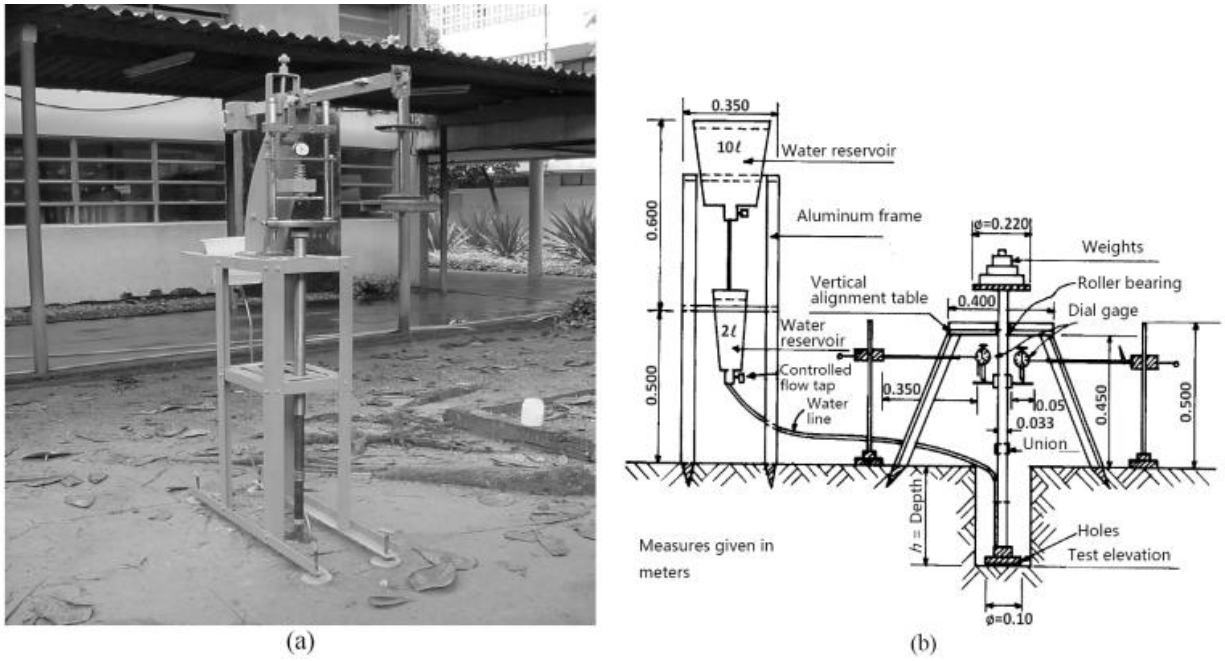
図 8.4.17　孔内載荷試験と乾燥弾性率、収縮弾性率、湿潤弾性率の測定

表 8.4.9 孔内載荷試験結果からの崩壊性土の判定

判定基準			崩壊性ポテンシャル
E_c/E_D		E_w/E_D	
~1	and	~1	非崩壊性
<1		~1	中程度の崩壊性
~1		<1	崩壊性
<1		<1	シビアな崩壊性

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

現場で圧密試験のような載荷試験としての図 8.4.18 のような試験がある。



出典: Evaluation of the Collapsibility of Soils in the Semiarid Region of Pernambuco, Brazil, Silvio Romero de Melo Ferreira, Stela Fucale（2014）

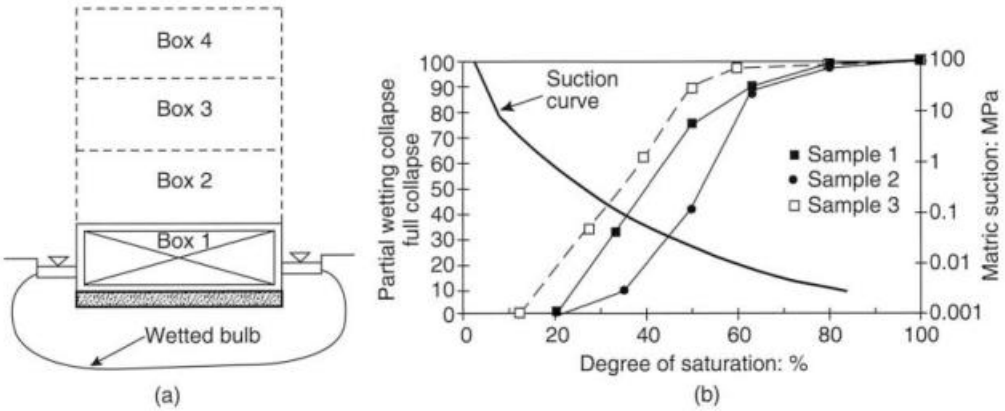
図 8.4.18 現場載荷試験機

8.4.3.5 その他の試験方法

黄土の弾性係数と崩壊性を評価するために標準貫入試験（SPT）を用いることも報告されている。コーン貫入試験（CPT）も用いられている。しかし、原位置試験では崩壊領域における応力状態の均一性を確保することが重要であるため、この欠点を克服するために様々な試験方法が開発されている。横方向の応力変化を評価するためのステップブレード（stepped blade）法（Handy, 1995）、湿潤に対する応答を決定するダウンホールプレート試験（Houston ら, 1995）やボックスプレート荷重試験（Mahmoud , 1995）等が開発されている。

Houston ら（2001）は、図 8.4.19 に示す原位置試験装置を用いて、低塑性シルトの崩壊ポテンシャルの現場試験を行っている。コンクリートまたは鋼鉄の箱をコンクリート板の上に下ろし、土を充填し、基礎の底面を水で 浸水させ、動きを測定するものである。部分崩壊、マトリックサクション、飽和度の関係（図 8.4.19（b））により、構造物を取り囲む土の含水比がどのように変化するか把握することが重要であるとしている。

Houston ら（2001）は原位置試験（図 8.4.19 に示した試験とは異なる）と室内試験を用いて調査した土の崩壊予測を比較して、原位置試験は、荷重を制御することはできるが、湿潤の影響を受ける領域と湿潤の程度を制御することは非常に困難であることを報告している。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

図 8.4.19 低塑性シルトの崩壊を測定するための実験（a）と部分湿潤崩壊、マトリックサクション、飽和度の関係（b）

8.4.4 土の湿潤度

崩壊性土を改良するための最も困難な課題は、湿潤の程度と将来湿潤になる可能性の程度を評価することである。これは特に崩壊性土がかなりの深さまで湿潤していない乾燥または半乾燥環境において当てはまる。しかし、より湿度の高い環境で発見された崩壊性堆積物であっても深部で有意な湿潤が起こっていない、一部しか飽和していない状況のため、堆積物がまだ部分的に崩壊可能な状態になっていることがある。崩壊性土の有害な影響は、基礎の下と地下水線の間のゾーンで発生する。ポンディング試験（池を作る）は水の移動の深さと横方向の範囲を測定することにより、基礎の設計に反映できる。

試験室でのモデル実験を行い、観測された結果から湿潤に要する深さと時間を予測することができる。最近では Yanrong et al.（2018）が、地下水の上昇にさらされた黄土の崩壊の数値シミュレーションを行い、試験室および現場試験の両方に良い一致を示したことを報告している。

多くの技術者は崩壊性領域が地表に近く、あまり深くまで広がっていない場合、湿潤の程度は100%に等しいと仮定する傾向がある。しかし、特に下方に浸透が発生した場合、飽和度は通常 35%から 60%にしか達しないことがあり、必要以上の対策を行ってしまう可能性がある。El-Ehwany and Houston （1990）は 50%飽和で完全崩壊の 85%が生じるとしており、図 8.4.19 に示した観察結果とほぼ一致している。Ehwany らは完全崩壊が飽和度 65~70%で達成されることを示唆している。Lawton ら（1992）は部分飽和がまず部分崩壊の引き金となり、完全崩壊は飽和度 60%という低い値で起こることを報告している。Osopov and Sokolov （1995）は飽和度が 80%を超えて初めて完全な崩壊性が実現すると報告している。このような飽和度と崩壊の関係が分かっていないことは、実験室試験に基づく崩壊沈下量の予測にも影響する。室内試験では崩壊ひずみが過大評価され、一般に、現場で達成さ

れるよりも大きな飽和度が生じる。しかし、一般的な沈下予測の性質と精度を考えれば、これは特に大きな問題ではない。すべての崩壊性土は部分的な湿潤条件下で部分的な崩壊を経験する。しかし、部分崩壊曲線の形状や位置は土質、細粒分含有量、結合の種類によって異なる。湿潤の程度と程度を評価することが崩壊性評価の最も難しい部分となる。

8.4.5 崩壊性土の工学的問題

水が浸透したため比較的急激に体積が圧縮され、強度が低下する現象は明らかに地盤工学的に重要な問題であり、供用性が損なわれる場合には高額な修復費用が発生し、最悪の場合は完全に破壊・崩壊に至ることもある。

エジプトの乾燥地帯では崩壊性地盤が広く分布しており風成堆積物（Loess）や砂質土地盤が多い。そのため、建築基礎が急激な沈下や変形を起こした建物や基礎に亀裂が入った事例及び原因の研究がなされている（Sakr ら（2008））。アラブ首長国連邦は砂漠地帯の崩壊性砂地盤があり、基礎構造の沈下や損傷について調査している事例がある（Vandanapu ら（2016））。ブラジルには崩壊性地盤が広く分布し、ダム建設で問題となっている事例があり、ダム建設に伴う水文地質学的変化によって引き起こされた崩壊問題についての報告がある（Vilar and Rodrigues（2011））。その他にも堤防の基礎、ダム堤防、道路堤防、盛土などで問題が発生したことが報告されている。

崩壊性地盤に関連する問題を回避または軽減するためには、崩壊のプロセスを理解することが必要である。崩壊はほとんどの場合、含水比の増加によって引き起こされるため、問題は都市や建築物のある環境で発生することが多く、そのため、最も被害をもたらす可能性のある場所で影響が発生する。また、世界の多くの地域で、地震活動が活発な地域に崩壊性土が存在するため、これは特に問題となりうると考えられる（Houston et al.）。さらに、崩壊の可能性は、洪水や荷重（地震）によって自然に、あるいは人間活動によって人為的に、完全な崩壊が引き起こされるまで残る。人為的な活動には、排水管理の不備による偶発的なものと、地盤改良（動的締固めなど）による意図的なものがある。

8.4.5.1 交通・公益インフラ

道路で特に問題となるのは道路の長さに沿って発生する不均一な崩壊と道路下層の不均一な湿潤である。これらは荒く波打つ路面変状を引き起こし、道路構造物に何 km にも及ぶ甚大な被害をもたらす可能性がある。鉄道は道路よりも縦断方向の沈下に対して厳しい制限があるため、小さな不同沈下でも大きな問題となる可能性がある。パイプラインについても、縦断方向の不同沈下や横方向の移動を許容する十分な柔軟性がないと問題が顕在化する。水道管や下水道が不同沈下によって破壊された場合、漏水が崩壊現象を悪化させる可能性がある。また、橋梁、斜面、切羽などの構造物にも被害を与える可能性がある。高速道路から路盤に加わる応力には、上載厚と交通荷重の 2 つがある。いったん湿潤が生じれば、完全な崩壊を引き起こすには大型貨物車による短時間の荷重で十分であると考えられる。ほとんどの崩壊性土は道路の基礎材料よりも透水性や吸水性が高いため、排水管理に

留意する必要がある。舗装は蒸発を防ぐが、排水が悪いと道路の周囲の土地との相対的な含水比状態を生じさせ、道路周辺の崩壊性地盤による沈下が道路まで影響して変状が及ぶ可能性がある。

8.4.5.2 動的挙動

崩壊性地盤はせん断時の収縮性が高いため、液状化や動的沈下の影響を特に受けやすい。中国北部の寧夏回族自治区と甘粛省に位置する Haiyuan（海原）地区では 1920 年に発生した地震で大規模すべりが発生し、20 万人以上が死亡した。海原地区には黄土や軟弱な堆積岩、粘性土で構成されており、黄土の崩壊性破壊が原因の一因と考えられている。タジキスタンでは原因不明で道路変状が毎年生じている所を視察した。当該道路はロームが厚く堆積している斜面に作られており、斜面の下には川がある。雨季には黄土が湿潤する可能性があり、道路は起伏がある地点なので、積載オーバーした大型車両の交通振動が大きくなる可能性があり、それにより黄土が崩壊性沈下を起こしているのではないかと考えられた。

崩壊性地盤の動的沈下や変形の可能性を見つけることは困難である。崩壊性地盤は乾燥状態では十分なセメンテーションをしていることが多く、動的荷重や地震荷重が作用した際に大きな変形を生じないからである。しかし、湿潤状態になったり、地下水の上昇が起こったりすると崩壊性土の結合が弱まり、動的沈下が生じる可能性が増大する。Houston（2003）の崩壊性地盤の動的挙動の研究では繰り返し応力比（CSR）が飽和度が高くなるほど小さくなることが報告されている（図 8.4.20 参照）。すなわち、飽和度が高くなると地震に対する強度が小さくなることを意味している。※CSR は最大せん断応力（地震の繰返しせん断応力振幅に関連する）の鉛直有効応力に対する比として定義される。

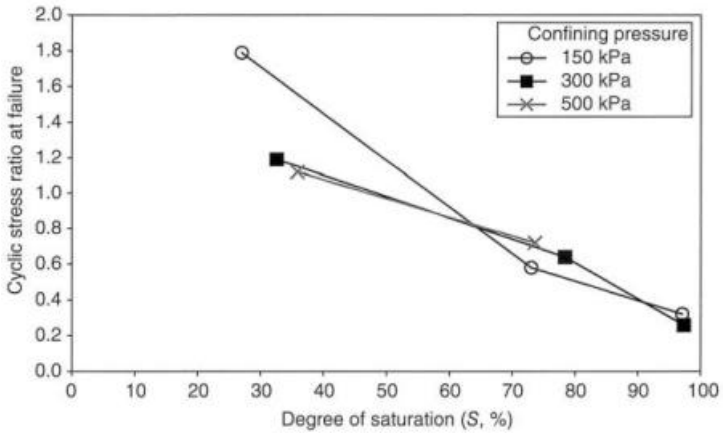


図 8.4.20 飽和度と繰返し強度の変化

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

黄土地盤における液状化はその微細構造的な側面によって複雑であり、砂地盤の液状化とは異な

るため良く分かっていない。

8.4.5.3　斜面の安定性

黄土の地すべりは発生する条件が多いため、非常に多様となる。黄土の地すべりの主なタイプを図 8.4.21 に示す。6 の Tan-ta は直径 10m 未満、深さ数 m の小規模な崩壊であるが、黄土の急斜面で発生することに留意すべきである。すべり開始後、急速な崩壊が起こり、多くの場合、すべり速度が速い。

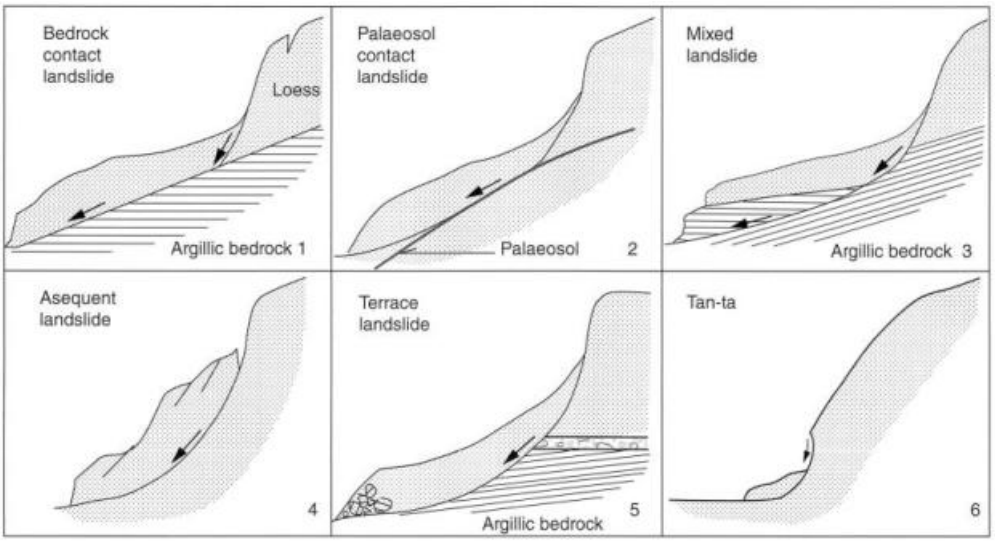


図 8.4.21　黄土地すべりの主なタイプ

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

中国の甘粛省の黄土マント山岳地帯のような黄土地帯では、過去 100 年間に 4 万件を超える大規模な地すべりが発生している。この地域の地すべりは地震動と夏のモンスーン性豪雨によって引き起こされる。この降雨によって、黄土がカルスト状の地形を呈し、大きな陥没穴が生じてさらなる危険となっている。

以下に各種文献等で記載されていた崩壊性地盤で生じた問題事例の写真を示す。



図 8.4.22 15 世紀の塔の崩壊によるひび割れ

（中国の蘭州にある 15 世紀の仏塔の壁に灌漑計画が導入された後に発生した亀裂）

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）



図 8.4.23 崩壊性石膏土地盤の建物のクラック

出典：A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS, Safa Hussain Abid Awn（2010）



図 8.4.24 沈下に伴う亀裂変状

出典：https://civil-engg-world.blogspot.com/2012/04/how-to-identify-collapsible-soils.html



図 8.4.25 舗装の沈下（英国）

出典: LABORATORY SIMULATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IRRIGATION-INDUCED SETTLEMENTS OF BUILT ENVIRONMENT OVERLYING COLLACPSIBLE SOIL STRATA IN UNITED ARAB EMIRATES, Ramesh VANDANAPU（2019）



図 8.4.26 黄土の沈下とガリ侵食

出典：Evaluation of groundwater effects on tunnel engineering in loess, W. Sun, Q. Liang, S. Qin, Y.N Yuan & T. Zhang（Jan 2021）



図 8.4.27 崩壊性石膏土の崩壊

出典：A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS, Safa Hussain Abid Awn（2010）



図 8.4.28 崩壊性土の家屋の被害（エジプト）

出典：Egyptian Collapsible Soils and their Improvement, Mohamed Sakr, Mohsen Mashhour, Adel Hanna（2008）



図 8.4.29 崩壊性土の家屋の被害（エジプト）

出典：Egyptian Collapsible Soils and their Improvement, Mohamed Sakr, Mohsen Mashhour, Adel Hanna（2008）

8.4.6 崩壊性土の対策方法

特定の地盤の崩壊を最小限に抑えるあるいは無くすために使用できる方法はいくつかある。適切な工法の選択は、崩壊土の深さ、建設される構造物の種類、工法のコストと実用性によって決まる。これらの方法には以下が含まれる。これらは膨潤性土の対策と同じ方法が提案されている。

- 置換工法
- 事前湿潤法（プリウエット）
- 水分コントロール
- 動的締固め工法
- 化学的安定化またはグラウチング

8.4.6.1 置換工法

簡単な解決策は必要な深さまで掘削し、崩壊性土を取り除くことである。取り除いた土は圧縮し、基礎土として再使用することができる。本方法は、特に浅い深度で崩壊性土砂が発生する場合によく用いられる。入れ替えた土は 95～100%の密度に締め固める必要がある。Jennings と Knight は土は常に最適水分より 2%以上少ない水分で締め固めるべきであると提案している。

8.4.6.2 事前湿潤法 prewetting

事前湿潤法とは構造物の建設前に水分浸透により崩壊が予想される土を湛水または湿潤させて、構造物建設後に土の崩壊が最小限になるようにする工法である。土を濡らすには池を作るか、トレンチやボーリング孔を利用する。事前湿潤法は水路や道路など誘導荷重が小さい場合に有効であるが、プレローディングを伴わない事前湿潤法は将来の基礎沈下を防止するには不十分である。事前湿潤法は土が工事前の荷重状態で崩壊させるので、その後の追加荷重は補償されず、さらなる沈下をもたらすことになるため留意が必要である。

8.4.6.3 水分コントロール

この方法は、地面への水の浸入を防ぐことを目的としている。湿潤をコントロールするために使用できる方法は以下のようなものがある

- 水の灌漑をコントロールする
- 造園する場合は防水プランターボックスに入れる
- 構造物に隣接する景観植生を制限する
- 構造物の周囲に舗装または埋設ジオメンブレンを設置する
- 効果的な表面および埋設排水システムを設置する

8.4.6.4 水締め工法

水締め工法は土砂や砂の締め固めする際に用いられる手法のひとつで、土砂や砂を埋め戻す際に、水を注ぎ込みながら埋め戻す工法である。掘り起こした土を大量に埋め戻すケースでは、しっかりと転圧したとしても地盤が沈んでしまうことがあるため、水締めが用いられる。水締めとして大量の注水によって土粒子の周辺にある空隙を取り除くことで、毛細管現象で発生する毛管力を減少させ、ばらばらになった粒子が自重によって沈降し、土砂や砂が密になる。このため、水締めに使用される埋め戻し土は透水性の良い砂で水がしっかりと行き渡ることが前提となる。

現地盤から水締めを行う場合は事前湿潤法と同じくなるが、透水性が大きくないと効果がなく、また、どの深度まで締め固める効果がでるか不明である。軽い構造物には適用できる可能性があるが、崩壊特性を完全に消失させるためには水締め工法と動的締固め工や締固め杭等を複合して用いるのが良い。

8.4.6.5 動的締固め工法

緩い砂等の軟弱地盤の対策工法である締固め工法で崩壊性土を建設前に密度増加させて崩壊性破壊による沈下量を抑制するものである。崩壊性土までの地盤の硬さなどによるが、バイブロフローテーション工法、動的締め固め工法（重錘落下締固め工法）が使用できると考えられる。

(1) バイブロフローテーション工法

バイブロフローテーション工法は砂質地盤の支持力増大、液状化対策として用いられる工法である。棒状のバイブロフロットを地盤中に振動しながら水を噴射し、水締め固めと振動による地盤締め固め、同時に生じた空隙に砂利等を補給して地盤改良する工法である。水噴射により崩壊性土を破壊し、更に密度増加することにより崩壊性土の対策として期待される。

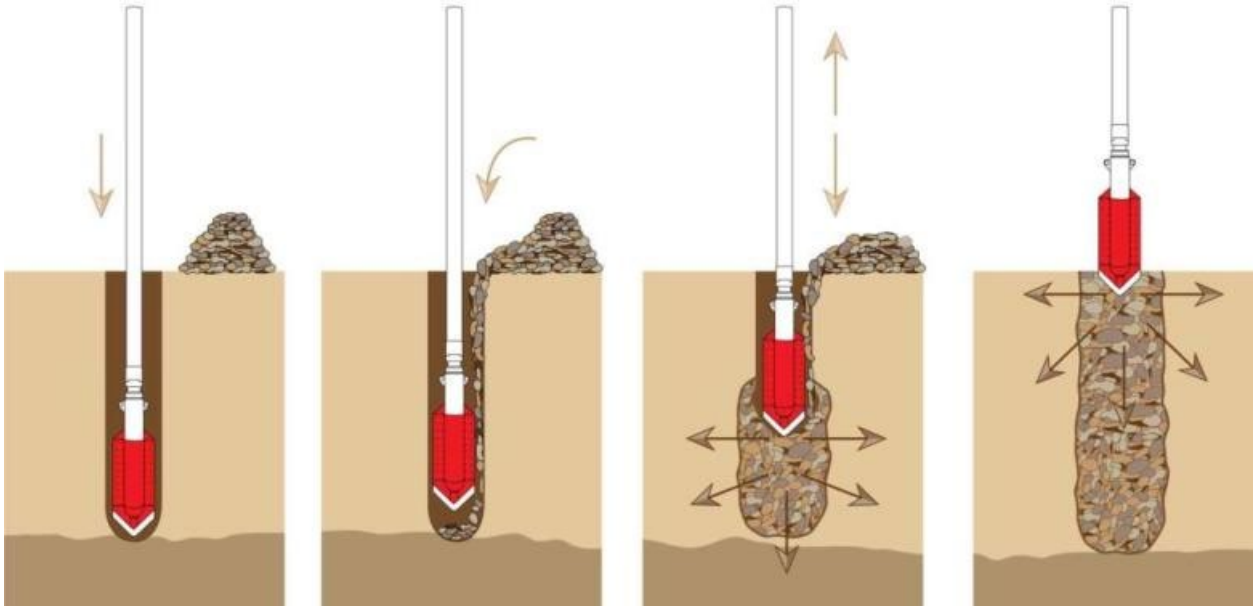


図 8.4.30 バイブロフローテーション工法の施工方法

出典: https://www.omsvibro.com/ground-improvement-techniques/

(2) 動的締固め工法（重錘落下締固め工法）

重動的締固め工法は、最大 30 トンもの非常に重い重錘を 40m もの高さから土に投下することで、崩壊性土を事前に破壊して、緻密化するために用いられる。地表に衝突した重錘はそのエネルギーを土に与え、重りの直下とその周辺に緻密化効果をもたらす。高速道路プロジェクトにおいて崩壊性沖積土からなる下層地盤の処理にも使用されている。Bell and Bruyn（1997）は黄土に炭酸塩が比較的多く含まれている場合、動的締固めでは望ましい結果を得ることが難しい可能性があると指摘している。崩壊性土の深度が深いと深部まで崩壊が生じる荷重を与えられない可能性があるので、重錘の重さ、落下高さ、落下回数等試験施工することが望まれる。



図 8.4.31 動的締固め工法

出典: https://www.structuralguide.com/ground-improvement-methods/

8.4.6.6 化学的安定処理またはグラウチング

珪酸ソーダや塩化カルシウムなどの添加剤による化学的安定化は長年にわたって試みられておりその成功の程度は様々である。この方法は土構造内にセメンテーションを形成するため、水に濡れても崩壊しにくい。作業を成功させるためには薬液を目的の深さまで浸透させることが不可欠である。この工法は、細かい砂質の堆積物に最も適している。グラウチングの利点は、構造物が既に設置された後でも使用できることである。グラウチングは、以下の 3 つのメカニズムの 1 つ以上によって土壌改良を行う

1. グラウトの粘性が十分に低く、土の透水性が十分に高ければ、グラウトは単純に土に浸透し、土を大幅に強化・硬化させる。
2. グラウトの粘性が高く、土の透水性が低い場合、グラウトの球根は周囲の土を圧縮し、緻密化する。このプロセスはコンパクショングラウチングと呼ばれる。
3. 第 3 のメカニズムは、地盤補強と呼ぶことができる。十分なグラウトが十分な位置と深さで地盤に注入されれば、剛性の高いグラウトゾーンが上載荷重と構造荷重を受け持ち、緩いゾーンはある程度無負荷になる。

ケイ酸塩による安定化には、一般的にコストがかかる。旧ソビエト連邦で実施された現場および実験室での試験から、2%ケイ酸ナトリウム水溶液で前湿潤処理することで、崩壊性地盤の圧縮性を著しく低下させ、強度を向上させることができることが示された。この工法は、建設される構造物の重量が加わると沈下することが予想される乾燥および湿潤の両方の崩壊性土に使用される。この工法は 3 つのステップからなる

1. 炭酸ガスを注入して水分を除去し、土を予備的に活性化する。
2. ケイ酸ナトリウムグラウトの注入。
3. アルカリを中和するための二酸化炭素の注入。

炭酸ガスで前処理した非炭酸塩タイプの砂質土の現地試験では、20～25%の強度向上が見られた。湿潤土壌へのアンモニア単独注入も行われている。しかし、アンモニアの効果はケイ酸ナトリウムの効果よりもはるかに低い。さらに、アンモニアは使用するのに危険でもある。崩壊の可能性を減らすためにセメントを使用する試みも成功した。添加剤としてセメントを 5%という少量使用した結果、崩壊ポテンシャルは 0.5%を超えない程度に大幅に低下した。石灰とアスファルト乳剤は、特に道路建設に関連して黄土の安定化に使用されてきた。リン酸は黄土の安定化に使用されてきた。

8.4.6.7 焼結工法

レスの崩壊特性改善のために焼結工法がレトビノ（Litvinov）によって開発され， ソビエト連邦でよく使用されている。これは主として高温度を用いるもので, 特別の装置としてレス土中に穴を掘り, 高温にすると直径 1.5~2.0m の固結した土の柱がえられることになる。この方法はウクライナ共和国で特に良好な結果を得た。16 の実験例があるものの，高価格の割には効果の少ない点からあまり使われていない。

8.4.6.8 基礎

崩壊性土の厚さが比較的小さい場合、基礎の推奨は簡単である。そうでない場合は、崩壊の可能性を除去するために何らかの前処理が必要である。崩壊性地盤の層が深い場合や、地表よりかなり厚い場合は杭基礎が用いられる。しかし、崩壊性地盤で使用された杭が負の周面摩擦効果によって、浸水直後に支持力を失い、過大な沈下が発生した事例をいくつか報告されている。さらに、崩壊性地盤の存在は建物の耐用年数の間に杭の性能に悪影響を及ぼす可能性がある。崩壊性地盤における設計上の解決策には、4 つの基本的なアプローチがある（Popescu, 1992）。

- 差動沈下の影響を最小化するために、非常に剛性の高いラフト基礎と剛性の高い上部構造を使用する（例：図 8.4.32）。これは高価になりがちであり、万能ではない。
- 損傷を受けることなく地盤の動きに対応できるよう、基礎と上部構造の十分な柔軟性を確保する。この方法は、小規模で低コストの建物に適用しやすい。あるいは、分割された剛性の高い建物をフレキシブルに連結することもできる。
- 杭を使用することで、崩壊性レイヤーをバイパスする。
- 利用可能な様々な改良技術のうちの 1 つ以上によって、地盤の状態を制御または変更する。

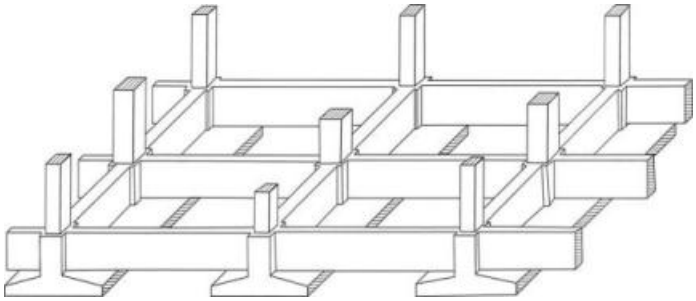


図 8.4.32　崩れやすい地盤に対する連続フーチングの設計（Zeevaert, 1972; Van Nostrand Reinhold Co. より転載）

より安価な基礎とする対策としては、崩壊性地盤の上にジオグリッドで砂を補強することで沈下と支持力特性を改善することができるという報告がある。中国での豊富な経験から、多くの対策が成功した。以下はその例である。

- 階段状の斜面
- 土留め構造物（擁壁、地下排水溝、土留め杭など）。

これらの方法を用いてほとんどの浅い地すべりや中程度の深さの地すべりを処理することができる。例えば、擁壁と排水溝を組み合わせた構造を用いる対策方法である。しかし、段丘地すべりは処理が難しく、地下水の圧力を緩和するために水平排水孔が必要になることが多い。こうした圧力のために、わずかな斜面の変位によって引き起こされる黄土の液状化が、斜面全体の安定性を脅かすことがある。

8.5 侵食性土壌

8.5.1 一般

侵食性土壌は自然の風化や侵食作用によって容易に変形や移動が起きる地質材料で構成される地盤を指す。これらの地盤は、風、水、氷、重力などの作用によって土壌や岩石が削られたり運ばれたりするため、安定性に問題が生じやすい。侵食性地盤は主に農業、建設、環境保護など多くの分野で重要な問題となっている。侵食性地盤の主な特徴は以下の通りである。

- 脆弱性　：侵食性地盤は外力に対して非常に脆弱であり、容易に侵食される
- 高い透水性　：水が地盤内部に容易に浸透するため、洗い流されやすい
- 低い粘着性　：土壌粒子間の結びつきが弱く、構造が不安定
- 高い風化率　：風化作用が進行しやすく、土壌や岩石の分解が早い

侵食しやすい土は砂質土、砂質シルトで粒子間の固結力が弱いものである。分散性土、崩壊性土は特に侵食しやすい土であり、含まれる粘土鉱物や凝集力の大きさなどで塩類土壌、炭酸塩土壌、硫酸塩土壌も侵食されやすい土壌となる。可溶性地盤も水に溶ける地盤であるが、地質年代的に時間を要するので、侵食性土壌とは異なる。

図 8.5.1 は侵食性地盤のガリ侵食の状況である。



出典: EUR 25402 EN-Soil Atlas of Latin American and the Caribbean, Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo et al., 2015

図 8.5.1 ガリ侵食 [Gardi, 2015]

8.5.1.1 パイピングと侵食

パイピングとは粘土が線状構造に沿って侵食されることであり、塩分を多く含む地下水で特に問題となる。パイピングは、次の条件が満たされた場合に発生する。

- 亀裂内の水圧が粘土内の全圧力および粘土のせん断抵抗よりも高い。
- 粘土の透水係数が低いため、粘土への水の流れが亀裂内の水圧に対抗しなくなる。

パイピングはフィルター層が完全に飽和する前にのみ発生する。侵食は、水の動きによる粘土粒子への抗力が、粒子と粘土構造の間の摩擦力と引力の合計よりも大きい場合に発生する別のプロセスである。侵食はパイピングの結果として発生する可能性があるが、長期的には水を含む亀裂とベントナイトの境界でも発生する。侵食は３つのパターンで発生する。

- 表面侵食は土壌の表面を流れる水が表面から物質を運び去る。
- パイピング（内部侵食）には高い水圧勾配が必要であり、土壌の孔隙系に沿って物質が除去されることによって発生する。
- 接触侵食はフィルター層と土壌の接触部など、粗い物質と細かい物質の間の領域で発生する。

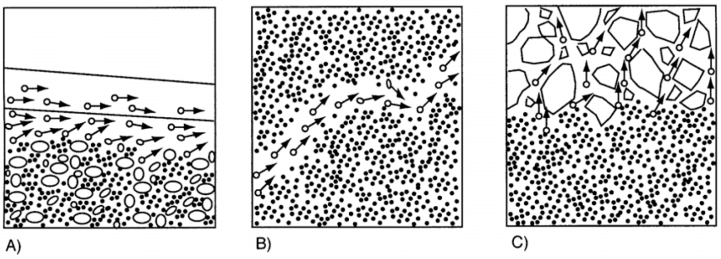


Figure 11: Types of backfill erosion. A). Surface erosion. B). Piping. C). Contact erosion. From Keto (2003).

出典: The Effects of High Salinity Groundwater on the Performance of Clay Barriers, David Savage, 2005

図 8.5.2 侵食のタイプ［Savage, 2005］

8.5.2 侵食性土壌の分布地域

侵食性土壌は色々な特殊土を包含しており、世界中に広域に分布している。図 8.5.3、図 8.5.4 には世界の土壌侵食の分布地域を、図 8.5.5 には降雨による土壌侵食予測図をそれぞれ示す。

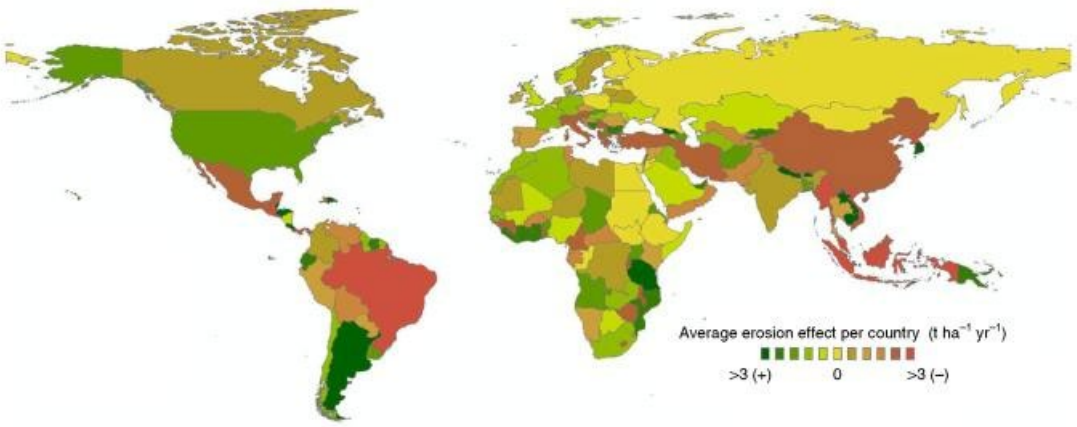
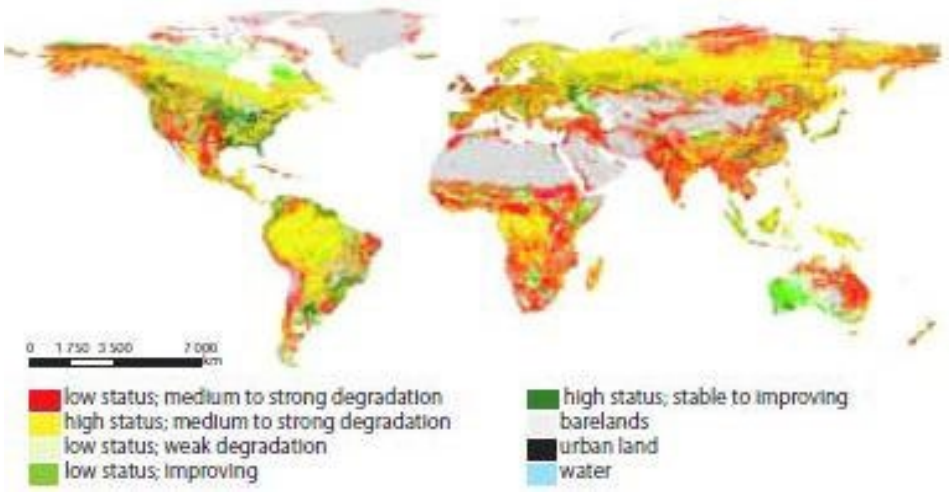


Fig. 3 | A global map of countries' soil erosion performance. The map is based on soil erosion discontinuities between each country and all of its neighbours (unweighted). Darker green indicates that a country has a more positive impact on the global rate of soil erosion than its neighbours (that is, it has a dampening effect), and darker red indicates that a country has a more negative impact on the global rate of soil erosion (that is, it has higher erosion rates). For all countries that perform more poorly than their neighbours, the map shows how much soil erosion they could mitigate (per hectare and year) just by catching up to their neighbours. Even the better performing countries could probably further improve their impact, so this map probably presents a lower bound for countries' erosion mitigation potential—especially in regions where soil erosion is high. For reference, the global average soil erosion rate is 2.4 t ha^{-1} yr^{-1}, and we estimate the average country discontinuity at 1.4 t ha^{-1} yr^{-1}.

出典: Countries and the global rate of soil erosion, David Wuepper, Pasquale Borrelli, Robert Finger（2020）

図 8.5.3 土壌侵食の分布地域 その1



出典: Biochemical soil treatment for erosion control against Desertification, I. Chang, J. Im, H.D. Shin, G.C. Cho（2015）

図 8.5.4 土壌侵食の分布地域 その2

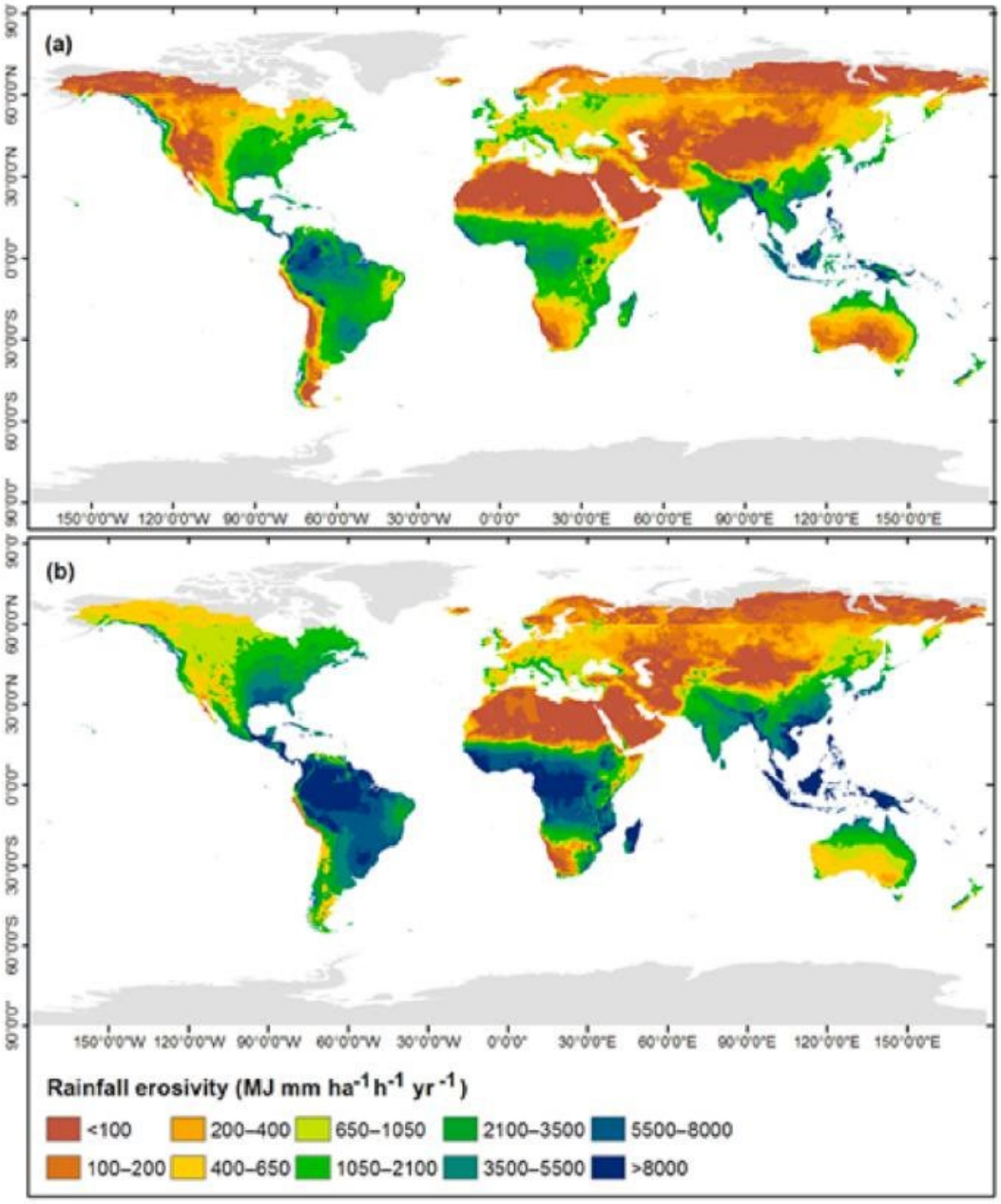


Fig. 2. Spatial distribution of mean annual global rainfall erosivity (2001–2020) based on (a) Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM-IMERG)-only and (b) GPM-IMERG merged with Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) station data. Erosivity classes correspond to quantiles of the GPM-IMERG merged with GloREDa.

出典: Biochemical soil treatment for erosion control against Desertification, I. Chang, J. Im, H.D. Shin, G.C. Cho（2015）

図 8.5.5 降雨による土壌侵食予測

統合マルチ衛星全球降水量測定データ （GPM-IMERG）のみ、 (b) 全球降水量侵食率データベース （GloREDa） 観測所データと統合したGPM-IMERGに基づく平均年間全球降水量侵食率 （2001～2020 年） の空間分布。

8.5.3 侵食性土壌の判定方法

土壌侵食を簡易に評価する方法として、Roslan と Mazidah（2001）によって、土壌サンプルの砂、シルト、粘土の割合を使用して土壌侵食の程度を分類する ROM スケールによる方法が提案されている。Hudson（1979）の土壌侵食性（K 係数）は粒度分布を使用して分類する。ROM 指標による土壌侵食度の分類を**表 8.5.1** に示す。

$$EI_{ROM} = \frac{\%sand + \%silt}{2\ (\%clay)}$$

表 8.5.1 ROM 指標を用いた土壌侵食度の分類

ROM-scale	土壌侵食度の分類
<1.5	低い
1.5~4.0	中程度
4.0~8.0	高い
8.0~12.0	非常に高い
>12	極限

出典: Erosion risk index: Correlation of ROM-scale and Mackintosh Probe at Sungai Langat Tributary, Nazreen Farina Ahmad Sabri1 et al.（2022）

8.5.4 侵食性土壌の工学的問題

侵食性土壌は斜面の侵食崩壊、盛土斜面の侵食、斜面に植生対策した崩壊、河川護岸の侵食、海岸の侵食による土地の損出、など侵食に係る様々な問題が発生している。特に、家屋周辺、道路などでは深刻な問題となる。



出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 8.5.6 侵食性土壌による盛土の侵食



出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 8.5.7 侵食性土壌の侵食

8.5.5 侵食に対する対策方法

法面の侵食対策は、植生工、被覆工、排水工、土質改良があり、**表 8.5.2** のようにまとめられる。

表 8.5.2 法面対策工法

対策方法		特徴	長短
植生工（Vegetation Method）	種子吹付工（Hydroseeding）	法面に種子・肥料・接着剤を混ぜたスラリーを吹き付ける	長所：低コストで広範囲に適用可能 短所：急面では根付きにくい。
	張芝工（Turfing）	芝生や植生マットを法面に敷設	長所：即時の保護効果があり、景観にも優れる 短所：設置費用が高い
	植生マット・植生シート	植生マット：繊維マットに種子を織り込み、施工後に発芽 植生シート：不織布などで固定し、土壌流出を抑制	長所：法面の保護効果が高い 短所：乾燥地帯では発芽しにくい
被覆工（Surface Protection）	モルタル・コンクリート吹付工	法面にモルタルやコンクリートを吹き付けて固化	長所：耐久性が高く、急斜面でも適用可能 短所：透水性が低く、排水対策が必要
	鋼製・樹脂製ネット工	鋼製または樹脂製のネットを張り、表層崩壊を防ぐ	長所：柔軟性があり、植生との併用が可能 短所：施工コストがやや高い
	吹付枠工（植生との併用）	コンクリートの格子状枠を設置し、内部に土壌や植生を施す	長所：強度と緑化の両立が可能 短所：施工に時間がかかる
排水工（Drainage Control）	明渠排水工（Surface Drainage）	法面上部や中間に排水溝を設置し、雨水を速やかに排除	長所：水の集中を防ぎ、侵食を軽減 短所：定期的な清掃が必要
	暗渠排水工（Subsurface Drainage）	法面内部に排水パイプを埋設し、地下水を排除	長所：内部の水圧を低下させ、法面崩壊を防ぐ 短所：施工コストが高め
	浸透防止シート	法面表面に透水性の低いシートを設置し、雨水の浸透を抑える	長所：水による軟弱化を防ぐ 短所：強風や経年劣化で剥がれるリスクあり
土質改良（Soil Improvement）	ライム・セメント安定処理	法面の土にライムやセメントを混合し、強度を向上させる	長所：長期間の安定性が期待できる 短所：施工時に土壌 pH の変化が起こる
	繊維補強土	繊維やジオグリッドを混合して土壌の強度を向上	長所：補強効果が高く、変形を防ぐ 短所：コストが高い

出典: JICA 調査団

8.5.5.1 バイオポリマー

バイオポリマーは生物（細菌、微生物など）によって生成される天然ポリマーであり、医療、食品、化粧品工学の分野で広く使用されている。親水性バイオポリマーは、高い吸水性により土壌からの水分損失を防ぐため、土壌安定化に応用できる可能性がある。

土壌に少量（0.5%）の多糖類型バイオポリマー（ベータグルカンなど）を含ませると、土壌の強度が大幅に向上することが報告されている。

バイオポリマーは土壌の強度と耐久性（つまり安定性）を効果的に改善できる。アニオン親水性バイオポリマーは水分の蒸発を遅らせ、未処理の土壌と比較して土壌水分状態を高く保つ。侵食防止を目的として、環境に優しいバイオポリマー処理は未処理の状態と比較して土壌侵食抵抗（2%未満）を改善するのに非常に効果的である。バイオポリマー処理は砂漠化防止および侵食された土地の回復（例：植生回復）に効果的な代替手段である。

生体高分子は生物によって生成される高分子であり、その有益な特性から、様々な分野（医療、食品、化粧品、医薬品など）で使用されている。最近、生体高分子は土壌侵食の抑制、骨材の安定化、掘削の強化に使用されている。

土壌中の有機化合物は生物繊維による強化および間隙流体の電荷の変化により、粒子間の結合力と凝集力および土壌の弾性係数を増大させる。土壌の挙動は一連の微視的プロセス（すなわち、（1）微生物の接種および付着、（2）細菌の増殖およびバイオマスの蓄積、（3）土壌鉱物表面でのバイオフィルムの形成、（4）バイオポリマーや排泄物などの副産物の合成、および（5）土壌粒子とバイオ製品の相互作用）によって現れる。

土壌微生物の成長、増殖、蓄積、バイオポリマー合成プロセスは不規則（時間、量、質）であり、環境条件（温度、水分含有量、栄養素、ガス濃度、細孔サイズなど）に敏感である。したがって、バイオポリマーを直接適用することは環境条件や時間に関係なく、一貫した品質管理と土壌の信頼性の確保のための代替アプローチになる可能性がある。

土木建設の分野ではエキソ多糖類（ウェランガムやカードランなど）が吸水性や擬似塑性特性に応じて、コンクリートやドライミックスモルタルの保水剤や高性能減水剤として使用されている。

表 8.5.3 に示すように、バイオリマーの研究は様々な研究者が取り組んでおり、その効果が確認されている。

表 8.5.3 バイオポリマーの研究事例

研究者	年	研究内容、論文名
Jang, C, Yang, B, Hong,W.-T., Ahn, J.; Jung, J.	2024	寒天ガムの濃度が高いほど土壌の液状化抵抗強度が増加する Soil improvement using agar gum polymer for seismic liquefaction mitigation
Soldo, A., Miletic, M., Auad, M.L.	2020	キサンタンガム、ベータグルカン、グアーガム、キトサン、アルギン酸バイオポリマーがシルト質砂土の強度に与える影響 Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties
Hataf, N., Ghadir, P., Ranjbar, N.	2018	湿潤条件下ではキトサンが土壌粒子間の粒子間結合を改善できる Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer
Chang, I., Im, J., Prasidhi, A.K., Cho, G.-C.	2015	ジェランガムバイオポリマーが土壌の浸透性に与える影響 Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening
Yang, Y.-L., Zhang, T., Liu, S.-Y.	2012	リグニン添加がシルト質土壌の収縮性能に及ぼす影響を調査し、リグニン処理シルトの収縮特性はリグニンのセメント化とマトリックス吸引の複合機能によって影響を受ける Utilization of biomass-based by-product lignin to suppress moisture loss-induced shrinkage oDFSlty soil.
Karol (1) Mitchell & Santamarina (2)	2003 2005	天然細菌を直接利用して土壌を強化し、地震による液状化を緩和し、汚染された場所を浄化する (1) Chemical grouting and soil stabilization (2) Biological considerations in geotechnical engineering
Taylor and Jaffé (1) Mitchell, Martinez & DeJong (2) Kwon & Ajo-Franklin Noh et al. (3) Jiang et al. (4) Jiang and Soga (5)	1991 2009 2013 2016 2016 2016	細菌の活動は不溶性のバイオマテリアルを生成することで、粒子間の結合、剛性、強度、浸透性などの土壌の力学的特性と水文学的特性を変えることができる (1) nhanced in-situ biodegradation and aquifer permeability reduction (2) Biological considerations in geotechnical engineering (3) High-frequency seismic response during permeability reduction due to biopolymer clogging in unconsolidated porous media (4) The applicability of microbially induced calcite precipitation（MICP）for internal erosion control in gravel-sand mixtures. (5) Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-claymixtures.
Baveye et al. (1) Bouwer et al. (2) Dunsmore et al. (3)	1998 2000 2004	バイオフィルムは細菌細胞とゲル状の細胞外高分子物質（EPS）の混合物である。これらの柔らかいゲル状の EPS（またはバイオポリマー）は土壌の細孔を埋め、透水係数を低下させることでバイオクロッギングを引き起こす (1) Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. (2) Biofilms in porous media (3) Novel approach to investigate biofilm accumulation and bacterial transport in porous matrices.
Ivanov & Chu (1) Nugent et al. (2) Chang & Cho (3) Chang et al. (4), (5)	2008 2010 2012 2015, 2016	バイオポリマーによるバイオクロッギングの潜在的な工学的利用 (1) Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ (2) The effects of exopolymers on the erosional resistance of cohesive sediments (3) Strengthening of Korean residual soil with β-1, 3/1, 6-glucan biopolymer (4) Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand (5) Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes

出典: JICA 調査団

8.6 破砕性土

8.6.1 特徴

破砕性土は土を構成する土粒子が脆く、外力が作用すると、粒子破砕が生じ、沈下などの変形が生じる土である。破砕性材料と呼ばれる材料にはしらす、軽石やスコリアなどの火山性堆積物、まさ土などの風化残積土、石灰質砂や珊瑚礫混じり土などの海洋堆積物などがあげられる。いずれの材料も特異な粒子形状、粒子表面の脆さ、粒子自体の脆弱さなどの特徴を持ち合わせているために破砕を受けやすい。一方、フィルダムなど大型土構造物に使用される材料は比較的堅固な材料であっても、載荷圧力が高いため粒子破砕を生じることがある。

地盤材料は外力の大きさにもよるが、粒子破砕を起こす材料であるともいえる。そのため、破砕性をあらわす指標を設定し，その指標を遭遇する外力条件と比較することが破砕性を工学的な問題に取り入れる上で重要となる.

8.6.1.1 石灰質砂

石灰質砂は、主に熱帯および亜熱帯地域の沿岸地域および大陸棚（アラビア湾、メキシコ湾、オーストラリア沖の北西棚など）に分布する。棚の温暖な環境により、生物起源および生化学的プロセスが起こり、図 8.6.1 に示すように、性質や形状が異なる様々な粒子タイプを持つ海洋生物の骨格残骸が主となる石灰質砂堆積物が生成される。

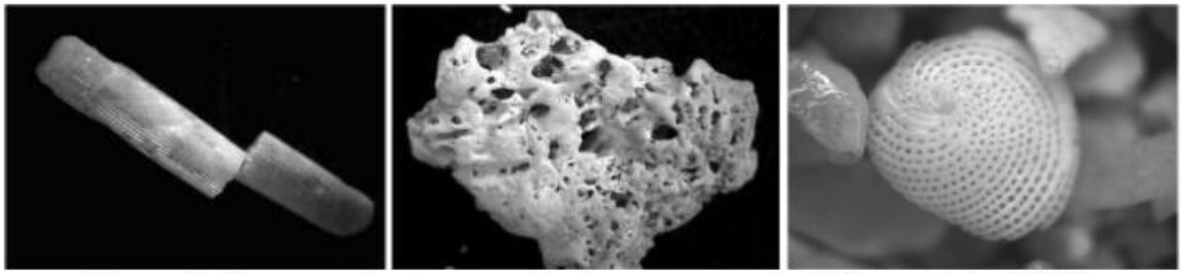


Figure 2. Some grain shapes of calcareous sands (Olgun et al., 2009)

出典: Sand compressibility aspects related to CPT, S.M. Ahmed, S.W. Agaiby, P.W. Mayne（2014）

図 8.6.1 石灰質砂の粒子形状

石灰質砂は、通常、方解石やアラゴナイト [CaCO3] などの炭酸カルシウム含有量が高く、セメント化および非セメント化の両方の条件で含有量が変化するドロマイト [CaMg（CO3）2] も含まれている。石灰質砂は起源、炭酸塩含有量、成分の形態、セメント化の程度に応じて、地盤工学的特性が大きく異なる。また、珪砂のような硬質砂とも地盤工学的特性は異なる。

石灰質の非粘着性粒子は比重が高い場合がある（方解石の場合は Gs=2.75、アラゴナイトの場合は 2.95、珪砂の場合は 2.65）が、石英砂に比べて空隙率がかなり高くなっており、粒間空隙が組み合わさることで圧縮性が大幅に高い。石灰質砂は、ドロマイト化プロセスにより時間の経過とともに体積が減少する可能性があり、ドロマイト化プロセスではより小さな[Mg]原子がより大きな[Ca]原子に置き換わってドロマイト[CaMg（CO3）2]が形成される。このプロセスにより多孔性が高まる。このような性質により、石灰質砂の力学的特性は以下のような特徴がある。

- 比較的低い応力で破砕されやすい
- 内部摩擦角は珪質土よりも大きいが、拘束圧の増加により摩擦角は小さくなる
- せん断中に圧縮するため、ピーク強度は通常の硬質砂の 2 倍のひずみが必要となる

8.6.1.2 軽石（Pumice）

軽石は爆発的な火山噴火の際に一般的に生成されるユニークな物質である。微視的構造はマグマの流れ（流紋岩質、安山岩質、粗面岩質）、堆積（落下流と火砕流密度流）、火山物質の種類（凝灰岩と火砕流）などの特定の地質学的特徴によって説明される。軽石が広範囲に移動するため、建設工事で軽石質堆積物に頻繁に遭遇する。軽石は軽量、押しつぶしやすい、角張っている、高い吸水能力を持つ気泡性である、表面粗度が高く摩擦角が大きい、圧縮強度が低い、などの特徴がある。

火山噴火から生成される堆積物は溶岩、降下堆積物、火砕流の 3 つの主なタイプに分類され、軽石は降下堆積物に含まれる。降下堆積物は噴火中に火山の火口から噴出する物質で、空中発射体として大気中を飛ぶ。これらの物質は総称してテフラと呼ばれ、灰 ash（＜2mm）、火山礫 pumices（2～64mm）および溶結凝灰岩 ignimbrites（＞64mm）に分類される。

軽石は、侵食、河川流、沖積過程を通じて河谷、氾濫原、丘陵地帯で他の堆積物と混合され、拡散する。淡いクリーム色から白、薄い灰色の物質で水に浮くことが多く、密度は約 0.95 kg/m^3 である。気泡間の固体物質の量が異なるため、密度は大きく変化する。空隙率は±90%となる。鉱物構造がないため、ガラスと呼ばれる。粒子のサイズは、大きなブロックから丸石サイズの破片、細かい砂まで様々となる。密度が低く、侵食され易く、簡単に粉砕される。

脚注：スコリアとパミス

両者とも多孔質な火山岩であるが以下のように違う。両者とも破砕性土になるが、強度から軽石の方が問題となる。

特徴	スコリア（Scoria）	軽石（Pumice）
色	黒、赤、茶色	白、灰色、淡黄色
密度	思い（比重>1.0）→水に沈む	軽い（比重<1.0）→ 水に浮く
泡の大きさ	大きめ（泡の壁が厚い）	小さめ（泡の壁が薄い）
組成	玄武岩～安山岩（SiO_2 45~55%）	流紋岩～デイサイト（SiO_2 65~75%）
形成温度	1000–1200℃（高温）	600–900℃（低温）
噴火タイプ	溶岩流・ストロンボリ式噴火	爆発的噴火・プリニー式噴火
モース硬度	5～6	4～6
圧縮強度	10～50 MPa	1～10 MPa
割れやすさ	比較的丈夫（気泡の壁が厚い）	非常に脆い（気泡の壁が薄い）
指で砕けるか？	砕けにくい	簡単に砕ける

出典: JICA 調査団

8.6.1.3 風化残積土

残積土（residual soil）は母岩の組織を失うほど極端に風化して土砂化したものという狭義の定義がある。また多くの国々では崩積土（colluvial soil）まで残積土に含める。

風化残積土が岩石の風化生成物であるため、その性質は母岩の地質的特性や風化程度に大きく依存し、軟岩に近いものから土となったもの、さらには、ラテライトのように再固結したものまで含む可能性がある。したがって、風化残積土の定義は世界的に厳密なものとはなっておらず、定義が統一化されていないのが現状である。ラテライトも風化残積土に分類されている。

風化には物理的、化学的、生物的要因に分けられ、一般に物理的作用が最初に起こり、化学、生物的作用は最後に現れる。花崗岩の風化残積土であるマサ土は、表 8.6.1 の順で風化が進行する。

風化残積土は破砕性土の性質を有すると言われているが、風化残積土はばらつきが大きいため破砕性土としての明確な分類がない。表 8.6.1 のマサ土の風化進行程度で 4 番目の指先で破砕できるような風化が進んだものは破砕性土としての挙動を示すと考えられるが、土層の中で風化のばらつきがあるため、指先で壊れるものがあるから単純に破砕性土と評価できなく、土層全体としては破砕性土の挙動を示すかどうかにより決まると考えられる。

表 8.6.1 マサ土の風化の進行

順番	種別	風化の状況
1	物理的	新鮮な花日岩。造岩鉱物の風化による変質はない。節理はほとんどなく、密着していて、容易に剥離しない。
2		造岩鉱物の中でも風化作用を受けやすい斜長石，黒雲母は多少風化し、褐色を帯びる。節理はときとして鉄さび色を呈するが、多くは密着していて、粘土鉱物などの二次鉱物を含まない。
3	中間的	長石は白濁し、又、黒雲母は赤褐色を帯びる。風化は特に節理に沿って進行し、暗褐色の二次的な粘土鉱物が節理面上に見られる。
4	化学的	長石は指先で簡単に粉砕でき、全体として褐色を呈する。ハンマーの打撃で容易に砂状に粉砕できるが、一部にはかなり硬い部分を残す。
5		全体が一様に風化し、まさ土となる。斜長石，黒雲母は完全に粘土化し、石英の細粒化が見られる。風化の進行によっては花崗岩の組織は完全に壊される。

出典: 風化残積土の特性と工学的問題，西田一彦（1991）に JICA 調査団加筆

8.6.2 破砕性土の分布地域

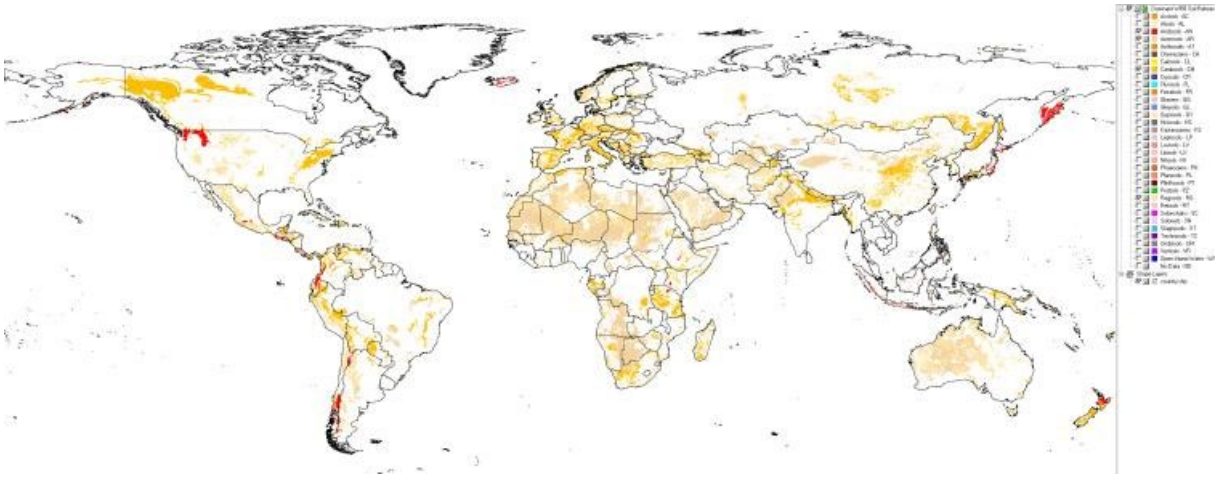
破砕性土は軽石（Pumice）を多く含む火山灰性土、珊瑚礁や貝殻を由来とする砂質土、炭酸塩土壌の石膏、風化花崗岩、チョーク、岩塩などあり、熱帯沿岸地域、火山活動が活発な地域、風化が激しい地域に分布している。破砕性地盤としてカルスト地形がある。カルスト地形は可溶性地盤であるが、破砕性地盤として扱われる場合もある。

破砕性土が分布する国や地域は表 8.6.2 の通りである。HWSD で破砕性土になる可能性が高い土壌は砂質・ローム質の Cambisols、砂質の Arenosols、未発達な Regosols、火山灰由来で軽石を多く含む Andosols である。団粒構造が発達している Luvisols も可能性がある。図 8.6.2 には HWSD による Cambisols、Arenosols、Regosols、Andosols の分布図を示すが、使用に当たっては留意する。

表 8.6.2 破砕性土の種類と分布国・地域

種類	分布国・地域
火山灰性土	日本、ニュージーランド、フィリピン、インドネシア、イタリア、チリ
珊瑚礁・貝殻を由来とする砂質土	沖縄、オーストラリア（グレートバリアリーフ）、インドネシア、フィジー、ハワイ諸島、モルディブ、グアム、ソロモン諸島
炭酸塩土壌（石膏、チョーク）	中国、米国、イラン、スペイン、カナダ、英国、フランス、ドイツ、インド、オーストラリア、メキシコ、タイ、イタリア、トルコ
酸性土壌（岩塩）	米国、中国、カナダ、ドイツ、ポーランド、英国、イタリア、オーストラリア、ロシア、ラオス
風化花崗岩	温暖湿潤な気候や乾燥した気候の地域 熱帯・亜熱帯地域：中国南部、インド南部、東南アジア、アフリカ西部 →長期間の化学風化によって花崗岩が砂化 乾燥地域：ナミブ砂漠、アメリカ南西部、オーストラリア内陸部 →物理風化により花崗岩が砂化

出典: JICA 調査団



出典：HWSD Ver.2.0

図 8.6.2 HWSD から推定される崩壊性土の分布図
（Cambisols、Arenosols（黄土）、Regosols、Andosols（火山灰性土含む））

8.6.3 破砕性土の判定方法

8.6.3.1 粒度試験

破砕性土の判定はせん断試験後の粒度変化で判定する。均等係数 Uc や曲率係数 Uc'の変化やせん断試験前後の粒度曲線の差を確認する。粒子破砕性の評価指標は、破砕前後の試料の粒度曲線を基に表 8.6.3、表 8.6.4 に示すような指標が提案されている。

表 8.6.3 粒子破砕状態の指標

研究者	粒子破砕の指標
Marsal（1965）	粒子破砕率 BM は各ふるいの破砕後の通過率－初期の通過率の正の値の合計
Lee と Farhoomand（1967）	破砕度$B_g = \frac{D_{15i}}{D_{15f}}$
Lade ら（1996）	破砕指標$B_{10} = 1 - \frac{D_{10f}}{D_{10i}}$
Hardin（1985）	Bt は初期と破砕後の粒度曲線の差 Bp=Bt/Bp
福本（1983）	粒子破砕量 S.I.=2（P2'-P2）-（P1'-Pi）（P1'+P1－2） P1 と P2 は破砕前の 1 回目と 2 回目の加積通過率 P1'と P2'は破砕後の加積通過率
磯崎ら（1991）	細粒分増加量=ΔFc
新城（1997）	破砕指数 CB
三浦ら（1977）	比表面積の増加量△S

出典: JICA 調査団

表 8.6.4 破砕性の評価

Marsal（1965）	Lee ら（1967）	Hardin（1985）	破砕性の評価	特徴
破砕度 Br（%）	破砕度 Bg	破砕指数 B		
<2	≒1.0	<0.1	低い	ほとんど粒径変化無し
2~10	1.1~1.5	0.1~0.3	中程度	一部の粒子が破砕する
10~20	1.5~2.0	0.3~0.6	高い	多くの粒子が破砕される
>20	>2.0	>0.6	非常に高い	大量の粒子が細粒化

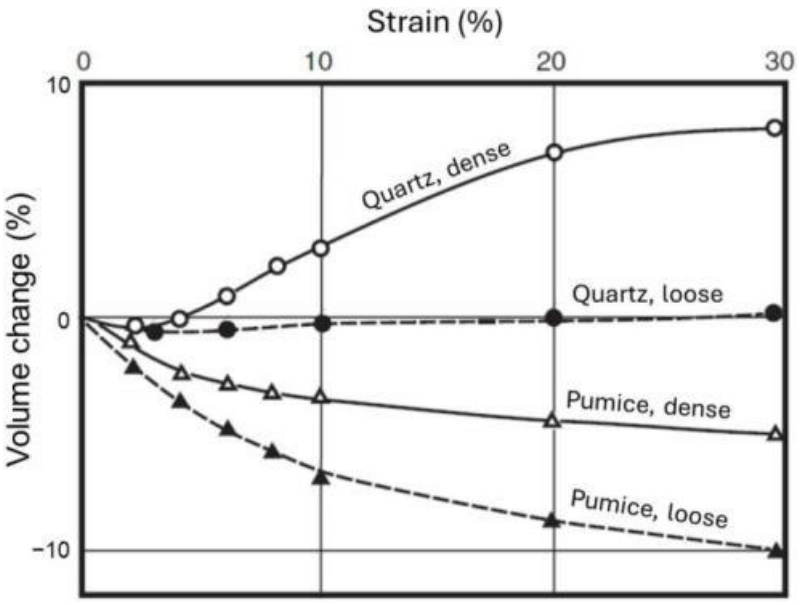
出典: JICA 調査団

8.6.3.2 力学試験

(1) せん断試験

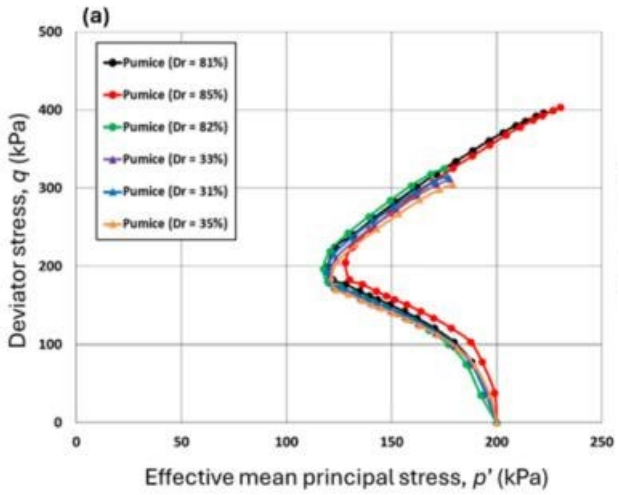
破砕性土の力学試験は、一般的な土の強度試験であるの直接せん断試験、三軸試験等がある。破砕性土のせん断特性の特徴としては、排水条件のせん断試験では相対密度に関係なく、せん断中に圧縮側の体積変化（正のダイレイタンシー）を示すのが特徴となる。一般の砂では緩い状態ではせん断中に圧縮側の体積変化が生じるが、密になるとせん断開始時には少し圧縮側になるものの、直ぐ膨張側の体積変化を起こす。破砕性土は一般的な砂の緩い相対密度のせん断特性を示す（図 8.6.3）。また、粒子が角張っているため、見かけの粘着力が大きい。また、相対密度が低いときでも通常の砂よりも内部摩擦角が大きくなる。軽石では図 8.6.4 に示すように相対密度に関係なく一定のせん断強度になることもある。これは粒子破砕の影響とインターロッキングの影響を受けるためである。

軽石の動的せん断強度は静的せん断試験で相対密度に関係なく、あたかも緩い砂のようなせん断特性を有するため、一般の砂よりも強度が小さくなる。軽石砂が飽和状態にあると液状化を起こしやすい可能性があるが、実際には軽石砂は液状化に対して高いせん断抵抗を示すことがある。これは粒子破砕の程度が増大するほど動的せん断強度が大きくなるためと考えられている。すなわち、過去にどのくらい粒子破砕が生じるようなせん断履歴を受けているかで動的強度が変化する。



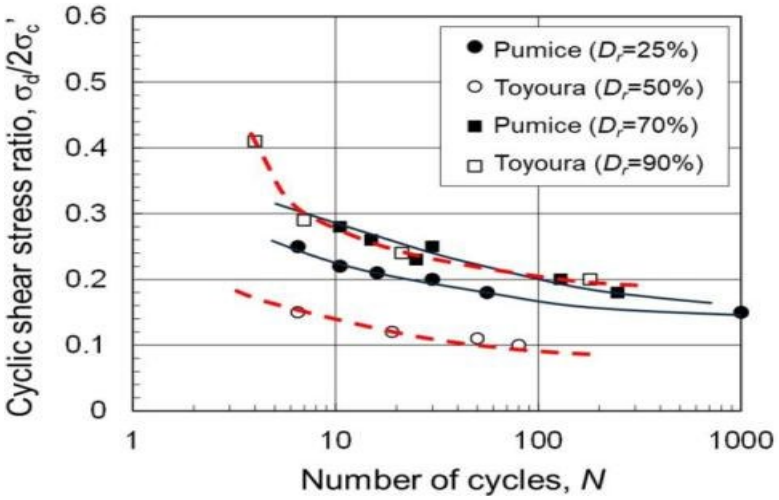
出典: Understanding the Geotechnical Behaviour of Pumiceous Soil A Review, Balasubramanian Elankumaran, Kim L. de Graaf, Rolando P. Orense（2024）

図 8.6.3 軽石と石英砂の相対密度が粗と密のときのせん断中の体積変化



出典: Understanding the Geotechnical Behaviour of Pumiceous Soil A Review, Balasubramanian Elankumaran, Kim L. de Graaf, Rolando P. Orense（2024）

図 8.6.4 軽石の相対密度が粗（Dr=31～35%）と密（Dr=81～85%）のときの三軸圧縮試験結果

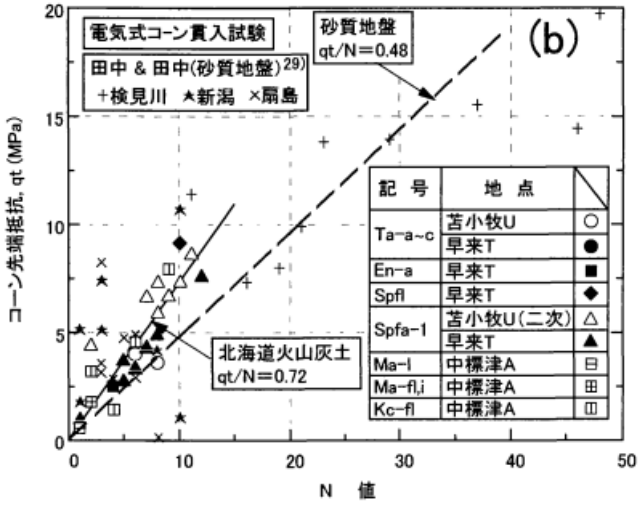


出典: Understanding the Geotechnical Behaviour of Pumiceous Soil A Review, Balasubramanian Elankumaran, Kim L. de Graaf, Rolando P. Orense（2024）

図 8.6.5 相対密度が異なる軽石（黒）と豊浦砂（赤）の繰り返しせん断抵抗曲線

(2) 原位置試験

原位置試験では標準貫入試験（SPT）よりも電気式コーン貫入試験（CPT）の方が工学的な利用では役に立つ可能性がある。破砕性土の試験としては、SPT は土被り圧の影響を受けて強度を高く推定する可能性がある。軽石を多く含む火山灰性土ではコーン貫入試験による深度方向の抵抗荷重が伸びないことも確認されており、破砕性土の力学的特性を正しく測定している可能性がある。八木らの研究では、CPT の qt と SPT の N 値について、通常の砂が qt/N=0.48 に対して、破砕性の火山灰では qt/N=0.72 と異なるため、N 値では破砕性土の強度を正しく推定できないとしている。これは SPT では打撃時に破砕により沈下量が大きくなるためと説明している。



出典: 破砕性火山灰地盤の力学特性の評価, 八木一善, 三浦清一（2004）

図 8.6.6 N 値と qt の関係

8.6.4 破砕性土の工学的問題点

表 8.6.5 に破砕性土の工学的問題点を示す。

表 8.6.5 破砕性土の工学的問題点

破砕性土の種類	工学的問題点
軽石堆積物	軽石堆積物の層は深度が深くなるとN値が大きくなり、支持層としての考えられる土層になるが、杭の載荷試験を行うと、土粒子の破砕に伴う沈下が大きく生じ、先端支持力が得られない場合がある。
石灰質砂	杭の周面摩擦は、珪砂の場合よりも大幅に低く、杭径の 2%程度の周期的変位が繰り返されると周面摩擦が大幅に減少する可能性がある。
破砕性火山性土	標準貫入試験でのサンプラーの侵入により粒子の破砕が誘発される。 これにより、破砕性地盤のN値が過小評価される。
火山性粗粒土	道路や鉄道の新設盛土材として利用する場合や、天然の火山性粗粒土地盤を掘削する場合、凍結融解により粒子破砕が生じ、サイクル数の増加にともない強度・変形特性が徐々に低下する。したがって、設計や維持管理の面で、施工後数年間にわたり十分注意する必要がある。

出典: JICA 調査団

8.6.5 破砕性土の対策方法

破砕性土の対策方法の知見は少ないが、基本的な対策として置換工法がある。置換工法においては、破砕性土を完全に除去できれば問題ないが、破砕性土が残されている場合は、砕石のような剛性の高い材料で置き換えると表層からの荷重伝搬力が大きくなること、および自重の増加により荷重の影響を受けやすくなり、逆効果となる可能性がある。特に振動に対してはクリープ的に破砕が進行するため、残された破砕性土に新たな荷重が伝搬することは避けるべきである。

効果的な対策として破砕性土の空隙へのグラウト注入が考えられ、杭の支持力の低下防止に役立つと考えられる。その他、砕石柱工法や深層混合処理のように破砕性地盤に対して新たな荷重を増加させない工法も有効な工法と考えられ、盛土の場合は、深層混合処理の杭に直接盛土するのではなく、黄土をセメント安定処理したクッション層を入れると良いとされている。

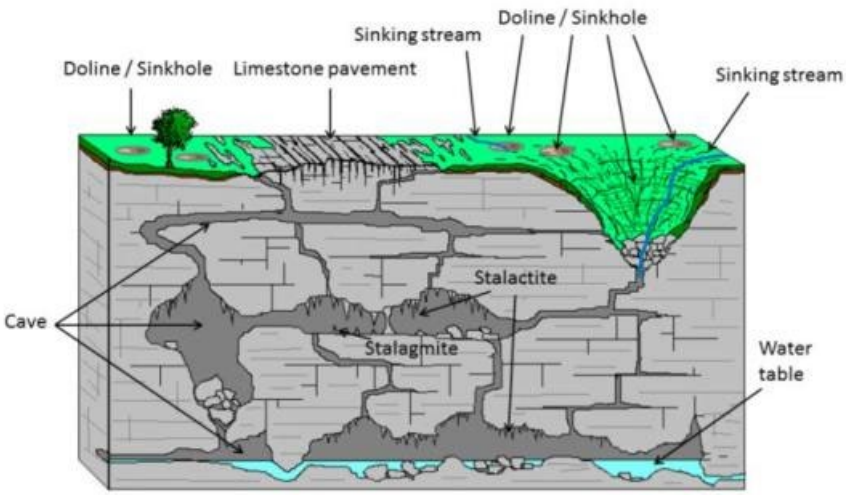
8.7 可溶性地盤

8.7.1 一般

天然の可溶性岩石には、存在量が少なく溶解度が高い順に、石灰岩（ドロマイトとチョークを含む）、石膏（無水石膏も含む）、塩（岩塩）がある。これらの可溶性岩石が雨水、川の水、地下水にさらされると、一般に地下の空洞が形成され、それに伴い崩壊や地盤沈下の危険がある。可溶性岩石の地形は水路が溶液によって広がった節理、亀裂、地層面、洞窟を通じて地下に流れるため、表面がほとんど乾燥しているのが一般的である。これにより、カルストと呼ばれる独特の地形（乾燥した谷、石灰岩の舗装など）が形成される。カルスト地形は、ゆっくりとした地盤沈下から壊滅的な崩壊や破壊的な陥没穴の発生まで、様々な地質災害をもたらす。図 8.7.1 にカルスト地形の概念図を示す。

溶解性岩石は地表から数十 m 以内（時にはさらに深いところ）にある場合、様々な地質災害を引き起こす。岩石の溶解は一般に建造物を直ぐ崩壊させるほど早くない。塩の場合は設計寿命を 50～100 年と考えると 100%溶けてしまう。石灰岩の溶解は塩に比べてはるかに遅く、その上に築かれた構造物に影響を与えるまでに何千年もかかる。

カルスト地形は地盤沈下の危険があるため、構造物の基礎を造るには非常に困難な地盤となる。土で満たされたカルスト地形は浸水、パイピング、侵食作用によって不安定になりやすく、数時間から数日のタイムスケールで陥没穴が発生することがある。しかし、開いた洞窟の上の岩盤の崩壊はまれである。



出典: https://lotusarise.com/karst-landforms-upsc/

図 8.7.1 カルスト地形の概念図

8.7.1.1 カルスト地形の分類

カルスト地形の発達規模は世界各地で大きく異なり、カルスト地形の地盤条件の大まかな分類は図 8.7.2 のようになる。カルストを評価するにあたっては、石灰岩の岩相とカルストの規模だけでなく、洞窟のサイズ、新しい陥没穴の頻度、岩盤の起伏も考慮する必要がある。

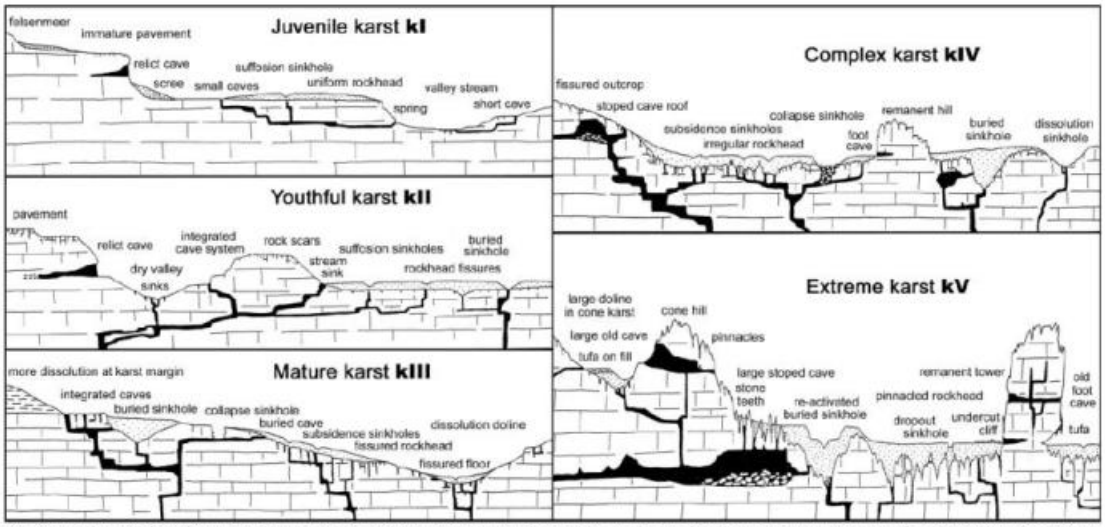


Fig. 9. Typical morphological features of karstic ground conditions within the five classes of the engineering classification of karst. These examples show horizontal bedding of the limestone; dipping bedding planes and inclined fractures add complexity to most of the features, and also create planar failures behind steep cliff faces. The dotted ornament represents any type of clastic soil or surface sediment.

出典: Engineering classification of karst ground conditions, A.C. Waltham, P.G. Fookes（2003）

図 8.7.2 カルスト地形の分類

8.7.1.2 陥没穴

陥没穴（シンクホール、sinkhole）という用語は地面が沈み、水がそこに沈むことを意味する。陥没穴は直径と深さが 1～100m の範囲で様々であり、図 8.7.3 に示す種類がある。チョークのような弱く柔らかい石灰岩に発達する陥没穴は、図 8.7.4 に示すようなパイプ状の溶解を引き起こす。これらは通常直径 10m まで、深さ 20m 程度あるが、最大で直径 50m、深さ 50m になることがある。

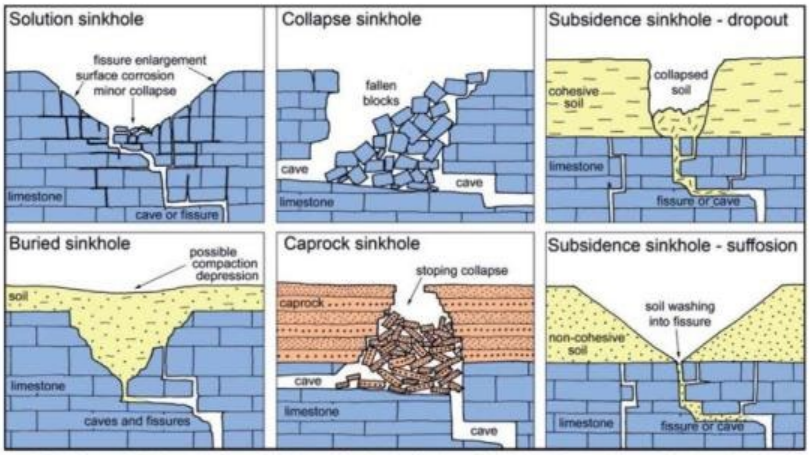
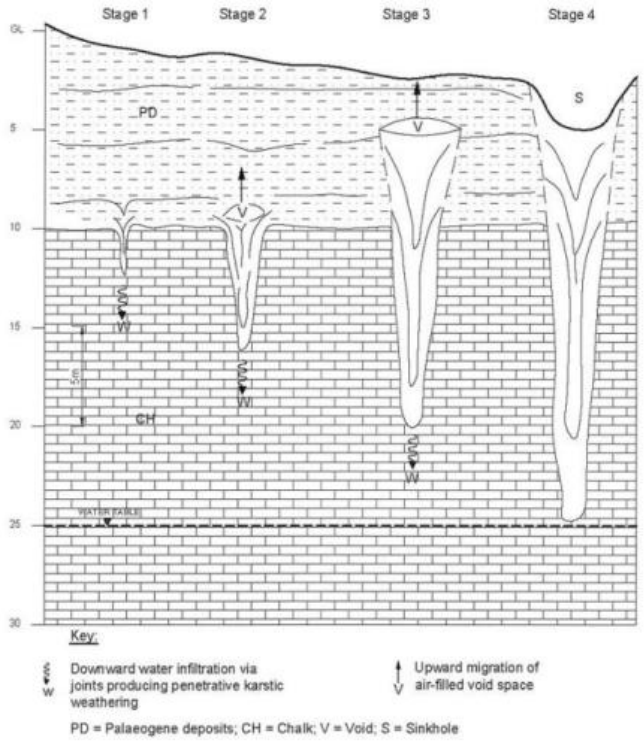


Fig. 1. Subsidence sinkholes and collapse sinkholes within the classification of these karst features. Most sinkholes are 2–50 m wide and deep, although larger examples do occur.

出典: Sinkhole hazard case histories in karst terrains, T. Waltham（2008）

図 8.7.3 陥没穴の種類



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland, Tim Chapman, Kelvin Higgins, Hilary Skinner, David Toll（2024）

図 8.7.4 パイプ状の陥没穴の発達

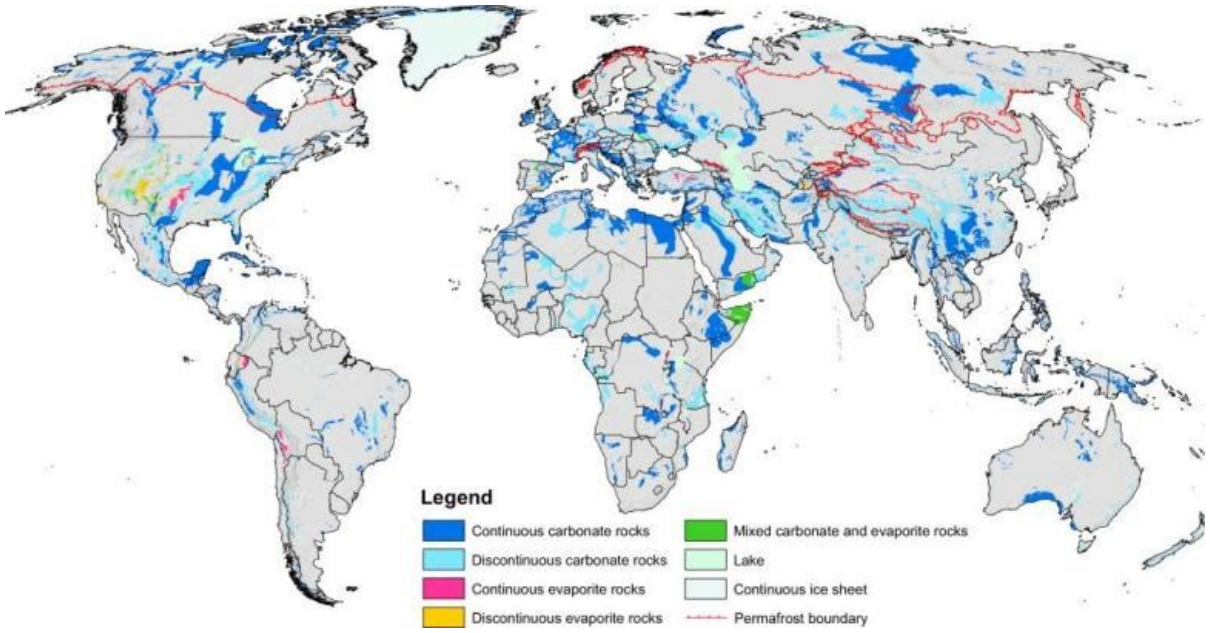
8.7.2 可溶性地盤の分布地域

石灰岩を主体とするカルスト地盤は表 8.7.1、図 8.7.5 に示す通り世界中に分布している。地形分類としては山岳が 40%、平野と台地ではそれぞれ 30%となっている。

表 8.7.1 地域毎の可溶性地盤の分布割合

Continent	Total carbonate rock areas (CC, DC and mixed)					
	Plains		Hills		Mountains	
	1,000 km^2	%	1,000 km^2	%	1,000 km^2	%
Africa	1,859	46.1	1,494	37.1	677	16.8
Asia	1,322	16.0	2,017	24.4	4,915	59.6
Australia & Oceania	272	55.3	79	16.0	141	28.6
Europe	787	36.9	730	34.2	617	28.9
North America	1,875	44.2	1,110	26.2	1,258	29.6
South America	71	9.4	168	22.1	520	68.5
World	6,186	31.1	5,598	28.1	8,128	40.8

出典: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, Nico Goldscheider, Zhao Chen, Augusto S. Auler et al.(2020)



出典: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, Nico Goldscheider, Zhao Chen, Augusto S. Auler et al.(2020)

図 8.7.5 可溶性なカルスト地形の世界的分布図

8.7.3 可溶性地盤の工学的問題

8.7.3.1 陥没穴による被害事例

図 8.7.6 はペンシルベニア州の沖積土に新たに陥没穴ができたため、尾根沿いの道路が崩壊した事例である。これは地下水の連続的な汲み上げにより発生した地盤災害の 1 つである。

図 8.7.7 は下水道からの水漏れによって陥没穴が発達し、右手前の家で基礎が失われるような損傷を受けている事例である。



典: Sinkhole hazard case histories in karst terrains, T. Waltham (2008)

図 8.7.6 道路の陥没



出典: Karst Management, hilip E. van Beynen（2011）

図 8.7.7 家屋の陥没穴による被害

8.7.3.2 地質構造の複雑さ

図 8.7.8 は 6 本のボーリング調査で推定した石灰岩の横断分布図である。左側 A は一般的なボーリングデータからの解釈であるが、尖塔状の岩盤の理解に基づいたより可能性の高い解釈では右側 B のようになり、精度を高めるためには多くのボーリングが必要となることが分かる。このような地形に杭基礎を適用する場合、地層を正確に判断することが重要となる。

図 8.7.9 はカルスト地形の発達に対する経験的解釈に基づいたチョーク岩盤の横方向および垂直方向の風化の影響を考慮して作成した地質断面図である。ボーリング A の LG 土層中にある M/W CH でもしボーリングを止めていたら、全く異なる地質断面になると考えられ、他のボーリングも A と同じ深さまで掘削した場合、地質断面が変わる可能性がある。

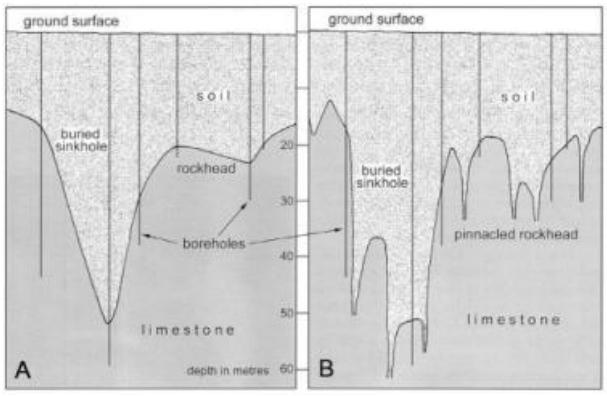


図 8.7.8 新しい高層ビルの敷地で調査した石灰岩の解釈（マレーシア国 クアラルンプール）

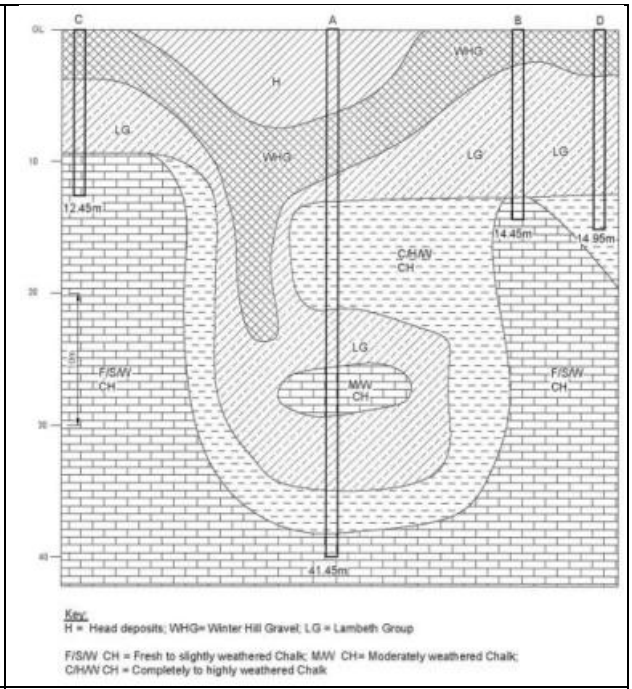
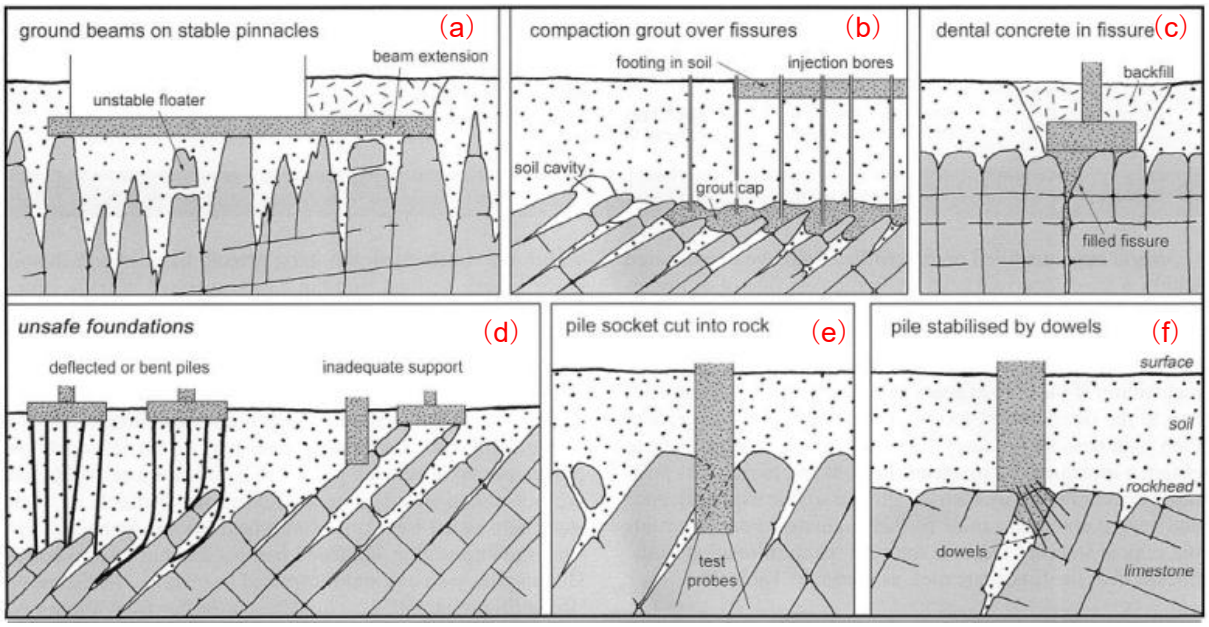


図 8.7.9 チョーク風化岩盤の横断図

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland, Tim Chapman, Kelvin Higgins, Hilary Skinner, David Toll（2024）

8.7.3.3 石灰岩基盤上の工学的問題

岩盤まで基礎を敷くことで地盤変動や陥没穴の発生といった大きな危険を排除できる。カルスト地形は表土内に埋もれているため、非常に変化に富んだカルスト地形を正しく評価するのは容易ではない。カルスト石灰岩の岩盤は（a）不均一で亀裂のある尖峰状の岩盤、（b）様々な深さに存在する開いた洞窟があり、基礎の設計で問題を引き起こす。図 8.7.10 には土で覆われた様々なカルスト地形の基礎の例を示す。図 8.7.10（a）のように、深く割れ目が入り込み、空洞化した尖塔構造のカルスト石灰岩のほとんどは強固な材料で、十分な幅があり、下にある岩盤から切り離されていないことが確認されている場合は尖塔に基礎を載せ、その間にある土で満たされた割れ目や埋没した陥没穴をまたぐことができる。図 8.7.10（b）のように、岩盤の隙間はグラウトで埋めてより安定した基礎を作ることができるが、空洞の形状によっては追加のグラウトが必要になる場合がある。図 8.7.10（c）のように、石灰岩の上まで掘削して基礎を作る場合は、隙間を捨てコンで埋めて対策できる。図 8.7.10（d）のように、傾斜した割れ目を有する石灰への打ち込み杭は、割れ目方向に杭が傾いて貫入する可能性がある。図 8.7.10（e）のように、浮き石のように安定していない場合は、タボ（Dowel）で接合することもできる。風化した領域内で止めた杭は、急傾斜の陥没穴の縁にある場合、杭の先端が破損する可能性があるため、強度が十分な支持力を提供できる深さまで延長する必要がある。陥没穴は、排水路の変更やパイプラインの漏水により土壌の動きが再活性化するたびに、表面沈下が発生することがある。石灰岩の上に行われるダムの基礎工事と貯水池の湛水は一連の問題を引き起こす。ほとんどの石灰岩は荷重に耐える強度があるが、漏水の問題は簡単に解決できない。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland, Tim Chapman, Kelvin Higgins, Hilary Skinner, David Toll（2024）

図 8.7.10 土で覆われた石灰岩カルストの基礎工事



出典: Karst Management, hilip E. van Beynen（2011）

図 8.7.11 図 8.7.10 の(a)のような割れ目状態

8.7.3.4 石膏岩盤上の工学的問題

石膏カルストは石灰岩上のカルストと似ているが、石膏の溶解の範囲と分布に気候的制約がない点が異なる。石膏は石灰岩よりも力学的に弱く、溶解が速いため、石灰岩で見られるような極端なカルスト地形とはならない。石膏上で最も広く見られる災害は新しい陥没穴の発生である。石膏は数十年という時間で溶解するため、構造物の設計寿命内に問題となる可能性がある。

8.7.3.5 岩塩上の工学的問題

岩塩は rock salt または halite と呼ばれ、乾燥環境に堆積した堆積層内に広く見られる蒸発岩物質である。塩は砂漠の塩原、半乾燥地帯の塩ドーム、その他の埋没岩層で存在する。

Salars、塩田（salt pans）、プラヤ（playas）、サブカ（sabkhas）は新しく堆積した蒸発岩塩の地域にある。通常は地下水下にあり溶解の影響は小さいものの、幅が数 m のカルスト空洞は浅い深さにあることから、小さな崩壊によって現れることがある。塩が多くある地域は季節的な浸水に見舞われることが多いため、そこに建設が行われることは少ないが、そこを横切る道路にとっては空洞が危険となる可能性がある。

8.7.3.6 サブカのカルスト地形

アラビア湾沿岸の土地ではサブカが問題となっている。沿岸サブカは、最大約 10km 幅の潮上平原で蒸発岩と炭酸塩岩から形成され、通常は風成砂で薄く覆われている。内陸盆地の大陸サブカは主に岩塩岩で構成されている。沿岸サブカの岩相は通常わずか数 m の厚さであるが、沈降盆地の縁に沿ってかなりの厚さに堆積することがある。その後隆起すると、炭酸塩岩と硫酸塩岩が侵食され、より一般的なカルスト地質災害が発生する。

サブカにおけるカルスト地形災害の主な原因は岩石化の不十分な層内の浅い深さで発生する石膏によるものである。これは毛細管帯内と浅い地下水面下の両方に堆積する。ほぼ純粋な石膏の層は通常 1m 以下の厚さとなる。石膏には無水石膏の団塊が含まれ、小さな空洞と高い一次透水性を持つ開いた構造となる。サブカの地下水は埋没帯水層から上方に漏れ出る塩水が大部分を占めており、これらは通常石膏を飽和させている。その結果、蒸発によって石膏の間隙に沈殿が生じ、金網組織を持つ無水石膏に容易に変化し、局所的に支持力が低下した地盤を形成する。新しい陥没穴はパイプラインの漏水、排水処理からの漏水、現場の排水などの建設工事により形成されることがある。

その他、新たに流入した不飽和水がサブカ砂の硫酸塩セメントまたは岩塩セメントを溶解し、局所的な圧縮と緩い材料の移動を可能にする場合に発生する。サブカ土壌とその下にある石膏層の溶解は主に浅い箇所で起こるため深い杭基礎を設置することで、問題を軽減することができるが、道路や小規模な構造では問題を引き起こす。図 8.7.12 はアラビア湾沿岸サブカの建設現場で発生した陥没穴の発生事例である。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland, Tim Chapman, Kelvin Higgins, Hilary Skinner, David Toll（2024）

図 8.7.12 アラビア湾沿岸サブカの建設現場内にできた小さな陥没穴（部分的に埋め戻されている）

8.7.4 可溶性地盤の対策方法

8.7.4.1 基礎構造物

建設前に小さな亀裂に土を埋め込んで転圧する。岩盤亀裂で土が奥まで入らない場合はグラウトを行う。それで対応できない場合は浅い基礎、剛性の高いマットや空洞を跨いだ基礎の構築、深い基礎（杭や橋脚）とする。土被りが薄い場合、岩盤の上に浅い基礎を置くか、岩盤の上に人工的に盛土するのが良い。重量があり沈下の影響を受けやすい建材物の場合、岩盤が深い位置にあると杭基礎が選択される。

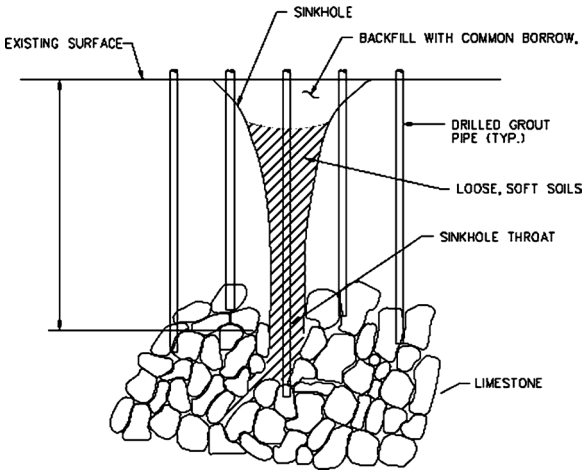
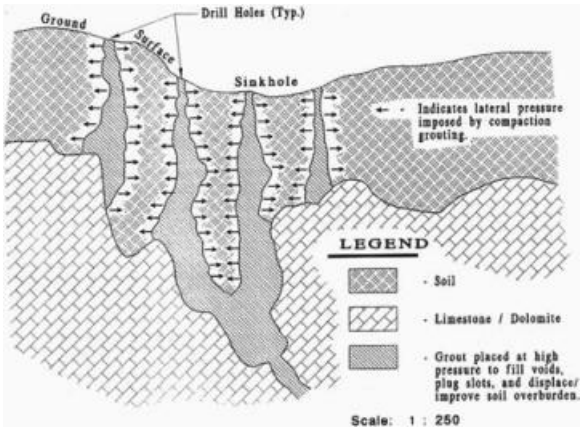
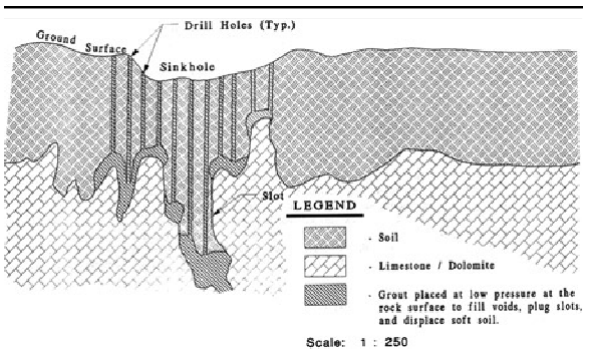
8.7.4.2 地盤改良

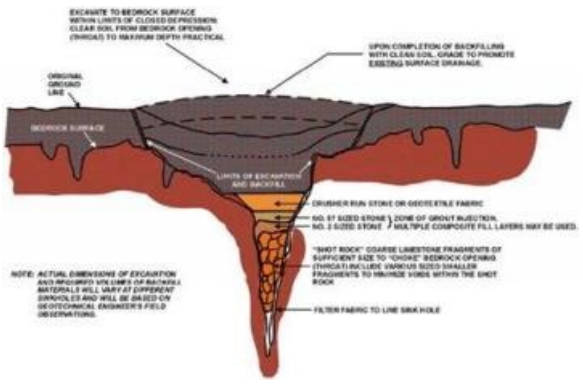
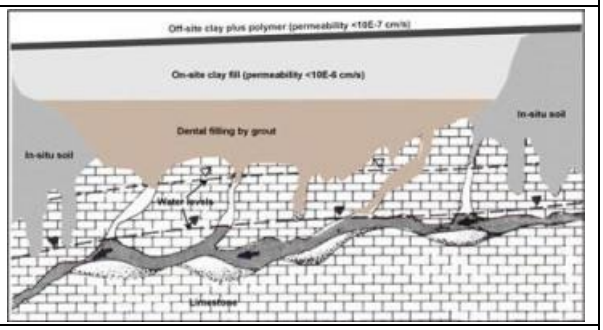
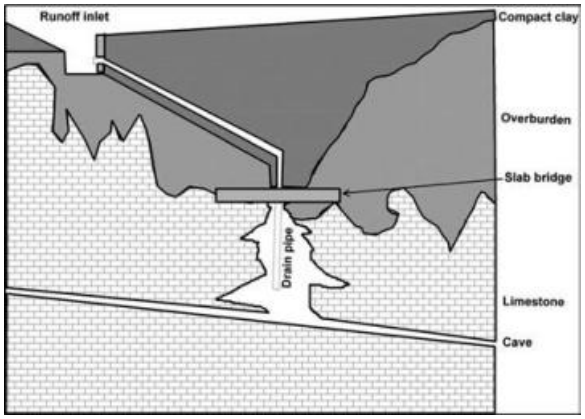
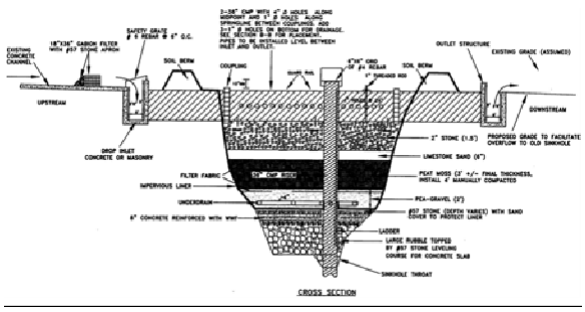
地盤改良においては、重錘落下工法を用いる方法がある。動的締固め中に発生する地盤変形のパターンから陥没穴の範囲や不安定領域を特定し、対策に利用できる。複数回の重錘落下で沈下が進行するような場合は深い位置まで空隙が残されていると考えられるため、集中的なグラウト充填で対策可能となる。岩盤が深く、懸念される領域が広範囲に及ぶ場合、大部分の空隙にグラウトを注入する。岩盤までの深度が浅く、地下水位がないような場合は、岩盤面まで土砂を取り除き、ジオグリッドもしくはジオテキスタイルを敷き、その上に良質材を盛土することにより構造物としての基礎とすることができる。

8.7.4.3 陥没穴の対策

表 8.7.2 に一般的に用いられる 7 つの対策方法を示す。これらの方法は、陥没穴の修復の基本原則であるが、設計で一般化されているものではないことに留意する。

表 8.7.2 陥没穴の対策方法

陥没穴の方法	対策概念図
喉が見える浅い陥没穴	
喉が分かっている深い陥没穴	
キャップグラウチング	

整地した埋め戻し	
グラウトによる充填	
ドレインパイプによる埋め戻し	
ろ過システム	

8.8 泥炭

8.8.1 一般

泥炭は湿地や沼地で形成される有機質土の一種である。泥炭は、植物の残骸や有機物が水に浸された状態で、酸素が制限された環境下で堆積・分解されることによって形成される。含水比が大きく、強度が小さく、間隙比が大きいため、盛土の沈下やすべり破壊を生じさせる原因となる。

泥炭は北極圏や亜寒帯地域にあるものが知られているが、熱帯や温帯の湿地にも分布している。熱帯地域の泥炭は形成が遅れていて、木根や木が風化しないまま残っていることがあり、掘削時に工事の支障となることがある。

8.8.1.1 泥炭の分類

有機質土は、有機物の含有量に基づいて分類される。有機物含有量が最も高い有機土壌の種類の 1 つが泥炭で、部分的にまたは完全に分解された植物の残骸で構成され、飽和状態で蓄積された有機物（鉱物の重量の 25%未満）である。スポンジ状のコンシステンシーがあり、独特の有機臭があり、色は茶色から黒色である。

泥炭の元素組成は植物組成と分解度によって異なる。泥炭は多孔性が高く、せん断強度が低く、圧縮性が高い材料として認識されており、水分含有量（200%以上）と有機物含有量が非常に高い（75%以上）ことに関係している。

泥炭の特性はその植物組成、繊維含有量、および植物残骸の分解度によって異なる。泥炭の分解度に基づいて分類する方法として、表 8.8.1 に示すフォンポストスケールがある。泥炭は 10 段階で分類され、H1 が最も分解度が低く、H10 が最も分解度が高い。フォンポストスケールを使用した泥炭の分解度は泥炭の構造の目視検査と圧縮試験の結果に基づいて決定される。また、ASTM では有機物含有量や繊維含有量により分類されている（表 8.8.2、表 8.8.3）。英国の規格 5930:198 で定められた分類をマレーシアの環境により明確に適合するようにした拡張マレーシア土壌分類システム（MSCS）は表 8.8.4 のようになっている。さらにマレーシアの土木工学の泥炭分類は更に細かく表 8.8.5 に示す通り規定されている。

表 8.8.1 フォンポストスケールに基づく泥炭土の分解度

泥炭の分類		分解度	繊維質	圧迫すると押し出される材料（指の間を通過）
繊維質泥炭 Fibric peat	H1	無し	簡単に見分けられる	透明で無色の水
	H2	意味をなさない	簡単に見分けられる	黄色がかった水
	H3	とても少し	まだ見分けられる	茶色の泥水
	H4	少し	見分けるのが容易でない	濃い茶色の泥水
ヘミック泥炭 Hemic peat	H5	中くらい	容認されるがほとんど無し	泥水と泥炭
	H6	中くらいの強い	不明瞭	泥炭の約 3 分の 1 が絞り出され、濃い茶色の水

泥炭の分類		分解度	繊維質	圧迫すると押し出される材料（指の間を通過）
サプリック泥炭 Sapric peat	H7	強い	かすかに認識できる	泥炭の約半分が絞り出され、非常に濃い茶色の水
	H8	非常に強い	極めて不明瞭	泥炭の約 3 分の 2 が絞り出され、また粘り気のある水も少し出る
	H9	ほとんど完全	ほとんど認識できない	ほぼすべての泥炭がペースト状に絞り出される
	H10	完全	識別できない	泥炭はすべて指の間を通過し、自由水は見えない

出典: JICA 調査団

表 8.8.2 ASTM による泥炭の分類（有機物含有量）

土質	記載	有機物含有量（%）
粘土、シルト、砂	わずかに有機質	2~20
有機質土		25~75
泥炭		>75

出典: Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats, Mohamad Tarmizi Mohamad Zulkifle, Tham Fatt Ng, John Kuna Raj, Roslan Hashim et al（2013）

表 8.8.3 ASTM による泥炭の分類（繊維含有量）

土質	繊維含有量（%）	Von Post scale
繊維質泥炭	>66	H4 or less
Hemic 泥炭	33~66	H5 or H6
Sapric 泥炭	<33	H7

出典: Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats, Mohamad Tarmizi Mohamad Zulkifle, Tham Fatt Ng, John Kuna Raj, Roslan Hashim et al（2013）

表 8.8.4 マレーシア国の有機質土と泥炭の分類方法

Table 2 Malaysian Soil Classification Systems (MSCS) for Organic Soils and Peat (Jarret, 1995)

Soil Group	**Organic Content**	**Group Symbol**	**Degree of Humidification**	**Subgroup name**	**Field Identification**
Peat	>75%	Pt	H1-H3	Fibric or Fibrous Peat	Dark brown to black in color. Material has low density so seems light. Majority of mass is organic so if fibrous the whole mass will be recognized plant remains. More likely to smell strongly if highly humidified
			H4-H6	Hemic or Moderately Decomposed Peat	
			H7-H10	Sapric or Amorphous Peat	

出典: GEOTECHNICAL CHALLENGES WITH MALAYSIAN PEAT, Adnan Zainorabidin, D.C Wijeyesekera（2007）

表 8.8.5 マレーシア国の土木工学用土壌分類システム

Table 4 Organic soils and peat section of the Malaysian Soil Classification System for Engineering Purposes (from BS5930: after Jarrett 1995; Huat 2004; Engineering Geology Working Group 2007)

Soil groups	Subgroup and laboratory identification						
	Description	Group symbol	Subgroup symbol	Liquid limit %	Degree of humification	Subgroup name	Field identification
Organic soils and peats							
Slightly organic soils (organic content 3–20 %)	Slightly organic silt	Mo	Mo			Slightly organic silt (subdivide like Co)	Usually very dark to black in color, small amount of organic matter may be visible. Often has distinctive organic smell
	Slightly organic clay	Fo	CLo	<35 %		Slightly organic clay of low plasticity	
			Clo	35–50		Slightly organic clay of intermediate plasticity	
		Co	Cho	50–70		Slightly organic clay of high plasticity	
			Cvo	70–90		Slightly organic clay of very high plasticity	
			CEo	>90		Slightly organic clay of extremely high plasticity	
Organic soils (organic content 20–75 %)	Organic soils	O				Subdivision of organic soil is difficult, as neither the plasticity tests nor the humification tests are reliable for them. As such, the best attempt is the probable outcome of subdivision leading to descriptions such as “fibrous organic soils” or “amorphous organic soils of intermediate plasticity”	
Peats (organic content more than 75 %)	Peat	Pt	Ptf		H1–H3	Fibric or fibrous peats	Dark brown to black in color. Material has low density so seems light. Majority of mass is organic, so if peat is fibrous, the whole mass will be recognizable plant remains. If highly humified, the peat will more likely to smell strongly
			Pth		H4–H6	Hemic or moderately decomposed peats	
			Pta		H7–H10 (von Post humification scale)	Sapric or amorphous peats	

1. When describing soils, the name of the soil group should always be given, supplemented if required by the group symbol, although for some additional applications (e.g., longitudinal applications), it may be convenient to use the group symbol alone

2. Where appropriate, gravel and sand may qualify as sandy gravel and gravelly sand

3. If laboratory methods have not been used for identification, the group symbol or subgroup symbol should be placed in parentheses, e.g., (GC)

4. When it is not possible or not required to distinguish between silt, M or clay, C, the designation “fine soil” or “fines,” F, may be used

5. If more than 50 % of coarse material is of gravel size, the term “gravelly” is used. The descriptive term “sandy” is used if more than 50 % of the coarse material is sand-sized

6. A material that passes below the A-line on the Casagrande plasticity chart, has a restricted plastic range in relation to its liquid limit, and has a low cohesion, is termed a “silt,” M. Slightly organic soils also usually plot below the A-line on the plasticity chart and are termed “slightly organic silts,” Mo

7. Materials that pass above the A-line on the plasticity chart, and are fully plastic in relation to their liquid limits, are classified as “clay,” C

出典: Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats, Mohamad Tarmizi Mohamad Zulkifle, Tham Fatt Ng, John Kuna Raj, Roslan Hashim et al（2013）

8.8.1.2 泥炭の形成

泥炭は枯れた植物から構成され、様々な腐植化プロセスで植物構造が形成される。図 8.8.1 には泥炭湿地の形成概念図を示している。枯れた植物から形成された泥炭湿地は浸水し、泥炭として蓄積する。泥炭水中の物質は腐植とフミン酸を多く含み、泥炭水の色は、図 8.8.1 の STAGE2 に示すように暗褐色から黒となる。これらの条件は、植生の種類の存在とともに泥炭湿地の形成に影響を与える。

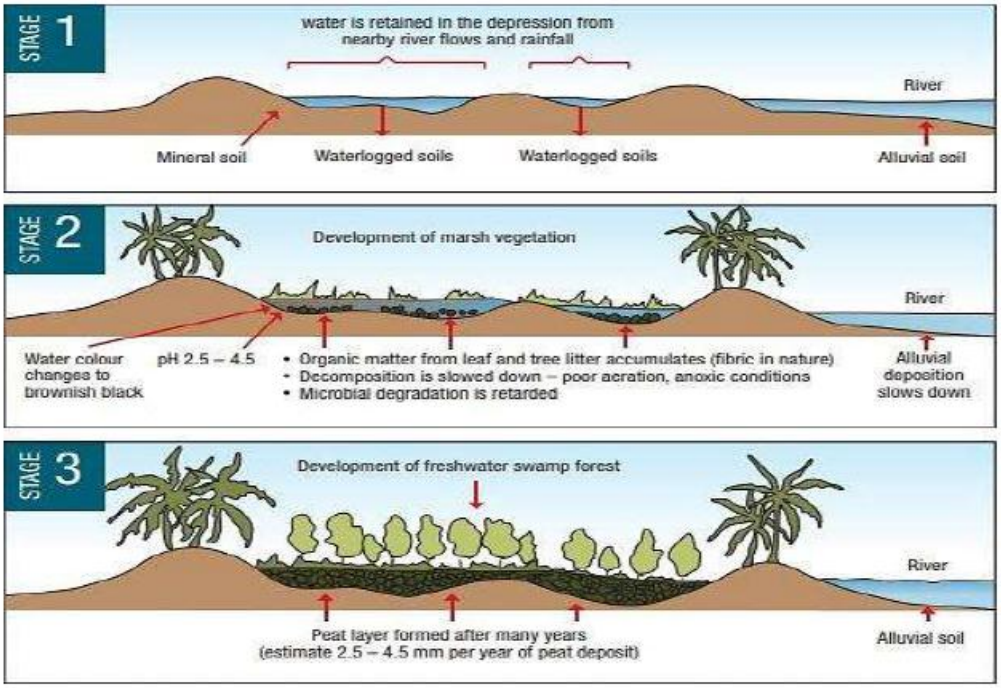


Figure 2 Illustration Formation of Peat [1, 10]

出典: AN INTRODUCTION OF TROPICAL PEAT AND ITS HISTORY OF SHEAR STRENGTH IN MALAYSIA, Norhaliza Wahab, Mohd Khaidir Abu Talib, Munzilah Md Rohani（2019）

図 8.8.1 泥炭形成の概念図

泥炭は実際には不完全な通気と高水分の条件下で保存・分解された植物の残骸の蓄積を表している。世界中の泥炭は、植物や動物の残骸などの物質から自然に発生する。泥炭土は繊維質の有機物で構成されており、酸素が不足している沼地、湿地、その他の湿った場所に生育するコケ、木、スゲ、その他の植物の部分的な分解から生成される。分解と腐植化のプロセスでは、溶液またはガスのいずれかで有機物が失われ、物理的構造が消失し、化学的状態も変化する。

図 8.8.2 は、泥炭の種類に基づいた泥炭の土層構成を示している。Sapric 泥炭は完全に分解された

段階を経た後、Hemic および繊維質の底層で一般的に識別できる。この段階では Sapric 粒子の配置は Hemic 繊維質に比べてより結合しており、木材などの大きな粒子はこの段階で完全に分解されている。逆に繊維質泥炭の場合、木質植物が存在するため、泥炭の配置は Hemic および Sapric 泥炭に比べて緩くなっている。

熱帯の泥炭地では、水の流入と流出に応じて、地下水位の高さに応じて泥炭地表面が膨張したり収縮したりする。低緯度の泥炭地では、通常、降雨量は年に 2 回の季節サイクルで変化する。乾季には、水の流入不足により泥炭地が収縮し、透水係数が低下し、横方向の流れによる水の損失が減少する。雨季が戻ると、地下水位が上昇し、水の流入により泥炭地が膨張して透水係数が増加する。このメカニズムは「泥炭呼吸」と呼ばれ、熱帯泥炭地の中期的な水分ストレスからの回復力を高め、泥炭湿地の表面が地下水位に追従して酸化と水分損失を制限している。

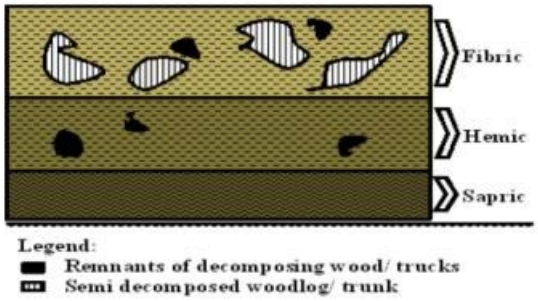


Figure 3 Peat morphology profile [15]

A 出典: AN INTRODUCTION OF TROPICAL PEAT AND ITS HISTORY OF SHEAR STRENGTH IN MALAYSIA, Norhaliza Wahab, Mohd Khaidir Abu Talib, Munzilah Md Rohani（2019）

図 8.8.2 泥炭の土層構成

8.8.1.3 泥炭の土質特性

泥炭は軽い上載荷重で容易に変形して破壊する、せん断強度が低い、圧縮性が高い、水分含有量が高い、支持力が低い、地下の木質残渣の存在による影響がある、有機物と繊維含有量が高く腐植化率が低いなどの悪い特性でよく知られている。表 8.8.6、図 8.8.3、図 8.8.4 は、泥炭に係る各種関係式や関係図の例である。泥炭の特性を簡易に推定するために参考になる。

(1) 関係式

表 8.8.6 泥炭の各種関係式

	予測式	作成者
間隙比と含水比	$e_0 = \frac{30.65(w_n + 0.88)^{0.116} - 30}{1.12}$	Bujang B. K. Huat（2006）
	wn（%）=68.0e0-13.53	I. Chmielewska, 2023
有機分含有量 ※N:強熱減量（%）, C:係数。450 ℃の時C=1.0。	H（%）=100-C（100-N）	Skempton & Petley （1970）
	Iom（%） = 0.0592wn+54.34	Huat et al., 2009
	Iom（%）=0.0143wn+83.06	I. Chmielewska, 2023
密度	ρ（g/cm3）= -0.0114e0+1.127	I. Chmielewska, 2023
圧縮指数	Cc = 0.01wn	Mesri & Ajlouni（2007
	Cc = 0.0115wn	Moran et al.（1958）
	Cc = 0.35（e0–0.5）	Hough（1957）
	Cc=0.0115wn	Azzouz et al. （1976）
	Cc = 0.007wn	I. Chmielewska（2023）
	Cc = 0.67（e0–0.5）	I. Chmielewska（2023）
	Cc = 0.009（wL-10）	Skempton and Petley （1970）
	Cc = 0.007（wL-10）	Hobbs （1986）
有効鉛直応力	$\sigma_v^{'}$（kPa）$= \left(\frac{40}{e}\right)^{2.7}$	Mesri & Ajlouni（2007）
	$\sigma_v^{'} = \left(\frac{19.2}{e}\right)^{3.6} for\ Fibric$	I. Chmielewska（2023）
	$\sigma_v^{'} = \left(\frac{19.2}{e}\right)^{2.6} for\ Hemic$	
	$\sigma_v^{'} = \left(\frac{14.7}{e}\right)^{2.6} for\ Spric$	
二次圧縮係数 $C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta log t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta log t}(1 + e_0)$	$C_\alpha = 0.06C_c \pm 0.01$	Mesri & Ajlouni（1997）
	$C_\alpha = 0.07C_c$	I. Chmielewska（ 2023）
改良土の特性（マレーシアのサラワク州産の熱帯泥炭土）	LL=-50.737MDD（kN/m3）+114.38	P.K. Kolay, M.R. Aminur ら（2010）
	OMC=-52.53MDD+100.62	
	FC=0.762OC+2.8509	
	LL=0.2088OC+59.982	
	OMC=0.206OC+45.04	
	MDD=-0.0041OC+1.0691	
	Gs=-0.0078OC+2.1605	
改良土の圧縮強度（マレーシアのサラワク州産の熱帯泥炭土）	USC=1.14FA（%）=99.66	Prabir K. Kolay, Siti Noor Linda Taib（2018）
	USC=1.58OPC+219.13	
	USC=1.98FA+123.67 for 20%FA & 6%QL	

出典：JICA 調査団

(2) 関係図

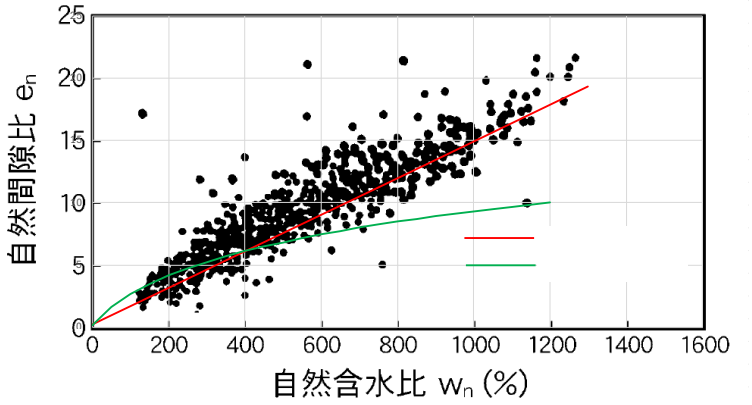


図 3.8　W_n と e_n の関係

出典: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル（平成 29 年 3 月）に JICA 調査団加筆

図 8.8.3 含水比と自然間隙比の関係

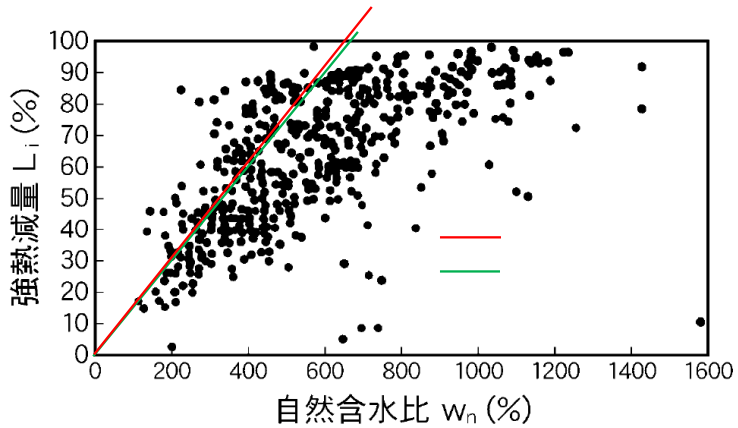


図 3.5　W_n と L_i の関係

出典: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュア，泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル（平成 29 年 3 月）に JICA 調査団加筆

図 8.8.4 含水比と強熱減量の関係

8.8.1.4 熱帯性泥炭の定義

泥炭地には 2 つの大まかな定義がある。

IPCC ガイドライン湿地補足（2013）は、4 つの土壌サブカテゴリへの区分を使用することを提案している。これらはすべて、必要に応じて沿岸部と内陸部のサブカテゴリに区分されている。IPCC では、3. 湿った有機土壌と 4. 排水された有機土壌に分類される。

1. 排水鉱物土壌
2. 湿った鉱物土壌
3. 湿った有機土壌
4. 排水有機土壌

FAO（1998）の有機土壌は、以下の基準 1 と 2、または 1 と 3 に基づいて識別されている。

1. 有機層の厚さが 10cm 以上。20 cm 未満の土壌層は、20 cm の深さまで混合したときに 12% 以上の有機炭素を含まなければならない。
2. 数日以上水で飽和しない土壌は、重量で 20%以上の有機炭素（つまり、約 35%の有機物）を含まなければならない。
3. 土壌は水飽和エピソードの対象であり、次のいずれかを含む：
   a) 土壌に粘土が含まれていない場合は、重量で少なくとも 12%の有機炭素（つまり、約 20%の有機物）。または、
   b) 土壌に 60%以上の粘土が含まれている場合は、重量で少なくとも 18%の有機炭素（つまり、約 30%の有機物）。または、
   c) 粘土の量が中程度の場合は、有機炭素の割合が中程度。

泥炭を灰分含有量で土壌分類すると表 8.8.7 に分類され、表 8.8.8 のようサブグループに分類される。また、炭素含有量と灰分の関係では図 8.8.5 のように明確な相関関係がある。図から泥炭の炭素含有量は 18%以上と考えられる。

表 8.8.7 灰分による土の分類

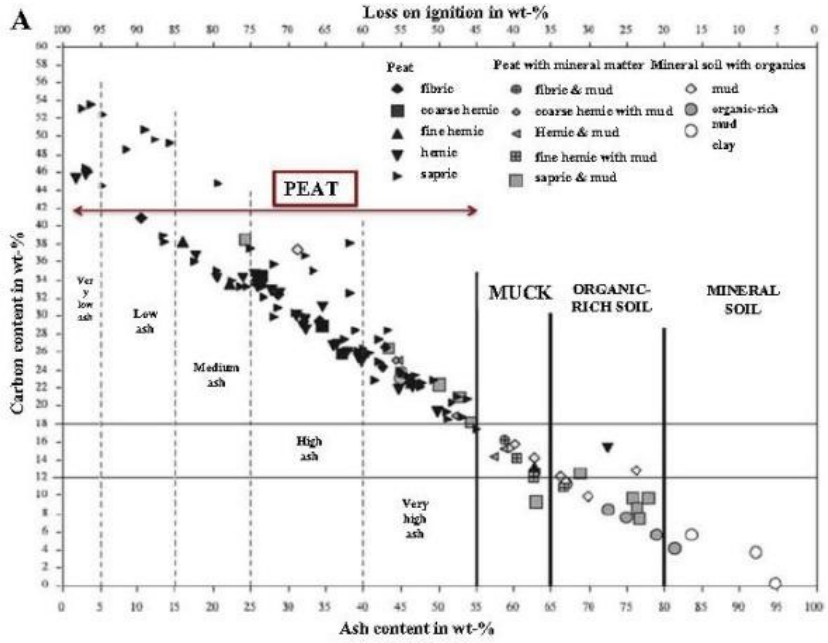
灰分含有量(%)	分類
0~55	泥炭
55~65	泥土
65~80	有機質に富む土壌
80~100	鉱物性土壌／土砂

出典:JICA 調査団

表 8.8.8 泥炭のサブグループ

灰分含有量(%)	泥炭のサブグループ
0~5	非常に低い
5~15	低い
15~25	中くらい
25~40	高い
40~55	非常に高い

出典:JICA 調査団



出典: Chapter 9 Tropical Peat and Peatland Definition in Indonesia, Mitsuru Osaki, Kazuyo Hirose, Hendrik Segah, and Farhan Helmy (2016)

図 8.8.5 熱帯性泥炭の分類体系

(1) インドネシアの泥炭の定義

環境省は、「泥炭」を「長期にわたる分解プロセスを通じて自然に形成され、沼地または静的貯水池に蓄積される植物残渣」と定義している。

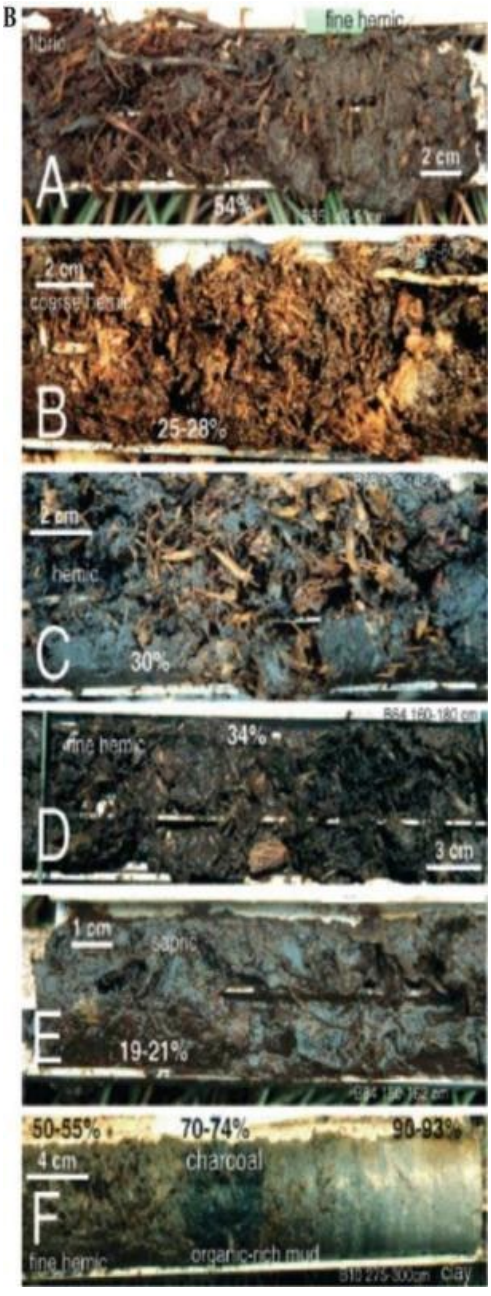
農業省は、「泥炭」を「嫌気性で湿った条件によって分解が遅くなり、その上に生育する腐敗植物から自然に発生する組成が 65 % を超える有機物が蓄積して形成された土壌」と定義している。

林業省は、「泥炭」を「長期間にわたって蓄積された有機物残留物」と定義している。

なお、炭地とは、灰分が 35 以下、泥炭の深さが 50cm 以上、有機炭素含有率（重量比）が 12%以上の部分的に分解された有機物が蓄積している地域である。

8.8.1.5 典型的な熱帯性泥炭土壌

典型的な熱帯性泥炭土壌として、図 8.8.6 に示す Tasek Bera（マレーシア）泥炭地の熱帯低地泥炭がある。



出典: Chapter 9 Tropical Peat and Peatland Definition in Indonesia, Mitsuru Osaki, Kazuyo Hirose, Hendrik Segah, and Farhan Helmy（2016）

図 8.8.6 典型的な熱帯性泥炭

表 8.8.9 泥炭の説明

番号	説明
A	繊維質（左）から粗いヘミック（右）、灰分 54%
B	粗いヘミック泥炭、灰分は 25～28%
C	ヘミックピート、灰分 30
D	細粒ヘミックピート、灰分 34%
E	樹液性泥炭、灰分は 19～21 %
F	基底部、右から左へクォーツ粒を含むカオリン質粘土（灰分 D 90-93 %）、有機物に富む泥（灰分 D 70-74 %）、粗灰分のヘミック泥炭、木質泥炭（灰分 D 50-55 %）

出典: JICA 調査団

8.8.2 泥炭の分布地域

泥炭は世界中に存在し、地球の陸地表面の 5%～8%を占めている。泥炭はカナダ、フィンランド、スウェーデン、ノルウェーなどの国の温帯および寒帯地域に存在するが、世界の泥炭の 8%～11%は熱帯または亜熱帯地域にある。泥炭は米国、中国、ドイツ、ポーランドにも存在する。

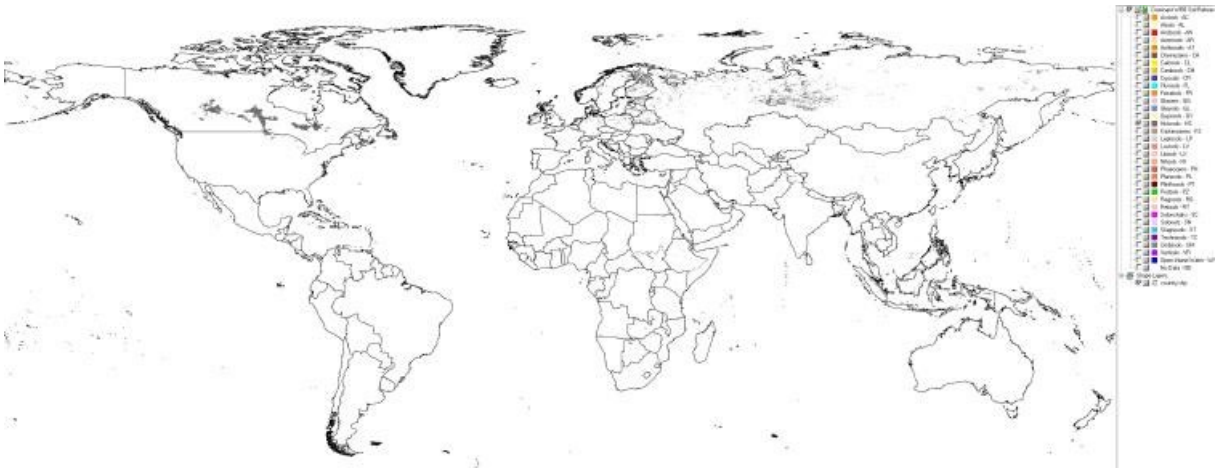
分布する主な地域は米国（フロリダ州: エバーグレーズ湿地、ルイジアナ州: ミシシッピ川デルタ、ミネソタ州、ウィスコンシン州、ミシガン州: グレートレイクス周辺の湿地帯）、カナダ:（ハドソン湾周辺および北部の湿地帯）、ブラジル（アマゾン盆地: 熱帯雨林内の湿地帯および低地）、アルゼンチン（パンパ地域の湿地帯）、フィンランド、スウェーデン、ノルウェー、イギリス、アイルランド、ロシア（西シベリアの湿地帯および泥炭地帯）、コンゴ民主共和国（コンゴ盆地の湿地帯）、ナイジェリア（ナイジャーデルタ地域）、インドネシア（スマトラ島、ボルネオ島の湿地帯および泥炭地帯）、マレーシア（サラワク州、サバ州の湿地帯）、中国（長江デルタ、珠江デルタの湿地帯）、オーストラリア（タスマニア島の湿地帯および泥炭地帯）、ニュージーランド（北島および南島の湿地帯）である。

図 8.8.7 に泥炭の世界分布図を、図 8.8.8 に HWSD による Histosols の世界分布図を、図 8.8.9 にインドネシア国の有機分含有量の分布図を、図 8.8.10 にマレーシアの泥炭分布図をそれぞれ示す。HWSD による Histosols は有機質土及び泥炭に相当する。



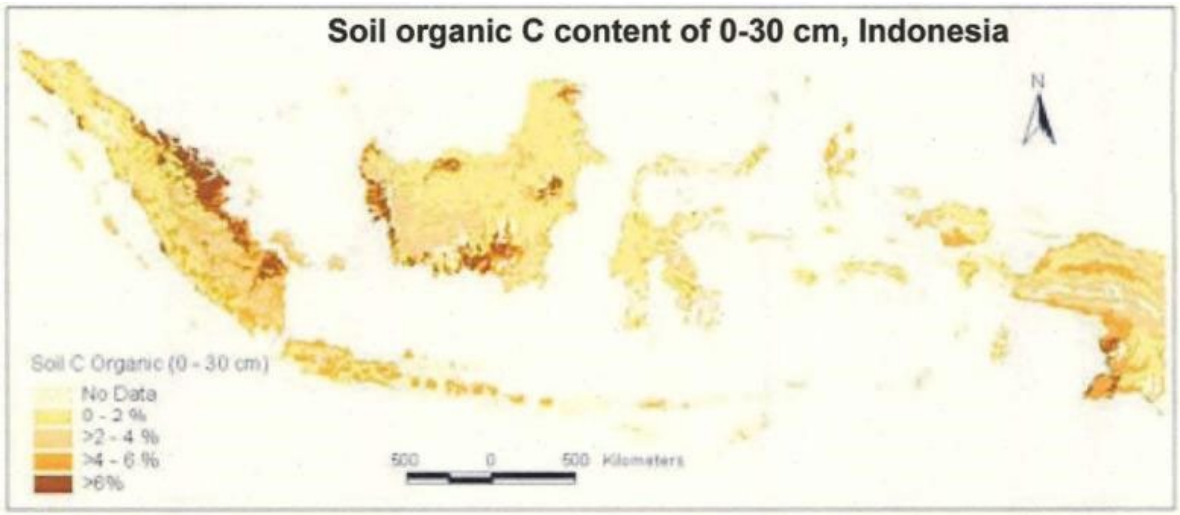
出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu et al.（2024）

図 8.8.7 泥炭の世界分布図



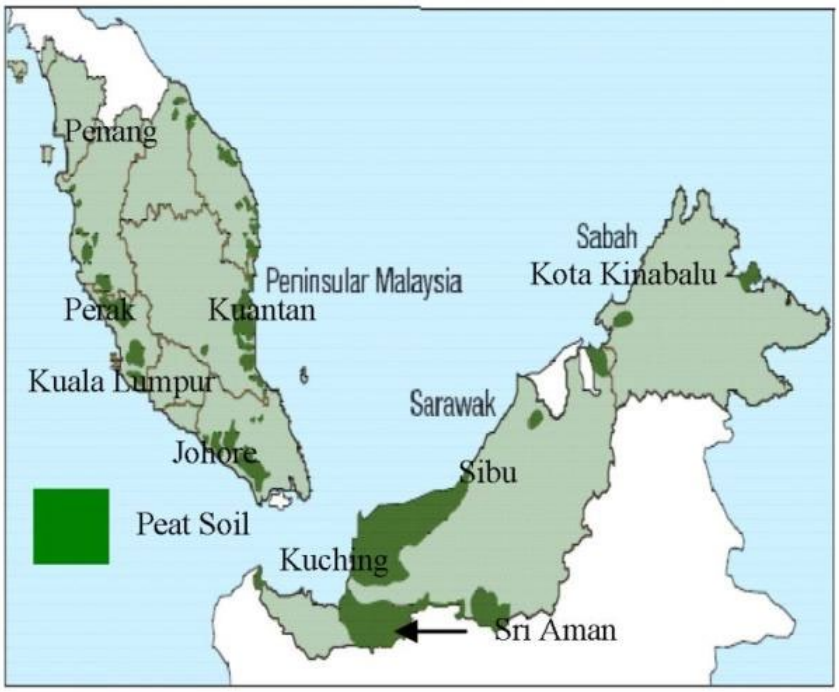
出典: HWSD 2.0

図 8.8.8 HWSD による Histosols の世界分布図



出典: Indonesian Soil Data Base and Predicted Stock of Soil Carbon, R. Shofiyati, I. Las, F. Agus2010

図 8.8.9 インドネシア国の有機分含有量の分布図



出典: Problematic Soils In Search for Solution, BUJANG BIN KIM HUAT（2010）

図 8.8.10 マレーシアの泥炭分布図

8.8.3 泥炭の工学的問題点

工学的問題点は日本の泥炭と同じである。泥炭地盤上の建物の基礎は通常杭基礎であるが、それでも周囲の地盤が沈下し、図 8.8.11 に示すような引き込まれた変状を引き起こす。図 8.8.12 に示すように熱帯地域の泥炭は形成が遅れていて、木根や木が風化しないまま残っていることがあり、掘削時に工事の支障となることがある。また、攪拌による地盤改良も施工が困難となる可能性がある。

カリマンタン島では米栽培を増大する目的で泥炭地に灌漑水路を配置したが、それにより泥炭地内の地下水が下がり、泥炭が乾燥して自然に野火が起きた（図 8.8.13）。その煙は空高く舞い上がり、航空機の運航へ影響を及ぼした。無計画な泥炭の開発は自然環境破壊に留まらず、CO_2 問題、航空機への運航障害などの問題を引き起こすので注意が必要である。

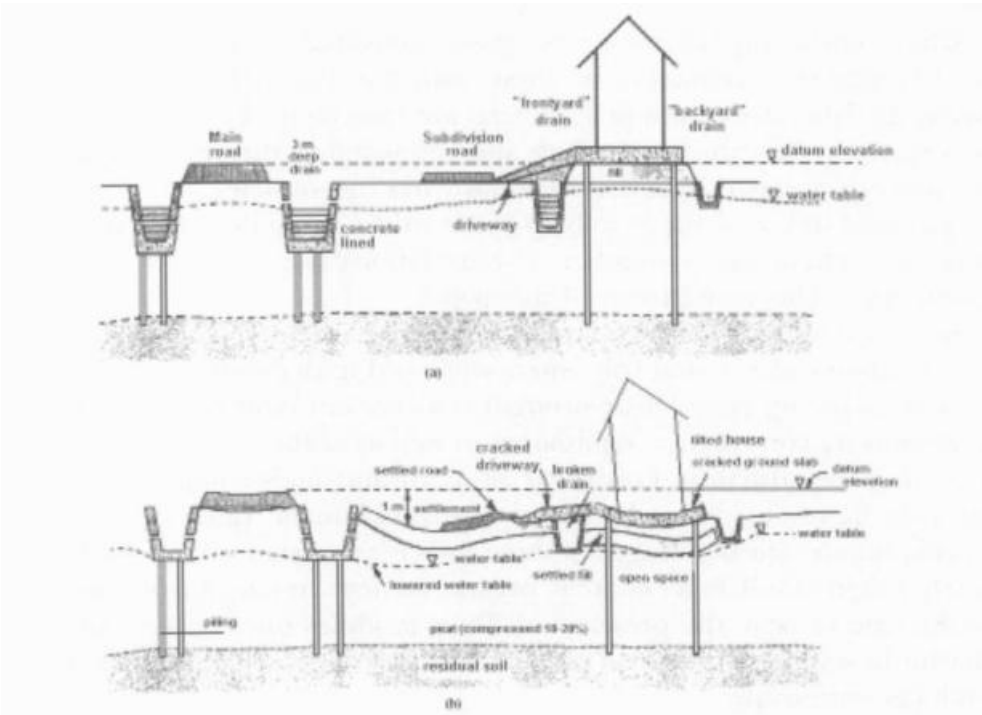


Fig. 1: (a) Typical section of a housing estate on peat (immediately after completion of construction) (b) Several years after completion of construction (scale exaggerated)

出典: Deformation and Shear Strength Characteristics of Some Tropical Peat and Organic Soils, Bujang B. K. Huat（2006）

図 8.8.11 対策された構造物の泥炭地盤の沈下による引き込まれ変状



図 8.8.12 インドネシアカリマン島湿地帯の泥炭
（水路掘削土に大量の未風化の樹木が取り出されている）

出典：JICA 調査団



出典: https://forestsnews.cifor.org/49581/peatland-fire-policy-from-past-to-present?fnl=

図 8.8.13 インドネシアカリマン島の野火

8.8.4 泥炭の対策方法

8.8.4.1 日本の設計法の利用

泥炭の対策工法は、既に日本でも「泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル」として公開されている。開発途上国においても本マニュアルを参照し、対策工法を検討することができる。対策工法以外の事項についても大いに参照できる。

表 8.8.10 泥炭の対策工法

表 4.1 泥炭性軟弱地盤対策工の種類

工法	工法の細分名
表層処理工法	トレンチ工法
	サンドマット工法
	センタードレーン工法
	敷設材工法
置換工法	掘削置換工法
	強制置換工法
押え盛土工法	
盛土補強工法	
緩速載荷工法	
載荷重工法	サーチャージ工法
	プレローディング工法
圧密促進工法	サンドドレーン工法
	プラスチックドレーン工法
	真空圧密工法
サンドコンパクションパイル工法	
固結工法	表層混合処理工法
	中層混合処理工法
	深層混合処理工法
	石灰パイル工法
	グラベルセメントコンパクションパイル工法
構造物的工法	パイルスラブ工法
	パイルキャップ工法
	パイルネット工法
軽量盛土工法	気泡混合軽量盛土工法
	発泡スチロールブロック工法
	発泡ビーズ混合軽量土工法

出典: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル（平成 29 年 3 月）

8.8.4.2 熱帯性泥炭の対策方法

熱帯性有機土壌と泥炭土壌を扱う場合、土壌を改善または強化するための選択肢はほとんどなく、（1）基礎を強化する、(2) 問題のある土壌を除去する（切断して交換する)、(3) 土壌安定処理を適用する、または（4）プロジェクトをより良い地盤へ移転する、のいずれかを選択するのが一般的である。これまでの研究では表面補強、プレローディング、垂直ドレーン、深層安定化、杭打ち、化学的安定化などのいくつかの方法が検討されている。Mc Manus ら（1997）は深さに基づき採用できる 3 つの対策方法を提案している（表 8.8.11)。

表 8.8.11 泥炭堆積物の深さに基づく建設方法

深さ（m）	対策方法
＜3	置換工法
3～10	プレロード、段階施工、サンドドレーン 軽量盛土および表面マットレス ストーンカラム工法など
＞10	深層安定化技術（杭、動的圧縮など）

出典: GEOTECHNICAL CHALLENGES WITH MALAYSIAN PEAT, Adnan Zainorabidin, D.C Wijeyesekera（2007）

対策工の選択は総コスト、耐用年数、施工時間など、いくつかの建設要因によって決めなければならないが、大規模な建設プロジェクトではコストのかかる土壌の置き換えを避ける傾向があり、土壌の安定化工法が採用されることがある。乾式深層土壌混合（DSM）または単にセメントコラム混合は軟弱地盤の安定化のための一般的な方法である。この安定化法では普通ポルトランドセメント(OPC)や石灰などのセメント化合物を泥炭と混合する。その他、セメント、石灰、フライアッシュ、高炉スラグ、硫酸カルシウム、石膏などのいくつかの化学的安定化法がある。さらに、支持力を向上させるためのジオシンセティック補強材の使用や界面せん断強度特性を向上させるための不織布ジオシンセティック粘土ライナー（GCL）の使用など、機械的な改良も一般的である。

8.8.5 泥炭の設計基準／マニュアル

海外で泥炭を対象とした設計基準は本研究では確認できなかったが、泥炭の対策工法の設計は下記マニュアル／指針に準拠して問題ないと考えられる。

- 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル（平成 29 年 3 月）
- 道路土工-軟弱地盤対策工指針 平成 24 年度版, 日本道路協会

8.9 塩類性土壌

塩類性土壌には塩類土壌 saline soils、塩類ソーダ土壌 saline-sodic soils、ソーダ土壌 sodic soils がある。世界中に広く分布し、世界全体で約 33%の灌漑地や 20%の耕地に分布する。

8.9.1 塩類土壌の特徴

塩分は飽和抽出液の電気伝導率（ECe）の測定で行われ、ナトリウム分は交換性ナトリウム率（ESP）またはナトリウム吸着率（SAR）の測定で行われる。各土壌の特徴は以下の通りである。

塩類土壌	25℃で ECe>4dS/m（デシシーメンス／m） ESP<15 で可溶性塩類が多く、交換性 Na+が少ない土壌
ソーダ土壌	ECe<4dS/m、ESP>5 で可溶性塩類が少なく、交換性 Na+が高い土壌
塩類ソーダ土壌	ECe>4dS/m、ESP>15 で可溶性塩類と交換性 Na+の両方が高い土壌

これらの土壌は、主に降水量と蒸発散量の比率が乾燥・半乾燥地域に見られる。このような土壌は、海水の氾濫によって沿岸地域に、地下水位の上昇によって灌漑地域に、浸出不足によって湿潤地域の一部の不透水性土壌にも発生する。

すべての土壌はいくらかの可溶性塩類を含んでいる。土壌中の可溶性塩類の主な供給源は母材の風化である。もうひとつの主な供給源は沿岸や河口海水である。その他の供給源は大気沈着、地下水の毛管上昇、浸透、灌漑水である。塩類は土壌に継続的に添加され、同時に水がある所では侵食や浸出によって、土壌より除去される。土壌の中には、過剰な交換性ナトリウムイオンを含み、過剰な塩分を含むものと含まないものがある。ソーダ土壌は土壌が非常に分散して不透水性であり、極めてアルカリ性の反応を示す。

土壌の塩分濃度は自然現象による場合もあれば、人為的による場合もある。多くの土壌は誤った水管理によって塩類化している。世界の耕作地の約 23%が塩類土壌で、37%がソーダ土壌である。土壌の塩分濃度を判断する基準は、土壌中の塩分量ではなく、土壌の飽和抽出液の電気伝導度 ECe である。電気伝導率は溶液中の塩類濃度に比例し比較的容易に測定できる。飽和抽出液は土壌の最大保水力まで水を加え，土壌溶液を吸引することによって得られる。飽和抽出液は土壌の最大保水力まで水を加え，土壌溶液を吸引することによって得られる。25℃における飽和抽出液の電気伝導度（ECe）が 4dS/m 以上であれば「塩類土壌」である。ナトリウム分の濃度は交換性ナトリウム率（ESP）とナトリウム吸着比（SAR）である。ESP は CEC（陽イオン交換容量）に対する交換性ナトリウムの比で求められる。

$$ESP = \frac{Exchangeable\ Na^{+}}{CEC} \times 100$$

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

ESP が 15 を超えるか、SAR が 13 を超えると、土壌はソーダ土壌であると言われる。したがって、土壌は ECe と ESP（または SAR）に基づいて、4 つのカテゴリーに分類することができる（表 8.9.1）。

表 8.9.1 塩類土壌とソーダ土壌の分類 Richards（1954）

土壌のカテゴリー	ECe（dS/m）	ESP（%）	SAR
塩類土壌	>4	<15	<13
塩類ソーダ土壌	>4	>15	>13
ソーダ土壌	<4	>15	>13
通常の土	<4	<15	<13

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

8.9.1.1 塩類土壌 Saline soil

塩類土壌はほとんどの作物の生育に悪影響を及ぼす中性の可溶性の塩を十分に含んでいる。ECe>4dS/m は現在も世界中で塩類土壌の標準として使用されているが、この ECe ではほとんどの作物の収量が減少する。多くの作物はもっと低い ECe で収量が減少するため、アメリカ土壌学会の用語委員会は、塩類土壌と非塩類土壌の境界の ECe を 2dS/m に引き下げた。表 8.9.2 に、ECe と植物の反応に基づく塩類土壌の分類を示す。

表 8.9.2 土壌の塩分濃度クラス

土壌塩分クラス	ECe（dS/m）	作物への影響
非塩類	0~2	塩分の影響は無視できる
少し	2~4	影響を受けやすい作物の収量が制限される可能性がある
中くらい	4~8	多くの作物の収量が制限されている
強い	8~16	耐性のある作物しか満足のいく収穫は得られない
非常に強い	>16	満足のいく収穫が得られる耐性作物はわずかである。

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

塩類土壌の自然塩に塩化物（Cl^-）や硫酸塩（SO_4^{2-}）などの中性塩、ナトリウム（Na^+）、カルシウム（Ca^{2+}）、マグネシウム（Mg^{2+}）、カリウム（K^+）が主に含まれるが、NaCl が優勢である。硝酸塩がわずかに含まれることもあるが、炭酸塩と重炭酸塩は通常存在しない。多くの塩類土壌は下層に相当量の石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）がある。塩類土壌の pH は中性に近いが、8.2～8.5 と高い場合もある。過剰な塩分が粘土粒子の凝集を保つため、塩類土壌は土壌構造が良好である。

塩類土壌は一般的に物理的性質が良く、多孔質で透水性がある。このような土壌を塩分濃度の低い水で浸出すると、きめの細かい塩類土壌が分散し、水や空気に対する透過性が低くなる傾向がある。

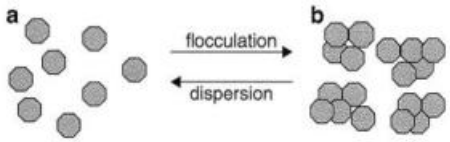
8.9.1.2 塩類ソーダ土壌 Saline-Sodic soil

塩類ソーダ土壌は ECe が 4dS/m を超え、ESP が 15%を超える土壌をいう。これらの土壌の pH 値は通常 8.2 である。これらの土壌は過剰な可溶性塩類（主に NaCL）と過剰な交換性ナトリウム Na+の両方を有する。塩類ソーダ土壌の主な塩類はナトリウム、カルシウム、マグネシウムの塩化物および硫酸塩と炭酸塩、重炭酸塩である。これらの土壌の物理的条件は塩分濃度が高い限り良好である。高濃度の塩分はコロイドを凝集させ、よく凝集した状態に保つ。塩類が溶出すると分散が起こり、それに伴って土壌構造が劣化し、透水性が失われる可能性がある。

8.9.1.3 ソーダ土壌 Sodic soil

ソーダ土壌はコロイド表面に交換性ナトリウム Na+の割合が高く（15%以上）、粒子を分散させ、凝集体への結合を防ぐ。そのため、過剰な交換性ナトリウムは土壌の物理的、化学的、栄養的性質に悪影響を及ぼす。ソーダ土壌の表面またはその近くには粘土の緻密な層がある。この層はしばしばクレイパン clay pan と呼ばれ、根を制限する層である。ESP＞15（または SAR＞13）の土壌の多くは土壌の物理的性質が非常に悪く、作物の生育に適さない。中性塩類の含有量は低く、ソーダ土壌に含まれる塩類はアルカリ加水分解を受ける。Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}の炭酸塩と重炭酸塩が優勢である。ECe は 4dS/m 未満である。飽和土壌の pH は 8.2 より高く、場合によっては 10.5 にもなる。一部の高濃度ヨウ素土壌の土壌溶液中に分散・溶解した有機物は暗色を呈するため、これらの土壌は以前、黒色アルカリ土壌と呼ばれていた。

粘土粒子が分散すると土壌構造が悪くなり、このような土壌は不透水性で透水係数が低くなる。分散と凝集の可逆的プロセスを図 8.9.1 に示す。



出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

図 8.9.1 分散(a)と凝集(b)の模式図

ソーダ土壌の全塩濃度は低くても高くてもよいが、ソーダ土壌の概念は、Na^+と Ca^{2+}および Mg^{2+}の比率が高いことに基づいている。ESP と SAR はどちらもこの比率を表す一指標であるが、米国農務省土壌塩分研究所の基準である ESP>15 のソーダ土壌は普遍的な値ではない。オーストラリアでは ESP>6 が分類基準となっている。

アルカリ性土壌の主な原因は、交換性陽イオンまたは $CaCO_3$、$MgCO_3$、3,Na22CO3 などの塩の加水分解である。交換性陽イオンの加水分解は、以下の反応に従って起こる：

$$N\text{-}clay\text{-}Na \leftrightarrow Na\text{-}clay - H + Na^+ + OH^-$$

置換された Na は OH^-イオンと結合せず、その結果、OH^-イオン濃度が上昇し、土壌の pH が上昇する。$CaCO_3$ や $MgCO_3$ のような化合物の加水分解は、以下の反応に従って行われる：

$$CaCO_3 + 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^- + H_2CO_3$$

ここで H^+は炭酸塩と結合して不活性化され、弱イオン化炭酸を形成する。$CaCO_3$ および $MgCO_3$ は溶解度が低いため、土壌中での加水分解は限定的であり、そのため土壌中の pH は 8.0～8.2 程度以下になる傾向がある。Na_2CO_3 を過剰に含む土壌の pH は 8.2 を超え、10.5 にもなる。これは、Na_2CO_3 の溶解度が高いためである。塩類土壌とソーダ土壌の主な違いを表 8.9.3 に示す。

表 8.9.3 塩類土壌とソーダ土壌の主な特徴

特徴	塩類土壌	ナトリウム土壌
化学的	・ナトリウム、カルシウム、マグネシウムの塩化物と硫酸塩からなる中性塩 ・pH<8.2未満、ECe>4dS/m ・pHとESPの間には明確な関係はない ・土壌には、石膏のような難溶性のカルシウム化合物が多量に含まれている場合がある	・中性塩は一般的に存在しない。アルカリ加水分解が可能な塩、例えばNa_2CO_3は存在する ・pH>8.2、ESP>15、ESP<4 dS/m ・pHとESPは関連している ・可溶性陽イオンはナトリウムが支配的である ・土壌のpHが高いため、可溶性のカルシウムとマグネシウムが沈殿し、土壌溶液中の濃度が非常に低くなる ・石膏はほとんどない
物理的	・過剰な可溶性塩の場合、粘土分は凝集し、土壌は良好な構造を持つ ・土壌の水と虚空の透水性は良い	・交換性ナトリウムが過剰になると粘土が分散し、土壌構造が悪くなる ・土壌の水と虚空の透水性は良くない
植物成長への影響	・塩分を含む土壌では、植物の生育に悪影響を及ぼす ・過剰な塩分が土壌溶液の浸透圧に影響を与え、水の利用可能性が減少する ・Na、Cl、Bなどの特定のイオンの毒性が影響する	・ソーダ土壌では植物の生育に悪影響を及ぼす ・過剰な交換性ナトリウムの分散効果によって物性が悪くなる ・高い土壌pHがカルシウムの欠乏を含む栄養の不均衡に影響する 例えば、特定のイオン、Na、Co_3、Moなどの特定のイオンの毒性が影響する
土壌改良	・塩類土壌の改善には基本的に浸出と排水によって根域の可溶性塩類を除去する必要がある	・化学的改良に続いて、浸出、灌漑、排水が必要である

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

8.9.2 塩類土壌の形成

土壌が塩類化する原因には自然的なものと人為的なものがある。自然的原因としては乾燥、土壌の母材、塩分を多く含む浅い地下水位、塩分の浸透、表土の乾燥による水の毛細管現象、沿岸の洪水などによる浸出量の低下や不足が挙げられる。人為的な原因としては灌漑システムの不具合、排水システムの不具合、灌漑への塩水の使用、塩田やエビ養殖への塩水の浸水などが挙げられる。

土壌中の可溶性塩類の主な供給源の塩は、主にナトリウム、カルシウム、マグネシウム、カリウムの塩化物や硫酸塩を含む天然塩である。土壌が陽イオンの場合、陰イオンは炭酸塩と炭酸水素塩が主で、陽イオンはナトリウムが主である。土壌中の自然塩の蓄積には気候地域との関連性がある。マグネシウムや塩化カルシウムのような最も可溶性の高い塩は最も乾燥した条件下でのみ見られる。マグネシウムや硫酸ナトリウム、塩化ナトリウムは乾燥・半乾燥地域によく見られる。湿度が高くなるにつれて、最も可溶性の高い塩類は姿を消し、石膏のみ、そして最終的には炭酸カルシウムのみが見られるようになる。

8.9.3 塩類土壌の分布地域

2000 年の FAQ 報告書によると、塩害土壌の面積は 9 億 3,220 万 ha で、塩類土壌が 3 億 5,150 万 ha、ソーダ土壌が 5 億 8,100 万 ha であったが、塩類土壌とソーダ土壌を含む世界の塩害土壌の総面積は 8 億 3,100 万 ha であり、アフリカ、アジア、オーストラリア、アメリカ大陸を含むすべての大陸に広がっている。FAQ/UNESCO の世界土壌地図に基づくと、塩類土壌の総面積は 3 億 9,700 万 ha、ソーダ土壌の総面積は 4 億 3,400 万 ha である。塩分の影響を受けている土地のほとんどは、乾燥・半乾燥環境にある。

分布地域を図 8.9.2 に示す。分布する地域は、中央アジアのアラル海盆地（アムダリヤ川流域とシルダリヤ川流域)、インドのインドガンジス盆地、パキスタンのインダス川流域、中国の黄河流域、シリアとイラクのユーフラテス川流域、オーストラリアのマレー・ダーリング盆地、米国のサンホアキンバレーなどがある。

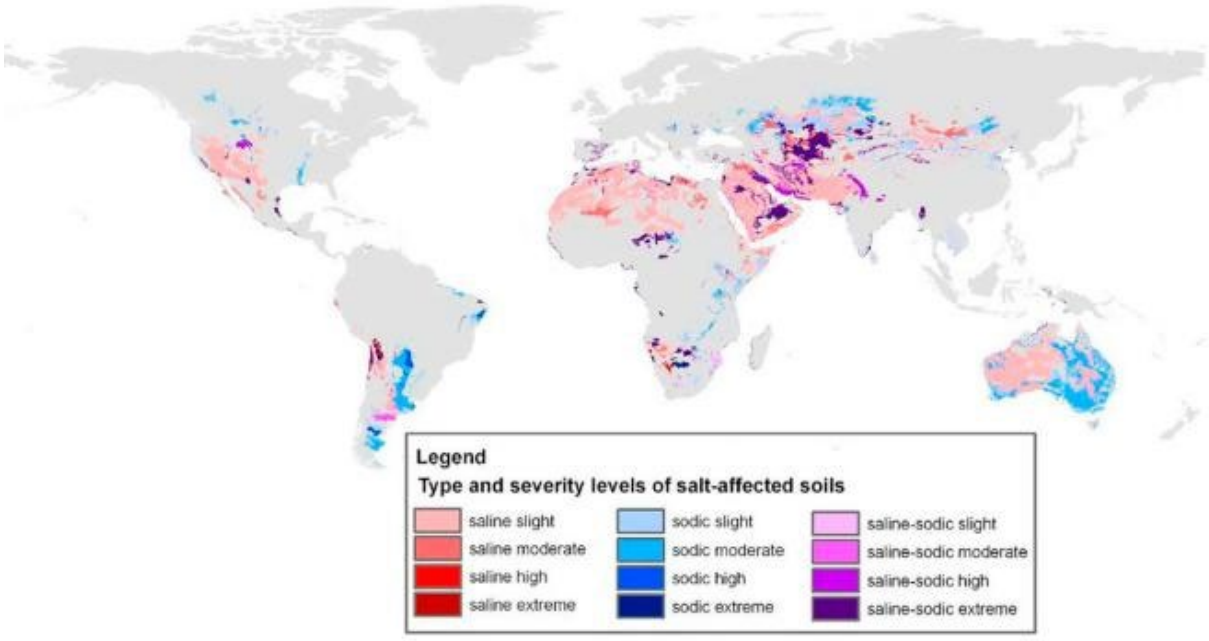
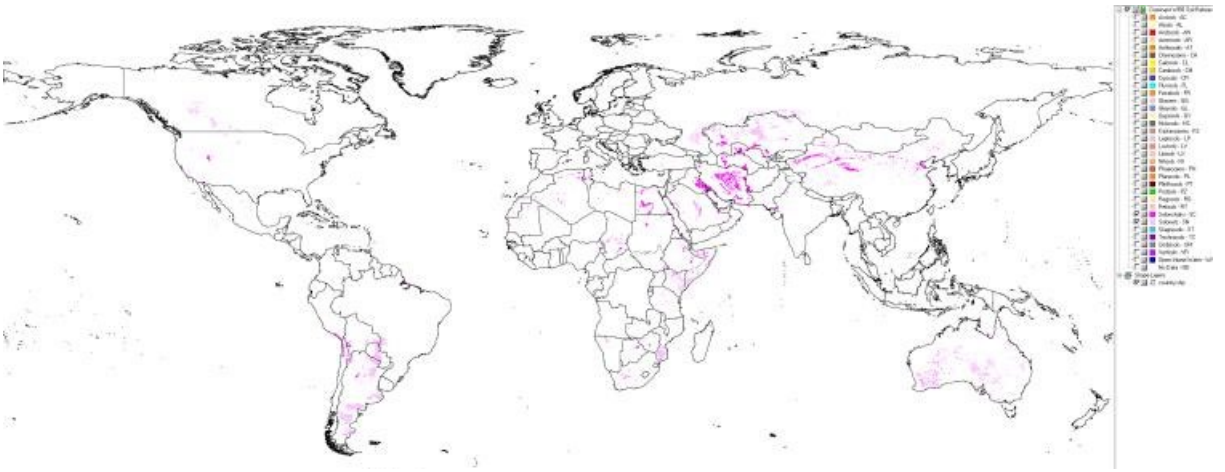


FIGURE 6
Global distribution of saline, sodic, and saline-sodic soils. Source: Encyclopedia of the Environment (unknown date). https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/land-salinization/

出典：Rio（1992）to Glasgow（2021）: Three decades of inadequate mitigation of climate change and its slow onset effects, Ilan Stavi (Sep. 2022)

図 8.9.2 塩類土壌が分布する地域

HWSD による塩類土壌は Solonchak と Solonetz である。局所的に Gleysols と Fluvisols にある可能性がある。Solonchak と Solonetz の分布図を図 8.9.3 に示す。



出典: HWSD 2.0

図 8.9.3 HWSD による Solonchak と Solonetz の世界的分布図

8.9.4 塩類土壌の判定方法

8.9.4.1 現場での判定方法

塩分がサイトに影響を及ぼしているかどうかを示唆する症状を以下に示す。塩類化の初期段階では、1 つ以上の症状が現れることもあれば、症状がないこともある。さらに、通常、土壌や植物に症状が現れるのは、塩害の進行段階であり、改善対策には時間とコストがかかる。

- 作物畑の葉バムのパッチ
- 耐塩性植物がいる
- 半乾燥・乾燥地での土壌湿潤の増加
- 作物の成長パターンが不規則で、植物の活力がない
- その部分がむき出しになり、"やけど scalded"を負っている
- 土壌に白い斑点や筋がある
- 白い痂皮

8.9.4.2 化学試験による方法

塩類性土壌を土壌分類するためには、電気伝導率（ECe）と交換性ナトリウム率（ESP）とナトリウム吸着比（SAR）の値が必要となる。ESP と SAR は次式で定義されるため、陽イオン交換容量（CEC）と交換性陽イオン（Na+、Ca2+、MG2+）の濃度が必要となる。

$$ESP = \frac{Exchangeable\ Na^{+}}{CEC} \times 100 \quad （再掲）$$

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad （再掲）$$

表 8.9.4 塩類土壌とソーダ土壌の分類 Richards（1954）（再掲）

土壌のカテゴリー	ECe（dS/m）	ESP（%）	SAR	pH
塩類土壌	>4	<15	<13	>8.5
塩類ソーダ土壌	>4	>15	>13	>8.5
ソーダ土壌	<4	>15	>13	<8.5
通常の土	<4	<15	<13	<8.0

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

SAR 値を直接測定している場合、以下の式を使うことで ESP を推定可能である（Richards, 1954）。

$$ESP\ （\%）= \frac{-0.0126 + 0.01475SAR}{1 + \ （-0.0126 + 0.01475SAR）} \times 100$$

SAR を求めるために必要となる試験方法を表 8.9.5 に示す。これらの試験方法は、ASTM で基準化されている。但し、塩類性土壌の区別は農業に関する指標で工学的指標でないことに留意する必要がある。

表 8.9.5 塩類性土壌を判定するための化学分析試験（ASTM）

試験（測定）項目	ASTM 基準
飽和ペースト抽出液を作成	ASTM D4542 Standard Test Methods for Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Refractometer
土壌飽和ペースト抽出液の導電率（ECe）	ASTM D1125-14 Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water
抽出液中のナトリウム、カルシウム、マグネシウム濃度をイオンクロマトグラフィーで測定	ASTM D6919 Standard Test Method for Determination of Dissolved Alkali and Alkaline Earth Cations and Ammonium in Water and Wastewater by Ion Chromatography
土壌中の交換性ナトリウムを測定するための標準手順	ASTM D6980 Standard Test Method for Determination of Exchangeable Sodium in Soils by Ammonium Acetate Extraction
土壌の陽イオン交換容量（CEC）	ASTM D7503 Standard Test Method for Measuring Cation Exchange Capacity（CEC）of Soils

出典: JICA 調査団

8.9.5 塩類性土壌の工学的問題点

8.9.5.1 塩類土壌

高い塩分濃度などの化学的性質は埋設した金属構造物やパイプラインを腐食させ、インフラの耐用年数を短くする。塩類土壌中の塩分がコンクリートに浸透すると、アルカリシリカ反応や塩害によってコンクリートが劣化し、構造物の強度が低下し、修復が必要になる場合がある。土壌として形成状況が一様でなく、塩分の濃度も不均一に分布しているため、変形が一様でなく建物の基礎が不同沈下する可能性がある。また、塩類土壌は水を吸収しやすく、膨潤性を持つことがあるため、膨潤性土と同じような問題を引き起こす可能性がある。

8.9.5.2 ソーダ土壌

ソーダ土壌は分散性の性質を有しているため、土壌の分散により、土壌の微細な粒子により水の浸透が妨げられ、水はけが悪くなり、地盤の排水性が低下する。土壌の分散は粒子間の結合力が弱くなり、地盤の安定性が低下し、土砂崩れや地すべりのリスクが増大する。また、圧縮強度やせん断強度が低下し、基礎工事や道路建設において問題を引き起こす。特に重い構造物の下では、地盤の強度不足が深刻な問題となる。分散した土壌は風や水による侵食に対して脆弱で、地表が削られ、植生の喪失や地形の変化が生じることがある。ソーダ土壌は分散性土となるため、分散性土と同じような問題が生じる。ナトリウム塩が毛管現象により土壁にしみ込み問題を起こしている事例もある（図 8.9.4）。



Figure 2: Capillary Rise in Water-logged Area, growing unhygienic living conditions (Sultanpur District)

出典: Engineering Problems in Sodic Soils and its Feasible Measures – A Pilot Study in Sultanpur District, Uttar Pradesh（2015）

図 8.9.4 ソーダ土壌の毛管現象による土壁の被害

8.9.6 塩類性土壌の対策方法

塩類性土壌に関しては農業での被害が多いため、それらの対策については述べられている研究は多いが、工学的な問題に対しては少ない。農業ではソーダ土壌に対して石膏を混ぜる対策が取られているが、工学的な対策となるかは不明である。ソーダ土壌に対して分散性の土壌対策が使用できるかも不明である。交換性ナトリウムイオンが高いと対策工にどのような影響が与えるか不明である。

8.10 硫酸塩／硫化土壌

8.10.1 一般

硫化物と硫酸塩鉱物は、土壌中の含有量は少ないものの、深刻な農業問題や環境問題を引き起こす可能性がある。硫酸塩土壌は硫酸塩（SO_4^{2-}）を多く含む土壌である。代表的な硫酸塩には硫酸カルシウム（石膏：$CaSO_4$）や硫酸マグネシウム（Epsom 塩：$MgSO_4$）、硫酸ナトリウム（ソーダ）、硫酸鉄がある。硫化土壌は硫化物（S^{2-}）を多く含む土壌である。代表的な硫化物には硫化鉄（FeS_2：黄鉄鉱）や硫化亜鉛（ZnS）などがある。硫化土壌は通常、湿地帯や低酸素環境（還元的環境）で形成され、硫酸塩が還元されて硫化物が生成される。表 8.10.1 に硫酸塩と黄鉄鉱の特徴を示す。

硫酸塩/硫化土壌では雨水が蒸発した際に残った石膏の白い結晶ができる。この微細な白い粉は硫酸塩や硫化物の含有量が高い盛土の表面にしばしば発生する。また、黄鉄鉱の酸化生成物である含水酸化鉄（黄土色）の橙褐色の堆積物を伴うことも多い。これらの堆積物は、排水溝を塞いだり、水路の底を覆ったりして、水生生物の死につながる。また、建設工事において当該材料を掘削し、盛土を行うと浸透する雨水や空気に開放され、風化を促進する可能性がある。自由排水の盛土は酸化作用の強い環境であるため、酸性状態が急速に進行し、硫酸塩の溶解度が大幅に上昇し、建設材料が侵される可能性がある。

表 8.10.1 硫酸塩と黄鉄鉱の各特徴

項目	特徴
硫酸塩 SO_4^{2-}	石膏、無水石膏（CaSO4）、エプソマイト（MgSO4.7H2O）、およびその他の塩として、蒸発岩列中に天然に存在する。重晶石（BaSO4）は、様々な岩石中に微量成分として存在する。重晶石は極めて難溶性であるが、無水石膏、エプソマイト、およびその他の塩類は非常に可溶性であるため、ほとんどの土木工事が実施される地表付近から溶出し、深部の風化していない岩石や土壌でのみ遭遇する可能性がある。このような状況では、建設資材の腐食や膨張など、土木工事に深刻な問題を引き起こす可能性がある。石膏は撹乱されていない地層にある半透明の大きな結晶から、反応性の粘土や泥岩の露出した表面に成長する微細なエフロレッセント状の白い粉状の結晶まで、多種多様な形態で発生する可能性がある。
黄鉄鉱 FeS^2	最も一般的な硫化物で、多くの火成岩、変成岩、堆積岩、およびそれらに由来する土壌の一般的な微量成分である。硫化鉱物は一般に溶解度が非常に低く、それ自体は建設資材への危険性はない。しかし、硫化物の風化によって可溶性の硫酸塩（SO_4^{2-}）が生じ、天然および製造された建材と化学反応を起こす可能性がある。自然条件下では、硫化物の風化は通常石膏（$CaSO_4.2H_2O$）の生成につながるが、これは中性 pH 条件下では溶解度が限られており、これが地表付近の土壌における硫酸塩の通常の形態である。

出典：JICA 調査団

8.10.2 硫酸塩/硫化土壌の分布地域

硫酸塩/硫化土壌は、世界中で少なくとも 24Mha の地表または地表近くに分布する。広い気候および地理的範囲に分布しているが、最も一般的には熱帯および沿岸地域に分布する。

硫酸塩土壌の分布地域を図 8.10.1 に示す。硫酸塩土壌は、乾燥地帯や半乾燥地帯に分布する。主な分布する国は米国（グレートベースン、デスバレー、ソルトレイク地域)、アルゼンチン（パンパ地域)、ボリビア（ウユニ塩湖)、エジプト（ナイルデルタ地域)、チュニジア、アルジェリア、モロッコ、サウジアラビア（内陸の砂漠地域)、イラン（カヴィール砂漠)、カザフスタン（カスピ海沿岸)、ウズベキスタン（アラル海周辺)、オーストラリア（南オーストラリア州、ニューサウスウェールズ州）である。

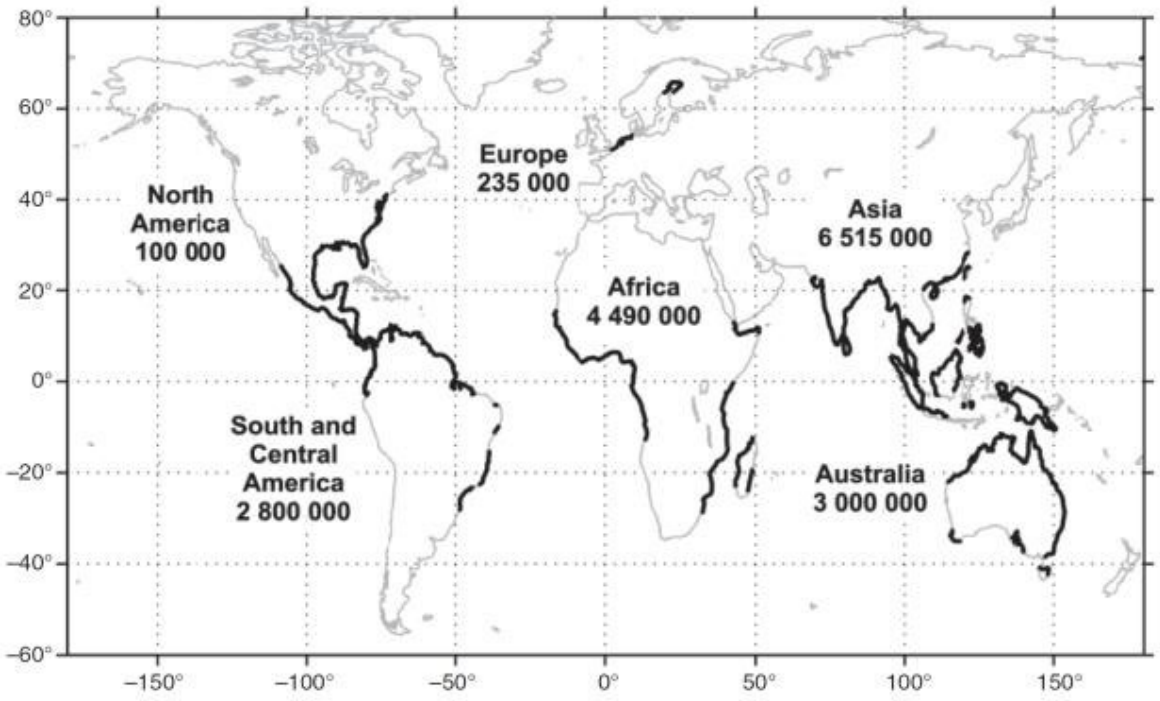
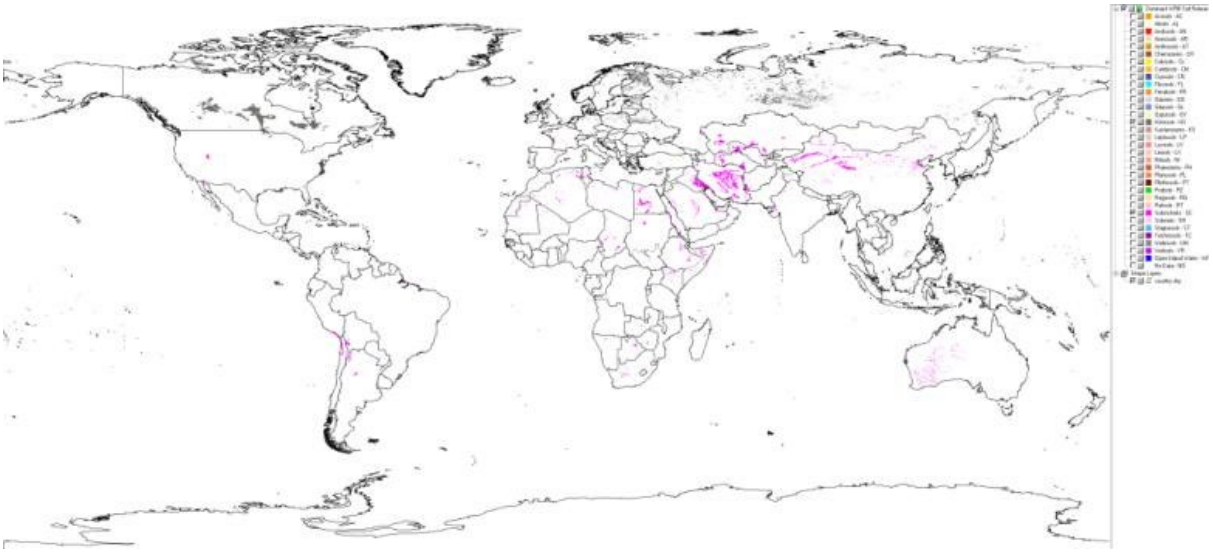


Fig. 1. Simplified and generalised map of worldwide coastal occurrence of acid sulfate soils (ASS) (marked by thick lines). Estimates for the spatial extent of actual and potential ASS are given in hectares. Adapted from Gröger (2011).

出典：Using X-ray fluorescence core scanning to assess acid sulfate soils, Ulrike Proske, Henk Heijnis and Patricia Gadd（2014）

図 8.10.1 硫酸塩土壌の分布する地域

HWSD では硫酸塩土壌は Solonchak に含まれるが、Solonchak は塩類が高い土壌であるため、他の土壌の可能性があると考えた方が良い。硫化土壌は HWSD の分類に含まれていないが、可能性を考えるときには Gleysols、Histosols、Fluvisols の地域に着目するとよい。



出典: HWSD Ver.2.0 より JICA 調査団作成

図 8.10.2 硫酸塩土壌が含まれる Solonchak の世界的分布図

8.10.3 硫酸塩/硫化土壌の判定方法

硫酸塩/硫化土壌の判定は、化学分析試験に基づくが、工学的に判断する基準値は特に定められていない。

8.10.3.1 水溶性硫酸塩（WS）

最も一般的な検査は水サンプルの硫酸塩含有量、または土壌や岩石サンプルの水溶性硫酸塩含有量（WS）である。WS は有害性の可能性を評価するための指標として使用される。WS は試料中の利用可能な硫酸塩の総量を表すものではなく、存在する硫酸塩鉱物の溶解度を示すものである。石膏は中性 pH では水にほとんど溶けないため、これが唯一の硫酸化合物であれば、WS は約 1500mg/l SO4 を超えない。しかし、pH が酸性であれば、存在する硫酸塩が石膏だけであっても、WS の値ははるかに高くなる。したがって、pH 値を決定することは、WS 値を解釈し、材料または水がもたらす脅威を評価するのに役立つ。

8.10.3.2 酸可溶性硫酸塩（AS）

WS 試験は脱イオン水に接触した土壌や岩石の可溶性硫酸塩含有量を測定するものであるが、硫酸塩が石膏のような難溶性の鉱物の形をしている場合、硫酸塩含有量はこれよりもかなり高くなることがある。酸可溶性硫酸塩（AS）は時間の経過とともに水によって溶液化する「硫酸塩の貯留層」を表す。AS 含有量には潜在的に反応性の硫酸塩鉱物がすべて含まれるが、重晶石などの非反応性硫酸塩は測定されない。したがって、AS は総硫酸塩含有量の尺度ではないことに留意する必要がある。

8.10.3.3 全硫黄（TS）

土壌や岩石中の全硫黄含有量（TS）には硫酸塩、硫化物、および有機硫黄などの他の形態として存在するすべての硫黄が含まれる。

潜在的硫酸塩含有量（TPS）とは試料中の硫黄化合物がすべて硫酸塩に変換された場合に生成される可能性のある硫酸塩の総量（SO_4 として）となる。これは特定の物質から発生する硫酸塩の脅威に関する数値である。

酸化可能硫化物（OS）とは試料中に硫化物として存在する硫黄がすべて硫酸塩に酸化された場合に生成される可能性のある硫酸塩（SO_4 として%）である。OS は TPS より低く、通常 TS と AS から間接的に計算できる。

これら 3 つの試験（WS、AS、TS）は、土壌、弱い岩石、骨材に対して日常的に実施されている主な試験である。これらの試験は、比較的迅速かつ安価であるため、過剰なコストや遅延を発生させることなく、多数の試料を試験できるという利点がある。

8.10.3.4 総硫酸塩含有量（TRS）

還元硫黄化合物の含有量は TS と AS の差から推定できる。しかし、この数値には有機硫黄や重晶石などの難溶性の硫黄も含まれるため、硫化物の含有量を過大評価することになる。また、TS と AS の測定には大きな誤差があるため、特に低い値では精度に限界がある。還元硫黄含有量を直接測定すれば推定値の精度が向上する。WS、AS 及び TS の試験とは異なり、自動化されておらず、実施に費用がかかる可能性がある。

8.10.3.5 一硫化硫黄（MS）

一硫化物は反応性が高く、湿地、沼地、泥炭などの河口域や有機堆積物、高炉スラグなどの製造された骨材に含まれる黄鉄鉱（FeS）などで重要な役割を果たす。一硫化物の定量では試料を塩酸で処理し、気体の硫化水素（H_2S）に変換する。これを硫化銅として沈殿させて捕捉し、捕捉溶液中の銅濃度の減少から量を測定する。この試験は通常 AS の測定と組み合わせて行われるが、必要であれば単独で実施することもできる。一硫化物含有量（MS）は%S として報告される。TRS 試験と同様、この試験には危険な化学物質が含まれるため、適切な技術と経験を持った担当者が実施する必要がある。

8.10.3.6 その他の試験

X 線回折（XRD）などの技術は土壌や岩石中の黄鉄鉱、石膏、その他の鉱物の存在を定性および半定量的に検査するために使用することができ、炭酸塩や粘土鉱物などの他の鉱物に関する情報も得られる。土壌や岩石の蛍光 X 線（XRF）分析では TS 含有量の推定値を含む全体的な化学組成を知ることができるが、直接化学組成を測定するよりも精度は劣る。透過型および反射型の光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡（SEM）は微細な硫黄化合物の結晶形態と粒径を調べるために使用することができる。SEM は高倍率と 3D イメージングが可能で、成分の化学分析を容易にする EDX 機能を備えているため、特に有用である。SEM はフレームボイド黄鉄鉱の同定や、酸化の有無を検出するのに非常に役立つ。また、特定の状況における化合物の反応性を理解するのにも役立つ。しかし、これらの技術は高価であり、工学的な検査には適さない。

8.10.4 硫酸塩/硫化土壌の工学的問題点

土木工事に影響を及ぼす問題は、主に溶液中の硫酸塩と、ある硫黄化合物から別の硫黄化合物への変化によるものである。掘削によって空気や水が硫化鉱物に到達し、硫酸塩への酸化や酸性状態の発生につながる可能性がある。その結果、コンクリートや鋼鉄などの建設資材が侵されたり、盛土やその上にある舗装、床スラブ、基礎が盛り上がったり、人工斜面や切羽が破損したり、排水溝やフィルターが詰まったり、水路が汚染されたりする可能性がある。硫酸塩や硫化物を含む土壌や岩石を石灰やセメントで処理すると、膨張性の硫酸塩鉱物が形成され、それが地盤隆起の原因となり、その上にある建設資材を破壊する。

問題の多くに共通する特徴は、工事中に問題が顕在化することもあるが、建設直後に発生するのではなく、建設後数ヶ月から数年経ってから発生することである。このような問題は、影響を受けた地盤や盛土を除去し、その上にある構造物の大規模な補修や撤去を必要とする場合があるため、修復が困難で費用がかかる場合がある。

8.10.4.1 埋設コンクリートへの影響

地中の硫酸塩や酸がコンクリートを侵し、ひび割れ、膨張、軟化を引き起こす（図 8.10.3）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 8.10.3 硫酸塩土壌による鉄筋コンクリート製フーチングの劣化

英国では Specification for Highway Works に骨材の品質の分類として「DS クラス（Design Sulfate Class)」と「AC クラス（Aggressivity Class)」が定義されている。

DS クラスは土壌や地下水中の水溶性硫酸塩の濃度に基づいて分類され､分類は以下のようになる。

- DS-1：硫酸塩濃度が低い環境
- DS-2：硫酸塩濃度がやや高い環境
- DS-3：硫酸塩濃度が中程度の環境
- DS-4：硫酸塩濃度が高い環境
- DS-5：硫酸塩濃度が非常に高い環境

AC クラスは環境の腐食性の程度を示し、主に土壌や地下水の pH 値や硫酸塩濃度、その他の腐食因子に基づいて分類され、分類は以下のようになる。

- AC-1：腐食性が低い環境
- AC-2：腐食性が中程度の環境
- AC-3：腐食性が高い環境

DS と AC クラスの制限値は合否基準というよりも設計目的のためのものである。しかし、コンクリート、セメント結合材、その他のセメント系材料、または恒久的な工事の一部を形成する安定化キャッピングへの埋め戻しに対する制限値は DS-2 クラスの最上位に基づいており、中性 pH 値における石膏の溶解度にほぼ対応している。限界値は以下の通りである。

- 1500mg/L を超えない SO_4
- 空冷高炉スラグを含まない骨材については TS 含有率が 1%を超えないこと、または空冷高炉スラグについては 2%を超えないこと

さらに、以下の要件のうち少なくとも 1 つに適合するものでなければならない。

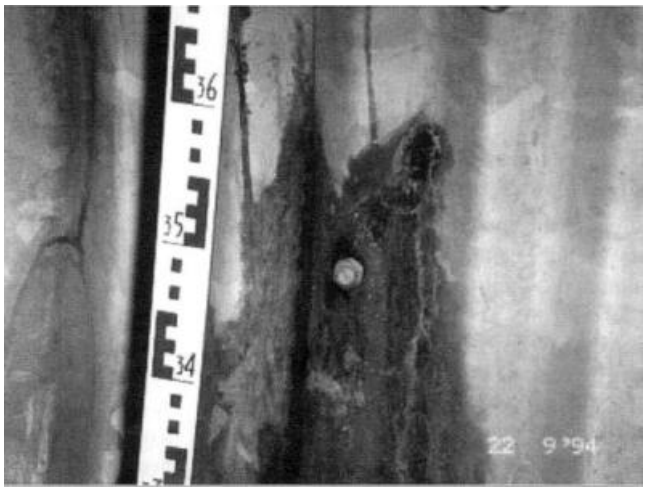
- 石灰石、チョーク、ドロマイト、高炉スラグ、鉄鋼スラグ、または破砕コンクリートが優勢であること
- 硫化物含有率が 0.5%（SO_4 として）未満であること

上記 2 つの要件は、WS 試験で検出されない酸化可能な硫化物を含む材料が埋め戻し材として使用されることを防ぐように考慮されたものであり、これは高濃度の硫酸塩と酸性の浸出液がコンクリートを攻撃する可能性があるためである。

8.10.4.2 埋設金属構造物

恒久的な工事の一部を構成する金属は硫酸塩、硫化物、酸による腐食の影響を特に受けやすい。構造用金属部材の建設用途として、アンカー土や補強土における亜鉛メッキ鋼やステンレス鋼、波形鋼板などがある。沖積砂や沖積礫などを用いた盛土で黄鉄鉱の酸化によって発生した酸が英国の高速

道路の波形鋼板埋設暗渠の腐食を引き起こしたという問題が起きている（図 8.10.4）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 8.10.4 英国 A50 幹線道路にある亜鉛メッキ鋼製暗渠の腐食

8.10.4.3 鋼矢板

鋼矢板は土木構造物の建設において広く使用されており、酸、硫酸塩、硫化物による腐食の影響を受けやすい。酸化的な状況では硫酸塩と酸の動員によって腐食が生じる。しかし、酸素が乏しい、あるいは存在しない場所では硫酸塩が硫化物に還元され、場合によっては腐食性の高い鉄の一硫化物や気体の硫化水素が発生するため、異なる反応が起こる可能性がある。このような反応は、河口域で頻繁に発生する有機質シルト堆積物で発生する可能性があり、港湾工事で大規模なシートパイルが使用される場所であることが多い。このような環境では塩分濃度が高く、さらに潮汐によって水位が日ごとに変化するため、反応性一硫化物の生成に特に適した条件となる。この対策として、カソード防食の使用など腐食に対抗するための様々な方法がある。

8.10.4.4 埋戻し材／盛土材

埋戻し材／盛土材の硫化反応は材料の土質特性や汚染された排水の近隣の水路への流出にも重大な問題となる可能性がある。

硫酸塩／硫化土壌で最も劣化しやすい材料は泥岩やアルギル質石灰岩（炭酸カルシウム（$CaCO_3$）を主成分とする石灰岩に粘土鉱物が混じった石灰岩）のような軟岩や硫酸塩／硫化の成分を多量に含む炭鉱くずのような材料である。これらの材料は、高速道路などの盛土材料やダム材料として広く使用されている。このような盛土構造物は耐用年数が極めて長く、時間依存による劣化の可能性が問題となるため、劣化の影響を考慮した設計を行うことが重要となる。以下に想定される硫酸塩/硫化

土壌となった埋戻し材/盛土材の影響を示す。

- 硫酸の浸出による材料のせん断強度の低下
- 硫酸による排水材の化学的影響
- 石膏や黄土の沈殿による排水管の詰まり
- コンクリートや金属への攻撃
- 高濃度の金属を含む酸性排水による下流水路の汚染
- 酸、硫酸塩、金属による湛水の汚染の可能性

8.10.4.5 道路盛土

風化促進の問題は高速道路でも発生している。黄鉄鉱を含む泥岩の顕著な尾根上の道路工事では粘土に黄鉄鉱があり、総硫黄含有量は最大で 2.6%あった。暴露後の黄鉄鉱の酸化の速さとその後の大雨による泥岩の劣化は予想されていなかった（図 8.10.5)。平坦に圧延されていた表面が天日乾燥によって多角形の乾燥クラックと広範な白色エフロレッセンスが発生した。進行する黄鉄鉱の酸化過程による長期的な影響から保護するため、60cm の良質材で保護し、側斜面にはベンチを設けた。

別の道路工事では硫酸塩土壌の劣化が懸念されたため、材料を緩く積み上げることで黄鉄鉱の酸化が促進され、膨潤の可能性が大幅に緩和された。盛土施工中は水の浸入を防ぐため、各層は平滑な転圧仕上げを行った。最終的な覆土は水の侵入を抑制し、舗装の劣化を抑えるように設計された。不活性な花崗岩質骨材からなる厚さ 300mm の保護層が下層に敷かれ、工事の交通移動を容易にした。界面での毛細管上昇を抑えることで土工の劣化と道路界面での石膏結晶の形成の両方を防止した。この層は柔軟なひずみ緩和バリアとしても機能するため、最終的な道路建設でもそのまま残された。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 8.10.5 暴露後のパイライト泥岩における石膏結晶の急速な劣化と成長

黄鉄鉱を含む盛土からの排水は pH が 2～4 の範囲にあり、溶存硫酸塩や鉄、マンガン、アルミニウムなどの金属が非常に高濃度に含まれる強酸性であることがある。これらの水が大気に触れると、鉄は急速に酸化されて黄土色に沈殿し、水路の汚染やフィルター、パイプ、排水管の閉塞を引き起こす。

8.10.4.6 化学的な安定化処理

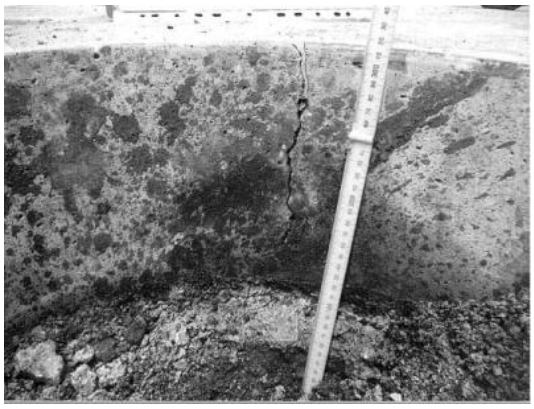
石灰、PFA、スラグ、セメントなどによる土壌の安定処理は材料の土質特性を向上させるために行われることが多い。これは単に湿った土壌を乾燥させ、土工材料として使用するのに適するようにすることもあるが、現場においてより強固な層を形成し、覆土や非結合下地盤として使用することも含まれる。

安定化処理材と土壌との反応により pH 値が 12 を超える強アルカリ性環境下でセメント系化合物が形成される。このような高い pH 値では土壌中の硫酸塩がセメント系化合物と反応し、エトリンガイト（$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$）と呼ばれる高膨張性のカルシウムサルホアルミネート水和物や石膏を形成する。これらの鉱物もまたコンクリートに対して膨張性の影響を及ぼす。pH が高いと黄鉄鉱の酸化が促進され、硫酸塩がさらに生成されるため、この現象はさらに悪化する。この反応はすぐには起こらないことが多いが、季節的な水の浸入のためか、数ヵ月後に起こることがある。通常、膨張材を頻繁に交換する必要があるため、その修復には多大な費用と手間がかかる。

8.10.4.7 床スラブの隆起

床版の盛り上がりは、下層の盛土に石膏が析出することによって生じることがある。これは、下層材料に高い硫酸塩または硫化物が含まれ、水位が高い場合に発生する可能性がある。建物は表面浸透を妨げるため、下層の盛土で乾燥が起こる。建物内部が暖房されている場合、地下水は毛細管現象によって床スラブ下の盛土材に引き込まれる。水は蒸発し、充填材の空隙で石膏が結晶化する。最終的に空隙は充填され、さらに結晶化が進むと、盛土材の膨張とその上にある床スラブの隆起につながる。空隙が完全に充填される前に、粒子内および粒子間で結晶化が起こる可能性があり、非常に高い膨潤圧が発生する。盛土成分の隆起と破壊に加えて、地盤を支える要素や床スラブが隆起する可能性がある。

この問題は、高濃度の硫化物や硫酸塩を含む泥岩や過固結粘土の上に建物が建っている場合によく起こる。建設工事時の掘削等によって、空気が硫化物の一部を酸化させ、その生成物が毛細管現象によって床スラブ直下の盛土に運ばれ、石膏の膨張形成によって盛土が隆起する可能性がある（図 8.10.6）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 8.10.6 硫酸塩による地盤隆起によって生じたコンクリート床スラブのひび割れ

多くの事故は硫酸塩や硫化物に富み、高い水位にある地層に直接建設したことに起因しているが、床スラブの下に使用する埋め戻しに硫酸塩、硫化物、その他の膨張性鉱物が多量に含まれている場合も、同様の問題が発生する可能性がある。黄鉄鉱を含む地産の石灰質泥岩が構造物の現場打ちコンクリート床版の下の埋め戻し材として使用された時、床がドーム状に隆起し、時には壁、特に出入り口や窓の開口部の角に、広範な歪みや斜めのひび割れが生じた。膨張は進行性で、建築後数年経ってから構造体に損傷が発生し、修復された後も続いた。

硫酸塩土壌中の硫酸塩はコンクリートと反応し、エトリンガイトなどの膨張性化合物を生成し、コンクリートが膨張し、ひび割れや崩壊を引き起こす（硫酸塩攻撃）。硫酸塩が水分を吸収することで土壌が膨潤し、乾燥すると収縮する膨潤があり、膨潤土と同様な問題を引き起こす。硫酸塩は金属構造物やパイプラインの腐食を促進し、特に地下に埋設された金属製のインフラが影響を受ける（図 8.10.7）。水の透過性が低下することがあるため、排水問題を引き起こす可能性がある。



(a) 硫化土壌の様子　　(b) 硫酸塩による水路の腐食

出典: Acid Sulfate Soils, Implications for Rural Landholders, Western Australia 2008

図 8.10.7 硫酸塩/硫化土壌の被害事例

硫化物土壌が酸化されると硫酸が生成され、土壌の pH が低下（酸性化）し、周囲のコンクリートや金属構造物が酸攻撃を受け、劣化や腐食が生じる。酸性条件下では、土壌中の粘土鉱物が分解し、地盤の強度が低下し、軟弱地盤と同様な問題を引き起こす。酸性化により土壌中の重金属が溶出しやすくなり、環境汚染を引き起こす可能性があり、特に地下水汚染が問題となる。

8.10.5 硫酸塩/硫化土壌の対策方法

材料としての使用を想定した硫酸塩/硫化土壌の対策方法として、以下が挙げられる。

- 硫酸塩含有量が高いことが知られている地域の土壌の使用を避ける。
- 土壌を混ぜて硫酸塩の濃度を薄める。例えば、切り込みの底の地層を掘り過ぎて他の土壌と交換するか、少なくとも掘削した同じ土壌を貯蔵してから再敷設する。
- 適切な排水処理により、硫酸塩・硫化物を含む土壌に水が浸入するリスクを低減させる。
- 盛土表面にシールコートを塗布する。これによりある程度の防水効果が得られる他、乾燥収縮によるひび割れのリスクが低減され、水が容易に浸入するのを防ぐ。

硫酸塩/硫化土壌の効果的な対策は、硫酸塩・硫化物を含む土を使用せず、除去することである。化学的安定処理は逆効果を生む可能性があるので留意する必要がある。

8.11 炭酸塩土壌

8.11.1 特徴

炭酸塩土壌は、主に炭酸カルシウム（CaCO3）や炭酸マグネシウム（MgCO3）などの炭酸塩鉱物を含む土壌であり、特に乾燥地域や半乾燥地域で広く分布している。形成状態により硬い岩、砂利、砂、粘土、シルトから非常に細かくて緩いものまで様々である。そのため、土壌の特性には多くの不確実性とばらつきがある。風化した石灰岩や炭酸塩鉱物の粒子から形成されたものは比較的堅固な表面を持つ。珊瑚土壌も炭酸塩土壌に含まれ、地質学的な年代が進めば石灰岩となる。

類義語としては石灰土壌（Lime soil）、泥灰土（Marl soil）、石灰質土壌（Calcareous soil）がある。石灰土壌は炭酸カルシウムを多く含む土壌に分類されるので可溶性地盤として取り扱った。

8.11.1.1 炭酸塩土壌の形成過程

炭酸塩土壌の主な供給源は炭酸カルシウム（CaCO3）を含む岩石で、これらの岩石が風化・溶解・沈殿する過程を通じて、土壌中に炭酸塩が蓄積される。風化作用は物理的および化学的なプロセスを通じて岩石を細かく砕き、土壌を形成する。炭酸塩土壌の化学的風化が重要であり、炭酸カルシウムは水と二酸化炭素（CO2）と反応して、炭酸水素カルシウム（$Ca(HCO_3)_2$）を形成し、これが水に溶解しやすくする。溶解した炭酸水素カルシウムが蒸発する時に再び炭酸カルシウムとして沈殿し、土壌中に蓄積される。この過程は乾燥地帯で特に顕著であり、蒸発量が降水量を上回る地域で炭酸塩土壌が形成されやすくなる。物理化学的な炭酸塩沈殿（拡散した小さな結晶や団塊など）の結果である場合はアルファカルクリートと呼ばれ、生物学的影響を受けた炭酸塩沈殿（ライゾリシス、細菌/真菌のマット/フィラメントなど）の結果である場合はベータカルクリートと呼ばれる。

カルクリートは以下のメカニズムによって生成される

- 土壌断面内の炭酸塩の堆積、または塵や雨による供給（下降モデルによる）
- 炭酸塩を多く含む地下水の土壌断面への上昇（上昇モデルによる）
- 炭酸塩岩盤のその場での風化/削剥（変質モデル）
- 生物による炭酸塩の沈殿（根生成モデル）

8.11.1.2 物理的性質

炭酸塩土壌の粒度分布はその形成過程や母岩の種類によって変わり、一般的には、砂質から粘土質までの広範な粒度分布を持つ。乾燥密度は 1.2～1.6 g/cm^3、飽和密度は 1.6～2.0 g/cm^{3}の範囲である。透水係数は 10^{-4}～10^{-6} cm/s の範囲である。炭酸塩鉱物は水分を吸収して膨張する特性があり、膨潤率は 5～15%の範囲になる。

8.11.1.3 化学的性質

炭酸塩土壌の pH は一般的にアルカリ性である。高い pH は土壌中の微生物活動や化学反応に影響を与える。pH 値はおよそ 8.0～9.5 である。電気伝導率 EC は、土壌中の溶解塩濃度を示す指標であり、電気伝導率が高くなると腐食をもたらす。電気伝導率は 0.5～2.0 dS/m で腐食リスクは高い。

表 8.11.1 電気伝導率による腐食のリスク

電気伝導率 EC（dS/m）	腐食リスク	環境の例
< 0.05	非常に低い	純水（脱イオン水）
0.05~0.2	低い	一般的な淡水（河川水・地下水）
0.2~0.5	中くらい	軟水域（湖水・一部の地下水）
0.5~2.0	高い	塩分を含む水（汽水・高ミネラル地下水）
2.0~10.0	非常に高い	塩害土壌、塩水、海岸地下水
>10.0	極めて高い	海水、工業排水

出典: JICA 調査団

炭酸塩土壌の CEC（陽イオン交換容量）は粘土鉱物や有機物含量の影響を受けるが、CEC は一般に 10～30cmol（+）/kg でシルト質土壌に相当する値である。炭酸塩含量 $CaCO_3$ %は一般に 10～40%と高い。表 8.11.2 に炭酸塩含有量による土壌分類を示す。

表 8.11.2 炭酸塩含有量による土壌分類

炭酸塩含量（$CaCO_3$ %）	土壌分類	特徴
<0.5	Non-calcareous	ほぼ炭酸塩を含まない土壌（酸性土壌）
0.5~5	Low carbonate	炭酸カルシウムがわずかに含まれるが、影響は少ない
5~15	Moderate carbonate	作物栽培に影響を及ぼす可能性がある（アルカリ性傾向）
15~30	High carbonate	pH が 7.5 以上になりやすく、作物の栄養吸収に影響
>30	Calcareous soil	pH は 8.0 以上で、鉄やリンの固定が問題となる

出典: JICA 調査団

8.11.1.4 母材

母材はほとんどが炭酸塩岩であるが、たまに大理石もある。炭酸塩岩の代表は石灰岩であり、次にドロマイト（苦灰岩）である。特殊な炭酸塩岩としては砂岩-石灰岩混成（Marl）、珪質炭酸塩岩（Siliceous Carbonate Rock）、灰角礫岩（Calcareous Breccia）がある。表 8.11.3 に炭酸塩岩の種類を、表 8.11.4 に石灰岩の種類をそれぞれ示す。

表 8.11.3 炭酸塩岩の種類

分類	主な種類	成分	酸反応（HCl）	主な形成環境
石灰岩（Limestone）	泥質石灰岩、生物起源石灰岩、オオイド石灰岩、チョーク、トラバーチン、コーキナ	$CaCO_3$	強い発泡	海洋 サンゴ礁 湖
ドロマイト（Dolomite）	一次ドロマイト、二次ドロマイト	$CaMg(CO_3)_2$	弱反応（粉砕すれば強反応）	蒸発環境 乾燥地域
混成岩	マール（泥灰土、Marl）、シリカ質炭酸塩岩	$CaCO_3$+ 粘土/SiO_2	反応するが鈍い	深海、湖沼
破砕岩	石灰角礫岩	$CaCO_3$	強い発泡	断層地帯 地震活動域

出典: JICA 調査団

表 8.11.4 石灰岩の種類

石灰岩の種類	特徴
泥質石灰岩（Micrite）	微細な炭酸カルシウム粒子で構成される
生物起源石灰岩（Bioclastic Limestone）	貝殻・サンゴ・有孔虫の化石を多く含む
オオイド石灰岩（Oolitic Limestone）	球状のオオイド（炭酸カルシウムの粒）を含む
チョーク（Chalk）	非常に微細な生物の殻（コッコリスなど）から成る白い石灰岩
トラバーチン（Travertine）	温泉沈殿物から形成される多孔質の石灰岩
コーキナ（Coquina）	貝殻の破片が集積して形成

出典: JICA 調査団

8.11.1.5 泥灰土 Marl

石灰質物質と粘土が同時に堆積して形成された岩石はマール Marl と呼ばれる。泥灰土の形成は石灰岩、ドロマイト、炭酸塩砂岩などの親炭酸塩岩の物理的および化学的風化の結果である。

泥灰土の炭酸塩含有量は 100%から非常に低いパーセントまでの範囲となるが、有機物、シルト、砂などの他の不純物も存在する場合がある。ほとんどの場合、泥灰土は炭酸塩堆積物の固められた、またはセメント化された層として存在する。

泥灰土の種類と特性の大きなばらつきにより、文献では様々な定義が与えられている（表 8.11.5）。

表 8.11.5 泥灰土の定義

研究者	年	定義と属性
Terzaghi and Peck	1967	緑色の硬い～非常に硬い海成石灰質粘土
Pettijohn	1975	35~65%の炭酸塩と粘土の含有量を含む土または岩のような物質
Fookes and Higginbottom	1975	炭酸カルシウムと粘土の単純な二成分混合物
McCarthy	1977	柔らかい石灰岩
Challinor	1978	粘土鉱物、アラゴナイト、方解石を含む混合岩石で、通常はシルトなどの副成分が少量含まれる。
Saudi-ARAMCO	1978	様々な量の粘土が混じった柔らかい石灰岩
Sowers and Sowers	1979	炭酸カルシウムを含む水に沈着した砂、シルト、粘土
Bates and Jackson	1980	粘土と炭酸カルシウムの密接な混合物からなる様々な材料に一般的に緩く適用される古い層。
Mitchell, R.S. w14x	1985	柔らかい石灰質粘土を多く含む鉱物
Blyth and de Freitas	1985	石灰質泥岩
Al-Tayyib et al.	1985	炭酸塩土壌は、その形成は炭酸塩岩の物理的および化学的風化に起因する
McLean and Gribble	1985	淡水湖に堆積した砕けやすい炭酸塩土
Qahwash	1989	石灰質堆積物
Mitchell	1993	比較的純粋な炭酸カルシウムから、生化学的プロセスによって形成された炭酸カルシウムと泥および有機物の混合物まで多岐にわたる。
Aiban	1994	細粒石灰質堆積物

出典: Performance of a stabilized marl base a case study, S. A. Aiban, H. I. Al-Abdul Wahhab, O. S. B. Al-Amoudi, H. R. Ahmed（1998）

泥灰土は主に石灰分（カルシウムカーボネート）と粘土で構成されており、その他の鉱物成分や有機物も含まれることがある。母岩は石灰岩、チョーク、ドロマイト、粘土岩であり、これらが風化・侵食されて粘土鉱物と混ざり合うことにより形成される。泥灰土は主に以下の成分で構成されている。

- カルシウムカーボネート：泥灰土の主要成分であり、石灰岩の性質を有する。
- 粘土鉱物：カオリナイト、イライト、モンモリロナイトなどの鉱物が含まれる。
- 有機物：堆積環境によっては、有機物が多く含まれることがある。

泥灰土の構造は通常、細粒で均一な状態であるが、堆積環境によって層状や帯状の構造を持つことがある。色は白から灰、黄、赤褐色まで様々で、含まれる成分に応じて変わる。

土壌の比重は 2.66～2.92 の範囲である。方解石（5%～96%）、石英（3%～72%）、ドロマイト（0～20%）が幅広く含まれている。石英と方解石の割合が高いため、泥灰土は粗粒で非塑性挙動を示すと考えられている。



出典: Marl crumbling decrease using geopolymer mixtures– lessons from experimental tests in the vicinity of Fez, Morocco, M. Akdim, L. Mesrar, A. Alami, S. Sabah , R. Jabrane（2022）

図 8.11.1 泥灰岩の崩れかけた様子

8.11.2 炭酸／炭酸塩土壌の分布地域

炭酸／炭酸塩土壌は主に乾燥地域や半乾燥地域に分布する。炭酸塩土壌としての分布図はないが、母岩となる炭酸塩岩 Carbonate rocks の分布図があり、図 8.11.2 に示す。分布する主な地域は、米国（カリフォルニア州、ネバダ州、アリゾナ州、ニューメキシコ州、テキサス州などの乾燥地域、グレートベースン: ユタ州)、メキシコ、アルゼンチン（パンパ地域およびパタゴニア)、ペルー（アンデス山脈)、スペイン、イタリア、ギリシャ、ウクライナ、ロシア南部、モロッコ、アルジェリア、チュニジア、リビア、エジプト、エチオピア、ケニア、タンザニア、サウジアラビア、イラン、カザフスタン、ウズベキスタン（アラル海周辺)、インド（タール砂漠)、オーストラリアなどである。

泥灰土は､水中や湿潤な環境で堆積することが多く､河川や湖沼の底､海洋の浅い部分などにある。ヨーロッパ（パリ盆地、ジュラ山脈)、北米（アパラチア山脈)、中東（ナイル川)、南米（パタゴニア)、アジア（黄土高原）に広く分布している。

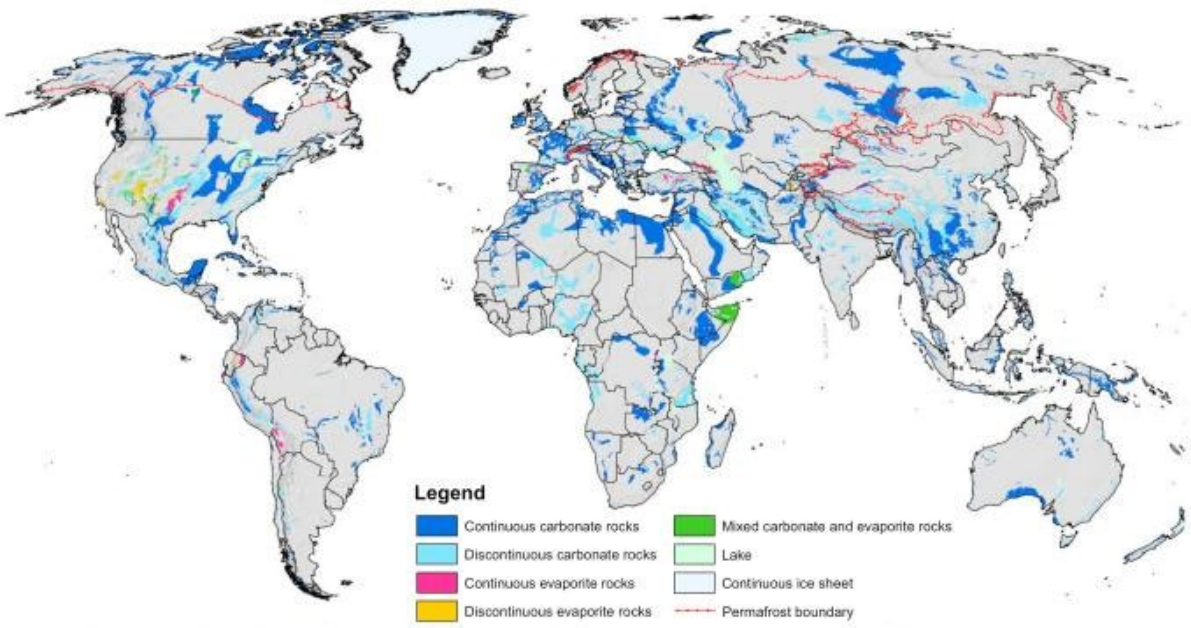


Fig. 1 Generalized presentation of the World Karst Aquifer Map (WOKAM) and its legend (without springs, caves and some other details), showing karstifiable carbonate and evaporite rocks that represent potential karst aquifers (modified after Chen et al. 2017b). The present paper focuses on carbonate rocks

出典：Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, N. Goldscheider, Zhao Chen,Augusto S. Auler et al.（2020）

図 8.11.2 世界の炭酸塩岩の分布図

8.11.3 炭酸／炭酸塩土壌の判定方法

8.11.3.1 酸滴加試験

酸滴加試験は最も簡単かつ一般的な炭酸塩土壌の判定方法で、塩酸（HCl）などの強酸を土壌サンプルに滴下し、発泡反応を観察する。炭酸塩を含む土壌は、塩酸と反応して二酸化炭素（CO_2）を放出し、泡が発生する。この反応は以下の化学式で表される。

$$CaCO_3+2HCl \rightarrow CaCl_2+H_2O+ CO_2 \uparrow$$

$$MgCO_3+2HCl \rightarrow MgCl_2+H_2O+ CO_2 \uparrow$$

酸滴加試験の結果は泡の発生量と速度で評価される。泡が多く、速く発生するほど、土壌中の炭酸塩濃度が高いことになり、表 8.11.6 のように判定する。

表 8.11.6 炭酸塩含量による判定

反応状態	判定
強い反応	炭酸塩含量が非常に高い
中程度の反応	炭酸塩含量が中程度
弱い反応	炭酸塩含量が低い
反応なし	炭酸塩をほとんど含まない

出典: JICA 調査団

8.11.3.2 気圧法（Calcimeter Method）

酸滴下試験は観察で判定するが発生する CO_2 の体積もしくは圧力を測定して炭酸塩含有量を測定する。試験は以下の手順で行われる。

1. 炭酸塩土壌を乾燥（105℃、24 時間）し、水分除去後約 1g を密閉容器に入れる。
2. 一定量の塩酸（HCl, 1M）を試料に加えて炭酸塩と反応させ、CO_2を発生させる。
3. 発生した CO_2の圧力をマノメーターで測定する。一部のカルシメーターでは CO_2の体積測定も可能。
4. 標準曲線（既知の $CaCO_3$含量と CO_2圧力の関係）を用いて、土壌中の炭酸塩（$CaCO_3$, $MgCO_3$）含量を求める。

表 8.11.7 に炭酸塩含有量による判定を示す。

表 8.11.7 $CaCO_2$ 含有量による判定

$CaCO_2$ 含有量（%）	炭酸塩土壌の分類	特徴
< 0.5	Non-calcareous Soil	炭酸塩をほとんど含まず、酸性化しやすい
0.5~5	Low Calcareous Soil	炭酸カルシウムの影響は少ないが pH は 7.0 付近
5~15	Moderate Calcareous Soil	石灰質の影響が顕著で pH 7.5 以上になりやすい
15~30	Highly Calcareous Soil	強アルカリ性（pH 8.0 以上）、作物栽培に影響を与える
>30	Strongly Calcareous Soil	ほぼ石灰岩に近い土壌で、養分固定が著しく発生

出典: JICA 調査団

8.11.3.3 石灰要求度試験

石灰要求度試験は土壌中の炭酸塩濃度を定量的に評価するための方法で、滴定法を用いて行われる。土壌サンプルに適量の酸を加えた後、その酸の過剰量を滴定することで炭酸塩の濃度を求める。得られた炭酸塩濃度から表 8.11.8 のように判定する。

表 8.11.8 炭酸塩濃度による判定

炭酸塩濃度（ppm）	判定
>5,000	非常に高い
2,000~5,000	中くらい
<2,000	低い

出典: JICA 調査団

8.11.3.4 炭酸塩測定法の比較

炭酸塩を測定する方法には上記以外に重量法と X 線解析法（XRD）がある。それぞれの特徴は表 8.11.9 のようになる。

表 8.11.9 炭酸塩測定法の比較

測定法	原理	測定範囲（$CaCO_3$ %）	精度	所要時間	メリット
気圧法（Calcimeter）	CO_2圧力測定	0.5～50%	中～高	10～30 分	簡単で迅速、特殊な試薬不要
滴定法（Acid Titration）	酸と反応	0.1～50%	高	30～60 分	$CaCO_3$ のみを定量可能
重量法（Gravimetric Method）	CO_2損失重量	5～100%	高	1～2 時間	正確だが時間がかかる
XRD（X 線回折法）	炭酸塩鉱物のピーク分析	0.01～100%	非常に高い	数時間	鉱物組成も分析可能

出典: JICA 調査団

8.11.3.5 pH 測定試験

炭酸塩土壌は通常 pH が 7 以上のアルカリ性を示すので、土壌の pH を測定することで炭酸塩含量の推定が可能となる。表 8.11.10 に pH による炭酸塩含量の判定を示す。

表 8.11.10 pH による判定

pH	アルカリ度	炭酸塩含量の判定
>8	高い	非常に高い
7~8	中程度	中程度
<7	酸性または中性	低い

出典: JICA 調査団

8.11.4 炭酸／炭酸塩土壌の工学的問題点

8.11.4.1 膨潤性

炭酸塩土壌は膨潤性土と同じ挙動を示すが、そのメカニズムは一般的な膨潤性土とは異なる。雨期には $CaCO_3$が部分的に溶解し、土壌粒子の隙間を広げることで体積が膨張する。乾期には $CaCO_3$が再沈殿して粒子間の空間を埋めるため収縮する。また、炭酸塩土壌にスメクタイトを含む場合があり、高濃度の炭酸塩を含む土壌では Na^+ や Mg^{2+} の影響で膨潤性土となることがある。これらの挙動により、膨潤性土と同じような道路や舗装の表面の亀裂や構造物の亀裂などの問題を引き起こす。

8.11.4.2 地盤の安定性

炭酸塩土壌は強度が不均一であり、沈下や地盤陥没のリスクがある。炭酸カルシウムが水に溶けやすく、雨水や地下水と反応して溶解することで、地盤が不安定になることがあり、建物や構造物の基礎が沈下し、ひび割れや倒壊する可能性がある。

8.11.4.3 化学反応による構造物の劣化

炭酸塩土壌は高いアルカリ度のため、コンクリートや鉄筋などの建材と化学反応を起こしやすい。炭酸カルシウムがコンクリートの成分と反応してエトリンガイトを生成し、コンクリートの膨張とひび割れを引き起こすことがある。

8.11.4.4 泥灰土の道路材料

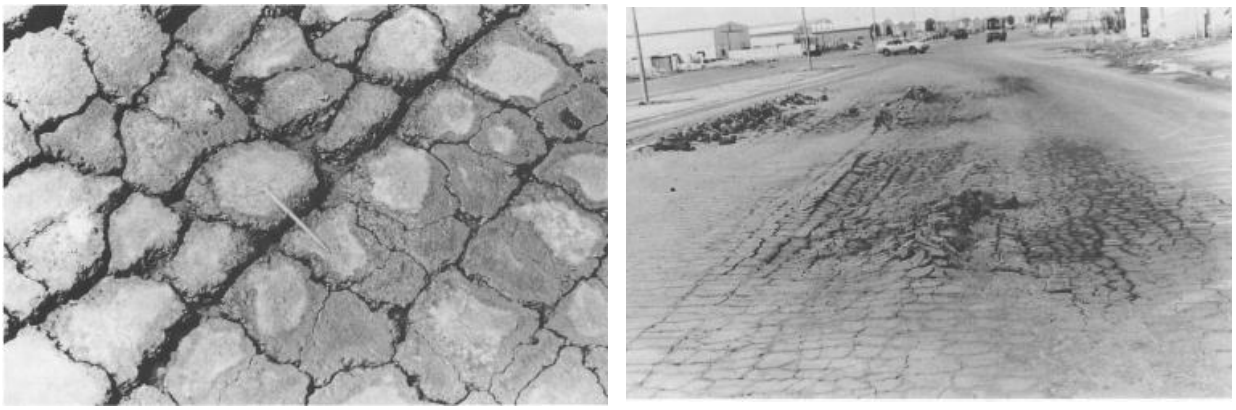
泥灰土の使用が直面する問題の 1 つは、建設が基準に従って実施されたにもかかわらず、道路に陥没や沈下が発生することである。泥灰土で作られた舗装の問題は、様々な方向に広がる小さな亀裂の形成から始まり、その後ワニ模様の亀裂パターンを形成する。これに続いて小さな亀裂が広がり、アスファルト層が小さなブロックで崩壊する。アスファルトブロックの変位が発生し、窪みが形成される。アスファルト層と基層が完全に崩壊し、多くの場合、道路は通行不能になる。地下水位が地表に近い地域で泥灰土を基層材料として使用した場合、交通量の少ない新しく建設された道路でも、これらの典型的な劣化モードが見られる。建設から数週間後に一部の道路が完全に崩壊するのを観察することは珍しくない。

泥灰土には様々な種類の炭酸塩物質が大量に含まれているため、泥灰土を道路材料として用いる場合は次の留意が必要である。

- ✓ 最適な水分含有量よりも乾燥した側で圧縮されると、崩壊しやすくなり、浸水時に膨張する可能性があり、強度が大幅に低下する。

✓ 最適な水分含有量よりも湿った側で圧縮すると、余分な水が原因で土壌団粒マトリックスが弱くなり、強度が低下し、圧縮性が高くなる。

また泥灰土の一部では膨潤性の特性があるので、膨潤土と同様な道路の劣化の問題がある。図 8.11.3 は泥灰土を基層として使用した場合の舗装の典型的な劣化の事例である。泥灰土を盛土材料として使用する場合、経済的および環境的理由から石灰処理が規定されている。特定のケースでは石灰処理によって建設コストが 3 倍になることがある。



出典: Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia, Saad A. Aiban（1955）

図 8.11.3 泥灰土を基層として使用した場合の舗装の典型的な劣化（施工後 3 か月）

8.11.5 炭酸／炭酸塩土壌の対策方法

炭酸塩土壌の膨潤性を対策する方法としては農業でも行われている石膏（CaSO4）による安定処理がある。炭酸塩土壌は元々石灰岩の風化からできる土壌であるため、石灰による安定処理は、可溶性交換イオンを Ca+と交換することにより膨潤性を抑えることができたり、石灰が土壌中のケイ酸（SiO_2）やアルミナ（Al_2O_3）と反応しポゾランを形成したり、炭酸塩の再結晶化を起こしたりするので効果的と考えられるが、CaCO3 含有量が 15%以上になると石灰反応が抑制される可能性がある。セメント安定処理も CaCO3 含有量が 15%以上になるとセメントの水和反応を阻害し、強度向上効果がでない可能性がある。

8.11.5.1 火山灰を用いた安定処理

火山灰をポゾラン安定剤として泥灰土に用いることは有効であり、以下の効果が期待できる。

- UCS を高め、最適水分含有量が増加し、最大乾燥密度が低下する。
- 液性限界 LL と塑性限界 PL が大幅に増加し、PL の増加速度が LL よりも速いため、塑性指数 PI は低下する。
- 火山灰の添加により化学反応が起こり、強度と弾性係数が増加し、時間が長くなるほど効果が発現する。
- 火山灰含有量が増加すると、泥灰土の膨張が減少し、延性が低下する。
- 硫酸塩の影響を大幅に軽減でき、膨張を減らすことができる。

8.11.5.2 ナノ $CaCO_3$（NC）を用いた安定処理

ナノ材料の特徴は自由表面に多数の原子と分子が存在し、物理的、化学的、反応性の観点から表面特性に及ぼす。また、ナノ粒子は表面積が大きく表面電荷も大きいため、炭酸塩土壌に少量加えるだけでも顕著な改善が期待できる。これまでの研究における知見を以下に示す。

- 軟弱土に添加するナノ土壌粒子の数を変えると圧縮強度とせん断強度が向上する。
- 膨張と収縮の歪みの両方が減少する。
- 圧縮強度が向上し、耐腐食性が強化され、水和生成物の生成が促進される。
- NC の添加量が増えると初期水和の促進効果が高まり、NC 粒子のシーディング効果により強度発現が改善される。
- NC とナノ SiO_2（NS）の両方がコンクリートの圧縮強度と曲げ強度を改善できる。
- NS は多孔質領域を減らすための効果的な充填材として機能し、ポゾラン効果によってセメントの水和プロセスを加速する。

8.12 酸性土壌

8.12.1 特徴

土壌は非常に不均質な物質であり、そのpHを純粋な溶液のように正確に測定することはできない。土壌のpHが6.6～7.3である場合、土壌は中性であると言われる。土壌のpHは一般に4～10の範囲である。良質な農業用土壌のpHは6.0～7.0程度である。

pH値が6.5未満の土壌は酸性土壌と呼ばれる。土壌の酸性度には、活性酸性度、交換性酸性度、非交換性酸性度（または滴定性酸性度）の3つのカテゴリーがある。活性酸性は、土壌溶液中のH+イオンに起因するもので、pHの基となる。交換性酸性は電位酸性とも呼ばれ、単位はcmole（p^+/kg）で、粘土や有機物に吸着したH^+イオンやAl^{3+}イオンから構成される。滴定酸性は土壌有機物の弱酸性官能基の解離と、水酸基性ケイ酸塩の脱プロトン化によって生じる。アルミニウムと水素の交換部位が占める割合が大きいほど、pHは低くなり、土壌の酸性度は高くなる。USDA、NRCS（1998）はpH値に基づいて土壌を表 8.12.1のように分類している。

表 8.12.1 土壌の酸性度とアルカリ度による分類

酸性度とアルカリ度のカテゴリー	pH範囲
極めて酸性	3.5-4.4
非常に強い酸	4.5-5.0
強酸性	5.1-5.5
中酸性	5.6-6.0
弱酸性	6.1-6.5
中性	6.6-7.3
弱アルカリ性	7.4-7.8
中アルカリ性	7.9-8.4
強アルカリ性	8.5-9.0

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

酸性硫酸塩土壌は、pHが非常に低いことに加えて、黄鉄鉱（FeS_2）の酸化によって生成される遊離硫酸が優勢である。特に河口湿地や沿岸湿地の土壌には、排水時に酸化して硫酸を生成する硫化物質が蓄積しているものがある。pHは、水が飽和している間はほぼ中性に近い値を保つ。しかし排水すると、これらの土壌は強酸性になり、「潜在性酸性硫酸塩土壌」と呼ばれる。酸性硫酸塩土壌や潜在性酸性硫酸塩土壌は通常、河口や沿岸の環境下で発達するため、その一部は同時に塩分を含むことがある。このため、酸性硫酸塩土壌は塩害土壌にも含まれることが多い。世界の酸性表土の約67%、および下層土の約79%は強酸性（pH5.0～5.2以下）である。これらの土壌では、アルミニウムの毒性が深刻な問題となっている。

8.12.2 酸性土壌の形成

土壌の酸性化は自然および人為的な様々な原因によって生じる。自然による酸性土壌は気候、母材、土壌、地形、植生など、様々な条件下で発生する。土地の利用、土壌や作物の管理方法は、人為的な土壌酸性化の主な原因である。しかし、土壌中の酸や水素イオンの主な発生源は、大気や雨水、鉱物の風化・変質、CO_2 や有機酸の放出を伴う有機物の分解、微生物や根の呼吸、根からの分泌物、塩基と交換する H^+の放出、産業廃棄物や鉱業廃棄物、肥料などである。土壌酸性化のプロセスには、有機酸や無機酸の生成、H^+と Al^{3+}塩基性陽イオンの交換、塩基の溶出などが含まれる。

湿度の高い地域では土壌はいくつかの理由で酸性になる。以下のように大気中の CO_2 の溶解のために、雨水は反応して酸性になる。

$$H_2CO_3 = HCO_3^- + H^+$$

$$H_2O + CO_2 = H_2CO_3$$

$$HCO_3^- = CO_3^{2-} + H^+$$

溶存塩基や懸濁塩基を含まない場合、大気中の二酸化炭素と平衡状態にある雨水の pH は通常 5.5 前後である。砂岩のような中性の母岩から発生する湿度の高い熱帯の土壌のほとんどは、この値に近い pH を持つ。炭酸の生成につながる同様の反応が土壌中の水でも起こり、大気の拡散、有機物の分解、根や微生物の呼吸など、様々な過程で CO_2 が生成される。しかし、これらのプロセスは、気候や植生によって速度は異なるものの、湿度の高い熱帯土壌を含むすべての土壌で機能している。

大気中には硫黄や窒素の酸化物も存在し、雨水中に酸を発生させることがある。

$$NO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_2$$

$$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO$$

$$SO_2 + O_2 \rightarrow SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

酸性雨の約 4 分の 1 は硝酸（HNO_3）である。残りの 75%は硫酸（H_2SO_4）である。工業化地域の一部の土壌では酸性雨が土壌酸性化の原因となっている。酸性雨は実際には汚染された雨水である。

湿度の高い地域では土壌は集中的に風化・浸出される。風化は鉱物を分解し、浸出は風化の浮遊物と可溶性生成物を除去する。土壌の細粒分はカオリナイトのような活性の低い 1:1 タイプの粘土と、鉄とアルミニウムの酸化物または三二酸化物で占められている。これらの土壌は CEC と BSP が低いため、緩衝能が低く、酸性化しやすい。このような性質は Oxisols や Ultisols によくある。アルミニウムイオン（Al_3+）は交換錯体に吸着され、加水分解されて H^+を生成する。水素イオンは吸着された塩基に取って代わり、土壌を pH 5.5 以下の酸性にする。

$$Al^{3+} + 6H_2O \leftrightarrow Al(H_2O)_6^{3-} \leftrightarrow Al(OH)(H_2O)_5^{2+} + H^+$$

降水量が蒸発散量を上回り、水の下方向への移動が大きい多雨地域では、Ca^{2+}や Mg^{2+}といった塩基性陽イオンが土壌から溶出し、土壌の酸性化につながる。

炭酸以外の無機酸も土壌中で生成され、土壌酸性化の原因となる。これらの酸には硝酸、塩酸、硫酸などがある。土壌中の最も重要な無機酸性化反応のひとつは、硫黄の酸化である。鉱山の残土やマングローブの埋立地などではもともと硫黄分が多く、酸性化が深刻な問題となっている。河口域やマングローブ湿地では土壌中にかなりの黄鉄鉱（FeS_2）が存在する。これらの土壌の pH は中性に近いが、埋め立てや排水が行われると黄鉄鉱が酸化されて硫酸が生成され、土壌の pH は pH3.0 以下と極端に低くなる。次のような反応が容易に起こり、酸化された硫黄イオン 1 個につき 2 個の水素イオンが生成される。石灰化資材が豊富に供給されない限り、土壌の pH は非常に低い値に追い込まれる。このような土壌は酸性硫酸塩土壌として知られ、スルファケント（Sulfaquent）とスルファケプト（Sulfaquept）という大きなグループに分類される。

$$2FeS_2 + 7O_2 + 6H_2O = 4SO_4^{2-} + 8H^+ + 2Fe(OH)_3$$

少量の有機酸は大気中の沈殿物や樹冠からの落下によって土壌に入るが、ほとんどの有機酸は根からの滲出物や溶脱、土壌微生物からの放出によって生じる。土壌中で稲わらが分解される際に、クエン酸、シュウ酸、ギ酸、マレイン酸が生成される。これらの酸は好気的条件下では安定しない可能性がある。土壌の酸性度に対するこれらの酸の寄与については研究されていないが、クエン酸とシュウ酸はリン酸三カルシウムと岩石リン酸からのリン酸の可溶化に大きく寄与することがわかっている。

有機物の由来となる植物によっては多くの有機物も酸性化する。植物の中にはかなりの量の有機酸を含むものや、残渣の分解中に有機酸を生成するものがある。一部の植物の残渣は塩基性が低いため、そのような植物を長期間栽培すると、その場所が酸性に傾く可能性がある。このように、植生は長期的に土壌反応に影響を及ぼす重要な要因となりうる。植物は、土壌中の陽イオンや陰イオンの除去、滲出物や分泌物、残渣や分解産物によって、酸性またはアルカリ性に寄与する。マメ科植物は非マメ科植物に比べて、陰イオンに比べて陽イオンを多く取り込むため、特に酸性化しやすい。マメ科植物は土壌から硝酸塩をほとんど取り込まないが、これは窒素需要のほとんどが植物微生物による窒素固定によって満たされるためである。マメ科植物や穀類を含む多くの作物植物の酸性化の可能性がある。一部の樹種の中には、落葉中の塩基が低いため、酸性化するものもある。

窒素肥料とリン肥料は土壌への水素イオンの主要な供給源となる。ほとんどのアンモニウム（NH^{4+}）を主成分としており、最終的にアンモニウムが硝酸塩（NO^{3-}）に変換され、水素イオンが放出される。

$$NH_4^+ + 2O_2 = NO_3^- + 2H^+ + H_2O$$

つまり、アンモニウムイオンが硝酸塩に変換され、2 つの水素イオンが生成される。一般的な窒素肥料は尿素［$CO(NH_2)_2$］で、pH が 6.3 未満の土壌では以下のように分解される。

$$CO(NH_2)_2 + 2H^+ + 2H_2O = 2NH_4^+ + H_2CO_3$$

つまり、尿素 1 分子が分解されるごとに水素イオンが 2 個消費される。このため、周囲の土壌の

pH は上昇する傾向にあるが、アンモニウムイオンはその後硝酸塩に変換され、2 つのアンモニウムによって 4 つの水素イオンが放出される。したがって、尿素を施用すると短期的には pH が上昇する可能性があるが、全体的な反応は酸性化する。無水アンモニア、尿素、硝酸アンモニウムはそれぞれ施用され中で硝化した窒素 1 ポンドあたり、平均 1.8 ポンドの炭酸カルシウムの中和可能な酸性を生成する。2 つのアンモニウム含む硫安は 1 ポンドのアンモニウム態窒素を施用すると、硝化させるごとに平均 5.4 ポンドの炭酸カルシウムを中和可能な酸性として放出する。高率のアンモニア性窒素肥料を施用する生産システムでは酸性化の速度は 40kmol H^+/ha/年にも達する可能性がある。アンモニア態窒素は、その供給源が無機化、生物学的固定、肥料のいずれであれ、土壌中の好気性条件下で容易に硝化を受ける。形成された硝酸イオンは、植物の根に吸収され、植物の根を超えて溶出する。負に帯電した硝酸イオンが吸収されるごとに、負に帯電したヒドロキシルイオンが根から排泄されるため電気的バランスが保たれ、土壌の酸性化は起こらない。しかし、硝酸イオンが溶出すると電気バランスを維持するために、同量の正電荷を帯びた陽イオン（Ca^{2+}、Mg^{2+} 、K^+）も溶出する。これにより土壌が酸性化する。

トリプル過リン酸塩または第一リン酸カルシウム［$Ca(H_2PO_4)_2$］は一般的なリン酸肥料で、土壌中で水と反応し、第二リン酸カルシウム（$CaHPO_4$）とリン酸（H_3PO_4）を生成し、以下の反応に示すように水素イオンを発生する。

$$Ca(H_2PO_4)_2 + H_2O = CaHPO_4 + H_3PO_4$$

$$H_3PO_4 = H^+ + H_2PO_4^- = 2H^+ + HPO_4^{2-} = 3H^+ + PO_4^{3-}$$

リン酸肥料は通常、植物の畝の周囲に帯状に配置される。H_2PO_4 はその水素放出傾向があり、帯状の土壌の pH が非常に低くなり、周囲に徐々に拡散していく。

石灰分を多く含む土壌や石灰岩やドロストーンのような石灰質の母岩から生成される土壌では、炭酸カルシウムと反応する可能性がある。

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

また、炭酸は輝石などの一次珪酸塩鉱物の溶解を促進し、Ca^{2+}や Mg^{2+}を放出する。これらは土壌の酸性化に対する抵抗性を高め、石灰化につながる可能性がある。

$$CaMgSi_2O_6 + 4H_2CO_3 + 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^- + 2H_4SiO_4$$

石灰は様々な化学的・生化学的プロセスを通じて土壌中で生成される他の有機酸や無機酸を中和することができる。この現象は、特に乾燥した環境や石灰質の土壌において、土壌の酸性化に抵抗する。

$$CaCO_3 + heat \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow (gas)$$

$$CaCO_3.MgCO_3 + heat \rightarrow CaO.MgO + 2CO_2 \uparrow (gas)$$

$$CaO + H_2O + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O$$

表 8.12.2 土壌の酸性化に寄与するプロセス

Sources of acidity	Reactions
Carbon dioxide	$H_2O + CO_2 = H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^- = 2H^+ + CO_3^-$
Ammonium	$NH_4^+ + 2O_2 + NO_3^- + 2H^+ + H2O$
Phosphate fertilizer	$Ca(H_2PO4)_2 + H_2O = CaHPO_4 + H_3PO_4$ $H_3PO_4 = H^+ + H_2PO_4^- = 2H^+ + HPO_4^{2-} = 3H^+ + PO_4^{3-}$
Pyrite	$2FeS_2 + 6H_2O + 7O_2 = 4SO_4^{2-} + 8H^+ + 2Fe(OH)^2$
Organic matter	Decomposition and production of organic acids
Nutrient uptake by roots	Release of H^+ ions in exchange of bases
Acid rain	Reaction in atmosphere of water

Adapted from Harter (2007)

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

母岩の性質（種類、組成、テクスチャー、風化の程度）も土壌の pH に影響する。石英、長石、セスキ炭酸塩鉱物を多く含む酸性の母岩（花崗岩、流紋岩、閃緑岩）もある。これらの土壌は塩基が低いため肥沃度が低い。塩基性物質は可溶性の Al と Fe の含有量が低く、Ca と Mg の含有量が高い。これらの土壌は中性から弱アルカリ性であり、高い緩衝能力を持つ。

8.12.3 酸性土壌の分布地域

土壌の酸性化は世界中で作物生産を低下させる主な原因となっている。1970 年代には世界で約 30 億 ha の酸性土壌があったが、20 年後に 40 億 ha に増加していることが判明している。これらの土壌のうち、1 億 7800 万 ha が農業用土壌である。酸性土壌は、氷のない土地の 30%を占めている。現在では世界の耕作可能な土地の約 50%が酸性土壌であると推定されている。

表 8.12.3 に示すように酸性土壌の面積が最も大きいのは、南米、北米、アジア、アフリカである。ほとんどの地域で酸性土壌の面積は耕作面積をはるかに上回っており、酸性土壌の大部分はまだ自然の森林や草原の植生下にあることを示している。

表 8.12.3 酸性土壌の地域分布

地域		面積（M ha）
アフリカ		659
オーストラリア、ニュージーランド		239
ヨーロッパ		351
アジア	近東	5
	極東	212
	東南と大洋州	314
	北と中央	512
アメリカ	北	662
	中央	36
	南	916
世界		3,950

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman（2018）

酸性土壌は主に 2 つの地球規模のベルト（図 8.12.1）に分布する。北部のベルトは寒く湿潤な温帯気候で、南部の熱帯ベルトは温暖で湿潤な気候である。寒冷および温帯地域の酸性土壌は Spodosols、Alfisols、Inceptisols、Histosols が優勢で、熱帯地域では主に土壌分類の Ultisols および Oxisols が優勢である。

Spodosols は鉄酸化物の有無にかかわらず、アルミニウムと混合された非晶質有機物の土壌下層集積を有する。Spodosols は浸出が激しく、酸性が強い。通常肥沃度は低い。撹乱されていない Spodosols は表面に有機物が集積している。Spodosols は針葉樹林の植生の下の涼しく湿った環境で最もよく見られる。Spodosols は主に温帯地域の土壌で非常に塩基性の陽イオンが少なく、緩衝剤のない、粗い質感の母材の上に形成される。Spodosols の広い地域は北ヨーロッパ、ロシア、北アメリカ北東部にある。Spodic 層は塩基性陽イオン、鉄、有機物が表層から転流して形成され、非常に酸性になる。

Alfisols は湿潤中緯度の温帯林の下で形成される土壌である。これらの土壌では、溶脱は中程度で、塩基の状態はかなり高く（35%以上）なっている。湿潤大陸性気候と湿潤亜熱帯気候に共通するこれらの土壌はよく発達しており、粘土層と呼ばれる表層下の粘土層を含んでいる。一部の Alfisols はアフリカ、南米、オーストラリア、東南アジアの湿潤/乾燥熱帯気候で見られる。

Histosols は黄土色の表土（土壌表面の淡色の鉱物土壌層）を持っている。

Inceptisols は層分化が始まったばかりの土壌である。Inceptisols は広く分布しており、様々な生態学的環境で発生する。乾燥地帯を除くすべての気候で様々な植生と母材タイプの下にある。かなり急な斜面、若い地形面、耐性のある母材でよく見られる。

Histosols は不浸透性層まで広がる有機土壌物質を含む土壌、または厚さ 40cm 以上で黒ボク土の性質を持たない有機層を含む土壌で、通常は湿潤または飽和状態で蓄積された有機母材から形成される。これらは主に一般に沼地、湿原、または泥炭および泥土と呼ばれる土壌である。Histosols のほとんどはカナダ、スカンジナビア、西シベリア平原、スマトラ、ボルネオ、ニューギニアに分布している。ヨーロッパの他の地域、ロシア極東、フロリダ、その他の永久湿地にも小規模の地域がある。Histosols は周囲の鉱物土壌からの塩基性陽イオンの流入に応じて、通常中程度から強い酸性を示す。有機物の高電荷特性により、CEC 値は非常に高くなる。酸性は主に H^+イオンによるもので、ほとんどの Histosols の酸性度のごく一部を $Al3^+$イオンが占めている。湿地（森林のない）や湿地（森林のある）の一部の Histosols は pH（水中）値が中性範囲（6～7.5）になることがある。

Ultisols は湿潤な熱帯および亜熱帯の高度に風化した土壌である。鉄とアルミニウムの酸化を反映して、赤や黄色をしていることが多い。堆積粘土層があり、堆積粘土層がない Oxisols とは区別される。Ultisols は塩基状態の悪い土壌（<35%）である。Ultisols は米国南部、中国南東部、東南アジア、その他の亜熱帯および熱帯地域で優勢な土壌である。

Oxisols は熱帯および亜熱帯の温暖で湿潤な気候の熱帯雨林などの広葉樹の常緑植物の下にある。これらの土壌はカオリナイトや鉄およびアルミニウムの酸化物または三二酸化物などの低活性粘土に富んでいる。浸出、風化、酸性化しており、肥沃度が低い。農業には適していない。植生が除去されると露出した表面は簡単に侵食される。Oxisols は南米やアフリカの熱帯地域にほぼ独占的に見られる（ほとんどの場合、非常に安定した大陸性クラトン上にある）。

WRB 土壌分類システム（FAO2006）ではほとんどの酸性土壌は基準土壌グループ（RSG）の Acrisols、Ferralsols、Podzols に属する。

酸性土壌は Andosols、Arenosols、Alisols、Albeluvisols、Cambisols、Histosols、Leptosols、Plinthosols、Planosols、Fluvisols、Regosols、Umbrisols にもある。Fluvisols と鉱山土壌（Espoli-Anthropic Regosols）の一部には黄鉄鉱（FeS2）が含まれており、酸化により極度の酸性化が発生する。

図 8.12.1 に酸性土壌の世界的分布を示す。酸性土壌の 67%は森林（樹木が密集し、樹冠が密集している）と林地（樹木が密集し、樹冠が開いている）を支え、約 18%はサバンナ（サバンナは、樹木がまばらに分布し、樹冠が開いているため地面に十分な光が当たる草原生態系）、草原、ステップ植生（草原植生。草原は背の高い草が生える草原で、ステップは背の低い草が生える草原）で覆われている。世界には潜在的および活動的な酸性硫酸塩土壌が約 1,200 万～1,300 万 ha あり、そのうち約 1,000 万 ha が熱帯にある。硫化物を含む物質はインドネシアやマレーシアを含む一部の地域で、厚い泥炭層の下に広い範囲で存在する。さらに、過去の潮汐環境に由来することが多い更新世、第三紀またはそれより古い黄鉄鉱堆積物はカナダ、米国、ロシア、ウガンダ、英国、デンマーク、ジンバブエ、ドイツ、オランダの内陸部に存在する。

酸性硫酸塩土壌の大部分は南アジアと東南アジア、西アフリカ、南米北東海岸沿い（ガイアナ、オリノコ、アマゾンのデルタなど）に存在する。一部の酸性硫酸塩土壌は東アフリカと南アフリカの沿岸地域、特にマダガスカル、オーストラリア沿岸、カリブ海にある。東南アジアでは酸性硫酸塩土壌の大部分（約 500 万 ha）はインドネシア、タイ、ベトナムにある。

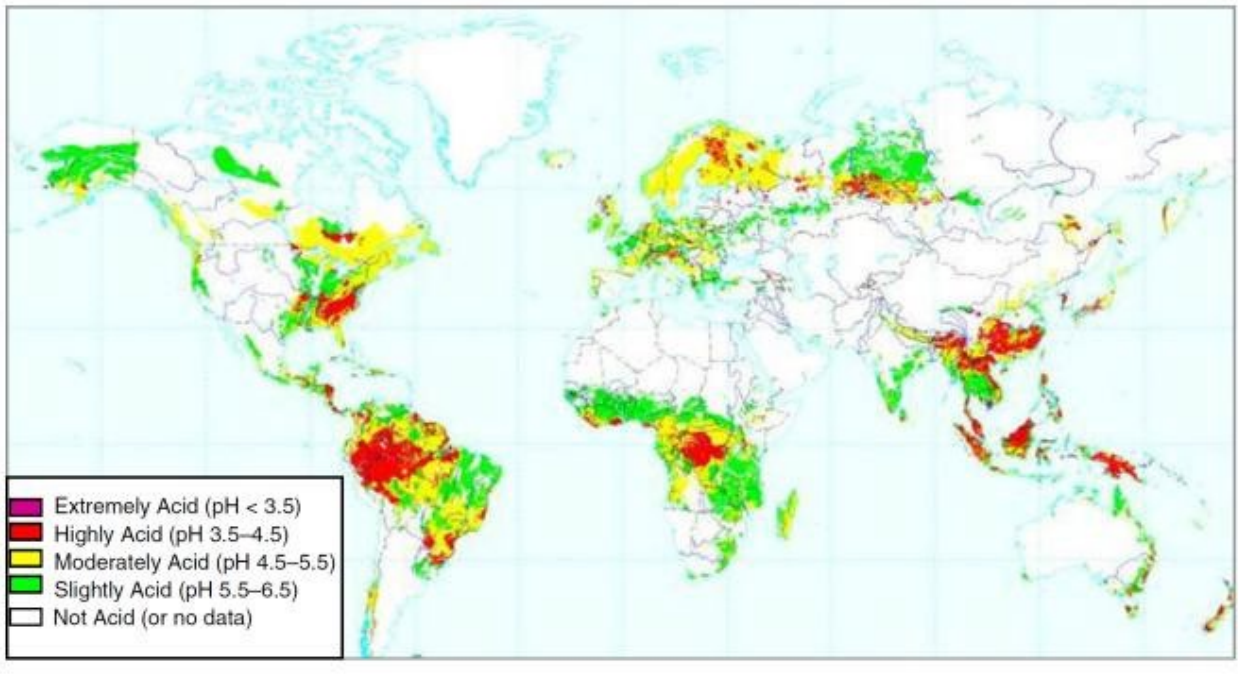


Fig. 1 – World distribution of acid soils (USDA, NRCS, world soil resources, Washington, D.C.) [14].

出典：Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants, Miao Bian, Meixue Zhou, Dongfa Sun, Chengdao Li (2013)

図 8.12.1 酸性土壌の分布する地域

8.12.4 酸性土壌の工学的問題点

酸性土壌は農業で問題となるが、工学では酸性硫酸塩土壌の酸性度が高いため問題となる。酸性土壌は埋設されたコンクリート、パイプライン、鉄筋の基礎を腐食させ、構造物の耐用年数を低下させる。酸性条件下では、重金属（例えば、カドミウム、鉛、亜鉛など）が土壌中から溶出しやすいので、重金属が地下水や河川に流出し、水質汚染を引き起こすことがある。

Carsington Dam（英国）では建設中に基礎に残した酸性硫酸塩土壌の粘性土が激しい降雨により酸化して強度低下し、すべり崩壊を起こした（図 8.12.2）。

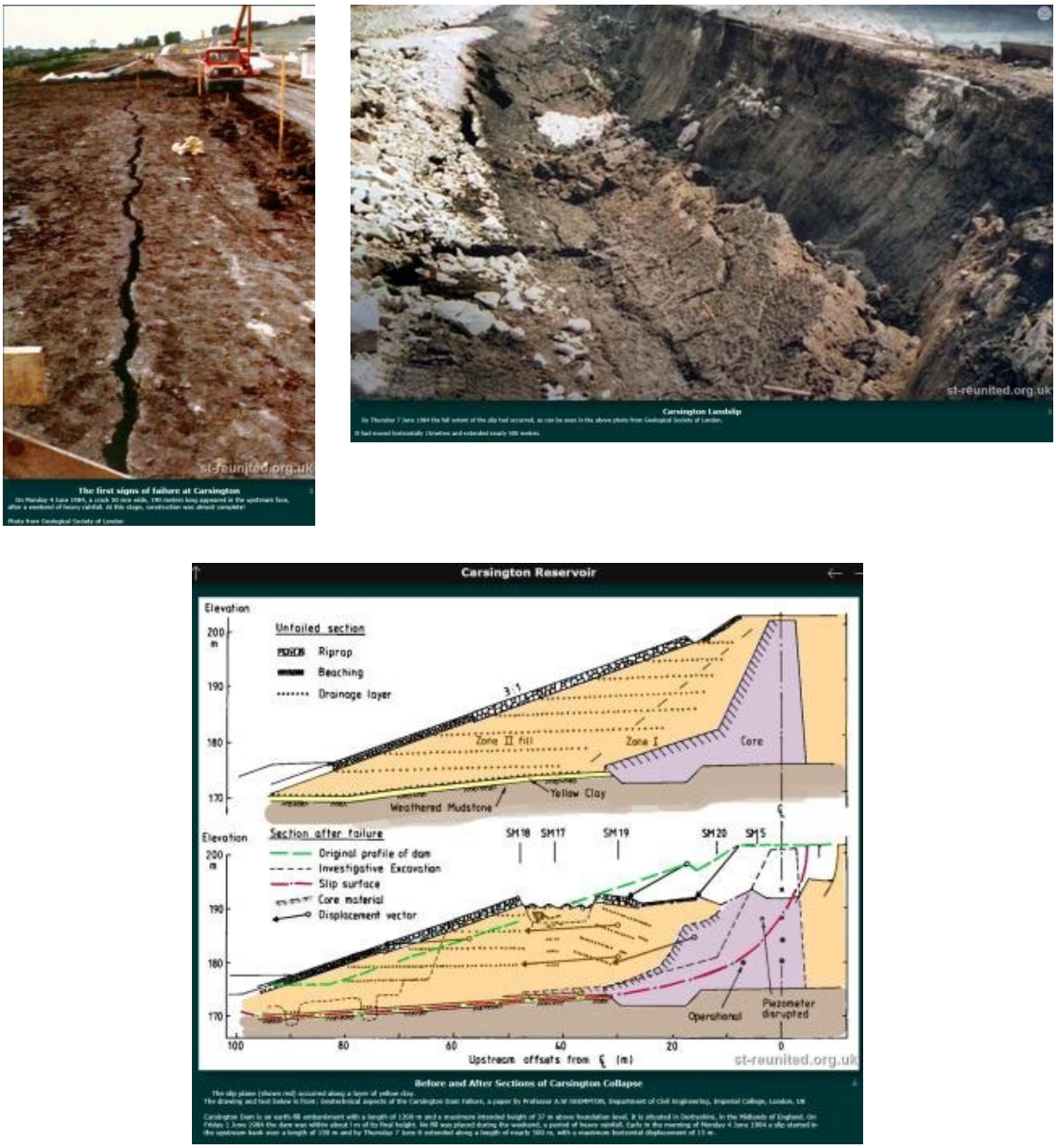


図 8.12.2 Carsington Dam のすべり破壊

出典：http://st-reunited.org.uk/History/Carsington/index.html

8.12.5 酸性土壌の対策方法

酸性土壌は工学分野では問題の報告事例が少なく、本研究で対策方法に関する有益な文献は見つかっていない。一般には材料としての使用を避ける。道路の建設計画で避けられない場合、金属の腐食防止策を講じるなどの対策が有効と考えられる。対策については、「8.10 硫酸塩／硫化土壌」も参考になる。

8.13 珊瑚土壌

8.13.1 一般

珊瑚土壌は、石灰質堆積物の一つである珊瑚を起源とする土として整理している。これには、礫状の珊瑚片等を含有する珊瑚礫まじり土と、珊瑚礁や珊瑚岩石を主体として構成される土層の両方を含んでいる。一般的には、珊瑚は内部に多孔質な構造を有するため、空隙率が高く、吸水率が高く、比較的密度が低いものであるが、時間の経過とともに沈殿と再結晶などによって密度が高く、空隙率が低くなり、珊瑚礁・珊瑚岩として強度も高くなっていく。これら珊瑚と砂、シルト、粘土などによって珊瑚土壌は構成されている。

石灰質堆積物は主に炭酸カルシウム（$CaCO_3$）で構成されており、これは珊瑚、軟体動物、石灰質藻類などの底生生物の殻や骨格の残骸によって形成される。珊瑚礁岩は生きている海生植物（珊瑚状藻類）と海生動物である珊瑚によって堆積した炭酸カルシウムの地層である。時間の経過とともに、沈殿と再結晶によって珊瑚はより密度が高く岩のようになり、珊瑚礁岩となる。X 線回折による詳細な鉱物学的分析により、時代の新しい珊瑚岩では$CaCO_3$が完全にアラゴナイトの形になっていたが、古い時代の珊瑚岩には一般に方解石が含まれていた。年代が進むほど方解石の割合が高くなる。



出典：JICA 調査団

図 8.13.1 珊瑚礫まじり土の例（パラオ）



出典：JICA 調査団

図 8.13.2 珊瑚岩石の例（マーシャル諸島）

8.13.2 珊瑚土壌の地質的特徴

珊瑚土壌の分布域は以下の 3 つの特徴がある。

- 海岸に平行に伸びる多数の珊瑚礁（coral reef）、縁（friging）、障壁（barriers）である。これらの地層には、波の作用で侵食された珊瑚の残骸で満たされた空洞がある。
- 珊瑚の頭と珊瑚礁の間の海底で、海洋堆積物で覆われている。海洋堆積物は珊瑚の層を含む、緩い密度から中程度の密度の炭酸塩砂、シルト、粘土で構成されている。
- 沖積土（砂利、砂、シルト）が珊瑚礁の堆積物と海洋堆積物の下にあり、それらと混ざり合っている海岸平野である。珊瑚礁の崩壊生成物が珊瑚礁の空洞を埋め、斜面を砂とシルトで覆う。

表 8.13.1 に珊瑚の留意点を示す。

表 8.13.1 珊瑚の留意点

項目	留意点
珊瑚の起源骨格系	調査対象の珊瑚岩の形状とサイズ、およびそれらの壁の穿孔状況
珊瑚礁の年齢	古い珊瑚礁は石化が大きく、強度が高く、空隙率が低く、透水性が低い
珊瑚礁の種類	海洋珊瑚礁は大陸珊瑚礁よりも強度が高く、透水性が低い
帯状分布	露出側（風上）の珊瑚は、ラグーンまたは露出していないゾーンよりも地質工学的特性が優れている可能性が高い

出典：JICA 調査団

8.13.3 珊瑚土壌の工学的問題

珊瑚土壌は、珊瑚の含有率や珊瑚自体の種類の違いなどばらつきが大きく、地盤工学的な評価が難しい。例えば珊瑚土壌に占める珊瑚礫が少ない場合はシルト等が主体の土となり圧密沈下などが問題となる地盤となる。珊瑚礫の含有率が高くなると、珊瑚礫のかみ合わせなどにより、その挙動も珊瑚礫の性質が支配的になる。また、珊瑚は多孔質な構造を有するため、一般的な礫質土と異なり、打ち込み杭の施工などの外力により、珊瑚の構造やセメンテーションが破壊され、所定の支持力が発揮されない、想定以上の圧縮が発生するなどの力学的挙動に不明な点があることで知られている。

8.13.3.1 杭の支持力

珊瑚土壌の支持力は、同じ杭径の打ち込み杭よりも、場所打ち杭とグラウト杭の方が 3～5 倍高い支持力が得られる。さらに、打ち込み杭は珊瑚構造の破壊を引き起こし、側圧と先端支持力の低下を引き起こす。貫入長を長くしたり、打ち込んだ杭の先端部を拡大したりしても、支持力はそれほど向上しない可能性がある。

Meyerhof の杭の支持力式では、珊瑚土壌の場合、杭の支持力を過大評価する可能性がある。従来の設計方法では、石英やシリカの砂層（杭打ち時に押しつぶされずに移動する硬い粒子）に打ち込

まれた杭は、その周囲の土壌をしっかりと詰め込み、土と杭の界面応力を発生させ、高い周面摩擦が生じると考えられている。しかし、珊瑚土壌では非常に緩く、多くの平らな粒子といくつかのかさばった中空粒子で構成される。打ち込まれた杭は土粒子を押しつぶし、土壌の弱いセメント化が壊れ、杭の表面に対する横方向の圧力が小さくなり、周面摩擦が低くなる。すなわち、打ち込み杭は、珊瑚岩の構造とセメント化を破壊し、周面摩擦が低くなる。

8.13.3.2 サンゴ礫まじり土の特徴

日本においては沖縄県にサンゴ礫まじり土が堆積している。当該地の港湾構造物は、設計を実施する地盤としてサンゴ礫まじり土が対象となる場合が多く、以下のような課題があることが示されている。

- 乱れの少ない試料採取が困難：各種土質試験を実施するために乱れの少ない試料を採取する場合、サンプラーによる押込み方法ではサンゴ礫が刃先に当たって押込み不能となる。あるいは刃先が変形するなどして試料を攪乱してしまう。回転式の方法ではサンゴ礫が動いて試料を乱してしまう。

- サンゴ礫まじり土の力学的挙動が不明確：サンゴ礫が少ない場合はマトリックスとして主体となるシルト等が支配的となり圧密沈下の問題がある地盤となり、一方でサンゴ礫の含有率が多くなるとサンゴ礫のかみ合わせが主体となり土としての挙動もサンゴ礫が支配的となる。また、その境界値も細粒分含有率だけでなく、サンゴ礫の形状や大きさ、サンゴの種類など様々な要因が含まれることになる。このため、圧密沈下の懸念もありながら、設計上の強度はφ材の評価として設計せざるを得ない状況にある。

- 原位置試験の実施が困難：サンゴ礫混入の影響で、原位置試験、例えば標準貫入試験で得られる N 値の値などの試験値のばらつき、評価が難しく、サウンディング結果より推定できる設計定数の信頼性が乏しい。

8.13.4 珊瑚土壌の対策方法

8.13.4.1 珊瑚骨材を利用したコンクリート

珊瑚は島嶼国の建設工事においては、材料の制約により珊瑚をコンクリート骨材として使用することが多い。しかし、強度、耐久性、配合設計などの珊瑚骨材コンクリートの特性に関する研究事例は少なく、珊瑚骨材コンクリートの適切な配合設計の開発が求められている。珊瑚土壌を骨材として利用する場合、通常の骨材とは異なる特性を有することに留意する必要がある。珊瑚は内部に多孔質な構造を有し吸水率が高くなるため、フレッシュコンクリートの水分管理が重要となる。また、通気性が高くなることが想定され長期的な耐久性に影響を与える可能性がある。一方で、密度が低いため荷重低減の効果は期待できると考えられる。

珊瑚コンクリートに関する研究は、中国の研究者による事例が多い。コンクリート配合に関する知見を以下にいくつかピックアップしたので参考にされたい。

- 塩化物、マグネシア、硫酸イオンの濃度が高く、温度が変化する海洋環境でも耐えられる、耐久性のある珊瑚コンクリートを製造するにはフライアッシュ、シリカフューム、スラグ、繊維などのセメント化合物の使用が効果的である。
- コーラルコンクリートの強度等級は比較的低く、約 30MPa であるが、セメント含有量を増やす、もしくは高性能減水剤を加えることで強度を上げることができる。コーラルコンクリートの特性は軽量骨材コンクリートと通常のコンクリートの中間となる。
- コーラル骨材コンクリートの破壊パターンは、多孔質のコーラル骨材のため脆いが、天然骨材およびリサイクル骨材コンクリートの破壊パターンは比較的延性がある。
- 事前に湿らせたコーラル骨材はセメント水和プロセスの前と最中に吸収した水を徐々に放出し、骨材とセメントマトリックス間の界面結合を強化する。
- コーラル砂利の量を減らし、微細コーラル砂とコーラル砂を混合することで塩化物や硫酸塩の攻撃に対する耐久性が向上し、超高性能コンクリート（UHPC）の開発が可能である。
- 珊瑚コンクリートは 7 日圧縮強度が 28 日強度の 90%に達するなど、早期強度または急速硬化現象を示す。

表 8.13.2 に中国の研究者らによるコンクリート配合検討事例を示す。同表より、30MPa 以上の強度を得るにはセメント含有量が 400kg/m^3 以上であることがわかる。2 人の研究者は珊瑚砂のみ（小さな珊瑚の破片を含む）を混ぜ、粗い珊瑚砂利を避けることで、より良い強度と耐久性が得られることを報告している。

表 8.13.2 中国の研究者らによるコンクリート配合検討事例

項目	Zhou et al,（2018）	Li et al,（2016）	Ma et al,（2019）
セメント	555kg/m^3	440kg/m^3	500kg/m^3
珊瑚砂	543kg/m^3	1555kg/m^3	1300kg/m^3
珊瑚礫	692kg/m^3	-	-
混合比	1: 1: 1.2	1: 3.35: 0	1: 3.35: 0
コンクリート強度	38 MPa	27 MPa	40 MPa
コンクリート密度	2095kg/m^3	2020kg/m^3	2000kg/m^3
水セメント比 W/C	0.55	0.59	0.48

出典：JICA 調査団

8.13.4.2 珊瑚土壌の設計基準

珊瑚土壌に関する基準やマニュアルなどは特にない状況である。各国の状況に合わせて使用されているのが現状である。パラオ（コロール島、バベルダオブ島）のような火山島を由来とした珊瑚礫まじり土を利用している地域の場合、珊瑚礫まじり土は海岸の土取り場で浚渫により採取され、一般的な礫質土、砂質土等として路盤材や埋め立て材料として用いている。マーシャル諸島（マジュロ環礁）のような環礁地域では、珊瑚礁の採石場で珊瑚岩として採取され利用されている。珊瑚岩は、堆積環境や年代、環礁の内側と外側など採取箇所によって密な層（環礁外側）と軟らかい層（環礁内側：ラグーン）があり、密な層は捨て石やコンクリート骨材、軟らかい層は路盤材や埋め立て材として用途によって使い分けている状況にある。マーシャル諸島（マジュロ環礁）のような環礁地域では、珊瑚礁の採石場で珊瑚岩として採取し、利用されている。珊瑚岩は、堆積環境や年代、環礁の内側と外側など採取箇所によって密な層(環礁外側)と軟らかい層(環礁内側：ラグーン)があり、密な層は捨て石やコンクリート骨材、軟らかい層は路盤材や埋め立て材として用途によって使い分けている状況にある。

珊瑚土壌に関する基準やマニュアルなどは特にないため、国際的な大規模プロジェクト等では、海外基準を用いて設計・施工等がされていた。この場合、高い設計強度などの性能が要求されるため、現地の材料は使用されず、海外からの輸入となりコストが増大することになる。また、仮に現地の材料の有効利用を計画し、土質性状等を把握したい場合でも、試験設備自体を有しておらず、必要な試験が自国で実施出来ないため、試験のための現地材料の輸出が必要となり、コストや法律の面からハードルが高い状況にある。

8.14 雲母を多く含む砂

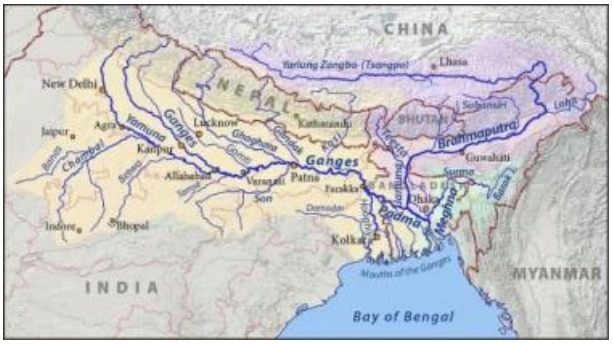
8.14.1 一般

バングラデシュ国において回転杭の載荷試験を行ったところ、N 値を用いた設計支持力よりも小さい支持力しか得られなかった。原因究明のために詳細な土質調査と三軸圧縮試験を含む室内試験を行ったところ、一般に考えられている力学特性と異なっていることが確認された。本項では、雲母多く含む砂の問題事例について整理した。

8.14.2 雲母を多く含む砂の支持力問題

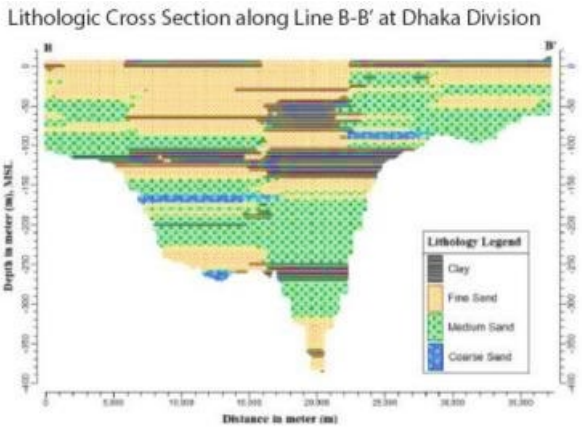
8.14.2.1 ダッカの地質

バングラデシュはガンジス河とブラマプトラ河の末端で、ヒマラヤから多くの土砂が長距離で運ばれており、ベンガル湾を埋めた低地となっている。また、東からはメグナ川からも土砂の供給が行われている。ダッカ市の地質は上部に沖積世の粘性土が 10m 前後あり、その下は薄い粘性土層を挟むが砂地盤が厚く堆積している。砂層は細粒なもの、中粒なもの、粗粒なものと色々な地層が重なっており、深い所は 300m 以上となっており、これらの砂層から地下水を汲み上げている。このため、ダッカ市内では地下水が-40m 以上下がっており、毎年数 m 下がっている。



出典: https://lotusarise.com/brahmaputra-river-system-upsc/

図 8.14.1 バングラデシュに通じる巨大河川



出典: GROUND WATER SUSTAINABILITY ASSESSMENT FOR THE GREATER DHAKA WATERSHED AREA（2019）

図 8.14.2 ダッカ市の地質分布図

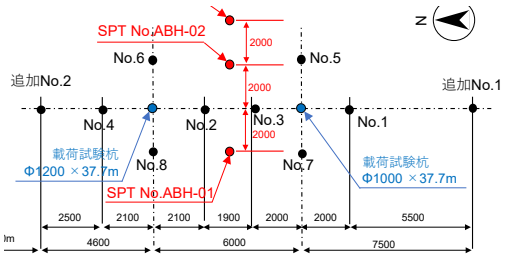
8.14.2.2 回転杭の載荷試験結果

載荷試験位置の地質は上部 10m 程度に粘性土が有り、その下はシルト質砂があり、深度 39m 以深は N 値 50 以上となっており、ここを回転杭の支持層として設計されている（図 8.14.3）。

載荷試験は杭径φ1,000mm とφ1,200mm の 2 種類行われ、2 つの試験位置は 6m 離した近傍で行われている（図 8.14.4）。回転杭は鋼管杭の先端に杭径の 1.5 倍の回転翼を有し、コンクリートを使用しないため狭いヤードで短い施工期間で行うことができる（図 8.14.5）。

図 8.14.6 に載荷試験結果を示す。同図には回転杭の試験位置から 30m 程度離れたところで行われた場所打ちコンクリート杭（φ800mm、φ1,000mm、φ1,500mm）の載荷試験結果を示している。

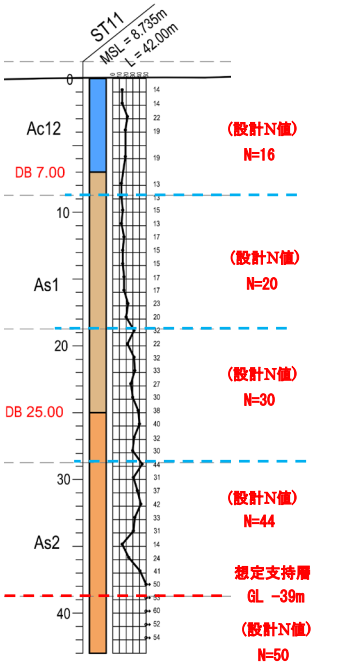
ほぼ同じ地質条件で行われた場所打ちコンクリート杭は全て設計条件を満足し、最終荷重の沈下量も 10mm 程度と問題なかったが、回転杭は 100mm 以上の沈下量となり、設計支持力を満足しなかった。



出典: JICA 調査団

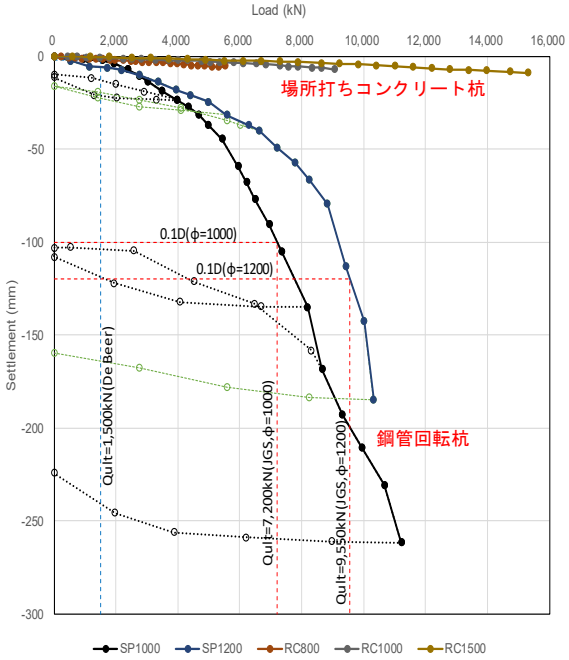
図 8.14.4 回転杭載荷試験位置

日本においては N 値 50 以上の砂地盤であれば載荷試験で確認しなくても支持力が得られることは技術者では常識であるが、支持力低下の原因究明を行う中で雲母を含む砂は一般的な砂とは異なった力学特性を有することが分かった。



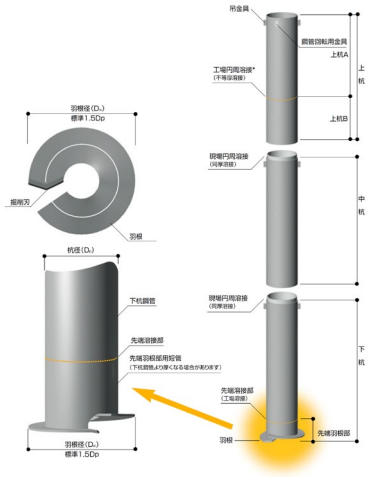
出典: JICA 調査団

図 8.14.3 試験施工位置のボーリング柱状図



出典: JICA 調査団

図 8.14.6 回転杭載荷試験結果



出典: NS エコパイルカタログ

図 8.14.5 回転鋼管杭

8.14.2.3 バングラデシュの工学的な問題

回転杭の支持力問題でバングラデシュ工科大学の A.M.M. Safiullah 教授に見解を尋ねたところ、バングラデシュの沖積性堆積物は雲母をかなりの割合で含んでいるため、過去の土質工学では説明できない問題がある。バングラデシュの砂はヒマラヤの氷河で削り取られた砂で、一般的な沖積平野の土と異なるためであると説明を受けた。以下は、A.M.M. Safiullah 教授の論文で説明されている問題を紹介する。以下の事例から、バングラデシュの雲母を含む土壌では SPT の N 値と強度特性などを見直す必要があるとされている。

(1) ケーソン基礎

ケーソンを深さ約 16m まで沈めた後、ケーソン内部の土砂を除去してもそれ以上の沈下が困難となった。長さ 18m の 1.5 インチ GI パイプを使ってケーソン壁の近くに水を注入した。ケーソンの直径の半分注入した時、突然ケーソンから水が滲み出し、ケーソンは深さ 6.7m まで沈下した。周面摩擦が大きくなりそうなケーソンには内部噴射設備を設けるべきであると報告している。

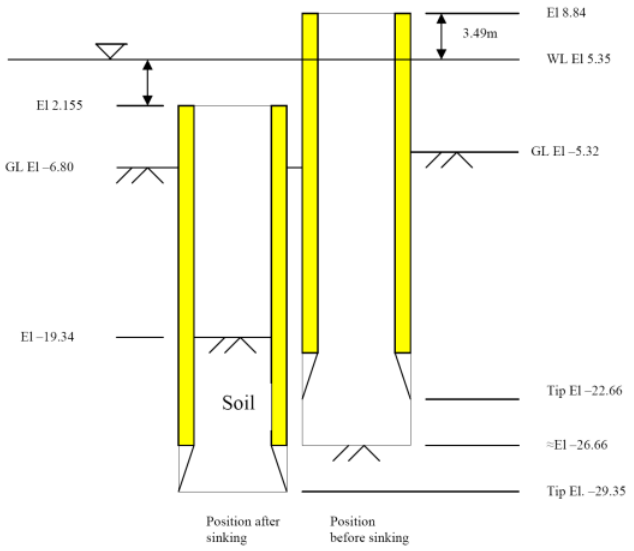


Fig. 1. Position of caisson on Pier 17 of the Buriganga bridge before and after sudden sinking on September 1996.

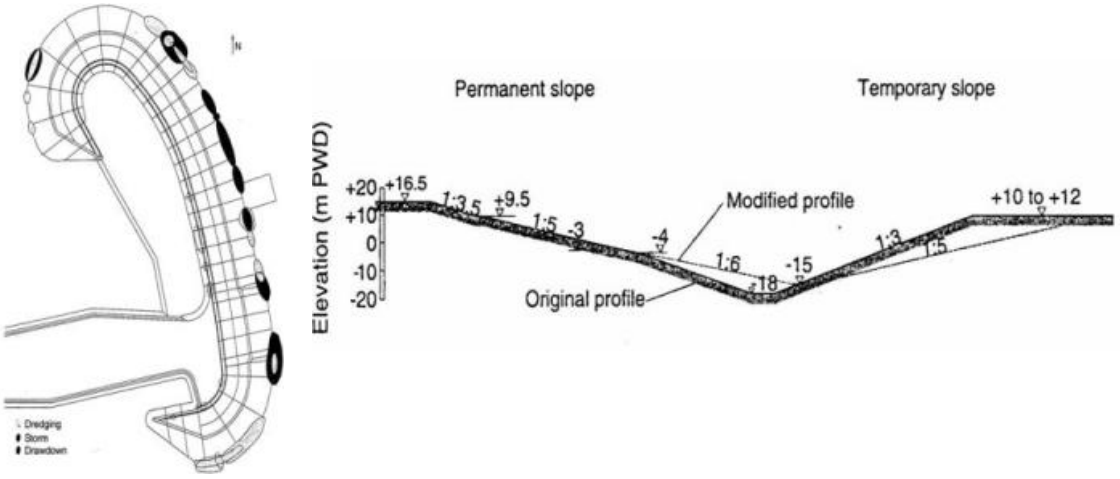
出典: Geotechnical problems of bridge construction in Bangladesh, A.M.M. Safiullah (2005)

図 8.14.7 ケーソンの突然の沈下

(2) ジャムナ橋の導流堤

バングラデシュでは、緩い沖積土が分布し、急激な洗掘を受けやすいため、ジャムナ橋の護岸では導流堤の設置が行われた。カッター・サクション浚渫船によって、元の地盤面より 27m から 30m の深さを水面下に掘削した。当初の設計勾配である 1:3.5 の勾配で浚渫している時に約 50%の区間ですべりが生じた。勾配が 1:3 の時の仮設斜面では長さのほぼ 100%がすべりの影響を受けた。勾配を 1:6 と極めて緩い斜面で浚渫することにより、工事長さの 5%未満の軽微なすべりにすることができた。これとは対照的に勾配が 1:5 時の仮斜面では浚渫や河川水位の低下に伴ってすべりが続発した。

斜面では雲母質の砂が浚渫されていた。雲母の量、分布、方位は様々であった。雲母の含有量は 5～10%であった。N 値から推定した相対密度は 40～60%であり、この相対密度ですべりが起こることは考えられない状況であった。



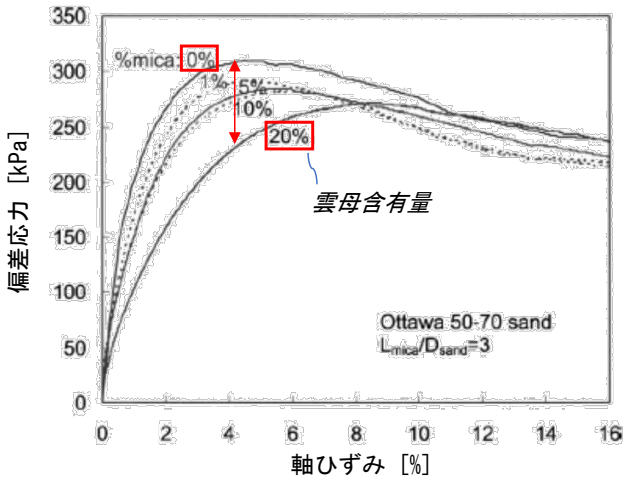
出典: Geotechnical problems of bridge construction in Bangladesh, A.M.M. Safiullah（2005）

図 8.14.8 ジャムナ橋への西側導流堤の平面図と流下すべりのトリガーの位置、横断面図

8.14.2.4 雲母の含有量

A.M.M. Safiullah 教授のアドバイスに基づき、雲母の含有量を電子顕微鏡による雲母観察により、雲母の含まれる個数から求まる雲母含有量と X 線回折分析により雲母の含有割合を求めた。顕微鏡観察から認められた雲母の含有割合は 27%～45%と非常に多い値となった。X 線回折分析による雲母含有量は 9.2%と顕微鏡による結果と大きく異なった。雲母のような平べったい粒子は同じ大きさの長石な粒子と比べて 1 個あたりの体積が小さく、個数から含有量を求める方法と重量から求める方法とは異なるため、数量から求める含有量は重量割の含有量になるよう補正する必要がある。

このため、載荷試験位置の雲母の量は 9%程度含んでいると推定された。Lee ら（2007）の研究によると雲母量が多くなるほどピーク強度が下がるとともに、変形係数が小さくなることが把握されている（図 8.14.9）。なお、せん断後のふるい分け試験では粒子破砕の少ないことが確認されている。せん断強度に及ぼす雲母の影響の研究では雲母含有量が 2.5%以上含むとせん断特性が変わるという報告があるので注意しなければならない。



出典：Lee J.S, M. Guimaraes, J. C. Santamarina, Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007

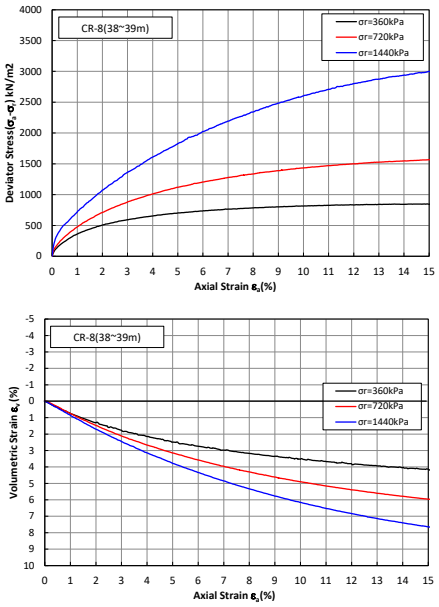
図 8.14.9 雲母含有量が排水三軸圧縮強度に及ぼす影響

8.14.2.5 ダイレイタンシー特性

図 8.14.10 には杭先端付近の三軸圧縮試験結果を示す。図の下はせん断時の体積変化を示すものであるが、せん断中に体積が圧縮している。これは緩い砂のせん断時の体積変化の挙動である（図 8.14.11）。N 値 50 以上のため密な砂と考えられるが、全く違った特性になっている。

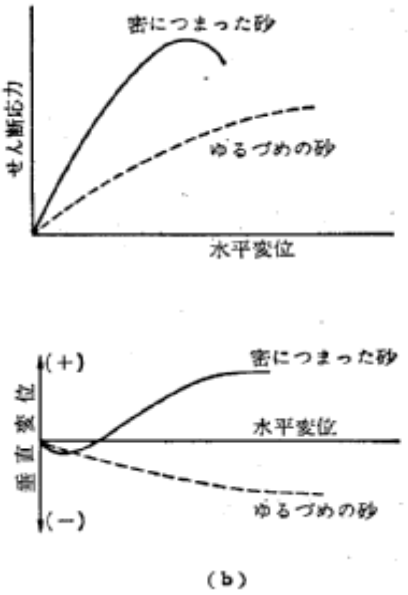
これは図 8.14.12 に示す相対密度 90%の密な Dogs Bay sand のせん断特性に似ている。Dogs Bay sand は図 8.14.13 に示すような貝殻混じりの砂で、せん断時に破砕する破砕性土として有名な砂である。雲母を含む砂は破砕性土のようなせん断特性を有する砂となる。但し、試験前後の粒度試験では粒度特性は大きく変化していない。

砂に雲母が含まれていると、図 8.14.14 に示すような Bridging や Ordering という粗な構造を形成しやすくなる。これは砂の粒子の大きさと比べて、雲母の大きさが大きくなると顕著となる。砂に雲母が含まれる場合、図 8.14.15(c)に示すように雲母はせん断に伴い曲がり、空隙が小さくなるので圧縮側の変形が生じる。このように雲母が多く含まれていると一般的な砂とは異なった変形特性を示す。



出典: JICA 調査団

図 8.14.10 杭先端付近の三軸圧縮 CD 試験



出典: https://www.con-pro.net/readings/soil/chapter05-04.html

図 8.14.11 一般的な緩い砂と密な砂の体積変化

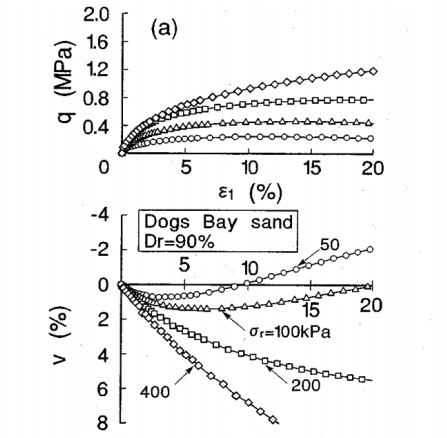


Fig.5 (a) Deviator stress, volumetric strain and axial strain response (Dogs Bay sand)

出典: カーボネイト砂の力学特性とその砂中の杭の周面摩擦力特性、田中、安福、村田、兵動、1995

図 8.14.12 破砕性砂の三軸圧縮試験結果



Photo.1 Photomicrograph of Dogs Bay sand

圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価、安福、田中、村田、兵動、1994

図 8.14.13 Dogs Bay sand の写真

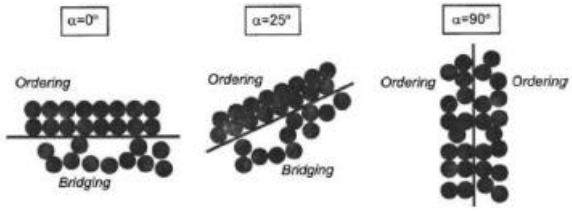
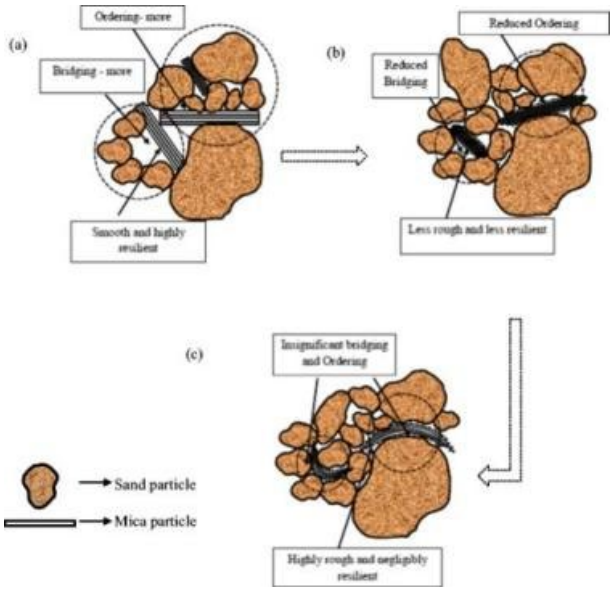


Fig. 1. Hypothesized bridging and ordering effects: Platy particle orientation α

出典: Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response, Lee J.S, M. Guimaraes, J. C. Santamarina,, 2007

図 8.14.14 砂に雲母が含まれているときの特種な構造



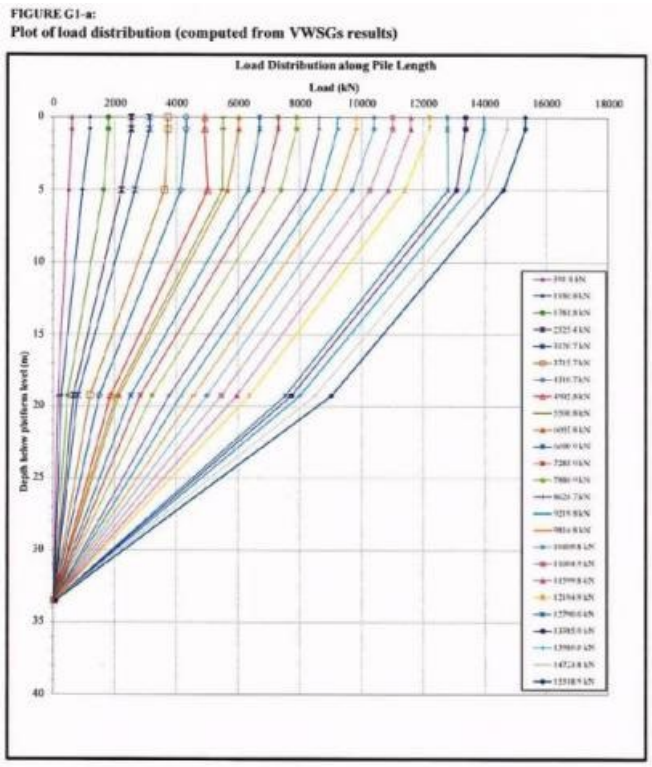
出典: Effect of Successive Impact Loading on Compactability, Microstructure, and Compressibility Behavior of Micaceous Sand, Seethalakshmi P., Ajanta Sachan, 2018

図 8.14.15 砂に雲母が含まれている時のせん断変形

8.14.2.6 場所打ちコンクリート杭

杭先端がN値50以上となる砂層を支持とする先端支持杭として設計された載荷試験の軸方向の荷重分布図を図 8.14.16 に示す。深度方向に筋籠に設置した軸力を測定するセンサーで測定したものである。深度0mの値は載荷荷重で、深度が一番深いところは杭先端の荷重となる。

杭先端荷重は載荷荷重が大きくなってもほとんど増加が無いため、この杭は摩擦杭と評価される。同様な試験結果は数カ所で確認されており、雲母を含む砂では先端支持力が出ないと推察される。もし、雲母を含む砂が破砕性土と同じせん断特性を有するならば、破砕性土の先端支持力が古典的な杭の支持力式よりも小さい支持力しか得られないことと同じことを意味する。すなわち、雲母を含む砂は先端支持力が設計基準に通り得られない可能性がある。



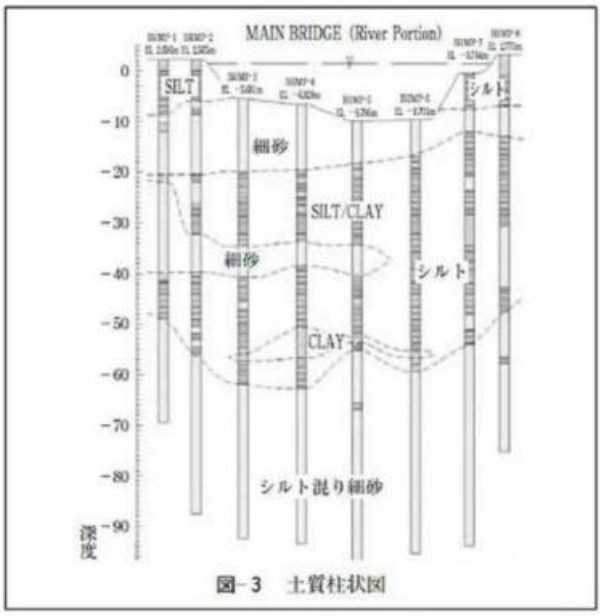
出典: JICA 調査団

図 8.14.16 場所打ちコンクリー杭の載荷試験結果

8.14.2.7 ルプシャ橋のシャフトグラウト杭

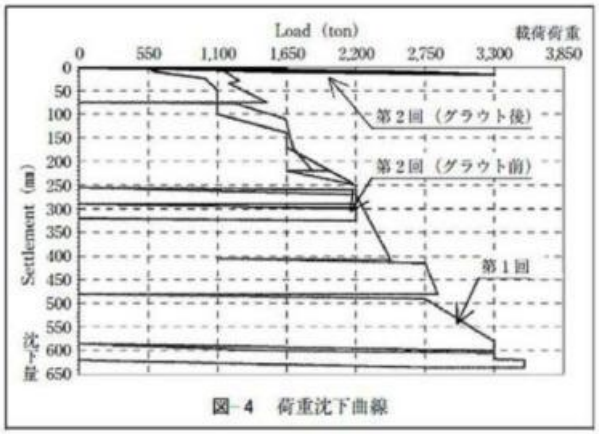
バングラデシュのルプシャ橋では場所打ちコンクリート杭で杭径 2.5m、杭長 74m、79m、90.5m の載荷試験を実施している。先端地盤は N 値 50 以上のシルト混じり細砂で、中間地盤シルトからシルト混じり細砂（N=15~50）となっている（図 8.14.17）。設計許容支持力は 2,250t、安全率が 2.5 のため、極限支持力は 5,625t となる。杭先端は雲母量が多い圧縮性の高いシルト混じり細砂と評価されている。

1 回目の載荷試験では許容支持力に近い 2,200t で杭径の 10%以上の 26cm 沈下して、日本の基準の極限支持力に達している。このため杭長を 5m 長くした 2 回目の載荷試験が行われ、2,200t で沈下量が 33cm となり、杭長を伸ばしても支持力が悪い結果となった。このため、試験杭の先端と周辺にグラウトを行い、最大荷重 3,300t の時の沈下量が 14mm と改善されている。3 回目の載荷試験は杭長を当初よりも 16m 長くした杭長 80m とし、グラウト可能なシャフトグラウト杭を採用し、Osterberg Cell を 3 個入れた載荷試験が行われている。3,400t 載荷時に沈下量を 41mm とすることができている。図 8.14.19 には 3 回目の載荷試験の杭内の軸力分布図を示す。載荷試験では下段のセルの荷重を 2,300t、上段のセルの荷重 3,400x2=6,800t 載荷し、杭の自重を除いた荷重は 8,340t まで載荷している。杭先端は極限に達しているが、杭の周面は弾性から塑性への移行領域と評価している。バングラの BNBC では杭先端の極限支持力は 150N≦4,000kPa とされている。N=50 とすると 150N=150×50=7500kPa なので 4,000kPa が杭先端極限支持力度となる。杭径 2.5m の場合、極限支持力は 3.14/4×2.5×2.5×4,000=19,625kN÷2,000t となる。載荷試験から得られた先端支持力は 970t でグラウトをしても設計基準の極限支持力が得られていないことになる。2 回目の載荷試験結果を解析した結果、シルト質細砂の周面摩擦力はほとんどゼロと解析され、通常の砂層では考えられないことが起きていると報告している。これは雲母が杭載荷時のせん断時に杭に対して平行に並び、摩擦力低下になったのではないかと想定される。



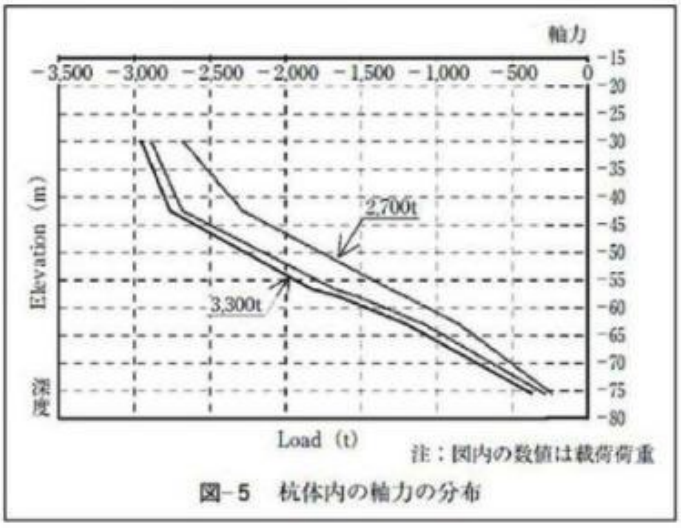
出典: バングラデシュ国における大口径長尺特殊杭の施工事例（シャフトグラウト杭）、向市博昭、基礎工 2007

図 8.14.17　ルブシャ橋の土質柱状図



出典: バングラデシュ国における大口径長尺特殊杭の施工事例（シャフトグラウト杭）、向市博昭、基礎工 2007

図 8.14.18　載荷試験結果



出典: バングラデシュ国における大口径長尺特殊杭の施工事例（シャフトグラウト杭）、向市博昭、基礎工 2007

図 8.14.19　3 回目試験時の杭体内軸力の分布図（3 個のセル）

8.14.3 雲母を含む土壌の工学的問題点

Xianwei Zhang ら（2024）は、風化花崗岩（細粒分 67%、液性限界 LL=59.2%、塑性指数 Ip=17.8）でも雲母含有量が高いと、圧縮性、崩壊性、膨潤性が高くなり、圧縮性が低下し、有効摩擦角が低くなるなど､望ましくない特性になると報告している｡図 8.14.20 に示すように砂と同じような Bridging や Ordering が粘土や風化花崗岩（WGS）でも形成されると報告している。

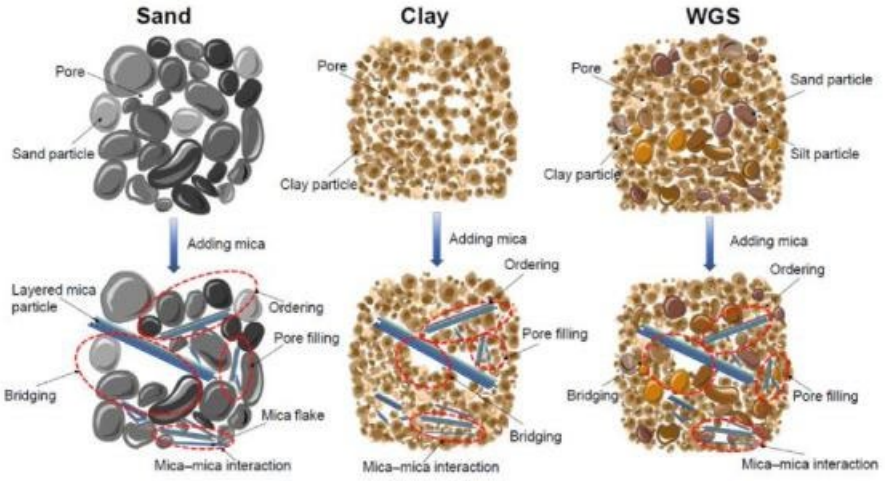


Fig. 18. Schematics of the microstructures of mica when mixed with sand, clay, and residual soil.

出典: Impact of mica on geotechnical behavior of weathered granitic soil using macro and micro investigations, Xianwei Zhang, Xinyu Liu b, Haodong Gao, Gang Wang, Ran An, Zhu Liang（2024）

図 8.14.20 雲母が含まれると変化する土の構造的な変化

開発途上国における現地調査結果のうち、ガーナのヒアリングでは、雲母質の岩を母材とする土壌があり、水により締固め特性が変化し道路に沈下が生じる問題と、雲母質の岩を骨材として使用するときにもコンクリートの品質低下の問題があると報告されている。

雲母が含まれている土において考えられる工学的な問題点は以下の通りとなる。

- 雲母が含まれると古典的な支持力式よりも小さな支持力となる。支持力は先端支持力と周面支持力両方が小さくなる可能性がある。
- 雲母が含まれる土は破砕性土のようなせん断挙動となる（排水せん断時には圧縮側に変形する）。
- 雲母含有量が 10%を超えると締め固め特性が低くなり、圧縮性が大きいため道路舗装、盛土などに使用することは推奨されない。
- 締固めを繰り返すと粒子破砕が進行するが、ある回数から粒子破砕が進行しなくなる。その状態になると変形特性は安定する。

8.15 氷河堆積土（氷積土）

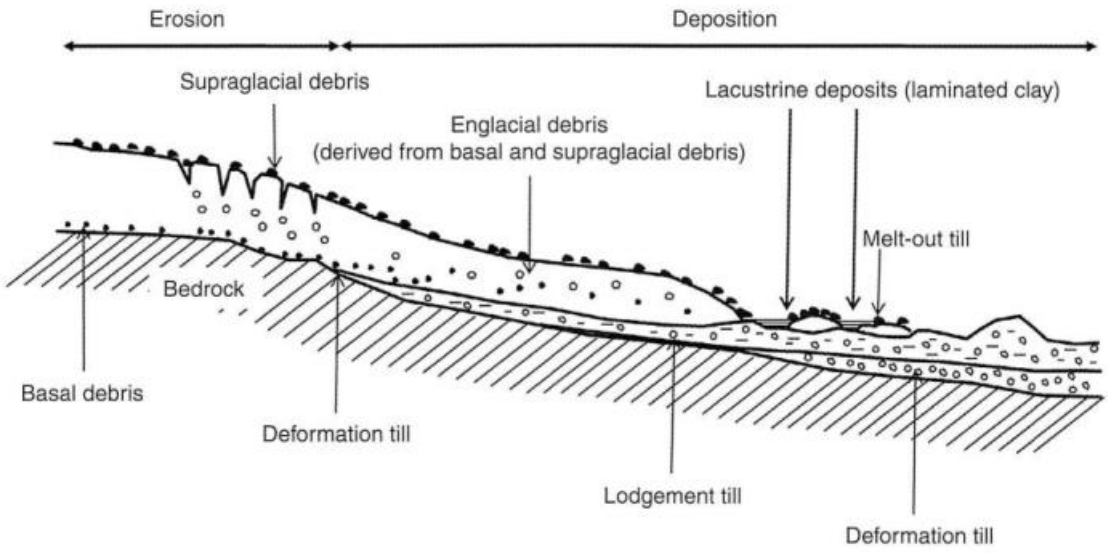
8.15.1 一般

氷河堆積土（ティル）は世界の温帯地域に広く分布しており、世界全体の約 10%を占めている。ティルは変形した基底層が元々の特徴の多くを保持しているものから、砂利、砂、シルト、粘土の混合土、さらには薄層粘土と様々のものがある。

ティルは自重によって圧縮・せん断、再形成、風化などが起こる可能性がある。ティルには、粘土から巨礫まで様々な粒子サイズが含まれており、粘土主体から岩片主体のティルまで様々となる。ティルは亀裂の発生や層状に堆積することがあり、建設時に特定のティルの特性を予測することが難しく、取り扱いが難しい材料である。

8.15.2 地質学的形成のプロセス

氷河や氷床がその下の土や岩石を移動すると、その物質が変形して変形ティルが形成されるか、または侵食されて新しい場所に移動し、堆積物、溶解ティル、水に沈んだ堆積物として堆積する（図 8.15.1）。これらのプロセスにより様々な異なる堆積岩が形成される（表 8.15.1）。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

図 8.15.1 氷河土壌の形成

表 8.15.1 氷河物質の主な説明

破片の種類	堆積環境	氷河土壌	説明
氷河の表面 Supraglacial			氷河の表面を運ばれる残骸。落石や、おそらくは氷河床から生じたもの
Englacial			氷河内で発見された氷河上または氷河下の物質に由来する残骸
氷河の下 Subglacial			氷河の底から堆積した堆積物
	陸生氷河 Glacioterrestial		陸上の基底堆積物
		融解したティル Melt-out till	停滞またはゆっくりと移動する残骸の多い氷河の氷が融解して堆積しその後の移動や変形は起こらない
		流れ出したティル Flow till	氷河の縁から流れ出る堆積物
		基底堆積物 Lodgement till	氷河下の変形層で剪断により分散され（通常は）均質化された堆積物
	氷河流域 Glaciofluvial		溶けた氷河の水から堆積した砂と砂利
		氷の境界 Ice marginal	氷河に隣接域
		氷河前方 Pro-glacial	氷河または氷床の外側の境界の直前またはすぐ外側に堆積
		Subglacial	氷河の下に堆積
	氷河湖沼 Glaciolacustrine		氷で堰き止められた湖で見つかった層状の粘土
		氷との接触 Ice contact	氷河の縁に隣接して堆積した
		遠位 Distal	氷河から少し離れた場所の堆積
	氷河海 Glaciomarine		海洋環境内で発見された氷河堆積物
		フィヨルド Fjord	フィヨルド内の堆積
		大陸 Continental	大陸棚に堆積
		Water-lain	水によって堆積
		近位 Proximal	氷河の近くの堆積
		遠位 Distal	氷河から少し離れた場所の堆積

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

8.15.3 氷河土壌の工学的問題点

氷河土壌の工学的な問題は表 8.15.2 のようにまとめられている。

表 8.15.2 氷河土壌の工学的問題点

段階	問題点	詳細
調査	強度	一部のティル till は非常に強固であるため、乱されていないサンプルを入手するのは困難となる。ティルの構造は試験で得られる強度に重大な影響を及ぼす可能性がある。硬い粘土用に開発された経験的相関関係は基底ティルには適用できない可能性がある。ボーリング調査ではより弱い物質のゾーンを通過するように配置されない可能性がある。
	透水性	亀裂や層状構造のため、現場の透水性は実験室で測定される透水性よりも大きくなることがよくある。
	ボルダー	ボルダーがあることにより、誤って岩盤頭部としてしまう可能性がある。
	層状粘土 Laminated clay	粘土の塊なのか、層状粘土の層なのかを識別するのが困難となる。
	砂と礫	砂と砂利のポケットなのか層なのかを特定するのは難しい。
掘削	強度	一部の氷河土壌、特に基底堆積物は非常に密度が高いため、掘削が困難となる。そのため、爆薬や道路用ピックが使用されている。基底堆積物には延性のある土壌のポケットが含まれる場合があり、掘削の安定性に影響を与える可能性がある。
	ボルダー	氷河土壌には岩塊までの大きさの異なる岩石が含まれる場合がある。これらは杭、トンネル、または連続壁の掘削で問題となる可能性がある。
	ボルダー基底 Boulder beds	これらは異なる層のティルの間または融氷したティルと基底ティルの間に存在する可能性があり、あらゆる形態の掘削に影響を与える。
	層状粘土 Laminated clay	氷河湖成堆積物から形成された変形ティルにはポケットやレンズまたは層状の粘土層が含まれることがある。それらは周囲のティルよりも柔らかい場合があり、不安定性につながる。
	砂と礫	氷河湖成堆積物および氷河湖成堆積物から形成された変形堆積物には砂や砂利のポケットやレンズまたは層が含まれることがある。それらは水を含んでいる可能性があり、帯水層または水源につながると水の突出を引き起こす。
	割れ目	多くの基底堆積物は堆積過程の結果として亀裂が生じる。これによりブロックの崩壊や剪断帯の形成につながる可能性がある。
設計	強度	一部の基底堆積層の現場における非排水せん断強度は室内試験で測定された強度を超え、過剰設計となる可能性がある。
	硬さ	いくつかの基底ティルの硬さは沈下計算で沈下量を過大に予測してしまう。また、間隙水の排水が予測よりも遅くなる。
	ボルダー	ボルダーは掘削の問題となるが、岩石の存在により試験杭の支持力推定が安全側でない結果を与える可能性がある。
	ボルダー基底	端部の群杭支持に不同移動が発生する可能性がある。
	層状粘土	層状粘土のポケットは杭群の不同移動を引き起こす可能性がある。杭の基部の下にある層状粘土は過度の沈下を引き起こす可能性がある。杭長を超える層状粘土は支持力を低下させる可能性がある。層状粘土層は長期的な斜面崩壊を引き起こす可能性がある。
	砂と礫	砂や砂利の塊により杭群の動きに差が生じる可能性がある。

出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al（2024）

8.15.4 クイッククレイ

氷河土壌に関する特殊土の一つとして、クイッククレイが有名である。クイッククレイは、北欧、カナダ、ロシア、アラスカ等の氷河のあった場所で多く見られ、水分を多く含み、揺するだけで泥濘化するような非常に不安定な土である。「クイッククレイ」という呼称は、再成形時に構造が完全に崩壊し、その結果せん断強度がほぼゼロに低下する粘土を指す。クイッククレイは鋭敏比が 50 以上で、完全に再成形されたせん断強度が 0.4kPa 未満の粘土として定義される。0.4kPa の値はフォールコーンテストで 60 度の先端角度を持つ 60g コーンが 20mm を貫入する値として求められたものである。鋭敏比は撹乱されていないせん断強度と完全に再成形された非排水せん断強度の比である。

鋭敏比の低い粘土の分類は、表 8.15.3 に従って行われる。クイッククレイはゆっくりとした地質学的プロセスによって形成され、そのほとんどは、最後の氷河期の海水に堆積した堆積物中に形成されている。内陸の氷が後退するにつれて土地が隆起し、粘土の堆積物が海面より上に残った後、粘土堆積物は浸出を受け、間隙水中のイオン濃度が変化する。浸出は雨水の浸透、下にある透水性の土または岩石の自噴水圧および拡散によって引き起こされる。これらのプロセスは非常に遅く、クイッククレイは中程度の厚さの粘土堆積物に多く見られ、厚い堆積物ではそれほど多くは見られず、透水性の層と地表の近くでのみ発生する。ただし、汽水や淡水に堆積したクイッククレイもある。たとえば、泥炭やその他の腐植質に富んだ土の有機物との接触により、間隙水中のイオン濃度が変化し、粘土がクイッククレイになることがある。

表 8.15.3 鋭敏比による粘土の分類

分類	鋭敏比
低い	<8
中くらい	8~30
高い	>30

出典: Quick clay in Sweden, KARIN RANKKA, YVONNE ANDERSSON-SKÖLD, CARINA HULTÉN, ROLF LARSSON, VIRGINIE LEROUX, TORLEIF DAHLIN（2004）

クイッククレイの形成の原理がブレンナーら（Brand & Brenner, 1981）によって提案されている（図 8.15.2）。

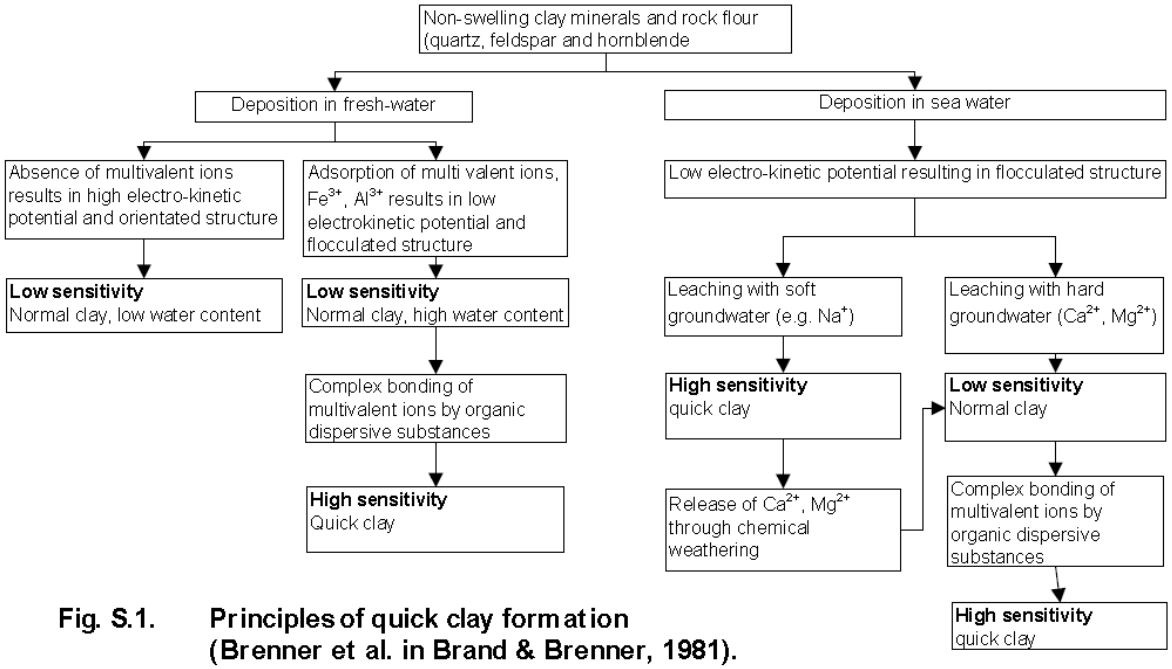


Fig. S.1. Principles of quick clay formation (Brenner et al. in Brand & Brenner, 1981).

出典: Quick clay in Sweden, KARIN RANKKA, YVONNE ANDERSSON-SKÖLD, CARINA HULTÉN, ROLF LARSSON, VIRGINIE LEROUX, TORLEIF DAHLIN（2004）

図 8.15.2 クイッククレイ形成の原理

クイッククレイは低活性の非膨潤性粘土鉱物が大部分を占めており、モンモリロナイトやサポナイトなどのスメクタイトは膨潤性粘土鉱物の 1 つである。活性度 Ac は次のように定義される。

$$A_c = \frac{I_p}{I_c}$$

ここに、Ip: 塑性指数、Ic: 粘土分含有量。

活性が 0.75 未満の粘土は低活性とみなされる。

表 8.15.4 活性度による粘土の分類(Bjerrum, 1954).

活性度 Ac	分類
0~0.75	低い
0.75~1.4	普通
>1.4	高い

出典: Quick clay in Sweden, KARIN RANKKA, YVONNE ANDERSSON-SKÖLD, CARINA HULTÉN, ROLF LARSSON, VIRGINIE LEROUX, TORLEIF DAHLIN(2004)

クイッククレイの液性限界は自然含水比よりも低い。クイッククレイの含水比と液性限界の比率は通常 1.1 よりも高いとされている（図 8.15.3)。

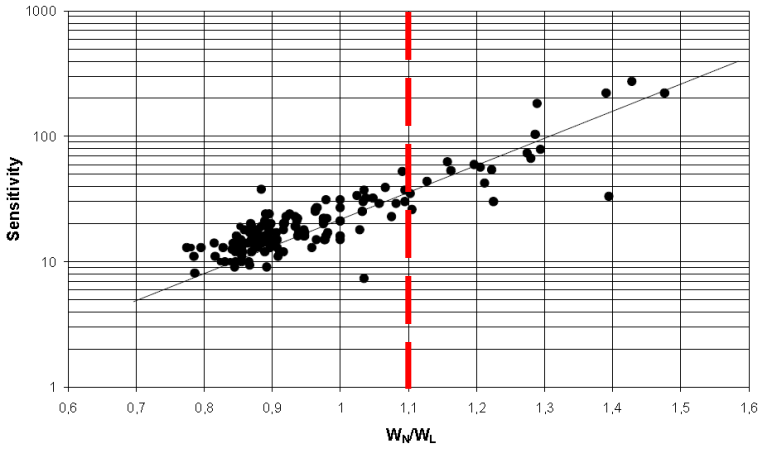


Fig. 3.38. Relation between quasi liquidity index w_N/w_L and sensitivity for Torp clay.

図 8.15.3 自然含水比と液性限界の比と鋭敏比の関係

出典: Quick clay in Sweden, KARIN RANKKA, YVONNE ANDERSSON-SKÖLD, CARINA HULTÉN, ROLF LARSSON, VIRGINIE LEROUX, TORLEIF DAHLIN(2004)

8.16 乾燥土壌

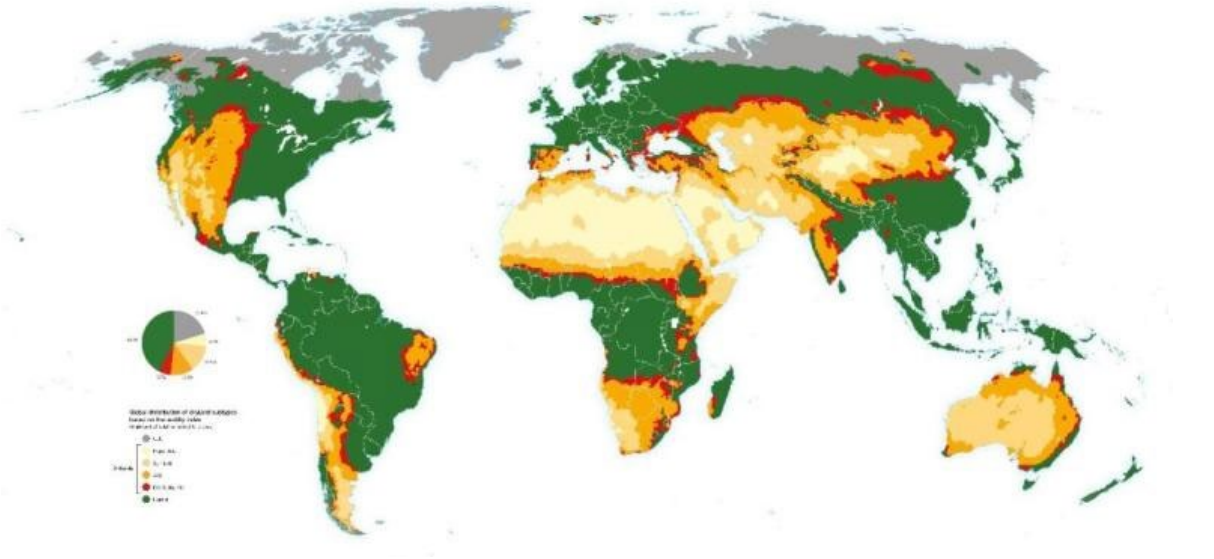
8.16.1 特徴

乾燥土壌は、乾燥気候によって条件付けられた土壌で、年間の蒸発量が年間降水量を上回り、その結果土壌水分が不足した場合に生じる。地球上の陸地の 3 分の 1 が現在乾燥状態にあると言われ、極度乾燥地域と乾燥地域の土壌のうち、活動的な砂丘で構成するのはわずか約 25%である。

乾燥状態は、地球上の暑い場所と寒い場所の両方で見られ、サハラ砂漠などの暑い砂漠の土壌とゴビ砂漠などの寒い砂漠の土壌がある。乾燥土壌は砂漠土壌（Desert Soils）、レグソル Regsols（土漠土）、塩類土壌（Saline Soils）、アルカリ土壌（Alkaline Soils）、ギプサム土壌（Gypsiferous Soils）、カリキソル（Calcisols）、ソルネット土壌（Solonetz Soils）、パレオソル（Paleosols）の種類がある。塩類土壌の中には Salina、playa、sabkha と言う特殊土がある。

8.16.2 乾燥土壌の分布地域

乾燥土壌としての分布図は無いが、気候としての分布図を図 8.16.1 に示す。分布する主な地域は米国（南西部地域: アリゾナ州、ネバダ州、ニューメキシコ州、カリフォルニア州のモハーヴェ砂漠、ソノラ砂漠、グレートベースン: ユタ州、ネバダ州）、メキシコ（ソノラ砂漠、チワワ砂漠）、チリ（アタカマ砂漠）、ペルー（アタカマ砂漠）、サハラ砂漠（エジプト、リビア、アルジェリア、モーリタニア、マリ、ニジェール、チャド、スーダン）、ナミビア（ナミブ砂漠）、ボツワナ（カラハリ砂漠）、サウジアラビア（ルブアルハリ砂漠）、イラン（ダシュテ・ケヴィール砂漠、ダシュテ・ルート砂漠）、シリア砂漠（イラク、ヨルダン、シリア）、中国（タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠）、インド、パキスタン（タール砂漠）、オーストラリア（グレートビクトリア砂漠、シモソン砂漠、タナミ砂漠、グレートサンディ砂漠）、スペイン（タベルナス砂漠）である。



出典: https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity

図 8.16.1 乾燥/半乾燥地域の分布図

8.16.3 工学的問題点

砂漠のような乾燥土壌は風による侵食に対して脆弱で、建設現場や道路が砂で覆われることがあり、作業効率の低下や視界不良の支障が生じる。水の利用可能性が限られているため、地元で調達した水を使用する必要がある。その場合、高濃度の溶存塩分が含まれている水の可能性があり、コンクリートの打設などの建設活動に影響を与える可能性がある。また、工事用の井戸の掘削を行っても、地下水の供給量が不足する可能性がある。

ギプサム土壌やカルキソル(石灰土壌)などの土壌は硬度が高く、掘削や加工が難しい場合があり、工事のコストが増加し、工期が延びる可能性がある。アルカリ土壌とソルネット土壌は膨潤性を示し、膨潤土と同じ問題を引き起こす。

8.17 風化岩・変成岩

8.17.1 一般

風化岩や変成岩には、土砂化する前から工学的な問題を引き起こすものと切土などして急速に風化を起こして問題になるものがある。岩石は風化し易さ、鉱物の種類、気象条件により、様々な土に変化する。表 8.17.1 に岩種と風化土の問題点、風化のし易さ、酸性度、および関係する特殊土を整理したものを示す。

堆積岩の中には特殊土になるだけでなく、中～強風化岩になる過程で盛土材料に使用すると問題になる岩がある。泥岩類は盛土するとき良好な材料でも、土粒子間の空隙が多いと、盛土後に風化して沈下が生じることもある。また、降雨により風化が促進され、崩壊性土のように沈下することがあるので注意する必要がある。

表 8.17.1 種々の岩種と風化のしやすさ、形成される可能性のある特殊土

種類		風化土と問題点	風化の容易さ	酸性度	関係する特殊土
深成岩	花崗岩（Granite）	風化するとマサ土（Grus, Decomposed Granite）になり、強度が大幅に低下する。透水性が高く、雨水で流失し易く、切土法面が崩れやすい（侵食性が高い）。	風化しにくい	酸性	マサ土
	閃緑岩（Diorite）	気候帯により土質は変わり、熱帯地域ではラテライト、温帯地域は粘性土、乾燥地帯では砂質土となる。	花崗岩より風化しやすい	中性	（ラテライト）
	斑れい岩（Gabbro）	膨潤性粘土鉱物を多く含むため膨潤性土になる可能性がある	風化しやすい	塩基性	（膨潤性土）
	かんらん岩（Peridotite）	水や酸素と反応しやすく、蛇紋石（Serpentine）や酸化鉄（Fe_2O_3）に変化する（蛇紋岩化）。	最も風化し易い	超塩基性	膨潤性土
火山岩	流紋岩（Rhyolite）	粘性土	風化しにくい	酸性	ラテライト
	安山岩（Andesite）	スレーキングして粘性土になる。	風化しやすい	中性	ラテライト
	玄武岩（Basalt）	風化すると粘土化し、強度が極端に低下する。膨潤性の高いスメクタイト（モンモリロナイト）を生成し、膨潤性土となる。 風化が進むと ラテライト化し、軟弱な赤土となる。	非常に風化しやすい	塩基性	膨潤性土 分散性土 ラテライト
	コマチアイト（Komatiite）	強塩基性土壌となり軟弱化する	最も風化しやすい	超塩基性	
変成岩	緑色片岩（Greenschist）	玄武岩由来の変成岩なので根性土となり、一部膨潤性土になる可能性がある。	非常に風化し易い	塩基性	膨潤性土?
	角閃岩（Amphibolite）	粘性土になる。	風化しやすい	塩基性	
	片麻岩（Gneiss）	シート状風化が進むと、剥離しやすく、法面崩壊のリスクが高い。透水性が高く、地下水が集中すると崩壊の原因になる。	風化しにくい	酸性(Felsic)	ラテライト

種類		風化土と問題点	風化の容易さ	酸性度	関係する特殊土
	大理石（Marble）	炭酸塩土壌、アルカリ土壌となる。	酸に溶けやすく、風化しやすい	塩基性	
	結晶片岩（Schist）	葉理（層状の割れ目）が発達しているため、斜面崩壊しやすい。風化すると スレーキング（繰り返し乾湿作用で崩壊）を起こし、急速に強度が低下する。	風化しやすい	酸性から塩基性	
	粘板岩（Slate）	頁岩（Shale）や泥岩（Mudstone）が変成して形成された岩なので、土壌になると同様な問題を引き起こす。	風化しやすい（スレーキング）	中性～やや酸性	
	千枚岩（Phyllite）	粘性土となる。	風化しやすい	中性～やや酸性	
	結晶片岩（Schist）	葉理（層状の割れ目）が発達しているため、斜面崩壊しやすい。風化すると スレーキング（繰り返し乾湿作用で崩壊）を起こし、急速に強度が低下する。	中程度に風化しやすい	中性～酸性	
堆積岩	チャート（Chert）	土壌化しない。	非常に風化しにくい	（やや酸性）	
	石英砂岩（Quartz Sandstone）	長期間の風化作用により砂質の土壌が形成されることがある。	非常に風化しにくい	（やや酸性）	
	泥岩（Mudstone）	膨潤性が高く、水を含むと崩壊しやすい（モンモリロナイトを含む）。乾燥時は硬いが、水が入るとスレーキング現象 を起こしてボロボロになる。	風化し易い	（中性）	
	粘土岩（Claystone）	膨潤性が高く、水を含むと崩壊しやすい（モンモリロナイトを含む）。乾燥時は硬いが、水が入るとスレーキング現象 を起こしてボロボロになる。	風化し易い		
	頁岩（Shale）	頁岩（Shale）は層理に沿って崩壊しやすい。Clay shale はスレーキングが早く、粘土化すると膨潤性土になる。	非常に風化し易い／スレーキング	（中性）	膨潤性土 ラテライト
	砂岩（Sandstone）	風化すると風化砂（Weathered Sand）となり、粒状の土壌になる。水を含むと強度が急激に低下する。砂岩が泥岩と互層をなす場合、風化速度が異なり不安定 になる。	比較的風化し易い	（中性）	
	石灰岩（Limestone）	カルスト地形を形成しやすく、地下に空洞（Sinkhole）ができる。酸性雨や地下水の影響で溶解しやすい。予測不能な陥没が発生することがある。	風化しにくい	（塩基性）	レゴスル
	泥灰岩（Marl）	風化すると泥灰土となり、膨潤性を示す土となる。	非常に風化し易い	（塩基性）	膨潤性土
	ドロマイト（Dolomite）	ドロマイトは「象の肌」のような独特の質感を示し、石灰岩と区別される。炭酸塩土壌となる可能性がある。	石灰岩より風化しにくい	（塩基性）	

種類		風化土と問題点	風化の容易さ	酸性度	関係する特殊土
	赤色泥岩（Ferruginous Mudstone）	風化により粘性土になるが、酸化鉄を多く含むのでラテライトになることもある。	風化し易い	（塩基性）	ラテライト

出典: JICA 調査団

8.17.2 泥岩

泥岩は、細粒で粘土を多く含む様々な堆積岩に付けられた一般名である。これらの材料は堆積岩層中に頻繁に発生するため、人工地盤、盛土、または建設資材として使用されることもある。組成と構造の要因に応じて、泥岩は様々な工学的挙動を示す可能性があり、その一部は強度の低さ、耐久性の低さ、体積変化の受けやすさなど、問題のあるものである。泥岩の一般的な地質学的定義は、構成成分の 50%以上を構成する 63 μ m 満の主要粒径を持ち、鉱物構成成分の 50%以上が珪質砕屑鉱物の破片（粘土鉱物、石英、長石を含む）で構成されているとされている。泥岩は粘土質または珪質として定義され、粒度が 0.063～0.002 mm の物質はシルト岩、粒度が 0.002 mm 未満の物質は泥岩と呼ばれている。「土」と「岩」の区別は、圧縮強度に基づいて、非排水せん断強度が 300 kPa（一軸圧縮強度（UCS）600 kPa）未満の材料として定義され、岩石はこれよりも強い材料となる。

表 8.17.2 に強度による泥岩と土の分類を示す。

表 8.17.2 強度による泥岩と土の分類

強度による分類	一軸圧縮強度	特徴
強い泥岩	50~100（MPa）	ナイフまたは地質学用ハンマーのピックの先端でのみ傷をつけることができ、ハンマーで複数回強く叩くことでのみ破壊できる。
中くらいに強い泥岩	25~50（MPa）	ナイフや地質学用ハンマーのピックの先で深く刻み込むことができ、薄いスラブは手で強く押すと割れることがある。標本は地質学用ハンマーで一撃で簡単に割れるか、ナイフの刃で割ることができる。ポケットナイフで剥くことはできない。
弱い泥岩	5~25（MPa）	小さな砂利サイズの破片は強い指の圧力で変形し、地質学用ハンマーの先端で強く打つと簡単に小さな凹みができる。ポケットナイフで剥がすのは困難。
非常に弱い泥岩	1~5（MPa）	地質学ハンマーの先で強く叩くと崩れ、ポケットナイフで剥くことができる。
極めて弱い泥岩	0.6~1（MPa）	親指の爪でへこませることができる。
極めて強い粘土	300~600（kPa）	現場では「非常に硬い粘土」。崩れやすく、再成形できず、親指の爪でへこませることができる。
非常に強い粘土	150~300	試験により判定。現場では「非常に硬い粘土」。
強い粘土	75~150	
中くらいの粘土	40~75	現場判定では「硬い粘土」。崩れたり、壊れたり、塊に再成形される。
低い粘土	20~40	現場判定では「固い粘土」。成形できず、糸状に巻ける。
非常に弱い粘土	10~20	現場判定では「柔らかい粘土」。軽く指で押すと成形できる。
極めて弱い粘土	<10	現場判定では「非常に柔らかい粘土」。指の間に押し出される。

出典: JICA 調査団

8.17.3 工学的問題点

8.17.3.1 スレーキングし易い泥岩の切土

インドネシアでは高速道路の建設で Clay shale の切土崩壊が生じている。Clay shale は急勾配でも容易に切土できるが、雨期に斜面崩壊が生じる。また、Clay shale は切土後に生じた細かい亀裂部が粘土化し、膨潤性粘土となる。亀裂に発生した膨潤性土は、亀裂を進展させ、斜面の脆弱部を形成させ、斜面崩壊を発生させる。スレーキングし易い泥岩を切り土するときは泥岩に水が入らないようにし、植生などで直ぐ被覆する対策が有効となる。

8.17.3.2 基礎

泥岩を基礎として利用する場合、大気への露出による岩盤の劣化を最小限に抑えるために、掘削後すぐに基礎を構築するのが重要である。しかし、間隔の狭い不連続面や比較的弱い岩盤がある場合、浅い基礎の支持力は不十分になりがちである。

杭基礎を使用する場合、杭を打ち込むことにより地盤が砕け、地下水の状態が変化する可能性がある。これは、セメントで固められた泥岩で特に問題になる。先端支持杭の一般的な設計では健全な岩盤に杭直径の約 3～4 倍の根入れを行い、杭載荷試験を実施して十分な支持力があることを確認することが重要である。

8.17.3.3 黄鉄鉱による泥岩の体積変化と劣化

黄鉄鉱の酸化により硫酸塩を多く含む酸性間隙水が生成される。方解石、コンクリート、粘土との反応による酸の中和により、石膏やその他の鉱物の膨張が形成される場合、沈殿は酸化領域から離れた場所で発生する可能性があり、特に層理面、ジョイント、または構造界面などの応力が最も少ない領域で発生する。

特定の黄鉄鉱を含む泥岩が隆起の問題を引き起こすかどうかは、黄鉄鉱の性質、泥岩内の他の鉱物の存在、環境条件、構造の設計など、多くの要因によって決まる。たとえば、適切に設計された土工では、比較的不浸透性のキャッピング層が存在することで黄鉄鉱の酸化の範囲が制限されるため、反応は自己制限的になる。土工充填の問題を回避するための対策は、材料を通る間隙流体の移動を制御する、排水性の粒状分離層を設けることである。

8.17.3.4 掘削

ほとんどの種類の泥岩は掘削機械を使用して比較的簡単に掘削できる。掘削方法は通常、弾性波速度、一軸圧縮強度と亀裂間隔の評価に基づいて決定される。トンネル、シャフト、その他の地下空洞の掘削には泥岩のスレーキング特性を評価する必要がある。シルト含有量が少なく、粘土含有量が多い泥岩では、掘削中に安定した状態を維持できるほど十分に強度があるかもしれないが、ライニングによるサポートが完全に機能する前に急速に劣化する可能性がある。

泥岩が横方向に変位することがある。耐久性の低いセメント化または圧縮された泥岩、特に膨張性粘土鉱物を含む泥岩は、表土と横方向の拘束が減少すると大幅に膨張し、隆起と横方向の変位を引き

起こす。剛性支持構造の過負荷になる可能性があり、再負荷時に過度の沈下が発生する可能性がある。この現象は水の存在によって悪化することがあり、耐久性の高いセメント化泥岩よりも過度に圧密された粘土堆積物でより急速に進行する傾向がある。露出した泥岩を吹付けコンクリートで覆うなど、露出時間を最小限にすることで、隆起の影響を回避できる場合がよくある。覆っても黄鉄鉱の酸化と石膏の沈殿による隆起は防げないが、水の浸入を防ぐことで粘土鉱物の膨張とスレーキングは軽減される。

8.17.3.5 高速道路建設

高速道路建設において、黄鉄鉱を含む泥岩の問題は風化した材料をできるだけ長くそのままにしておくか、露出したばかりの地面を圧縮粘土の層またはジオメンブレンバリアで覆うことで軽減できる。別の対策としては泥岩を適切な期間風化にさらして、建設前に黄鉄鉱の酸化と反応生成物を生成することである。この方法の欠点は建設計画の遅延である。さらに、現在存在する硫酸塩は化学的侵食に関与し、地表水や地下水の流入が適切に管理されていない場合、硫酸塩鉱物の溶解と再沈殿によって隆起を引き起こす可能性がある。

泥岩の転圧はシープスフットローラーを使用して行うのが最適である。シープスフットローラーは材料を完全に混合し、空隙をより効果的に減らすと同時に、層状の盛土内に滑らかで強度の低い表面が形成されるのを防ぐ。

8.17.3.6 泥岩を用いた高盛土の水浸沈下

泥岩はシルトや粘土などの微細な粒子が堆積して形成された堆積岩であり、水分の影響を受けやすく、盛土材として使用すると浸水によって沈下を引き起こすことがある。泥岩は乾燥状態では十分に転圧されて、密度も品質管理基準をクリアしていれば、表面強度も十分あり問題ないと考えられる。

低い盛土では大きな問題とはならないが、高盛土すると自重による圧力が大きくなり、接合部の破砕が生じる可能性がある。これに降雨の浸透が到達すると、粒径の大きい泥岩では表面からのスレーキングが始まり、泥岩同士の接触部が弱くなり、空隙内に土粒子の移動が始まり、変形が盛土天端まで伝達して沈下が生じる。

泥岩を盛土材料として使用するときは乾湿繰り返し試験を行い、材料の耐久性を確認するのが良い。もし、スレーキングし易い材料の場合は、盛土前に泥岩を砕き、均等係数が大きくなるように調整する、もしくは細粒な材料と混合し粒度調整を行うことが対策として考えられる。高盛土では泥岩の材料自体の圧縮強度が弱い場合、水浸沈下だけでなく、破砕性土のように材料自身が破砕されて沈下が生じることもある。通常は盛土時に破砕され問題ないと考えられるが、風化に伴いクリープ的に材料が破砕し、沈下が進行する可能性もあるので、施工後のモニタリングも重要となる。

第9章 JICA 特記仕様書への提言

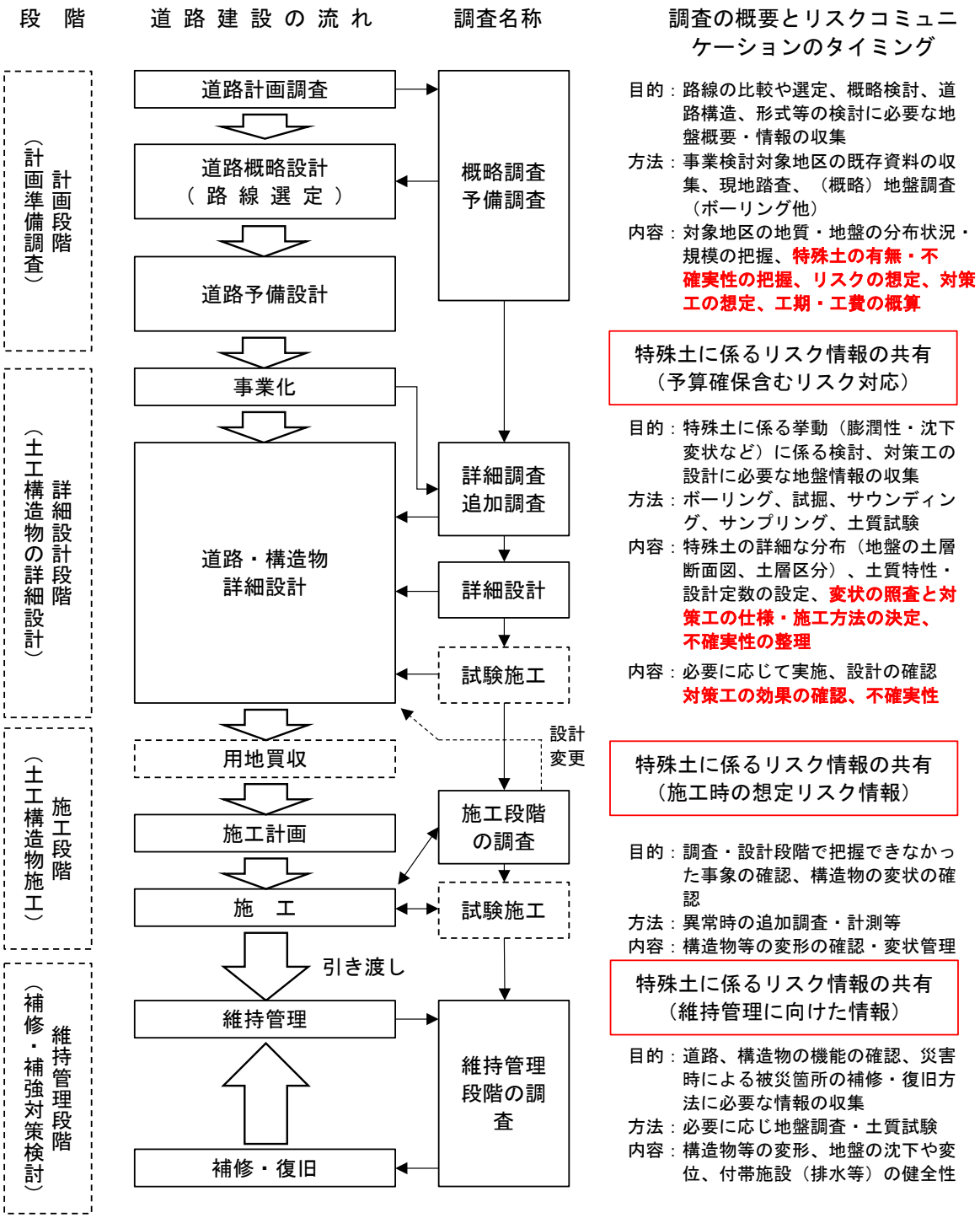
9.1 特記仕様書のあるべき方向性

前章まで特殊土に係る調査結果を取りまとめた通り、世界に分布する特殊土は多様であり、インフラ整備事業に深刻な問題を与えるリスクがあるが、その調査方法や対策工法の検討・設計方法は確立されているとは言えず、技術情報も不十分な状況である。特殊土が分布する ODA 事業に係る準備調査の段階では、特殊土が分布する地域の事業には通常の事業と比較して不確実なリスクをより多く含んでいる事から、準備調査の段階からリスクマネジメントの観点を取り入れることが重要である。

図 9.1.1 には道路事業を例とした事業実施の流れを示す。本事業実施の流れに示す通り、準備調査段階では特殊土の分布の有無を確認し、そのリスクと不確実性を想定した上で対策工法と対応に係る工期・工費を算定する必要がある。

3.2 節で示した ODA 案件に係る JICA 特記仕様書のレビュー結果から、一部特殊土が分布する可能性のある国において特殊土の有無、問題土に係る調査を示唆する記述があったが、多くの仕様書において自然条件調査に係る記載は定型的な記載となっている。一方で、特殊土のリスクがある可能性のある事業の特記仕様書では、円滑に事業を実施するために特殊土のリスクに係る調査を促進することを目的として、以下に示す方向性で踏み込んだ記述を追加することが推奨される。

- 想定外のリスクを含有する特殊土の問題にかかり、コンサルタントの提案に方向性を与える
- 事業段階ごとのリスク対応を示唆し、調査時点における必要な対応を促す
- 想定される特殊土ごとに最低限実施する調査項目を記載する
- 調査に必要なリソースを定義する



出典：JICA 調査団

図 9.1.1　特殊土に係るリスクが想定される事業の流れ（道路事業の例）

9.2 特記仕様書の自然条件調査に係る記述の追記提案

多くの特記仕様書で用いられている自然条件調査に係る定型文は以下の通りである。

自然条件調査に係る定型文

自然条件調査は、概略設計、事業実施計画、事業費の積算について必要な精度を確保し、また本事業により新設・拡張・附帯される施設・設備が自然・社会・生活環境に及ぼす影響を適切に予測し、その影響を回避/最小化しうる設計・施工を検討するために行う。

具体的な自然条件調査の細目（調査項目、調査内容、仕様、数量等）については、コンサルタントがプロポーザルで提案することとする。

前述した方向性、ならびに特殊土に係る技術的な問題に鑑み、膨潤性土、分散性土、崩壊性土、ラテライトに係る事業に向けた特記仕様書への追記事項を以下に提案する。

9.2.1 膨潤性土

膨潤性土が分布する地域では、崩壊性土の層に水分が浸潤することにより土が膨張し、上部の構造物（舗装や建屋など）が損傷する被害や、法面の崩壊が発生することがある。このため、調査段階で基礎部の地盤や盛土材料に膨張性を示す膨潤性土が含まれる可能性を適切に把握し、必要な対策を提案し、その費用を算定することが求められる。膨潤性土に係る対策工は国によって基準がある場合があるが、必ずしも効果が十分ではなく問題が発生する事例もあることがヒアリング調査で判明している。このため、リスクに係る対象地区の情報を収集し、リスクを極力適切に想定した上で対策の必要性の判断、対策工法の検討を行い、対策費用を算定することが重要である。また膨潤性土の判定に係る試験は通常の物理試験に加え、自由膨張率試験や鉱物を同定する X 線回折法、圧密試験による膨張性・膨張圧の測定などがある。対象地・対象とする構造物に鑑み、適切な試験法を選定して実施する。

上記の事項に鑑み、通常の自然条件調査の定型文に追記する事項を下記の通り提案する。

膨潤性土が分布する可能性のある事業への追記事項

なお、事業の対象地域では、膨潤性土が分布する可能性があることから、通常の自然条件調査に加えて以下の調査を実施する。

- 対象地区の事業における膨潤性土に係るリスク情報（類似工事の問題、対策工の事例など）、分布状況に係る情報の収集
- 膨潤性土の判定に係る試験の実施
- 膨潤性土に係るリスクの想定、対策工法の検討
- 膨潤性土が事業に及ぼす不確実性の整理

9.2.2 分散性土

分散性土が分布する地域では分散性土地盤に水分が浸透することにより、地盤中の土粒子が溶け出しパイピングホールが発生することで上部の構造物（舗装や堤防など）の陥没や、法面の浸食崩壊などが発生する。このため、調査段階で分散性土の分布の有無を適切に判断し、必要な対策を計画し、その費用を算定することが求められる。分散性の有無の判断は一般的な物理試験だけでは難しく、ダブルハイドロメーター試験やピンホール試験で判断される。対策工法については確立しておらず、対象地区の類似工事の事例などを調査した上で問題のメカニズムを考慮し、適切な対策を検討する必要がある。

以上の事項に鑑み、通常の自然条件調査の定型文に追記する事項を下記の通り提案する。

分散性土が分布する可能性のある事業への追記事項

なお、事業の対象地域では、分散性土が分布する可能性があることから、通常の自然条件調査に加えて以下の調査を実施する。

- 対象地区の事業における分散性土に係るリスク情報（類似工事の問題、対策工の事例など）、分布状況に係る情報の収集
- 分散性土の判定に係る試験（クラム試験、ダブルハイドロメーター試験、ピンホール試験）の実施
- 分散性土に係るリスクの想定、対策工法の検討
- 分散性土が事業に及ぼす不確実性の整理

9.2.3 崩壊性土

崩壊性土が分布する地域では崩壊性土地盤に水分の浸入や荷重増加により急激な変状や堆積変化が発生し、上部の構造物の損傷や地盤の崩壊・地滑り、切土法面の崩壊などが発生する可能性がある。その被害は施設の機能上・構造上の大きな損傷を引き起こす深刻なものとなることが多いため、崩壊性土の分布状況を詳細に把握し、リスクを踏まえた事業計画とする必要がある。崩壊性土に係る基準やガイドラインは整備されておらず、体系的な研究成果も少ないことから、問題の発生メカニズムを理解し、適切な調査・計画・設計施工を行う必要がある。

以上の事項に鑑み、通常の自然条件調査の定型文に追記する事項を下記の通り提案する。

崩壊性土が分布する可能性のある事業への追記事項

なお、事業の対象地域では、崩壊性土が分布する可能性があることから、通常の自然条件調査に加えて以下の調査を実施する。

- 対象地区の事業における崩壊性土に係るリスク情報（類似工事の問題、対策工の事例など）、分

布状況、周辺部の表流水・地下水の経路に係る情報の収集と整理

- 崩壊性土の判定に係る試験の実施
- 崩壊性土に係るリスクの想定、対策工法の検討
- 崩壊性土が事業に及ぼす不確実性の整理

9.2.4 ラテライト

ラテライトは盛土材料として活用されることが多い。ラテライトはその形成過程に鑑み、採取される材料のばらつきが大きく、良質な材料を十分に確保できないケースや、期待した特性が得られないまま現場で使用され、損傷が発生することがある。また基礎地盤にラテライト層が分布している場合、表層部は良質だが深度方向で特性が変わり期待される強度・支持力・CBR がないことから上部の構造物の損傷が発生することなどがある。この特性のばらつき、堆積構造を認識し、調査を行うことが重要である。

以上の事項に鑑み、通常の自然条件調査の定型文に追記する事項を下記の通り提案する。

ラテライトが分布する可能性のある事業への追記事項

なお、事業の対象地域では、ラテライトが分布する可能性があることから、通常の自然条件調査に加えて以下の調査を実施する。

- 対象地区の事業におけるラテライトに係るリスク情報（類似工事の問題、対策工の事例など）の収集
- ラテライト層の深度方向の詳細な分布状況の確認
- ラテライトに係るリスクの想定、対策工法の検討
- ラテライトが事業に及ぼす不確実性の整理

9.2.5 珊瑚土壌

珊瑚土壌は一般的な粘性土や砂質土とは異なった性質を示し、珊瑚の含有率の違いなどばらつきが大きい土壌であること、珊瑚自体が多孔質であることから支持杭の荷重を受けることで珊瑚の構造やセメンテーションが破壊され所定の強度が発揮されないことがある。このため、珊瑚土壌のリスクを把握し、適切な事業計画を立案する必要がある。

また、島しょ国など、珊瑚土壌が支配的な国では、良質な材料、コンクリート骨材として利用されることがある。一方で、当該国に関連する基準やマニュアルがないことから、ODA 事業などで海外基準を用いた事業では珊瑚由来の土質材料が要求性能に合致せず、海外からの材料調達となり工事

費が増大するケースがある。経済的で環境負荷を低減した事業の実施のために、現地材料の有効活用の視点が重要である。

以上の事項に鑑み、珊瑚土壌のリスク、あるいは土質材料としての適用性検討の必要性に鑑み、通常の自然条件調査の定型文に追記する事項を下記の通り提案する。

珊瑚土壌が分布する可能性のある事業、珊瑚由来の材料の適用可能性がある事業への追記事項

なお、事業の対象地域では、珊瑚土壌が分布する可能性があることから、通常の自然条件調査に加えて以下の調査を実施する。

- 対象地区の事業における珊瑚土壌に係るリスク情報（類似工事の問題、対策工の事例など）の収集
- 珊瑚土壌の深度方向の詳細な分布状況の確認
- 珊瑚土壌に係るリスクの想定、対策工法の検討
- 珊瑚土壌が事業に及ぼす不確実性の整理
- 珊瑚由来の土質材料に係る事業への適用性の調査（特性・賦存量）

9.3 詳細設計・施工・維持管理段階に引き継ぐ情報の整理

調査段階で整理した特殊土に係るリスクならびに事業に及ぼす不確実性を踏まえ、準備調査以降の各段階に引き継ぐ必要がある情報を整理することが円滑な事業の実施に向けて重要であることから、調査項目として以下の内容を追記することを提案する。

詳細設計・施工・維持管理段階に引き継ぐ情報の整理

想定される特殊土に係るリスクに鑑み、詳細設計時に実施すべき調査項目、施工時に想定されるリスクと施工時の留意事項、維持管理者へ引き継ぐ情報を整理し、とりまとめる。

9.4 要員の配置

特殊土に係る技術情報は体系化、基準化されておらず、事業リスクを低減するためには対象とする特殊土の深い理解と専門の技術力を活かし、定型的ではなく、案件・地域ごとに個別の適切な対応が求められる。このため、調査にあたっては土質基礎の専門性を有する経験豊富な技術者がアサインされること、また通常の案件と比較して必要な人月を多く想定することも重要と考えられる。

事業で想定されるリスクに鑑みて担当技術者を評価対象とすることも検討することが望まれる。

第10章　今後の案件形成への助言

10.1　現地ヒアリング結果に基づく期待される支援事業

特殊土の課題解決、円滑な事業の実施を目的とした本邦技術の海外展開について検討するため、現地調査にて日本や第三国に期待する特殊土を含む地盤関連技術についてヒアリングを行った。ヒアリング結果をとりまとめ、表 10.1.1 に示す。各国、特に沈下等の地盤の変状に直面している国からは軟弱地盤対策に係る技術への期待がきかれたほか、試験方法や試験機材に関する技術移転、特殊土に係る基準の整備に向けた研究協力などが挙げられている。

表 10.1.1 日本に期待する主な支援事業（ヒアリング調査結果・国ごと）

対象国	日本に期待する主な支援事業
カンボジア	特殊土の調査・対策工の考え方・設計方法に係る共同研究（SATREPS），マニュアル・基準の整備を含めた技術協力，軟弱地盤対策工法を取り入れた従来型の道路整備事業，試験方法に関する人材育成等の技術協力，本邦地盤改良技術（浅層・中層・深層改良など）の普及化事業，河川浸食防止事業の実現に向けた技術開発プロジェクト
インドネシア	のり面処理技術に係る日本からの技術支援，地盤改良技術については既にインドネシアの軟弱地盤対策で適用済みであり、多くの現地建設会社が高い関心を持ち、引き続き質の高い技術移転が望まれる，特殊土壌対策に関する共同研究（SATREPS など），地盤沈下や地すべり防止のためのモニタリング技術支援，セメントや化学薬品を現地の特殊土条件に合わせた技術開発
タイ	質の高いインフラ整備のためのプロジェクトマネジメントや道路整備・点検に関する技術協力，研究機関との協働による技術開発，適用可能な本邦地盤関連技術としては現地の関心が比較的高い軟弱地盤改良技術（浅層・中層・深層）ならびにその固化材料に係る技術であり、その普及化事業
キルギス	地盤調査に係る研究・技術協力，特殊土（黄土層と想定される）に起因する区間の対策工整備事業（地すべり地を迂回した橋梁整備事業など），耐震関連の技術の技術移転
タジキスタン	地盤調査に係る研究・技術協力、特殊土（黄土層と想定される）に起因する区間の対策工整備事業（地すべり地を迂回した橋梁整備事業など），沈下などの変状が止まらない区間の対策工としての地盤改良技術（浅層～中層）の技術移転，地盤改良技術の現地地盤への適用実績は無く、適用にあたっては調査・試験施工が必要
パラオ	サンゴ由来の適切な利用に関するマニュアル作り，試験設備の供与などを含めた技術協力プロジェクト，骨材材料として安価に安定的な品質で珊瑚礁由来の材料を用いるための技術支援
マーシャル諸島	現地調達のサンゴ由来材料でも所定の強度を発現できる技術，サンゴ由来材料が工学的に適切か判断できる環境整備，専門家派遣等による技術協力，塩害対策に関する技術支援，骨材材料として安価に安定的な品質で珊瑚礁由来の材料を用いるための技術支援
エチオピア	膨潤性土の土質改良に係る共同研究（既に SATREPS で実施中），地すべりに係る対策等に係る共同研究や技術協力事業，地盤改良技術（浅層改良）や固化材に関する共同研究
ケニア	特殊土壌対策に関する研修セミナーへの技術支援，洪水対策、のり面処理技術、排水処理技術、地盤改良技術に係る技術支援，地盤改良技術は、特にセメント、石灰に代わるより効率的な材料安定化技術

対象国	日本に期待する主な支援事業
タンザニア	切土・高盛土での斜面崩壊対策技術支援，地盤探査技術や解析ソフトウェアを活用した地盤解析技術の支援，気候変動に対応する気候マップの見直し，技術者教育プログラムへの技術支援
ギニア	特殊土に係る支援事業として各機関から地盤調査に係る技術協力，地盤情報なども含めたデータベースの強化、当地に適合したマニュアルの作成支援，ギニアの産官学とともに実施する道路建設・維持管理の質の向上に向けた研究協力（SATREPS）事業，本邦地盤関連技術として、土質材料としてラテライトを安定した品質で利用するための改良技術（粒度調整・固化材による改良など）の技術支援
コートジボワール	コートジボワールの産官学とともに実施する道路建設・維持管理の質の向上に向けた研究協力（SATREPS）事業，データベース強化や維持管理能力向上などを含めた道路事業の質の向上に向けた技術協力事業，本邦地盤関連技術として、土質材料としてラテライトを安定した品質で利用するための改良技術（粒度調整・固化材による改良など）の技術支援
ガーナ	特殊土に関する調査法・対策工法に係る共同研究事業（SATREPS），ガイドラインの作成、データベースの強化等に係る技術協力事業，本邦地盤関連技術として、土質材料としてラテライトを安定した品質で利用するための改良技術（粒度調整・固化材による改良など）の技術支援

出典：JICA 調査団

10.2 日本に期待する支援事業と海外展開の事例の類型化

前節で取りまとめた各国の関係機関が日本に期待する技術や支援事業を類型化し、また、既往の海外展開の事例とともに表 10.2.1 にとりまとめた。本表から、期待される支援事業ごとにこれまでも海外展開が進められている事例があることが分かる。引き続き固有技術の技術移転や、技術支援・人材教育・共同研究等のスキームを通じた地盤関連の基礎技術ならびに対象地域の特殊土に係るインフラ整備事業における課題解決に向けた支援が望まれている。

表 10.2.1 日本に期待する支援事業と海外展開の事例

大区分	中区分	日本に期待される主な支援事業	海外展開の事例
技術移転	地盤改良技術	- 本邦地盤改良技術（浅層・中層・深層改良など）の普及化事業	- 膨潤性土土質改良事例 - 回転式破砕混合工法による土質改良事例 - 寒地土研と IRE の共同研究締結に伴う泥炭地盤上の道路建設工事における地盤改良技術 - JICA 普及・実証事業の事例(中層混合処理工法の事例) - 固結工法における混和剤、添加材による品質改良の事例
	のり面処理技術	- のり面処理技術（緑化工・構造物工）の普及化事業	- 多機能フィルターによる法面保護事例 - BSC 工法の事例（緑化工）
	斜面崩壊対策	- 斜面崩壊対策技術・地すべりモニタリング技術の普及化事業	- 日本地すべり学会の技術移転の事例
技術支援	技術支援	- マニュアル・基準・ガイドラインの整備に関する技術支援 - 地盤情報データベース強化に関する技術支援 - 地盤探査や地盤解析に関する技術支援 等	―
	人材教育	- 技術者教育プログラム、室内土質試験に係る技術者支援 等	- MNGD プロジェクト
資金援助	設備供与	- 各種材料試験が実施できる環境整備支援	- MNGD プロジェクト
共同研究	SATREPS	- 特殊土の調査・対策工の考え方・設計方法に係る共同研究	- MNGD プロジェクト

出典：JICA 調査団

10.3 本邦技術の海外展開事例と現地適合化に向けた課題

表 10.3.1 にヒアリング調査、資料調査結果から、本邦技術の海外展開事例と現地適合化に向けた課題をまとめて示す。ここで示したように特殊土を含む地盤関連技術の海外展開は様々な試みがなされていることが分かる。特殊土は各地で特有のものであることに鑑み、対象地域の特殊土への適用性の確認、技術の適用基準の整備、材料や資材の輸出入に係る調達コストや許可などの手続きが課題として挙げられる。

表 10.3.1 本邦技術の海外展開事例と現地適合化に向けた課題

展開事例	概要	課題
回転式破砕混合工法	- 円筒内で高速回転する複数本のフレキシブルなチェーンの打撃力で地盤材料の破砕・細粒化・添加剤の均一分散させる土質改良工法 - 一つの機構で破砕と混合を同時に実施 - 高含水比粘性土から軟岩まで幅広い土砂性状に適応 - 建設発生土の有効活用に適する工法 - 石灰・セメント等の安定処理による土質改良技術の活用により、良質な改良土を作成 - 膨潤性土や分散性土などの粘土質の特殊土壌に適用できる可能性あり	- 試験施工等による適用性評価やプラントの機材費、輸送費、関税等の初期投資が高額 - 本工法（新技術）の活用ができるような道路設計・施工標準が必要 - 現地スタッフへの土質改良に係る知見の移転が必要 - セメント等添加材の利用が有用であるが、現地で調達できる材料が限定される可能性がある - プラント形式ではなく、自走型施工機の開発も進められており、機材費、輸送費等の経費削減が図れる可能性がある。
混和剤による土質改善（膨張性土に対する対策）	- 膨脹性土は形成される粘土鉱物により膨潤性が支配され、その粘土鉱物としてはモンモリロナイトが主体となる。 - モンモリロナイトの存在だけで膨潤性が高いとはならず、同じモンモリロナイトのCa+モンモリロナイトと Na+モンモリロナイトのうち、Na+が多いほど膨潤率も高くなる。 - 粘土層表面に Na+モンモリロナイトを吸着・結合できる混和剤を散布することで、膨潤性を取り除くことで土質材料の改善を図ることができる。	- 材料の輸出の許可や関税などの影響によって、調達難易度及びコストが高くなることがある。 - インドネシアでは、花王の現地法人(KIC)で現地製造をすることで国内使用を可能としている。
多機能フィルターによる膨潤性土斜面の法面保護	- 多機能フィルターは早期法面保護と植生を図る工法である。 - 日本では浸食性が高い地盤で用いられるが、インドネシアでは膨潤性土の斜面に適用を試み、複数の地点で施行され実績を残している。 - 黄砂地盤やラテライトの盛土斜面にも対応可能と考えられている。	- 積極的に民間企業から関係機関に試験施工を申し込み、その後の受注につなげている。 - パンフレットではインドネシア以外に中国、東ティモール、ブータン、台湾の実績があり、海外展開に積極的。
軟弱地盤（泥炭地盤）に関する研究協力	- 北海道に広く分布する泥炭地盤を対象。寒地土木研究所では長年にわたり研究・技術開発が実施されており、豊富	- 他国への展開 - 対象土の拡大 - 研究段階からの協力により、特殊

展開事例	概要	課題
	な知識、技術等を有している。 - 2014 年に寒地土研－インドネシア共和国公共事業・国民住宅省道路研究所(IRE)と研究協力協定を締結し、泥炭地盤における道路建設に関する技術協力を実施している - 本協力関係のもと、中層混合処理工法の実証事業において、インドネシアの技術基準書への取り込み・認可につながった。	土（泥炭地盤）に関するガイドライン整備や地盤改良技術の確立などの上流段階にかかわることで、本邦技術を使いやすい環境の醸成が可能。
セルロース土質改良工法	- SATREPS において、「特殊土地盤上道路災害低減に向けた植物由来の土質改良材の開発と運用モデル」が実施 - エチオピアで問題となっているブラックコットンソイルの特殊土対策工の運用モデルを構築することを目的 - 日本国内で実用化されている古紙を原料とする改良材「セルドロン」のメカニズムを応用し、在来植物由来のセルロース土質改良材を作成する手法を開発 - 2024 年 11 月現在、本技術の運用に関するマニュアルを作成しており、エチオピア国における道路整備への活用が期待できる	- エチオピア道路建設に係る設計基準への組み込みや実施工後の舗装等の変状モニタリングによる効果の確認等 - 他国への展開
地すべり技術の海外展開	- 本邦は地すべり専門の学会を有し、多種多様な地すべりの調査、対策、緊急対応の経験・技術を有し、蓄積している。 - 地すべりの専門家がいない、地すべりという現象自体を認識できていない途上国は多く、実際に地すべり災害が発生した際に必要な対応・対策について不十分で、日本技術移転のニーズは高いと考えられる - 実際の現場作業等や、技術マニュアルの作成を通した調査技術の技術移転 - 施工機械の操作指導や、実際の対策工設計・施工を通した対策工設計・施工技術の技術移転	- 途上国においては、地すべり監視機器の維持管理の問題や、技術的困難さの問題もあり、本邦のようなシステムの構築が困難な場合がある。 - 途上国においては、経済的・技術的理由から地すべり防止工よりも移転が優先される傾向にある場合がある。 - 技術の継承には、地すべり監視機器設置作業などの事業が継続的に発生する必要がある。災害が発生しないことに越したことはないが、対策プロジェクト終了後の事業の継続性が課題となる。 - 各国の技術力や技術者の数など、技術移転による理解度に差があることを認識する必要がある。

出典：JICA 調査団

10.4 本邦技術海外展開に向けた助言

上述したように、特殊土が分布する国々は特殊土の対策に係り、様々な課題を抱えておりその課題解決に向けた本邦の支援を期待している状況である。

支援には共同研究や技術協力プロジェクトを活用した特殊土に係る基礎研究と調査方法、対策方法に係る基準の整備に向けた上流側の支援から、固有技術の現地の適合性の確認と売込みが挙げられる。固有技術の展開にあたっては現地政府へのアプローチ、基準との適合性や輸出入のコスト・手続きが課題となっていることから、上流側の技術協力により、特殊土に係る現地関係者への理解促進や基準の整備に向けた支援を進めるとともに、技術を組み込んだ ODA 事業の案件形成、ODA 事業を通じた対策技術の売込みと拡大が有効であると考えられる。

現地調査結果も踏まえ、本邦技術の海外展開に向けて有力と考えられるプロジェクト案を表 10.4.1 に示す。

表 10.4.1 本邦技術の海外展開に向けたプロジェクト案

対象地域	対象土	概要
東南アジア・東アフリカ	分散性土・膨潤性土	【共同研究／技術協力】 分散性土・膨潤性土に係る情報の収集、試験方法に係る調査・研究と対策工の適用性確認に向けた実証実験、研究結果に基づく基準の策定と関係者の能力向上支援
東南アジア・東アフリカ	分散性土・膨潤性土	【無償資金協力事業】 膨潤性土の対策（土質改良技術（機材・もしくは改良材による））を適用した建設事業の案件形成
西アフリカ	ラテライト	【共同研究／技術協力】 道路整備の質向上を目的としたラテライトに係る情報の収集、試験方法に係る調査・研究と対策工の適用性確認に向けた実証実験、研究結果に基づく基準の策定と関係者の能力向上支援
西アフリカ	ラテライト	【無償資金協力事業】 ラテライトを含む盛土材料の材料調整・改良技術（機材による）を適用した建設事業の案件形成
中央アジア	黄土	【共同研究／技術協力】 黄土に係る情報の収集、試験方法に係る調査・研究と対策工の適用性確認に向けた実証実験、研究結果に基づく基準の策定と関係者の能力向上支援

出典：JICA 調査団

巻末資料

Appendix A 全世界、地域／国別の地図上に表した各特殊土の分布状況

A1　膨潤性土

A1.1　全世界

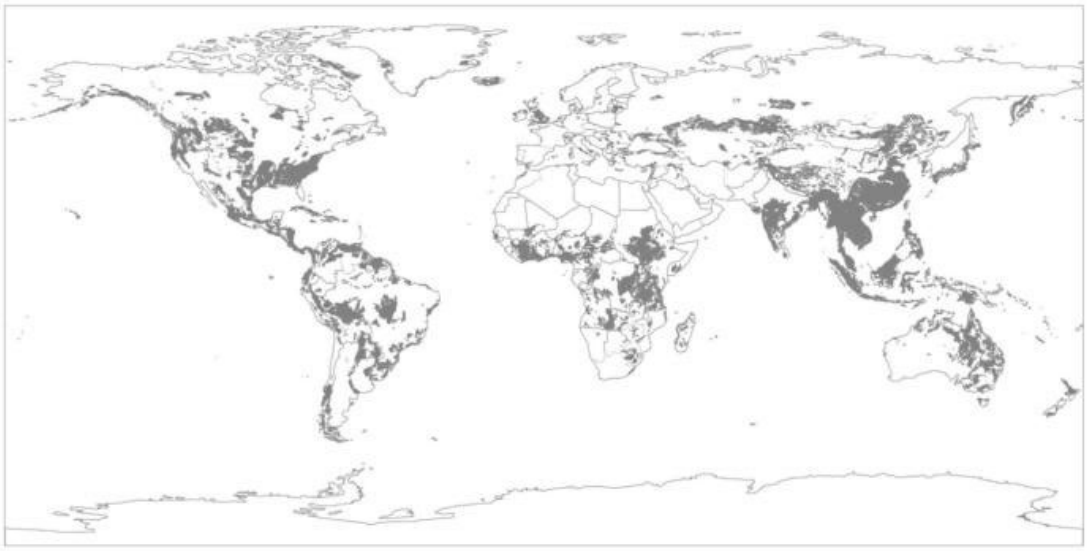
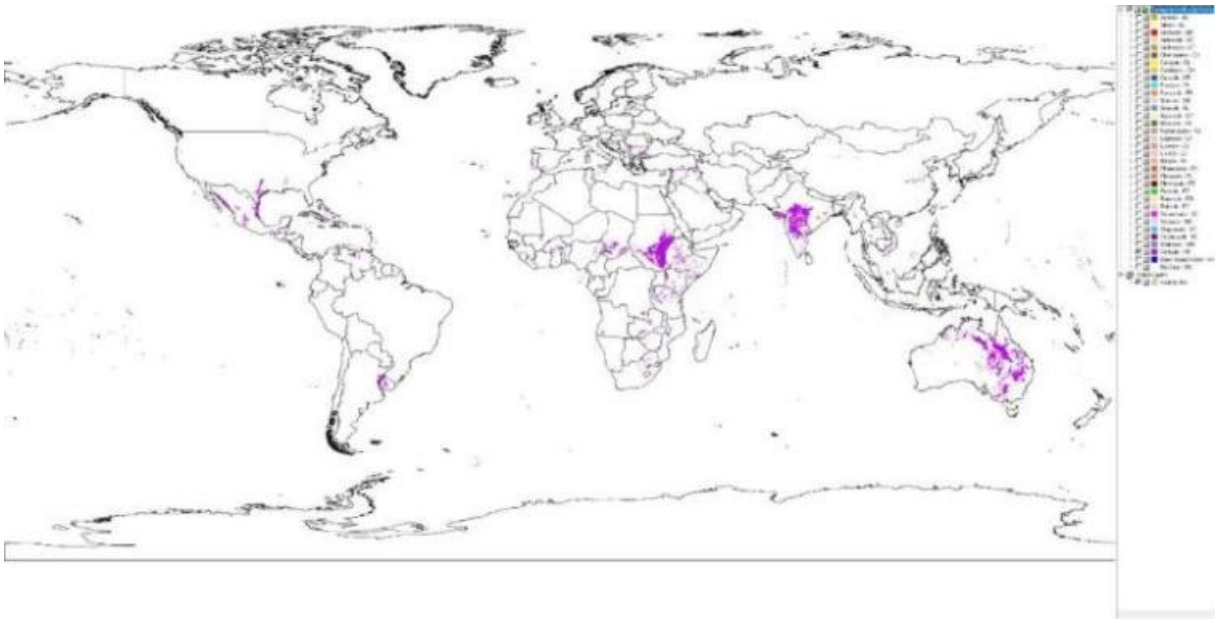


Figure 1 – Global distribution of shrink–swell soil where major construction costs occur (by region)

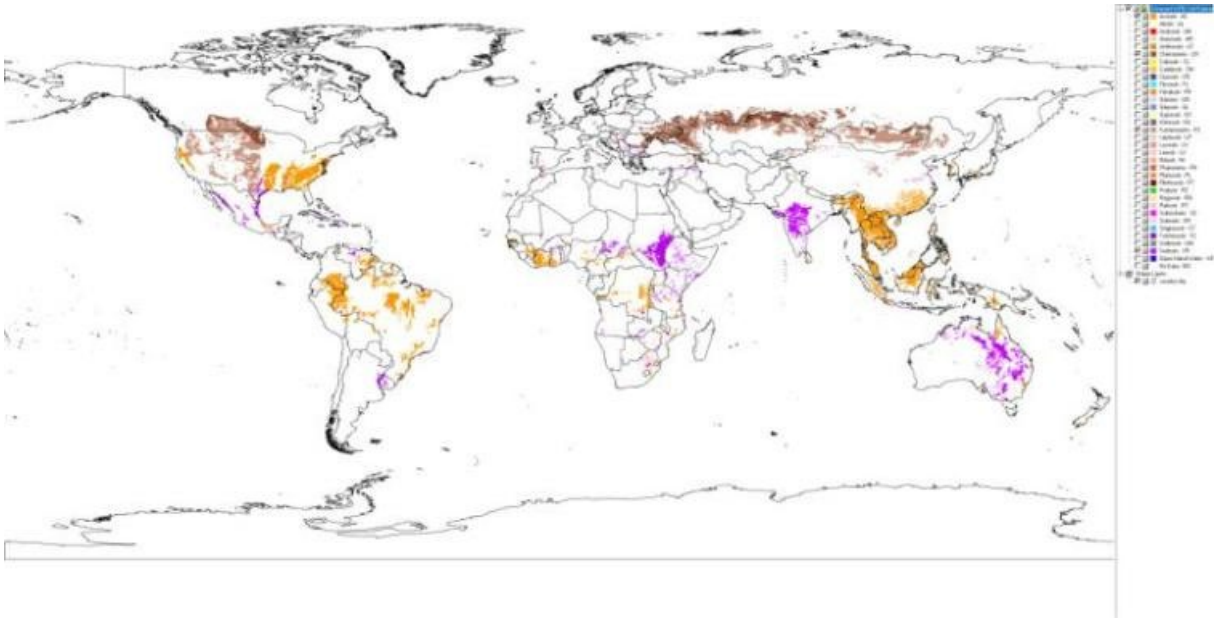
出典：Swelling and Shrinking Soils, Jones, Lee; Banks, Vanessa; Jefferson, Ian. 2020

図 A-1 膨潤性土の世界的分布図



出典：HWSD Ver.2.0

図 A-2 Vertisols の世界的分布図(HWSD)



出典：HWSD Ver.2.0

図 A-3 膨潤性土の可能性のある土壌(Acrisols, Chenmnozems, Kastanozems, Vertisols)
の世界的分布図(HWSD)

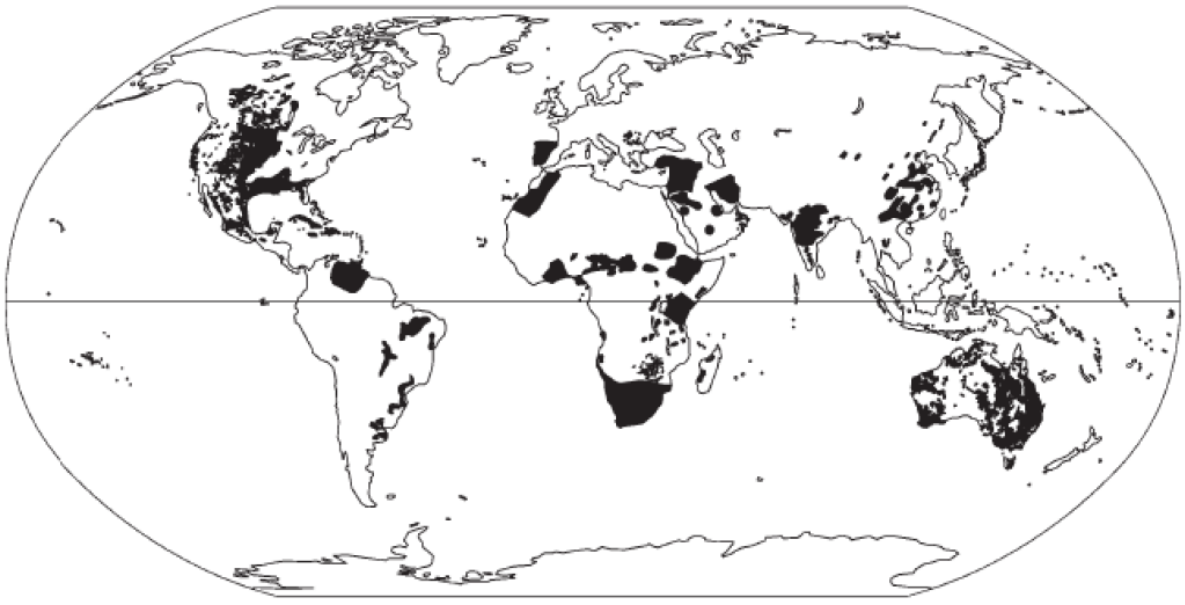


Figure 1.1 Global distribution of reported expansive soil sites (Nelson et al (2015))

出典：Characterization and Treatment of Expansive Subgrade Soils in Sudan, Omer Siddig Mustafa Hamza, 2019

図 A-4　膨潤性土の世界的分布図

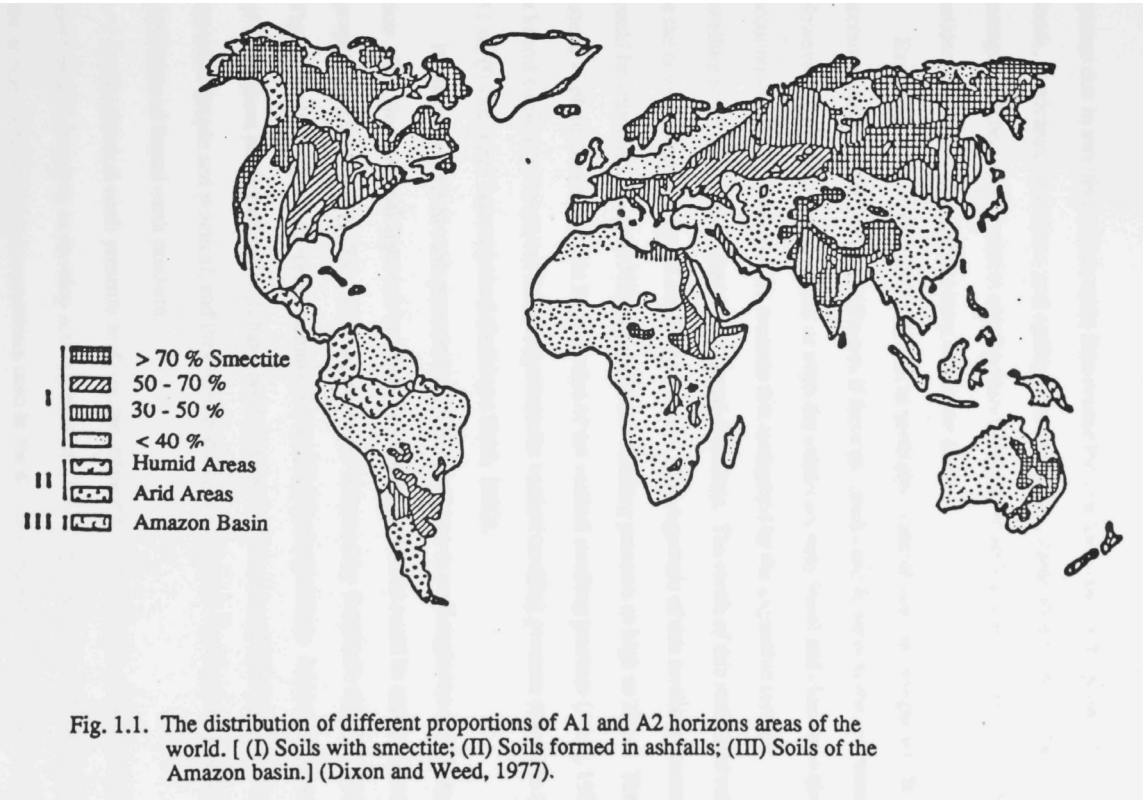


Fig. 1.1. The distribution of different proportions of A1 and A2 horizons areas of the world. [(I) Soils with smectite; (II) Soils formed in ashfalls; (III) Soils of the Amazon basin.] (Dixon and Weed, 1977).

出典: FINITE ELEMENT MODELING OF LATERAL SWELLING PRESSURE DISTRIBUTION BEHIND EARTH RETAINING STRUCTURES, MUSTAFA AYTEKIN, 1992

図 A-5 スメクタイトを含む土壌の全世界分布図

A1.2　地域毎／国毎

A1.2.1　中国

中国は、膨潤性土が最も広く分布している国の一つで、過去半世紀にわたり、膨張土壌の問題に関する研究がさまざまな産業分野や地域で実施されている。

広大な土壌はいくつかの省や都市で発見されており、主に河南省、湖北省、広西チワン族自治区、雲南省などに分布している。

中国の膨潤性土は、残積膨潤性土と堆積膨潤性土の主に 2 種類あることが分かっている。残積膨潤性土は、母岩鉱物の化学組成と化学風化の程度によって異なり、また、堆積状況（湖沼、洪水、斜面、沖積）と堆積年代（固結の程度）によって異なる。

(1) 残積膨潤性土

残積膨潤性土は、中国の熱帯および亜熱帯地域でも最も深刻な地質災害が発生する膨潤性土である。中緯度の暖湿地帯にも分布していますが、古亜熱帯分布域の準平原や残存地域で分布している。

熱帯および亜熱帯における強い化学風化、すなわちラテライト作用により、極めて強い風化帯では大きな空隙が形成される。そのような土は含水率が高く、塑性が高く、収縮が強い、膨張性の特性を有する。

半乾燥または多湿のモンスーン気候地域においては、土木建設中に軽量の建物や舗装は、不均一な乾燥収縮や基礎土の水分の蓄積により深刻な損傷を受けることがよくある。盛土は含水率が高く、密度が低く、締め固めが難しため、盛土に大きな変形や損傷を引き起こす。鉄道、産業用建物、土木建築物への深刻な被害はその典型的な例である。

残留膨張土の工学的特性は風化の程度だけでなく、母岩の組成と特性にも依存する。異なる気候帯および異なる母岩で形成された残存膨潤性土は工学的特性の大きな違いを示す。

(2) 堆積性膨潤性土

多膨大な調査や研究結果から、膨潤性粘土鉱物を豊富に含む第四紀の粘土堆積物は、主に中緯度の温暖湿潤気候帯、つまり暖温帯や北部の亜熱帯に分布していることがわかった。新第三紀の粘土堆積物は古気候と古環境によって影響を受けて、暖温帯だけでなく他の地域、特に古代の乾黄土高原、内モンゴル高原、および新疆と青海の主要な中生代の堆積物にも分布している。堆積盆地。古気候と古環境の影響に加えて、堆積性の膨張性粘土の工学的特性は、特に形成年代、つまり堆積の固結時間の長さに最強される。地質年代が古いほど、密度は高くなり、密度も高くなる。相対的な水分含有量が少ない。更新世中期から後期、中新世にかけて形成された粘土堆積層は通常過固結している特徴があり、その密度は通常 1.95~2.05g/cm^3 で、深く埋もれた上部第三紀の粘土は 2.1 g/cm^3 に達することがある。東部の温暖湿潤な気候帯には、完新世初期に形成された広大な氾濫原の粘土堆積物がまだ残っている。中国の堆積性膨張土壌は、その起源と年代に応じて次のカテゴリーに分類される。

- 中新世の還元環境 湖沼の広大な硬質粘土/軟質泥岩
- 鮮新世の褐色赤色の広大な硬質粘土/軟質泥岩
- 更新世中期（後期）の過固結した膨張性硬質粘土
- 完新世初期の濃い灰色の広大な土壌
- シゲダ層の広大な硬質土壌/軟岩

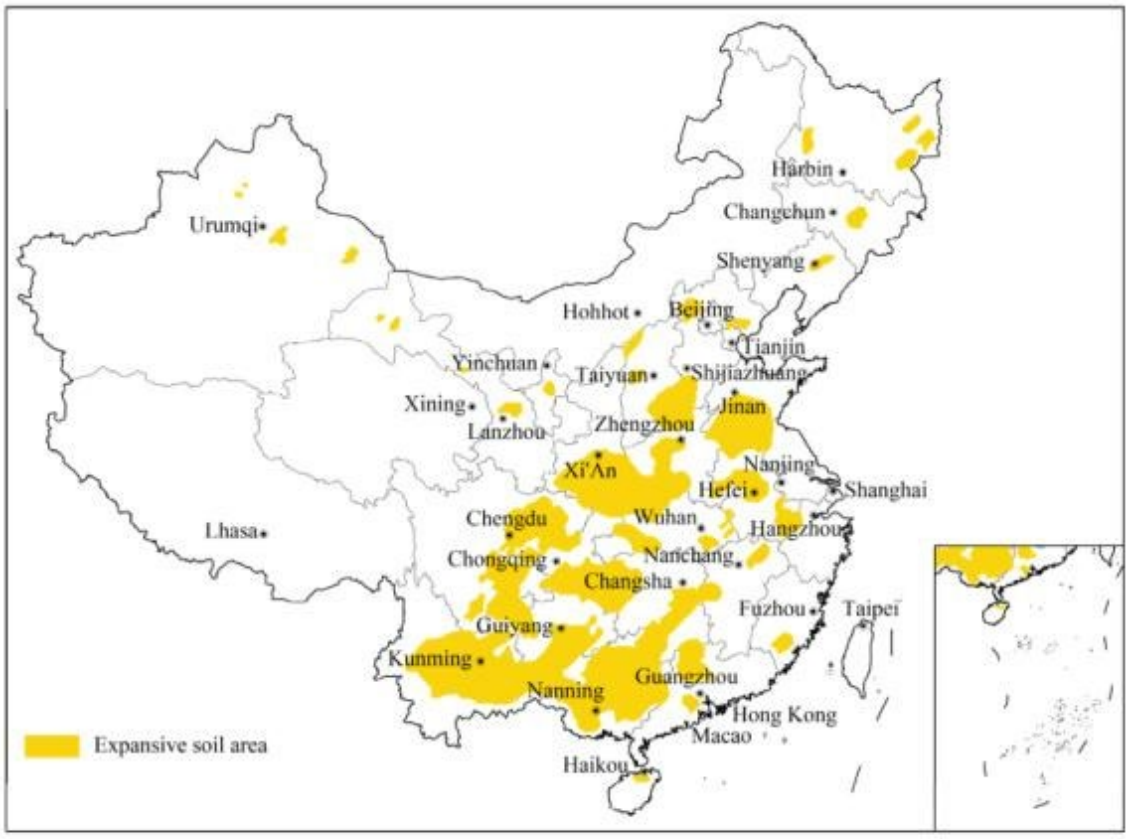


Figure 1. Distribution of expansive soils in China [5].

出典: Failure Mechanisms and Protection Measures for Expansive Soil Slopes: A Review, Peng Luo, Min Ma(2024)

図 A-6 中国の膨潤性土の分布図

A1.2.2　インドネシア

インドネシアでは、膨潤性土に建てられた建築構造物に直接的かつ深刻な問題を引き起こすさまざまな問題がある。図 1 は、インドネシアで問題のある泥岩の分布図である。粘土石は第三紀のもので、(地層の主成分および/または岩石層の構成要素として) 海洋環境に堆積する。泥岩、石灰質粘土、細かい~粗い岩石互層が優勢となる。この泥岩には膨張・収縮特性があり、風化／スレーキングすることにより膨潤性土を形成する。

インドネシア各島には膨潤性土に分類される粘土層がある。斜面の場合、土壌の亀裂は 3 つの段階で安定性を低下させる可能性がある。まず、土壌の亀裂により透水性値が上昇し、土壌強度が低下する可。次に、水が土壌の亀裂の空隙を埋め、地面に追加のせん断力を与える。そして最後に、土壌の亀裂は土壌のせん断応力を低下させる。



出典: Atlas Sebaran Batu Lempung Bermasalah Indonesia, Pramudyo, T., Sollu, W. P., & Hermawan, W. (2019))

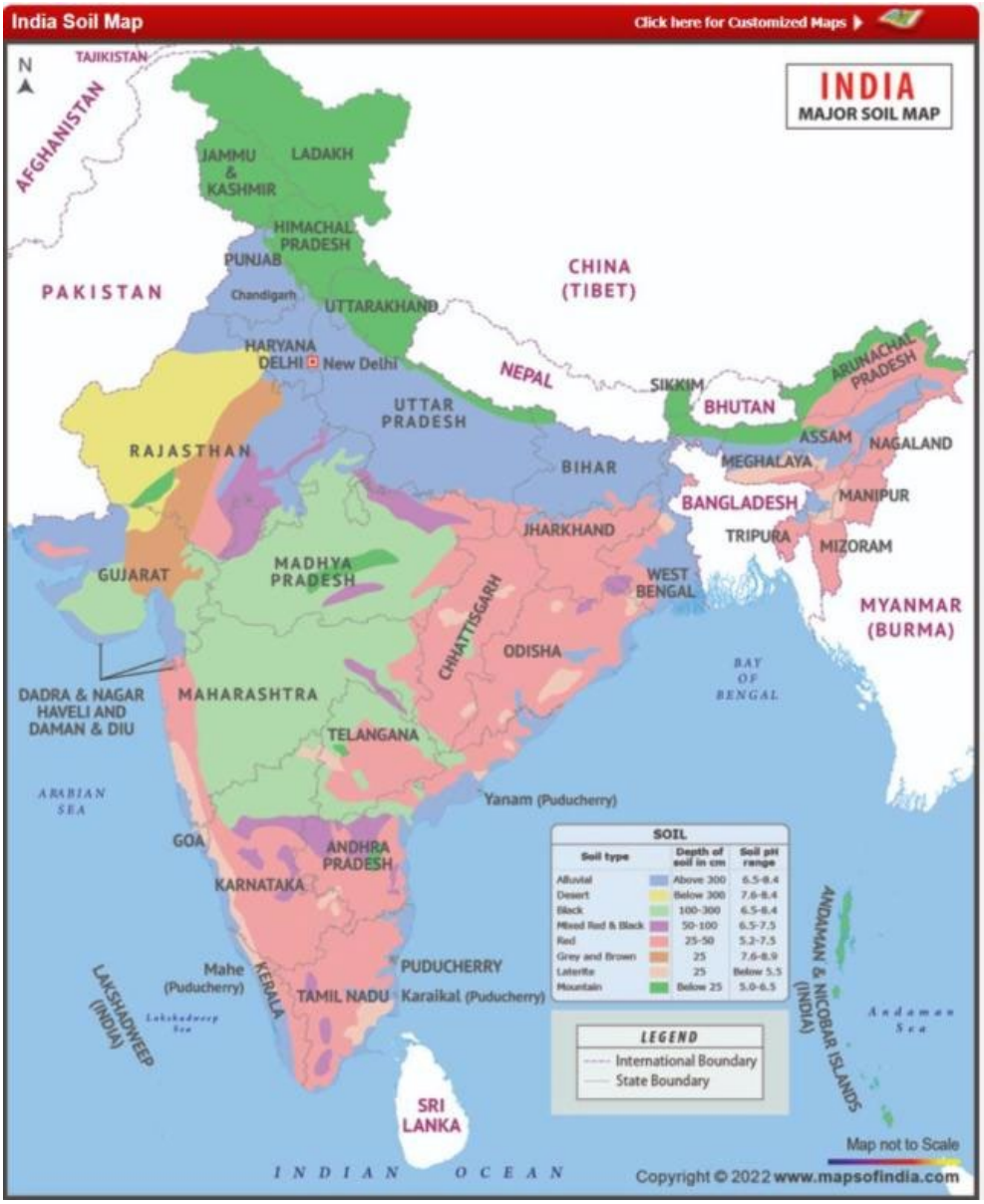
図 A-7 問題のある泥岩の分布図

A1.2.3　インド

インドは膨潤性土の研究が多く、膨潤性土は黒綿土 Black Cotton Soil(BCS)、黒土 Black Soil として分類されている。地方名では Regur Soil と呼ばれる。

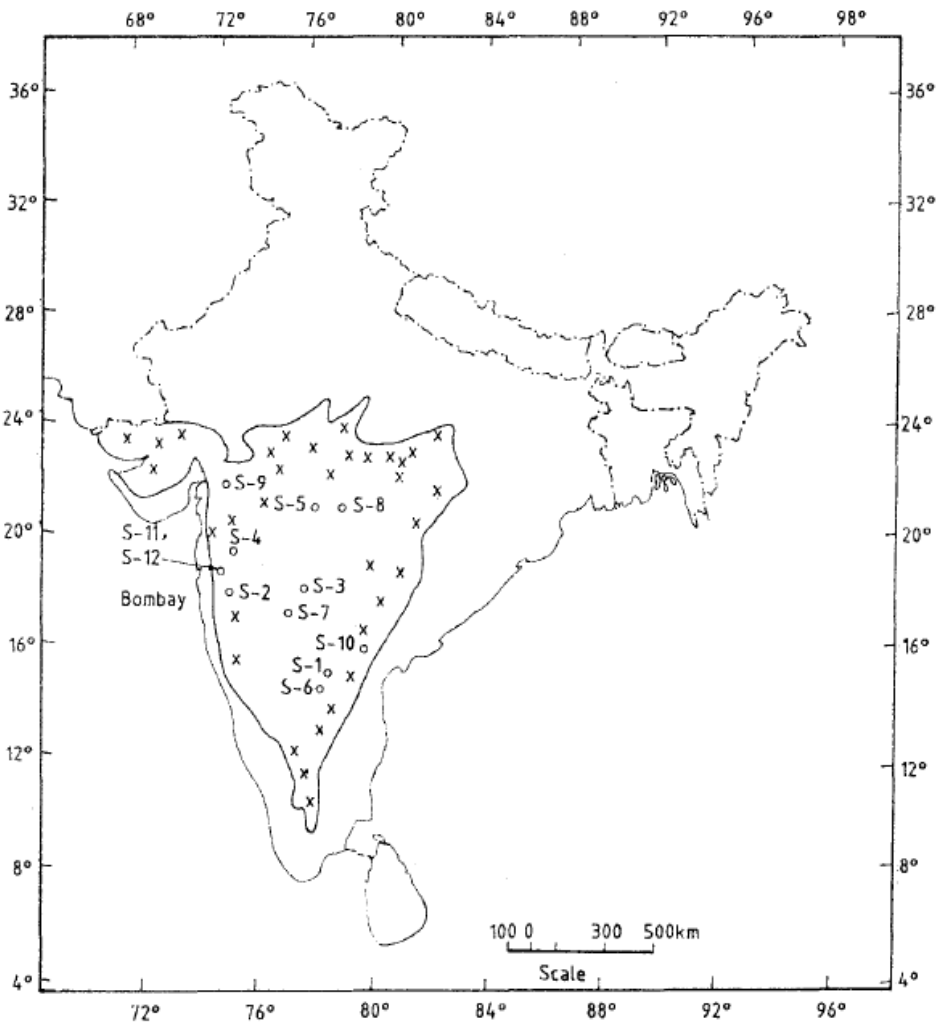
膨潤性土はインドの総面積の 29.69%を占める。デカン高原の玄武岩の火山岩の崩壊により形成されました。BCS の黒い色は、鉄とアルミニウムの存在によるもので、質感は粘土質である。

インドでは 0 に示す Map of India で詳細な土壌分布図が公開されている。同地図を Web 上でクリックすると各地方の分布図が得られる。



出典: https://www.mapsofindia.com/maps/india/soilsofindia.htm

図 A-8 インドの膨潤性土分布図



Based upon Survey of India map with the permission of the Surveyor General of India. The territorial waters of India extend into the sea to a distance of twelve nautical miles measured from the appropriate base line.

© Government of India copyright, 1993

Figure 14.1: Map of India Showing Approximate Black Cotton Soil Area and Location of Places from Which BC Soil Samples Were Taken for These Investigations

III: Studies concerning the engineering behaviour of BC soils treated with lime, cement and a combination of both. A few studies on field performance are also included.

IV: A brief write up on studies conducted with trace chemicals is also included at the end.

出典: https://www.mapsofindia.com/maps/india/soilsofindia.htm

図 A-9 インドの膨潤性土分布図

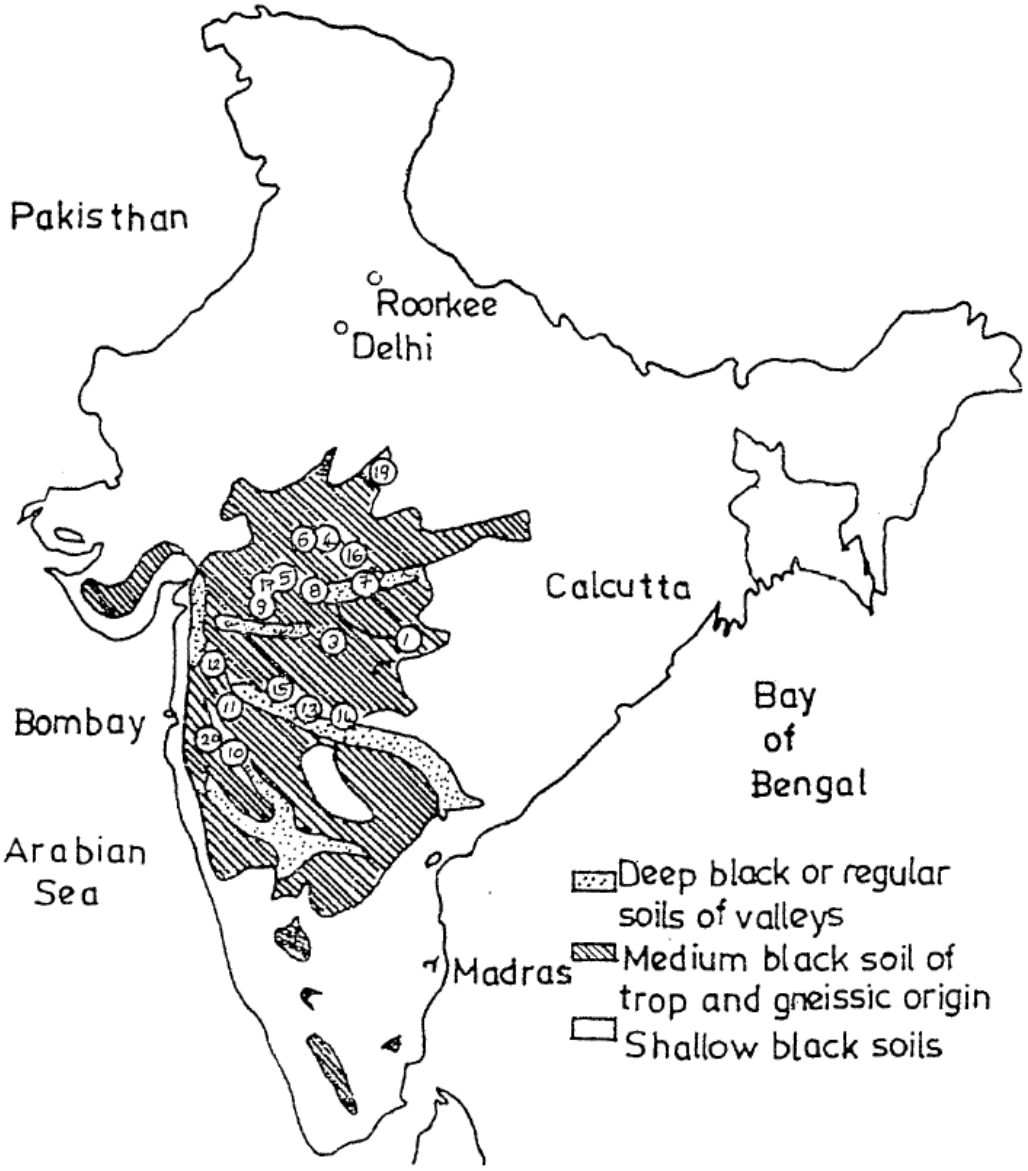


Fig. 1 Soil map of India showing location of black soils.

出典: Black cotton soils – Highly expansive clays of India, Dinesh Mohan, 1994

図 A-10 インドの膨潤性土分布図

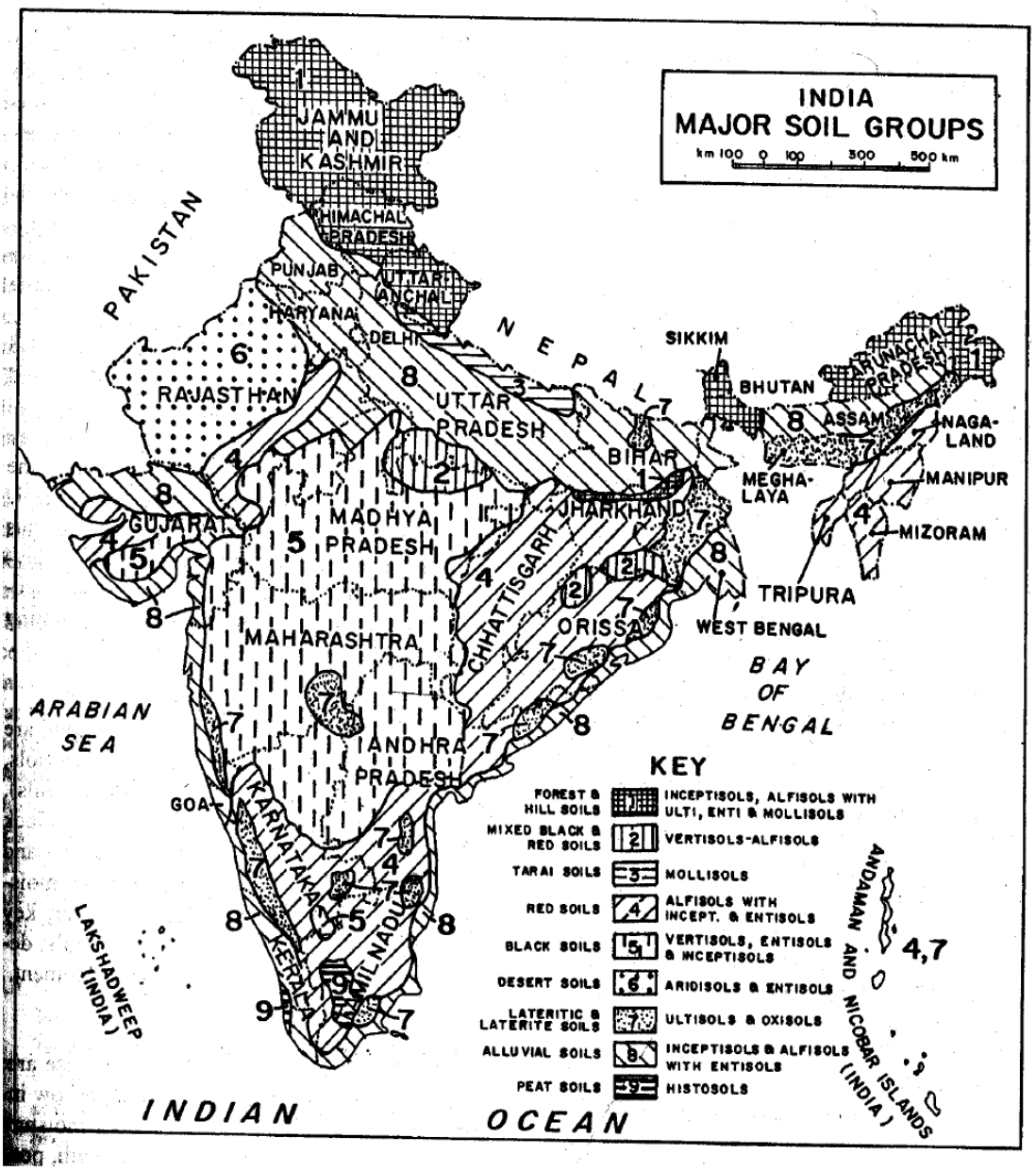


Fig. 1. Major soil groups of India and soil orders that occur in these soil groups

出典: Conservation and Management of Soil and Water resources, Anand Swarup, T. J. Purakayastha, 2016

図 A-11　インドの膨潤性土分布図

A1.2.4　オーストラリア

オーストラリアは、Vertisols が 80ha を超え、インドの 73ha やスーダンの 50ha を上回っている。土壌は主に乾燥性湿潤地帯に分布しており、ウスチック帯や乾帯にはあまり分布していない。

ほとんど Vertisols は緩やかに起伏のある平野にあり、沖積岩および堆積岩または塩基性火成岩に由来する。土壌温度は、南部の高温から熱帯オーストラリアの大部分の高温まで多岐にわたる。

Isbell (1989)によると、Vertisols は主に低地(標高 500m 未満)の緩やかな起伏のある平地に分布する。多標高の高い降雨量の多い地域から洪水を受ける内陸河川の広い氾濫原に分布する。

Vertisols の広大な半乾燥地域は主に草原であり、より乾燥した地域にはまばらな低木地のみが存在する。クイーンズランド州東部の広範囲にわたるバーティソル地域はもともと、アフリカやインドのこの植生と同様の湿度と温度環境でアカシア森林を支えている。

オーストラリアの Vertisols の特性は多岐にわたる。オーストラリアの典型的な Vertisols は、上層が暗い色をしていることから、一般的に黒土と呼ばれるが、灰色、茶色、赤色の土壌も含まれる。玄武岩由来の黒土や、半乾燥地帯で発生する灰色および赤色の Vertisols もあるため、色の範囲は必ずしも降雨量や有機物含有量と関係があるわけではない。

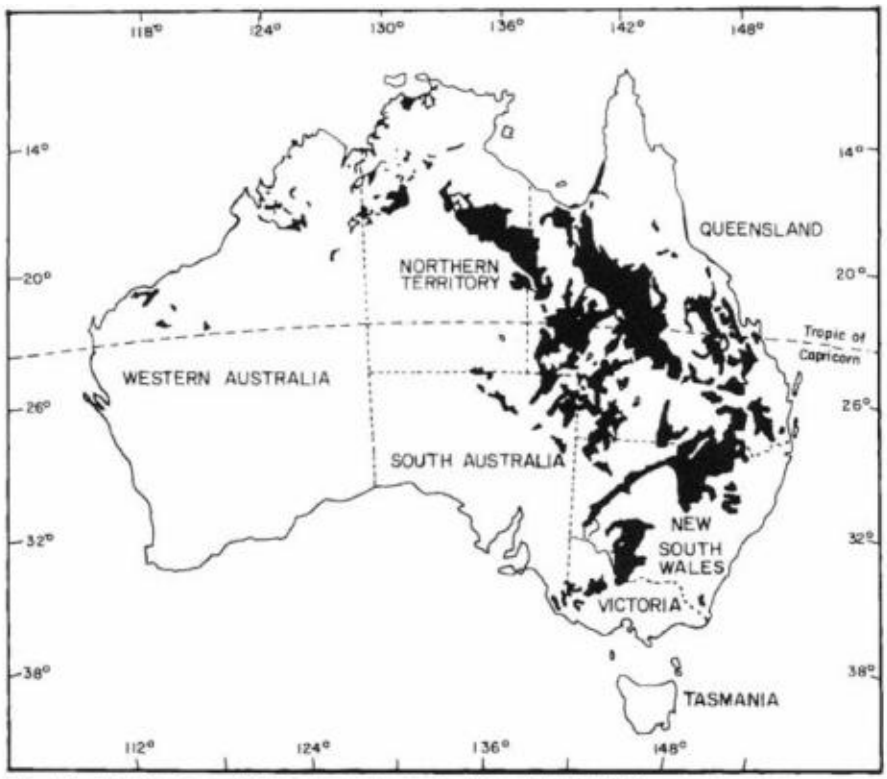


Fig. 1.2. Distribution of Vertisols in Australia (after Isbell, 1989).

出典: VERTISOLS AND TECHNOLOGIES FOR THEIR MANAGEMENT, N. AHMAD, A.MERMUT(Elsevier, 1996)

図 A-12 オーストラリアの Vertisols 分布図

A1.2.5　アメリカ

(1) 米国

USGS（米国地質調査所）による米国における膨潤性土が占める陸地の割合は、地域によって異なるが、全体の陸地の約 **20%**に及ぶとされている。

主にテキサス州の東中部と南部、アラバマ州西中部、ミシシッピ州東中部で優勢となっている。この地域では、土壌は緩やかな斜面の石灰質粘土または柔らかい石灰質堆積岩から風化した残積土となっている。

テキサス、オクラホマは半乾燥気候と平原地帯であり、ネバダは内陸盆地の乾燥地域であり、ルイジアナ、フロリダは湿潤気候の沿岸平野と色々な気象条件と地形に分布する。

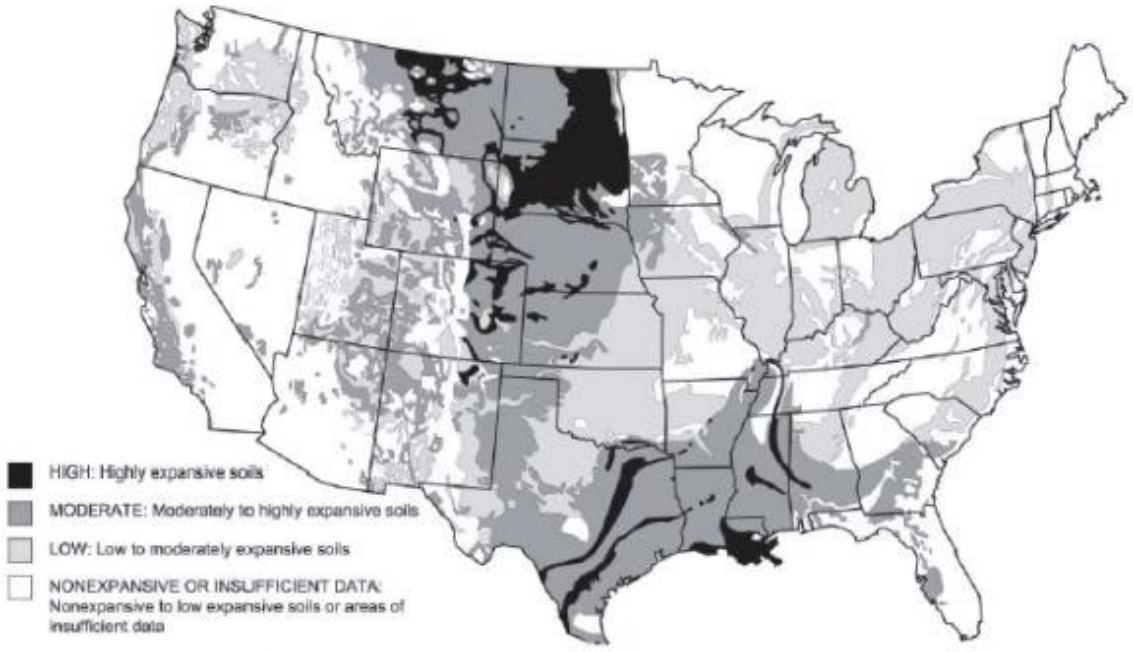
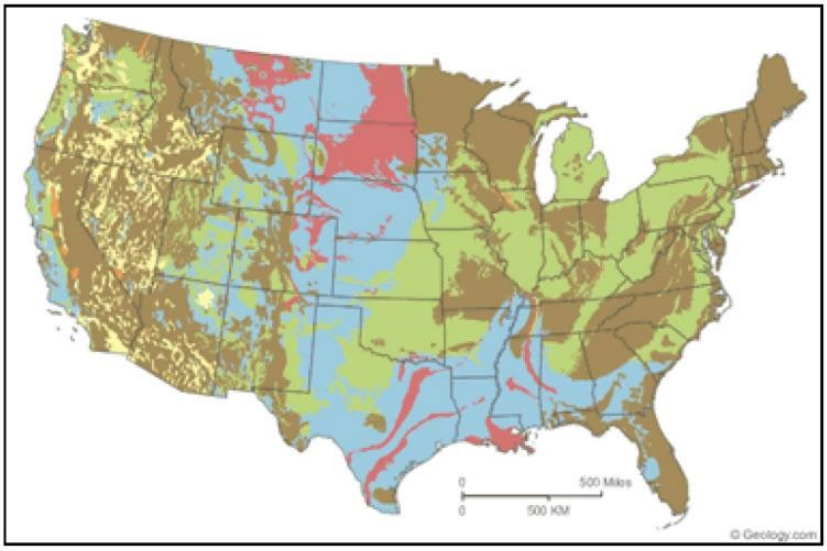


FIGURE 2.17. Distribution of potentially expansive soils in the United States (modified from Olive et al. 1989).

出典: Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh (Geoff) Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson(2015)

図 A-13 米国の膨潤性土分布図



	Over 50 percent of these areas are underlain by soils with abundant clays of high swelling potential.
	Less than 50 percent of these areas are underlain by soils with clays of high swelling potential.
	Over 50 percent of these areas are underlain by soils with abundant clays of slight to moderate swelling potential.
	Less than 50 percent of these areas are underlain by soils with abundant clays of slight to moderate swelling potential.
	These areas are underlain by soils with little to no clays with swelling potential.
	Data insufficient to indicate the clay content or the swelling potential of soils.

出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 A-14 米国の膨潤性土分布図

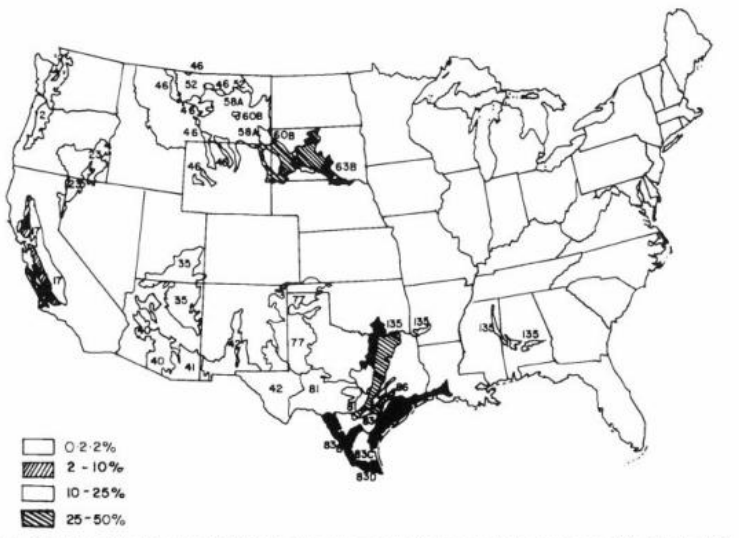
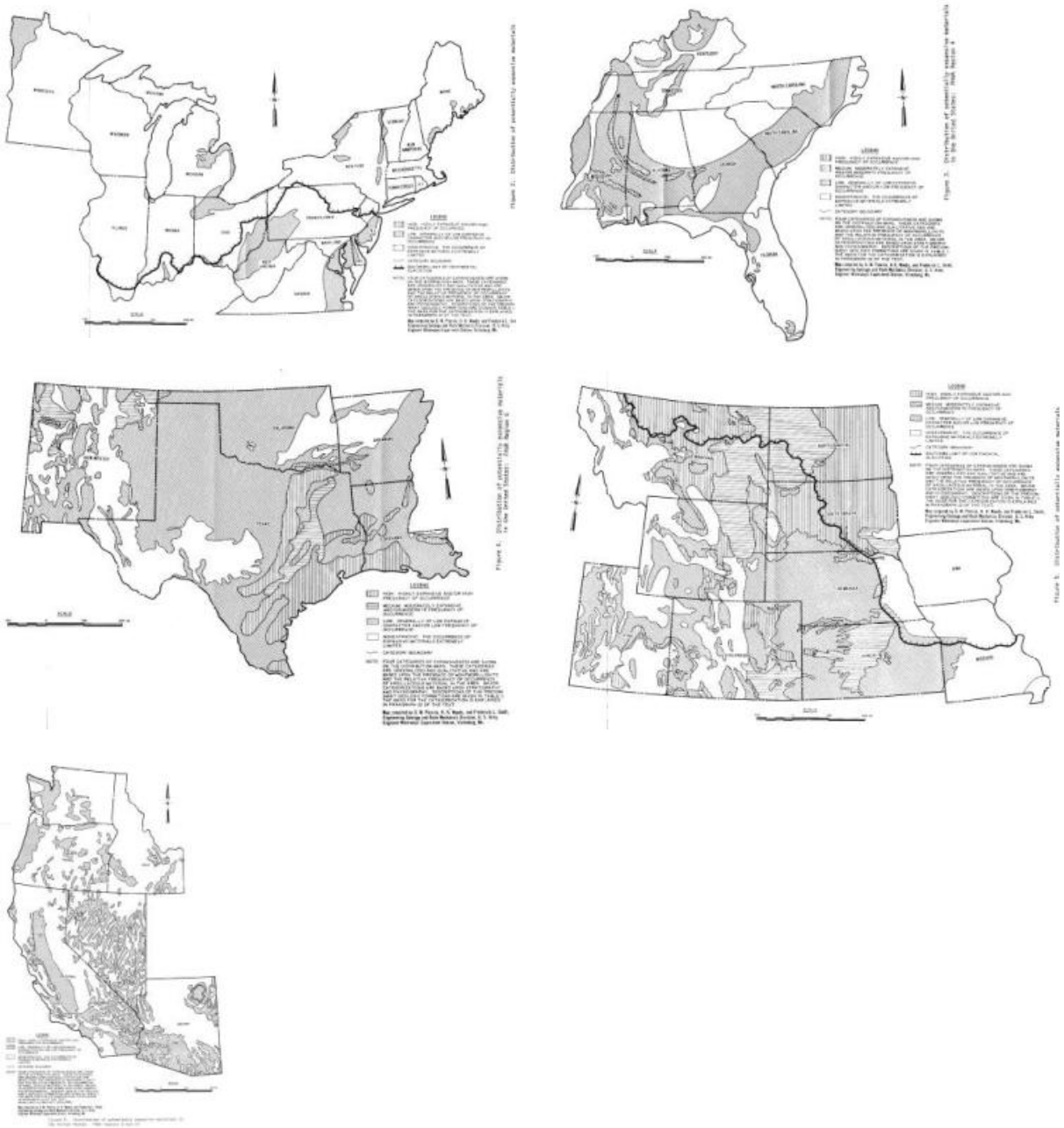


Fig. 1.4. Distribution of Vertisols in the United States of America as percentage in major land resource areas (after Nichols, 1989).

出典: VERTISOLS AND TECHNOLOGIES FOR THEIR MANAGEMENT, N. AHMAD, A.MERMUT(Elsevier, 1996)

図 A-15 米国における Vertisols の分布図(%)



出典: FHWA-RD-75-48 A Review of Engineering Experiences with Expansive Soils in Highway Subgrades, Snethen et al., U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station(1975)

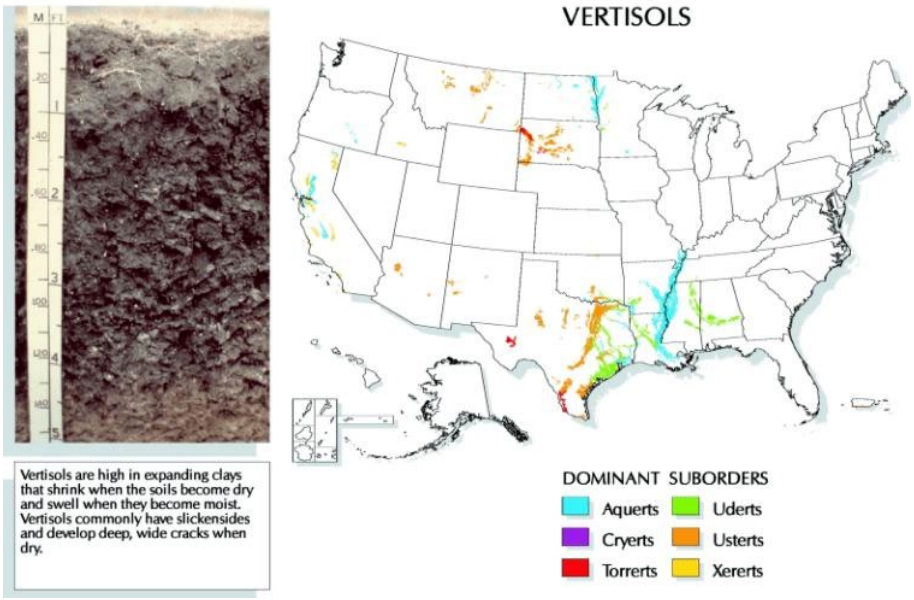
図 A-16 米国における Vetisols 分布図



Fig. 1. Distribution of expansive soils in the United States and their relative activity [after Wiggins, 1976].

出典: EXPANSIVE SOILS IN NORTH AMERICA, Warren K. Wray, 1994

図 A-17 米国における膨潤性土分布図



出典: Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys 2nd. Ed., USDA, 1999

図 A-18 米国における Vertisols の分布図

(2) メキシコ

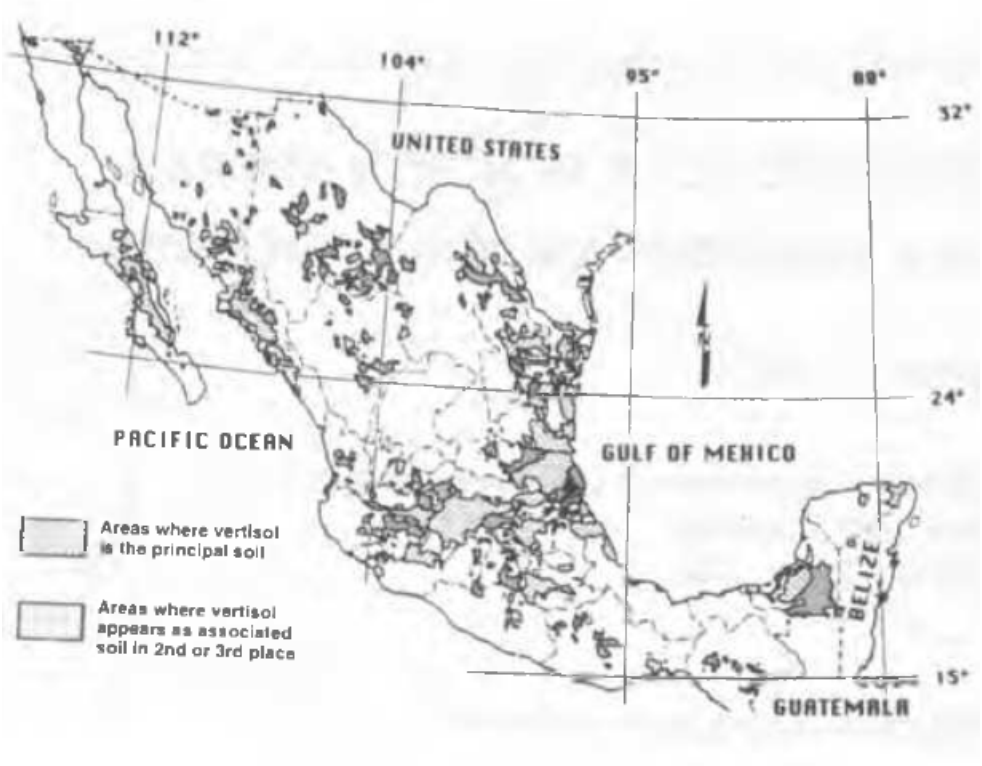


Fig. 2. Distribution of potentially expansive soils in Mexico and their relative activity [after Zepeda and Castañeda, 1987].

出典: EXPANSIVE SOILS IN NORTH AMERICA, Warren K. Wray, 1994

図 A-19 メキシコの膨潤性土の分布図

A1.2.6 ヨーロッパ

ヨーロッパにおける膨潤性土は、特に膨潤性粘土鉱物（例：スメクタイト、モンモリロナイト）を含む地域に分布している。分布している地域は広範である。

フランス（南部）のプロヴァンス地方や地中海沿岸の一部で、膨潤性粘土が広く見ら、特に、三畳紀やジュラ紀の粘土層が含まれる地域で分布している。

スペインはカタルーニャ地方、アラゴン地方、および中央高原（メセタ中央）で膨潤性粘土が確認されている。

イタリアはアペニン山脈周辺やポー川流域の低地で膨潤性粘土が分布しており、地中海性気候と結びつき、膨張と収縮の繰り返しが顕著に起きている。

ルーマニアではドナウ川流域やカルパチア山脈の周辺で膨潤性土壌が分布している。

ブルガリアもドナウ平原や南部の丘陵地帯で膨潤性粘土が見られるこの地域では乾期と雨期が交互に現れるため、膨潤性の影響が顕著となっている。

ドイツは南部（バイエルン地方）やライン川流域の一部で膨潤性粘土層が確認されている。

スイスは一部の低地や谷間で膨潤性土壌が分布している。特にアルプス山脈に起因する堆積層で見られる。

イギリスはイングランド南東部（ロンドン周辺）や中部で、膨潤性粘土が分布する。ロンドンクレイ（London Clay）と呼ばれる地層が典型例で、収縮と膨張による基礎問題が頻発している。

オランダは国全体が低地であり、膨潤性土壌の影響は限定的だが、一部の粘土層で問題が生じることがある。

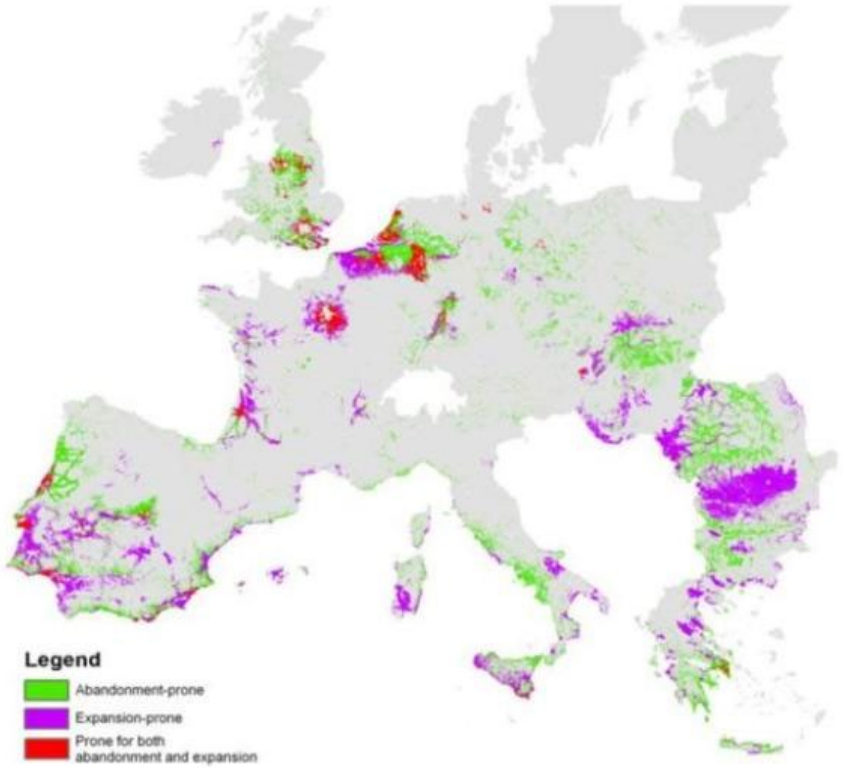
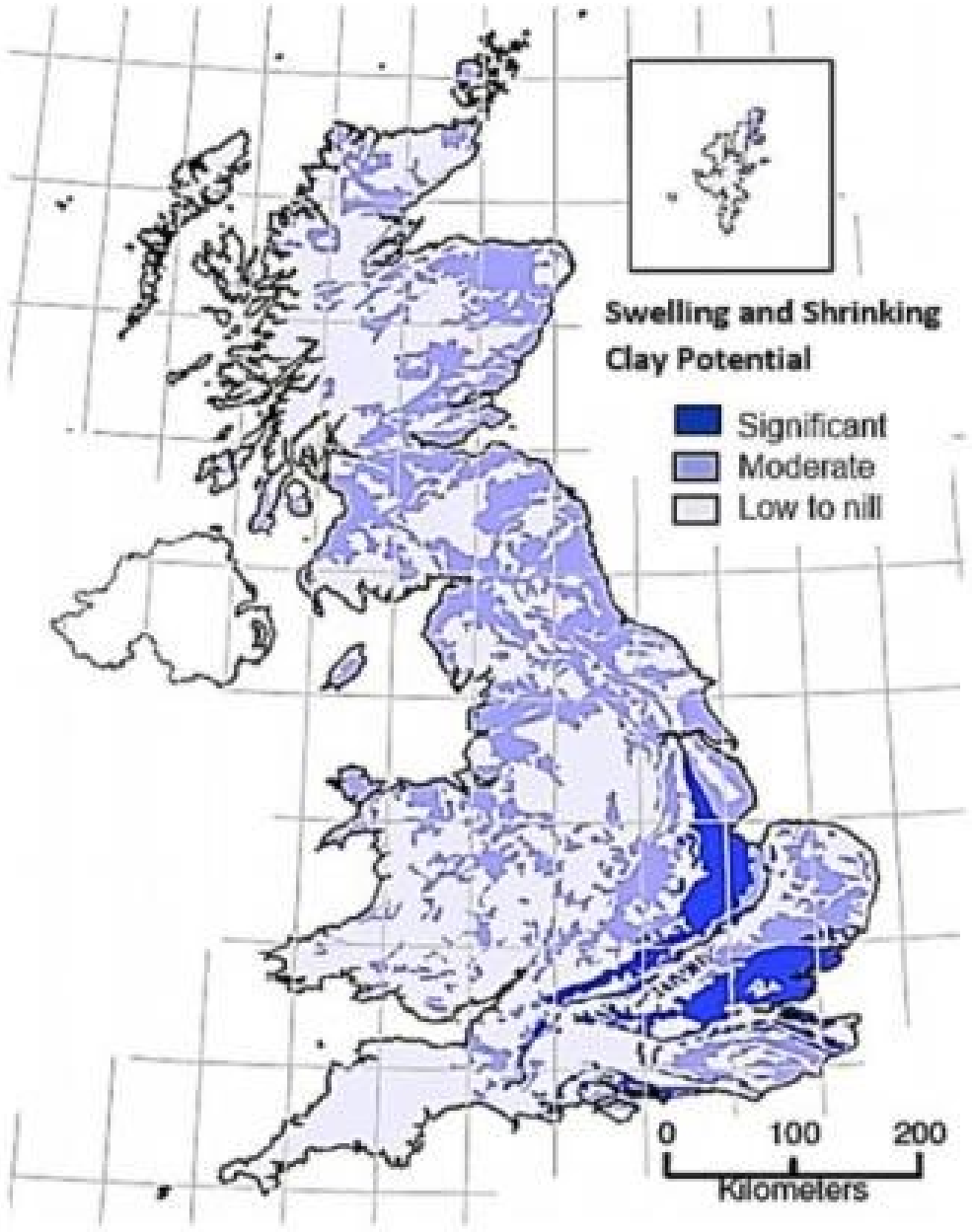


Figure 2. Areas with high probability (above the 90th percentile in each of the three regions) for expansion and abandonment according to the change regressions. Areas with high probability for both abandonment and expansion are also marked. The probabilities for Sweden, Finland, the UK, and Greece were extrapolated.

出典: Abandonment and Expansion of Arable Land in Europe, Erez Hatna and Martha M. Bakker(2011)

図 A-20 ヨーロッパの膨潤性土分布図

(1) 英国



(a)

出典: Enhancing the Engineering Properties of Subgrade Materials Using Processed Waste: A Review, Samuel Y. Amakye, Samuel J. Abbey, Colin A. Booth, Abdul-Majeed Mahamadu(2021)

図 A-21 英国の膨潤性土の分布図

A1.2.7　アフリカ

黒綿土 Black Cotton Soil と呼ばれる熱帯黒色粘土は、アフリカの主要な問題土壌である。塑性粘土の割合が多く、水を吸収すると膨張するため、高速道路や飛行場の建設には不向きな材料である。

これらの土壌が存在する多くの地域では、良好な天然の礫や骨材がない。ほとんどの BCS は広い範囲を覆っているため、それらを避けたり、迂回したりすることは実行不可能となる。ここそとを通って建設された道路で、満足のいくものはほとんどなく、多くは完全に失敗している。

熱帯の黒色粘土のほとんどは、玄武岩などの塩基性岩石の風化によって残留形成されたものである。沖積堆積物も存在するが、スーダンを除けば、その規模はかなり限られている。チャド湖盆地は、アフリカで唯一大規模な黒色粘土土壌のラクストリン lacustrine 堆積物である。

アフリカの black turfs、モロッコのティルス tirs 等の地方名がある。



出典: Laterite and Lateritic Soils and other Problem Soils of Africa, An Engineering study for Agency for International Development AID csd-2164(1971)

図 A-22 アフリカの黒色粘土の分布図

表 A-1 アフリカにおける暗色粘性土の分布（Dudal, 1965 による）

国名	地域	推定被覆面積		面積割り	国土面積
		（百万 ac）	（百万 ha）	（%）	（百万 ha）
Angola	Valleys of the Cunene and Cubango, region of Calete and southwestern part of the country	1.2	0.49	0.4	124.67
Botswana	West of Livingstone and Tuli; large areas around the Okovang and Makarikari Swamps	1.5	0.61	1.0	58.17
Cameroon	Logone Chari Basin and part of the Chad Basin; peneplain of Kaele and Marona region	3.0	1.21	2.6	47.54
Chad	Chad Basin and scattered areas	40.8	16.51	12.9	128.4
Congo	Ruzizi Plain, valleys of the Semliki and Lufira	0.7	0.28	0.1	234.49
Dahomey	Northern part of the country and in the region of Divo	0.2	0.08	0.7	11.26
Ethiopia	Rift Valley and Ethiopian Plateau	24.7	10.00	9.1	110.43
Ghana	Mainly Accra, Ho-Keta and Winneba Plains; scattered patches near Kpandu, K wamen and K wesi	0.5	0.20	0.8	23.85
Ivory Coast	In northern part of the country and in the region of Divo	0.5	0.20	0.6	32.25
Kenya	Athi Plains near Nairobi and other areas	4.9	1.98	3.4	58.04
Lesotho	Drakensberg	5.7	2.31	75.9	3.04
Malagasay	Some valley depressions in the western part of the country and in uplands in the western and northern part	2.0	0.81	1.4	58.7
Malawi	Chyre valley and areas around Malawi and Chilwa Lakes	4.0	1.62	13.7	11.85
Morocco	Mainly in the northwest Gharb and in the Doukkalas (south of Casablanca); scattered areas	0.5	0.20	0.5	44.66
Mozambique	Alluvial plains of the Limpopo and Inkomati Rivers and surrounding uplands; Zambezi valley upstream of Tete; coastal area north of Mozambique city	2.7	1.09	1.4	80.16
Niger	Northeast Bornu and Benoue River Basin	9.9	4.01	3.2	126.7
Senegal	Senegal valley, lowland of the northwest; on the Cape Verde peninsula	0.5	0.20	1.0	19.67
Somalia	In the plains extending between the Giuba and	2.0	0.81	1.3	63.77

国名	地域	推定被覆面積		面積割り	国土面積
		（百万ac）	（百万ha）	（%）	（百万ha）
	Scebeli Rivers				
South Africa	Bushveld and Springbok Flats (Transvaal); Highveld (Orange Free State and Transvaal)	9.0	3.64	3.0	121.91
Southwest Africa	Probable occurrence in the Caprivi Strip along the Cubango River and around the "Etosha Pan"	1.7	0.69	0.8	82.56
Rhodesia	The area around Salisbury; part of the valley of the Zambesi; Livingstone area and southern part of the country	3.5	1.42	3.6	39.08
Sudan	Region between the White and Blue Nile extending east of the Blue Nile into Ethiopia and covering an area west of the White Nile; widespread in South Sudan, Bahr el Gasal, Upper Nile and Eq uatoria Province	100.0	40.47	21.7	186.15
Swaziland	Mainly in the Middleveld, eastern Lowveld and Lebombo areas	0.5	0.20	11.6	1.75
Tanzania	Valleys of the Mayowasi and Malagarasi, Great Ruaha valley areas near Tendigo Swamps and Rukwa Lake; scattered upland areas	17.3	7.00	7.4	94.51
Togo	In the northern part of the country and in the Mono valley	0.2	0.08	1.2	6.68
Uganda	Valley of the Semliki, areas near 4.2 George, Albert and Edward Lakes, areas in the east and northeast of the country	4.2	1.70	7.1	24.1
Upper Volta	Souron valley; poorly-drained basin deposits spread over the country	1.0	0.40	1.5	27.3
Zambia	Valleys of the Luangwa, Lukushashi and Zambesi; Kafue flats	2.2	0.89	1.2	75.26
Total		244.9	99.11	5.2	1,896.95

出典: Laterite and Lateritic Soils and other Problem Soils of Africa, An Engineering study for Agency for International Development AID csd-2164(1971)



Fig. 1.1. Areas of major distribution of Vertisols and vertic soils in tropical and subtropical Africa (after Kanwar and Virmani, 1986).

出典: VERTISOLS AND TECHNOLOGIES FOR THEIR MANAGEMENT, N. AHMAD, A.MERMUT(Elsevier, 1996)

図 A-23 アフリカの Vertisols の分布図

(1) ナイジェリア

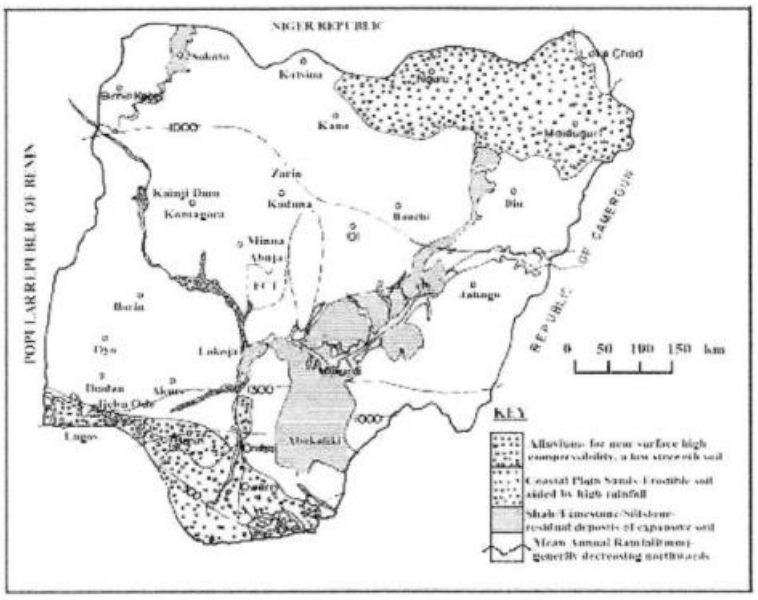


Figure 1.1: The area geologic formations considered to have expansive residual soils {modified after Adesunloye (1987)}.

出典: Geotechnical Properties of Major Problem Soils of Nigeria, Ademola Bolarinwa(LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011)

図 A-24 ナイジェリアの膨潤性土の分布図

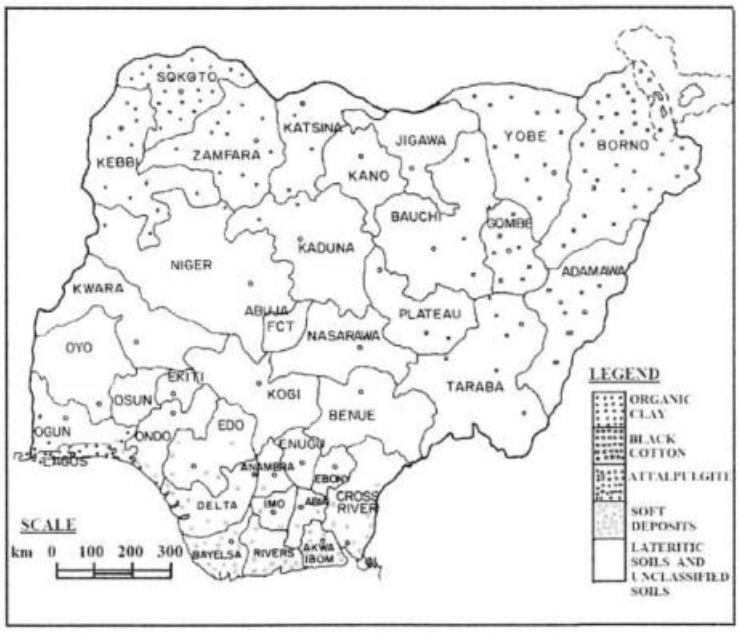


Figure 4.57: Location and distribution of major problem soils of Nigeria

出典: Geotechnical Properties of Major Problem Soils of Nigeria, Ademola Bolarinwa(LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011)

図 A-25 ナイジェリアの特殊土の分布図

(2) 南アフリカ

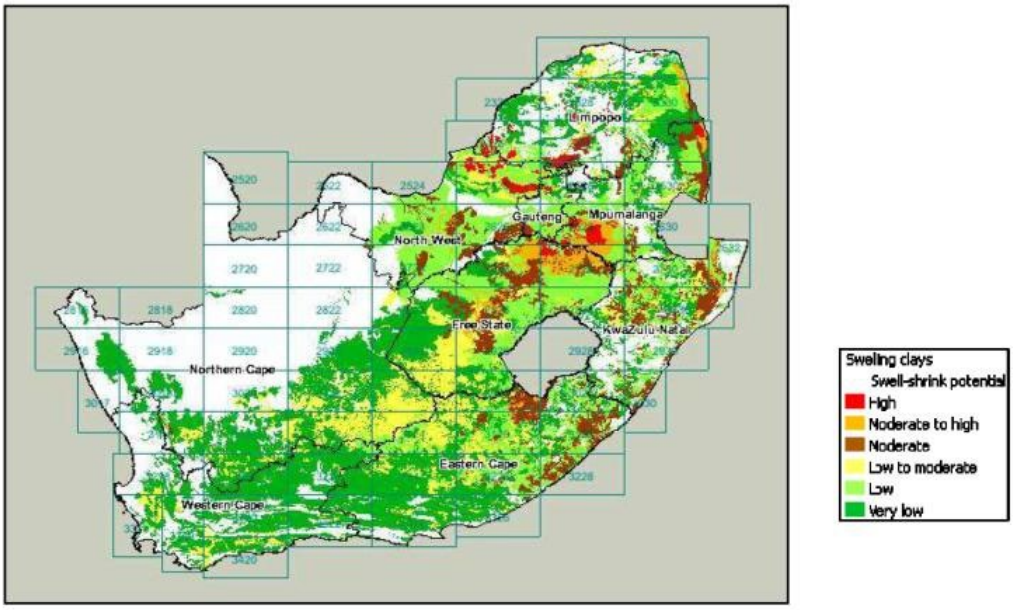


Figure 14: Swelling clay map of South Africa (from: AGIS Comprehensive Maps: Online)

出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 A-26 南アフリカの膨潤性土の分布図

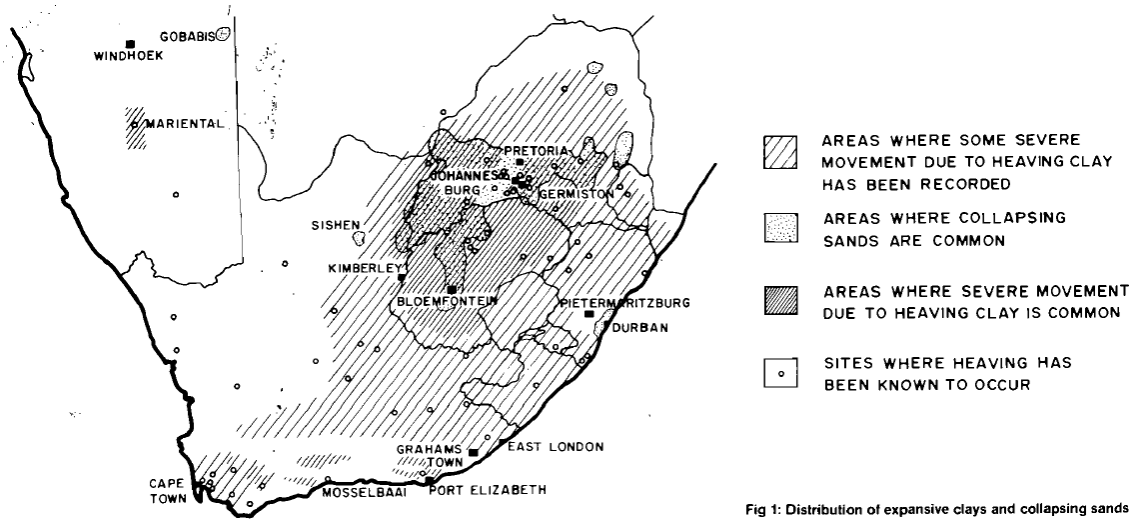
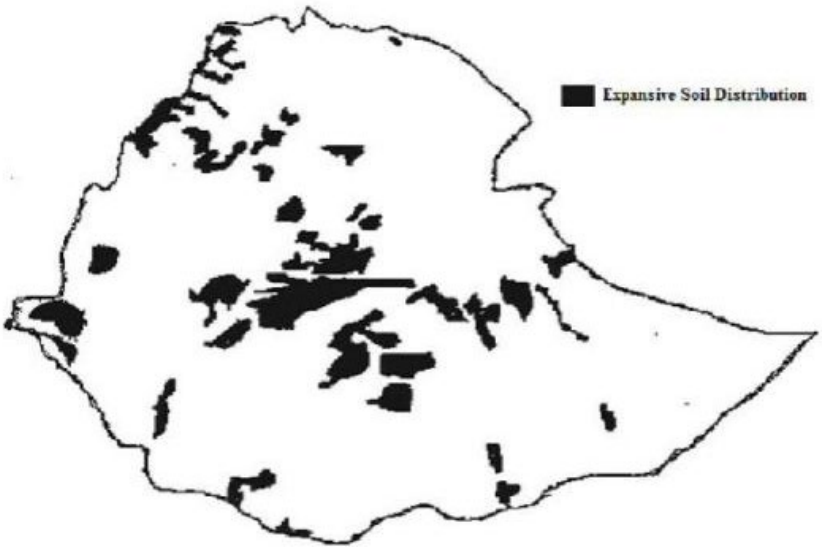


Fig 1: Distribution of expansive clays and collapsing sands

出典: Expansive soi, A A B Williams, J T Pidgeon and P W Day(1985)

図 A-27 南アフリカの膨潤性土の分布図

(3) エチオピア



出典: Expansive soils in Ethioipa : a Review, B. Uba(2017)

図 A-28 エチオピアの膨潤性土の分布図

(4) スーダン

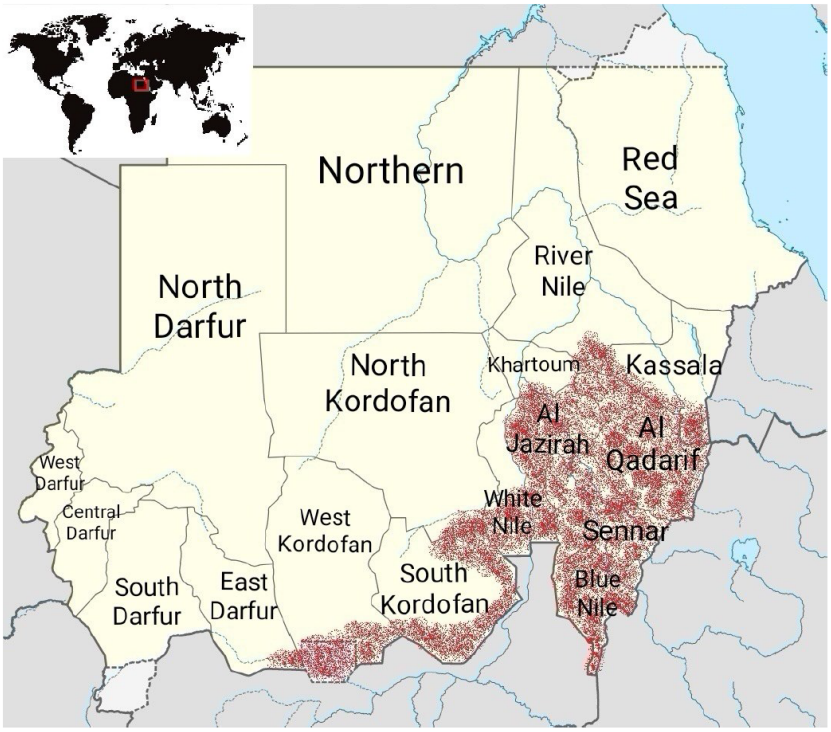


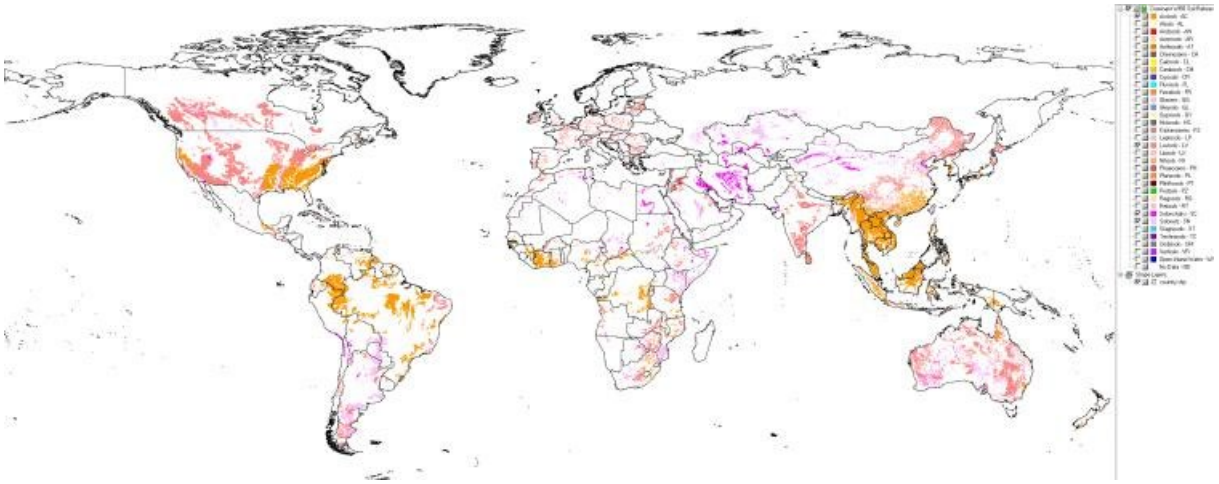
Figure 1.2 Distribution of expansive soil sites in Sudan

出典: Characterization and Treatment of Expansive Subgrade Soils in Sudan, Omer Siddig Mustafa Hamza, 2019

図 A-29 スーダンの膨潤性土分布図

A2　分散性土

A2.1　全世界



出典：HWSD Ver.2.0

図 A-30 HWSD の Solonetz、Solonchak、Acrisols の分布図

A2.2　地域毎／国毎

A2.2.1　南アフリカ

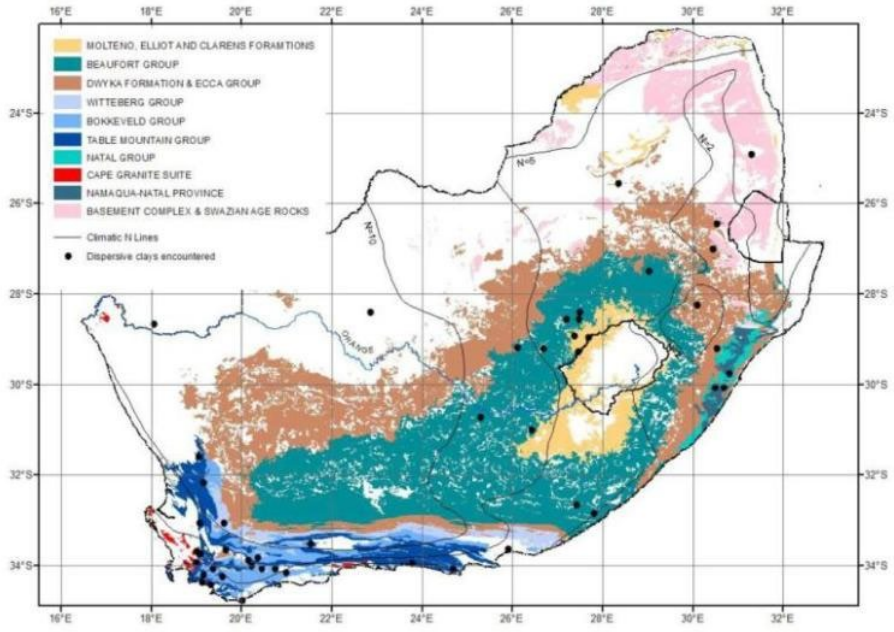
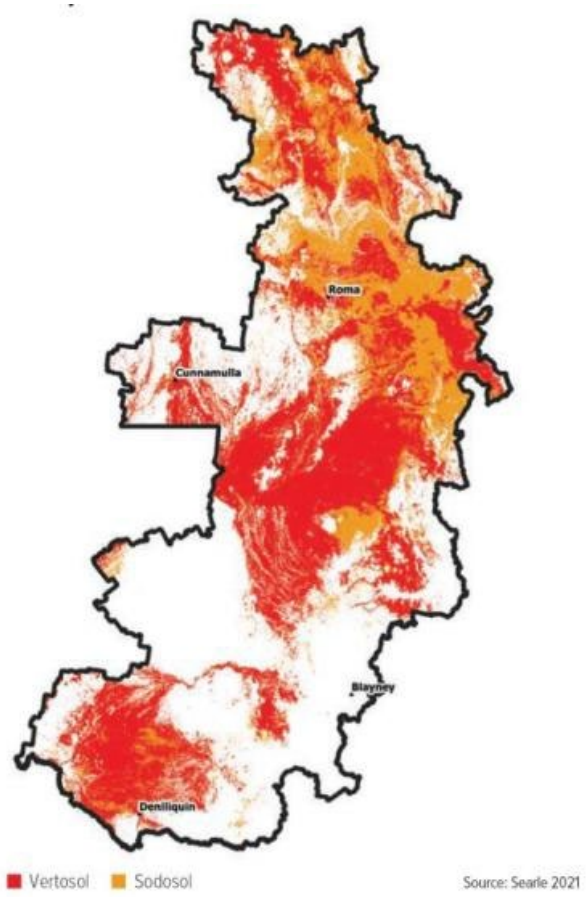


Figure 2-10: Identified dispersive soil occurrences in Southern Africa (Elges, 1985). (N.B.: Climatic N Lines = Weinert's N-values)

出典: THE EVAULATION OF TEST PROTOCOLS FOR DISPERSIVE SOIL IDENTIFICATION IN SOUTHERN AFRICA, AMRITA MAHARAJ(2023)

図 A-31　Elges (1985)による南アフリカの分散性土の分布地域

A2.2.2　オーストラリア



出典: Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics – Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce(2023)

図 A-32 オーストラリアのクイーンズランド州とニューサウスウェール州の分散性土の分布
Sodosol（オレンジ色の網掛け）と Vertosols（赤色の網掛け）の分布
黒色 Vertosols は灰色 Vertosols よりも分散性、ソーダ性(Sodic)が低い

A3　浸食性土壌

A3.1　全世界

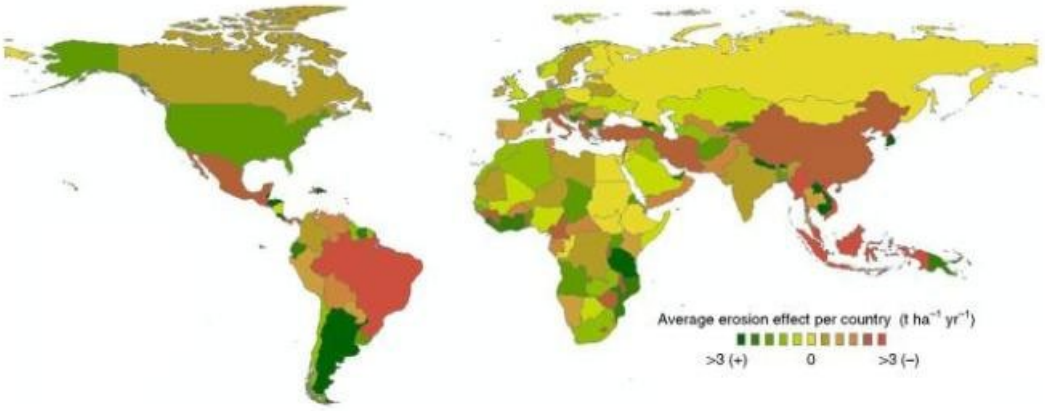
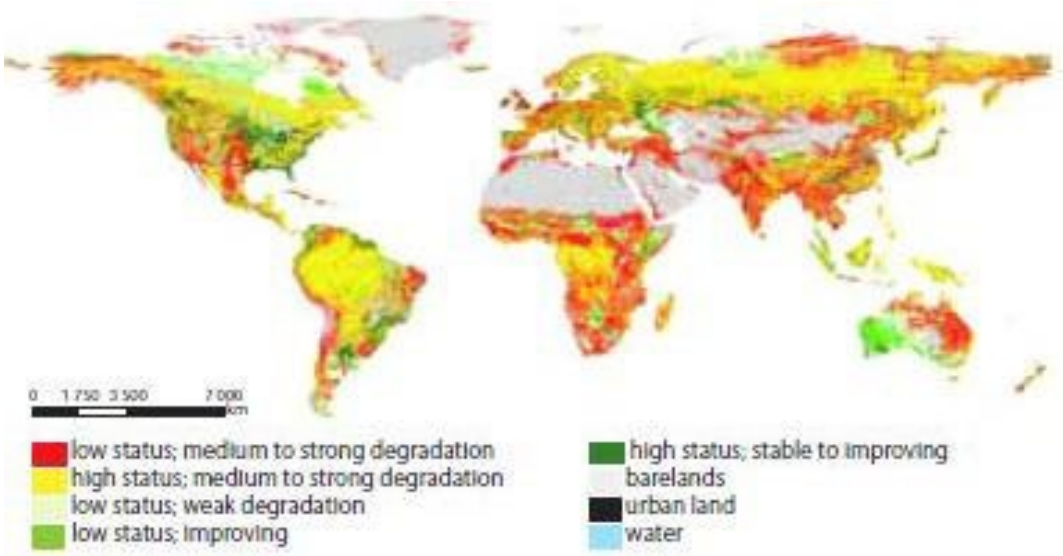


Fig. 3 | A global map of countries' soil erosion performance. The map is based on soil erosion discontinuities between each country and all of its neighbours (unweighted). Darker green indicates that a country has a more positive impact on the global rate of soil erosion than its neighbours (that is, it has a dampening effect), and darker red indicates that a country has a more negative impact on the global rate of soil erosion (that is, it has higher erosion rates). For all countries that perform more poorly than their neighbours, the map shows how much soil erosion they could mitigate (per hectare and year) just by catching up to their neighbours. Even the better performing countries could probably further improve their impact, so this map probably presents a lower bound for countries' erosion mitigation potential—especially in regions where soil erosion is high. For reference, the global average soil erosion rate is 2.4 t ha^{-1} yr^{-1}, and we estimate the average country discontinuity at 1.4 t ha^{-1} yr^{-1}.

出典: Countries and the global rate of soil erosion, David Wuepper, Pasquale Borrelli, Robert Finger(2020)

図 A-33　土壌浸食の世界的分布地域



出典: Biochemical soil treatment for erosion control against Desertification, I. Chang, J. Im, H.D. Shin, G.C. Cho(2015)

図 A-34　土壌浸食が起きている世界的分布地域

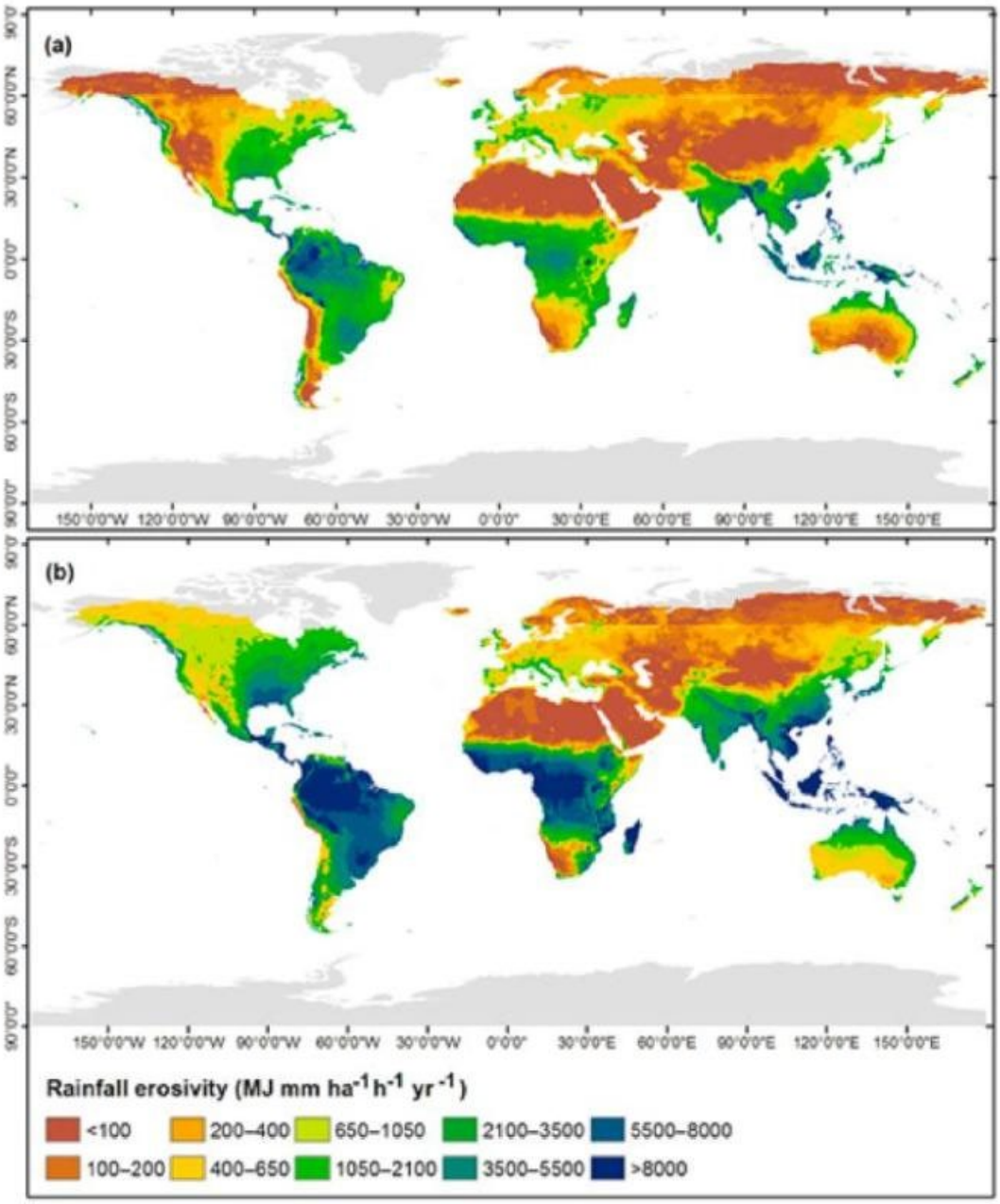


Fig. 2. Spatial distribution of mean annual global rainfall erosivity (2001–2020) based on (a) Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM-IMERG)-only and (b) GPM-IMERG merged with Global Rainfall Erosivity Database (GloREDa) station data. Erosivity classes correspond to quantiles of the GPM-IMERG merged with GloREDa.

統合マルチ衛星全球降水量測定データ（GPM-IMERG)のみ、(b) 全球降水量侵食率データベース（GloREDa）観測所データと統合したGPM-IMERG に基づく平均年間全球降水量侵食率(2001～2020 年）の空間分布。

出典: Biochemical soil treatment for erosion control against Desertification, I. Chang, J. Im, H.D. Shin, G.C. Cho(2015)

図 A-35 降雨による土壌浸食予測

A3.2　地域毎／国毎

A3.2.1　南アフリカ

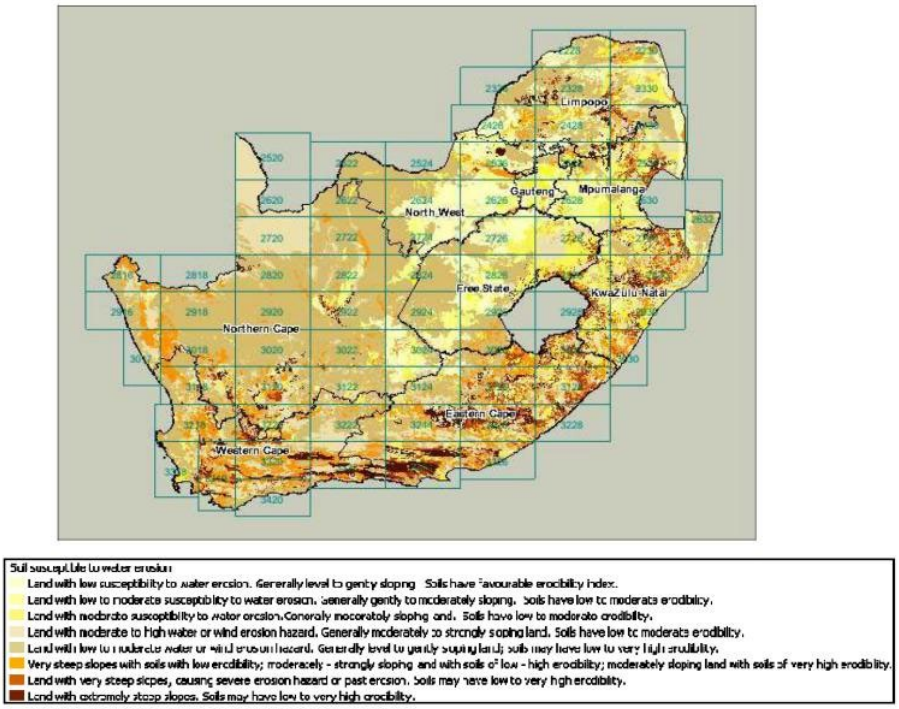


Figure 11: Map of soil susceptibility to water erosion in the RSA (From: AGIS Comprehensive Maps: Online)

出典:A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 A-36　南アフリカ国の浸食土壌の分布図

A4　崩壊性土

A4.1　全世界

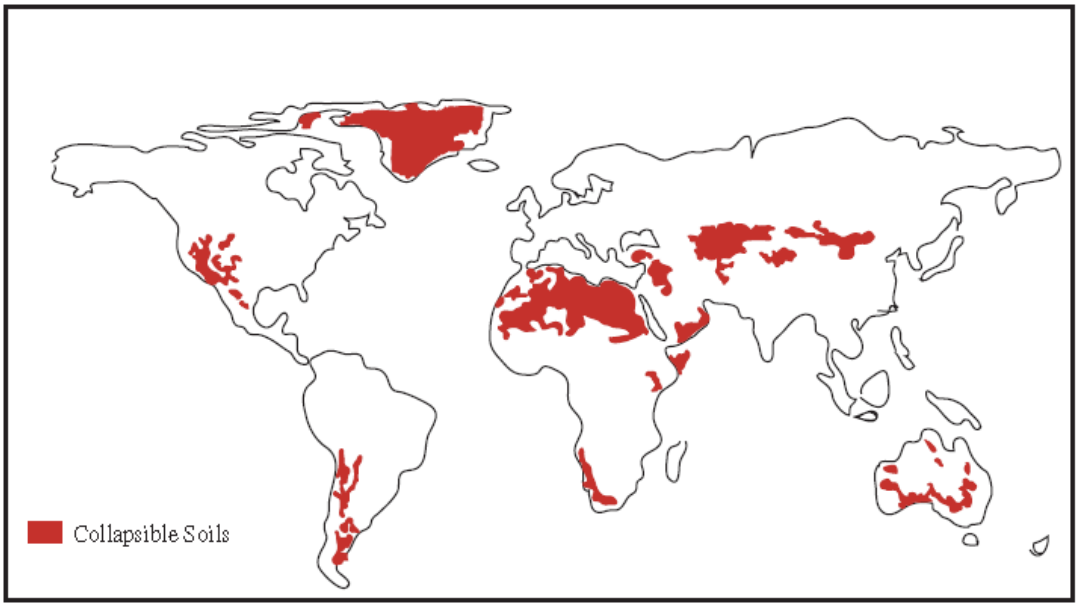
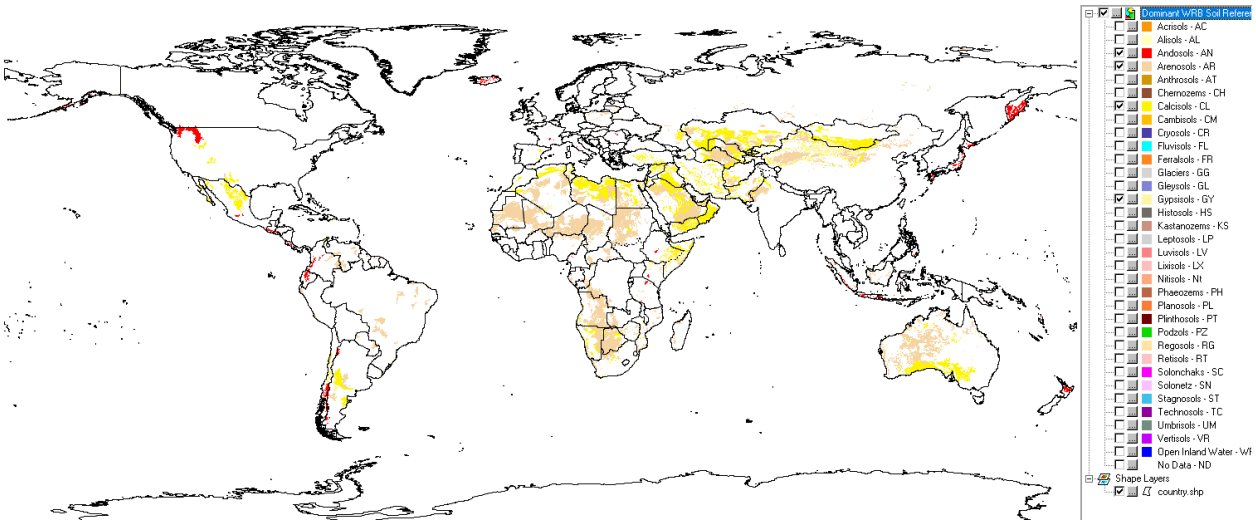


Figure 1.1: World distribution of collapsible soils, modified after [FAO, 1990].

出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, AhmedAl-anabi(2014)

図 A-37　崩壊性土の世界的分布図



出典：HWSD Ver.2.0

出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, AhmedAl-anabi(2014)

図 A-38　HWSD から推定される崩壊性土の分布図
（Andosols、Arenosols(黄土)、Calcisols、Gypsisols(石膏)）

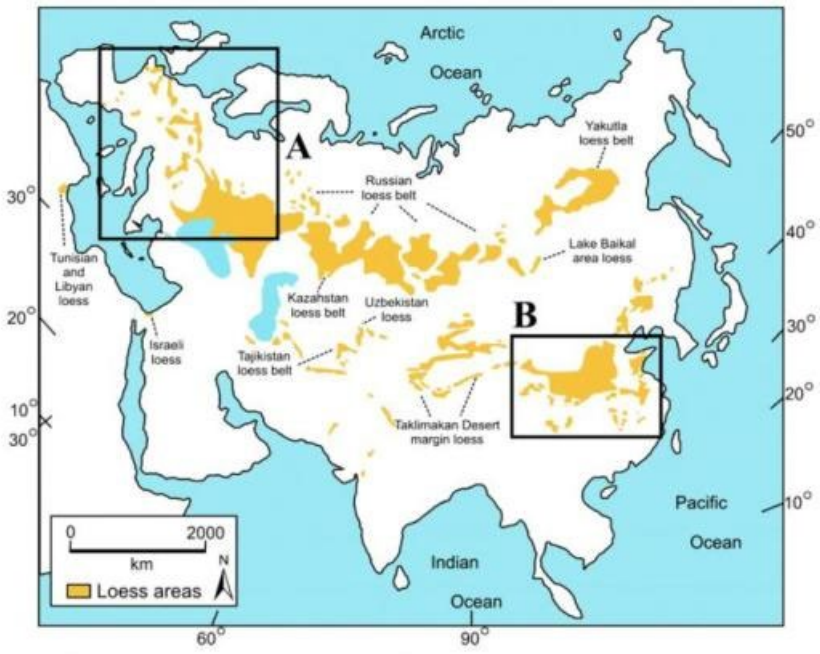


Fig. 1. Distribution of loess in Eurasia with the localities and areas of thickest loess deposition according to Muhs (2007, modified) with locations indicated the European Loess Belt (A) and the Chinese Loess Plateau (B).

出典: Loess–palaeosol sequences in China and Europe: Common values and geoconservation issues, Djordjije A. Vasiljević, Slobodan B. Marković, Thomas A. Hose, Zhongli Ding et al.(2014)

図 A-39 黄土の世界的分布図

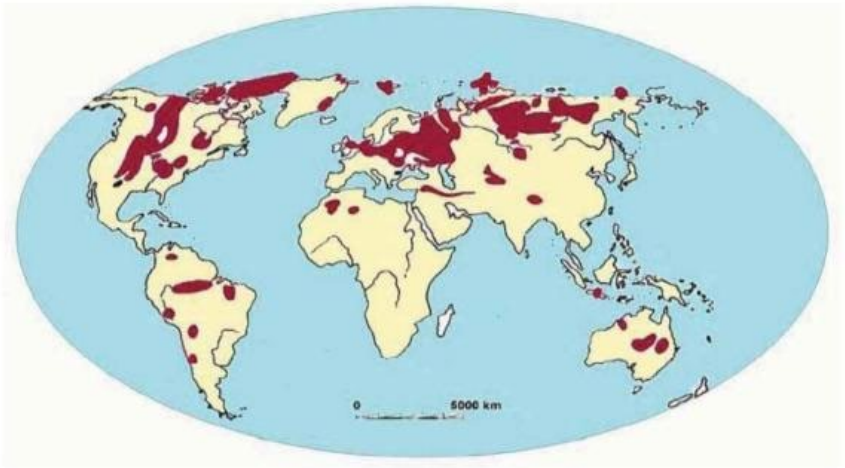


Figure 2.3: Distribution of gypseous soils in the world as mensioned by red area on the map (after FAO,1990)

出典: EFFECT OF MATRIC SUCTION ON THE BEHAVIOUR OF UNSATURATED GYPSEOUS SOIL, Ali Abdulkadhim Jasim Al-Shamoosi(2019)

図 A-40 石膏質土壌の世界的分布図

A4.2　地域毎／国毎

A4.2.1　ヨーロッパ

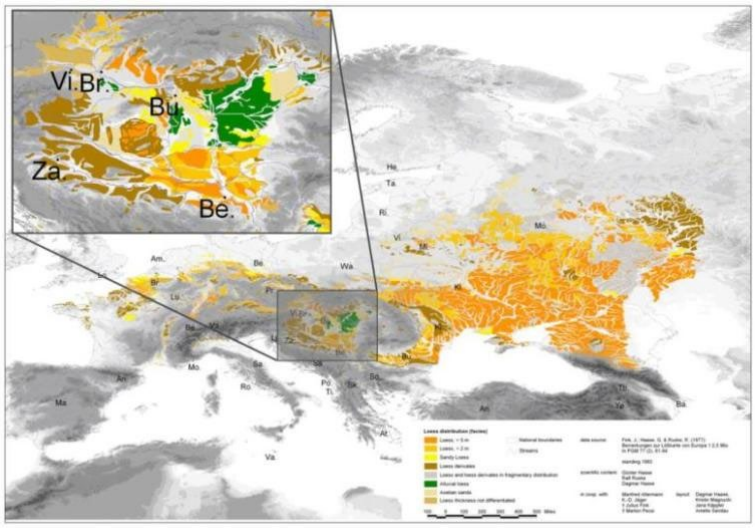


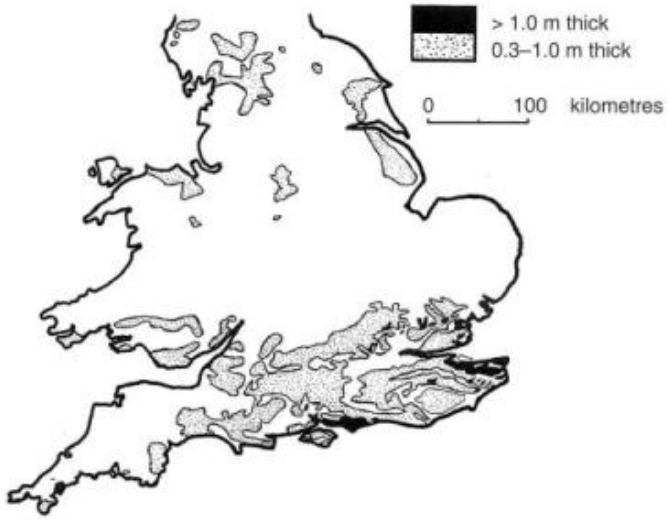
Fig. 2. Loess deposition in Europe according to Haase et al. (2007) with attention to thickness of Pannonian loess sections.

出典: Loess–palaeosol sequences in China and Europe: Common values and geoconservation issues, Djordjije A. Vasiljević, Slobodan B. Marković, Thomas A. Hose, Zhongli Ding et al.(2014)

図 A-41　黄土のヨーロッパの分布図

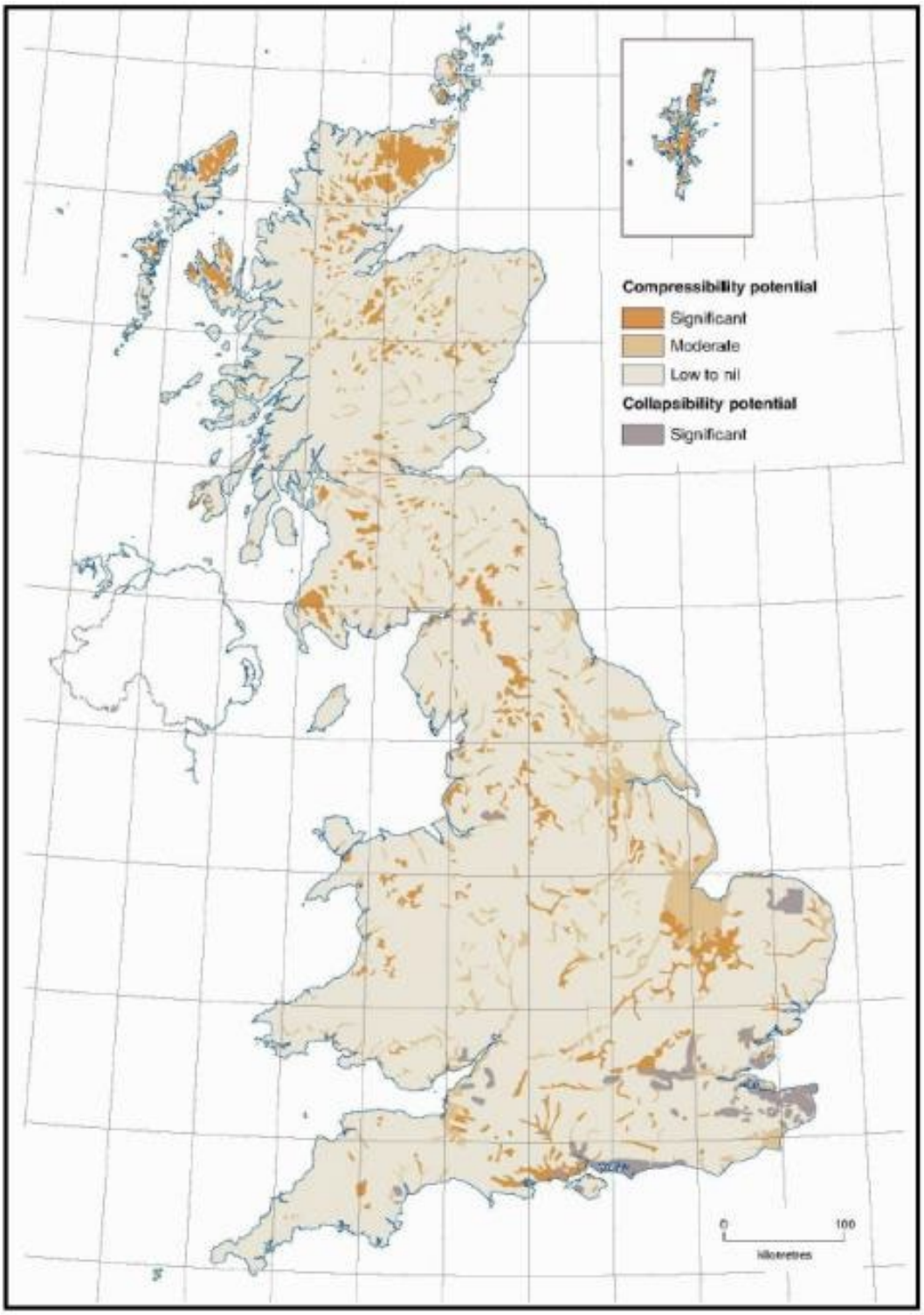
A4.2.2　英国

イギリスでは黄土はブリックアース Brickearth と呼ばれ、ケント州の北部と東部、エセックス州の南部にある。層厚は最大で 8m で 4m 程度が多い。



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation, Michael Brown, John Burland et al(2024)

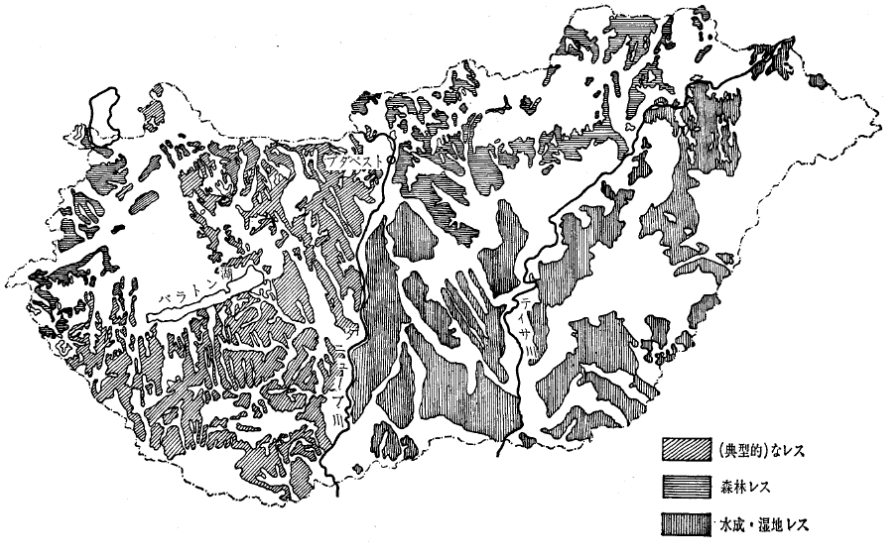
図 A-42　英国ウェールズ南部における「ブリックアース」（黄土）堆積物の分布



出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 A-43 英国の圧縮性土と崩壊性土の分布図

A4.2.3　ハンガリー



出典: ハンガリーにおけるレスの特徴, Gyorgy Egri, 1978

図 A-44 ハンガリー国の黄土の分布図

A4.2.4　ルーマニア

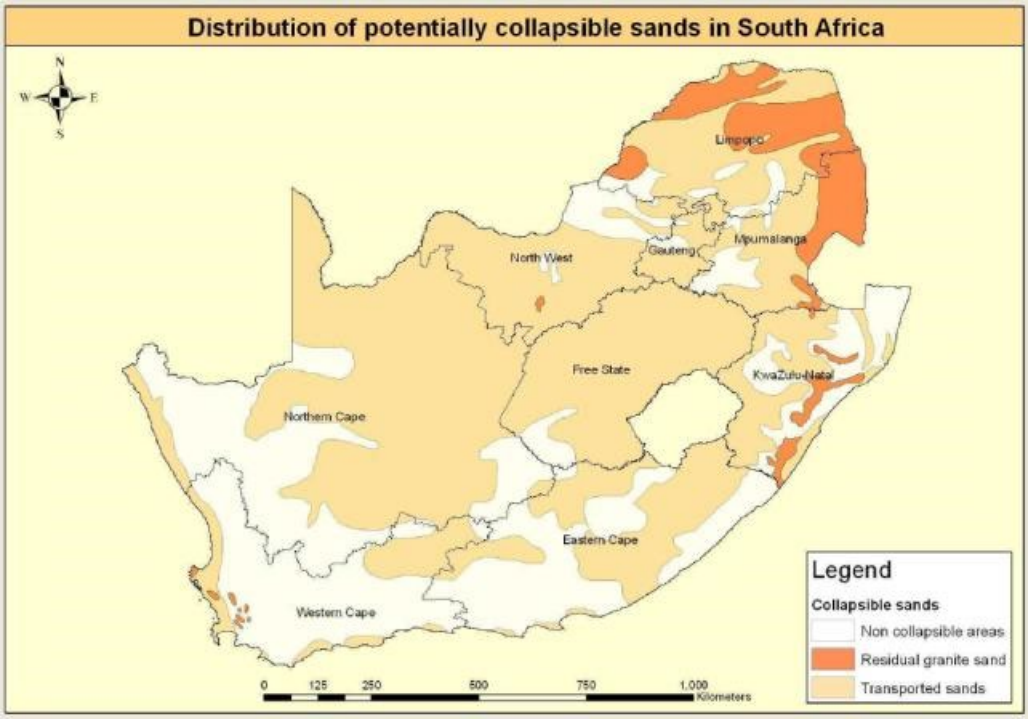


Figure 1. Collapsible soil spreading in Romania (NP 125:2010).

出典: I LOESSOID SOILS IMPROVEMENT – LABORATORY TESTS AND ROAD ENGINEERING APPLICATIONS, Cong Dinh Nguyen, Catalin Burlacu, Ioan Boti(2019)

図 A-45 ルーマニア国の崩壊性土の分布図

A4.2.5　南アフリカ



出典: A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011

図 A-46　南アフリカの崩壊性砂の分布図

A4.2.6　アルゼンチン



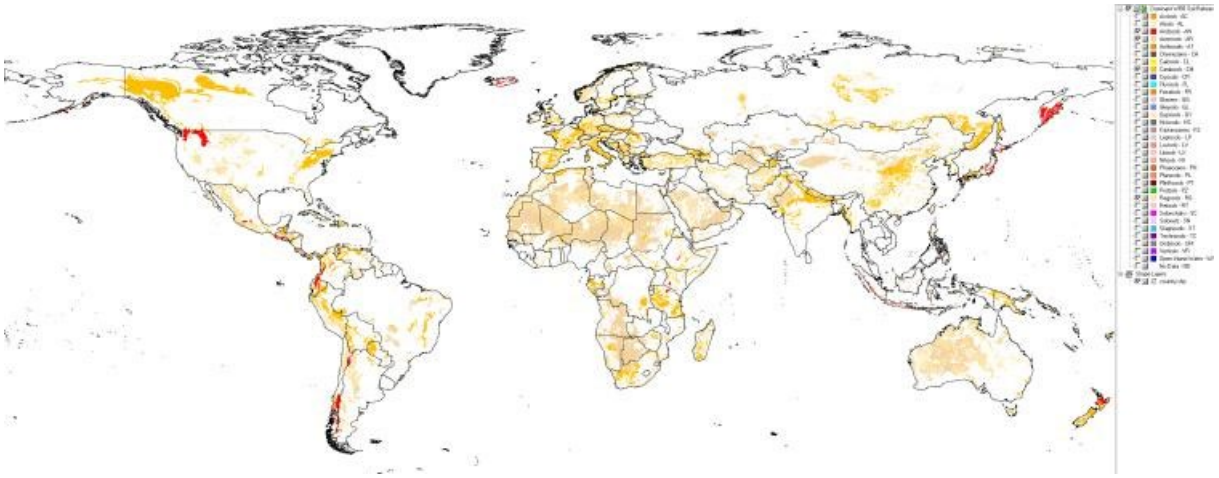
図—1　アルゼンチン共和国
主に崩壊性土が分布している中部地域

出典: 中央アルゼンチンの崩壊性土, Aldo R. Reginatt, 1978

図 A-47 アルゼンチンの分散性土分布図

A5　破砕性土

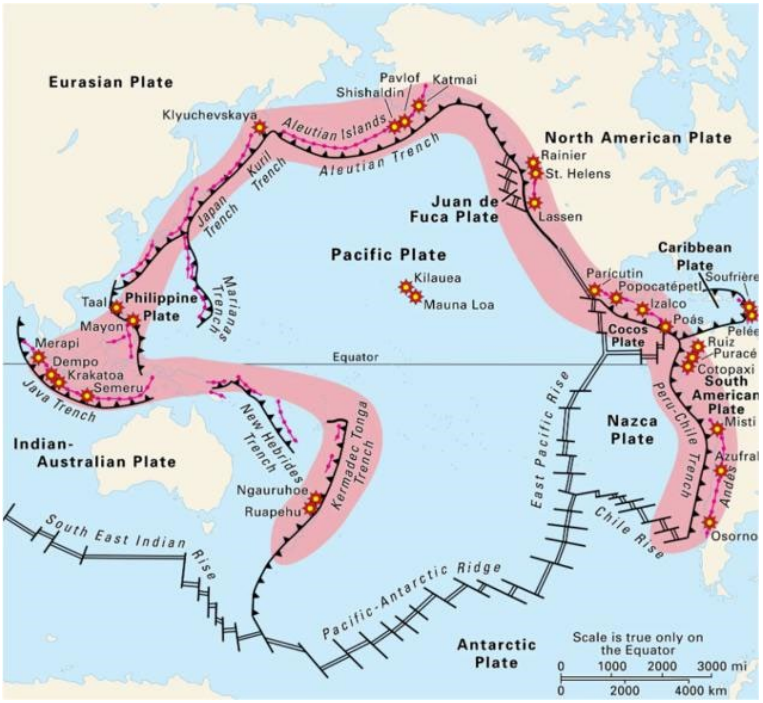
A5.1　全世界



出典：HWSD Ver.2.0

図 A-48 HWSD から推定される崩壊性土の分布図
（Cambisols、Arenosols(黄土)、Regosols、Andosols(火山灰性土含む)）

A5.2　地域毎／国別

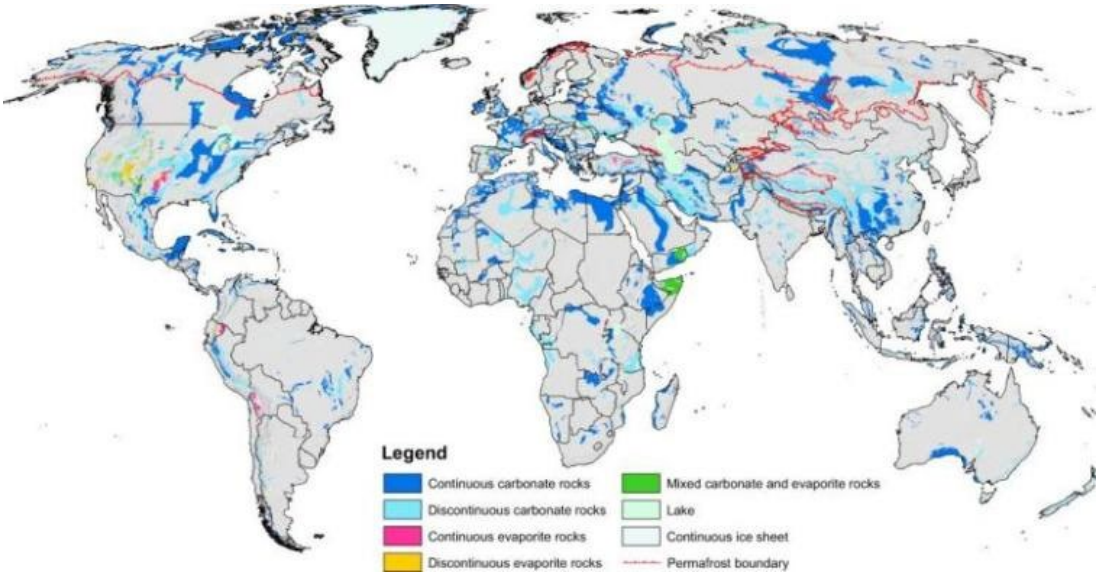


出典: Understanding the Geotechnical Behaviour of Pumiceous Soil: A Review, Balasubramanian Elankumaran, Kim L. de Graaf, Rolando P. Orense(2024)

図 A-49 環太平洋火山帯とそれに関連するプレート境界

A6　可溶性地盤

A6.1　全世界

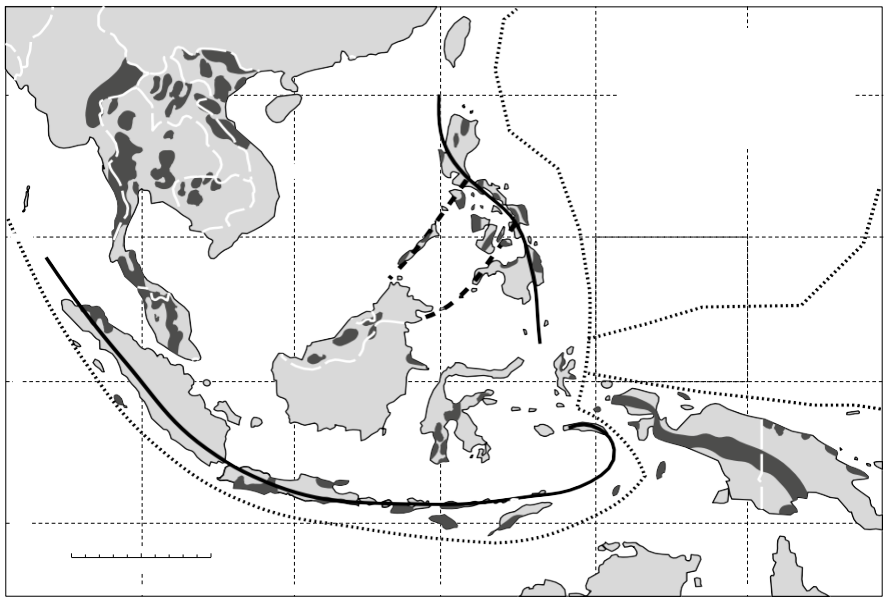


出典: Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, Nico Goldscheider, Zhao Chen, Augusto S. Auler et al.(2020)

図 A-50　可溶性なカルスト地形の世界的分布図

A6.2　地域毎／国毎

A6.2.1　東南アジア



出典: Karst Management, hilip E. van Beynen(2011)

図 A-51　東南アジアのカルスト地形

A6.2.2　中米とカリブ海



Fig. 20.1 Karst areas in Central America and the Caribbean

出典: Karst Management, hilip E. van Beynen(2011)

図 A-52　中米とカリブ海のカルスト地域

A7　塩類土壌

A7.1　全世界

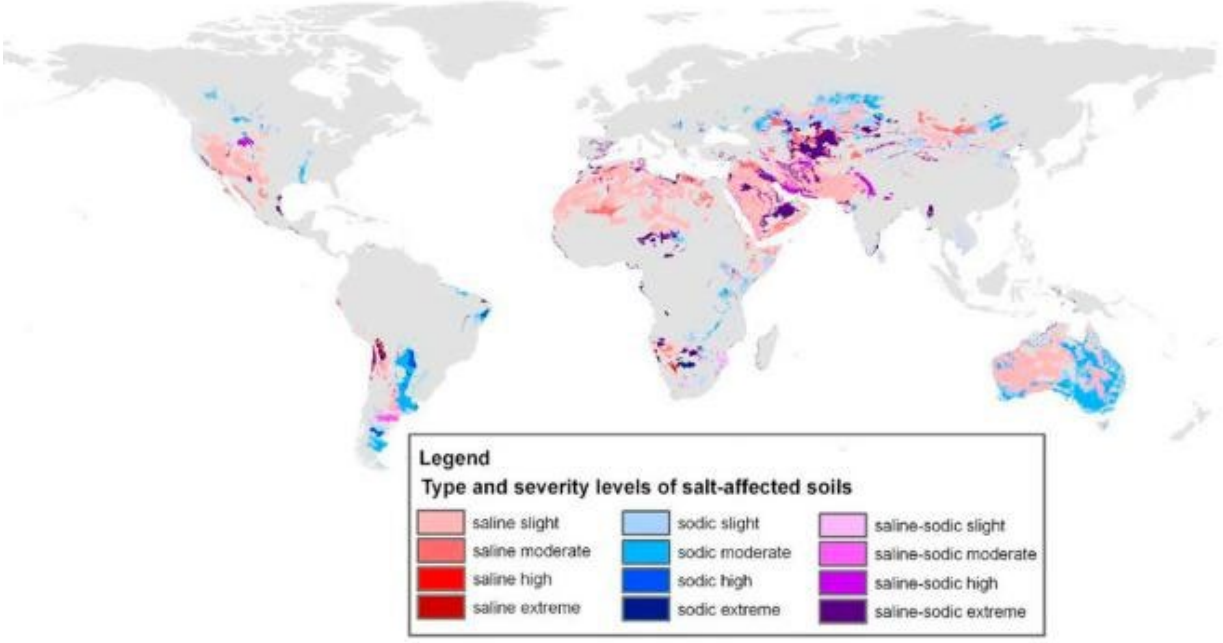
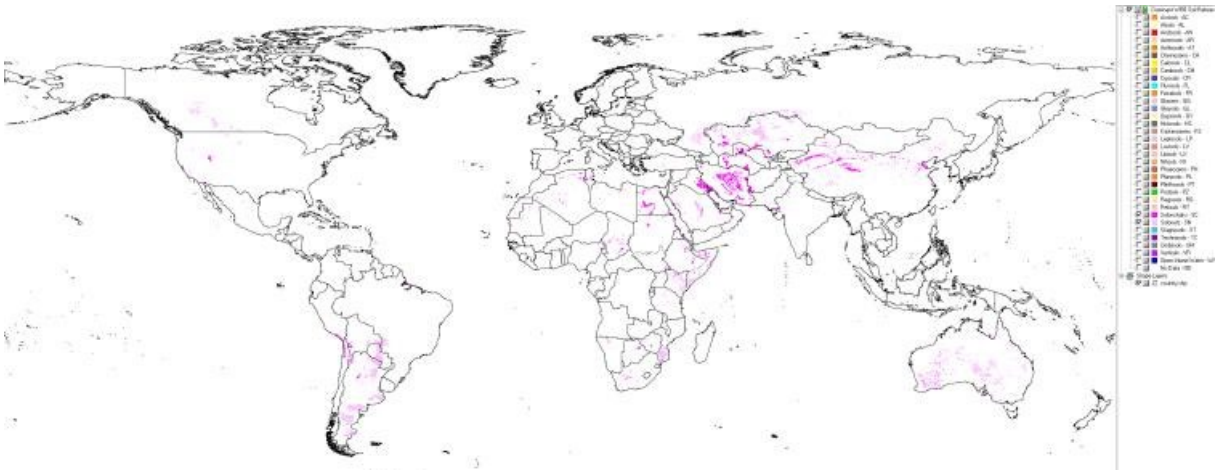


FIGURE 6
Global distribution of saline, sodic, and saline-sodic soils. Source: Encyclopedia of the Environment (unknown date). https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/land-salinization/

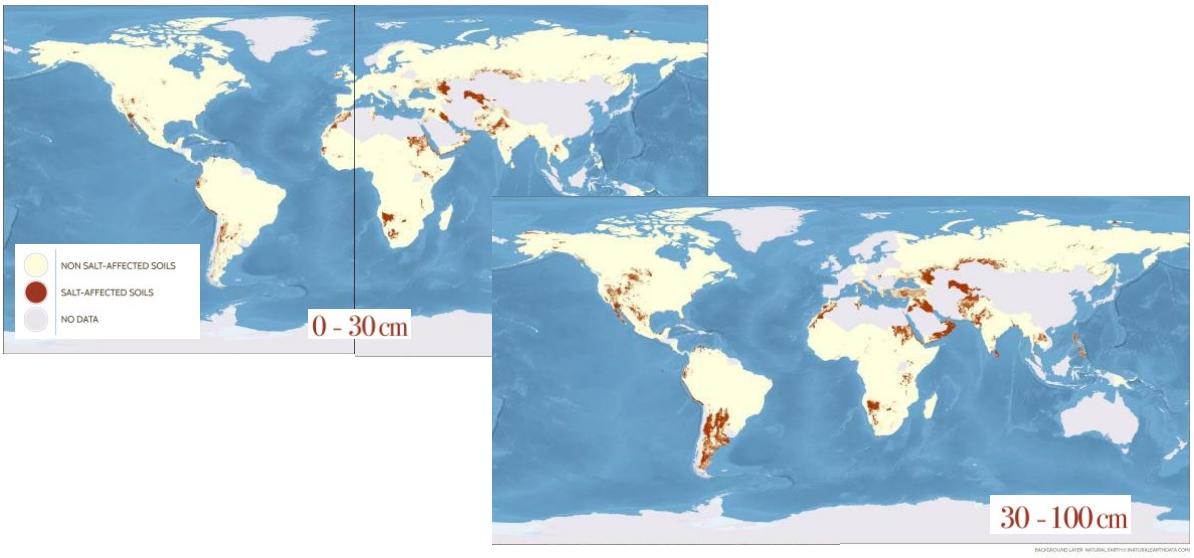
出典：Rio (1992) to Glasgow (2021): Three decades of inadequate mitigation of climate change and its slow onset effects, Ilan Stavi(Sep. 2022)

図 A-53 塩類土壌が分布する地域



出典: HWSD 2.0

図 A-54 HWSD による Solonchak と Solonetz の世界的分布図



出典：Global Map of salt-affected Soils, Food and Agriculture Organization of the United State(2021)

図 A-55 塩類土壌の分布する地域

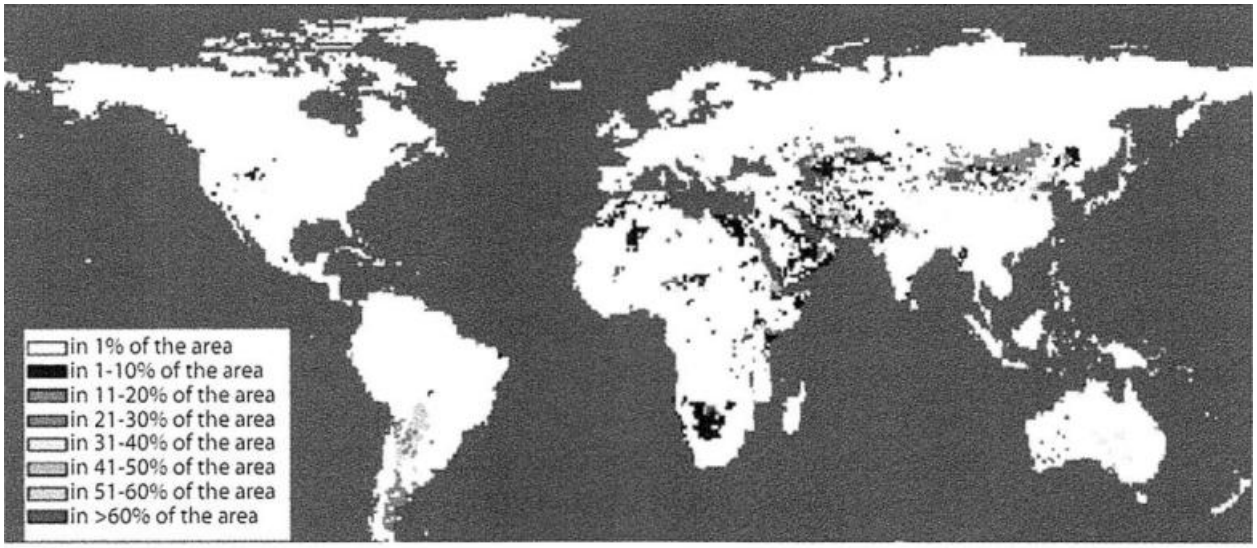


Fig. 10.5 Global distribution of saline soils. (Source FAO/UNESCO Soil Map of the World)

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman(2018)

図 A-56 塩類土壌の分布する地域

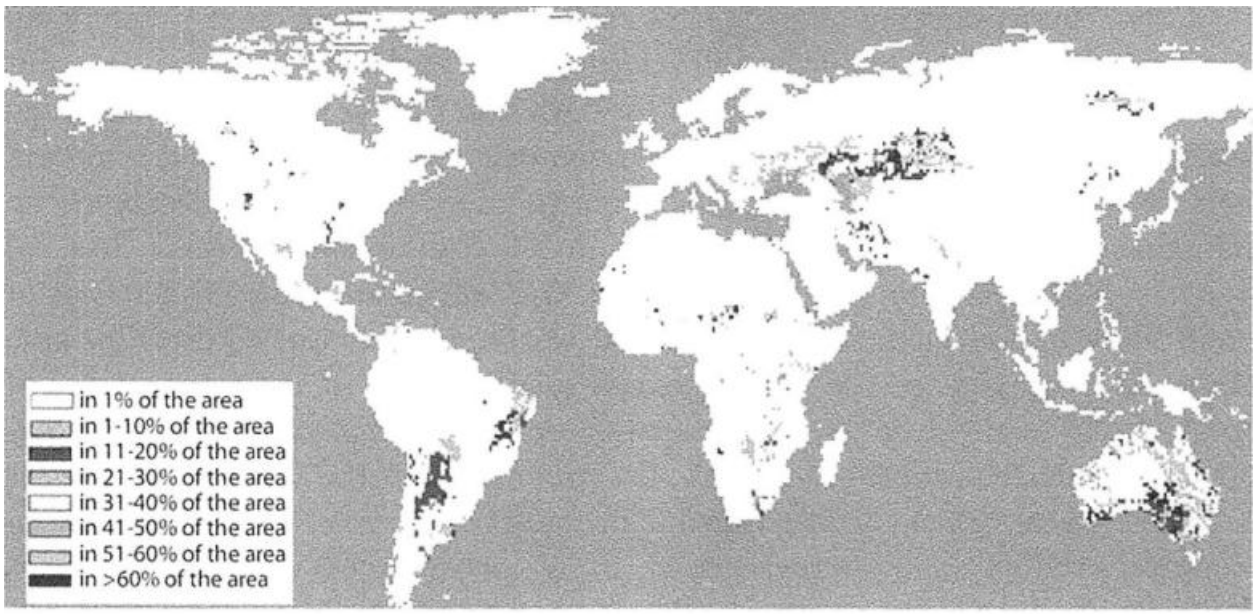


Fig. 10.6 Global distribution of sodic soils. (Source FAO/UNESCO Soil Map of the World)

出典: Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman(2018)

図 A-57 ソーダ土壌の分布する地域

A7.2　地域別／国別

A7.2.1　中央アジア

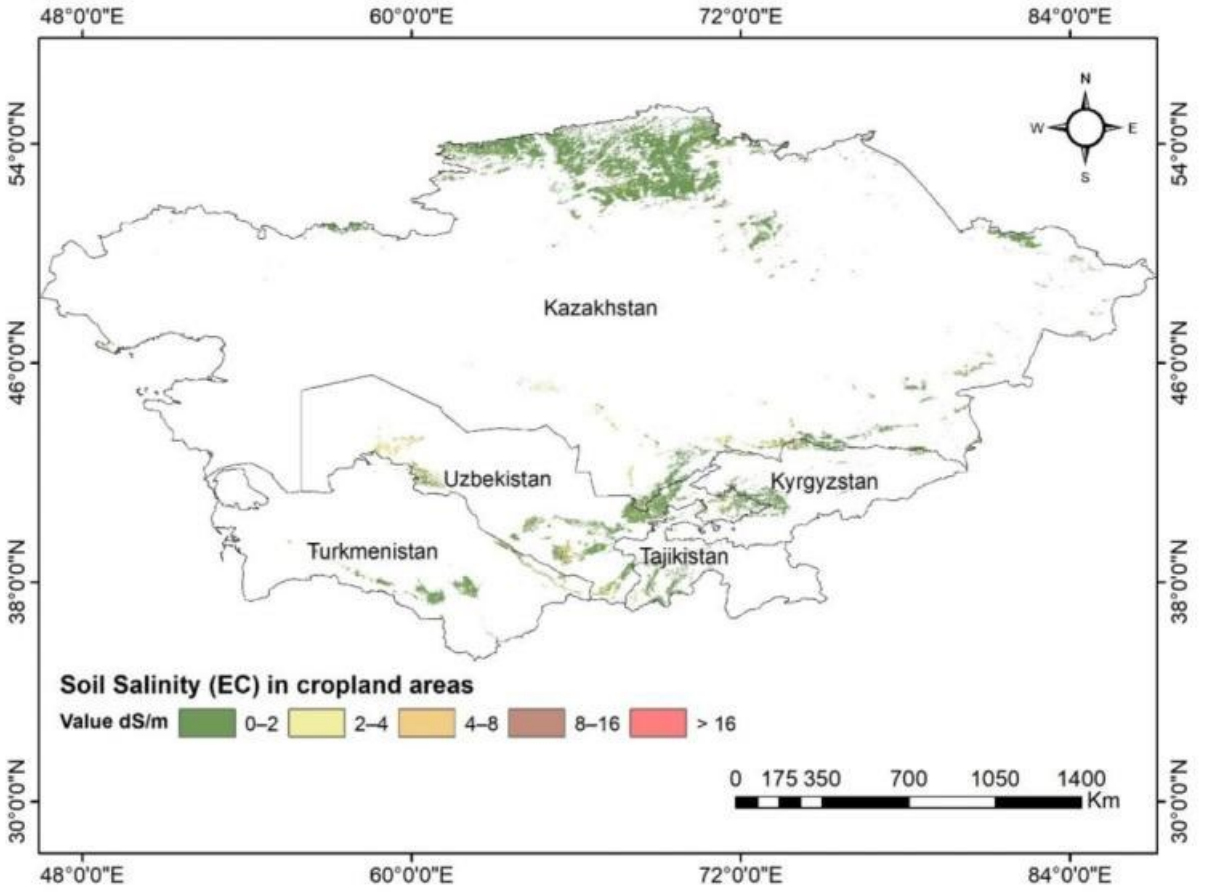


Figure 4. Soil salinity distributions and EC classes for 2018 cropland areas in Central Asia.

出典: Soil Salinity Variations and Associated Implications for Agriculture and Land Resources Development Using Remote Sensing Datasets in Central Asia, Simon Measho, Fadong Li et al., (2022)

図 A-58　中央アジアの塩類土壌分布図

A8　硫酸塩/硫化土壌

A8.1　全世界

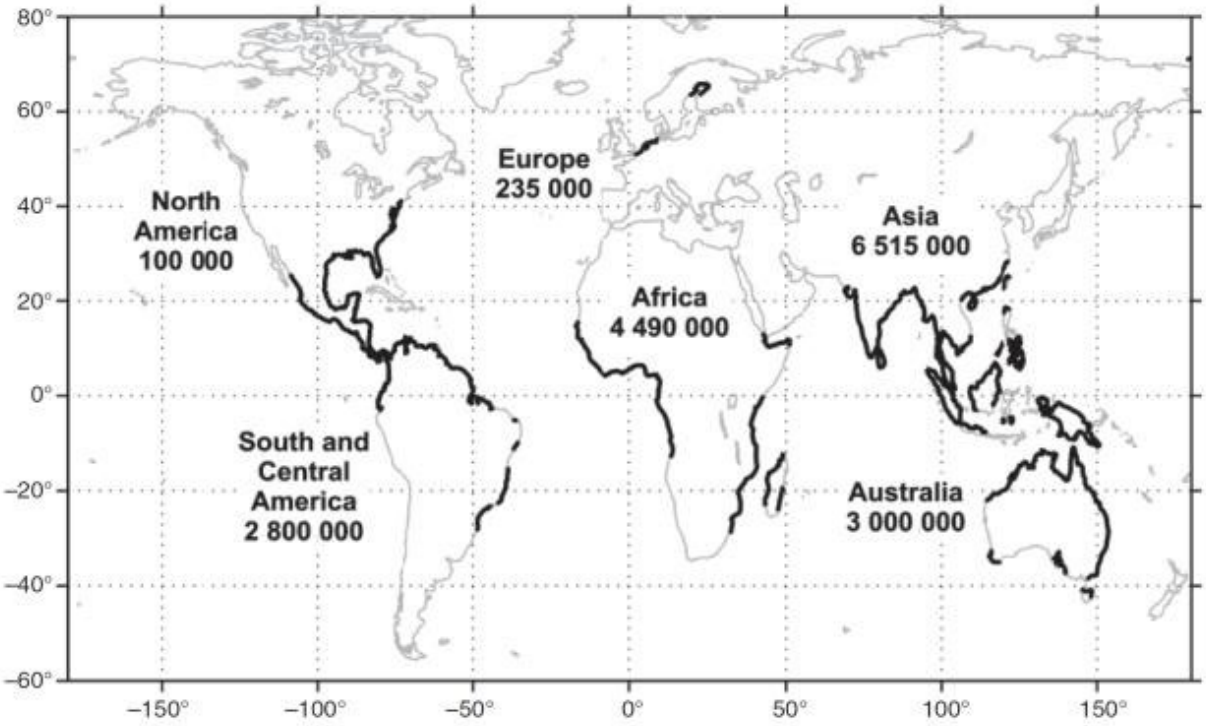


Fig. 1. Simplified and generalised map of worldwide coastal occurrence of acid sulfate soils (ASS) (marked by thick lines). Estimates for the spatial extent of actual and potential ASS are given in hectares. Adapted from Gröger (2011).

出典：Using X-ray fluorescence core scanning to assess acid sulfate soils, Ulrike Proske, Henk Heijnis and Patricia Gadd(2014)

図 A-59 酸塩土壌の分布する地域

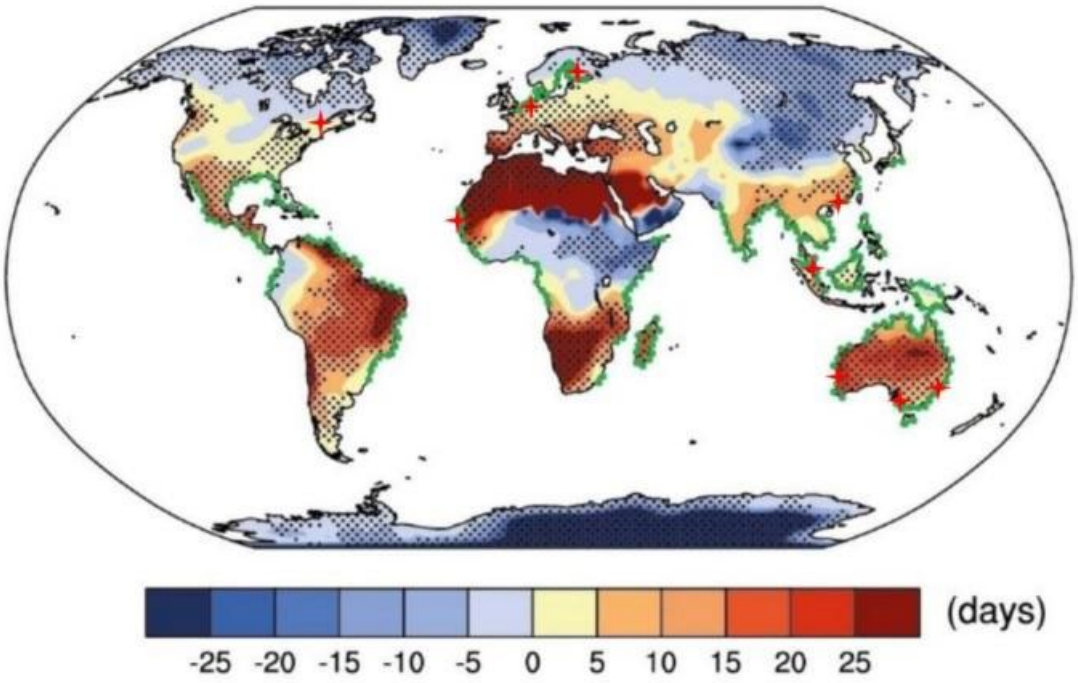
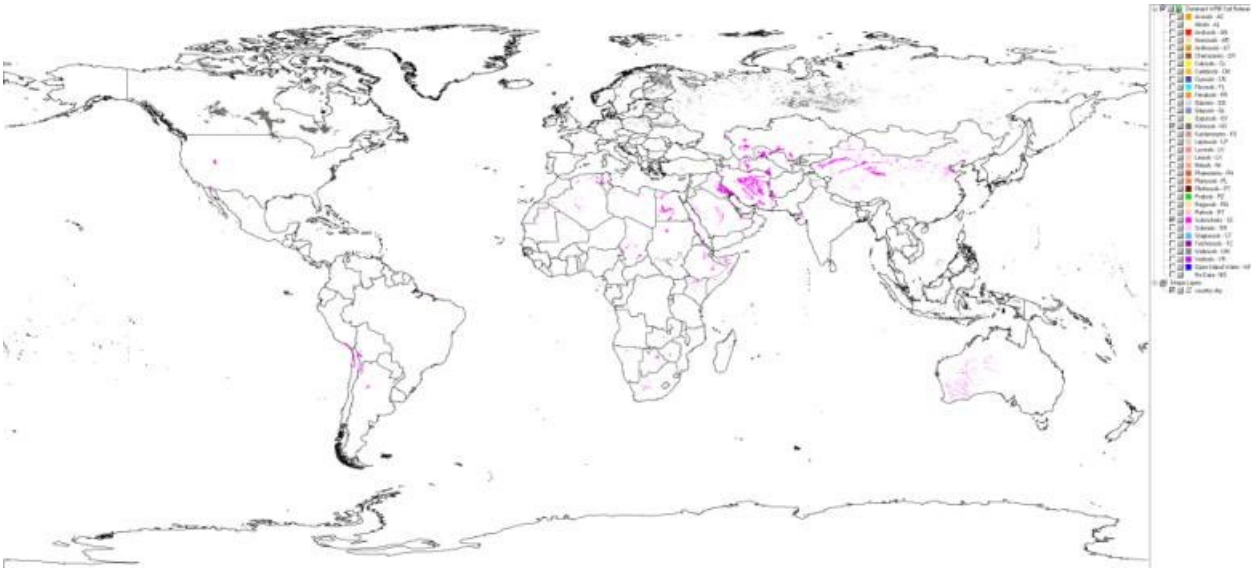


Figure 1 General global distribution of coastal ASS (green dots; according to Simpson and Pedini [9] and Australian Soil Resource Information System (http://www.asris.csiro.au)) superimposed on long-term projection of consecutive dry days from IPCC AR5 [10] (projected change in annual maximum number of consecutive dry days when precipitation is less than 1 mm over the 2081–2100 period in the RCP8.5 scenario (relative to the 1981–2000 reference period) from the CMIP5 models). Red stars indicate locations of ASS impacted by drought mentioned in Table 1.

出典：Global risks of severe acidification of acid sulfate soils due to increasing drought and the importance of organic matter for mitigation,

C.i Yuan, P. Marschner, R. W. Fitzpatrick, L. M. Mosley(2016)

図 A-60 沿岸域の酸性硫酸塩土壌の世界的な分布図



出典: HWSD Ver.2.0 より JICA 調査団作成

図 A-61 硫酸塩土壌が含まれる Solonchak の世界的分布図

A9　　地域別/国別

A9.1.1　スウェーデン

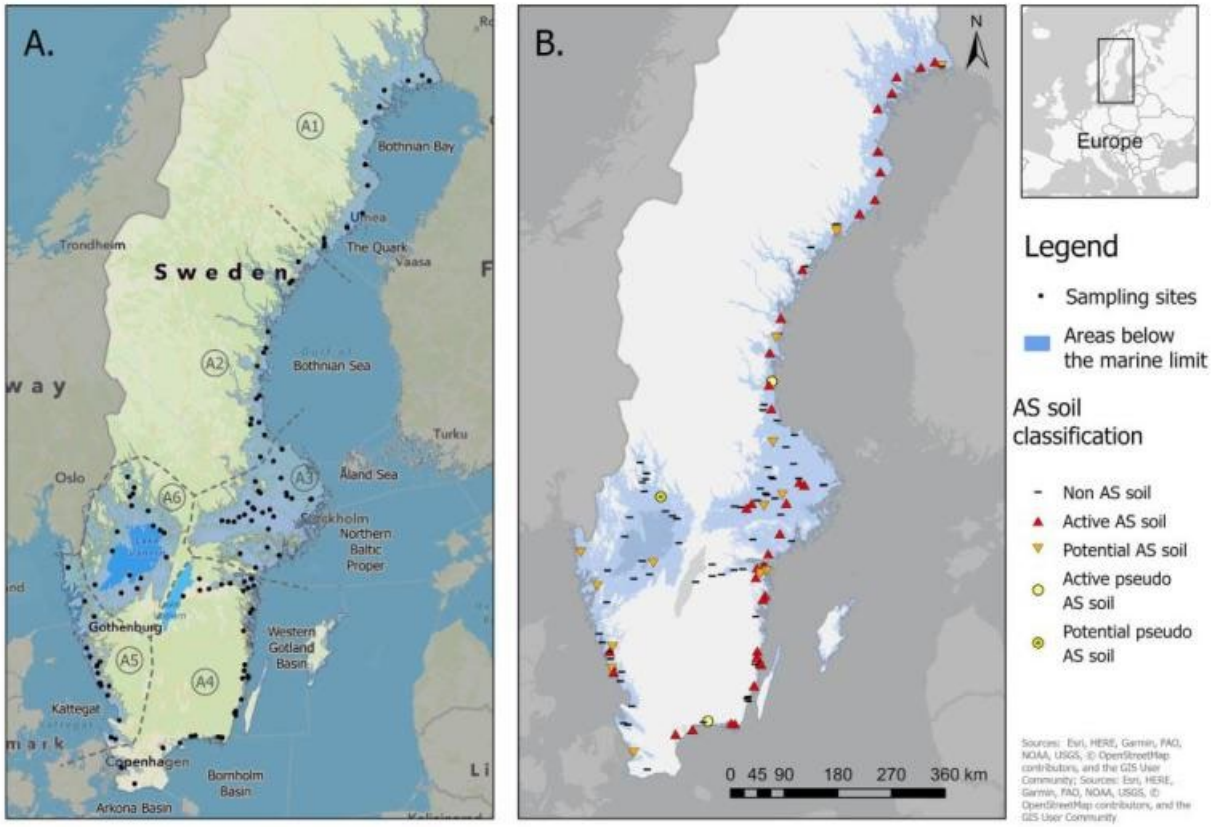


Fig. 1. Sampling sites in Sweden with areas A1 – A6 marked and the area below the Holocene marine limit indicated (A) plus the occurrence of acid sulfate (AS) soils in the country (B).

出典: A nationwide acid sulfate soil study – A rapid and cost-efficient approach for characterizing large-scale features, Alexandra Nyman, Anders Johnson, Changxun Yu, Gustav Sohlenius, Marina Becher, Mark Dopson, Mats Åström(2023)

図 A-62 スウェーデンの酸性硫酸塩土壌の分布図

A10　炭酸塩土壌

A10.1　全世界

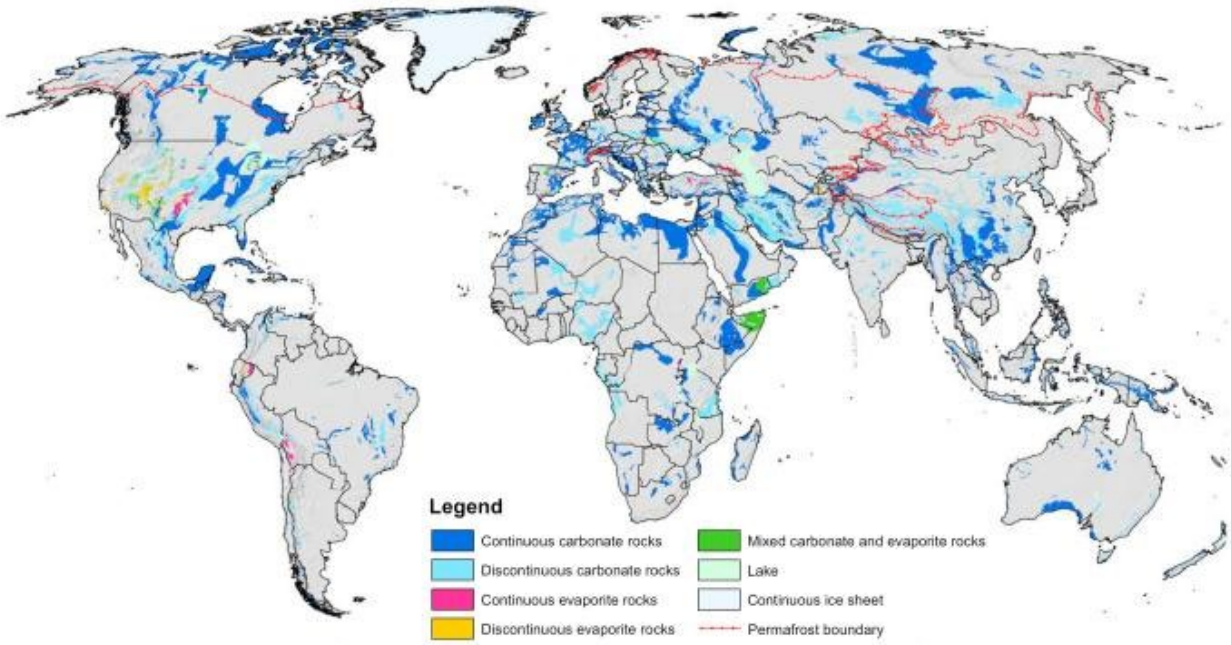


Fig. 1 Generalized presentation of the World Karst Aquifer Map (WOKAM) and its legend (without springs, caves and some other details), showing karstifiable carbonate and evaporite rocks that represent potential karst aquifers (modified after Chen et al. 2017b). The present paper focuses on carbonate rocks

出典：Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, N. Goldscheider, Zhao Chen,Augusto S. Auler et al. (2020)

図 A-63　Carbonate rocks の分布する地域

A11　ラテライト

A11.1　全世界

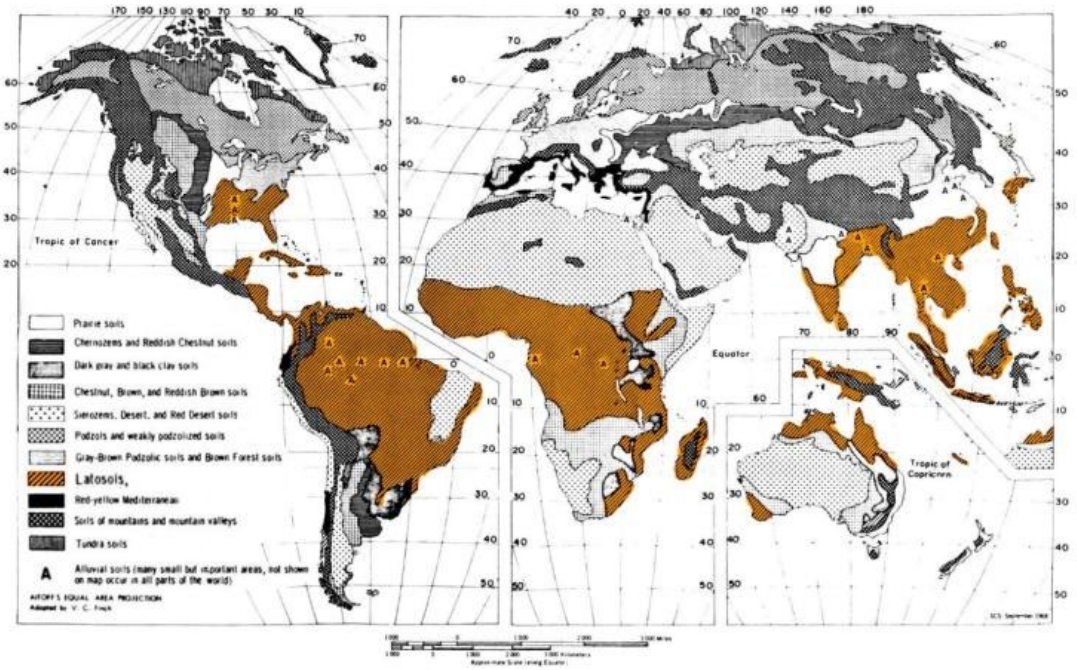


Figure 2.6: Latosol soil (collective laterite) world distribution (http://www.nzdl.org)

出典：AN INVESTIGATION INTO THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PROPERTIES OF LATERITE SOILS IN NILAI, MALAYSIA, Ahmed Sujeeth (2015.04)

図 A-64 ラテライトの世界的分布図

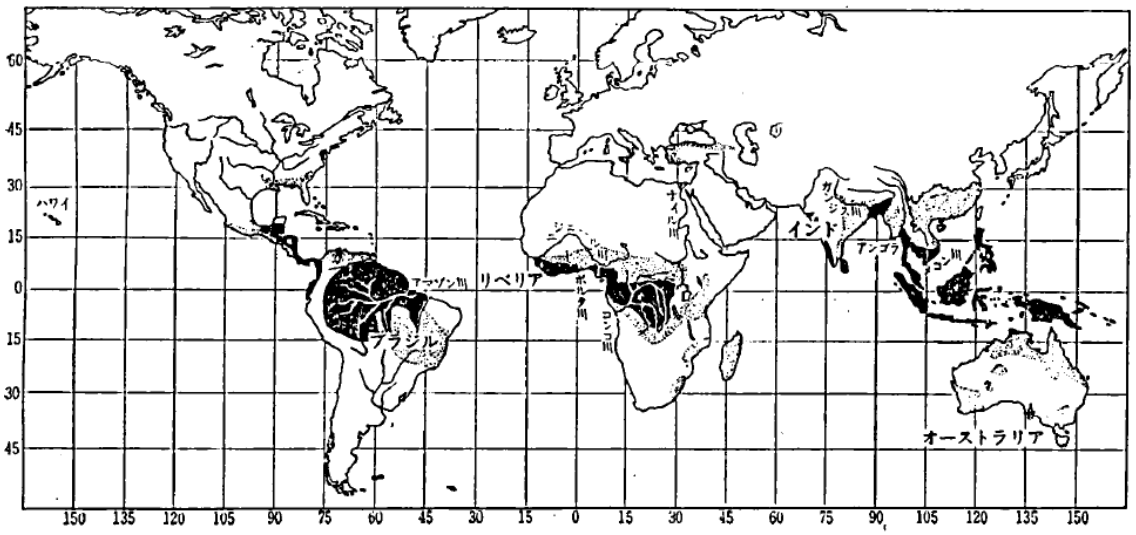
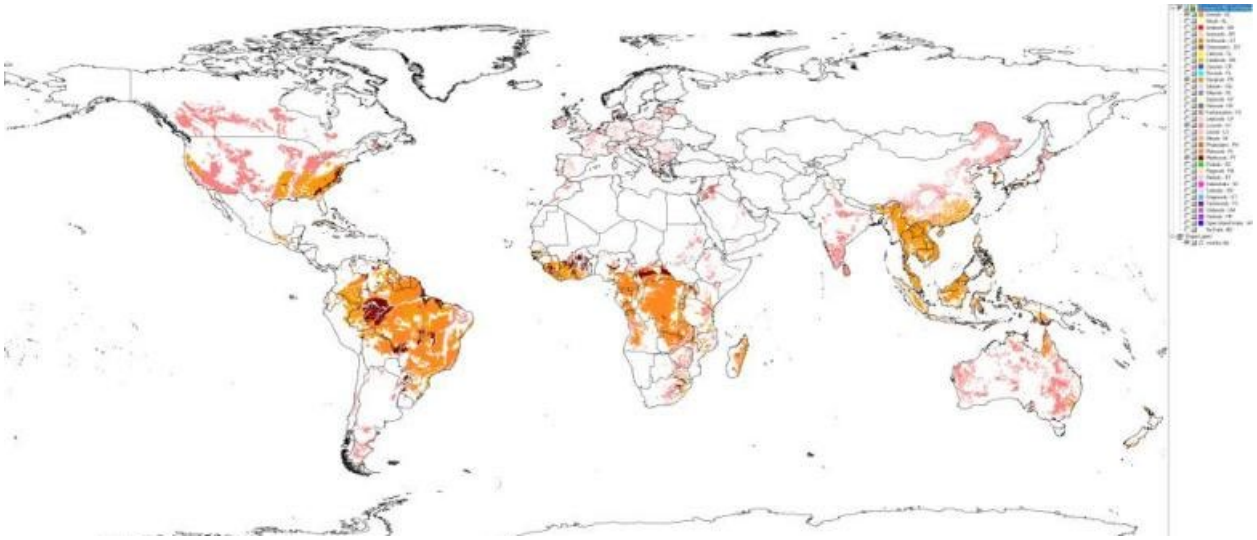


図-1.2　ラテライト質土（濃影の部分）及びラテライト（薄影の部分）の分布[7)]

出典：地盤工学の立場からみた風化残積土に関する研究，末岡徹(1993)

図 A-65 ラテライトの世界的分布図



出典：JICA 調査団(HWSD Ver.2.0 を用いて作成)

図 A-66 HWSD から推定されるラテライトが分布する地域

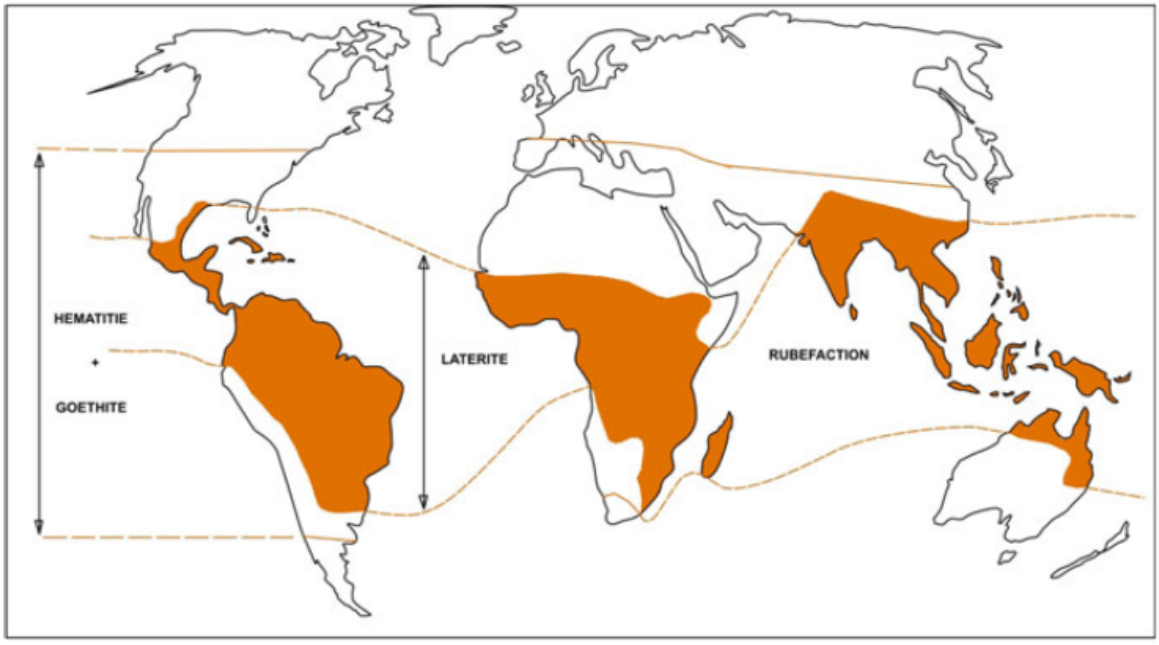


Fig. 1.1 The zone of rubefaction coincides with the intertropical area of laterite formation (modified from Tardy 1992)

出典： Laterites of the Bengal Basin Characterization, Geochronology and Evolution, Sandipan Ghosh, Sanat Kumar Guchhait, 2020

図 A-67 ラテライトの世界的分布図



Figure 2 : Régions de sols latéritiques [MENIN M., 1976]

出典：48.VALORISATION DES LATERITES DE COTE D'IVOIRE : FABRICATION DE BRIQUETTES DE PAREMENT A BASE DE LATERITE STABILISEE A FROID A L'AIDE D'UN LIANT HYDRAULIQUE : LE CIMENT PORTLAND, ASSANDE Aka Alexandre, 2007

図 A-68 ラテライトの世界的分布図

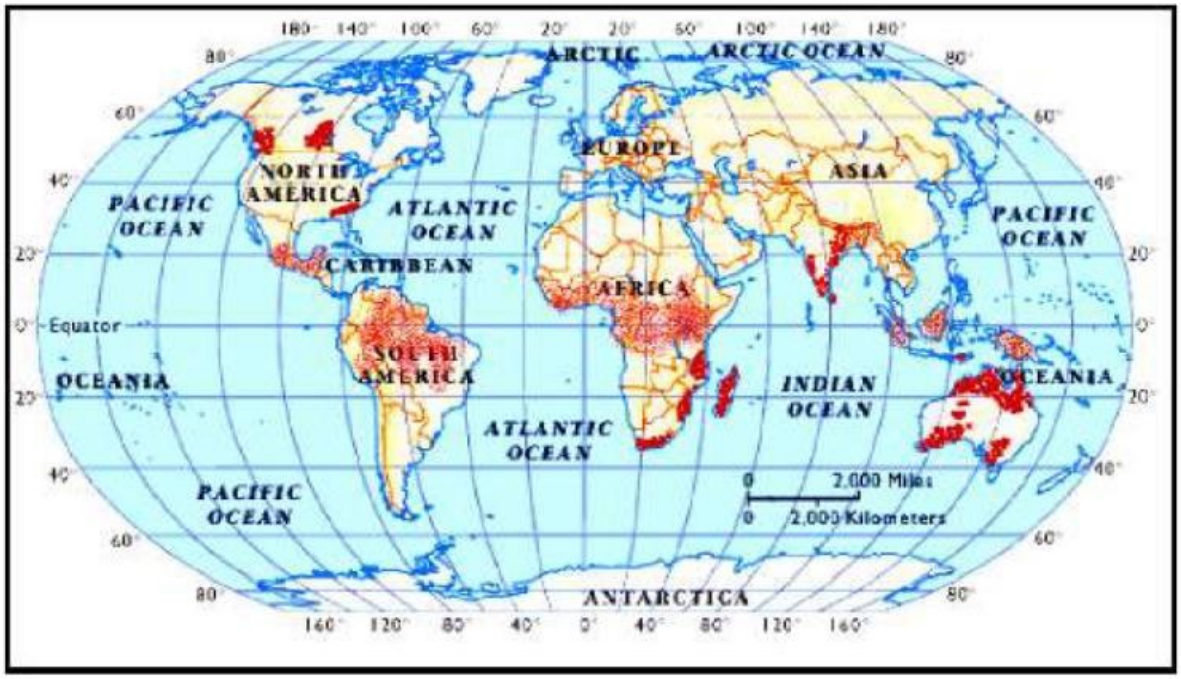


Figure 1: Worldwide Distribution of Laterite (Pearson, 1970)

出典：Characterization and Stabilization of Laterite for Sustainable Construction Applications, IFEYINWA IJEOMA OBIANYO, 2017

図 A-69 ラテライトの世界的分布図

A11.2　地域別／国別

A11.2.1 インド

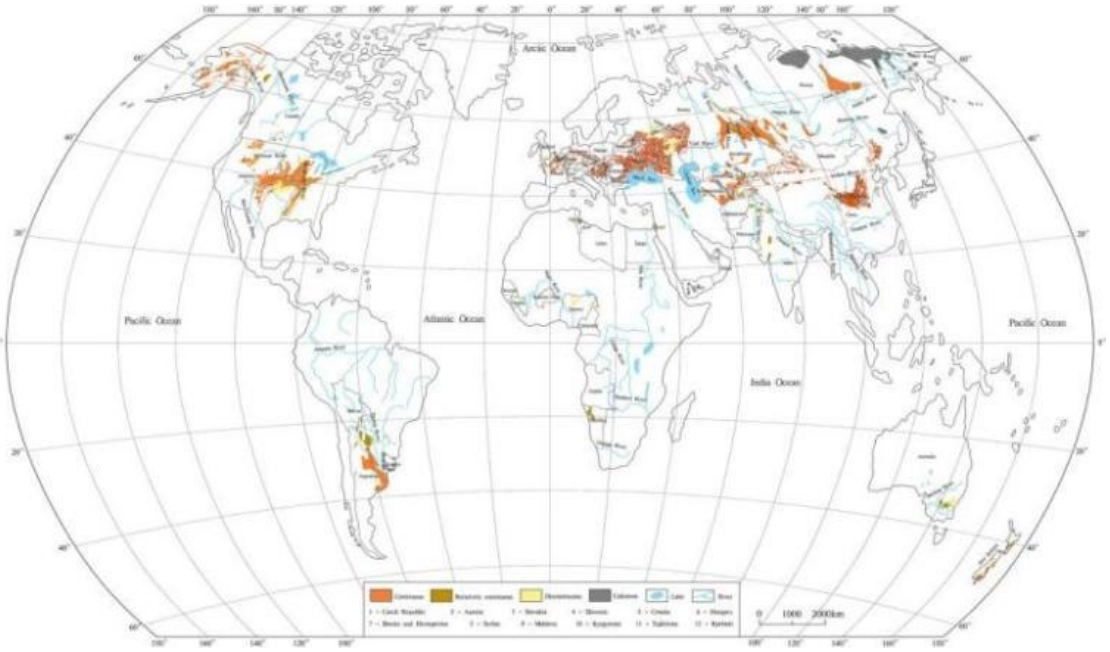


出典: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Major_soil_types_in_India.jpg

図 A-70 インド国の土壌分布図

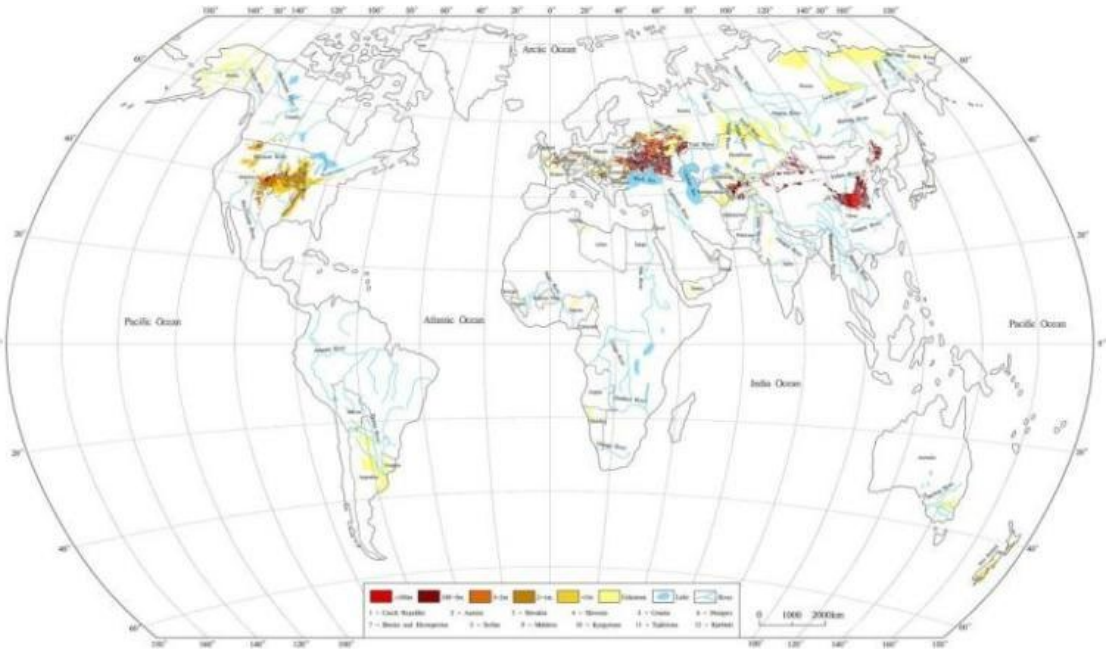
A12　黄土

A12.1　全世界



出典: Loess genesis and worldwide distribution, Yanrong Lia, Wenhui Shi, Adnan Aydin, Mary Antonette Beroya-Eitner, Guohong Gaoa(2020)

図 A-71　黄土の世界的分布図



出典: Loess genesis and worldwide distribution, Yanrong Lia, Wenhui Shi, Adnan Aydin, Mary Antonette Beroya-Eitner, Guohong Gaoa(2020)

図 A-72　世界の黄土の厚さ分布

A12.2　地域毎／国別

A12.2.1 中央アジア

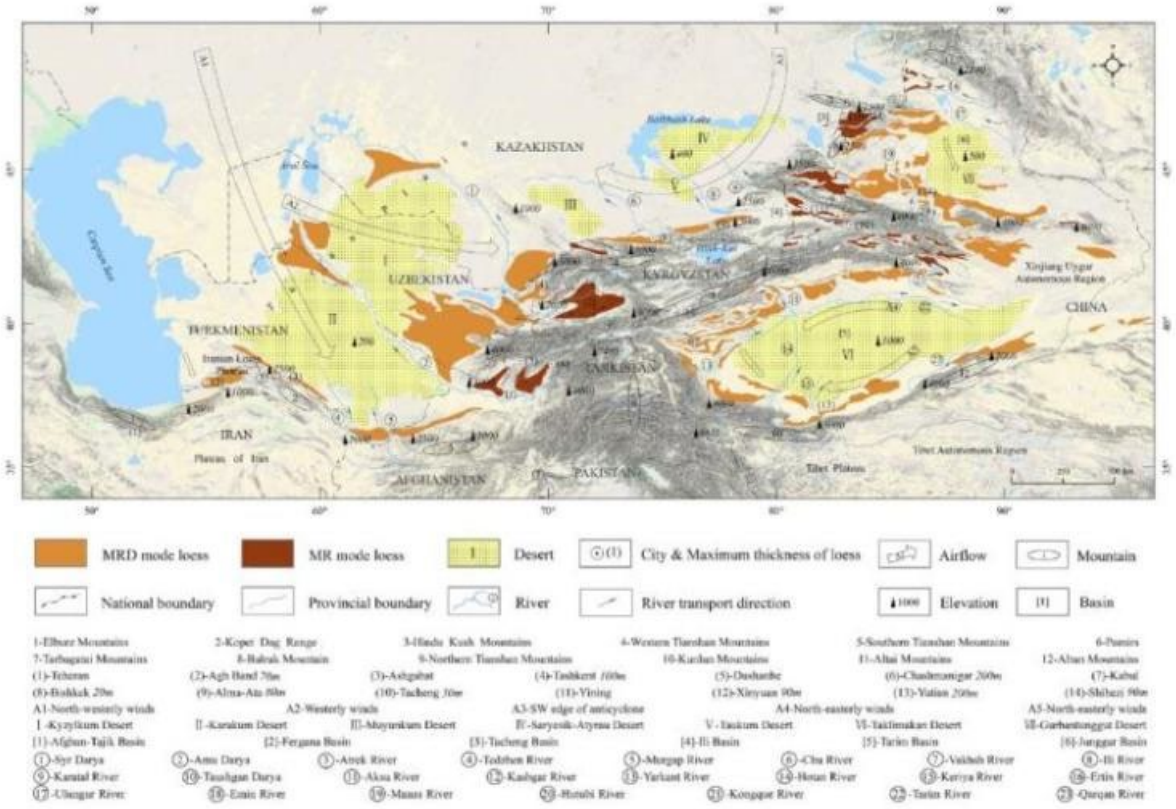


Fig. 1. Loess distribution in Central Asia and Xinjiang region of China. Loess zones are compiled from Liu (1965), Mavlyanova and Shermatov (1987), Dodonov (1991), Smalley et al. (2006), Machalett et al. (2008), Dodonov (2013), Muhs et al. (2014), Song et al. (2019), and Wang et al. (2019). Prevailing near-surface winds are modified from Sun (2002), Machalett et al. (2008), Wang et al. (2017), and Fitzsimmons et al. (2020).

出典: Reply to Li and Song's discussion of Loess genesis and worldwide distribution, Wenhui Shi, Yanrong Li et al.(Jun. 2021)

図 A-73　中央アジアの黄土分布図

(1) チベット

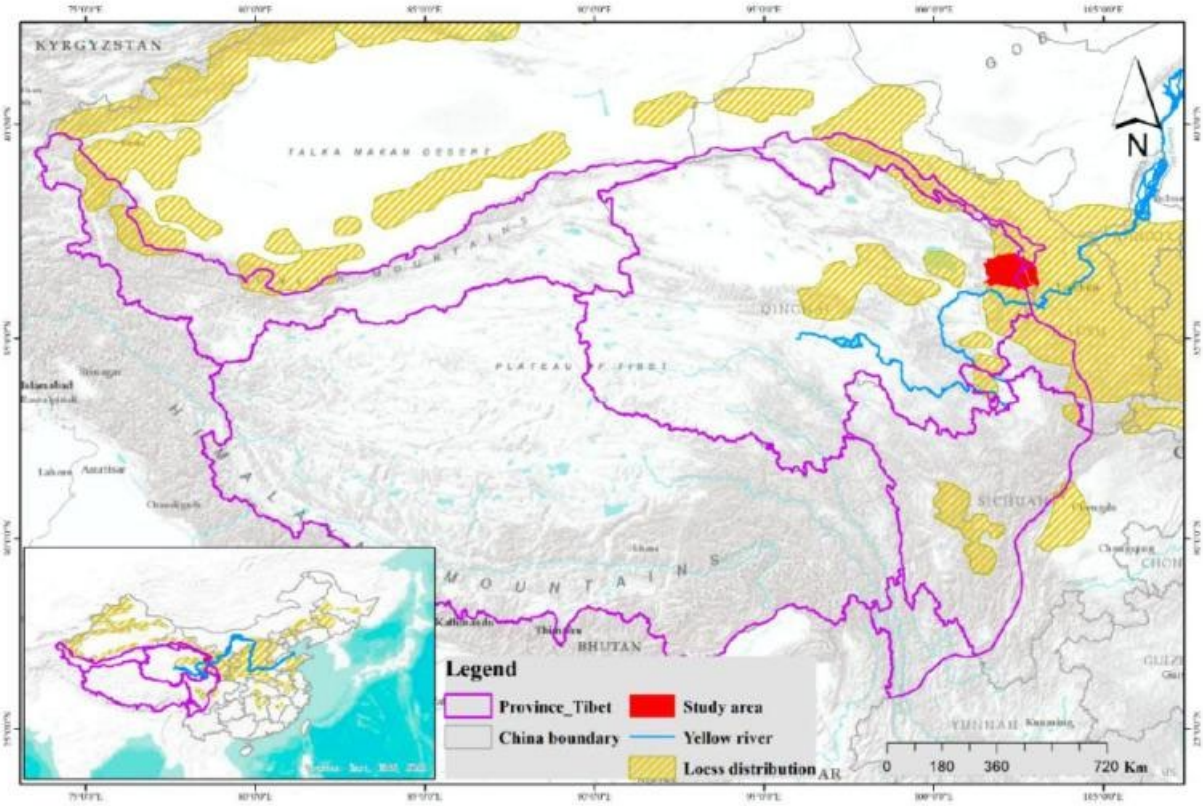


Figure 1. Geographical setting of the study area. The study area is located in the northeastern of Tibet Plateau from E100°40′ to 103°03′ and N36°02′ to 37°25′. This loess area is specific since it is also a margin region between loess plateau and Tibet Plateau.

出典: Regional Recognition and Classification of Active Loess Landslides Using Two-Dimensional Deformation Derived from Sentinel-1 Interferometric Radar Data, Qingkai Meng, Pierluigi Confuorto et al(2020)

図 A-74 チベットの黄土の分布図

A12.2.2 ユーラシア大陸



Figure 1 Map showing the distribution of loess in Eurasia and localities or regions referred to in the text. Compiled from Rozycki (1991) and Liu (1988), and redrawn from figure in Muhs and Bettis (2003).

出典: LOESS DEPOSITS, ORIGINS AND PROPERTIES, D R Muhs(2007)

図 A-75 ユーラシア大陸における黄土の分布図

A12.2.3 ヨーロッパ

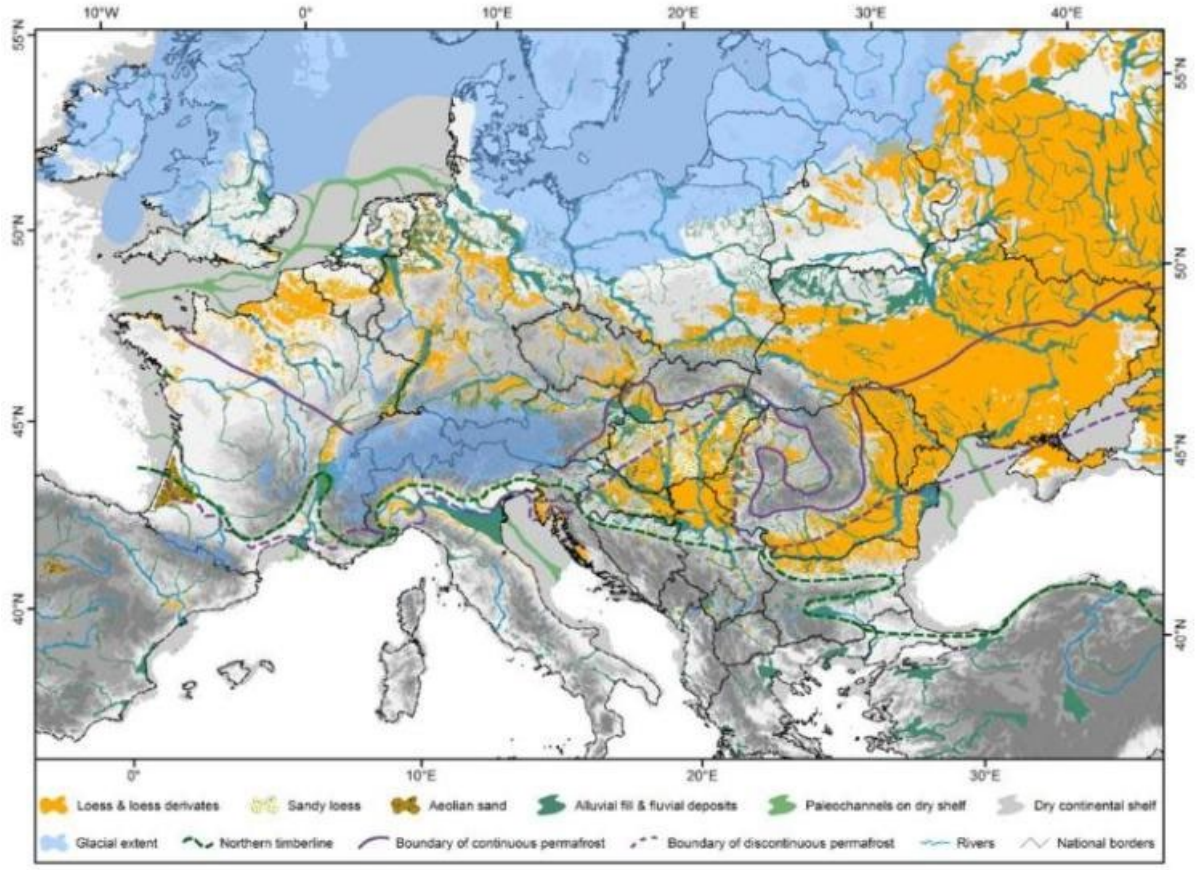


Fig. 2. Distribution of loess and selected Late Pleistocene sediments in Europe. The LGM extent of glaciers (Ehlers et al., 2011) and dry continental shelves (modified after Willmes, 2015), as well as the northern timberline (modified after Grichuk, 1992) and the boundaries of continuous and discontinuous permafrost (Andrieux et al., 2016; Ruszkiczay-Rüdiger and Kern, 2016; Vandenberghe et al., 2014a) are also mapped.

出典: Loess landscapes of Europe – Mapping, geomorphology, and zonal differentiation, F. Lehmkuhl, J.J. Nett et al.(2021)

図 A-76 ヨーロッパの黄土の分布図

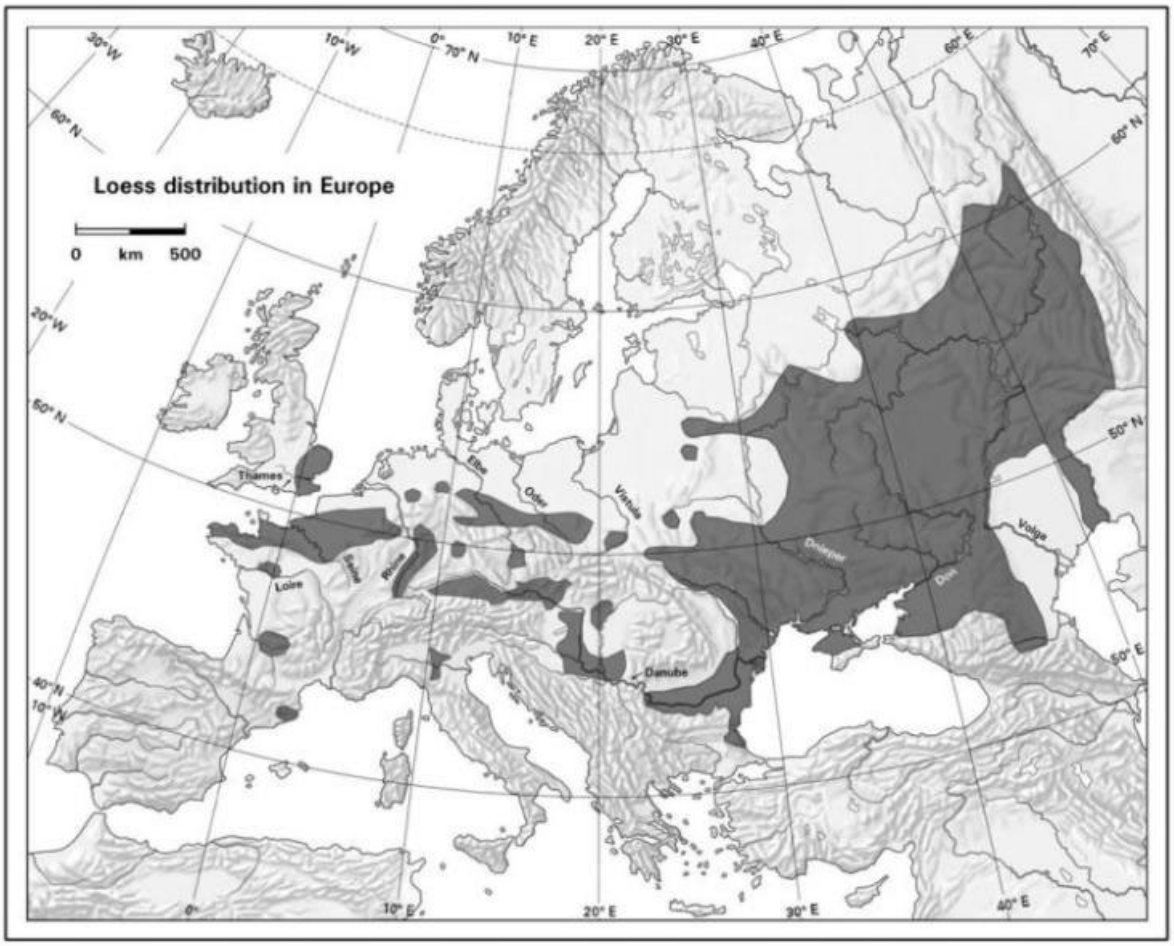


Fig. 1. Loess distribution in Europe, redrawn and modified after Trofimov (2001). Note the large area of the USWR loess, and its relationship to the rivers Dnepr, Don and Volga. Note also the way in which this USWR loess is essentially separated from the more western deposits. Topographic map taken from Spies (2006).

出典: Rivers and loess　the significance of long river transportation in the complex event– sequence approach to loess deposit formation, Ian Smalley, Ken O'Hara-Dhand, Jo Wint, Bjoern Machalett, Zdzislaw Jary, Ian Jefferson

図 A-77 ヨーロッパの黄土の分布図

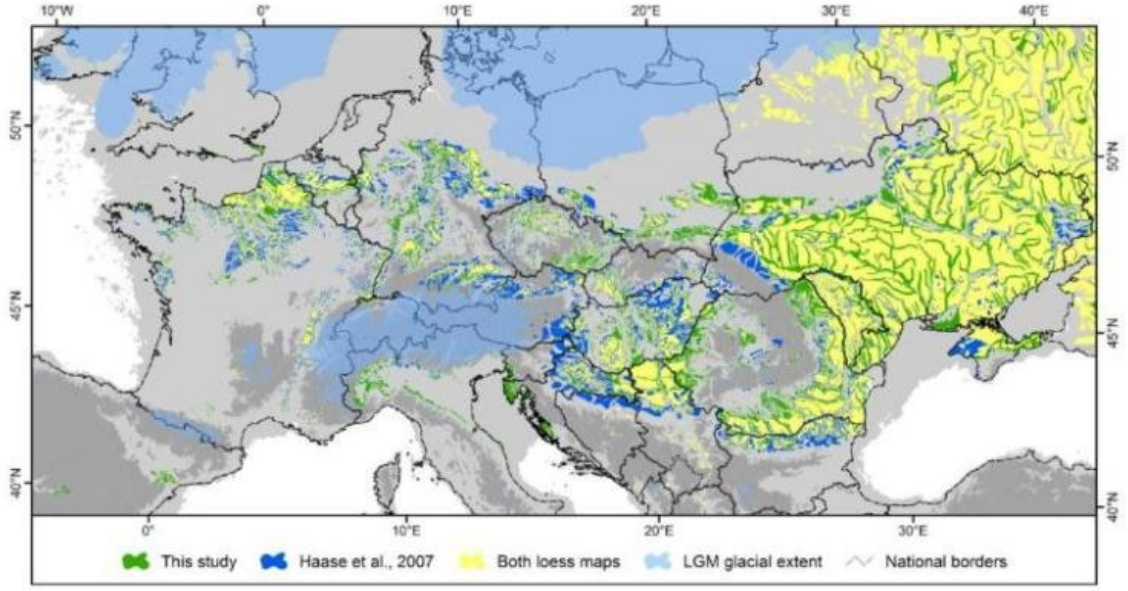


Fig. 18. Comparison of our new European loess map to the mapping approach from Haase et al. (2007). Similarities are shown in yellow. The distribution of loess, sandy loess, aeolian sand, and loess derivates that are only evident in our map is depicted in green, while the distribution of loess, loess derivates, sandy and alluvial loess that are only present in the Haase et al. (2007) map are shown in blue. The extent of glaciers (Ehlers et al., 2011) and the dry continental shelves (modified after Willmes, 2015) during the LGM are also depicted. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

出典: Loess landscapes of Europe – Mapping, geomorphology, and zonal differentiation, F. Lehmkuhl, J.J. Nett et al.(2021)

図 A-78 ヨーロッパの黄土の分布図(F. Lehmkuhl らの新しい分付図と Haase ら(2007)の分布図の比較)

(1) ハンガリー

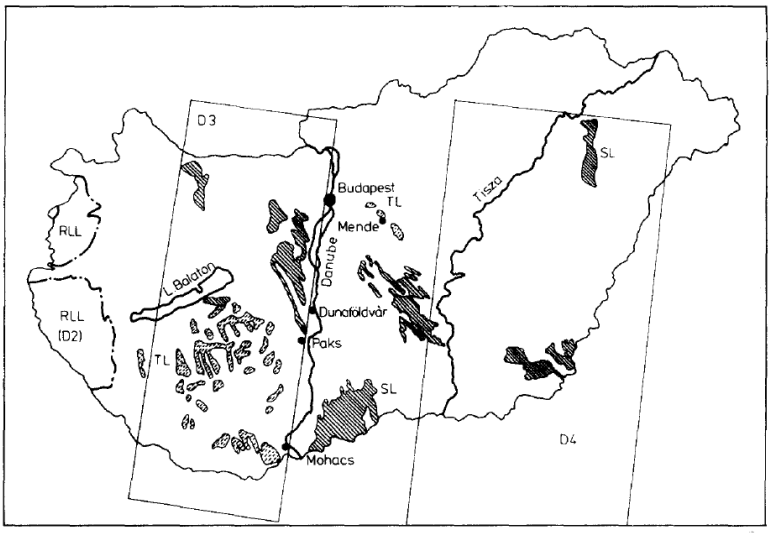


Fig. 4. Selected loess regions in Hungary (after Pecsi 1964). *TL* = typical loess; *SL* = sandy loess; *RLL* = redeposited loess loam (Pecsi terminology).

出典: THE ORIGIN AND DISTRIBUTION OF THE LOESS IN THE DANUBE BASIN AND ASSOCIATED REGIONS OF EAST-CENTRAL EUROPE – A REVIEW, I.J. SMALLEY and J.A. LEACH(1978)

図 A-79 ハンガリーの黄土の分布図

A12.2.4 北米

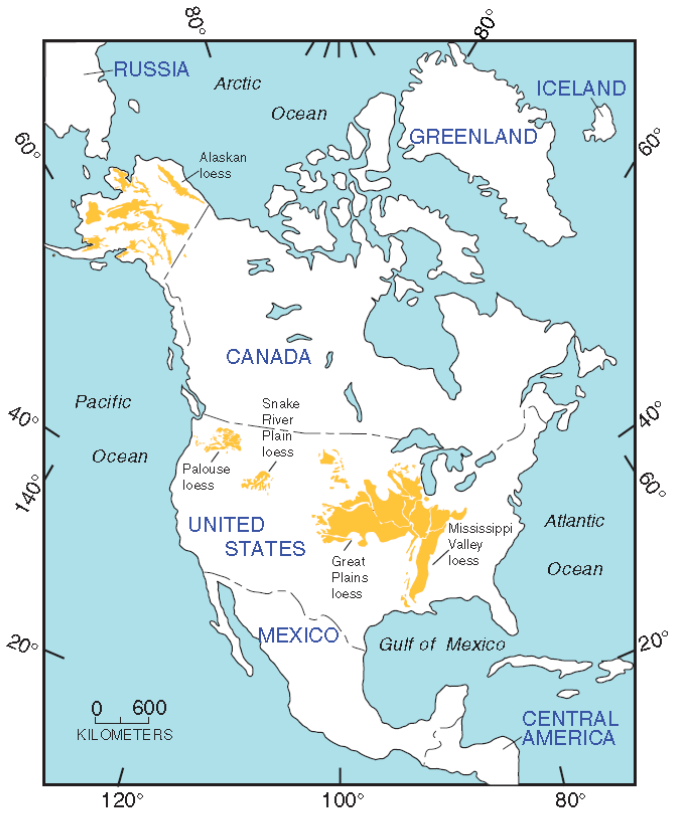


Figure 3 Map showing the distribution of loess in North America, from compilations in Péwé (1975), Bettis *et al.* (2003), and Busacca *et al.* (2004), and references therein.

出典: LOESS DEPOSITS, ORIGINS AND PROPERTIES, D R Muhs(2007)

図 A-80 北米における黄土の分布図

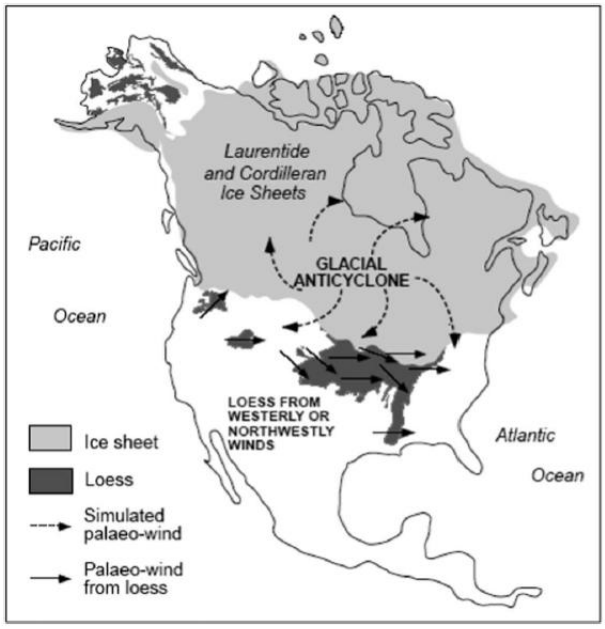


Figure 2.9　The distribution of loess in the U.S. with the direction of Palaeo-wind (Bettis et al. 2003)

出典: IDENTIFICATION AND BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE SOILS, Alain El Howayek, Pao-Tsung Huang, Rachael Bisnett, Maria Caterina Santagata, 2011

図 A-81　米国の黄土の分布図

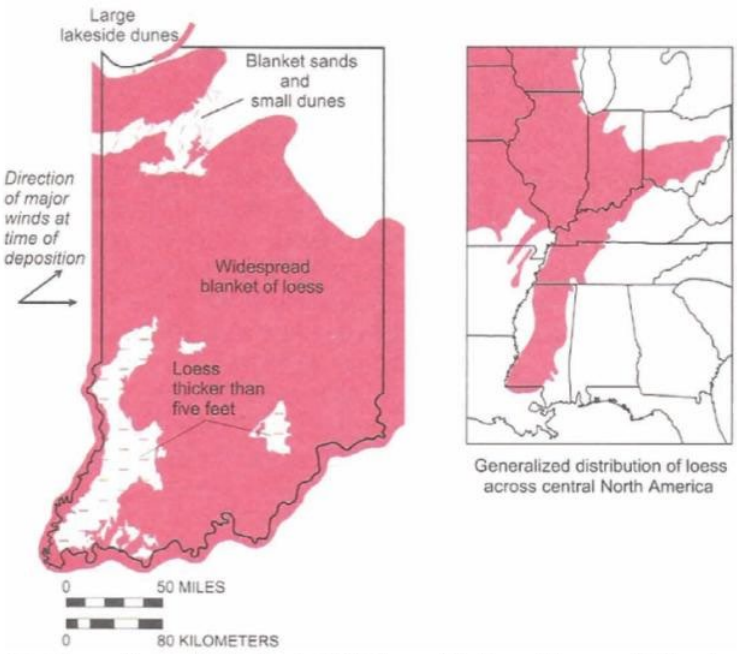


Figure 3.1　Maps of loess distribution in Mid-West and Indiana (Camp and Richardson 1999)

出典: IDENTIFICATION AND BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE SOILS, Alain El Howayek, Pao-Tsung Huang, Rachael Bisnett, Maria Caterina Santagata, 2011

図 A-82　米国中央西とインディアナ州の黄土分布図

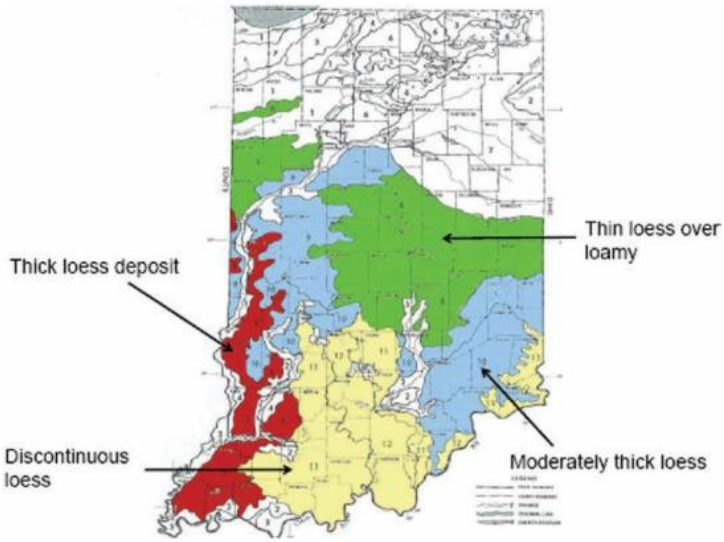


Figure 3.7 Map of loess deposits in Indiana (After Map of Indiana soil regions by Purdue University, USDA and Indiana Soil Conservation Service)

出典: IDENTIFICATION AND BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE SOILS, Alain El Howayek, Pao-Tsung Huang, Rachael Bisnett, Maria Caterina Santagata, 2011

図 A-83 インディアナ州(米国)の黄土分布図

A12.2.5 南米南部

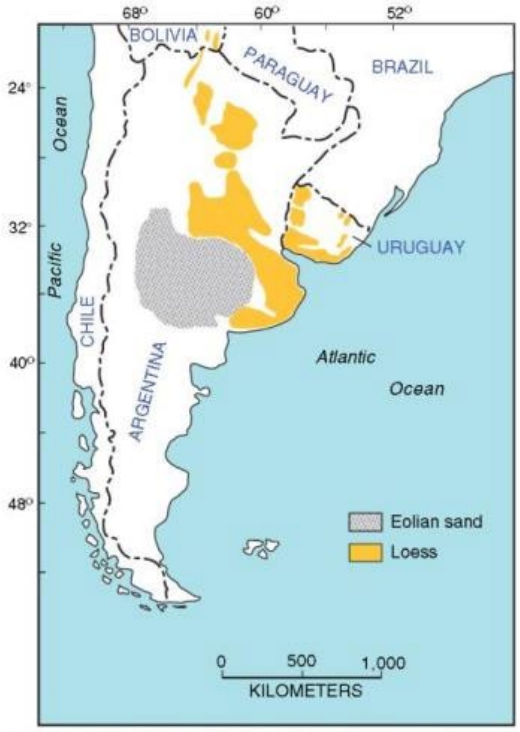


Figure 2 Map showing the distribution of loess and eolian sand in southern South America. Redrawn from Zárate (2003) and sources therein.

出典: LOESS DEPOSITS, ORIGINS AND PROPERTIES, D R Muhs(2007)

図 A-84 南米南部における黄土と風成砂の分布図

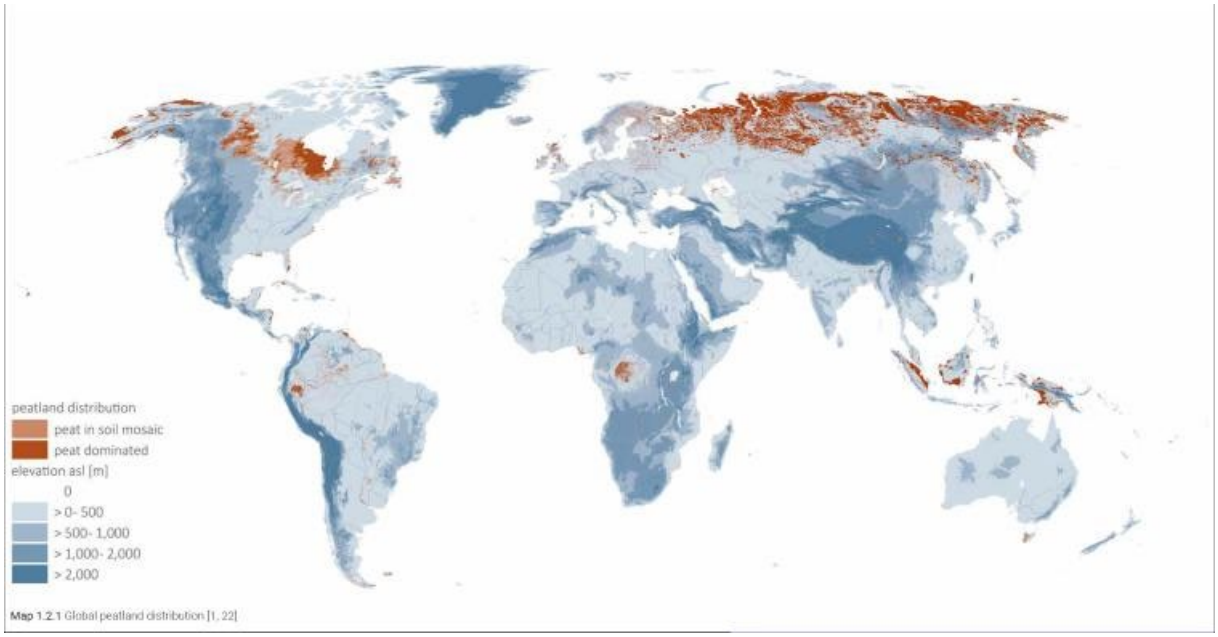
A13　泥炭

A13.1　全世界



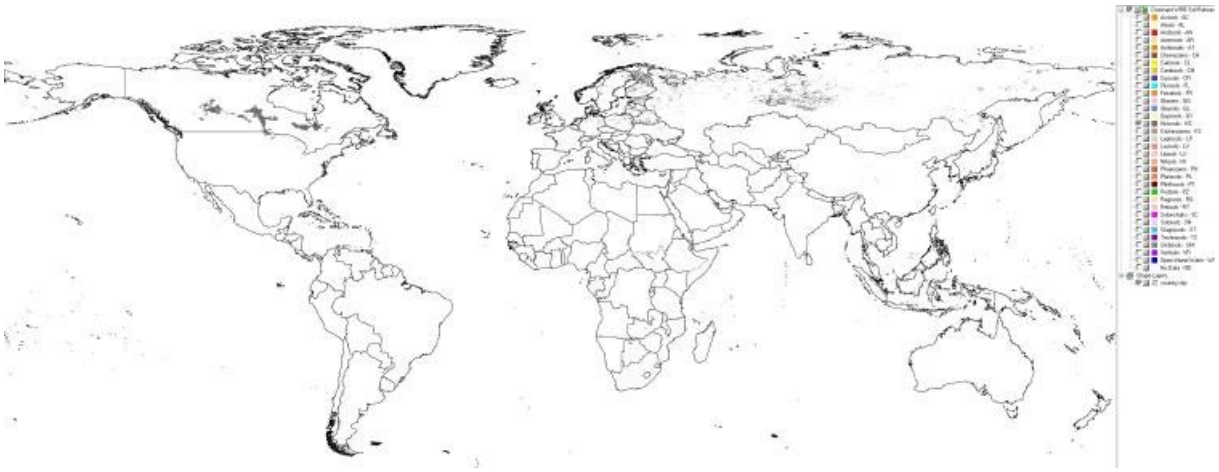
出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu et al. (2024)

図 A-85 泥炭地域の全世界分布図



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-86 泥炭地域の全世界分布図

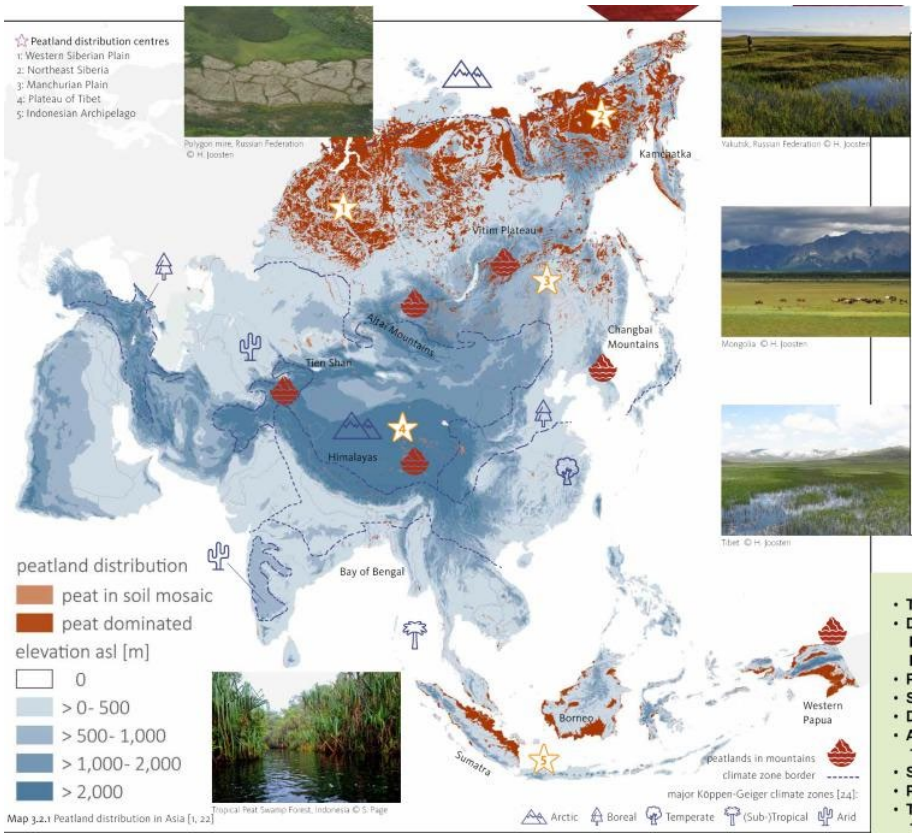


出典: HWSD 2.0

図 A-87 HWSD による Histols の世界的分布図

A13.2 地域別／国別

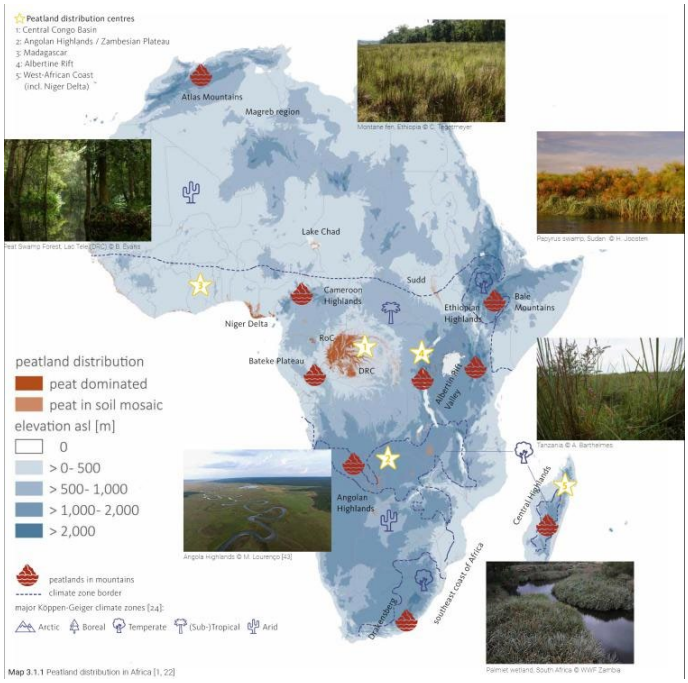
A13.2.1 アジア



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-88 アジアの泥炭分布図

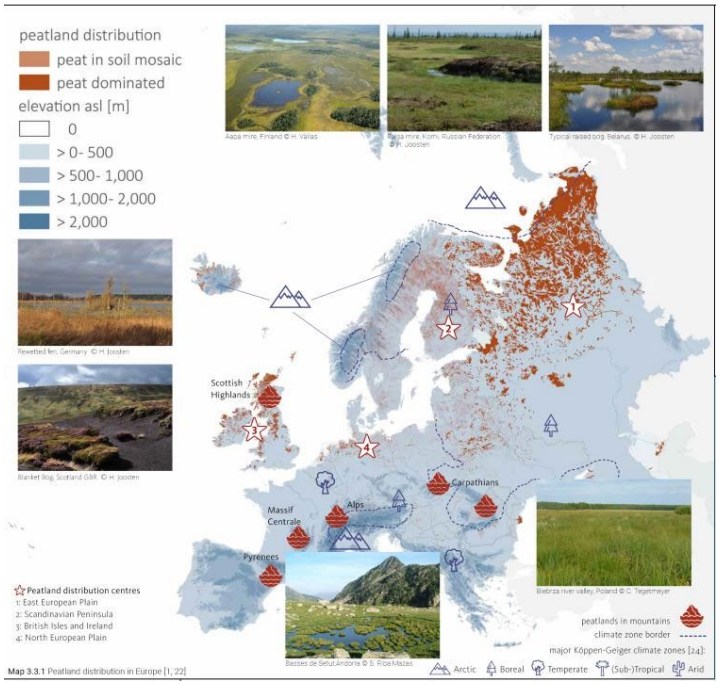
A13.2.2 アフリカ



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-89 アフリカの泥炭分布図

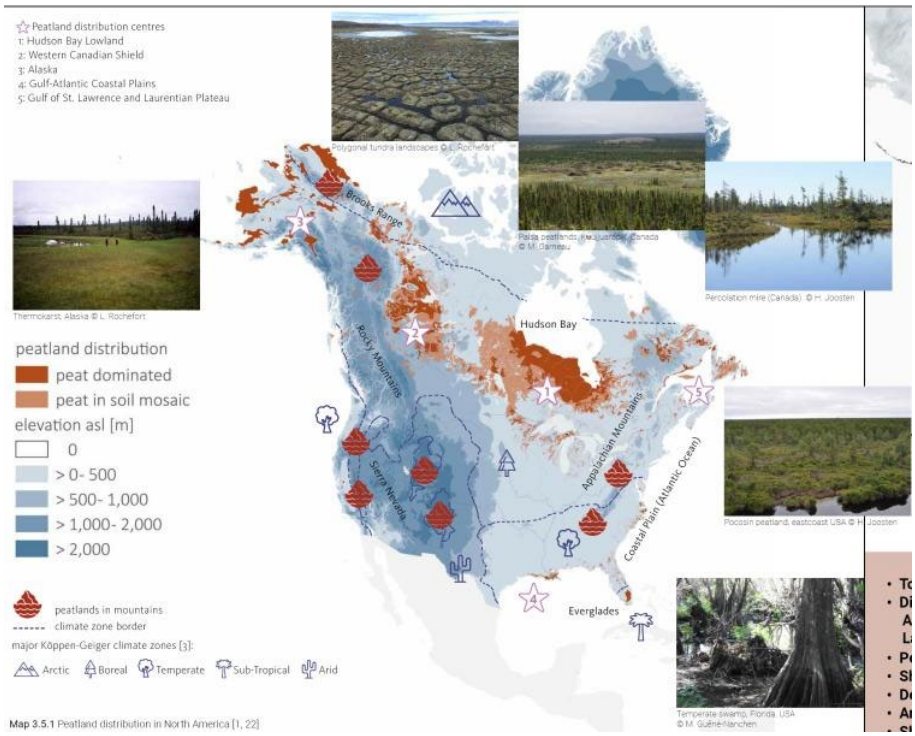
A13.2.3 ヨーロッパ



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-90 ヨーロッパの泥炭分布図

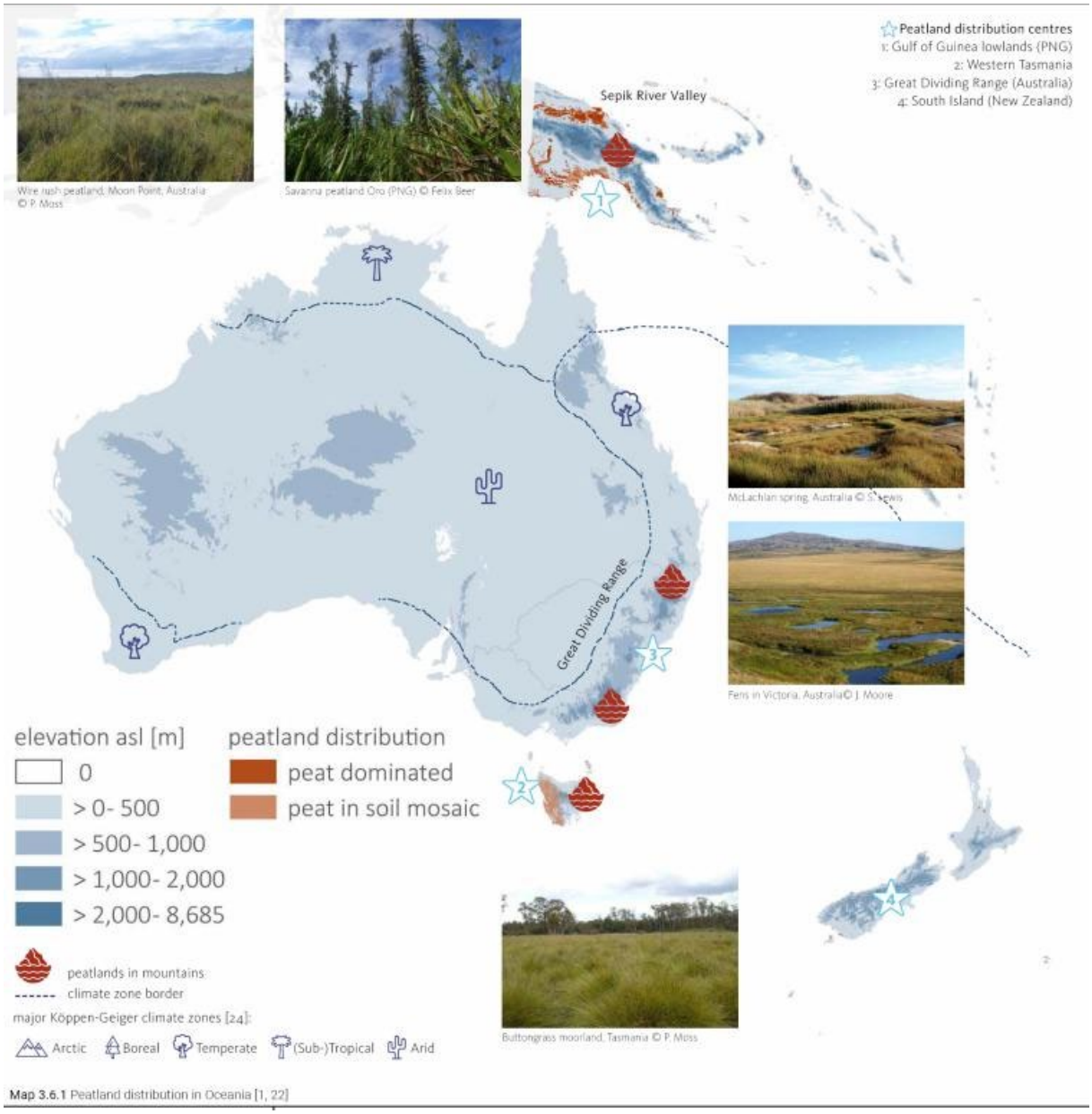
A13.2.4 北米



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-91　北米の泥炭分布図

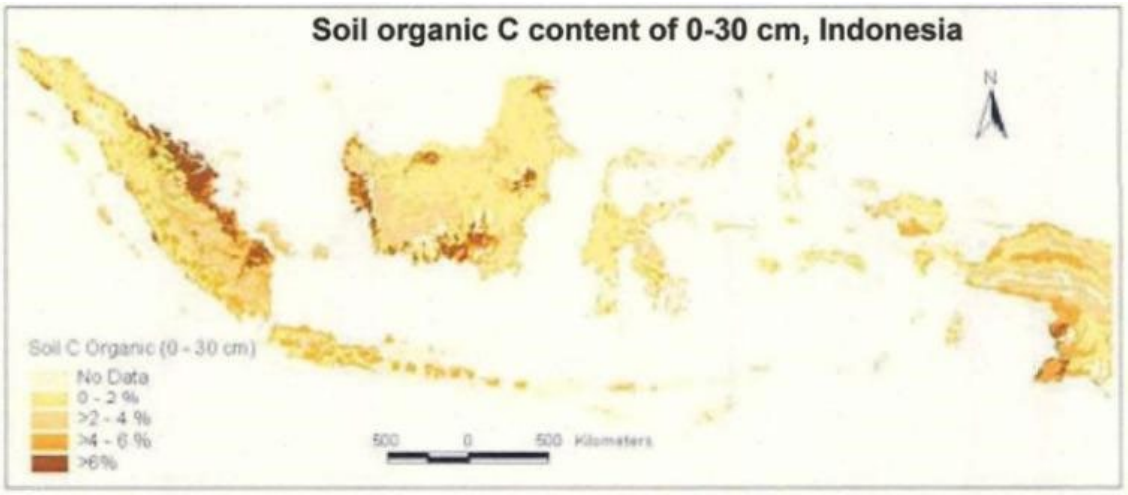
A13.2.5 オセアニア



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-92 オセアニアの泥炭分布図

A13.2.6 インドネシア



出典: Indonesian Soil Data Base and Predicted Stock of Soil Carbon, R. Shofiyati, I. Las, F. Agus2010

図 A-93 インドネシア国の有機分含有量分布図

A13.2.7 マレーシア



出典: Problematic Soils In Search for Solution, BUJANG BIN KIM HUAT(2010)

図 A-94 マレーシアの泥炭分布図

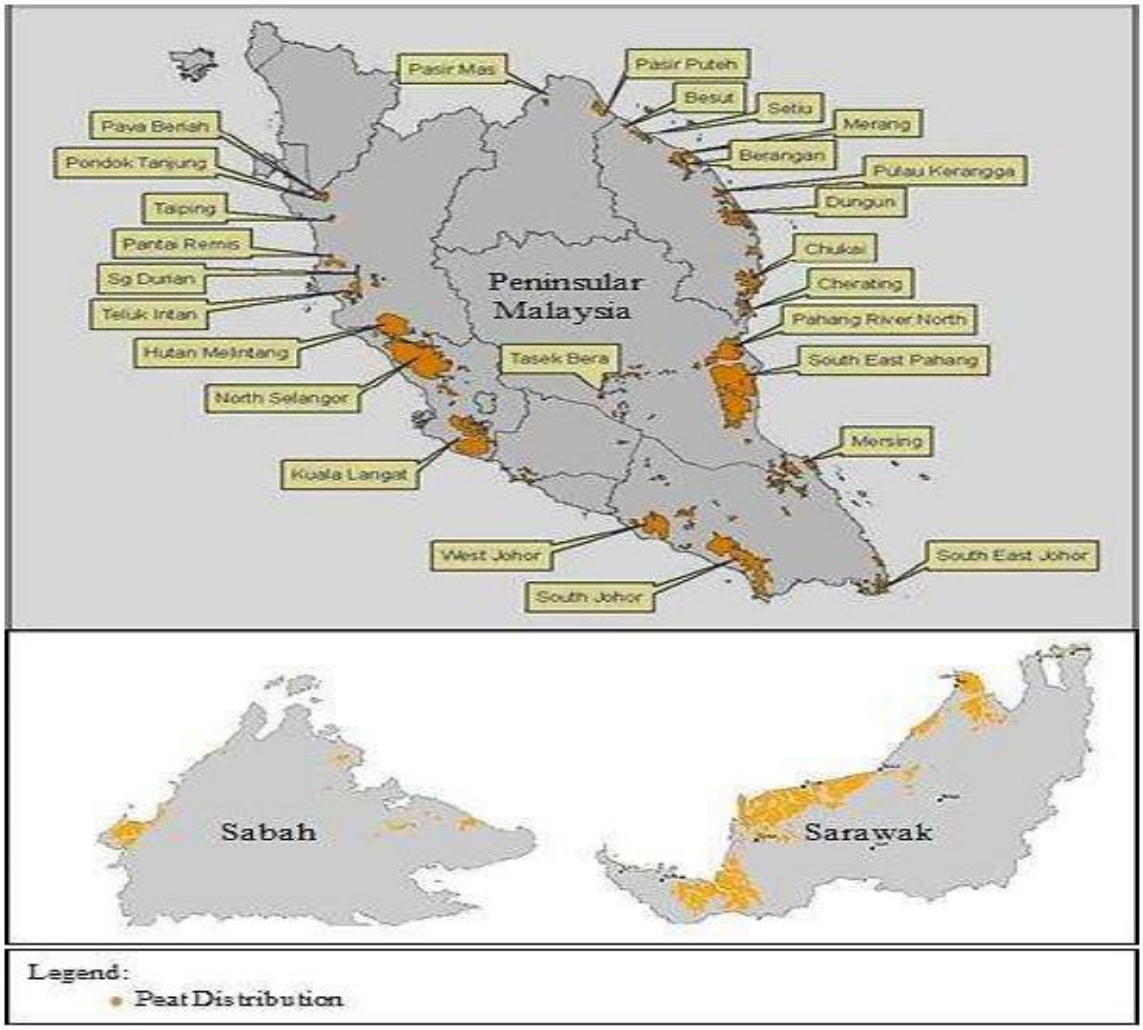


Figure 1 The distribution of peatland in Malaysia [5]

出典: AN INTRODUCTION OF TROPICAL PEAT AND ITS HISTORY OF SHEAR STRENGTH IN MALAYSIA, Norhaliza Wahab, Mohd Khaidir Abu Talib, Munzilah Md Rohani(2019)

図 A-95 マレーシアの泥炭分布図

A13.2.8 ポーランド

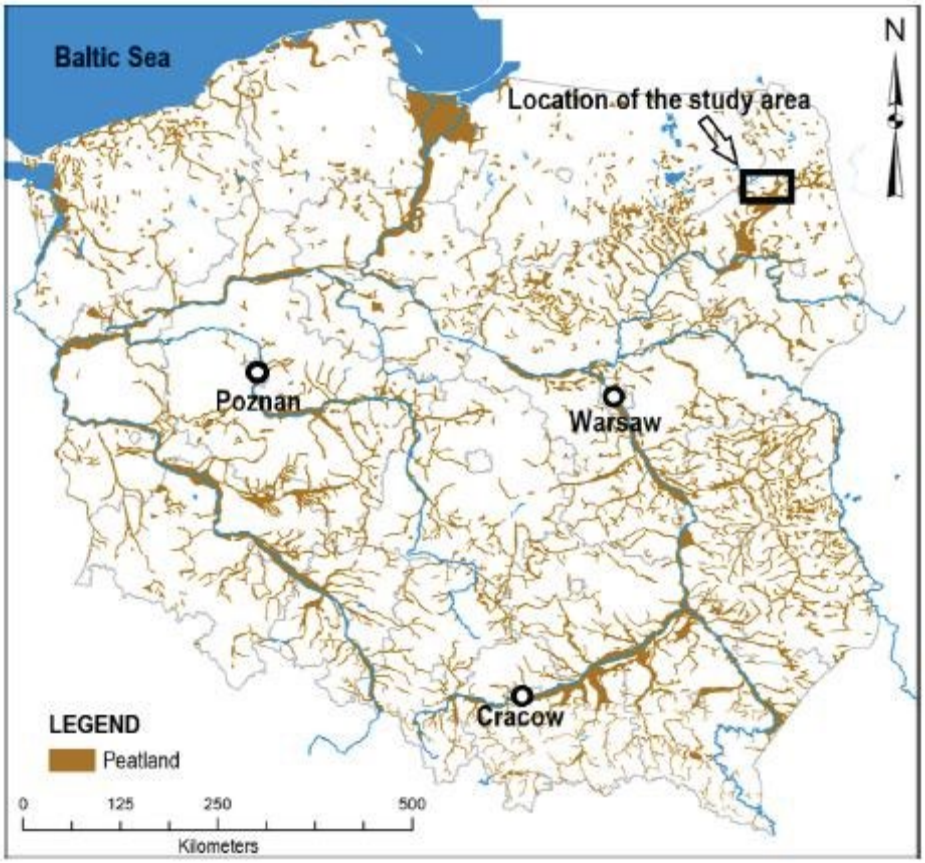
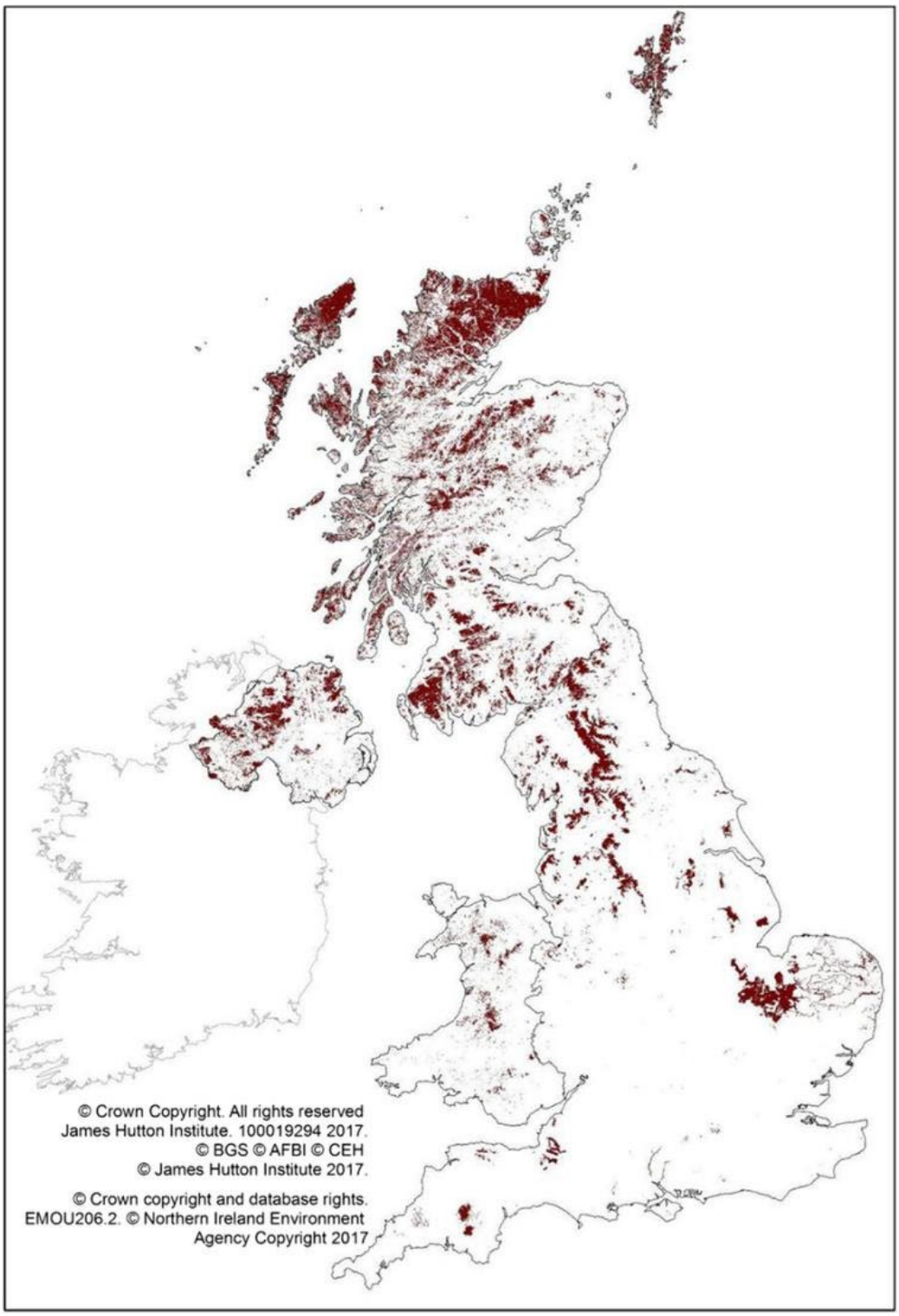


Figure 1: Peatlands in Poland and the location of the study area (based on Majtyka, 2013).

出典: Effect of fibre content on the geotechnical properties of peat, Iwona Chmielewska(2023)

図 A-96 ポートランドの泥炭分布域

A13.2.9 英国



出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley et al., 2024

図 A-97 英国の泥炭分布図

A13.2.10　　フィンランド

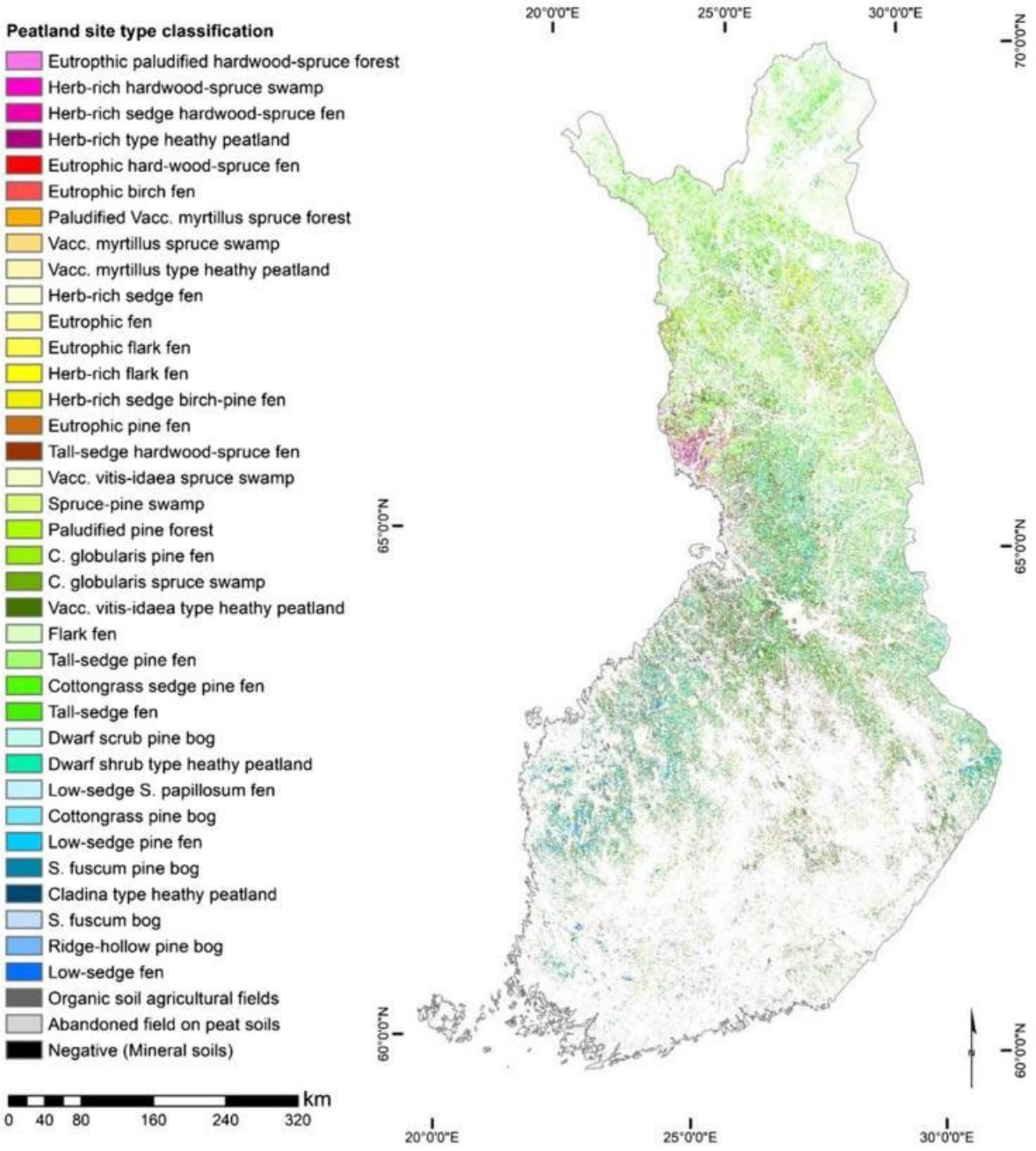


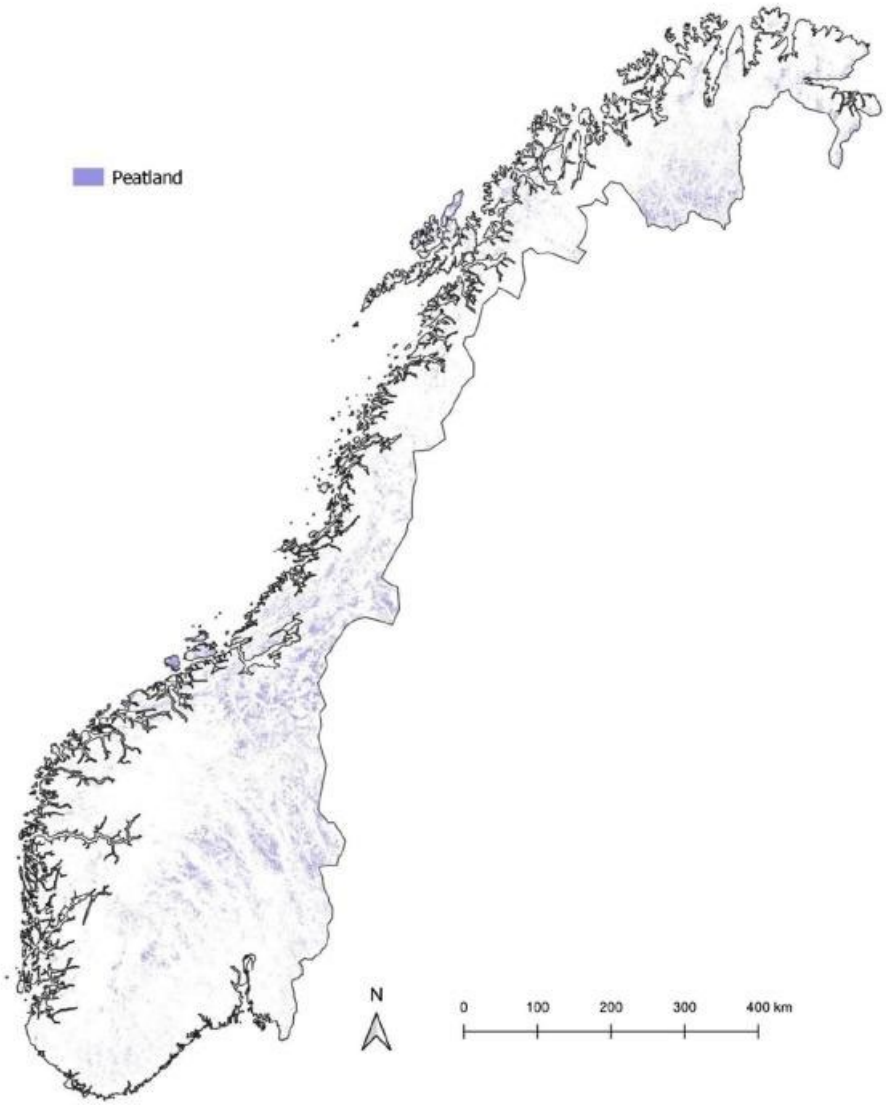
Fig. 4 Peatland site type map of Finland

出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley et al., 2024

図 A-98 フィンランドの泥炭分布図

A13.2.11　　ノルウェイ

Fig. 5 Distribution of currently mapped peatland in Norway (*Source* AR50). According to AR50, this map shows discrete areas of peatland meeting the strict definitions for peatland areas (see Table 1)

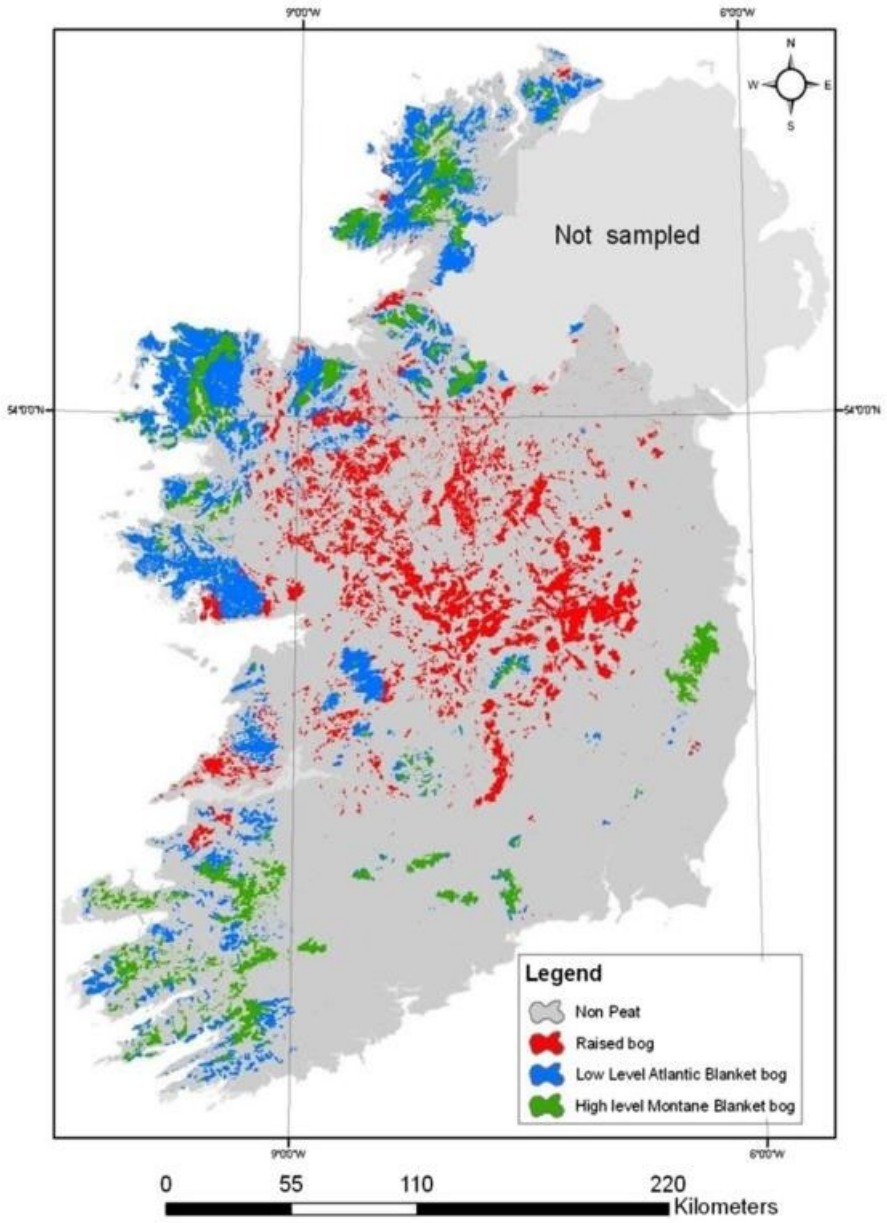


出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley et al., 2024

図 A-99 ノルウェーの泥炭分布図

A13.2.12　　アイルランド

Fig. 7 Peatland map of Ireland (Connolly and Holden 2009)



出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley et al., 2024

図 A-100 アイルランドの泥炭分布図

A13.2.13　　オーストラリア

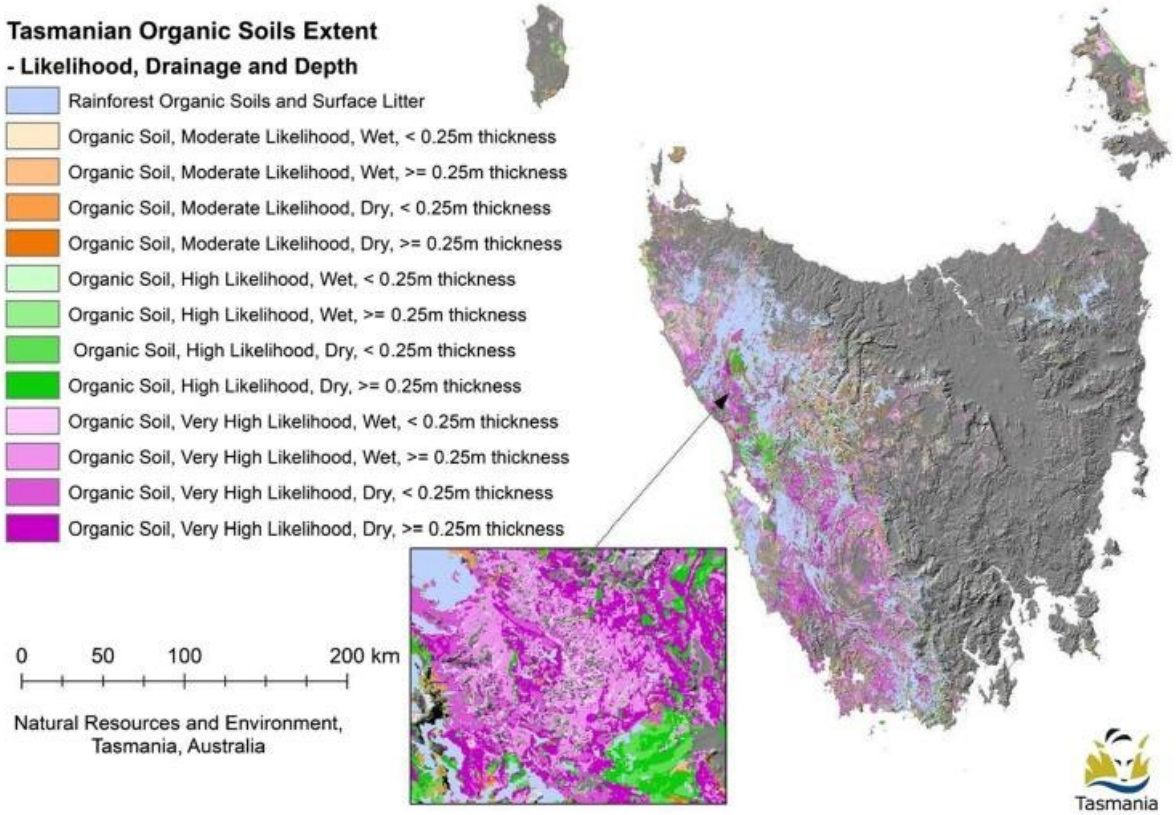
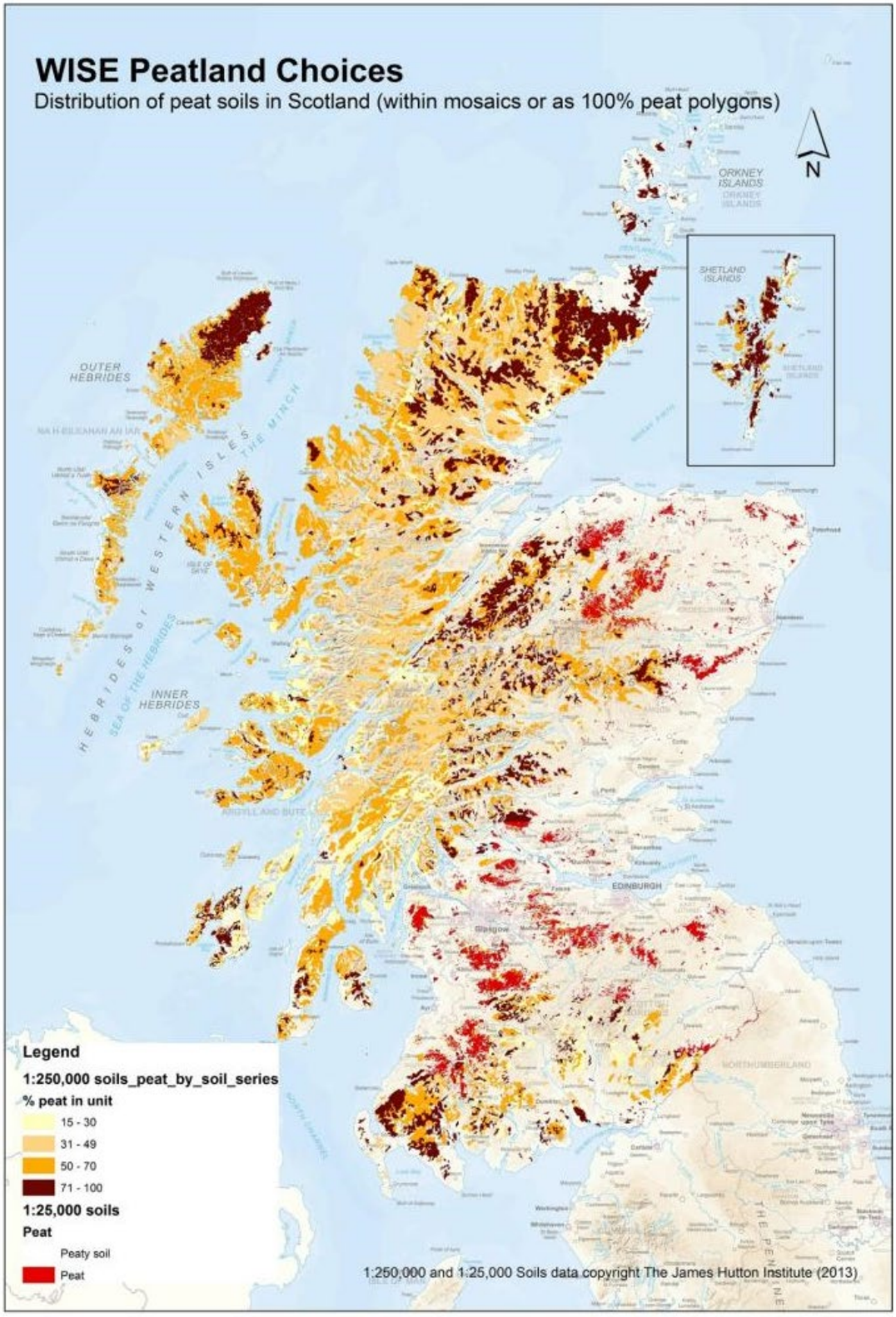


Fig. 10 The likelihood of organic soil and its drainage and thickness in Tasmania, Australia

出典: Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley et al., 2024

図 A-101　オーストラリア国 Tasmania 島の泥炭分布図

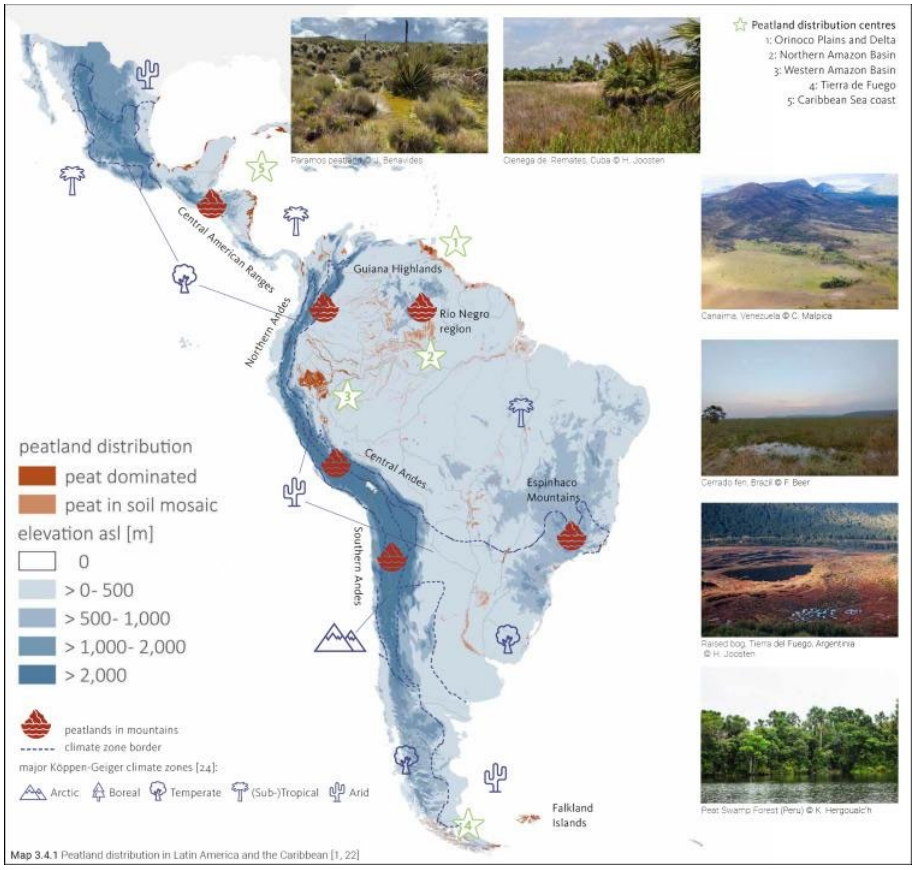
A13.2.14　　スコットランド



出典: https://www.see.leeds.ac.uk/peatland-modules/learning/2.php

図 A-102　スコットランドの泥炭分布図

A13.2.15　　中南米



出典: Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024

図 A-103　中南米の泥炭分布図

A14　酸性土壌

A14.1　全世界

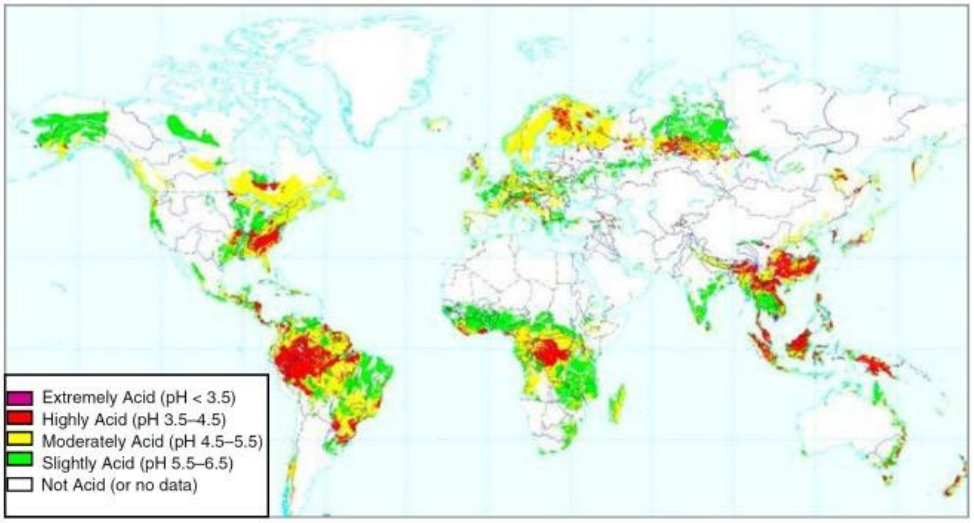


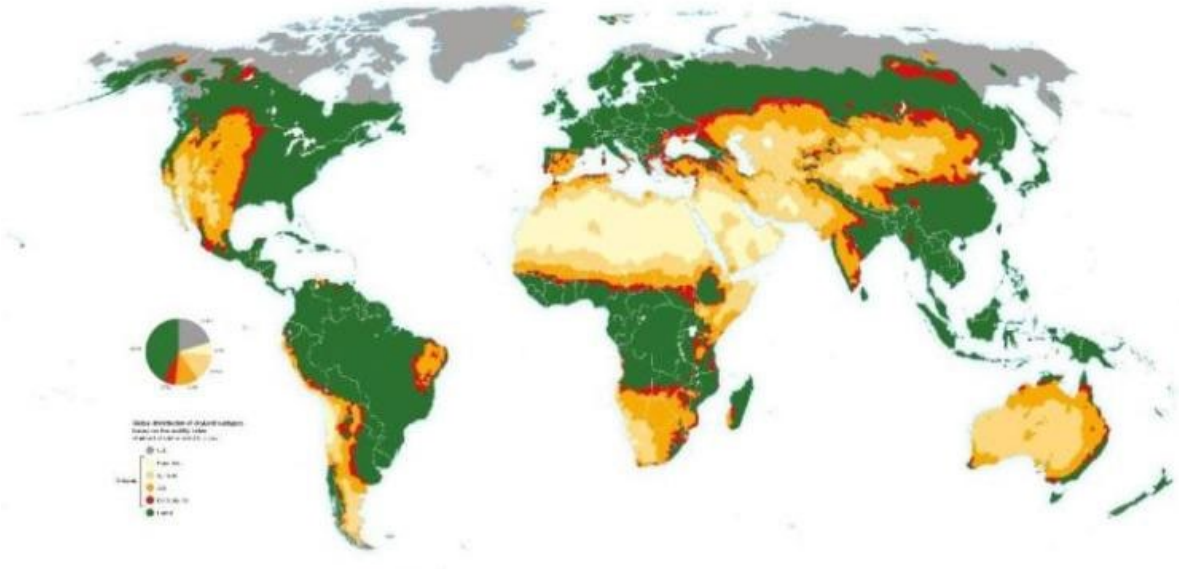
Fig. 1 – World distribution of acid soils (USDA, NRCS, world soil resources, Washington, D.C.) [14].

出典：Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants, Miao Bian, Meixue Zhou, Dongfa Sun, Chengdao Li(2013)

図 A-104 酸性土壌の分布する地域

A15　乾燥土壌

A15.1　全世界



出典: https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity

図 A-105 乾燥/半乾燥地域の全世界分布図

Appendix B 特殊土の地域的分布（特殊土の種類ごとの推定分布国一覧）

B1　主要地域毎の特殊土の分布域

表 B-1 主要地域毎の特殊土の推定分布域

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
膨潤性土	世界中に広く分布	(日本)、(韓国)、中国、(モンゴル)、(台湾)、(フィリピン)、(ベトナム)、カンボジア、タイ、(ラオス)、マレーシア、(ミャンマー)、インドネシア、(東ティモール)、(ミャンマー)、(バングラデシュ)、(ネパール)、(ブータン)、インド、(スリランカ)、パキスタン、(アフガニスタン)、(カザフスタン)、(キルギス)、(タジギスタン)、(トルクメニスタン)、イラン、イラク、ヨルダン、イスラエル、オマーン、サウジアラビア、オーストラリア	セネガル、ベナン、ガーナ、コートジボワール、(リベリア)、ナイジェリア、セネガル、ニジェール、マリ、トーゴ、ブルキナファソ、エチオピア、ソマリア、ケニア、マラウイ、ザンビア、タンザニア、ウガンダ、スーダン、カメルーン、チャド、コンゴ、アンゴラ、ルアンダ、中央アフリカ、南ローデシア、ボツワナ、レソト、スワジランド、ローデシア、マラガサイ、モロッコ、アルジェリア、チェニジア	カナダ、米国、カリブ諸島、グアテマラ、ニカラグア、コスタリカ、パナマ、コロンビア、ベネズエラ、ブラジル、ペルー、チリ、アルゼンチン、パラグアイ、ウルグアイ、アルゼンチン、グリーンランド、アイスランド	英国、アイルランド、フランス、スペイン、ドイツ、オランド、デンマーク、ポーランド、ベラルーシ、リトアニア、イタリア、ギリシャ、ノルウェー、チェコ、トルコ、ロシア
分散性土	乾燥・半乾燥地域の堆積土壌が多い平野や河川流域、風成土壌が多い地域、塩類	カンボジア、中国、インド、バングラデシュ、パキスタン、イラン、イラク、シリア、サウジアラビア、アフガ	南アフリカ、エチオピア、ナイジェリア、ケニア、スーダン、マリ、チャド、アンゴラ、ジンバブエ、モーリタ	米国、カナダ、メキシコ、グアテマラ、ホンジュラス、エルサルバドル、キューバ、ハイチ、ドミニカ共和	スペイン、イタリア、ギリシャ、トルコ、ロシア、ハンガリー、ルーマニア、ウクライナ

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
	化の影響を受けやすい土地 ※膨潤性土がある地域では分散性土もある可能性がある。	ニスタン、オトルクメニスタン、ウズベキスタン、オーストラリア	ニア	国、ブラジル、アルゼンチン、ボリビア、チリ、ペルー、パラグアイ、ウルグアイ	
浸食土壌	乾燥地帯、半乾燥地帯	中国、インド、パキスタン、バングラデシ、フィリピン、インドネシア、タイ、タジギスタン、ギリギス、オーストラリア、ニージーランド	モーリタニア、マリ、チャド、スーダン、エチオピア、ケニア、ウガンダ、南アフリカ	米国、メキシコ、ブラジル、ペルー、ボリビア、エクアドル、アルゼンチン	スペイン、ギリシャ、イタリ、ルーマニア、ウクライナ
崩壊性土壌	乾燥地帯、半乾燥地帯 火山地域、黄土分布域	サウジアラビア、イラン、イラク、ヨルダン、カザフスタン、ウズベキスタン、トルクメニスタン、タジギスタン、キリギス、インド、パキスタン、中国、オーストラリア、ニージーランド	エジプト、モロッコ、アルジェリア、チュニジア、ケニア、エチオピア、タンザニア、南アフリカ	米国、メキシコペルー、ボリビア、エクアドルアルゼンチン、ブラジル	ルーマニア、ウクライナ、モルドバ、スペイン、ギリシャ、イタリア
破砕性土	火山活動の多い火山地域や山岳地域 乾燥地域での風化や岩石崩壊地域	日本、中国、インドネシア、フィリピン、イラン、インド、ネパール・ブータン、パキスタン、モンゴル、トルコ、サウジアラビア、オーストラリア、ニージーランド	エチオピア、ケニア、タンザニア、ウガンダ、ルワンダ、ブルンジ、コンゴ民主共和国、南アフリカ、ナイジェリア、カメルーン、エリトリア、ジブチ	米国、カナダ、メキシコ、グアテマラ、エルバルサルドル、コスタリカ、ニカラグア、チリ、ペルー、エクアドル、ボリビア、アルゼンチン	イタリア、ギリシャ、アイスランド、米国、メキシコ、チリ、ペルー、エクアドル

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
可溶性地盤	石灰岩、ドロマイト、岩塩、石膏がある地域 ステップ地帯や塩湖周辺	中国、ベトナム、タイ、マレーシア、インドネシア、フィリピン、インド、サウジアラビア、イラン、イラク、トルコ、カザフスタン、キルギス、ミャンマー、ラオス、カンボジア、オーストラリア、ニージーランド	モロッコ、アルジェリア、チュニジア、エチオピア、南アフリカ	米国、メキシコ、ブラジル、ベネズエラ	フランス、スペイン、イギリス、イタリア、クロアチア、スロベニア、ボスニア
軟弱地盤	世界中の平野、低地、湿地、湿原を有する国	※多数国	※多数国	※多数国	※多数国
塩類土壌	乾燥・半乾燥地域(蒸発が降水量を上回る地域) 沿岸地域やデルタ地帯	中国、モンゴル、ベトナム、タイ、ミャンマー、カザフスタン、ウズベキスタン、トルクメニスタン、キルギス、タジキスタン、カザフスタン、インド、バングラデシュ、パキスタン、サウジアラビア、イラン、イラク、シリア、オーストラリア	エジプト、スーダン、アルジェリア、モロッコ、アルジェリア、チュニジア、エチオピア、ケニア、タンザニア、ボツワナ、ナミビア、南アフリカ	米国、メキシコ、グアテマラ、ホンジュラス、エルサルバドル、コスタリカ、ニカラグア、ブラジル、アルゼンチン、ボリビア、ペルー、チリ	スペイン、イタリア、ギリシャ、フランス、ウクライナ、ルーマニア、ハンガリー、ポルトガル、ロシア
(酸性)硫酸塩土壌、硫化土壌	沿岸塩性湿地、デルタ地域、塩性湖周辺 海水浸入と湿地環境	中国、ベトナム、タイ、インドネシア、フィリピン、マレーシア、ミャンマー、バングラデシュ、インド、サウジアラビア、イラ	エジプト、エチオピア、ケニア、タンザニア、スーダン、セネガル、ナイジェリア、ガンビア、モーリタニア、ガボン、カメ	米国、カナダ、メキシコ、グアテマラ、ホンジュラス、エルサルバドル、コスタリカ、ニカラグア、ブラジル、ペルー、ボリビ	イギリス、オランダ、フランス、ドイツ、ポーランド、デンマーク、スウェーデン、ポーランド、ウクライナ、イタリア、スペイン

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
		ン、イラク、オーストラリア、ニュージーランド	ルーン、マダガスカル、南アフリカ	ア、アルゼンチン、チリ	
炭酸／炭酸塩土壌	乾燥・半乾燥地域、石灰岩地帯	中国、タイ、ベトナム、インド、パキスタン、イラン、サウジアラビア、カザフスタン、ウズベキスタン、トルクメニスタン、タジキスタン	エジプト、エチオピア、ケニア、リビア、チェニジア、アルジェリア、モロッコ、スーダン、ナミビア、マリ、ソマリア、南アフリカ	米国、メキシコ、アルゼンチン、チリ、ペルー、ブラジル、ボリビア	フランス、ドイツ、イタリア、オーストリア、スイス、スペイン、ギリシャ、ルーマニア、ハンガリー、チェコ、スロバキア、クロアチア、スロベニア、モンテネグロ、トルコ
黄土	最後の氷期（更新世）の間に形成	中国、モンゴル、カザフスタン、インド、パキスタン、イラン、トルクメニスタン、ウズベキスタン、タジキスタン、キリギス、北朝鮮、韓国、日本	エチオピア、エジプト、スーダン、チャド、ニジェール、マリ、アルジェリア、モロッコ、チェニジア、南アフリカ	米国、カナダ、メキシコ、アルゼンチン、ウルグアイ、ブラジル、チリ	クロアチア、スロベニア、モンテネグロ
ラテライト	熱帯地域および亜熱帯地域、高温多湿の地域 熱帯雨林地域	中国、カンボジア、タイ、ミャンマー、ベトナム、ラオス、マレーシア、インドネシア、フィリピン、インド、スリランカ、バングラデシュ、パキスタン、ネパール、モルディブ	エチオピア、ケニア、ナイジェリア、セネガル、ギニア、ガーナ、コートジボワール、ウガンダ、タンザニア、コンゴ民主共和国、モザンビーク、アンゴラ、マダガスカル、マリ、カメルーン	メキシコ、ブラジル、コロンビア、ベネズエラ、ペルー、ボリビア、ガイアナ、スリナム、フレンチギアナ、パラグアイ	気象条件に適合しないため無い 類似の土壌 ポルトガル、スペイン、イタリア、ギリシャ、フランス、トルコ(
泥灰土 Marl	カルシウム炭酸塩（石灰）と粘土成分からなる堆積性土	インド、中国	エジプト、リビア、アルジェリア	米国	イギリス、フランス、オランダ、ドイツ

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
	壌				
サ ブ カ **Sabkha**	乾燥地域や半乾燥地域の沿岸部や内陸低地 ペルシャ湾岸とサハラ砂漠周辺	インド、イラン、パキスタン、サウジアラビア、アラブ首長国連邦、カタール、クウェート、バーレーン、オマーン、イラク、オーストラリア	エジプト、リビア、アルジェリア、チェニジア、モーリタニア	米国	
火山灰性土	火山活動地域 環太平洋火山帯やヒマラヤ地帯 アフリカ大地溝帯	日本、中国、インドネシア、フィリピン、インド、ベトナム、タイ、ミャンマー、パプアニューギニア、ニュージーランド	エチオピア、ケニア、ウガンダ、ルワンダ、コンゴ民主共和国、タンザニア、カメルーン、エリトリア、モロッコ、コモロ	米国、メキシコ、グアテマラ、エルサルバドル、ホンジュラス、ニカラグア、コスタリカ、パナマ、エクアドル、コロンビア、チリ、ペルー、アルゼンチン	フランス、イタリア、ギリシャ、スペイン、ポルトガル、アイスランド、トルコ
泥炭	寒冷地、熱帯の湿地や沼地	日本、中国、インドネシア、タイ、ベトナム、マレーシア、フィリピン、インド、バングラデシュ、カザフスタン	ケニア、ザンビア、コンゴ民主共和国、コンゴ共和国、南スーダン、ウガンダ、ルワンダ、マラウイ、ガボン、ナイジェリア	米国、カナダ、メキシコ、ベリーズ、ホンジュラス、コスタリカ、ブラジル、ペルー、コロンビア、ガイアナ、アルゼンチン	イギリス、ドイツ、オランダ、デンマーク、ポーランド、エストニア、ラトビア、リトアニア、フィンランド、スウェーデン、ノルウェー、アイルランド、ロシア
液状化地盤	平野、湿地部の軟弱地盤	日本、中国、台湾、フィリピン、インドネシア、ミャンマー、インド、バングラデシュ、パキスタン、カザフスタン、ニュージーランド	(エジプト、モロッコ、アルジェリア)	米国、メキシコ、チリ、ペルー、エクアドル、ハイチ	イタリア、ギリシャ、トルコ、アルバニア、ルーマニア、アイスランド
雲母を多く	雲母を多く有	インド、バングラ	南アフリカ、モザ	米国、カナダ、ブ	スウェーデン、フ

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
含む砂	する崗岩や片麻岩が分布する地域	デシュ、ネパール、中国、オーストラリア	ンビーク、マダガスカル	ラジル	ィンランド、ドイツ、イタリア、ロシア
氷河堆積土	極寒地、高山地域 ヒマラヤ山脈、ロッキー山脈、アンデス山脈	中国、モンゴル、インド、ネパール、ブータン、パキスタン、カザフスタン、イラン	ケニア、タンザニア、ウガンダ、エチオピア、南アフリカ、モロッコ、アルジェリア、ルワンダ	カナダ、米国、メキシコ、アテマラ、アルゼンチン、チリ、ペルー、エクアドル、コロンビア、ボリビア	スウェーデン、フィンランド、ノルウェー、デンマーク、ドイツ、トルコ、ポーランド、イギリス、ロシア
凍土	極寒地、高山地域	中国、モンゴル、カザフスタン、ニュージーランド		米国、カナダ、グリーンランド、チリ、アルゼンチ	ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、ロシア
クイッククレイ	寒冷地で氷河期の影響を受けた海水堆積物			カナダ、米国、グリーンランド	ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、ロシア
砂漠	乾燥地帯	モンゴル、中国、トルクメニスタン、ウズベキスタン、カザフスタン、イラン、インド、パキスタン、サウジアラビア、ヨルダン、イラク、クウェート、カタール、アラブ首長国連邦、オマーン、イエメン、イスラエル、シリア、ヨルダン、オーストラリア	アルジェリア、リビア、エジプト、チュニジア、モロッコ、ナミビア、南アフリカ、ボツワナ、ナミビア、エチオピア、エリトリア、ジブチ	アメリカ合衆国、メキシコ、チリ、ペルー、アルゼンチン	スペイン
珊瑚由来の土壌	熱帯・亜熱帯地域の島嶼部や沿岸地域 カリブ海沿岸や熱帯地域 地中海地域	熱帯・亜熱帯地域の島嶼部や沿岸地域 日本、フィリピン、インドネシア、マレーシア、タイ、	沿岸地域や島嶼部 セーシェル、モーリシャス、ケニア、タンザニア、モザンビーク、マダガ	カリブ海沿岸や熱帯地域 バハマ、ジャマイカ、キューバ、メキシコ、ベリーズ、ドミニカ共和国、	石灰岩質の土壌=地中海地域 イタリア、フランス、スペイン、ギリシャ、クロアチア、キプロス)

特殊土名	主要な分布域	アジア 中東 オセアニア	アフリカ	アメリカ	ヨーロッパ
		オーストラリア、ニューカレドニア、フィジー、ソロモン諸島、パラオ、マーシャル諸島、トンガ	スカル、コモロ	ハイチ、プエルトリコ、バルバドス	
風化岩／軟岩	熱帯高温多湿地域や寒冷・乾燥地域 高温多湿、降水量が多い、寒暖差が大きい、沿岸地域	東南アジア（インドネシア、フィリピン）、ビ砂漠（モンゴル、中国）、太平洋沿岸	中央アフリカ（コンゴ盆地）、サハラ砂漠（アフリカ）	アマゾン流域（ブラジル）、カナダ	ヨーロッパ中部（ドイツ、フランス）、北欧（スウェーデン、フィンランド）、ロシア、地中海沿岸

出典：JICA 調査団

B2　各国に分布する特殊土の種類の一覧

表 B-2 アジア、中東、オセアニア、環太平洋地域の国毎の特殊土

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
アジア、中東、オセアニア、環太平洋	東アジア	日本	**軟弱地盤**、**泥炭**、**液状化地盤**、**火山灰性土（ローム）**、海成粘土（青泥、青粘土）、崩壊性土（マサ、しらす）、破壊性土（軽石を多く含む火山灰）、（膨潤性土）、（黄土）、珊瑚由来土
		中国	**軟弱地盤**、**膨潤性土**、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破砕性土、**可溶性地盤**、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、**黄土**、ラテライト、泥灰土、火山灰性土、泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、液状化地盤、凍土、砂漠
		韓国	軟弱地盤、（膨潤性土）、火山灰性土、黄土、風化岩
		北朝鮮	（膨潤性土）、黄土
		モンゴル	破砕性土、塩類土壌、黄土、氷河堆積土、凍土、風化岩、砂漠
		台湾	軟弱地盤、**液状化地盤**、風化岩
	東南アジア	インドネシア	**軟弱地盤**、**液状化地盤**、**膨潤性土**、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、火山灰性土、**泥炭**、珊瑚由来土、**風化岩**
		タイ	**軟弱地盤**、膨潤性土、浸食土壌、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト、火山灰性土、泥炭、珊瑚由来土、風化岩
		ベトナム	**軟弱地盤**、（膨潤性土）、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト、火山灰性土、泥炭
		フィリピン	**軟弱地盤**、**液状化地盤**、（膨潤性土）、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、火山灰性土、泥炭、珊瑚由来土
		マレーシア	**軟弱地盤**、膨潤性土、可溶性地盤、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、泥炭、珊瑚由来土
		シンガポール	**軟弱地盤**
		ミャンマー	**軟弱地盤**、液状化地盤、（膨潤性土）、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、火山灰性土
		カンボジア	**軟弱地盤**、**膨潤性土**、**分散性土**、可溶性地盤、ラテライト
		ラオス	（膨潤性土）、可溶性地盤、ラテライト
		東ティモール	膨潤性土
		ブルネイ	
	南アジア	インド	**軟弱地盤**、液状化地盤、**膨潤性土**、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、ラテライト、泥灰土、サブカ、火山灰性土、泥炭、雲母を多く含む砂、砂漠

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
		パキスタン	液状化地盤、膨潤性土、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、ラテライト、サブカ、氷河堆積土、砂漠
		バングラデシュ	**軟弱地盤**、液状化地盤、（膨潤性土）、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、泥炭、**雲母を多く含む砂**
		スリランカ	膨潤性土、ラテライト
		ネパール	（膨潤性土）、破砕性土、ラテライト、雲母を多く含む砂、氷河堆積土
		ブータン	（膨潤性土）、破砕性土、氷河堆積土
		モルディブ	ラテライト、珊瑚由来土
	中央アジア	カザフスタン	液状化地盤、（膨潤性土）、可溶性地盤、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、泥炭、氷河堆積土、砂漠、凍土
		ウズベキスタン	分散性土、崩壊性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土
		アフガニスタン	（膨潤性土）、分散性土、砂漠
		トルクメニスタン	（膨潤性土）、分散性土、崩壊性土、崩壊性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、砂漠
		キルギス	（膨潤性土）、**浸食土壌**、**崩壊性土**、可溶性地盤、塩類土壌、**黄土**
		タジギスタン	（膨潤性土）、**浸食土壌**、**崩壊性土**、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、**黄土**
	西アジア	サウジアラビア	膨潤性土、分散性土、崩壊性土、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、サブカ、砂漠
		イエメン	砂漠
		オマーン	膨潤性土、サブカ、砂漠
		イラン	膨潤性土、分散性土、崩壊性土、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、サブカ、氷河堆積土、砂漠
		イラク	膨潤性土、分散性土、崩壊性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、サブカ、砂漠
		シリア	分散性土、塩類土壌、砂漠
		ヨルダン	膨潤性土、崩壊性土、砂漠
		レバノン	
		イスラエル	膨潤性土、砂漠
		パレスチナ	
		アラブ首長国連邦	サブカ、砂漠
		カタール	サブカ、砂漠

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
		バーレーン	サブカ、
		クウェート	サブカ、砂漠
	オセアニア	オーストラリア	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、サブカ、雲母を多く含む砂、珊瑚由来土、砂漠
		ニュージーランド	液状化地盤、浸食土壌、崩壊性土、破砕性土、可溶性地盤、硫酸塩土壌、硫化土壌、火山灰性土、凍土
	環太平洋諸国	パプアニューギニア	火山灰性土、珊瑚由来土
		フィジー	珊瑚由来土
		ソロモン諸島	珊瑚由来土
		バヌアツ	珊瑚由来土
		ニューカレドニア	珊瑚由来土
		パラオ	珊瑚由来土
		ミクロネシア連邦	珊瑚由来土
		キリバス	珊瑚由来土
		ナウル	珊瑚由来土
		トンガ	珊瑚由来土
		マーシャル諸島	珊瑚由来土

出典：JICA 調査団

表 B-3 アフリカ地域の国毎の特殊土

地域		国名	地域分布する可能性のある特殊土
アフリカ	北アフリカ	エジプト	（液状化地盤）、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、泥灰土、、砂漠
		リビア	炭酸／炭酸塩土壌、泥灰土、砂漠
		チェニジア	膨潤性土、可溶性地盤、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、、砂漠
		アルジェリア	（液状化地盤）、膨潤性土、可溶性地盤、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、泥灰土、氷河堆積土、、砂漠
		スーダン	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土
		モロッコ	（液状化地盤）、膨潤性土、可溶性地盤、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、火山灰性土、氷河堆積土、砂漠
		西サハラ	
	西アフリカ	ナイジェリア	膨潤性土、分散性土、破砕性土、硫酸塩／硫化土壌、ラテライト、泥炭
		ガーナ	軟弱地盤、**膨潤性土**、**ラテライト**
		セネガル	膨潤性土、硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト
		コートジボワール	軟弱地盤、膨潤性土、ラテライト
		ガンビア	硫酸塩土壌、硫化土壌
		マリ	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト
		モーリタニア	分散性土、浸食土壌、硫酸塩／硫化土壌
		ブルキナファソ	膨潤性土
		ニジェール	膨潤性土、黄土
		ギニア	軟弱地盤、**ラテライト**
		シエラレオネ	
		リベリア	（膨潤性土）
		ペナン	膨潤性土
		トーゴ	膨潤性土、破砕性土
	東アフリカ	ケニア	**膨潤性土**、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土、珊瑚由来土
		ウガンダ	膨潤性土、浸食土壌、破砕性土、ラテライト、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土
		タンザニア	軟弱地盤、**膨潤性土**、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、ラテライト、火山灰性土、氷河堆積土、珊瑚由来土
		ルワンダ	膨潤性土、破砕性土、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土
		ブルンジ	破砕性土

地域		国名	地域分布する可能性のある特殊土
		エチオピア	**膨潤性土**、分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、ラテライト、火山灰性土、氷河堆積土、砂漠
		ソマリア	膨潤性土、炭酸／炭酸塩土壌
		ジブチ	破砕性土、砂漠
		エリトリア	破砕性土、火山灰性土、砂漠
		コモロ	火山灰性土、珊瑚由来土
		モーリシャス	珊瑚由来土
		セーシェル	珊瑚由来土
		南スーダン	泥炭
		マダガスカル	硫酸塩土壌、硫化土壌、ラテライト、雲母を多く含む砂、珊瑚由来土
	中央アフリカ	コンゴ民主共和国	膨潤性土、破砕性土、ラテライト、火山灰性土、泥炭
		コンゴ共和国	膨潤性土、泥炭
		中央アフリカ	膨潤性土
		ガボン	硫酸塩土壌、硫化土壌、泥炭
		カメルーン	膨潤性土、破砕性土、硫酸塩／硫化土壌、ラテライト、火山灰性土
		ザンビア	泥炭
		赤道ギニア	
		サントメ・プリンシペ	
		チャド	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、黄土
	南部アフリカ	南アフリカ	分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌／土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、砂漠
		ボツアナ	膨潤性土、塩類土壌
		ナミビア	塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、砂漠
		ザンビア	
		ジンバブエ	膨潤性土、分散性土
		モザンビーク	ラテライト、雲母を多く含む砂、珊瑚由来土
		マラウイ	泥炭
		エスワティニ	膨潤性土
		レソト	膨潤性土
		アンゴラ	膨潤性土、分散性土、ラテライト

出典：JICA 調査団

表 B-4 アメリカ地域の国毎の特殊土

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
アメリカ	北アメリカ	米国	**軟弱地盤**、**液状化地盤**、**膨潤性土**、分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、泥灰土、火山灰性土、泥炭、雲母を多く含む砂、クイッククレイ、砂漠、凍土
		カナダ	**軟弱地盤**、**膨潤性土**、分散性土、破砕性土、硫酸塩／硫化土壌、黄土、泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、氷河堆積土、クイッククレイ、凍土
		メキシコ	**軟弱地盤**、**液状化地盤**、分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、ラテライト、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土、珊瑚由来土、砂漠
		グリーンランド	膨潤性土、クイッククレイ、凍土
	中央アメリカ	ベリーズ	泥炭
		グアテマラ	膨潤性土、分散性土、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、火山灰性土、氷河堆積土
		ホンジュラス	塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、火山灰性土、泥炭
		エルサルバドル	分散性土、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、火山灰性土
		ニカラグア	膨潤性土、分散性土、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、火山灰性土
		コスタリカ	膨潤性土、分散性土、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、泥炭
		パナマ	膨潤性土、火山灰性土
	カリブ海諸国	キューバ	珊瑚由来土
		ジャマイカ	珊瑚由来土
		ハイチ	液状化地盤
		ドミニカ共和国	珊瑚由来土
		バハマ	珊瑚由来土
		バルバドス	珊瑚由来土
		トリニダード・トバゴ	
		アンティグア・バーブーダ	
		セントルシア	
		セントビンセント・グレナディーン	
		グレナダ	

地域		国名	**分布する可能性のある特殊土**
		セントクリストファー・ネーヴィス	
	その他カリブ海	プエルトリコ	珊瑚由来土
		バミューダ	
		アルバ	
		キュラソー	
		サン・バルテルミー	
	南アメリカ	アルゼンチン	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土、砂漠、凍土
		ブラジル	膨潤性土、浸食土壌、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、ラテライト、泥炭、雲母を多く含む砂
		ボリビア	分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト、氷河堆積土
		チリ	**液状化地盤**、膨潤性土、分散性土、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、黄土、火山灰性土、氷河堆積土、砂漠、凍土
		コロンビア	膨潤性土、ラテライト、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土
		エクアドル	液状化地盤、分散性土、浸食土壌、破砕性土、火山灰性土、氷河堆積土
		ガイアナ	ラテライト、泥炭
		パラグアイ	分散性土、ラテライト
		ペルー	**液状化地盤**、膨潤性土、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、ラテライト、火山灰性土、泥炭、氷河堆積土、砂漠
		スリナム	ラテライト
		フレンチギニア	ラテライト
		ウルグアイ	膨潤性土、分散性土、黄土
		ベネズエラ	膨潤性土、可溶性地盤、ラテライト

出典：JICA 調査団

表 B-5 ヨーロッパ地域の国毎の特殊土

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
ヨーロッパ	北ヨーロッパ	デンマーク	膨潤性土、硫酸塩／硫化土壌、泥炭、氷河堆積土
		スウェーデン	破砕性土、硫酸塩土壌、硫化土壌、泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、**クイッククレイ**、凍土
		ノルウェー	膨潤性土、破砕性土、泥炭、氷河堆積土、**クイッククレイ**、凍土
		フィンランド	泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、**クイッククレイ**、凍土
		アイスランド	液状化地盤、膨潤性土、破砕性土、火山灰性土
		エストニア	泥炭
		ラトビア	泥炭
		リトアニア	膨潤性土、泥炭
		アイルランド	膨潤性土、泥炭
		イギリス	**膨潤性土**、可溶性地盤、硫酸塩／硫化土壌、泥灰土、泥炭、氷河堆積土
	西ヨーロッパ	フランス	膨潤性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、泥灰土、火山灰性土
		ドイツ	膨潤性土、破砕性土、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、泥灰土、泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土
		ベルギー	
		オランダ	膨潤性土、硫酸塩／硫化土壌、泥灰土、泥炭
		ルクセンブルク	
		モナコ	
		スイス	破砕性土、炭酸／炭酸塩土壌
		オーストリア	破砕性土
		リヒテンシュタイン	
	東ヨーロッパ	ポーランド	膨潤性土、硫酸塩／硫化土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、泥炭、氷河堆積土
		チェコ	膨潤性土、炭酸／炭酸塩土壌
		スロバキア	炭酸／炭酸塩土壌
		ハンガリー	分散性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌
		ルーマニア	
		ロシア	膨潤性土、分散性土、塩類土壌、泥炭、雲母を多く含む砂、氷河堆積土、クイッククレイ、凍土
		ベラルーシ	膨潤性土
		ウクライナ	分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌
		モルドバ	

地域		国名	分布する可能性のある特殊土
	南ヨーロッパ	イタリア	液状化地盤、膨潤性土、分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩／硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、火山灰性土、雲母を多く含む砂
		スペイン	膨潤性土、分散性土、浸食土壌、破砕性土、可溶性地盤、塩類土壌、硫酸塩土壌、硫化土壌、炭酸／炭酸塩土壌、火山灰性土、砂漠
		ポルトガル	塩類土壌、火山灰性土
		ギリシャ	液状化地盤、膨潤性土、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌、火山灰性土
		アンドラ	
		サンマリノ	
		バチカン市国	
		マルタ	
		スロベニア	炭酸／炭酸塩土壌、黄土
		クロアチア	可溶性地盤、炭酸／炭酸塩土壌、黄土
		ボスニア・ヘルツェゴビナ	破砕性土、可溶性地盤
		セルビア	
		モンテネグロ	炭酸／炭酸塩土壌、黄土
		北マケドニア	
		アルバニア	液状化地盤、破砕性土
		コソボ	
	バルカン半島・その他	トルコ	**液状化地盤**、膨潤性土、分散性土、破砕性土、**可溶性地盤**、炭酸／炭酸塩土壌、火山灰性土、氷河堆積土
		ルーマニア	液状化地盤、分散性土、浸食土壌、破砕性土、塩類土壌、炭酸／炭酸塩土壌
		アゼルバイジャン	軟弱地盤、液状化地盤
		ジョージア	
		アルメニア	
		ブルガリア	破砕性土

出典：JICA 調査団

Appendix C 土壌に関する各種の分類体系

土壌分類するステム（体系）は以下のものがある。

表 C-1 世界的土壌分類システム

土壌分類システム	説明
USDA Soil Taxonomy （アメリカ農務省土壌分類システム）	アメリカ農務省が開発した土壌分類システムで、土壌特性に基づいて土壌を分類する。分類階級: Order（階級）、Suborder（亜階級）、Great Group（大群）、Subgroup（亜群）、Family（科）、Series（系列）。主に米国ですが、国際的にも使用されている。
World Reference Base for Soil Resources (WRB)	FAO が提唱する国際的な土壌分類システムで、世界中の土壌を比較可能にすることを目的としている。国連食糧農業機関（FAO）と国際土壌科学連合（IUSS）の協力によって開発された。分類階層は Reference Soil Groups（基準土壌群）を基にし、Qualifier（修飾語）を用いて詳細に分類する。世界中で使用されている。
FAO Soil Classification	FAO がかつて使用していた土壌分類システムで、世界の土壌資源を一元的に把握するために開発された。分類階層は Major Soil Group（主要土壌群）、Subgroup（亜群）、Family（科）。国際的に使用されていたが、現在は WRB に置き換えられている。
Harmonized World Soil Database (HWSD)	2008 年 7 月に IIASA と FAO が共同で設立した最先端のデータベースである。地理情報システム（GIS）内に構成され、世界の土壌資源に関する最新情報を含むグローバルな土壌データベースである。経度と緯度の 30 秒角（約 1 km）のグリッド セル サイズでデータが構成されており、有機炭素、pH、貯水容量、土壌の深さ、土壌の陽イオン交換容量、粘土画分、総交換可能栄養素、石灰と石膏の含有量、ナトリウム交換率、塩分、テクスチャークラス、および粒度測定にリンクされている。

出典：JICA 調査団

それ以外には各国で制定されたシステムがあり、その国特有な土壌にも対応している。有名なものは Australian Soil Classification、Canadian System of Soil Classification、Russian Soil Classification がある。

日本の土壌分類法は「農業環境技術研究所の土壌分類法」と「日本土壌協会の土壌分類法」と「日本の自然環境保全のための分類」がある。日本土壌協会の土壌分類法は農業環境技術研究所の土壌分類法と連携している。

表 C-2　HWSD の土壌分類と特殊土の可能性

土壌名	推定特殊土	説明
Acrisols	Laterite 膨潤性土?	熱帯や亜熱帯地域に広く分布する。風化が進んだ地域で形成され、表層から下層にかけて酸化鉱物や粘土鉱物が豊富に含まれているため、一般的には赤褐色または黄褐色を呈し、粘土の含有率が高いことが特徴。一般的には酸性であり、pH が低い傾向がある。
Alisol	分散性土	温帯から亜熱帯にかけての広い範囲で見られる土壌で、主に石灰岩の風化によって形成される。表層から下層にかけて石灰分が豊富に含まれており、土壌の pH が中性またはアルカリ性であることが特徴。 ただし、一部の地域では酸性の石灰岩風化土壌としても見られる。
Andosols	破砕性土 崩壊性土	火山灰や火山岩の崩壊物によって形成された土壌であり、火山活動の頻度が高い地域に特に見られる。その肥沃さや水はけの良さで知られている。また、通常、灰色や黒色をしており、高い有機物含有量と低い粘土含有量を特徴としている。
Arenosols	崩壊性土 Leoss	砂が主要な土壌粒子として支配的な場合に分類される。Arenosols は、砂で構成されており、粘土やシルトの含有量が少ない特徴を持つ。 これにより、水はけが良好で、通気性が高い土壌となる。
Anthrosols		人為的に変化した土壌、つまり、人間の活動によって形成された土壌である。Anthrosols は、農業、都市化、工業、採掘などの活動によって土壌が変化した場合に分類される。通常、植物の残渣、家畜の排泄物、人為的に添加された肥料や堆積物などの要素が土壌中に含まれている。
Chernozems	膨潤性土	ロシア語で「黒い土壌」という意味であり、その名の通り、非常に肥沃で黒い色をしている。穀物や野菜などの農作物の生産に非常に適した土壌として知られている。高い有機物含有量と良好な構造を持ち、水はけが良く保水力が高い特徴がある。温帯から亜寒帯にかけての広い範囲で見られ、ロシアやウクライナなどの国々で広く分布している。特に草原地帯での草の腐植分解と土壌動物の活動によって促進される。この過程により、土壌が有機物と栄養素で豊かになり、土壌が黒色を帯びる特徴的な色を持つようになる。
Calcisols	炭酸塩土壌 分散性土	石灰質土壌として知られており、主に中性またはアルカリ性の土壌条件下で形成される。主に石灰岩や石灰岩の風化物からなる土壌であり、土壌プロファイル

土壌名	推定特殊土	説明
	崩壊性土 破砕性土	には石灰質の堆積物や含水層が見られることが一般的である。中性からアルカリ性の pH を持ち、しばしば石灰分の高い層が見られる。地中海沿岸や乾燥した気候の地域など、特定の地理的条件下でよく見られる。
Cambisols		比較的新しい土壌であり、土壌形成過程の中間段階にあることを示している。土壌が比較的浅く、表層に有機物質の蓄積が見られることがある。通常、粘土鉱物の移動や混合が進行しているため、土壌の上層と下層の間で明瞭な差異が見られる。世界中でさまざまな気候条件下で見られるが、特に温帯や亜寒帯地域でよく見られる。
Cryosols	凍土	永久凍土地域で形成される土壌であり、寒冷な気候条件下で存在する。永久凍土が土壌中に広く存在し、凍結・解凍サイクルが支配的に形成される土壌である。永久凍土が存在することで土壌中の水分が凍結し、土壌の物理的・化学的特性が大きく変化する。これにより、土壌の結合力が増し、土壌が硬くなることがある。
Fluvisols	軟弱地盤	河川や湖沼、氾濫原などの沖積地や河岸段丘など、水が定期的に移動する場所で形成される。主に河川の堆積物や氾濫した堆積物などの堆積作用によって形成される。主に粘土やシルト、砂などの細粒な堆積物からなり、土壌の色や質は堆積物の種類や堆積環境によって異なる。
Ferralsols	Laterite	熱帯や亜熱帯地域に広く分布している。風化が進んだ地域で形成され、表層から下層にかけて酸化鉄や酸化アルミニウムなどの酸化鉱物が豊富に含まれて、土壌が赤色や赤褐色を呈することが特徴。土壌が酸性であることが一般的であり、pH が低い傾向がある。
Glaciers	氷河残積土	氷河が地形を形成する際に形成される土壌を指す。氷河は、氷河の流れの中で岩石を砕き、研磨し、運び、堆積させることで地形を形成する。この過程により、氷河土壌が形成される。氷河が運ぶさまざまな粒子や岩石の大きさ、形状、組成に応じて異なる特性を持つ。一般的には、氷河土壌は岩石や砂、粘土、礫石などの粒子で構成され、土壌の質や深さ、水はけなどの特性は、氷河の動きや侵食の度合いによって大きく変化する。
Gleysols	軟弱地盤	通常、湿地や低地などの水が常に存在する土地で形成される。長期間水が溜まっているため、土壌中の酸素が限られた状態で形成され、酸化還元反応が起こり、土壌中の鉄やマンガンなどの鉱物が酸化還元され、土壌がグレイ色や青灰色を呈する。土壌の下層にも酸化還元の影響が及ぶため、土壌全体が均一な色調を示すことがある。また、土壌中には、水分の移動に伴って形成される特徴的なパターンや斑点が見られることがある。
Gypsisols	硫酸塩土壌 分散性土	硫酸塩が豊富に含まれる土壌であり、石膏質土壌としても知られている。乾燥した砂漠地域や半乾燥地域で見られることが一般的。 これらの土壌は、水分が不足しており、乾燥した気候条件下で形成される。 土壌には、石膏や他の硫酸塩が含まれており、土壌中の酸性やアルカリ性の pH などの特徴が見られる。

土壌名	推定特殊土	説明
Histosols	泥炭／有機質土	高度に有機物質が蓄積した土壌であり、しばしば湿地や沼地などの水が蓄積する場所で形成される。泥炭やトロ炭などの有機物質が豊富に含まれており、土壌内で明確な有機質層が観察される。これらの土壌は、湿地生態系の一部として形成されることが一般的であり、しばしば湿地や沼地の植物残渣から形成される。
Kastanozems	膨潤性土?	ロシア語で「栗色の土壌」という意味。穀物や牧草地などの農業に適した肥沃な土壌として知られている。明確な層を形成し、通常、表層に有機物質の蓄積が見られる。土壌中の石灰分が豊富で、通常、アルカリ性の pH を持っている。乾燥した気候条件下で形成されることが一般的。特に黒海沿岸地域や中央アジア地域など、ロシアやウクライナを含む旧ソビエト連邦の地域で広く見られる。
Leptosols		土壌の発達が非常に不十分であるか、非常に薄い。岩石や岩盤が表面に露出している場所や、風化が進んでいない岩石や砂岩が表面に露出している場所で見られることが一般的。土壌の表層から非常に浅い土壌層しか存在せず、土壌の下層の発達がほとんど見られない。風や水の侵食によって土壌が流出し易い。
Luvisols	膨潤性土 Laterite	温帯から亜寒帯にかけての広い範囲で見られる土壌。主に風化が進んだ地域で形成され、表層から下層にかけて粘土鉱物の堆積が見られる。土壌の表面から下層にかけて粘土が増加し、その性質が特徴付けられる。一般的に灰色または灰褐色を呈し、粘土が増加する傾向がある。これは土壌の形成によって、下層から上層への粘土の移動が阻害されるためである。
Lixisols	Laterite	赤土または赤褐色土壌としても知られており、温帯から熱帯にかけて広く分布している。風化が進んだ地域で形成され、その表層から風化した鉱物や有機物が含まれている。特に、酸性の熱帯地域でよく見られる。一般的に表層に鉄やアルミニウムなどの酸化鉱物が豊富に含まれており、この酸化鉱物によって土壌が赤褐色から赤色を帯びることが特徴。
Niltsols	凍土	寒冷な気候条件下で形成され、凍土層が存在することが特徴。ロシア語で「氷沼土壌」を意味し、通常、北極圏や亜寒帯地域など、凍土が土壌形成プロセスに影響を与える地域で見られる。凍土が存在することで土壌の物理的・化学的特性が大きく変化し、土壌の厚さや栄養素の利用可能性が制限されることがある。
Phaeozems	膨潤性土	ロシア語で「黒土」という意味で、通常、穀物栽培に適した非常に肥沃な土壌を指す。土壌内で明確な黒色の表層（A 層）を持つことが特徴。この黒色の表層は、有機物質の蓄積によって形成され、土壌の肥沃度を示している。温帯や亜寒帯地域で広く見られ、特にロシアやウクライナなどの農業が盛んな地域で多く見られる。
Planosols		平坦な地形で広く見られる土壌。土壌内で土壌粒子や有機物質が均一に混合された層（モノリスティック・ホライゾン）が観察されることがある。

土壌名	推定特殊土	説明
		また、土壌内で明確な層が形成されず、土壌が均一な構造を示す場合もある。湿地や沼地、河川の氾濫平野など、水が流れ込む傾向がある場所でよく見られる。地形が平坦であり、水が表面に広く分布する。
Plinthosols	Laterite	熱帯や亜熱帯地域に広く分布しており、主に風化した岩石や砂岩などの堆積物から形成される。一般に乾燥しており、表層から深い層にかけて、明らかな赤色の鉄酸化物の斑点（プリンソールまたはフェリーディット）が見られることが特徴。土壌形成過程で鉄酸化物が移動し、下層で再沈殿することによって形成され、土壌の下層には硬化した鉄酸化物の斑点が形成される。
Podzols		寒冷で湿潤な気候条件下で形成される土壌で、主に北方の温帯地域や亜寒帯地域に広く分布している。表層にアルミニウムや鉄などの鉱物が蓄積し、土壌の下層には灰色または灰白色の露出層が見られることが特徴。植物の分解物や有機物が表層から下層に流出し、酸性の条件下で鉄やアルミニウムが溶解され、下層に移動して再沈殿する過程で形成され、表層には有機物が少なく、灰色または灰白色の露出層が形成される。
Regosols		土壌の発達が不十分であり、土壌中の層序がほとんど形成されていない土壌を指す。岩石や岩石の砕屑物が直接露出した場所や、風化が進んでいない岩石や岩盤が表面に露出している場所で見られる。また、氷河の後退によって露出した岩石や土地の場合もある。土壌が表面でわずかに発達しており、土壌形成がほとんど進んでいないため、非常に浅い土壌層しか存在しない。
Retisols		砂地や砂地の上に薄い表層があり、土壌の発達が不十分である土壌を指す。主に乾燥地域や砂漠地帯などで見られ、土壌が風や水の侵食によって形成される他、土壌の発達が十分に進まない環境でも形成される。通常、表層に砂や砂質土が広がり、深い土壌層が不足していることが特徴。
Solonchaks	塩基性土壌 分散性土	主に高い塩分濃度を持つ塩性土壌。しばしばアルカリ性であり、表層から深い層まで塩類が含まれている。塩分の高い環境下で形成され、しばしば塩類の結晶や白い塩の斑点が見られることがある。乾燥地域や半乾燥地域で見られることが一般的であるが、地下水位が高く、塩分が地表に浸出する湿地帯でも見られることがある。
Solonetz	塩基性土壌 分散性土	高い塩分濃度と高い塩基度（アルカリ性）を持つアルカリ性塩性土壌。主に乾燥した気候条件下で形成され、地下水面が浅く、塩類が土壌中に溶解し、土壌表面に塩分の結晶が形成されることが特徴。土壌が重粘土質であり、表面がカチカチに固まる傾向がある。主に乾燥した地域や半乾燥地域、ステップ地帯などで見られる。
Stagnosols		水の滞留が特徴的な未発達の土壌であり、通常は湿地や湿地帯で見られる。土壌内で水の移動や排水が制限され、水がしばしば表面に滞留することがある。これは、土壌中の粘土や有機物の堆積や地下水面の浅さなどに

土壌名	推定特殊土	説明
		よって引き起こされる可能性がある。湿地や湿潤な地域で形成され、通常は水が長期間土壌中に滞留することがある。しばしば沼地、湿原、河川の氾濫平野などで見られる。
Technosols		人工的に作られた土壌や人間の活動によって影響を受けた土壌を指す。さまざまな種類があります。都市部での建築物や道路建設に伴って形成される土壌、鉱山や産業施設の廃棄物の影響を受けた土壌、農業用地や土壌改良のために人工的に作られた土壌などが含まれる。しばしば土壌の性質や組成が均一ではない。また、特定の物質や汚染物質の影響を受けることがある。
Umbrisols		深い有機物の蓄積が見られる土壌であり、一般的に森林地帯や湿地などの生物学的に活発な環境で形成される。表層に高い有機物含有率を持ち、土壌の色は暗い茶色や黒色を呈す。
Vertisols	膨潤性土	湿潤な熱帯および亜熱帯地域に広く分布している。高い粘土含有量を特徴とし、主に粘土鉱物の一種であるモンモリロナイトを含んでいる。モンモリロナイトは水を吸収すると膨潤すため、湿潤な期間と乾燥期間の間で急激な体積変化を示す。土壌中の隙間が拡大し、土壌表面に深い割れ目が形成される。一般的には灰色や灰褐色を呈する。

出典：JICA 調査団

表 C-3 USDA Soil Taxonomy と日本の土壌学会による土壌分類

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
Alfisols	基礎栄養分が過剰に枯渇することなく、またモリック表土の形成を主導する過程が優勢になることなく、珪酸塩粘土を移動させる過程のマーカーを持っている。アルフィソルの特有の性質は、オクリックまたはウンブリック表土、アルジル層またはナトリック層、中から高程度の基礎栄養分の供給量、および中生植物が一年の半分以上または暖かい季節に連続して 3 ヶ月以上利用できる水分が組み合わさっていることです。これらの土壌は、水分と基礎栄養分を持っているため、全体として集中的に利用されている。	温帯から熱帯の様々な気候条件の森林下に生成するか、 とくに湿潤ないし亜湿潤の温暖な地域で、土壌撹乱や侵食を受け難い地形面上に最も広く分布する。粘土の下層部への移動によりアルジリック層が発達し、土層内の塩基飽和度が比較的高い。アルティソルとは塩基飽和度によって区別される。アルフィソルは養分に富み、肥沃度が高い。北アメリカのモリソルとスボドソルの間、地中海沿岸の耕地土壌（石灰岩上に発達する赤色土のテラ・ロサなど）の大部分を占めている。
Andisols	アンドソルの特有の性質は、短い順序で結晶構造を持つ鉱物やアルミニウム・フミン酸複合体が優勢であることであり、これは風化や鉱物の変換によって、移動が最小限に抑えられて生じる。アンドソルに共通する特徴として、高いリンの保持能力、利用可能な水分容量、および陽イオン交換容量が挙げられる。ほとんどのアンドソルは火山噴出物や火山砕屑物から形成される。しかし、アンドソルは適切な温度と十分な湿度があれば、風化と短い順序で結晶構造を持つ鉱物の形成が可能な環境であれば、ほぼどんな環境でも形成される可能性がある。この土壌は、独特のアンドソルの性質が土壌の上部 60cm のうち 60%に存在している限り、どんな診断表土や下層地平を持つことができる。ただし、有機炭素が 25%以上含まれている O 層は除く。 1989 年以前は、現在アンドソルとして分類されている土壌は、主にインセプチソル（未熟土壌）の中のアンデプト（アンデソル土壌）やアンダクエプト（湿潤アンデソル土壌）として分類されていたが、アンドソルが土壌分類の一つのオーダーとして認められるとともにこれらの区分は廃止された。	黒ボク土 Andosols/Ando soils/に相当する。環太平洋火山帯、アフリカ東部から地中海に至る地域、アイスランド等の火山地域に分布している。火山灰を母材として、アンディック土壌特徴（活性アルミニウムに富み、 リン酸保持容量が大きく、有機態炭素含量が高く、乾燥密度か小さいという特徴）をもつことがアンディソルの必要条件である。アンディソルは団粒構造が発達しており、透水性や保水性が良いが、酸性を呈し、リン酸欠乏を起こすなどの問題がある。しかし、適当な施肥法・改良法により生産性の高い土壌になる。
Aridisols	アリジソルに共通する特有の性質は、以下の	世界の陸地面積の約 40%を占める乾燥ない

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
	組み合わせから成る。中生植物が非常に長期間にわたって利用できる水がないこと、1 つ以上の生成された地平を持つこと、フミン酸によって著しく暗くなっていない表層地平または地平があること、深く広い亀裂（ヴェルティソルを参照）やアンドソルの性質（アンドソルを参照）がないことである。アリジソルは、植物の成長に適した温度（5℃以上）でほとんどの期間にわたって利用可能な水がなく、土壌温度が 8℃を超えるときに 90 日間連続して利用可能な水があることはない。 アリジソルは主に乾燥地域の土壌である。これらは、現在のところ極めて少ない降雨またはわずかな降雨によって土壌に水がほとんど入らない地域にある。多くの地域では、散在する一時的な草や花、サボテン、乾性植物の低木が植生を構成している。一部のアリジソルは限定的な放牧を提供します。灌漑すれば、多くのアリジソルは多様な作物に適している。	し半乾燥地域に分布する年間をとおして、土壌断面が乾燥するようなアリディック土壌水分状況をもつか、あるいは石膏よりも水可溶性の塩類の二次的集積層であるサリック層をもつ。水分不足と異常に高い塩類含量などにより農業利用は強く制限されている。水分補給が不可欠であるが、灌漑法を誤ると逆に土壌の塩類化やアルカリ化が促進される危険性がある。
Entisols	エンティソルに共通する特有の性質は、鉱物土壌材料が優勢であり、明確な生成地平がないことである。主要な土壌形成過程の特徴が欠如していること自体が重要な識別点となる。付随的な特徴は存在しない。エンティソルは植物を支える意味で土壌といえるが、どんな気候や植生の下でも存在する可能性がある。 生成地平が欠如している理由はいくつかある。例えば、地平が容易に形成されない石英砂のような惰性の親材料である場合、溶解が遅い硬い岩（石灰岩のような）が残留物をほとんど残さない場合、最近の火山灰や沖積物の堆積物で地平が形成されるのに十分な時間がない場合、侵食の速度が生成地平の形成速度を上回る斜面での発生、動物による地平の混合や 1～2 メートルの深さまでの耕作による最近の混合、または深い掘削からの堆積物である場合などが考えられる。	土層分化が制限された未熟土壌であるが、明るい土色のオクリック表層をもつ点で新鮮な土壌母材と区別される。砂丘、火山灰、 レスなどのような非固結堆積物上のレゴソル、侵食が激しい山腹斜面の岩屑土、 長期間水で飽和されたり、湛水状態におかれるグライ土など世界の陸地面積の 20%にもおよぶ。
Gelisols	ジェリソルの特有の性質は、永久凍土の存在	Wikipedia より引用

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
	と凍結および解凍に関連する土壌の特徴および性質である。これらの特徴には、不規則または壊れた地平と、特に永久凍土層の上部に沿って下層地平に有機物が取り込まれることが含まれる。凍結と解凍によって、表層および下層地平に粒状、板状、および気泡状の構造が形成される。凍結時の土壌体積の増加は、ジェリソルにおける主要な土壌形成過程と見なされる。これらの土壌は、高緯度地域や高地に限定されるが、世界の土壌の約 13%を占め、アリジソルに次いで 2 番目に多い土壌である。	土壌表面から 2 メートル以内に永久凍土を含むと定義される非常に寒い気候の土壌です。「ジェリゾール」という言葉は、「凍結する」を意味するラテン語の gelare に由来し、ジェリゾールの特徴である融解と凍結を交互に繰り返すことで発生する凍結撹乱のプロセスに言及しています。 構造的には、ジェリゾルは B の地平線を持つ場合があり、より一般的には永久凍土の上に A の地平線および/または O の地平線があります。土壌有機物は上層に蓄積するため、ほとんどのジェリゾールは土壌の色が黒または暗褐色で、その後に浅い鉱物層が続きます。ゲリゾールが発生するほとんどの地域で氷河作用の影響があるにもかかわらず、栄養素、特にカルシウムとカリウムが永久凍土の上に非常に簡単に浸出するため、化学的にはあまり肥沃ではありません。永久凍土は、大きな構造物(建物など)が設置されたときに凍った地球が溶けるにつれて沈下するため、ジェリゾールの工学的使用を大幅に制限します。 ジェリゾルは主にシベリア、アラスカ、カナダで見られます。アンデス山脈(主にチリ、ボリビア、アルゼンチンの交差点付近)、チベット、スカンジナビア北部、グリーンランドと南極大陸の氷のない部分に小さな地域があります。化石ジェリゾールは、9 億年前の先カンブリア紀の氷河期にまでさかのぼります。
Histosols	ヒストソルの特有の性質は、土壌の上部 80 cm（32 インチ）に非常に高い有機物含量を持ち、永久凍土がないことである。この厚さの半分以上で有機物の含量が少なくとも 20～30%であるか、有機物が豊富な地平が岩石や岩の破片の上にあることである。ほとんどのヒストソルは泥炭または腐植土で、水中に蓄積した、ある程度分解された植物の残骸から成り立っているが、森林の落葉やコケから形成され、自由に排水されるものもある。	湿地帯に発達する有機質土壌で、過湿な条件下で湿性植物遺体の分解が抑制されて厚＜堆積し、有機土壌物質(水で飽和されない条件下では有機態炭素含量が 20%以上、飽和される場合は粘土含量に応じて 12%以上）が土壌断面の大部分を占める。年間数日以上は水で飽和されないフォリスト亜目、それ以外で繊維物質が明瞭で分解度の低いファイブリスト、 繊維物質がほとんど 見当たらないサプリスト、 その中間のヘミス亜

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
		目に細分される。泥炭土はファイプリストまたはヘミスト、黒泥土はサプリストに相当する。農業利用のためには、排水と無機質土壌の客土を行うことが必要であり、 日本では大部分が水田として利用されている。ヒストソル以外は無機質土壌と呼ばれる。
Inceptisols	インセプチソルは、広範な特徴を持ち、多様な気候に存在する。乾燥した環境を除き、ほぼどんな環境でも形成される可能性があり、それに応じた植生の差も大きい。インセプチソルは他の土壌オーダーに向かって変化することがあり、さまざまな地形に存在する。 インセプチソルの特有の性質は、年間の半分以上または暖かい季節に連続して 3 ヶ月以上植物が利用できる水分があること、そして炭酸塩や無定形シリカ以外の移動した物質の蓄積がほとんどない一つ以上の生成地平があることの組み合わせである。 さらに、インセプチソルはモリソルの特有の性質、すなわち厚くて暗い表層地平と高いカルシウム供給量、またはアンドソルの特有の性質である短い順序で結晶構造を持つ鉱物やアルミニウム・フミン酸複合体が優勢であることを持たないことも特徴である。	他の目に見られるような特徴的な性質が十分に発達しなかった様々な土壌を包含する。すなわちアルジリック層、スポディック層、オキシック層などの必要条件を満たさないカンビック層をもつ。土壌の特色は断面発達が不鮮明であるが、断而発達がある程度認められる。乾燥地以外の多様な環境下であらゆる母材から生成し、世界中に広く分布する。
Mollisols	モリソルの特有の性質は、非常に暗褐色から黒色の表層地平（モリック表土）が A 層と B 層の合計厚さの 3 分の 1 以上を占めるか、または 25cm 以上の厚さで構造があり、乾燥時に硬くないか非常に硬くないこと、A 層と B 層の抽出可能な陽イオンの中でカルシウムが優勢であること、中程度から高い陽イオン交換容量を持つ結晶性粘土鉱物が優勢であること、そして一部の地平で粘土含量が 50cm 以上の深さにある場合、深く広い亀裂（1cm 以上の幅）がある場合、50cm 以上の深さにある地平で粘土含量が 30%未満であることの組み合わせである。	南北アメリカ、 ヨーロッパ、アジアの亜湿潤ないし半乾燥の中緯度草原地帯に広く分 布する。黒色で有機物に富み、軟らかく、塩基に富むモリック表層をもち、土層内の塩基飽和度が高い物理性や化学性が良好で肥沃な土壌であり、アメリカのプレリー土、 ロシアのチェルノーゼム、 アルゼンチン・ウルグアイのパンパなど世界の主要な穀倉地帯を形成している。

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
	モリソルは、草地の下で形成されるのが特徴であり、中程度から顕著な季節的湿度不足の気候で形成される。しかし、モリソルの中には森林生態系の下で形成されたものや、湿潤な気候の沼地や石灰質土壌で形成されたものもある。モリソルは、ヨーロッパ、アジア、北アメリカ、南アメリカのステップ地帯に広範に分布する土壌である。	
Oxisols	オキシソルの特有の性質は、石英以外のほとんどの鉱物がカオリンと遊離酸化物に極端に風化していること、粘土分画の活動が非常に低いこと、そしてローム質または粘土質の質感（砂ローム質またはそれより細かい質感）である。 オキシソルは、特徴的に熱帯または亜熱帯地域で、長期間安定している土地表面に存在する。一般的に、これらの表面は前期更新世かそれよりも古いものであるが、風化した土壌材料が再堆積される場合、比較的若い表面でもオキシソルが発生することがある。オキシソルは湿潤な気候で発達した。しかし、気候が変化するため、現在では乾燥環境にあるものもある。	熱帯降雨林等の湿潤熱帯気候下で、古く安定な地形面上で強い風化を受けて生成する。別名ラトソルと呼ばれる土壌にほぼ対応する。オキシソルは脱塩基、脱ケイ酸、遊離鉄やギプサイトの農縮等の過程を経ており、低 CEC で易風化鉱物含量の低いオキシック層または低 CEC 粘土の集積層である、カンディック層をもつ。地下水位が土壌表面付近で変動するような所では、鉄の分離析出が起こり、粘土質で赤または暗赤色の斑紋をもつ柔らかい物質であるプリンサイトが形成される。 これが地表に露出して乾湿の繰り返しにより不可逆的に硬化した鉄石がラテライトと呼ばれる。養分の溶脱か進んでいるが、団粒構造か発達しており物理性は良い。
Spodosols	スポドソルは、主に腐植およびアルミニウム、または腐植、アルミニウム、鉄を非晶質材料として移動させる過程のマーカーが少なくとも上部のシークエムに存在する。ポドソルの特有の性質は、高い陽イオン交換容量を持つ黒色または赤みがかった非晶質材料の蓄積からなる B 地平(horizon)にある。この地平はスポディック地平と呼ばれる。ほとんどの未撹乱土壌では、アルビック地平が B 地平の上にある。スポディック地平は粗い質感、高い pH 依存電荷、少量の塩基という付随的な特性を持つ。一般的に、陽イオン交換容量は粘土ではなく有機炭素の量に関連している。	ロシアやカナダの湿潤冷温帯の針葉樹林（タイガ）や高山地帯のハイマツ林下を主とするが、熱帯降雨林下等にも分布する。その林床には多量の堆積腐植が蓄積し、有機物の分解から生じる有機酸が鉄・アルミニウム酸化物を溶解し、浸透水とともに下方に移動・集積する。こうして、漂白層の下に暗赤褐色のスポディック層が明白な境界で区切られて生成する。スポディック層はスポドソルの判定に用いられる。スポドソルの肥沃度は低く、鹿業利用には酸性改良が必要である。
Ultisols	アルティソルは、アルフィソルと同様に粘土の移動のマーカーを持っているが、アルフィソル	温帯から熱帯の乾燥帯から湿潤帯までの地質的に古い地域に広く分布する。非常に長期に

Oder	USDA による説明	新編土壌物理学の説明
	にはない集中的な浸出のマーカーも持っている。アルティソルに共通する特有の性質は、アルジル層と特に下層地平における低い塩基供給量である。 アルティソルの陽イオン交換容量は、主に中程度から低い。塩基飽和度は深さが増すにつれて減少し、これは植物による塩基の循環や肥料の添加を反映している。耕作されていない土壌では、塩基飽和度が最も高いのは通常、表面直下の数センチメートルである。アルフィソルと同様に、アルティソルには水分が含まれているが、塩基はほとんど含まれていない。 肥料を施さなければ、転換農耕に使用することができる。しかし、一般的に暖かく湿潤であるため、肥料を施すことで非常に生産性の高い土壌にすることができる。	わたる土壌生成作用を経て、粘土の集積したアルジリック層またはカンディック層をもち、塩基飽和度が低い。アメリカ合衆国旧分類の赤黄色ポドソル性土にほぼ相当する。塩基の溶脱のため、肥沃度は低い。
Vertisols	これらの土壌は、せん断面（スリッケンサイド）に沿った土壌材料の破壊に関連する過程のマーカーを持っている。土壌材料が移動するため、診断特性には多くの付随的な特性がある。その中には、乾燥時の高い密度、湿潤時の低いまたは非常に低い水力伝導度、湿潤状態と乾燥状態に応じて土壌表面が顕著に上下すること、そして開いた亀裂の結果としての急速な乾燥が含まれる。 ヴェルティソルに共通する特有の性質は、高い粘土含量、湿度の変化に伴う顕著な体積変化、定期的に開閉する亀裂、スリッケンサイドおよび水平から傾いたくさび状の構造アグリゲートの形での土壌移動の証拠である。一部のヴェルティソルにおける黄砂(eluvial)/海積(illuvial)地平の発達は、土壌攪乱（ペドタービーション）が長期的な移動過程を排除するほど迅速ではないことを示唆している。	雨季と乾季が交替する熱帯、亜熱帯の低地に広く分布する。粘土含量が 30%以上で周期的に開閉する亀裂をもつ。モンモリロナイトなど膨張性粘土鉱物を主体とするので、乾季には収縮して大きな亀裂が入り、表層物質が落ち込んでくさび状の充填物を形成し、雨季には膨張して亀裂をふさぐか、内部の充填物も膨張するので、強い圧力が生じ、土壌構造面に平滑で光沢をもつスリッケンサイドが発達する。また、この膨張は地表面に凹凸の入り組んだ特異な微地形であるギルガイを形成することもある。石灰質堆積岩、玄武岩、塩基性火山灰およびそれらの沖積性堆積物などを母材とする。アメリカでは以前グルムソルと呼ばれた。インドのレグール土壌、オーストラリアのギルガイ土壌などがバーティソルに属する。バーティソルは保肥力が大きいが、湿潤状態では透水性が低い。また、土壌の膨張、収縮か土木建築上の問題となることが多い。

出典：JICA 調査団

表 C-4 World Reference Base for Soil Resources の土壌分類

RSG	Key	説明
Histosols	有機質土	有機物の含量が非常に高い土壌である。有機物の層厚が 40cm 以上、有機物含量が 50%以上、鉱質土壌の影響をほとんど受けていない、酸性で pH は 3.5～5.5 程度、栄養分の供給が限定的で特にリンやカリウムが不足がちである。高い有機物含量により、水分保持能力が非常に高い。湿地、沼地、泥炭地などの水分の多い環境に多く見られる。主に寒冷地域や亜寒帯、湿地や低地に分布する。
Anthrosols	人工	人間活動の影響を強く受けた土壌で、農業、都市開発、工業活動などによって大きく変化した土壌を指す。人工的に堆積された材料や、人為的に改良された構造、化学的な性質を有する。性質は非常に多様で、地域や人間活動の種類に依存する。有機物や栄養分の含量が高く、物理的な構造が人為的に改善されていることが多い。世界中の都市部や農業地帯、工業地帯に広く分布する。
Technosols	人工	人間活動によってもたらされた人工材料を含む土壌である。これには、建設廃材、工業廃棄物、都市ゴミ、鉱山残渣などが含まれる。壌の物理的・化学的性質に大きな影響を与える。多様な成分を含むため、物理的・化学的性質が非常に多様である。重金属や有害物質が含んでいることがある。主に都市部や工業地域、鉱山跡地などに広く分布し、都市開発や産業活動が集中する地域でよく見られる。
Cryosols	根の生長の制限	永続的に凍結している層が存在する土壌である。永久凍土層（ペルマフロスト）が存在する土壌である。一年を通して凍結しており、少なくとも 2 年以上凍結した状態が続いている。永久凍土層の深さや厚さは地域によって異なる。寒冷な気候条件下で形成され、一般に、極地や高山地域に分布している。これらの地域では、平均気温が低く、凍結と融解のサイクルが特徴となる。Cryosols の上には、通常、ツンドラ植生や寒冷地特有の生態系が存在する。植生は限られており、地表はコケや地衣類、小低木などで覆われている。
Leptosols	根の生長の制限	土壌が薄く、基盤岩が浅い層に存在する土壌である。土壌プロファイルが非常に浅く、岩盤や硬い母材が表層から 30cm 以内に存在することが特徴である。土壌層が浅いため、水分保持能力が低く、植物の根が深く張ることが難しい。表層近くに硬い岩盤や固結した層が存在するため、土壌の形成が制約される。土壌の肥沃度が低い。草地、灌木地、または森林の一部として存在する。特に斜面や丘陵地、山岳地帯に広く分布する。土壌が浅いため、乾燥しやすく、水分供給が足りない。
Solonetz	根の生長の制限	ナトリウム（Na）による影響を受けた土壌である。土壌の中に高濃度の交換可能ナトリウム（ESP: Exchangeable Sodium Percentage）が存在する。ESP が 15%以上である。ナトリウムは土壌の構造を変化させ、粘土粒子の分散を引き起こし、土壌の物理的性質を劣化させる。土壌プロファイル中には硬い B 層（ナトリック層）が存在し、ナトリウムの影響で密度が高い。ナトリック層は、通常、土壌表面から 10cm から 100cm の深さにある。透水性が低く、水はけが悪いことが多い。水分が土壌中に滞留しやすく、塩類の集積が進む。乾燥すると、ナトリック層は非常に硬くなる。Solonetz 上の植生は耐塩性の高い植物が中心で、塩生植物や耐塩性の低木が見られる。

RSG	Key	説明
Vertisols	根の生長の制限	粘土含量が高く、湿潤と乾燥のサイクルによって大きく収縮・膨張する土壌である。高い粘土含量（30%以上）を持ち、特に 2:1 型の粘土鉱物（モンモリロナイトなど）が多く含まれます。この粘土鉱物の特性により、土壌が湿潤時に膨張し、乾燥時に収縮するため、大きな亀裂や溝が形成される。季節的な湿潤・乾燥サイクルにより、土壌が収縮・膨張するため、土壌構造が非常に不安定となる。この動きにより、土壌内で縦方向に動くため、「自動的な土壌混合(ペドチュービーション）」が起こる。乾燥時には大きな亀裂が生じ、湿潤時にはこれらの亀裂が閉じる。土壌表面やプロファイル中には特徴的な「ギルガイ」や「ブレックナット」という小さな塊が見られる。湿潤時には排水が悪く、乾燥時には硬くて通気性が低いという特徴がある。
Solonchaks	根の生長の制限	塩類の濃縮が特徴的な土壌である。土壌プロファイルの上部に高濃度の可溶性塩類（塩化物、硫酸塩、炭酸塩）が蓄積している。塩類の濃度が高く、植生や農業生産に影響を与える。電気伝導度（EC）が高く、4 dS/m（デシジーメンス毎メートル）以上である。土壌表面や浅い層に塩類が集積することが多く、白色や灰色の塩類被膜が見られる。耐塩性の高い植物が生育する環境で、自然状態ではハロフィル植物（塩生植物）が優占する。乾燥地域や半乾燥地域、沿岸地域に広く分布する。典型的な分布地域には、内陸塩湖の周辺、乾燥河川の下流域、海岸線近くなどがある。不適切な灌漑が塩害を悪化させるリスクがある。サブグループで、石膏（カルシウム硫酸）が多く含む Gypsic Solonchaks と硫酸塩の含量が特に高い Thionic Solonchaks がある
Gleysols	Fe/Al を含む	長期間にわたって水分過剰の状態が続く土壌である。この過剰な水分は、地下水位が高いか、排水が不良なために発生する。水分過剰のために酸素供給が不足し、還元状態になる。還元状態により、土壌中の鉄が酸化還元反応を起こし、灰色、青灰色、緑灰色の色合いを帯びる。これらの色は「グレイ化」と呼ばれる。乾燥時には鉄が再酸化され、赤褐色や黄色の斑点が見られることがある。湿地、沼地、低地、沿岸地域など、常にまたは季節的に水に浸る地域に広く分布する。水田や湿地の森林、湿地草原などの自然環境が典型である。サブグループには有機物含量が多く、ヒストリックエピペドン（表層）が存在する Histic Gleysols、有機物が多く含まれ、モルリックエピペドン（暗色の表層）が存在する Mollic Gleysols、硫酸塩が多く含まれる Thionic Gleysols 等がある。
Andosols	Fe/Al を含む	火山灰などの火山由来の材料が母材となって形成された土壌である。火山灰、火山礫、溶岩などの火山由来の材料が母材となって形成される。火山活動が活発な地域に分布し、日本、インドネシア、フィリピン、アイスランドなどに多く見られる。高い有機物含量を持つことが多い。特徴的なアロフェン、イモゴライト、フェリヒドライトなどの短範囲秩序粘土鉱物が存在する。土壌の色は暗色で、有機物に富んでいる。軽量で多孔質な構造を持ち、水分保持能力と通気性に優れている。土壌の粒子は比較的若く、風化が進んでいないため、壊れやすい。酸性から中性の pH を持つことが多い。風化した火山材料に由来するアルミニウムや鉄の酸化物が豊富に含まれている。
Podzols	Fe/Al を含む	酸性の環境下で形成される層構造を持つ土壌である。酸性度が高く、通常 pH 値が 4.5 以下である。酸性のため、金属元素（特にアルミニウムと鉄）が溶解しやすく、特有

RSG	Key	説明
		の層状構造を形成する。表層に未分解または部分的に分解された有機物が堆積したオーガニック層が存在する O 層、白色または灰白色で、養分や金属元素が溶脱された結果、漂白されたような外観を持つ E 層（漂白層）、溶脱された金属元素（アルミニウムと鉄）が再沈着する層で、赤褐色や黄色、オレンジ色などの色を帯びる B 層（集積層）がある。B 層は「スパディック層」とも呼ばれる。寒冷または温帯の湿潤地域に広く分布し、主に針葉樹林、特に松林やヒースランドの下でよく見られる。酸性度が高く、養分が溶脱されるため、肥沃度が低い。
Plinthosols	Fe/Al を含む	鉄とアルミニウムの酸化物が集積した硬い層、または硬化しやすい層が存在する土壌である。鉄とアルミニウムの酸化物が集積した層（プランシック層、plinthic horizon）が存在する。この層は、乾燥や空気にさらされると硬化し、非常に硬い層を形成する。赤色やオレンジ色をしている。季節的な湿潤と乾燥のサイクルの影響を強く受け、湿潤期にはプランシック層が柔らかくなり、乾燥期には硬化する。水分の変動により、土壌の物理的性質が大きく変化する。プランシック層の形成には、主に鉄とアルミニウムの酸化物が関与し、風化した鉱物や母材から溶脱され、土壌中に再沈着する。ケイ酸塩鉱物の溶解や再沈着も関与していることがある。熱帯や亜熱帯の湿潤地域に広く分布し、強い降雨と高温がプランシック層の形成を促進する。
Planosols	Fe/Al を含む	水分過剰と排水不良の影響を受けた層を持つ土壌である。上層の比較的浅い土壌層と、下層の硬い、通常は粘土質の層（プラナティック層）が存在する。上層の土壌は砂質で、下層の土壌は粘土含量が高く、密度が高く、水分が下層に浸透し難い。上層の砂質土壌と、下層の粘土質土壌の間に明確なコントラストがある。下層の深さは 30cm から 50cm である。下層の粘土質の層が排水を妨げるため、上層に水が溜まりやすくなり、季節的な水分過剰状態が頻繁に見られ、土壌はしばしば酸素不足（嫌気的条件）となり、植物の生育に影響する。一般に平坦地や緩やかな傾斜地に広く分布し、主に温帯から亜熱帯の湿潤気候地域に見られる。排水が不良な地域で形成されやすい。自然状態では湿地植物や湿潤地帯の草本植物が生育する。
Stagnosols	Fe/Al を含む	水分の停滞とそれによる土壌の酸化還元反応が特徴となる土壌である。表層または表層近くで水分が長期間停滞し、長期間にわたり酸素不足状態（嫌気的条件）となる。水分の停滞は、主に不良な排水条件や透水性の低い層の存在による。長期間の水分停滞により、土壌中の鉄やマンガンが酸化還元反応を起こし、特徴的な色の変化を伴い、例えば、青灰色や灰色、時には赤褐色の斑点が見られる。これらの色の変化は、土壌の還元状態を示しており、「グレイ化（gleying）」と呼ばれる現象である。表層から 30～50cm の深さに、明瞭な漂白層（E 層）や酸化還元反応の結果として形成された斑点状の模様が見られる B 層（Bg 層）を持つ。自然状態では、湿地植物や耐湿性の高い草本植物、低木が生育する。
Nitisols	Fe/Al を含む	熱帯や亜熱帯の湿潤地域に広く分布する肥沃な土壌である。一般に高い肥沃度を持ち、農業利用に適して、主にコーヒー、茶、バナナなどの栽培に適している。 有機物含量が比較的高く、土壌の物理的・化学的性質が良好である。ブロック状構造（blocky structure）を持ち、断面が角張っていない独特の形状をして、排水性と通

RSG	Key	説明
		気性が良好である。断面は深紅色または赤褐色で、鉄とアルミニウムの酸化物が豊富に含まれている。酸化鉄に富む赤色のニティック層（nitic horizon）が存在する。主に熱帯や亜熱帯の湿潤地域に広く分布しており、特に火山灰や玄武岩などの母材から形成され、風化が進んでいる。
Ferralsols	Fe/Al を含む	熱帯および亜熱帯の湿潤地域に広く分布する土壌である。強く風化した土壌で、鉄やアルミニウムの酸化物が豊富に含まれている。非常に強く風化した土壌で、長期間の風化作用により、シリカが溶脱され、鉄やアルミニウムの酸化物が濃縮された層（ferralic horizon）を持つ。非常に強く風化されており、一次鉱物がほとんど残っていない。鉄とアルミニウムの酸化物が豊富に含まれているため、赤色や黄色となる。これらの酸化物は土壌の安定性と耐侵食性を高める。肥沃度は低く、主要な栄養素（特にリン）が不足している。均一な赤色または黄色を示し、垂直方向の変化が少ない。粘土含量が高く、粘土鉱物の大部分はカオリナイトやジブス石などの鉱物である。物理的に安定しており、侵食に強い。しかし、硬化して非常に堅固になることがある。
Chernozems	有機質を多く含む	高い有機物含量と優れた肥沃度を持つ黒色土壌である。厚い（通常 20cm 以上）、黒色または暗褐色の表層(A 層)（モリックエピペドン、Mollic horizon）が有し、有機物含量が非常に高い。有機物は主に腐植物質（腐植）である。窒素、リン、カリウムなどの栄養素が豊富であり、非常に肥沃である。土壌構造が良好で、水分保持能力と通気性に優れている。ステップ気候帯に広く分布し、ウクライナ、ロシア、カザフスタン、アメリカのプレーリー地域などが主要な分布地域である。 夏に乾燥し、冬に寒冷な気候が特徴である。草原植生の下で形成される。植物残渣が土壌に多量に供給され、これが分解されて高い有機物含量を持つ土壌を形成する。
Kastanozems	有機質を多く含む	半乾燥草原地帯（ステップ気候帯）に広く分布する土壌である。名前の通り、表層が茶褐色（カスタノ）を呈する土壌で、有機物が豊富で、草原植生からの植物残渣が多く含まれている。Chernozems ほどではないが、比較的高い有機物含量を持つ。厚い（通常 10cm 以上）、暗色のモリックエピペドン（表層）が存在し、有機物含量が高い。ベースサチュレーション(陽イオン交換容量に占める主要な栄養元素の割合）が 50%以上で、土壌中の主要な陽イオン（カルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウム）が豊富に存在し、土壌の化学的肥沃度が高い。主要な分布地域は、ロシア南部、ウクライナ、カザフスタン、北アメリカのグレートプレーンズなどである。比較的少ない降雨量と季節的な温度変化地域に分布する。サブグループにはカルシウムの集積層（カルシック層）が存在する Calcic Kastanozems が含まれる
Phaeozems	有機質を多く含む	肥沃で有機物が豊富な土壌である。主に温帯から亜寒帯の湿潤地域に広く分布している。暗色を呈します。有機物は主に腐植物質（腐植）である。土壌の上層（A 層）は厚い（通常 20cm 以上）モリックエピペドン（Mollic horizon）で特徴的な黒色または暗褐色の色を生み出す。モリックエピペドンは、比較的高いベースサチュレーション（50%以上）と高い有機物含量を含む。pH は中性から弱アルカリ性である。良好な土壌構造を持ち、水分保持能力と通気性に優れている。温帯から亜寒帯の湿潤地域に

RSG	Key	説明
		広く分布し、北アメリカのプレーリー、東ヨーロッパのステップ、アジアの一部などが主要な分布地域である。
Umbrisols	有機質を多く含む	酸性の環境下で形成される暗色の表層を持つ土壌である。厚い（通常 20cm 以上）暗色の表層（umbric horizon）を持ち有機物を豊富に含み、暗褐色から黒色を呈する。腐植物質が多く含まれ、肥沃である。酸性で、pH が 5.5 未満である。酸性環境は、アルミニウムや鉄の溶解を促進する。風化が進んだ鉱物組成を持ち、主にケイ酸塩鉱物が多く含まれる。粘土鉱物は、主にカオリナイトやイライトなどが含まれる。主に湿潤な温帯地域や亜寒帯地域に分布し、年間を通じて降雨量が多く、冷涼な気候で、ヨーロッパ、北アメリカ、アジアの一部が含まれます。
Durisols	塩基性高い	層中にシリカ（ケイ酸塩）の硬い層（duric horizon）が存在する土壌である。 地表近くにあることも深いところにもある。シリカの硬化は、土中でシリカが溶解して再沈着する過程で起こり、層は非常に硬く、コンクリートのようになる。主に乾燥から半乾燥の地域に広く分布し、降雨が少なく、蒸発が多いため、シリカの移動と集積が促進される。肥沃度が低く、農業利用には適さない。硬いシリカ層が植物の根の成長を阻害する。自然状態では、浅い根を持つ耐乾性のある低木や草本植物が育つ。サブグループには硬いシリカ層に加えて、石膏（カルシウム硫酸）が多く含まれる Gypsic Durisols、非常に硬いシリカ層（petroduric horizon）が存在する Petroduric Durisols 等がある。
Gypsisols	塩基性高い	石膏（硫酸カルシウム）が多く含まれる土壌である。土層の一部に石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）が多量に集積して、「gypsic horizon」と呼ばれる。石膏の含量が 15%を超える。石膏は、乾燥地域で蒸発が高い条件下で地下水が上昇し、その過程で溶解した石膏が再沈着して形成される。乾燥から半乾燥の地域に広く分布し、降雨量が少なく、蒸発量が多い。北アフリカ、中東、中央アジア、アメリカ南西部などに分布する。石膏の集積により、土壌はしばしば硬くなる。乾燥時には硬くなる一方で、湿潤時には柔らかくなる。肥沃度が低く、特に石膏層が厚い場合、作物の根が深く成長できない。サブグループには非常に硬い石膏層（petrogypsic horizon）を有する Petrogypsic Gypsisols、カルシウム炭酸塩が豊富に含まれる層が存在する Calcaric Gypsisols 等がある。
Calcisols	塩基性高い	カルシウム炭酸塩（石灰）が集積している土壌である。土層の一部にカルシウム炭酸塩（$CaCO_3$）が多量に集積して、「calcic horizon」と呼ばれる。カルシウム炭酸塩の含量が 15%を超える。カルシウム炭酸塩の集積は、乾燥地域で蒸発が高い条件下で地下水が上昇し、その過程で溶解したカルシウムが再沈着して形成される。乾燥から半乾燥の地域に広く分布し、降雨量が少なく、蒸発量が多い。北アフリカ、中東、中央アジア、南ヨーロッパ、アメリカ南西部などに分布する。カルシウム炭酸塩の集積により、土壌はしばしば硬くなる。カルシウム炭酸塩は、土壌の排水性や通気性に影響を与える。比較的肥沃であり、特に乾燥耐性のある作物に適している。サブグループには非常に硬いカルシウム炭酸塩層（petrocalcic horizon）を有する Petrocalcic Calcisols、石膏（$CaSO_4$）の集積層が有する Gypsic Calcisols などがある。

RSG	Key	説明
Retisols	粘土	北方の寒冷地域に分布し、土層中に網目状の構造（retic horizon）を持つ。網目状の構造は風化による鉄やアルミニウムの再沈着が原因で形成される。酸化物の濃集と漂白された部分が交互に現れ、層中に明瞭なパターンが見られる。北方の寒冷地域に広く分布し、冬季に長期間凍結し、夏季に短期間解凍する。代表的な分布地域は、シベリア、カナダ、スカンジナビア半島などである。酸性で、pH が 5.5 未満である。酸性環境は、アルミニウムや鉄の溶解を促進する。肥沃度は低い。有機物の含量が低く、特にリンやカリウム少ない。
Acrisols	粘土	熱帯および亜熱帯の湿潤地域に分布する酸性の土壌である。強い酸性を示し、pH は 5 以下である。アルミニウムの溶解が進み、植物に有害な濃度に達する。ベースサチュレーションが 50%未満である。土層中に粘土が集積したアルジック層（argic horizon）を持ち、表層から溶脱された粘土が下層に再沈着して発達した構造が形成される。肥沃度は低く、特にリンやカリウムが不足している。有機物含量も低い。熱帯および亜熱帯の湿潤地域に分布し、長期間にわたる風化と強い降雨によって形成される。主な分布地域は、アフリカ、中南米、東南アジアがある。
Lixisols	粘土	熱帯および亜熱帯の季節性湿潤地域に広く分布する土壌である。土層中に明瞭なアルジック層（argic horizon）が存在し、粘土が集積した層で、粘土の下方移動と再沈着によって形成される。アルジック層は表層から少なくとも 30cm 以上の深さにある。ベースサチュレーションが 50%以上である。土壌の肥沃度は比較的高い。酸性から中性を示し、pH は 5.5 から 7.0 の範囲である。明瞭な乾季と雨季が交互に訪れる熱帯および亜熱帯の季節性湿潤地域に分布する。代表的な分布地域には、西アフリカ、中南米、南アジア、東南アジアの一部がある。
Alisols	粘土	酸性の環境下で形成される粘土集積土壌である。土層中に明瞭なアルジック層（argic horizon）が存在し、粘土が集積した層で、表層から溶脱された粘土が下層に再沈着して形成される。強い酸性を示し、pH は 5 以下で、高濃度の可溶性アルミニウムを含む。ベースサチュレーションが 50%未満で、肥沃度が低い。
Luvisols	粘土	中性から弱酸性の環境下で形成される粘土集積土壌である。土層中に明瞭なアルジック層（argic horizon）が存在し、上層から移動した粘土が集積した層である。ベースサチュレーションが 50%以上で、土壌の肥沃度が比較的高い。中性から弱酸性で、pH は 5.5 から 7.5 の範囲である。温帯地域の森林や草原地域に分布し、適度な降雨と温暖な気候である。代表的な分布地域には、ヨーロッパ、北アメリカ、アジアの一部などがある。
Cambisols	未発達	土壌発達の初期段階にある土壌で、特徴的な水平分化がまだはっきりと見られない。Bw 層（変質層）を有し、元の母材に対して明らかに変質しているが、まだ明確なアルジック層（argic horizon）やスパディック層（spodic horizon）、ケンソス層（calcic horizon）などの成熟した土壌層が存在しない。Bw 層は、色の変化、構造の発達、若干の粘土含量の増加などが見られる。肥沃度が比較的高く、農業、林業、牧草地としての広く利用されている。さまざまな気候条件や地形に広く分布して、侵食が進行している場所や堆積地、斜面地などに見られる。特定の気候帯に限られず、世界

RSG	Key	説明
		中の多様な環境で見られる。
Fluvisols	未発達	河川氾濫原、三角州、湖岸、海岸低地など、水の流れによって堆積した土壌で、定期的な堆積物の追加があり、土壌が若く、層状構造が明瞭である。表層に新しく堆積した物質（オールソイル）が見られ、明瞭な層序を持つ。水による運搬・堆積作用によって形成された土壌のため、粒径分布が多様で、鉱物質が豊富で、土壌断面が均一でない。世界中の河川沿いや氾濫原、海岸地域に広く分布し、アマゾン川流域、ガンジス川流域などの大規模な河川氾濫原地域、オランダのデルタ地域やエジプトのナイルデルタなどが有名である。
Arenosols	未発達	砂の含量が非常に高い土壌である。上層から少なくとも 50cm の深さで砂の割合が80%以上を占める。明瞭な層状分化がほとんどなく、土壌の発達が初期段階にとどまる。水分保持能力が低く、排水性が非常に良好である。肥沃度は低く、有機物含量も低い。砂丘、砂漠、沿岸地域、河川の堆積物地域など、世界中の多くの地域にあり、サハラ砂漠、アラビア砂漠、オーストラリアの砂漠地帯、北アメリカの砂丘地域が有名である。
Regosols	未発達	土壌発達が未熟で、明瞭なアルジック層（argic horizon）やスパディック層（spodic horizon）などの成熟した土壌層が存在しない。土層は比較的浅く、A 層（表層）と C 層（母材層）が見られ、変質層や集積層の発達が見られない。風化が進んでいない母材から形成され、母材の種類は多様で、砂、シルト、粘土、火山灰、堆積物などが含まれる。地形が急激に変化する場所や、風や水の侵食、堆積が頻繁に起こる場所に広く分布して、山岳地帯、河川氾濫原、砂丘地域などが含まれる。世界中の多くの地域で見られる。肥沃度は低く、自然状態では植生が乏しい。土壌の浅さと未熟さから、栄養素の供給が不十分である。

出典：JICA 調査団