

全世界

全世界開発途上国における
建設工事で遭遇する特殊土壌対策及び
ローカルの自然地盤材料の補強対策に関する
基礎研究（プロジェクト研究）

特殊土対策ハンドブック

2025 年 5 月

独立行政法人
国際協力機構（JICA）

日本工営株式会社

資金
JR
25-015

全世界開発途上国における建設工事で遭遇する
特殊土対策及びローカルの自然地盤材料の
補強対策に関する基礎研究（プロジェクト研究）

特殊土対策ハンドブック
本編

2025 年 5 月

独立行政法人 国際協力機構（JICA）

日本工営株式会社

序文

昨年、我が国の ODA は 70 周年を迎えました。無償資金協力は 1968 年に食糧援助という形で歩みを開始し、1990 年代には一時は世界的トップドナーの地位を経て、現在までの累計として世界各国で約 5 兆 4600 億円（JICA 実施分、2023 年度まで）に上る協力を実施してきました。

道路・橋梁・港湾、農業灌漑等のインフラ整備のための土木案件は、無償資金協力の大宗を占めています。工事では客土などを除き、専ら現地盤を加工して使用しますが、各国の現場では日本国内で一般にみられない特殊土と遭遇することもあります。こうした特殊土は研究が乏しく知見の蓄積が十分ではありません。施工計画上で十分な注意を払われていないことが多く見られます。このため、事前の設計調査時に予見が困難であったり、覚知していても施工時・施工後に被る影響を評価して適切な対策を講じたりすることは必ずしも十分ではありませんでした。結果として、施工時に事業費増額を伴う大幅な設計変更や工期延長事案が発生するケースにしばしば直面してきました。

本基礎研究では、過去 ODA インフラ整備事業において直面してきた特殊土との遭遇例とその対策事例を収集・整理し、将来の事業計画段階での注意事項や対策の考え方の整理を JICA として初めて試み、成果をハンドブックとして纏めました。具体的には、調査設計段階において対象国での特殊土の有無やリスクを事前に認識・理解し、特殊土壌に直面するリスクを可能な限り低減できるよう実務者向けの参考資料としました。成果のとりまとめにあたっては、海外の研究機関と協働して研究を進めてきた地盤工学・改良、斜面防災、農業土木などを専門とされる日本の研究者、民間コンサルタントからなる専門家意見交換会を開催しました。委員長の東京都市大学の末政直晃教授をはじめ、各委員には成果の集約に貴重な助言を賜りました。この場を借りて、ご協力いただいた関係各位に心より御礼申し上げます。

終わりに、本ハンドブックが ODA インフラ整備事業のみならず、広く海外土木工事の設計、施工に従事される実務者に活用され、開発途上国での特殊土壌及びローカル自然地盤材料の補強対策を考慮する際に大いに役立つことを切に願います。また、本成果は研究の途上であり、継続的な知見の蓄積が望まれることから、読者諸氏からの建設的なご意見をお寄せいただきますようお願い申し上げます。

2025 年 5 月

独立行政法人 国際協力機構

資金協力業務部

部長 山村 直史

発刊に寄せて

世界各地には、日本国内では滅多に出会えない土が存在する。それらの多くは、その地域に独特な景観を作り出したり、特産品を創出したりして人間と調和的であるが、中には非常に厄介な土もある。このような土は特殊土と呼ばれ、特に建設工事において或いは構造物の維持において取り扱いの難しい、厄介な存在となっている。

このような特殊土は、母材の性質や成り立ちの影響を強く受けるため、分布する地域は比較的限られる。また、同じ名称の特殊土に分類されたとしても、成因のわずかな違いによりその厄介な性質に大きな差が生じることもある。そのため、同じ特殊土であっても他の場所で効果が見られた対策が意味を為さなかったり、むしろ過剰であったりすることもある。

特殊土が問題となる地域が発展途上国にある場合が多いため、特殊土の性質や対策方法がうまく伝達されない、あるいは十分な事後分析がなされなかったりすることが多い。そのため、特殊土はいつまでも厄介な土のままだという現状にある。

本ハンドブックは、JICA の各種事業に直接関わる技術者や職員、関連技術者が主に開発途上国において無償資金協力事業を推進していく中で、特殊土に遭遇したために工期や工費が大幅に遅れたり、膨らんだり、あるいは建設後の構造物に想定外の支障が生じたりした事例を鑑みて、特殊土を正しく理解して、そのリスク低減や構造物の品質確保を図る目的で作成されたものである。しかしながら、前述した特殊土の“特殊性”のために、特殊土に対する唯一の正しい対処法を示すことは困難かつ無意味であると判断し、あくまでも特殊土に遭遇したときの問題解決の糸口になることを目的に設定した。時間的制約から、本ハンドブックでは遭遇率の高い膨潤性土、分散性土、崩壊性土、ラテライトを主な対象土とした。作業の過程では、これらの特殊土に関して、まずは机上のみならず世界各地に赴いて特殊土に関する情報をできるかぎり収集し、正しく有益な情報となるように内容を精査して、理解がしやすいように整理した。それぞれの特殊土に対して、なぜ特殊土に分類されるかの理由や分布地域、生成過程の他に、被災事例や判定方法、対策事例が豊富に記載されている。巻末には、各国の試験基準や判定方法も記載されている。

本ハンドブックが特殊土に対する情報集積の契機となって、特殊土がいずれ厄介でなくなる存在になることを切に願っている。今回の作成にあたって、ご尽力いただいた委員各位、JICA 及び調査に従事された日本工営（株）に厚く御礼申し上げる。

2025 年 5 月

プロジェクト研究 専門家意見交換会 委員長

東京都市大学 末政 直晃

第1章	ハンドブックの概要と基本事項.....	1-1
1.1	ハンドブックの目的.....	1-1
1.2	ハンドブックの対象.....	1-1
1.3	ハンドブックの作成方針.....	1-2
1.4	特殊土の基本情報.....	1-4
1.5	特殊土に係る施設整備事業の基本事項.....	1-4
第2章	一般的に開発途上国で問題となる特殊土と 事業実施に当たっての留意点	2-1
2.1	膨潤性土	2-1
2.2	分散性土	2-37
2.3	崩壊性土	2-67
2.4	ラテライト	2-81
第3章	その他の特殊土.....	3-1
3.1	侵食性土壌	3-1
3.2	破砕性土	3-3
3.3	可溶性地盤	3-6
3.4	塩類性土壌	3-9
3.5	硫酸塩／硫化土壌.....	3-12
3.6	炭酸塩土壌	3-14
3.7	酸性土壌	3-17
3.8	泥炭	3-19
3.9	珊瑚土壌	3-22
3.10	雲母を多く含む砂.....	3-24
3.11	氷河堆積土（氷積土）	3-26
3.12	乾燥土壌	3-29
3.13	風化岩・変成岩.....	3-30

第4章	特殊土対策.....	4-1
4.1	対策工法の概要.....	4-1
第5章	特殊土に係る施設整備事業の基本方針.....	5-1
5.1	特殊土リスクがある施設整備事業の進め方.....	5-1
5.2	事業関係者間のリスクコミュニケーション.....	5-6
5.3	特殊土に係る調査の考え方.....	5-8
5.4	記録作成及び報告.....	5-11
第6章	特殊土について.....	6-1
6.1	特殊土の定義.....	6-1
6.2	土壌の形成要因.....	6-2
6.3	土壌形成プロセス.....	6-4
6.4	特殊土の分類.....	6-6
6.5	特殊土分布域.....	6-11
6.6	土壌分類学の活用.....	6-15
6.7	特殊土の工学的問題点.....	6-18
第7章	おわりに.....	7-1
巻末資料		
APPENDIX A	土質特性による膨潤性土の判定方法.....	A-1
APPENDIX B	化学的指標による膨潤性土、分散性土の判定.....	B-1
APPENDIX C	各種の試験に関する日、米、英の試験基準.....	C-1
APPENDIX D	特殊土に関する Q&A.....	D-1
APPENDIX E	特殊土に関する事例集.....	E-1
APPENDIX F	記号一覧.....	F-1
APPENDIX G	略語一覧.....	G-1
APPENDIX H	参考文献.....	H-1

第1章 ハンドブックの概要と基本事項

1.1 ハンドブックの目的

世界には建設工事において特に取り扱いの難しい土が多く存在し、これらは総称して「特殊土」と呼ばれている。インフラ事業を進める上で地盤工学上問題となる土として、膨張、収縮など体積が大きく変化するもの、強度が明らかに不足するもの、腐食を引き起こす可能性のあるものなどがある。

インフラ整備等の建設工事で特殊土に遭遇した場合、その対策の困難さに直面することがある。特殊土は調査設計段階で確認される場合もあるが、施工や維持管理段階で確認される場合もあり、計画の変更やコストの増大、および工程の遅延などを生じさせるリスクを常に有している。

本ハンドブックは、主に JICA の無償資金協力事業や円借款等において、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ついて、取りまとめたものである。事業に取り組むにあたり、事前に対象国における特殊土の有無やリスク、およびその対策について認識・理解しておくことで、計画・調査段階、設計・施工段階、維持管理段階における特殊土に対するリスクを、可能な限り低減できると考えられる。本ハンドブックは、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、作成したものである。

なお、本ハンドブックは、指針や技術基準などのように、それらを準拠すれば問題なく設計・施工できるものでなく、事業推進者やエンジニアが特殊土に対峙した時、問題解決の糸口や情報を提供するものであり、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。

1.2 ハンドブックの対象

表 1.2.1 に本ハンドブックの対象を示す。読み手は、JICA の各種事業に関連する技術者やカウンターパート、および JICA 職員を基本とするが、開発途上国の事業に従事する日本企業の技術者も参照することができる。

表 1.2.1 ハンドブックの対象

項目	内容
読み手	・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技術者 ・JICA 無償資金協力事業や円借款等に従事する施工業者 ・JICA 職員 (JICA 本部、JICA 現地事務所スタッフ) ・開発途上国のカウンターパートの技術者 ※必要に応じて、以下も対象とする。 ・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、施工業者
事業	・特殊土分布地域における道路建設事業 (高規格道路、地方道路を含め全ての道路) で、無償資金協力事業や円借款のもの

項目	内容
	※必要に応じて、以下も対象とする。 ・開発途上国政府が実施する道路建設事業 ・道路建設以外のインフラ事業（灌漑・ダム・河川堤防 等） ・建築基礎の整備において特殊土が問題となる建築に係る事業
特殊土	・膨潤性土 ・分散性土 ・崩壊性土 ・ラテライト ・その他の特殊土 ※特殊土は、開発途上国で一般的に問題となる特殊土として、膨潤性土、分散性土、ラテライト、崩壊性土を取り上げ、概要や問題事例、各段階における対応方法について記述した。その他の特殊土については、注意喚起を目的として概要のみを記載した。

出典：JICA 調査団

1.3 ハンドブックの作成方針

ハンドブック作成にあたり、以下の点を考慮した。

- ① 特殊土の種類や問題、および対策等に関する基本情報を可能な限り網羅的に入れ、特殊土の存在とリスクを本書で読み手に理解させること
- ② 特殊土に関する記述の際は、冒頭に本章の要旨を入れ、詳細に目を通さなくてもハンドブックの要点を容易に読み手に理解させること
- ③ 各種対策工法の具体的な解説は省略し、対策工法の要点のみを整理することで、理解の促進を図ること

※詳細は各対策工法の専門書を別途参照いただくことを想定している。

表 1.3.1 にハンドブックの構成と位置付けを示す。ここで主に対象とする特殊土は、世界中に広く分布して、開発事業で遭遇することの多い「膨潤性土」、「分散性土」、「崩壊性土」、「ラテライト」とした。これらの特殊土については、過去の遭遇事例や計画設計等の各段階における対応、特殊土対策技術の適用性等について取りまとめた。一方、その他の特殊土については、注意喚起を目的として概要のみを取りまとめた。また、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、参考文献を巻末資料として取りまとめた。

表 1.3.1 ハンドブックの構成と位置付け

章	項目	内容	位置付け
第1章	ハンドブックの概要と基本事項	・ハンドブックの目的 ・ハンドブックの対象 ・ハンドブックの作成方針 ・特殊土の基本情報 ・特殊土に係る施設整備事業の基本事項	ハンドブックの全体概要について解説
第2章	一般的に開発途上国で問題となる特殊土と事業実施に当たっての留意点 ・膨潤性土 ・分散性土 ・崩壊性土 ・ラテライト	・概要 ・過去の建設工事で遭遇した特殊土の事例 ・計画調査段階における対応 ・設計施工段階における対応 ・特殊土対策技術と適用性 ・コンサルタント、施工業者の業務上の留意点 ・維持管理段階における対応	特殊土毎の建設工事における遭遇事例や各段階における対応方法、および特殊土対策技術と適用性
第3章	その他の特殊土	・概要	主に注意喚起を目的とした第2章以外の各特殊土の概要
第4章	特殊土対策	・対策工法の概要	特殊土に対する対策工法の概要について紹介
第5章	特殊土に係る施設整備事業の基本方針	・特殊土リスクがある施設整備事業の進め方 ・事業関係者間のリスクコミュニケーション ・特殊土に係る調査の考え方 ・記録作成及び報告	施設整備事業を進めるにあたってのリスクマネジメントの方法
第6章	特殊土について	・特殊土の定義 ・土壌の形成要因 ・土壌形成プロセス ・特殊土の分類 ・特殊土の分布域 ・土壌分類学の活用 ・特殊土の工学的問題点	特殊土に関する基礎的情報
第7章	おわりに	・今後の課題と展望	特殊土対策技術の今後の発展に向けた課題および展望
巻末資料		・土質特性による膨潤性土の判定方法 ・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	

出典：JICA 調査団

1.4 特殊土の基本情報

特殊土によるリスクを考慮した対応を実施するにあたり、特殊土の基本情報（定義・形成要因・形成プロセス・分類・分布域・土壌分類学・工学的問題）を理解することが重要である。表 1.4.1 に、特殊土の基本情報を示す。詳細は「第 6 章 特殊土について」で解説する。

表 1.4.1 特殊土の基本情報

項目	内容
定義	在来地の地盤工学の手法だけでは、設計施工ができないような土（地盤工学会，日本） 本ハンドブックでは、主に開発途上国で問題となる土を対象
形成要因	母材、地形、気候、生物、人間の活動、時間が複合的に作用して形成
形成プロセス	風化 気候：湿潤条件、湿潤熱帯気候、乾燥した熱帯/亜熱帯気候、寒冷気候 堆積：火山物質、水
分類	力学的特性：膨潤性土、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破碎性土、可溶性地盤、軟弱地盤 化学的特性：塩類／ソーダ土壌、（酸性）硫酸塩/硫化土壌、炭酸塩土壌、酸性土壌 その他：ラテライト、黄土、火山灰性土、珊瑚土壌と珊瑚骨材、雲母を多く含む砂、氷河堆積土（氷積土）、風化岩/軟岩、乾燥土壌
分布域	世界各地 ・膨潤性土、分散性土、崩壊性土、ラテライトについては、独自に分布図と簡易なリスクマップを作成 ・本研究ファイナルレポートの巻末資料に各種文献の特殊土分布図を掲載
土壌分類学	世界土壌分類データベース（HWSD）と特殊土との関連性
工学的問題点	特殊土の問題を解決する上でのポイント

出典：JICA 調査団

1.5 特殊土に係る施設整備事業の基本事項

特殊土に係る施設整備事業は、特殊土に係る技術的な情報が体系的に蓄積されていないこと、通常の事業と比較して不確実なリスクを多く含んでいることから、リスクマネジメントの観点が重要である。リスクマネジメントの観点を踏まえ、施設整備事業は表 1.5.1 に示す項目に留意し、進めることが望まれる。詳細は「第 5 章 特殊土に係る施設整備事業の基本方針」で解説する。

表 1.5.1 施設整備事業の基本事項

項目	内容
特殊土リスクがある施設整備事業の進め方	特殊土のリスクを伴う事業実施の流れ、事業実施の体制構築に係る配慮、リスク対応の考え方など
事業関係者間のリスクコミュニケーション	関係者間のリスクコミュニケーションの重要性と、コミュニケーションの方法、事業段階ごとのコミュニケーションなど
特殊土に係る調査の考え方	特殊土が関係する施設整備事業において、実施する調査において配慮すべき事項など
記録作成及び報告	特殊土が関係する施設整備事業において、情報共有・記録の重要性と共有すべき情報、情報の引継ぎの重要性など

出典：JICA 調査団

第2章 一般的に開発途上国で問題となる特殊土と

事業実施に当たっての留意点

本項では、一般的に開発途上国に広く分布し、かつ問題となる事例が多い特殊土（「膨潤性土」、「分散性土」、「崩壊性土」、「ラテライト」）を対象に、概要・問題事例・建設時の各段階における対応・留意点について記載した。メカニズム・判定方法・対策方法などの詳細については、「全世界開発途上国における建設工事で遭遇する特殊土壌対策及びローカルの自然地盤材料の補強対策に関する基礎研究（プロジェクト研究）」の報告書で記載しているので、適宜参照されたい。

本章で取り扱う特殊土は以下の通りである。それ以外の特殊土については第3章に記載している。

力学的特性	膨潤性土、分散性土、崩壊性土(主に黄土を対象)
化学的特性	該当なし
その他	ラテライト

2.1 膨潤性土

2.1.1 概要

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・収縮性を有する。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するが、それらと比べて膨潤挙動の影響が大きいので、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潤粘土鉱物が含まれている。土壌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、膨潤性土は体積が増加し、乾燥すると収縮する。

膨潤性土が示す特殊な挙動により建設事業において様々な問題が発生する一方で、その挙動は各地で異なり、基準やガイドラインが整備されている国は限られている。このため、膨潤性土が分布する地区で適切な対応を行うためには、問題が発生する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。

[解説]

2.1.1.1 膨潤性土が問題となる深さ

膨潤性土は最大 20m の深さまで堆積することがある。その挙動が問題となるのは雨期や乾期で含水比が変化する範囲であり、一般には地下水が深ければ含水比が変化する深さ（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。含水比の変化が少ない地点、例えば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。

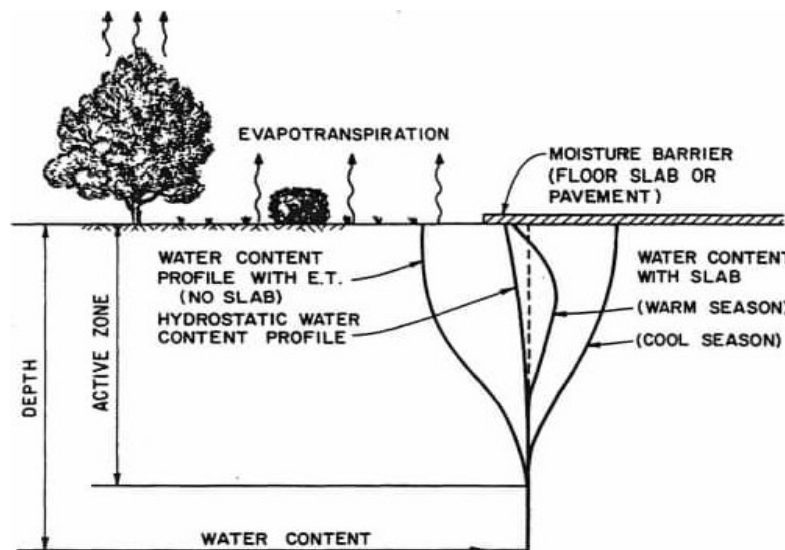


図 2.1.1 含水比が変動する範囲(Active zone)

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

2.1.1.2 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壌水分の変化の結果である。膨潤のメカニズムに影響を与える要因の多くは、塑性や密度などの土壌特性に影響を与える、もしくは影響を受ける。表 2.1.1、表 2.1.2 に膨潤・収縮に影響を及ぼす土質特性および環境条件を示す。

表 2.1.1 膨潤・収縮に影響を及ぼす土質特性

影響因子	説明
粘土鉱物	一般的に土壌の体積変化を引き起こす粘土鉱物は、スメクタイト系のモンモリロナイト、バーミキュライト、およびいくつかの混合層鉱物である。
土壌水化学	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。
土壌吸引	土壌の吸引力は、飽和度、重力、間隙の大きさや形状、表面張力、土壌粒子と水の電気的・化学的特性に関連している。
塑性	一般に、含水比の広い範囲で塑性挙動を示し、液性限界の高い土壌は、膨潤や収縮の可能性が大きい。
土壌構造と土壌組織	粘土鉱物が凝集した粘土は分散粘土よりも膨張性が高い傾向がある。土壌組織と土壌構造は、高い含水比での締め固めや再成形によって変化する。
乾燥密度	乾燥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。

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

表 2.1.2 膨潤・収縮に影響を及ぼす環境条件

影響因子		説明
初期水分条件		乾燥した膨張性の土壌は、含水率が高く吸引力が低い同じ土壌よりも、水に対する吸引力が高い。一方、湿潤な土壌は、比較的乾燥した初期土壌よりも容易に水を吸収し収縮する。
水分の変動	気候	気候条件の違いにより降水量と蒸発散の量変動する。
	地下水	水位が浅い場合、膨潤性土への水分の供給源となる。
	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、地表の排水機能の程度により膨潤性土の水分供給量が増減する。
	植生	樹木、低木、草は蒸散によって土壌から水分を奪い、植生が異なる場所では土壌の湿潤度が異なる。
	透水性	透水性の高い土壌、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。
	温度	気温の上昇により、水分が舗装や建物下の低温の場所に拡散する。
ストレス条件	ストレス歴	過圧密粘土は、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。
	現場条件	載荷重や土壌水分環境の変化を考慮する場合、土の初期応力状態を推定する必要がある。
	載荷重	載荷重の大きさは、含水比や密度に対して生じる体積変化の量を決定する。
	土壌プロファイル	地層中の膨潤性の可能性のある層の厚さと位置は、潜在的な移動に影響する。

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

2.1.1.3 膨潤性土の起源、母材と粘土鉱物

膨潤性土は、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（東アフリカ、インド）の黒綿土（ブラックコットンソイル、通称 BCS）のほとんどは、玄武岩などの塩基性岩石の風化によって形成されたものである。同じ膨潤性土でも地域や国によって、母材や形成過程等の違いにより、土質特性が異なるため、表 2.1.3～表 2.1.6 に膨潤性土の地域毎の母材、由来について取りまとめた。

表 2.1.3 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壌(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
	マラウイ、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	Karoo 火山
	マラガサイ	頁岩、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 2.1.4 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 Shall、火山灰
	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 2.1.5 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	アルティプレーノ高原	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 2.1.6 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

2.1.1.4 膨潤性土の生成プロセス

膨潤性土の代表的な土壌分類ひとつである 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スリックケンサイド 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 の8つである。

表 2.1.7 に Vertisols の一般的な土壌形成プロセスの一覧表を示す。土壌形成に関係するモデルはいくつか提案されているが、図 2.1.2 に示す土壌力学モデルが膨潤性土の発達プロセスを理解しやすい。

表 2.1.7 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
土壌攪拌	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
スリックケンサイド、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(スリックケンサイド、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 Ca^{2+} と Mg^{2+} 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

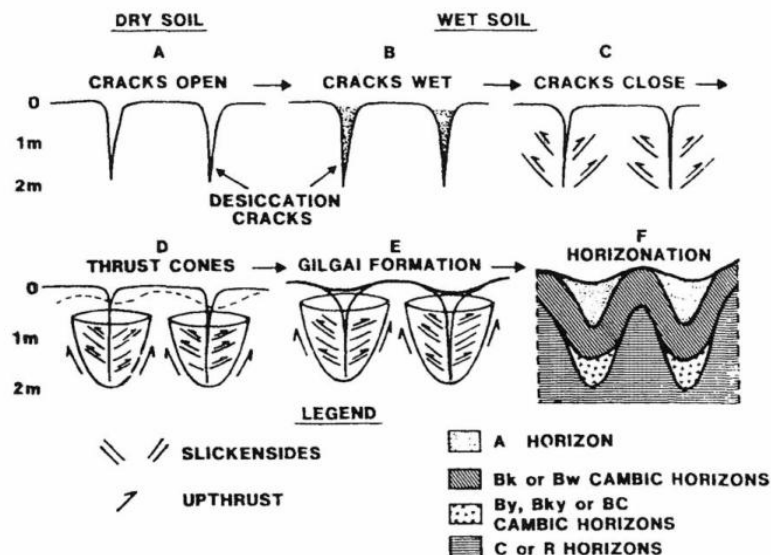


Fig. 2.6. Schematic illustration of possible stages (A-F) in the formation of slickensides, gilgai and cyclic horizonation (Wilding and Tessier, 1988).

出典: VERTISOLS AND TECHNOLOGIES FOR THEIR MANAGEMENT, N. AHMAD, A. MERMUT, ELSEVIER, 1996

図 2.1.2 土壌力学モデル(Wilding & Tessier, 1988)

2.1.2 過去の建設工事で遭遇した特殊土の事例

膨潤性土が建設事業に与える事例として、住宅等の建築物の変状・クラック、道路表面の変状・舗装の損傷、盛土の変状・のり面の崩壊、切土斜面の表層崩壊・すべり破壊、水路の法面部の崩壊とそれに伴う護岸の損傷、擁壁や埋設構造物壁面の損傷・崩壊、トンネルのライニング・舗装の損傷・崩壊があげられる。

これらの問題は、建設から数か月以内に発生するケース、3～5年かけてゆっくりと発生するケース、土壌の水分含有量を変化させる事象が発生した際に表面化するケースなどがあるが、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ため、膨潤性土が分布する地域における事業の実施にあたっては慎重な調査計画・設計検討・施工・維持管理が必要である。本節に示す種々の事例を参照しつつ、対象地域で問題となっている事例の収集を行い、必要な対応の検討を行う。

[解説]

2.1.2.1 建築物・住宅の事例

住宅、モーター、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構造、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(Popa, 1997)。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。

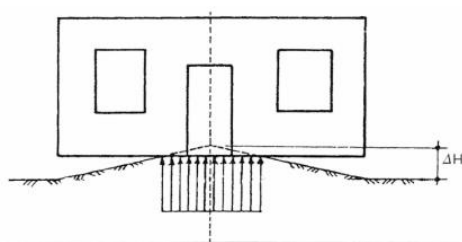


Figure 25.3 Dome-shaped heave disturbance.

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

図 2.1.3 ドーム状の隆起変状

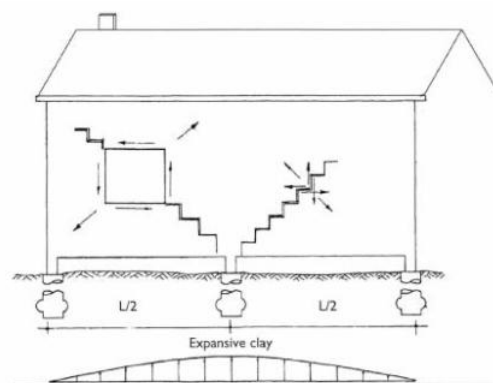


Figure 25.4 Differential heave disturbance (structure subjected to center column heave).

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

図 2.1.4 ドーム状の隆起による住宅の被害パターン



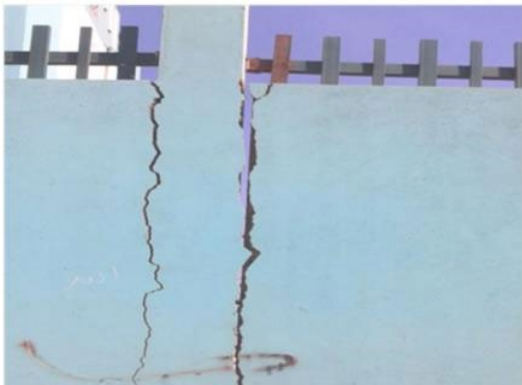
出典: Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali Al-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, Taylor & Francis(2006)

図 2.1.5 家屋の被害例(壁のクラック)



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

図 2.1.6 家屋の被害例(基礎のクラック)



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 2.1.7 家屋の被害例(壁のクラック)



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 2.1.8 家屋の被害例(壁のクラック)



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 2.1.9 家屋の被害例(基礎)



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 2.1.10 家屋の被害例(床)

2.1.2.2 道路の事例

水に敏感な膨潤性土の上に道路を建設することは、しばしば大きな問題となる。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となる。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。ひどい場合には、道路表面全体が崩壊する。図 2.1.11 には膨潤性土による道路の変状がどのように起きるか説明している。降水や道路周辺などの散水等により周辺地盤が膨潤し、道路片部では隆起が生じる。時間の進行と共に道路中心の含水状態は次第に高くなり、道路が隆起し始める。乾期には道路の外側では乾燥が始まり沈下が生じ、結果として道路中央部の隆起が一番大きくなる。道路の中心部は乾期でも水分の流出が生じにくいため、収縮が生じず、次の雨期に更なる水分移動により隆起が進行する。

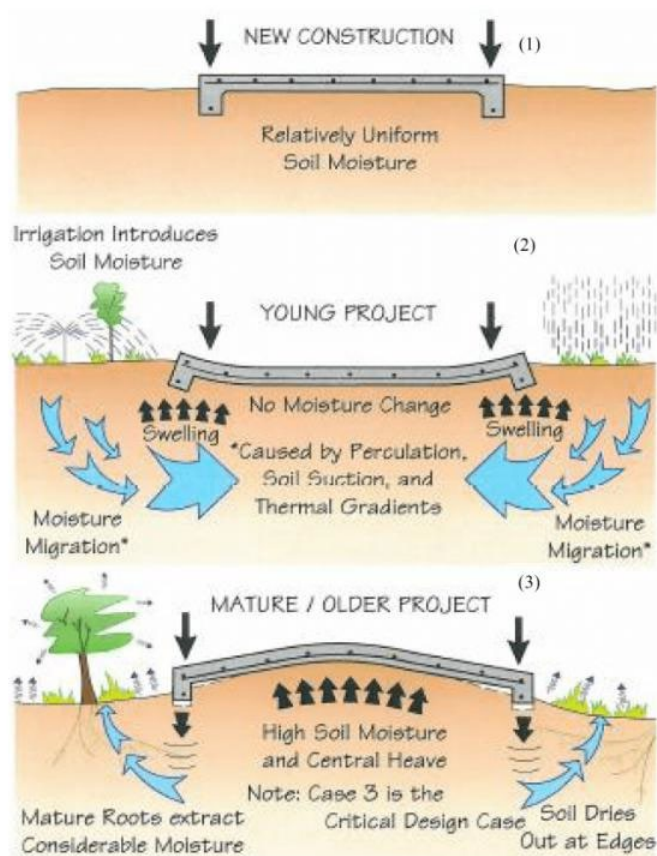


Figure 2.5 Damage progression under expansive soil. (1) New foundation construction above expansive soil, which often has relatively uniform soil moisture. (2) Water from irrigation and rainfall moves under the perimeter of the foundation, resulting in edge lift. (3) Many years after construction, the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

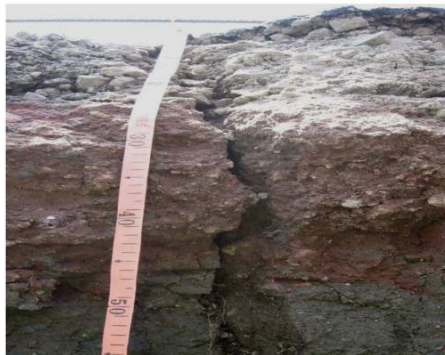
出典: Adverse Effects of Expansive Soils on Road Infrastructure and Evaluation of Chemical Remediation Techniques, Hayder Abbas Hasan(2019)

図 2.1.11 道路の変状の進行



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

図 2.1.12 道路の被害事例(うねり)

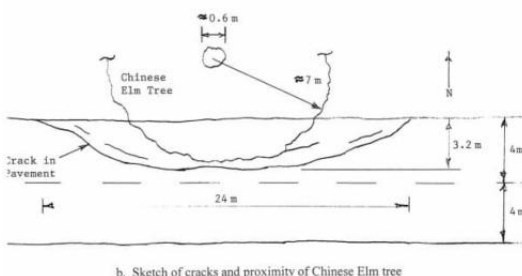


出典: Evaluation of Damage to a Road and Sports Complex on Expansive Clays, M. B. Mgangira, P. Paige-Green(2008)

図 2.1.14 道路クラックの断面



a. Photograph looking west showing cracks in westbound lane and proximity of Chinese Elm tree



b. Sketch of cracks and proximity of Chinese Elm tree

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

図 2.1.16 樹根による道路のクラック



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

図 2.1.13 道路の被害事例(クラック)



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

図 2.1.15 クラックの深度方向伝搬



a. Looking north along west curb



b. Looking north along east curb



c. Looking north at both curbs

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

図 2.1.17 樹根による道路のクラック



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 2.1.18 未舗装道路の泥濘化

2.1.2.3 盛土の事例

インドネシアの工業団地では法面掘削に伴い粘土頁岩がスレーキングして斜面崩壊が生じた（図 2.1.19 参照）。斜面崩壊対策として押さえ盛土の対策が行われたが、押さえ盛土は乾期に大きなひび割れが発生し、その対策としてひび割れた斜面にブルーシート保護を行ったが、雨期に盛土はほぼ全壊するすべりが生じた。膨潤性土は盛土として施工された場合、その膨潤性は原位置の状態よりも 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 2.1.21 に示す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行われると言うことである。



出典: JICA 調査団

図 2.1.19 盛土斜面の被害(インドネシア)



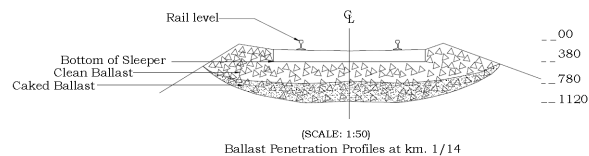
出典: Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review, Samuel Y. Amakye, Samuel J. Abbey(2021)

図 2.1.20 道路盛土斜面のすべり破壊



出典: JICA 調査団

図 2.1.21 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 2.1.22 インド鉄道のバラスト貫入

2.1.2.4 斜面の事例

一般に切り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。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。膨潤性土が分布する切土では想定外に大きな地すべりを誘発させ、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 (Clayshake) が分布しており、この層を切り土すると数日でスレーキング風化が始まり、切り土前は N 値が 60 以上あっても、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注意しなければならない。

図 2.1.27 に示すように膨潤性土の切り土斜面は色々な形態ですべりが生じる。特にすべりが斜面上流側に順次拡大することがあるので、斜面からの水の浸透を制御するような対策では広範な範囲を対策しなければならない可能性があるので注意する。



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

図 2.1.23 切り土斜面の崩壊



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

図 2.1.24 斜面の崩壊



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 2.1.25 斜面の崩壊



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 2.1.26 Clay shale 切り土斜面の崩壊

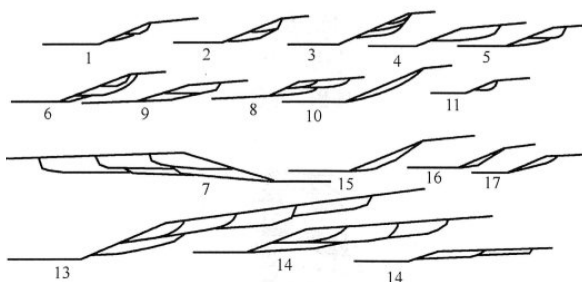


图 7-8 滑坡体形态素描图

図 2.1.27 膨潤性土の斜面崩壊パターン

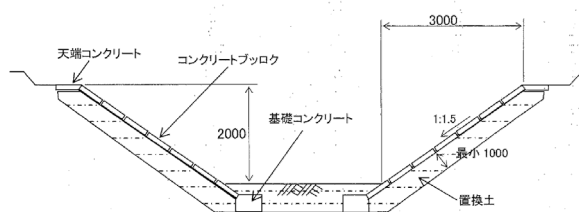
2.1.2.5 灌漑水路、運河の事例

灌漑水路、運河水路地盤に膨潤性土が分布する場合、その膨潤性によって乾燥収縮亀裂や不規則な隆起がその法面部に生じたり、地中の粘着力の変化によってすべり破壊が発生したりするなどの問題が発生することがある。カンボジアの灌漑水路の事例では対象地盤が分散性土の地域であったが、コンクリートライニングパネル背面の置き換え土に膨潤性土が使用されたために法面のはらみだし、コンクリートパネルの損傷の被害が発生した。置換土は分散性土ではないことをクラム試験によって確認していたが、同地域での膨潤性土の被害事例がなく、膨潤性土のリスクを想定していなかったために発生した被害となっている。分散性土、膨潤性土は同じ母岩・鉱物に起因することがあり、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、逆のケースもあるため、注意する必要がある。



出典: JICA 調査団

図 2.1.28 灌漑水路の被害(カンボジア国)



出典: JICA 調査団

図 2.1.29 水路の設計断面

2.1.2.6 擁壁・埋設構造物の事例

擁壁、暗渠やシェルターなどの埋設構造物は、垂直方向の膨張力のみならず、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力は高い値に達し、擁壁の大きな動きや剛性構造物のひび割れを引き起こす。図 2.1.30 の (a)と(b)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る。この水路は先に掘削し、現地で水路作成後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、想定外の膨潤性土圧が作用し、水路に損傷を与えている。他の箇所では膨潤性土圧と団地盛土からのすべりが生じた水路が倒れ込んでいる。また、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 2.1.30 の (c)と(d)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のが観察された。この変状は毎年繰り返されていると考えられる。



(a) 排水施設の被害(インドネシア)



(b) 排水施設の被害(インドネシア)



(c) 鉄道盛土のカルバート側壁の膨潤圧による変状
(インド)・乾期



(d) 同・雨期

出典: JICA 調査団

図 2.1.30 擁壁・埋設構造物の膨潤性土による変状事例

2.1.3 計画調査段階における対応

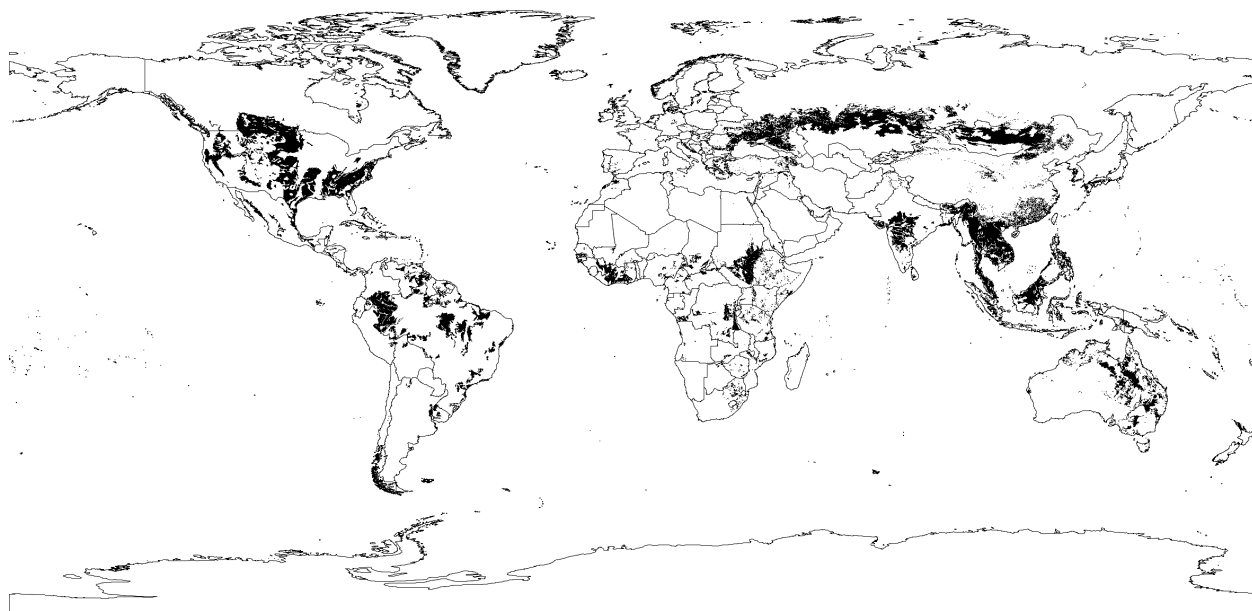
計画調査段階では、事業の計画地に膨潤性土が分布しているか適切に判断し、対策の検討の必要性を判断する。膨潤性土はその形成過程から、膨張性粘土鉱物を含む母岩が分布し、乾期と雨期を有する乾燥地域や半乾燥地域に広く分布している。分布域の確認には本ハンドブックに示す膨潤性土分布図・リスクマップから当該地域のリスクを把握し、適切な調査・試験によって対象地に分布し、事業に関わる土質についてその膨潤性の有無を把握する必要がある。

膨潤性土を正しく判定する方法は、力学的に膨潤量・膨潤圧を測定する試験であるが、対象地点で全ての土壌に対して力学試験を実施することは工期・費用の点から困難である。このため、現場踏査段階では現場における簡易判定手法、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、膨潤性が疑われる土壌に対しては詳細な判定として力学試験による判定方法など、各段階で適切な手法を選定する必要がある。

〔解説〕

2.1.3.1 推定特殊土分布図

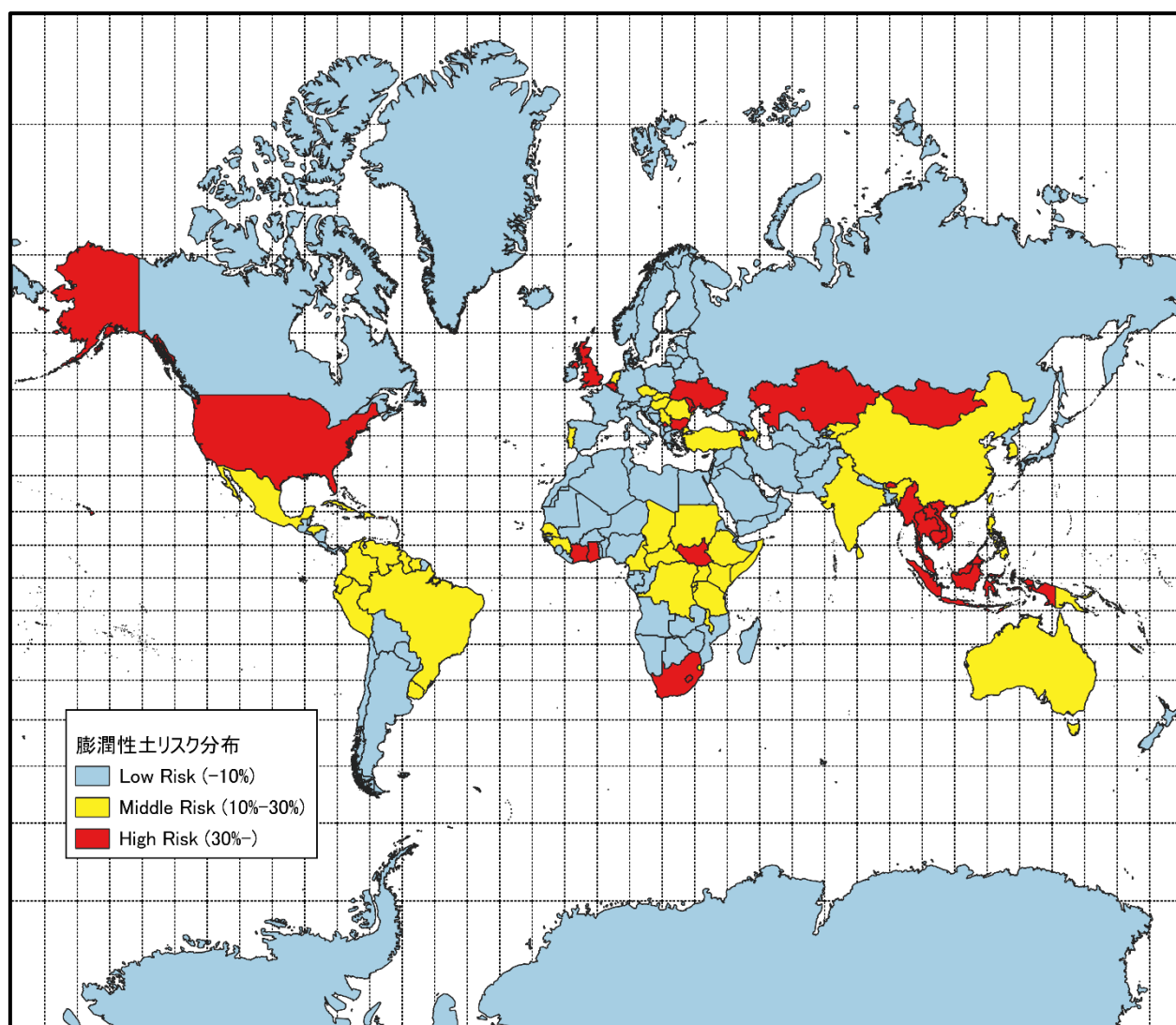
膨潤性土が分布する国は、米国（テキサス州、カリフォルニア州）、アジア（タイ・カンボジア・インドネシア）、インド（デカン高原、ブラックコットンソイル）、オーストラリア、アフリカ（ナイジェリア中央部および北部地域、スーダンナイル川流域、南アメリカ、ベネズエラオリノコ川流域）、中国（四川盆地、黄土高原の一部地域）、ヨーロッパ（フランス）などがある。関連する土壌のデータベースならびに各国の膨潤性土に関する文献を基に作成した分布図を図 2.1.31 に示す。



出典：JICA 調査団

図 2.1.31 膨潤性土の分布図

また、図 2.1.31 に示した分布図を基に国ごとに分布する面積の割合を算出し、各国ごとに面積割合を算出し、リスクの度合いとして図化し、図 2.1.32 に示す。本図も参照にリスクがあると判断される国で事業を実施する場合には、特に膨潤性土の有無について十分な調査を実施する必要がある。



出典：JICA 調査団

図 2.1.32 膨潤性土の分布リスク

2.1.3.2 膨潤性土の判定方法

(1) 現場踏査時の判定

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。クラックの深さは数 10cm に及ぶ。また、ギルガイなど膨潤性土特有の地形を形成する。

現場踏査段階では建設地点の近場で土取場等、直接土を観察出来る地点を探し、土壌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、土壌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。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。

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、土壌の色が黒暗色か観察し、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。

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。

(2) 物理特性による判定

1) 判定に用いる試験方法

膨潤特性に係る土質試験の物理特性パラメータは、自然含水比 w_0 、乾燥密度 ρ_d 、アッターベールグ限界（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 I_p ）、粒度特性（細粒分含有量 F_c 、粘土分含有量 CF）、自由膨張率（DFS）がある。自由膨張率試験はインドの基準(IS)に規定されている。

表 2.1.8 膨潤性判定に用いる試験基準

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

出典: JICA 調査団

※自由膨張率試験の概要

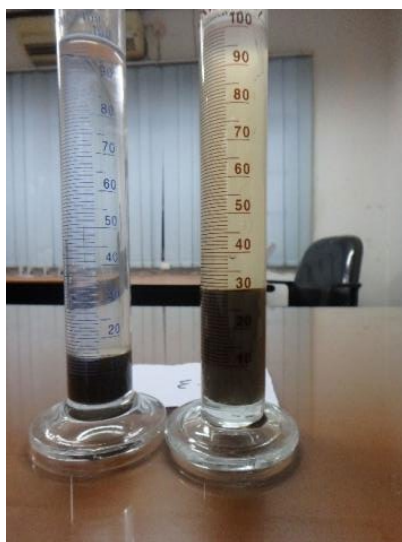
試験に用いる試料は炉乾燥した土を 0.425mm のふるいで通過させた試料である。100ml のメスシリンダー2 本に、ひとつは蒸留水、もう一つにはケロシンをそれぞれ 100ml ずつ入れる。土試料を両方メスシリンダー内に 10g ずつ入れ、空気を除去するように十分攪拌する。攪拌後 24 時間土試料を沈降させる。自由膨張率 DFS は次式で求める。

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

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 2.1.33 自由膨張率試験

2) 物理特性による判定

物理的特性による膨潤性土の判定はひとつの物理的指標では判定できない。そのため複数の判定指標の結果を総合的に判断することが重要となる。判定する指標で有効となる指標は、液性限界、塑性限界、自由膨張率である。次なる指標はコロイド分、自然含水比である。最終的な判断は膨潤率／膨潤ポテンシャルと膨潤圧力により判定する。

多くの研究者により物理特性による判定方法が提案されている。各提案式については、巻末資料に取りまとめた。

ここでは代表的な判定方法として「膨潤率」、「塑性指数」、および「自由膨張度」の判定方法を紹介する。

a) 液性限界

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 2.1.9 に液性限界による判定方法のとりまとめと提案される判定方法を示す。

表 2.1.9 液性限界による判定方法とりまとめと提案される判定方法

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	鄭家喜	李生林	公路膨張土工程	提案される 判定方法
	1997	1999	2003	2009	
低い	15~45	40~55	40~45	<40	30
中くらい	45~50	55~65	45~50	40~48	30~40
高い	>50	>65	50~55	>48	40~60
非常に高い			>55		>60

出典:JICA 調査団

b) 塑性指数

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り、多くの文献によって提案されている。表 2.1.10 に塑性指数に基づく判定方法の例を示す。

表 2.1.10 塑性指数に基づく判定方法の例

膨潤度	鄭家喜	Claudia	Bekkouch	李生林	CMC	CMC	交通部 標準	ACPA
	1999	2000	2001	2003	2004	2004	2004	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

出典: JICA 調査団

c) 自由膨張率

自由膨張率は塑性指数の次によく用いられている指標である。表 2.1.11 に自由膨張率に基づく判定方法の例を示す。

表 2.1.11 自由膨張率に基づく判定方法の例

膨潤度	IS1498 1970	IS1498 1997	劉特洪 1997	Sridharan 2000	李生林 2003	CMC 2004
	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

出典: JICA 調査団

d) 提案される判定指標の組み合わせ

膨潤性土判定するためには複数の指標で判定することが望ましいが、多くの研究者が色々な組み合わせと判定基準値を設けているので、表 2.1.12 は参考として使用する。なお、本判定基準値は BCS を想定した値で、それより膨潤性の高い膨潤性とは別途基準値を定めるのが良い。

表 2.1.12 提案される膨潤性判定法

膨潤度	液性限界	塑性指数	自由膨張率	コロイド分	自然含水比
	LL (%)	Ip (%)	FSI (%)	CC (%)	W0 (%)
低い	30	<10	<20	15	>35
中くらい	30~40	10~20	20~35	15~20	25~35
高い	40~60	20~35	35~50	20~28	15~25
非常に高い	>60	>35	>50	>28	<15

出典: JICA 調査団

e) 図による判定

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。よく使用されているものを紹介する。これを利用する場合も他の指標から総合判断する。

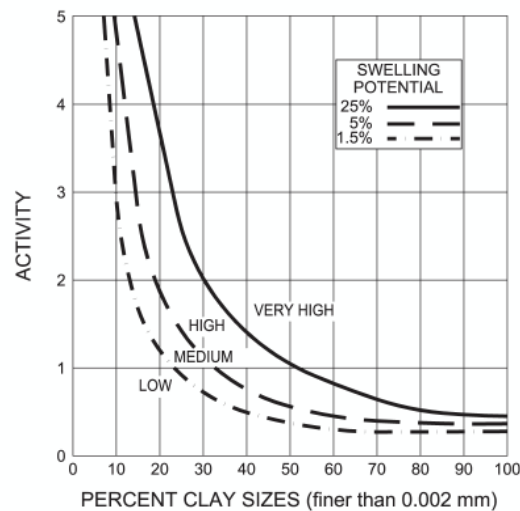


FIGURE 9.2. Swelling potential for compacted clays based on activity and percent clay (Seed, Woodward, and Lundgren 1962).

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

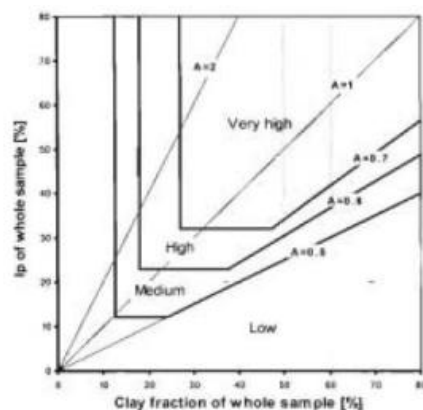


Figure 2.8 Classification chart after Williams and Donaldson (1980).

出典: A UNIVERSAL METHOD FOR ASSESSING INTRINSIC EXPANSIVENESS OF SOILS, KEBREAB BERHANE HABTE, 2004

図 2.1.35 粘土分含有量と塑性指数による判定(Williams and Donaldson, 1980)

(3) 粘土鉱物による判定

土壌中のスメクタイト系の粘土鉱物、代表的な鉱物であるモンモリロナイトの存在を特定することは、その土壌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。

モンモリロナイトの存在は分散性土にもあるので注意すべきである。また、モンモリロナイトを含まない膨潤性土もある。

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。

(4) 化学的分析による判定方法

化学的分析による判定方法として、陽イオン交換容量 (CEC)、比表面積 (SSA)、全カリウム (TP) が挙げられる。詳細は巻末資料に示す。

※膨潤性土と分散性土の化学的特性はほぼ同じなので判定に用いる場合は他の特性を確認する。膨潤性土と分散性土は酸性の環境ではその特性を示さない。膨潤性の方が中性から弱アルカリで特性が大きくなるが、分散性土はそれよりアルカリ側で特性が大きくなる。

表 2.1.13 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

2.1.3.3 力学試験による膨潤度測定試験

力学試験による判定方法として、圧密試験、COLE を求める試験、膨潤指数 EI を求める試験がある。ここでは代表的な判定方法として「圧密試験」による判定方法を紹介する。

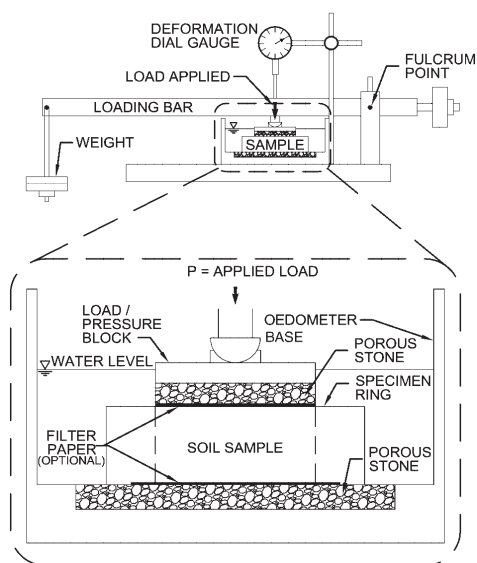
(1) 圧密試験による判定方法

圧密試験は試験が容易であること、試験装置が一般的に入手可能であることから、世界各国で活用される試験と言える。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 S_p 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応力から膨潤圧 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。

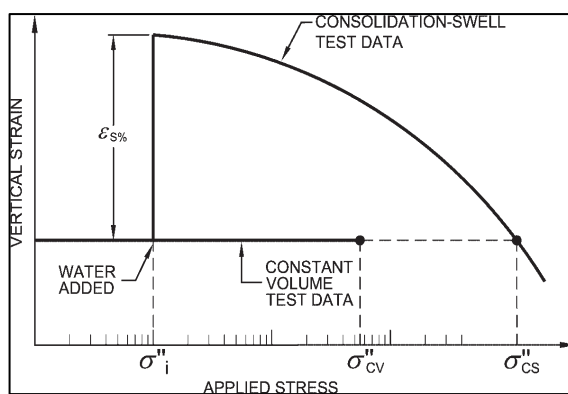
図 2.1.36 に試験の模式図を、図 2.1.37 に試験結果から整理される膨潤率、膨潤圧の関係をそれぞれ示す。膨潤ポテンシャルを測定するための圧密試験の基準は、ASTM D4546 に規定されている。この ASTM D4546 は通常の圧密試験法 ASTM D2435/D2435M とは違って、膨張性地盤専用に開発されたものである。 ε_s 、 σ_{cs} 、 σ_{cv} の結果を使用する際は、現場と試験条件の違いを認識し、実際の応力状態条件を考慮する必要がある。CS 試験においては、浸水させる載荷応力 σ_i によりひずみ膨潤率 ε_s も変化するため、設計に用いる場合には、浸水前の応力状態を考慮する必要がある。一方、CV 試験では、膨潤圧 σ_{cv} は初期応力 σ_i の影響を受けないため一定値となる。

なお、ASTM D4546 には「この試験方法の精度は、試験を実施する要員の能力と、使用する機器及び設備の適合性に依存する。」と記載されており、試験員が試験とその結果の基礎となる基本的な工学原理について教育を受けていることが重要である。



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 2.1.36 圧密試験機の模式図



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 2.1.37 膨潤率、膨潤圧の関係

判定基準試験から得られた膨潤率／膨潤ポテンシャルもしくは膨潤圧から膨潤性土を判定する目安は以下の通りである。膨潤特性は地域ごとに違うので使用する構造物の許容する変位や圧力に応じて決める。

表 2.1.14 圧密試験機を用いた膨潤性の判定基準

膨潤度	膨潤率(%)			膨潤圧(kPa)	
	不攪乱	中程度	大きめ	小さめ	大きめ
低い	<0.5	<4	<10	<50	<100
中くらい	0.5~1.5	4~8	10~20	50~100	100~250
高い	1.5~4.5	8~16	20~30	100~250	250~500
非常に高い	>4.5	>16	>30	>250	>500

出典: JICA 調査団

2.1.4 設計施工段階における対応

計画調査段階で膨潤性土が分布すると判断した場合には、建設中・建設後の膨潤性土の挙動によるリスクを最小限とするため、対策工を検討する。対策工はサーチャージ、置換工法、化学処理・熱処理による改良、水分・締固め度のコントロールなど、種々の原理に基づく工法が採用されている。対策工法の選定にあたっては対象国または各国の関連基準、既往文献や対象地区における事例などを参照し、対象地に適した対策工法を選定する。

設計にあたっては選定した対策工に応じて置換層厚、改良材の種類ならびに混合率、含水比や締固め度などの具体的な値を検討して設定し、対策を適用する範囲を明確にして図面に記するとともに、施工仕様・品質管理基準を検討して設定する。

施工段階では設計図面・仕様書に基づき、仕様に準じた品質管理を行いながら対策工の目的に鑑み、リスクを最小化するよう十分な配慮をもって施工を行う必要がある。また、膨潤性土は地域ごとに特性のばらつきが大きく、その特性によっては期待された十分な対策効果が得られない可能性があることから、対象地で対策事例が少ない、膨潤性土による問題が多く発生しているなど、リスクが高い場合には試験施工を事業に組み込むことが望まれる。

対策工の選定、各対策工の設計において検討する事項、施工時に配慮・留意すべき事項について以下に記す。

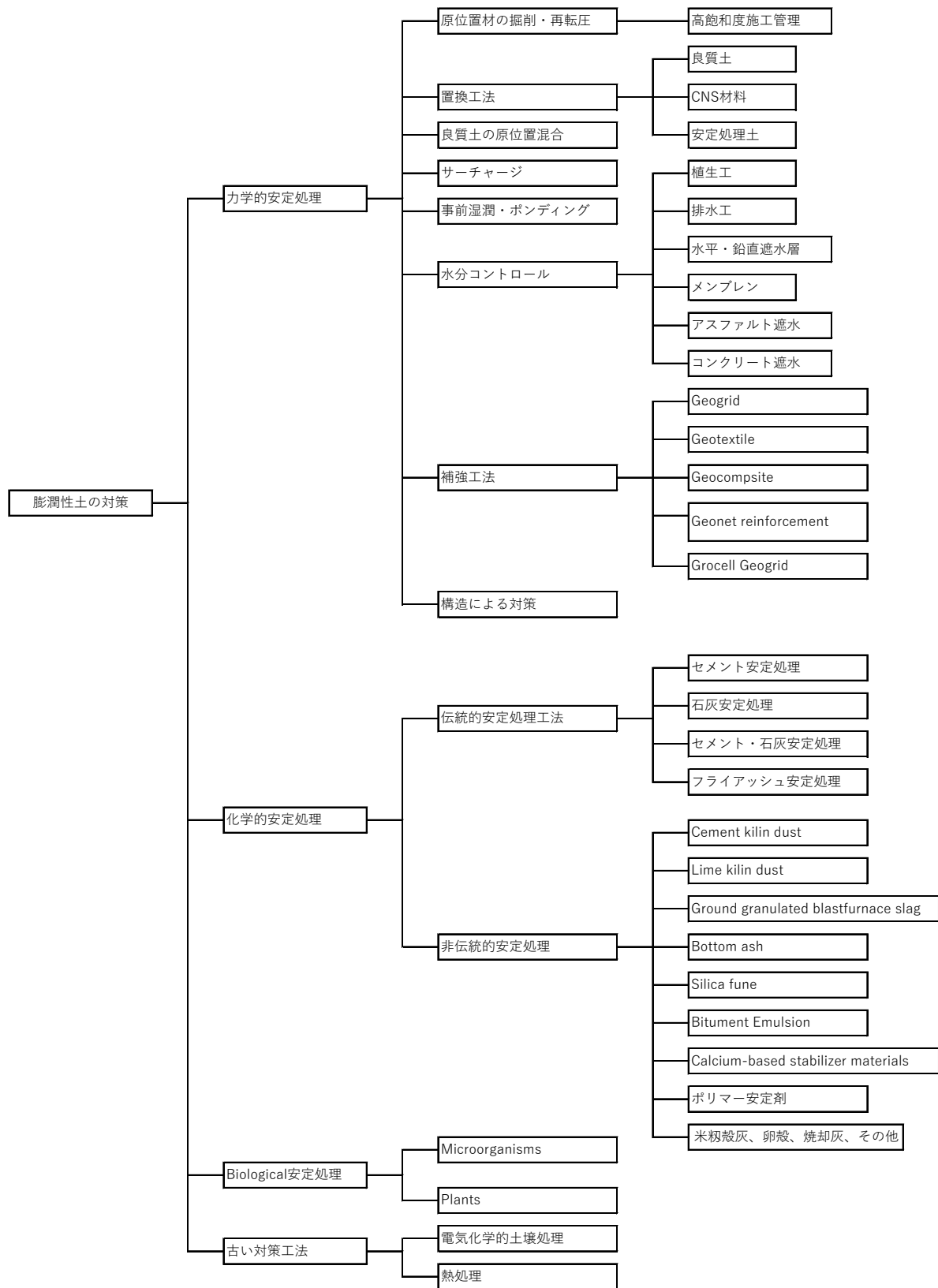
[解説]

2.1.4.1 対策工の設計に係る考慮事項、対策工法の選定

対策工の設計にあたっては、現場の土壌に関する経験と判断、選択される方法の適用限界、適切な施工法を把握し、以下の要素を考慮した上で対策方法を選択する必要がある。

- プロジェクトの規模
- 建設資金の段階的投入（例えば、池の埋め立て処理にはプロジェクトの初期投資が必要）
- プロジェクトの性質と用途（空港の滑走路、二次幹線道路、または許容される強度要件と最大容積変化のバリエーション）
- 他工法との経済性比較

膨潤性土の対策工で使用されている対策工は図 2.1.38 のようになる。代表的な対策工の長所・短所は表 2.1.15 のようになる。また、対策工選定時の留意事項は表 2.1.16 になるのでそれらを参考に適切な対策工を検討する。選定にあたっては当該国の施工事例や失敗事例を確認し、当該国で実現可能な対策工を選定するのが良い。



出典: JICA 調査団

図 2.1.38 膨潤性土の対策工法

表 2.1.15 膨張性土に適用される安定処理方法

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壌は、高密度および最適含水比未満の土壌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壌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	膨張性土を除去し、過度の隆起を防ぐために必要な深さまで非膨張性土で置き換える。 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、膨潤性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。
事前湿潤ポンディング	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壌への水の浸透を早めたりする。	土壌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	すべての細粒土は化学安定剤で処理できる。	土壌の化学特性は化学処理に悪影響を及ぼす可能性がある。

安定処理方法	処理法概要	利点	欠点
	アッシュ、有機化合物はあまり使用されない。 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。	膨張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。	化学安定剤は潜在的なリスクを伴うため、健康と安全を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。
水分コントロール工法	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

表 2.1.16 膨張性土の適用を成功させるための留意点

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。 非膨張性土壌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、亀裂のある土壌に有効である。 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、再転圧された土壌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。
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インは、湿潤時間が短くできる可能性がある。

対策方法	要点
	亀裂が深く乾燥した土壌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。 土壌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、土壌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	土壌が強度を増すには、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、土壌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壌は反応性が高い。 水はけの悪い土壌は、水はけの良い土壌よりも反応性が高い。 通常2～10%の石灰混合で土壌を安定させることができる。 土壌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、リッパースレード付きの大型トラクターでは、60cmの土壌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まれて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、粉碎、混合、締固めにおいて特に重要である。 石灰処理した土壌は、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、土壌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、土壌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しれない。 石灰に反応しない土壌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。

対策方法	要点
	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 CaCl ₂ 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。 CaCl ₂ 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。 CaCl ₂ 、硫黄分を多く含む土壌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。 粒状土壌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、基礎土壌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

2.1.4.2 対策工に係る関連基準

特殊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、特に設計法を具体的に述べてはいない。インドネシアのジオメンブレンを用いた膨潤性土の対策法はひとつの対策法に対して秀逸の基準である。米国は US Army の基準がまとまっているが、1983 年制定と古い。実務的に設計を行うならば市販の図書が推奨される。

表 2.1.17 に膨潤性土に関する設計基準の例を、表 2.1.18 に膨潤性土に関する参考図書の例をそれぞれ示す。

表 2.1.17 膨潤性土に関する設計基準の例

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)
Ethiopia	GEOTECHNICAL DESIGN MANUAL, ETHIOPIAN ROADS AUTHORITY, 2013 SITE INVESTIGATION MANUAL, ETHIOPIAN ROADS AUTHORITY, 2013
Kenya	Pavement Design Guideline for Low Volume Sealed Roads, MINISTRY OF TRANSPORT, INFRASTRUCTURE, HOUSING AND URBAN DEVELOPMENT, 2017.
Tanzania	Field Testing Manual, TANZANIA NATIONAL ROADS AGENCY, 2003 Pavement and Materials Design Manual, TANZANIA NATIONAL ROADS AGENCY, 1999 Standard Specification for Road Works, TANZANIA NATIONAL ROADS AGENCY, 2000
US Army	TM 5-818-7 TECHNICAL MANUAL FOUNDATIONS IN EXPANSIVE SOILS, HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF 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 Noted 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	鐵路弱膨張土路基填築工芸試験工作指南; 上海鐵路局著; 中国鉄道出版社(2012)
中国	新建時速 200 公里鐵路改良膨張土路基施工技術; 李慶鴻・王炳龍・俞峰編著; 李慶鴻主編; 中国鉄道出版社(2007)
New Zealand	NZS3604, IDENTIFICATION AND ASSESSMENT 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 2.1.18 膨潤性土に関する参考図書の例

参考図書	出版社
2021 International Tiny House Provisions: Code, Commentary and Standards for Design, Construction and Compliance R403.1.8 Foundations on expansive soils., R403.1.8.1 Expansive 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 ENGINEERING, 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

2.1.5 コンサルタント、施工業者の業務上の留意点

コンサルタントは計画・調査・設計段階で事業の計画地に膨潤性土が分布するかの確に判断し、膨潤性土の挙動によって発生するリスクを最小限とすることを目的として、調査・試験を行い、必要に応じて適切な対策工を計画・設計する。対策工は施工時に必要となる試験、品質管理方法、施工上の配慮を検討した上で、施工業者がリスクに応じた必要な経費を見積もれるよう、入札図書に反映する。施工監理においては対策工が仕様書に準じて適切に施工されているか、施工状況の確認、品質管理試験（原位置ならびに室内試験）を通して管理する。

施工業者は膨潤性土の特性とリスクを把握し、契約図書に準じ、必要な試験・品質管理を行いつつ、膨潤性土に配慮した適切な施工を行う。

[解説]

2.1.5.1 入札図書作成にあたっての留意事項

事業の対象地で膨潤性土が分布する場合には、入札図書作成にあたって以下の事項に留意する。

- 周辺部の調査結果から盛土材料に膨潤性土が混入するリスクがあると判断した場合には、当該地の膨潤性土を正しく判定できる品質管理試験方法、基準値、頻度を規定し、技術仕様の品質管理方法にその内容を含める。
- 舗装工の路床や、建屋等構造物の基礎部に膨潤性土が分布するリスクがあると判断した場合には、施工基面の造成面の写真の記録、立ち合いによる確認・承認の規定を行うなど、膨潤性土が分布する想定外のリスクを防止するための規定を技術仕様を含める。
- 膨潤性土の対策、施工方法に係る技術的知見は一般的な地盤、土質材料に係る技術的知見と比較して少ない研究・施工事例に基づくものであり、関連する設計基準に準じた場合でも想定外の事象が発生するリスクが相対的に高いため、対策工の検討にあたっては十分な調査を実施し、試験施工の実施も考慮した上で計画・設計する。
- 膨潤性土を良質土にする置換工を施工する場合には、その範囲ならびに深度を明瞭に規定し図面に示すとともに、埋め戻しの際の材料品質、締固め度等の基準とともに水処理に係る配慮など、リスクを最小化するための規定を技術仕様を含める。
- 膨潤性土の地盤・土質改良を施工する場合には改良材の使用、配合率の仕様、もしくは配合試験の要件と判断方法に係る規定を技術仕様を含める。

2.1.5.2 施工時の品質管理における留意事項

施工管理に携わる技術者は、施工の各段階で適切な配慮ができるよう膨潤性土の特性、表流水や地下水の変動に伴う乾湿繰り返しによって膨張収縮挙動が発生することを十分に理解する。また、膨潤性土を目視・触手で的確に判断できるように工事開始前に対象地で分布する膨潤性土の特性（色・物理特性など）を確認、把握しておくことが重要である。膨潤性土に係り配慮すべき事項につき以下に示す。

- 膨潤性土は地中の地下水の予期していなかった変動によって膨張収縮挙動が発生し、構造物に損傷を与えることがある。施工時に局所的な湧水や既設管がある場合、植物根が構造物の影響範囲に入ってくる可能性がある場合などには特に留意し、影響を検討したうえで適切に対応する。
- 施工時には膨潤性土の特性に鑑み、動態観測（施工基面に沈下板の設置と定期的な計測の実施など）の実施の必要性について検討する。動態観測を実施し、計測結果から膨潤性土の挙動を観測した場合には、構造物への影響を検討した上で必要な対策を実施する。
- 膨潤性土の施工にあたっては、施工状況を高い頻度で記録することが想定外の事象が発生した場合に対策を検討するうえで有用である。また、施工データ、品質管理の記録をデータとして残すことは今後の事業の実施にあたっての膨潤性土に係るリスク回避、研究の発展に向けて有用であるため、積極的に施工状況を記録し、データを実施機関に残すとともに、学界での発表などを通して関係者に共有していくことが望ましい。

2.1.6 維持管理段階における対応

膨潤性土が分布する地域において、建設した構造物がその機能を保持し続けるよう適切な維持管理を実施する必要がある。維持管理にあたっては、調査・設計・施工の各段階の記録等を参考に調査及び点検・保守や、必要に応じた補修及び復旧を行う。

[解説]

(1) 維持管理の目的

維持管理は、工事完了後の構造物（道路・水路・建屋等）が必要な機能を十分に発揮し、構造物の安全性を保ち続けることを目的として実施する。

膨潤性土が分布する地域では「2.1.2 過去の建設工事で遭遇した特殊土の事例」に示したように、膨潤性土の挙動によって、盛土表面・舗装面などの隆起と不陸の発生、舗装の損傷や建屋の変状、壁面のクラックの発生、切土・盛土法面の表層破壊やすべり破壊、埋設構造物の損傷などが発生する可能性がある。膨潤性土によるこのような変状はできるだけ早期に見出し、必要な対応を遅延なく実施することが必要である。

(2) 維持管理の留意点

膨潤性土の挙動に起因して発生する構造物の変状は様々であるが、施工後直ぐ問題が発生することもあるが、施工後複数年経過してから問題となる場合もある。対策後、構造物周辺の環境変化により、想定しない所からの水分供給があったり、未対策な所でも膨潤性土となり、その影響が本体に影響したりすることがある。また、環境整備で植樹した大きく成長する樹木は根からの水分吸収により水分状態を変化させ、水分低下による沈下が発生することもある。逆に、樹木伐採も自然環境で水分が調和された環境が変化し、新たな膨潤による隆起が生じる可能性がある。

特に道路構造物では舗装の損傷が構造物の機能に深刻な影響を与えることが多い。供用時に縦断方向のクラックなど、膨潤性土に起因する典型的な損傷が確認された場合には変状の現状調査、調査・設計・施工時のデータの確認を行い、今後想定される変状の範囲・その度合いの検討を行った上で、必要な補修対策を計画・実施する。

(3) 点検・調査

進行すると深刻な損傷となる可能性がある構造物の変状を早期に把握し、適切な措置及び補修の要否を判断するために実施する。点検にあたっては特に膨潤性土の問題の発生事例に鑑み、特に注意して点検する箇所・着目点を事前に抽出し、点検者が把握しておくことが重要である。例えば道路構造物では路床土の膨張収縮に伴う舗装表面の亀甲状のクラックの発生や、盛土構造物では横断方向の膨潤性土の不平等な膨張収縮に起因する縦断方向のクラックの発生などに留意する必要がある。

ODA 事業の実施にあたっては引き渡しの前に事業者が実施する必要がある日常の点検・調査と留意事項をまとめ、適切な維持管理が行われるよう伝達しておく必要がある。

2.2 分散性土

2.2.1 概要

分散性土は、水に触れると粘土粒子が水に溶けだし、水中に浮遊する土壌である。分散性土が水と接触すると、粘土成分は単一の粒子のように振る舞い、最小限の電気化学的引力を持つため、他の土壌粒子と結合または接触しない。分散性土は視覚的に分類、あるいはアッターベルグ限界および粒度等の物理特性で通常の侵食に耐性のある粘土と区別することが簡単ではなく、ピンホールテストおよびダブルハイドロメーターテストで識別を行う。

分散性土の研究は堤防やダムのパイピング現象に関係するものが多い。道路や斜面で土壌が溶け出し、カンボジアで「ドラゴンホール」呼ばれる空洞ができる被害が多いが、その研究は多くない。パイピングによるダムや堤防の決壊は人命や家屋等に多大な被害を与えるため、研究が多いと考えられる。研究テーマとしては物理的、化学的に何故分散現象が生じるか学術的に追求しているものが多く、対策工に関する工学的研究は膨潤性土と比べると極めて少ない。このため、分散性土が分布する地区で適切な対応を行うためには、問題が発生する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。

[解説]

2.2.1.1 分散性土の特徴

(1) 一般的な特徴

分散性土の典型的な特徴は以下のとおりである。

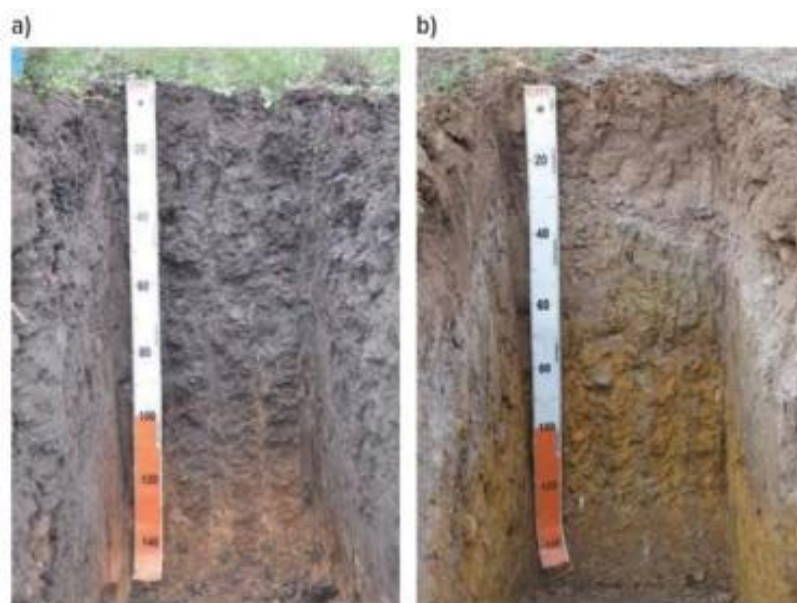
- 水と接触すると粘土粒子が溶け出して浮遊（分散）する土。
- 粘土粒子間の反発力が引力を上回ることによって凝集が崩れ、コロイド懸濁液を形成。
- 静止水中でも分散が起き、侵食やパイピングに非常に脆弱。
- 閾値速度がなく、流水の強さに関係なく侵食される。

土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。非分散性土では流水による侵食が起こらない一定の閾値速度が存在する。個々の粒子は互にくっつき、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。分散性土には中程度から高い粘土質の含有量が含まれるが、分散性土と非分散性土の粘土分率に大きな違いはなく、粘土粒子が10%未満の土では分散パイピングを支えるのに十分なコロイドが無い可能性がある。

分散性土は通常の土壌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%）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。

オーストラリアでは分散性土はオーストラリアの土壌分類システムによる「灰色 Vertosols(Vertisols とは少し違う名称)」と Sodosols からなっている。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。



a) Sodic な下層土を持つ灰色の Vertosols。Vertosols はクラックが生じやすい粘土である。

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。

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

図 2.2.1 オーストラリア分散性土

(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主として以下のものがある。

- 雲母 (Mica) : すべり面形成に関与。
- カオリナイト (Kaolinite) : 風化の進んだ熱帯土壌に多く、粒子間の結合が弱い。
- バーミキュライト (Vermiculite)
- モンモリロナイト (Montmorillonite) : 膨潤性が高く、分散性にも関与。

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。

土壌中の粘土鉱物は環境や土壌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壌に多く含まれ、オキシソルやアルティソルの一部に見られる。粘土鉱物は土壌の化学的機能に加えて物理的機能も持ち、土壌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・母材の説明が以下のようにある。

- 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。花崗岩由来の土壌は高い 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。
- 運搬された土壌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壌はほぼ常に分散性となる。
- 気候 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土壌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壌は 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。
- モンモリロナイトを多く含んでいる土壌は膨潤性土だが、 Na^+ を多く保有していると分散性土となる。

(3) 分散のメカニズム

分散性土における分散のメカニズムを以下にまとめる。

- 粘土粒子の拡散二重層が厚くなり、反発力が強まる。
- 土壌構造、間隙、粘土鉱物、水分量、有機物、温度、チキソトロピー、溶液中のイオン組成などが影響。
- 表面の膨潤によって粒子間の結合力が低下し、侵食が始まる。
- 分散は静水中でも起こるため、単なる「碎ける」現象とは異なる。
- Na^+ が多くてもモンモリロナイトが無ければ分散しないことがある。

2.2.2 過去の建設工事で遭遇した特殊土の事例

分散性土が建設事業に与える事例として、ダムの亀裂（パイピング）・崩壊、道路や堤防の陥没（ドラゴンホール）、法面の侵食などが挙げられる。

これらの問題は、分散性土を水理構造物に使用されるときなど、建設による地形改変、豪雨などによる表流水・地下水の変動などによって主として表面化する。

分散性土による被害は、メンテナンス上の問題が軽微な場合もあるが、内部侵食は早期発見が難しく、また小規模な表面侵食から大きな損傷に拡大するなど、構造上の大きな損傷を引き起こすため、分散性土が分布する地域における事業の実施にあたっては慎重な調査計画・設計検討・施工・維持管理が必要である。本節に示す種々の事例を参照しつつ、対象地域で問題となっている事例の収集を行い、必要な対応の検討を行う。

[解説]

2.2.2.1 内部侵食破壊と被害事例

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過し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。

図 2.2.2、図 2.2.3 に、分散性土を含む材料で建設されたダムの被害の状況の写真を示す。



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 2.2.2 ダムのパイピングによる崩壊

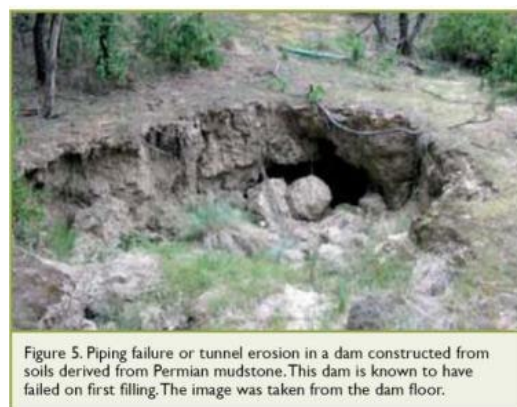


Figure 5. Piping failure or tunnel erosion in a dam constructed from soils derived from Permian mudstone. This dam is known to have failed on first filling. The image was taken from the dam floor.

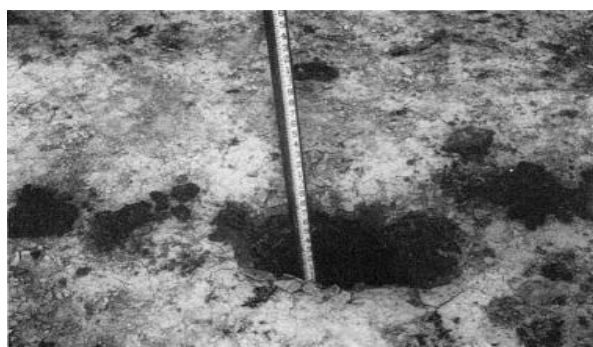
出典: Dispersive Soils and their Management Technical Reference Manual, Tasmania, 2009

図 2.2.3 ダムのパイピング、トンネル侵食

2.2.2.2 表面侵食と陥没（ドラゴンホール）と被害事例

分散性土による被害として、表面侵食や垂直または垂直に近いトンネル侵食（ドラゴンホール）が挙げられる。ドラゴンホールは文献では「jugs (jug は水入れ、水差し、つぼ、ジョッキを意味する)」と記載されている。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さまざまだが、多くの場合、ではじめは 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 2.2.4 典型的なパイピングホール



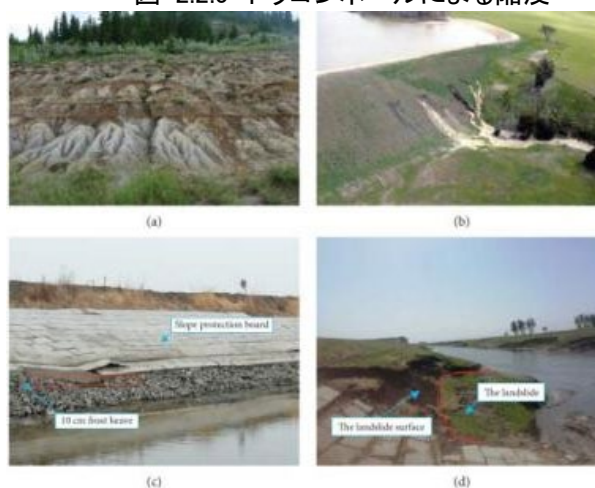
出典: カンボジア国既設道路の陥没の原因となる降雨浸透水を排除する機能性を有した排水シート敷設案件化調査, JICA

図 2.2.5 ドラゴンホールによる陥没



出典: JICA 調査団

図 2.2.6 トンレサップ灌漑事業(カンボジア)



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

図 2.2.7 色々な分散土崩壊事例

2.2.3 計画調査段階における対応

計画調査段階では、事業の計画地に分散性土が分布しているか適切に判断し、対策の検討の必要性を判断する。分散性土はその性質から、分散性粘土鉱物を含む母岩が分布し、塩類土壌など Na^+ の含有が高い土壌があるところに広く分布していると考えられる。分布域の確認には本ハンドブックに示す分散性土分布図・リスクマップから当該地域のリスクを把握し、適切な調査・試験によって対象地に分布し、事業に関わる土質についてその分散性の有無を把握する必要がある。

分散性土を判定する方法は、4つの代表的な試験法があるが、各試験法で決定力があるものは無く、複数の試験の併用で検証することが望ましい。ただし対象地点で全ての土壌に対して試験を実施することは工期・費用・設備の点から困難である。このため、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を実施し、必要に応じてピンホール試験や化学分析を行うなど、対象地で想定されるリスクに鑑み、クリティカルとなる大規模なリスクを低減する目的で適切な調査・試験方法を検討・選定して実施する必要がある。

[解説]

2.2.3.1 分散性土の分布

分散性土の世界的な分布域を示したものは特に無い状況にある。

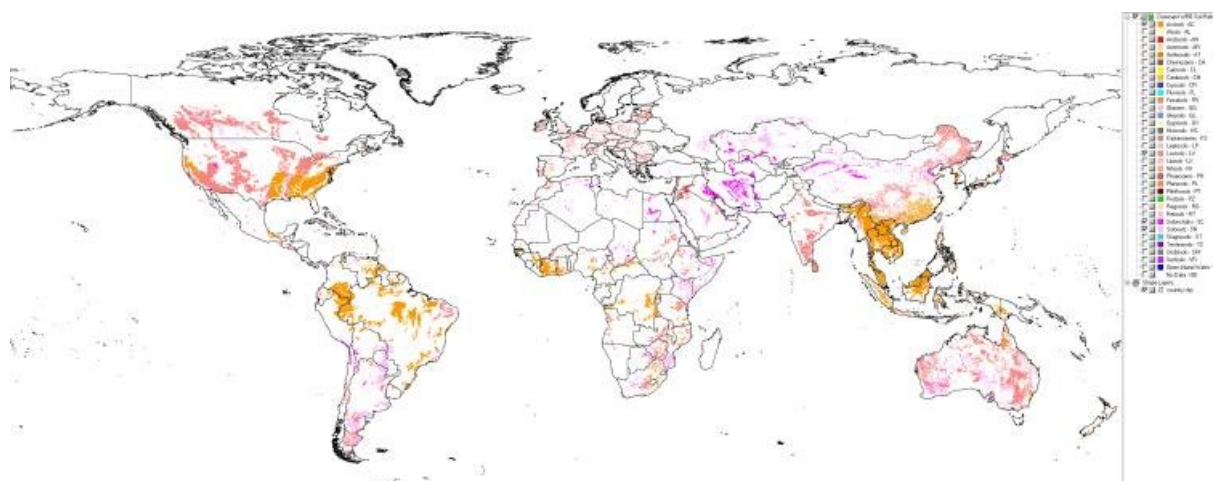
既往文献等より、分散性土が分布する国はカンボジア（メコン川とトンレサップ湖の河川流域や湿地が広がっている沖積層）、オーストラリア（タスマニア州）、タイ（北東部）、南アフリカ（Senekal dam）、米国（五大湖近辺やプレーリー地帯）、ギリシャ、インド（湿潤な気候や河川流域地域）、ラテンアメリカ、インドネシア（ジャワ島やスマトラ島などの河川流域地域）、ジンバブエ、中国（長江流域や黄河流域）、バングラデシュ（ガンジス川やブラマプトラ川のデルタ地帯）、ナイジェリア（ナイジェリア川やベニ川の流域）、イスラエル（地中海沿岸地域やヨルダン川流域など）、イラン、スペイン、ウクライナ（黒海からチェルノブイリ周辺）、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。

分散性土となる可能性が高い土壌を表 2.2.1 に示す。この分散性土となる可能性が高いと考えられる Solonetz、Solonchak、Acrisols の分布図を図 2.2.8 に示す。なお、担当地域で分散性土が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。

表 2.2.1 分散性土壌と推定される主な土壌分類(HWSD / FAO/UNESCO)

土壌分類	特徴	備考
Solonetz	Na^+ 濃度が高い Sodic 土壌	分散性の可能性が最も高い
Solonchak	塩類土壌 (Saline soil)	Na^+ が浸出すると分散性を示すことがある
Vertisols	膨潤性粘土	Na^+ が多いと分散性になる(特に豪州)
Acrisols / Luvisols / Alfisols	高温湿潤地域に分布	カンボジアなどに多く、分散性土の可能性あり

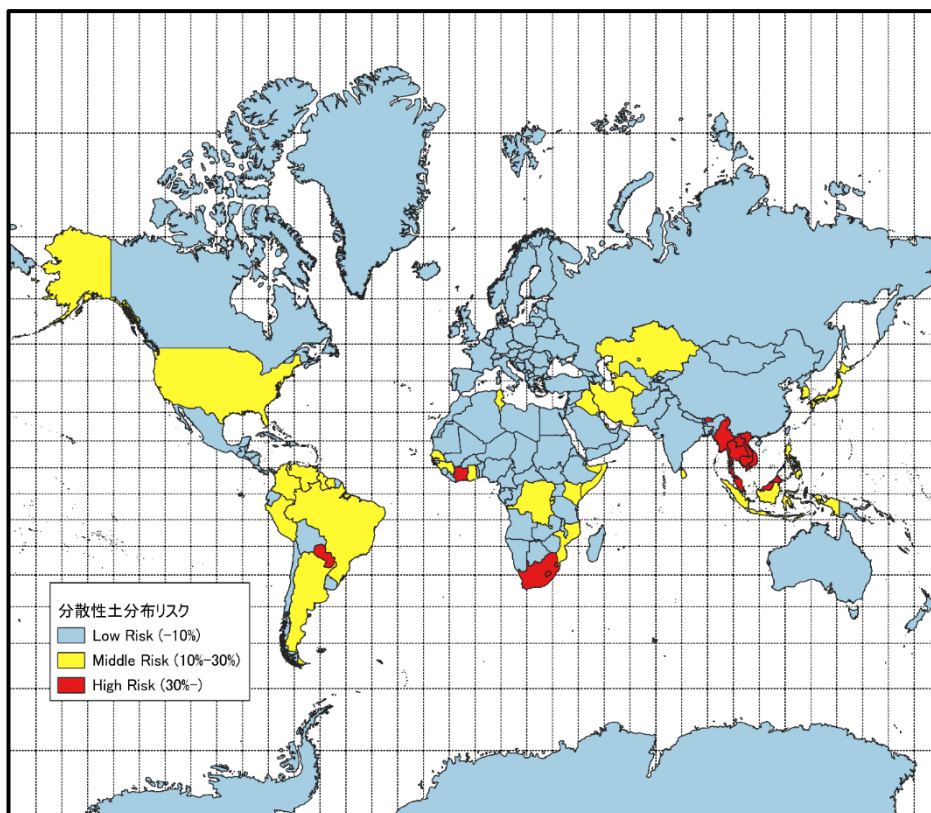
出典: JICA 調査団



出典: HWSD Ver.2.0 を用いて JICA 調査団作成

図 2.2.8 HWSD の Solonetz、Solonchak、Acrisols の分布図

また、図 2.2.8 に示した分布図などを基に、国ごとに分布する面積の割合を算出し、各国ごとに面積割合を算出し、リスクの度合いとして図化し、図 2.2.9 に示す。本図も参照にリスクがあると判断される国で事業を実施する場合には、分散性土の有無について十分な調査を実施する必要がある。



出典: JICA 調査団

図 2.2.9 分散性土の分布リスク

2.2.3.2 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。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ことが重要である。そのため、出荷および保管時には適切な防湿容器に密封する。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、複数試験の併用が望ましい。

試験方法を表 2.2.2 に示す。試験法の活用として、推奨される順番としては、ピンホール>ダブルハイドロメーター>化学分析>クラム試験の順であり、最小限でもダブルハイドロメーター試験とクラム試験は実施が推奨される。化学分析が可能であれば追加的に実施することが望ましい。

表 2.2.2 分散性を判定する試験方法

試験名	ASTM 基準	特徴・位置づけ
ピンホール試験	ASTM D4647 Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test	最も信頼性が高く、物理的侵食(パイピング)を模擬できる。 重要構造物(例:ダム)の設計時に有用。 特別な試験装置が必要で、実施可能な試験室は限られる。
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	分散率(DR)を算出する定量的試験。 比較的实施しやすく、ピンホールの代替や補完に有効。
クラム(Crumb)試験	ASTM D65 Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test 72	簡便な目視試験。 初期スクリーニングに有用だが、精度は低く一次判定向き。
化学分析 (間隙水抽出)	ASTM D6919 Standard Test Method for Determination of Dissolved Alkali and Alkaline Earth Cations in Water by Ion Chromatography	ESP, SAR などの化学的指標から分散性を評価。 精度は高いが、土木分野での馴染みが薄く、実施頻度は低め。

出典: JICA 調査団

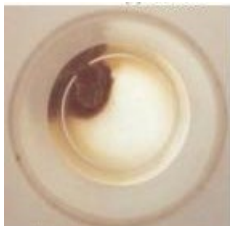
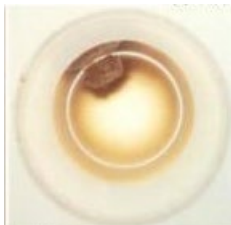
(1) クラム試験による判定

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。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。

試験方法は、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。ピンホール試験をする場合もそれと同じ条件で作成したものを使用する。

クラム試験は土壌に分散性があることを示す指標であるが、土壌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。また、一次スクリーニングとしての利用が望ましく、ダブルハイドロメーター試験やピンホール試験との併用が推奨される。

表 2.2.3 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)	 (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、広がるかもしれないが、水中に浮遊するコロイドによって濁った水は生成されない。すべての粒子は最初の 1 時間以内に沈降する。
弱分散性 (Low Dispersive)	 (b) Grade 2	ゆっくりと崩壊し、水がわずかに濁る	Grade 2 は移行グレードである。かすかでほとんど見えないコロイド懸濁液が土壌粒子の表面付近で濁水を引き起こす。雲が簡単に見える場合は、Grade 3 を割り当てる。雲が 1 つの小さな領域でかすかに見える場合は、Grade 1 を割り当てる。
中程度分散性 (Moderately Dispersive)	 (c) Grade 3	崩壊が比較的速く、水が中程度に濁る	土壌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る。雲は、皿の底に沿って土壌粒子の塊から最大 10mm 離れたところまで広がることもある。
高分散性 (Highly Dispersive)	 (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る。時には、土のかげらの分散が広範囲に及ぶため、元の土のかげらとコロイド懸濁液の界面を特定するのが困難である。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る。

出典: JICA 調査団

(2) ダブルハイドロメーター試験による判定

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時に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。

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

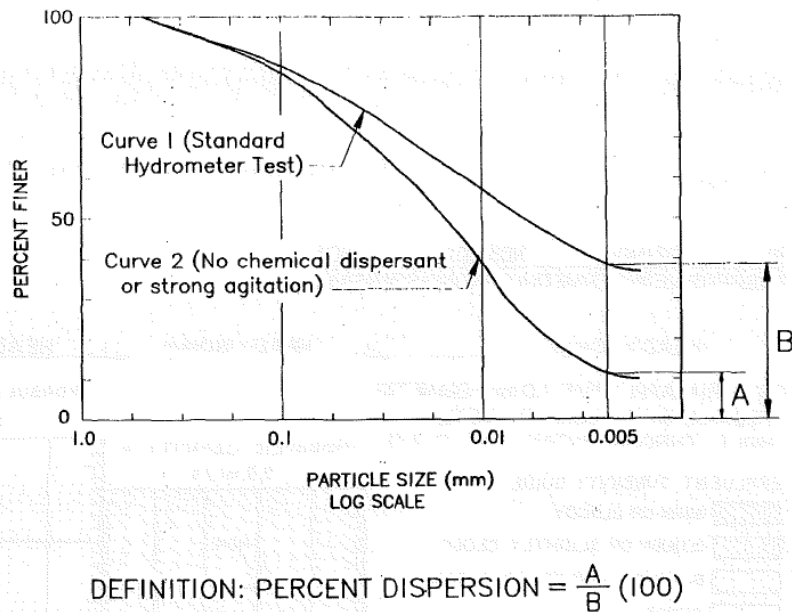


Figure 1. - Percent dispersion as determined from the double hydrometer test.

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

図 2.2.10 ダブルハイドロメーター試験の分散率の求め方

本試験による分散性の判定は Elges(1985)が決めた表 2.2.4 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。本試験方法は分散性能の予測に約 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。

表 2.2.4 ダブルハイドロメーター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

(3) 化学分析による判定

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、土壌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 による判定

ESP は土壌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 の値が高いと土壌粒子間の結合が弱まり、分散や膨潤が起こりやすくなる。ナトリウムイオンは土壌粒子表面で水和して膨張し、粒子間の引力を減少させる。

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

ここで、

- ・ 交換性 Na^+ (meq/100g 土壌)：土壌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 土壌)：土壌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。

表 2.2.5 ESP による分散性判定基準

ESP (%)	判定	特徴
<5	非分散性土壌 (Non-Dispersive Soil)	土壌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	部分分散性土壌 (Partially Dispersive Soil)	土壌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	分散性土壌 (Dispersive Soil)	土壌粒子間の結合が弱く、分散性が明確となる
25~40	分散性土壌 (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	分散性土壌 (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 2.2.6 ESP による土壌分類

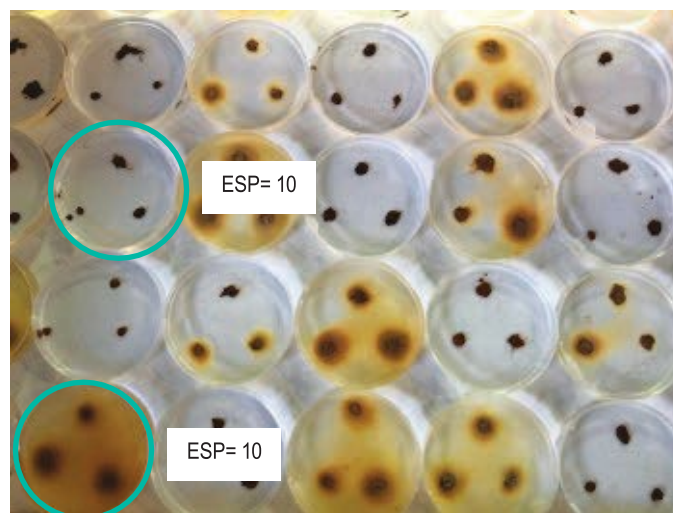
ESP (%)	土壌分類	特徴
<15%	正常土壌 (Non-saline soil)	ナトリウム濃度が低く、作物の成長に影響を与えない。
15~40%	アルカリ土壌 (Alkali soil)	高ナトリウム濃度により土壌の透水性が低下。作物への悪影響が出やすい。
>40%	ソーダ土壌 (Sodic soil)	非常に高いナトリウム濃度が原因で、土壌構造が崩壊し、排水性が悪化。地力が低く、特別な改良が必要。

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 を超える土壌は Sodic 土壌とみなし、ESP が 15 を超える土壌は強 Sodic 土壌とみなされる。「Sodic 土壌」と「分散性土壌」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、土壌が分散する決定的な ESP は存在しない。

実例より、

- ESP > 5 でも 38%は分散しなかった。
- ESP = 26 でも分散しない例あり。
- ESP < 6 でも 17%が分散したケースあり。
- 蒸留水中では、ESP 1~2%でも分散・透水性悪化のリスクあり。



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

図 2.2.11 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)

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

土壌の塩分濃度とナトリウムの割合に基づいて、土壌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。この指数は土壌の電気伝導率（EC）と交換性ナトリウム百分率（ESP）を組み合わせたもので、土壌の分散性や膨潤性、透水性の低下リスクを示す。

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

ここで、

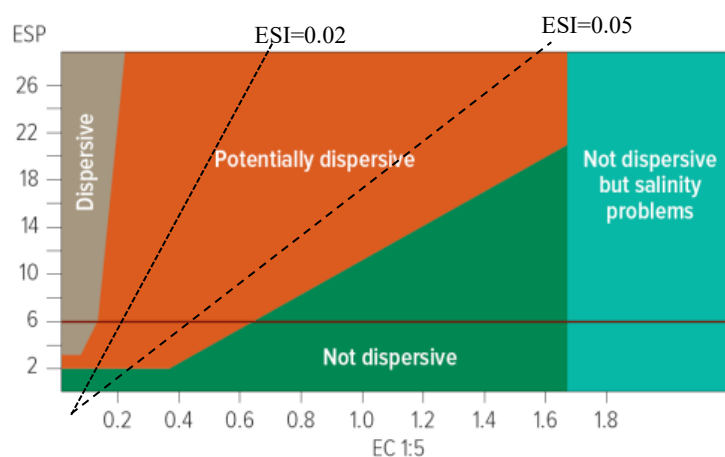
- ・ EC1.5：土壌と水を 1:5 の比率で混ぜた溶液の電気伝導率（単位：dS/m）。

表 2.2.7 ESI による分散性判定基準

ESI	土壌の安定性	特徴と影響
> 0.1	安定 (Stable soil)	土壌粒子が安定し、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)	土壌が分散しやすく、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 以下になるとは土壌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 2.2.12 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ます。



Source: Adapted from Central West CMA (2008), and Hazelton and Murphy (2016).
A more detailed version is shown in Appendix D.

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 2.2.12 ESP と EC を使った分散予測

3) SAR による分散性の判定

SAR（ナトリウム吸着比）は土壌水中のナトリウム（ 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。 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 が高いと交換性 Na^+ が増加し、粒子間の反発力が強まり、土壌が分散・構造崩壊しやすくなる。

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

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）

SAR の値による分散性の判定基準は表 2.2.8 の通りである。

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。土壌の初期診断として、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。

表 2.2.8 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)	土壌構造が安定し、分散や侵食のリスクが低い
6~12(13)	弱分散性 (Low Dispersive)	土壌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ある。
12(13)~20	中程度分散性 (Moderately Dispersive)	分散性が高まり、土壌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)	土壌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

土壌の分散性評価には、従来より ESP（交換性ナトリウム百分率）や SAR（ナトリウム吸着比）が多用されているが、これらの指標には以下のような制約がある。

- ESP や SAR ではカリウム (K^+) が無視されている。
- SAR ではカルシウム (Ca^{2+}) とマグネシウム (Mg^{2+}) が同等の効果とみなされているが、実際には凝集力に差がある。

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 2.2.9 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、実際の土壌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 2.2.9 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)	土壌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)	土壌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)	土壌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) 図による分散性の判定

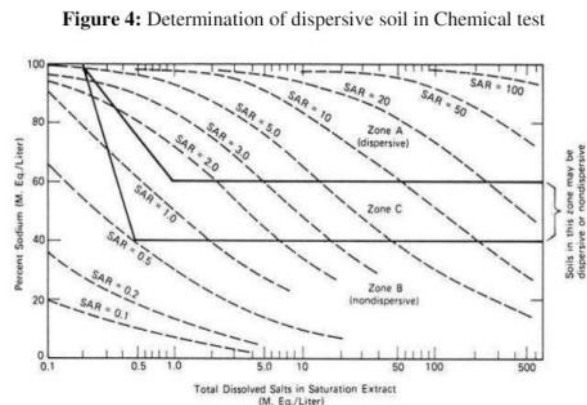
分散性土の化学的特性は数式だけでなく図を用いて視覚的に判断する方法も開発されている。特にナトリウム割合 (Na^+) や CEC (陽イオン交換容量) との関係性をグラフ化した図は分散傾向の判定に役立つ。

図 2.2.13 は、総溶解塩(TDS)と Na^+/TDS による分散性判定図である。

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

判定の考え方を以下に示す。

- Na^+/TDS が高く、TDS が低い → 分散性が高い
- Na^+/TDS が低く、TDS が高い → 安定土壌
- グラフ上に閾線が引かれており、判定はその線を基準に「安定」「不安定」「移行帯」で分類される



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

図 2.2.13 総溶解塩(TDS)と Na^+/TDS による分散性判定図

図 2.2.14 は、土壌の分散性は CEC と ESP の「組み合わせ」で決まることを視覚的に示したものである。判定領域は、通常以下のように分類される：

- 分散性が高い領域 (高 ESP × 低 CEC)
- 安定領域 (低 ESP × 高 CEC)
- 中間領域 (移行ゾーン)

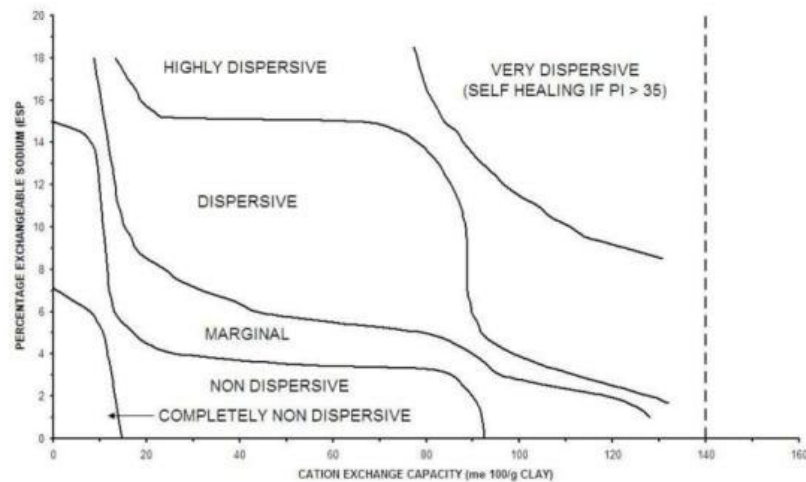


Figure 2-8: Diagram of determination of dispersion potential as a function of ESP and CEC (Gerber and Harmse, 1987)

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

図 2.2.14 粘土の CEC と ESP からの分散性判定図

また、図 2.2.15 に示すフローで判定する方法も提案されている。判定の初期段階を化学指標で絞り込み、最終判定を物理試験で裏付けるという、現場に即した診断プロセスとなっている。

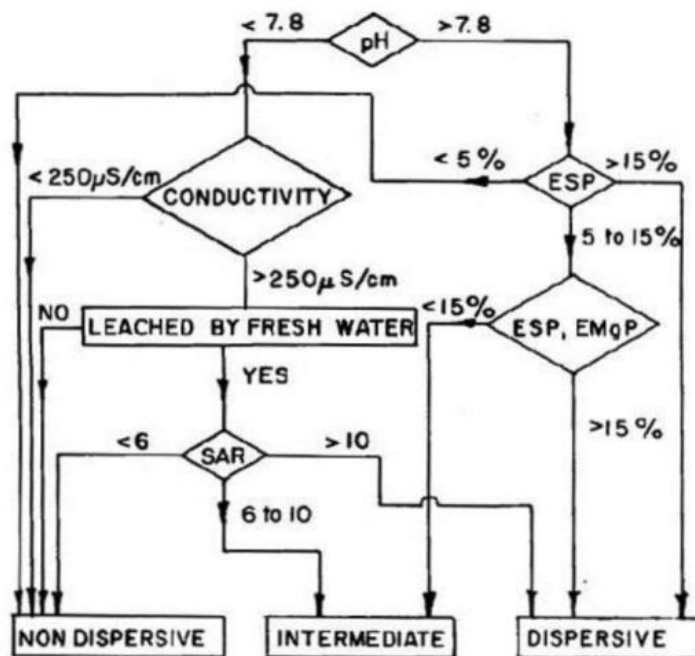


Figure 2-9: Alternative procedure for identification of dispersive soils. (Gerber and Harmse, 1987)

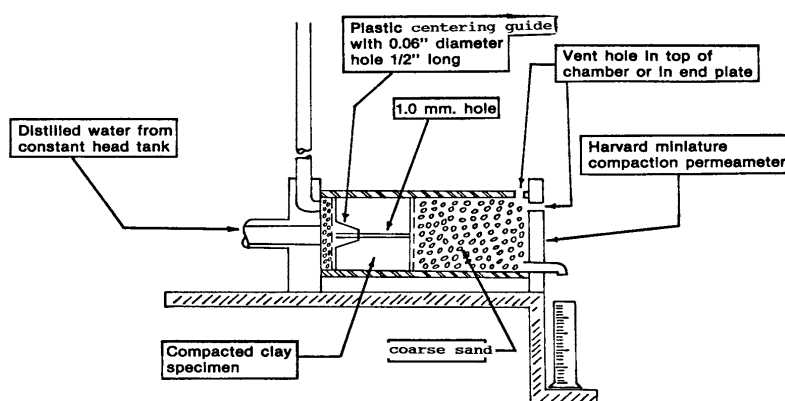
出典: THE EVALUATION OF TEST PROTOCOLS FOR DISPERSIVE SOIL IDENTIFICATION IN SOUTHERN AFRICA, AMRITA MAHARAJ(2023)

図 2.2.15 Gerber と Harmse(1987)の分散性判定フロー図

(4) ピンホール試験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 direct 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。

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 2.2.16 ピンホール試験装置の概略図(ASTM D4647)

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 2.2.10、表 2.2.11、表 2.2.12)。方法 A および方法 C では土壌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。

判定の運用上の注意を以下に示す。

- ND2 : 公共安全に関係ないプロジェクトでは、追加対策なしでも問題にならない可能性が高い
- ND3, SD : 不確実性が高く、追加試料による検証が望ましい
- D1, D2, D : 分散性が高く、フィルター、セメント・石灰安定処理など対策が必要。

表 2.2.10 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 2.2.11 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。

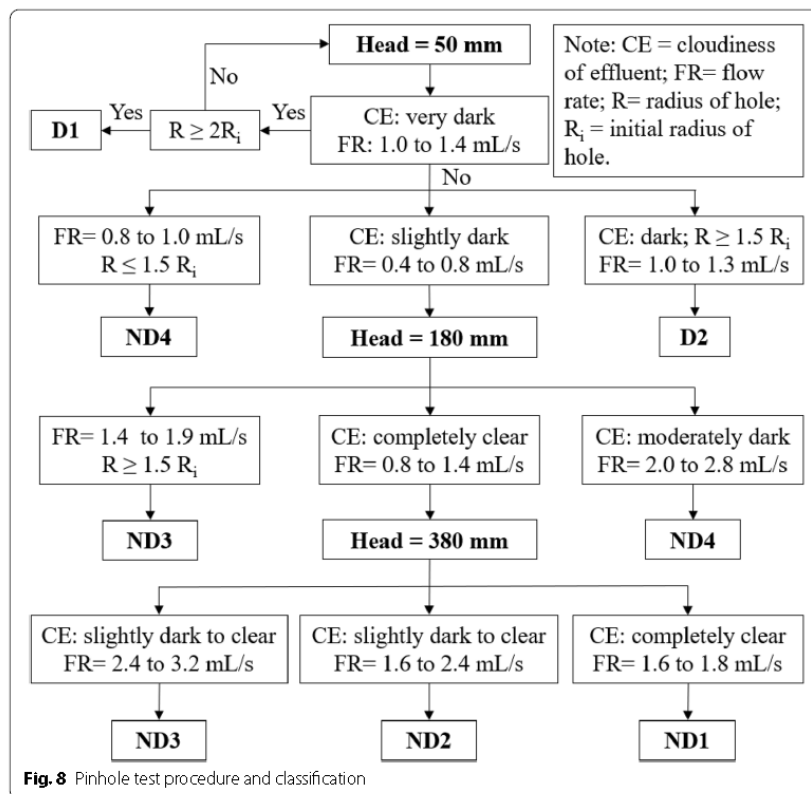
注2-粘性土の分散性を分類する方法Bは、方法Aのカテゴリーを以下のように組み合わせたものである：D= D1、D2、ND4；SD = ND3；およびND = ND2、ND1。

出典: JICA 調査団

表 2.2.12 方法 C による分散性判定

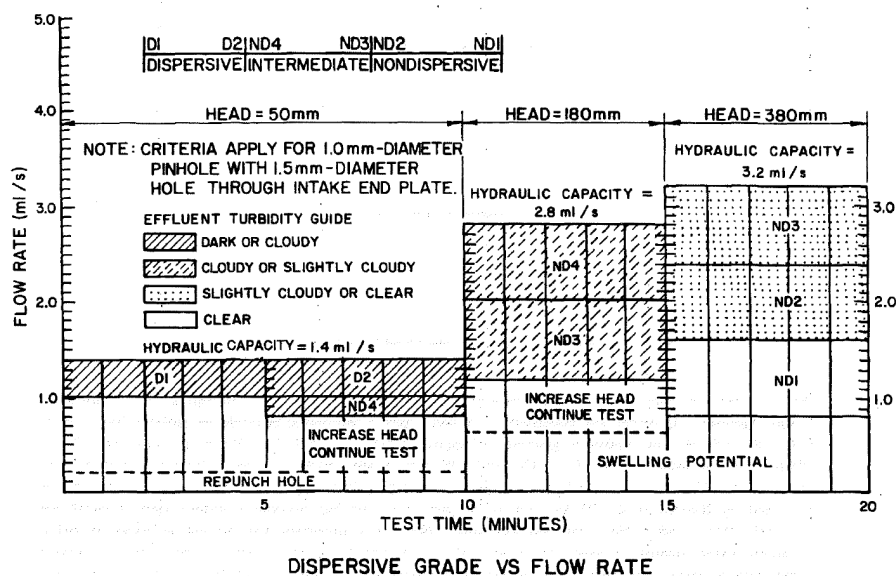
分類	分散性度	判定方法
D1、D2	分散性	50mm の水頭で急速に破壊する
ND4、ND3	軽度から中程度	50mm、180mm または 380mm の水頭でゆっくりと侵食する
ND2、ND1	非分散性	380mm の水頭下においてコロイド侵食はごくわずかか全くない。

出典: JICA 調査団



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 2.2.17 ピンホール試験の判定方法



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

図 2.2.18 ピンホール試験の判定方法

2.2.4 設計施工段階における対応

計画調査段階で分散性土が分布すると判断した場合には、建設中・建設後に発生する可能性のある分散性土のリスクを最小化するための対策について検討を行う。分散性土のリスクは発生した場合に広範囲に侵食や陥没、崩壊の発生など、大規模な被害を伴うものとなる可能性がある。このため、安全で合理的な事業計画を策定するために、設計段階では道路線形や構造物の配置など基本計画・設計段階から想定されるリスクに配慮したものとする必要がある。

分散性土による被害はほとんどの場合、法面や亀裂などからの水の供給によって引き起こされるため、対象とする構造物の排水や水の侵入からの保護に十分な留意が必要となる。対策工としては適切なフィルター材の設置、コンクリート等による法面保護、遮水シートの設置などが挙げられる。また、分散性土の分散性を抑制する方法として、化学的安定処理による対策も挙げられる。

設計にあたっては選定した対策工に応じてフィルター材や保護工の種類や厚さ、改良材の種類ならびに混合率、含水比や締固め度などの具体的な値を検討して設定し、対策を適用する範囲を明確にして図面に記すとともに、施工仕様・品質管理基準を検討して設定する。

施工段階では設計図面・仕様書に基づき、仕様にした品質管理を行いながら対策工の目的に鑑み、リスクを最小化するように十分な配慮をもって施工を行う必要がある。また、分散性土は地域ごとに特性のばらつきが大きく、期待された十分な対策効果が得られない可能性があることから、リスクが高い場合には試験施工を事業に組み込むことが望まれる。

[解説]

2.2.4.1 対策工の設計に係る考慮事項、対策工法の選定

対策工の設計にあたっては、現場の土壌に関する経験と判断、選択される方法の適用限界、適切な施工法を把握し、以下の要素を考慮した上で対策方法を選択する必要がある。

- プロジェクトの規模
- 建設資金の段階的投入（例えば、池の埋め立て処理にはプロジェクトの初期投資が必要）
- プロジェクトの性質と用途（空港の滑走路、二次幹線道路、または許容される強度要件と最大容積変化のバリエーション）
- 他工法との経済性比較

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 2.2.19 に示す。



出典: JICA 調査団

図 2.2.19 分散性土の対策工法

表 2.2.13 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できる。	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壌を改善する。	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、現地調達が可能で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ですが、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

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と考えられる。化学的安定処理における主な化学改質剤とその特徴を表 2.2.14 に示す。

表 2.2.14 主な化学改質剤と特徴

安定剤	主な成分	効果・特徴	留意点
消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Ca^{2+} 源	分散性・膨潤性の抑制に高い効果。安価で使用実績が多い。	有機物が多いと反応阻害。施工時の粉塵にも注意。
石膏(CaSO_4)	高電解質 + Ca^{2+}	初期の電解質強化に有効。乾燥地で有効性あり。	溶解性が低く、コストが高め。
ミョウバン($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	Al^{3+} 源	粘土粒子間の急速凝集効果	一部の土壌で過剰な酸性化の懸念あり。
農業用石灰(炭酸カルシウム)	緩やかな Ca^{2+} 供給源	安価・環境適合性◎	効果は緩慢。
フライアッシュ (火力発電副産物)	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	石灰との混合でポズラン反応により安定化	単独使用では不十分な場合あり。
粉砕高炉スラグ(GGBS)	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ など	セメントや石灰と組み合わせ強化効果	産業副産物として安価。長期強度の発現に寄与。
ポリマー類 (合成・天然)	分子結合材	分散性の封じ込め、施工性◎	耐久性やコスト面でさらなる検証が必要。
アスファルト溶剤、糖蜜	有機系	表面被覆による遮水・保水対策	臭気や揮発性に注意。現場使用例は限定的。

出典: JICA 調査団

化学的安定処理は、分散性土の分散挙動を抑制し、工学的性質（強度、剛性、透水性）を改善するための有効な手段であるが、以下のような注意点や適用限界が存在する。

1. 硫酸イオンの存在による問題

分散性土壌中に硫酸イオン (SO_4^{2-}) が存在する場合、石灰安定処理により膨潤性層が形成される可能性がある。これは、 Ca^{2+} （石灰の主成分）と SO_4^{2-} が反応して石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) が生成され、それが結晶膨張を引き起こすためである。結果として、土壌の強度が逆に低下することもある。土壌の硫酸塩含有量を事前に確認し、必要に応じて硫酸塩耐性型の安定処理材（例：耐硫酸セメントなど）を検討する。

2. ポルトランドセメントの単独使用の限界

セメントは通常の膨潤性粘土には有効であるが、分散性粘土に対しては必ずしも石灰より優れているとは限らない。セメントによる安定化は初期強度の向上に効果があるものの、分散性（化学的安定性）の抑制には不十分であることも多い。分散性の制御には、ナトリウムイオンの置換が重要であり、石灰 (Ca^{2+} 源) の方が直接的に作用しやすい。分散抑制を主目的とする場合は、石灰または石膏との併用や、他のポズラン反応材との組み合わせを検討する。

3. 分散抵抗 ≠ 物理的耐性

分散や侵食に対して最も耐性のある安定処理土が、必ずしも物理的荷重やひび割れなどの力学的ストレスに強いわけではない。例えば、高強度であっても脆性破壊が起こることや、繰返し荷重や乾湿サイクルによって性能が劣化することもある。分散抑制効果と力学的耐性の両立を目指した複合処理が必要となる（例：石灰＋繊維補強、石膏＋セメントなど）。

2.2.4.2 対策工に係る関連基準

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、分散性土への関心が高いオーストラリアでは地域単位で管理指針（ガイドライン）が整備されており、実務上有用である。

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

1) Ipswich 市における分散性土の管理ガイドライン（2016 年）

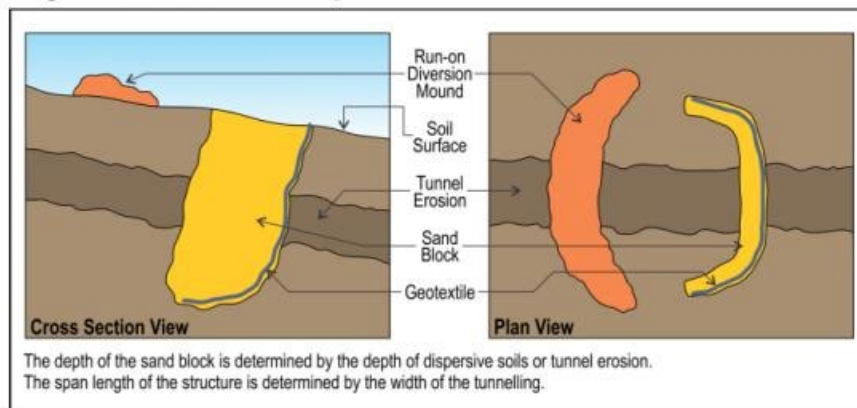
■ ガイドラインの主目的

分散性土による侵食を「予防・緩和・管理」することを目的とし、次のような複合的手段の組み合わせが推奨されている。

■ 対策の 5 本柱

1. 分散性土壌の特定と回避
地質調査や判定試験（ピンホール、クラム等）により初期段階で把握。
2. 土壌の再圧縮
盛土や切土の仕上げ後、土壌を再転圧することで空隙を抑え、浸透を防止。
3. 化学的改良
主に石膏（ CaSO_4 ）を使用し、 Na^+ の置換により分散性を抑制。※ただし、pH 変化や植生への影響に注意。
4. 砂ブロックと物理的障壁の使用（図 2.2.20）
フィルター材、遮水材、排水層を用いた水流分散・拡散対策。

Figure 5.2 Modified Sand Block Design



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

図 2.2.20 砂ブロックと障壁

5. 非分散性表土の利用と植生回復

分散性土を少なくとも 150 mm の厚さの安定土壌で覆う。

急傾斜部では特に植生回復が重要。

■ チェックリストによる管理対策（例）

- ・ 石膏散布: 侵食リスクの高い場所には化学的処理。水路に近い区域では使用制限。
- ・ 露出期間の最小化: 分散性土を長期間露出させない段階的施工。
- ・ 流出水の管理: 雨水を分散性土から離れた安定な区域（植生・礫質地・高台）に誘導。
- ・ 雨水タンクの使用: 建物・屋根の水を集水して集中排出を防ぐ。
- ・ 土壌被覆: 非分散性土壌やジオテキスタイルで表面を覆い保護。
- ・ 植生の再生: 特に急斜面部での植物被覆は不可欠。
- ・ 流出水の拡散: 捕集した水は 1 点集中で流さず、広範囲に分散させる。

2.2.5 その他の分散性土対策技術と適用性

分散性土の確立された対策は無く、分散性土の分布地域で種々の対策が実施されている。前述の対策以外に石灰を用いた対策、SPP 処理、藻類によるバイオ安定処理などが提案・実施されている。

分散性土の地盤変状のリスクが適切に想定できる場合には地滑り対策にかかる技術が海外の事業においても適用できる可能性があるため、必要に応じてその適用性を検討する。

[解説]

石灰を用いた対策は、化学的安定処理の一つで、分散性の低減を目的として石灰を添加する方法である。ゴトヴァンド灌漑プロジェクト（イラン）の研究事例であるが、分散性粘土を有する堤防土に石灰を 3～6%添加することで分散性の低減を図った。結果として、添加量 3～5%で非分散性土に変化し強度と耐侵食性が向上したのに対し、添加量 6%になると大水頭で突然強度が低下しパイピングや崩壊のリスクが増加した結果が得られている。

SPP 処理は、化学的安定処理の一つで、スルホン化石油製品により、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であり、主にアメリカで研究・実用化されている。

藻類によるバイオ安定処理は、藻類の定着により表層に自然由来の「バイオシール」が形成され、根系やマット構造による表面保護と微細な粒子の固定化効果が期待される工法である。

多くの分散性土に関する基礎的研究や実験報告は豊富に存在するが、実際の施工における具体的な成功・失敗事例の報告は少ない。これは分散性土の地域性・気候条件・母岩特性の多様性に起因し、一般化が難しいことも背景にある。今後は現場での実績データの蓄積と共有が重要である。

2.2.6 コンサルタント、施工業者の業務上の留意点

コンサルタントは計画・調査・設計段階で事業の計画地に分散性土が分布するかの確に判断し、分散性土の挙動によって発生するリスクを最小限とすることを目的として、調査・試験を行い、必要に応じて適切な対策工を計画・設計する。対策工は施工時に必要となる試験、品質管理方法、施工上の配慮を検討した上で、施工業者がリスクに応じた必要な経費を見積もれるよう、入札図書に反映する。施工監理においては対策工が仕様書に準じて適切に施工されているか、施工状況の確認、品質管理試験（原位置ならびに室内試験）を通して管理する。

施工業者は分散性土の特性とリスクを把握し、契約図書に準じ、必要な試験・品質管理を行いつつ、分散性土に配慮した適切な施工を行う。

[解説]

2.2.6.1 入札図書作成にあたっての留意事項

事業の対象地で分散性土が分布する場合には、入札図書作成にあたって以下の事項に留意する。

- 周辺部の調査結果から盛土材料に分散性土が混入するリスクがあると判断した場合には、当該地の分散性土を正しく判定できる品質管理試験方法、基準値、頻度を規定し、技術仕様の品質管理方法にその内容を含める。
- 舗装工の路床や、建屋等構造物の基礎部に分散性土が分布するリスクがあると判断した場合には、施工基面の造成面の写真の記録、立ち合いによる確認・承認の規定を行うなど、分散性土が分布する想定外のリスクを防止するための規定を技術仕様を含める。
- 分散性土の対策、施工方法に係る技術的知見は一般的な地盤、土質材料に係る技術的知見と比較して少ない研究・施工事例に基づくものであり、関連する設計基準に準じた場合でも想定外の事象が発生するリスクが相対的に高いため、対策工の検討にあたっては十分な調査を実施し、試験施工の実施も考慮した上で計画・設計する。
- 分散性土を良質土にする置換工を施工する場合には、その範囲ならびに深度を明瞭に規定し図面に示すとともに、埋め戻しの際の材料品質、締固め度等の基準とともに水処理に係る配慮など、リスクを最小化するための規定を技術仕様を含める。
- 分散性土の地盤・土質改良を施工する場合には改良材の使用、配合率の仕様、もしくは配合試験の要件と判断方法に係る規定を技術仕様を含める。

2.2.6.2 施工時の品質管理における留意事項

施工管理に携わる技術者は、施工の各段階で適切な配慮ができるよう分散性土の特性、降雨等による流水や地下水の変動に伴う水分の浸潤によって、静止水中也においても粘土分が溶け出し、沈下や強度低下等の挙動が発生することを十分に理解する。また、分散性土は見た目での識別は困難であるが水との接触により直ちに粘土粒子の溶け出しが起こり泥濘化するため、分散性土地盤を目視・触手で的確に判断できるように工事開始前に対象地で分布する分散性土の特性(色・物理特性など)を確認、把握しておくことが重要である。分散性土に係り配慮すべき事項につき以下に示す。

- 分散性土は水分の浸潤により変状が発生し、構造物に損傷を与えることがあることから、施工時の排水や、局所的な湧水や既設管がある場合の漏水への配慮などには特に留意し、影響を検討したうえで適切に対応する。
- 表面侵食や陥没が小規模だったとしても、水分の湿潤により変状が拡大していくため、施工中においても保護シートなどで、盛土・切土の天端や法面などからの水の流入を防ぐ対応を実施することが重要である。
- 施工時には分散性土の特性に鑑み、動態観測（沈下板の設置、変位杭の設置など）の実施の必要性について検討する。動態観測を実施し、計測結果から分散性土層の変状を観測した場合には、構造物への影響を検討した上で必要な対策を実施する。

2.2.7 維持管理段階における対応

分散性土が分布する地域において、建設した構造物がその機能を保持し続けるよう適切な維持管理を実施する必要がある。大規模な変状が発生する際にも事前に変状などの兆候が認められることが多いことから、維持管理段階では日常点検において、建設された施設の変状（クラックの発生や段差・陥没の発生）が認められないか、注意して点検・記録する。

維持管理にあたっては、調査・設計・施工の各段階の記録等を参考に調査及び点検・保守作業を行う。

[解説]

(1) 維持管理の目的

維持管理は、工事完了後の構造物（道路・水路・建屋等）が必要な機能を十分に発揮し、構造物の安全性を保ち続けることを目的として実施する。

分散性土が分布する地域では「2.2.2 過去の建設工事で遭遇した特殊土の事例」に示したように、その挙動によって、盛土表面・舗装面などの陥没・不陸の発生、舗装の損傷やトンネル侵食、切土・盛土の崩壊、表面侵食などが発生する可能性がある。分散性土によるこのような変状はできるだけ早期に見出し、必要な対応を遅延なく実施することが必要である。

(2) 維持管理の留意点

分散性土の挙動に起因して発生する構造物の変状は様々であるが、施工後直ぐ問題が発生することもあるが、施工後複数年経過してから問題となる場合もある。

特に道路構造物では舗装の損傷が構造物の機能に深刻な影響を与えることが多い。舗装面のクラックの発生や切土法面の侵食などが大きな変状・崩壊につながることもあるため、日常点検において、なんらかの変状が確認された場合には、調査・設計・施工時のデータの確認を行い、今後想定される変状の範囲・その度合いの検討を行った上で、必要となる変状抑止対策、補修を計画・実施する。

(3) 点検・調査

進行すると深刻な損傷となる可能性がある構造物の変状を早期に把握し、適切な措置及び補修の要否を判断するために実施する。点検にあたっては特に分散性土の問題の発生事例に鑑み、特に注意して点検する箇所・着目点を事前に抽出し、点検者が把握しておくことが重要である。道路構造物では舗装表面の進行性のクラックや陥没の発生、切土法面の変状に留意する必要がある。ODA 事業の実施にあたっては引き渡しの前に事業者が実施する必要がある日常の点検・調査と留意事項をまとめ、適切な維持管理が行われるよう伝達しておく必要がある。

2.3 崩壊性土

2.3.1 概要

崩壊性土は水分の侵入や荷重増加の外的要因によって土粒子が形成している構造が崩れ、地層の急激な変状や堆積変化をもたらす崩壊性を特徴とする特殊土である。崩壊性土は主に乾燥地域に岩屑流、黄土をはじめとする風成堆積物、熱帯に分布する残積土などから形成される。

崩壊性土は土粒子が密接ではなく空隙率の高いオープンな構造をしており、低密度だが乾燥時には高い強度を呈している。このため、乾燥した施工時には切土面や掘削部は安定している一方で、降雨による水分の侵入や地下水の変動などにより土粒子間の粘着力が失われ、大規模な地滑りや急激な沈下の発生に伴う構造物の被害をもたらすことがある。被害は建築物、道路や堤防、ダムなど多くの構造物の事例が報告されている。被害は極めて深刻なものとなるケースもあるが、その分布に地域性があることもあり、基準やガイドラインなどは殆ど整備されておらず、体系的な研究成果も少ない。このため、崩壊性土が分布する地区で適切な対応を行うためには、問題が発生する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。

[解説]

2.3.1.1 崩壊性土の特徴

(1) 一般的な特徴

崩壊性土の典型的な特徴は以下の通りである。

- オープンな準安定構造
- 高い空隙比と低い乾燥密度
- 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の含有

土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。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、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強度低下する。

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。

(2) 崩壊性土の起源・母材

崩壊性土は主に黄土 (Loess)、砂質ローム、火山灰由来土、洪積層由来土に区分される。黄土はシルトサイズの一次石英粒子からなり、寒冷地で風化した粒子が河川などで運ばれたのち、乾燥し、卓越風によって運ばれて堆積した風成堆積物である。砂質ロームの母材となる河川性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) で、水分の増加や振動で空隙構造が崩れる。地下水以深に緩い状態で堆積している砂は地震で液状化することがある。火山性堆積物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。

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。

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が、崩壊性土の母材として主に以下が挙げられる。

- 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。

2.3.1.2 構造と崩壊のメカニズム

崩壊性土は粒子間の毛管力による結合力や化学的なものも含むセメンテーションの結合力が浸潤により弱くなる、もしくは失われることで荷重に抵抗できなくなり崩壊がおこる。この結果、崩壊性土層の急激な堆積の圧縮に伴う沈下や、斜面の崩壊が発生する。

2.3.2 過去の建設工事で遭遇した崩壊性土の事例

崩壊性土が建設事業に与える事例として、大規模な地滑りの発生、住宅等の建築物の変状・クラック、道路表面の大規模なクラックや沈下と舗装の損傷、盛土の沈下や盛土・切土に係るのり面の崩壊などが挙げられる。

これらの問題は、建設による地形改変、豪雨などによる表流水・地下水の変動や車両等による動的荷重や地震荷重、それらの組み合わせによって、予期しない時期に発生、表面化する。

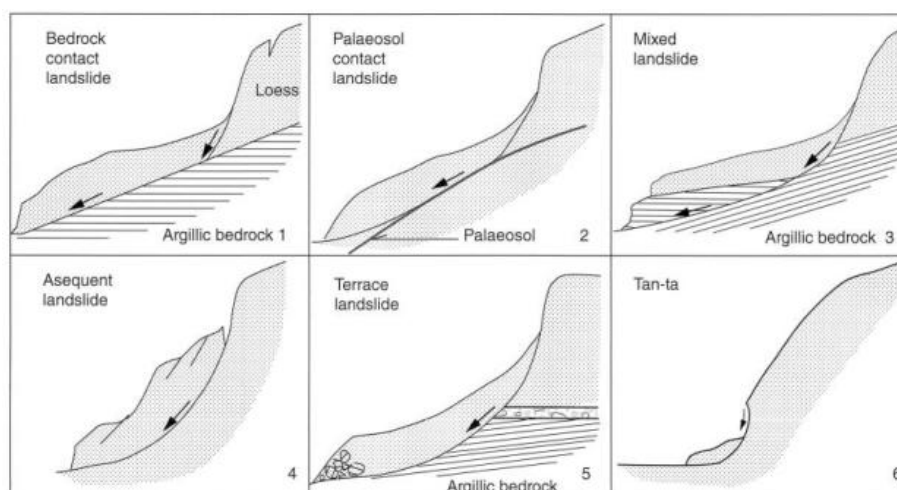
崩壊性土による被害は、多くの場合深刻で、施設の機能上・構造上の大きな損傷を引き起こすため、崩壊性土が分布する地域における事業の実施にあたっては慎重な調査計画・設計検討・施工・維持管理が必要である。本節に示す種々の事例を参照しつつ、対象地域で問題となっている事例の収集を行い、必要な対応の検討を行う。

〔解説〕

2.3.2.1 斜面の安定・地すべりのタイプと被害事例

黄土が主に分布する地域（中央アジア、中国・甘粛省黄土高原など）では大規模な地滑りが繰り返し発生している。黄土層が分布する地域における地すべりは黄土層と下位層の境界部がすべり面となるケース、黄土層内にすべり面が形成されるケース、複合的なケースなど、さまざまな形態で発生する。またすべり面端部地盤の沈下が地すべりの誘因となるケース、ガリ浸食など表面のクラックから水分が侵入しすべり面を形成するなどメカニズムも複雑である。

黄土の地すべりの主なタイプを図 2.3.1 に示す。図中の 6 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。



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 2.3.1 黄土地すべりの主なタイプ

図 2.3.2、図 2.3.3 には黄土を含む崩壊性地盤の沈下・浸食、地すべり崩壊に伴う被害の状況の写真を示す。崩壊性土地盤の沈下を伴うすべり破壊は極めて大規模になることがあることから、事業の実施にあたっては慎重な配慮が求められる。



出典: Loess Landslides-Peculiarities of Deformation Mechanism,
oleg V.Zerkal and Olga.S.Barykina

図 2.3.2 黄土のすべり破壊



出典: A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS,
Safa Hussain Abid Awn, 2010

図 2.3.3 崩壊性石膏土の崩壊

2.3.2.2 道路（舗装・構造物）の被害事例

交通インフラ（道路や鉄道）は崩壊性土による問題を引き起こすことがよくある。道路で特に問題となるのは道路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による不同沈下である。これらは荒く波打つ路面を引き起こし、道路構造物に何 km にも及び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となる。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。道路面から崩壊性土の路体に加わる応力には上載圧と交通荷重があるが、水分の浸潤により、湿潤状態が生じれば、大型貨物車による短時間の交通荷重でも沈下・崩壊の誘因となる可能性がある。

ほとんどの崩壊性土壌は透水性や吸水性が高いため、排水管理に十分な留意が必要となる。排水不良により想定外の崩壊性地盤の沈下が発生し、変状が施設に及ぶ可能性がある。

図 2.3.4、図 2.3.5 には崩壊性地盤の沈下が舗装の損傷の要因となった事例の写真を示す。図 2.3.6、図 2.3.7 は黄土が分布する中央アジアの事例の写真で道路の際部まで浸食がすすむ黄土地盤の状況の写真、地すべり性の変状が橋梁の下部工に深刻な変位を発生させ、桁を撤去して橋梁の使用を断念した事例の写真を示す。



出典: Evaluation of groundwater effects on tunnel engineering in loess, W. Sun, Q. Liang, S. Qin, Y.N Yuan & T. Zhang , 2021

図 2.3.4 黄土の沈下とガリ侵食



出典: A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS, Safa Hussain Abid Awn, 2010

図 2.3.5 崩壊性石膏土の崩壊



出典: JICA 調査団

図 2.3.6 黄土地盤の浸食



出典: JICA 調査団

図 2.3.7 黄土地盤・変状に伴う橋梁の損傷

2.3.2.3 建築物・住宅の被害事例

崩壊性地盤上の建築物・住宅の被害事例の写真を図 2.3.8、図 2.3.9 に示す。道路やその他の構造物と同様に、崩壊性地盤は水分の浸潤によって局所的な崩壊や沈下が発生する可能性があり、基礎部の不等沈下によるクラックや壁面の崩壊などの被害が確認されている。



出典: Egyptian Collapsible Soils and their Improvement, Mohamed Sakr, Mohsen Mashhour, Adel Hanna, 2008

図 2.3.8 崩壊性土の家屋の被害(エジプト)



出典: A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS, Safa Hussain Abid Awn, 2010

図 2.3.9 崩壊性石膏土地盤の建物のクラック

2.3.3 計画調査段階における対応

計画調査段階では、事業の計画地に崩壊性土が分布しているか適切に判断し、対策の検討の必要性を判断する。崩壊性土はその形成過程から、乾燥地域に分布している。地域性が高いため、分布域の確認に本マニュアルに示す崩壊性土分布図・リスクマップから当該地域のリスクを把握し、周辺地域の地滑りなどの被災事例の調査、ならびに適切な調査・試験によって対象地に分布し、事業に関わる地質・土質についてその崩壊性の有無を把握する必要がある。

崩壊性土を判定する方法は、室内試験、主に乾燥状態と湿潤状態における圧密試験機を用いた試験や載荷試験、また現場試験、平板載荷試験やコーン貫入試験などにより崩壊性を評価することが行われるが、試験方法・評価基準は確立しておらず、研究者や地域によって異なる。このため対象地で想定されるリスクに鑑み、クリティカルとなる大規模なリスクを低減する目的で適切な調査・試験方法を検討・選定して実施する必要がある。

〔解説〕

2.3.3.1 崩壊性土の分布

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、土壌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。

崩壊性度の土壌毎に地域区分すると表 2.3.1 のようになる。

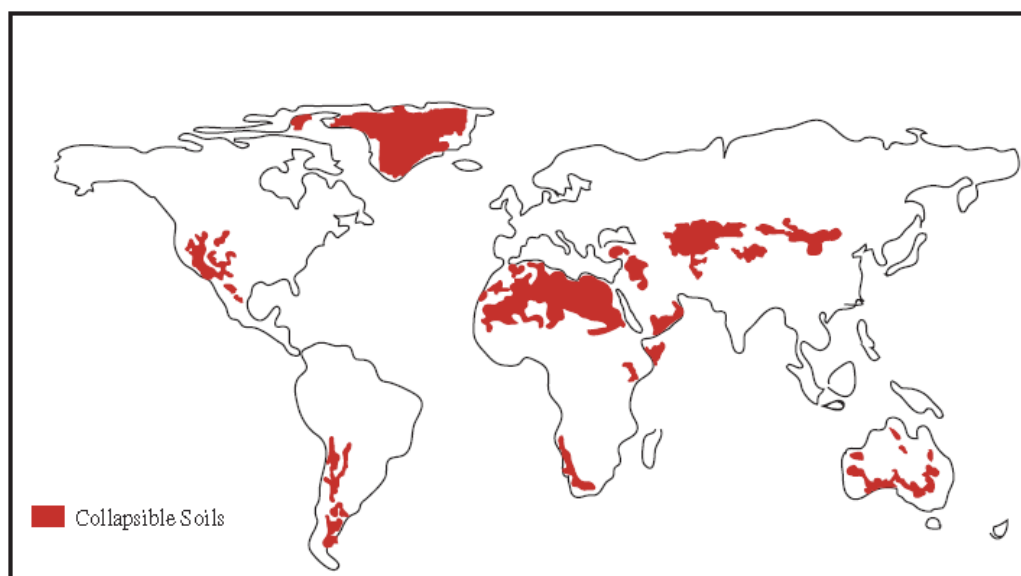
表 2.3.1 崩壊性土の土壌区部毎の分布する主な地域

土壌分類	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) 欧州の大河流域(ドナウ川、ライン川、イル川など) 米国の大河流域(ミシシッピ川、コロラド川) 南米の大河流域(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

土壌分類	主な地域
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

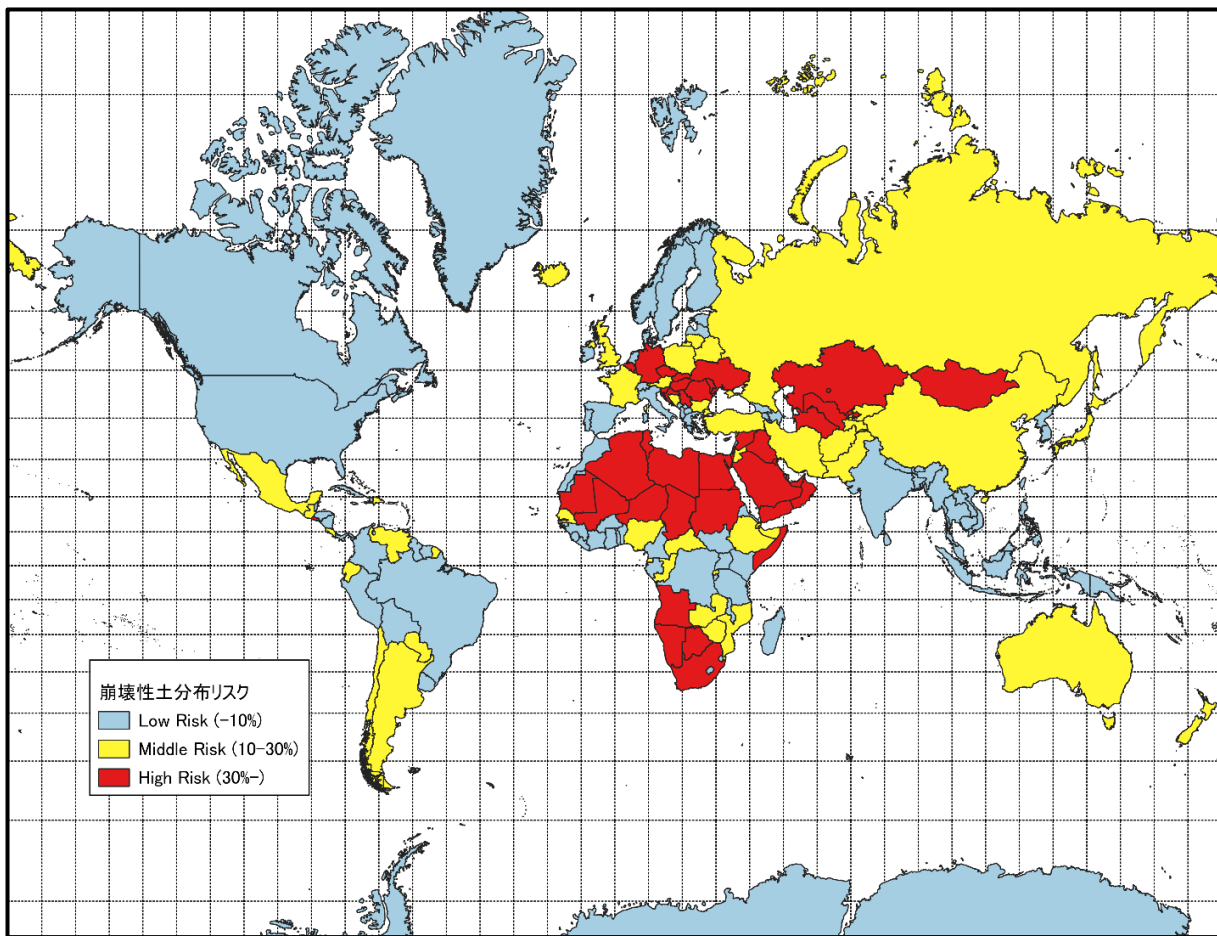
崩壊性土の世界的分布図を図 2.3.10 に示す。



出典: Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, AhmedAl-anabi(2014)

図 2.3.10 崩壊性土の世界的分布図

また、図 2.3.10 に示した分布図などを基に、国ごとに分布する面積の割合を算出し、各国ごとに面積割合を算出し、リスクの度合いとして図化し、図 2.3.11 に示す。本図も参照にリスクがあると判断される国で事業を実施する場合には、崩壊性土の有無について十分な調査を実施する必要がある。



出典: JICA 調査団

図 2.3.11 崩壊性土(Loess)の分布リスク

2.3.3.2 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。

- 特定 Identification : 崩壊性土が存在するかどうかを特定する。
- 分類 Classification : 崩壊性土の問題程度を分類する
- 定量化 Quantification : 崩壊の程度を評価する。
- 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壌を含む土地ではまず崩壊性の可能性がある土壌を特定し、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をしばしば間違えるか、単に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、シルトと粘土）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壌を特定し、評価する能力を低下させる可能性がある。世界的には特殊土の知識情報が蓄積されているにもかかわらず、技術者にとって馴染みのない分野や特殊な用語を使用するため、それが障害となって特定作業が行われない傾向がある。

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。

- 崩壊性土を探す予備調査

対象地の地質・地形情報、インフラ施設に係る被害事例の情報を収集する。また降雨・表流水の経路など、対象地域に供給される水分の情報を分析する。

- パラメータによる判定

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基準値や指標に基づき崩壊土の可能性を評価する。これらの指標の多くは相関関係が小さく、ばらつきが大きいため判定性が低いことに留意する必要がある、判断の目安として活用する。

- 室内試験

圧密試験器を用いた崩壊試験、ならびに試験結果に基づく評価指標が ASTM や他の研究者によって提案されている。その他、サクションを測定できる圧密試験器、Rowe Cells、三軸崩壊試験、ダブルハイドロ試験等による判定方法が提案されている。

- 現場試験

現場において簡易に崩壊性土を判定する方法として **Sausage Test** が提案されている他、平板載荷試験、電気式コーン貫入試験、孔内水平載荷試験、標準貫入試験やコーン貫入試験結果の評価に基づく崩壊性の判定方法が提案されている。

2.3.4 設計施工段階における対応

調査段階で崩壊性土が分布すると判断した場合には、建設中・建設後に発生する可能性のある崩壊性土のリスクを最小化するための対策について検討を行う。崩壊性土のリスクは発生した場合に広範囲の沈下や地滑りの発生など、大規模な被害を伴うものとなる可能性がある。このため、安全で合理的な事業計画を策定するために、設計段階では道路線形や構造物の配置など基本計画・設計段階から想定されるリスクに配慮したものとする必要がある。

崩壊性土地盤の沈下やすべり破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、対象とする構造物の影響範囲の排水のコントロールに十分な留意が必要となる。対策工としては置換工法、水の侵入のコントロール、動的締固め・バイプロフローテーションなどの密度増加に係る地盤改良、セメント等固化材による地盤改良工法などが挙げられる。

設計にあたっては選定した対策工に応じて置換層厚、改良材の種類ならびに混合率などの具体的な値を検討して設定し、対策を適用する範囲を明確にして図面に記すとともに、施工仕様・品質管理基準を検討して設定する。

施工段階では設計図面・仕様書に基づき、仕様に準じた品質管理を行いながら対策工の目的に鑑み、リスクを最小化するよう十分な配慮をもって施工を行う必要がある。また、崩壊性土は地域ごとに特性のばらつきが大きく、期待された十分な対策効果が得られない可能性があることから、リスクの度合いに応じて試験施工を事業に組み込むことが望まれる。

[解説]

2.3.4.1 対策工の設計に係る考慮事項、対策工法の選定

対策工の設計にあたっては、現場の土壌に関する経験と判断、選択される方法の適用限界、適切な施工法を把握しプロジェクトの規模、性質と用途、環境影響を考慮し、工法の経済性比較を行った上で対策方法を選択する必要がある。

また、崩壊性土層は水分の浸潤により沈下・崩壊などの変状が発生することがあることから、施工時に必要となるヤード、想定される排水の処理方法など、リスクに配慮した概略施工計画を考慮し、必要な費用を見積もり、工法を選定する必要がある。

2.3.4.2 施工時の品質管理における留意事項

施工管理に携わる技術者は、施工の各段階で適切な配慮ができるよう崩壊性土の特性、表流水や地下水の変動に伴う地盤内への水分の浸潤が崩壊性土の挙動に影響を与えることを十分に理解する。崩壊性土が分布する地域では計画されるプロジェクトの地域一帯に分布している可能性が高いが、崩壊性土層を目視・触手で的確に判断できるように工事開始前に対象地で分布する崩壊性土の特性（色・物理特性など）を確認、把握しておくことが重要である。膨潤性土に係り配慮すべき事項につき以下に示す。

- 崩壊性土は地中への水分の浸潤、地下水の予期していなかった変動によって沈下やせん断強度低下が発生し、構造物に損傷を与えることがある。施工時に局所的な湧水や既設管がある場合などには特に留意し、影響を検討したうえで適切に対応する。
- 施工時には崩壊性土の特性に鑑み、動態観測（沈下板の設置、変位杭の設置など）の実施の必要性について検討する。動態観測を実施し、計測結果から崩壊性土層の変状を観測した場合には、構造物への影響を検討した上で必要な対策を実施する。
- 崩壊性土層の分布地域における施設の施工にあたっては、施工状況を高い頻度で記録することが想定外の事象が発生した場合に対策を検討するうえで有用である。また、施工データ、品質管理の記録をデータとして残すことは今後の事業の実施にあたっての崩壊性土に係るリスク回避、研究の発展に向けて有用であるため、積極的に施工状況を記録し、データを実施機関に残すとともに、学界での発表などを通して関係者に共有していくことが望ましい。

2.3.5 その他の崩壊性土対策技術と適用性

崩壊性土の確立された対策は無く、崩壊性土の分布地域で種々の対策が実施されている。前述の対策以外に事前湿潤法、焼結工法、ジオシンセティックスを用いた対策などが提案・実施されている。

崩壊性土の地盤変状のリスクが適切に想定できる場合には地滑り対策にかかる技術が海外の事業においても適用できる可能性があるため、必要に応じてその適用性を検討する。

[解説]

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壌を湛水または湿潤させて、構造物建設後に土壌の崩壊が最小限になるようにする工法である。土壌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、将来の基礎沈下を防止するためにはプレローディングを併用する必要がある。

焼結工法は黄土の崩壊特性改善のために開発された工法で、主として高温度を用いるもので、特別の装置で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。良好な結果が得られた実験例があるものの、コストが高く、適用事例は少ない。

このように崩壊性土が分布する地域では対策に係る取組みが行われている。事業の計画段階で地域の対策がある場合にはその適用性とリスクについて分析し、事業計画に反映する。

また崩壊性土の分布地域において、その崩壊により地すべりが発生するリスクがあると判断される場合、地すべり対策工の適用検討を行う。崩壊性土は厚く堆積している地域も多く、効果的な対策とするために通常よりも大規模となることも想定される。リスクを的確に見積もり、機能と安全性を確保するために必要な対策を計画する。

2.3.6 コンサルタント、施工業者の業務上の留意点

コンサルタントは計画・調査・設計段階で事業の計画地に膨潤性土が分布するかの確に判断し、膨潤性土の挙動によって発生するリスクを最小限とすることを目的として、調査・試験を行い、必要に応じて適切な対策工を計画・設計する。対策工は施工時に必要となる試験、品質管理方法、施工上の配慮を検討した上で、施工業者がリスクに応じた必要な経費を見積もれるよう、入札図書に反映する。施工監理においては対策工が仕様書に準じて適切に施工されているか、施工状況の確認、品質管理試験（原位置ならびに室内試験）を通して管理する。

施工業者は膨潤性土の特性とリスクを把握し、契約図書に準じ、必要な試験・品質管理を行いつつ、膨潤性土に配慮した適切な施工を行う。

[解説]

2.3.6.1 入札図書作成にあたっての留意事項

事業の対象地で崩壊性土が分布する場合には、入札図書作成にあたって以下の事項に留意する。

- 舗装工の路床や、建屋等構造物の基礎部に崩壊性土が分布するリスクがあると判断した場合には、施工基面の造成面の写真の記録、立ち合いによる確認・承認の規定を行うなど、崩壊性土が分布する想定外のリスクを防止するための規定を技術仕様を含める。
- 崩壊性土の対策、施工方法に係る技術的知見は一般的な地盤、土質材料に係る技術的知見と比較して少ない研究・施工事例に基づくものであり、関連する設計基準に準じた場合でも想定外の事象が発生するリスクが相対的に高いため、対策工の検討にあたっては十分な調査を実施し、試験施工の実施も考慮した上で計画・設計する。
- 崩壊性土を良質土にする置換工を施工する場合には、その範囲ならびに深度を明瞭に規定し図面に示すとともに、埋め戻しの際の材料品質、締固め度等の基準とともに水処理に係る配慮など、リスクを最小化するための規定を技術仕様を含める。

2.3.6.2 施工時の品質管理における留意事項

施工管理に携わる技術者は、施工の各段階で適切な配慮ができるよう崩壊性土の特性、表流水や地下水の変動に伴う水分の浸潤によって沈下・強度低下等の挙動が発生することを十分に理解する。また、崩壊性土地盤を目視・触手で的確に判断できるように工事開始前に対象地で分布する崩壊性土の特性（色・物理特性など）を確認、把握しておくことが重要である。崩壊性土に係り配慮すべき事項につき以下に示す。

- 崩壊性土は水分の浸潤により変状が発生し、構造物に損傷を与えることがあることから施工時の排水や、局所的な湧水や既設管がある場合の漏水への配慮などには特に留意し、影響を検討したうえで適切に対応する。
- 施工時には崩壊性土の特性に鑑み、動態観測（沈下板の設置、変位杭の設置など）の実施の必要性について検討する。動態観測を実施し、計測結果から崩壊性土層の変状を観測した場合には、構造物への影響を検討した上で必要な対策を実施する。

2.3.7 維持管理段階における対応

崩壊性土が分布する地域において、建設した構造物がその機能を保持し続けるよう適切な維持管理を実施する必要がある。大規模な変状が発生する際にも事前に変状などの兆候が認められることが多いことから、維持管理段階では日常点検において、建設された施設の変状（クラックの発生や段差・沈下の発生）が認められないか、注意して点検・記録する。また、崩壊性土地盤の変状のメカニズムに鑑み、排水施設が適切に維持され、計画された機能の保持がされているか、適切な点検・記録が必要である。

維持管理にあたっては、調査・設計・施工の各段階の記録等を参考に調査及び点検・保守作業を行う。

[解説]

(1) 維持管理の目的

維持管理は、工事完了後の構造物（道路・水路・建屋等）が必要な機能を十分に発揮し、構造物の安全性を保ち続けることを目的として実施する。

崩壊性土が分布する地域では「2.3.2 過去の建設工事で遭遇した崩壊性土の事例」に示したように、その挙動によって、盛土表面・舗装面などの沈下・不陸の発生、舗装の損傷や建屋の変状、壁面のクラックの発生、切土・盛土法面のすべり崩壊などが発生する可能性がある。崩壊性土によるこのような変状はできるだけ早期に見出し、必要な対応を遅延なく実施することが必要である。

(2) 維持管理の留意点

膨潤性土の挙動に起因して発生する構造物の変状は様々であるが、施工後直ぐ問題が発生することもあるが、施工後複数年経過してから問題となる場合もある。

特に道路構造物では舗装の損傷が構造物の機能に深刻な影響を与えることが多い。舗装面のクラックの発生や切土法面の浸食などが大きな変状・崩壊につながることもあるため、日常点検において、なんらかの変状が確認された場合には、調査・設計・施工時のデータの確認を行い、今後想定される変状の範囲・その度合いの検討を行った上で、必要となる変状抑止対策、補修を計画・実施する。

(3) 点検・調査

進行すると深刻な損傷となる可能性がある構造物の変状を早期に把握し、適切な措置及び補修の要否を判断するために実施する。点検にあたっては特に崩壊性土の問題の発生事例に鑑み、特に注意して点検する箇所・着目点を事前に抽出し、点検者が把握しておくことが重要である。道路構造物では舗装表面の進行性のクラックの発生や、切土法面の変状に留意する必要がある。ODA事業の実施にあたっては引き渡しの前に事業者が実施する必要がある日常の点検・調査と留意事項をまとめ、適切な維持管理が行われるよう伝達しておく必要がある。

2.4 ラテライト

2.4.1 概要

ラテライトは鉄とアルミニウムが豊富な土壌で、酸化鉄の含有量が高く、錆びた赤色を呈し、一般的に高温多湿な熱帯地域で形成される残積土である。このような特徴があるが、ラテライトの定義は必ずしも明確ではなく、堆積状況は比較的堅硬な岩塊状を呈するものから、粒状、軟質な細粒状を呈するものがあり、密度や空隙率等の特性のばらつきも大きい。ラテライトが分布している地域では様々な用途の材料として用いられており、レンガの材料として建築構造物の壁面材や道路盛土の路体、路盤材、コンクリート骨材などとして活用されている。

従来、ラテライトは良質な盛土材として活用されているケースが多いが、採取した材料の工学特性は粒度、液塑性、含水比、締固め特性、力学特性のばらつきが大きく、また材料の調整方法によって試験値が変化することが判明しており、その取扱いに注意が必要である。

[解説]

2.4.1.1 ラテライトの特徴

(1) 一般的な特徴

ラテライトの定義は必ずしも一義ではなく、化学的、形態的、農業・土壌学的、鉱床・資源工学的に定義されているが、既往の論文では概括して以下の 4 つの条件を満足する風化生成物と定義することが可能であるとされており、硬く固結した硬盤状あるいは粒状、塊状、あるいはそれらが固結したものをラテライト、工学的に土と考えられるものをラテライト性土と定義している。

- 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。

本ハンドブックでは建設土質材料として良く使用されるラテライト性土を主眼とするが、建設現場で遭遇することのあるラテライト地盤も含み、ラテライトとして説明する。

(2) 起源・母材

ラテライトの起源、母材、形成要因の正確な組み合わせは十分に特定されているとは言えず、研究者・学会でのコンセンサスは得られていないが、ラテライト土壌と母岩の関係に係る研究ではラテライト物質がセスキ酸化物の供給が行われる花崗岩、麻粒岩、片麻岩、片岩、千枚岩、火山灰などのさまざまな母岩の上に重なる可能性があると考えられ、その他にも頁岩、砂岩、および石灰岩等の堆積岩上で確認されている。ラテライト物質は、母材または隣接する高地のいずれかに鉄源があり、そこから水が低地の既存の堆積物に三二酸化物を注入する可能性があるという条件で、さまざまな物質の上に形成される可能性がある。

(3) 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る。風化プロセスを表 2.4.1 に示す。

表 2.4.1 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する ケイ酸塩鉱物(例:長石、輝石など)が水和・加水分解され、ケイ酸分が溶脱する
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する。 鉄(Fe)やアルミニウム(Al)の酸化物が残留する。
集積 Accumulation	鉄やアルミニウムが酸化し、硬化して赤色の酸化物を形成する。 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り返しにより、鉄やアルミニウムの酸化物がセメントのように結合し、硬い層を形成する。

出典: JICA 調査団

ラテライトの形成に影響を与える要因としては、高温多湿であるなどの気象条件、表流水や地盤に浸透する水の量などの地形・排水条件、母岩や植生環境、経過時間などが挙げられる。

2.4.1.2 ラテライトの特性と建設事業における課題

(1) ラテライトの土質特性と評価

1) 物理特性

ラテライトの粒度分布は多様で不規則であり、粘土分～礫分、巨大な岩片まであらゆる大きさのものを含んでいる。ラテライトには比較的弱い構造で劣化しやすい礫分～土粒子を含むことがあるため、試験の前処理や手順によって粒度分布が影響を受けることがある。液塑性限界も同様に試験手順に大きく影響され、再現性のある結果が得られないことがあるが、問題のあるラテライト土壌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 50%以上、塑性指数は 20 以上となっているとの報告がある。自然含水比は 3%～200%を超えるものまで様々なものが確認されており、問題のあるラテライトの自然含水比は一般的に高い。原位置の乾燥密度は均質なラテライトでは 2.08～2.56g/m³ と高いものから、火山性の赤色粘土状のものでは 0.32～0.96g/m³ と低いものまでである。

アフリカでは線形収縮率をラテライトの評価方法が提案されており、下層路盤に用いるラテライトの最大線形収縮率を 5%とすることなどの規定がある。

2) 力学特性

ラテライトの締固め特性は、その風化の程度や不均質性、水分に対する感受性や締固め前の準備、手順によって異なり、ばらつきが大きい。自然状態で含水比が低く最適含水比を目標に加水して締固めをする場合には高い乾燥密度を得られるが、自然状態で含水比が高く、乾燥させて締固めを行う場合には乾燥密度が低くなる。

また CBR 値は乾燥状態で高い値を示すが、水分の浸潤により CBR 値が急激に低下することがあるなど含水比の変化に対して敏感な影響を示す。その影響は締固めエネルギーによっても異なり、締固めエネルギーが高いほど、含水率の増加に伴う強度低下の程度が高くなる。ラテライトは非常に硬いものから軟らかいものまで様々な凝結した粒子から構成されているが、弱い粒子が転圧や交通荷重などにより破碎され、細粒分が増加することもその要因として挙げられる。

ラテライトの強度特性は母岩と鉱物塑性、地形、堆積地点の水位と深度、乾燥の程度、風化の程度によって異なることがある。

(2) 建設事業におけるラテライトの問題

ラテライトはその形成過程から、鉄やアルミニウムが硬化した硬い層が上層にあり、その下に礫や小石まじり砂層、さらに移行層を挟んで粘性土層が分布する堆積状況となっていることが多い。硬く硬化した層は掘削時に大きな塊状となり盛土材料に適さない場合があるが、適切な粒度に破碎・調整できれば通常良質な材料として利用可能となる。良質な材料の下位には移行層を経て建築基礎や舗装の路床としては問題となる細粒分の多い粘土層が分布することがあることから、道路やその他構造物の基礎にラテライトが分布する場合には表層部の状況のみならず路床等、構造物・舗装の影響範囲の堆積物の状況について慎重に確認する必要がある。またラテライトの厚い堆積層が現地で確認された場合にも良質土となる材料は上部しかなく、十分な量の材料を確保できない可能性がある。

また礫分が主体となる良質なラテライトに見えた場合にも砂分が少なく細粒分が多い粒度構成の悪い材料の場合には交通荷重等で流動した変形を起こす場合がある。

2.4.2 過去の建設工事で遭遇したラテライトの事例

ラテライトが分布する地域では、良質な盛土材料として道路の路体や路盤などに広く活用されている。一方で、ラテライトの土質特性のばらつきが大きく、その評価方法が必ずしも確立していないことに起因する可能性があるが、ラテライトを用いている地域で道路の損傷事例が多く確認されている。

これらの事例に鑑み、ラテライトが分布する地域におけるその活用にあたっては、計画、設計、施工の各段階において、慎重な調査・配慮が求められる。

〔解説〕

西アフリカの国道では、舗装の破損や表層部の陥没、轍、うねりなどの損傷があり、走行性を著しく損なっている事例が多く認められた。図 2.4.1 は未舗装区間の表層部の損傷、図 2.4.2 は舗装部の陥没穴を示している。これらの事例では基礎地盤の処理不足、不適切な材料の使用、施工時の含水や締固め管理の不足、維持補修の不足など複数の要因が問題につながっている可能性がある。



出典: JICA 調査団

図 2.4.1 未舗装のラテライト道路の変状
(ギニア)



出典: JICA 調査団

図 2.4.2 ギニア国国道1号線の道路被害

また、再生路床・下層路盤にラテライトを用い、セメント安定処理を施した区間で路盤の劣化に起因すると思われる舗装の損傷の事例（図 2.4.3）が確認されている。対策工法として固化改良を採用する際にも同様に慎重な配慮が求められる。



出典: アフリカ(エチオピア、ガーナ、タンザニア) 資金協力事業による道路整備計画のあり方(基礎研究)の改訂ファイナルレポート

図 2.4.3 路盤の劣化に起因すると思われる舗装の損傷と解体調査の状況(ラオス)

2.4.3 計画調査段階における対応

計画調査段階では、対象地のラテライトの分布の有無、またラテライトを建設材料として使用するかどうかについて調査・検討し、必要な対策の検討を行う。

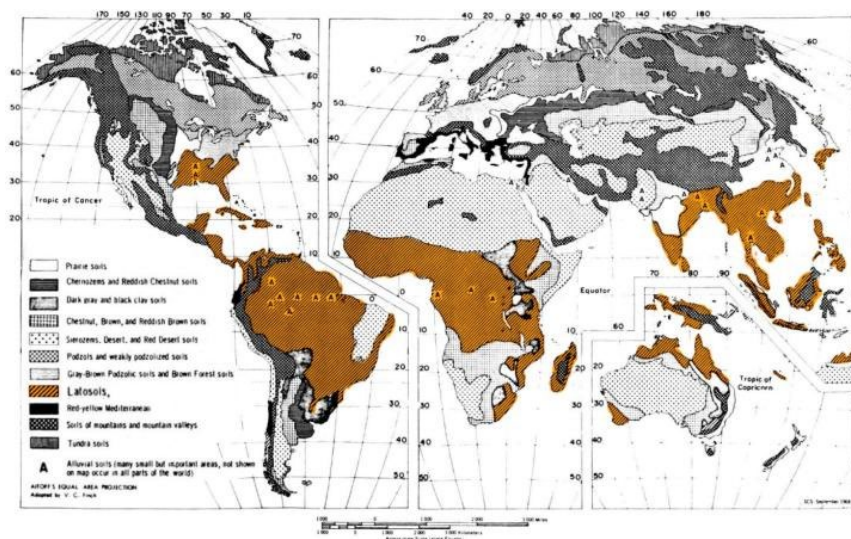
ラテライトは主に熱帯および亜熱帯地域に分布している。ラテライトが分布する地域では、建設材料としてラテライトが一般的に用いられていることから、事業の計画にあたり施工に用いられた実績や建設後の施設の状況などの情報を収集し、リスク低減のために活用する。

ラテライトの材料特性は一般的な土質試験（物理・力学）によって評価されるが、ラテライトは試験材料の前処理や手順によって粒度分布や塑性指数などの物理特性が変化することがあり、締固め特性やCBRなどの力学特性も含めてラテライトを正しく評価する詳細な方法は必ずしも確立していない。このため、調査・試験にあたっては専門家の知見も活用し、慎重に計画・実施し、適切な判断を行う必要がある。

[解説]

2.4.3.1 ラテライトの分布

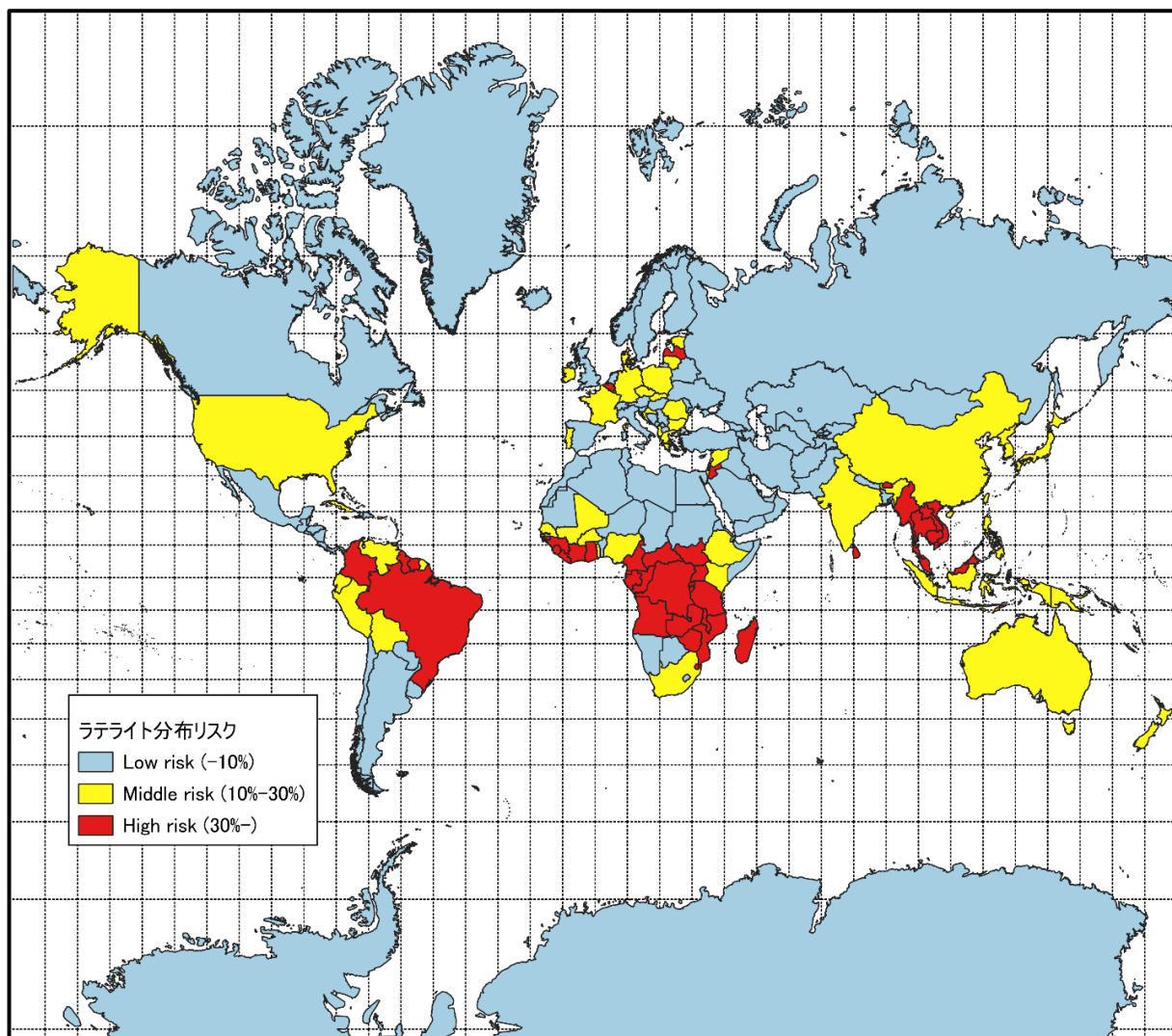
ラテライトは、主に北緯 35°～南緯 35°、熱帯および亜熱帯地域に分布する。既往文献から図 2.4.4 に分布図を示す。分布する国にはアフリカ（ガーナ、ナイジェリア、コートジボワール、カメルーン、コンゴ共和国、アンゴラ、ケニア、ウガンダ、タンザニア）、アジア（インド、スリランカ、タイ、ベトナム、カンボジア、ラオス、マレーシア、インドネシア）、オーストラリア、南アメリカ（ブラジル、コロンビア、ベネズエラ、中央アメリカおよびカリブ（メキシコ、キューバ、ジャマイカ、ハイチ、ドミニカ共和国）、パプアニューギニアなどがある。



出典: AN INVESTIGATION INTO THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PROPERTIES OF LATERITE SOILS IN NILAI, MALAYSIA, Ahmed Sujeeth (2015.04)

図 2.4.4 ラテライトの分布

また、図 2.4.4 に示した分布図などを基に、国ごとに分布する面積の割合を算出し、各国ごとに面積割合を算出し、リスクの度合いとして図化し、図 2.4.5 に示す。本図も参照にリスクがあると判断される国で事業を実施する場合には、ラテライトの有無について十分な調査を実施する必要がある。



出典: JICA 調査団

図 2.4.5 ラテライトの分布リスク

2.4.3.2 ラテライトの試験と判定

ラテライトの試験結果は自然含水比や試料の調整方法・手順などの影響をうけ、ばらつきが大きいことから、現時点で統一されたラテライトの評価方法は確立されていない。本節ではラテライトに係り、主に舗装工事への土質材料・骨材としての適正に関し、土質試験指標と評価方法を既往文献から

抜粋し表 2.4.2、表 2.4.3 に示す。これらの指標をラテライトの適正に係る目安として活用することができる。

表 2.4.2 アスファルト舗装の下で使用するラテライト土壌の判定方法

土壌特性	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
最適含水率(%)	-	8~0	-

出典: IDENTIFICATION OF PROBLEM LATERITE SOILS IN HIGHWAY ENGINEERING: A REVIEW, M. D. Gidigas, 1974

表 2.4.3 西アフリカの舗装ラテライト骨材の方法

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

出典: IDENTIFICATION OF PROBLEM LATERITE SOILS IN HIGHWAY ENGINEERING: A REVIEW, M. D. Gidigas, 1974

表 2.4.4 にはラテライトの土質特性と予想される建設時の工学的挙動・問題点を示している。室内試験を実施し、物理的特性と工学的特性の値からその土が潜在的に問題となり得るかどうかを容易に判定することができる。

表 2.4.4 ラテライト土壌の工学的評価

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 子破碎
	好ましくない	好ましい					
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: IDENTIFICATION OF PROBLEM LATERITE SOILS IN HIGHWAY ENGINEERING: A REVIEW, M. D. Gidigas, 1974

2.4.4 設計施工段階における対応

ラテライトが分布する地域における建設事業の実施にあたっては、ラテライト層が浅層部が硬固でその層厚が比較的薄く、下層に粒度が細かく細粒な層が分布する一般的な堆積環境に鑑み、基礎地盤の適正を確認し、基礎処理の必要性を的確に判断しながら設計、施工を行う必要がある。

ラテライトを土質材料として使用する際には、設計において材料の仕様、品質管理における材料評価方法、また締固めなどの施工仕様を検討し、適切に規定する。

対策としては不良なラテライト地盤では置換工法が一般的に採用され、良質な置換材料が得られない場合、あるいは土質材料としての改良のためにセメントや石灰などの固化材を混合する安定処理工法が一般的に実施されている。

施工段階では規定された仕様に基づき適切な品質管理を行い十分な配慮をもって施工を行う。

[解説]

2.4.4.1 対策工法の選定、設計における留意事項

対策工の設計にあたっては、現場の土壌に関する経験と判断、選択される方法の適用限界、適切な施工法を把握しプロジェクトの規模、性質と用途、環境影響を考慮し、工法の経済性比較を行った上で対策方法を選択する必要がある。

ラテライト地盤の特性が悪い場合は置換工法が使用され、置換材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と比較すると良好なため、深層混合処理工法のような対策は行われておらず、浅層部の限られた深度まで置換もしくは安定処理が行われることが一般的である。

置換工法は最も一般的に行われているが、置換の必要性を判断する指標や置換厚さに対する設計方法はなく、国・地域ごとに経験的な方法が用いられている。一般的な舗装設計における置換厚は欧米や日本の基準によって、主に舗装構成、土質分類と CBR 値で決定することが可能であるが、前述の通りラテライトは土質試験や CBR 試験結果は試料状態、手順によってばらつきが発生し、施工現場にて期待通りの特性が得られない可能性があることも考慮し、慎重な検討が必要となる。

安定処理で一般的に使用されているのは石灰ならびにセメントである。配合に係る設計方法は定められていない。過去の事例から、セメント安定処理の経年劣化による問題が報告されているため、置換工法と同様に慎重な検討が必要となる。

2.4.4.2 施工時の品質管理における留意事項

ラテライトを建設材料として使用している事業の施工管理にあたっては、現場において室内試験結果から期待される特性と施工時の特性が異なる可能性があることを考慮し、目視や手で触れることにより、粒度の変化や期待される強度との整合性などを密に確認することが重要である。

路床にラテライト層がある場合にはラテライト層は比較的薄い層厚で特性が大きく変化することがあることから、現場密度、CBR 試験や試掘などを適切な頻度で地盤の状態を確認する必要がある。

2.4.5 その他のラテライト対策技術と適用性

ラテライト地盤は浅層部の置換や改良、材料の改良が一般的に実施されている。従来型の技術の他に現時点ではあまり現地で適用されていないセメント系固化材や土質材料に係る粒度調整の技術などが適用できる可能性があり、様々な試みが行われている。現地で材料の入手が容易で、良好な対策事例がある場合など、合理的な事業の形成に資すると判断される場合に、他の対策の適用性について調査し、採用について検討するものとする。

〔解説〕

石灰安定処理やセメント安定処理以外にそれらに産業廃棄物となるような材料を組み合わせた経済的に有利な安定処理方法の研究や試行が多くなされている。表 2.4.5 はラテライトの道路工事に適用された事例を示す。現地や本事例も参考とし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その適正を十分に確認した上で、最適な工法とすることが望まれる。

表 2.4.5 道路工事で採用されたラテライトの改良工法

	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%含むラテライト土を使用	ラテライト土に石灰を混ぜると、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土の安定化により、土の特性が向上した。	Miami, USA
Mahalinga-Iyer et al., 1997	ラテライト土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。締め固め後、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。	ラテライト土の CBR は 35～90%の範囲だった。ラテライト土の収縮性能は、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	道路建設に珪殻灰(最大 8%)とセメント(最大 8%)を含むラテライト土を使用。	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)だった。指定されたセメント含有量に対して珪殻灰を増やすと、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	最初に、生のラテライト土に 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土を締め固め度が 96%、93%、90%になるまで	圧縮下における土壌の変形は圧縮度、土壌の飽和状態、および土塊の内部構造に依存する。	China

	材料と方法	結果	地域
	転圧する。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。	土壌にセメントを混入すると、土壌の内部構造に影響を与え、土壌の耐水性および圧縮性が向上した。	
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%だった。ラテライト土は、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。 ラテライト土壌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	ラテライト土は、シルト含有量が 30%未満の舗装路盤材として利用された。	ラテライト土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%の範囲だった。	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 種類のラテライト土を使用した。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 サイズのチップを使用した。	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%、SiO ₂ 2.2%の組成を持つラテライト処理に使用した。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。	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土は道路建設に大きな可能性を示した。	Indonesia

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)

2.4.6 コンサルタント、施工業者の業務上の留意点

コンサルタントは計画・調査・設計段階で事業の計画地にラテライトが分布するかの確に判断し、ラテライト地盤の評価、材料としての適性によって発生するリスクを最小限とすることを目的として、調査・試験を行い、必要に応じて適切な対策工を計画・設計する。対策工は施工時に必要となる試験、品質管理方法、施工上の配慮を検討した上で、施工業者がリスクに応じた必要な経費を見積もれるよう、入札図書に反映する。施工監理においては対策工が仕様書に準じて適切に施工されているか、施工状況の確認、品質管理試験（原位置ならびに室内試験）を通して管理する。

施工業者はラテライトの特性とリスクを把握し、契約図書に準じ、必要な試験・品質管理を行うつつ、膨潤性土に配慮した適切な施工を行う。

[解説]

2.4.6.1 入札図書作成にあたっての留意事項

事業の対象地でラテライトが分布し、土質材料としての利用が想定される、もしくは基礎地盤にラテライト層が分布することが想定される場合には、入札図書作成にあたって以下の事項に留意する。

- 舗装工の路床や、建屋等構造物の基礎部にラテライト層が分布する場合には、その平面的な分布範囲とともに深度方向の分布を適切に判断し、記録が残るように、施工基面の造成面の写真の記録、適切な頻度での試掘調査、立ち合いによる確認・承認の規定を行うなど、ラテライト層に係るリスクを防止するための規定を技術仕様を含める。
- 土質材料としてのラテライトは施工時の含水比や転圧の状況、手順によって特性が変化することがあるため、盛土後の品質管理試験（現場密度試験など）に物理試験（粒度試験他）を含め、施工後の材料品質に係る管理を行い、記録を残す規定を技術仕様を含める。
- 基礎として適さないラテライト層が対象地に分布すると判断された場合には、想定範囲を図面に示すとともに、埋め戻しの際の材料品質、締固め度等の基準とともに水処理に係る配慮など、リスクを最小化するための規定を技術仕様を含め、必要な費用を適切に見積もる。

2.4.6.2 施工時の品質管理における留意事項

施工管理に携わる技術者は、施工の各段階で適切な配慮ができるようラテライト層、材料としてのラテライトの特性を十分に理解する。ラテライトの施工に係り配慮すべき事項につき以下に示す。

- ラテライトはその堆積環境・形成過程に伴いばらつきが大きい。基礎地盤、材料品質の変化に十分に留意し、品質管理を行う。
- ラテライトは施工時の含水比などの条件、転圧の手順によって締固め特性が変わることがあるため、施工条件を考慮して材料試験時の手順を設定するなど慎重な配慮をするとともに、施工初期段階に期待される施工品質が得られているか、十分な管理を行う。

2.4.7 維持管理段階における対応

ラテライトが分布する地域において、建設した構造物がその機能を保持し続けるよう適切な維持管理を実施する必要がある。

ラテライトは時間の経過に伴う特性の変化など、その性質が必ずしも解明されていない。従って、ラテライト地盤やラテライトを材料として用いた区間の維持管理にあたって、日常点検にて建設された施設の変状が認められないか、注意して点検・記録する。変状が認められた場合には損傷の進行を抑制し、建設した施設が十分な機能を発揮し続けられるよう、必要な対応を行う。

維持管理にあたっては、調査・設計・施工の各段階の記録等を参考に調査及び点検・保守作業を行う。

[解説]

(1) 維持管理の目的

維持管理は、工事完了後の構造物（道路・水路・建屋等）が必要な機能を十分に発揮し、構造物の安全性を保ち続けることを目的として実施する。

ラテライトが分布する地域では舗装の劣化が想定よりも早く発生するケースが確認されている。このような変状はできるだけ早期に見出し、補修等の必要な対応を遅延なく実施することが施設の健全性を維持するために必要である。

(2) 維持管理の留意点

ラテライトの材料として、もしくは基礎地盤としてのばらつきが道路構造物の舗装の健全性に深刻な影響を与えることがある。舗装面のクラックや轍の発生が舗装の深刻な損傷を起こす事があるため、日常点検において、なんらかの変状が確認された場合には、調査・設計・施工時のデータの確認を行い、必要な補修対策を計画・実施する。

(3) 点検・調査

進行すると深刻な損傷となる可能性がある構造物の変状を早期に把握し、適切な措置及び補修の要否を判断するために実施する。点検にあたっては特にラテライトが分布する地域で発生している問題の事例に鑑み、特に注意して点検する箇所・着目点を事前に抽出し、点検者が把握しておくことが重要である。道路構造物では舗装表面の進行性のクラックの発生や轍などに留意する必要がある。ODA 事業の実施にあたっては引き渡しの前に事業者が実施する必要がある日常の点検・調査と留意事項をまとめ、適切な維持管理が行われるよう伝達しておく必要がある。

第3章 その他の特殊土

本項では、第2章で示した特殊土以外の特殊土について、主に注意喚起を目的として概要のみを記述した。特殊土の分布域や判定方法および対策方法などに関する情報を有する特殊土については、「全世界開発途上国における建設工事で遭遇する特殊土壌対策及びローカルの自然地盤材料の補強対策に関する基礎研究（プロジェクト研究）」の報告書で記載しているので、適宜参照されたい。

本章で取り扱う特殊土は以下の通りである。

力学的特性	侵食性土、破砕性土、可溶性地盤、軟弱地盤(ここでは泥炭を対象)
化学的特性	塩類性土壌、硫酸塩/硫化土壌、炭酸塩土壌、酸性土壌
その他	珊瑚土壌、雲母を多く含む土壌、氷河土壌、風化岩・変成岩、乾燥土壌

3.1 侵食性土壌

侵食性土壌は自然の風化や浸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。侵食性土壌は主に農業、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。

[解説]

侵食性土壌は、砂質土、砂質シルトで粒子間の団結力が弱いものであり、主に以下のような特徴がある。

- 脆弱性：侵食性土壌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。

分散性土、崩壊性土は特に侵食しやすい土壌である。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。水に対して溶けるという意味では可溶性地盤があるが、溶けるのに前記よりも地質年代的に時間を要するので、侵食性土壌とは異なる。

土壌侵食やそれに続く砂漠化などは地質工学的災害である。最近の予測では気候変動により、2015年から2070年の間に水による土壌侵食が世界的に30～66%増加する可能性がある」と報告されている。国連は、耕作地の喪失が土壌の二酸化炭素固定の減少により地球温暖化のペースを加速させていると警告した。これを受けて、土壌の栄養分と水分のバランスの強化、森林再生など、土壌侵食を減らすためのさまざまな取り組みが行われている。



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 3.1.1 ガリ侵食の事例

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、など色々なところで侵食に伴う問題が発生する。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 3.1.2 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 3.1.3 侵食性土壌の侵食

3.2 破碎性土

破碎性土 Crushable soil は土を構成する土粒子が脆く、外力が作用すると、粒子破碎が生じ、沈下などの変形が生じる土である。破碎性土には以下のようなものが挙げられる。

- 石灰質砂・珊瑚礫混じり土などの海洋堆積物
- 軽石・スコリアなどの火山性堆積物
- まさ土などの風化残積土

地盤材料は外力の大きさにもよるが、粒子破碎を起こす場合があるため、その破碎のしやすさ、すなわち破碎性をあらわす指標を設定し、その指標を遭遇する外力と比較することが工学的な問題に取り入れる上で重要となる。

[解説]

(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。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 3.2.1 に示すように、性質や形状が異なるさまざま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。石灰質砂は、通常、方解石やアラゴナイト $[\text{CaCO}_3]$ 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増加するドロマイト $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ も含まれている。石灰質砂は高い空隙率と粒間空隙が組み合わさることで圧縮性が大幅に高くなり、比較的低い応力で破碎されやすくなる。

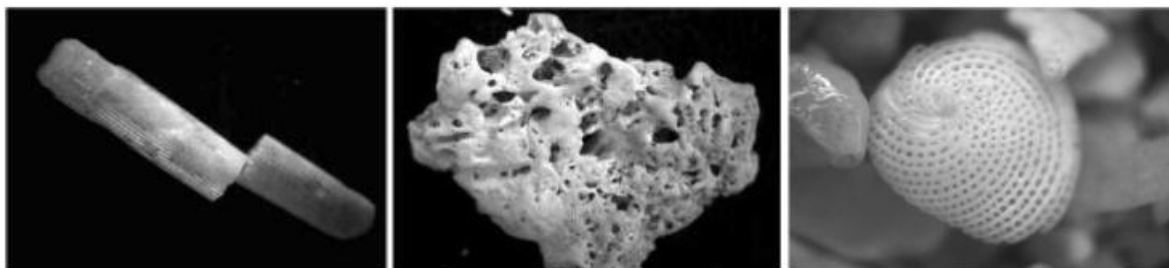


Figure 2. Some grain shapes of calcareous sands (Olgun et al., 2009)

出典: Sand compressibility aspects related to CPT, S.M. Ahmed, S.W. Agaiby, P.W. Mayne(2014)

図 3.2.1 石灰質砂の粒子形状

(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。軽石の特徴として、軽量で、押しつぶしやすく、角張っていること、高い吸水能力を持つ気泡性であること、表面粗度が高く摩擦角が大きいことおよび圧縮強度が低いことなどがある。

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)
指で碎けるか?	碎けにくい	簡単に碎ける

出典: JICA 調査団

(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壌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)まで残積土に入れている。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壌となったもの、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。そういう意味で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各国によってその定義はバラバラなのが現状である。ラテライトも風化残積土に分類されている。風化残積土に関する研究は地質学、土壌学、土質工学などの各分野でも行われているが、地盤工学的観点からの研究は比較的新しくまだ不明な点も多い。

風化残積土地盤の取扱いを困難にしているもう一つの要素は不均一性とばらつきの要素である。節理面などの不連続面ならびにその部分を充填する異質物質が地盤の強度、変形、透水性に及ぼす影響である。古い節理面あるいは亀裂が熱水の作用で変質を受けているものは節理部に比較的厚くて、不規則な形態をもつ粘土を伴っており、モンモリロナイトを含んでいることが多い。

(4) 工学的問題点

粒子の破碎は打込み杭の側面摩擦、鉄道バラストの耐久性、ロックフィルダム沈下の沈下など、土質工学上の重要な問題である。軽石堆積物は火山地帯でよく見られるが、その基質に非常に砕けやすく圧縮しやすい粒子が含まれているため、工学的に大きな課題となっている。これらの堆積物は複雑な土質特性を示し、地滑りや地震などの自然現象と関連している。石灰質砂の杭の周面摩擦は、珪砂の杭よりも大幅に低い。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。破碎性土の杭の支持力は、従来の古典的土質工学の推定式が適用できない。日本でも火山灰質土の杭の支持力が一般の土壌より小さいことが報告されている。破碎はふるい分けだけでは評価できず、破碎可能な砂の構造と挙動を完全に理解するには、顕微鏡による粒子の形態の詳細な観察が必要となる。

3.3 可溶性地盤

可溶性地盤は、雨水、川の水、地下水などを起因として地盤そのものが溶解する地盤のことをいい、地盤沈下や地下の陥没による崩壊などを生じさせる。可溶性地盤には溶解度が高い順に、以下のようなものが挙げられる。

- 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）

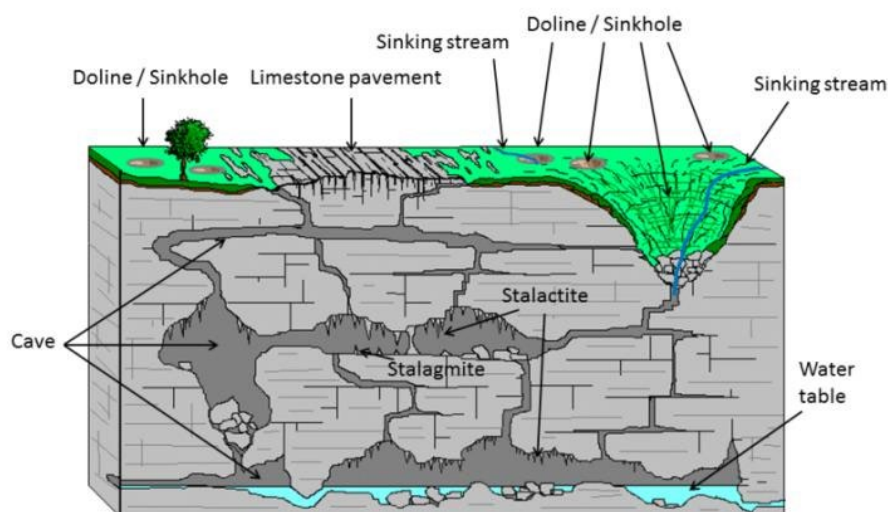
一般的にカルスト地形を有する箇所に建設する場合、地盤沈下の危険があり、構造物の基礎を造るには非常に困難な地盤となるため、留意する必要がある。

〔解説〕

(1) 特徴

可溶性地盤は、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、さまざまな程度の地質災害をもたらす。カルスト地形の概念図を図 3.3.1 に示す。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。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く、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。石膏の場合はそれほどではない。石灰岩の溶解はそれ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。

可溶性地盤は、種類によって溶解速度が異なり、地質構造も複雑な場合があり、地形・地質状況によって特有の工学的問題を抱えている。可溶性地盤上に建設する際は、地盤の特性（物理的・力学的・化学的性質）を十分に理解するとともに基礎地盤の調査精度を高めることが重要である。



出典: <https://lotusarise.com/karst-landforms-upsc/>

図 3.3.1 カルスト地形の概念図

(2) 工学的問題

カルスト地形の工学的問題は杭基礎などでは石灰岩が融解してシンクホール(陥没穴、sinkhole)を形成し、時には大きな陥没が地表面に現れ構造物に損害を与える。また、カルスト地形が生み出す洞窟は古くなると構造破壊を行い、中空のような空隙の多い構造となる。岩盤に載せた杭が突然下方の空隙に落ちて橋脚が使用不能になる問題を起こすこともある。空洞は地下深くまであることが多いため、対策する場合は対策方法を含めて大きな問題となる。



Fig. 10. The large dropout sinkhole in the suburbs of Guatemala City.

出典: Sinkhole hazard case histories in karst terrains, T. Waltham, 2008

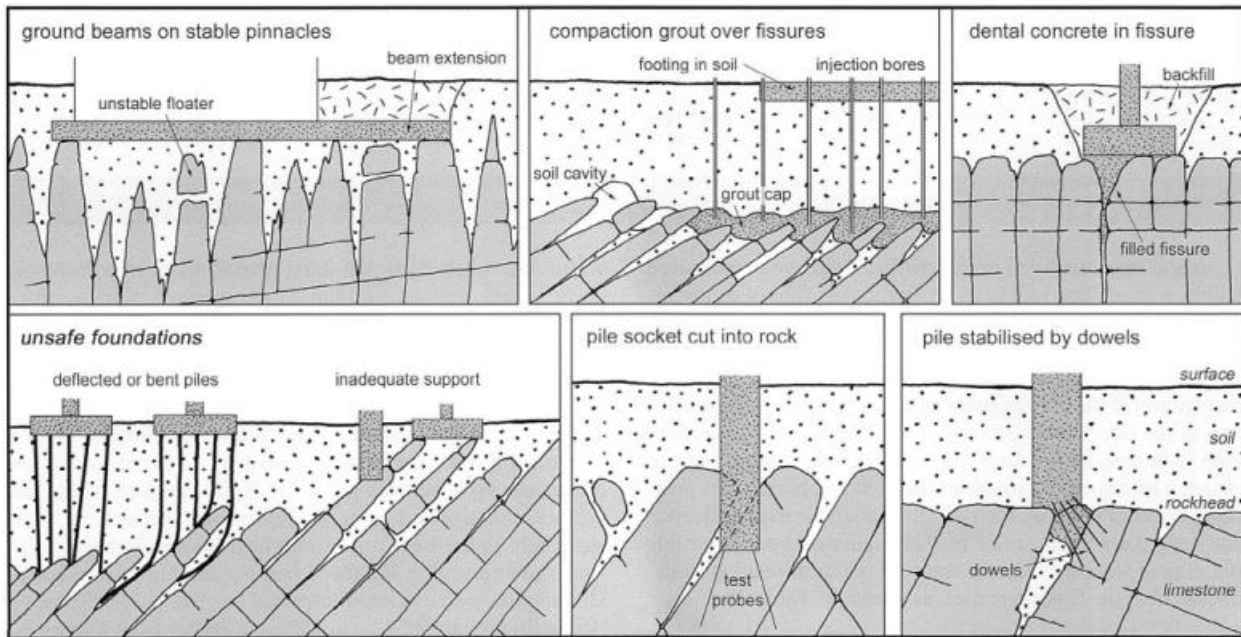
図 3.3.2 巨大な陥没穴



Fig. 12. The failed expressway viaduct after its pier had dropped into a void in the limestone beneath Tampa (photo: S. O'Rourke).

出典: Sinkhole hazard case histories in karst terrains, T. Waltham, 2008

図 3.3.3 高速道路の橋脚が空洞に落ちた事例



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 3.3.4 土壌で覆われた石灰岩カルストの基礎工事

3.4 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。塩類土壌や塩類ソーダ土壌では、高い塩分濃度に構造物を腐食させ、インフラの耐用年数を短くする。一方、ソーダ（ナトリウム）土壌では、分散性の性質を有し、土壌の微細な粒子が間隙を詰まらせ、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ため、建設時は塩類土壌の除去や化学的改良による排水性改善等の対応が必要となる。

〔解説〕

塩類土壌は可溶性塩類が多く、交換性 Na^+ が少ない土壌である。ソーダ（ナトリウム）土壌は可溶性塩類が少なく、交換性 Na^+ が高い土壌である。塩類ソーダ土壌は可溶性塩類と交換性 Na^+ の両方が高い土壌である。塩類土壌とソーダ土壌の主な特徴を表 3.4.1 に示す。

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、また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。

塩類土壌では、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。塩性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様でなく、塩分の濃度も不均一に分布しているため、変形特性のばらつきによる建物の基礎が不同沈下する。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。

ソーダ土壌では、分散性の性質を有しているため、土壌の分散により、土壌の微細な粒子が間隙を詰まり、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。

表 3.4.1 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 ₂ CO 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)



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 3.4.1 ナトリウム土壌の毛管現象による土壁の被害

(1) サブカ (Sabkha)

1) 定義と分布

サブカ (Sabkha) は潮上干潟または塩性砂原である。沿岸または内陸の乾燥・半乾燥地域に形成される平坦な塩性地形となる。

分布域は特にアラブ首長国連邦・ペルシャ湾南岸が典型例であり、地中海・英国・アイルランドなどにも地質記録として存在する。

類義語としては Sebkha、塩原 (salt flat)、沿岸サブカ／内陸サブカがある。

2) 形成起源とプロセス

サブカの形成には浅海の炭酸塩環境＋強蒸発＋地下水の毛細上昇が重要となる。蒸発作用により地表～浅層に岩塩性鉱物（石膏、アラゴナイト、無水石膏等）が沈殿する。乾湿サイクル、地下水と風成堆積の相互作用により、独特の平坦かつ塩分に富む地表が形成される。

3) 気候要因と影響

蒸発量は年間最大 124cm（ラグーン）、平均 6cm（サブカ）である。昼夜・季節の温度差が大きく（0～50℃）、日中の乾燥＋夜間の湿潤（霧）が特徴となる。気候変動や暴風（シャマル）により、海水が内陸 5km まで進入することもある。岩塩・石膏の続成作用や亀裂（ポリゴン状）形成など、微地形の変化と物性変化が頻繁に起こる。

4) 地盤工学的特徴

a) 物理・化学特性

高塩分地下水（NaCl 最大 23%）により、土粒子間結合が弱い・腐食性が高い。構成鉱物は方解石、ドロマイト、石膏、無水石膏、岩塩、マグネサイトなどである。結合鉱物の高溶解性が構造的脆弱性・支持力低下の原因となっている。

b) 工学的問題

- ・ 強度が低く、不均一・再沈殿性が高い。
- ・ 地盤は乾燥と湿潤、熱膨張と収縮により脆弱化・亀裂発生。
- ・ 施工中・運用中の沈下、崩壊、腐食性被害、塩害リスクが高い。

c) 地下水の影響

- ・ 毛細管上昇帯が表層に影響し、蒸発による塩析出→土壌劣化。
- ・ 地表形状が地下水面の傾斜に影響されるほど、水と蒸発の支配性が強い。

3.5 硫酸塩／硫化土壌

硫酸塩土壌 Sulfates soil 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。一方、硫化土壌 Sulfides soil 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。

硫酸塩によるコンクリート構造物の劣化やセメント改良に伴う硫黄化合物の変化により、膨潤性を示す場合があり、留意する必要がある。

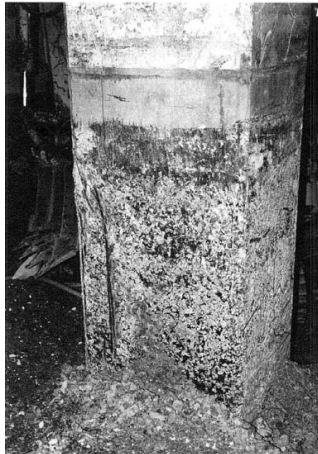
〔解説〕

硫黄は岩石や土壌に広く存在し、主に 2 つの形態で存在する。酸化状態では硫酸塩として、主に石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) として、還元状態では硫化物として、主に黄鉄鉱 (FeS_2) として存在する。その他の形態は、埋立地における気体の硫化水素 (H_2S) など、特殊な状況で発生する。

黄鉄鉱 (FeS_2) は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 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 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形態である。

硫酸塩は、石膏、無水石膏 (CaSO_4)、エプソマイト ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、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 (BaSO_4) 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り、特に塩化物やその他の塩類も存在する。

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、盛り土やその上にある舗装、床スラブ、基礎が盛り上がったたり、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。図 3.5.1～図 3.5.4 に問題事例を示す。



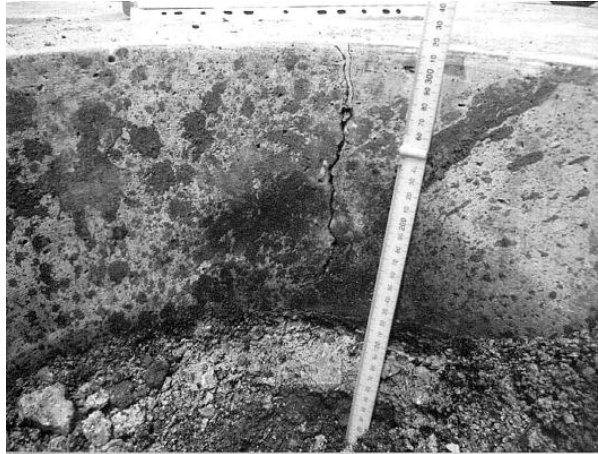
出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition
Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 3.5.1 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



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition
Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 3.5.2 英国 A50 幹線道路にある垂鉛メッキ鋼製暗渠の腐食



出典: ICE Manual of Geotechnical Engineering 2nd Edition Volume 1 Geotechnical engineering principles, problematic soils and investigation

図 3.5.3 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



出典: Acid Sulfate Soils, Implications for Rural Landholders, Western Australia 2008

図 3.5.4 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

3.6 炭酸塩土壌

炭酸塩土壌 Carbonate soil は、主に炭酸カルシウム (CaCO_3) や炭酸マグネシウム (MgCO_3) などの炭酸塩鉱物を含む土壌であり、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。

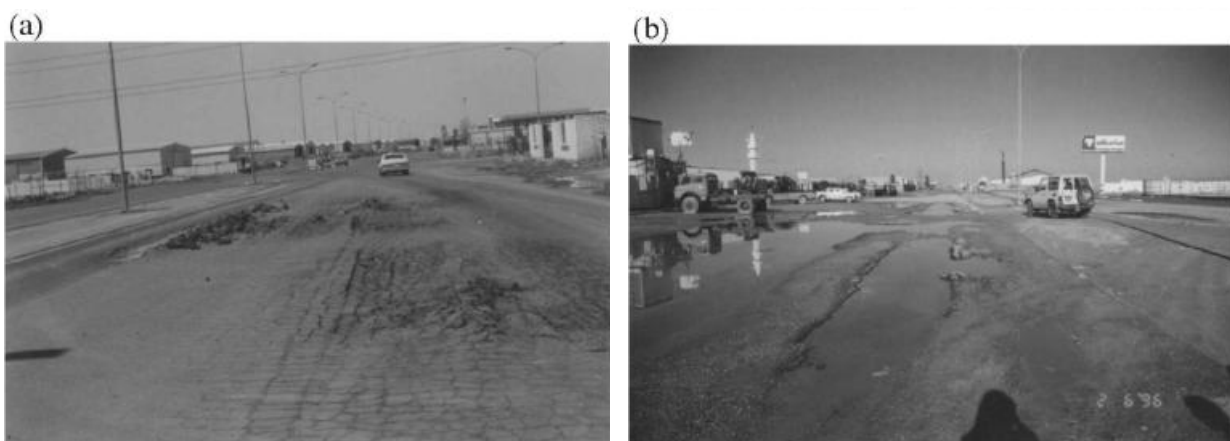
炭酸塩土壌は、強度が不均一であり、沈下や地盤陥没のリスクがあること、メカニズムは異なるが膨潤性土と同じ挙動を示すため、道路や舗装の表面や構造物に亀裂を発生させるおそれがある。

[解説]

炭酸塩土壌は、主に炭酸カルシウム (CaCO_3) や炭酸マグネシウム (MgCO_3) 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。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。深度 20 メートルから 100 メートルでも気象条件によって形成される。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さまざまである。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。珊瑚礁由来の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。炭酸塩土壌の主な供給源は炭酸カルシウム (CaCO_3) を含む岩石で、これらの岩石が風化し、溶解し、そして沈殿する過程を通じて、土壌中に炭酸塩が蓄積される。

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、泥灰土) 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。

炭酸塩土壌の問題として、表 3.6.1 の通り挙げられる。



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)

図 3.6.1 泥灰岩を基層とする道路の典型的な劣化 (a)建設後 3 か月 (b) 2 年後の道路の状態

表 3.6.1 炭酸塩土壌の問題

項目	問題
道路の問題	泥灰土の一部では膨潤性の特性があるため、膨潤性土と同様な道路の劣化の問題がある。
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。
膨潤性	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。一方、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。これらの理由により、膨潤性土と同じように道路や舗装および構造物に亀裂などの問題が発生する場合がある。
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。
泥灰土(Marl)の道路盛土材料	泥灰土は道路盛土材料として使用されることがあるが、道路に陥没や沈下が発生する場合がある。そのため、泥灰土を盛土材料として使用する場合は、経済的および環境的理由より石灰処理が行われる。

出典：JICA 調査団

(1) 泥灰土 (Marl)

泥灰土 (Marl) は炭酸カルシウム (CaCO_3) と粘土が共に堆積して形成された土質材料または軟岩であり、以下のような特徴を持つ：

- 母岩：石灰岩、ドロマイト、粘土岩などの炭酸塩岩の物理的・化学的風化産物
- 成分： CaCO_3 (0～100%)、粘土、シルト、砂、有機物などを含む
- 状態：未固結土からセメント化された硬質層まで幅広い
- 地質学的分類と土質工学的分類の中間に位置する複雑な素材

特性は極めて多様で、一律の地質的・工学的定義が困難とされる。成分比 (CaCO_3 /粘土) の違いにより強度や圧縮性が大きく変化し、同一地点でも層厚や含水比のバラツキが大きいいため、地盤条件の予測が困難となる。



出典: Marl crumbling decrease using geopolymers mixtures- lessons from experimental tests in the vicinity of Fez, Morocco, M. Akdim, L. Mesrar, A. Alami, S. Sabah , R. Jabrane, 2022

図 3.6.2 泥灰岩の崩れかけた様子 [M. Akdim, 2022]

泥灰土は建設材料として広く使われているが、湿潤時に CBR 値が大幅に低下するなど、水に対して非常に敏感である。過度の荷重や厳しい露出条件下での道路の路盤建設に泥灰土を使用した場合の性能は疑問となる。また、湿潤乾燥サイクルによって強度が急激に低下したり、95%以上の密度でも最適含水比を外れたりすると道路が劣化する。

含まれる粘土鉱物によっては水分を吸収して膨潤する膨潤性土となる。このような泥灰土は大きなテンションクラックが生じ、斜面勾配 10%以上で斜面の安定性に問題を引き起こすことがある。

3.7 酸性土壌

酸性土壌 Acid soil は pH 値が 6.5 未満の土壌をいう。土壌の酸性化は自然および人為的なさまざまな原因によって生じる。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、CO₂ 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。

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他、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。

[解説]

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。

土壌の酸性化は自然および人為的なさまざま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、さまざま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、CO₂ 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 Al³⁺塩基性陽イオンの交換、塩基の溶出などが含まれる。

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が高い酸性度のため問題となる。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 3.7.1）。

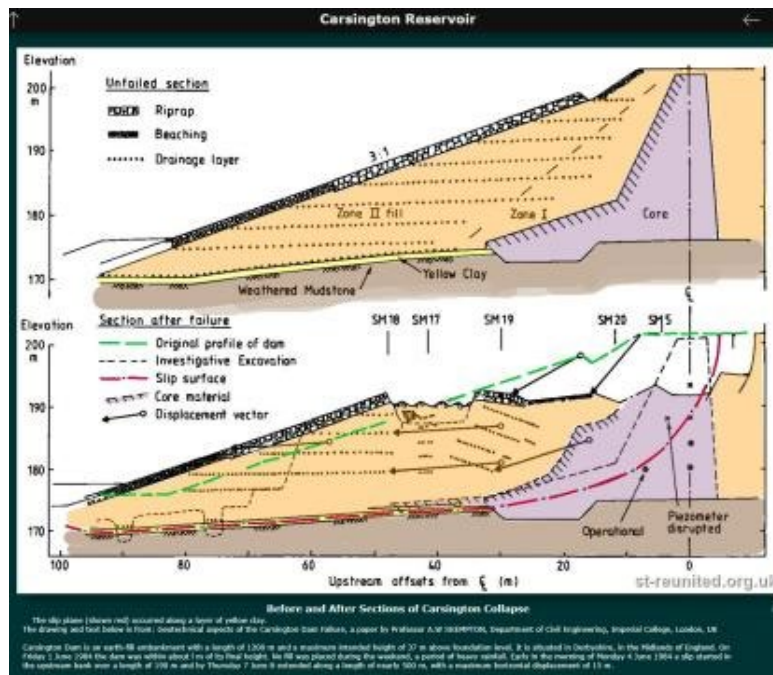


図 3.7.1 Carsington Dam のすべり破壊

出典: <http://st-reunited.org.uk/History/Carsington/index.html>

3.8 泥炭

泥炭 Peat soil は湿地や沼地で形成される有機質土の一種で、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。主な分布域は北極圏や亜寒帯地域および熱帯地域・温帯地域である。

泥炭は含水比が大きく、強度が小さく、間隙比が大きいため、盛土により大きな沈下が生じたり、沈下と同時に盛土がすべり破壊したりするため、留意する必要がある。

[解説]

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。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。

有機土壌は、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つが泥炭である。泥炭は、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、水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、泥炭の自然含水比（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。

基本的な問題点は日本の泥炭や有機質土と同じである。泥炭は一般に、非排水強度が低く、圧縮性が高い。泥炭地の建物は通常杭の上に支持されるが、それでも周囲の地盤が沈下し、図 3.8.1 に示すような引き込まれた変状を引き起こす。図 3.8.2 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。また、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 3.8.3）。その煙は空高く舞い上がり、航空機の運航に問題となった。無計画な泥炭の開発は自然環境破壊に留まらず CO₂ 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。

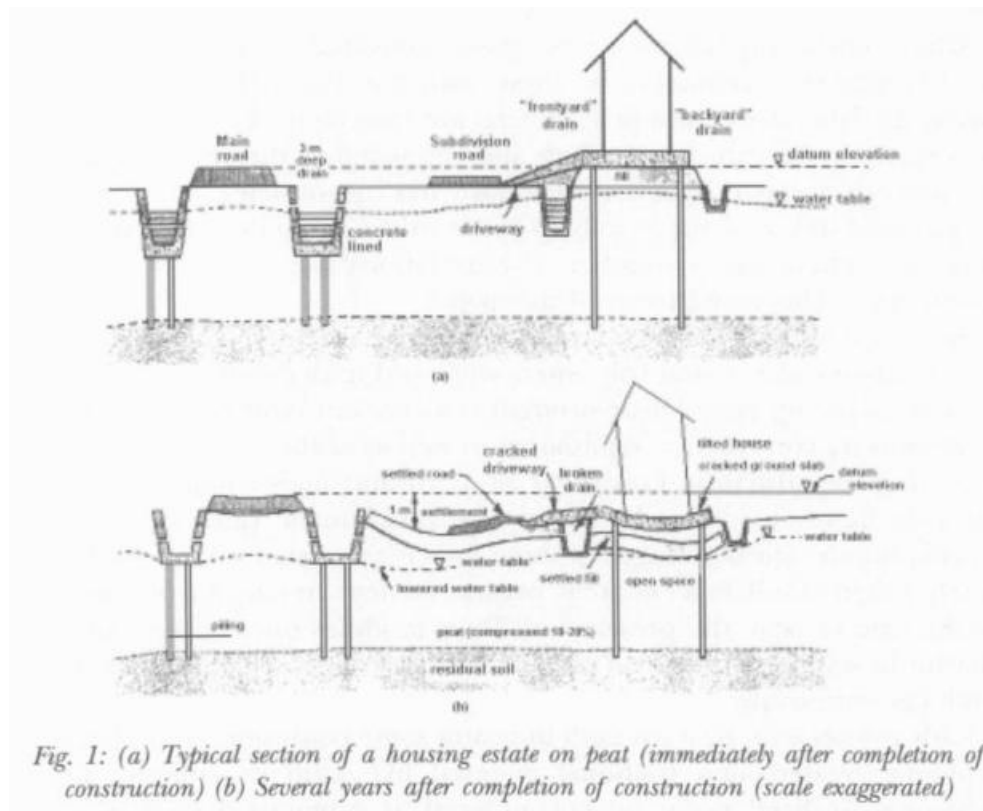


Fig. 1: (a) Typical section of a housing estate on peat (immediately after completion of construction) (b) Several years after completion of construction (scale exaggerated)

出典: Deformation and Shear Strength Characteristics of Some Tropical Peat and Organic Soils, Bujang B. K. Huat(2006)

図 3.8.1 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



出典: JICA 調査団

図 3.8.2 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: <https://forestsnews.cifor.org/49581/peatland-fire-policy-from-past-to-present?fnl=>

図 3.8.3 インドネシアカリマン島の野火

泥炭の対策工法については、日本の設計法の利用として、泥炭性軟弱地盤対策工マニュアルを参考にすることができる (表 3.8.1)。それ以外の情報も同マニュアルを参考にすることができる。

表 3.8.1 泥炭の対策工法の種類

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マニュアル」(H29.3、土木研究所/寒地土木研究所)

3.9 珊瑚土壌

珊瑚土壌は、海生植物(珊瑚状藻類)と海生動物である珊瑚を起源とする土壌のことをいう。珊瑚が堆積した炭酸カルシウムの地層を珊瑚礁岩といい、珊瑚礁岩が風化・崩壊して、残骸が単独もしくは他の土壌と混ざりあって珊瑚土壌となる。珊瑚は多孔質で吸水率が高く、密度は比較的低い、時間の経過とともに沈殿と再結晶によって密度が増して岩のようになり、強度が高く空隙率が低い材料となっていく。

珊瑚土壌は、地盤工学上一般的な粘性土や砂質土とは異なった性質を示すこと、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施工時など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ることで所定の強度が発揮されないことなどがあるため、留意する必要がある。

[解説]

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。

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り、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。

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、密度が低いいため荷重低減の効果は期待できると考えられる。

珊瑚土壌に関する基準やマニュアルなどは特になく、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(図 3.9.1 参照)。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(参照)。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（図 3.9.2 参照）。



珊瑚礫まじり土浚渫場



珊瑚礫まじり土

出典：JICA 調査団

図 3.9.1 珊瑚礫まじり土の例(パラオ)



珊瑚岩石採石場



上部:硬い層

下部:軟らかい層

出典：JICA 調査団

図 3.9.2 珊瑚岩石の例(マーシャル諸島)

3.10 雲母を多く含む砂

雲母 (mica) はケイ酸塩鉱物のことをいい、雲母が砂に多く含まれる場合、雲母の粒子形状に伴う砂との噛み合わせにより、通常の砂と比べて異なった力学特性（支持力特性、せん断特性等）を有する。

特に杭の施工時に N 値にもとづく設計支持力では期待する先端支持力が得られない可能性があり、一般的な設計式を使用する際は留意する必要がある。

[解説]

バングラデシュなどの一部の開発途上国では、砂に雲母を含む場合、通常の砂と比較して支持力特性やせん断特性などの力学特性が想定よりも小さくなる事例が確認されている。雲母は層状ケイ酸塩鉱物で六角板状の結晶をしているため、砂との噛み合わせにより、図 3.10.1 や図 3.10.2 に示すような特殊な構造となることが要因である。

実際に、バングラデシュの杭の施工現場においては、 N 値にもとづく杭の設計支持力よりも実際には低い先端支持力が得られており、問題となった。

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を整理すると、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壊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）。
- N 値から相対密度や内部摩擦角が推定できない。
- 雲母が多く含まれると内部摩擦角は密度に関係なくあまり大きくならない。また、粘着力は雲母量が多くなるほど小さくなる。
- 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。
- 締め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。

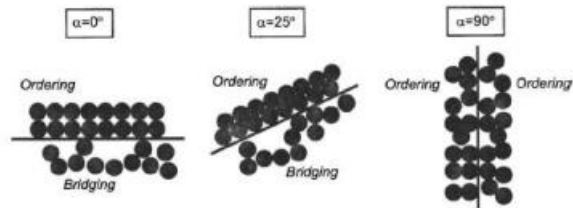
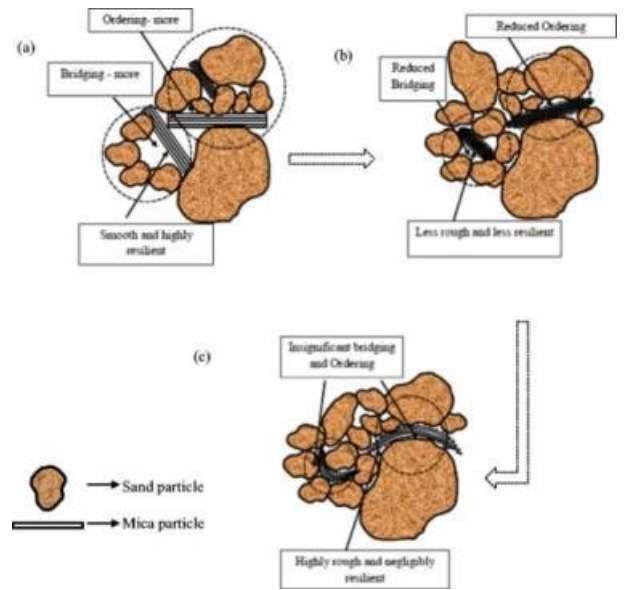


Fig. 1. Hypothesized bridging and ordering effects: Platy particle orientation α

出典: Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response, Lee J.S, M. Guimaraes, J. C. Santamarina,, 2007

図 3.10.1 砂に雲母が含まれているときの
特殊な構造



出典: Effect of Successive Impact Loading on Compactability, Microstructure, and Compressibility Behavior of Micaceous Sand, Seethalakshmi P., Ajanta Sachan, 2018

図 3.10.2 砂に雲母が含まれている時の
せん断変形

3.11 氷河堆積土（氷積土）

氷河堆積土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、粘土の混合土壌、さらには薄層粘土とさまざまなものがあり、氷河が前進するにつれてその下で圧力とせん断の作用によって堆積するか、氷が溶けるときに堆積する。堆積プロセスによって物理特性や力学特性など大きく変化すること、不均質であることから調査・試験のばらつきが生じやすい問題がある。

氷河堆積土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、アラスカ等の氷河が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。この土壌は、当該地域ではしばしば地すべりを発生させる素因となるため、建設時に留意する必要がある。

[解説]

氷河堆積土は危険な土のひとつであり、氷河堆積土は世界の寒冷地域に広く分布しており、世界全体の約 10%を占めている。第四紀（氷河）の地質学に関する地質学文献は多くあるが、土質工学的特性に関する情報は極めて少ない。氷河堆積土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、粘土の混合土壌、さらには薄層粘土とさまざまなものがある。氷河堆積土は氷河が前進するにつれてその下で圧力とせん断の作用によって堆積するか、氷が溶けるときに堆積する。堆積モードによって土は空間的に変化し、分類や特徴付けが困難となる。地盤調査が不十分で、堆積プロセスが土質工学的挙動に与える影響が理解されていないとクレームや失敗につながる。

通常のサンプリングでは試料の乱れによりそれらの特徴を検出できない場合がある。氷河によって運ばれ、氷体の衰退に伴い解放された堆積物をティル till と呼ぶが、その特性は土質力学などの経験論で説明できず、取り扱いが難しい材料である。ティルに砂利や砂のレンズが含まれると深さに応じてさまざまな硬さ、強度、浸透性が生じるため、サンプル採取が困難になる場合がある。また、砂利や亀裂はサンプル採取に影響し、試験結果にばらつきが生じる可能性がある。

表 3.11.1 に氷河堆積土の工学的問題を示す。

表 3.11.1 氷河堆積土の工学的問題点

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	一部の氷河堆積土、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	氷河堆積土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)

◆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。鋭敏比は攪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。

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る。ほとんどのクイッククレイは、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増加する。浸出は雨水の浸透、下にある透水性の土壌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。

クイッククレイの形成の原理は、図 3.11.1 に示すように整理されている。クイッククレイは、当該地域ではしばしば地すべりを発生させる素因となるため、建設時に留意する必要がある。

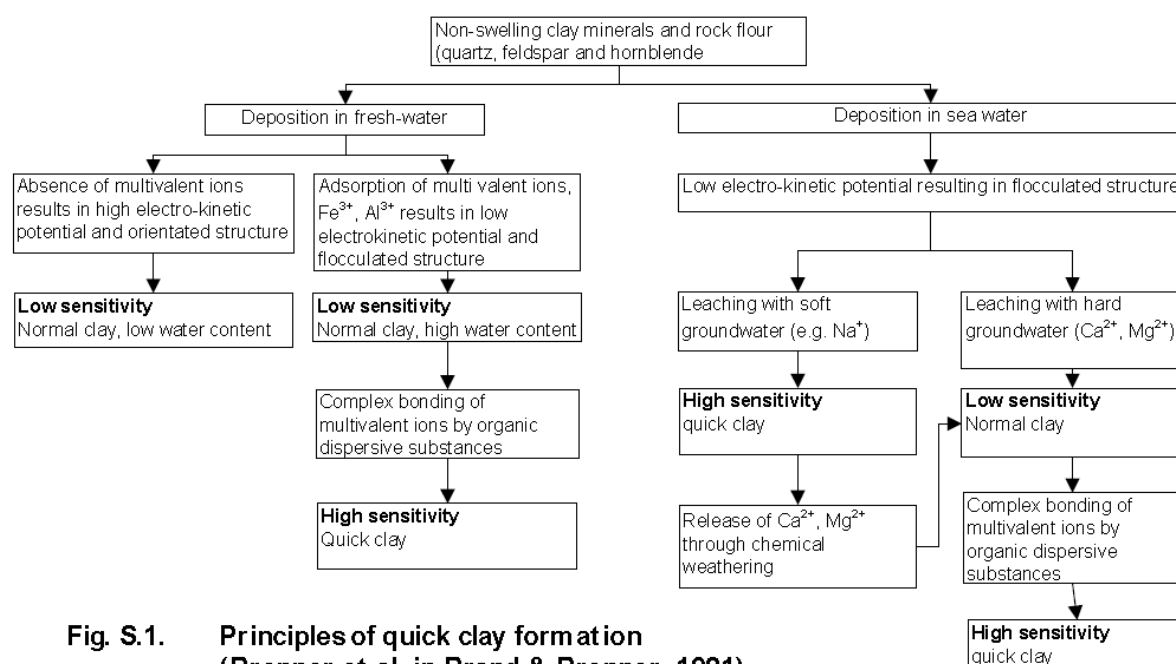


Fig. S.1. Principles of quick clay formation
(Brenner et al. in Brand & Brenner, 1981).

出典: Quick clay in Sweden, KARIN RANKKA, YVONNE ANDERSSON-SKÖLD, CARINA HULTÉN, ROLF LARSSON, VIRGINIE LEROUX, TORLEIF DAHLIN(2004)

図 3.11.1 クイッククレイ形成の原理

3.12 乾燥土壌

乾燥土壌 Arid soil 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。

乾燥土壌は風の浸食に対して脆弱なため、建設時に砂埃などによる視界不良に伴う作業効率の低下が生じる。また、水を利用する場合、高濃度の溶存塩分が含まれている水の可能性があること、工事用の井戸を掘削しても、地下水の供給量が不足する可能性がある。

〔解説〕

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に約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。

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、作業効率が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が、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。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、膨潤性土と同じ問題を引き起こす。

3.13 風化岩・変成岩

風化岩や変成岩は、土壌化して特殊土になる場合があるが、土壌になる前から工学的な問題を引き起こすものや切土して急速に風化を起こして問題となるものがある。

本項では、風化のしやすさや形成される可能性のある特殊土の関係を整理した。

風化岩の代表例として「泥岩」があるが、組成と構造の要因に応じて、様々な工学的挙動を示す可能性があり、特に留意する必要がある。

[解説]

風化岩や変成岩が土壌になって特殊土になることについては各特殊土の項目で説明しているが、土壌になる前から工学的な問題を引き起こすものや切土などして急速に風化を起こして問題となるものがある。岩石は風化しやすいものからしにくいものがあり、アルカリ度が高いと風化しやすくなるなど、含まれる鉱物により色々な土壌となる。また、気象により色々な土壌に風化する。風化のしやすさ、形成される特殊土壌の関係を整理すると表 3.13.1 のようになる。

表 3.13.1 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		風化土壌と問題点	風化のしやすさ	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)。	最も風化しやすい	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

種類		風化土壌と問題点	風化のしやすさ	酸性度	関係する特殊土
変成岩	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	
	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。	非常に風化しやすい	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	ラテライト
	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	
堆積岩	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	
	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。	風化しやすい	(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。	風化しやすい		

種類		風化土壌と問題点	風化のしやすさ	酸性度	関係する特殊土
	頁岩 (Shale)	頁岩(Shale)は層理に沿って崩壊しやすい。Clayshale はスレーキングが早く、粘土化すると膨潤性土になる。	非常に風化しやすい／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。	比較的風化しやすい	(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。	非常に風化しやすい	(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)	
	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。	風化しやすい	(塩基性)	ラテライト

出典: JICA 調査団

堆積岩の中には特殊土になるだけでなく、中～強風化岩になる風化の過程で盛土材料に使用した場合に問題となる岩がある。泥岩類は盛土するときには良好な材料でも、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留意しなければならない。

泥岩は、細粒で粘土を多く含むさまざま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出現するため、建設現場の自然地盤として存在するのが一般的で、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、泥岩はさまざま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。泥岩は典型的には、軟らかい土のような粘土堆積物から、非常に硬い土や中程度の強度の岩石までの範囲にわたり、一軸圧縮強度による分類を表 3.13.2 に示す。

表 3.13.2 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	粘り気の強い粘土
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

泥岩の問題事例を表 3.13.3 に整理したので参考にされたい。

表 3.13.3 風化岩・変成岩の問題

スレーキングしやすい泥岩の切土	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 は切土時に急勾配でも容易に切土できるが、雨期と乾期を繰り返す雨期に斜面崩壊が生じる。Clay shale は切土後に細かい亀裂が多数生じ、そのスレーキングした亀裂に薄い粘土が生じ、それが膨潤性粘土となり、亀裂を拡大し、斜面の脆弱部を形成し、崩壊に至る。スレーキングが早いのが通常の頁岩よりも大きな剥離が生じないので、切り土直後は目立たない。
基礎	泥岩は、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。回復不能な歪みや非線形の応力歪み関係の可能性があるのにも関わらず、弾性係数を変形係数として使用するのが一般的となっている。多くの泥岩に見られる異方性はかなりの不同沈下を引き起こす可能性があるため、強固な鉄筋コンクリート製のラフトを使用するか、構造物にジョイントを設ける必要がある。
黄鉄鉱による泥岩の体積変化と劣化	黄鉄鉱を含む泥岩の場合、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。黄鉄鉱充填物の膨張が原因で北東イングランドの建物の構造的損傷が起きている。カナダ東部の泥岩基盤でも同様な問題が起きている。
掘削	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。
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。もしくは、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がある。一方で、建設計画の遅延の問題があり、さらに現存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、盛土材と使用すると浸水によって沈下を引き起こすことがある。また、微細な粒子が密に集まって形成されており、乾燥時には比較的安定した強度を持つが、浸水すると沈下を引き起こす場合がある。例えば、泥岩の盛土材料の粒度が粗いと盛り立て後に空隙の多い状態となる。また、粒度が良くても撒き出し時に粒度の粗いものと細かいものが材料分離すると、粒度の粗い方で転圧後に空隙の多い状態が形成される。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が、降雨が浸透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。

出典: JICA 調査団

第4章 特殊土対策

4.1 対策工法の概要

特殊土の対策工法としては、「力学的工法」、「化学的安定処理」、「生物学安定処理」、「その他の工法」に大きく分類される。力学的工法としては、主に原位置材を再利用する方法、置換工法、サーチャージ/載荷工法、事前湿潤・ポンディング、水分コントロール、締固め工法、固結工法、補強工法(盛土材)が挙げられる。化学的安定処理の方法としては、在来工法や廃棄材・副産物を活用した安定処理工法が挙げられる。生物学安定処理の方法としては、主に微生物、酵素、天然ポリマーを用いた方法が挙げられる。その他の工法としては、電気化学的土壌処理、熱処理工法が挙げられる。

特殊土の対策方法は、いまだ確立されておらず、かつ知見も十分でないことから、これらの対策方法の適用にあたっては、地域環境、地質・地形条件、施工上の制約等を鑑み、適切な方法を選択し、選択した工法について、実際の施工に先立ち試験施工でその施工性、効果を確認することが望ましい。また、施工・維持管理段階において、対策効果に関するモニタリングを行うことが重要である。

特殊土が異なっても同じ対策方法が活用できる場合が多いと考えられ、対象施設、現地環境、制約条件、地質・地形条件等を鑑み、適切な対策方法を選択するとよい。ただし、特殊土の対策については確立されていない方法もあり、調査・計画・設計・施工・維持管理の各段階において、対策方法の効果を十分にモニタリングすることが重要である。

[解説]

特殊土の対策では、通常的设计・施工では不十分な場合が多く、地盤の挙動に応じた特別な対策工法の選定・適用が不可欠となる。ここでは、特殊土の対策方法の概要について紹介し、対策方法を決定するための一助として活用されることを目的とした。したがって、対策方法の詳細については、各参考図書並びに巻末資料掲載の事例集を参考にされたい。

対策工法の選定の際の参考として、表 4.1.1 に特殊土と対策方法の対応表を示す。同表は、特殊土に各対策方法を適用した場合の対策効果・実績、経済性、留意点等を安定化・水分制御・強度に分けて整理したものである。対策効果が良く、かつ実績を有する方法については、信頼が高く、活用できる可能性が高いと思われる。一方で、対策効果が良くても、実績を有さない方法については、選定にあたっては十分な検証が必要と思われる。同じ特殊土の分類に位置付けられても、地域によっては適用できないことも想定されることから、現地での適用確認を検証するための調査・試験・試験施工が必要となる。特殊土の対策方法は、いまだ確立されておらず、かつ知見も十分でないことから、これらの対策方法の適用にあたっては、地域環境、地質・地形条件、施工上の制約等を鑑み、適切な方法を選択することが望ましい。また、特殊土は、建設時には問題が発生しなくても、経時変化に伴う地域環境の変化、構造物の劣化等を起因として、後で問題が発生する可能性も十分にあることから、施工・維持管理段階において、対策効果に関するモニタリングを行うことが重要である。

表 4.1.1 特殊土と対策方法の対応表

対策工法		利用対象	膨潤性土			分散性土、侵食土壌			崩壊性土			破砕性土		ラテライト
			膨潤・沈下、すべり	安定化	水分制御	強度	安定化	水分制御	強度	安定化	水分制御	強度	安定化	強度
力学的 工法	原位置材	高飽和度施工管理	△			×								
	再利用	良質土の原位置混合												
	置換工法	良質土(砂、礫)	○A	×	○A	○A	×	○A	○1		○	○	○	○
		再生材	▲A	×	▲A	▲A		▲A	▲1		▲	▲	▲	▲
		フィルター材					△							
		CNS材料	○	○										
		安定処理土	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	サーチャージ		△		△				△		△	△1	△1	
	事前湿潤・ボンディング		△		×	△		×	△		×			
	水分コントロール	植生工		▽			▽			▽				
		流入水ブロック		△			△			△				
		排水工		○			○			○				
		水平・鉛直遮水層		○			○			○				
		メンブレン		○			○			○				
		吹付工		○			○			○				
		コンクリート遮水		○			○			○				
	締固め工法	フィルター					○							
		サンドコンパクション		×	×		×	×	○A		○A	○A	○A	●
		砕石コンパクション		×	×		×	×	○A		○A	○A	○A	●
		パイロフローテーション		×	×		×	×	○A		○A	○A	○A	●
	固結工法	垂直落下締め固め工法							△3		△3	△3	△3	●
		混合処理	○	△	○	○	△	○	○		○			●
		浅層混合処理							○4		○4	○4	○4	●
		深層混合処理							○4		○4	○4	○4	●
	補強工法(盛土材)	高圧噴射工法					○H		○H		○	○	○	●
		グラウト注入工					○		○		○	○	○	●
		Geogrid, Geotextile			○			○			○		○	○
		Geocomposite			○			○			○		○	○
化学的 安定処理	在来工法	Geonet reinforcement			○			○			○		○	○
		Grocell Geogrid			○			○			○		○	○
		セメント(C)安定処理	○		○	○		○	○		○			○
		石灰(L)安定処理	○		○	○		○	○		○			●
		C+L安定処理	○		○	○		○	○		○			●
		C+F安定処理	○		○	○		○	○		○			●
		ダスト	▲		▲	▲		▲	?		?	?	?	●
		スラグ	△		△	▲		▲	?		?	?	?	●
		シリカフェーム	▲		▲	▲		▲	?		?	?	?	●
		焼却灰	△		△	▲		▲	?		?	?	?	●
	チャレンジ工法	植物灰	△		△	?		?						
		(C/L)+ (安価/廉価) 材料)	△		△	?		?						
		石膏	▲		▲	▲		▲						▲
		ミョウバン				△		△						
		安定処理	▲		▲	▲		▲			▲	▲	▲	●
		農業石灰	▲		▲	△		△	▲		▲	▲	▲	●
		水性アスファルト乳剤	▲		▲	△		△	▲		▲	▲	▲	▲
		カルシウム系安定剤	▲		▲	▲		▲	?		?	?	?	●
		ポリマー	△		△	△		△	▲		▲	▲	▲	▲
		土壌繊維	△		△	▲		▲	▲		▲	▲	▲	▲
生物学 安定処理	古典的 工法	アスファルト溶剤				△		△	▲		▲	▲	▲	△
		微生物	●		▲	●		▲						▲
		酵素	●		▲	●		▲						▲
		天然ポリマー	●		▲	●		▲						▲
生物学 安定処理	複合化	複合化	●		▲	●		▲						▲
		電気化学的土壌処理	△											
		熱処理	△											
			△											

記号	効果	変換	C:セメント
○	良い	有り	L:石灰
●	良い	無し	F:フライアッシュ
△	やや良い	有り	
▲	やや良い	無し	
▽	無より良い		
?	可能性不明		
×	悪い		
××	逆効果		
×	未解明		

サフィクス
H 高価/不経済
L 石灰
A 問題土全層置換/改良ならよい
1:荷重分散
2:破砕強度以上載荷/設計荷重以上の載荷
3:問題層が深い場合は効果少ない
4:問題層が厚い場合は適用できない
5:盛土材として不可
6:材質劣化の可能性

生物学 安定処理	微生物	バクテリア
		藻類
	酵素	微生物誘導炭酸カルシウム沈殿(MICP)
		有機酵素
	天然ポリマー	バイオポリマー変性
		グアーガム (Guar Gum)
		キトサン (Chitosan)
		アルギン酸 (Alginate)
	複合化	澱粉誘導体 (Modified starch)
		アカシアガム (ガムアラビック)
		天然ポリマーx微生物
		天然ポリマーx酵素
		天然ポリマーx土壌繊維

再生材	再生砕石
	鉄鋼スラグ
	石灰灰(F)
	汚泥焼却灰
	下水汚泥資材
	タイヤチップ
	木材チップ
	グラスサンド
	廃プラ再生材
	セメントクリンカーダスト
ダスト	石灰クリンカーダスト
	鉱滓ダスト

土壌繊維	天然繊維	ココナツ繊維 (コイヤ)
		稲わら・麻 (ジュート)
	合成繊維	動物由来の繊維くず
		ポリプロピレン (PP)
		ポリエステル
		ナイロン

4.1.1 力学的工法

4.1.1.1 原位置材再利用

特殊土における原位置材の再利用とは、問題となる土を除去せず、現地でそのまま使用する、もしくは力学的改良を実施することを意味する。これにより、土の処分・輸送コストの削減や輸送に伴う環境負荷の低減が期待される。一方で、材料特性に応じた高度な施工管理と補助工法が求められる。

(1) 高飽和度施工管理

高飽和度施工管理とは施工時の含水比・飽和度を適切に制御することにより、特殊土の力学特性（特に強度・変形特性）を安定化させる技術的アプローチである。特に膨潤性土や高含水比状態の土質に対して有効となる。

本方法は高含水比の材料が現場で適正な含水比まで下げることが困難な材料に対して適用される施工方法である。含水比と乾燥密度を締固め曲線のゼロ空隙線=飽和度 100%になるべく近くなるように管理する。

膨潤性土では最適含水比より高く、飽和度が高いと膨潤する特性が低くなる。そのような含水状態を維持できれば問題のない土となる。崩壊性土では湿潤して転圧することにより、崩壊性土の湿潤による体積変化を低減できる。

留意点：

- 締固め密度が締固め度 90%より低いような状態を許容しているため、せん断強度が小さくなる。
- 最適含水比より高い状態で飽和度が高い密度にする施工監理は容易ではない。含水比と密度のばらつきを少なくすることが重要となる。

(2) 良質土の原位置混合

原位置に存在する特殊土と良質土（例：砂質土、礫質土）を直接混合することで、全体の工学的性質を改善する方法で、これは物理的・力学的安定化工法の一つとなる。対象土を全て置換する置換工法に比べて、良質材の使用量を削減することができる。

良質材の混合割合は特殊土の問題となる特性を低減できる程度と締固め性能／施工性を向上できる両面から検討することになる。

膨潤性土では粒状な材料を多く配合するほど膨潤特性が低くなるが、過度に入れると透水係数が大きくなり、下部に残された膨潤性土に水分を与えることになる。置換工法で使用が勧められる CNS 材料になるように調整するのが良い。

4.1.1.2 置換工法

置換工法は問題となる特殊土を部分的または全面的に除去し、代わりに適切な工学的性能を持つ材料で置き換える工法である。

- 施工性が高く、確実な効果が得られる
- 対象となる土の深さが浅い場合に特に有効
- 置換材の選定が効果の成否を大きく左右する

置換材料としては良質土（砂・礫）、再生材、フィルター材、CNS（非膨潤性粘性土）材料、安定処理土がある。

(1) 良質土（砂・礫）

- 排水性・締固め性・力学強度に優れた土質材料で、長期的に安定した地盤強度が期待できる。

(2) 再生材

- 建設発生土やアスファルト殻、コンクリート塊などを破砕・分級して再利用するもので資源循環・環境配慮型材料として注目されている。

(3) フィルター材（透水性材）

- 透水性が高く、土粒子の移動を防ぐ設計粒度を持つ材料（例：目詰まりを防ぐ砂、粒度調整碎石）である。
- 単体では構造体を支えることは少ないが、層間材料や保護材として有用となる。特に分散性土や侵食土壌の保護材として有効となる。

(4) CNS（非膨潤性粘性土、Cohesive Non-swelling Soil）

- 粘性を持ちながらも膨潤しない特性を持つ選定土で、膨潤性土対策に特化した材料である。
- 膨潤性粘土の置換や緩衝層として利用する。
- 水分変化による膨張・収縮ひずみの抑制。
- 膨潤性土を安定処理して CNS 材とすることもある。
- 特に道路・鉄道路盤や住宅基礎下での応用が進む

(5) 安定処理土

- 現地発生土や特殊土にセメント・石灰などの安定材を添加し、強度・変形特性を力学的に改良する材料
- 特殊土の問題となる特性を低減する。

- 工場プラントあるいは現地での混合・転圧施工がある。

4.1.1.3 サーチャージ／載荷工法

サーチャージ（surcharge）工法とは対象地盤の上に一時的な盛土荷重（余盛）を加えることによって、地盤内の間隙水圧を上昇させ、その排水・圧密を促進することで、将来の沈下をあらかじめ施工段階で終わらせておく地盤改良技術である。一般には軟弱地盤の圧密沈下を抑制する工法であるが、特殊土でも利用可能な場合がある。

膨潤性土では比較的膨潤性が低い場合に用いられ、膨潤圧に対抗する荷重が載荷し、膨潤特性を抑制する。崩壊性土や破碎性土では問題となる沈下が生じる荷重を載荷する。崩壊性土では事前湿潤を併用すると効果的となる。

4.1.1.4 事前湿潤・ポンディング

事前湿潤は地盤や盛土材料に対して、施工前に計画的に水分を加え、含水比や飽和度を制御する処理である。そのひとつの方法としてポンディングがあり、地表に一定時間、池状に水を溜めて水分を深部まで浸透させる方法である。

膨潤性土では施工前に水を加えて膨潤を一度起こさせ、体積変化を先取り（＝膨潤履歴を与える）させ、その後に施工（締固め・構造物建設）を行えば、施工後の膨潤を抑制できる。膨潤性土は透水係数が極めて小さいためにポンディングが活用されるが、必要とされる深さまで飽和状態に近づけるのには年単位の放置時間が必要となる。水の供給量が過剰すぎると泥状化や強度低下のリスクがある。崩壊性土では事前湿潤・ポンディングを利用することで施工前に崩壊問題を発生させ、対策する。施工前に湿潤させておかないと、建設後に予期しない沈下が生じるので注意する。

4.1.1.5 水分コントロール

水分コントロールとは特殊土（膨潤性土、分散性土、侵食性土壌、崩壊性土など）の含水比や水の浸透・排出を適切に制御し、地盤の安定性を確保するための工学的手法である。代表的な手法には排水工（表面・地下水の排出による含水比安定化）、流入水ブロック（地表水の進入防止）、植生工（降雨の緩和と表層浸透抑制）、フィルター（内部浸食防止と水の抜け道確保）などがある。また、水平・鉛直遮水層やメンブレン（防水シート）、アスファルト遮水、コンクリート遮水などの遮水構造により、水の侵入経路を遮断することも重要な対策である。これらの技術を適切に組み合わせることで地盤の変形、侵食、崩壊、膨潤などのリスクを低減することができる。

4.1.1.6 締固め工法

締固め工法は崩壊性土、破碎性土、ラテライトや他の特殊土壌で土壌の密度を高めて安定性や強度増加を図る対策工である。よく使用される工法には以下のものがある。

- **サンドコンパクション工法:**
 - 砂柱を地盤中に形成し、周辺地盤を側方圧密と打込み効果で密実化
 - 崩壊性土やラテライト風化層の支持力増強・排水性向上に有効
- **砕石コンパクション工法**
 - 砕石を振動・打撃により締固めながら打設し、支持力・透水性・排水性を改善
 - 破碎性土の支持力低下を防ぎつつ圧密促進に効果的
- **バイブロフローテーション工法**
 - 水中または飽和状態で、バイブロフロートを用いて深層を振動締固め
 - 軽石質土や風化ラテライトの深部密度増加・支持力向上に適用される
- **重錘落下締固め／動圧密工法**
 - 重量物を繰り返し自由落下させて深層まで締固め効果を与える
 - 崩壊性土・風化ラテライトの初期構造を破壊し、再構成による安定化を図る

膨潤性土、分散性土、侵食性土壌においては本工法が逆に水を誘導して、体積変化（膨潤・崩壊）や粒子分散・流出が発生しやすくなるので採用には十分注意が必要となる。

サンドコンパクションやバイブロフローテーションでは給水が伴うため、膨潤性土・分散性土では不適切な場合がある。重錘落下締固めは高エネルギーによって粒子破碎や泥化で逆効果になることを留意する。

分散性土や侵食性土壌では施工後の排水計画と表層保護（植生工・フィルター等）を併用しないと、雨水浸透による洗掘のリスクが高い。

4.1.1.7 固結工法

固結工法とは特殊土にセメント系などの安定材を加えることで、土と化学的に反応させて一体化・固化し、地盤強度や変形特性を改善する力学的な改良工法である。膨潤性土、軟弱粘性土、崩壊性土、破碎性土などの改良に広く用いられる。表 4.1.2 に固結工法の種類と概要を示す。

表 4.1.2 固結工法の種類と概要

対策工法		説明	対象
混合処理工法	浅層混合処理工法	地表から数 m 程度までの土を、攪拌機で安定材(セメント、石灰等)と混合・転圧して固化。	道路・盛土・表層改良に適用。特に崩壊性土、膨潤性土などの浅層改良に有効。
	深層混合処理工法	鉛直に掘削・混合装置を挿入し、地中深くまで安定材を注入・攪拌して円柱状の改良体を形成。	軟弱地盤や破砕性土、火山灰質土の支持力確保や沈下抑制に効果的。
	高圧噴射工法 (ジェットグラウト)	高圧でセメントスラリーを噴射しながら土を破砕・混合して高強度の固化体を形成。	不均一な土層・地下水位の高い地盤でも施工可能。特にラテライト、破砕性火山性土などの改良・遮水壁構築に使用。
グラウト注入工法		既存地盤の空隙や亀裂に、低粘性の注入材(セメント系・薬液系)を注入して固化させる工法。	地盤の止水性・支持力・一体性を向上。崩壊性土、破砕性土(軽石質地盤など)や空隙の大きい火山性土壌で効果的。

出典: JICA 調査団

4.1.1.8 補強工法（盛土材）

特殊土（軟弱地盤、膨潤性土、崩壊性土、破砕性土など）は変形・沈下・安定性の低下が問題となるため、ジオシンセティックス材による補強工法が有効である。表 4.1.3 に補強工法の種類と概要を示す。

表 4.1.3 補強工法の種類と概要

補強材	説明	効果	適用
Geogrid (ジオグリッド)	高強度のポリマー製格子状補強材を盛土や路床に敷設	引張補強効果により側方変形を抑制し、せん断強度や耐荷力を向上	膨潤性土・軟弱地盤・破砕性土の盛土補強に使用
Geotextile (ジオテキスタイル)	不織布または織布状のフィルター機能を持つ補強材	粒子の混ざり防止、排水・浸透制御、基礎分離に有効	分散性土・侵食性土壌の内部侵食防止や地盤安定化に適用
Geocomposite (ジオコンポジット)	ジオグリッド+ジオテキスタイルや排水材を複合化した多機能材	補強+排水+遮水などの多目的機能を一体化	膨潤性土・崩壊性土など複雑な問題を持つ地盤に有効
Geonet Reinforcement (ジオネット補強工)	網状の三次元構造材で、排水機能と補強機能を兼ねる	急傾斜盛土や法面安定化、浸透水処理に有効	崩壊性土や雨水浸透による地盤軟化対策として使われる
Geocell Geogrid (ジオセルジオグリッド)	三次元の「セル状構造材(ハニカム状)」で盛土材料を拘束	荷重分散・沈下抑制・侵食防止効果が高い	軟弱地盤や膨潤性土、侵食性土壌における舗装・路盤補強に適する

出典: JICA 調査団

4.1.2 化学的安定処理

4.1.2.1 在来工法

化学的安定処理とは安定材を土に混合し、化学反応により強度・変形・水理特性を改善する工法で、膨潤性土、軟弱粘土、崩壊性土、分散性土などの対策に広く使用される。表 4.1.4 に化学的安定処理の在来工法の種類と概要を示す。

表 4.1.4 化学的安定処理の在来工法の種類と概要

工安定処理法	概説	対象	特徴
セメント(C)安定処理	ポルトランドセメントを混合し、水和反応により固化・強度増加	軟弱地盤・分散性土・崩壊性土の支持力改善、浸透性低減に効果	短期間で高い強度を発現
石灰(L)安定処理	消石灰などを用いて土中の粘土鉱物と反応し、膨潤性を低下・可塑性を抑制。	特に膨潤性土(モンモリロナイト質粘土)への対策として有効。	初期の土質改良に有効 pH 上昇や粒子凝集効果により施工性も向上
C+L 複合安定処理(セメント+石灰)	石灰で初期の膨潤・可塑性を抑制し、セメントで高強度を発現。	膨潤性土・高含水比の粘性土など、単一材では効果が不十分な場合に有効。	段階的な安定化メカニズムを活かした改良法
C+F 安定処理(セメント+副産物)	セメントにフライアッシュ(F)などの産業副産物を混合し、ポゾラン反応を活用。	破砕性土やラテライトなど、在来資源を利用した地盤改良に応用される	環境負荷の低減・コスト削減が可能

出典: JICA 調査団

4.1.2.2 廃棄材・副産物を活用した安定処理工法（チャレンジな工法）

近年、環境負荷低減・資源循環の観点から、産業副産物や廃棄物を活用した土壌安定処理工法が注目されている。これらの材料は、セメントや石灰の代替・補助材として使用され、特殊土の強度・膨潤性・浸透性の改善に寄与する。なお、廃棄材は都市ごみや下水汚泥等の焼却灰、植物灰・木灰、卵殻・貝殻等を指しており、一般的に最終処分場まで運ばれるような廃棄物とは異なる。

(1) 無機系副産物・工業廃棄物

- ダスト（製鋼スラッジ等）、スラグ（高炉スラグ等）、焼却灰（都市ごみ、下水汚泥）、植物灰・木灰

(2) 有機・天然系廃棄物

- 卵殻・貝殻（炭酸カルシウム）、石膏（硫酸カルシウム）、ミョウバン（硫酸アルミニウム）、農業石灰（炭酸カルシウム）

(3) ポリマー・繊維・化学処理材

- ポリマー（天然・合成）、土壌繊維（天然繊維、合成繊維）、アスファルト溶剤・エマルジョン

4.1.3 生物学安定処理

生物学安定処理とは微生物や酵素、天然由来の有機化合物（ポリマーなど）を利用して、土粒子の結合・強化・水分制御を行い、特殊土の問題（膨潤、崩壊、侵食、沈下など）を抑制する工法である。近年は環境調和型・低炭素型の土壌安定化技術として注目されている。表 4.1.5 に生物学安定処理の種類と概要を示す。

表 4.1.5 生物学安定処理の種類と概要

手法	主な作用メカニズム	適用対象土	効果例
微生物処理	鉱物析出による粒子間固結	破砕性・崩壊性・侵食性土	強度向上、透水性低下
酵素処理	酵素反応による結合促進	粘性土・侵食性土壌	せん断強度向上、侵食抵抗増加
天然ポリマー	ポリマーの物理的被膜・凝結	膨潤性・分散性・侵食性土	吸水抑制、安定性向上
複合化処理	機能の相乗・補完	上記全般（複雑地盤）	多機能化、長期安定性の強化

出典: JICA 調査団

4.1.4 その他の工法

ロシアやウクライナなどで昔使用されていた工法であるが、使用にあたっての具体的内容が明らかでなく、かつ特に研究が進められていないため、効果については確実でない可能性がある。

(1) 電気化学的土壌処理

- ・ 土に電流を流して、水やイオンを動かし、脱水や安定化を行う工法
- ・ 粘土などの膨潤性土や軟弱地盤に有効
- ・ 石灰や薬液も電気ですくまで運べるので、深い場所にも使える
- ・ 小規模・局所処理に向く

(2) 熱処理工法

- ・ 土を加熱することで水分を飛ばし、鉱物の性質を変えて強化する工法
- ・ 膨潤性土や崩壊性土、有機質土に効果あり
- ・ 高温で膨張しにくい構造に変える
- ・ エネルギーが多く必要なので限定的に使われる

第5章 特殊土に係る施設整備事業の基本方針

5.1 特殊土リスクがある施設整備事業の進め方

特殊土のリスクが想定される地域における施設整備事業の推進にあたっては、特殊土に係るリスクを適切に評価した上で、計画・設計・施工・維持管理といった様々な事業の段階でリスクの低減のために必要な対応を行っていくことが重要である。一方で、特殊土については技術的な情報の蓄積、対策工の実績が少なく、体系的・技術的な知見が十分とは言えない。このため、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。また、特殊土の情報の収集や分析・評価のプロセスは基準やマニュアルに規定された確立されたものではなく、その遂行には専門的な知見が要求される。

このため、特殊土に係る施設整備事業の実施にあたっては、適切な事業実施フローの策定及び事業実施体制の構築から、リスクの想定と適切な対応、事業完了時に維持管理に係る適切な情報の引継ぎや将来事業のリスク低減に向けた情報の蓄積などを含むリスクマネジメントの観点が必要である。

ここでは特殊土に係る施設整備事業の進め方において必要な考え方を記載する。

[解説]

5.1.1 特殊土のリスクを伴う事業実施の流れ

一般に事業実施は構想、計画、設計、施工、維持管理の流れに沿ってウォーターフォール型で実施される。この点、特殊土対策はまだ確立していないだけでなく、その規模によっては事業の成立にも影響するものである。そのため、特殊土対策を独立してウォーターフォール型で進めるのではなく、その調査、計画設計、施工、維持管理の各段階で目的であるインフラの調査、計画設計、施工、維持管理との間のフィードバックも踏まえて一体的に進める必要がある。

特殊土の分布状況、対象国の事業者の経験や過去の ODA 事業の事例を踏まえ、特殊土に係るリスクが想定される場合には、通常の事業と比較して不確実なリスクをより多く含むことに鑑み、事業の各段階でリスクの想定を行い、それに基づき調査・評価（アセスメント）、対応策の検討、対応策のモニタリングを行いながら事業を進めていくことが重要である。計画段階では想定されるリスクに鑑み、事業関係者（事業者・ドナー・コンサルタント・建設業者・維持管理者等）それぞれが担うべき役割・機能や連携の在り方について検討・整理した上で、事業の各段階でリスクに関する情報や認識を常に更新していく必要がある。事業を進める際には「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」（国土交通省大臣官房 技術調査課/国立研究法人 土木研究所）を参考にするといよい。同ガイドラインからリスクマネジメントのプロセスならびに階層構造のイメージを図 5.1.1 に示す。

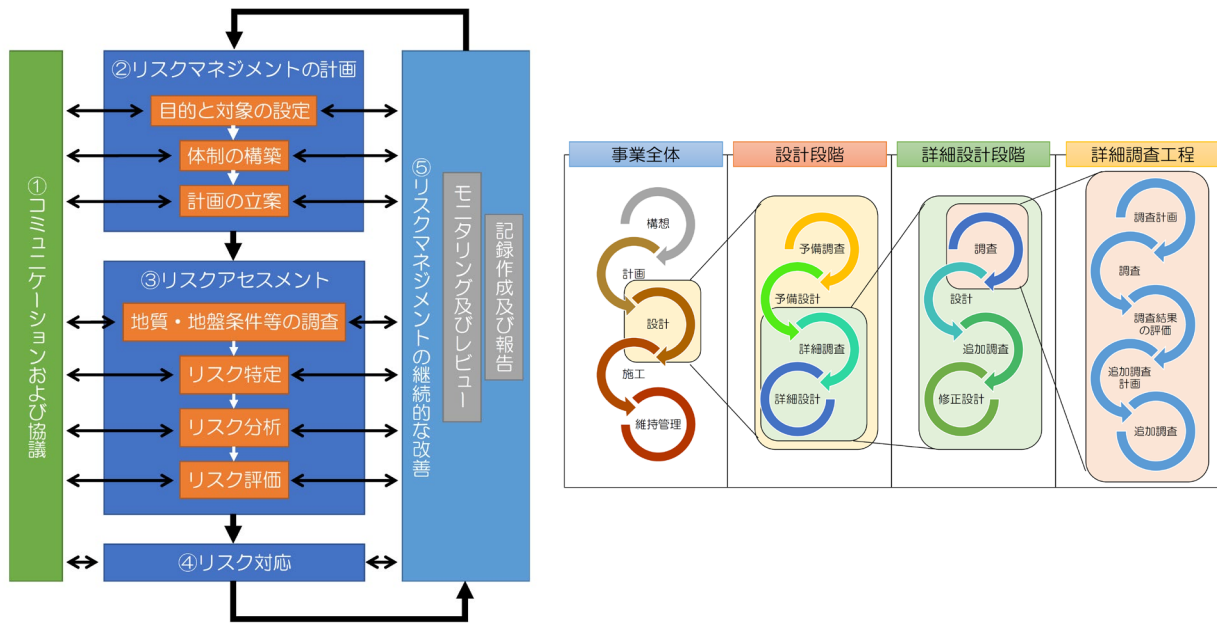


図 5.1.1 リスクマネジメントの構成とプロセス

これらの基本的な考え方を踏まえ、道路事業を例とした事業実施の流れを図 5.1.2 に示す。

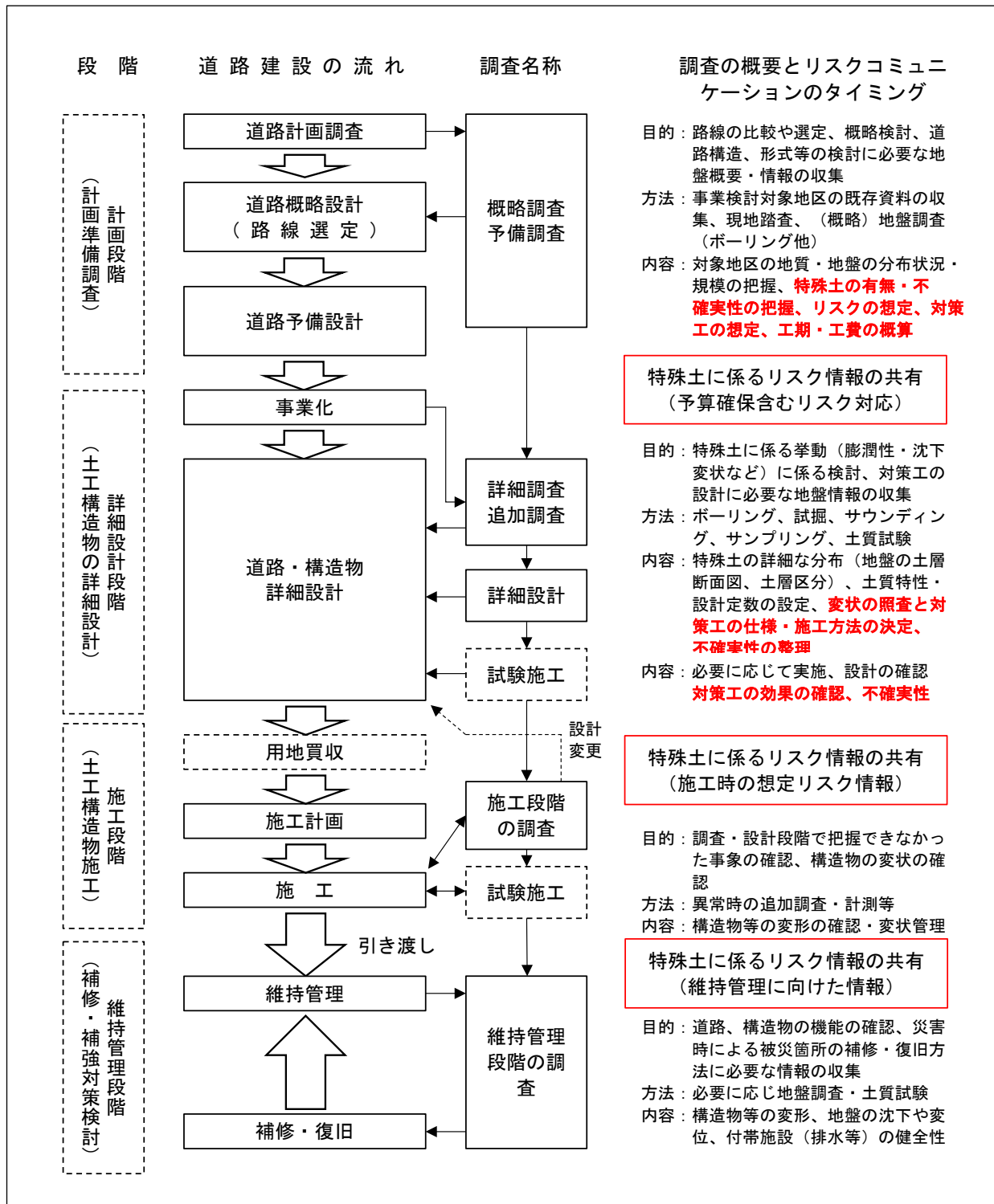


図 5.1.2 特殊土に係るリスクが想定される事業の流れ（道路事業の例）

5.1.2 特殊土リスクを踏まえた事業実施の体制構築に係る配慮

(1) 特殊土リスクマネジメントの体制・組織

特殊土に係るリスクが想定される事業実施にあたっては、画一的な体制・組織を構築することを求めるものではなく、その事業の目的や特性に応じて事業の実施時点で取り得る最適な仕組みによって実施することが重要である。体制・組織づくりにおいては、事業者が関係者の役割分担について検証し、その事業における特殊土に係る地質・地盤リスクの特性や影響の大きさ等を勘案し、リスクに対応できる能力・機能を備えたものとなるよう、必要となる関係者を確保する必要がある。

海外の事業の実施にあたっては通常、援助国・被援助国の政府機関、国際協力機関、建設コンサルタント、施工業者に所属する事業関係者がそれぞれの役割を果たしながら、事業を進めることとなる。特殊土に係るリスクが想定される事業の実施にあたっては、これらのリスクに係るマネジメントの専門的な知見が求められることから、これらの専門技術者が参加できるようにする必要がある。各組織に配置する専門の技術者としては、地質・地盤等に関連する適切な資格を有するもの、地質・地盤リスクに係る有識者等が想定される。

現状の体制・組織において必要な能力・知識が不足することが想定される場合、事業の内部・外部から必要な能力・組織の補完を考えることも必要となる。特殊土に係る地質・地盤リスクの評価と対応の難易度が高い場合には、委員会形式等の採用や、研究機関などを含めた関係者会議の開催等も検討することが望まれる。事業者はこれらのリスクマネジメントに参画する関係者を確定させたうえで、役割・機能を割り当て、その連携体制を構築する必要がある。参加する関係者は割り当てられた役割・機能について確認し、能力・機能を十分発揮するように努める。

(2) 体制・組織の見直し

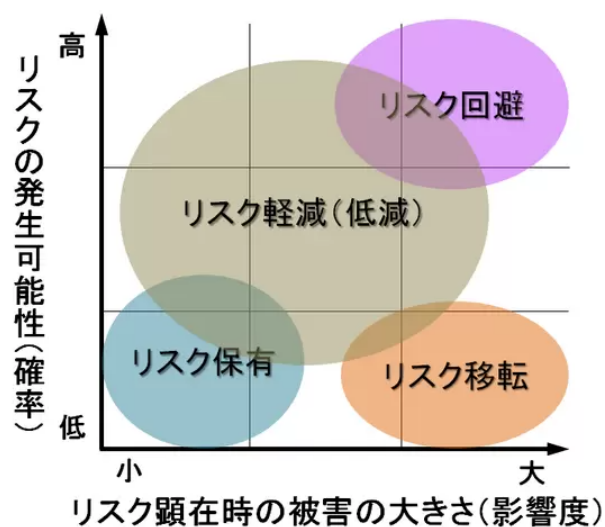
地質・地盤リスクマネジメントは事業全体、事業の各段階、一つの業務・工事の単位を通じて、継続的に進めていくことが重要であり、進捗に併せた組織や体制の見直しについても検討する必要がある。

リスクマネジメントを進めていく途中の段階であっても、体制・組織の機能や能力が不足する懸念が生じた場合には、迅速にその見直しを行い改善することが重要であり、事業の進捗に合わせた見直しも必要である。このような見直しにあたっては事業の進捗に応じてリスクに関する情報や対応のための体制の状況をモニタリングすることが重要である。

5.1.3 特殊土に係るリスク対応の考え方

特殊土に係る事業は不確実性が高い地盤の特性に鑑み、事業費や工期の増大リスクが通常の事業と比較して高い。このため、リスク対応においてはリスク回避、リスク軽減（低減）、リスク保有、リスク移転の考え方に基づき、対応を検討することが重要である（図 5.1.3 を参照）。

例えば道路建設時において、特殊土が分布する地域を避けて計画するリスク回避、想定される特殊土を踏まえた対応策を計画・実施するリスク低減、特殊土に対する対応策がとられず都度補修対応を行うリスク保有、リスクが発生した際に保険などによる補填・補修を行うリスク移転などの対応が考えられる。



出典：Jhttps://www.newton-consulting.co.jp/bcmnavi/glossary/risk_treatment.html

図 5.1.3 4つのリスクの対応概念図

5.2 事業関係者間のリスクコミュニケーション

各段階で特定されたリスクについては、関係者間の情報・意識の共有を目的としたコミュニケーション・協議を行うことが適時、関係者が必要な対応をとるために有益であり、リスクマネジメントの取り組みの中で最も重要なプロセスである。

計画段階でリスクに係るコミュニケーションの方法、モニタリング方法や時期を定め、継続的にリスクに係る情報・意識共有を関係者間で行う。また施設の建設が完了し、事業者には施設の引継ぎを行う際に検討状況や施工時の状況、供用時に想定されるリスク、ならびに対応策についても適切に引継ぎを行うことが重要である。

〔解説〕

事業関係者間のコミュニケーション及び協議は継続的に実施して、リスクに対する認識や対応についての考え方を常に更新していくことが重要である。

① 内部のコミュニケーション及び協議

事業や構造物の設計及び施工で求められる土構造物を含む施設の性能と地盤調査・試験等から推定される特殊土の性質とリスク、不確実性に関する情報を議論し、特殊土リスクに対する認識を共有する機能が必要である。このような協議の場合は単に情報を共有するだけではなく、リスクの見逃しや見誤り防止を目的とする他、リスク対応の最適な時期を検討する目的でリスクへの対応を当該時点でどこまで可能か明確にすることや、複数の業務や工事が輻輳するケースでリスクへの対応を統一する目的とするなど、目的を明確にして実施することが重要である。

② 外部とのコミュニケーション及び協議

コミュニケーション及び協議は事業の内部だけではなく、外部に対しても行う必要がある。特殊土に係る地質・地盤リスクは事業の目的や事業に対する要求・要請、環境といった事業の置かれた外部の状況によって、リスクの大きさや位置づけが左右されることから、外部とのコミュニケーション及び協議も継続的に実施する必要がある。

③ リスクの見える化への配慮

特殊土のリスクの要因・メカニズムと問題の発生に係る不確実性は、特殊土ごとに調査・試験方法・対策技術を含む技術的・体系的な知見が十分に確立されていないこともあり、土木事業に携わる専門家であっても理解は容易ではない。このため、コミュニケーション及び協議においては、関係者がリスクを理解し認識を共有できるように、用いる資料や説明等をわかりやすいものに工夫する等配慮することが望ましい。

また、外部とのコミュニケーション及び協議においては、土木事業に係る一般的知識を持たない関係者も想定されるため、説明の際は、専門用語を極力使用しない、難しい表現を避ける等の配慮が必要である。

④ 事業段階間の引継ぎに関するコミュニケーション、協議

事業は構想、計画、設計、施工、維持管理の段階を通して進められるが、各段階で事業関係者の構成が変わっていくため、事業段階間の情報の引継ぎが重要である。特殊土に係るリスクを円滑に引継ぎできるよう、想定されるリスク、不確実性、対応をとりまとめた資料を各段階で作成し、コミュニケーション、協議を実施し、後続の段階で適切な対応（施工時の配慮や維持管理時の注意点など）がとられるよう配慮することが重要である。

5.3 特殊土に係る調査の考え方

特殊土に係るリスクマネジメントプロセスにおいて、その不確実性を把握し、リスクの特定、分析、評価を行うための資料を得ることを目的として、地質・地盤条件等に係る調査を実施する。それぞれの特殊土に係る試験ならびに評価方法は必ずしも確立していないことから、事前に対象となる特殊土に係る情報を収集し、調査計画を立案する必要がある。また事業の進捗に合わせて情報ならびにリスク評価の精度を向上させ、各事業段階で必要なリスク対応がとれるよう調査を進めることが重要である。

[解説]

(1) 調査計画

調査計画の立案にあたっては、特殊土に係る不確定なリスクの特定・分析・評価を目的とし、対象とする特殊土の分布範囲、特性、対策工の検討に係る情報を各事業段階で必要な精度で入手できるよう調査内容・項目・試験を計画する。特殊土に係る試験ならびに評価方法は必ずしも確立しておらず、関連基準に準拠した調査項目・試験では不十分なことがあるため、適切な調査計画のために地質・地盤技術者が検討・立案することを基本とする。

(2) 調査の流れ

不確定なリスクを有する特殊土に係る地質・土質調査は、下記の手順で進めていくことが望ましい。

- ① 机上調査や地質調査による特殊土に係る地質・地盤・分布に係る情報の整理
- ② 不確実性の整理（特殊土に係る地質・地盤の不確実性、設計・施工の不確実性等）
- ③ 不確実性を考慮した特殊土に係る地盤や盛土等構造物の推定性能（想定できる範囲での不確実性を考慮したもの）とリスク要因の把握
- ④ 特殊土に係る地盤や盛土等構造物の要求性能と推定性能の対比等によるリスクの抽出

(3) 周辺事業の情報、地形、地質・地盤、気象情報等の収集と活用

詳細な地形図、既往の地質・地盤調査情報、周辺で行われた事業の調査・設計、工事記録等の情報など、特殊土に係るリスクマネジメントを進めていくうえで有効な情報を、公開情報や相手国政府機関などからできる限り収集・活用し、特殊土の挙動の予測、対策に係る不確実性を低減することに努める。

事業の早期段階において、現地調査の実施前に入手可能な地形情報、地質・地盤に係る情報、降雨等の気象条件などの分析が重要である。周辺事業で特殊土の挙動や対策に係る具体的な情報が入手可能な場合は、発生するリスクと適切な対応方法を的確に把握することが可能である。しかし、特殊土が分布する可能性があるが入手できる情報が限られる場合には、そのリスクを考慮した事業計画とする必要がある。

(4) 地質・地盤調査・試験

地質、地盤調査では、通常の調査と同様に(3)で収集した地形・地質をはじめとする資料調査を行った上で、ボーリング調査・試掘調査・原位置サウンディングなどを行い、リスクを含有する特殊土・地層の詳細な分布状況を把握、整理し、事業におけるリスク箇所を特定する。原位置試験で採取した試料を用いて室内試験（特殊土ごとに必要な試験を含む）を実施し、特殊土の特性、物性データと挙動を把握する。調査は事業の各段階で、リスクの特定、対応の検討に必要な精度で実施する必要があり、事業の進捗に伴って精度を高めることが重要である。

(5) 特殊土に係るリスクの整理

1) 不確実性の整理

不確実性によるリスクを整理する。一般的にリスクの要因には以下のようなものがあるため、必要な項目について整理する。

① 自然的要因（地質・地盤・地下水等の要因：素因）

- ・特殊土の特性・挙動等の不確実性に起因するもの
- ・特殊土の人工地盤（盛土等）の特性・挙動等の不確実性に起因するもの
- ・地質・地盤災害の発生の不確実性に起因するもの
- ・地盤や地下水等による環境影響の発生の不確実性に起因するもの
- ・地下水・地中ガス等の存在や挙動の不確実性に起因するもの

② 人為的要因（関係者やその対応の要因：誘因）

- ・特殊土に対する設計・施工の不確実性に起因するもの
- ・施設や基礎の管理の不確実性に起因するもの
- ・特殊土に係る地質・地盤情報の伝達・対応等の不確実性に起因するもの

特殊土の特性・挙動等や特殊土に対する設計・施工の不確実性について、通常の事業では必ずしも明確に扱われておらず、定量的に示すことができない場合が多い。しかしながら不確実性の整理はリスクを推定するうえで不可欠であるため、経験的・定性的な方法も用いて不確実性のある項目やその程度を明示することに努める。特に特殊土に係る地質・地盤リスクが大きいと推定されるものについては必要に応じて追加調査を行って検討する。

2) 特殊土に係る地質・地盤の要求性能の整理

施設・構造物の設計条件等から、特殊土に係る地質・地盤の要求性能を整理する。一般に土木事業における地質・地盤の要求性能は下記のようなものが挙げられる。必要に応じて構造物ごとにより詳細に整理する。

① 支持地盤としての性能（工事中を含む）

- ・力学性能（強度、変形性、異方性等）
- ・水理性能（遮水性、透水性等）
- ・長期安定性（沈下、液状化、風化・浸食等に対する安定性等）

② 事業及び周辺に関する性能（工事中を含む）

- ・斜面安定性（地すべり・崩壊に対する安定性等）
- ・環境安定性（地下水の水質の安全性等）

3) 地質・地盤の推定性能の把握と特殊土に係る地質・地盤リスクの抽出

地質・地盤調査・試験の結果を基に、地質・地盤の要求性能項目に対する推定性能を把握する。

これらの調査結果を踏まえ、地質・地盤リスクを抽出する。地質・地盤リスクとなる条件の一例としては次のようなものがある。

- ・地質・地盤の推定性能が地質・地盤の要求性能を下回る可能性のある項目
- ・地質不良部や災害危険箇所
- ・地質・地盤、施工の不確実性が大きいもの

抽出した特殊土に係る地質・地盤リスクについてはそのリスク要因と特性を取りまとめて整理し、平面図・断面図にリスクの範囲を明示するなど、関係者に分かりやすくリスクの可視化を行うよう配慮する。抽出したリスクについて整理する項目の例を以下に示す。可能な範囲でこれらについて整理しておくことが望ましい。また、検討の結果、リスクとして抽出しなかったリスクについてもその理由等を整理しておくことが望ましい。

① リスクの項目

② リスクの位置や範囲

③ リスクの内容（要因、素因や誘因等）

④ 結果の大きさとその根拠

⑤ 起こりやすさとその根拠

5.4 記録作成及び報告

特殊土に係るリスクマネジメントプロセスにおいて、得られた特殊土に係るリスクやその対応に係る情報は関係者間で報告・共有し記録を作成し、次の段階に引継ぎを行う。

[解説]

(1) 情報の報告・共有と記録

相手国政府・実施機関を含む事業関係者がリスクの内容を事業の各段階で把握し、必要な対応がとられるよう、特殊土に係る地質・地盤リスクに関わる情報を、コミュニケーション及び協議の場で報告・共有する。地質・地盤リスクに関わる情報の例を以下に示す。

- ・事業や構造物の設計及び施工で求められる地質・地盤の性能（要求性能）
- ・地質・地盤調査・試験等によって推定される地質・地盤の性能（推定性能）
- ・地質・地下水等の不確実性の状況と推定性能への影響
- ・施工や対策工等の不確実性の状況と推定性能への影響
- ・地質・地盤リスク（リスク項目、内容、リスク分析・評価結果）
- ・リスク対応（提案・選定したリスク対応と理由）
- ・残存リスク

(2) 情報の引き継ぎ

事業者は、事業が次の段階に進む時点で、記録された特殊土に係る地質・地盤リスクに関する情報やそれまでの検討状況について、関係者に引継ぎを行う。関係者は引き継がれた記録の内容を確認し、コミュニケーション及び協議の場において、課題や検討方法について情報と意識の共有を図る。なお、事業を通じてこれらの情報が効率的に活用できるように、リスクマネジメントに必要な情報は、調査・測量から維持管理までの各プロセスにおいて、電子データとして取得・保存することが望ましい。

特に特殊土に係るリスクは次章以降に述べるように、施設の工事が完了し、供用開始後・予想外の時期に被害が表面化することがあり、その原因の究明や適切な対応策の検討のために事業実施段階での情報が有用なため、維持管理者を担う施設管理者へのデータの引継ぎも重要である。

第6章 特殊土について

6.1 特殊土の定義

本ハンドブックでの「特殊土」とは、開発途上国の事業等に従事する際の建設工事で遭遇する問題のある土を対象とし、日本で一般的に行われている調査、設計、施工で対応が難しいと考えられるものを対象とした。

[解説]

地盤工学会では特殊土を用語として、「unusual soil, problem soil」と称している。英語を訳すると「普通でない土」と「問題のある土」となる。地盤工学会の特殊土の定義としては「在来地の地盤工学的手法だけでは、設計施工ができないような土」としている。「problem soil」の方が地盤工学会の定義に近い英訳と考えられる。文献調査では「problematic soil」もよく使われており、こちらは問題を起こすかもしれない土に対して適切な訳と考えられる。日本でいう「特殊土」なる名称は、昭和27年公布の「特殊土地帯災害防除及び振興臨時措置法」に始まっているが、この法律の対象は、しらす、ぼら、こら、赤ほやなど、特殊な火山噴出物および花岡岩風化土、その他、侵食を受けやすい性質の土を指すとしている。全世界に存在する特殊土は、後述するように上記以外に様々な種類が存在し、本ハンドブックでは日本に分布することは稀で、日本で一般的に行われている調査、設計、施工で対応が難しいと考えられるものを主な対象とした。

農業もしくは土壌の研究では、特殊土は農耕に適さないような土を Problem soil と称している。分類方法は農業を目的としているため、工学的分類方法とは異なるが、Vertisols は膨潤性土の代表的な土である黒綿土 Black cotton soil を分類しているので、分布地域の推定に利用できる。「unusual soil」の中には「Local soil」もしくは「Regional soil」と言われるものがあるが、分布域が極めて狭く、建設工事で遭遇する可能性が極めて低い、もしくは避けて対応できる特殊土があると想定される。また、日本の ODA では対象とはならないような、例えば北欧に分布するような「クイッククレイ」がある。そのような特殊土については可能な範囲で取りまとめた。

英語では「土」と「土壌」は両者とも「soil」と訳される。地盤工学会の用語では特殊土としているが、農業や土壌学では特殊土壌と標記されることが一般である。建設分野や地盤工学で一般的に用いられる特殊土、膨潤性土、分散性土などは「土」を用い、農業や土壌学で一般に使用されている塩類土壌や熱低性土壌などは「土壌」と適宜使い分けた。文献においては膨潤性土に対して「expansive soil(s)」と「expansive clay(s)」と両方が使用されている。「膨潤性土」としては「expansive soil(s)」が妥当な用語となるが、膨潤性土はほとんどが粘性土である。自然状態では岩であっても、切土すると直ぐにスレーキングし、風化が進行して、岩から土に変化する過程で特殊土と同じような工学的な問題を起こす岩があるが、これらについても本ハンドブックでは特殊土として取り扱うこととした。

6.2 土壌の形成要因

土壌の形成要因は、「母材」、「地形」、「気候」、「生物」、「人間の活動」、「時間」の6つに分類され、それぞれの要因が複合的に作用して土壌が形成される。

[解説]

土壌学の父とみなされているヴァシリー・ヴァシリエヴィチ・ドクチャエフは、土壌特性の地理的変動が気候や地形条件、および地質学的要因(母材)に関連していることを初めて明確に述べた人物である。彼のアイデアは、多くの土壌科学者によって発展し、土壌の特性は多くの変数の相互作用の結果であり、最も重要な要因は次の6つとされている。

- 母材 Parent Material
- 地形または地形内の位置 Topography or position in the landscape
- 気候 Climate
- 生物、特に植物 Living organisms, especially vegetation
- 人間の活動 Human activities
- 時間 Time

ジェニーHans Jenny は、この関係を次の式で表した。

土壌 = f (気候、生物、地形、母材、時間)

この式によると、母材、気候、または土壌の年齢の変化によって、特定の土壌特性が生じることを意味している。

たとえば、加熱・冷却または凍結・融解サイクル(地形と気候によって決まる)などのプロセスによる固体の岩盤の風化により、岩石の破片のマトリックス(レゴリスとも呼ばれる)が生成される。さらに、風化により岩石から遊離した結晶質鉱物を含むより微細な構造が生成される。これらのきめの細かい物質は、種子が発芽し、地衣類やコケなどの植物が定着するための条件を提供する。

植物の成長は、ミネラルが植物の栄養素として機能する単純な分子または化合物に分解されることによって支えられる。植物が定着すると、枯れ葉が表面に落ちて腐敗し、薄い有機層を形成する。これが今度は、栄養素を土壌に戻すことで植物の次の成長サイクルを与える。時間が経つにつれて、親物質はますます多くの有機物で覆われて埋もれ、より大きな植物が成長できるようになる。敷地の傾斜や方位によって生育条件が決まる場合もあるが、排水や物質の投入または除去でも変わる。

このようにして、さまざまな要因の相互作用を反映した特性を持つ土壌が形成される。気候の変化によって風化プロセスが減少し、親物質の供給とミネラルの放出が停止する場合がある。あるいは、気候変動によってより豊かな植生群落が形成され、植物質の生産量が増え、有機層が深くなることも

ある。無視してはならないもう 1 つの重要な要因は、人間の活動の影響である。土壌のプロセスと特性は、土地の使用方法や管理方法によって大幅に変更される可能性がある。排水、肥料の施用、自然植生の除去などは、土壌の特性を人工的に変える方法のほんの一例に過ぎない。

表 6.2.1 に土壌の形成要因を主要要因の母材・地形・気候・生物・時間の 5 つに区分して取りまとめた。

表 6.2.1 土壌の形成要因

要因	内容
母材	母材の種類が土壌の形成要因に影響 氷、水、風、または重力によって運ばれた未固結堆積物 起源である固結した硬岩のすぐ上にある風化物質 腐敗または部分的に腐敗した植物の残骸からなる有機物質
地形	地形条件によって、地域の気候、植生、水の動きが異なるため、 土壌の形成要因に影響
気候	気候帯: 気温と水分レベルの違いにより土壌形成に係る風化プロセスに影響 気温: 気温および気温の変動は土壌形成プロセスに影響 降水量: 降水量の程度が土壌形成プロセスに影響 土壌温度: 植物の分布、土壌内の生物学的プロセスの制御の決定に影響 土壌水分: 土壌形成、土壌の使用または管理に影響
生物	植物と動物(微生物から人間まで)は土壌の形成要因に影響
時間	数百年から数千年にわたって作用する物理的、化学的、生物学的プロセスが土壌の形成要因に複合的に影響

出典: JICA 調査団

6.3 土壌形成プロセス

土壌形成は、生物学的、化学的、物理的作用により形成されるが、その主要なプロセスは「風化」、気候に関係する「湿潤条件」、「湿潤熱帯気候」、「乾燥した熱帯/亜熱帯気候」と「寒冷気候」、堆積に関係する「火山物質」と「水」の7つに分類される。多くの土壌はいくつかのプロセスを経て、形成される。

〔解説〕

個々の土壌タイプの特性はその存続期間中に作用する土壌学的プロセスによって形成される。生物学的、化学的、物理的作用は、土壌内の物質を追加、変換、移動（転位）、破壊または除去し、気候変動や土地利用などの要因に応じて、時間の経過とともに進化および変化する。多くの土壌は、土壌形成のいくつかの異なる段階を経て形成される。

表 6.3.1 に土壌形成プロセスを風化・湿潤条件・湿潤熱帯気候・乾燥した熱帯/亜熱帯気候・寒冷気候・火山物質・水の 7 つに区分して取りまとめた。

表 6.3.1 土壌形成プロセス

プロセス		内容
風化		物理的風化: 化学組成を変えずに崩壊することで土壌が形成 化学的風化: 化学反応により徐々に風化が進行することで土壌が形成
気候	湿潤条件	浸出: 浸透によって引き起こされるこのミネラルと有機溶質の損失 粘土粒子の移動: 粘土粒子が土壌層から別の土壌層への移動または転座 粘土の破壊: 塩基性陽イオンの浸出により粘土鉱物と有機物に水素イオンが蓄積された結果、不安定な状態となり、最終的に粘土の組織構造が崩壊
	湿潤熱帯気候	鉄分層を含む高度に風化した土壌: 高い土壌温度と激しい浸透が組み合わさって、土壌から風化可能なすべての一次鉱物が溶解して除去された結果、鉄やアルミニウムの酸化物、粘土鉱物のカオリナイト、粗い石英粒子などの溶解度の低い化合物が残っている土壌が形成 特徴的な窒素層を持つ風化した土壌: 鉄化プロセスの派生により、光沢のある脚面を持つ特徴的な「ナッツのような」多面体のブロック構造を含む土壌が形成。カオリナイトと鉄を多く含み、赤色を有する。 鉄分に富み、硬化する可能性のある層 (プリンティック plinthic) を持つ土壌: 飽和した土壌で鉄が分離することによって形成 粘土質層と低または高活性粘土を含む土壌: ある層にある粘土粒子が別の層へと移動することにより、その上にある層よりも粘土含有量が多い土壌が形成
	乾燥した熱帯/亜熱帯気候	炭酸カルシウムが蓄積された土壌: 炭酸カルシウム (CaCO_3) が地表層からある深さの蓄積層へ移動されることにより形成 石膏が蓄積された土壌: 石膏を含む母材から溶解した土壌で、土壌水分の蒸発散により石膏が豊富な土壌が形成 シリカが蓄積された土壌: 乾燥地域でよく確認されるデュリスोल Durisols と呼ばれる土壌の地下に形成されるシリカを豊富に含む非常に硬い土壌が形成 塩分が蓄積された土壌: 塩分濃度が約 2500ppm 含まれる土壌が形成
	寒冷気候	極低温プロセスにより発生する凍土、土壌物質の攪拌、選別、配向、熱亀裂、表面の固化、結晶、塊状層、またはくさび状のいずれかの氷の蓄積などパターン化された地面と呼ばれる特徴的な土壌が形成
堆積	火山物質	噴出した火山物質から火山ガラスを多く含む土壌が形成
	水 (水によって形成された土壌)	水の土壌内の浸透によって地下水グライなどの特徴的な土壌が形成

出典: JICA 調査団

6.4 特殊土の分類

特殊土は、「力学的特性」、「化学的特性」、「その他」の3つの区分に分類できる。

力学的特性：膨潤性土、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破碎性土、可溶性地盤、軟弱地盤

化学的特性：塩類／ソーダ土壌、(酸性)硫酸塩/硫化土壌、炭酸塩土壌、酸性土壌

その他：ラテライト、黄土、火山灰性土、珊瑚土壌と珊瑚骨材、雲母を多く含む砂、氷河堆積土（氷積土）、風化岩/軟岩、乾燥土壌

[解説]

地盤工学にとって問題となる土は多くある。問題となる特性には、体積が大きく変化する、強度が明らかに不足している、腐食を引き起こす可能性のある土などがある。これは、構造物や都市環境全体に問題をもたらす、膨潤性土の場合、毎年ヨーロッパでは4億ユーロ(660億円)、米国では150億ドル(1兆6千億円)もの経済的損失をもたらしている。そのコストは、地震、洪水、ハリケーン、竜巻を合わせたものを上回ることが多い。「第2章」、「第3章」で述べたように土壌は生成要因と生成プロセスの複雑な組み合わせにより形成されるため、見かけが同じような土壌でも特性に大きな違いが生じる可能性がある。特に特殊土においては一般的に土質工学の分野で使用されている土質分類や工学的なメカニズムだけでは正しく評価・解釈できなくなっており、そのため、多くの種類の問題土壌が存在し、それらに対処する際に多くの重要な問題が生じると考えられる。

これらの問題を克服するためには以下のことを知らなければならない。

- 認識（地質学、地形学、土壌学を通して）
- 分類と評価（相関関係、実験室およびフィールドテストによる）
- 評価（経験的、分析的、数値的な適切なモデルの使用による）
- 適切に的を絞った工学的解決策を適用することにより、対策を行う。

特殊土は、その挙動が古典的な土質力学の理論に適合しないため、異常または「問題がある」ように思われるが、調査し、室内試験、現場試験、試験施工などを行い、特殊土の特性を正しく理解し、技術開発を通じて効果的に工学的に処理することができると考えられる。特殊土を体系的に分類する方法は地盤工学でまだ確立したものは無いようである。世界的な土壌の分布状況を分かりやすく分類する方法として、気象条件に基づいた気候帯（熱帯、乾燥、温帯、大陸性、極地・高山）による分類があり、分かり易い。気候帯の中ではそれぞれ異なった土壌形成プロセスがあり、気候帯の中で様々な土壌が形成される。それらの土壌の中には気候帯を跨いで形成されるものもある。工学的な問題の観点からは土壌が有している土質の力学特性（膨潤性、分散性、崩壊性など）で分類するのが現場で生じている問題現象と繋がるので理解しやすいと考えられる。しかし、土壌が形成過程で有した化学的な特性も腐食や構造物の劣化などの別な工学的な問題を引き起こしている。力学特性や化学的特性でうまく分類できないような土壌がある。ラテライトは熱帯・亜熱帯で形成される土壌で、土

壤分類では定められていない。また、火山灰性土はロームのような粘性土もあればシラスのような火山灰を呈するものもある。軽石(pumice)は破碎性土としても扱われる。雲母を多く含む砂も雲母が平べったい形状のために引き起こす特殊な工学的特性を有する。インドネシアでは、粘土頁岩 Clay shale は切土すると直ぐにスレーキングし、粘土化して極めて軟弱な土壌や膨潤性土になる。また、アフリカでは片岩(Shist)、千枚岩(Phyllite)、頁岩(Shale)等風化して問題を起こす土壌になると指摘されている。また、Sabkha や Mars と言われる特殊土名がついた土壌については前述した分類の中に含まれる。

表 6.4.1 に力学特性・化学特性・その他の3つに区分して整理した特殊土の分類表を示す。

表 6.4.1 特殊土の分類

分類	特殊土名	特徴	主な地域	工学的問題	関連用語
力学特性 Physical properties	膨潤性土 Expansive/swelling soil (clay)	水分の変化によって大きく膨張・収縮する粘土質の土壌。モンモリロナイトなどの膨潤性粘土鉱物を多く含む。	乾燥・半乾燥地域。乾期と雨期が明瞭な地域。	地盤の沈下／隆起に伴う変状、構造物の沈下やひび割れ、地すべり／斜面変状、膨潤に伴う土圧発生	Black cotton soil、Bentonite、Smectite/montmorillonite、Vertisols
	分散性土 Dispersive clay/soil	水に触れると粘土粒子が個別に分離・拡散し、崩壊しやすい土壌。ナトリウム(Na ⁺)を多く含む粘土が主成分。	乾燥・半乾燥地域。	パイピング、空洞化／陥没、斜面侵食／崩壊	細粒分(シルト・粘土)が溶脱 Solonetz
	崩壊性土壌 (可圧縮性土壌) Collapsible soil/ground	乾燥時は安定しているが、水分を吸収すると急激に沈下・崩壊する性質を持つ土壌。	半乾燥地～乾燥地。	水浸沈下(地盤／基礎／盛土)、斜面崩壊	火山灰、黄土 Loess、Sabkha、熱帯性土壌、Quick clay、泥岩、砂質土
	破碎性土 (圧縮性土壌) Crushable soil	乾燥時には硬く締まり、外部からの圧力で容易に割れたり砕けたりする土壌	火山地域、風成堆積物が多い乾燥地域	盛土／基礎の沈下、地盤／杭の支持力不足	Loess、火山灰、Sabkha、熱帯性土壌、Collapsible clay、軽石、粒子破碎
	侵食土壌 Erosive soil (Fragile soil)	風や水の作用で表層が削られ、肥沃度が低下した土壌。	斜面地、乾燥地、降雨量の多い地域。	土砂崩落、斜面侵食／ガリ侵食、河川侵食	黄土 Loess、塩類土壌、Sheet Erosion、風成侵食
	可溶性地盤 Soluble ground	水に溶けやすい鉱物(主に石灰岩、ドロマイト、石膏、岩塩)を含む地盤を指し、地下水の流れによって空洞や	石灰岩・石膏・岩塩を多く含む地域	陥没、空洞化、支持地盤の不均一	石灰岩、チョーク、石膏、岩塩 カルスト地形、Sinkhole、洞窟

分類	特殊土名	特徴	主な地域	工学的問題	関連用語
化学特性 Chemical properties		陥没(カルスト地形)を形成しやすい			
	軟弱地盤 Soft grand	強度が弱い、圧縮しやすく、支持力が低いため、沈下や変形が起こりやすい地盤。	沖積平野、デルタ地帯、湿地、埋立地、泥炭地など	圧密沈下／斜面安定／支持力不足。特殊土としては液状化し易い緩い砂、泥炭、海生粘土がある。	沖積世地盤、泥炭(Peat)、海生粘土、液状化
	塩類土壌 Saline Soils	地表または土壌中に塩分が過剰に蓄積した土壌。	乾燥・半乾燥地域や排水不良な低地	膨潤性による基礎構造物や道路にひび割れや沈下。塩害による鋼材の腐食／劣化。コンクリートの中性化／アルカリシリカ反応。透水性の低下。ソーダ土壌では分散性の問題が生じる。	Solonchak、Solonetz、Sabbkha、Salina(塩田)、Playa、表層クラスト塩害による鋼材の腐食／劣化構造物の沈下やひび割れ
	ソーダ土壌 Sodic soils	ナトリウム(Na^+)が過剰に蓄積し、土壌の構造が崩れて透水性が低下したアルカリ性土壌。	乾燥・半乾燥地域や排水不良な灌漑地帯		
	硫酸塩土壌 Sulfates soils	硫酸塩(SO_4^{2-})を多く含む土壌で主に石膏(CaSO_4)や硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)が蓄積。 Na^+ を多く含むとSodic soilに移行する。	乾燥・半乾燥地域の塩類集積地帯や沿岸湿地	硫酸塩攻撃によるコンクリート／骨材の劣化。湿潤時に石膏(CaSO_4)が溶解し、乾燥時に再結晶化することで体積変化が発生する膨潤性の問題。空洞化、地盤沈下。低支持力。金属・配下難の腐食。	石膏(gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、硫酸塩、硫化物、還元された黄鉄鉱(FeS_2)硫酸カルシウム(calcium sulfate)
	硫化土壌 Sulfides soils	硫化土壌は硫黄を含む有機物(例:ピライト FeS_2)が還元状態で蓄積した土壌。酸化すると強酸性(pH 4)を示すAcid Sulfate Soil土壌に変化する。	沿岸湿地・干拓地・泥炭地・河口域	酸性化によるコンクリート・鉄筋の腐食。軟弱地盤、低支持力。	
	炭酸塩土壌 Carbonate soil	炭酸塩(Carbonate, CO_3^{2-})を豊富に含む土壌で石灰岩の風化や塩類集積によって形成される。主に炭酸カルシウム、炭酸マグネシウム(ドロマイト)、炭酸ナトリウムなどが含まれる。	乾燥・半乾燥地域、カルスト地域、火山灰地域、海洋地域(珊瑚礁)乾燥・半乾燥地域	空洞化に伴う地盤沈下。道路、鉄道、基礎の不同沈下。Calcareous soilはコンクリート・金属の劣化。塩害による鉄筋の腐食。支持力の低下。珊瑚混じり砂では破碎性土と同じ杭	Limestone soils、Alkaline soil、Calcareous soil、チヨーク(Chalky soil)、泥灰土(Marl)、貝殻・珊瑚礁混り砂

分類	特殊土名	特徴	主な地域	工学的問題	関連用語
	カルケアス土壌 Calcareous soil	炭酸カルシウム (CaCO ₃) を多く含むアルカリ性の土壌。炭酸塩土壌に含まれる。		の支持力が従来式で求められない。	
その他	ラテライト	強い風化を受けた土壌であり、酸化鉄や酸化アルミニウムが豊富に含まれ、硬化しやすい。酸性土。	湿潤熱帯・亜熱帯地域	乾燥時には非常に硬いが、雨がふると軟化して崩れ易くなる不安定な材料。表面が硬化しても地下に軟弱層がある場合が多い。基礎の沈下が不均一で不同沈下を起こす。道路舗装材に使用すると雨期に急速に劣化し、舗装破損で更に悪化する。	乾燥すると硬化し、岩石のように固くなり、道路材料やレンガとして利用される。
	火山灰性土	火山噴火によって堆積した火山灰・スコリア・軽石などが風化して形成された土壌で、軽量で多孔質。	山帯に沿った地域	軟弱地盤と同じ問題、破碎性挙動(軽石 pumice を多く含む)、斜面崩壊	ローム、シラス、Ashy Soil、低摩擦力、pumice、scoria
	雲母を多く含む砂	風化や侵食によって形成された砂粒の中に、マイカ鉱物(白雲母、黒雲母、金雲母など)が豊富に含まれる砂質堆積物。	雲母鉱床が豊富な地域や花崗岩質の山地・河川流域	高圧縮変形、剪断力の不足、杭の支持力不足	
	氷河堆積土 (氷積土) Glacial sediment	氷河によって運搬・堆積された土壌・堆積物の総称であり、粒径の異なる堆積物が混在し、地盤としての安定性や排水性が変化する特徴を有する。氷河が後退するときに形成され、砂礫・シルト・粘土を含む多様な組成を持つ。	北半球の高緯度地域や山岳地帯	不均一な構造、急激な強度低下 (Quick clay)、凍結融解	Quick clay/sand、Till、moraine、角張った粒子、Outwash、Esker Drumlin
	風化岩／軟岩	風化岩は岩石が風化(物理的・化学的作用)によって	風化岩は熱帯・温帯地域の高温多湿	スレーキングして軟弱粘性土に変化する⇒斜面崩壊、地すべり、膨潤性土	Clay shale, Clay stone, Shist, Phyllite,

分類	特殊土名	特徴	主な地域	工学的問題	関連用語
		強度・変形特性が低下したもの。 軟岩は岩石の種類にかかわらず元々硬度が低く、掘削が容易な岩石である。	な環境や古い地質の地域。 軟岩は堆積岩(頁岩、泥岩、凝灰岩)や風化しやすい火成岩(安山岩、凝灰岩など)が分布する地域	盛土材料で使用する と荷重によって粒子が破碎して沈下する(破碎性)。または水が浸入してスレーキングして沈下が生じる(崩壊性)。	Shale、 水浸沈下

出典：JICA 調査団

6.5 特殊土分布域

特殊土の分布域について、主要地域毎・国毎に可能な範囲で取りまとめた。

[解説]

6.5.1 特殊土の分布域

特殊土の基本情報として、主要地域毎の特殊土の分布域、および地域毎・国毎に存在する特殊土をそれぞれ可能な範囲で本研究ファイナルレポートの巻末資料に取りまとめた。全世界で事業を行うにあたっての計画段階における基本情報として、調査計画の立案の際等に活用いただくことを想定している。

6.5.2 特殊土分布図の作成

本プロジェクト研究で収集整理した文献情報をもとに、世界各地で遭遇する機会が多い特殊土（膨潤性土、分散性土、崩壊性土（黄土）、ラテライト）を対象に、独自の推定特殊土分布図を作成した。

6.5.2.1 概要

本ハンドブックでは、世界中に特に広く分布している「膨潤性土」、「分散性土」、「ラテライト」を対象に、特殊土分布図を作成した。特殊土分布図は、フリーソフトウェアである QGIS 上で作成し、誰もが同データを活用できるようにした。表 6.5.1 に特殊土分布図の作成概要を示す。

作成にあたっては、基図は全世界の土壤が網羅されている「Harmonized World Soil Database Ver.2.0」(HWSD) を利用し、別途、文献調査やヒアリング調査等で収集したローカルな分布図等をもとに、必要に応じて修正を加えることで、作成した。また、特殊土分布図とは別に、開発途上国の事業に従事するにあたっての特殊土に関する事前把握とリスクの認知を目的とした国別リスクマップも作成した。リスクマップの品質を高めるためには、人口密度やインフラ施設としての重要度等のファクターも考慮する必要があるが、本リスクマップが事業に着手する初期段階での活用を目的としていることから、全世界の特殊土に対するリスクを概略的に把握するに留めている。特殊土は、同じ特殊土として分類されても、分布地域等によってもリスクの大小を有すると考えられることから、近い将来、事業の初期段階のみでなく、各国における詳細なリスク判定を行えるような品質の高いマップを作成していく必要がある。

表 6.5.1 特殊土分布図の作成概要

項目	内容
目的	・開発途上国の事業に従事するにあたっての特殊土に関する事前把握とリスクの認知
対象とする特殊土	世界各地で遭遇する機会が多い以下の特殊土を対象とした。 ・膨潤性土 ・分散性土 ・崩壊性土（黄土） ・ラテライト ※その他の土壤で特殊土分布図に関する文献が得られたものについては、その情報を示すものとした。
提供するマップ	・推定特殊土分布図（JICA オリジナル） ・リスクマップ
ソフトウェア	・QGIS（フリーソフトウェア）
作成概要	・ベース図は全世界の土壤について網羅的に取りまとめられている「Harmonized World Soil Database Ver.2.0」(HWSD) とし、別途、収集した資料より必要に応じて修正を加え、再整理して分布図としてまとめた。 ・再整理した分布図をベースに、国ごとに対象とする特殊土のリスクを明示するため、リスク度合いを示したマップも作成した。 ・リスクマップは国ごとに特殊土が分布するとされる面積を算出し、その割合を 3 段階に区分し High Risk (30%以上の区域に分布)、Middle Risk (10-30%の区域に分布)、Low Risk (分布域が 10%以下) として色分けしたリスクマップを作成した。

項目	内容
留意点	・リスクマップは対象とする特殊土の分布面積を国土面積で除することにより算出したものであり、人口、都市の重要度等の別のファクターを考慮したものではない。したがって、開発途上国で事業に従事する際の初期段階における注意喚起として活用していただくことを想定している。

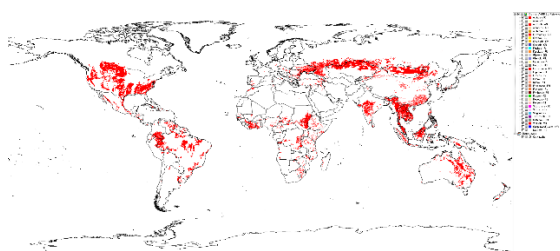
出典：JICA 調査団

6.5.2.2 推定特殊土分布図の作成手順

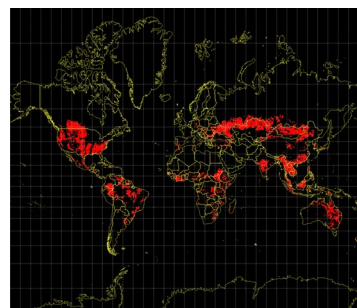
本項では、本ハンドブックで作成した推定特殊土分布図の作成手順について説明する。

(1) 基図の作成

本研究ファイナルレポートの巻末資料で示す各特殊土の世界分布図を HWSD から取得する。この分布図を QGIS 上にラスタデータとして格納し、分布のベース図とする。



(a)



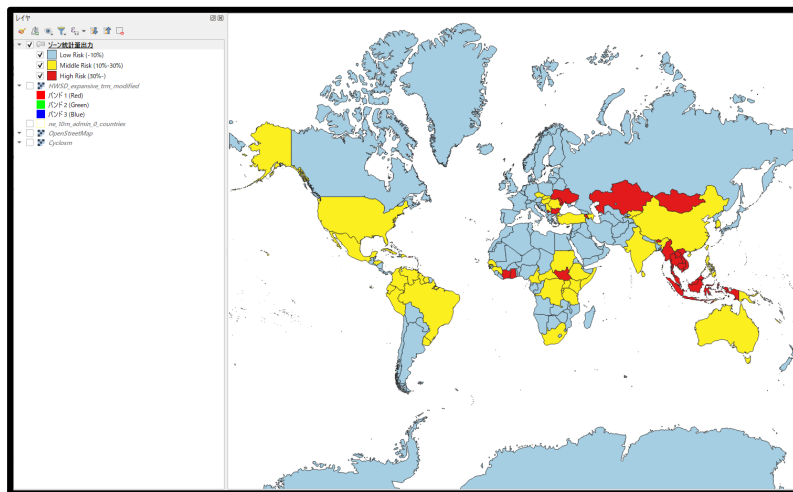
(b)

出典：HWSD Ver 2.0、JICA 調査団

図 6.5.1 (a)HWSD の分布図および(b)QGIS 上のベース図

(2) 想定分布図の作成

QGIS 上でラスタ解析を行い、各国の国境で区切られたベクタのゾーンにおけるラスタ値の平均値を算出する。この数値を、国土面積に対する特殊土の分布割合とする。分布割合に応じて Low Risk（10%未満）、Middle Risk（10～30%）、High Risk（30%超）と区分を設ける。

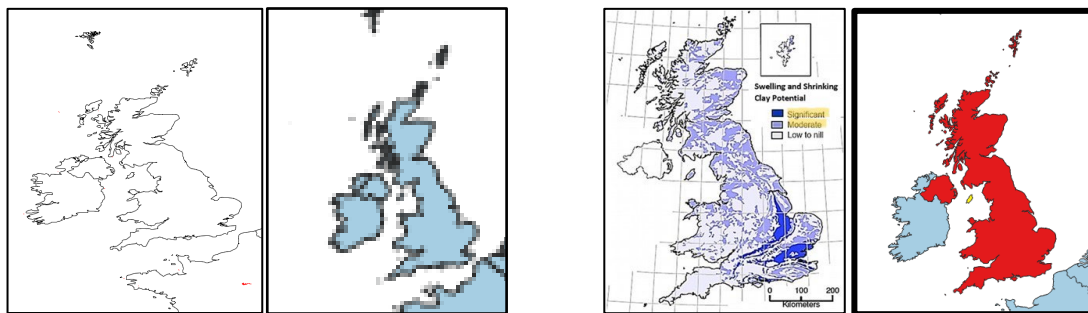


出典: JICA 調査団

図 6.5.2 QGIS 上の想定分布図の例

(3) 基図への既往文献の特殊土分布データ反映

本研究ファイナルレポートの巻末資料で示す既往文献の各特殊土の分布図を上記と同様に QGIS 上への格納およびラスタ解析を行い、算出した統計量を上記の想定分布図に反映する。更新版の想定分布図については本ハンドブック第 2 章の「計画調査段階における対応」にて示す。



(a) HWSO 基図と想定分布図

(b) 既往文献データと更新した想定分布図

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), JICA 調査団

図 6.5.3 QGIS 上の想定分布図更新の例

6.6 土壌分類学の活用

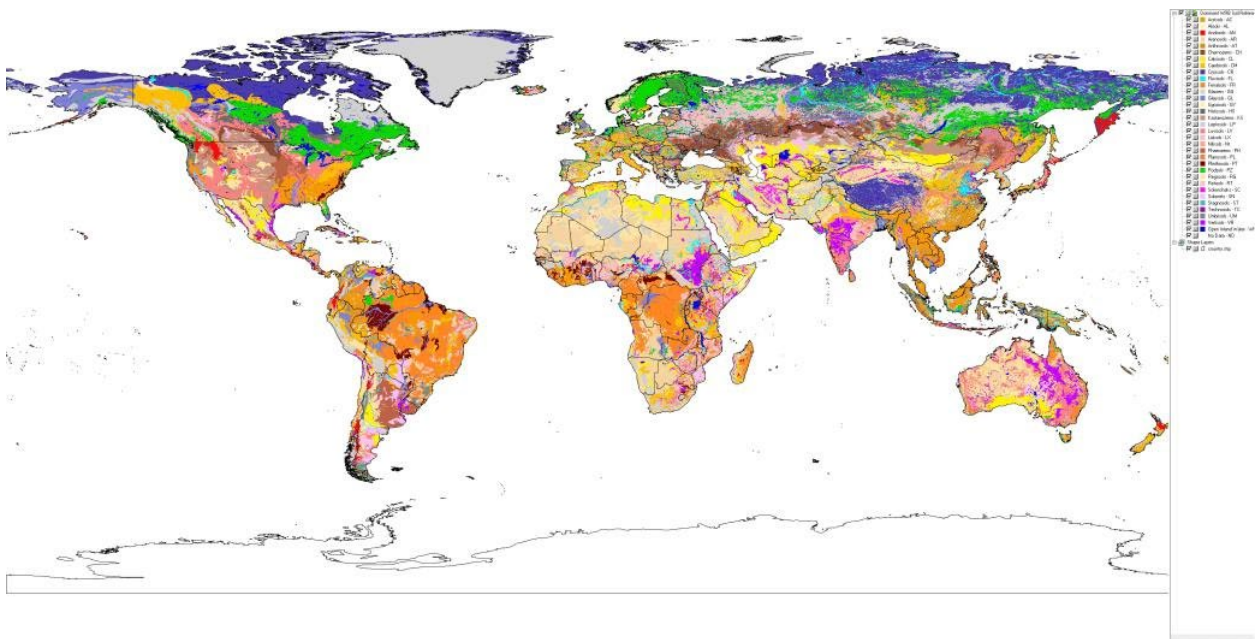
世界土壌分類データベースである Harmonized World Soil Database Ver. 2.0 (HWSD) による土壌分布図は、膨潤性土などの世界分布図と類似性を有しており、本ハンドブックにおける特殊土分布図の作成のための基礎情報とした。

〔解説〕

土壌分類の世界的な分布図については比較的多く研究されているが、特殊土としての世界分布図は作成されていない。土壌分類学では World Reference Base for Soil Resources, WRB 第4版 (2022)、USDA Soil Taxonomy 第13版 (2022)が世界的な研究となっている。WRB は国際的な土壌の研究に対して、USDA Soil Taxonomy は米国の農業を目的に作成されたものである。

Harmonized World Soil Database version 2.0 (HWSD v2.0)は、FAO と IIASA によって開発され、1 km の解像度に焦点を当てて、形態、化学、物理的特性を含む土壌の特性に関する詳細な洞察を提供する包括的な世界土壌分類データベースとなっている。農業、食糧安全保障、気候変動の影響などの分野の研究にとって貴重なツールとなっている。Windows 版のソフトで世界各地の土壌分類状況を簡単に知ることが出来る。図 6.6.1 に全世界の土壌分布を示した例を示すが、容易に拡大して各国の詳細な土壌分布を見ることが出来る。HWSD を活用することにより各国の特殊土が存在する可能性を推定できる可能性がある。膨潤性土は代表的な土壌が Vertisols で、それ以外の Chernozems、Acrisols、Luvisols、Phaeozems などの土壌も膨潤性土の可能性があるので、膨潤性土の世界的分布図(図 6.6.2)と HWSD を用いて作成した膨潤性土の可能性のある土壌分布図(図 6.6.3)を比較すると、両者が同じような分布状況を示すのが分かる。本研究ファイナルレポートの巻末資料に、HWSD の土壌分類に基づく特殊土の可能性について整理した。土壌分類と特殊土の関係を明確に示した論文が少ないため、可能性のみを評価していることに注意されたい。

本ハンドブックにおいては、HWSD を特殊土分布図の基礎情報として活用している。



出典: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>

図 6.6.1 Harmonized World Soil Database v2.0 の全世界表示例

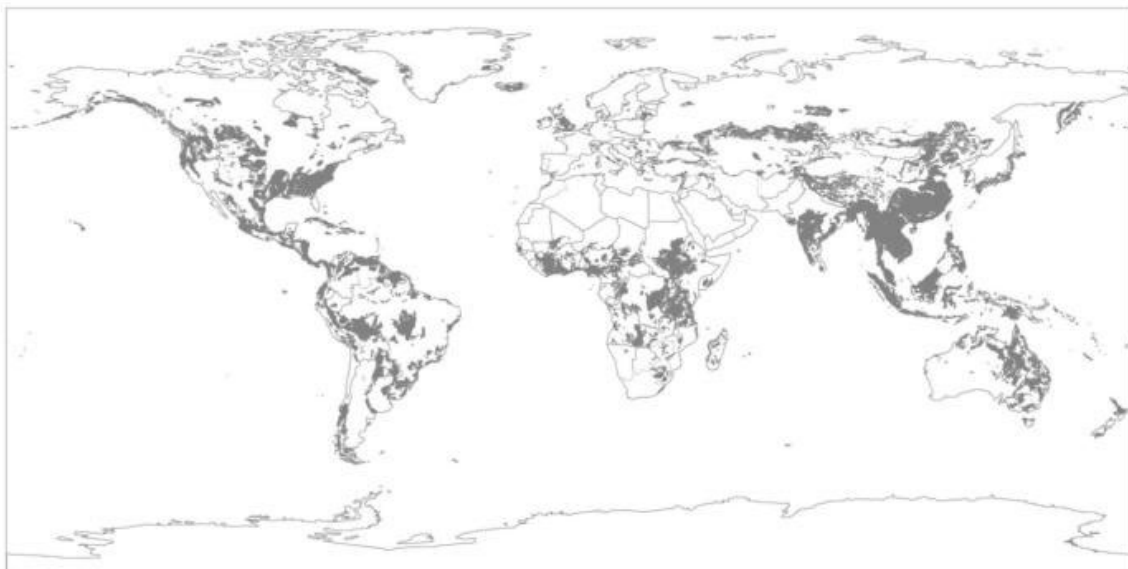
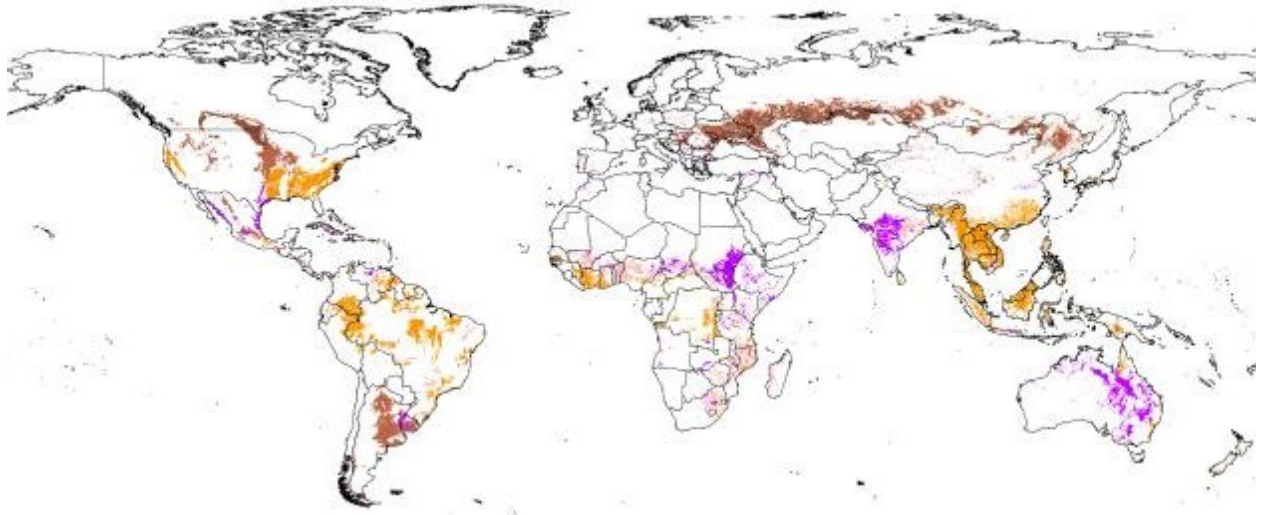


Figure 1 – Global distribution of shrink–swell soil where major construction costs occur (by region)

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

図 6.6.2 膨潤性土の世界的分布図



出典：JICA 調査団

図 6.6.3 HWSD を用いた膨潤性土の可能性のある土壤分布図
(Vertisols, Chernozems、Acrisols、Luvisols、Phaeozems)

6.7 特殊土の工学的問題点

開発途上国におけるインフラの成長に伴い、建設工事で特殊土に遭遇する事例は増えてくることが予想され、対策技術の必要性がますます高まってきている。

特殊土の問題を解決するためには、以下の3つが必要となる。

- 特殊土に関連する地質学的・地形学的側面の理解
- 特殊土の挙動を評価・判定する方法
- 特殊土の効果的な対策と設計法の確立

特殊土の工学的問題点は「土壌の特性」、「気象条件」、「構造物」毎に異なるため、新しい特殊土対策技術が確立された場合でも、想定外の新たな問題が発生する可能性がある。

〔解説〕

特殊土の問題解決には、基本的な地盤工学を修正して行くことが必要となる。文献調査ではそれらはまだ完全には解決されておらず、多くの土壌が世界的に問題を引き起こし続けている。ODA の援助を受けている国では、インフラや建設環境の基盤が成長し続け、特殊土に関わる事業がこれまで以上に必要になっており、それに伴い特殊土に関連する問題に遭遇することが増えていくと考えられる。さらに、世界中の政府が設定した持続可能性の主要目標に関連する炭素の影響を削減するための推進力が加わり、気候変動に関連する極端な気象パターンの増加も相まって、特殊土に対処する方法に関する技術が今後ますます必要になると考えられる。

特殊土は、継続的に重大な問題を引き起こしており、世界中で問題のある地盤で多くの困難に遭遇している。特殊土の問題を解決するためには以下のことを特殊土毎に解決して行かなければならない。

- 特殊土に関連する地質学的・地形学的側面を理解する。
- 特殊土とその挙動を評価・判定する方法を特定する。
- 特殊土を効果的に対策し、設計する方法を確立する。

特殊土の工学的な問題点は、土壌の特性、気象条件、構造物毎に違っており、今後新しい施工方法を適用すると過去に遭遇したことの無い問題を生じる可能性があり、多くの未知の領域が残されている可能性が高い。

第7章 おわりに

本ハンドブックは「全世界開発途上国における建設工事で遭遇する特殊土壌対策及びローカルの自然地盤材料の補強対策に関する基礎研究（プロジェクト研究）」業務にて収集・調査した事項をもとに、現時点の知見・情報を取りまとめて編集したものである。収集された基準や学術論文、書籍は特殊土ごとに濃淡があり、膨潤性土については比較的多くの情報がある一方で、他の特殊土についてはその特性や挙動、調査方法や対策に係る情報が極めて限定的な状況である。

特殊土に係る問題は、世界各国で様々なプロジェクトの中で発生しており、膨潤土を始めとして、分散性土や崩壊性土、ラテライトなど、様々な特殊土に係る事業において広域に、あるいは構造物に大規模な被害を与えたケースが確認されている。特殊土は地域ごとに様々な種類のものがあり、特性もばらつきが大きく、体系的な調査・研究が十分ではなく、対策が確立していない分野であり、既存の土質工学の枠組みの中での検討ではリスク回避が十分ではないケースが多く発生している。このことから、遭遇した、あるいは遭遇する可能性のある特殊土の分布の規模、内容によっては、ルート・構造物位置の大小の変更、構造の変更と言った道路計画・設計へのフィードバックも視野に入れて総合的かつ効率的に事業を進める必要がある。

本邦では必ずしも世界各地に分布する特殊土を対象とした技術ではないが、建設事業において問題となる軟弱地盤の改良技術や、固化材による土質材料の安定処理、法面の処理技術など、地盤に係る優れた技術を多く有している。これらの技術に対して、特殊土を含む地盤に係る問題の解決のため、各国からも表 7.1.1 に示すような支援事業に期待が寄せられている。

表 7.1.1 日本に期待する特殊土・地盤に係る支援事業

大区分	中区分	日本に期待される主な支援事業
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
	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
	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
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
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
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

出典：JICA 調査団

本邦の技術は現地地盤・土質材料への適合に向けた開発研究によって、特殊土に係る問題解決に向けた有力なソリューションとなる可能性を有している。例えば化学的に比較的安価な添加剤で膨潤性土の特性の改良を行う技術、ラテライトを安定的な品質に改良するための混合機材、比較的安価に法面の浸食・表層崩壊を防止するためのフィルタ材などが一例として挙げられる。

今後、こういった技術も含め、特殊土に係る調査・研究が進められ、安全で質の高いインフラ建設事業の実施に資する知見を集積していくことが重要である。また、本邦技術の世界貢献に向けた海外展開が強く望まれる。

最後に、プロジェクトで遭遇した事例について、特殊土の内容、講じた対策とその効果、インフラ整備事業の計画・設計へのフィードバック等の一連の情報をデータベースとして蓄積することが今後に向けて非常に有効と考えられる。本ハンドブックがその最初のベースとなるのであれば幸甚である。

巻末資料

Appendix A 土質特性による膨潤性土の判定方法

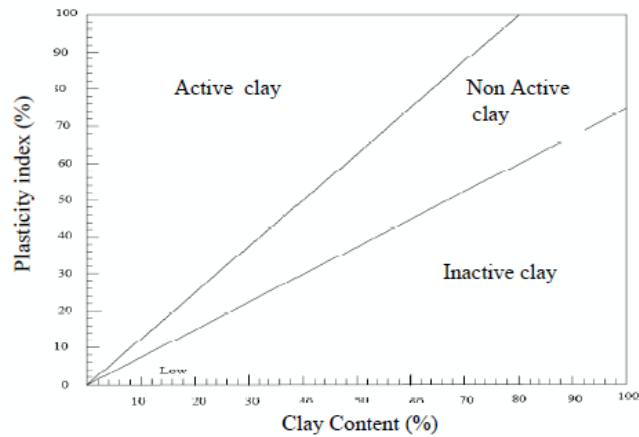


Figure (2.4): Soil classification chart (Skempton, 1953).

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

図 A.1 粘土分含有量と塑性指数を用いた判定 (Skempton, 1953)

表 A.1 収縮限界／線形収縮率による判定 (Altmeyer, 1955)

膨張ポテンシャル	想定膨張度	収縮限界 (%)	線形収縮率
Non-critical	<0.5	>12	<5
Marginal	0.5~1.5	10~12	5~8
Critical	>1.5	<10	>8

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.2 収縮限界、塑性指数、コロイド分に基づく想定膨潤量による判定 (Holtz and Gibbs, 1956)

膨潤度	想定膨潤量 (全体積%)	インデックス試験のデータ		
		収縮限界 SL (%)	塑性指数 IP	コロイド含有率 (0.0001mm 以下)
低い	<10	>15	<18	<15
中くらい	10~30	10~16	15~28	13~23
高い	20~30	7~12	25~41	20~33
非常に高い	>30	<11	>35	>28

鉛直載荷重 1.0psi≒6.89kPa ※赤字 JICA 調査団修正

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.3 収液性限界と塑性指数による判定(Williams, 1958)

膨潤度	液性限界 LL(%)	塑性指数 IP
低い	<50	<25
中くらい	50~60	25~35
高い	>60	>35

出典: 膨張土処治理論と工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京(2008)

表 A.4 収縮限界、塑性指数、コロイド分に基づく想定膨潤量による判定(Holtz and Gibbs, 1959)

膨潤度	収縮限界 SL (%)	塑性指数 IP	コロイド含有率 (0.0001mm 以下)
低い	>15	<18	<5
中くらい	10~16	15~28	13~23
高い	7~12	25~41	20~31
非常に高い	<11	>35	>28

鉛直載荷重 1.0psi≒6.89kPa ※赤字 JICA 調査団修正

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

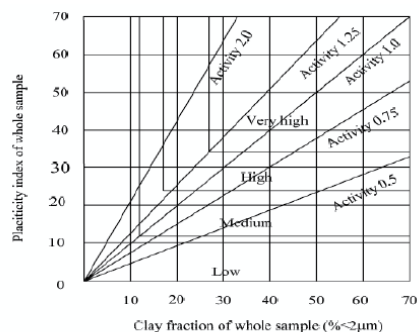


Figure (2.5): Swell potential as function of colloids content and Activity (Seed et al., 1960)

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

図 A.2 粘土分含有量と塑性指数による判定(Seed et al., 1960)

表 A.5 膨張ポテンシャルと塑性指数による判定(Seed et al., 1962)

膨張ポテンシャル	膨張ポテンシャル S	塑性指数 PI(%)
低い	0~1.5	0~10
中くらい	1.5~5	10~20
高い	5~25	20~35

$$\text{Swelling potential } S = 1.10^{-5} I_p^{2.24}$$

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.6 膨張ポテンシャルと塑性指数による判定(Holtz, Seed, Woodward)

膨張ポテンシャル	Holtz & Gibbs	Seed et al.	コロイド分 (%)	収縮限界 LS (%)	自由膨張率 (%)
	膨張率 (%)	膨張率 (%)			
低い	<10	0~1.5	<17	<15	<50
中くらい	10~20	1.5~5	12~27	15~30	50~100
高い	20~30	5~25	18~37	30~60	100~200
非常に高い	>30	>25	>27	>60	>200
注	7kPa	7kPa	%-0.001mm	-	-

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

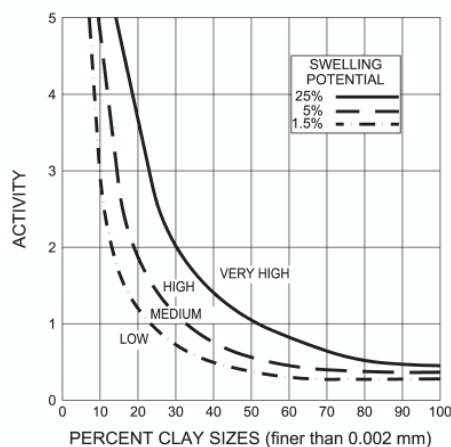


FIGURE 9.2. Swelling potential for compacted clays based on activity and percent clay (Seed, Woodward, and Lundgren 1962).

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 A.3 粘土分含有量と活性度による判定(Seed et al., 1962)

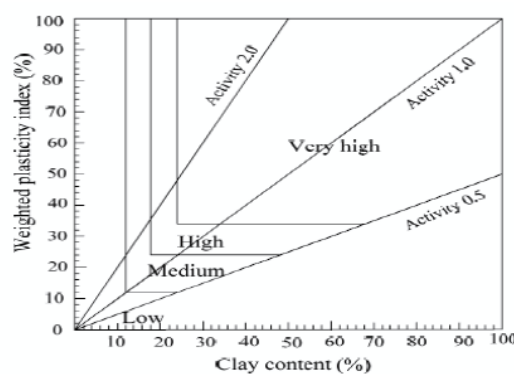


Figure (2.6b): Potential severity of volume change for clay soils (Van Der Merwe, 1964).

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

図 A.4 粘土分含有量と塑性指数による判定(Van Der Merwe, 1964)

表 A.7 収縮指数による判定(Ranganatham and Satyanarayana, 1965)

膨張ポテンシャル	収縮指数
低い	0~20
中くらい	20~30
高い	30~60
非常に高い	>60
極めて高い	>130

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.8 膨潤指数による判定(Uniform Building Code, 1968)

膨張ポテンシャル	膨潤指数 EI
低い	0~20
中くらい	21~50
高い	51~90
非常に高い	91~130
極めて高い	>130

$$\text{膨潤指数 EI} = 100 \times \Delta h \times F$$

ここに、 Δh =膨潤率(%）、 F =No.4 ふるい(4.75mm)通過量

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.9 収縮指数と塑性指数による判定(Sowers and sowers, 1970)

膨潤度	塑性指数 PI(%)	収縮限界 SL(%)
低い	<15	>12
中くらい	15~30	10~12
高い	>30	<10

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.10 収縮指数と塑性指数による判定(IS 1498, 1970)

膨潤度	液性限界 LL(%)	塑性指数 PI(%)	収縮限界 SL(%)	自由膨張率(%)
低い	20~35	<12	<15	<50
中くらい	35~50	12~23	12~30	50~100
高い	50~70	23~32	30~60	100~200
非常に高い	70~90	>32	>60	>200

出典: Swelling Behaviour of Expansive Soil, Vikram Kumar, Dharendra Kumar(2011)

表 A.11 塑性指数による判定 (Peck, Hanson, and Thornburn 1974)

膨張ポテンシャル	塑性指数 (%)
低い	0~15
中くらい	0~35
高い	20~55
非常に高い	>35

出典: Peck, Hanson, and Thornburn 1974

表 A.12 収縮指数と液性限界による判定 (Sneththen et al., 1975)

膨潤度	塑性指数 PI (%)	Raman(1967)	Ranganatham et al.(1965)	Ladd et al.(1961)
		収縮指数 (%)	収縮指数 (%)	液性限界 LL (%)
低い	<12	<15	<20	20~35
中くらい	12~23	15~30	20~30	55~50
高い	23~32	30~60	20~30	50~70
非常に高い	>32	>60	>60	70~90
極めて高い	-	-	-	>90

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.13 液性限界による判定 (Chen, 1975)

膨潤度	Chen	IS 1498
	液性限界 LL (%)	液性限界 LL (%)
低い	<30	20~35
中くらい	30~40	35~50
高い	40~60	50~70
非常に高い	>60	>70

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

表 A.14 塑性指数による判定 (Chen, 1975)

膨潤度	Holtz	Chen	IS 1498
	塑性指数 Ip (%)	塑性指数 Ip (%)	塑性指数 Ip (%)
低い	<20	0~15	<12
中くらい	12~34	10~35	12~23
高い	23~45	20~55	23~32
非常に高い	>32	>35	>35

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

表 A.15 液性限界、塑性指数、サクシヨンによる判定
(Modified from Snethen, Johnson and Patrick, 1977)

膨潤度	膨張率 (%)	液性限界 LL (%)	塑性指数 Ip (%)	サクシヨン	
				(pf)	(MPa)
低い	<0.5	<50	<25	<3.1	<1.3
中くらい	0.5~1.5	50~60	25~35	3.1~3.6	1.3~4.0
高い	>1.5	>60	>35	>3.6	>4.0

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 A.16 液性限界、塑性指数、サクシヨンによる判定 (Snethen et al.1977)

膨潤度	膨張率 (%)	液性限界 LL (%)	塑性指数 Ip (%)	サクシヨン	
				(ton/ft ²)	(MPa)
低い	<0.5	<50	<25	<1.5	<0.16
中くらい	0.5~1.5	50~60	25~35	1.5~4.0	0.16~0.43
高い	>1.5	>60	>35	>4.0	>0.43

出典: AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TREATMENT OF EXPANSIVE SOILS BY GRANULAR MATERIALS, Hergul Timucin(2019)

表 A.17 塑性指数による判定 (Snethen,1980)

膨張ポテンシャル	塑性指数 PI (%)
低い	<18
中くらい	22~32
高い	22~48
非常に高い	>35

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.18 塑性指数による判定 (Neil, 1980)

膨張ポテンシャル	膨張率 (%)	液性限界 (%)	塑性指数 PI (%)
低い	<0.5	<50	<25
中くらい	0.5~1.5	50~60	25~35
高い	>1.5	>60	>35

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

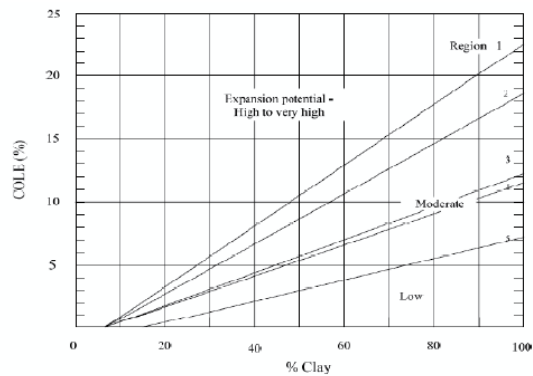


Figure (2.10): Swell potential as a function of colloids content and COLE (McKeen and Hamberg, 1981)

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

図 A.5 粘土分含有量と COLE による判定(McKeen and Hamberg, 1981)

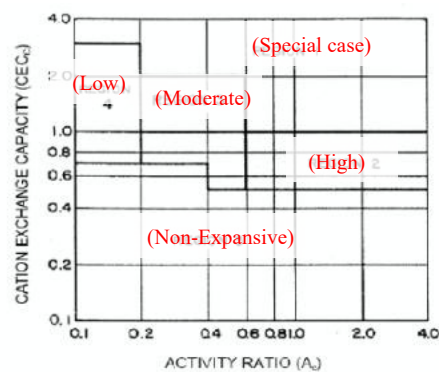


Figure (2.11): Soil expansiveness and COLE regions as a function of Activity and Cation Exchange Capacity (McKeen and Hamberg, 1981)

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

赤字: JICA 調査団加筆

図 A.6 活性度と COLE による判定 (McKeen and Hamberg, 1981)

表 A.19 現場サクシオンと塑性指数と液性限界による判定(Snethen, 1984)

膨張ポテンシャル	膨張ポテンシャル率 (%)	サクシオン	塑性指数 I_p (%)	液性限界 LL (%)
低い	<0.5	<1.5	<25	<30
中くらい	0.5~1.5	1.5~4	25~35	30~60
高い	>1.5	>4	>35	>60

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.20 MFSI による判定(Srindharan, 1986)

膨潤度	MFSI (cm ³ /g)	四塩化炭素の沈殿体積 (cm ³ /g)
無視	<1.5	1.10~3.00
低い	1.5~2.0	>1.1 and <MSFI
中くらい	1.5~2.0	<1.1
高い	2.0~4.0	<1.1
非常に高い	>4.0	<1.1

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, : Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

表 A.21 塑性指数、収縮限界、液性限界による判定(Chen, 1987)

膨張ポテンシャル	塑性指数 PI (%)	収縮限界 SL (%)	液性限界 LL (%)
低い	<18	>15	20~35
中くらい	15~25	10~15	35~50
高い	>35	7~12	50~70

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.22 塑性指数、収縮限界、液性限界による判定(Erol, 1987)

膨潤度	膨潤率 (%)	粘土分 (%)	塑性指数 PI (%)	収縮限界 SL (%)
低い	<10	>15	<18	>15
中くらい	10~20	13~23	15~25	10~16
高い	20~30	20~31	25~41	7~12
非常に高い	>30	>28	>35	<11
注	-	<2 μ m	-	-

出典: AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TREATMENT OF EXPANSIVE SOILS BY GRANULAR MATERIALS, H. Timucin(2019)

表 A.23 膨潤圧と液性限界と細粒分含有量による判定(Puvvadi, 1987)

膨張ポテンシャル	液性限界(体積) (%)	修正自由膨張指数
低い	<200	<2.5
中くらい	200~400	2.5~10
高い	400~550	10~20
非常に高い	>550	>20

$$\text{Modified free swell index} = \frac{V-V_s}{V_s}, LL_{\text{volume}} = \frac{LL_{\text{mass}}}{LL_{\text{mass}} + 100\rho_w/\rho_{\text{dry}}} \times 100$$

ここに V=膨潤後の体積、V_s=土の体積=W_s/(G_sγ_w)

出典: Modified Free Swell Index for clays, Puvvadi V. Sivapullaiah Thallak G. Sitharal and Kanakapura S. Subba Rao(1987)

表 A.24 膨潤圧と液性限界と細粒分含有量による判定(Chen, 1988)

膨張ポテンシャル	膨張圧(6年後) (MPa)	液性限界 (%)	細粒分含有量 %<74 μ m
低い	<0.05	<30	<30
中くらい	0.15~0.25	30~40	30~60
高い	0.25~1.0	40~60	60~95
非常に高い	>1.0	>60	>95

※赤字 JICA 調査団修正

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.25 膨潤圧と液性限界と細粒分含有量による判定(Modified Chen, 1988)

膨潤度	細粒分含有量 %<74 μ m	液性限界 LL (%)	N value	想定膨張率 (%全体積)	膨張圧 (ksf), (kPa)
低い	<30	<30	<10	<1	1 (48)
中くらい	30~60	30~40	10~20	1~5	3~5, (144~239)
高い	60~95	40~60	20~30	3~10	5~20, (239~958)
非常に高い	>95	>60	>30	>10	>20, (>958)

載荷重 $\sigma' = 1,000 \text{psf}(48 \text{kPa})$

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 A.26 塑性指数による判定(Carter and Beley, 1991)

膨張ポテンシャル	膨張量 (%)	塑性指数 Ip	塑性指数 Ip (%)
低い	0~1.5	0~15	0~15
中くらい	1.5~5	10~30	15~24
高い	5~25	20~55	25~46
非常に高い	>25	>40	>46

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

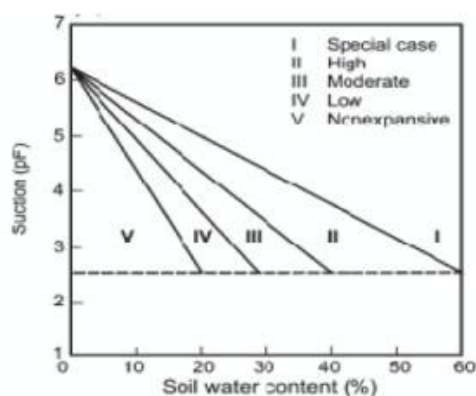


Figure (2.12): Example of the relationship between soil suction and water content
(McKeen, 1992)

図 A.7 含水比とサクションによる判定 (McKeen, 1992)

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.27 塑性指数による判定 (BRE, 1993)

体積変化ポテンシャル	塑性指数 I_p (%)
低い	<20
中くらい	20~40
高い	40~60
非常に高い	>60

$$I'_p = I_p \times \frac{(\%425\mu m)}{100} \%$$

出典: Institution of Civil Engineers Manuals series CHAPTER C5 – EXPANSIVE SOILS Lee D Jones, British Geological Survey

表 A.28 膨潤指数 EI による判定 (ASTM D 4829, 1995)

EI ポテンシャル	EI (%)
非常に低い	0~20
低い	21~50
中くらい	51~90
高い	90~130
非常に高い	>130

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, : Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,
Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

表 A.29 提案される代表的な膨潤ポテンシャルによる判定 (Slab Performance Risk) (CAGE, 1996)

スラブパフォーマンス マンリスク	代表的膨張率(%)	
	$\sigma_v=500\text{psf}(29.9\text{kPa})$	$\sigma_v=1,000\text{psf}(47.9\text{kPa})$
低い	0~3	0~2
中くらい	3~5	2~4
高い	5~8	4~6
非常に高い	>8	>6

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

表 A.30 自由膨張度による判定 (IS 2720 Part40, 1997)

膨張収縮ポテンシャル	自由膨張度 FSI
低い	<20
中くらい	20~35
高い	35~50
非常に高い	>50

$$COLE = \Delta L / \Delta L_D = (\gamma_{dB} / \gamma_{dM})^{0.35} - 1$$

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

表 A.31 コロイド含有率、塑性指数、収縮限界による判定 (USB, 1998)

膨張度	膨潤率(%)	粘土分含有量(%)	塑性指数 Ip(%)	収縮限界(%)
低い	<10	<15	<18	>15
中くらい	10~30	13~23	15~28	10~16
高い	20~30	20~33	25~41	7~12
非常に高い	>30	>28	>35	<11
注	-	<0.001mm	-	-

出典: 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平 (2009)

表 A.32 コロイド含有率、塑性指数、収縮限界による判定 (Claudial, 2000)

膨張／収縮 ポテンシャル	ブルーメチレン値 VB (g/100gsoil)	塑性指数 Ip (%)	膨潤圧 SP' (kPa)
低い	<2.5	<12	0~100
中くらい	2.5~4.5	12~35	100~300
高い	4.5~9	35~45	300~500
非常に高い	>9	>45	>500

出典: Prediction of Swelling/Shrinkage Potential Using the Blue Methylene Method: some Examples in Italian Clayey Soils, M.

Claudial(2000)

表 A.33 COLE(線形膨張係数)による判定 (Thomas et al., 2000)

膨張収縮ポテンシャル	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

$$COLE = \Delta L / \Delta L_p = (\gamma_{dB} / \gamma_{dM})^{0.35} - 1$$

ここに、 $\Delta L / \Delta L_p$ =乾燥寸法に対する線ひずみ、 γ_{dB} =炉乾燥した乾燥密度、 γ_{dM} =5psi (34kPa) 吸引時の試料の乾燥密度。

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.34 液性限界による判定 (Sridharan, 2000)

膨潤度	Chen	IS 1498
	液性限界 LL (%)	液性限界 LL (%)
低い	<30	20~35
中くらい	30~40	35~50
高い	40~60	50~70
非常に高い	>60	70~90

出典: Classification procedures for expansive soils, A. Sridharan and K. Prakash(2000.12)

表 A.35 塑性指数による判定 (Sridharan, 2000)

膨潤度	Holtz	Chen	IS 1498
	塑性指数 Ip (%)	塑性指数 Ip (%)	塑性指数 Ip (%)
低い	<20	0~15	<12
中くらい	12~34	10~35	12~23
高い	23~45	20~55	23~32
非常に高い	>32	>35	>32

出典: Classification procedures for expansive soils, A. Sridharan and K. Prakash(2000.12)

表 A.36 塑性指数による判定(Sridharan, 2000)

膨潤度	膨張率(%)	自由膨張比
無視	<1	<1.0
低い	1~5	1.0~1.5
中くらい	5~15	1.5~2
高い	15~25	2~4
非常に高い	>25	4

出典: Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using Modified Free Swell Index, Methylene Blue and Swell Oedometer Tests,

Jaleh Forouzan, Amir(2016.02)

表 A.37 コロイド分、収縮限界、収縮指数、自由膨張度、膨張率による判定(Sridharan, 2000)

膨潤度	コロイド分 (%)	収縮限界 SL (%)	収縮指数 Is (%)	自由膨張度 (%)	膨張率 (%)	膨張率 (%)
低い	<17	>13	<15	<50	<10	0~1.5
中くらい	12~27	8~18	15~30	50~100	10~20	1.5~5.0
高い	18~37	6~12	30~60	100~200	20~30	5~25
非常に高い	>27	<10	>60	>200	>30	>25
注	%-0.001mm	-	-	-	Holtz, 7kPa	Seed, 7kPa

出典: Classification procedures for expansive soils, A. Sridharan and K. Prakash(2000.12)

表 A.38 MSFI による判定(Sridharan, 2000)

膨潤度	膨潤率(%)	MSFI (cm ³ /g)	自由膨張比
無視	<1	<1.5	<1.0
低い	1~5	1.5~2.0	1.0~1.5
中くらい	5~15	1.5~2.0	1.5~2.0
高い	15~25	2.0~4.0	2.0~4.0
非常に高い	>25	>4.0	>4.0
注	7kPa	-	-

$$MFSI = \frac{V_d}{10}, \text{ Free swell ratio} = \frac{\text{蒸留水中の沈降体積}}{\text{四塩化炭素中の沈降体積}}$$

ここに、V_d=蒸留水中の沈降体積

出典: Classification procedures for expansive soils, A. Sridharan and K. Prakash(2000.12)

表 A.39 粘土分と塑性指数による判定(Bekkouche et al., 2001)

膨張ポテンシャル	粘土分含有量<2 μ m(%)	塑性指数 Ip(%)
低い	<30	<18
中くらい	30~60	18~22
高い	60~95	22~35
非常に高い	>95	>35

出典: Swelling Performance of some Expansive Soil Treatment Techniques, Mohamed Youssef Abd El-Latif(2008)

表 A.40 コロイド含有率、塑性指数、収縮限界による判定(CMC., 2004)

膨潤度	想定膨潤率 (%)	コロイド(-0.001mm) 含有率(%)	塑性指数 Ip (%)	収縮限界 SL (%)
低い	<10	<15	<18	>15
中くらい	10~20	13~23	15~28	10~16
高い	20~30	20~31	25~41	7~12
非常に高い	>30	>28	>35	<11

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

表 A.41 粘土分と塑性指数による判定 (CMC., 2004)

膨張度クラス	標準吸水含水率 SAMC(%)	塑性指数 Ip (%)	自由膨張度 FSI
非膨潤性	< 2.5	< 15	< 40
低い	2.5~4.8	15~28	40~60
中くらい	4.8~6.8	28~40	60~90
高い	> 6.8	> 40	> 90

$$SAMC(\%) = \frac{W_c - W_s}{W_s}$$

ここに、 W_c =温度 77° F(25°C)、湿度 60%の密度、 W_s =炉乾燥の密度

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

表 A.42 膨潤圧による判定(MUSSO & PEJON, 2006)

膨潤ポテンシャル	膨潤圧力 (kPa)
低い	<75
中くらい	75~200
高い	200~500
非常に高い	>500

出典: Expansive soils engineering geological mapping – applied method in clayey soils of Montevideo, Uruguay, M. MUSSO & O.

PEJON(2006)

表 A.43 コロイド分、塑性指数、収縮限界による判定 (ACPA, 2008)

膨潤度	想定される膨潤率 (%) (乾燥状態から飽和状態)	コロイド分 (%) (0.001mm 以下)	塑性指数 Ip (%)	収縮限界 SL (%)
低い	<10	< 15	< 8	>15
中くらい	10~20	15~28	15~28	10~16
高い	20~30	28~40	24~41	7~12
非常に高い	>30	> 40	>35	<11

出典: Expansive Soils TS204.2P, ACPA(2008)

表 A.44 楊世基標準による判定 (楊世基標準, 2008)

膨潤度	液性限界 LL (%)	塑性指数 Ip (%)	膨張率 (%)	サクシオン (kPa)	CBR 膨張量 (%)
低い	40~50	18~25	0.7~2	100~160	1~2
中くらい	50~60	25~35	2~4	160~440	2~3
高い	>60	>35	>4	>440	>3

出典: 膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京 (2008)

表 A.45 建設部標準による判定 (建設部標準 GBJ 112 - 87, 2008)

膨潤度	自由膨張率 (%)	地面変形量 (mm)
低い	40~65	15~35
中くらい	65~90	35~70
高い	>90	>70

出典: 膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京 (2008)

表 A.46 交通部標準による判定 (交通部標準 JTG D30-2004, 2004)

膨潤度	自由膨張率 (%)	標準吸湿水分率 (%)	塑性指数 Ip (%)
非膨潤	<40	<2.5	<15
低い	40~60	2.5~4.8	15~28
中くらい	60~90	4.8~6.8	28~40
高い	>90	>6.8	>40

出典: 膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京 (2008)

表 A.47 李生林による判定(李生林, 2003)

膨潤度	液性限界 LL (%)	膨張率 (%)	塑性指数 Ip (%)	自然含水比	自由膨張率 (%)	気候、水文地 質学的条件
低い	40~45	0.7~2	<18	>35	40~55	より良い
中くらい	45~50	2~4	18~25	25~35	55~70	一般
高い	50~55	4~6	25~35	15~25	70~85	低い
非常に高い	>55	>6	>35	<15	>85	とても低い

出典: 膨張土処治理論と工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黄向京 (2008)

表 A.48 劉特洪による判定(劉特洪, 1997)

膨潤度	自由膨張率 (%)	膨張率 (%)	膨潤圧 (kPa)	液性限界 LL (%)	塑性指数 Ip (%)	内部摩擦角 ϕ (°)
低い	40~65	<2	<40	15~45	<18	>16
中くらい	65~90	2~4	40~120	45~50	18~25	13~16
高い	>90	>4	>120	>50	>25	<13

出典: 膨張土処治理論と工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黄向京 (2008)

表 A.49 鄭家喜による判定(鄭家喜, 1999)

膨潤度	CBR _{0.9} (%)	膨張率 (%)	液性限界 LL (%)	塑性指数 Ip (%)
低い	2~4	2~4	40~55	<20
中くらい	1~2	4~5	55~65	20~26
高い	<1	>6	>65	>26

出典: 膨張土処治理論と工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黄向京 (2008)

表 A.50 自由膨潤度による判定(公路膨張土工程, 2009)

膨潤度	自由膨潤度 (%)	自由膨潤度 (%)
低い	40~65	30~50
中くらい	65~90	50~80
高い	>90	>80

出典: 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平 (2009)

表 A.51 収縮率による判定(柯尊敬, 1977)

膨潤度	線収縮率(%)	体積収縮率(%)	膨張率(%)
低い	2~5	8~16	2~4
中くらい	5~8	16~23	4~7
高い	8~11	23~30	7~10
非常に高い	>11	>30	>10

出典: 膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京(2008)

表 A.52 自由膨張率と収縮率による判定(公路膨張土工程, 2009)

膨潤度	収縮率(%)	線収縮率(%)	線収縮率(%)	体積収縮率(%)	自由膨張率(%)
低い	8~12	4~6	0.7~2	8~16	30~50
中くらい	12~18	6~8	2~4	16~23	50~80
高い	>18	>8	>4	>23	>80
	無載荷	無載荷		収縮限界	

出典: 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平(2009)

表 A.53 複数の指標による判定(公路膨張土工程, 2009)

膨潤度	粘土分含有量(%)	液性限界(%)	塑性指数(%)	比表面積(m ² /g)	CEC(mol/kg)	収縮膨張率(%)
低い	<35	<40	<18	<150	<300	4~6
中くらい	35~50	40~48	18~25	150~300	300~400	6~8
高い	>50	>48	>25	>300	>400	>8
注	<0.0002mm	-	-	-	-	無載荷

出典: 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平(2009)

表 A.54 複数の指標による判定(公路膨張土工程, 2009)

膨潤度	自由膨張率(%)	モンモリロナイト含有量(%)	CEC(NH ₄ ⁺)
低い	40~60	7~17	170~260
中くらい	60~90	17~27	260~360
高い	>90	>27	>360

出典: 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平(2009)

表 A.55 塑性指数による判定(NHBC, 2011)

体積変化ポテンシャル	塑性指数 I_p' (%)
低い	10~20
中くらい	20~40
高い	>40

出典: Institution of Civil Engineers Manuals series CHAPTER C5 – EXPANSIVE SOILS Lee D Jones, British Geological Survey

表 A.56 塑性指数による判定(Kumar et al., 2011)

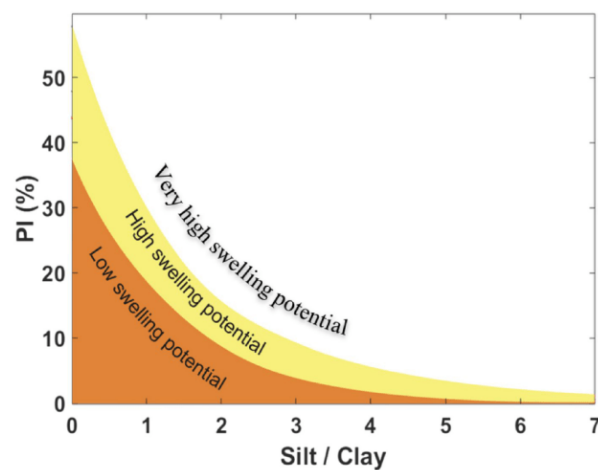
膨潤ポテンシャル	塑性指数 I_p' (%)
低い	0~15
中くらい	15~35
高い	35~55
非常に高い	>55

出典: I Swelling behaviour of expansive soil, Vikram Kumar, Dhirendra Kumar(2011)

表 A.57 収縮限界、線形収縮率による判定(Kumar et al., 2011)

膨潤ポテンシャル	収縮限界 SL (%)	線形収縮率 (%)
低い	>12	0~5
中くらい	10~12	5~8
高い	<10	>8

出典: I Swelling behaviour of expansive soil, Vikram Kumar, Dhirendra Kumar(2011)



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

Guimarães, 2023

図 A.8 シルト／粘土と PI による膨潤度判定

Appendix B 化学的指標による膨潤性土、分散性土の判定

表 B.1 CEC による膨潤性土と分散性土の判定

CEC(%)	膨潤性土判定	分散性土判定
<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

表 B.2 ESP による膨潤性土と分散性土の判定

ESP (%)	膨潤性土判定	分散性土判定
<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

表 B.3 SSA による膨潤性土と分散性土の判定

SSA(m ² /g)	膨潤性土判定	分散性土判定	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ト

出典：JICA 調査団

表 B.4 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

表 B.5 SSA による膨潤性土と分散性土の判定

TP (%)	膨潤性土判定	分散土判定
>1.5	低い	低い
0.5～1.5	中程度	中程度
<0.5	高い	高い

出典: JICA 調査団

Appendix C 各種の試験に関する日、米、英の試験基準

C1 室内土質試験

表 C.1 室内土質試験の試験基準

試験名	日本(JIS/JGS)	ASTM	BS/ISO	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	
ダブルハイドロ試験	-	ASTM D4221	ISO 10930	
自由膨張率試験	-	-	-	IS: 2720(Part40)
圧密試験	-	ASTM D2435	ISO 17892	
膨潤/崩壊試験	-	ASTM D4546	ISO20315	
岩石の吸水膨張試験	JGS 2121	ASTM D5313	-	--
線伸張係数 COLE	-	-	-	US DA, Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey handbook(2024)
膨潤指数 EI	-	ASTM D4829	-	
ピンホール試験	-	ASTM D4647	-	
クラム試験	-	ASTM D6572	-	
単粒子破碎試験	-	-	-	
スレーキング試験	JIGS 2124, 2125	ASTM D4644	-	
Slake Durability Test	-	ASTM D464	BS EN ISO 14689?	

出典: JICA 調査団

C2 現場試験

表 C.2 現場試験の試験基準

試験名	日本 (JIS/JGS)	ASTM	BS/ISO	その他
平板載荷試験支持力	JIS A 1215 JGS 1521	ASTM D1194 (地盤) ASTM D1195 (道路基盤) ASTM D1195 (舗装基盤)	SO 22476-13	
電気式コーン貫入試験 (CPT)	JGS 1431	ASTM D5578	ISO 22476-1	
孔内水平載荷試験	JIS A 1228:	ASTM D4719	ISO 22476-4	
フラットダイラトメータ試験 (DMT)	-	ASTM D6635	ISO 22476-5	

出典: JICA 調査団

C3 化学分析試験

表 C.3 化学分析試験の試験基準

試験名	日本 (JIS/JGS)	ASTM	BS/ISO	その他
全交換性 陽イオン容量 CEC	JGS 0261 (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	ASTM D7503 (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ など)	ISO 11260 (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Al ³⁺ , H ⁺)	USDA Soil Survey Laboratory Methods Manual
水溶性成分含有量 試験	JGS 0241	ASTM D3987 (廃棄物)	(ISO 18772)	
比表面積 SSA	JIS A 1475	STM D3663	ISO 9277	
全リン TP	JIS K 0102	ASTM D4972	ISO 11263	USDA NRCS Soil Survey Laboratory Methods Manua
電気伝導率 E _{Ce}	JGS 0212 (JIS K 0123)	ASTM D1125	ISO 11265	USDA Handbook 60 FAO Irrigation and Drainage Paper 29
pH 試験	JGS 0211	ASTM D4972	BS 1377-T-11 ISO 10390	
水溶性硫酸塩 WS 酸可溶性硫酸塩 AS	JIS K 0102 JIS A 1226:	ASTM C1580 ASTM D4327 ASTM D516	BS 1377-3 ISO 9280 ISO 10304-1	
全硫黄 TS	JIS K 0066 IS K 0102	ASTM D4239 ASTM D2492	ISO 15713 ISO 15178	
総硫酸塩含有量 TRS	JIS K 0102: JIS A 1226	ASTM C114 ASTM D4327 ASTM D516	ISO 11048 ISO 10304 BS 1377-3	
一硫化硫黄 MS	JIS M 8814 JIS K 0102	ASTM D2492	ISO 11048 ISO 15713 ISO 4689-3	
酸滴加試験	JIS A 1229	ASTM D5744 ASTM D8045	ISO 10693 ISO 15175 BS 1377-3:	
気圧法 (Calcimeter Method)	JIS A 1225	ASTM D4373	ISO 10693 ISO 15178 BS 1377-3	
石灰要求度試験	JIS A 1229	ASTM D3155	ISO 14254 BS 1377-3:	

出典: JICA 調査団

C4 特殊試験

表 C.4 特殊試験の試験基準

試験名	日本(JIS/JGS)	ASTM	BS/ISO	その他
X 線回折法(XRD)	JIS Z8828	ASTM D934	ISO 18309	
蛍光 X 線分析(XRF)	JIS Z 8825	ASTM E1621	ISO 13196	
X 線吸収分光法(XAS)	JIS K 0136	ASTM E572	ISO 20807	
示差熱分析法(DTA)	JIS K 7121	ASTM E793	ISO 11357-8 ISO 7111	
示差走査熱量測定 (DSC)	JIS K 7121	ASTM D3418	ISO 11357-1	
熱重量分析(TG)	(JIS K 7120)		ISO 11358-3	
EDS(エネルギー分散型 X 線分光, EDX)	JIS H7806	ASTM E1508	ISO 22309	
走査電子顕微鏡(SEM)	JIS Z2614	ASTM E766 ASTM E1588 ASTM E1588	ISO 16700 ISO 25498	IEC 62523

出典: JICA 調査団

Appendix D 特殊土に関する Q&A

D1 特殊土一般

No.	Q&A	内容
1	Question	特殊土とは何ですか？
	Answer	本ハンドブックでの特殊土は、主に開発途上国の事業等に従事する際の建設工事で遭遇する問題のある土を対象とし、日本で一般的に行われている調査、設計、施工で対応が難しいと考えられるものとしています。
2	Question	特殊土にはどのような種類がありますか？
	Answer	特殊土は、「力学的特性」、「化学的特性」、「その他」の3つの区分に分類でき、多くの種類があります。 力学的特性: 膨潤性土、分散性土、浸食土壌、崩壊性土、破碎性土、可溶性地盤、軟弱地盤 化学的特性: 塩類／ソーダ土壌、(酸性)硫酸塩/硫化土壌、炭酸塩土壌、酸性土壌 その他 : ラテライト、黄土、火山灰性土、珊瑚土壌と珊瑚骨材、雲母を多く含む砂、氷河堆積土(氷積土)、風化岩/軟岩、乾燥土壌
3	Question	特殊土はどのように判定されますか？
	Answer	特殊土の判定は、主に ASTM などの試験基準および研究者らによって提案された判定方法にもとづき実施されます。詳細は、ハンドブックをご参照ください。特殊土によっては、分散性土など現場で簡単に判定できる方法もあります。
4	Question	特殊土にはガイドラインや基準などありますか？
	Answer	ガイドラインや基準などが整備されている国もありますが、整備されていない国の方が多いです。また、整備されていても、設計・施工法が確立されていないため、記載内容が十分でないものも確認されます。

D2 膨潤性土

No.	Q&A	内容
1	Question	膨潤性土とは何ですか？
	Answer	膨潤性土は、特徴的な膨潤・収縮性を有する土のことで、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、建設物に大きなクラックを発生させることがあり、世界中で大きな問題になっています。
2	Question	膨潤性土はどの地域に分布していますか？
	Answer	膨潤性土が分布する国は、米国(テキサス州、カリフォルニア州)、アジア(タイ・カンボジア・インドネシア)、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(ナイジェリア中部および北部地域、スーダンナイル川流域、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)などがあります。
3	Question	膨潤性土の判定方法は？
	Answer	膨潤性土の判定方法は、物理特性による判定、粘土鉱物による判定、化学的分析による判定、力学試験による判定があります。物理特性による判定は、液性限界・塑性指数・自由膨張率により判定する事例が多いです。粘土鉱物による判定は、X線回折法(XRD)、示差熱分析法(DTA)、電子顕微鏡法などがあります。化学的分析による方法としては、陽イオン交換容量(CEC)、比表面積(SSA)、全カリウム(TP)があります。力学試験による判定としては、膨潤度を測定するための圧密試験(ASTM D4546)があります。膨潤性土の判定には、圧密試験を実施することが最も効果的ですが、物理特定による判定や粘土鉱物や化学的分析による試験を組み合わせる行うことでも判定結果の信頼性が向上します。
4	Question	膨潤性土が建設事業に及ぼす影響は？
	Answer	膨潤性土が建設事業に及ぼす影響として、住宅等の建築物の変状・クラック、道路表面の変状・舗装の損傷、盛土の変状・のり面の崩壊、切土斜面の表層崩壊・すべり破壊、水路の法面部の崩壊とそれに伴う護岸の損傷、擁壁や埋設構造物壁面の損傷・崩壊、トンネルのライニング・舗装の損傷・崩壊等が挙げられます。
5	Question	膨潤性土による被害を防ぐ方法は？
	Answer	建設中・建設後の膨潤性土の挙動によるリスクを最小限とするため、サーチャージ、置換工法、化学処理・熱処理による改良、水分・締固め度のコントロールなど、種々の原理に基づく工法などより、適切な対策方法を選定します。対策工法を選定にあたっては対象国または各国の関連基準、既往文献や対象地区における事例などを参照し、対象地に適した対策工法を選定する必要があります。
6	Question	地盤調査を実施するにあたっての留意点は何ですか？
	Answer	膨潤性土エリアに構造物を建設する場合には、周辺で得られた地盤情報を使用すると膨潤性土の特性が考慮されず、危険側に評価されてしまう可能性があるため、特定の構造物の場所で詳細な調査を実施する必要があります。
7	Question	土壌に粘土の白い筋が確認されたのですが、これはベントナイトですか？
	Answer	粘土の白い筋はカルシウムの沈殿物であり、ベントナイトではありません。土壌が湿るとカ

No.	Q&A	内容
		ルシウム分が多く含まれているため、過度の沈下は引き起こされる可能性はありますが、膨張は引き起こされません。
8	Question	膨潤性土により、構造物が隆起してしまった。数年後には隆起が安定しますか？
	Answer	安定しません。隆起後に基礎地盤の土壌水分を除去する基本的な方法はなく、構造物の動きは継続します。ただし、その大きさは変化する可能性があります。
9	Question	基礎直下の膨潤性土は、水源が除去されるか長時間乾燥すると沈下すると聞いたのですが。
	Answer	構造物の下での水分含有量は、熱ダクトや炉のすぐ下の領域を除いて、ほとんど減少しません。湿ると、土壌は隆起します。土壌が最大膨張ポテンシャルに達すると、水分は土壌のより乾燥した部分に移動し、隆起が続きます。
10	Question	化学的安定化処理によりすべての膨潤性土の問題を解決できますか？
	Answer	解決できません。化学的安定化処理に関する技術は初期段階にあり、普及化するためには、特に現場適用に関する広範な研究が必要です。
11	Question	建築物が高台にある場合、膨潤性土の問題は発生しませんか？
	Answer	高台であっても、高水位により膨張を引き起こす可能性があるため、問題が発生する可能性があります。
12	Question	建設前に膨潤性土に水たまりを作ると、隆起の問題を解決できますか？
	Answer	解決できません。水たまりは、浅い深度の地表下の土壌にのみ影響を及ぼしますが、建物が完成すると、深層にある膨潤性土が膨張する危険があります。
13	Question	表面排水を適切に行えば、基礎が動くリスクは軽減されますか？
	Answer	軽減されますが、それだけでは隆起やひび割れを防ぐのに十分ではなく、適切な構造設計や適切な建設技術などの他の要素も同様に重要です。
14	Question	建物の周囲の地表全体を舗装すると、膨張の問題を制御可能でしょうか？
	Answer	可能です。建物の周囲を広範囲に舗装すると、地表水が基礎地盤に浸透するのを効果的に抑制できます。膨潤性土地域のガソリンスタンドの亀裂に関する報告が驚くほど少ないのは、このためです。
15	Question	床スラブの下に砂と砂利を置くと、粘土が膨張したときに流れ込むことができる空間が提供され、膨張する粘土の揚力圧力が軽減されるというのは本当ですか。
	Answer	膨張する粘土は、絡み合った砂利粒子に揚力圧力をかけ、床を隆起させる可能性があるため、誤りです。
16	Question	膨潤性土地域では、可能な限り埋設物を避けるべきというのは本当ですか？
	Answer	本当です。膨潤性土は、水道管や下水道管をせん断し、漏水を引き起こす可能性があります。最初の小さな漏水がさらに膨張を引き起こし、より大きな漏水を引き起こし、深刻な損傷につながります。

D3 分散性土

No.	Q&A	内容
1	Question	分散性土とは何ですか？
	Answer	分散性土は、水に触れると粘土粒子が水に溶けだし、水中に浮遊する土のことで、内部侵食の進行による崩壊や、小規模な表面侵食から大きな損傷に拡大するなど、構造上の大きな損傷を引き起こすため、問題になっています。
2	Question	分散性土はどの地域に分布していますか？
	Answer	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)、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、ベトナムなどがあります。
3	Question	分散性土の判定方法は？
	Answer	分散性粘土を判定する試験方法は4つの試験があります。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、複数試験の併用が望ましいです。最小限でもダブルハイドロメーター試験とクラム試験は実施が推奨されます。判定までの流れとしては、クラム試験は分散性の「1次判定」として使用し、その後、ダブルハイドロメーター試験を実施し、判定結果を再評価することが望ましいです。 ・クラム(Crumb)試験 ・ダブルハイドロメーター試験 ・ピンホール試験 ・化学分析
4	Question	分散性土が建設に及ぼす影響は？
	Answer	分散性土は視覚的に分類、あるいはアッターベルグ限界や粒度等の物理特性より、通常の侵食に耐性のある粘土と区別することが簡単ではありません。 また、分散性土による内部侵食は早期発見が難しいため、クラックや陥没などの発生から急速に崩壊に至る可能性があります。
5	Question	分散性土による被害を防ぐ方法・対策は？
	Answer	必要な範囲や規模によりますが、分散性土の撤去、置換工法の適用、分散性土自体の使用の回避が、まず確実かつ効果の高い対策と考えられます。 分散性土による被害はほとんどの場合、亀裂や開口部などからの水の供給によって引き起こされるため、適切なフィルター材の設置、コンクリート等による法面保護、遮水シートの設置なども挙げられます。また、分散性土の分散性を抑制する方法として、化学的安定処理による対策も挙げられます。

No.	Q&A	内容
6	Question	分散性土に関する国際的設計基準や統一規格はありますか？
	Answer	ありません。
7	Question	分散性土と崩壊性土はどのような違いがありますか？
	Answer	分散性土は、静水中でも化学的に粘土粒子が溶け出して浮遊・拡散しますので、単に流される・碎ける現象とは異なります。崩壊性土は、主に乾燥地域に分布し、粒子の結合力が弱く雨水などで物理的に流されます。
8	Question	クラム試験とは何ですか？
	Answer	試験方法は、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す。4 段階で分散性を判定します。(ASTM D65)
9	Question	ダブルハイドロメーター試験とは何ですか？
	Answer	試験方法は、粒度試験で沈降分析する時に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(分散度 DR(%))を求めて分散土を求めるものです。DR<15 で非分散、50<DR で分散性高いという評価になります。(ASTM D4221)
10	Question	ピンホール試験とは何ですか？
	Answer	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 direct 試験です。直径 30～38mm、長さ 38mm の供試体を作成し、供試体に 1mm の穴を開け、50mm、180mm、380mm および 1020 mm の水頭で蒸留水を穴に通水し、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試験方法です。(ASTM D4647)

D4 ラテライト

No.	Q&A	内容
1	Question	ラテライトとは何ですか？
	Answer	ラテライトは鉄とアルミニウムが豊富な土壌で、酸化鉄の含有量が高く、錆びた赤色を呈し、一般的に高温多湿な熱帯地域で形成される残積土ですが、ラテライトの定義は必ずしも明確ではありません。堆積状況は比較的堅硬な岩塊状を呈するものから、粒状、軟質な細粒状を呈するものがあり、密度や空隙率等の特性のばらつきも大きいです。
2	Question	ラテライトはどの地域に分布していますか？
	Answer	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ります。
3	Question	ラテライトは良質材ですか？
	Answer	従来、ラテライトは良質な盛土材として活用されているケースが多いですが、採取した材料の粒度、液塑性、含水比、締固め特性、力学特性のばらつきが大きく、また材料の調整方法によって試験値が変化することが判明しており、その取扱いに注意が必要な土です。
4	Question	ラテライトを使用するにあたっての留意点は？
	Answer	良質な盛土材料として道路の路体や路盤などに広く活用されていますが、ラテライトの土質特性のばらつきや、その評価方法が確立していないことに起因した可能性のある道路の損傷事例が多く確認されており、ラテライト地盤の評価、材料としての適性等を把握することが重要となります。
5	Question	ラテライトの判定方法は？
	Answer	すべてのラテライト土に共通する評価基準は確立されていない状況です。 各国において、特に道路工学(舗装・路盤・下層路盤)における材料として、CBR、PI、吸水率、摩耗率、線収縮率などを指標として、評価をしている状況です。
6	Question	ラテライトは特殊土ですか？
	Answer	ラテライトの材料特性は、現状では一般的な土質試験(物理・力学)によって評価されますが、ラテライトは試験材料の前処理や手順によって粒度分布や塑性指数などの物理特性が変化することがあり、締固め特性や CBR などの力学特性も含めてラテライトを正しく評価する詳細な方法は必ずしも確立していない状況にあります。このため、調査・試験にあたっては専門家の知見も活用し、慎重に計画・実施し、適切な判断を行う必要がある土となります。

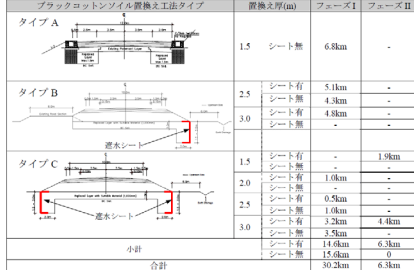
D5 崩壊性土

No.	Q&A	内容
1	Question	崩壊性土とは何ですか？
	Answer	崩壊性土は水分の侵入や荷重増加の外的要因によって土粒子が形成している構造が崩れ、地層の急激な変状や堆積変化をもたらす崩壊性を特徴とする特殊土です。崩壊性土は主に黄土(Loess)、砂質ローム、火山灰由来土、洪積層由来土などがあります。
2	Question	崩壊性土はどの地域に分布していますか？
	Answer	代表的な崩壊性土である黄土は、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)などがあります。
3	Question	崩壊性土の判定方法は？
	Answer	崩壊性土を判定する方法は、室内試験、主に乾燥状態と湿潤状態における圧密試験機を用いた試験や載荷試験、また現場試験、平板載荷試験やコーン貫入試験などにより崩壊性を評価することが行われていますが、試験方法・評価基準は確立しておらず、研究者や地域によって異なるのが実情です。
4	Question	崩壊性土が建設に及ぼす影響は？
	Answer	事例として、大規模な地滑りの発生、住宅等の建築物の変状・クラック、道路表面の大規模なクラックや沈下と舗装の損傷、盛土の沈下や盛土・切土に係るのり面の崩壊などが挙げられます。これらの問題は、建設による地形改変、豪雨などによる表流水・地下水の変動や車両等による動的荷重や地震荷重、それらの組み合わせによって、予期しない時期に発生、表面化します。
5	Question	崩壊性土による被害を防ぐ方法は？
	Answer	崩壊性土地盤の沈下やすべり破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、対象とする構造物の影響範囲の排水のコントロールに十分な留意が必要となります。 対策工としては置換工法、水の侵入のコントロール、動的締固め・バイブロフローテーションなどの密度増加に係る地盤改良、セメント等固化材による地盤改良工法などが挙げられますが、崩壊性土の確立された対策は無く、崩壊性土の分布地域で種々の対策が実施されているのが実情です。

D6 特殊土分布図

No.	Q&A	内容
1	Question	本ハンドブック付録の特殊土分布図の精度はどのくらいですか？また、使用するにあたっての留意点は？
	Answer	本ハンドブック付録の特殊土分布図は、HWSD をベースに、対象の特殊土の世界分布図の情報を反映させて作成しています。一部の特殊土は国の分布図の情報も含まれていますが、建設事業を開始する際の基本情報として認知してもらうことを目的としており、計画・設計・施工に直接活かせるような精度は持っていません。本分布図を参考に、各建設事業において調査段階で現地踏査・土質調査・室内試験等により独自の分布図を作成し、計画・設計・施工・維持管理の各段階で分布図を更新していくことが重要です。

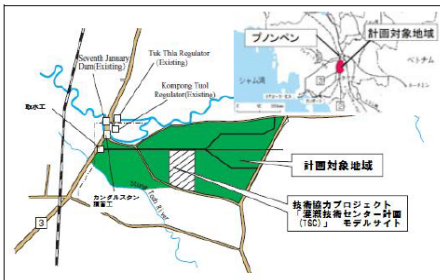
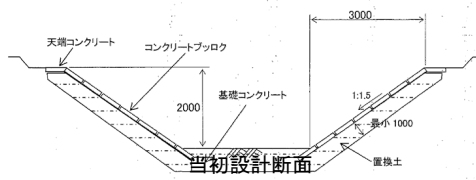
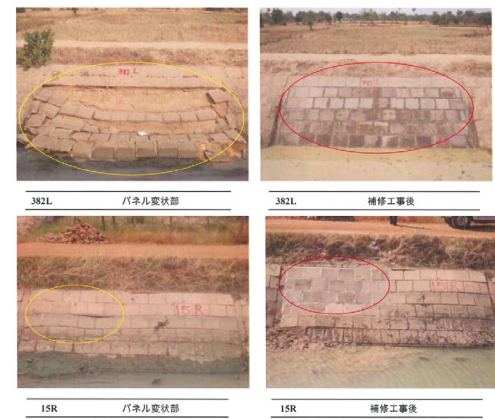
Appendix E 特殊土に関する事例集

対象土	ブラックコットンソイル(膨潤性土)		
対象国	エチオピア国		
JICA無償資金協力			
案件名	第四次幹線道路改修計画 The Project for Rehabilitation of Trunk Road, Phase IV		
被害分類	路面破損(2014年に確認)	事業完成	2014年3月(第1期)2016年2月(第2期)
案件概要			
■エチオピアの首都アディスアベバから隣国スーダンに至る国道3号線の劣化区間であるアムハラ州デジェン〜デブレマルコス間の舗装整備や橋梁の改修を行うことにより、国際物流路線の機能強化及び地域住民の医療・教育施設や食料へのアクセス機能の向上を図り、もって農業開発と工業化の両方の実現のための下支えとなる経済・社会インフラ開発に寄与することを目的として実施された。 第1期:デジェン〜ルマメ 29.0km 第2期:ルマメ〜デブレマルコス 39.9km		 事業位置図  ブラックコットンソイルの影響を一因とする路面の段差 出典:2018年度外部事後評価報告書	
設計段階の対策		特殊土による被害と補修状況	
■設計段階の対策: ・良質な材料への置換え ・低地域など排水性が悪いと予想される地域での遮水シート併用 ・冠水対策に盛土構造  出典:エチオピア国第四次幹線道路改修計画準備調査報告書		■エチオピアには、膨潤性土の一種であるブラックコットンソイルが多く分布しております。ブラックコットンソイルは含水量の変化による膨張と収縮の差が著しい。 ■特にブラックコットンソイルの影響を受けやすい区間であるイェットノラ付近で、2014年末に約600mにわたって路面損傷(クラック、段差)が確認された。 ■瑕疵検査前の2015年5月に施工業者がオーバーレイ(パッチング)工法による補修。 ■2018年の事後評価で同箇所ブラックコットンソイルによる路面の損傷(変形、亀裂、陥没)が再確認された。路面の損傷を起因とする事故は発生していないが、利用者からは走行の快適性に支障が指摘されている。	
問題への対応および今後の課題			
■現地政府は、2018年12月から2019年5月にかけて、路面損傷の原因を調査した。調査結果によると、損傷の主な要因は以下である。 ・湿気による路床の軟化 ・排水路の詰まり ・粗悪な建設資材の使用 ・ボックスカルバートと舗装の間の差動運動 舗装の早期破損は、膨張土の膨潤効果による路床の沈下が主な原因である可能性が高い。膨張土と呼ばれるブラックコットンソイルは、含水することで膨張し軟弱化する。そのような問題土が路床に存在すると、支持力を失い交通荷重に耐えられなくなる。 ■現地政府は改修計画を進めており、従来のマーシャル試験に基づく配合設計法によるアスファルト舗装を採用する。 ■改修後も長期的に道路性能を維持するためには、下記の課題が考えられる。 ・ブラックコットンソイルへの適切な対策のさらなる検討 ・施工品質の向上と適切な材料選定 ・継続的なモニタリングと維持管理体制の強化		わだち掘れの発生  亀甲クラックと簡易な補修(現地政府)  わだち掘れと亀甲クラックの発生  現地政府による補修状況(破損部分の撤去)  出典:アフリカエチオピア、ガーナ、タンザニア) 資金協力事業による道路整備計画のあり方(基礎研究)の改訂ファイナルレポート	

適用土壌	ブラックコットンソイル(膨潤性土)
対象国	エチオピア国
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)	
案件名	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 The Project for Development and Operation Model of Plant-derived Soil Additives for Road Disaster Reduction on Problematic Soil
期間	2019年4月～2024年3月
概要	
■背景 ・サブサハラアフリカでは道路網の拡張が経済発展や福祉・教育の向上に寄与する一方、広範囲に分布するブラックコットンソイル(膨張性粘性土)が道路の施工や維持管理上の大きな課題となっている。 ・膨張性粘性土は、水分を吸収すると体積が膨張し、乾燥すると収縮する特性を持ち、雨季には地盤の泥濘化・沈下、乾季には固化・隆起を引き起こす。このため、従来は路体表面から深さ方向1～2mを良質土に置換する対策がとられてきたが、良質土の確保が難しくなっており、特殊土そのものを改良して地盤材料として有効利用する必要性が高まっている。 ■目標: 在来植物由来の土質改質材を開発し、地産地消型の特殊土対策運用モデルを構築することを目指す。 ・研究題目1: セルロース系土質改良材による特殊土の改良メカニズムの解明(基礎研究) ・研究題目2: 在来植物からのセルロース系土質改良材の生産技術の開発(応用研究) ・研究題目3: 地方での道路災害低減に向けた特殊土対策工の運用モデル構築(社会実装) ※同研究プロジェクトWEBサイトより一部抜粋	
現時点(2025年4月)公開されている成果	
■研究題目1: セルロース系土質改良材による特殊土の改良メカニズムの解明(基礎研究) ・セルドロンや植物由来の粉体(エンセーテ、セルドロン、サトウキビバガスなど)をブラックコットンソイルに混合し、従来の配合と新たにマニュアル化を意識した配合で一軸圧縮試験・CBR試験を実施した。 ・単体利用ではエチオピア道路公社の道路設計指針に定めるCBR 3の基準達成に限界があり、石灰との併用が必要と考えられる。 ・ブラックコットンソイルとの混合層が難透水層となり、地中部の含水比変動を抑制できる可能性がある。 ・本研究が対象とする小規模道路の路床や路盤の設計時には、過大な指標となる可能性がある。 ■研究題目2: 在来植物からのセルロース系土質改良材の生産技術の開発(応用研究) ・アディスアベバ科学技術大学(AASTU)では粉碎機の安定運用が確立し、効率的な粉体化体制が整備された。ジンカ大学でも導入後、トラブル対策により運用が安定化しつつある。大型資源はチップング工程を加えた処理フローの確立を進めている。 ・粉体化植物資源の吸水試験では、サトウキビバガスが実用性に優れ、改良材として有望と判断。 ・エチオピア・日本双方で力学試験も実施し、植物粉体混合によるブラックコットンソイル改良効果を検証中。 ■研究題目3: 地方での道路災害低減に向けた特殊土対策工の運用モデル構築(社会実装) ・南オモ県における道路災害発生状況と現行対策の把握: 衛星画像を活用した基本地図作成、住民収集情報に基づく防災地図作成。 ・土質改良材による特殊土地盤上道路整備工の開発: ジンカ大学ではブラックコットンソイルを対象に、セルロース系改良材(植物由来の粉体や古紙シュレッターくずの粉体:FSP)を用いた実物大走行実験を実施し、改良効果を検証。 ・特殊土対策工の運用モデルと道路維持管理体制の構築: 現地に適した特殊土対策工法の導入可能性を検証と、人力施工を前提とした簡便な施工方法の適用性についても考慮。 ※2023年度実施報告書公開版より一部抜粋	
2024年10月エチオピア現地調査時に訪問されたアディスアベバ科学技術大学(エチオピア側研究者)	
    アディスアベバ科学技術大学試験室 使用されている土質改良材 出典: JICA調査団	

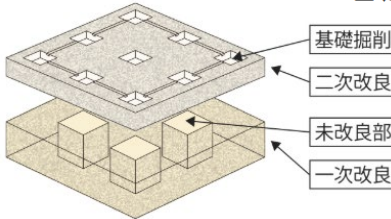
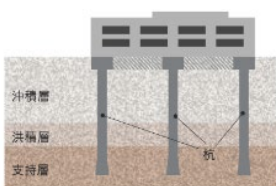
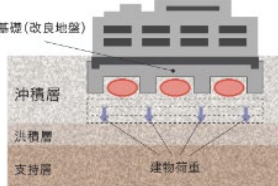
対象土	膨潤性土
対象国	インドネシア国
特殊土による被害	
	
膨潤性土に水路が押されて変形	対策の支え梁が壁を貫通
	
膨潤性土によるすべり崩壊地	すべりにより壁が移動
■対策 ・試験結果に基づく護岸法面保護工設計における土質定数の適切な設定 ・護岸法面保護工の構造・施工方法の見直し ・既存護岸のすべり発生箇所に対する対処方法の検討 ・取水工改修工事における設計・施工上の対応策	

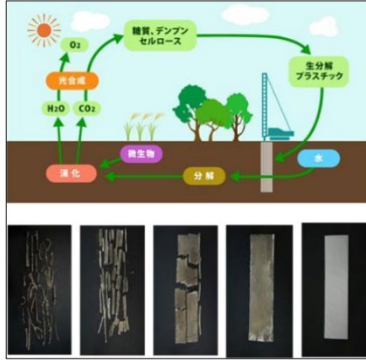
対象土	分散性土(ドラゴンホール)		
対象国	カンボジア国		
JICA無償資金協力			
案件名	国道6号・7号線修復計画 The Project for Rehabilitation of the National Roads Route 6 and 7		
被害分類	路面破損(2004年に確認)	事業完成	1998年6月
案件概要		設計段階の対策及び特殊土による被害	
■カンボジアの国道6A号線、6号線、7号線は、同国の最重要路線の一つに位置付けられている主要幹線道路である。国道6・7号線のスノルケン～コンボンチャム間における道路改修などを実施し、農産物の産地として重要な同国東北地方と首都を結ぶ交通輸送状況の改善を図り、同国の社会・経済活動の安定化に寄与した。 ・既存道路の拡幅・リハビリ ・6号線及び7号線の一部の緊急リハビリ工事 ・6号線(スノルケン～スクーン) 約29km ・7号線(スクーン～コンボンチャム) 約45km ・既存橋梁の架替え10橋、新設洪水対策用橋梁3橋 ■設計段階の対策:分散性土対策として、のり面を保護するための粘性土張付工を採用した。		■分散性土を含む盛土材、法面材を使用した場合、水分の浸入により土が水に溶解し、ガリ浸食、崩壊や「ドラゴンホール」、またはトンネル侵食やシンクホール」と呼ばれる穿孔と陥没が発生するものであり、日本国内では見かけないものである。 分散性土を原因とするドラゴンホール(路肩) 分散性土を原因とするドラゴンホール(盛土) 出典: アフリカ(エチオピア、ガーナ、タンザニア) 資金協力事業による道路整備計画のあり方(基礎研究)の改訂ファイナルレポート	
ドラゴンホールとは			
■ドラゴンホールは盛土に発生する縦方向の穴であり、直径20～50cm程度が多い。盛土上面や斜面に鉛直方向に形成され、斜面下部の横方向の穴と繋がっていると考えられる。道路では、降雨浸透水による侵食で空洞(水道)ができ、当地では「ドラゴンホール」と呼ぶ。 ■原因と発生メカニズム ・盛土施工者に関係なく発生することから、盛土材料中の分散性土が主な原因と考えられる。分散性土により横穴が生じ、縦クラックに沿ってパイピングが進行し、縦穴が形成される。被害として表面侵食や垂直・垂直に近いトンネル侵食(ドラゴンホール)が発生する。 ・ドラゴンホールは文献上「jugs」とも呼ばれ、道路や灌漑水路脇の小さな開口部から発生し、深さ3m、底径約1mに達することがある。初期開口部は25mm未満の場合が多い。拡大すると崩壊・陥没を引き起こし、修理せず放置すると道路陥没や堤防破壊を招く。植生があっても分散性粘土では侵食防止は困難である。		■特徴 ・カンボジア国内の平野部の道路盛土で広く発生。 ・道路盛土だけでなく、堤防堤体や畦にも多く発生。 ・雨季に浸水した堤体で発生し、山岳部では見られない。 ・設計・施工・管理者に関わらず普遍的に発生。 ・ラオス国でも多く確認される。 出典: JICA調査団 2024年7月カンボジア現地調査時に確認されたドラゴンホール	
問題への対応			
■2009年のJICA技術協力案件「建設の品質管理強化プロジェクト」による現地で分散性土対策の試験工事を実施し、現地技術者が簡易に分散性土を見分けることができる簡易分散性試験、及び添加剤による改良等の対策工が提案された。 ■分散性土はカルシウムイオンを含むセメントや石灰を混合することで、水に対して安定すると言われている。現地の技術者が簡易に分散性土を見分ける事が可能なASTMによる分散性判定試験(クラム試験)を採用し、原法面土および添加材(セメント等)混合土の室内簡易分散性試験、および室内試験の結果を基に既存道路法面改良の試験工事を検討した。セメント混合の価格、良質土を調達した場合の費用、混合方法等を総合的に検討することにより、経済性及び品質を確保した工事の実施が可能となる。 ■提案対策 ・施工前に対象土の簡易分散性試験を実施し、分散性の有無、程度を確認する。 ・良質土の調達及びセメントの添加による改良とのコスト比較をする。		■改良効果の高い施工条件は、以下の通り。 ・添加材:セメント ・混合率:2.5%以上 ・混合時間:3.3 分/m³ (混合機械:バックホー 0.4-0.6 m³ 使用の場合) a: 無、b: 小、c: 中、d: 大 分散性の程度の判定基準 10分後 出典: JICA調査団 2024年7月カンボジア現地調査時に実施した簡易分散性試験	

対象土	分散性土(置換工に膨潤性土)		
対象国	カンボジア国		
JICA無償資金協力			
案件名	カンダルスタン灌漑施設改修計画 The Project for the Rehabilitation of the Kandal Stung Irrigation System		
被害分類	コンクリートライニング変状(2010年に確認)	事業完成	2007年8月
案件概要			
■カンボジアでは稲作を中心とする農業が主要産業であるが、全国の水田で灌漑施設が整備されているのは約18%に過ぎず、損傷・老朽化や構造上の欠陥により十分な機能を果たしていない。このため農業生産性は低く、農村部の貧困の一因となっていた。本案件では、首都プノンペン近郊のカンダル州カンダルスタン地区において、既存灌漑施設(取水施設、灌漑水路、維持管理道路)の改修・改良を実施し、作付面積、単位収量、農業収入の目標をほぼ達成することで農業生産性の向上に貢献した。		 出典:カンダルスタン灌漑施設改善計画 事後外部評価	
設計段階の対策		特殊土による被害と補修状況	
■現地土は分散性土で流水・雨水による浸食抵抗能力が極めて弱いため、水路横断面において粘性土で現地土を被覆して、水路内の水と分散性の土を遮断する。 ・被覆に使用する粘性土が流水・雨水等により浸食防止のため、水路内はコンクリートブロックライニング、その他は張芝による植生工により法面を保護する。大部分が掘込み水路であり漏水も少ないため、揚圧力の減圧対策とコスト削減を目的に、斜面のみを対象とした二面ブロックライニングの開水路タイプを採用する。 ・地山には分散性土がある可能性が高いため、置換土は非分散性の土を用いる設計とした。  出典:カンボジア国 カンダルスタン灌漑施設改修計画 基本設計調査報告書		 2010年10月20日大雨後の被害状況  大雨後に実施された緊急補修	
原因分析と問題への対応			
■変状の原因分析結果 ・上流部:置換土に使用した材料が粘土鉱物スメクタイトを含む膨潤性土であったため、コンクリートパネルが芋み出す変状が生じた。 ・下流部:置換土に使用した材料の一部にスメクタイトを微量に含む分散性土が混入したため、部分的にコンクリートパネルが崩壊した。下流部置換土の分布は上流部置換土の様に様な分布ではなく、分散性土と非分散性土が混在している。 ■改修工事 購入砂に配合材として普通ポルトランドセメントを50kg/m3の割合で混入させた改良土を用い、コンクリートパネル背面の地盤改良を行う工法を採用した。  出典:JICA調査団		 補修工事後の状況 出典:カンボジア国カンダルスタン灌漑計画 コンクリートライニング変状対策計画最終報告書	
2024年7月カンボジア現地調査時の現地状況			

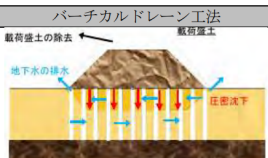
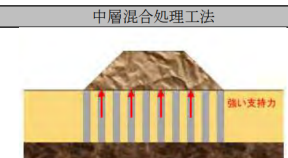
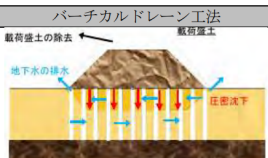
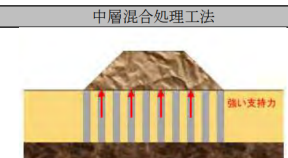
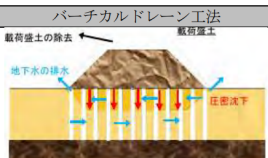
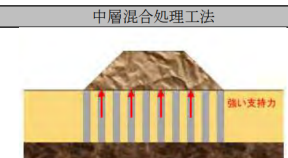
対象土	ラテライト		
対象国	ラオス国		
JICA無償資金協力			
案件名	国道9号線改修計画 The Project for Improvement of the National Road Route 9		
被害分類	構造破損(2012年に確認)	事業完成	2001年3月(第1期)2002年12月(第2期)
案件概要		設計段階の対策	
■ラオスの中南部を横断する国道9号線は、内陸国ラオスにとって海へのアクセスを確保する重要な幹線道路であるとともに、インドシナ半島の横貫道、東西経済回廊として、国際的に重要な役割を担っています。セノ〜ムアンバラン区間(73キロメートル)の一部約53キロメートルを対象に、道路や橋梁の改修・整備が実施された。 ■設計段階の対策:セメント安定処理のセメント混入率は3%		■基本設計の舗装構造 ・表層構造 過積載重量車をかなりみかけること、降水の路盤への浸透を防止することを考慮して、アスファルト・コンクリート(AC)タイプの表層を採用する。 ・上層路盤と下層路盤 現地採取の資材を最大限利用するために、下層路盤はセメント安定処理路盤とし、上層路盤には粒度調整砕石を用いる。さらに層背安定処理路盤(BTB)を粒度調整砕石路盤の上に施工し、工事に伴う粉塵の発生をおさえる。 出典:基本設計調査報告書	
原因分析と問題への対応			
路面に発生したクラック  粘土化したセメント安定処理層 		原因確認のための掘削  2012 M. Furuki 対象路線を通過する過積載車両  (株) 大林組神村氏提供	
		■想定される破損原因 過積載車両及びセメント安定処理層の劣化が原因であり、亀甲クラック状の損傷は極めて頻繁に発生する。セメント安定処理された既存の下層路盤の強度が、想定以上に小さいという問題が発生した。 ■問題への対応 損傷の著しいセノ〜ムアンバンの舗装構造の強化、さらに排水設備を充実した道路構造への改修を「国道九号線(メコン地域東西経済回廊)整備計画」として改めて実施した。 ■改修内容 舗装方式として、既存工区の舗装仕様および他改修道路の舗装仕様を勘案してアスファルトコンクリート舗装を採用し、また、コスト縮減及び環境配慮の観点から路盤材料として既存道路路面の再活用を可能とする路上再生路盤工法を一部区間において採用することとした。	
出典:アフリカ(エチオピア、ガーナ、タンザニア)資金協力事業による道路整備計画のあり方(基礎研究)の改訂ファイナルレポート			

対象土	ラテライト
対象国	ガーナ国・ギニア国
JICA無償資金協力	
案件名	ガーナ国第二次国道八号線改修計画 The Project for Rehabilitation of National Trunk Road N8 (Phase 2)
案件名	ギニア国国道三号線スンバ橋架け替え計画 Projet de Reconstruction du pont Soumba sur la Route Nationale N° 3
対策	
・盛土材料としてラテライトを適用。 ・盛土のり面保護には種子吹付工法を採用。 ・ラテライトは、盛土材料として施工性や良好な支持力を確保できる一方で、のり面保護における植生が定着しにくいという課題があったため、試験施工を実施し、適正な種子や散布方法を選定。 ・降雨の影響により施工表面がぬかるんだり、のり面がガレやすいという課題に対しては、施工時に主にのり面部の保護と、雨季施工における配慮が必要。 【ガーナ】雨季を避けた時期に施工を実施し、施工中の降雨リスクを低減。 【ギニア】雨季中の施工となったが、のり面の浸食防止対策を講じ、施工品質を確保。 ・完成後もラテライトに起因する不具合の有無についてモニタリングを継続し、問題の早期発見と対応を図る。	
※案件を実施したコンサルタントからのヒアリング内容を踏まえ、JICA調査団により取りまとめた。	

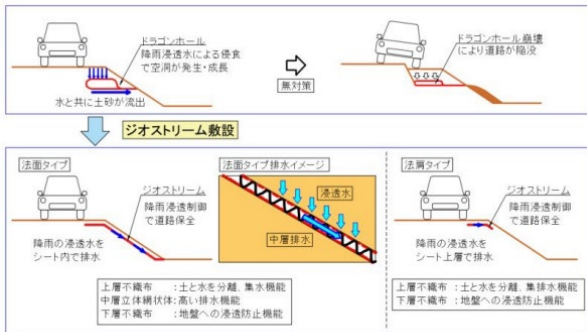
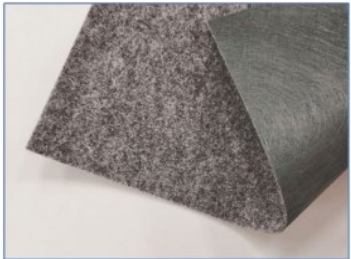
工法名	TNF工法(地盤改良型直接基礎構造)		企業名	株式会社タケウチ建設(広島県三原市)	
対象国	ベトナム国				
適用土壌	軟弱地盤				
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業					
案件名	軟弱地盤地域におけるTNF工法(地盤改良型直接基礎構造)普及に向けた案件化調査				
期間	2015年7月～2016年6月				
工法概要					
■TNF(Tender Net Foundation)工法は、基礎・地盤改良層・スラブを一体化し、建物の荷重を基礎だけでなくスラブ全体から支持地盤に伝える杭を使わない基礎工法である。井桁状の地盤改良により建物直下を面で支え、周辺地盤との沈下差を抑制。地盤沈下による杭の抜け上がりがないため、地中やスラブ下の設備配管の破断も防止できる。 ■特徴 ・コスト:建物から近い表層の地盤を改良し支持層とすることで、杭を使用しないローコストな基礎を実現。施工条件により削減率は異なるが、6,000㎡の事例ではコンクリート杭と比べ約40%削減可能。 ・工期:6,000㎡の事例ではコンクリート杭の基礎と比較し、約40%の工期短縮が可能。 ・環境:一般の地盤改良工法で行われる土の入れ替えが不要で、川砂調達や建設残土処理の負担を軽減し、環境負荷を低減。 Tender = やさしい Net = 格子状 Foundation = 基礎  TNF工法施工イメージ 同社ホームページより一部抜粋					
目的と主な成果					
■目的 規模の建物基礎に対する Tender Net Foundation(TNF)工法の普及に必要な調査を行うものである。ベトナム政府から同工法の工法認可を取得するためのプロセスや、認可取得に必要な調査項目を整理・確認するとともに、現地の土質や混合材への適応性について工学的検証(セメント混合土強度発現試験)を行う他、現地政府関係者を対象に本邦受入活動により同工法の認知・拡大を図る。加えて、同工法をベトナムで広く普及することを想定した、公共需要及び民間需要を調査する。 ■主な成果 ・一次改良(基礎下改良)を井桁状に改良することで、地中応力が分散され、改良体の剛性と相乗し沈下が均等化されることで不同沈下を抑制できる。また、井桁状の凹部分で現状地盤を抱え込む力が働き、改良体を安定したものにさせることができる。			従来型工法  基礎(支持杭) TNF工法  基礎(TNF地盤改良) TNF工法概略図 同社ホームページより一部抜粋		
現在の状況及び今後の課題					
■現在の状況 ・本案件化調査を通じて、SATI はTNF工法の技術的優位性やベトナム地盤への適応性を確認し、同国の持続的な開発に有効な技術であると認識している。本調査が普及・実証事業へ進むことを期待している。(2025/3時点、継続案件(「普及・実証・ビジネス化実証事業」)なし) ■今後の課題 ・建設業・設計業に関する関連法規・許認可の変更 ・政策による税務・税制の変更 ・社員のコンプライアンス意識の低下による技術の流出  JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋			■ベトナムの軟弱地盤対策における問題点 ・ベトナムでは軟弱地盤対策として、木杭が古くから採用されてきたが、経験則に基づいた工法であることに加えて耐久性に問題があり、現在の建物被害の主な要因となっている。 ・近年はコンクリート杭基礎が一般的だが、地質調査や設計での確認が不十分な場合、期待した性能を発揮できないことがある。特に対象建物が平面的に広い場合や、建物が点にしている場合は、その箇所に応じた十分な調査が必要であり、コストをかけても効果が得られない場合がある。 ・基礎による沈下しない基礎でも抜け上がり(周辺の地盤だけが沈下し、建造物が浮き上がる現象)の問題が残る。砂置換工法では残土の処理や河川環境への影響も課題となる。 ・民間事業では、新技術の活用が進む一方、公共事業では予算の制約から新技術の導入が難しい。		

工法名	エコジオドレーンSPD工法	企業名	チカミルテック株式会社(高知県高知市)
対象国	インドネシア国		
適用土壌	軟弱地盤		
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業			
案件名	軟弱地盤改良エコジオドレーンSPD工法の活用に係る案件化調査		
期間	2022年2月～2023年2月		
工法概要			
■ジオドレーンSPD(Suction Plastic Board Drain)工法とは、軟弱地盤中にプラスチックドレーン材を鉛直方向に打設し、水平ドレーンと組合せ対象範囲を遮水シートで密閉し、真空ポンプによって強制的に排水を促進する工法である。この工法により現地で不足している盛土用の土、排水用の砂をドレーン材に置き換えることで、工期等の制約の問題を解消することが出来る。提案製品は、プラスチックドレーン材に植物由来の生分解性プラスチックを使用することで、最終的にドレーン材は水と二酸化炭素に分解する。 ■インドネシアでは従来、安価な盛土PVD(Prefabricated Vertical Drain)工法が対策の主流だったが、近年、工事量の増大により、盛土圧密に必要な材料(排水用砂、盛土用土)の不足により工事の遅延が発生している。本工法は真空圧密による水抜きで地盤改良を行い、不足問題を解決する。また、掘削・運搬を減らすことで環境負荷を低減し、生分解性プラスチックドレーン材の使用により、将来の地下空間利用を妨げない。		 エコジオドレーンSPD工法 施工イメージ JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋	
目的と主な成果			
■目的 インドネシアにおける軟弱地盤改良に関する既存ガイドラインの内容や地盤条件、圧密工法の導入現状を把握し、生分解性ドレーン材の導入可能性を明らかにするとともに、現地政府関係者の提案製品・技術に対する理解促進を図ることである。 ■主な成果 ・エコジオドレーン SPD 工法は従来の盛土工法と比較して約17.5%のコスト削減が可能。 ・盛土の運搬・撤去が不要なため、従来工法と比較しておよそ 35.8% 工期を短縮できる。 ・植物由来の生分解性プラスチック製ドレーン材を使用することで、地盤改良後に水と二酸化炭素へ分解し、地盤改良後の地下工事(シールド工法、推進工法等)の阻害を防ぐとともに、地盤改良後に残置するドレーン材がマイクロプラスチック化のリスクを低減する。		 生分解性ドレーン材の循環と分解のイメージ図 同事業調査完了報告書より一部抜粋	
現在の状況、ビジネス展開へ向けた知見及び今後の課題			
■現在の状況 ・インドネシアの地盤は、軟弱な粘土に膨張土が組み合わさって形成されており、粘土層の圧密促進だけでは十分な改良効果が得られないとの指摘があった。膨張土の検出と対策を専門に研究されているバンドン工科大学のハスビ博士から、エコジオドレーン SPD工法と膨張土対策を組み合わせた工法を開発するため、共同研究を実施したいとの申し出があり合意した。 ■ビジネス展開へ向けた知見 インドネシアでは、国土の約10%が軟弱地盤であり、特に沿岸部の経済特区や新港建設において、環境負荷の少ない地盤改良工法の需要が高まっている。下記技術が期待される。 ・真空圧密工法: 現地で多発している排水経路の不具合による施工失敗を防ぐ。 ・生分解性ドレーン材: 汎用プラスチックを使用したドレーン使用で懸念される海洋/マイクロプラスチックによる環境汚染や地下工事阻害リスクを解消。		■今後の課題 ・生分解性ドレーン材の実証 インドネシアでの生分解性と通水量維持に関する実証が未実施のため、バンドン工科大学と共同で実証試験を行い、現地で使用可能か検証する。 ・土質データの収集 提案技術の適用可能性を示すために、候補用地の土質データを収集する必要がある。 ・土・砂の需給状況情報の収集 提案技術の優位性を示すため、候補用地周辺の土・砂の需給状況に関する情報を得る必要がある。 ・関係機関の理解促進 インドネシアでの生分解性ドレーン材の実績がないため、関係機関への理解促進が必要。 ・適用可否の判断に必要なデータ不足 既存の資料・データだけでは判断できない可能性があるため、現地で土質データの収集や土質試験を行い、PVD工法やエコジオドレーンSPD工法の適用可否を確認する。	

製品名	多孔質(ポーラス)コンクリート製品	企業名	北海道ポラコン株式会社(北海道札幌市)
対象国	インドネシア国		
適用土壌	膨張性粘土及び軟弱地盤		
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業			
案件名	雨水による浸水被害軽減のためのポーラスコンクリート製品導入に係るビジネス化実証事業		
期間	2024年8月～2026年3月		
案件名	膨張性粘土及び軟弱地盤地域におけるインフラ被害への多孔質コンクリート製品導入案件化調査		
期間	2022年3月～2023年12月		
案件名	膨張性粘土によるインフラ施設被害への多孔質(ポーラス)コンクリート製品導入に関する基礎調査		
期間	2019年2月～2019年11月		
製品概要			
■多孔質(ポーラス)コンクリート製品は、連続的な多孔質の形状の特殊なコンクリートであり、透水・浸透・植生・吸音・浄化等の特徴を持っている。			
■洪水・浸水対策として、雨水を土中に浸透させる「浸透工法」と、軟弱地盤対策として、降雨により地中に含まれた雨水を集めて排出する「集水工法」がある。			
■インドネシアで発生している膨張性粘土によるインフラ被害への対策としては、地盤内に侵入した雨水を素早く集水・排水するための集水工法の適用が見込まれる。		ポーラスコンクリート製品 ポーラスコンクリート JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋	
目的と活用			
■目的 膨張性粘土および軟弱地盤への多孔質(ポーラス)コンクリート製品の導入により、地盤の膨張・収縮を抑制し地盤上に建設された経済・交通インフラ被害の軽減を目指すとともに、製品および工法の普及・ビジネス展開を図る。		浸透工法 集水工法 地中の雨水を集めて排水する	
■インフラ分野(道路など)での活用 ・膨張性粘土を含む地盤上に建設された道路脇や地下にポーラスコンクリート製の集水パイプやU字溝を設置し、路面や路盤内に侵入した雨水を速やかに集水・排水することで、膨張性粘土の膨張を抑制し路面損傷を防ぐ。 ・膨張性粘土を含む地盤に建設された道路路面を段階的に区切り、各法尻にポーラスコンクリート製品を設置することで地下水位を適切にコントロールし、土壌の膨張などに起因する法面の崩壊を防ぐ。		浸透工法と集水工法のイメージ 製品のスペック・価格	
■雨水流出抑制での活用 ・浸透工法による雨水流出抑制対策。 ・洪水対策の一環としてジャカルタなどで浸透井戸の導入が進む。 ・公的機関向けには浸透井戸、民間事業者向けには浸透桝が導入されているが、雨量や土質などを考慮した雨水流出計算に基づいて機能的に導入はまだ少ない。		製品名 透水路コン管 透水路コンクリートU字溝 特長 当社の特殊製法によって、優れた透水性を実現した集水パイプで、全面での集水が可能。流速の変化が極めて少なく目詰まりが起こりにくいことが特徴。 道路側面などで側面からの集水効果があるU字型側溝。側面からの集水により水位をポーラス最下部まで下げる効果がある。 スペック・価格 ・k-450(内径 450mm×厚さ 58mm×長さ 1,000mm)の規格で国内標準販売価格は15,530円/本。重量は186kg。 ・現地生産により製造原価を低減し、1ユニットあたり 5,755 円(日本の 1/3 程度)を想定している。 ・PUW-300B(長さ 2,000mm、内径 300mm×深さ 300mm)の規格で国内標準価格は21,320円。重量は250kg。蓋は1,790円(重量27.5kg) ・現地生産により製造原価を低減し、1ユニット(2m)あたり 9,978 円(日本の約 1/2)を想定している。 同調査完了報告書より一部抜粋	
現在の状況、ビジネス展開に向けた知見及び今後の課題			
■現在の状況 ・現在、「雨水による浸水被害軽減のためのポーラスコンクリート製品導入に係るビジネス化実証事業」を実施中。案件化調査では、ポーラスコンクリート製品のニーズと現地適合性を確認した結果を踏まえ、次のステップとして、現地での製品開発・生産可能性の検証、適切な活用方法の普及活動を実施し、生産体制の構築・販路開拓を進める。		■ビジネス展開に向けた知見 ポーラスコンクリート製品の有用性が実証され、膨張土・軟弱地盤対策工法の普及が進むことで、インドネシアの交通インフラ整備が促進される。高速道路の維持管理に関する技術指針や設計基準の整備が期待される。ジャカルタ近郊の工業団地における膨張土被害の軽減により、外国投資環境の向上にも貢献する。	
■今後の課題 ・制度適応性の確認: 雨水浸透施設の法整備の遅れ、不適切な導入リスク ・現地インフラとの適合性: 生産設備の現地調達の難しさ、原材料の調達課題、作業安全性の確保 ・事業パートナーの体制面の重要性: 試験施工場所の確保や現地開発業者や設計事業者の協力		■今後の課題 ・制度適応性の確認: 雨水浸透施設の法整備の遅れ、不適切な導入リスク ・現地インフラとの適合性: 生産設備の現地調達の難しさ、原材料の調達課題、作業安全性の確保 ・事業パートナーの体制面の重要性: 試験施工場所の確保や現地開発業者や設計事業者の協力	

工法名	中層混合処理工法	企業名	株式会社ワイビーエム(佐賀県)																					
対象国	インドネシア国																							
適用土壌	軟弱地盤																							
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業																								
案件名	「中層混合処理工法」を用いた地盤改良効果の普及・実証事業																							
期間	2018年12月～2023年1月																							
案件名	「中層混合処理工法」を用いた地盤改良による交通インフラ整備支援に係る案件化調査																							
期間	2016年5月～2017年5月																							
工法概要																								
■中層混合処理工法は、インドネシア国内では未だ適用事例が無い工法で、軟弱地盤の地表から、一定の深さまでの区間を、セメント又は石灰などの安定材と原地盤の土を混合し、柱体状又は全面的に地盤改良して強度を増し、沈下及びすべり破壊を防止する工法である。 ■地盤内にセメントや石灰を混ぜた支持杭(改良体)を造成し、地盤を補強する役割を担う。固結した改良体は圧縮性が小さく、荷重による圧縮沈下がほとんど生じず、改良効果の発現も早い点が特徴。適用には室内配合試験や一軸圧縮試験による強度確認が必要だが、粘性土、砂質土、有機質土など多様な地盤に対応できる点が特長である。		 JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋																						
目的と主な成果																								
■目的 インドネシアの軟弱地盤地域におけるインフラ地盤沈下防止と地震被害抑制のため、インドネシア国内で施工事例の無い新たな地盤改良工法「中層混合処理工法」の導入と、同工法を高品質かつ的確に施工可能な提案製品の市場創出を目指す。 ■主な成果 ・有機質土の下に砂質土層がある場合、インドネシアの既存工法であるバーチカルドレーン工法は適用できないが、中層混合処理工法なら対応可能である。この工法を導入することで、複雑な土層状況への適応が可能となり、従来解決が困難だった地盤沈下などの問題を改善できると期待される。 ・中層混合処理工法は、地盤強度をコントロールし、高強度でバラツキが小さい改良体を造成できる。狭い場所でも施工可能で、バーチカルドレーン工法やコンバクションパイル工法より優れた特徴がある。仮設土留め壁の安定性確保や液状化対策にも対応し、土木・建築構造物の基礎にも適用できる。軟弱地盤が広がるスマトラ島やカリマンタン島での活用が進むことで、普及が期待されている。		バーチカルドレーン工法と中層混合処理工法の違い <table><tr><th>工法名</th><th>バーチカルドレーン工法</th><th>中層混合処理工法</th></tr><tr><td>模式図</td><td></td><td></td></tr><tr><td>概要</td><td>・軟弱な粘性土地盤中に透水性の高い砂等(排水材)を打込み、水平方向の排水距離を短縮し圧密を促進させる。 ・載荷重工法等と併用することにより、圧密沈下の早期収束を図り残留沈下量を低減させる。</td><td>・地盤内にセメントや石灰を混ぜた支持杭(改良杭)を造成し、地盤を補強する。 ・固結した改良杭は圧縮性が非常に小さく、荷重による圧縮沈下をほとんど生じない。 ・「攪拌翼」にて地盤を均質に攪拌混合させる。</td></tr><tr><td>土質</td><td>粘性土、有機質土</td><td>粘性土、砂質土、有機質土</td></tr><tr><td>工期</td><td>・おおむね1～3年。地盤沈下が収束するまで1年～3年を待つ必要があり、工事は長期化する。早期に次工程へ移れない。</td><td>・概ね2週～4週で期待強度に達し、次工程へ速やかに移れるため、バーチカルドレーンよりも工期の短縮が図れる。</td></tr><tr><td>強度の信頼</td><td>圧密沈下による地盤の締め固めを期待するため、工法としての強度は不明確である。</td><td>事前の室内配合試験で目標強度を確認する。 ・地盤沈下低減効果が大い。 ・周辺地盤への影響が少ない。</td></tr><tr><td>工法単価</td><td>・工法の単価は安い。 ただし、全体工期が長くなるため、人件費・経費が高み、トータルコストは高くなる。</td><td>・バーチカルドレーン工法と比較して高価。 ただし、工法自体のコストは高くなるが、全体工期は短縮可能で、人件費や経費の削減によりトータルコストは低くなる。</td></tr></table> 同調査完了報告書より一部抜粋		工法名	バーチカルドレーン工法	中層混合処理工法	模式図			概要	・軟弱な粘性土地盤中に透水性の高い砂等(排水材)を打込み、水平方向の排水距離を短縮し圧密を促進させる。 ・載荷重工法等と併用することにより、圧密沈下の早期収束を図り残留沈下量を低減させる。	・地盤内にセメントや石灰を混ぜた支持杭(改良杭)を造成し、地盤を補強する。 ・固結した改良杭は圧縮性が非常に小さく、荷重による圧縮沈下をほとんど生じない。 ・「攪拌翼」にて地盤を均質に攪拌混合させる。	土質	粘性土、有機質土	粘性土、砂質土、有機質土	工期	・おおむね1～3年。地盤沈下が収束するまで1年～3年を待つ必要があり、工事は長期化する。早期に次工程へ移れない。	・概ね2週～4週で期待強度に達し、次工程へ速やかに移れるため、バーチカルドレーンよりも工期の短縮が図れる。	強度の信頼	圧密沈下による地盤の締め固めを期待するため、工法としての強度は不明確である。	事前の室内配合試験で目標強度を確認する。 ・地盤沈下低減効果が大い。 ・周辺地盤への影響が少ない。	工法単価	・工法の単価は安い。 ただし、全体工期が長くなるため、人件費・経費が高み、トータルコストは高くなる。	・バーチカルドレーン工法と比較して高価。 ただし、工法自体のコストは高くなるが、全体工期は短縮可能で、人件費や経費の削減によりトータルコストは低くなる。
工法名	バーチカルドレーン工法	中層混合処理工法																						
模式図																								
概要	・軟弱な粘性土地盤中に透水性の高い砂等(排水材)を打込み、水平方向の排水距離を短縮し圧密を促進させる。 ・載荷重工法等と併用することにより、圧密沈下の早期収束を図り残留沈下量を低減させる。	・地盤内にセメントや石灰を混ぜた支持杭(改良杭)を造成し、地盤を補強する。 ・固結した改良杭は圧縮性が非常に小さく、荷重による圧縮沈下をほとんど生じない。 ・「攪拌翼」にて地盤を均質に攪拌混合させる。																						
土質	粘性土、有機質土	粘性土、砂質土、有機質土																						
工期	・おおむね1～3年。地盤沈下が収束するまで1年～3年を待つ必要があり、工事は長期化する。早期に次工程へ移れない。	・概ね2週～4週で期待強度に達し、次工程へ速やかに移れるため、バーチカルドレーンよりも工期の短縮が図れる。																						
強度の信頼	圧密沈下による地盤の締め固めを期待するため、工法としての強度は不明確である。	事前の室内配合試験で目標強度を確認する。 ・地盤沈下低減効果が大い。 ・周辺地盤への影響が少ない。																						
工法単価	・工法の単価は安い。 ただし、全体工期が長くなるため、人件費・経費が高み、トータルコストは高くなる。	・バーチカルドレーン工法と比較して高価。 ただし、工法自体のコストは高くなるが、全体工期は短縮可能で、人件費や経費の削減によりトータルコストは低くなる。																						
現在の状況、ビジネス展開へ向けた知見及び今後の課題																								
■現在の状況 ・2024年1月には事業に取り組んだ現地カウンターパート公共事業省地盤・トンネル・構造物センターが作成した中層混合処理工法に関する技術基準書がインドネシアで承認され公共工事に適用可能となった。実際に、ジャカルタ近郊の都市ブカシで建設中の自動車試験場のテストコースの地盤安定化工事に採用された。また、インドネシア国内で主に日系及びインドネシア地場のゼネコン、設計コンサルタント、地盤改良工事の専門業者へ周知活動を続けており、工法普及に取り組んでいる。 出典：https://www.jica.go.jp/activities/schemes/priv_partner/sdgs/2024/20241118_02.html) ■今後の課題 ・提案工法による施工実績数の積み上げ 中層混合処理工法の認知度は低く、施工実績(試験施工を含む)を積み上げて、適用可能であることを証明する必要がある。フタマカリヤと協力して、現場での適用を継続的に模索し、さらに提案工法の効果検証を進めるための機会も活用する。 ・自社の中古製品の取り扱いの検討 専門工事業者は通常、汎用性の高い機械は所有しているものの、工法普及段階では専用機を購入しにくいと、中古機械が優先される傾向にある。工法普及の進展に応じて、自社の中古製品の取り扱いについて検討が必要。		■ビジネス展開へ向けた知見 ・施行を可能にすることによるフロー効果とストック効果 中層混合処理工法の普及により、開発が進まなかった地盤改良が可能となり、工期短縮、施工不良削減、安定した地盤沈下低減などの効果が期待できる。道路整備により、アクセス改善や渋滞回避、経済活性化(短期的に約7.3兆円、長期的に約33.5兆円の経済効果)が見込まれ、交通事情の大幅改善も期待される。 ・民間セクターの開発、促進に寄与する インドネシアでは民間事業のインフラ開発が進んでおり、短期間で効果が発揮できる工法が求められる。軟弱地盤での高速道路開発により、周辺の商業地や住宅地開発が進み、短期間で効果を発揮する中層混合処理工法が役立つと考えられる。 ・提案製品の機動性を活かした開発行為が実現できる 提案製品は小型で機動性が高く、狭い場所での施工に適している。土地利用の高度化や地価上昇に伴い、狭隘な場所や小規模な案件が増える中、これまで適用が難しかった地域にも対応でき、施主の希望を実現することができる。																						

製品名	土壌硬化剤STEIN	企業名	株式会社SPEC(東京都)
対象国	カンボジア国・スリランカ国・ケニア国・ナイジェリア国・ガーナ国		
適用土壌	配合率を調整することでほぼ全ての土質に対応可能。		
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業			
案件名	土壌硬化剤STEINを活用した灌漑・農業・農村道路整備技術の普及・実証事業		
期間	2019年3月～2023年1月		
案件名	土壌硬化剤STEIN技術を活用した灌漑・農業施設造成整備等に関する案件化調査		
期間	2016年7月～2017年7月		
その他			
・令和5年度J-Partnership支援:土壌硬化剤STEINを用いたケニアでの土木工事において問題となるBlack cotton soilの硬化による道路およびため池の施工事業(2023年6月)			
・外務省脱炭素技術海外展開イニシアティブ:脱炭素製品として採択(2023年3月)			
製品概要			
■土壌硬化剤STEINは、STEIN元素(普通セメントを基材とし、27種の無機添加剤を事前混和したもの)5%と普通セメント95%を配合した、粉末状の土壌硬化剤である。 ■STEINは、1975年に日本で開発された無機物粉体からなる環境に無害な土壌硬化剤である。現場土に重量比およそ10%混和し、最適な水分調整後に締固めることで短期間に硬化させ、強健な構造物を造成できる。 ■STEIN工法は、アスファルト舗装と比べて施工費用が40～60%程度と低く、強度や耐久性に優れるため、ひび割れや水たまりなどの課題が少ない。灌漑施設や道路の施工を簡易かつ低価格で実施でき、耐久性が高いことも特長である。さらに、環境への悪影響がなく、メンテナンスの必要がほぼないため、ランニングコストの削減にも寄与する。		 STEIN JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋	
主な成果と活用			
■主な成果 ・JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業では、STEINの硬度は計画値を満たし、施工状態の目視評価でも道路機能に影響する問題は確認されなかった。しかし、軽度の浸食、摩耗、ひび割れ、陥没が見られ、特に道路端部では重車両によるえぐれが発生した。陥没はSTEIN施工区間・非施工区間の両方で確認され、路床以下の地盤が軟弱であることや路床部の不具合が原因と考えられる。 ・2022年に世界銀行資金を活用し、ケニア・モイ大学と共同でブラックコットンソイル(黒綿土)問題や国立公園内の管理道路舗装に関する実証実験を行った。実験では、ケニア国内の採取場所や土壌分類ごとに強度に差があるという結果が出ており、今後STEINの実用化に向けた試金石となっている。 ■活用 STEINを活用した施工の特長は、現場土を使用することで工程がシンプル化され、期間短縮やコスト低減が可能になる。施工は土とSTEINを混合してから4時間以内で終了し、舗装道路では施工後24時間で通行可能になる。施工後1週間程度で目標強度を達成し、風化や浸食、熱による変形が起こりにくく、耐用年数は最長45年とされ、メンテナンスがほぼ不要なため、車道や歩道、水路、ため池等での普及が期待される。		 ⑨施工範囲の区分け(a) ⑩STEINの設置(b) ⑪STEIN敷き均し(b) ⑫バックホウによるSTEIN混合(b) STEIN散布と混合 同調査完了報告書より一部抜粋	
ビジネス展開へ向けた知見及び今後の課題			
■ビジネス展開へ向けた知見 ・カンボジア市場においてSTEINは十分な価格競争力を持つことが確認された。一方で、民間の不動産開発業者は舗装面の見た目を重視する傾向があるため、塗装などを活用し、相手に応じた訴求を工夫することが求められる。また、STEINは「施工付き販売製品」であるため、信頼できる認定施工事業者の確保と密な連携が事業成功の鍵となる。 ・事業期間中にSTEIN製造装置をMOWRAMに移転し、MOWRAM・PDWRAM職員や施工事業者に対して研修を通じた技術移転を実施した。MOWRAMは今後もマーケット展開を支援する意向を示しており、STEIN製造装置が設置されたタケオを製造拠点として、供給するSTEIN元素を用いた製造を行い、現地の認定施工業者にSTEINを供給する予定である。		■今後の課題 ・技術移転の継続性確保 MOWRAM・PDWRAMの人事異動等で技術や知見が途切れないよう、事業期間終了後も技術アップデートと知識の定着を図りながら営業を継続する。 ・見た目の課題への対応 STEIN舗装は混合土の色がそのまま残るため、設計・施工マニュアルに特性を明記し、受注前に十分説明する。特にカンボジアの民間開発業者の要求に応じ、塗装等で見た目を整える提案を行う。 ・路床の脆弱性への対策 カンボジアの道路では路床の脆弱性が問題となるため、舗装計画の策定時に路床・路盤・基礎などの設計条件を十分考慮し、STEINが対応できる責任範囲を明確にして、事業者と調整・設計を行う。	

製品名	排水シート「ジオストリーム」	企業名	株式会社田中(大阪府泉大津市)
対象国	カンボジア国		
適用土壌	分散性土(ドラゴンホール)		
JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業			
案件名	降雨浸透水による道路陥没防止のための排水シート導入ビジネス化実証事業		
期間	2023年7月～2024年10月		
案件名	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		
期間	2020年3月～2022年12月		
製品概要			
■排水シート「ジオストリーム」は、道路法肩の路盤と路床の間や道路法面の保護土の下層に敷設することで土と水を分離し排水する機能を持つ排水材で、ジオテキスタイルの一種として位置付けられる。 ■主な特徴 ・地盤補強機能を備え、道路法肩に敷設することで降雨による法肩の損傷を長期的に低減させることができる。 ・合成繊維製で耐久性と経済性に優れ、製品のメンテナンスは原則不要。 ・軽量で敷設に特殊な技術が不要、技術導入や定着が容易。		 ジオストリーム JICA中小企業・SDGsビジネス支援事業 調査完了報告書より一部抜粋	
目的と主な成果			
■目的 カンボジアにおける道路インフラは、降雨浸透水による陥没や法面崩壊が頻発しており、これらの問題は道路の安全性と耐久性を低下させている。ジオストリームを導入することで、これらの問題を解決し、道路の維持管理コストの削減と安全性の向上を図る。 ■主な成果 案件化調査では、法面に対するドラゴンホール対策として3層構造の法面タイプの効果を調査した結果、ドラゴンホールの発生原因の大きな要因は法肩からの雨水の浸透にあることが確認された。そのため、ビジネス化実証調査におけるジオストリームは、法肩からの雨水の浸透を防ぐ2層構造の法肩タイプとした。法肩タイプのジオストリームは、厚さ3mmのポリエステル短繊維不織布を上層に、厚さ0.5mmのポリエステル長繊維不織布を下層とした2層構造となっており、上層不織布の排水効果と下層不織布の補強効果で地盤への水の浸透を抑制しつつ、補強効果でクラックの発生を低減させる効果がある。		 ジオストリームの効果イメージ 同事業調査完了報告書より一部抜粋	
現在の状況、ビジネス展開へ向けた知見及び今後の課題			
■現在の状況 ・2024年2月、上記事業の一環として公共事業運輸省(MPWT)からの全面的な協力のもと、カンボジア国国道3箇所排水シート「ジオストリーム」を使用した道路補修工事の試験施工が実施された。 ・3月と5月に行われたモニタリング調査(樹愛亀に委託)の結果、施工箇所の地盤支持力が保持されていることが確認され。 ・7月の雨季に実施した視察では、降雨時にジオストリームの排水効果が目視で確認された。  法肩タイプ(2層構造) 同事業調査完了報告書より一部抜粋		■ビジネス展開へ向けた知見及び今後の課題 ・ジオストリームの予算取りが困難 MPWTが法面の損傷を発見した際、使用タイミングや基準の判断が難しく、予算措置が取りにくい。 ・モニタリング結果が不十分で効果の説明が困難 雨期明けの舗装面や法面損傷の原因の解明が進んでおらず、ジオストリームが適切かどうかの検証に時間がかかる。 ・ライフサイクルコスト(LCC)の理解不足 経済財務省(MEF)がLCCの概念を理解しておらず、耐用年数が短い安価な製品が求められる。 ・業務提携先・調達先・販売代理店選定リスク 候補企業が技術能力が低く、業務提携や調達、販売代理店として不適切な場合がある。	

Appendix F 記号一覧

記号	単位	同義語	名称
Ac	-		活性度
Ar	-		縦横比
AI		P/PET	乾燥指数
B			Hardin の破砕指数
B10	-		Lee らの破砕指標
Bg	-		Lee らの破砕度
BM	%	Br	Marsal の粒子破砕率
c	kPa, kN/m ²		粘着力
CB	-		破砕指数
CBR	%		California bearing ratio、カリフォニア耐力比
CC	%		粘土分(含有量)／コロイド分(含有量)。日本は 5 μ m 以下。国により 2 μ m 以下 or 1 μ m 以下。
CEAc	-		陽イオン交換活性係数
CEC	meq/100g cmol/kg		陽イオン交換容量
Cc	-		圧縮指数
COLE	cm cm ⁻¹		線状膨張係数(Coefficient of Linear Extensibility)
COLEWS	cm cm ⁻¹		飽和状態の線状膨張係数
Cm	-		換算係数
CROSS	-		構造安定性の陽イオン比
Cp			崩壊度
CRR			液状化低工費
Cs	-		膨潤指数、膨張指数
CSR			せん断応力比
cv	s/m		圧密係数
Dc	%	D	締固め度
DFS	%	FSI	自由膨張率
DR	%		分散度
Dr	%		相対密度
Ec	kN/m ²		崩壊時の弾性率
EC	dS/m		電気伝導率
EC1.5	dS/m		土壌と水を 1:5 の比率で混ぜた溶液の電気伝導率
ECe	dS/m		土壌飽和抽出液の電気伝導率
ECw	dS/m		灌漑水の電気伝導率
ED	kN/m ²		乾燥状態の弾性率

記号	単位	同義語	名称
EI	%		膨潤指数
eLL	-		液性限界の間隙比
emax	-		最大間隙比
emin	-		最少間隙比
eN	-		自然間隙比
ESI	-		気化学的安定性指数
ESP	%		交換性ナトリウム率
Ew	kN/m ²		崩壊後の湿潤弾性率
Fc	%		細粒分含有率(0.075mm 以下)
fs	kPa, kN/m ²		CPT の周面摩擦
Gs	-		比重
Ic	-		CPT の normalized soil behavior type index
ICZ			$I_{cz} = \frac{h_z - h_{cz}}{h_1}$ h1:初期高さ、hZ:土被り圧の高さ、hZS:土被り圧で飽和させたときの 高さ
Ip	%	PI	塑性指数
Is	%	IS	収縮指数 Is(%)=PL-SL
K	%		沈下係数
K0	-		静止土圧係数
KL			$K_L = \frac{\left[\left(\frac{w_n}{S_r}\right) - PL\right]}{I_p}$
LL	%	wL	液性限界
LS	%	LS	線収縮率 (Linear Shrinkage, %)
M			マッキントシュ値
MBV	%	VB	メチレンブルー吸着量
MMc	%		モンモリロナイト含有量
N	-		N 値
P/ET	-	AI	降水量と蒸発散量の比率
PI	%	Ip	塑性指数=LL-PL
PL	%	wp	塑性限界
ps	kPa, kN/m ²		膨潤／膨張圧
qc	kPa, kN/m ²		CPT のコーン先端抵抗
qt	kPa, kN/m ²		修正先端抵抗(正規化コーン抵抗) $q_t = q_v + u_2(1 - a)$ u2: 間隙水圧(通常は u2ポート=コーン後方)

記号	単位	同義語	名称
			a: コーン先端の先端面積比 (area ratio) : 0.6~0.85 程度
qu	kPa, kN/m ²		一軸圧縮強度
PVC	kPa, kN/m ²		Potential Volume Change
Rc	-		真円度
SAMC	%		膨潤活性鉱物含有量
SAR	-		ナトリウム吸着比
SBP	%		バイオポリマー飽和度
S.I.	-		粒子破碎量
SL	%	ws	収縮限界
Sp	%		膨張／膨潤ポテンシャル、膨張／膨潤率
SSA	m ² /g		比表面積
Sr	%		飽和度
TDS	mg/L		総溶解固形物
TP	mg/L		全リン
u	kPa, kN/m ²		間隙水圧
VB	%		メチレンブルー吸着量
Vd	ml		蒸留水に入れた沈降後の試料の体積
Vk	ml		ケロシンに入れた沈降後の試料の体積
Vp	Km/s		せん断波速度、弾性波速度
wn	%	w0	自然含水比
wL	%	LL	液性限界
wp	%	PL	塑性限界
ws	%	SL	収縮限界
ΔFc	%		細粒分増加量
△S	mm ²		比表面積
ε _S	%		膨潤ひずみ
σ' _{cv}	kPa, kN/m ²		(圧密)膨潤／膨張圧
σ'' _{cv}	kPa, kN/m ²		定体積膨潤／膨張圧
φ	deg		内部摩擦角
ρ _d	g/cm ³		乾燥密度
ρ _{dmax}	g/cm ³		最大乾燥密度
ρ _{dmin}	g/cm ³		最小乾燥密度

Appendix G 略語一覧

略語	日本語名称	英文名称
ABI	英国保険協会	Association of British Insurers
ACPA	アメリカコンクリート舗装協会	American Concrete Pavement Association
AS	酸可溶性硫酸塩	Acid-Soluble Sulfates
ASTM	アメリカ材料試験協会	American Society for Testing and Materials
BCS	黒綿土	Black cotton soil
BG	ブチレングリコール	Butylene Glycol
BG	β -グルカン	Beta-Glucan
BS	英国規格	British Standards
BSP	塩基飽和度	Base Saturation Percentage
CEAc	陽イオン交換活量	Cation Exchange Activity Coefficient
CEC	陽イオン交換容量	Cation Exchange Capacity
CAGE		Casagrande's (Atterberg) Expansion Group Evaluation
COLE	線状膨張係数	Coefficient of Linear Extensibility
CPT	コーン貫入試験	Cone penetration test
Cz	炭酸塩層	Carbonate zone
DEM	個別要素法	Discrete Element Method
DTA	示差熱分析	Differential Thermal Analysis
EC	電気伝導率	Electrical Conductivity
ECe	土壌飽和抽出液の電気伝導率	Electrical Conductivity of Saturation Extract
ECw	灌漑水の電気伝導率	Electrical Conductivity of Water
EPS	細胞外高分子物質	Extracellular Polymeric Substances
ESI	電気化学的安定性指数	Electrochemical Stability Index
ESP	交換性ナトリウム率	Exchangeable Sodium Percentage
EU	欧州連合	European Union
EXD	エネルギー分散型 X 線分析	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
FAO	国際連合食糧農業機関	Food and Agriculture Organization
FDA	アメリカ食品医薬品局	Food and Drug Administration
ICOLD	国際大ダム会議	International Commission on Large Dams
HWSD	統一世界土壌データベース	Harmonized World Soil Database
IIASA	国際応用システム分析研究所	International Institute for Applied Systems Analysis
IS	インド規格	Indian Standards
ISO	国際標準化機構	International Organization for Standardization

略語	日本語名称	英文名称
ISRIC	国際土壌情報センター	International Soil Reference and Information Centre
IUSS	国際土壌学会	International Union of Soil Sciences
ISC	国際学術会議	International Science Council
JGS	地盤工学会	Japanese Geotechnical Society
JIS	日本産業規格	Japanese Industrial Standards
LIG	リグニン	Lignin
MCV	改良カリフォルニア値	Modified California Value
MICP	微生物誘導炭酸カルシウム沈殿	Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation
MS	一硫化硫黄	Monosulfide
NRCS	天然資源保全局	Natural Resources Conservation Service
PS	パレオゾル	palaeosols
RSG	基準土壌グループ	Reference Soil Group
SAMC	膨潤活性鉱物含有量	Swelling Active Mineral Content
SAR	ナトリウム吸着比	Sodium Adsorption Ratio
SBP	糖由来ポリマー	Sugar-Based Polymer
SBP	バイオポリマーの細孔飽和度	Saturation of Biopolymer in Pore
SEM	走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope
SPT	標準貫入試験	Standard penetration test
SPP	スルホン化石油製品	Sulfonated Petroleum Products
SSA	比表面積	Specific Surface Area
TDS	総溶解固形物	Total Dissolved Solids
TP	全リン	Total Phosphorus
TRS	総硫酸塩含有量	Total Recoverable Sulfates
UCS	一軸圧縮強度	Unconfined compression strength
USBR	アメリカ合衆国開拓局	United States Bureau of Reclamation
USDA	アメリカ合衆国農務省	United States Department of Agriculture
USLE	汎用土壌流出式	Universal Soil Loss Equation
WCSS	世界土壌学会議	World Congress of Soil Science
WRB	世界土壌資源基準／参照体系	World Reference Base for Soil Resources
WS	水溶性硫酸塩	Water-Soluble Sulfates
XRD	X線回折	X-ray Diffraction
XRF	X線蛍光分析	X-ray Fluorescence

Appendix H 参考文献

本参考文献はハンドブックの作成にあたり、収集したものである。ハンドブックで全て引用しているわけではないが、文献調査の際の参考となれば幸いである。

H1 膨潤性土

H1.1 論文

1. A Case History of Structures Constructed on Expansive Soils, John D. Nelson, Denise C. Garcia, Erik J. Nelson, Kuo Chieh Chao, 2019
2. A COMPARATIVE STUDY ON SOILS DEGREE OF SWELLING USING NEW CORRELATIONS FORMULAS, Nawal DOUNANE, Habib TROUZINE, 2021
3. A Critical Review on Stabilisation of Expansive Soils With Compensating Materials, T. Ashok Kuma, T. Thyagaraj, R.G. Robinson, 2020
4. A LABORATORY STUDY ON THE INFLUENCE OF RUBBER STRIPS ON THE IMPROVEMENT OF CBR VALUES OF EXPANSIVE SOIL, Koteswara Rao. D, G.N.V.V.S.S.L.Shilpa Devi, P.R.T. Pranav, 2012
5. A Novel Method to Improve the Durability of Lime-Treated Expansive Soil Nripojoyoti Biswas, Sayantan Chakraborty, Anand J. Puppala, Aritra Banerjee, 2021
6. A NEW FORMULA FOR RATE OF SWELLING OF EXPANSIVE CLAY SOILS, Agus Setyo Muntohar, Roslan Hashim, 2005
7. A Rational Method of Predicting Swelling Potential for Compacted Expansive Clays, B. V. RANGANATHAM, B. SATYANARAYANA, 1965
8. A REVIEW ON EFFECT OF VARIOUS ADDITIVES ON DISPERSIVE NATURE OF EXPANSIVE SOIL, Lakshmy S S, Emy Poullose, 2020
9. A REVIEW OF ENGINEERING EXPERIENCES WITH EXPANSIVE SOILS IN HIGHWAY SUBGRADES, D.R. Snethen et al., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1975
10. A Review of Expansive Soil – Effects and Mitigation Techniques, Trudeep N. Dave and Arshad K. Siddiqui, 2019
11. A small Saskatchewan town copes with Swelling clay problems, R.K.H. Ching, D.G. Fredlund, 1984
12. A STUDY ON IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SOIL BY USING CNS (COHESIVE NON SWELLING) LAYER, Kola Srinivas, D.S.V.Prasad, V.K.L.Rao, 2016

13. A STUDY ON STRENGTH AND SWELLING CHARACTERISTICS OF THREE EXPANSIVE SOILS TREATED WITH CaCl_2 , T. L. RAMADAS, N. DARGA KUMAR, G. YESURATNAM, 2012
14. A Study on Strength Characteristics of Expansive Soil-Flyash Mixes at Various Moulding Water Contents, P.V.V.Satyanarayana S.Hemanth Kumar, P.Praveen, B.V.Suresh Kumar, 2013
15. A treatment of expansive soil using different additives, Mohammed Y. Fattah, Firas A. Salman, Bestun J. Nareeman, 2010
16. A unified Swelling potential index for expansive soils, Patrick Chege Kariukia, Freek van der Meer, 2004
17. A UNIFYING FRAMEWORK FOR MODELING SWELLING SOIL BEHAVIOUR, B.F. Lim, G.A. Siemens, 2016
18. A UNIVERSAL METHOD FOR ASSESSING INTRINSIC EXPANSIVENESS OF SOILS, KEBREAB BERHANE HABTE, 2004
19. Abandonment and Expansion of Arable Land in Europe, Erez Hatna and Martha M. Bakker, 2011
20. Activity in Swelling Vertical of Expansive Soil, Agus Tugas Sudjianto, Kabul Basah Suryolelono, Ahmad Rifa'i, Indrasurya B Mochtar, 2011
21. Advancement in oedometer testing of unsaturated soils, El- Sohby, M., Mazen, O., Aboushook, M., 2005
22. Adverse Effects of Expansive Soils on Road Infrastructure and Evaluation of Chemical Remediation Techniques, Hayder Abbas Hasan, 2019
23. Amelioration Effect of Fly Ash and Powdered Ground Steel Slag for Improving Expansive Subgrade Soil, Dereje Alemshet, Basha Fayissa, Anteneh Geremew, Gelata Chala, 2023
24. Amelioration of fat clay treated with CNS and cohesionless soils, Khalid Farooq, Hassan Mujtaba, Syed Zishan Ashiq, Mudassar Munir Shah, Abdullah Mohamed, 2024
25. AN EVALUATION Of EXPEDIENT METHODOLOGY FOR IDENTIFICATION Of POTENTIALLY EXPANSIVE SOILS, Donald R. Snethen, Lawrence D. Johnson, David M. Patrick, 1977
26. An Experimental Study on the Geotechnical, Mineralogical, and Swelling Behavior of KPK Expansive Soils, Bakht Zamin, Hassan Nasir, Khalid Mehmood, Qaiser Iqbal, Asim Farooq, Mohammad Tufail, 2021
27. An experimental study on strength improvement of expansive subgrades by polypropylene fibers and geogrid reinforcement, Nitin Tiwari, Neelima Satyam, 2022
28. AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TREATMENT OF EXPANSIVE SOILS BY GRANULAR MATERIALS, TİMÜÇİN HERGÜL, 2012
29. An Experimental Study to Mitigate Swelling Pressure of Expansive Tabuk Shale, Saudi Arabia, A. A. Embaby, A. Abu Halawa, M. Ramadan, 2017

-
30. An Expansive Soil Index for Predicting Shrink–Swell Potential, P. J. Thomas, J. C. Baker, L. W. Zelazny, 2000
 31. AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TREATMENT OF EXPANSIVE SOILS BY GRANULAR MATERIALS, TİMUÇİN HERGÜL, 2012
 32. AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SWELLING PRESSURE ON EARTH ANCHORED RETAINING WALL DESIGN, Christian H. Baxter, 2004
 33. ANALYSIS AND DESIGN OF STIFFENED RAFT FOUNDATION ON HIGHLY EXPANSIVE SOILS, OMER GURHAM OMER, 2003
 34. ANALYSIS OF BEHAVIOR OF EXPANSIVE SOIL FOUNDATIONS, Lawrence D. Johnson, William R. Stroman, 1976
 35. Analysis of Engineering Properties of Black Cotton Soil & Stabilization Using by Lime, Kavish S. Mehta, Rutvij J. Sonecha, Parth D. Daxini, Parth B. Ratanpara, Miss Kapilani S. Gaikwad, 2014
 36. Analysis of the behaviour of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting, Geremew Zemenu, Audiguier Martine, Cojean Roger, 2009
 37. Application of dimensional analysis and regression tools to estimate swell pressure of expansive soil in Tebessa (Algeria), Yacine Berrah, Abderrahmane Boumezbeur, Nacer Kherici, Nouar Charef, 2016
 38. APPLICATION OF XANTHAN GUM BIOPOLYMER FOR TREATMENT OF EXPANSIVE SOIL: A REVIEW, Gaurav chandravanshi, S.K Jain, 2021
 39. Applied Clay Mineralogy - Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, Common Clays Haydn H. Murray, 2007
 40. APPROPRIATE PARAMETERS FOR PREDICTION OF SWELLING PRESSURE OF EXPANSIVE CLAYS, Sudha Rani, K. Mallikarjuna Rao, 2009
 41. 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
 42. At-rest lateral earth pressure of compacted expansive soils: Experimental investigations and prediction approach, Zhong Han, Pan Zhang, Weilie Zou, Kewei Fa, Sai K. Vanapalli, Lianglong Wan, 2024
 43. Atlas Sebaran Batu Lempung Bermasalah Indonesia, Pramudyo, T., Solliu, W. P., & Hermawan, W. , 2019
 44. Attenuative Capacity of Compacted Black Cotton Soil treated with Bagasse Ash, Ijimdiya, T.S., Osinubi, K.J., 2011
 45. Behavior of Expansive Clay of Ngawi Region (East Java) Under Water Content Variation, Sudjianto, A. T. Suryolelono, K. B., Rifa'i, A., Mochtar, I. B., 2009
-

46. Behavior of Flexible Pavements on Expansive Soils, Adel Djellali, Abdelhafid Ounis, Behrooz Saghaei, 2019
47. Behaviour of Black Cotton Soil Reinforced with Sisal Fibre, Santhi Krishna K. Sayida M.K., 2009
48. Behaviourial Study of Expansive Soils and its Effect on Structures–A Review, VERMA S. K., MARU S., 2013
49. Biopolymer as Environmentally Friendly Reinforcement to Overcome Cracked Soil Problems on Expansive Soil A Case Study at Karanggede – Juwangi Road, Bagus Guritno, Dewi Amalia, Iin Karnisah, Apip Pudir, 2021
50. Black Cotton Soil Modification using Sea Salt, Rajesh Prasad Shukla, Niraj Singh Parihar, Rajendra Prasad Tiwari, Bal Krishna Agrawal, 2014
51. Black cotton soils - Highly expansive clays of India, Dinesh Mohan, 1994
52. Black Cotton Soils and the Vetiver system, 2004
53. Black soils in eastern India, Kazutake KYUMA, Yoshikazu TAKAYA, 1969
54. Case Studies of Problematic Expansive Soils: Characterization Challenges, Innovative Stabilization Designs, and Novel Monitoring Methods, Anand J. Puppala, 2021
55. Cation Exchange Capacity (CEC) determination from spectroscopy, P. C. Kariuki, F. Van Der Meer & P. N. W. Verhoef, 2003
56. Cement and Lime Stabilization Effect on the Evolutivity of an Expansive Overconsolidated Clay, A. Mahamedi, M. Khemissa, 2014
57. CEMENT STABILIZATION OF COMPACTED EXPANSIVE CLAY, Mahamedi Abdelkrim, Khemissa Mohamed, 2012
58. Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils Performance Evaluation and Comparison, Masrur Mahedi, Bora Cetin, David J. White, 2020
59. Chapter 7 Expansive soil Wyoming Multi-Hazard Mitigation Plan, 2011
60. Chapter 7 Subsurface Geophysical Methods, EM 1110-1-1802, 1995
61. CHAPTER C5 – EXPANSIVE SOILS, Lee D Jones, ICE manuals, 2014
62. Characterisation of incinerator ash treated expansive soils, A. A. AL-RAWAS, 2004
63. Characteristics and treatment of expansive soil using biopolymer, Wagdi Hamid, Kehinde LemboyeKehinde, Abdulmohsin Dhowian, 2022
64. Characteristics of Black Cotton Soil Testing & Analysis - Report, Subash Thanappan, LAMBERT, 2023

-
65. Characteristics, Problems and Remedies of Expansive Soils of Rajasthan, India, N. K. Ameta, D.G. M. Purohit, A. S. Wayal, 2007
 66. CHARACTERIZATION AND EXTENT OF EXPANSIVE SOILS IN THE LAS VEGAS VALLEY, Lorraine Linnert Dunford, 2005
 67. Characterization and Treatment of Expansive Subgrade Soils in Sudan, Omer Siddig Mustafa Hamza, 2019
 68. Characterization of Sand and Zeolite Stabilized Expansive Soil as Landfill Liner Material under Environmental and Climatic Effects, Şerife Öncü, Huriye Bilsel, 2020
 69. Characterization of Swelling Clays as Components of the Engineered Barrier System for Geological Repositories, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2013
 70. Chemical and Geotechnical Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash and Geotextiles, C.Rajakumr, N.Balasundaram, T.Meenambal, 2017
 71. CHEMICAL STABILISATION FOR LOW COST ROADS IN BOTSWANA, T. Abadjieva, 2001
 72. Chemical Stabilization of Expansive Clays from Algeria, M.K. Gueddouda, I. Goual, M. Lamara, A. Smaida, B. Mekarta, 2011
 73. Characterisation of incinerator ash treated expansive soils, A. A. AL-RAWAS, 2004
 74. Clark County Expansive Soil Guidelines Map
 75. Clark County Soil Guidelines Map
 76. Classifications des sols selon leur sensibilité au retrait et au gonflement (approches qualitatives du gonflement), Comportement de retrait-gonflement des sols en période de sécheresse
 77. Classification of Shrinkage and Swelling Potential of a Subgrade Soil in Central Thailand, Auckpath Sawangsuriya, Apiniti Jotisankasa, and Sekchai Anuvechsirikiat
 78. Classification procedures for expansive soils, A. Sridharan, K. Prakash, 2000
 79. Closure to “Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison” by Masrur Mahedi, Bora Cetin, and David J. White., Masrur Mahedi, Bora Cetin, David J. White
 80. Combined effect of mineralogical and chemical parameters on Swelling behaviour of expansive soils, Bendadi Hanumantha Rao, Peddireddy Sreekanth Reddy, Bijayananda Mohanty, Krishna R. Reddy, 2021
 81. Compacted black cotton soil treated with cement kiln dust as hydraulic barrier material, F.O.P. Oriola, G. Moses, 2011
 82. Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil, H.N. Ramesh, K.V. Manoj Krishna, H.V. Mamatha, 2010
-

83. Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement, B.R. Phanikumar, E. Ramanjaneya Raju, 2020
84. Comparative Study on Some Chemical and Mechanical Stabilizations of Expansive Soils, Omer S. M. Hamza, A. Eltybe, M. Yousif, M. Hashim, M. Saifeldin, A. Hashim, M. Abdelazeez, M. Abdelateef, Y. Hayder, 2022
85. Comparative Study of Black Cotton Soil Stabilization with RBI Grade 81 and Sodium Silicate, K.V. Madurwar, P.P. Dahale, A.N.Burile, 2013
86. Comparison of Fly Ash and Rice Husk Ash Stabilized Black Cotton Soil, Laxmikant Yadu, Rajesh Kumar Tripathi, Dharamveer Singh, 2011
87. Comparison of Environmental Impacts of Two Alternative Stabilization Techniques on Expansive Soil Slopes, Rui Zhang, Mingxu Long, Jianlong Zheng, 2019
88. Comparison of swell behaviour of highly expansive clay through field monitoring and centrifuge modelling, Ruan A. Murison, S.W. Jacobsz & Talia S. da Silva Burke, Tiago A.V. Gaspar & Ashraf S. Osman, 2022
89. Consolidation Characteristics of Fly Ash and Lime Treated Black Cotton Soil, Vijayakumar Sureban, 2011
90. Consolidometer test procedural factors affecting swell properties, D.G. Fredlund, 1969
91. Consultancy Report On Rehabilitation Of Weak Formation between Hosangabad & Itarsi and Itarsi & Khandwa Stations, Bhopal Division: West Central Railway, 2007
92. CONTROLLING STRESS FROM SWELLING CLAY, Timothy P. Wangler, Angela K. Wylykanowitz, George W. Scherer, 2006
93. Correlation between Swelling Pressure and Free Swell of Greater Cairo City Expansive Soils –A Case Study, Nasser A. A. Radwan, Khaled M. M. Bahloul, 2019
94. CORRELATION FOR PREDICTION OF SWELLING PRESSURE USING DIFFERENTIAL FREE SWELL AND PLASTICITY INDEX, Shweta Kushwaha, R. K. Yadav, 2016
95. Cracking of RC School Building Due to Soil Expansion, Omer S. Mughieda, Khaldoun A. Bani-Hani, 2007
96. CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCED EXPANSIVE CLAY, R.R. AL-OMAR1, W. K. ORAIBi, 2000
97. CYCLIC SWELLING BEHAVIOUR OF CLAYEY SOILS, Geremew Zemenu, Audiguier Martine, Cojean Roger, 2009
98. DAMAGE TO BUILDINGS ON CLAY SOILS, D. A. Cameron, P. F. Walsh, AUSTRALIAN COUNCIL OF NATIONAL TRUSTS and NATIONAL TRUST OF AUSTRALIA(VICTORIA), 1984
99. DAMAGE TO FOUNDATIONS FROM EXPANSIVE SOILS, J. David Rogers, Robert Olshansky, Robert

- B. Rogers, 1985
100. Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance, Magdi M. E. Zumrawi, Asim O. Abdelmarouf, Abubakr E. A. Gameil, 2017
 101. DEFINITION OF EXPANSION POTENTIAL FOR EXPANSIVE SOIL, John D. Nelson, Kuo-Chieh Chao, Daniel D. Overton, 2007
 102. DESIGN OF PIER FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, John D. Nelson, Kuo-Chieh Chao, Daniel D. Overton, 2007
 103. Determination of Cation Exchange Capacity from Soil Water Retention Curve, Morteza Khorshidi, Ning Lu, 2016
 104. DETERMINATION OF FREE SWELL INDEX OF SOILS IS: 2720 (Part40) 1997
 105. Determination of Geotechnical Properties and Stability of Expansive Soil using Fly Ash, Farhan KHAN, Bhumika DAS, Nomesh DEWANGAN, 2021
 106. Determination of swell index and Swelling pressure from suction tests – a case study of Neo gene clays from War saw (Po land), Emilia WÓJCIK¹, Ireneusz GAWRIUCZENKOW¹, 2017
 107. Determination of Swell Potential of Soils using Cole in Panyam, North – Central Nigeria, A. A. Umbugadu, M. I. Ancho, and Nghargbu K'tso, 2021
 108. Determining of Thickness of Cohesive Non Swelling Soil Layer for Canal Lining, P.Sanjay Chandra, G.Venkatarathnam, 2016
 109. DETERMINING THE SUITABILITY & THICKNESS OF CNS SOIL LAYER FOR CANAL LINING BIRADAR SHARATH CHANDRA, NAKKA MONICA MADHURI, CHANDRAMOULI Y.J.,P.SRAVANTHI, .P.ADIKALA KUMAR, 2016
 110. Discussion of Swelling characteristics of bentonite in artificial seawater, Abidin Kaya, Yeliz Yukselen-Aksoy, Hakan Oren, 2009
 111. Disposal of solid waste for black cotton soil Stabilization, ARANJEET RAJESH SONI, P.P.DAHALE, R.M.DOBABLE, 2011
 112. 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
 113. Due to their potential to provide nonuniform support at the base of a concrete pavement structure, expansive soils must be properly addressed during the design phase, 2008
 114. Effect of Fly Ash on an Expansive Soil for Flexible Pavement Design, Lakshmi Keshav, Mangaiarkarasi.V, 2012

115. Effect Of Clay-Water Interactions On Swelling In Montmorillonite Clay, Kalpana Katti, Dinesh Katti, 2001
116. EFFECT OF CURING PERIOD AND TEMPERATURE ON CHARACTERISTICS OF STABILIZED EXPANSIVE SOIL, Bidula Bose, 2012
117. EFFECT OF FLYASH AND LIME ON STABILIZATION OF EXPANSIVE SOIL, P. P. DAHALE, P. B. NAGARNAIK, A. Y. GAJBHIYE, 2016
118. Effect of Fly-Ash on Geotechnical Characteristics of Black Cotton Soil, Satyendra Singh Rajput, R. K. Yadav, 2015
119. EFFECT OF FLY ASH ON STRENGTH AND SWELLING ASPECT OF AN EXPANSIVE SOIL, Rajdip Biswas, Nemani V.S.R Krishna, 2008
120. EFFECT OF HEATING ON SWELLING AND DISPERSION OF DIFFERENT CATIONIC FORMS OF A SMECTITE, M. CHOROM, P. RENGASAMY, 1996
121. Effect of Hydrated Lime on the Engineering Behaviour and the Microstructure of Highly Expansive Clay, LASLEDJ Abdelmadjid, AL-MUKHTAR Muzahim, 2008
122. EFFECT OF LIME AND STONE DUST IN THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF BLACK COTTON SOIL, Ankur Mudgal, Raju Sarkar, A.K. Sahu, 2014
123. Effect of matric suction on Swelling behaviour of compacted expansive soils from Sudan, A. Karim & M. Zein
124. Effect of randomly inclusion of alccofine and Phosphogypsum on strength behavior of expansive soil, V. Jaladevi, B. Seralathan, V. Murugaiyan, 2022
125. Effect of sand cushion reinforced with geogrid on heave of footing rested on expansive soil, Youssef Gomaa Youssef, Gihan Elsayed Abdelrahman, Abdelrahman Emad Abdeltawab, 2023
126. Effect of Waste Glass Powder on the Swelling and Strength Characteristic of Karak Expansive Clay, Bakht Zamin, Hassan Nasir, Asim Farooq, Beenish Jehan, Muhammad Tariq Bashir, 2021
127. Effect on Maximum Dry Density and Optimum Moisture Content of Expansive Soil on Addition of Sawdust Ash, Himani Rai, 2019
128. EFFECTIVENESS OF POLYMER FOR MITIGATION OF EXPANSIVE SOILS, Zana Taher, 2017
129. The Effects of Quartzite on the Swelling Behaviors of Compacted Clayey Soils, Ekrem Kalkan, Necmi Yarbaşı, Özgür Bilici, 2020
130. Effect of RBI-81 on Properties of Black Cotton Soil, Najia Nouf, Sureka Naagesh, 2014
131. Effect of Rice Hush Ash on Lime Stabilized Black Cotton Soil, Prasad Dahale, Vaishali J. Rajurkar, 2014
132. Effectiveness of Two-Stage Stabilization for Improvement of Geotechnical Properties of Expansive Soils,

-
- Charles Lucian, 2018
133. Effects of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, M. Celal Tonož, Resat Ulusay, Candan Gokceoglu, 2004
134. Effective Road Pavement Design for Expansive Soils in Ipswich, Catherine May Caunce, 2010
135. Electrophoretic Mobility of Illite and Micaceous Soil Clays, I. Lebron, D. L. Suarez, 1992
136. Engineering properties of an expansive soil, Azam S., Ito M., Chowdhury R., 2013
137. 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
138. Enhancing the Properties of Expansive Soil Using Biopolymers—Xanthan Gum and Guar Gum, Nikita Keshav, Anuradha Prabhu, Akshata Kattimani, Anjana Dharwad, Chaitra Kallatti & Sanjana Mahalank, 2021
139. Environmental Characteristics of Clays and Clay Mineral Deposits, USGS, 1999
140. ESTABLISHING RELATIONSHIP BETWEEN SWELLING PRESSURE AND FREE SWELL INDEX OF SOILS – A CASE STUDY, A.P.PATIL, D.D.PARKHE, R.V.SHRIGRIWAR, R.V.PANSE, 2016
141. Estimation of Free Swell and Swelling Pressure using Genetic Programming, Vishweshwaran M, Anandha Kumar S, 2019
142. ESTIMATION OF SWELLING PRESSURE USING SIMPLE SOIL INDICES, Kamil KAYABALI, Özgür YALDIZ, 2014
143. 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, 2024
144. EVALUATION AND CLASSIFICATION OF SWELL POTENTIAL USING COMPOSITIONAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING PROPERTIES OF EXPANSIVE SOILS -A REVIEW, M. Selvamsagayaradja, V. Murugaiyan, 2019
145. Evaluation of Damage to a Road and Sports Complex on Expansive Clays, M. B. Mgangir, P. Paige-Green, 2008
146. Evaluation of Improvement Techniques for Strip Foundations on Expansive Clay Soils in Sudan, A.M. El Sharief, I.M. Saeed, 2002
147. Evaluation of predicted equations for Swelling potential Evaluation des équations prédites pour le gonflement potentiel, Hussein Elarabi, 2005
148. Evolution of Foundation Design for Expansive Soils, John D. Nelson, Daniel D. Overton, Kuo-Chieh Chao,
-

2006

149. Expansive and collapsible soil behaviour under the Revised Soil Classification System, R. Ortiz-Hernández, E. Rojas-González, 2024
 150. Expansive and collapsible soils in semi-arid regio, S.SIGNER, F.A.M.MARINHO, N.B.SANTOS, 1989
 151. Expansive clay road Embankments in arid areas: moisture - suction conditions, M J O'Connell, C S Gourley, 1993
 152. Expansive Clay Soil-Structure Interaction: A Case Study, Omer Mughieda, Kenan Hazirbaba, 2015
 153. Expansive Soil Characterisation and Appraisal, Sridharan Asuri, Prakash Keshavamurthy, 2016
 154. Expansive Soil Embankment Filling and Cutting Treatment Technology A Systematic Review, Zhen Huang, Hang Shi, Wei Zhang, Shaokun Ma, Feng Gao, Min Ma, 2022
 155. Expansive Soil Properties in a Semi-Arid Region Muawia A. Dafalla and Mosleh A. Shamrani, 2012
 156. Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume, Ahmed S. A. Al-Gharbawi, Ahmed M. Najemalden, Mohammed Y. Fattah, 2023
 157. Expansive Soil Test Site Near Newcastle, S. G. Fityus, D. W. Smith, M. A. Allman, 2004
 158. Expansive Soil の浸水時の膨張量、膨張圧、せん断強度の変化についての実験的研究, 安原、山根、半沢, D.K.T. Loan, 2000
 159. EXPANSIVE SOILS - IDENTIFICATION, DETECTION AND REMEDIATION STRATEGIES, Emilio M. Morales, Mark K. Morales
 160. Expansive soils engineering geological mapping: applied method in clayey soils of Montevideo, Uruguay, MARCOS MUSSO, OSNI PEJON, 2006
 161. Expansive Soils Failures Overview Multiple Locations, Devon Saunders, 2013
 162. EXPANSIVE SOILS IN NORTH AMERICA, Warren K. Wray, 1994
 163. Expansive Soils of Mississippi, MAFTTES, 1993
 164. Expansive Soils Sally Blackner. What are Expansive Soils? Vertisol Soils, or known as Shrink Swell Soils
Vertisol Soils, or known as Shrink Swell Soils, <https://slideplayer.com/slide/11789163/>
 165. Expansive soils: TRI's research strategy, C S Gourley, D Newill, H D Schreiner, 1993
 166. Expansive soils, A A B Williams, J T Pidgeon, P W Day, 1985
 167. Expansive Soils, J David Rogers, 2013
 168. Expansive Soils, LEGALET, 2011
-

169. Expansive Subgrade Strength Improvement using Geogrid and Geotextile Layers, Jayashree Jayakumar, Jeevanantham Venkatesh, Yamini Roja Selvaraju, 2020
170. Experimental assessment of Swelling potential in montmorillonite soils, J C Pérez, J C Ruge, J P Rojas, J A Orjuela, J R Cáceres, 2021
171. Experimental Studies on Treated Sub-base Soil with Fly Ash and Cement for Sustainable Design Recommendations, M. Jayakumar, Lau Chee Sing, 2012
172. EXPERIMENTAL STUDIES ON UTILIZATION OF MURRUM AS EMBANKMENT MATERIAL, P.Sundar Kumar, M.J.Ratnakanth Babu, 2010
173. Experimental Study of Some Factors Affecting Swelling Pressure, Ahmed M. Elsharief, Magdi M. E. Zumrawi, Ahmed M. Salam, 2014
174. EXPERIMENTAL STUDY ON STABILIZATION OF BLACK COTTON SOIL BY FLY ASH, COCONUT COIR FIBER & CRUSHED GLASS, Amit Tiwari, H.K.Mahiyar, 2014
175. Experimental Study on Swelling Characteristics of Expansive Soil Stabilized by Alkali Residue, Yuyi Liu, Weimin Cong, Yuexin She, Maobai Cao, 2017
176. Experimental study on the engineering properties of expansive soil treated with Al₁₃, Jianbo She, Zheng Lu, Yahui Duan, Hailin Yao¹, Liang Liu, 2020
177. Factors Affecting the Swelling-Compression Characteristics of Clays in Yichang, China, Changxi Huang, Xinghua Wang, Hao Zhou, Yan Liang, 2019
178. Failure Mechanisms and Protection Measures for Expansive Soil Slopes: A Review, Peng Luo, Min Ma, 2024
179. Feasibility Study of Improving Properties of Black Cotton Soil Using Industrial Wastes, Sanjeev Tanaji Jadhav, Sushma Shekhar Kulkarni, 2014
180. FIELD AND LABORATORY EVALUATION OF TYPES OF INTERCEPTING MEDIA USED FOR STRIP FOUNDATION ON EXPANSIVE SOILS, Ahmed M. El Sharief, Ibrahim M.A. Saeed, 2005
181. Field and laboratory Observations of Expansive Soil Heave, M.A Osman, AM. El Shartef, 1987
182. FIELD EXPERIMENTS ON PILES IN THE EXPANSIVE SOILS OF CENTRAL SUDAN, Mohammed A. Osman, Ahmed M. Elsharief, 1999
183. Field study of treatment for expansive soilrock channel slope with soilbags, Sihong Liu, Yang Lu, Liping Weng, Fuqing Bai, 2015
184. FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS OF SLABS ON ELASTIC HALF SPACE EXPANSIVE SOIL FOUNDATIONS, RIFAT BULUT, 2001

185. FINITE ELEMENT MODELING OF LATERAL SWELLING PRESSURE DISTRIBUTION BEHIND EARTH RETAINING STRUCTURES, MUSTAFA AYTEKIN, 1992
186. Flow through and Volume Change Behavior of a Compacted Expansive Soil Amended with Natural Biopolymers, Ahmed Bukhary & Shahid Azam, 2024
187. FLY ASH USED IN BLACK COTTON SOIL ROAD CONSTRUCTION, S.MOHANKUMAR(III-CIVIL)
188. Foundation Design and Analysis Expansive and Collapsible Soils, ENCE 4610
189. FOUNDATIONS IN EXPANSIVE SOILS, UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC), 2004
190. Foundations on Expansive Clay Soil Part 1 – The Science of Expansive Clay, Eric Green, P.E., 2005
191. Foundations on Expansive Soils Sudan Experience, Ahmed M Elsharief, 2012
192. Free swell of compacted plastic soils, Ivan Gratchev, Somayeh Saeidi, 2018
193. General Geotechnical Issues in West Africa -A Case Study of Problematic Soils in the Dalcarr Peninsula (Senegal), Amadou Moctar Sarr, 2002
194. Genesis and Clay Mineralogical Investigation of Highly Calcareous Soils in Semi-Arid Regions of Southern Iran, Mostafa Emadi, Majid Baghernejad, Hamidreza Memarian, Mahboub Saffari and Hamed Fathi, 2008
195. GEOCHEMISTRY OF SERPENTINITE SOILS: A BRIEF OVERVIEW, P. KUMARATHILAKA, C.B. DISSANAYAKE, METHTHIKA VITHANAGE, 2014
196. Geo-Engineering Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash, Bidula Bose, 2012
197. Geological and Engineering Characteristics of Expansive Soils in Western Desert, Egypt, A Elshater, MA Khashab, MA El-Sherif, ES Abu Seif, 2019
198. Geotechnical Aspects of Buildings on Expansive Soils in Kibaha, Tanzania: Preliminary Study, CHARLES LUCIAN, 2006
199. Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust, Ankush Kumar Jain, Arvind Kumar Jha, Shivanshi, 2020
200. Geotechnical profiles of expansive soil hazard for road infrastructure: Case study of Takalar-Jeneponto provincial road corridor, W Hamid, L Samang, T Harianto, A R Djamaluddin, A Arsyad, 2019
201. GEOTECHNICAL PROPERTIES OF EXPANSIVE SOILS IN AWKA AND ENVIRONS, SOUTHEASTERN NIGERIA, IN RELATION TO ENGINEERING PROBLEMS, P. O. Ogbuchukwu, O.C. Okeke1, C.A. Ahiarakwem, O.O. Ozotta, 2019
202. Getting Control of Expansive Soil, <http://www.foundation-repair-guide.com/expansive-soil.html>, 2013

203. GIS and geotechnical mapping of expansive soil in Toshka region, Mary Labib, Amani Nashed, 2013
204. Grafting of Swelling Clay Materials with 3-aminopropyltriethoxysilane, Hongping He, Jannick Duchet, Jocelyne Galy, Jean-François Gerard
205. Groundnut Shell Ash Stabilization of Black Cotton Soil, Oriola, Folagbade, Moses, George, 2010
206. Guidelines for the Design of Bored Concrete Piles in Expansive Soils of Sudan, El Sharief A.M, Ahmed E.O., Mohamedzein Y.E.A., 2007
207. Guidelines to Identify and Quantify Expansive Soils in Civil Infrastructure, Marcos Musso, 2014
208. Heterogeneous uptake of the C1 to C4 organic acids on a Swelling clay mineral, C. D. Hatch, R. V. Gough, and M. A. Tolbert, 2007 INFLUENCE OF DRYING PROCESS OF CLAYEY SOILS ON THE CATION EXCHANGE CAPACITY, SAOUSSEN LARIBI, MARTINE AUDIGUIER, ROGER COJEAN, 2009
209. Identification and prediction of the Swelling behaviour of some soils from the Tlemcen region of Algeria, Abdelkader DJEDID, Sidi Mohammed AISSA MAMOUNE, Abdelmalek BEKKOUCHE, 2001
210. Identification of Expansive Soils and Improving Geotechnical Properties Using Gypsum and Sand, Dr. Jagdish Prasad, Dr. D.G.M. Purohit, Dr. Sunil Sharma, 2017
211. Identification of potentially expansive soils causing longitudinal cracks along pavement shoulder in central Thailand, A. Sawangsuriya, A. Jotisankasa, B. Vadhanabhuti & K. Lousuphap, 2011
212. Improved Performance of Soils Stabilized With FBC Ash, Guillermo Thenoux, Loreto Acevedo, Aleli Osorio, Marcelo González, 2009
213. Improvement in CBR of the Expansive Soil Subgrades with a Single Reinforcement Layer, A.J.(Choudhary, J.N.Jha, S.K. Shukla, 2012
214. Improvement of Black Cotton Soil with Ordinary Portland Cement - Locust Bean Waste Ash Blend, K. J. Osinubi, M. A. Oyelakin, A. O. Eberemu, 2011
215. Improvement of C.B.R in Black cotton Soil having high Salinity using different Materials As a Case Study: Bhavnagar-Dholera State Highway No- 6, Vismay J shah, Abhijitsinh Parmar, Ankit Patel, 2013
216. IMPROVEMENT OF EXPANSIVE CLAY BY DEEP IN-SITU TECHNIQUE, B. Venkataswamy, S.R. Gandhi, K.S. S.-inivas, K.V. Sanghavi, 2003
217. IMPROVEMENT OF EXPANSIVE SOIL BY LIME AND REINFORCEMENT, D. Baglari, S.K. Das, 2013
218. Improvement of Expansive Soils Stabilized with Rice Husk Ash (RHA), Daryati, M A Ramadhan, 2020
219. Improving Subgrade Properties of Expansive Soils Using Bottom Ash and lime, Faiqa Farooq, Murtaza Hasan, 2023

220. Improving the Characteristics of Expansive Soil Using Coarse-grained Soil, Sherif M. ElKholy, 2008
221. Improving The Engineering Properties of Expansive Clayey Soils by Adding Biopolymer-A Review, Sondos Kareem Al-mousawi, Shaimaa Hasan Fadhil, 2024
222. IN EVALUATION OF METHODOLOGY FOR PREDICTION AND MINIMIZATION OF DETRIMENTAL VOLUME CHANGE OF EXPANSIVE SOILS IN HIGHWAY SUBGRADES, Vol. I. Research Report, Donald R. Snethen, 1979
223. INDIRECT ESTIMATION OF SWELLING PRESSURE FROM ROUTINELY DETERMINED GEOTECHNICAL PARAMETERS, MIRCEA ANICULĂESI, IRINA LUNGU, FLORIN BEJAN, 2020
224. Influence of Chemical Admixtures on Geotechnical Properties of Expansive Soil, R. Suresh, V. Murugaiyan, 2021
225. Influence of Clay Content and Montmorillonite Content on Swelling Behavior of Expansive Soils, Peddireddy Sreekanth Reddy, Bijayananda Mohanty, Bendadi Hanumantha Rao, 2020
226. INFLUENCE OF DRYING PROCESS OF CLAYEY SOILS ON THE CATION EXCHANGE CAPACITY, SAOUSSEN LARIBI, MARTINE AUDIGUIER, ROGER COJEAN, 2009
227. Influence of foundation embedding on clays shrinkage-Swelling hazard consequences, E. Jahangir, O. Deck & F. Masrouri, 2011
228. INFLUENCE OF GEOFABRICS IN THE CONSTRUCTION OF PAVEMENTS ON EXPANSIVE CLAYEY SUBGRADES, A. V. Narasimha Rao, D. Neeraja, 2012
229. INFLUENCE OF MINERAL ADMIXTURES ON EXPANSIVE SOIL, S.Pachaiappan, Dr.V.Murugaiyan, R Prethiv Kumar, M Dhavud Tharik, R Muralidharan, 2017
230. Influence of Soil Suction on Swelling Pressure of Bentonite-Sand Mixtures, Mohammed Y. Fattah, Nahla M. Salim, Entesar J. Irshayid, 2017
231. INFLUENCE OF SWELL ON SHEAR STRENGTH OF EXPANSIVE SOILS, CEREN DELIKTAS, 2016
232. Inhibition effect of Swelling characteristics of expansive soil using cohesive non-Swelling soil layer under unidirectional seepage, Hailin Yao, Jianbo She, Zheng Lu, Xingwen Luo, Shaohua Xian, Ran Fang, Zhenzhong Chen, 2020 La sécheresse géotechnique, Cojean Roger, 2007
233. Investigation of Construction Practices and Test Procedures for Road Pavements on Expansive Subgrades VOLUME I of III, Kieren Ashley Walters, 2008
234. Irrigation and Expansive Soils, <https://www.irrigationtutorials.com/faq/expansive-soil.htm>, 2013
235. Kao's agent for expansive soil, PT. Kao Indonesia Chemicals(KIC) Koji Nagasawa, 2024
236. La sécheresse géotechnique, Cojean Roger, 2009

237. Laboratory characterization of clayed soils to shrinkage-Swelling susceptibility, Audiguier Martine, Geremew Zemenu, Laribi Saoussen, Cojean Roger, 2009
238. Lime Chemical Stabilization of Expansive Deposits Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt Hesham A. H. Ismaiel¹, Mohamed M. Badry, 2013
239. Lime Stabilization Effects on Geotechnical Properties of Expansive Soils in Amman, Jordan, EmadAkawwi, Atef Al-Kharabsheh, 2000
240. Lime Stabilization of Expansive Soils, Joseph Desire Muhirwa, Richard Benda, Robert Sargent, Aravind Pedarla, Dr Anand Puppala, 2011
241. Lime Stabilization of Tropical Soils from Sudan for Road Construction, Ahmed M. Elsharief, Adil A. M. Elhassan, Awad E. M. Mohamed, 2013
242. Liquid–crystalline aqueous clay suspensions, Laurent J. Michot, Isabelle Bihannic, Solange Maddi, Se’rgio S. Funari, Christophe Baravian[§], Pierre Levitz, Patrick Davidson, 2006
243. Longitudinal Stress Analysis of Buried Pipes under Expansive Soils, Yves Elie Abou Rjeily, Michel Farid Khouri, 2014
244. Measurements of Shrinkage Induced Pressure (SIP) in Unsaturated Expansive Clays, A.J. Puppala, T. Wejrungsikul, V. Puljan¹ and T. Manosuthikij, 2012
245. Mechanism and Engineering Characteristics of Expansive Soil Reinforced by Industrial Solid Waste: A Review, Jianhu Wei, JianmengWei, Qijun Huang, Sheikh Mohd Iqbal Bin S. Zainal Abidin, Zhenjie Zou, 2023
246. Methods for assessment and identification of dispersive soils, DJOKOVIĆ Ksenija, ČAKI Laslo, ŠUŠIĆ Nenad, HADŽI-NIKOVIĆ Gordana, 2018
247. Methylene blue adsorption method: influence of protocol parameters on the blue value as a function of clay mineralogy, Saoussen Laribi, 2009
248. MITIGATING THE EXPANSIVE BEHAVIOR OF CHEMICALLY TREATED SOILS, Sochan Jung, Maria Caterina Santagata, 2009
249. Mitigation of Expansive Soils Damages, Joseph Muhirwa, Richard Benda, Robert Sargent
250. Modified Free Swell Index for Clays, Puvvadi V. Sivapullaiah, Thallak G. Sitharam, Kanakapura S. Subba Raol, 1987
251. Modifying Expansive Soil Characteristics with Xanthan Biopolymer Integration, Pragya Gupta, Ushendra Kumar, 2024
252. Moisture and Dry Density Influence on Compacted Clay and Clay-Sand Mixtures, Bahia Louafi, Muawia A. Dafalla, 2022

253. Montmorillonite Content of Expansive Soils and Its Relationship with Swelling and Consistency Properties, P. Sreekanth Reddy, Bijayananda Mohanty, and B. Hanumantha Rao, 2022
254. Na・Ca混合溶液の飽和浸透に伴うベントナイトと有明粘土の透水性変化について, 宮本英揮, 取出伸夫, 2000
255. Numerical Modeling of Flexible Pavement Constructed On Expansive Soils, Mostafa Deep Hashem, Ahmed Mousa Abu-Baker, 2013
256. Neural networks based linear (PCA) and nonlinear (ISOMAP) feature extraction for soil Swelling pressure prediction (North East Algeria), Bahloul Ouassila, Tebbi Fatima Zohra, Lekouara Laid, Bekhouche Hizia, 2023
257. Optimization of the Atterberg Limits on expansive soil stabilized with chitosan biopolymer, Dimas Aldie Firmansyah, Andri Krisnandi Somantri, Atmy Verani Rouly Sihombing, Asep Sundara, Lindung Zalbuin Mase, 2024
258. Parameters Influencing Stabilisation of Black Cotton Soils with Lime, B.R. Malhotra, A V.S.R. Murty, Deep Chandra, 1987
259. Pengaruh Biopolimer Pada Stabilitas Lereng Swelling soil, Dewi Amalia, Bagus Guritno, Hendry, Geni Firuliadhim, 2021
260. Performance Evaluation of Cement and Slag Stabilized Expansive Soils, Masrur Mahedi, Bora Cetin, and David J. White, 2018
261. Performance, Problems and Remedial Measures for Roads Constructed on Expansive Soil in Ethiopia – A Review, Bantayehu Uba Uge, 2017
262. Physical stabilization of expansive subgrade soil using locally produced geogrid material, Samson Yonas Aga, 2021
263. Physico-chemical and Mineralogical Changes in the Formation of Black Cotton Soils from Basalts in India, G. S. Mehrotra, R. S. Mithal, 1987
264. Physico-chemical Properties of Expansive Soils from Sudan and their Effects on Intrinsic Swelling and Shrinkage, Ahmed M Elsharief, Suhad E. Mustafa, 2012
265. Potassium Chloride Treatment to Control Alkali Induced Heave in Black Cotton Soil, P. V. Sivapullaiah, P. Hari Prasad Reddy, 2010
266. PRACTICAL AID TO IDENTIFY AND EVALUATE PLASTICITY, SWELLING AND COLLAPSIBILITY OF THE SOIL ENCOUNTERED IN BADRAH, SHATRA AND NASSIRYA CITIES, Abbas Jawad Al-Taie, 2016
267. Practical Problems of Highway Construction in Black Cotton Soil Areas and In-Place Remedial Measures:

-
- A Case Study, Dr. S.S.Seehra, 2008
268. Predicting Soil Swelling Potential Using Soil Classification Properties, Victor H. R. Barbosa, Maria E. S. Marques, Antônio C. R. Guimarães, 2023
269. PREDICTING SWELLING/SHRINKAGE POTENTIAL USING THE BLUE METHYLENE METHOD: SOME EXAMPLES IN ITALIAN CLAYEY SOILS, Meisina Claudia, 2000
270. Prediction of expansive soil based on the coefficient of linear extensibility (COLE), Charles Lucian, 2016
271. Prediction of Free Swell Index for the Expansive Soil Using Artificial Neural Networks, R.K Dutta 1 , A Singh, T Gnananandarao, 2019
272. Prediction of lateral Swelling pressure behind retaining structure with expansive soil as backfill, Yunlong Liu, Sai K. Vanapalli, 2019
273. PREDICTION OF THE VARIATION OF SWELLING PRESSURE AND 1-D HEAVE OF EXPANSIVE SOILS WITH RESPECT TO SUCTION, Hongyu Tu, 2015
274. Prediction of Soil Swelling Parameters, Jan Pruska, Miroslav Sedivy, 2015
275. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index, Ireneusz Gawriuczenkow, Emilia Wójcik, 2018
276. PREDICTION OF SWELLING BEHAVIOR OF EXPANSIVE SOILS USING MODIFIED FREE SWELL INDEX, METHYLENE BLUE AND SWELL OEDOMETER TESTS, AMIR JALEH FOROUZAN, 2016
277. PREDICTION OF SWELLING CHARACTERISTICS OF EXPANSIVE SOILS, Magdi M. E. Zumrawi, 2012
278. PREDICTION OF SWELLING IN EXPANSIVE CLAYS, Robert L. Lytton, W. Gordon Watt, 1970
279. PREDICTION OF SWELLING PARAMETERS OF TWO CLAYEY SOILS FROM ALGERIA USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, FATIMA ZOHRA MEROUANE, SIDI MOHAMED AISSA MAMOUNE, 2018
280. Prediction of Swelling Pressure and Factors Affecting the Swell Behavior of an Expansive Soil, YOUSRY M. MOWAFY, GUNTHER E. BAUER, 1985
281. Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index, Ireneusz Gawriuczenkow, Emilia Wójcik, 2018
282. PREDICTION OF SWELLING PRESSURE OF EXPANSIVE SOILS USING COMPOSITIONAL AND ENVIRONMENTAL FACTORS, Sudha Rani, 2013
283. PREDICTION OF THE VARIATION OF SWELLING PRESSURE AND 1-D HEAVE OF EXPANSIVE
-

-
- SOILS WITH RESPECT TO SUCTION, Hongyu Tu, 2015
284. Prediction of Volumetric Shrinkage in Expansive Soils (Role of Remote Sensing), Fekerte Arega Yatagesu, Freek van der Meer, Harad van der Werff, 2009
285. Preliminary Investigation Regarding Swelling Behaviour of Soil of Southern Region of KPK, Pakistan, Zia ur Rahman, Irshad Ahmad, Fayaz Ahmad Khan, Wuheed ur Rehman, 2015
286. Problem Soils_A Home Buyer's Guide to Geologic Hazards in Arizona, 2002
287. Problematic soil mechanics in the Algerian arid and semi-arid regions Case of M'sila expansive clays, Mohamed Khemissa, Abdelkrim Mahamedi, Lakhdar Mekki, 2015
288. PROBLEMS DUE TO EXPANSIVE SOILS AND THEIR REMEDIES, S. Siva Gowri Prasad, P.V.V. Satyanarayana, 2022
289. Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units, Pamela Jo Thomas, 1998
290. RELATION SHIP BETWEEN TWO CLAYEY SOILS MICROSTRUCTURES OF PARIS AREA AND THEIR SHRINKAGE - SWELLING SUSCEPTIBILITY, Martine AUDIGUIER, Zemenu GEREMEW, Roger COJEAN, 2009
291. Relationship between Consolidation and Swelling Characteristics of Expansive Soils of Addis Ababa, Mesfin Kassa, 2005
292. RELATIONSHIPS OF SPECIFIC SURFACE AREA AND CLAY CONTENT TO SHRINK.SWELL POTENTIAL OF SOILS HAVING DIFFERENT CLAY MINERALOGICAL COMPOSITIONS, G. J. ROSS, 1978
293. RELATIVE PERFORMANCE OF VPW & GGBS IN IMPROVING EXPANSIVE SOIL SUBGRADES, K. Uppiah, G.V.R. Prasada Raju, G. Radhakrishnan, R. Dayakar Babu, 2013
294. REMOTE SENSING AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF EXPANSIVE SOILS, Fekerte Arega Yitagesu, 2012
295. Research into Treatment Theory and Technique for Expansive Soil Geological Disasters, Xian-min LI, Yan-hui LIANG, Peng ZHANG, Yon
296. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil, Linchang Miao, Songyu Liu, Yuanming Lai, 2002
297. Residential House Foundations on Expansive Soils in Changing Climates, Nafisa Tabassum, Rifat Bulut, 2022
298. Response of High Swelling Montmorillonite Clays with Aqueous Polymer, Guru Prasad Panda, Alireza Bahrami, T. Vamsi Nagaraju, Haytham F. Isleem, 2023
-

299. Review of classification methods to determine expansion degree of expansive soils in Indonesia, Christy A Putri, Widjojo A Prakoso, Wiwik Rahay, 2023
300. Review of Oedometer Method for Predicting Heave on the Expansive Soil, Willis Diana, Agus Setyo Muntohar , Anita Widiarti, 2020
301. REVIEW PAPER Heave Prediction Techniques and Design Consideration on Expansive Soils, Abdulmohsin W. Dhowian, 1990
302. Risk prevention related to shrink/swell hazard: an experience useful for other natural hazards, Marcel Toulemont, Roger Cojean, 2009
303. SEPARATION OF SWELLING CLAY MINERALS BY A CENTRIFUGAL METHOD, DARRELL C. BUSH, RALPH E. JENKINS, STANLEY B. McCALEB, 1966
304. 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
305. Simplified reliable prediction method for determining the volume change of expansive soils based on simply physical tests, Hossam Elbadry, 2017
306. SIMULATION OF SWELLING PRESSURE MEASUREMENTS ON EXPANSIVE SOILS, Fangsheng Shuai, 1996
307. Slope Stabilization by use of Geosynthetics in Clay Shale Formation, Tje-Liong Gouw, Anthony Gunawan, 2019
308. Soil chart, new evaluation method of the Swelling-shrinkage potential, applied to the Bahlui's clay stabilized with cement, Stanciu A., Aniculaesi M., Lungu I., 2013
309. Soil Expansivity in the Auckland Region, B.J. Brown, P.R. Goldsmith, J.P.M. Shorten, L. Henderson, 2003
310. SOIL PHYSICAL PROCESSES OF GROUNDWATER RECHARGE THROUGH INDIAN BLACK COTTON SOILS, MG HODNETT, JP BELL, 1981
311. SOIL STABILIZATION WITH FLYASH AND RICE HUSK ASH, ROBERT M. BROOKS, 2009
312. Soil-water characteristic curve of expansive soils considering cumulative damage effects of wetting and drying cycles, Yunlong Liu, Yingao Zhao, Sai K. Vanapalli, Mudassir Mehmood, 2024
313. Stabilisation of Black Cotton Soil Using Admixtures, Pankaj R. Modak, Prakash B. Nangare, Sanjay D. Nagrale, Ravindra D. Nalawade, Vivek S. Chavhan, 2012
314. Stabilization of Expansive Soil Using Agar Biopolymer, Naman Kantesaria, Piyush Chandra, Ajanta Sachan, 2021
315. STABILISATION OF SULFATE-BEARING SOILS, Britpave, 2005

316. 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
 317. Stability of Swelling clay embankments, R. A. WIDGER, D. G. FREDLUND, 1979
 318. Stabilization of Black Cotton Soil with Lime and Geo-grid, Sujit Kawade, Mahendra Mapari, Shreedhar Sharanappa, 2014
 319. Stabilization of black cotton soil by Fly Ash, Ashish Mehta, Kanak Parate, B. S. Ruprai, 2013
 320. Stabilization of Black Cotton Soil using Alkali Activated Fly Ash, Prashant Hiremath, Geetanjali Patil, 2016
 321. Stabilization of an expansive overconsolidated clay using hydraulic binders, Abdelkrim Mahamedi, Mohamed Khemissa, 2014
 322. STABILIZATION OF EXPANSIVE SOIL MIXTURE USING HUMAN HAIR FIBRE (BIOPOLYMER), Imane IDOUI, Souhila Rehab BEKKOUCHE, Riad BENZAID, Inas BERDI, 2024
 323. Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review, Armand Augustin Fondjo, Elizabeth Theron, Richard P Ray, 2021
 324. Stabilization of Expansive Soil Using Waste Ceramic Dust, Akshaya Kumar Sabat, 2012
 325. STABILIZATION OF EXPANSIVE SOILS USING COHESIVE NON-SWELLING SOIL (CNS), DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, UET LAHORE
 326. Stabilizing Potential of Cement and Fly Ash Mixture on Expansive Oay Soil, O.O. Amu, A.B. Fajobi and S.O. Afekhuai, 2005
 327. State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners, De-Jun Kong, Huai-Na Wu, Jin-Chun Chai, Arul Arulrajah, 2017
 328. Steps to Improve Roads on Black Cotton Soils, D V Bhavanna Rao, 2007
 329. Strength and FOS Performance of Black Cotton Soil Treated with Calcium Chloride, K.V. Manoj Krishna, H.N.Ramesh, 2012
 330. STRENGTH BEHAVIOUR OF EXPANSIVE SOILS TREATED WITH CaCl₂ AND LIME, Kumar R.P. Bhyravavajhala, 2000
 331. Strength Characteristics of Expansive Soil and Murrum Using Quarry Dust, Shyam Prakash Koganti, Hanumantha Rao Chappidi, 2016
 332. Structure Damage Due to Expansive Soils a Case Study, Beni Lew, 2010
 333. Studies of Swell and Swell Pressure Characteristics of Compacted Clays H. B. SEED, J. K. MITCHELL, and C. K. CHM, 1962
-

334. Studies on Hydration Swelling and Bound Water Type of Sodium and Polymer-Modified Calcium Bentonite, Yong Wan, Dongdong Guo, Xinminnan Hui, Lei Liu, Yuan Yao, 2020
335. Study of Geotechnical properties of black cotton soil contaminated by castor oil and stabilization of contaminated soil by sawdust, Ms. Arpita V Patel, 2011
336. STUDY OF SWELLING BEHAVIOUR OF BLACK COTTON SOIL IMPROVED WITH SAND COLUMN, Aparna, P.K. Jain, Rakesh Kumar, 2014
337. STUDY ON HEAVE CHARACTERISTICS OF BLACK COTTON SOILS USING COPPER SLAG WITH CEMENT AS ADMIXTURE
338. Study on shear strength and Swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil, Ling-wei Kong, Luo-rong Tan, 2000
339. Study on Swelling soil behaviour and its improvements, Harishkumar. K, K. Muthukkumaran, 2011
340. Study on use of chemically stabilized native expansive soil as cohesive non-Swelling material, Venkata Naga Laxma Naik Kethavathu, Thanusree Avineni, Sudharani, Chigurupati, 2021
341. Suction - Swelling relations for Warsaw clays, Z. Skutnik, K. Garbulewski, 2005
342. Suction and Swelling behavior of clayey soils in the presence of seawater, Hasan Firat Pulat, Yeliz Yukselen-Aksoy, 2011
343. Suitability of Black Cotton (Clay) Soil Stabilized with Cement And Quarry Dust for Road Bases and Foundations, Akanbi, D.O., Job, F.O., 2014
344. Surface Deformation of Expansive Soil at Ankang Airport, China, Revealed by InSAR Observations, Shuangcheng Zhang, Jinzhao Si, Yufen Niu, Wu Zhu, Qianyou Fan, Xingqun Hu, Changbo Zhang, Peng An, Zhipeng Ren, Zhenhong Li, 2022
345. Sustainable Improvement of Expansive Clays Using Xanthan Gum as a Biopolymer, Jayaprakash Reddy Joga, B.J.S. Varaprasad, 2019
346. Swell - Shrink Behaviour of Expansive Soils Under Stabilized Fly Ash Cushions, A.Srirama Rao, M.Rama Rao, 2008
347. Swell and compressibility characteristics of expansive clays in north Cyprus, Anoosheh Iravanian, Amr Abdeh, 2019
348. SWELLING AND CONSOLIDATION BEHAVIOR OF PALM LEAVES FIBER- REINFORCED EXPANSIVE SOIL, Houda Laaroussi, Noriyuki Yasufuku, Ishikura, 2019
349. Swelling and Gelatinization of Cereal Starches, II. Waxy Rice Starches, RICHARD F. TESTER, WILLIAM R. MORRISON, 1990

- 350. SWELLING AND RESIDUAL STRENGTH CHARACTERISTICS OF SOILS BASED ON A NEWLY PROPOSED PLASTIC RATIO CHART, T AKAO SAITO, GOSABURO MIKI, 1975
- 351. Swelling Behavior of the Expansive Soil Prepared with Calcium Bentonite, Khurram Kirmani, Kausar Ali, M. A. Khan, 2021
- 352. SWELLING CHARACTERISTICS OF COMPACTED EXPANSIVE SOILS, N. V. NAYAK, R. W. CHRISTENSEN, 1971
- 353. Swelling Characteristics of Saudi Tayma Shale and Consequential Impact on Light Structures, Muawia A. Dafalla, Mosleh A. Al-Shamrani, 2014
- 354. Swelling clay against basement wall, Earth retention engineering Forum, 2006
- 355. Swelling Clay Mapping For Characterizing Expansive Soils; Results From Laboratory Spectroscopy and Hysens Dais Analysis, P. C. Kariuki, F.D. van der Meer, 2003
- 356. Swelling Clays and Septic Systems, Jennifer Krenz, Brad Lee, and Phillip Owens, 2006
- 357. SWELLING PERFORMANCE OF SOME EXPANSIVE SOIL TREATMENT TECHNIQUES, Mohamed Youssef Abd El-Latif, 2008
- 358. Swelling potential and Swelling pressure calculation methods: A comprehensive review, Hawkar Ibrahim, Rizgar Hummadi, 2025
- 359. SWELLING PRESSURE STUDY OF GEOPILE REINFORCED BLACK COTTON SOIL USING FREE SWELL METHOD AND CONSTANT VOLUME METHOD, Anu Mary Jacob, Ajitha Bhaskar, 2009
- 360. Swelling Properties of an Unsaturated Expansive Soil Deposit, Imran Shah, Regina, Saskatchewan, 2011
- 361. Swelling Properties of Expansive Soils Treated with Chemicals and Flyash, G Radhakrishnan, M Anjan Kumar, GVR Prasada Raju, 2014
- 362. Swelling Stress of Bentonite: Thermodynamics of Interlayer Water in K-Montmorillonite in Consideration of Alteration, Misato Endo, Haruo Sato, 2024
- 363. Technical and Economical Viability of Lime Stabilization of Expansive Soils for Road construction in Sudan, A. M. ELSharief, Sumaya Ahmed Mohamed, 2000
- 364. THE CHALLENGES POSED BY PROBLEM SOILS ON THE PERFORMANCE OF ROAD PAVEMENTS: REVIEW OF A TANZANIAN MANUAL FOR PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS, RICHARD ROBERT MWAIPUNGU, SABRY AHMED, 2017
- 365. The Cupolex Solution, Abhimanyu Mam, 2016
- 366. The Effect of Cu (II) on Swelling and Shrinkage Characteristics of Sodium Bentonite in Landfills, Guiyuan Xiao, Guangli Xu, Tongzhong Wei, Jian Zeng, Wenjun Liu, Lu Zhang, 2021

-
367. The Effect of Osmotic Pressure on Improve Oil Recovery from Fractured Shale Formations, Perapon Fakcharoenphol, Hossein Kazemi, Sarinya Charoenwongsa, Yu-Shu Wu, 2014
368. The Effect of Water Content Change and Variation Suction in Behavior Swelling of Expansive Soil, Agus Tugas Sudjianto, Kabul Basah Suryolelono, Ahmad Rifa'i, Indrasurya B Mochtar, 2011
369. The Effects of Quartzite on the Swelling Behaviors of Compacted Clayey Soils, Ekrem Kalkan, Necmi Yarbaşı, Özgür Bilici, 2020
370. THE ENGINEERING CHARACTERISTICS OF BLACK COTTON SOIL TREATED WITH CORN STRAW ASH., M. T. Audu, D. N. Mbaezue, S. Dauda, 2019
371. THE EXPERIENCE IN PERFORMING HIGH EMBANKMENT WORKS USING EXPANSIVE SOILS IN INDONESIA, Hiraki Hoshikawa, Akio Watanabe, Masamichi Tagaki, Junji Hori, 1999
372. The Influence of Matric Suction on the Shear Strength of Highly Plastic Compacted Swelling Clays, Ahmed M. Elsharief, Omaima A. Abdelaziz, Mohamed A. Dafallaa, 2015
373. The Mode of Formation, Nature and Geotechnical characteristics of Black Cotton Soils - A Review, Gidigas S. S. R, Gawu S. K. Y, 2013
374. The place of expansive clays in the framework of unsaturated soil mechanics, Stephen Fityus, Olivier Buzzi, 2008
375. THE PREDICTION OF SWELL PERCENT AND SWELL PRESSURE BY USING NEURAL NETWORKS, Yusuf Erzin, Nazmi Güneş, 2011
376. THE PROPERTIES OF THE BLACK EARTHS OF HAWAII, Martin Eusebio Raymundo, 1965
377. The Role of Mathematical Models in Responding To Pavement Failures and Distresses in Texas, Azhar A. Majeed, Enstar M. Kafi, 2019
378. THE SHRINKAGE PROPERTIES OF CLAY SOILS FROM SUDAN, Ahmed M. ELSHARIEF¹, Husham H. RAHMATALLA, 2007
379. THE SWELLING OF EXPANSIVE SUBGRADE AT WATESPURWOREJO ROADWAY, STA. 8+127, Agus Setyo Muntohar, 2006
380. THE SWELLING PROPERTIES OF SOIL ORGANIC MATTER AND THEIR RELATION TO SORPTION OF NON-IONIC ORGANIC COMPOUNDS, WILLIAM G. LYON, DAVIDE. RHODES, 1991
381. The unique relationship between swell percent and swell pressure of compacted clays, Yusuf Erzin, N. Gunes, 2013
382. The use of CPT to predict the load carrying capacity of piles in expansive soils of Sudan, Ahmed M. Elsharief, Elfateh O. Ahmed, Yahia M. Mohamedzein, 2005
-

- 383. The Use of Geogrids in Mitigating Pavement Defects on Roads Built over Expansive Soils, Richard Shumbusho, Gurmel S. Ghataora, Michael P.N. Burrow¹, Digne R. Rwabuhungu, 2021
 - 384. Thermomechanics of Swelling unsaturated porous media Compacted bentonite clay in spent fuel disposal, Petri Jussila, 2007
 - 385. TIMBER PILE FOUNDATIONS FOR EXPANSIVE SOILS, Stephen G. Fityus, Mark G. Delaney, 2000
 - 386. Treatment for Expansive Soil Channel Slope with Soilbags, Sihong Liu, Fuqing Bai, Yisen Wang, Shan Wang, Zhuo Li, 2013
 - 387. Treatment of Expansive Subgrade Soils Using Lime and Fly Ash, Omer Siddig Mustafa Hamza, 2014
 - 388. Treatment of soil Swelling using geogrid reinforced columns, RAID R. AL-OMARI, MOHAMMED Y. FATTAH, HAIFAA A. ALI, 2016
 - 389. TROUBLE-FREE Foundations for Expansive Soils, David McMahon, 2002
 - 390. Unconfined Strength of Compacted Black Cotton Soils from Sudan, El Sharief A.M., 2011
 - 391. Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review, Samuel Y. Amakye, Samuel J. Abbey, 2021
 - 392. Use of fly ash in black cotton soil for road construction, Rajendra Prasad Hardaha, M LAgrawal, Anita Agrawal, 2013
 - 393. UTILIZATION OF CRUSHED STONE DUST AS A STABILIZER FOR SUB GRADE SOIL: A CASE STUDY IN JIMMA TOWN, Jimma, ETHIOPIA, 2019
 - 394. Utilization of Waste Incineration Bottom Ash to Enhance Engineering Properties of Expansive Subgrade Soils, Damtew Tsige Melese, 2022
 - 395. VALUE ENGINEERING IN ROAD CONSTRUCTION AT EXPANSIVE SOIL PROBLEM, HARDIANSYAH PUTRA, 2012
 - 396. VARIOUS ASPECTS OF EXPANSIVE SOILS RELEVANT TO GEOENGINEERING PRACTICE Simple Correlations Between Soil Plasticity and Expansion Potential, Advanced Engineering Geology & Geotechnics Spring, 2004
 - 397. VERTISOLS, ISRIC-World Soil Information
 - 398. VOLUME CHANGE AND SWELLING PRESSURE OF EXPANSIVE CLAY IN THE CRYSTALLINE SWELLING REGIME, ALEXANDRA WAYLLACE, 2008
 - 399. Water content – void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils, S. Tripathy, K.S. Subba Rao, D.G. Fredlund, 2002
 - 400. What are Expansive Soils? Jeffrey P. Kerrane, 2005
-

-
401. インドネシアの膨潤性地盤に建つ生産施設の基礎地業, 西正晃・八重樫光・杉山誠, 2007
402. インドネシアの膨張土対策に関する考察 一膨張性粘土の性状, 國津博昭・片上典久, 2013
403. インドネシア国膨張性粘土及び軟弱地盤地域におけるインフラ被害への多孔質コンクリート製品導入案件化調査, JICA, 北海道ポラコン株式会社, 2023
404. インドのブラックコットン土, D. Mohan, R.K. Bhandari, 1978
405. インド貨物専用鉄道プロジェクト 西回廊, 藤原亮太・江口聡・ダン・トゥアン・ハイ, 2016
406. ごみ焼却ボトムアッシュの活用による増強膨張性路床土壌の工学的性質, Damtew Tsige Melese, 2022
407. ジャカルタ近郊の建物建設におけるライムストーン置換による膨張性地盤の対策工法と効果確認実験, 中島均・浅香美治・内山伸・齋藤亮・小森崇, 2018
408. ジャカルタ近郊の膨張性地盤に建つ生産施設の1階床のレベル計測, 浅香美治・中島均・小森崇・山田学, 2016
409. 各種ベントナイトのコンシステンシー特性およびその他の基礎的特性に関する研究, 水野克己・近藤三二・嘉門雅史, 2003
410. 基千電阻率法的膨張土吸水膨張過程中結構変化定量研究, 查甫生・劉松玉・杜延軍・崔可銳, 2008
411. 黒綿土の改質について, 深見文哉・秋山祥克・酒巻克之・菅野由人・小林瑞穂・宮木康二, 2024
412. 焼却炉灰処理された膨張土壌の特性評価, A・A・アル・ラウス, 2004
413. 道路の維持管理とその課題 ーケニアの道路維持管理の現状からー, 浅野英一, 2001
414. 道路土工におけるベントナイト性土の土質化学的検討(予報), 喜田大一・辻博和, 1972
415. 発明特許No.: CN 102168430 B, 一種減小膨張岩土地区挡土墙土压力的方法(膨張性岩土地域における擁壁土圧を低減する方法), 発明者: 劉斯宏・王柳江・高英・方敏華・劉方超, 2014
416. 不攪乱粘土試料の一次元膨潤圧特性とその異方性, 小西純一・鈴木素之・三須尊洋・甲斐康広・藤井公博, 2010
417. 米国ニューオリンズにおける堤防嵩上げのための深層混合処理工とモンモリロナイト系現地粘土のセメント攪拌特性, 野津光夫・榊原優・松下和紀・中井則, 2012
418. 膨潤性粘土鉱物について ー水太りする鉱物のはなしー, 開発土木研究所 地質研究室, 1995
419. 膨張土膨張特性的変化規律研究, 譚羅榮・孔令偉, 2004
-

H1.2 試験方法

1. DETERMINATION OF FREE SWELL INDEX OF SOILS IS: 2720 (Part40) 1997
2. IS 9451: 1994 GUIDELINES FOR LINING OF CANALS IN EXPANSIVE SOILS (Second Revision), 2003
3. 産総研におけるベントナイトのメチレンブルー吸着量測定方法, 堀内悠, 高木哲一, 2012

H1.3 設計基準、マニュアル、ガイドライン

1. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils, Raja S. Madhyannapu, Anand J. Puppala, 2014
2. DESIGN AND CONSTRUCTION OF AIRPORT PAVEMENTS ON EXPANSIVE SOILS, R.GORDON McKEEN, 1976
3. Design Consideration of Pavements on Expansive Clay Soils of Sudan, Ahmed Mohammed ElSharief, Sunwya Ahmed Mohamed, 2001
4. Design of Deep Soil Mixing Columns for Mitigation of Heave, Anand J. Puppala, Raja Sekhar Madhyannapu, Soheil Nazarian, 2008
5. DESIGN OF PIER FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, John D. Nelson, Kuo-Chieh Chao, Daniel D. Overton, 2007
6. Design of Support System for Excavation in Black Cotton Soils in Guntur, India, D Neelima Satyam, Manne Akhila, 2012
7. DESIGN PRINCIPLES FOR FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, Kuo-Chieh Chao, 2007
8. DETERMINATION OF FREE SWELL INDEX OF SOILS IS: 2720 (Part40) 1997
9. Expansive soil handling for road, construction, GUIDE Construction and Building Pd T-10-2005-B, PUBLIC WORKS DEPARTMENT, 2005 (Penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan, PEDOMAN Konstruksi dan Bangunan Pd T-10-2005-B, DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM)
10. Expansive soil treatment with geomembrane As a vertical moisture barrier, GUIDE Construction and Building Pd T-11-2004-B, DEPARTMENT OF SETTLEMENTS AND REGIONAL INFRASTRUCTURE, 2000 (Penanganan tanah ekspansif dengan geomembran Sebagai penghalang kelembaban vertikal, PEDOMAN Konstruksi dan Bangunan Pd T-11-2004-B, DEPARTEMEN PERMUKIMAN DAN PRASARANA WILAYAH, 2000)
11. FHWA-RD-79-51 TECHNICAL GUIDELINES FOR EXPANSIVE SOILS IN HIGHWAY SUBGRADES, Donald R. Snethen, 1979

12. FOUNDATION DESIGN FOR EXPANSIVE SOILS, LA DBS, 2011
13. FOUNDATION DESIGN OPTIONS FOR RESIDENTIAL AND OTHER LOW-RISE BUILDINGS ON EXPANSIVE SOILS, The Structural Committee of The Foundation Performance Association, Houston, Texas, 2004
14. TM 5-818-7 TECHNICAL MANUAL FOUNDATIONS IN EXPANSIVE SOILS, HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY, 1983
15. 膨張性地盤対策用の基礎及び床の構造、並びに膨張性地盤対策用の基礎及び床の構造の構築方法, 国際公開番号: WO 2014/136533 A1, 清水建設 浅香美治, 2014
16. 公路膨張土加筋設計与施工新技術, 李献民, 中国建築工業出版社, 2012
17. 公路膨張土工程 理論与技術, 鄭健龍, 人民交通出版社, 2013
18. 公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平, 人民交通出版社, 2009
19. 新建時速 200 公里鐵路 改良膨張土路基施工技術, 李庆鴻・王炳龍・俞峰, 中国鐵道出版社, 2007
20. 膨張土地区建築技術規範, 中華人民共和國住宅和城鄉建設部, 中国建築工業出版社, 2013
21. 膨張土路基的氣候性災害, 丁加明・丁力行・王永和, 人民交通出版社, 2009
22. 膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京, 人民交通出版社, 2007
23. 鐵路弱膨張土路基填築工芸試驗指南, 上海鐵路局著, 中国鐵道出版社, 2012

H1.4 図書

1. A parametric study on tensionresistant foundations in expansive soils tension-resistant foundations, Ramachandra Phanikumar, Satya Sundari N, LAMBERT, 2020
2. An approach to design of retaining walls with expansive soil backfill Design of Retaining Structures with Expansive Soil Backfill and Reduction in Lateral Pressure by Providing CNS Backinig, Kuldeep Kumar Moza, LAMBERT, 1985
3. An Introduction to Field and Laboratory Investigations for Foundations in Expansive Soils, J. Paul Guyer, P.E., R.A., The Clubhouse Press, 2017
4. BEHAVIOUR OF SATURATED EXPANSIVE SOIL AND CONTROL METHODS, R.K Katti, Dinesh R. Katti, A.R. Katti, A.A.BALKEMA, 2002
5. Characteristics of Black Cotton Soil Testing & Analysis - Report, Subash Thanappan, LAMBERT, 2023
6. CONSTRUCTION OF BUILDINGS ON EXPANSIVE SOILS, E.A. SOROCHAN, CRC Press, 1991

7. DAMAGE TO BUILDINGS ON CLAY SOILS, D. A. Cameron, P. F. Walsh, AUSTRALIAN COUNCIL OF NATIONAL TRUSTS and NATIONAL TRUST OF AUSTRALIA(VICTORIA), 1984
8. Effect of Black Cotton Soil on Substructure Stability Analysis with change in Weather condition, Abhinandan R. Gupta, Rashmi Unone, LAMBERT, 2020
9. Effect Of LIME & RBI GRADE 81 On Geo Technical Properties Of Black Cotton Soil, Shailendra Kumar, Krishnaraj Khatri, Shiwanand Suryawanshi, AMBERT, 2017
10. Effect of pond ash on volumetric changes of expansive soils Effect of pond ash, Ramachandra Phanikumar, LAMBERT, 2020
11. Effect of pozzolanic additives on index properties of expansive soils Case Study, Ramachandra Phanikumar, LAMBERT, 2020
12. Engineering behaviour of an expansive soil stabilised with CCR Engineering behaviour of an expansive soil, Phanikumar 8. R., Suryakumari M., LAMBERT, 2020
13. EXPANSIVE CLAY SOILS AND VEGETATIVE INFLUENCE ON SHALLOW FOUNDATIONS, C. Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen, ASCE, 2001
14. EXPANSIVE SOILS Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John D. Nelson, Debora J. Miller, JOHN WILEY & SONS, INC., 1992
15. Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, Amer Ali Al-Rawas, Mattheus F.A. Goosen, Taylor & Francis, 2006
16. Expansive Soils Volume 1, , DONALD SNETHEN, ASCE, 1980
17. Expansive Soils: Problems and Remedies Expansive Soils, Ramachandra Phanikumar, Sana Suri, LAMBERT, 2013
18. Foundation Engineering for Expansive Soils, John D. Nelson, Kuo Chieh (Geoff) Chao, Daniel D. Overton, Erik J. Nelson, Wiley, 2015
19. FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, FU HUA CHEN, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMP, 1972
20. Geomembranes and the Control of Expansive Soils in Construction, Malcolm Steinberg, McGraw-Hill, 1998
21. Geotechnical Properties of Major Problem Soils of Nigeria, Ademola Bolarinwa, LAMBERT, 2017
22. Handbook On Preparation Of Black Cotton Soil Subgrade Using Steel Slag, Vinodhkumar Shanmugasundaram, Ramya Dhandapani, LAMBERT, 2018
23. Improvement of Black Cotton Soil Properties using By-products and Lime, Velaga Sarath Babu,

-
- LAMBERT, 2004
24. MAGNITUDE, MODELING AND SIGNIFICANCE OF SWELLING AND SHRINKAGE PROCESSES IN CLAY SOILS, J.J.B. Bronswijk, 1991
 25. Merkmale von Black Cotton Soil Prüfung und Analyse - Bericht, Subash Thanappan, SciencaScripts, 2023
 26. MITIGATING THE EXPANSIVE BEHAVIOR OF CHEMICALLY TREATED SOILS, Sochan Jung, Maria Caterina Santagat, FHWA/IN/JTRP-2009/02, 2009
 27. NATIVE SOIL AS A PAVEMENT MATERIAL EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES ON CHEMICALLY STABILIZED BLACK COTTON SOIL FOR USE AS A SUBBASE MATERIAL IN FLEXIBLE PAVEMENTS, Rahul Pai, Satyajit Patel, LAMBERT, 2021
 28. Numerical Modeling of Expansive Soil Behavior, Ayman Abed, IGS, 2008
 29. PERFORMANCE EVALUATION OF BLACK COTTON SOIL WITH WASTE FIBERS AND MINERALS, SEEMA PANDEY, SANDEEP SIGH, 2022
 30. Polypropylene Fibre: A Solution for Problematic Expansive Soil, Amit Kumar, Ashwani Jain, ELIVAPRESS, 2021
 31. Proceedings of the Fourth International Conference on EXPANSIVE SOils Volume I, DONALD SNETHEN, dASCE, 1980
 32. Recent Advancements on Expansive Soils, Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures, Egypt 2018 - The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE) John S. McCartney, Laureano R. Hoyos, Springer, 2018
 33. Rice Husk Ash Enhanced Lime-Stabilised Expansive Soils, Agus Setyo Muntohar, LAMBERT, 2011
 34. Stabilization of Black cotton soil using Sawdust ash and Terrazyme, Er. Ifrah Reshi, Er. Mukesh Kumar, 2019
 35. Stabilization of Expansive Soil using Fly Ash, Adhyatma Khare, R. N. Kahre, LAMBERT, 2022
 36. Stabilization of Local Expansive Subgrade Soil using Marble waste powder with Lime, Amdegebreal Endalew, GRIN, 2016
 37. Stimulation of Black Cotton Soil via Stone Dust and PET Fibre, SAMEER SAJAD, HARPREET SIGH SINGH, CU, 2021
 38. STUDY ON EXPANSIVE SOILS MIXED WITH A COHESIVE NON-SWELLING SOIL - INVESTIGATION ON SOIL-MIXTURES COMPRISING OF EXPANSIVE SOILS MIXED WITH A COHESIVE NON-SWELLING SOIL, GUNJISURESH, CH SUDHARANI, LAMBERT Academic publishing, 2020
-

39. Sub-Grade Design of Flexible Pavement Incorporating Industrial Wastes and Polypropylene Fiber in Black Cotton Soil, MOHAMMAD HADI AFZALI, Abhishek Sharma, 2022
40. Swelling behaviour of expansive soil, Vikram Kumar, Dharendra Kumar, 2016
41. Swell-shrink behaviour of fiber-reinforced expansive soils, LAMBERT, 2016
42. THE DAY THE HOUSE FELL Homeowner soil problems - from landslides to expansive clays and wet basements, Richard L. Handy, ASCE PRESS, 1995
43. Use of Mine Waste for Unpaved Road Construction in Black Cotton Soil Utilization of Mine Waste for Unpaved Road Construction in Black Cotton Soil, Shashi Ranjan, Jitin Rahul, LAMBERT, 2019
44. Utilization of Waste Incineration Bottom Ash to Enhance Engineering Properties of Expansive Subgrade Soils, Damtew Tsige Melese(2022)
45. VERTISOLS AND TECHNOLOGIES FOR THEIR MANAGEMENT, N. AHMAD, A.MERMUT, ELSEVIER, 1996
46. △公路膨張土加筋設計与施工新技術, 李献民, 中国建築工業出版社, 2012
47. △公路膨張土工程 理論与技術, 鄭健龍, 人民交通出版社, 2013
48. △公路膨張土工程, 鄭健龍・楊和平, 人民交通出版社, 2009
49. △新建時速 200 公里鐵路 改良膨張土路基施工技術, 李庆鸿・王炳龍・俞峰, 中国鐵道出版社, 2007
50. △膨張土地区建築技術規範, 中華人民共和國住宅和城鄉建設部, 中国建築工業出版社, 2013
51. 膨張土の改良技術与工程応用, 王保田・張福海・科学出版社, 2008
52. △膨張土路基の気候性災害, 丁加明・丁力行・王永和, 人民交通出版社, 2009
53. △膨張土処治理論与工程建造新技術, 楊果林・劉義虎・黃向京, 人民交通出版社, 2007
54. 膨張土边坡工程 地質研究, 蔡耀軍・陽雲華・趙雯・陳尚法, 長江出版社, 2013
55. △鐵路弱膨張土路基填築工藝試驗指南, 上海鐵路局著, 中国鐵道出版社, 2012

H2 分散性土

H2.1 文献

1. カンボジアの分散性土 品質管理強化プロジェクトで対策工法, 建設工業新聞, 2017
 2. A PRELIMINARY STUDY OF DISPERSIVE SOIL EROSIONS OF RESERVOIRS AND ROAD EMBANKMENTS IN KASETSART UNIVERSITY CHALERMPHRAKIAT SAKON NAKHON PROVINCE CAMPUS, Supakij Nontananandh, Choodech Thongmit, Apiniti Jotisankasa, Pongsak Suriyavanagul, Korchoke Chantawarangul
 3. A Proposed Procedure for the Identification of Dispersive Soils, H. J. Von M. Harmse, F. A. Gerber, 1988
 4. A State of Art Review of Dispersive Soils - Identification Methods Perspective, Hassan Shoghi, Mahmoud Ghazavi, Sina Kazemian, Hossein Moayedi, 2013
 5. A Study on the Mechanism of Internal Erosion Resistance to Soil Slope Instability, Fauzilah Ismail, Zainab Mohamed, Mazidah Mukri, 2008
 6. Alternative sorbents for the dispersive solid-phase extraction step in quick, easy, cheap, effective, rugged and safe method for extraction of pesticides from rice paddy soils with determination by liquid chromatography tandem mass spectrometry, Jean Lucas de Oliveira Arias, Caroline Rombaldi, Sergiane Souza Caldas, Ednei Gilberto Primel, 2014
 7. An Assessment of Physical and Mechanical Properties of Dispersive Clay Treated with Lime, A H Vakili, M R Selamat, H Moayedi, 2013
 8. AN EXPERIMENTAL STUDY ON DISPERSIVE NATURE OF SOIL, Abhirami Suresh, Ajith K.P, Sandra Supran, Annie Joy, 2013
 9. ARTIFICIAL INDUCEMENT OF DISPERSIVITY IN NON DISPERSIVE CLAY SOILS, Purabi Sen, Satyajit Roy, Mahabir Dixit, R. Chitra Assessing slope failure of soil erodibility problem by soil dispersive identification, Reza Pahlevi Munirwan, Munirwansyah Munirwansyah, 202, 2019
 10. Assessment of Soil Dispersibility Behaviour In-Relation to Soil Internal Erosion Resistance, Fauzilah Ismail, Mazidah Mukri, Zainab Mohamed, 2008
 11. Biochemical soil treatment for erosion control against desertification, I. Chang, J. Im, H.D. Shin, G.C. Cho, 2015
 12. Broadband Apparent Permittivity Measurement in Dispersive Soils Using Quarter-Wavelength Analysis, A. M. Thomas, D. N. Chapman, C. D. F. Rogers, N. Metje, P. R. Atkins, H. M. Lim, 2008
 13. Case Study Problems on Dispersion Potential for Yangon-Mandalay Express Way Embankments, Khin Win Nwe, Nyan Myint Kyaw, 2018
 14. CASE STUDY PROBLEMS ON DISPERSION POTENTIAL FOR YANGONMANDALAY EXPRESS
-

-
- WAY EMBANKMENTS, Khin Win Nwe1, Nyan Myint Kyaw, 2022
15. CHARACTERISTICS AND PROBLEMS OF DISPERSIVE CLAY SOILS, Paul C. Knode, U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR Bureau of Reclamation, 1991
 16. Characterization of Dispersive Soils, T. S. Umesh1, S. V. Dinesh, Puvvadi V. Sivapullaiah, 2021
 17. CHARACTERIZATION OF SOIL PROFILE USING DISPERSION CURVE ANALYSIS, Hisbulloh Huda, Bagus Jaya Santosa, 2022
 18. Chemical and Mineralogical Characterization of Dispersive Soils, Sameer Vyas, Beena Anand, 2018
 19. Clay dispersion and its relation to surface charge in a paddy soil of the Red River Delta, Vietnam, Minh N. Nguyen, Stefan Dultz, Jörn Kasbohm, Duc Le, 2009
 20. Clay Dispersion as Influenced by pH and Net Particle Charge of Sodic Soils, M. Chorom, P. Rengasamy and R. S. Murray, 1994
 21. Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils, Hasan Savaş,M. Türköz, Evren Seyrek, E. Ünver, 2018
 22. Consistency Characteristics of Dispersive Clays, Roaa H. Ismael , Mohammed Y. Fattah , Mohammad F. Aswad, 2021
 23. Control of dispersivity of soil using lime and cement, T.S. Umesh, S.V.Dinesh, and P.V. Sivapullaiah, 2009
 24. Correlation of Cationic Indices with Clay Dispersion Degree of Two Soils from Brazil Fertilized with Chicken Manure, Thadeu Rodrigues de Melo, Wesley Machado1 & João Tavares Filho, 2014
 25. Countries and the global rate of soil erosion, David Wuepper, Pasquale Borrelli, Robert Finger, 2020
 26. Determination of Dispersivity in A Laboratory Soil Column, M. R. Namitha, V. Ravikumar, 2018
 27. DIFFUSION IN SATURATED SOIL. II- RESULTS FOR COMPACTED CLAY, Charles D. Shackelford, David E. Daniel, 1991
 28. Dispersed clay and organic matter in soil- their nature and association, P. N. Nelson, J. A. Baldock, P. Clarke, J. M. Oades, 1999
 29. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type, M. CHOROM & P. RENGASAMY, 1995
 30. Dispersion, Victorian Resoureces Online, http://vro.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/soilhealth_soil_structure_dispersion, 2012
 31. Dispersive Clay- Influence of Physical and Chemical Properties on Dispersion Degree, Abdelkader Belarbi, Abdeldjalil Zadjou, Abdelmalek Bekkouch, 2013
-

32. DISPERSIVE CLAY STABILISED BY ALUM AND LIME, Mohamdreza Hossanlourad, Mehran Naghizadeh rokni, Mohamadreza Hassanlo, Akbar Badrlou, 2017
33. Dispersive Soil Management, IMPLEMENTATION GUIDELINE NO. 28, 2016
34. Dispersive Soil Manual Managing Dispersive Soils practicalities and economics - Northern Region, David McKenzie, Alisa Bryce, 2023
35. Dispersive Soils and their Management - Guidelines for Landholders, Planners and Engineers, 2009

H2.2 図書

1. ENGINEERING ASPECTS OF SOIL EROSION, DISPERSIVE CLAYS AND LOESS, C.W. Lovell, ASCE, 1987

H3 侵食性土壌

H3.1 文献

1. ENGINEERING ASPECTS OF soil EROSION, DISPERSIVE LAYS AND LOESS, Proceedings of a Symposium sponsored by the Soil Properties Committee of the Geotechnical, Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention in Atlantic City, New Jersey, C.W. Lovell, ASCE, 1987
2. Quantity and Quality of Dispersed Fine Particles after the Low-Energy Water-Dispersible Soil Test: Impact of the Initial Soil Matrix Potential, Anatja Samouelian, Laurence Quenard, Isabelle Cousin, Sophie Cornu, HAL, 2018
3. Dispersive Soils and their Management Technical Reference Manual, Tasmania, 2009
4. Dispersive Soils-Characterization, Problems and Remedies, Bhagwan Singh, Praveen Kr Gahlot, Dr. DGM Purohit, 2018
5. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils, Hanie Abbaslou, Hojat Hadifard, Ali Reza Ghanizadeh, 2020
6. Effect of exchangeable Mg on Saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils, X.X. Zhang, L.D. Norton, 2002
7. Effect of Heating on Swelling and Dispersion of Different Cationic Forms of a Smectite, M. CHOROM, P. RENGASAMY, 1996
8. Effect of industrial by-products on the strength of stabilized dispersive soil, SAMAPTIKA MOHANTY, Nagendra Roy, Suresh Prasad Singha and Parveen Sihag, 2019

9. Effect of pH on Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Dispersion, D. L. SUAREZ, J. D. RHOADES, R. LAVADO, AND C. M. GRIEVE, 1984
10. Effect of soil textural characteristics on longitudinal dispersion in saturated porous media, Mojtaba G. Mahmoodlu, Amir Raoof, Martinus Th. van Genuchten, 2022
11. Embankment Dam Design With Dispersive Soil- Solutions And Challenges, Davood Salehi, Ali Heidari, 2021
12. Evaluating Erodibility of gypsiferous soils of Masjed Soleyman petrochemical plant site with emphasis on dispersive and solubility, M. H. Jowkar, M. khomehchiyan, M.R. Nikudel, 2019
13. Evaluation of Dispersion Potential for Some Problem Soils in Central Myanmar, Khin Win Nwe, Nyan Myint Kyaw, 2018
14. Evaluation of erosion characteristics of soils using the pinhole test, Ba Huu Dinh, Anh-Dan Nguyen, Seo-Yong Jang, Young-Sang Kim, 2021
15. Examination of the Physico-chemical Composition of Dispersive Soils, Gábor Nagy, László Nagy, Katalin Kopecskó, 2016
16. Evaluation of soil properties of the Sudan Savannah ecological zone of Ghana for crop production, D. S. MACCARTHY, W. A. AGYARE & P. L.G. VLEK, 2018
17. Experimental Determination of Dispersion Coefficient in Soil, Anthony .C. Ekeleme a, Jonah .C. Agunwamba, 2018
18. Factors affecting clay dispersion in Oxisols treated with vinasse, Thadeu Rodrigues de Melo, Tiago Santos Telles, Walquiria Silva Machado, João Tavares Filho, 2016
19. Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification, 2007
20. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess, Hamed Sadeghi, Majid Kiani, Mohammad Sadeghi, Fardin Jafarzadeha, 2019
21. Geotechnical Properties of Problematic Soils Emphasis on Collapsible Cases, Mohsen Rezaei, Rasoul Ajalloeian, Mohammad Ghafoori, 2012
22. Gully erosion, Bruce Carey, 2006
23. Identification and Remediation of Dispersive Soils, Linda J, Rani V, 2020
24. Identification and Stabilization of Dispersive Soils Case Study of Water Transfer Canal of Simindasht-Garmsar, Abdolhosein Haddad, Hamed Javdanian, Faezeh Ebrhimpour, 2017
25. Identifying dispersive soils, Department of Agriculture and Food Note: 386, 2009
26. Impact of Causality in Dispersive Soils on the Effective Length of Grounding Electrodes, Saeed Reza

-
- Ostadzadeh, Seyyed Sajjad Sajjadi, Seyed Hesamedin Hossein Sadeghi, 2022
27. Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime, Bisrat Gissila Gidday, Satyendra Mittal, 2020
 28. Influence of cement clinker and ggbs on the strength of dispersive soil, (202Samaptika Mohanty, N. Roy & S.P. Singh, 2018
 29. Investigating Erosional Behaviour of Chemically Stabilised Erodible Soils, B. Indraratna, T. Muttuvel, H. Khabbaz, 2008
 30. Investigation of desiccation cracking of earthen site soils treated by enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP), Jianwei Zhang, Peikun Wang, Yue Dong, Junjie, Zheng, Yu Song, Hanlong Liu, Min Zhang, 2025
 31. Investigation of Expansion and Dispersion Phenomena in Zahmat-Keshan Plain Soils, Kerman, Iran, Effat Mahmodi, Hamid Reza Soloki, Abdolazim Azimian, 2014
 32. Investigation on dispersivity potential of clayey soils of Varzeghan Hajilar earth dam and its relationship with parent rocks, N. Dadashzadeh, E. Asghari-Kaljahi, H. Mansouri, 2019
 33. Landslide Failure Mechanisms of Dispersive Soil Slopes in Seasonally Frozen Regions, Lixiang Wang, Xiaoming Yuan and Miao Wang, 2020
 34. Management of Dispersive Soils in Urban Areas (1), Tasmania, Marcus Hardie
 35. Management of Dispersive Soils in Urban Areas (2), Tasmania, Marcus Hardie, 2014
 36. Managing dispersive soils, Stephen Davies, Alison Lacey, 2010
 37. Methodological aspects of the quantification of dispersible clay and its relationship with soil properties along a catena under no-till management, Ariane Lentice de Paula, et al., 2020
 38. Methods for assessment and identification of dispersive soils, DJOKOVIĆ Ksenija, ČAKI Laslo, ŠUŠIĆ Nenad, HADŽI-NIKOVIĆ Gordana, 2018
 39. MINERAL CHARACTERIZATION OF SELECTED SOIL SAMPLES USING A DRY DISPERSION TECHNIQUE, JOHN S. KINSEY, RAYMOND M. COVENEY JR., 1989
 40. ONTROLLING STRESS FROM SWELLING CLAY, Timothy P. Wangler, Angela K. Wylykanowitz, and George W. Scherer
 41. Predicting formulae for effective length of counterpoise wires buried in ionized, dispersive and inhomogeneous soils, 2020
 42. Predicting formulae for effective length of counterpoise wires buried in ionized, dispersive and inhomogeneous soils, Seyyed Sajjad Sajjadi and Saeed Reza Ostadzadeh, 2020
-

43. Prediction of Dispersivity for Undisturbed Soil Columns from Water Retention Parameters, E. Perfect, M. C. Sukop, and G. R. Haszler, 2002
44. Problems in characterization and identification of dispersive soils - a case study, Mahabir Dixit, S. L. Gupta, 2011
45. Properties of Problem Soils of Arid Northeastern Thailand, N. Phienwej, P. Nutalaya, V. Udomchoke, T. Pientong A.S. Balasubramaniam, 1994
46. Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing, F A GERBER, H J VON MAL TITZ HARMSE, 1987
47. Quantity and Quality of Dispersed Fine Particles after the Low-Energy Water-Dispersible Soil Test Impact of the Initial Soil Matrix Potential, Anatja Samouelian, Laurence Quenard, Isabelle Cousin, Sophie Cornu, 2018
48. REALISTIC MODEL OF DISPERSIVE SOILS USING PLRC-FDTD WITH APPLICATIONS TO GPR SYSTEMS, G. E. Atteia, K. F. A. Hussein, 2010
49. Rehabilitation of field tunnel erosion using techniques developed for construction with dispersive soils, M. A. Hardie, D. W. E. Cotching, P. R. Zund, 2007
50. Reliability of Analysis Methods for Identifying Dispersive Clays, Yingqi Wei, Hong Cai, Yanfeng Wen, Jun Yan, Jianzhang Xiao, 2015
51. Revised test protocols for the identification of dispersive soils, A Maharaj, L van Rooy, P Paige-Green, 2015
52. SOIL MECHANICS NOTE NO. 13 DISPERSIVE CLAYS, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division, 1991
53. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria, 2008
54. SPATIAL ASSESSMENT OF EROSION AND ITS IMPACT ON SOIL FERTILITY IN THE TAJIK FOOTHILLS, Bettina Wolfgramm, Bruno Seiler, Mathias Kneubühler & Hanspeter Liniger, 2007
55. Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils, Bhuvaneshwari, S. and Soundara, B., Robinson, R.G., Gandhi, S .R., 2007
56. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation, Sasan Moraveja, Ghassem Habibagahi, Ehsan Nikooee, Ali Niazi, 2018
57. STABILIZATION OF DISPERSIVE SOIL BY USING FLY ASH, Md. Omar Faruk, Mohammad Shariful Islam, Mohammad Ziaul Hoque, Marzia Ashraf Shorno, 2019
58. Stabilization of Dispersive Soils by Pozzolan, A. H. Vakili, M. R. Selamat, H. Moayedi, H. Amani, 2013

59. Strength Characteristics of Dispersive Soil by Using Industrial By-Products, Samaptika Mohanty, N. Roy and S.P. Singh, 2017
60. Study of Dispersive Soil in Haryana State, Harinder Vir, 2011
61. Study on Physical and Mechanical Properties of Dispersive Soil Soe Soe War, Nyein Nyein Thant, 2009
62. The Evaluation of Test Protocols for Dispersive Soil Identification in Southern Africa, AMRITA MAHARAJ, 2013
63. The Identification of the Existence of Dispersive Soil on the Soft Soil for Dam Filling Material, Lusmeilia Afriani, Ryzal Perdana, 2022
64. THE INFLUENCE OF DISPERSING AGENTS ON SOIL PARTICLE SIZE ANALYSIS, ANDREEA-VASILICA DASCALU, ZAKARIA OWUSU-YEBOAH, IRINA LUNGU, MIRCEA ANICULAESI, 2023
65. The no-tillage, with crop rotation or succession, can increase the degree of clay dispersion in the superficial layer of highly weathered soils after 24 years, Alex Figueiredo et al, 2021
66. The no-tillage, with crop rotation or succession, can increase the degree of clay dispersion in the superficial layer of highly weathered soils after 24 years, Alex Figueiredo, Thadeu Rodrigues de Melo, Jean Carlo Santos de Oliveira, Wesley Machado, José Francirlei de Oliveira, Julio Cezar Franchini, Henrique Debiassi, Maria de Fátima Guimarães, 2021
67. The Use of the Crumb Test as a Preliminary Indicator of Dispersive Soils, Amrita MAHARAJ, 2011
68. Threshold electrolyte concentration for dispersive soils in relation to CROSS, Alla Marchuk, Pichu Rengasamy, Ann McNeill, 2012
69. Understanding the physiological basis for improved wheat seedling growth on dispersive sodic soils, Monia Anzooman, 2019
70. WATER-DISPERSIBLE CLAY IN SOILS TREATED WITH SEWAGE SLUDGE, João Tavares Filho, Graziela Moraes de Césare Barbosa & Adriana Aparecida Ribon, 2010
71. Water-Dispersible Colloids Effects of Measurement Method, Clay Content, Initial Soil Matric Potential, and Wetting Rate, Charlotte Kjaergaard, Lis W. de Jonge, Per Moldrup, and Per Schjønning, 2004

H3.2 試験方法

1. USBR 5400-89 DETERMINING DISPERSIBILITY OF CLAYEY SOILS BY THE CRUMB TEST METHOD

H3.3 図書

1. ENGINEERING ASPECTS OF SOIL EROSION, DISPERSIVE CLAYS AND LOESS, Proceedings of a Symposium sponsored by the Soil Properties Committee of the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE Convention in Atlantic City, New Jersey, C.W. Lovell, 1987
2. Quantity and Quality of Dispersed Fine Particles after the Low-Energy Water-Dispersible Soil Test- Impact of the Initial Soil Matrix Potential, Anatja Samouelian, Laurence Quenard, Isabelle Cousin, Sophie Cornu, 2018

H4 崩壊性土

H4.1 文献

1. A comparison between the behavior of laboratory and field plate load tests on collapsing soils, Samir Ibrahim Shalaby, 2016
 2. A MODIFIED COLLAPSE TEST FOR GYPSEOUS SOILS, Safa Hussain Abid Awn, 2010
 3. A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction, Mohammed Shakir Mahmood, Mustafa Jamal Abraham, 2020
 4. A review of the identification methods and types of collapsible soils, Alfred Wilson Opukumo, Colin T. Davie, Stephanie Glendinning, Ebiegeberi Oborie, 2022
 5. A STUDY ON CHARACTERIZATION OF A COLLAPSIBLE SOIL, Gustavo Gallegos F., Milka E. Escalera C., María C. Vázquez A., Julio C. Leal V., 2016
 6. Affect of a In-Situ Parameters in Explaining Collapsible Behaviour of Red Soils, K. Saroja Rani, P.V.V.Satyanarayana, G.Mounika, 2019
 7. An Experimental Study on the Identification and Classification of Collapse Potential of Some Soils in Sudan, M.A. Osman, E.M. Ali Ahmed, 2015
 8. Assessing the Hydro-Mechanical Behavior of Collapsible Soils Using a Modified Triaxial Test Device, S. Mohsen Haeri, Amir Akbari Garakani, Ali Khosravi, and Christopher L. Meehan, 2014
 9. Characteristics and Problems of Collapsible Soils, Paul C. Knodel, 1992
 10. Characterizations of Soil Collapsibility Effect of Salts Dilution, Omar H. Al-Hattamleh a, Odeh A. Odeh b, Hussein Al Deeky b, M.N. Akhtar, 2015
 11. COLLAPSE BEHAVIOUR OF A COMPACTED SILTY CLAY, APINITI JOTISANKASA, 2005
 12. Collapsible soils chashma right bank canal, Izharul Haq, 1984
-

13. Collapsibility and Volume Change Behavior of Unsaturated Residual Soil, Azlan A. Aziz, Faisal Hj. Ali, Choong Foong Heng, Thamer Ahmed Mohammed, Bujang B.K. Huat, 2006
14. COLLAPSIBLE SOIL AND EVAPORITE KARST HAZARD DELINEATION ON USING RECENT GEOLOGIC MAPPING, Jonathan L. White
15. COLLAPSIBLE SOILS CHARACTERISTICS; THEIR SUITABILITY FOR PROJECTS FOUNDATIONS, Lina Anwer, Sarkan Sarbast, 2019
16. COLLAPSIBLE SOILS IN THE UK, M. G. Culshaw, K. J. Northmore, I. Jefferson, A. Assadi-Langroudi & F. G. Bell, 2020
17. COLLAPSIBLE-SOIL-SUSCEPTIBILITY MAP FOR THE ST. GEORGE-HURRICANE METROPOLITAN AREA, William R. Lund, Tyler R. Knudsen, Garrett S. Vice, and Lucas M. Shaw, 2008
18. Compacted soil columns for foundations on collapsible soils. Laboratory and in-situ experimental study, Burlacu C., Olinic E., Manea S., 2013
19. Compressibility and shear strength of a residual soil, YAHIA E.-A. MOHAMEDZEIN, MOHAMMED H. ABOUD, 2006
20. Controlling Collapsibility Potential by Partial Soil Replacement, Naema.A. Ali, 2016
21. Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects, Mahmoud Hassanlourad, Hosein Salehzadeh, Habib Shahnazari, 2008
22. EFFECT OF MATRIC SUCTION ON THE BEHAVIOUR OF UNSATURATED GYPSEOUS SOIL, Ali Abdulkadhim Jasim Al-Shamoosi, 2019
23. Effect of Wetting on Collapsibility and Shear Strength of Tropical Residual Soils, Bujang B. K. Huat, Azlan A. Aziz, Faisal H. Ali, Nor Azwati Azmi, 2008
24. Effectiveness of critical state friction angle of volcanic ash soils in design application N.Yasufuku H.Ochiai & J.M.Kwag, 1998
25. Egyptian Collapsible Soils and their Improvement, Mohamed Sakr, Mohsen Mashhour, Adel Hanna, 2008
26. Egyptian Collapsible Soils, Case Study- Region Affected by Varying Moisture Content, Naema A. Ali, 2021
27. ENCE 4610 Foundation Design and Analysis Expansive and Collapsible Soils
28. ENCE 4610 Foundation Design and Analysis Lecture 20 Expansive and Collapsible Soils
29. Enhancing mechanical characteristics of a collapsible sandy Sabkha soil using an eco-friendly admixture: An experimental and numerical study, Mohamed B.D. Elsayy, Abderrahim Lakhout, 2023
30. Estimation of Relative Subsidence of Collapsible Soils Using Electromagnetic Measurements, Henok Hailemariam, Frank Wuttke, 2017

31. Evaluation, Design and Mitigation of Project Sites in Collapsible Soil Areas in Western Colorado, Steven L. Pawlak, P.E.
32. Foundations on collapsible soils: a review, Behzad Kalantari, 2013
33. Foundations on Weak and/or Compressible Soils, C.C. Swan
34. Geotechnical case studies emphasis on collapsible soil cases, Ramesh Vandanapu, Joshua R Omer, Mousa Fayiz Attom, 2016
35. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess, Hamed Sadeghi, Majid Kiani, Mohammad Sadeghi, Fardin Jafarzadeh, 2019
36. Geotechnical engineering practice for collapsible soils, SANDRA L. HOUSTON, WILLIAM N. HOUSTON, CLAUDIA E. ZAPATA, CHRIS LAWRENCE, 2001
37. Geotechnical Properties of a Typical Collapsible Soil in South-Western Nigeria Owolabi, Titilayo, Ola, Samuel, 2014
38. Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils, Khaled E. Gaaver, 2012
39. Geotechnical Properties of Problematic Soils Emphasis on Collapsible Cases, Mohsen Rezaei, Rasoul Ajalloeian, Mohammad Ghafoori, 2012
40. Hydroconsolidation (Collapse) Case History, Thomas F. Blake
41. Hydro-Mechanical Analysis of Unsaturated Collapsible Soils and their Stabilization, Ahmed Al-Janabi, 2014
42. IDENTIFICATION AND BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE SOILS, A.E.Howayek P.Huang R.Bisnett MC.Santagata, 2011
43. Identification Of Collapsible Soils In Deroua (Morocco), Kawtar Ouatiki, Lahcen Bahi, Mohamed Ould Awa, Latifa Ouadif, Ahmed Akhssas, El Houcine Ejjaouani, 2016
44. LABORATORY SIMULATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IRRIGATION-INDUCED SETTLEMENTS OF BUILT ENVIRONMENT OVERLYING COLLAPSIBLE SOIL STRATA IN UNITED ARAB EMIRATES, Ramesh VANDANAPU, 2019
45. Observations from insitu testing within a calcareous soil, Jiewu Meng, Edward L. Hajduk, Thomas J. Casey, William B. Wright
46. Origin and characteristics of collapsible soils state of the art report, D. B. Hamdy, 2024
47. PERFORMANCE OF REINFORCED COLLAPSIBLE SOILS, Sherif Soliman, 2010
48. Prediction of Collapsible Behavior of Red Soils, K.Saroja Rani, P.V.V.Satyanarayana, K.Prasanth, 2019

-
49. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and others), G.D. AITCHISON, 1973
 50. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and others), L . BJERRUM, 1973
 51. Problems of sub-mountain area development associated with collapsing loess soils (case of Tajikistan), Rustam Usmanov, Marina Rakočević, Vera Murgul, Nikolay Vatin, 2014
 52. Problems with collapsible soils: Particle types and inter-particle bonding, Ian Smalley* and Samson Ng'ambi, 2019
 53. Properties of Problem Soils of Arid Northeastern Thailand, N. Phienwej, P. Nutalaya, V. Udomchoke, T. Pientong, A.S. Balasubramaniam, 1994
 54. Relation Between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters, D. L. SUAREZ, 1981
 55. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting, Ping Li, Sai Vanapalli, Tonglu Li, 2016
 56. Role Of Clays Addition On The Stability Of Collapsible Soil Selected From Mosul City, Suhail A. A. Khattab, Salah W. I. Bahhe, Khawla A. K. AL-Juari, 2006
 57. SDMT – a Tool for in Situ Identification of Collapsible Soils, Dušan Berisavljević, Dragoslav Rakić, Nenad Šušić
 58. The Assessment of the Collapse Potential of Fills during Inundation using Plate Load Tests, Samir Ibrahim Shalaby, 2014
 59. Treatment of Collapsible Soil, Madonna Nabil Roshdy
 60. Understanding the collapsible behavior of loess from microstructure information, Ping Li, Sai K. Vanapalli, Tonglu Li, 2015
 61. Volume Change Measurement Of Collapsible Soil Stabilized With Lime And Waste Lime, Khawla A. K. Al-Juari, Assistant Lecturer, 2009
 62. 中央アルゼンチンの崩壊性土, Aldo R. Reginatto, 1987
-

H5 黄土

H5.1 文献

1. Absolute $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ chronologies and $\Delta 47$ thermometry paleoclimate reconstruction from soil carbonates in Central Asian loess over the past 1 million years, G'abor Újvári, Ramona Schneider, Thomas Stevens, L'aszl'o Rinyu, Gabriella Ilona Kiss, Jan-Pieter Buylaert, Andrew Sean Murray, Am'elie J.M. Challier, Redzhep Kurbanov, Farhad Khormali, Judit Benedek, Marjan Temovski, Danny Vargas, L'aszl'o Palcsu, 2024
2. An Exploration of Loess Landform Development Based on Population Ecology Method, Ling Yang, Xin Yang, Jiaming Na, 2022
3. An Investigation of the Geotechnical properties of loess from Canterbury and Marlborough, T. W.D Jowett, 1995
4. Characterization of the effect of disturbance on the hydro-mechanical behavior of a highly collapsible loessial soil, S. Mohsen Haeri, Ali Khosravi, Shahin Ghaizadeh & Amir Akbari Garakani, 2014
5. Classification of the types and forms of loess pseudokarst, Andrew Lavrusevich, 2019
6. Countermeasures to Prevent Water Erosion in the Loess Plateau of China, Juying Jiao, 2014
7. Early Identification of Geological Disasters in Loess Hilly Area of Ningnan Based on InSAR Technology A case study of Yuanzhou District, China, Hui Wang, Jia Zhang, Yongfeng Gong, Guorui Wang, Zhiyong Hu, 2023
8. Effect of compaction condition on the water retention capacity, microstructure and its evolution during drying of compacted loess, Tao Xiao, Ping Li, Zhenhui Pan, Jiading Wang, 2022
9. Effect of Mica Content on Mechanical Properties of Yili River Valley Loess under the Impact of Freezing and Thawing, Yanxiao Mu, Zizhao Zhang, Tiansheng Zhou, Zekun Guo, 2023
10. Effect of Mica Content on Shear Strength of the Yili Loess under the Dry-Wet Cycling Condition, Guangming Shi, Xinyu Li, Zekun Guo, Zizhao Zhang, Yanyang Zhang, 2022
11. Engineering properties of loess in Libya, A.M. Assallay, C.D.F. Rogers & I.J. Smalley, 1996
12. Evaluation of Ar-Ar ages of Individual Mica Grains for Provenance Studies of Loess, Long Island, NY, Jian Zhong, Sidney R. Hemming, and Gilbert N. Hanson
13. Evolution and Influencing Mechanisms of the Yili Loess Mechanical Properties under Combined Wetting-Drying and Freeze-Thaw Cycling, Yongliang Zhang, Zizhao Zhang, Wanhong Hu, Yanyang Zhang, 2023
14. EXPERIENCE OF CONSOLIDATION OF LOESSIAL COLLAPSIBLE SOILS ON LANDSLIDE SLOPES ENERGY OF DEEP EXPLOSIONS, Rustam Usmanov, 2017

-
15. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess, Hamed Sadeghi, Majid Kiani, Mohammad Sadeghi, Fardin Jafarzadeha, 2019
 16. Geotechnical Properties of a Typical Collapsible Soil in South-Western Nigeria, Owolabi, Titilayo. A, Ola, Samuel. A, 2014
 17. Holocene loess in the Himalayas piedmont of southeastern Nepal, Edgardo M. Latrubesse, Abang M. S. Nugraha, 2024
 18. Hydraulic property variations with depth in a loess mudstone landslide, Wei Liu, Gaochao Lin, Qingpeng Liu & Xing Su, 2024
 19. Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions, Amir Akbari Garakan, S. Mohsen Haeri, Ali Khosravi, Ghassem Habibagahi, 2015
 20. IDENTIFICATION AND BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE SOILS, Alain El Howayek, Pao-Tsung Huang, Rachael Bisnett, Maria Caterina Santagata, 2011
 21. Impact of the Technological Path on Some Soil Properties on Loess Slope, Edyta Kruk, 2018
 22. Improved Identification of Forest Types in the Loess Plateau Using Multi-Source Remote Sensing Data, Transfer Learning, and Neural Residual Networks, Mei Zhang, Daihao Yin, Zhen Li, Zhong Zhao, 2024
 23. Influence of compaction condition on the UCS and structure of compacted loess, Liang Sun, Ping Li, Tao Xiao, Jiading Wang, 2023
 24. LITHOSTRATIGRAPHIC DESCRIPTION AND CLASSIFICATION OF LOESS-STRATIGRAPHIC UNITS IN WISCONSIN, David S. Leigh and James C. Knox, 1993
 25. Loess and bee-eaters I Ground properties affecting the nesting of European bee-eaters (*Merops apiaster* L.1758) in loess deposits, Ian Smalley, Ken O'Hara-Dhand, Sue McLaren, Zorica Svircev, Hugh Nugent, 2013
 26. Loess and Bee-eaters IV Distribution of the rainbowbird (*Merops ornatus* Latham 1801) in Australia, Ian Smalley, Sue McLaren, Ken O'Hara-Dhand, 2015
 27. LOESS DEPOSITS, ORIGINS AND PROPERTIES, D R Muhs, 2007
 28. Loess genesis and worldwide distribution, Yanrong Lia, Wenhui Shi, Adnan Aydin, Mary Antonette Beroya-Eitner, Guohong Gaoa, 2020
 29. Loess landscapes of Europe – Mapping, geomorphology, and zonal differentiation, F. Lehmkuhl, J.J. Nett, S. Pöter, P. Schulte, T. Sprafke, Z. Jary, P. Antoine, L. Wacha, D. Wolf, A. Zerboni, J. Hošek, S.B. Markovič, I. Obrecht, P. Sümegi, D. Veres, C. Zeeden, B. Boemke, V. Schaubert, J. Viehweger, U. Hambache, 2021
 30. Loess Landslide Inventory Map Based on GF-1 Satellite Imagery, Wenyi Sun, Yuansheng Tian, Xingmin
-

-
- Mu, Jun Zhai, Peng Gao, Guangju Zhao, 2017
31. Loess structure Evolution and a scale-based classification, Yanrong Li Yuanyuan Wang, Adnan Aydin, 2024
 32. Loessification and hydroconsolidation There is a connection, Ian J. Smalley, Slobodan B. Marković, 2014
 33. LOESSOID SOILS IMPROVEMENT – LABORATORY TESTS AND ROAD ENGINEERING APPLICATIONS, Cong Dinh Nguyen, Catalin Burlacu, Ioan Boti, 2019
 34. Loess–palaeosol sequences in China and Europe Common values and geoconservation issues, Djordjije A. Vasiljević, Slobodan B. Marković, Thomas A. Hose, Zhongli Ding, Zhengtang Guo, Xiuming Liu, Ian Smalley, Tin Lukić, Miroslav D. Vujičić, 2014
 35. Magnetic properties and geochemistry of loessl paleosol sequences at Nowdeh section northeastern of Iran, Vahid, Feizi, Ghasem, Azizi, Habib, Alimohammadian, Maryam Mollashahi, 2023
 36. Magnetic Susceptibility Properties of Loess From the Willendorf Archaeological Site Implications for the SynPost-Depositional Interpretation of Magnetic Fabric, Christian Zeeden, Ulrich Hambach, 2021
 37. Mechanical properties of reinforced loess soils in road pavements, Rashidbek Hudaikulov, Dilfuza Makhmudova, Feruza Ikramova, Jamshid Rakhmonov, and Dilshod Aralov, 2024
 38. Modification and Stabilization of Collapsible Loess Using Diammonium Phosphate Solution, Chengjuan Ying, Lingxia Huang, Haiming Chen, Yadong Zhang, Duoxi Yao, 2024
 39. Modification of the Geotechnical Properties of Loess Using Eggshell Waste (El'Mghair Region), Hizia Bekhouche , Ouassila Bahloul, Fatima Zohra Tebbi, Assia Aidoud, 2024
 40. Multi-Index Classification Model for Loess Deposits Based on Rough Set and BP Neural Network, Xue-liang Zhang, Yi-guo Xue, Dao-hong Qiu, Wei-min Yang, Mao-xin Su, Zhi-qiang Li, Bing-hua Zhou, 2019
 41. OSL-dating of the Pleistocene-Holocene climatic transition in loess from China, Europe and North America, and evidence for accretionary pedogenesis, D. Constantin, J.A. Mason, D. Veres d, U. Hambach, C. Panaiotu, C. Zeeden, L. Zhou h, S., B. Marković, N. Gerasimenko, A. Avram, V. Tecsă, S.M. Groza-Sacaci, L. del Valle Villalonga, R. Begy, A. Timar-Gabor, 2021
 42. Property values as affected by loess thickness and texture, B.L. Becker, A.J. Bryce, R.J. Schaetzl, 2021
 43. Property Variations in the Peorian Loess of Southwestern Iowa, D.T. Davidson, R. L. Handy, 1952
 44. Regional Recognition and Classification of Active Loess Landslides Using Two-Dimensional Deformation Derived from Sentinel-1 Interferometric Radar Data, Qingkai Meng, Pierluigi Confuorto, Ying Peng, Federico Raspini, Silvia Bianchini, Shuai Han Haocheng Liu, Nicola Casagli, 2020
 45. Reply to Li and Song's discussion of Loess genesis and worldwide distribution, Wenhui Shi, Yanrong Li, Mohan Bai, Rong Wang, Mary Antonette Beroya-Eitner, Adnan Aydin, 2021
-

-
46. REVIEW OF GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF LOESS in NORTH AMERICA, ALAn J. LUTENEGGER, GEORGE R. HALLBERG, RICHARD L. HAnDY, 1979
 47. 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, 2009
 48. Rock Magnetic Properties and Palaeoclimate of Chinese Loess, Xiuming Liu¹, John SHAW, Tungsheng LIU, Friedrich HELLER, Mingyang CHEN, 1993
 49. Shear strength parameters identification of loess interface based on borehole micro static cone penetration system, Hengxing Lan, Zhanting Song, Han Bao, Yangfan Ma, Changgen Yan, Shijie Liu, Juntian Wang, 2024
 50. SOME PHYSICAL PROPERTIES OF NEW ZEALAND LOESS, K. S. BIRRELL, R. Q. PACKARD, 1953
 51. Study on Improving Loess Properties with Permeable Polymer Materials, Jiaqi Mu, Jianqi Zhuang, Jiaxu Kong, Shibao Wang, JieWang, Jia Zheng, Yuting Fu and Chenhui Du, 2022
 52. Study on Improving Loess Properties with Permeable Polymer Materials, Jiaqi Mu, Jianqi Zhuang, Jiaxu Kong, Shibao Wang, JieWang, Jia Zheng, Yuting Fu and Chenhui Du, 2022
 53. Summarization and Comparison of Engineering Properties of Loess in the United States, J. B. SHEELER, 1968
 54. The first loess map and related topics- contributions by twenty significant women loess scholars, Kathryn Fitzsimmons, Sue McLaren, and Ian Smalley, 2018
 55. The geological origins and soil properties of loess-like silty clay- a case study in the jinan area, Zhenghao Liu, Xianfeng Ma, Dingyi Zhou, Linhai Lu, Haihua Zhang, Yujie Bai, Han Han, 2024
 56. 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
 57. The Structural Damage Properties of Loess under Loading and Moistening, A Z Luo, S J Shao, 2018
 58. Vectorized dataset of check dams on the Chinese Loess Plateau using object-based classification method from Google Earth images, Yi Zeng, Tongge Jing, Baodong Xu, Xiankun Yang, Jinshi Jian, Renjie Zong, Bing Wang, 2, Wei Dai, Lei Deng, Nufang Fang, Zhihua Shi, 2023
 59. 黄土のコラプス沈下特性に関するレオロジー的考察, 郭玉文・西村拓・鈴木創三・加藤誠, 2003
-

H6 ラテライト

H6.1 文献

1. A review of the properties of laterite concrete, Shuaibu R.A, Mutuku R.N, Nyomboi T, 2014
 2. 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
 3. An Investigation into the Geotechnical Engineering Properties of Laterite Soils in Nilai, Malaysia, Ahmed Sujeeth, 2015
 4. CASE STUDY PROBLEMS ON DISPERSION POTENTIAL FOR YANGONMANDALAY EXPRESS WAY EMBANKMENTS, Khin Win Nwe, Nyan Myint Kyaw, 2023
 5. Chapter Three Laterite and Ferricrete, Mike Widdowson, 2007
 6. Characteristics of Lateritic Soils Used In Thailand Road Construction, B. A. VALLERGA, NIBON RANANANDANA
 7. Characterization and evolution of primary and secondary laterites in northwestern Bengal Basin, West Bengal, India, Sandipan Ghosh, Sanat K. Guchhait, 2015
 8. Characterization and Stabilization of Laterite for Sustainable Construction Applications, IFEYINWA IJEOMA OBIANYO, 2017
 9. 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
 10. Classification and Engineering Properties of Lateritic Materials, B. A. VALLERGA, C. J. VANTIL
 11. COMPOSITION AND GENESIS OF THE NICKEL-CHROME-BEARING NONTRONITE AND MONTMORILLONITE IN LATERITIZED ULTRAMAFIC ROCKS IN THE MURATDAG ~ I REGION (USAK, WESTERN ANATOLIA), TURKEY, SELAHATTIN KADI ~ R, M. SELMAN AYDOG ~ AN, CAHIT HELVACI, 2015
 12. Detailed Investigation of Index Properties and Rate of Consolidations of Nguzu Edda Lateritic Soils (South-Eastern Nigeria) Used for Road Construction, Nwadike Henry Onyebuchi, Nweke Obisi Mathias, 2016
 13. Determining properties of lateritic soil using fly ash and coir fibers and optimizing the results, Pallavi Amit Padalkar, 2022
 14. Determining properties of lateritic soil using fly ash and coir fibers and variance, Pallavi R. Kulkarni, V. J. Sharma, 2008
-

15. DEVELOPMENT OF LATERITE ORE PROCESSING AND ITS APPLICATIONS, FATHAN BAHFIE, AZWAR MANAF, WIDI ASTUTI, FAJAR NURJAMAN, ERIK PRASTYO, ULIN HERLINA, 2023
16. Effect of moulding water content on strength characteristics of a cement-stabilized granular lateritic soil, Pawan Kumar Chamling, Dipti Ranjan Biswal, Umesh Chandra Sahoo, 2021
17. Effect of multiple-compaction on laterite soil geotechnical and geo-statistical analysis, Imoleayo Oluwatoyin Fatoyinbo, Siyan Malomo, Yinusa Ayodele Asiwaju-Bello & Akinola Akintokunbo Bello, 2024
18. Engineering Properties of Lateritic Soils around Dall Quarry in Sango Area, Ilorin, Nigeria, Oladele A. Omotoso, Olusola J. Ojo, Emmanuel T. Adetolaju, 2012
19. EVALUATING THE SUITABILITY OF LATERITE SOIL STABILIZED WITH DEMOLISHED MATERIALS AS A ROAD SUB BASE, HIKMA ABDELA, 2017
20. Evaluation of climate change on the collapse potential of unsaturated cement-treated laterite soil for disaster risk reduction, Norshakila Abdul Wahab, Ahmad Safuan A Rashid, Mohamed Jawed Roshan, Roslizayati Razali, 2023
21. Evaluation of Strength and Compressibility Properties of Laterite Soil Blended with Quarry Dust and Cement, Jaja Godfrey Waribo Tom, Ngoye Telema, Urang Unyeawaji Emmanuel, 2023
22. EVALUATION OF THE SUITABILITY OF LATERITIC SOIL OF JIMMA ZONE AS ROAD CONSTRUCTION MATERIALS, LISANWORK TEFERI, 2016
23. Evolution of Laterite in Goa, Mike Widdowson, 2009
24. Exploration and mining of lateritic gold (Part II)- Resource estimation, geometallurgy and environmental considerations, Mario Iglesias-Martínez, Jos'e Antonio Esp et al, 2024
25. Ferricrete, Mike Widdowson, 2003
26. Ferralitic and Ferruginous Tropical Soils of West Africa, Terry R. Forbes, 1973
27. Genesis and Hardening of Laterite in Soils, Alexander, L. T., Oady, j. G., 1962
28. Geochemistry of laterite around UNESCO World Heritage Sites in Kamphaeng Phet, Thailand, Thitiphong Waikhamnuan, Sakonvan Chawchai, Raphael Bissen, 2025
29. GEOTECHNICAL ANALYSIS OF LATERITIC SOIL FROM SELECTED BORROW PITS IN MINNA METROPOLIS, Tsado, R. I., Adejumo, T. W. E., Aguwa, J. I. and David, B. T., 2018)
30. Geotechnical and Mineralogical Evaluation of Some Lateritic Soils from Southwestern Nigeria, Ige Olusegun Omoniyi, Ogunsanwo Olufemi, Aweda Kolawole Abdulwahid, 2014
31. Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Northern Zone of Anambra State, Nigeria, Aginam, C. H., Chidolue, C. A., Nwakaire, C., 2014

32. Identification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering - A Review, M. D. Gidigas, 1974
33. Improving the Engineering Properties of Laterite Soil Using Sharp Sand- A Sustainable Stabilization Technique, Dekpoghol T., Akpusugh, N. T., Akpusugh V. E., 2024
34. Investigation of the Geotechnical Engineering Properties of Laterite as a Subgrade and Base Material for Road Constructions in Nigeria, Habeeb A. Quadri, Olabambo A. Adeyemi, Oladipupo S. Olafusi, 2012
35. Investigation of the Geotechnical Properties of Laterite Soil Combined with Quarry Dust and Lime, Jaja Godfrey W. T., Ngoye Telema, Jaja Horace I., 2023
36. Laterites and lateritic soil and the potential use of the Dynamic Cone Penetrometer, Samuel Innocent Kofi Ampadu, 2015
37. Laterite as a base and subbase material for flexible pavement – a review, Jayalekshmi S., Lincy Fernandez, Anooja Faustine, Anjana A, Rahul. R. Pai, 2022
38. Laterites of the Bengal Basin Characterization, Geochronology and Evolution, Sandipan Ghosh, Sanat Kumar Guchhait, 2020
39. Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement, Dipti Ranjan Biswala, Umesh Chandra Sahoob, Suresh Ranjan Dashb, 2018
40. Modes of Formation, Palaeogene to Early Quaternary Palaeogenesis and Geochronology of Laterites in Rajmahal Basalt Traps and Rarh Bengal of Lower Ganga Basin, Sandipan Ghosh, Sanat Kumar Guchhait, 2019
41. Ni-Co Laterites—A Deposit Model, Erin Marsh, Eric Anderson, 2011
42. Reactive Transport Modeling Applied to Ni Laterite Ore Deposits in New Caledonia: Role of Hydrodynamic Factors and Geological Structures in Ni Mineralization, Andrey Myagkiy, Fabrice Golfier, Laurent Truche, Michel Cathelineau, 2021
43. Review of research on laterites, R. Maignien, UNESCO, 1966
44. Review of Specifications for the Use of Laterite in Road Pavements, Frank Netterberg, 2014
45. Sources of Substance and Genetic Relation of Soil and Bauxite-Bearing Horizons in the Laterite Profile of the Weathering Crust, M. A. Makarova, E. S. Shipilova, N. M. Boevaa, D. A. Vnuchkova, and Academician N. S. Bortnikova, 2023
46. Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane), Laura Daniela Jerez, Orlando Eli'as Go'mez, Carol Andrea Murillo, 2018
47. Stabilization of Laterite Soil Using Quarry Dust and Limestone Powder, Jaja Godfrey Waribo Tom, Ngoye Telema, Thomas Clement Glory, 2023

48. Strength and Durability of Cement-Treated Lateritic Soil, N. A. Wahab, M. J. Roshan, A. S. A. Rashid, M. A. Hezmi, S. N. Jusoh, N. D. N. Norsyahariati, S. Tamassoki, 2021
49. Strength and Stiffness Studies of Cement Stabilized Granular Lateritic Soil, Dipti Ranjan Biswal, Umesh Chandra Sahoo, Suresh Ranjan Dash, 2018
50. Strength Development in Lateritic Soil Stabilised with Coconut Shell Ash for Highway Pavement Construction, J. R. OLUREMI, O. M. OSUOLALE, T. T. ADEOYE3, A. A. AKINGBADE, 2016
51. Structural Characteristics of Ferrallitic Soils under Mechanical Cultivation in the Marginal Forest Areas of the Ivory Coast, DE BLIC, R. MOREAU
52. Study on properties of lateritic soil using fly ash and coir fibers, Pallavi A. Padalkar, Tejashri A. Kulkarni, Apurva J. Chavan, 2017
53. Sustainable use of laterite replaced with bottom ash as road construction materials, Uthairith Rochanavibhata, Sakda Lhajai, Pornkasem Jongpradist, Nattapong, Makaratat, Guoqing Jing & Pitthaya Jamsawang, 2024
54. TESTING OF LATERITIC MATERIALS FOR ROAD PAVEMENTS, P PAIGE-GREEN, F NETTERBERG, MI PINARD
55. The CORLAT Handbook Draft Version 1.2, G.J .J. Aleva, 1992
56. The Effect of Partial Replacement of Fine Aggregate with Lateritic Soil on the Compressive Strength of Sandcrete Block, Joseph Adeyeri, 2009
57. The Effect of Pretreatment on Compaction Characteristics of a Lateritic Gravel, Priscilla Ackah, Ampadu S, Owusu-Nimo F and Ayeh F., 2014
58. The Effect of Pretreatment on Index and Compaction properties of a Lateritic Gravel, S.I.K Ampadu, P. Ackah m, F. Owusu-Nimo, F. J. F. Ayeh, 2015
59. The field compaction of lateritic pavement layers in a tropical environment, Samuel I.K. Ampadu, David Thomas Arthur, 2022
60. The geochemistry and geotechnical (compaction) analysis of lateritic soils: A case study of Okpanam area, Efeoghene Enaworu, Felix C. Ugbe, Oluwatosin J. Rotimi, 2016
61. The geomorphological and geological importance of palaeosurfaces, M. WIDDOWSON, 1997
62. 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
63. コートジボワール産ラテライトの高付加価値化：水硬性バインダーを用いた低温安定化ラテライトをベースとするフェイシングブリケットの製造, ASSANDE Aka Alexandre, 2007

64. 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
65. 講義 ラテライトとラテライト質土およびタイナミック コーン ヘネトロメーターの潜在的用途
Samuel IK Ampadu 教授
66. 熱帯土壤中の鉄質形成物—特に結核と癰塊について, 久馬 剛, 1970

H6.2 図書

1. Laterite and Lateritic Soils and other Problem Soils of Africa, An Engineering study for Agency for International Development, LYON ASSOCIATES, 1971
2. LATERITE SOIL ENGINEERING Pedogenesis and Engineering Principles, M.D. GIDIGASU, ELSEVIER, 1976

H6.3 Murrum

1. EXPERIMENTAL STUDIES ON UTILIZATION OF MURRUM AS EMBANKMENT MATERIAL, P.Sundar Kumar, M.J.Ratnakanth Babu, 2010
2. STANDARD SPECIFICATIONS FOR CLASSIFICATION OF SOILS, HINDUSTAN PETROLEUM
3. SPECIFICATION – MURRUM FILLING, Bharat Petroleum
4. Strength Characteristics of Expansive Soil and Murrum Using Quarry Dust, Shyam Prakash Koganti, Hanumantha Rao Chappidi, 2016

H7 破碎性土

H7.1 文献

1. A contact model for rough crushable sand, Ningning Zhang, Matteo O. Ciantia, Marcos Arroyo, Antonio Gens, 2021
2. A Failure Criterion of Weak and Crushable Limestone Rock in Mining Field containing Karstic Cavities, Yahya Alassaf, Abdelkader Mabrouk, Mehrez Jamei, Anwar Ahmed, 2024
3. A gradation-dependent hypoplastic model for crushable sand, Yaolan Tang, Shun Wang, Chunshun Zhang, 2024
4. A new probabilistic approach for predicting particle crushing in one-dimensional compression of granular soil, Bo Zhou, Jianfeng Wang, 2014

-
5. A unified CPT–SPT correlation for non-crushable and crushable cohesionless soils, Sayed M. Ahmed, Sherif W. Agaiby, Ahmed H. Abdel-Rahman, 2013
 6. An energy-driven crushing-plasticity coupling model for grain crushing in porous rocks, Yaolan Tang, Jianchun Li, Dapeng Wang, Congying Li, Chunshun Zhang, 2024
 7. ANALYSIS OF CRUSHING OF GRANULAR MATERIAL UNDER ISOTROPIC AND BIAXIAL STRESS CONDITIONS, SEBASTIAN L. OBO-GUERRERO, Luis E. VALLEJO, 2005
 8. Calculating the State Parameter in Crushable Sands, Matteo O. Ciantia, Catherine O'Sullivan, 2020
 9. CPT-SPT Correlation of Volcanic Soils in Kediri, East Java, Aflizal Arafianto, Gregorius Rayhan, Martin Wijaya, 2021
 10. CRUSHING OF SOIL PARTICLES, Bobby O. Hardin, 1985
 11. DEFORMATION AND CRUSHING OF PARTICLES OF CEMENT TREATED GRANULATE SOIL, PHAN HUY DONG, KIMITOSHI HAYANO, YOSHIKI KIKUCHI, HIDENORI TAKAHASHI, YOSHIYUKI MORIKAWA, 2011
 12. DEFORMATION-STRENGTH EVALUATION OF CRUSHABLE VOLCANIC SOILS BY LABORATORY AND IN-SITU TESTING, SEI CHI MIURA, KAZUYOSHI YAGI, TSUYOSHI ASONUMA, 2003
 13. DEM analysis of energy dissipation in crushable soils, Jianfeng Wang, Haibin Yan, 2012
 14. Development of a More Descriptive Particle Breakage Probability Model, Murray M. Bwalya, Ngondzashe Chimwani, 2020
 15. Discrete element simulation of crushable soil, Y.P. CHENG, Y. NAKATA, M.D. BOLTON, 2003
 16. EFFECT OF CONSOLIDATION TIME ON SHEAR MODULUS OF CRUSHABLE VOLCANIC SOILS, SAHAPHOL TIMPONG, SEIICHI MIURA, KOJI YARA, 2005
 17. Experimental framework for evaluating the mechanical behavior of dry and wet crushable granular materials based on the particle breakage ratio, Carlos Ovalle, Christophe Dano, Pierre-Yves Hicher, and Mónica Cisterna, 2014
 18. Field characterisation and mapping of pumiceous deposits in central north island, NZ, O.M. Gill, R.P. Orense, 2019
 19. GEOTECHNICAL PROPERTIES OF A PUMICE SAND, M. J. PENDER, L. D. WESLEY, T. J. LARKIN, SATYAWAN PRANJOTO, 2006
 20. Geotechnical Properties of Two Volcanic Soils, L. D. Wesley, 2003
 21. Identification of soil particle size distribution in different sedimentary environments at river basin scale by
-

-
- fractal dimension, Yanyan Wang, Yujiang He, Jiang Zhan & Zhiping Li, 2022
22. INFLUENCE OF FREEZE-THAW ACTION ON DEFORMATION-STRENGTH CHARACTERISTICS AND PARTICLE CRUSHABILITY OF VOLCANIC COARSE-GRAINED SOILS, TATSUYA ISHIKAWA, SEIICHI MIURA, 2011
 23. Influence of Natural Aggregate Crushing Process on Crushing Strength Index, Andrzej Pacana, Dominika Siwiec, Lucia Bednarova, Marian Sofranko, Olga Vegsoova, Martin Cvoliga, 2021
 24. Laboratory testing issues related to crushable sands, Wils L., Van Impe W.F., Haegeman W, Van Impe P.O., 2013
 25. Micromechanical inspection of incremental behaviour of crushable soils, M. O. Ciantia, M. Arroyo, C.O. Sullivan, A. Gens, 2019
 26. Micromechanical inspection of incremental behaviour of crushable soils, Matteo O. Ciantia, Marcos Arroyo, Catherine O'Sullivan, Antonio Gens, 2019
 27. On single particle breakage behavior of crushable weathered sands, YU Fang-wei, ZHAO Chuang, LIU Wei-chen, 2022
 28. On the micro mechanics of yielding and hardening of crushable granular soils, John P. de Bono*, Glenn R. McDowell, 2018
 29. ONE-DIMENSIONAL COMPRESSION BEHAVIOUR OF UNIFORMLY GRADED SAND RELATED TO SINGLE PARTICLE CRUSHING STRENGTH, YUKIO NAKATA, YOSHINORI KATO, MASAYUKI HYODO, ADRIAN F. L. HYDE, HIDEKAZU MURATA, 2001
 30. Particle breakage and its influence on soil behavior under undrained condition, Fangwei Yu, Ikuo Towhata, 2016
 31. Particle failure in DEM models of crushable soil response, M.O. Ciantia, M. Arroyo, A. Gens, F. Calvetti, 2014
 32. PARTICLE SHAPE AND CRUSHING EFFECTS ON DIRECT SHEAR BEHAVIOR USING DEM, SEON-AH JO, EUN-KYUNG KIM, GYE-CHUN CHO, SEOK-WON LEE, 2011
 33. Pile penetration in crushable soils Insights from micromechanical modelling, M. O. Ciantia, C. O'Sullivan and R. J. Jardine, 2019
 34. Properties of compression and single particle crushing for crushable soil, Y.Nakata, Y.KatO & H.Murata, 2001
 35. Quantifying Particle Breakage and Its Evolution Using Breakage Indices and Grading Entropy Coordinates, James Leak, Daniel Barreto, Vasiliki Dimitriadi, Em"oke Imre, 2022
 36. SIGNIFICANCE OF PARTICLE CRUSHING IN GRANULAR MATERIALS, Poul V. Lade, Jerry A.
-

- Yamamuro, Paul A. Bopp, 1996
37. Simulation of bearing capacity of pile in crushable soil, Trong-nghia Nguyen, Mamoru Kikumoto, Florince, Rahmat Kurniawan, 2022
 38. Tracking pedogenic carbonate formation and alkalinity migration in agricultural soils amended with crushed wollastonite ore – Evidence from field trials in Southwestern Ontario, Reza Khalidy, Fatima Haque, Yi Wai Chian, Rafael M. Santos, 2025
 39. Understanding the Geotechnical Behaviour of Pumiceous Soil A Review, Balasubramanian Elankumaran, Kim L. de Graaf, Rolando P. Orense, 2024
 40. 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, 田中邦博, 安福規之, 村田秀, 兵動正幸, 1995
 41. まさ土のせん断特性に関する一考察, 福田聡, 長原英毅, 石川綾乃, 福本武明, 2002
 42. 火山灰質粒状体の粒子蔽砕に及ぼす応力系の影響, 礪崎真一, 三浦清一, 新田登, 1992
 43. 多孔質粒子やセメンテーションを持つ火山性超高間隙構造土のせん断特性, 東京大学生産技術研究所桑野研究室, 2019
 44. 締固めたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響, 福本武明, 1972
 45. 凍結融解作用を受ける火山灰質粗粒土の力学特性の評価試験方法の検討, 石川 達也・尾崎 悠太・三浦 清一, 2008
 46. 熱帯および温帯に分布する花崗岩質風化残積土の特性（その１）一風化残積土地盤の応用地質学的特徴, 末岡徹, 2020
 47. 熱帯および温帯に分布する花崗岩質風化残積土の特性（その２）一風化残積土地盤の化学的特徴, 末岡徹, 2020
 48. 破碎性火山灰地盤の力学特性の評価, 八木一善, 三浦清一, 2004
 49. 破碎性火山灰土の変形特性に及ぼす凍結融解履歴の影響, 山木 正彦・三浦 清一・横浜 勝司, 2009
 50. 破碎性材料の粒子特性と一次元圧縮特性, 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 2002
 51. 破碎性材料の力学特性, 中田幸男, 兵動正幸, 加登文学, 村田秀一, 2000
 52. 破碎性土の個別要素法シミュレーション, 中田幸男, M. D. Bolton, 2002
 53. 破碎性土の粒子形状について, 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 2001
 54. 北海道に分布する風化残積土の物理・力学挙動とその工学的評価, 川村志麻, 三浦清一, 2018
 55. 粒度分析に基づくまさ土斜面の風化度判定, 佐藤健, 板橋一雄, 長谷川英明, 熊崎幾太郎, 若松雅

佳, 平岩由夫, 1999

H7.2 試験基準

1. IS : 2386 - Part-4 AGGREGATE CRUSHING VALUE TEST

H8 炭酸塩土壌

H8.1 文献

1. A Comparative Study of Pile Foundations in Coral Formations and Calcareous Sediments, FOUAD M. GHAZALI, ZAKI A. BAGHDADI AND OSAMA A. MANSUR, 1990
2. Agricultural acceleration of soil carbonate weathering, John H. Kim, Esteban G. Jobbágy, Daniel D. Richter, Susan E. Trumbore, 2020
3. An invisible soil acidification Critical role of soil carbonate and its impact on heavy metal bioavailability, Cheng Wang, Wei Li, Zhongfang Yang, Yang Chen, Wenjing Shao, Junfeng Ji, 2015
4. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran, F. Khormalia, A. Abtahia, S. Mahmoodib, G. Stoops, 2003
5. Calcic soils and calcretes in the southwestern United States, George O. Bachman and Michael N. Machette, 1977
6. Causes and implications of the seasonal dissolution and precipitation of pedogenic carbonates in soils of karst regions – A thermodynamic model approach, David Domínguez-Villar, Aleksandra Bensa, Mirna Švob, Kristina Krklec, 2022
7. Carbon Sequestration, P. Ramamoorthy, R. Ariraman, M. Karthikeyan, 2021
8. Chapter 15 Carbonate and Gypsum, RICHARD H. LOEPPERT, DONALD L. SUAREZ, 1996
9. COMPARISON OF GYPSIFEROUS SOILS IN SAMARRA AND KARBALA AREAS, IRAQ, Mou'taz A. Al-Dabbas, Tom Schanz and Mohammed J. Yassen, Apr. 2010
10. CONODONT BIOSTRATIGRAPHY AND DEPOSITIONAL HISTORY OF THE MIDDLE DEVONIAN TO LOWER CARBONIFEROUS IN THE CANTABRIAN ZONE (CANTABRIAN MOUNTAINS, SPAIN), J. G. M. RAVEN, 1983
11. DETERMINATION OF CARBONATE CONTENT OF SOILS AND CLAYS BY USING CO₂ DETECTOR TUBE - IMPROVEMENT OF THE METHOD AND SOME APPLICATIONS -, AYE AYE THAN, KAZUYUKI SHOJI and SHIN-ICHIRO WADA, 2010

12. Effect of drying–wetting cycles on aggregate breakdown for yellow–brown earths in karst areas, Jie Xu, Yiqun Tang and Jie Zhou, 2017
13. EFFECT OF MATRIC SUCTION ON THE BEHAVIOUR OF UNSATURATED GYPSEOUS SOIL, Ali Abdulkadhim Jasim Al-Shamoosi, 2019
14. Genesis and Classification of Soils Containing Carbonate on the Apodi Plateau, Brazil, E. . Ferreira, L. H. Cunha dos Anjos, M. G. Pereira, G. S. Valladares, R. Cipriano-Silva and . C. de Azevedo, 2016
15. Genesis and Clay Mineralogical Investigation of Highly Calcareous Soils in Semi-Arid Regions of Southern Iran, Mostafa Emadi, Majid Baghernejad, Hamidreza Memarian, Mahboub Saffari and Hamed Fathi, 2008
16. Geochemical factors controlling the mobilization of geogenic cadmium in soils developed on carbonate bedrocks in Southwest China, Yizhang Liu, Chengshuai Liu, Changshun Song, Zijie Chen, Haiyang Guan, Dan Xing, Ting Gao, Jing Sun, Zengping Ning, Tangfu Xiao, 2023
17. GEOTECHNICAL PROPERTIES OF CARBONATE SOILS WITH REFERENCE TO AN .IMPROVED ENGINEERING CLASSIFICATION, B, Sterianos, 1988
18. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, Nico Goldscheider, Zhao Chen1 & Augusto S. Auler, Michel Bakalowicz, Stefan Broda, David Drew, Jens Hartmann, Guanghui Jiang, Nils Moosdorf, Zoran Stevanovic, George Veni, 2020
19. Heavy minerals as indicators of source material in soils on carbonates, Barbara ˇCeplak, Miloˇs Miler, Nina Zupanˇciˇc, Simona Jarc, 2023
20. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, O. S. Baghabra Al-Amoudi, K. Khan, N. S. Al-Kahtani, 2010
21. サンゴ礫混り土調査・設計マニュアル（案）, 沖縄総合事務局港湾計画課, 2005
22. 多孔質粒子やセメンテーションを持つ火山性超高間隙構造土のせん断特性, 東京大学生産技術研究所桑野研究室, 2019
23. 底質特性を用いた亜熱帯のサンゴ礁海岸の海浜分類とその特性に関する基礎的研究, 辻本剛三・升谷 武尊, 2020

H8.2 図書

1. CARBONATE DEPOSIDONAL ENVIRONMENTS, Peter A. Scholle, Don G. Bebout, Clyde H. Moore, AAPG, 1983
2. GEOTECHNICAL PROPERTIES, BEHAVIOR, AND PERFORMANCE OF CALCAREOUS SOILS, K. R. Demars, R. C. Chaney, ASTM, 1981

H9 泥灰土 Marl

H9.1 文献

1. A SIMPLE METHOD TO IDENTIFY MARL SOILS, Chulmin Jung, Antonio Bobet, Nayyar Zia Siddiki, 2010
2. Analysis of the railway heave induced by soil Swelling at a site in southern France, Anh-Minh Tang, Yu-Jun Cui, Viet-Nam Trinh, Yahel Szerman, Gilles Marchadier, 2009
3. Application of the dynamic cone penetrometer test for determining the geotechnical characteristics of marl soils treated by lime, Amir Hossein Vakili, Mahdi Salimi, Mohammad Shamsi, 2021
4. Automatic approach for increasing the location accuracy of slow-moving landslide endogenous seismicity the APOLoc method, F Provost, J-P Malet, J Gance, A Helmstetter, C Doubre, 2020
5. Classification of Marl Soils, Chulmin Jung, Sochan Jung, Antonio Bobet, Nayyar Zia Siddiki, 2009
6. Dimensional Specifications and Resistance Characteristics of Olive Marl Masonry for Reinforcement and Stabilization of Excavations and Road Structures, Farshad Saeedi, Gholam Moradi, Saeed Roustaei, 2023
7. Effect of nano-silica on engineering properties of lime-treated marl soil, J. Karimiazar, E.S. Teshnizi, B.C.O'Kelly, S. Sadeghi, N. Karimizad, A. Yazdi, R. Arjmandzadeh, 2023
8. Enhancing the Properties of Marl Soils for Effective Construction in Saudi Arabian Region, Md. Arifuzzaman, M. Najjar, M. N. Mahmud, A. B. M. S. Islam, I. Khan, M. M. Ali, 2016
9. Experimental Investigation Of Mechanical Behavior Of Improved Marl Soil Using Nano Calcium Carbonate, Ali Ohadiana, Mehdi Mokhberi, 2021
10. Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans, Hadi Bahadori, Araz Hasheminezhad and Farshad Taghizadeh, 2019
11. Effect of nano-silica on engineering properties of lime-treated marl soil, Jafar Karimiazar, Ebrahim Sharifi Teshnizi, Brendan C. O'Kelly, Shahriar Sadeghi d., Nafiseh Karimizad, Abdollah Yazdi, Reza Arjmandzadeh, 2023
12. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment, R. Cardoso, E. Maranha das Neves, 2012
13. 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
14. Mechanisms for the Formation of an Exceptionally Gently Inclined Basal Shear Zone of a Landslide in Glacial Sediments—The Ludoialm Case Study, Xiaoru Dai, Barbara Schneider-Muntau, Julia Krenn,

Christian Zangerl, Wolfgang Fellin, 2023

15. Microstructural Evaluation of Thermal Stabilization of Marl Soils Considering Permeability Variations, Mohammad Amiri, Masoud Dehghani, Maedeh Papi, 2022
16. Microstructural investigation of changes in engineering properties of heated lime-stabilised marl soil, Mohammad Amiri, Masoud Dehghanih, Behzad Kalantari, Maedeh Papi, Fatomeh Porhonar, Rana Salehian, Sepideh Taheri, Sydney, Australia, 2021
17. 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
18. Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia, Saad A. Aiban, 1995
19. STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MARLS- CASE FROM FES - MEKNES REGION (MOROCCO), Abdelouahed Essaied, Mohamed Rouai, Abdelilah deKayirI Karim Bouhali, 2023
20. Water erosion on marl slopes and prevention of its effects using conservation of water and soil systems in the Wadi Isser watershed – Algeria, Mohamed ZOBIRI, Mohamed MAZOUR, Boutkhil MORSLI, 2018
21. 泥灰岩土壌の性質と粘土鉱物, 伊藤 滋吉, 伊良波 幸和, 飯村 康二, 2011

H9.2 図書

1. Carbonate Depositional Environments, Peter A. Scholle, Don G. Bebout, Clyde H. Moore, The American Association of Petroleum Geologists, 1983
2. Geotechnical Properties, Behaviour, and Performance of Calcareous Soils, K. R. Demars, R. C. Chaney, ASTM, 1982

H10 可溶性地盤 Karst

H10.1 文献

1. Analysis of the Influence of the Beaded Karst on the Pile Additional Settlement, Zhangjun Daia, Shanxiong Chenb, Xichang Xu, Fei Yu, 2016
2. APPLICATION OF MAMMOTH VIBRO-TAMPER (MVT) FOR THE SHALLOW COMPACTION AT AIRPORT RUNWAY EXPANSION PROJECT ON FLORIDA LIMESTONE GROUND, Mitsuo Nozu, Frank Vespi, Kazunori Matsushita, Emi Walder, 2018
3. Effect of drying–wetting cycles on aggregate breakdown for yellow–brown earths in karst areas, Jie Xu, Yiqun Tang, Jie Zhou, 2017

4. Engineering classification of karst ground conditions, A.C. Waltham, P.G. Fookes, 2003
5. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, Nico Goldscheider, Zhao Chen, Augusto S. Auler, Michel Bakalowicz, Stefan Broda, David Drew, Jens Hartmann, Guanghui Jiang, Nils Moosdorf, Zoran Stevanovic, George Veni, 2020
6. Influence of Karst Caves at Pile Side on the Bearing Capacity of Super-Long Pile Foundation, Peisen Wang, Hongyan Ding, Puyang Zhang, 2020
7. Influence of Karst Caves on the Pile's Bearing Characteristics-A Numerical Study, Jia-hui Liang, Qiu-yan Fan, Kuo Qin, 2022
8. Influencing Factors and Evaluation Indexes of the Stress of Bridge Pile Foundation in Karst Area, Jian Xing, Xichang Xu, Lingfa Jiang, 2016
9. Investigation of Geological Anomalies at Pile Foundation Location in Urban Karst Areas Using Single Borehole Radar, L. Liu, Z. Shi, M. Peng, G.P. Tsoflias, 2020
10. KARST TOPOGRAPHY- NONINVASIVE GEOPHYSICAL DETECTION METHODS AND CONSTRUCTION TECHNIQUES, Lindsay Ivey Burden, 2012
11. Natural and anthropogenic rock collapse over open caves, T. WALTHAM, Z. LU, 2007
12. Prediction of bearing capacity of pile foundation in karst area based on model of metabolic GM (1,1), Z. Feng, H. Chen, C. Xia, S. Li, J. Cai, J. He, 2018
13. Quantitative foundation stability evaluation of urban karst area-Casestudy of Tangshan, China, Jingrui Niu, Ibrahim A. Oyediran, Daan Liua, Xin Huang, Zhendong Cui, Hongjian Wang, Xiaoshan Shi, 2015
14. Research on programmatic multi-attribute decision-making problem An example of bridge pile foundation project in karst area, Y. Lu, Ch. Nie, D. Zhou, L. Shi, 2023
15. Shoreline Pilling Foundation Design in Karst Formation, Port Sudan, Red Sea, Sudan, Al-Imam, O. A. O., Kheiralla, K. M., Elzien, S. M., Mohammed, A. A., 2014
16. Sinkhole hazard case histories in karst terrains, T. Waltham, 2008

H10.2 図書

1. Karst Management, Philip E. van Beynen, Springer, 2011

H11 珊瑚土壌

1. A STUDY ON MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE USING SEA WATER AND SEA SAND, Hiroshi Takenaka, Kiyofumi Sano, Takahiro Sakai, Takashi Habuchi, et al.
2. CASE RECORD OF QUAY WALL CONSTRUCTION ON A CORAL MIXED COHESIVE SOIL, AKIO NAKASE, OSAMU KUSAKABE, IROFUMI NAKANODO, HIDEAKI OHNEDA, 1985
3. Concrete with coral aggregate Study of applicability to offshore structures, Takahiro Nishida, Toru Yamaji, Kazuhide Yonamine, Osamu Taniguchi, Ryoichi Tanaka, Hiroshi Takenaka, Osamu Kiyomiya
4. Coral Reefs and Their Management in Tanzania, Greg M. Wagner, 2004
5. EVALUATION OF DURABILITY OF CONCRETE USED FOR WAVE DISSIPATING BLOCK BASED ON FIELD SURVEY, Toru Yamaji, Masafumi Miyata, Kenzo Kumagai, Mitsuyasu Iwanami, et al.
6. Evaluation of the Effects of Surface Treatment Methods on the Properties of Coral Aggregate and Concrete, Jinming Liu, Boyu Ju, Wei Xie, Ting Zhou, Haiying Xiao, Shanliang Dong, Wenshu Yang, 2021
7. Fundamental Properties of Self-Compacting Concrete Using Sea Water and Sea Sand, Hiroshi Takenaka, Takahiro Sakai, Hiromitsu Koyama, Toru Yamaji, Osamu Kiyomiya
8. Incorporating sea sand into self-compacting concrete a systematic review, B. M. Sindhurashmi, Gopinatha Nayak, N. D. Adesh, Vidya Rao, Sandhya Parasnath Dubey, 2024
9. MIX DESIGN OF CORAL AGGREGATE CONCRETE REPORT FOR BLIGH TANNER, Tatheer Zahra, 2019
10. STUDY ON USE OF CORAL SAND AS FINE AGGREGATES IN CONCRETE, C. Pavithra, D. Anil Ratthen, A. Arokiaprakash, S. Karthiga, 2017
11. Utilizing of coral/sea sand as aggregates in environment-friendly marine mortar Physical properties, carbonation resistance and microstructure, Songsong He, Chujie Jiao, Yanfei Niu, Song Li, 2022
12. 沖縄におけるコンクリート施工の現状とその問題点, 具志幸昌・喜納政修, 1964
13. 沖縄のコンクリートの基本的性状に関する研究 その1, 具志幸昌・和仁屋晴謹, 1968
14. 沖縄本島におけるコンクリートの強度および2、3の性質, 具志幸昌・和仁屋晴謹, 1968
15. さんご砂利コンクリートに関する研究 I, 具志幸昌, 1968
16. さんご砂利コンクリートに関する研究 II, 具志幸昌, 1969
17. 沖縄のコンクリートの基本的性状 II, 具志幸昌, 1977
18. さんご砂利コンクリートに関する研究 III, 具志幸昌, 1978

19. 海水および海砂を用いた自己充てん型コンクリートの諸特性, 竹中寛・酒井貴洋・山路徹・清宮理, 2013
20. 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートへのフライアッシュの適用性, 竹中寛・末岡英二・佐野清史・清宮理, 2015
21. 海水および珊瑚骨材を用いた自己充填型コンクリートの基本性能, 竹中寛・酒井貴洋・山路徹・清宮理, 2016
22. 海水および珊瑚由来の石灰岩骨材を用いた自己充填型コンクリートの基本性状, 竹中寛・酒井貴洋・田中亮一・与那嶺一秀・清宮理, 2016
23. 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの実用化に関する研究, 酒井貴洋, 2017
24. 海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの実用化に関する基礎的研究, 酒井貴洋・山路徹・清宮理, 2017
25. 環太平洋地域の低品質粗骨材を使用したコンクリートの強度および物質透過抵抗性に関する研究, 西田孝弘・大即信明・鬼塚良介・Wanchai Yodsudjai・横倉順治, 2003
26. サンゴ骨材を用いたコンクリートの施工性および耐久性に関する検討, 山路徹・与那嶺一秀・川端雄一郎, 2018
27. 珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性に関する検討, 西田孝弘・山路徹・与那嶺一秀・谷口修・田中亮一・竹中寛・清宮理・研究所報告, 2020
28. 珊瑚由来の石灰石骨材が海水練り自己充填型コンクリートの性質に及ぼす影響, 竹中寛・谷口修・田中亮一・与那嶺一秀・山路徹・清宮理, 2020
29. 消波ブロックに用いられたコンクリートの耐久性に関する実態調査と海外適用における課題, 山路徹, 宮田正史, 熊谷健蔵, 岩波光保, 高山知司, 久田成昭, 2019
30. 底質特性を用いた亜熱帯のサンゴ礁海岸の海浜分類とその特性に関する基礎的研究, 辻本剛三・升谷武尊, 2020

H12 塩類性土壌

1. A quantitative assessment of the dynamic process and potential capacity of using gypsum to reclaim sodic soil, Wenchao Zhang, Wenxin Zhang, Shujuan Wang, Zhentao Sun, Jia Liu, Yan Li, Yuqun Zhuo, Lizhen Xu, Yonggan Zhao, 2023
2. Accounting for potassium and magnesium in irrigation water quality assessment, J.D. Oster, Garrison Sposito, Chris J. Smith, 2016
3. Assessing Roles of Aggregate Structure on Hydraulic Properties of SalineSodic Soils in Coastal Reclaimed Areas, Yuanhang Fei, Dongli She, Shengqiang Tang, Hongde Wang, Xiaoqin Sun, Xiao Han, Dongdong Liu, 2024
4. Calculating pH from EC and SAR Values in Salinity Models and SAR from Soil and Bore Water pH and EC Data, C. W. Robbins, W. S. Meyer, 1990
5. Chapter 4 Problems Soils 9.9.20, SOIL 4234 Soil Nutrient Manegament, http://psssoil4234.okstate.edu/lecture/chapter-3/Chapter3_14.ppt/view
6. Conservation and Management of Soil and Water resources, Anand Swarup, T. J. Purakayastha, 2016
7. DISTRIBUTION AND CHARACTERISTICS OF PROBLEM SOILS IN INDIA AND THEIR MANAGEMENT FOR CROP PRODUCTION, N. N. GOSWAMI, 1981
8. Effect of sodium adsorption ratio and electric conductivity of the applied water on infiltration in a sandy-loam soil, Abdulwahed M Aboukarima, Mohammed A Al-Sulaiman, Mohamed SA El Marazky, 2018
9. Electrical conductivity as a salient factor in saline-sodic soils of Tabriz plain, S. OUSTAN, A. A. JAFARZADEH, N. ALIASGHARZAD, 2007
10. Engineering Problems in Sodic Soils and its Feasible Measures – A Pilot Study in Sultanpur District, Uttar Pradesh, Abhishek Saxena, Deepti Verma, Pragya Singh, 2015
11. Evaluation of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging, MFarzamian, F.JMartinez-Moreno ,T.BRamos, NCastanheira, A.MPaz, F.AMonteiro Santos, C.A Alexandre, M.C Paz5, M. RRodríguez, K Vanderlinden, M.C Gonçalves, 2021
12. Experimental investigation into the salinity effect on the physicommechanical properties of carbonate saline soil, Jiejie Shen, Qing Wang, Yating Chen, Xuefei Zhang, Yan Han, Yaowu Liu. 2024
13. Geochemical factors controlling the mobilization of geogenic cadmium in soils developed on carbonate bedrocks in Southwest China, Yizhang Liu, Chengshuai Liu, Changshun Song, Zijie Chen, Haiyang Guan, Dan Xing, Ting Gao, Jing Sun, Zengping Ning, Tangfu Xiao, 2023
14. Global Map of salt-affected Soils, Food and Agriculture Organization of the United State, 2021
15. 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
16. Handbook for saline soil management Editors R. Vargas, E.I. Pankova, S.A. Balyuk, P.V. Krasilnikov and G.M. Khasankhanova, 2018
17. Heavy minerals as indicators of source material in soils on carbonates, Barbara ˇCeplak, Milo's Miler, Nina Zupan ˇci'c, Simona Jarc, 2023
18. Influence of salinity on soil chemical properties and surrounding vegetation of Awe salt mining site, Nasarawa State, Nigeria, Dedek Oyinade Aderoju, Akomolafe Gbenga Festus, 2013
19. Irrigation Induced Salinity and Sodicity Hazards on Soil and Groundwater An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies, Aadhityaa Mohanavelu, Sujay Raghavendra Naganna, Nadhir Al-Ansari, 2021
20. Land salinization, Encyclopédie de l'environnement, 2023
21. Management of saline and sodic soils, P. Ramamoorthy, M. Karthikeyan, V. Nirubana, 2021
22. Management of Sodic Soils in Alberta, Government of Alberta, 2010
23. Managing Sadie, Acidic and Saline Soils, Pichu Rengasamy, John Bourne, 1997
24. MAPPING OF SALT-AFFECTED SOILS Technical manual, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS ROME, 2020
25. MINERALIZATION OF MICROALGAL CARBON AND NITROGEN IN SODIC SOILS, Ileana CASTRO-GONZÁLEZ, Héctor Iván BEDOLLA-RIVERA, María de la Luz Xochilt NEGRETE-RODRÍGUEZ, Omar S. CASTILLO, Dioselina ÁLVAREZ-BERNAL, Eloy CONDE-BARAJAS ,2024
26. MODELING OF SOIL SODIUM ADSORPTION RATIO BASED ON SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY, Mohsen Seilsepour, Majid Rashidi, 2008
27. PLANT MATERIALS TECHNICAL NOTE Plants for Saline to Sodic Soil Conditions in Montana and Wyoming, US Department of Agriculture, 2022
28. Prediction of Soil Exchangeable Sodium Percentage Based on Soil Sodium Adsorption Ratio, Mohsen Seilsepour, Majid Rashidi, Borzoo Ghareei Khabbaz, 2009
29. Prediction of Soil Sodium Adsorption Ratio Based on Soil Electrical Conductivity, Majid Rashidi, Mohsen Seilsepour, 2011
30. Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils, DROUGHT TIP, 2015
31. Relation Between pH_c and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters, D. L. SUAREZ, 1981
32. RELATIONSHIP BETWEEN EXCHANGEABLE SODIUM AND SODIUM ADSORPTION RATIO IN

-
- A SOLONETZIC SOIL ASSOCIATION, W. R. A. HARRONT. G. R. WEBSTER, R. R. CAIRNS, 1983
33. Research Article Modeling of Exchangeable Sodium Ratio on the Saline Soil, Zahra Shirmohammadi-aliakbarkhani, Somayeh Heydari, 2020
 34. Rio (1992) to Glasgow (2021)- Three decades of inadequate mitigation of climate change and its slow onset effects, Ilan Stavi, 2022
 35. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils, Birka Wicke, Edward Smeets, Veronika Dornburg, Boris Vashev, Thomas Gaiser, Wim Turkenburga and Andre Faaij, 2011
 36. The salinization problems and soil hydromorphism as components of land desertification, irrigated zone of Tajikistan and the liquidation ways of them, A.F. Salimzoda et al, 2021
 37. A General Assessment of Marine Turtle Nesting Activity on the Libyan Saline Coast, Daw A. Haddoud, Hisham M. El Gomati, 2010
 38. An experimental investigation on -stabilization of sabkha soils with cement and Cement Kiln Dust (CKD) in Sultanate of Oman, Danish Shuja, Chiranjeevi Rahul Rollakanti, Kiran Kumar Poloju, Adams Joe, 2022
 39. Application of Date Palm Ash to Improve Strength Characteristics of Sabkha Soil, Zaheer Abbas Kazmi, 2020
 40. Aspergillus Species from the Sabkha Marsh: Potential Antimicrobial and Anticancer Agents Revealed Through Molecular and Pharmacological Analysis, Bayan H Sajer, Wafa A Alshehri, Sahar S Alghamdi, Rasha S Suliman, Alhanouf Albejad, Haifa Hakmi, 2024
 41. Assessing deep soil mixing for excavation support in Sabkha soils: a numerical study, Hassan. A. Abas, Ayed E. Alluqmani, Isameldin Yousif, 2024
 42. Assessing the distribution of soil organic carbon under three plant species across coastal sabkhas: A comparative analysis, Kholoud Y.A. Shari, Sulaiman A. Alrumman & Ebrahim M. Eid, 2024
 43. Cement Kiln Dust as Partial Replacement of Cement for Improvement of Sabkha Soils for road application, Mohammed Yousuf Al-Aghbari, 2024
 44. Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman, Yahia E.-A. Mohamedzein, Amer A. Al-Rawas, 2011
 45. Chemical evolution of an inland sabkha: a case study from Sabkha Matti, Saudi Arabia, Waleed Saeed, Orfan Shouakar-Stash, André Unger, Warren W. Wood, Beth Parker, 2021
 46. Coastal Sabkha Preservation in the Arabian Gulf, Stephen W. Lokier, 2013
 47. Do coastal salt mudflats (sabkhas) contribute to the blue carbon sequestration?, Hadil Elsayed, Zulfa Ali Al Disi, Khaled Naja, Ivan Strakhov, Scott O. C. Mundle, Hamad Al Saad Al-Kuwari, Fadhil Sadooni, Zach Diloreto, Jassim Abdulla A. Al-Khayat, Maria Ditttrich, 2025
-

48. Effect of alkali activated materials in stabilizing sabkha soil, Wagdi M. Hamid, Ahmed M. Alnuaim, Abdulhafiz O. Alshenawy, 2023
49. Effect of Geopolymer Treatment on the Ultimate Bearing Capacity of Sabkha Soil under Axial Loading, Wagdi Hamid, Ahmed Alnuaim, 2024
50. EFFECT OF SOME CHEMICAL ADDITIVES ON THE BEHAVIOR OF SABKHA SOIL, Waad Abdul Sattar Hussain, Safa Hussain Abid Awn, 2015
51. Effects of Long-Term Soaking on the Load-Bearing Capacity of Bitumen-Treated Saline Sabkha Soil Subgrade, Fahad A. Al-Otaibi, 2023
52. Effect of water salinity on the compaction of Sabkha soils, Ali Messad, Oussama Yahia Debbab, Belkacem Moussai, 2019
53. Enhancing mechanical characteristics of a collapsible sandy Sabkha soil using an eco-friendly admixture: An experimental and numerical study, Mohamed B.D. Elsayy, Abderrahim Lakhout, 2023
54. Evaluation of Sabkha Soil Bearing Capacity by Plate Load Test in Al Muthanna Province, Mohammad Fadhil Abbas, Haider M. Makkiyah, 2024
55. Expansive potentiality of sabkha soils of Rabigh Lagoon, Saudi Arabia: a case study, Bader A. Hakami, El-Sayed Sedek Abu Seif, 2019
56. Foundations on Salt Bearing Soils of Jizan, M. N. Fatani, A. M. Khan, 1993
57. Foundations over Salt-Encrusted Flats (Sabkha) Profiles, Properties, and Design Guidelines, Waddah Akili, 2004
58. Geotechnical Properties of Sabkha Soil in the southern part of Al-Khobar city, KSA, Kamal M. Ali, Ibrahim Malik, Abdelazim Makki Ibrahim, 2015
59. Ground Improvement Using Dynamic Compaction in Sabkha Deposit, Joon-Shik Moon, Hyuk Sang Jung, Sungjune Lee, Su-Tae Kang, 2019
60. Groundwater and Solute Budget (A Case Study from Sabkha Matti, Saudi Arabia), Waleed Saeed, Orfan Shouakar-Stash, Warren Wood, Beth Parker, André Unger, 2020
61. High-quality genome assembly and annotation of five bacteria isolated from the Abu Dhabi sabkha-shore region, Beenish Sarfraz, Jean Tuyisabe, Louis De Montfort, Abdulrahman Ibrahim, Shamma Z. Abdulkreem Almansoori, Haya Alajami, Asma Almeqbaali, Biduth Kundu, Vishnu Sukumari Nath, Esam Eldin Saeed, Ajay Kumar Mishra, Khaled Michel Hazzouri, Raja Almaskari, Abhishek Kumar Sharma, Naganeeswaran Sudalaimuthuasari, Khaled M. A. Amiri, 2024
62. High-resolution facies analysis of a coastal sabkha in the eastern Gulf of Salwa (Qatar): A spatio-temporal reconstruction, MAX ENGEL, CHRISTIAN J . STROHMENGER, KIM T. PEIS, ANNA PINT,

- DOMINIK BRILL, HELMUT BR €UCKNER, 2021
63. Improvement and Characterization of Sabkha Soil of Saudi Arabia - A Review, Md Arifuzzamana, Mohammad A. Habib, Mohammed K. Al-Turki, M. I. Khanc, M. M. Ali, 2016
 64. Improvement of Sabkha Soils Using Cement and Marble Powder, Mohammed A. Hammad, Yahia E.-A. Mohamedzein, Mohamed. Al-Aghbari, 2024
 65. IMPROVING THE CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF SALINE SABKHA SOIL BY ADDING BITUMEN, Fahad A. Al-Otaibi, 2022
 66. INFLUENCE OF SALT DISSOLUTION RATE ON THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SABKHA AND DUNE SAND ARID SOIL DEPOSIT SAMPLES FROM KUWAIT, Fahad A. Al-Otaibi, 2022
 67. Integrated Analysis of the Geotechnical Factors Impeding Sustainable Building Construction—The Case of the Eastern Province of Saudi Arabia, Zaheer Abbas Kazmi, Mahmoud Sodangi, 2021
 68. Investigating stone column effectiveness for sabkha soil improvement: field tests and numerical model, Hassan. A. Abas, Abdullah M. Medawi, 2024
 69. Limited warming of Middle Miocene arid low-latitude climates: application of clumped isotopes in sabkha environments. Marta Marchegiano, Martin Ziegler, Or M. Bialik, David De Vleeschouwer, 2024
 70. Mineralogy and Geochemistry of Coastal Sabkha Deposits Along Yakhtul Coast, Red Sea, Yemen, Saeed Omar Wasel , Badir N. Albadran, 2024
 71. Mode of Formation of the Coastal Sabkha Sediments in the Coastal Plain of Al-Dafna Plateau, Ahmed A. Mohammed, Tarek I. Anan, Amin M. Gheith, 2022
 72. Modeling Soil Organic Carbon at Coastal Sabkhas with Different Vegetation Covers at the Red Sea Coast of Saudi Arabia, Ebrahim M. Eid, Amr E. Keshta, Sulaiman A. Alrumman, Muhammad Arshad, Kamal H. Shaltout, Mohamed T. Ahmed, Dhafer A. Al-Bakre, Ahmed H. Alfarhan, Damia Barcelo, 2023
 73. Numerical Model of Stone Column in Sabkha Soil, Hassan. A. Abbas, 2019
 74. OIL STABILIZATION AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE IN SABKHA ENVIRONMENTS, Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, 1995
 75. Origins of Evaporites in a Holocene Mixed Clastic and Carbonate Coastal Sabkha: Preliminary Hydrological and Geochemical Data from Mesaieed Sabkha, Qatar, Fiona Whitaker, Sher Mey Didi-Ooi, Jeremy Jameson, Christian J. Strohmenger, 2014
 76. Performance assessment of a foundation resting on reinforced collapsible Sabkha soil by deep soil mixing columns using machine learning analyses, Mohamed Elsaywy, Abderrahim Lakhout, Turki S. Alhmari, Hossam AbdelMeguid, Mahmoud Shaban, 2025
 77. Performance of Shallow Foundation on Sabkha Soil, A.M. Alnuaim, M.H. El Naggar, 2013

78. Predicting spatial variability of species diversity with the minimum data set of soil properties in an arid desert riparian forest, Xiaotong Li, Yudong Chen, Guanghui Lv, Jinlong Wang, Lamei Jiang, Hengfang Wang, Xiaodong Yang, 2022
79. Sedimentological and chemical studies of sabkha soil around Al Asfar Lake and the impact of this sabkha on Al Hassa Oasis, Al Hassa, KSA, Ahmed El Mahmoudi, Adel A. Hussein, Yousf Al Al-Dakheel, Massoud Abd El Aty, 2015
80. Stabilisation of Sohar's Sabkha soil using waste gypsum plasterboard, Hilal S. Al-Alawi, Abideen A. Ganiyu, Atef Badr, 2019
81. STABILIZATION OF RAS AL-GHAR SABKHA SOIL WITH LIME, Saad A. Aiban, Ibrahim M. Asi and O.S. Baghabra Al-Amoudi, 1995
82. Stabilization of Sabkha soil using Cement Kiln Dust (CKD), Yusef Ahmed Fiener, 2023
83. Studies on soil-foundation interaction in the Sabkha environment of Eastern Saudi Arabia, Walid Mohammed, El-Mahdi Siddig Ali, 2004
84. Study of diversity of mineral-forming bacteria in sabkha mats and sediments of mangrove forest in Qatar, Toka Mahmoud Farhat, Zulfa Ali Al Disi, Mohammad Yousaf Ashfaq, Nabil Zouari, 2023
85. Testing and Stabilization of Saline Sabkha Soils: A Review, Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, 2008
86. The characterization of sabkhas in the Eastern parts of Saudi Arabia and its implications for engineering, Al-Saafin, Adly KH, 1996
87. Variability and characteristics of eastern Saudi Sabkha soils, O.S. B. Al-Amoudi, S.A. Aiban, H. I. Al-Abdul Wahhab
88. Variability of blue carbon storage in arid evaporitic environment of two coastal Sabkhas or mudflats, Zulfa Ali Al Disi, Khaled Naja, Sankaran Rajendran, Hadil Elsayed, Ivan Strakhov, Hamad Al Saad Al-Kuwari, Fadhil Sadooni, Maria Dittrich, Jassim Abdulla A. Al-Khayat, 2023

H13 硫酸塩/硫化土壌

1. 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, MatsÅström, 2023
2. Acid Sulfate Soils, Implications for Rural Landholders, Western Australia, 2008
3. 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
4. Chapter 7 Sulfides and Sulfates, D. S. FANNING, M. C. RABENHORST, S. N. BURCH, K. R. ISLAM, AND S. A. TANGREN, 2019
5. Nitrification-induced acidity controls CO₂ emission from soil carbonates, Jingjing Tao, Lichao Fan, Jianbin Zhou, Callum Colin Banfield, Yakov Kuzyakov, Kazem Zamanian, 2024
6. STABILISATION OF SULFATE-BEARING SOILS, Britpave, 2005
7. Using X-ray fluorescence core scanning to assess acid sulfate soils, Ulrike Proske, Henk Heijnis and Patricia Gadd, 2014
8. The Evolving Classification of Acid Sulfate Soils, Martin C. Rabenhorst, Rob Fitzpatrick, Anton Boman, 2025
9. What are acid sulfate soils, Western Australia Department of Enviroment Regulation, 2015

H14 酸性土壌

1. Acid Soil and their Management, Bharat Lal, 2023
 2. Acidification of European croplands by nitrogen fertilization Consequences for carbonate losses, and soil health, Kazem Zamanian, Ruhollah Taghizadeh-Mehrjardi, Jingjing Tao, Lichao Fan, Sajjad Raza, Georg Guggenberger, Yakov Kuzyakov, 2024
 3. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants, Miao Bian, Meixue Zhou, Dongfa Sun, Chengdao Li, 2013
 4. Physical qualities of acid sulfate soil: its limitations and implications for oil palm production, Prapaipit Srimawong, Surachet Aramrak, Natthapol Chittamart, Apiniti Jotisankasa, 2024
 5. Sensitivity of the acid–base properties of clays to the methods of preparation and measurement 1. Literature review, Myriam Duc, Fabien Gaboriaud, Fabien Thomas, 2005
 6. Sustainable management of acid soils in the humid tropics – A synthesis of the past research and future directions, Patrick S. Michael, 2023
-

H15 雲母を含む土壌

1. Black sand in Egypt, Abdelrhman Gaballah, 2023
2. Can mica play a role in forming hybrid beds of submarine lobe systems?, Liu Qun, Ben Kneller, Victoria Valdez Buso, Xiumian Hu, 2022
3. Crushing Effect of Mica Particles on Mechanical Behavior of Micaceous Sand at Macro and Micro Level, Seethalakshmi P, Ajanta Sachan, 2016
4. Effect of Mica Particles on Mechanical Behavior of Micaceous Sand at Macro and Micro Level, Seethalakshmi, Ajanta Sachan, 2016
5. Evaluation of mechanical properties of mica-mixed sand considering inherent anisotropy, Ngoc Bao Le, Hirofumi Toyota, Susumu Takada, 2020
6. 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
7. In-situ Rb-Sr dating of detrital mica and its application for provenance studies, Delia Rösel, Martin Köhler, Anna Petts, Thomas Zack, 2023
8. Mica flakes and framboidal pyrite in the Gulf of Cadiz contourites as accurate proxies for Mediterranean Overflow strength, Javier P. Tarruella^{1*}, Thibault M. Béjard¹, Francisco J. Sierro, 2022
9. Predicting axial performance of piles in pumiceous materials, Kevin J. Hind, 2008
10. Removal of mica from crushed sand by high pressure washing, Carina Ulsen, Juliana L. Antoniassi, Henrique Kahn, Eldon A. Masini, 2014
11. Study on the Effect of Interfacial Modification on the Properties of Super Standard Mica Sand Cement-Based Materials, Huanqiang Liu, Xueqing Yang, Linhua Jiang, Kelian Li, Limei Wang, Weizhun Jin, 2024
12. Testing the influence of a sand mica mixture on basin fill in extension and inversion experiments, CAROLINE J.S. GOMES, TAYNARA D'ANGELO, GISELA M.S. ALMEIDA, 2015

H16 残積土

1. ナイジェリア・カドナ地方における花崗岩質風化残積土の地盤工学的考察, 末岡徹・小山哲・佐藤洋, 1984
2. 熱帯および温帯に分布する花崗岩質風化残積土の特性 (その1) 一風化残積土地盤の応用地質学的特徴, 末岡徹, 2020
3. 熱帯および温帯に分布する花崗岩質風化残積土の特性 (その2) 一風化残積土地盤の化学的特徴, 末岡徹, 2020
4. 風化残積土の特性と工学的問題, 西田一彦, 1991

H17 乾燥土壌

H17.1 文献

1. Assessment of strength development of cemented desert soil, Talal S. Amhadi, Gabriel J. Assaf, 2019
2. Experimental study of the efficiency of earth-to-air heat exchangers Effect of the presence of external fans, Hijaz Ahmad, Nasreddine Sakhri, Younes Menni, Mohamed Omri, Houari Ameer, 2021
3. Problematic soil mechanics in the Algerian arid and semi-arid regions Case of M'sila expansive clays, 2015
4. Soil Physiography Relationship of Arid region, D.C. Joshi, R.L. Shyampura, J.D. Giri, 2009
5. The effects of rain and evapotranspiration statistics on groundwater recharge estimations under semi-arid environments, Tuvia Turkeltaub and Golan Bel, 2022

H17.2 図書

1. Engineering Characteristics of Arid Soils, P.G.FOOKES, R.H.G.PARRY, Taylor & Francis, 1993

H18 Tropical Soils

H18.1 図書

1. Soils in the Humid Tropics and Monsoon Region of Indonesia, Kim H. Tan, CRC Press, 2008

H19 泥炭

H19.1 文献

1. A Field Study of Tropical Peat Fire Behaviour and Associated Carbon Emissions, Laura L. B. Graham, Grahame B. Applegate, Andri Thomas, Kevin C. Ryan, Bambang H. Saharjo, Mark A. Cochrane, 2022
 2. A Formula for Predicting Primary Settlement of Tropical Highly Organic Soil and Peat in the Field, Ayu Prativi, Noor Endah Mochtar, Indrasurya B. Mochtar, 2024
 3. A Geotechnical Exploration of Sabah Peat Soil Engineering Classifications and Field Surveys, Adnan Zainorabidin, 2016
 4. AN INTRODUCTION OF TROPICAL PEAT AND ITS HISTORY OF SHEAR STRENGTH IN MALAYSIA, Norhaliza Wahab, Mohd Khaidir Abu Talib, Munzilah Md Rohani, 2019
 5. Analysis of Canal Blocking Distribution to Reduce Sabangau Tropical Peat Swamp Forest Fires, Petrisly Perkasa, Sulmin Gumiri, Wahyudi Wahyudi, Indrawan Permana, 2023
 6. Assessment of variability of peat physicochemical properties, subsidence and their interactions within Selangor forests, Selva Dhandapani, Stephanie Evers¹, Doreen S. Boyd, Gabriel Yesuf, Lois Kinneen, Alice Haughan, Sofie Sjogersten, 2022
 7. Biophysical Characteristics of Tropical Peatland, Lulie Melling, Goh Kah Joo, Lah Jau Uyo, Alex Sayok and Ryusuke Hatano, 2007
 8. Carbon mineralization dynamics of tropical peats in relation to peat characteristics, AKHMAD R. SAIDY, ZURAIDA T. MARIANA, FENGKY A. ADJI, ROSSIE W. NUSANTARA, IRMA FITRIA, SYAHRINUDIN, 2018
 9. Chapter 9 Tropical Peat and Peatland Definition in Indonesia, Mitsuru Osaki, Kazuyo Hirose, Hendrik Segah, and Farhan Helmy, 2016
 10. Classification of Tropical Peat in Malaysia, Siti Khadijah Hajon, Hasimah Mos, Nurmaisarah Jantan, Haniff MH, 2018
 11. Coastal peat failure in the tropical coastal peatlands in Riau, Indonesia, Koichi Yamamoto, Hiroki Kagawa, Syota Sasaki, Ariyo Kanno, Atsushi Koyama, Motoyuki Suzuki, Sigit Sutikno, Noerdin Basi, Muhammad Haidar, 2019
 12. Compressibility behaviour and engineering properties of North Borneo Peat Soil, Habib M. Mohamad, Adnan Zainorabidin, Baba Musta, M. Nursyahrain Mustafa, Adriana Erica Amaludin, Mohamad Niizar Abdurahman, 2021
 13. Compressibility Behaviour of Borneo Tropical Peat Stabilized with Lime-Sand Column, Jodin Makinda, Lillian Gungat, N.S.V Kameswara Rao, Solomon Sulis, 2018
-

14. Concept of Exploiting Peat-Swamp Pools (Beje) and Ditches (Parit) as Participative FuelFire Break in Peat Forest and Peatlands, Wahyu catur adinugroho, 2003
15. Correlation Between Different Physical and Engineering Properties of Tropical Peat Soils from Sarawak, P.K. Kolay, M.R. Aminur, S.N.L. Taib, M.I.S. Mohd Zain, 2010
16. Definitions and engineering classifications of tropical lowland peats, Mohamad Tarmizi Mohamad Zulkifle, Tham Fatt Ng, John Kuna Raj, Roslan Hashim, John Kuna Raj, Ng Tham Fatt, Wan Hasiah Abdullah, Azman Abdul Ghani, Mustaffa Kamal Shuib, Muhammad Aqeel Ashraf, Ahmad Farid Abu Bakar, Jasmi Hafiz Abdul Aziz, Nur Iskandar Taib, Meor Hakif Amir Hassan, Nur Islami Rahman, Ismail Yusoff, S. Paramanathan, 2013
17. Deformation and Shear Strength Characteristics of Some Tropical Peat and Organic Soils, Bujang B. K. Huat, 2006
18. Differences in Tropical Peat Soil Physical and Chemical Properties Under Different Land Uses A Systematic Review and Meta-analysis, Adi Kunarso, Mark T. L. Bonner, Ewan W. Blanch, Samantha Grover, 2022
19. Dissolved organic carbon and physicochemical variables of peat water in tropical peat swamp forests, S Sundari, 2020
20. Drainage and land use impacts on changes in selected peat properties and peat degradation in West Kalimantan Province, Indonesia, G. Z. Anshari, M. Afifudin, M. Nuriman, E. Gusmayanti, L. Arianie1, R. Susana, R. W. Nusantara, J. Sugardjito, A. Rafiastanto, 2010
21. Effect of alkali on tropical peat stabilized with different stabilizers, P. K. Kolay, M. R. Aminur, S. N. L. Taib, 2011
22. Effect of Chemical Admixtures on the Engineering Properties of Tropical Peat Soils, Bujang B.K. Huat, Shukri Maail, Thamer Ahmed Mohamed, 2005
23. Effect of fibre content on the geotechnical properties of peat, Iwona Chmielewska, 2023
24. Effect of magnesium chloride solution on the physico-chemical characteristics of tropical peat, Nima Latifi, Ahmad Safuan A. Rashid, Aminaton Marto, Mahmood Md Tahir, 2015
25. Engineering Properties and Compressibility Behavior of Tropical Peat Soil, Youventharan Duraisamy, Bujang B.K. Huat, 2Azlan A. Aziz, 2007
26. EUKARYOTIC COMMUNITY IN TROPICAL PEAT FOREST IN SARAWAK, Siti Ramlah A. A., Mohd Noor M. I., Mohd Shawal T.M., Sakinah S., Nur Aziemah A. G., Sharifah Azura S. I., Norman K., 2016
27. Evaluating the Effect of Fire on Cultivated Tropical Peat Properties Lessons Learned from Observation in East Kutai Peatlands, Heru Bagus Pulunggono, Moh Zulfajrin, Nabila Hanifah, Lina Lathifah Nurazizah, 2022

28. First estimates of fine root production in tropical peat swamp and terra firme forests of the central Congo Basin, Matteo Sciumbata, Yeto Emmanuel Mampouya Wenina, Mackline Mbemba, Greta C. Dargie, Andy J. Baird, Paul J. Morris, Suspense Averti Ifo, Rien Aerts, Simon L. Lewis, 2023
29. GEOTECHNICAL CHALLENGES WITH MALAYSIAN PEAT, Adnan Zainorabidin, D.C Wijeyesekera, 2007
30. Global Peatland Hotspot Atlas: The State of the World's Peatlands in Maps, Alexandra Barthelmes, UN, 2024
31. Impact of development and cultivation on hydro-physical properties of tropical peat soils, Ahmad KURNAIN, Tejoyuwono NOTOHADIKUSUMO, Bostaug RADJAGUKGUK, 2006
32. Impacts of rainfall on peat fire during the dry season and wet dry season on degraded tropical peatland in South Sumatra, Indonesia, Agus Kurniawan, Laura B. Graham, Grahame Applegate, Virni Budi Arifanti, Acep Akbar, Etik Erna Wati Hadi, Nafila Izazaya Idrus, 2024
33. Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Budiman Minasny, Diana Vigah Adetsu, Matt Aitkenhead, Rebekka R. E. Artz, Nikki Baggaley, Alexandra Barthelmes, Amélie Beucher, Jean Caron, Giulia Conchedda, John Connolly, Raphaël Deragon, Chris Evans, Kjetil Fadnes, Dian Fiantis, Zisis Gagkas, Louis Gilet, Alessandro Gimona, Stephan Glatzel, Mogens H. Greve, Wahaj Habib, Kristell Hergoualc'h, Cecilie Hermansen, Darren B. Kidd, Triven Koganti, Dianna Kopansky, David J. Large, Tuula Larmola, Allan Lilly, Haojie Liu, Matthew Marcus, Maarit Middleton, Keith Morrison, Rasmus Jes Petersen, Tristan Quaife, Line Rochefort, Rudiyanto, Linda Toca, Francesco N. Tubiello, Peter Lystbæk Weber, Simon Weldon, Wirastuti Widyatmanti, Jenny Williamson, Dominik Zak, 2024
34. MULTI-TEMPORAL AIRBORNE LIDAR-SURVEY IN 2007 AND 2011 OVER TROPICAL PEAT SWAMP FOREST ENVIRONMENTS IN CENTRAL KALIMANTAN, INDONESIA, Viktor Boehm, Veraldo Liesenberg, Tatsuo Sweda, Hayato Tsuzuki, Suwido H. Limin, 2012
35. Permeability Behavior of Tropical Sapric Peat under Isotropic Compression, Alsidqi Hasan, Walter Janting anak Ngelambai, 2022
36. Physical and chemical properties of tropical peat under stabilised land uses, M. Könönen, J. Jauhiainen, R. Laiho, K. Kusinc, H. Vasandera, 2015
37. Physical and geotechnical characteristics of stabilized and unstabilized tropical peat soil, P. K. Kolay, M. R. Aminur, 2011
38. Physical and Geotechnical Properties of Tropical Peat and Its Stabilization, Prabir K. Kolay, Siti Noor Linda Taib, 2018
39. Physical Modelling for the Analysis of Wave Characteristics on Tropical Peat Coast, Sigit Sutikno, Ilham Ziaulhaq, Rinaldi, Koichi Yamamoto, 2021

40. Physico-geotechnical properties of peat and its stabilisation, Prabir K. Kolay, Aminur Rahman, 2016
41. Plant root carbon inputs drive methane production in tropical peatlands, N. T. Girkin, A. Siegenthaler, O. Lopez, A. Stott, N. Ostle, V. Gauci, S. Sjögersten, 2025
42. POLICY MEMO PEATLAND DEFINITION FROM UNCERTAINTY TO CERTAINTY, Indonesia Climate Change Center, 2012
43. SPATIAL GROUNDWATER LEVEL PERFORMANCE IN THE TROPICAL PEAT OF THE BLOCK C AREA, MEGA RICE PROJECT, CENTRAL KALIMANTAN, INDONESIA, Koichi Yamamoto, Yoshiyuki Ishii, Hiroshi Fukami, Ken Koizumi, Kitso Kusin, Gatot Eko Susilo, Adi Jaya, Suwido H. Limin, Hidenori Takahashi, 2023
44. Studies on sustainable land use and soil ecosystems in tropical peat land, Koyo YONEBAYASHI, 2006
45. THE ROLE OF COMPACTION ON PYHSICOCHEMICAL PROPERTIES AND CARBON EMISSIONS OF TROPICAL PEAT SOILS A REVIEW, Marshall Kana Samuela, Stephanie Lorna Evers, 2022
46. Treatment of tropical peat water in Sarawak peatlands nature reserve by utilising a batch electrocoagulation system, Nazeri Abdul Rahman, Calvin Jose Jol, Allene Albania Linus a, Chieng Kwong Ming, Parabi Arif, Nooranisha Baharuddin, Wan Wafi Shahanney Wan Borhan, Nur Syahida Abdul Jalal, Shaleen Nur Ain Samsul, Nurshazatul'aini Abdul Mutalip, Airul Azhar Jitai, Dayang Fadhilatul Aisyah Abang Abdul Hamid, 2023
47. Tropical peat composition may provide a negative feedback on fire occurrence and severity, Alastair J. Crawford , Claire M. Belcher, Stacey New, Angela Gallego-Sala, Graeme T. Swindles, Susan Page, Tatiana A. Blyakharchuk, Hinsby Cadillo-Quiroz, Dan J. Charman, Mariusz Galka11, Paul D. M. Hughes, Outi Lähteenoja, Dmitri Mauquoy, Thomas P. Roland, Minna Väliranta, 2024
48. Tropical peat soil changes across successive oil palm generations in Sarawak, Malaysia, Jicqueline Ratai, Christopher Boon Sung Teh, Ngai Paing Tan, Hasmah Mohidin, Kah Joo Goh, Faustina Elfrida Sangok, Lulie Melling, 2024
49. Tropical peat surface oscillations are a function of peat condition at North Selangor peat swamp forest, Malaysia, Martha J. Ledger, Chris D. Evans, David J. Large, Stephanie Evers, Chloe Brown, A. Jonay Jovani-Sancho, Nathan Callaghan Christopher H. Vane, Chris Marshall, Abirami Baskaran, Jing Ye Gan, Andrew Sowter, Keith Morrison, Sofie Sjögersten, 2023
50. Tropical peatland carbon storage linked to global latitudinal trends in peat recalcitrance, Suzanne B. Hodgkins, Curtis J. Richardson, René Dommain, Hongjun Wang, Paul H. Glaser, Brittany Verbeke, B. Rose Winkler, Alexander R. Cobb, Virginia I. Rich, Malak Missilmani, Neal Flanagan, Mengchi Ho, Alison M. Hoyt, Charles F. Harvey, S. Rose Vining, Moira A. Hough, Tim R. Moore, Pierre J. H. Richard, Florentino B., De La Cruz, Joumana Toufaily, Rasha Hamdan, William T. Cooper, Jeffrey P. Chanton, 2018
51. Tropical peatlands in the Anthropocene The present and the future, Nicholas T. Girkin, Hannah V. Cooper,

Martha J. Ledger, Patrick O'Reilly, Sara A. Thornton, Christine M. Åkesson, Lydia E.S. Cole, K. Anggi Hapsari, Donna Hawthorne, Katherine H. Roucoux, 2022

52. Tropical Wooded Peatland in Delta Amacuro State, Venezuela, Crispulo Marrero, Miguel Nino, Daniela Canelon, Franco Antonuncci, Douglas Rodríguez-Olarte, 2024
53. Xanthan gum biopolymer an eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat, Nima Latifi, Suksun Horpibulsuk, Christopher L. Meehan, Muhd.Zaimi Abd Majid, Ahmad Safuan A. Rashid, 2016

H19.2 基準

1. 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, 土木研究所 寒地土木研究所, 2017

H19.3 図書

1. TROPICAL PEAT LANDS, Toshio IWAKUMA, Takashi INOUE, Takashi KOHYAMA, Mitsuru OSAKI, Herwint SIMBOLON, Harukuni TACHIBANA, Hidenori TAKAHASHI, Noriyuki TANAKA, Kazuo YABE, 2000

H20 火山灰性土

1. Comparison of the geotechnical properties of pumice sand from Japan and New Zealand, N. Kikkawa, M. J. Pender & R. P. Orense, 2013
2. Engineering Properties of a Pumice Sand, L.D. Wesley, V.M. Meyer, Satyawon Pranyoto, M. J. Pender, B.E., PhD., MIPENZ, 1999
3. Field characterisation and mapping of pumiceous deposits in central North Island, NZ, O.M. Gill, R.P. Orense, 2018
4. The challenges of working with volcanic soils in the central North Island, New Zealand, E. L. Giles, MIPENZ, W. Okada, MIPENZ, CPEng, B.X. Hill, R. McCarrison, 2015
5. しらすの静的・動的強度に及ぼす細粒分の影響, 山脇大輔・兵動正幸・吉本憲正・加登文学・中田幸男・岡林巧, 2001
6. 火山灰地盤における杭基礎の新設計法—現場試験に基づく杭の鉛直支持力評価—, 富澤幸一・西本聡・三浦清一

H21 Quick Clay

1. Quick Clay and Landslides of Clayey Soils, Asmae Khaldoun, Peder Moller, Abdoulaye Fall, G. Wegdam, Bert de Leeuw, Yves Méheust, 2022
2. Soil classification analysis based on piezocone penetration test data —A case study from a quick-clay landslide site in southwestern Sweden, Abbas Abbaszadeh Shahri, Alireza Malehmir, Christopher Juhlin, 2015

H22 その他の特殊土

1. Effects of Exchangeable Cations on Hydraulic Conductivity of a Marine Clay, S. NARASIMHA RAO, PAUL K. MATHEW, 1995
2. Micromechanical inspection of incremental behaviour of crushable soils, Matteo O. Ciantia, Marcos Arroyo, Catherine O’Sullivan, Antonio Gens, 2019
3. Soil classification analysis based on piezocone penetration test data —A case study from a quick-clay landslide site in southwestern Sweden, Abbas Abbaszadeh Shahri, Alireza Malehmir, Christopher Juhlin, 2015
4. THE IMPORTANCE OF NIVATION AS AN EROSIIVE FACTOR, AND OF SOIL FLOW AS A TRANSPORTING AGENCY, IN NORTHERN GREENLAND, W. ELMER EKBLAW, 1918
5. Theoretical Solution for Cavity Expansion in Crushable Soil, Hanlong Liu, Hang Zhou, Zengliang Wang, and Xiancheng Li, 2021
6. Quick Clay and Landslides of Clayey Soils, Asmae Khaldoun, Peder Moller, Abdoulaye Fall, G. Wegdam, Bert de Leeuw, Yves Méheust, 2022

H23 特殊土全般

H23.1 文献

1. ASSESSMENT AND IDENTIFICATION OF THREE TYPES OF DIFFICULT SOILS, Tahar AYADAT, 2021
 2. Geotechnical problems related to the development of territories in the conditions of the Republic of Tajikistan, Usmanov R.A., Saidov R.S., Mangushev R.A., 2013
 3. IDENTIFICATION OF PROBLEMATIC SOILS IN SOUTHERN AFRICA TECHNICAL NOTES FOR CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERS, DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS Republic of South Africa, 2007
-

H23.2 図書

1. Characteristics and Management of Problem Soils (A Text Book), Veena Sharma, Vikas Sharma, NPH, 2019
2. Contemporary topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Magued Iskander, Debra F. Laefer, Mohamad H. Hussein, ASCE, 2009
3. ENGINEERING PROBLEMS of REGIONAL SOILS, Chinese Institution of Soil Mechanics and Foundation Engineering, CCES, PERGAMON PRESS
4. FOUNDATIONS IN PROBLEM SOILS - A Guide to Lightly Loaded Foundation Construction for Challenging Soil and Site Conditions, Steven J. Greenfield, C. K. Shen, S. Scot Litke, PRENTICE HALL, 1992
5. 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, ICE Manual, 2003
6. Management of Soil Problems, Khan Towhid Osman, Springer, 2018
7. Problematic Soils, I. Jefferson, E.J. Murray, E. Faragher, P.R. Fleming, Thomas Telford, 2001
8. Problematic Soils In Search for Solution, Bujang Bin Kim Huat, UPM, 2010
9. Soil Improvement Using Polyurethane (PU), Norbaya Bt Haji Sidek, Mohamed Hafez, Rohayu Che Omar, LAMBERT, 2020
10. TEXTBOOK OF SOIL MECHANICS and FOUNDATION ENGINEERING, V.N.S. MURTHY, CBS, 2012

H24 安定処理土

1. Lime Stabilization of Tropical Soils from Sudan for Road Construction, Ahmed M. Elsharief, Adil A. M. Elhassan, Awad E. M. Mohamed, 2013

H25 Soil Maps

1. Fabricating Unity: The FAO-UNESCO Soil Map of the World, Perrin Selcer, 2015
2. Soil map of the world 1:5000000 Volume I Legend, FAO-Unesco, 1974
3. Soil map of the world 1:5000000 Volume IV South America, FAO-Unesco, 1971
4. Soil map of the world 1:5000000 Volume VI Africa, FAO-Unesco, 1977

5. Soil map of the world 1:5000000 Volume VII South Asia, FAO-Unesco, 1977
6. Soil map of the world 1:5000000 Volume VIII North and Central Asia, FAO-Unesco, 1978
7. Soil map of the world 1:5000000 Volume IX Southeast Asia, FAO-Unesco, 1979
8. Soil map of the world 1:5000000 Volume X Australasia, FAO-Unesco, 1978
9. The new global lithological map database GLiM A representation of rock properties at the Earth surface, Jens Hartmann and Nils Moosdorf, 2012
10. VERY HIGH RESOLUTION INTERPOLATED CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS, ROBERT J. HIJMANS, SUSAN E. CAMERON, JUAN L. PARRA, PETER G. JONES, ANDY JARVIS, 2005

H26 世界の特殊土

H26.1 文献

1. Data Descriptor_Global distribution of clay-size minerals on land surface for biochemical and climatological studies, Akihiko Ito, Rota Wagai, 2017
2. Illustrated Guide to Soil Taxonomy ver.2.0, Natural Resources Conversation Service, 2015
3. Overlap of global Köppen–Geiger climates, biomes, and soil orders, Robert V. Rohli, T. Andrew Joyner, Stephen J. Reynoldsc and Thomas J. Ballingerd, 2015
4. Statistical emulators of maize, rice, soybean and wheat yields from global gridded crop models, Élodie Blanc, 2017
5. あちこちの土, 三谷健, 1978
6. 世界の土との出会い, 岡林郁夫, 1978
7. 世界の特殊土, 三木五三郎, 1978
8. 世界の特殊土の展望, 山内豊聡, 1978
9. 世界の特殊土の特集によせて, 福岡正巳, 1978

H26.2 図書

1. Engineering Characteristics of Arid Soils, P.G.FOOKES, R.H.G.PARRY, Taylor & Francis, 1993
2. Booker Tropical Soil Manual A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics, J R Landon, 1969

3. Handbook of Tropical Residual Soils Engineerin, Bujang B.K. Huat, David G.Toll, Arun Prasa, CRC Press, 2020
4. Management of Problem Soils in Arid Ecosystems, A. Monem Balba, CRC Press, 2020
5. State of the Art Report on Global and Regional Soil Information: Where are we? Where to go?, Christian Omuto, Freddy Nachtergaele, Ronald Vargas Rojas, FAO, 2012

H27 アジアの特殊土

H27.1 文献

1. Active landslides in the Rogun Catchment, Tajikistan, and their river damming hazard potential, Nina Jones, Andrea Manconi, Alexander Strom, 2021
2. ATLAS SEBARAN TANAH LUNAK INDONESIA, BADAN GEOLOGI, 2019
3. Application of nature-based solution for resilient and sustainable slopes in Thailand, Apiniti Jotisankasa, Auckpath Sawangsuriya, Tananop, 2023
4. Appraisal of Geotechnical Characteristics of Ormara Soil, Baluchistan, Pakistan, Abdul Jabbar Khan, Naveed Ahsan, Muhammad Sanaullah, Gulraiz Akhter, 2019
5. Appraisal of Soil Taxonomy and the World Reference Base for Soil Resources Applied to Classify Purple Soils from the Eastern Sichuan Basin, China, Qian Meng, Song Li, Bin Liu, Jin Hu, Junyan Liu, Yangyang Chen, En Ci, 2023
6. EUR 27236 EN — Global Soil Biodiversity Atlas, 2015
7. Evaluation of New CORDEX Simulations Using an Updated Köppen–Trewartha Climate Classification, Armelle Reca Remedio, Claas Teichmann, Lars Buntemeye, Kevin Sieck, TorstenWeber, Diana Rechid, Peter Hoffmann, Christine Nam, Lola Kotova, Daniela Jacob, 2019
8. FEED THE FUTURE TAJIKISTAN AGRICULTURE AND LAND GOVERNANCE ACTIVITY Climate Risk Assessment for the South-West Khatlon Region September 1, 2021
9. Geographic information system–based decision support for soil conservation planning in Tajikistan, E. Bühlmann, B. Wolfgramm, D. Maselli, H. Hurni, S.R. Sanginov, and H.P. Liniger, 2010
10. Indonesian Soil Data Base and Predicted Stock of Soil Carbon, R. Shofiyati, I. Las, F. Agus, 2010
11. Influences of root concentration and suction on Chrysopogon zizanioides reinforcement of soil, Krairoj Mahannopkul, Apiniti Jotisankasa, 2018
12. Lecture 2 PROBLEMATIC SOILS PROBLEMATIC SOILS IN INDONESIA AND LESSONS LEARNED FROM GEOTECHNICAL FAILURES, Paulus P. Rahardjo

13. Mechanisms of longitudinal cracks along pavement shoulder in central Thailand, A. Jotisankasa, B. Vadhanabhuti & K. Lousuphap, A. Sawangsuriya, 2011
14. PROBLEMS OF REGIONAL SOILS, W.H. Ting, Z.Y. Chen, M. Kamon, A. Denda etc.
15. PROFIL PROYEK PEKERJAAN DESAIN AND BUILD HAULING ROAD MODA TRUCK PENGANGKUTAN BAUKSIT DAN TAILING, KABUPATEN MEMPAWAH – KALIMANTAN BARAT
16. Rainfed lowland rice-growing soils of Cambodia, Laos and North-east Thailand, R.W. Bell, V. Seng, 2004
17. 基礎工 特集, 東アジアの地盤特性と工事例, 2007
18. 郷に入りては郷に従え-海外工事と日本人, 横山義雄, 1978

H27.2 設計基準

1. Codes and Standards for Geotechnical Engineering in Vietnam, Pham Quyet Thang, Nguyen Giang Nam, Nguyen Ngoc Thuyet, 2015
2. GENERAL SPECIFICATIONS 2018 FOR ROAD AND BRIDGE CONSTRUCTION WORKS (REVISION 2), MINISTRY OF PUBLIC WORKS AND PUBLIC HOUSING DIRECTORATE GENERAL OF HIGHWAYS, 2018 (SPESIFIKASI UMUM 2018 UNTUK PEKERJAAN KONSTRUKSI JALAN DAN JEMBATAN (REVISI 2), KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA, 2018)
3. SPESIFIKASI UMUM 2018 UNTUK PEKERJAAN KONSTRUKSI JALAN DAN JEMBATAN (REVISI 2), KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA, 2018 (GENERAL SPECIFICATIONS 2018 FOR ROAD AND BRIDGE CONSTRUCTION WORKS (REVISION 2), MINISTRY OF PUBLIC WORKS AND PUBLIC HOUSING DIRECTORATE GENERAL OF HIGHWAYS, 2018)

H28 アフリカの特殊土

H28.1 文献

1. 2D Electrical Resistivity Surveys and Geotechnical Studies for Pavement Failure Evaluation, North-Central, Nigeria, M. O. Oloruntola, D. O. Obasaju, S. Oladele, V. Ojekunle, C. Baiyegunhi, 2022
 2. A Geotechnical Investigation into the Failure of a Typical Road in Southwest Nigeria, B. A. Alo, O. A. Oni, 2018
 3. A Review of the Major Problem Soils in Nigeria, Ademola Bolarinwa, Samuel A. Ola, 2016
 4. A review on Problem Soils in South Africa, S. Diop, F. Stapelberg, K. Tegegn, S. Ngubelanga, L. Heath, 2011
 5. An Assessment of Soil Variability along a Toposequence in the Tropical Moist Semi-Deciduous Forest of Ghana, Johnny Kofi Awoonor, Bright Fafali Dogbey, 2021
 6. Analysing the Impact of Topography on Precipitation and Flooding on the Ethiopian Highlands, Enyew BD, Steeneveld GJ, 2014
 7. Dispersion of Problem Soils in Nigeria- an aid to the Geotechnical Engineer in Foundation Choice or Design, 2023
 8. Ethno-pedology Surveys in the Semi-arid Savanna Zone of Northern Ghana An I LEIA initiated project, R.D. Asiamah, J.K. Senayah, T. Adjei-Gyapong, O.C. Spaargaren, IRIS, 1997
 9. Evaluation of soil properties of the Sudan Savannah ecological zone of Ghana for crop production, D. S. MACCARTHY, W. A. AGYARE & P. L.G. VLEK, 2018
 10. From the ground up Unveiling Ghana's soil quality crisis and its ecological and health implications, Ebenezer Ebo Yahans Amuah, Bernard Fei-Baffoe, Raymond Webrah Kazapoe, Paul Dankwa, Isaac Kwaku Okyere, Lyndon Nii Adjiri Sackey, Douthy Biyogue Nang, Prosper Kpiebaya, 2024
 11. Ghana Soil Management Policy Relevance, Concepts And Processes For Its Attainment, Eric Owusu Adjei, 2020
 12. Generalized Additive Mixed Modelling of River Discharge in the Black Volta River, Wahab A. Iddrisu, Kaku S. Nokoe, Albert Luguterah, Eric O. Antwi, 2017
 13. Geoelectrical and geotechnical investigation of foundation failure in and around Oroke high school, Akungba- Akoko, southwestern Nigeria, Odundun, O. A., Fagorite, V. I., Rogbitan, E. O., 2020
 14. Geotechnical Characterisation of lateritic soils from south-western Nigeria as materials for cost effective and energy efficient building bricks, C.A. Oyelami, J.L. Van Roo, 2016
 15. Geotechnical Characterisation of Some Major Problem Soils of Nigeria in Road Failure Investigation,
-

- Fatokun, O. and Bolarinwa
16. IDENTIFICATION OF PROBLEMATIC SOILS IN SOUTHERN AFRICA TECHNICAL NOTES FOR CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERS, DEPARTMENT OF PUBLIC WORKS Republic of South Africa, 2007
 17. INTEGRATED RESISTIVITY, INDEX, AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS: IMPLICATION FOR HIGHWAY PAVEMENT FAILURE STUDIES IN NORTH-CENTRAL NIGERIA, Daniel Opemipo OBASAJU, Moroof Olasunbo OLORUNTOLA, Sunday OLADELE, 2022
 18. INVESTIGATING CAUSES OF FLEXIBLE PAVEMENT FAILURE A CASE STUDY OF THE BAKO TO NEKEMTE ROAD, OROMIA, ETHIOPIA Desta Degu, Basha Fayissa, Anteneh Geremew, Gelata Chala, 2022
 19. Location and Land use effects on Soil Carbon Accretion and Productivity in the Coastal Savanna Agro-ecological Zone of Ghana, F. M. Owoade, S. G. K. Adiku, C. J. Atkinson et al, 2021
 20. Magnetic soil properties in Ghana, Jan M.H. Hendrickx, J. Bruce J. Harrisona, Remke L. van Dama, Brian Borchersbet al, 2005
 21. NON-INVASIVE GEOPHYSICAL INVESTIGATION OF FAILURE ALONG A SECTION OF AGO-IWOYE MARKET ROAD, AGO-IWOYE, SOUTHWESTERN NIGERIA, Ganiyu Omotola MOSURO, Oluwaseyi John DADA, Olateju Olatunji BAYEWU, 2023
 22. SOIL ATLAS OF AFRICA, Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers et al., FSC, 2013
 23. Spatial analysis of soil physicochemical and hydraulic properties in the Libga irrigation scheme in northern Ghana using geostatistics and GIS approach, Yakubu Saaka Zakaria, Abdul-Ganiyu Shaibu, Bernard N. Baatuwue, 2022
 24. STATE OF THE CLIMATE KENYA 2023, Patricia Nying'uro, Sarah Kimani
 25. The Challenges posed by Problem Soils on the Performance of Road Pavements_Review of a Tanzanian Manual, RICHARD ROBERT MWAIPUNGU, SABRY AHMED, 2017
 26. Variations in Selected Soil Physical Properties with Landforms and Slope within an Inland Valley Ecosystem in Ashanti Region of Ghana, Sunday E. Obalum, John C. Nwite et al, 2011
 27. アルジェリア東西高速道路における特殊土と施工管理, 相河清実・齋藤禎二郎・谷澤房郎・浅香康弘・TRANDUG PHI OANH, 2009
 28. エチオピアの地質と地下資源, 地質相談所, 1964
 29. エチオピア国道路アセットマネジメント技術アドバイザー業務, JICA, エイト日本技術開発・オリエンタルコンサルタンツグローバル・阪神高速道路, 2023

30. スエズ運河地帯の南部の土, Ragaa H.Helmy, 1978
31. タンザニヤと3M-ROAD, 小泉光政, 1978
32. 資源開発環境調査, エチオピア連邦民主共和国
33. 地質図のエチオピア, <https://ja.maps-ethiopia.com/%E5%9C%B0%E8%B3%AA%E5%9B%B3%E3%81%AE%E3%82%A8%E3%83%81%E3%82%AA%E3%83%94%E3%82%A2>
34. 東南アフリカ事情③ エチオピアの現状と鉱物資源, 高橋清, 1985

H28.2 設計基準、マニュアル

1. Field Testing Manual, Tanroads, Central Materials Laboratory (CML), 2003
2. GEOTECHNICAL DESIGN MANUAL, ETHIOPIAN ROADS AUTHORITY, 2013
3. Interim Guideline for the Design of Hot-Mix Asphalt, MINISTRY OF WORKS, TRANSPORT AND COMMUNICATION, TANZANIA, 2018
4. Laboratory Testing Manual 2000, CML, TANZANIA
5. Pavement and Materials Design Manual 1999, Ministry of Works, Tanzania,
6. Site Investigation Manual, Ethiopian Roads Authority, 2013
7. Standard Specifications for Road Works 2000, MINISTRY OF WORKS, TANZANIA

H28.3 図書

1. Geotechnical Properties of Major Problem Soils of Nigeria, Ademola Bolariwa, LAMBERT, 2011

H29 アメリカの特殊土

1. TxDOT Guidelines for Soil Stabilization, Zhiming Si, 2007
2. ウィスコンシンの氷礫土, Tuncer B. Edil, David M. Mickelson, 1978
3. 中央アルゼンチンの崩壊性土, Aldo R. Reginatto, 1978

H30 ヨーロッパの特殊土

1. The European Soil Bureau Luca Montanarella, Robert J.A. Jones, 1996
2. ハンガリーにおけるレスの特徴, Gyorgy Egri, 1978
3. ボーム粘土に関する資料, E. De Beer, R. Carpentier, 1978
4. ポーランドの代表的な粘性土, E.T. Stepkowska, 1978
5. ポーランド北部の粘土, B. K. Mazurkiewicz, 1978
6. ユーゴスラビアのレス土, D. M. Milovic, 1979
7. 東ドイツのグリムメン粘土, E.T. Stfpkowska, M. Stor, 1978
8. 有機硫化物を含む軟弱土の土質工学的特性, Erick F. Schwab, 1978

H31 オーストラリアの特殊土

H31.1 文献

1. オーストラリアにおける二重層の土, O.G. Ingle, 1978
2. 自然斜面上のテールビーム堆積土, R.N. Chowdhury, 1978

H31.2 図書

1. AUSTRALIAN SOIL AND LAND SURVEY FIELD HANDBOOK 4TH EDITION, The National Committee on Soil and Terrain, 2024
2. DAMAGE TO BUILDINGS ON CLAY SOILS, D. A. Cameron, P. F. Walsh, AUSTRALIAN COUNCIL OF NATIONAL TRUSTS and NATIONAL TRUST OF AUSTRALIA(VICTORIA), 1984
3. FOUNDATION ENGINEERING - DESIGN AND CONSTRUCTION IN TROPICAL SOILS, Bujang B.K. Huat, Faisal Haji Ali, Husaini Omar, Harwant Singh, Taylor & Francis, 2006

H32 土壌分類

1. Comparison of Soil Taxonomy (2022) and WRB (2022) Systems for Classifying Paddy Soils with Different Drainage Grades in South Korea, Dan-Bi Lee, Young-Nam Kim, Yeon-Kyu Sonn and Kye-Hoon Kim, 2023
2. EUR 23499 — Atlas of Northern Circumpolar Soil, Jones, A., V. Stolbovoy, C. Tarnocai, G. Broll, O. Spaargaren and L. Montanarella (eds.), 2009
3. EUR 25534 EN — Soil Atlas of Africa, Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte et al., 2013
4. EUR 27236 EN — Global Soil Biodiversity Atlas, Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I. et al., 2016
5. EUR 31494 EN—Soil Atlas of Asia, JRC, FAO, 2023
6. European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies, Panos Panagos, Marc Van Liedekerke, Pasquale Borrelli, Julia Köninger et al., 2022
7. Harmonized World Soil Database version 2.0, Freddy Nachtergaele, Harrij van Velthuisen, Luc Verelst, Dave Wiberg, Matieu Henry, Federica Chiozza, Yusuf Yigini, 2023
8. Soil Atlas of Europe, European Soil Bureau Network European Commission, 2005
9. Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys 2nd. Ed., USDA, 1999
10. Technical note Processing the Harmonized World Soil Database (Version 2.0) in R, D G Rossiter, 2023

H33 その他、一般図書

1. HWSD V2.0, [HTTPS://GAEZ.FAO.ORG/PAGES/HWSD](https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
2. HARMONIZED WORLD SOIL DATABASE VERSION 1.2, FREDDY NACHTERGAELE, HARRIJ VAN VELTHUIZEN, LUC VERELST, DAVID WIBERG, FEB. 2012
3. SOIL TAXONOMY - A BASIC SYSTEM OF SOIL CLASSIFICATION FOR MAKING AND INTERPRETING SOIL SURVEYS, USDA, 1999
4. WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES. INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION SYSTEM FOR NAMING SOILS AND CREATING LEGENDS FOR SOIL MAPS. 4TH EDITION, IUSS, 2022
5. 土壌物理用語事典, 土壌物理学会編, 養賢堂, 2002