

独立行政法人 国際協力機構(JICA)  
住宅・都市計画省  
国家耐震工学研究センター

アルジェリア国  
アルジェ地域地震マイクロゾーニング調査  
ファイナルレポート  
Volume VIII  
サイスミックマイクロゾーニングの  
技術的ガイドライン

平成 18 年 12 月  
(2006年)

OYOインターナショナル株式会社  
日本工営株式会社

目 次

	<u>ページ</u>
1. サイスマックマイクロゾーニングの定義.....	1
2. データ収集 .....	4
3. ハザード解析 .....	6
4. 被害関数 .....	28
5. 被害の算定 .....	71

## 1. サイスマックマイクロゾーニングの定義

サイスマックマイクロゾーニングという用語が使われだしてから40年以上になるが、その定義は必ずしも明確ではない。サイスマックマイクロゾーニング調査は世界中の地震危険国で実施され、多くのサイスマックマイクロゾーニングマップと称される図面が作られているがその内容は千差万別である。たとえばある調査では、対象となる地域周辺の断層分布や過去の地震カタログなどから岩盤上での地震動の期待値を解析して作成した地震動期待値分布マップをサイスマックマイクロゾーニングマップと呼んでいる。また別の場合は、特定の地震モデルを想定せずに地質分布、地盤分布図を元にして、地質状況から地震動強さ、液状化危険度、がけの崩壊の相対的危険度をたとえばA～Eのランクで表示している。

これらの例では自然災害だけを対象としていたが、住宅や学校、病院などの建築物、橋梁や道路、鉄道、岸壁などの土木構造物、水道管、都市ガス管、電力線などのライフライン施設など、地震時に被害を受ける可能性のある構造物に関して地震発生時の被害数量を定量的に評価し、その分布を図面上に示す場合もある。このように一口にサイスマックマイクロゾーニングといってもその実体は様々である。

これまでに行われてきたサイスマックマイクロゾーニングをいくつかの側面から分類してみる。

a) まず対象物で分類してみると以下のようなになる。

a-1) 自然災害のみを対象とする

- ・地震動
- ・液状化危険度
- ・がけの崩壊危険度
- ・津波高さ

a-2) 自然災害に加え、自然災害によって引き起こされる構造物の被害を対象とする

- ・建築物（住宅、病院、学校、役所など）
- ・土木構造物（道路、橋梁、高架橋、鉄道、岸壁、空港、堤防など）
- ・ライフライン（水道、下水道、都市ガス、電力、電話など）

a-3) さらに上記構造物の被害によって2次的に引き起こされる被害を対象とする

- ・人的被害（死者、負傷者、住宅を失う人など）
- ・地震火災（火災発生件数、焼失棟数など）

a-4) 物理的被害以外に経済的、社会的影響まで対象とする

- ・地震による直接的被害額
- ・経済活動の停滞による被害額（商取引停止の影響、工場の生産停止による影響など）
- ・精神的ケアを必要とする人など

b) 定量的評価、定性的評価

b-1) 定量的評価

定量的評価では、地震動強さ、建物被害などが絶対量で評価される。地震動の場合は震度、加速度など建物被害の場合は被害棟数を求める。ただし、最終的なサイスミックマイクロゾーニングマップとしては、絶対量ではなく、より理解されやすい「ランク」による表示を行う場合もある、

b-2) 定性的評価

定性的評価では、被害の絶対量ではなく、相対的な被害危険度が評価される。たとえば、表層地盤をもとにして、ゆるい地盤ではゆれやすさがAランク、岩盤ではCランクなどと評価される。ランクの全体的な分布や、地点相互の比較などに意味がある評価である。

c) 目的

c-1) サイスミックコードなどの基準のためのゾーニング

サイスミックコードや地震保険の地域区分などでは、全国をいくつかの地域に区分し、それぞれの地震危険度レベルや入力地震動の割り増し係数を定めている。このレベルや係数を決定するために行われるサイスミックマイクロゾーニングでは、被害数量を算定するよりも広い地域を統一された尺度で評価し、相対的な地震危険度の違いを明らかにすることが重要とされる。このため、特定の震源を想定した決定論的なシナリオ地震を設定するのではなく、あらゆる震源の影響を統計的に取り扱う、確率論的な地震モデルを設定する。一般には、建物の被害程度に影響するハザード（自然災害）の評価が行われる

c-2) 防災対策、防災計画のためのゾーニング

効果的な防災対策、震災対応計画を策定するためには地震が発生した場合、対象地域がどのようになるかを事前に知っておくことが重要である。同じ自然災害でも風水害の場合は毎年のように被害が発生するため、どんな被害がどこで発生しそうかを経験的に予測することが出来る。これに対し、大きな被害をおよぼす地震はそれほど頻繁に発生するものではない。アルジェの場合は、東部は2003年にブーメルデス地震で被害を被ったが、アルジェセンターを襲った被害地震は1716年にまでさかのぼる。比較的近年に被害の経験があっても10年、20年と経つうち被害の経験は風化し、人々の記憶から消えて行ってしまう。地震被害の発生間隔は人間のライフタイムに比べて非常に長い現象であるため、災害の経験を対策に生かすことが難しい。そこで、今被害地震が発生したらこの街はどうなってしまうかをリアリスティックに描き出すためにサイスミックマイクロゾーニングが行われる。

地震は広い範囲のあらゆる物に影響を与える自然現象である。地震動や液状化などのハザード、建物などの物理的被害にとどまらず、ライフラインの途絶による社会生活の困窮、経済活動の停滞など、社会全体に連鎖的に被害が拡大する特徴がある。また、被害の様相は地盤などの自然条件の違いだけではなく、建物構造や道路の状況などの人工構造物の状況、さらには地震が発生した際の即時災害対応によっても変化する。したがって、このような目的のためのサイスマックマイクロゾーニングでは物理的な地震動分布、被害量などの解析を基にして、地震発生から数分、数時間、数日、数週間といった時間を追った地震災害シナリオを作り上げることがしばしば行われている。この場合のサイスマックマイクロゾーニングは、地震被害の事前総合シミュレーションである。

上記の分類に従うと、「アルジェリア国アルジェ地域地震マイクロゾーニング調査」は、

- a)-3： ハザード（自然災害）と構造物被害、および、2次災害までを対象とする
- b)-1： 定量的評価を行う
- c)-2： 防災対策、防災計画のためのゾーニング

に分類される。

## 2. データ収集

### 2-1 ベースマップの縮尺とメッシュの大きさ

サイスミックマイクロゾーニングマップを作成する際に使用する基図（ベースマップ）は、調査地域の広さに対応して適当な縮尺が異なる。調査地域が広い場合、余りに小縮尺の基図を使うことは、必要な経費と手間が膨大な割には益が少ない。

また、サイスミックマイクロゾーニングでは、正方形（または長方形）のメッシュが解析の単位として採用されることが多い。メッシュの大きさも、やはり調査地域の広さによって適当なサイズが異なる。より小さなメッシュを用いる場合には、当然より詳細なデータが必要になる。必要以上に小さなメッシュの採用は膨大なデータの作成を意味するため、避けるべきである。

表 2-1 に調査対象地域の広さに対応して、推奨される基図の縮尺とメッシュの大きさを示した。アルジェ地域の面積は約 230km<sup>2</sup> であるため、メッシュの大きさとしては 250m 程度が適している。

表 2-1 基図の縮尺とメッシュの大きさの推奨値

調査地域の広さ	基図の縮尺	メッシュの大きさ
100 - 400 km <sup>2</sup>	1/25,000	250m
400 - 1,600 km <sup>2</sup>	1/50,000	500m
1,600 - 6,400 km <sup>2</sup>	1/100,000	1km
6,400 - 25,600 km <sup>2</sup>	1/200,000	2km

デジタルデータではなく、印刷された地図のかたちでデータを収集する場合には、地図の縮尺は上記の基図の縮尺より詳細であることが望ましい。

### 2-2 入手が必要な情報

サイスミックマイクロゾーニングには多種多様な様々の情報が必要である。想定対象とするハザード（自然災害）や物的被害の種類、さらには適用する手法によって、必要なデータの内容や精度は異なる。必要なデータは大きく以下のように分類できる。

- a) 基本的情報
  - 行政界
  - 土地利用
  - 人口、建物センサス
  - 過去の地震被害記録など
- b) 地震の情報
  - 活断層図

- 地震地体構造図
- 歴史地震カタログ、計測地震カタログ
- 強震記録など
  
- c) 地質の情報
  - 地形図
  - 地質図
  - 基盤分布など
  
- d) 土質工学的情報
  - ボーリング柱状図
  - PS 検層結果
  - 土質特性
  - 地下水位分布など
  
- e) 建物の情報
  - 建物構造
  - 建物分布
  - 耐震コード、基準など
  
- f) インフラ情報
  - 橋梁構造、分布
  - 道路分布図
  - 上水道管路図、および、設備構造
  - 下水道管路図、および、設備構造
  - 都市ガス管路図、および、設備構造
  - 電力線分布図、および、設備構造
  - 電話線分布図、および、設備構造など

### 3. ハザード解析

ハザード解析には、様々な考え方、手法が存在する。日本やカリフォルニアでハザード解析が行われるようになった 1970 年代には限られたデータを用いて、経験則だけで評価が行われていた。以来、各種のデータの蓄積、解析手法の開発、計算機の発達、GIS の導入などにより、様々な手法が開発され用いられている。しかし、これらの地域でも新しい洗練された手法が常に用いられているわけではない。というのは、解析手法が高度になればなるほど多くのデータを必要とし、またデータの精度に対して結果が敏感になってくる。したがって、十分なデータが得られない場合や、データの精度に問題がある場合にあって高度な解析手法を適用することは、大きな間違いを犯す可能性がある。したがって、用いるべき解析手法は、いたずらに高度な解析手法を追い求めるのではなく、得られデータに即して選定されるべきものである。

このような事情により、現在世界各地で用いられているハザード解析の手法は、その地域、得られるデータの状況、用途などによって千差万別である。このガイドラインでは、調査地域に適した解析手法を選定する際の助けとなるように、これらの手法を大きくいくつかのグループに分けて以下に解説した。

#### 3-1 シナリオ地震の選定

シナリオ地震の設定の考え方は対象地域によって大きく異なる。必要なデータが入手できるかどうかにもよるが、対象地域の地震地体構造や地震活動度の影響が大きい。たとえば、完璧な歴史地震カタログが入手できたとしても、過去に大きな地震災害を経験していない地域で歴史地震だけに基づいてシナリオ地震を設定することは非現実的である。多くの場合は、複数の考え方を併用する。

##### [手法-1] 過去の被害地震に基づく方法

この方法は固有地震モデルに基づいた考え方である。固有地震モデルとは、「特定の断層で発生する最大規模の地震は、ほぼ同じ大きさ、同じ繰り返し間隔で発生する」という考え方である。この方法では対象地域に過去に被害をもたらした地震が、将来再び発生することを想定する。

##### [手法-2] 活断層に基づく方法

活断層とは、現在活動的であるか、または過去 100～200 万年の間に繰り返し活動し、将来も地震を発生させる可能性がある断層のことである。当然ながら活断層はシナリオ地震の資格がある。一般に地質図には多くの断層が記入されているがその多くは「活」断層ではない。その断層が活断層であるか否かの判定がこの方法のキーポイントである。

##### [手法-3] 地震地体構造および地震学的情報に基づく方法

海域では断層を見つけ出すことや、その断層が活断層であるかどうかを判定すること



は難しい。プレート境界部などの地震活動度が高い地域では、震源分布が有効な指標となる。近年海底地形の探査が盛んに行われるようになり、海底断層に関する多くの重要な発見がなされているが、活断層であるかどうかの判定はなお難しい。このような場合、GPS観測などによる地殻変動資料が断層の活動度を知るための重要なデータとなる。地震地体構造モデルはシナリオ地震を設定する際に有用な情報である。

上記で概説した、各手法における必要なデータとその必要度を表 3-1 に示した。

表 3-1 必要なデータとその入手可能性 - シナリオ地震の選定 -

データ	必要度			アルジェでの状況	
	手法-1 過去の被害地震に基づき方法	手法-2 活断層に基づく方法	手法-3 地震地体構造および地震学的情報に基づく方法	品質	量
地震災害に関する資料	◎	△	△	△	△
歴史的地震カタログ	◎	○	○	○	○
計測地震カタログ	△	△	◎	○	◎
活断層の位置、長さ等	△	◎		○	◎
活断層による地震の再来間隔、最終活動時期	△	○		x	x
GPS等による地殻変動観測記録		△	◎	◎	○

◎：調査地域におけるデータが不可欠  
○：必要なデータだが推測も可能、あるいは他地域のデータで代用できる  
△：入手が望ましい

◎：充分である  
○：おおむね充分であるが、さらに向上・追加することが望ましい  
△：存在はするが充分ではない  
x：無いまたは逸散している、使用に耐える品質では無い

## [アルジェの場合]

データの入手可能性を表 3-1 に示した。

アルジェの東部は 2003 年のブーメルデス地震で被害を被ったが、中心部であるアルジェセンターでの大きな地震被害は 1716 年の地震にまでさかのぼる。1716 年の地震は歴史上の地震であるため、これに基づいてシナリオ地震を設定できるような資料は得られなかった。

そこでアルジェにおけるシナリオ地震の設定には、活断層に基づいて設定する[手法-2]を採用した。図 3-1 にアルジェとその周辺の活断層の分布を示した。ブリダ断層、サヘル断層、テニア断層が内陸の断層で、これらの位置は地質学的に調査が行われている。カイルアルディン断層とゼンムリ断層は最近の海底探査によって発見された断層である。これらの断層の活動度は地震地体構造モデルに基づいて判定された[手法-3](図 3-2)。

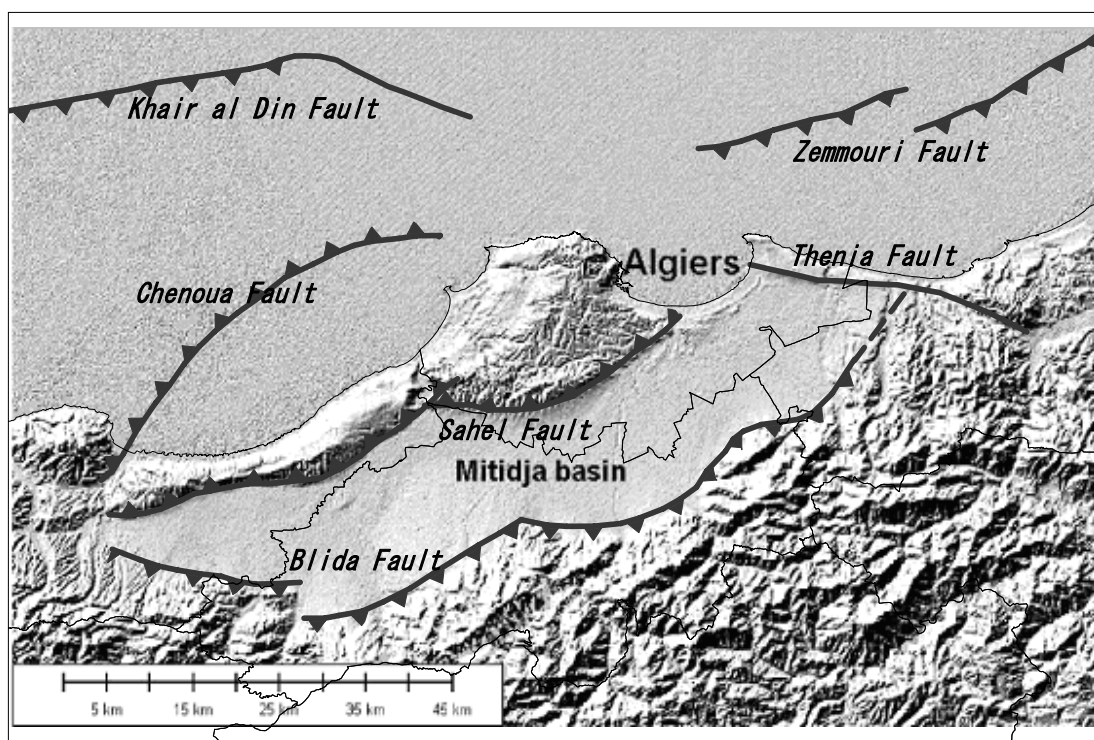


図 3-1 アルジェ周辺の活断層

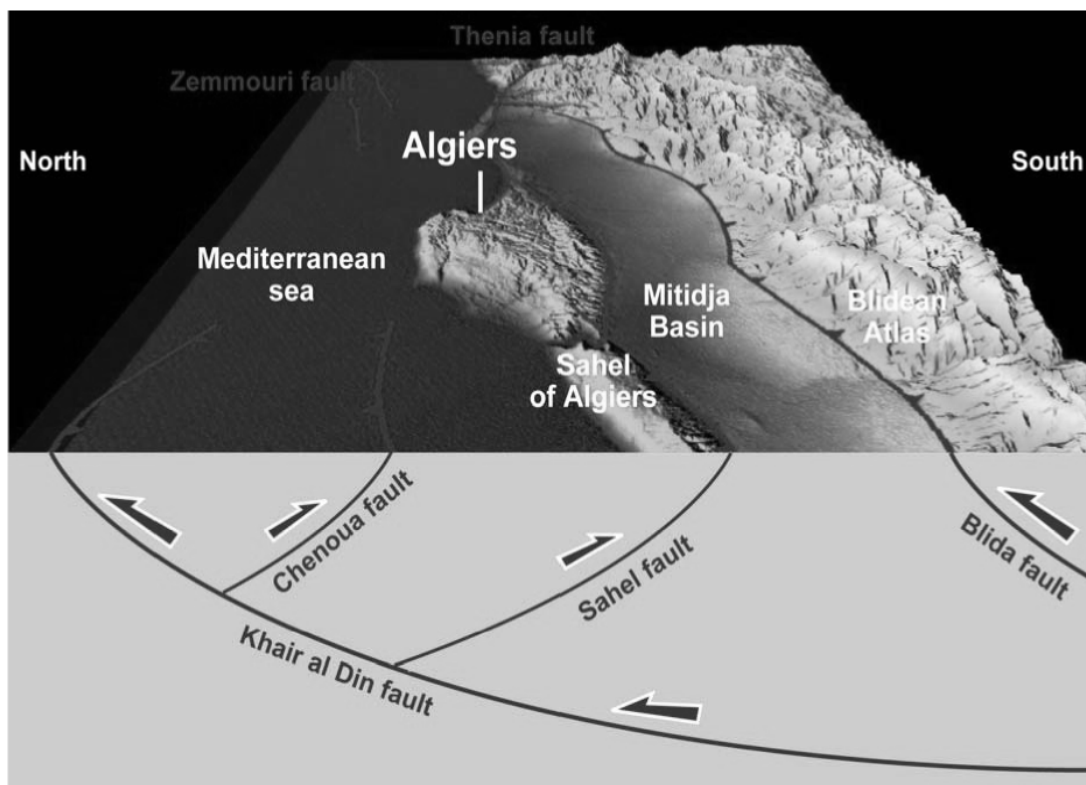


図 3-2 アルジェ周辺の 3 次元地震地体構造ブロックダイアグラム

### 3-2 基盤地震動

#### [手法-1] 距離減衰式 (PGA, PGV, Sa)

地震動は、大局的にはマグニチュードが大きく、震源に近いほど大きい。地震動の観測記録から、マグニチュードと距離をパラメータとする経験式、いわゆる距離減衰式が数多く提案されている。PGA のみならず、PGV、応答スペクトルの距離減衰式も提案されている。基盤で観測された記録や地表観測から推定された基盤地震動をデータとして用いた距離減衰式を用いる事によって、基盤での地震動を推定することができる。地震動の大きさにはマグニチュードと距離だけではなく震源の特性、地震波が伝播する岩盤の特性も影響するため、経験式を導いた元データの性質に影響される。したがって、調査対象地域で観測された記録から距離減衰式を作成することが望ましい。しかし、このためには広いマグニチュード幅、震源距離における、地盤特性が明らかな観測点での観測データが必要である。既存の距離減衰式を用いる際にはその適用範囲に留意する必要がある。

#### [手法-2] 経験的グリーン関数法

観測される地震動は、地震断層面での時空間変位分布と伝播経路における単位変位に対する媒質の応答(グリーン関数)のコンボリューションでモデル化できる。経験的グリーン関数法とは、理論的グリーン関数の代わりに観測された小地震の地震動をグリーン関数として使って大地震の地震動を合成する考え方である。大地震と小地震の伝播経路が同じ

なら、小地震の地震動には伝播経路の影響と観測点近傍の地盤特性が含まれているため、小地震の地震動を経験的グリーン関数として用いることには大きなメリットがある。多くの研究者が経験的グリーン関数法を研究しているが、Irikura(1986)は広く知られ、実際に用いられている方法のひとつである。基盤での地震動を推定するためには露岩した観測点での観測記録や地表で観測した記録から逆算した基盤相当の波形が使用される。設定したシナリオ地震の震源域で発生した適切な規模の小地震記録が得られるならば、この手法は小地震の観測地点における大地震を推定するのに適している。

### [手法-3] 統計的グリーン関数法

経験的グリーン関数法の最大の欠点は、想定されるシナリオ地震の震源域で発生した小地震の観測記録が必要なことである。これに対し、経験的グリーン関数法では、小地震の観測記録の代わりに、観測記録から導かれた震源断層の動的モデルから作成される要素地震動スペクトルを用い、シミュレーションを行う。この際にはアスペリティや応力降下が重要なパラメータである。この手法は入倉ら(例えば、釜江ら(1991))によって提唱され、内閣府の全国を対象とするプロジェクトで使用されている

上記で概説した、各手法における必要なデータとその必要度を表 3-2 に示した。

表 3-2 必要なデータとその入手可能性 - 基盤地震動 -

データ	必要性			アルジェエでの状況	
	手法-1 距離減衰式 (PGA,PGV,Sa)	手法-2 経験的 グリーン関数法	手法-3 統計的 グリーン関数法	品質	量
地震災害に関する資料	△	△	△	△	△
歴史的地震カタログ	◎	◎	◎	○	○
歴史的地震による震度分布	△	△	△	△	△
計測地震カタログ	△	△	△	○	◎
微小地震カタログ	△	△	△	x	x
強震記録 (リスト、波形)		◎		○	△
強震観測地点の地盤状況に関する資料		○		x	x
活断層の位置と長さ	◎	◎	◎	○	◎
活断層による地震の再来間隔、最終活動時期	△	△	△	x	x
GPS等による地殻変動観測記録	△	△	△	◎	○
アルジェリアの距離減衰式	○			△	△
アルジェリアでの断層長さとマグニチュードの関係	○			x	x
静的断層モデル (長さ、幅、傾斜、破壊速度)	○	◎		△	△
動的断層モデル (アスペリティ、応力降下)			◎	x	x

◎：調査地域におけるデータが不可欠  
○：必要なデータだが推測も可能、あるいは他地域のデータで代用できる  
△：入手が望ましい

◎：充分である  
○：おおむね充分であるが、さらに向上・追加することが望ましい  
△：存在するが充分ではない  
x：無いまたは逸散している、使用に耐える品質では無い

## [アルジェの場合]

データの入手可能性を表 3-2 に示した。

アルジェではデータの入手可能性に基づいて[手法-1]を採用した。距離減衰式はアルジェリアでの地震観測記録の検討を通じ、下記の 3 式を選定した。

- Laouami et al. (2005)
- Ambraseys et al. (2005)
- Berge-Thierry et al. (2003)

これら 3 式の適用性は 2003 年ブーメルデス地震の際のアルジェでの強震記録との比較で検討した。図 3-3 に水平成分の PGA の比較結果を地盤種別ごとに示した。図 3-3 の上 2 図は Laouami et al. (2005) と Berge-Thierry et al. (2003) の結果、下 2 図が Ambraseys et al. (2005) の結果である。Ambraseys et al. (2005) 式のほうが、他の 2 式より観測記録をよく説明できる。この結果から、アルジェでの基盤地震動の推定には Ambraseys et al. (2005) を採用することとした。

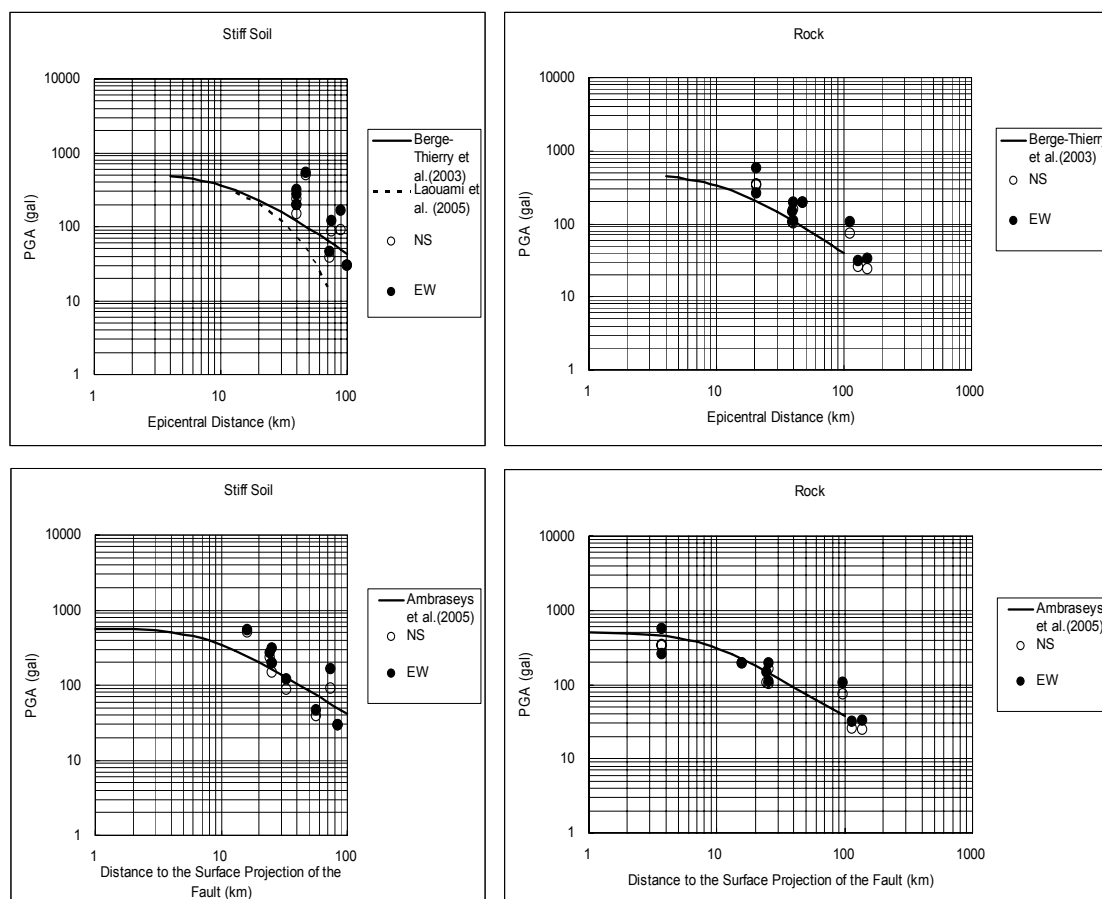


図 3-3 PGA の観測値と距離減衰式の比較

### 3-3 表層増幅

#### [手法-1] 過去の地震被害に基づく方法

表層の増幅特性を評価する最も直接的な方法は、当該地域で過去に発生した被害地震から推定する方法である。新しい表層地盤が厚く堆積している地域では、周辺の岩盤地域に比べて大きな地震動を経験し、しかもその分布は限定された範囲でも異なることを過去の経験は教えている。大規模宅地造成などで地盤の状況が大きく変化していない限り、次の大きな地震が発生した際も、地盤の効果は大きく異ならないと考えられる。過去の地震による観測記録あるいは被害から推定された震度、加速度などと、岩盤での観測記録、距離減衰式による推定値を比較することによって、表層地盤の増幅特性が推定できる。ただし、この手法を採用するには対象地域をカバーするだけの大きな被害地震が過去に発生していることが必要である。

#### [手法-2] 地質・地盤工学的分類による方法

表層の地質あるいは微地形区分は、表層の地盤による地震動を説明するためにしばしば用いられている。地質と増幅度の関係では Boucherdt and Gibbs (1976) や翠川(1987) が知られている。また、微地形区分と増幅度の関係では、日本では Matsuoka & Midorikawa (1994)、藤本・翠川(2003) が良く用いられている。これらの関係は基準となる岩盤上での観測記録と各種の表層地盤条件の地点での観測あるいは被害からの推定地震動の比較や、詳細地盤条件がわかっている地点での解析的地震動増幅との比較から定められたものである。ただし、これらの関係は世界中で共通な絶対的なものではなく、地域によって異なる可能性がある。

#### [手法-3] 表層のS波速度による方法

表層地質、微地形区分のかわりに、地表付近のS波速度を使って増幅度を評価する考え方である。地震動の観測あるいは数値解析によって、ある深さまでのS波速度の平均と増幅度の関係には強い相関があることが明らかにされている。S波速度と増幅度の関係式としては、Joyner and Fumal (1984)、Borcherdt et al. (1991)、Midorikawa et al. (1994) 等がある。ただし、これらの関係は世界中で共通な絶対的なものではなく、地域によって異なる可能性がある。

#### [手法-4] 応答解析(1次元)による方法

地盤を水平に連続した多層モデルとして表し、1次元のS波の伝播による多重反射をシミュレーションして増幅特性を周波数領域で評価する方法である。線形計算、等価線形計算、非線型計算がある。基盤から地表までの土層の構成、S波速度、密度、動的特性などが必要になる

#### [手法-5] 応答解析(2/3次元)による方法

地盤を2次元あるいは3次元のモデルとして表し、有限要素法または差分法で数値シ



ミュレーションを行う手法である。1次元計算に比べて飛躍的に大量のデータが必要となる。

上記で概説した、各手法における必要なデータとその必要度を表 3-3 に示した。

表 3-3 必要なデータとその入手可能性 - 表層増幅 -

データ	必要性					アルジェでの状況	
	手法-1 過去の被害地震 に基づく方法	手法-2 地質・地盤工学的 分類による方法	手法-3 表層のS波速度に よる方法	手法-4 応答解析(1次元) による方法	手法-5 応答解析(2/3次 元)による方法	品質	量
過去の大地震による震度、加速度分布	◎	○	○	△	△	△	△
地形図							
地質図	△	○	○	○	○	◎	○
微地形分類図	△	◎	○	○	○	△	○
表層地質図	△	◎	○	○	○	x	x
増幅度と地質、微地形、土質の関係	△	◎	○	○	○	△	△
		○				x	x
ボーリング柱状図							
速度検層結果			◎	◎	◎	△	○
増幅度と表層平均S波速度の関係			◎	◎	◎	x	x
			○			x	x
静的な地盤特性 (N値、密度など)							
動的な地盤特性							
航空写真	△	△	△	△	△	◎	◎
基盤深度							
基盤の2次元・3次元の分布			○	◎	◎	△	○
強震観測記録 (応答計算の入力として)				○	○	x	x
						○	△

◎ : 充分である  
 ○ : おおむね充分であるが、さらに向上・追加することが望ましい  
 △ : 存在するが充分ではない  
 x : 無いまたは透散している、使用に耐える品質では無い

◎ : 調査地域におけるデータが不可欠  
 ○ : 必要なデータだが推測も可能、あるいは他地域のデータで代用できる  
 △ : 入手が望ましい

## [アルジェの場合]

アルジェ地区のサイスミックマイクロゾーニングに着手した時点でのデータの入手状況を表 3-3 に示した。この表は、既存資料だけでは表層の増幅特性を評価することが困難であったことを意味している。そこで、調査地域内で多くのボーリング調査と PS 検層を実施し、その結果を用いて[手法-4]を採用して解析を実施することとした（図 3-4）。

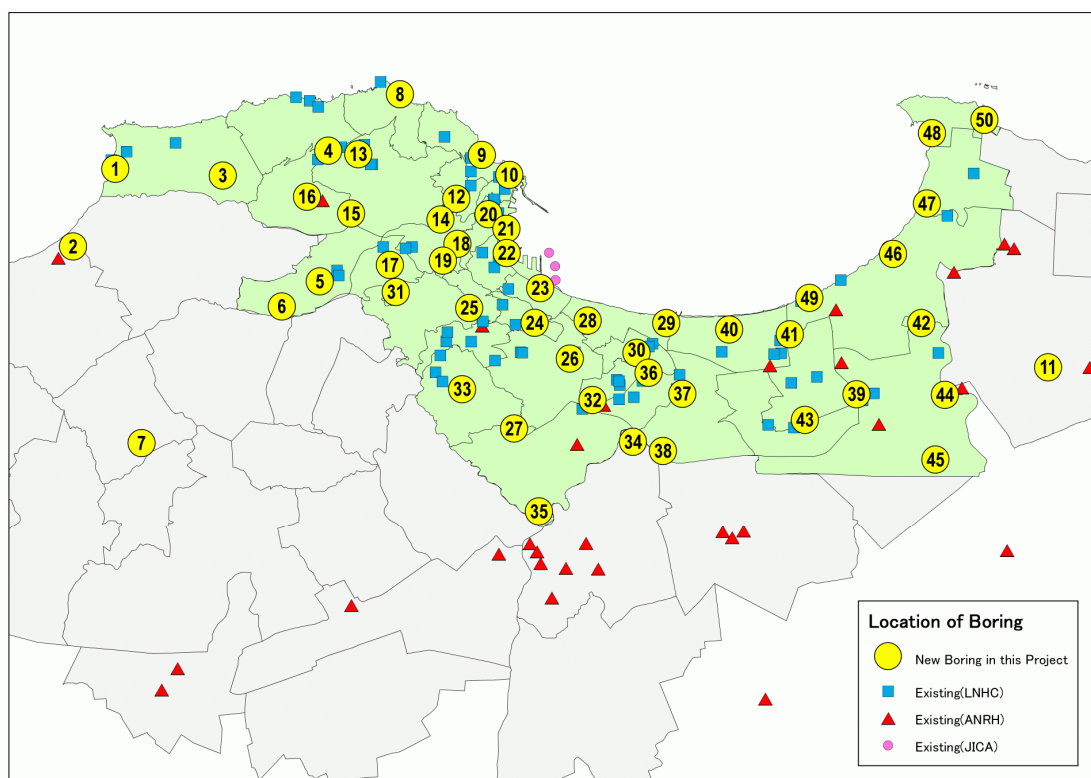


図 3-4 ボーリング位置図

1次元応答解析を実施するに際しては、下記の条件が考慮された。

1) 工学的地震基盤の設定とそこでの地震動

アルジェ地域の工学的地震基盤としては、 $V_s=630\text{m/sec}$  のブルーマール(p1-f)と  $V_s=1030\text{m/sec}$  のシスト(mi-f)が既存地質図、既存ボーリング、文献、ボーリング柱状図、PS 検層結果などをもとに選定された(図 3-5)。

距離減衰式で推定された基盤地震動における「基盤」の定義と、上記の地震工学的「基盤」の定義が異なるため、距離減衰式で推定された基盤地震動を翠川ら(1994)の  $V_s$  をパラメータとした増幅の経験則を用いて地震工学的基盤での地震動に換算した。

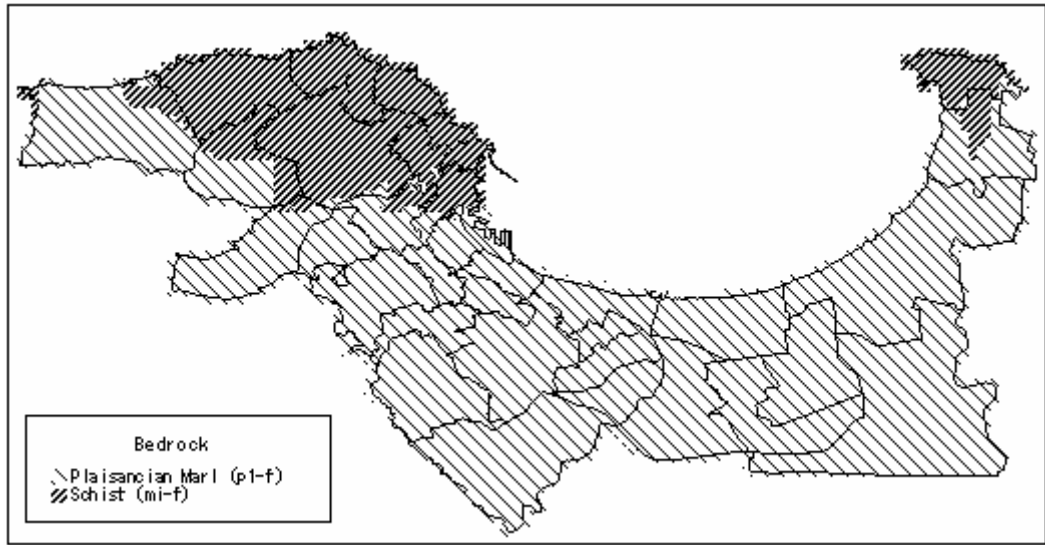


図 3-5 2 種類の工学的地震基盤の分布

2) 土の非線形特性

アルジェリアには土の動的非線形特性を評価するために必要な土質試験結果が存在しないため、土質やS波速度、N値の相似を考慮したうえで東京都のマイクロゾーニング調査で用いられた特性を用いた。図 3-6 に採用した非線形特性を示す。

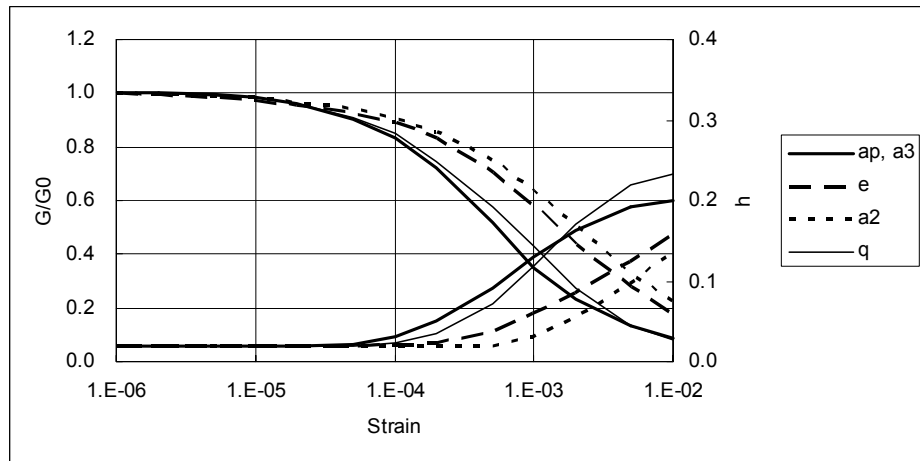


図 3-6 土の非線形特性

3) 入力地震波形

アルジェ地区での調査では、応答計算における入力地震波形として、2003年ブーメルデス地震の際の推定基盤地震動波形を用いた。これは、ブーメルデス地震のモーメントマグニチュードが6.9でシナリオ地震のマグニチュードと同規模であり、震源と調査地との距離の関係も似ているため、ブーメルデス地震のアルジェでの観測波の周波数特性は応答計算における入力として適している事を考慮して決定したものである。

調査地域内にある2箇所の強震観測点における2方向の水平成分、すなわち4波形を使用した。図3-7に使用した4波形を示した。最終的に、これら4波形を入力として実施した4種類の応答計算結果の平均値を結果とした。

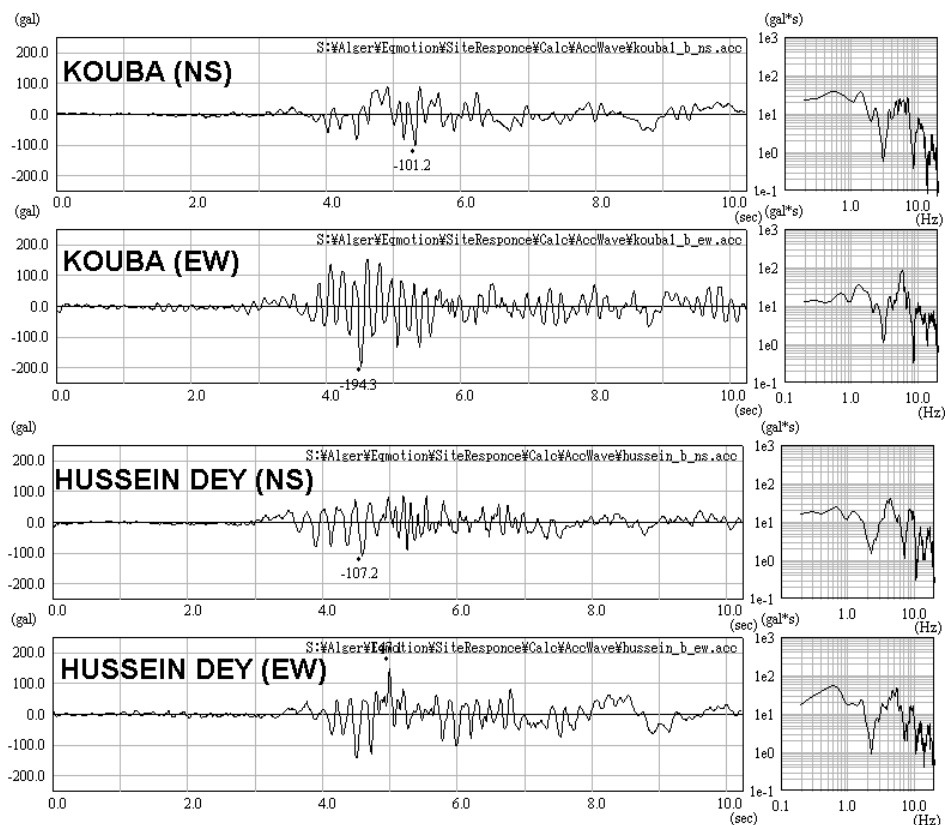


図 3-7 応答計算に使用した入力波形

### 3-4 液状化危険度

#### [手法-1] マグニチュードと震源距離に基づく方法

液状化が震源から最大どのくらいの距離まで発生するかについては、多くの調査結果があり、その結果は「液状化発生限界距離チャート」としてまとめられている。この関係は、元となったデータ、地域の違いを反映し、必ずしも一致しないが、大まかに液状化を検討すべき範囲を設定するために役立つ。この範囲内においても地下水位が低ければ液状化の危険性は低いと評価できる。

液状化は過去に液状化が発生した地点が次の地震でも再度液状化が発生することが非常に多い。したがって、液状化限界距離、地下水位分布、過去の地震による液状化履歴を重ね合わせることによって液状化の危険性を指摘することができる。

#### [手法-2] 微地形区分に基づく方法

液状化は、堆積物の生成過程を反映した微地形区分図と相関が高いことが知られてい

る。例えば、自然堤防や旧河道では液状化の危険度が高い。過去の地震による液状化発生地点との関係を詳細に調べることによって対象地域内での独自の判定基準を作成することができれば、精度の高い液状化予測が可能となる。このためには航空写真判読なども併用される。

### [手法-3] 地盤工学的モデルを用いた数値計算による方法

液状化する可能性がある土層について、液状化抵抗を推定し、地震時に地盤に発生するせん断応力を比較して液状化発生を判定する手法である。土の液状化抵抗はN値やCPT試験結果から推定されることが多い。Seed & Idriss (1971)、日本道路協会(1980, 1991)の方法が良く知られている。

上記で概説した、各手法における必要なデータとその必要度を表 3-4 に示した。

表 3-4 必要なデータとその入手可能性 - 液状化危険度 -

データ	必要性			アルジェでの状況	
	手法-1 マグニチュードと 震源距離に基づく 方法	手法-2 微地形区分に基 づく方法	手法-3 地盤工学的モデ ルを用いた数値計 算による方法	品質	量
最大液状化距離-マグニチュード関係図	○	○		x	x
液状化履歴図	○	◎	○	△	△
地形図		○		◎	○
地質図		○		△	○
微地形分類図		◎		x	x
表層地質図		◎		△	△
ボーリング柱状図 (N値またはコーン貫入抵抗を含む) 土質試験結果 (密度、粒度分布等)			◎	△	△
航空写真		○	△	◎	◎
地下水位分布図	○	○	◎	△	△

◎ : 調査地域におけるデータが不可欠  
 ○ : 必要なデータだが推測も可能、あるいは他地域のデータで代用できる  
 △ : 入手が望ましい

◎ : 充分である  
 ○ : おおむね充分であるが、さらに向上・追加することが望ましい  
 △ : 存在するが充分ではない  
 x : 無いまたは逸散している、使用に耐える品質では無い

### [アルジェの場合]

アルジェ地区のサイスミックマイクロゾーニングに着手した時点でのデータの入手状況を表 3-4 に示した。この表は、既存資料だけでは液状化危険度を評価することが困難であったことを意味している。そこで、調査地域内で多くのボーリング調査と PS 検層を実施し、その結果を用いて[手法-3]を採用して解析を実施することとした。

液状化危険度解析には地下水位が重要である。そのため、ボーリング調査に際して全地点で地下水位の測定を行った。また、地下水位の検討には既存資料も活用した(例えば、図 3-8)。さらにデータを収集することができれば、季節的な地下水位変動も検討できる。

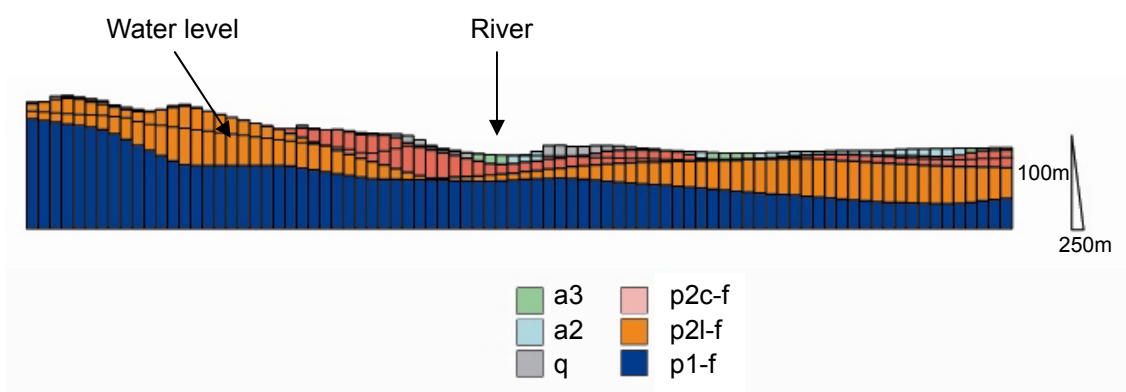


図 3-8 OUED EL HARRACH 周辺の地下水位断面の例

## 3-5 斜面崩壊危険度

### [手法-1] マグニチュードと震源距離に基づく方法

斜面崩壊が震源から最大どのくらいの距離まで発生するかについては、多くの調査結果があり、その結果は「斜面崩壊発生限界距離チャート」としてまとめられている。この関係は、元となったデータ、地域の違いを反映し、必ずしも一致しないが、大まかに斜面崩壊を検討すべき範囲を設定するために役立つ。

斜面崩壊は過去に発生した地点が次の地震でも再度発生することが非常に多い。したがって、斜面崩壊限界距離、過去の地震による斜面崩壊の履歴を重ね合わせることで斜面崩壊の危険性を指摘することができる。

### [手法-2] いくつかの項目の点数評価に基づく安定評価

斜面崩壊に与える地形的、地質的影響としては、斜面高さ、勾配、地質、降雨等が考えられる。過去の地震による斜面崩壊発生地点とこれらの要素の相関が明らかにできれば、この関係を用いて斜面崩壊の発生可能性が高い地点を地質図等から絞り込むことができる。



**[手法-3] 粘性と内部摩擦角に基づいた数値解析**

個別斜面における安定解析を行う方法である。斜面の勾配、土の内部摩擦角、土の粘着力など、個別の情報が必要となる。ただし、現状提案されているいくつかの手法は個別の地域において適用、検証されたものであり、実際に対象地域で用いるためには、過去の地震による斜面崩壊を用いた検証が欠かせない。

上記で概説した、各手法における必要なデータとその必要度を表 3-5 に示した。

表 3-5 必要なデータとその入手可能性 - 斜面崩壊危険度 -

データ	必要性			アルジェでの状況
	手法-1 マグニチュードと震源距離に基づく方法	手法-2 いくつかの項目の点数評価に基づく安定評価	手法-3 粘性と内部摩擦角に基づいた数値解析	
最大斜面崩壊距離-マグニチュード関係図	○	○		品質 x
斜面崩壊履歴図	○	○	◎	品質 x
地形図		◎	△	品質 ◎
地質図		◎	△	品質 △
降水量分布図		○	△	品質 x
水理地質図		△	△	品質 x
デジタル標高データ		△	◎	品質 △
土質試験結果 (粘性、内部摩擦角)			◎	品質 ○

◎：調査地域におけるデータが不可欠  
○：必要なデータだが推測も可能、あるいは他地域のデータで代用できる  
△：入手が望ましい

◎：充分である  
○：おおむね充分であるが、さらに向上・追加することが望ましい  
△：存在するが充分ではない  
x：無いまたは逸散している、使用に耐える品質では無い

## [アルジェの場合]

データの入手可能性を表 3-5 に示した。

アルジェの場合、データの入手可能性から判断して[手法-3]を採用した。調査地域内には2種類の斜面、すなわちシストまたは石灰質砂岩で形成された急斜面と、他の土質からなるやや傾斜のゆるい斜面が分布している。急斜面の災害形態としては「崩壊」が、ややゆるい斜面の災害形態としては「地すべり」が考えられ、このためこれらに対応した2種類の数値計算方法が用いられた。急傾斜の解析には Wilson の方法(図 3-9)が、ややゆるい斜面の解析には Ansal・Siyahi の方法(図 3-10)が用いられた。

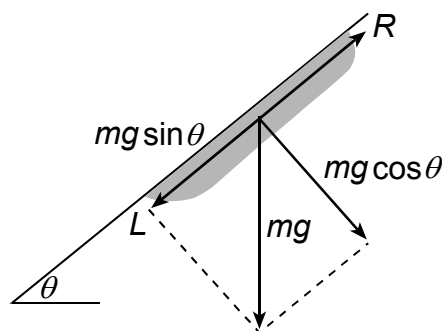


図 3-9 地すべり土塊のモデル (田中, 1982)

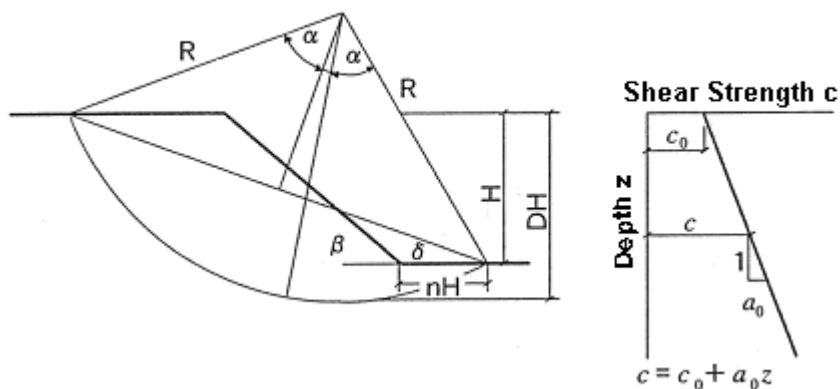


図 3-10 典型的な斜面の断面(Koppula, 1984)

アルジェでは個々の斜面が認定されていないため、斜面ごとではなくメッシュごとに斜面の崩壊危険度が評価された。各斜面の傾斜は 5 m ピッチの DEM データを用いて計算されたが、個々の斜面が認定された場合は、斜面の傾斜は現地調査によって調べられるべきものである。

[参考文献]

- Ansal, A and B.G. Siyahi, 1994, Microzonation for landslides during earthquakes, 2nd Int. Conf. on Earthquake Resistant Construction & Design, Savidis(ed), Balkema, 151-157.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K. and Smit P.M., 2005, Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. Bulletin of Earthquake Engineering, 3, pp.1-53.
- Berge-Thierry, C., Cotton, F., Scotti, O., Griot-Pommera, D.-A., & Fukushima, Y., 2003, New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes. Journal of Earthquake Engineering, 7(2), 193-222.
- Borcherdt, R. D., and J. F. Gibbs, 1976, Effects of Local Geological Conditions in the San Francisco Bay Region on Ground Motions and Intensities of the 1906 Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, 467-500.
- Borcherdt, R. D., C. M. Wentworth, A. Janssen, T. Fumal, and J. Gibbs, 1991, Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, Proc. 4th Intern'l. Conf. on Seismic Zonation, Vol. 3, pp.545-552.
- 藤本一雄、翠川三郎, 2003, 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, Vol. 3, No. 3, 13-27.
- Irikura, K., 1986, Prediction of Strong Acceleration Motion Using Empirical Green's Function, Proc. 7th Japan Earthq. Symp., 151-156.
- 日本道路協会, 1980, 1991, 道路橋示方書・同解説 V 耐震編.
- Joyner, W. B. and T. Fumal, 1984, Use of Measured Shear-wave Velocity for Predicting Geological Site Effects on Strong Motion, Proc. 8th World Conf. on Earthq. Eng., Vol. 2, 777-783.
- 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長, 1991, 地震のスケーリング側に基づいた大地震時の強震動予測—統計的波形合成法による予測—, 日本建築学会構造系論文集, No. 430, 1-9.
- Koppula, S.D., 1984, Pseudo-static analysis of clay slopes to earthquakes, Geotechnique, 34, 71-79.

- 
- Laouami N., Slimani A., Bouhadad Y., and Nour A., 2005, Strong ground motions analysis of the 21st May 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake (Mw=6.8) and elaboration of the Algerian attenuation law. Submitted for publication in Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal.
- Matsuoka, M. and S. Midorikawa, 1994, GIS-Based Seismic Hazard Mapping using the National Land Information, Proc. 9th Japan Earthq. Symp., E331-E336.
- 翠川三郎, 1987, 関東平野を対象とした震度分布予測, 構造工学論文集, Vol.33B, 43-48.
- Midorikawa, S, M. Matsuoka and K. Sakugawa, 1994, Site Effects on Strong-motion Records Observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan Earthquake, Proc. 9 th Japan Earthq. Symp., Vol.3, 85-90.
- Seed, H. B. and I. M. Idriss, 1971, Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, J. SMFD, ASCE, Vo. 97, No. 9, 1249-1273.
- 田中耕平, 1982, 地震によるランドスライド発生予測図ーその現状と問題点ー, 地すべり, 19-2, 12-19.
- Wilson, R.C., G.F. Wieczorek, E.L. Horp, 1979, Development of Critteria for regional Mapping of Seismic Slope Stability, Abstract, 1979 Annual Meeting of the Geological Society of America.

## 4. 被害関数

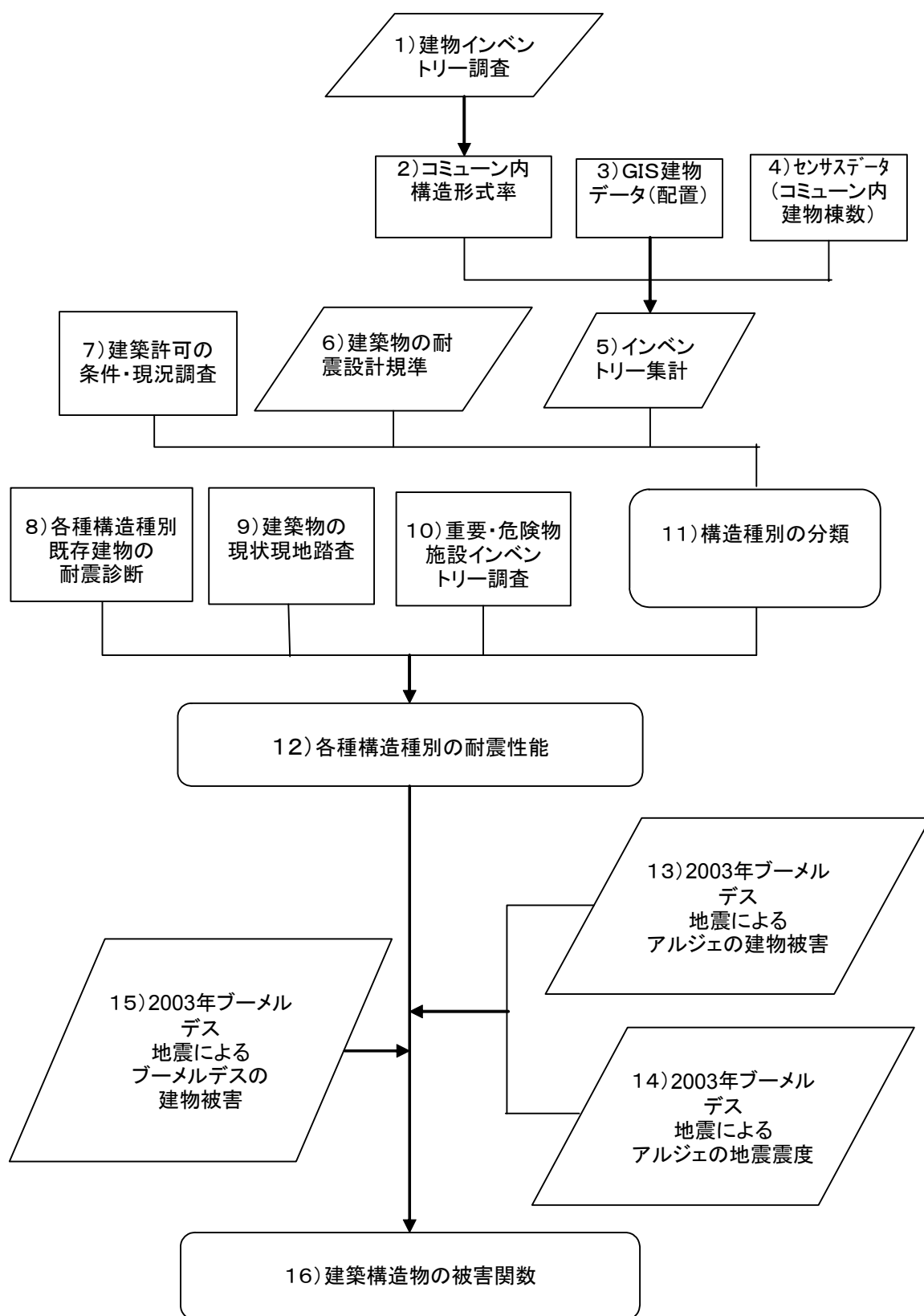
### 4-1 建築物

建築物の被害想定目的は、建築物の脆弱性の現状把握に基づき、調査地域の大地震時の被害想定を行い、短期、中期・長期防災計画を立案し、それぞれの優先順位に応じて対策を実施して、将来の地震災害の軽減を図ることである。

人的被害については、過去の大地震による建築物の倒壊や部分崩壊と相関があり、これらによるものが80%以上を占めている。

サイスミックマイクロゾーニング調査における建築物の被害は、シナリオ地震による地震動の大きさと、各種建築物の被害関数、および、各種建物棟数から定量的に算出した。現状における各種建築物の被害関数の設定、言い換えれば、統計的手法による各種構造種別の耐震性能把握が最も重要である。各種構造種別の耐震性能は、主に構造材料、建設・設計年代、階数、施工レベル、地盤の種類・状況等により異なる。これら各項目の調査は、既存資料（データ）を収集し有効活用するが、収集可能な範囲・内容・精度を判断し、必要に応じて新たに独自の調査を行う必要がある。既存・新規収集資料の範囲、内容、精度等により、把握できる耐震性能の精度に差がでる。

図 4-1 に、建築物の被害関数設定のフローチャートを示す。当表の各項目は、相互に関連し前後関係は一定ではない。フローチャートの番号順に、建築物の被害関数設定に関わる資料の取捨選択、および、活用方法について記述する。



出典: JICA 調査団

図 4-1 建築構造物の被害関数設定フローチャート

## 1) 建物インベントリー調査

建物インベントリー調査は、建物の一般的区分、および、耐震性能に関わる一般調査であり、ダメージマップにより表現する範囲（コミュニティ、用途地域等）内の諸項目毎の統計的数量が必要である。

建物インベントリー調査の主要項目と、その必要度、および、入手の可能性を、表 4-1 に示す。

一般に、耐震性能に関わる諸データが既存データとして過不足なく揃っているケースは稀で、マイクロゾーニング用に独自の調査を行うことが多い。

アルジェプロジェクトでは、建物インベントリー、および、重要・危険物施設インベントリー調査を行った。その詳細は、メインレポート第 4 章を参照されたい。

表 4-1 建物インベントリー調査項目

データ項目	重要度	アルジェ市における 入手の可能性	
		品質	量
建築場所	○○○	◎	◎
建物用途(単純、複合)	○○○	○	○
用途地域(法指定、都市計画)	○○	×	×
所有形態(公有、私有)	○	○	○
構造種別(RC 造、組積造、S 造、木造等の詳細構造種別)	○○○	○	○
建設・設計年代(耐震基準改定、建築審査、施工レベル変化等)	○○○	○	○
階数(地上・地下)	○○○	◎	◎
エンジニアードまたはノンエンジニアード建物	○○	○	○
耐震改修の有無	○○○	△	△
平面・立面的不均衡	○○	○	○
増・改築の有無	○	△	△
地盤の種類と状況	○○○	△	△
被災履歴(地震、火災、洪水等)	○○	△	△
短柱、ソフトストーリーの有無	○○○	△	○
エキスパンションジョイントの状況(床・屋根・壁面の離隔寸法)	○	△	○
必要度は、被害関数設定のための必要度に応じて、下記の 3 段階とした。 ○○○：非常に重要な項目であり、必ず調査すること ○○：重要な項目であり、可能な場合は建築主または建物管理者へのヒアリングにて入手 ○：一般調査項目であり、不明な場合は調査員の判断による。			
入手の可能性は、アルジェプロジェクトの実績であり、データの品質と量を評価した。 ◎：問題なし(OK) ○：ほぼ問題なし、しかしヒアリング等により追加情報が必要 △：情報あるが、不十分 ×：情報なし、もしくは散在している。			



## 2) コミューン毎の構造種別の比率

アルジェ市のマイクロゾーニング調査は、マップ上の表示を各コミュニティ単位とした。マップの表示単位を決定すれば、各種データは表示単位に応じた値が必要になる。したがって、各種構造種別の建物棟数比は、コミュニティごとに必要になる。アルジェプロジェクトでは、建物インベントリー調査結果を採用し、同一コミュニティ内の各種構造種別の建物棟数は同じ比率とした。

## 3) GIS マップ上の建物データ（配置）

アルジェプロジェクトでは、URBANIS が保有していた 2003 年のデジタルマップを利用して、既存建物棟数を計上した。建物、および、施設が、メッシュ線上、コミュニティ境界線上に位置する場合は、その建物、および、施設の図芯が位置する場所にあるものとしてカウントした。同デジタルマップには、道路としての情報のインプットではなく、建物・敷地等の形状表示した後に残った場所が自動的に道路や空き地として認識されていた。当調査の GIS データマップは、新しく道路としてのインプットを行い、国道・公道等の種別、幅員、歩道等を表示した。

## 4) センサスデータ（コミュニティ毎の建物棟数）

センサスデータは、ほぼ 10 年ごとに国が行っている最も信頼できる調査結果である。1998 年版センサスの内容は、コミュニティごとに、男女別人口、年代構成、居住・非居住建物棟数、独立住宅比率、一戸当たり部屋数、住宅設備の普及率等多岐に渡り、当調査の基本的資料として利用した。1977 年版センサスには建物の構造別分類が調査されていたが、最新の 1998 年版センサスには、建物構造種別の分類は無い。建物構造種類別の分布は、建物インベントリー調査の結果を採用した。

## 5) インベントリーの集計

当初のインベントリー集計は、構造種類別を基本として、建設・設計年代、階数、建物用途別等、できる限り詳細に分類して集計することが望ましい。集計はマップ表示上の範囲ごとに行う。アルジェ市の場合は、コミュニティごとに算出した。この集計値からマイナーな項目を集約し、メジャーな項目を 10 個程度（多くとも 20 個以内）に絞り込み、被害関数を検討する。

## 6) 建築物の耐震設計基準

既存建築物の耐震性能の把握は、建物の被害想定を行う上で最も重要な作業である。各時代の耐震規準、および、建築申請の対象建物の耐震性能は、数値的に把握できる。耐震規準は、法的に定められた最低目標であるが、何時の時代もその最低基準値に近い建物が多く建設されてきた。

1981 年にアルジェリア独自の耐震規準が公式制定された以降、建築物の耐震規準の変遷調査は、建設・設計年代の区分に適用でき、各区分年代の耐震性能を把握でき

る。また、耐震規準、および、建築申請の対象外の建物の耐震性能は、同時代の耐震規準のレベルや施工実態をヒアリングした結果を総合して推測することが出来る。

## 7) 建築許可申請・審査の実情調査

建築物の耐震規準が制定され、建築許可申請・審査が行われていても、申請・審査の対象範囲と内容、および、対象物件の何パーセントが実際に申請・審査されていたかは、時代によって変遷しているため、十分に調査する必要がある。申請・審査の対象範囲は、全建築の10%~30%程度が多く、その内50%~100%が実際に申請・審査されている場合が多い。アルジェ市では、公共建築は申請・審査が義務付けられていたが、民間建築は対象外であった。2003年以降は民間建築も対象になったが、全体に占める建物数は非常に少ない。

1980年以前の多くの建物と、1981年以降の民間建築は、耐震設計されていないと云われている。このような過去の状況把握は、構造種別の分類の際に重要な情報となる。

## 8) 各構造種別既存建物の耐震診断

耐震診断作業は、多くの労力を要するが、既存建物の耐震性能を直接詳細に検討する機会であり、建物の被害関数の検討にも非常に有益である。耐震診断規準が整備されている国は少ないが、地震多発国の政府や大学等が中心となって、幾つかの耐震診断手法が考案・実施されている。

アルジェプロジェクトでは、重要建物5棟の耐震診断を実施した。5棟の内訳は、非常に古い組積造2棟とRC造3棟である。RC造は、耐震規準RPA83に基づいて設計された病院建築、RPA88に基づいて設計されたアパートメントハウスと学校建築の3棟である。これらと別にRCノンエンジニアード共同住宅1棟の耐震診断を行った。コンクリート強度について標準強度と低強度の場合の耐震性能に与える影響を評価した。そしてこれらから構造耐震指標の分布形を推定している。

RC造建物に関しては、日本の耐震診断規準2001年版(英語版)を完全に適用して、耐震診断・補強設計を行い、補強後の耐震性能の検証も行った。補強案は複数提案したが補強案の選択次第で耐震性能が変化し、被害関数に反映する上で参考となる。

アルジェプロジェクトでは、日本の既存建築物の耐震診断規準に定められた、構造耐震指標「 $I_s$  値」を、耐震性能を判断する根拠として用いた。日本では、1970年代の当耐震診断基準作成時に、1968年の十勝沖地震と1978年の宮城県沖地震により、被害を受けた数百棟のRC建築の $I_s$  値と被害状況を調査した。また、1995年神戸大震災後には、1981年の新耐震規準に基づいて建設された建物が、大地震に耐えた実績に着目して、大学や多くの行政機関が、既存被災建物の $I_s$  値を計算して、 $I_s$  値と被害率の関係を検討した結果が公表されている。アルジェのRC重要建物の耐震診断は、構造耐震指標の算出は同規準を基に算出し、構造耐震判定指標はシナリオ地震による地震動を考慮して評価した。

組積造建築は、1830年代に建設された現迎賓館（Le PALAIS）と、1912年以前に建設された現上院議会ビル（Le SENAT）の丸石組積造2棟の耐震診断を行った。診断手法はFEMA-310を参考として、静的解析による耐力壁体の平均せん断応力度により評価した。耐震性能の決め手となる目地材は共に、石灰を用いたライムモルタルであり、低強度が予想されるが、サンプリングテストなどの強度資料が無く、イタリアの資料を参考にして、せん断応力度を $0.056 \text{ N/mm}^2$ に仮定して診断を行った。

#### 9) 建築物の現状現地踏査

現地踏査は建築構造技術者が行う目視調査で、調査範囲内のほぼ全域に亘り建築物の現状を観ることが望ましく、可能であれば、ヒアリング調査、および、調査範囲外の建築物を観ることも参考になる。建築物の現状は、地域・地区内の構造種別と構造的な特徴、階数、新・旧市街（建設年代）、地盤状況、建物と道路、空き地、緑地、および、建設工事の施工状況等を、全体的な視点で把握する。当踏査作業は、建物被害関数用の構造種別選定、および、耐震性能把握時の参考情報になる。

#### 10) 重要・危険物施設インベントリー調査

重要施設は大地震が発生した場合に、救助・救援活動の戦略的な指揮拠点、および、受け入れとなるべき建物、および、施設である。政府・行政関係の建物、病院、学校（集会場、校庭）、モスク、協会、体育施設、公園、広場、等、被災者の救助・救援活動を指揮する拠点、および、被災者やホームレスを受け入れられる設備や広さを持ったものである。危険物施設は大地震発生の際に、保有危険物により発生する火災、爆発、ガス・薬品の漏洩等、人的被害を引き起こす可能性がある施設である。両施設共に配置は重要で、被災者の緊急受け入れ、応急処置、中・長期避難所等が人口比から見て適正配置になっているかを、事前検討する場合にも役立つ。一方、危険物施設から民家等が適正な離隔距離を確保できているかをチェックできる資料になる。アルジェプロジェクトでは、調査対象を全34コミューンに分散したために、調査地域の全体的な傾向の把握は出来たが、上記の様な適正配置か否かの詳細なチェックをするような使い方は出来なかった。

#### 11) 構造種別の分類

建築物を構造材料・形式を中心に分類して、耐震性能の違い、言い換えれば、地震時被害率の違いを適切に区分することは、建物の被害想定に必要な作業である。

アルジェプロジェクトでは、建物インベントリー調査（35種類にて調査実施）等に基づいて、当初11種類としたが、プーメルデス地震での建物階数による被害率に明確な差が見られなかったことから、階数による被害率への影響は少ないと判断して、8種類に集約した。その比較表を、表4-2に示す。

表 4-2 構造種別の分類比較

建物インベントリ調査用 構造種別の当初分類				建築構造物被害関数用 構造種別の最終分類	
構造		階数	タイプ	構造	タイプ
組積造	古い煉瓦組積造	1,2	1	カスバ地区の組積造	1
	石組積造	1,2	2	石・煉瓦組積造	2
		3,4,5	3		
		6+	4		
	非補強煉瓦組積造	1,2	5		
		3,4,5	6		
		6+	7		
	一体床構造を持つ 非補強煉瓦組積造	1,2	8		
		3,4,5	9		
		6+	10		
鉄筋コンクリート(RC)造	自主耐震基準制定以前(1980年)のRC造ラーメン構造	1,2	11		
		3,4,5	12		
		6+	13		
	初期耐震基準(RPA81, 88)によるRC造ラーメン構造	1,2	14	初期耐震基準(RPA81, 88)によるRC造ラーメン構造	4
		3,4,5	15		
		6+	16		
	中期耐震基準(RPA99)によるRC造ラーメン構造	1,2	17	中期耐震基準(RPA99)によるRC造ラーメン構造	5
		3,4,5	18		
		6+	19		
	現行耐震基準(RPA2003)によるRC造ラーメン構造	1,2	20	現行耐震基準(RPA2003)によるRC造ラーメン構造	6
		3,4,5	21		
		6+	22		
	RC造壁式構造	1,2	23	RC造壁式構造および耐震壁付きラーメン構造	7
		3,4,5	24		
6+		25			
1,2		26			
RC造耐震壁付きラーメン構造	3,4,5	27			
	6+	28			
	1,2	29			
鉄骨造	ラーメン構造	3,4,5	30	鉄骨造	8
		6+	31		
		1,2	32		
	ブレース構造	3,4,5	33		
		6+	34		
		コンクリートブロック造他	---		

構造種別の分類の絞込み作業においては、建物インベントリ調査の結果、建物の耐震基準、および、建築許可の状況等を検討した結果、下記の判断をした。RC造建築は全体の約2/3を占め、RC造の耐震壁、および、耐震壁付きラーメン構造は合計12%を占めているので、それぞれ独立の分類とした。RC造ラーメン構造のうち高層(6階以上)建物は5%と少なく、被害率が高い1999年以前に建てられたものが殆どであった。耐震基準RPA99以降のRC造は、わずか2%であったが、将来耐震補強等の防災対策が行われた場合に、効果の確認を可能にするためそれぞれ独立の分類とした。その結果、RC造ラーメン構造は耐震基準の変遷に合わせて、自主耐震基準制定(1980年)以前、初期耐震基準(RPA81, 88)、中期耐震基準(RPA99)、現行耐震基準(RPA2003)の4種類とした。

組積造建築は全体の約 1/3 を占めているが、新しく建設されることは殆ど無い。素材は、石 (30 %) とレンガ (4 %) が圧倒的に多く、コンクリートブロックはごく僅かであった。石組積造建築は、コロニアル風の中・高層 (3 階以上) と、独立住宅の低層 (2 階以下) がほぼ同数あり、両者のブーメルデス地震での被害率の差は明確でなく、統合して石組積造を 1 種類とした。レンガ組積造建築は、カスバ地区に代表されるように古い建物が多く、目地は粘土モルタルが主であり、素材の特徴から経年劣化が進行しているものが多かったため、被害率は最も高く、独立の分類とした。

鉄骨造建築は全体の 1%のみであったが、新築建物を多く見かけ、今後増加傾向にあると判断して、独立の分類とした。

## 12) 各構造種別の耐震性能

上記 11) で分類した各構造種別の耐震性能把握は、建築物の被害想定作業で最も重要である。各構造種別の耐震性能把握手法は、米国、ヨーロッパ、および、日本で公表している評価方法以外にも、幾つかの大学や行政庁が独自に行っているものがある。調査地域の構造物にマッチし、耐震性能を適正に評価できる手法を採用すれば問題ない。

以下に代表的な既存建物の耐震性能把握手法を列記する。

### A) 米国では、

- ATC は、MMI 震度または PGA に建物損傷状態を対応させて、各構造種類別に標準的な値を整備し、耐震性能の評価資料を提供している：ATC-13, 14 & 21
- FEMA は、水平変形から耐震性能を推定する方法と、水平保有耐力を計算して耐震性能を直接算出する方法を提示している：HAZUS-99, FEMA-154, 155, 178, 237 & 310

### B) 日本では、1970 年代後半に、既存建築物の「RC 造」と「S 造」それぞれに耐震診断・改修規準を制定し、2001 年には日本で最も多い「木造」の耐震診断規準を制定した。

- RC 造建築は、上記 8) に記述した「 $I_s$  値」から耐震性能を評価する。
- S 造建築は、水平保有耐力を算出して耐震性能を評価する。
- 木造建築は、「壁量に基づいた精密診断法」が広く普及しているが、他にも「限界耐力計算法」、「エネルギー法」、および、「時刻歴応答解析法」を使用して、耐震性能を評価する。

### C) ヨーロッパでは EMS が、EMS 震度に建物損傷状態を対応させて各構造種類別に統計的標準被害関数を整備し、VULNUS と FAMIVE では、建物の安全標準を基にして、損傷乗数計算手法により、耐震性能を評価している。

日本では1977年に、RC造建築の耐震診断規準を制定し、強度指標(C)、靱性指標(F)、形状指標(SD)、および、経年指標(T)から構造耐震指標(Is)を算出し、耐震性能を評価している。1978年には、鉄骨造建築の耐震診断規準を制定し、既存構造躯体の水平保有耐力を基に耐震性能を評価している。

アルジェプロジェクトでは、アルジェリアの現行耐震基準(RPA99/V.2003)と日本の「Is値」を用いた耐震診断規準の比較検討を行い、安全性の判定指標値を調整して、日本のRC造の耐震診断基準を、耐震性能評価手法として採用した。そして、RC造骨組み構造の耐震診断結果、および、組積造、RC造耐震壁構造、鉄骨造の被害率調査から推定した各構造種別の「Is値」分布を用いて被害関数を算出した。その詳細はメインレポート第6章を参照されたい。

### 13) 2003年ブーメルデス地震によるアルジェ市の建築物の被害、14) 同震度

上記12)で設定した各被害関数と、それに対応した建物棟数、および、地震動の大きさから被害率を算出し、2003年ブーメルデス地震による被害実績から算定した被害率を用いてキャリブレーションを行い、その被害関数の妥当性を検証した。

CGSとCTCが協働して調査した2003年ブーメルデス地震による建物被害調査結果の詳細は分析途中であるため、入手した一部地域のプレ情報を使いキャリブレーションを行った。そのプレ情報では、構造種別毎の被害棟数を集計していたが、調査対象外の建物棟数は不明なので、前記3)のGISデータの建物総数を分母とし、被害グレード「4+5」を分子として被害率を算出した。ここで、被害率算出用の分子の建物棟数の扱いは数ケース考えられる。例えば、A)被害グレード「4+5」、B)被害グレード「(3+4)/2 + 5」、C)被害グレード「(3/3) + 4 + 5」等であり、今回はA)被害グレードを採用した。

また、上記入手プレ情報地区の震度は3 コミューンのみについてであり、平均震度はEMS7.9~8.2で震度差の範囲は小さく、被害データだけから被害曲線を得る事はできない。被害データについては同じコミューン内での震度の幅が大きいこと、および、建物調査率14%~26%に対してコミューン内の調査地点が特定できないことから、工学的判断により平均震度での調査被害率を低減した被害関数となっている。

### 15) 2003年ブーメルデス地震によるブーメルデス県の建築物の被害

上記13)、14)の作業で、平均震度EMS8前後における建物被害率のキャリブレーションを行ったが、他の震度での検証も合わせて行うことが望ましい。今回の調査範囲外であるが、2003年ブーメルデス地震の震源に近く、平均震度EMS9の範囲にあるブーメルデス県ブーメルデス市の建物被害率を参考に、EMS9の点のキャリブレーションを行い、設定被害曲線はほぼ許容できる範囲であることを確認した。

設定被害曲線のキャリブレーションは、可能な限り多くのポイントで出来れば良いが、現実には有用な直接的データは少なく、ある程度類似した別の都市の記録を参

考に行うことが多い。今回は CGS による、ブーメルデス地震被害調査結果を有効利用できた。

#### 16) 建築構造物の被害関数

上記 12)～15)の手順で検討されたように、建築物の被害関数の設定は被害想定を行う上で技術的、統計的判断を伴う作業である。調査対象範囲内の建築物の耐震性能を適切に評価し、統計的に適正な範囲の被害関数を設定する作業には、広範囲で高い技術力が必要である。この様に、十分な検討の基に設定された被害想定も、近い将来現実に大地震が発生した場合の被害実数と比較すれば、過去の事例、経験から±50 %～±100 %程度の違いがある場合もある。この点を、良い意味で認識、理解して防災計画を実施することが必要であろう。

### 4-2 インフラ

インフラ施設に対する地震被害想定については、日本とアメリカ (HAZUS など) において、予測手法が良くまとめられている。ここでは、日本で採用されている予測手法について紹介する。

交通・輸送手段としては、大きく分類して陸運、海運、空輸に分けられる。本節では、各輸送手段に対する被害予測手法を紹介する。

#### 4-2-1 陸運

陸運については、道路の機能を評価するため、通行可否のクリティカルポイントとなる橋梁の被害予測がおこなわれる。

橋梁の被害予測は、個々の橋梁に対しおこなわれることが多く、以下に記す 2 つの予測手法が代表的である。

##### (1) 片山の方法

本手法は、以下の手順 (図 4-2 参照) により、落橋の可能性を予測するものである。

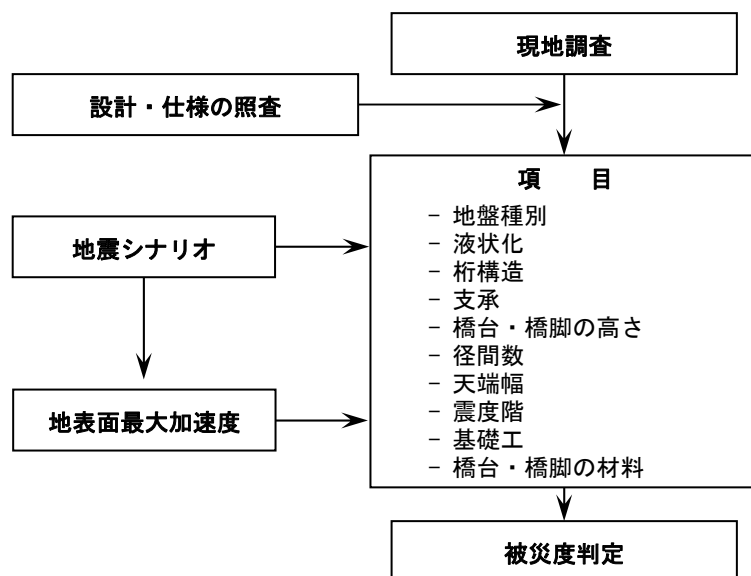


図 4-2 橋梁被害予測のフロー

- 1) 対象橋梁の構造と周辺地盤の特徴を調査する。
- 2) 橋梁位置の地震動（震度）、および、液状化の判定をおこなう。
- 3) 上記の結果を基に、項目ごとに設定されたカテゴリーを選択し、該当する重み係数を相乗する。
- 4) 相乗した値が評価点となり、落橋の危険性を評価する。

片山の方法では、落橋に影響する 10 項目について検討している。各項目は、表 4-3 に示すように判断が容易なパラメータで判定される。表 4-3 に、各範囲に対する重み係数を示す。

表 4-3 橋梁被害判定基準

項 目	範 囲	重み係数
地盤	硬質	0.5
	中位	1.0
	軟質	1.5
	非常に軟質	1.8
液状化	無	1.0
	おそれあり	1.5
	有	2.0
桁構造	アーチ・ラーメン	1.0
	連続桁	2.0
	単純桁・ゲルバー	3.0
支承	落下防止有り	0.6
	普通	1.0
	同一橋脚上の 2 つの可動支承	1.15
橋・橋脚の高さ	≤ 5 m	1.0
	5~10 m	1.35
	≥ 10m	1.7



項 目	範 囲	重み係数
径間数	= 1	1.0
	≥ 2	1.75
天端幅	広い	0.8
	狭い	1.2
震度階 (JMA)	5 弱	1.0
	5 強	1.7
	6 弱	2.4
	6 強	3.0
	7	3.5
基礎工	パイルベント	1.4
	その他	1.0
橋台・橋脚の材料	無筋コンクリート・その他	1.4
	鉄筋コンクリート	1.0

落橋の判定は、下式に示すように、上表中の重み係数の積によっておこなわれる。

$$y_i = \prod_{j=1}^N \prod_{k=1}^{M_j} X_{jk}^{\delta_i(jk)}$$

ここに、

$y_i$  :  $i$ -橋梁の被災度判定値

$N$  : 全項目数

$M_j$  :  $j$ -項目の範囲

$\delta_i(jk)$  : ダミー変数 ( $\delta_i(jk) = 1$ ;  $i$ -橋梁の特性が  $k$ -範囲に対応する場合,  $\delta_i(jk) = 0$ ; それ以外)

$X_{jk}$  :  $j$ -項目の  $k$ -範囲に対する重み係数

$\prod_{j=1}^N$  :  $1 \sim N$  番目までの積

橋梁被害の判定基準は、日本における3つの地震(1923年関東地震、1948年福井地震、1964年新潟地震)による30箇所(橋梁)の被害に基づき、表4-4に示すように設定されている。

表 4-4 橋梁の被災度判定に係る定義

被災度		片山の方法に基づく閾値
A	- 落橋の可能性大 - 大変位の発生 - 長期間使用不能・要改築	30 以上
B	- 落橋の可能性中位 - 変位の発生 - 一時使用不能・要修復/修繕	26 以上 30 未満
C	- 落橋の可能性小 - 小変位の発生 - 基本的に点検後に使用可	26 未満

[解説]

本手法は、日本で発生した大規模地震による橋梁の様々な被害形態を詳細に調査し、その結果を数量化手法によりとりまとめ、提案されたものである。1978年に提案されたものであるため、最近の被害事例は含まれていないが、利便性の高さから、現在でもよく利用されている。

手法自体は古いのが、長所として、橋梁構造と地盤の特徴（特にマイクロゾーニングの結果）が反映されること、同定により重み係数や評価の閾値を調整できることが挙げられる。

本調査では、調査団とカウンターパートの協働で、ブーメルデス地震の被災記録を用い、手法の検証をおこなった。その結果、元来の手法に対して、下記の点を調整した。

\*1: 地盤種別

オリジナル	修正
硬質	硬質:新鮮な岩盤
中位	中位:やや風化～風化した岩盤
軟質	軟質:堆積土層・洪積層
非常に軟質	非常に軟質:堆積土層・沖積層

\*2: 液状化危険度

オリジナル	修正
無	無
おそれあり	おそれあり: $0 \leq P_L < 15$
有	有: $15 \leq P_L$

\*3: 支承

オリジナル		修正	
範囲	重み係数	範囲	重み係数
落下防止有り	0.6	落下防止有り	0.6
普通	1.0	普通	1.0
同一橋脚上の2つの可動支承	1.15	同一橋脚上の2つの可動支承	1.15
		耐震設備	落橋防止
			免震(ゴム)支承
			0.6
			0.9

\*4: 震度

オリジナル		修正	
範囲	重み係数	範囲	重み係数
5弱	1.0	$MSK < 7.885$	1.0
5強	1.7	$7.885 \leq MSK < 8.680$	2.1
6弱	2.4	$8.680 \leq MSK < 9.475$	2.4
6強	3.0	$9.475 \leq MSK < 10.270$	3.0
7	3.5	$10.270 \leq MSK$	3.5

\*5: 判定閾値

被災度	オリジナル	修正
A	30 以上	30 以上
B	26 以上 30 未満	22 以上 30 未満
C	26 未満	22 未満

## (2) 日本道路協会の方法

本手法は、橋梁点検台帳（表 4-5 参照）を用いて、その構造特性や適用仕様書の年代、および、地盤状況に基づき評価点を算出し、橋梁の耐震性を評価する。

なお、橋梁点検台帳は、日本では所管機関により定期的に橋梁点検が実施され、データベース化されている。

表 4-5 橋梁点検台帳の内容

主項目	内 容
上部工	(1) 適用示方書 (2) 上部構造 (3) 上部構造材料 (4) 落橋防止構造
下部工の変形	(5) 下部構造形式 (6) 橋面高 (7) 地盤 (8) 液状化の影響
主鉄筋段落し部強度	(9) せん断支間比 (10) 段落し部の曲げ引張りひびわれ (11) 基部と段落し部の安全率 (12) 主筋段落し部の降伏強度に対する安全率 (13) せん断応力度
下部工の変状	(14) 支承部の変状 (15) 躯体の変状 (16) 基礎の異常 (17) 桁等の変状 (18) 下部構造形式

## [解説]

橋梁は、基準に準拠して建設されることから、もしその基準に耐震設計が謳われているならば、橋梁に対する耐震性能は予測可能である。同時に橋梁は主として公共施設であるため、その建設方式・種類は限られている。したがって、日本のように長い間設計基準が確立されているような国では、その基準類の内容・変遷が被害想定の上で重要な指標となる。

また、HAZUS における被害想定では、建設年次が非常に重要と位置づけられている。これは、建設年代が新しいほど橋梁の耐震性能は向上していることに対応している。

日本では、全ての橋梁に対して点検調査が実施され、橋梁台帳に記録されている。このように、橋梁点検台帳が整備されていれば、比較的容易に耐震性が評価できる。しかし、その台帳が未整備の場合は台帳作成業務から始める必要があるため、時間と経費がかかってしまう。

橋梁台帳は、定期的に整備され、維持管理に用いられる性格のものである。そのため、台帳を新たに作成するにあたっては、広範な合意（公的機関 - 教育機関 - 産業界）が必要である。

アルジェリアでは日本のような橋梁台帳が整備されていないため、この手法による被害想定は適さない。

#### 4-2-2 海運

海運については、港湾施設の被害予測がおこなわれる。港湾は、埠頭、棧橋、荷役施設、倉庫、貯蔵タンクなど、様々な施設で構成されているが、その中でも岸壁の耐震診断が実施されるケースが多い。それは、地震発生後（救援・救助）に岸壁が担う役割が、非常に大きいためである。

予測手法としては、以下に示すように、既往震災記録に基づき、震度を用いて施設の変形量を予測し、その変形量から被災度を推定する上部の方法、および、地表面最大加速度や液状化現象と被災度の関係をまとめたもの、が採用されている。

##### (1) 上部の方法

上部の方法（1983）では、まず、作用震度（ $K_e$ ）と破壊震度（ $K_c$ ）の比  $F_c$  から、被災変形量を推定する。そして、1923年関東地震から1978年宮城県沖地震までの17地震に基づき、港湾施設の被害事例を回帰分析して得られた被災変形量と被災程度の関係から、被害を予測する。

以下に、予測手法を示す

##### 1) 作用震度： $K_e$

$$K_e = \begin{cases} \alpha / g & (\alpha < 200 \text{ gal}) \\ 1 / 3 \cdot (\alpha / g)^{1/3} & (\alpha \geq 200 \text{ gal}) \end{cases}$$

$K_e$  : 作用震度

$\alpha$  : 各施設位置での地表面加速度 (gal)

$G$  : 重力加速度 (980 gal)

##### 2) 破壊震度： $K_c$

$K_c$  : 破壊震度：日本の技術指針に準拠して計算された施設の安全率が、地震時に1未満となる最小震度

3) 作用震度と破壊震度の比 :  $F_c$ 

$$F_c = K_e / K_c$$

## 4) 変形量の推定

重 力 式	
目的変数	回帰式
最大はらみだし量 (cm)	$D_x = -113.8 + 124.4 F_c$
天端沈下量 (cm)	$S_p = -50.9 + 57.1 F_c$
はらみだし量 / 構造物高 (%)	$R = -12.7 + 14.5 F_c$
加算変位 (cm)	$D_a = -127.5 + 148.5 F_c$
矢 板 式	
目的変数	回帰式
最大はらみだし量 (cm)	$D_x = -1.6 + 34.9 F_c$
平均はらみだし量 (cm)	$D_m = -15.9 + 9.5 F_c$
エプロン沈下量 (cm)	$S_e = -5.3 + 14.7 F_c$
はらみだし量 / 構造物高 (%)	$R = -1.5 + 5.8 F_c$
加算変位 (cm)	$D_a = -2.0 + 44.0 F_c$

## 5) 変形量と被災程度の関係

[重力式]

被災程度	最大はらみだし量 (cm)	平均はらみだし量 (cm)	天端沈下量 (%)	エプロン沈下量 (cm)	傾斜角 (°)
0	0	0	0	0	0
I	≤ 25	≤ 25	≤ 30	≤ 50	≤ 5
II	25 - 70	≤ 40	≤ 50	50 - 80	1 - 8
III	70 - 200	40 - 200	≤ 100	80 - 100	2 - 15
IV	200 ≤	200 ≤	100 <	100 ≤	15 ≤

[矢板式]

被災程度	最大はらみだし量 (cm)	平均はらみだし量 (cm)	天端沈下量 (%)	エプロン沈下量 (cm)	傾斜角 (°)
0	0	0	0	0	0
I	0 - 30	≤ 10	≤ 30	≤ 20	≤ 3
II	30 - 100	10 - 60	≤ 40	≤ 50	≤ 5
III	100 - 200	60 - 120	≤ 50	50 - 100	≤ 10
IV	200 ≤	120 ≤	50 <	100 ≤	10 <

6) 被害程度の評価

ランク	被災の状況	被災の程度
0	無被害	
I	本体には異常が無いが、附属構造物に破壊や変状が認められるもの。	
II	本体にかなりの変状が起こったもの。	簡単な手直しですぐに供用に耐えうる。
III	形はとどめているが、構造物本体に破壊が起こったと認められるもの。	機能をまったく喪失している。
IV	全壊として形をとどめていないもの。	

[解説]

本手法の適用にあたっては、港湾施設（岸壁など）の内的・外的安定計算を実施する必要がある（破壊震度を求めるため）。そのためには、各施設周辺の地盤情報・定数、施設の現況を把握する必要がある。もし、それらの情報が既存資料では得られない場合は、地盤調査、および設計レビューが必要となる。

本調査では、既存資料だけではそれらの情報を得ることが難しく、追加の調査が必要と判断されたため、本手法を採用しなかった。また、液状化の影響が考慮されていない点は要検討であろう。

本手法を採用する際には、既往の被災事例を基に、アルジェリアへの適用性について十分検討する必要があることを注記しておく。

(2) PGA・液状化危険度と被災程度の関係を用いた手法

本手法は、兵庫県南部地震を含む過去の地震における港湾の被害事例を基に設定された、地表面加速度・液状化危険度と被災程度の関係（表 4-6 参照）を用いている。

表 4-6 既往地震による港湾施設の被害

	地表面加速度 (gal)				
	0 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 450	450 ~
液状化地盤	0	1	2	3	3
非液状化地盤	0	0	1	2	3

被災度 0：無被害  
 被災度 1：小被害、付帯構造物にクラックや変位が生じる  
 被災度 2：中被害、主要構造物に変状が生じる  
 被災度 3：大被害、主要構造物に甚大な変状が生じ、その機能を失う

## [解説]

本手法では、マイクロゾーニングの結果から得られる地表面加速度と液状化危険度が反映される。簡易な手法であるため、既往被災で検証が出来れば、港湾施設の第一次的な脆弱性分布の判定に適している。

本調査では、ブーメルデス地震の被災事例において適合性を検証し、本手法を採用した。

## 4-2-3 空輸

空輸については、空港施設の被害予測が必要となるが、被災履歴が少なく、また過去の被災程度が小さいことから、定量的な被害予測は一般におこなわれていない。

そこで、調査団は、過去の被災履歴を基に、地表面加速度と被災程度の関係（表 4-7 参照）を整理し、被害予測判定表（表 4-8）を提案した。

表 4-7 既往地震における空港の被害状況

地震	空港	被災程度	被害状況	観測/推定 地表面加速度
1989年 ロマブリータ地震 (アメリカ)	サンフランシスコ空港 (国際線)	1	- 滑走路にヘアークラック - ターミナルでは構造的被害 無し - 管制塔で天井の落下 - 管制塔で窓パネルが壊れる - 空港は13時間閉鎖された	323 gal
1993年 釧路沖地震(日本)	釧路空港 (国内線)	1	- 小さなクラック	520 gal
1993年 北海道南西沖地震(日本)	奥尻空港 (ローカル線)	2	- 滑走路に20mのクラック - 空港は4日間閉鎖された - 誘導灯が壊れる	392 gal
1995年 兵庫県南部地震(日本)	関西空港 (国際線)	0	- 被害無し	169 gal
2000年 鳥取県西部地震(日本)	米子空港 (国内線)	2	- 滑走路にクラック - 空港は5日間閉鎖された	546 gal
2001年 芸予地震(日本)	広島空港 (国内線)	0	- 被害無し	298 gal
	西広島空港 (ローカル線)	1	- 小被害	298 gal
	松山空港 (国内線)	1	- 小被害	298 gal
2001年 シアトル地震(アメリカ)	シアトル シータック空港 (国際線)	1	- 管制塔の被害	194 gal
	King County 空港 (ボーイングの工場)	2	- 滑走路に大きなクラック	267 gal

## 注記

被災度 0: 無被害

被災度 1: 小被害, 空港施設が1日以上閉鎖される

被災度 2: 中被害, 空港施設が数日間閉鎖される

表 4-8 被災度と地表最大加速度の関係

地表最大加速度 (gal)	0 ~ 200	200 ~ 300	300 ~
被災度	0	1	2

被災度 0：無被害

被災度 1：小被害、空港施設が1日以上閉鎖される

被災度 2：中被害、空港施設が数日間閉鎖される

[解説]

本調査では、ブーメルデス地震の被災事例において適合性を検証し、本手法を採用した。

### 4-3 ライフライン

ライフライン施設においても、インフラ施設と同様に、地震被害想定については、日本とアメリカ (HAZUS など) において予測手法が良くまとめられている。ここでは、日本で採用されている予測手法について紹介する。

ライフライン施設としては、大きく分類して上水道、下水道、電気、ガス、電話に分けられる。本節では、各ライフライン施設に対する被害予測手法を紹介する。

#### 4-3-1 上水道

上水道の施設は、さまざまな構造物や設備で構成されている。

- (1) 貯水施設：原水を貯留するためのダムなどの貯水施設
- (2) 取水施設：原水を取り入れるための取水堰、取水塔、井戸などの施設
- (3) 導水施設：取水施設で取り入れた水を浄水施設へ導くための管路（導水管）などの施設
- (4) 浄水施設：原水を飲用に適する水（浄水）に浄化するための施設
- (5) 送水施設：浄水を配水施設に送るための管路（送水管）などの施設
- (6) 配水施設：需要に応じて必要な水を供給するための配水池、管路（配水管）などの施設
- (7) 給水施設：配水管から分岐して家庭などに引き込まれた給水管、および、これに直結している給水用具などの設備



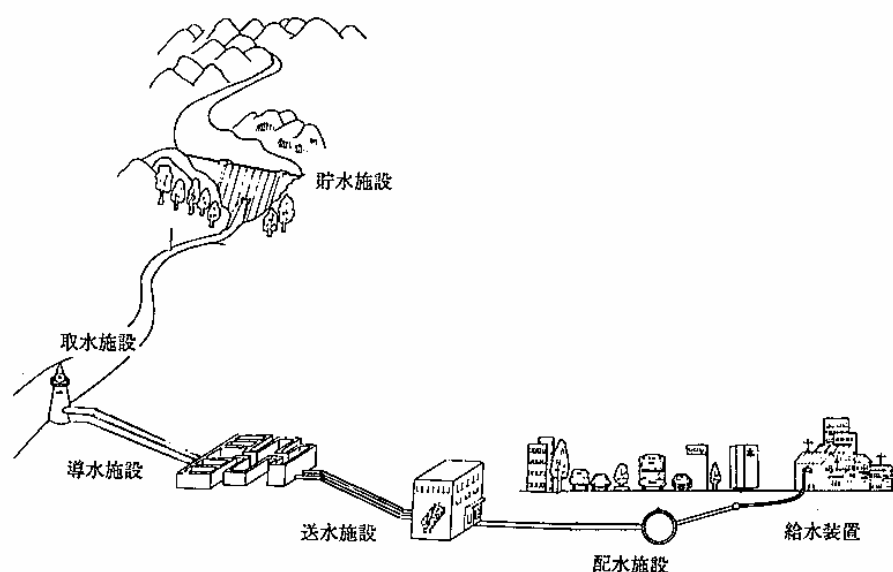


図 4-3 上水道システムの構成図

「都市防災と環境に関する研究会(1998):地震と都市ライフライン、京都大学出版会」

施設の耐震性について簡単にまとめると、以下のようになる。

- 貯留・取水施設、浄水施設、配水池やポンプ所などの施設  
耐震設計基準にしたがって設計がなされていること、過去の地震被害事例からみても、機能に大きな支障を及ぼす被害は発生しないと考えられる。しかし、旧基準による設備もあることから、これらについては個別の耐震性の評価を行っておく必要がある。
- 浄水施設  
電力を動力源にしている場合が多いため、停電時における施設の稼働状況についても把握しておく必要がある。
- 管路施設  
地震による被害が最も多い施設である。

以上のように、埋設管は、被災履歴が多く、かつその被害が与える影響が大きいことから、上水道施設における被害予測の対象とする。

被害量としては、管路延長に対する被害箇所数を求める。その予測手法は、過去の被災記録に基づく標準被害率を設定し、それに地盤、管種、管径の違いによる耐震性の特徴を加味した補正係数を適用するものである。以下に、3種類の式を示すが、いずれも表現が異なるだけで、計算の趣旨は同じである。

[自治体]

$$R_{fm} = R_f * C_g * C_p * C_d$$

ここに、

$R_{fm}$  : 水道管被害率 (箇所/km)

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

$C_g$  : 地盤・液状化係数

$C_p$  : 管種係数

$C_d$  : 管径係数

[日本水道協会 (1998)]

$$R_w = C_g * C_1 * C_p * C_d * R_{sw}$$

ここに、

$R_w$  : 水道管被害率 (箇所/km)

$R_{sw}$  : 標準被害率 (箇所/km)

$C_g$  : 地盤係数

$C_1$  : 液状化係数

$C_p$  : 管種係数

$C_d$  : 管径係数

[(財)水道技術研究センター (2000)]

$$(\text{被害箇所数}) = C_p * C_d * C_1 * S_d * L$$

ここに、

$S_d$  : 標準被害率 (箇所/km)

$C_p$  : 管種係数

$C_d$  : 管径係数

$C_1$  : 液状化係数

$L$  : 各管種・管径に対する計算対象グリッドごとの管延長 (km)

標準被害率、および、各補正係数については、以下に示すように、種々の考え方が提案されている。各提案のうちどれを採用するかは、被害想定対象地域の現状、過去の地震災害の再現性などを総合的に判断して決定する必要がある。

(1) 標準被害率

標準被害率については、3種類の考え方がある。

(1-1) 地表最大加速度を指標とするもの

- 1) 久保・片山 (1975) が、サンフェルナンド地震による地下埋設管被害を基に設定したもの

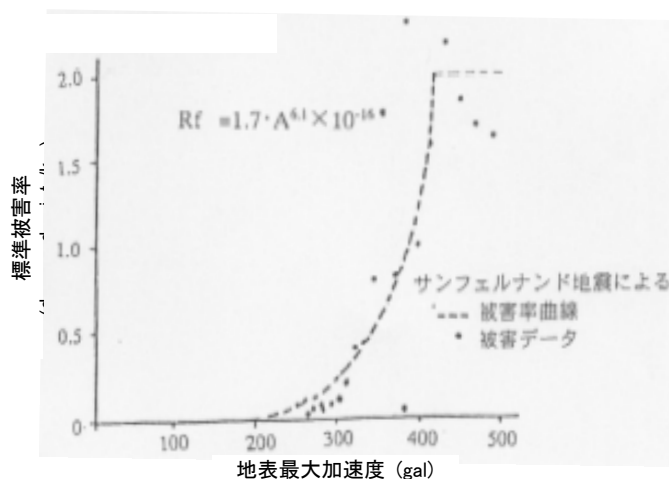


図 4-4 サンフェルナンド地震（1971）の被災状況に基づく  
地下埋設管に係る地表最大加速度と標準被害率の関係

標準被害率の算定には、下式を用いる。

$$R_f = 1.7 * A^{6.1} * 10^{-16} \text{ ----- (最大 } R_f = 2.0)$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

$A$  : 地表最大加速度 (gal)

- 2) 日本水道協会（1998）による兵庫県南部地震における被害データを基に設定されたもの

$$R_{sw} = \begin{cases} 0 & \text{----- (} A_{max} < 100 \text{ gal)} \\ 2.88 * 10^{-6} (A_{max} - 100)^{1.97} & \text{----- (} A_{max} \geq 100 \text{ gal)} \end{cases}$$

$R_{sw}$  : 標準被害率 (箇所/km)

$A_{max}$  : 地表最大加速度 (gal)

- (1-2) 地表最大速度を指標とするもの

- 1) 兵庫県南部地震などによる上水道配水管の被災事例を基に設定されたもの

$$R_f = 2.24 * 10^{-3} (V - 20)^{1.51}$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

$V$  : 地表最大速度 (kine)

2) 兵庫県南部地震における西宮市の上水道配水管被害を基に設定されたもの

$$R_f = \begin{cases} (V - 20) * 0.0125 * 0.8 & \text{(DIP - A, K, T)} \\ (V - 70) * 0.0125 * 0.8 & \text{(DIP - S, P)} \\ (V - 20) * 0.0125 * 3.0 * (2 / 3) & \text{(CIP - A)} \\ (V - 20) * 0.0125 * 0.8 & \text{(SP)} \end{cases}$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)  
 $V$  : 地表最大速度 (cm/sec)  
 DIP : ダクタイル鋳鉄管 Ductile cast iron pipe  
 CIP : 鋳鉄管 Cast iron pipe  
 SP : 鋼管 Steel pipe  
 A, K, T, S, P : 継手形状

3) 日本水道協会 (1998) による、兵庫県南部地震における被害データを基に設定されたもの

$$R_{sw} = \begin{cases} 0 & (V_{max} < 15 \text{ cm/sec}) \\ 3.11 * 10^{-3} (V_{max} - 15)^{1.30} & (V_{max} \geq 15 \text{ cm/sec}) \end{cases}$$

$R_{sw}$  : 標準被害率 (箇所/km)  
 $V_{max}$  : 地表最大速度 (cm/sec)

4) (財)水道技術研究センター (2000) による、兵庫県南部地震における被害データを基に設定されたもの

$$S_d = 6.33 * 10^{-5} V^{2.10} \quad (V \leq 110 \text{ kine})$$

$S_d$  : 標準被害率 (箇所数/km)  
 $V$  : 地表最大速度 (kine)

(1-3) SI 値を指標とするもの

SI 値を指標とした標準被害率は、兵庫県南部地震による上水道埋設管の被災事例を基に設定されている。

$$R_f = 0.025 * SI - 0.51 \quad (\text{最大 } R_f = 1.5)$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)  
 SI : SI 値 (cm/sec)

(2) 地盤・液状化係数

地盤・液状化係数は、各地の地域特性に基づき設定されるものである。

表 4-9 に日本の自治体が採用した係数の事例を、表 4-10 と表 4-11 に日本水道協会と(財)水道技術研究センターが提案している係数を示す。

表 4-9 日本の各地における地盤・液状化係数

地盤分類	秋田県, 新潟県, 広島県, 宮崎県	地盤分類	仙台市	
丘陵地	0.5	丘陵地	0.4	
台地	0.5	台地	0.5	
沖積平野	1.0	沖積平野	1.0	
軟弱低地	2.0	軟弱低地・造成地	2.0	
地盤分類	宮城県	地盤分類	福井県	
沖積層以前	0.5	洪積世	0.5	
沖積層地盤	1.0	沖積世	1.0	
腐植土地盤	2.0	沖積世（腐植土）	2.0	
造成地	2.0	地盤分類	青森県	
地盤分類	埼玉県	洪積地盤以上の良好地盤	0.5	
Dc, Ds, Dg	0.5	沖積 地盤	ローム	0.9
Lm	0.9		粘土・砂など	1.0
Ac, As	1.0		腐植土	2.0
Ap	2.0	地盤分類	山口県, 広島市	
地盤分類	長野県	1種	0.6	
1種	0.6	2種	1.3	
2種	1.3	3種	1.3	
3種	1.3	4種	1.9	
4種	1.9	地盤種境界	2.5	

液状化指数 ( $P_L$ )	0	5	10	15	20
東京都 97, 川崎市	1.0	1.2	1.5	3.0	
札幌市	1.0	1.1	1.3	2.1	
静岡県	1.0	1.0	2.9	4.7	
宮城県, 宮崎県, 仙台市	-	-	2.9		4.7
青森県, 秋田県, 埼玉県, 広島県	-	-	2.9	4.7	
福井県	-	-	2.5	3.5	
新潟県	-	-			3.0

地盤分類による係数と液状化指数による係数の両方が設定されている自治体では、いずれか大きい方を採用する。

表 4-10 日本水道協会による地盤・液状化係数

地盤分類	$C_g$	液状化指数		$C_l$
山地, 山間部の造成地	1.1	液状化の 可能性	高い ( $P_L > 15$ )	2.4
段丘平坦面, 丘陵	1.5		中位 ( $5 < P_L \leq 15$ )	2.0
古い運河, 後背湿地, 平地部の造成地, 海岸線	3.2		低い ( $0 \leq P_L \leq 5$ )	1.0
溪谷底部の平坦地, 扇状地, 崖, 自然堤防（開発地・未開発地）	1.0			

表 4-11 (財)水道技術開発センターによる液状化係数

液状化判定	$C_l$
無し ( $0 \leq P_L \leq 5$ )	0.9
一部 ( $5 < P_L \leq 15$ )	1.0
全体 ( $P_L > 15$ )	1.6

(3) 管種係数、管径係数

管種・管径係数は、過去の被災履歴を分析することにより設定されている。自治体が採用した係数については、管種係数と管径係数の積として設定している事例（表 4-12～表 4-13 参照）と、管種係数と管径係数を別個に設定している事例（表 4-14～表 4-17）がある。また、日本水道協会と(財)水道技術研究センターでは、後者にて係数を提案している（表 4-18～表 4-19）。

表 4-12 福岡県における管種・管径係数

管種	管径 (mm)			
	$\leq 75$	100 - 125	150 - 350	400 -
石綿セメント管	10.2	5.3	3.9	3.3
塩化ビニル管	2.6	1.9	1.9	-
普通鑄鉄管	1.4	1.0	0.8	0.3
ダクタイル鑄鉄管	1.1	0.5	0.5	0.1
ネジ付鋼管	10.5	5.5	4.0	3.4
溶接鋼管	0.5	0.3	0.2	0.1

表 4-13 三重県における管種・管径係数

管種	管径 (mm)				
	$\leq 75$	100 - 150	200 - 250	300 - 450	500 -
ダクタイル鑄鉄管	2.1	1.0	1.0	1.0	0.1 (0.2)
鑄鉄管	1.7	1.2	1.1	0.6	0.2
鋼管	2.8	1.5	1.3	0.9	0.8

表 4-14 東京都 97, 札幌市, 川崎市における管種係数と管径係数

管種	管径 $\phi$ (mm)	係数
ダクタイル鋳鉄管	$\phi \leq 75$	0.6
	$100 < \phi \leq 450$	0.3
	$500 < \phi \leq 900$	0.09
	$1,000 < \phi$	0.045
鋳鉄管	$\phi \leq 75$	1.7
	$100 < \phi \leq 250$	1.2
	$300 < \phi \leq 900$	0.4
	$1,000 < \phi$	0.15
鋼管	$\phi \leq 75$	0.84
	$100 < \phi \leq 250$	0.42
	$300 < \phi$	0.24
塩化ビニル管	$\phi \leq 75$	1.5
	$100 < \phi$	1.2
石綿セメント管	$\phi \leq 75$	6.9
	$100 < \phi \leq 250$	2.7
	$300 < \phi$	1.2

表 4-15 静岡県における管種係数と管径係数

管種	管種係数	管径係数	
鋼管 (ネジ)	10.0	$< 100 \text{ mm}$	1.3
		$100 \text{ mm} \leq$	0.75
鋼管 (溶接)	0.1	$< 1,000 \text{ mm}$	1.0
		$1,000 \text{ mm} \leq$	0.5
鋳鉄管	1.0	$< 400 \text{ mm}$	1.5
		$400 - 1,000 \text{ mm}$	0.3
		$1,000 \text{ mm} \leq$	0.15
ダクタイル鋳鉄管	0.25	$< 500 \text{ mm}$	1.3
		$500 - 1,000 \text{ mm}$	0.3
		$1,000 \text{ mm} \leq$	0.15
石綿セメント管	3.0	$< 100 \text{ mm}$	2.3
		$125 - 250 \text{ mm}$	0.9
		$300 \text{ mm} \leq$	0.4
塩化ビニル管	1.5	$< 100 \text{ mm}$	1.1
		$100 \text{ mm} \leq$	0.9

表 4-16 各地における管種係数

管種	宮城県	青森県・埼玉県	神奈川県	秋田県・長野県	広島県	新潟県*・宮崎県	仙台市	山口県	福井県
普通铸铁管	1.0								
ダクタイル铸铁管	0.2								0.3
鋼管	-			2.0			-		
溶接鋼管	0.1								
ネジ付鋼管	2.0	-	2.0	-					2.8
ステンレス鋼管	0.1	-							
鋼管ソケット管	-		0.8	-					0.8
鉛管	0.8	-			1.0*		-		
塩化ビニル管	1.5				1.0			0.8	1.2
石綿セメント管	4.0			2.0	1.0	4.0	1.3	2.8	
ポリエチレン管	-		0.1			-		0.2	
コンクリート管	-				1.0		-		
幹線	0.1	-							

\*新潟県:鉛管は設定されていない。

表 4-17 各地における管径係数

管径 (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100
宮城県	1.3	0.9	0.6	0.5	0.3						
長野県	1.33	-	0.67	-	0.50						0.33
神奈川県	1.3	0.8			0.4					0.2	
秋田県・広島県・ 仙台市	1.2	0.6		-	0.4					0.2	
青森県	1.2	0.6			0.4						0.2
埼玉県	1.2	0.6		-	0.4					-	0.2
新潟県	2.0	*	0.6	-	0.4					-	0.2
福井県	1.0	0.6		-	0.4					-	0.2
宮崎県	1.0			0.5		0.4				0.2	
山口県	1.0	0.8	0.6	-	0.4	-	0.3		-	0.1	
広島市	1.0	-	0.6	-	0.4	-	0.3		-	0.1	

\* 新潟県: 100~125mm の管径係数は、1.5。

また、「-」は、その管径での係数が設定されていないことを示す。



表 4-18 日本水道協会による管種係数と管径係数

管種	$C_p$	管径	$C_d$
溶接鋼管	0.3	500 mm 以上	0.5
ダクタイル鋳鉄管	0.3	200 - 450 mm	0.8
鋳鉄管	1.0	100 - 150 mm	1.0
塩化ビニル管	1.0	75 mm 以下	1.6
石綿セメント管	1.2		
ネジ付鋼管	2.0		
ポリエチレン管	0.1		
その他管種	1.0		
不明	1.0		

表 4-19 (財)水道技術研究センターによる管種係数と管径係数

管種	$C_p$	管径	$C_d$
ダクタイル鋳鉄管(A, K, T)*	0.3	75 mm	1.6
ダクタイル鋳鉄管(S, SII)*	0.0	100~150 mm	1.0
鋳鉄管	1.0	200~250 mm	0.9
溶接鋼管	0.3**	300~450 mm	0.7
塩化ビニル管	1.0	500~600 mm	0.5***
ネジ付鋼管	4.0**		
石綿セメント管	2.5**		

\*\*\*: 収集データ数が少ないため参考値として表記

\*: A, K, T, S, SII: 継手形状

\*\* : 収集データ数が少ないため参考値として表記

### [解説]

#### (1) 標準被害率

標準被害率の算定には、上記のように3種類の方法がある。

最近の知見では、パイプラインのような線状構造物に対しては、地表速度の方が地表加速度に比べて地震被害との相関が高いことが報告されている。また、SI 値が地震被害をよく説明できるとの報告も多くみられる。このように、将来的には、地表速度やSI 値を指標とした標準被害率の設定事例が増えてくるものとみられる。

しかし、地表加速度を用いた事例の方が多く、比較検討がしやすいのが現状である。

今回の調査では、地盤ハザードマップにおいて、地表加速度分布が得られていることから、地表加速度を指標とした標準被害率を採用した。

(2) 地盤・液状化係数

地盤・液状化係数については、さまざまな係数が採用されている。

本調査では、検証できる資料に乏しいことから、上表（地表加速度を標準被害率の指標としている）の中庸値を採用した。

(3) 管種係数・管径係数

管種係数・管径係数についても、地盤・液状化係数と同様に、さまざまな係数が採用されている。

本調査では、検証できる資料に乏しいことから、上表（地表加速度を標準被害率の指標としている）の中庸値を採用した。

4-3-2 下水道

下水道施設は、以下に示す各施設で構成されている（図 4-5 参照）。

- (1) 施設:各家庭や施設から排出される汚水や雨水を排水するための排水埋設管や開水路などの施設
- (2) 集水施設:排水埋設管からの排水を集水するための集水暗渠・マンホールや開渠、などの施設
- (3) ポンプ場:集められた汚水・雨水を、流下勾配を調整するためにポンプアップする施設
- (4) 浄水場:汚水・雨水を浄化し、河川や海に放流するための施設

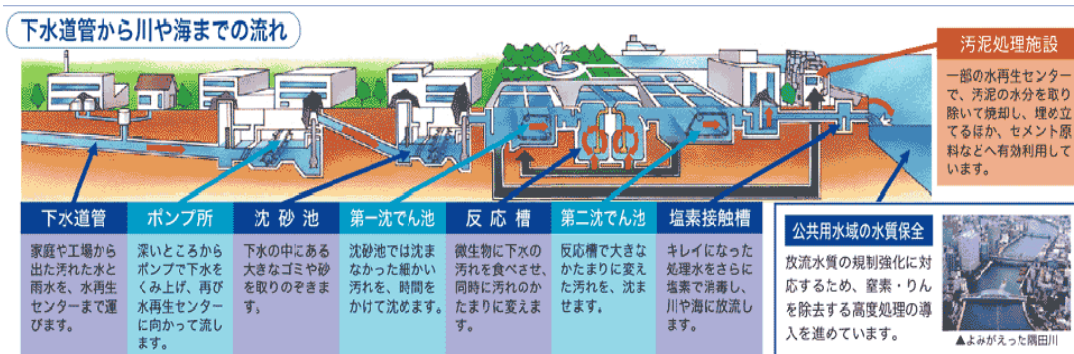


図 4-5 下水道システムの構成図

(資料:東京都下水道局, <http://www.gesui.metro.tokyo.jp/>)

これらの内、地震被害が多いのは、埋設管、およびマンホールである。一方、ポンプ場や浄水場は耐震設計が考慮されており、被災事例の報告も少ない。したがって、下水道施設の被害想定は、埋設管を対象とする。

下水道の普及は比較的近年になってからが顕著であるため、既往震災時の被災事例が少なく、上水道と同じ被害予測手法を採用するケースが多い。下水道埋設管の被害想定手法は、前節を参照されたい。

#### [解説]

上記のように、下水道施設の被害想定は、上水道と同様としているのが現状である。ただし、将来的には下水道を対象とした被害予測手法が確立されていくものとみられる。

なお、本調査では、大断面（直径1m以上）の暗渠の情報のみが入手されたため、上水道の被害予測手法を流用するより、定性的評価が有意義と判断した。

### 4-3-3 電気

電力供給施設は（図4-6参照）、以下に示す各施設で構成されている。

- (1) 発電所：電力を発電する施設（原子力発電所、火力発電所、水力発電所など）
- (2) 送電施設：発電所から送電するための高圧電線、鉄塔、暗渠、送電用変電所などの施設
- (3) 配電施設：消費者（家庭、工場など）に配電するための中圧・低圧電線、電柱、配電用変電所などの施設

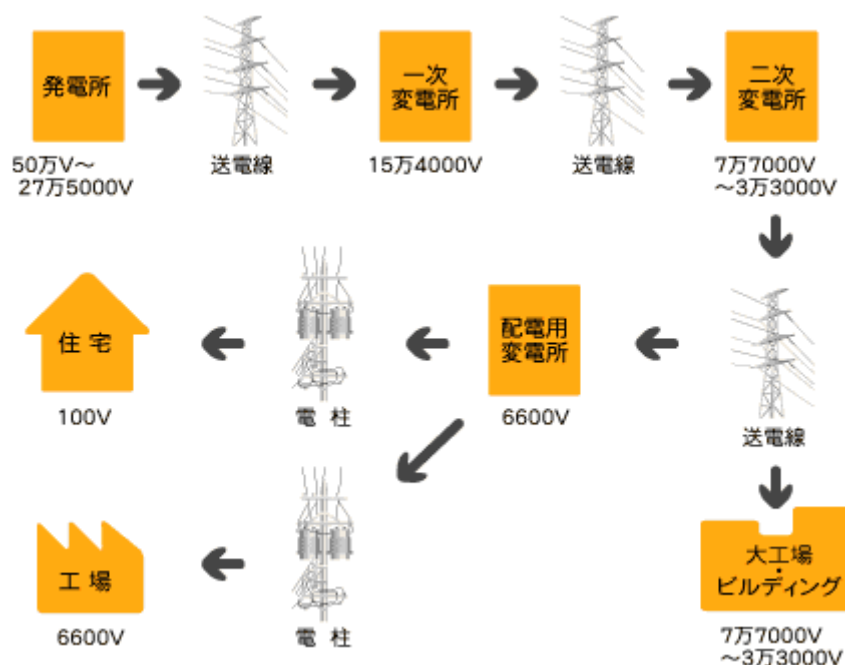


図4-6 電力供給システムの構成図

（資料：中部電力（株），<https://link.chuden.jp/>）

これらの内、地震被害が多いのは、中圧・低圧電線や電柱である。一方、発電所や送電施設、配電用変電所などは耐震設計が考慮されており、被災事例の報告も少ない。したがって、電力供給施設の被害想定は、電柱および中圧・低圧電線を対象とする。

被害予測は、一般に架空線と地下埋設線とに分けて実施される。被害量は、グリッドごとに架空線と地下埋設線の被害延長を求め、それらを足し合わせて求める。

以下、電柱、架空線、地下埋設線の順に被害予測手法を示す。

(1) 電柱

電柱の被害想定は、大きく分けて2種類の方法が採用されている。

(1-1) 標準被害率を基に計算式を用いた方法

この方法には、兵庫県南部地震の被災事例を考慮したものと、そうでないものがある。

1) 兵庫県南部地震以前の方法(1991)

$$N_h = C_{g1} * R(A) * N$$

$$R(A) = \begin{cases} 0 & (A < 150 \text{ gal}) \\ 0.0053A - 0.795 & (150 \leq A < 300 \text{ gal}) \\ 0.8 & (300 \text{ gal} \leq A) \end{cases}$$

- $N_h$  : 電柱の被害本数 (本)
- $C_{g1}$  : 地盤・液状化補正係数 (上水道と同様)
- $R(A)$  : 標準被害率 (%)
- $A$  : 地表最大加速度 (gal)
- $N$  : 電柱の本数 (本)

2) 兵庫県南部地震を考慮した方法 (1997)

$$N_d^P = C_1 * R / 100 * N + N_f * N$$

- $N_d^P$  : 電柱の被害量 (基)
- $C_1$  : 液状化条件による補正係数 (上水道と同様)
- $R$  : 標準被害率 (%)

自治体	JMA 震度階			
	5+ 以下	6-	6+	7
青森県	0.00	0.47		6.68
東京都 97	0.00	0.55		設定せず
札幌市	0.00	0.47	2.86	6.68
川崎市	0.00	0.47		設定せず

- $N$  : 電柱の設備量 (基)
- $N_f$  : 焼失率 (%)

## (1-2) 地震動と被害率のマトリックスを用いた方法

この方法には、地震動として地表最大加速度を用いたものと、震度を用いたものがある。

## 1) 地表最大加速度を用いた方法

この方法には、新潟地震と宮城県沖地震の被災事例に基づくものと、それらに兵庫県南部地震の事例を加えて被害率を設定したものとがある。

## 1-1) 新潟地震、宮城県沖地震に基づく方法（1986）

表 4-20 新潟地震、宮城県沖地震の被災事例に基づく電柱 100 基当たりの被害本数

電柱		PGA (gal)	神奈川県, 秋田県, 富山県, 福井県, 宮城県				
			≤150gal	151 – 300gal	301 – 400gal	401gal≤	液状化地域 P <sub>L</sub> ≥15
折損	コンクリート柱		0.00	0.00	0.01	0.03	0.9
	木柱		0.00	0.00	0.01	0.02	0.2
倒壊	コンクリート柱		0.00	0.00	0.03	0.10	3.4
	木柱		0.00	0.00	0.01	0.03	0.9

## 1-2) 新潟地震、宮城県沖地震、兵庫県南部地震に基づく方法（1998）

表 4-21 新潟地震、宮城県地震、兵庫県南部地震の被災事例に基づく電柱 100 基当たりの被害本数

電柱		PGA (gal)	埼玉県						
			≤150gal	151 – 300gal	301 – 400gal	401 – 600gal	601 – 800gal	801 gal≤	液状化地域: P <sub>L</sub> ≥15
電柱の折損・倒壊	コンクリート柱		0.0	0.0	0.04	0.13	1.0	3.2	4.3
	木柱		0.0	0.0	0.02	0.05	0.4	1.3	1.1

## 2) 震度を用いた方法

この方法には、日本海中部地震と兵庫県南部地震に基づくものと、兵庫県南部地震の被災事例に基づくものとがある。なお、それ以外に、延焼を考慮した方法も採用されているが、これは日本の住宅環境（木造家屋が多いこと）が強く反映されているため、ここでは割愛する。

2-1) 日本海中部地震、兵庫県南部地震に基づく方法

表 4-22 日本海中部地震，兵庫県南部地震の被害事例に基づく電柱の被害率

JMA 震度階	標準被害率	福岡県	
		液状化係数	被害率
5+ 以下	無被害	-	無被害
6 -	0.13 %	$0.98 + 0.014 P_L$	$0.13 + 0.0018 P_L$
6+ 以上	0.49 %	$0.99 + 0.006 P_L$	$0.49 + 0.0029 P_L$

2-2) 兵庫県南部地震に基づく方法

表 4-23 兵庫県南部地震の被害事例に基づく電柱の被害率

気象庁震度	栃木県	
	変圧器などの機器設置が	
	ある支持物	ない支持物
7	1.8 %	1.3 %

(2) 架空線

架空線の被害想定は、大きく分けて 2 種類の方法が採用されている。

(2-1) 電柱の被害想定結果を用いた方法

以下に自治体で採用された 4 例を示す。それぞれの計算式に違いはあるが、基本的には、電柱の被害数に電柱と電線の被害関係率を掛け合わせて、被害が求められている。

1) 東京都 91，宮城県，神奈川県，山梨県，静岡県

$$N_d^C = 0.5 [\text{条} \cdot \text{スパン} / \text{本}] * 1 [\text{m} / \text{条} \cdot \text{スパン}] * N_d^P$$

$N_d^C$  : 架空線被害延長 (km)

1 : 1 条・スパン当たりの平均延長 (係数)

$N_d^P$  : 電柱被害数 (本)

2) 東京都 97

$$n_d^C = a * N_d^P / L$$

$n_d^C$  : 架空線平均被害率 (箇所/km)

a : 支持物 1 本あたり架空線の被害径間,  $a = 0.396$  (兵庫県南部地震の被害事例に基づく)

$N_d^P$  : Damage number of pole (poles)

L : Cable length (km)

## 3) 札幌市

$$N_d^C = L * N_d^P / N + N_f * L$$

$N_d^C$  : 架空線被害延長 (km)

$L$  : 架空線延長 (km)

$N_d^P$  : 電柱被害本数 (本)

$N$  : 電柱の本数 (本)

$N_f$  : 建物の消失率 (%)

## 4) 川崎市

$$N_d^C = a * N_d^P * l$$

$N_d^C$  : 架空線被害延長 (km)

$a$  : 支持物 1 本あたり架空線の被害径間,  $a = 0.5$  (過去の地震被害事例に基づく)

$N_d^P$  : 支持物被害量 (本)

$l$  : 1 条・スパン当たりの延長 (km)

## (2-2) 地震動と被害率のマトリックスを用いた方法

この方法には、兵庫県南部地震の被災事例を考慮したものと、そうでないものがある。

## 1) 兵庫県南部地震以前の方法(1986)

表 4-24 架空配電線の被害率 (条・スパン/電柱 100 基当たり)

電柱	PGA (gal)	神奈川県, 秋田県, 福井県, 宮崎県				
		≤150gal	151 - 300gal	301 - 400gal	401gal≤	液状化地域 $P_L \geq 15$
コンクリート柱		0	0.01	0.32	1.2	11.0
木柱		0	0.002	0.05	0.18	2.6

## 2) 兵庫県南部地震を考慮した方法 (1997)

表 4-25 兵庫県南部地震の被害事例に基づく架空配電線の被害率 (条・スパン/電柱 100 基当たり)

電柱	PGA (gal)	埼玉県						
		≤150gal	151 - 300gal	301 - 400gal	401 - 600gal	601 - 800gal	801 gal≤	液状化地域 $P_L \geq 15$
電柱の折損・倒壊	コンクリート柱	0.0	0.01	0.32	1.20	8.5	27.0	11.0
	木柱	0.0	0.002	0.05	0.18	1.3	4.1	2.6

(3) 地下埋設線

この方法には、兵庫県南部地震の被災事例を考慮したものと、そうでないものがある。

(3-1) 兵庫県南部地震以前の方法(1991)

$$L_c = C_{gl} * R(A) * L$$

$$R(A) = \begin{cases} 0 & (A < 200 \text{ gal}) \\ 0.002A - 0.4 & (200 \leq A < 300 \text{ gal}) \\ 0.2 & (300 \text{ gal} \leq A) \end{cases}$$

- $L_c$  : 地下ケーブルの被害総延長 (km)
- $C_{gl}$  : 地盤・液状化補正係数 (上水道と同様)
- $R(A)$  : 標準被害率 (%)
- $A$  : 地表最大加速度 (gal)
- $L$  : 地下ケーブルの延長 (km)

(3-2) 兵庫県南部地震を考慮した方法 (1997)

この方法では、計算式は同じでも、異なる標準被害率が採用されている。

なお、後述する電話・通信施設における地下埋設線も、電力施設と同様の予測手法が採用されているケースが多い。ここでは、それらの標準被害率も併記する。

$$N_d = C_1 * R / 100 * L$$

- $N_d$  : 被害量 (km)
- $C_1$  : 液状化条件による補正係数 (上水道と同様)
- $L$  : 設備量 (km)
- $R$  : 標準被害率 (%)

気象庁震度	標準被害率 (%)		
	東京都 97	青森県*	札幌市*
5 以下	0.00	0.00	0.00
6 弱	0.30	0.30	0.30
6 強			2.00
7	- **	4.70	4.70

\*: 電話施設に対する値  
 \*\*: 設定無し

[解説]

電力施設における被害予測の対象には、低圧電線も含まれる。しかし、本調査では、下記の理由から低圧電線の被害予測を実施していない。



- 低圧電線の分布は非常に複雑で、データベース化ができなかった。
- その多くが建物に沿って分布している。
- 被害量は建物被害に相当するものと予測される。

以下、本調査で実施した計算のながれを示す。

#### (1) 電柱

電柱の被害予測には、電柱の分布（本数）を把握する必要がある。しかし、本調査では、その情報は得られなかった。

そこで、(1) - (1-1) - 2)の手法を用い、電柱の被害を被害率として取り扱った。なお、アルジェの建物状況から、延焼については考慮していない。

$$\begin{aligned}
 N_d^P &= C_1 * R / 100 * N + N_f * N \\
 &= C_1 * R / 100 * N + 0 \\
 &= x * N \text{ ----- } (x = C_1 * R / 100)
 \end{aligned}$$

このとき、標準被害率は、採用されている標準被害率のデータを包含するように設定した。

#### (2) 架空線

架空線の被害予測には、上記の電柱の被害率と(2) - (2-1) - 2)の手法を用い、電柱の数と架空線長の比は一定（電線の1スパン長はいずれも等しい）と仮定し、架空線の被害率を算定した。

$$\begin{aligned}
 n_d^C &= a * N_d^P / L \\
 &= a * x * (N / L) \\
 &= b (\%) \text{ ----- } (b = a * x, N / L = \text{const.})
 \end{aligned}$$

架空線の被害は、ここで求めた架空線の被害率を、グリッド内の架空線延長に乗じて求めた。

#### (3) 地下埋設線

地下埋設線の被害予測は、採用ケースが多い(3) - (3-2)の手法を採用した。このときの標準被害率は、採用されている標準被害率のデータを包含するように設定した。

### 4-3-4 ガス

ガス供給施設は（図 4-7 参照）、以下に示す各施設で構成されている。

- (1) ガス製造所：ガスの生成施設
- (2) 高压施設：ガス製造所から中継拠点までガスを送るための高压導管、整圧所などの施設
- (3) 中压施設：高压施設の整圧所にて圧を調整されたガスを貯蓄（ガスホルダー）したり、多方面に配送するための中压導管や整圧所などの施設
- (4) 低压施設：消費者（家庭、ビルなど）に配送するための低压導管、調節機などの施設

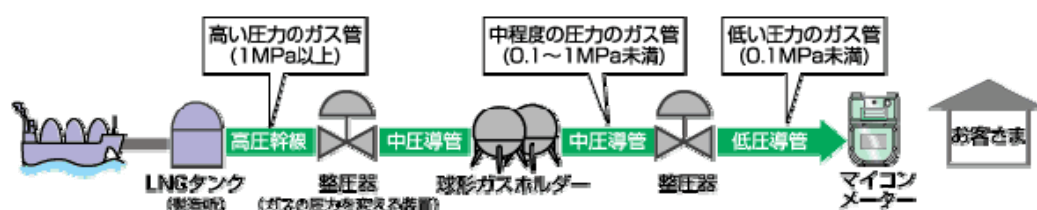


図 4-7 ガス供給システムの構成図

（資料：大阪ガス（株），<http://www.osakagas.co.jp>）

これらの内、地震被害が多いのは中圧・低圧導管や調節器（低圧部）である。一方、ガス製造所や高压施設、整圧所などは耐震設計が考慮されており、被災事例の報告も少ない。したがって、ガス供給施設の被害想定は、中圧・低圧導管を対象とする。なお、低圧部の調節機、および、引き込み低圧導管は建物に密接しているため、その被害は建物被害予測と同等と推定する。

被害量としては、上水道と同様に、管路延長に対する被害箇所数を求める。その予測手法は、過去の被災記録に基づく標準被害率を設定し、それに地盤、管種、管径の違いによる耐震性の特徴を加味した補正係数を適用するものである。以下に、基本式を記す。

$$R_{fm} = R_f * C_g * C_p * C_d$$

ここに、

- $R_{fm}$  : 被害率（箇所/km）
- $R_f$  : 標準被害率（箇所/km）
- $C_g$  : 地盤・液状化係数
- $C_p$  : 管種係数
- $C_d$  : 管径係数

標準被害率、および、各補正係数については、以下に示すように、種々の考え方が提案されている。各提案のうちどれを採用するかは、被害想定対象地域の現状、過去の地震災害の再現性などを総合的に判断して決定する必要がある。

## (1) 標準被害率

標準被害率については、3種類の考え方がある。

## (1-1) 地表最大加速度を指標とするもの

地表最大加速度を指標とした標準被害率は、久保・片山（1975）が、サンフェルナンド地震による地下埋設管被害を基に設定したものが使用されている。

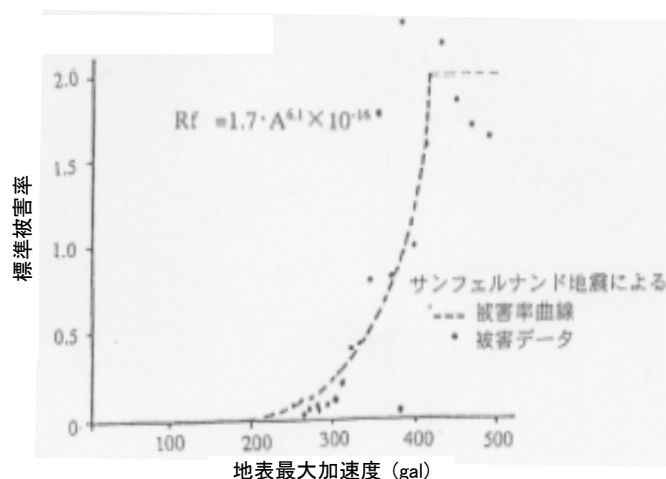


図 4-8 サンフェルナンド地震（1971）の被災状況に基づく  
地下埋設管に係る地表最大加速度と標準被害率の関係

標準被害率の算定には、下式を用いる。

$$R_f = 1.7 * A^{6.1} * 10^{-16} \text{ ----- (最大 } R_f = 2.0)$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

$A$  : 地表最大加速度 (gal)

## (1-2) 地表最大速度を指標とするもの

地表最大速度を指標とした標準被害率は、兵庫県南部地震によるガス導管の被災事例に基づいて設定されている。

$$R_f = 3.89 * 10^{-3} (V - 20)^{1.51}$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

$V$  : 地表最大速度 (cm/sec)

## (1-3) SI 値を指標とするもの

SI 値を指標とした標準被害率は、兵庫県南部地震によるガス導管の被災事例を基に設定されている。なお、この手法では、地方自治体によって2種類の式が採用されている。

1) 福岡県

$$R_f = 0.025 * SI - 0.76 \text{ ----- (最大 } R_f = 1.8)$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

SI : SI 値 (cm/sec)

2) 新潟県, 広島県, 広島市

$$R_f = 0.025 * SI - 0.5 \text{ ----- (最大 } R_f = 1.75)$$

$R_f$  : 標準被害率 (箇所/km)

SI : SI 値 (cm/sec)

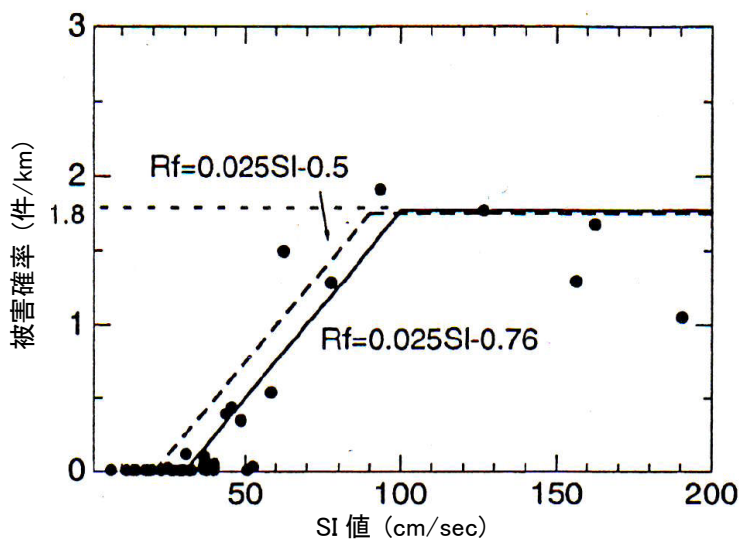


図 4-9 兵庫県南部地震による地表 SI 値と鋼管ネジ継手の被害率の関係

(資料: ガス地震対策検討委員会, 1996)

(2) 地盤・液状化係数

地盤・液状化係数は、多くの場合上水道と同じ係数を採用している。

(3) 管種係数、管径係数

管種・管径係数は、過去の被災履歴を分析することにより設定されている。自治体が採用した係数については、管種係数と管径係数の積として設定している事例 (表 4-26～表 4-27 参照) と、管種係数と管径係数を別個に設定している事例 (表 4-28～4-29) がある。

表 4-26 静岡県における管種係数と管径係数

管種	管種係数	管径係数	
		管径	係数
鋼管（ネジ）	5.0	< 100 mm	1.3
		100 mm ≤	0.75
鋼管（溶接）	0.1		1.0
鋳鉄管	1.0	< 400 mm	1.5
		400 - 1,000mm	0.3
		1,000 mm ≤	0.15
ダクタイル鋳鉄管	0.25	< 500 mm	1.3
		500 - 1,000mm	0.3
		1,000 mm ≤	0.15
石綿セメント管	3.0	< 100 mm	2.3
		125 - 250mm	0.9
		300 mm ≤	0.4
塩化ビニル管	1.5	< 100 mm	1.1
		100 mm ≤	0.9

表 4-27 三重県における管種・管径係数

		管径			
		75 mm	100 mm	150 mm	200 mm
管種	中圧管	0.03	0.03	0.03	0.03
	低圧本管	0.5	0.5	0.2	0.2
	低圧支管	1.0	1.0	1.0	1.0

表 4-28 各地における管種係数：中圧管

管種	宮城県	神奈川県	秋田県 埼玉県 長野県 宮崎県	福井県	新潟県	東京都 97 川崎市	広島県	福岡県
ネジ式鋼管	-		1.0	1.4	0.50	0.01	1.00	-
溶接鋼管		0.05			0.025	0.01	0.00	0.01
メカニカル鋼管	-		0.1	0.125	0.05	0.01	-	0.01
鋼管 SGM		-				0.01	0.055	-
メカニカル鋳鉄管	1.0		0.1		0.05	0.02	0.029	0.13
ガス型鋳鉄管		-				0.02	0.087	0.30
水道型鋳鉄管	-		0.5		0.25	0.02	-	0.30
ダクタイル鋳鉄管	-		0.1	-	0.05	0.02	-	
印ろう鋳鉄管		-				0.02	0.391	-
ポリエチレン管	-		0.05	0.1	0.00	-		
塩化ビニル管	-		0.75	-	0.375	-		
石綿管	-		2.0	-	1.00	-		
不明・その他	-	0.1	0.5	-	0.05	-		

表 4-29 各地における管種係数：低圧管

管種	宮城県	神奈川県	秋田県 埼玉県 長野県 宮崎県	仙台市	福井県
溶接鋼管	0.1				0.2
メカニカル鋼管	0.15	0.2			0.25
鋼管 SGM	-				
ネジ式鋼管	2.0			1.0	2.8
メカニカル鋳鉄管	0.2			-	0.3
水道型鋳鉄管	1.0			-	1.0
ダクタイル鋳鉄管	-	0.2			-
ポリエチレン管	0.1			0.01	0.2
塩化ビニル管	-	1.5	-		
石綿管	-	4.0	-		
ガス型鋳鉄管	-				
印ろう鋳鉄管	-			0.6	-
不明・その他	-	0.2 / 1.5 *	1.0	-	
管種	青森県	福岡県	東京都 97 川崎市	新潟県	広島県
溶接鋼管	0.1	0.12	0.02	0.05	0.00
メカニカル鋼管	-	0.07	0.02	0.10	-
鋼管 SGM	-				0.055
ネジ式鋼管	0.5	1.0			
メカニカル鋳鉄管	-	0.33	-	0.10	0.029
水道型鋳鉄管	1.0	0.74	-	0.50	-
ダクタイル鋳鉄管	0.2	-	0.05 / 0.02 **	0.10	-
ポリエチレン管	-	0.12	0.00		-
塩化ビニル管	1.5	3.2	0.70	0.75	-
石綿管	4.0	1.0	-	2.00	-
ガス型鋳鉄管	-	0.50	0.23	-	0.087
印ろう鋳鉄管	-		0.46	-	0.391
不明・その他	-			1.00	-

備考：\*：低圧本管 = 0.2, 低圧支管 = 1.5

\*\*：ガス型 = 0.05, メカニカル = 0.02

[解説]

ガス施設における被害予測の対象には低圧導管が含まれる。しかし、アルジェ内の低圧導管は、順次ソネルガスによって中圧導管に置き換えられているため、本調査では低圧導管の被害予測を実施していない。

また、低圧施設の調節機などは建物に密接しているため、その被害は建物被害予測と同等と予測される。

以下に、各設定項目の留意点を記す。

(1) 標準被害率

標準被害率の算定には、上記のように3種類の方法がある。

上水道と同様に、最近の知見では、パイプラインのような線状構造物に対しては、地表速度と地震被害の関係の方が地表加速度に比べて相関が高いことが報告されている。また、SI値が地震被害をよく説明できるとの報告も多くみられる。このように、将来的には地表速度やSI値を指標とした標準被害率の設定事例が増えてくるものとみられる。

しかし、地表加速度を用いた事例の方が多く、比較検討がしやすいのが現状である。

今回の調査では、地盤ハザードマップにおいて、地表最大加速度分布が得られていることから、地表加速度を指標とした標準被害率を採用した。

(2) 地盤・液状化係数

地盤・液状化係数については、上水道で採用した値を使用した。

(3) 管種係数・管径係数

管種係数・管径係数については、検証できる資料に乏しいことから、上水道と同様に上表(地表加速度を標準被害率の指標としている)の中庸値を採用した。

#### 4-3-5 電話

電話施設は、以下に示す各施設で構成されている。

- (1) 通信局：電話の接続を行う施設（電話交換局、中継交換局、無線基地局、光ファイバーなど）
- (2) 電話線・支持物：交換局と契約者（家庭、事務所など）を結ぶ施設（電柱、架空線、地下埋設線など）

これらの内、地震被害が多いのは電話線や電柱である。一方、通信施設は、耐震設計が考慮されており、被災事例の報告も少ない。したがって、電話施設の被害想定は、電力施設と同様に電柱と電話線（架空線、地下埋設線）が対象となる。

被害予測手法についても、電力施設と同じ手法（4-3-3参照）を用いるのが一般的である。

[解説]

近年、携帯電話やインターネットの急速な普及により、従前とは違った地震被害（携帯電話用アンテナの倒壊など）が生じている。また、情報通信分野の発達は、震災時の救急・救助に大いに役立つ反面、輻輳などにより混乱をいっそう深める要因にもなり得る。これらのことから、耐震性能の向上への取り組みに併せ、被害予測手法の改良・開発も必要となっている。



## 5. 被害の算定

4章で解説した被害関数を用いて被害を算定するためには、被害関数に対応した地震動（震度、加速度など）の分布と建築物やライフライン（水道、下水道、電力線など）の分布が必要である。例えば、アルジェでは建築物は構造種別と建築基準によって8種類に分類されたが、この場合は250mメッシュごとに8種類の分類ごとの建築物棟数が必要である。

現況の分布数量に被害関数を乗じることによって250mメッシュごとの被害が算定される。メッシュごとに算定された被害数は、しばしば行政単位で集計される。