

## 第Ⅱ編 液状化ハザードマップ作成のための3次元地盤構造モデルの作成

### 1. 3次元地盤構造モデルの作成手法

地盤構造モデルの作成方法においては、一般的に、ボーリング柱状図、室内土質試験結果、PS検層が利用される。さらに、既存資料による地質断面図や地層基底面コンター\*等を参考に地層境界面を設定し、近傍のボーリング柱状図に記載されている土質名やN値を用いてモデル化されることが多い。このように作成される地盤構造モデルでは、地層の連続性や土質種別の精度が比較的低下することが欠点として挙げられる。

インフラ施設の液状化リスク評価のための3次元地盤構造モデルにおいては、そうした地層の連続性や土質種別の精度を上げる必要がある。そこで、本ガイドライン（案）では、3次元地盤モデル作成の手引き<sup>12</sup>でも採用されている補間方法により、3次元地盤構造モデルを作成するものとする。図2に液状化ハザードマップ作成を考慮した3次元地盤構造モデル作成ワークフローを示す。このワークフローでは、地盤モデル作成工程において、3次元で地層の連続性や液状化層を把握し、液状化評価のための物性値データを作成することで、工学的な評価は可能となり液状化ハザードマップの作成につながる。

#### ① 地盤情報の収集

調査地の地形情報や地盤情報を把握することを目的に、既往土質調査資料および地盤情報を収集する。地盤情報が少ない範囲や人工改変地等では追加調査を実施する。

#### ② 3次元地質解析

収集および追加調査により得られたボーリング柱状図や物理探査データといった地盤情報を基に地質の対比やデータクロスチェックを行い、空間補間により3次元地質構造モデルを作成する。

#### ③ 3次元物性構造解析

3次元地質構造モデルに対し、収集および追加調査により得られたN値や室内土質試験結果等の地盤の物理特性を付与し、3次元地盤構造モデルを作成する。

---

\* 地層基底面コンター：完新統や更新統（実務では、それぞれ沖積層、洪積層と呼ばれることが多い）といった地層の下面における等高線のこと。文献によっては基底面（下面）ではなく、上面の場合もある。

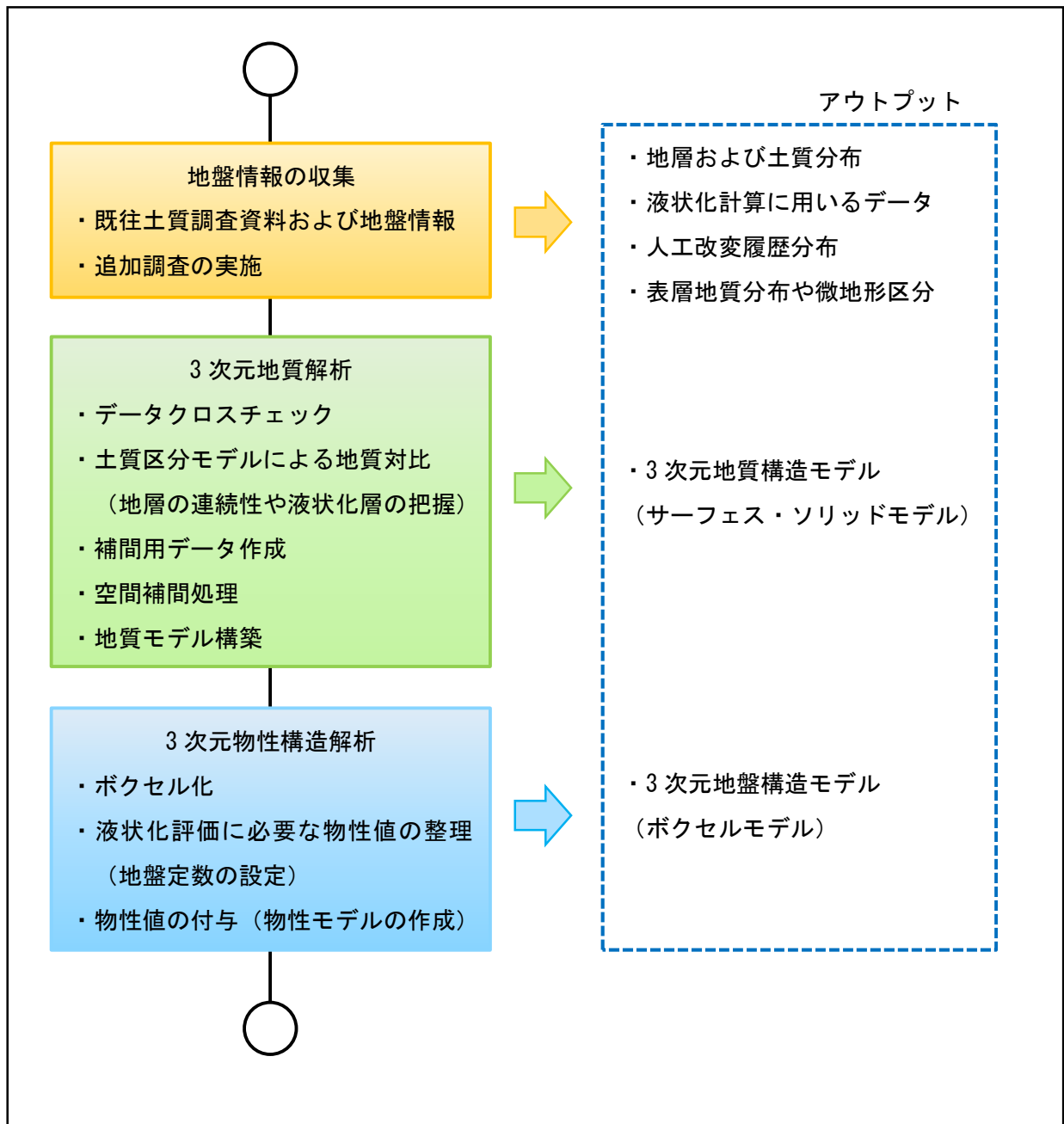


図 2 液状化ハザードマップ作成を考慮した3次元地盤構造モデル作成ワークフロー

## 2. モデル作成に必要な地盤情報と収集方法

既存の土質調査資料を収集し、調査範囲に対してどの程度の地盤情報（量や精度）があり、どのような情報が不足しているのか整理し、把握しておく必要がある。

既往の土質調査および地盤資料は、以下のものを収集し整理する。

- ・ボーリング柱状図、PS 検層  
（公開データ（kunijiban<sup>13</sup>、全国電子地盤図<sup>14</sup>など）、提供データ（自治体））
- ・室内土質試験結果
- ・既往の地質断面図
- ・表層地質図や地形分類図
- ・人工改変履歴

収集した地盤情報より、以下のものを整理する。

- ・土質分布（砂質土、粘性土、礫質土 etc・・・）、N 値
- ・地盤の物理特性（密度、S 波速度、細粒分含有率、平均粒径）、動的特性（動的変形特性）
- ・地下水位
- ・地形、地質

さらに、既往の地盤構造モデルに関連する情報として、下記のデータを利用することができる。

- ・浅部・深部統合地盤構造モデル（J-SHIS<sup>15</sup>）
- ・南海トラフ、首都直下モデル（内閣府<sup>16</sup>）
- ・地震被害想定調査モデル（都道府県、区市町村）
- ・その他の地盤構造モデル

収集整理した既存資料より、作成するメッシュサイズに応じて微地形区分を設定する。なお、250m メッシュでは J-SHIS にて全国で整備されており、50m メッシュで評価する場合にはそれらを参考に、収集した地形分類図を用いて評価する。また、人工改変履歴があった場合には、その範囲で液状化被害の影響が大きいと考えられるため、改変範囲を把握する必要がある。収集資料より改変範囲を把握できることが望ましいが、不明確な場合は追加調査の実施を検討する。

地盤構造モデルの作成に必要な地盤情報が不足する場合は、追加の土質調査を計画し、調査内容および調査位置を選定する必要がある。都市部等においても 50m メッシュといった比較的高解像度で地盤構造モデルを作成するにあたっては、ボーリング柱状図だけではデータが少ない場合がある。また、ボーリング密度が高くても土質および N 値といった地盤情報のみであるため、液状化評価で重要な各土質の粒度構成を把握するには情報が不十分であることが多い。そこで、3次元地盤構造モデルを作成する範囲の中で、微地形が変化しているなど、補足すべきと考えられる情報を追加の土質調査により得ることが必要となる。

地盤のモデル化において、液状化評価は地表から 20m までを評価対象とすることが一般的であるため、目的に応じて必要な深度までモデル化すればよい。なお、工学的基盤までをモデル化するには、PS 検層や微動探査より調査地における工学的基盤面を設定する必要がある。工学的基盤は、これら調査結果の他、極小微動アレイ調査データの結果<sup>17</sup>等の利用より推定可能である。

### 3. 地盤情報を得るための追加調査

収集した既存の土質調査資料および地盤情報の中で、調査対象範囲において詳細情報や不足情報の把握が必要な場合、追加調査を計画することが望ましいが、対象全範囲で理想的な地盤情報量を満足することは現状において難しい。従って、河川地形の成り立ちや既往の地質断面図等から液状化対象層の分布をイメージし、既往地盤調査の量や分布を踏まえて、予算・時間を考慮した追加調査計画をバランスよく立案することが重要となる。追加調査としては、以下が例として挙げられ、把握したい地盤情報によりそれぞれ選定する必要がある。

- 1) ボーリング調査 (PS 検層、標準貫入試験、室内土質試験)
- 2) PDC 調査
- 3) 物理探査 (微動探査および表面波探査)

- 1) ボーリング調査では、オールコアボーリングに合わせて、標準貫入試験、PS 検層、および室内土質試験 (物理試験、動的変形試験) 等を実施することによって、詳細な地盤情報を得ることができる。
- 2) PDC (ピエゾドライブコーンの略称) 調査では、深度 20m までの N 値、細粒分含有率、地下水位等を、安価に取得することができる。調査に必要な専有面積が小さく、1 日程度で調査が終了することから、都市部においても公園の空きスペースなどを利用して実施することができる。既往ボーリングにおける孔内水位では情報が不十分である場合には、地下水位面の位置を把握する目的でも適用できる。
- 3) 物理探査では、S 波速度構造を求める手法として、微動探査および表面波探査が挙げられる。なお、各物理探査は手法や機器設置間隔によって探査対象深度が異なるため、適用対象に応じて選定する必要がある。微動探査は、一般的に基盤深度の把握では 1 次元微動探査を多数実施することが多いが、近年、安価な計測機器が開発され、多点を同時に計測しその位相差などから 2 次元、3 次元的な構造分布が連続して把握できるようになっている。

#### a) 1 次元微動探査

地盤振動を利用する受動的探査法である。最小アレイ半径 5m 程度、最大アレイ半径は探査深度の 1/3 程度で、三角形を重ねたアレイ、T 字アレイ、L 字アレイによって、鉛直方向の 1 次元 S 波速度構造を求めることができる。

#### b) 2 次元表面波探査

かけや打撃による振動を起振源として利用する探査法である。表面波探査は、受振器 24～48 チャンネルを使用し、受振点間隔 1m、起振点間隔 2m が一般的である。ノイズ条件および起振条件が良ければ深度 20m 程度までの S 波速度断面を得ることが可能である。

#### c) 2 次元、3 次元微動探査

地盤振動を利用する受動的探査法である。2 次元、3 次元微動探査は、受振点間隔 5～10m

程度で 20 分～30 分間程度以上の微動観測を行う。同時観測した 50 個程度の受振波形相互の相関性を解析すること（空間自己相関法：SPAC 法）により、深度 50m 程度までの地盤の S 波速度構造を求めることができる。

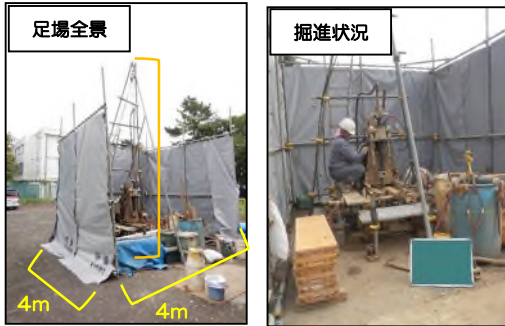
表 2 に物理探査の利活用例一覧表を示す。これらの手法の中で、微動探査は、雑振動を信号源とするため都市部での適用性が高い。3 次元微動探査は、地盤改良や掘削による人工改変等が行われた範囲を特定し、詳細な 3 次元 S 波速度構造を求めることに適している。2 次元微動探査は、深さ 50m 程度までの工学的基盤面の連続性をモデル化する際に適用される。1 次元微動探査は、基盤まで達する既往ボーリングが少ない場合のボーリングを補完してモデル化を行う際に適用される。2 次元表面波探査は、氾濫原堆積物などの液状化対象層の詳細な分布形状等を微地形区分と対比させてモデル化する際に適用される。

図 3 に追加調査内容の概要図を示す。

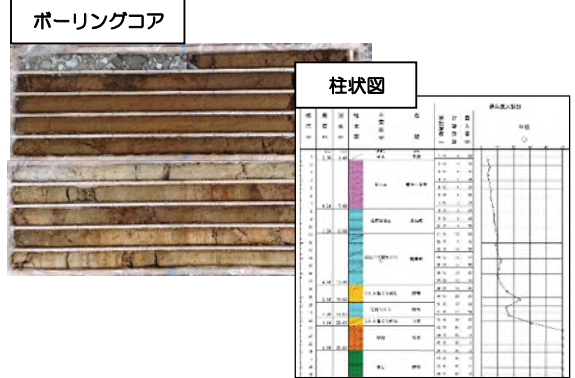
表 2 物理探査の利活用例一覧表

物理探査手法	対象深度	成果	対象	成果の利用	適用対象
1 次元 微動探査	地表 ~120m	1 次元 S 波速度構造	土層対比 S 波速度の鉛直分布	PS 検層の補完 土層毎の S 波速度 工学的基盤の広域分布	<ul style="list-style-type: none"> <li>旧河道が発達し、基盤深度が深い</li> <li>既往文献で基盤構造が不足</li> <li>広域を対象とした工学的基盤の分布</li> </ul>
2 次元 表面波探査	地表 ~10m	2 次元 S 波速度断面	液状化層対比 浅部土層対比 S 波速度構造	PDC・ボーリングとの対比 による浅部土層の連続性 土層毎の S 波速度 液状化層の分布構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>液状化対象となる微地形が分布し、既往ボーリング情報が不足</li> <li>砂丘堆積物、自然堤防が分布し、既往ボーリング情報が不足</li> </ul>
2 次元 微動探査	地表 ~50m	2 次元 S 波速度断面	土層対比 S 波速度構造	ボーリングとの対比による 土層の連続性 土層毎の S 波速度	<ul style="list-style-type: none"> <li>基盤の凹凸が大きく既往ボーリング資料が不足</li> <li>内陸断層など地盤構造の急変点が存在</li> </ul>
3 次元 微動探査	地表 ~50m	3 次元 S 波速度構造	土層対比 S 波速度構造 3 次元地盤構造対比	詳細な 3 次元構造による モデル化 土層毎の S 波速度	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工改変地が広く分布</li> <li>過去に被害集中地域が存在</li> <li>過去に砂利採取などの人工改変が行われた範囲の特定</li> <li>重要構造物等の詳細調査対象</li> </ul>

ボーリング調査



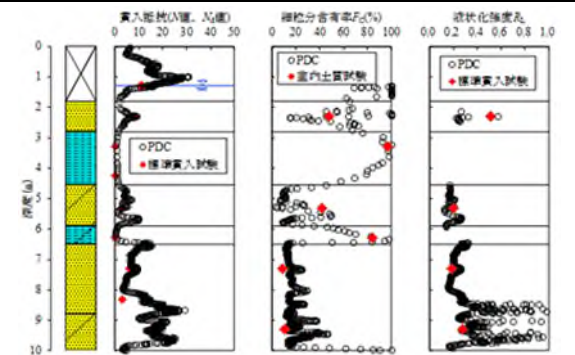
※占有面積は約 16m<sup>2</sup> 程度



液状化ポテンシャルサウンディング (PDC)

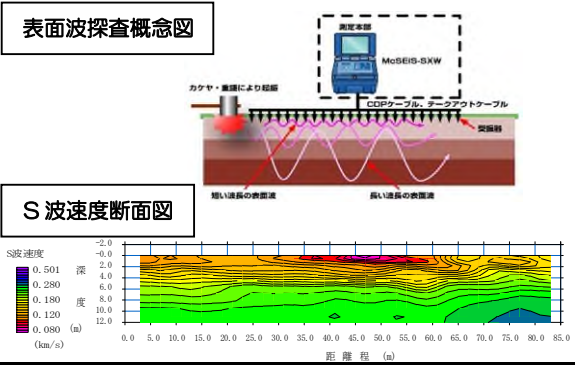
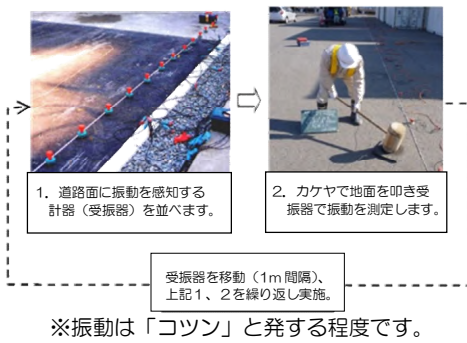


PDC 配置状況 (2m×3m)  
 ※一般的なボーリング調査の占有面積が約 16m<sup>2</sup>、  
 ※占有面積は 6m<sup>2</sup>



PDC による調査事例

2次元 表面波探査



3次元 微動探査

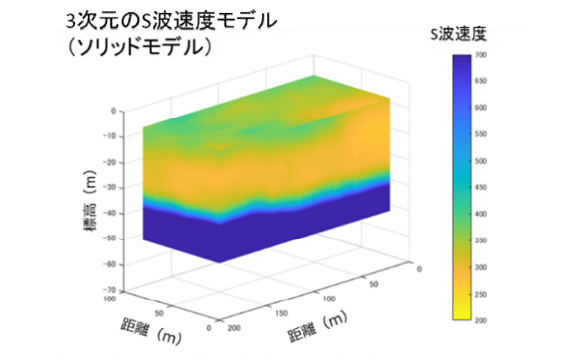
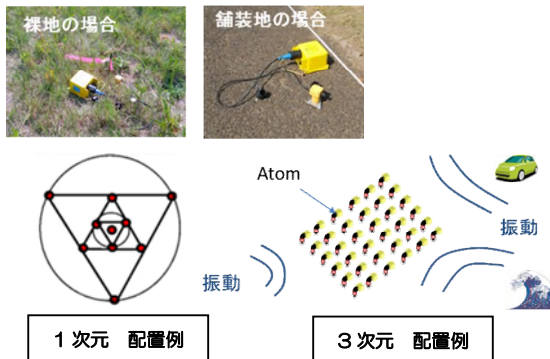


図 3 追加調査の概要図

## 4. 3次元地盤構造モデルの空間補間方法

これまでの地盤モデル作成方法では、既往文献による地質断面図や地層基底面コンター等を参考に地層境界面を設定し、収集したボーリング柱状図の土質区分を用いて2次元的に地盤がモデル化されることが多い(図4)。このように作成される地盤モデルでは、地盤情報のない範囲での地層の連続性や土質種別の精度が比較的低くなるため、本ガイドライン(案)における3次元地盤構造モデルの作成では、①3次元地質解析と②3次元物性構造解析の2つのステップで行うものとした。3次元地質解析では液状化対象層の区分に必要な地層および土層のモデル化、3次元物性構造解析では液状化評価に必要な地盤の物理特性をモデル化するものである。

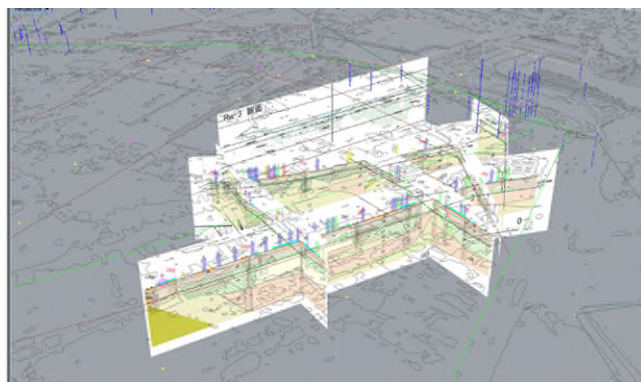


図4 地質断面図を用いた地盤モデル作成例  
(橋本ら(2015)<sup>18</sup>の断面図を利用)

### 4.1. 3次元地質解析の概要

3次元地層モデルの空間補間方法の手順を示す。完新統や更新統といった大きな地質単位に対する境界モデルとして、完新統底面、更新統底面、新第三系上面、先第三系上面等の工学的基盤(S波速度300m/s以上(道路橋示方書<sup>19</sup>))上面以浅のサーフェスモデルおよび地層ソリッドモデル(図5参照)を作成することを目的として、3次元地質解析を実施する。検討手順の概要は図6の通りである。

- 1) データクロスチェック
- 2) 地質対比
- 3) 補間用データ作成
- 4) 空間補間処理
- 5) 地質モデル構築



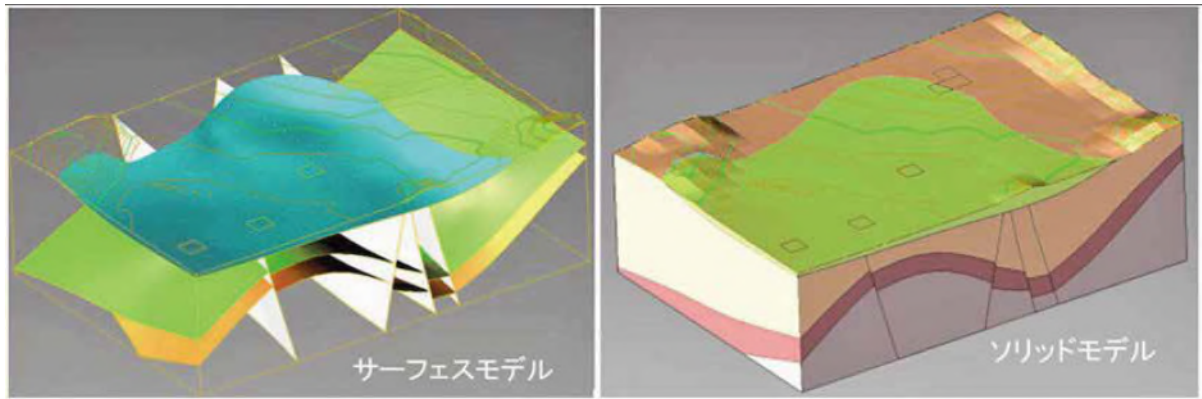
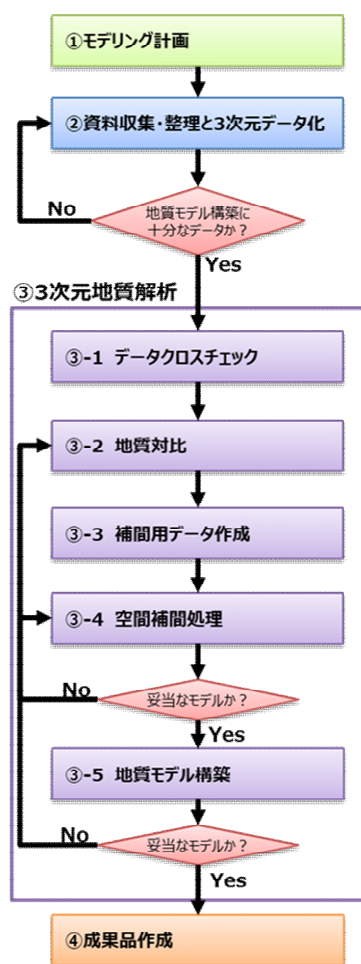


図 5 サーフェスモデルおよび地層ソリッドモデルの例  
(3次元地盤モデル作成の手引きより)



#### ①モデリング計画

事業の求める目的や用途に基づき、3次元地質モデルの対象と範囲、サーフェス・ソリッド等の種類・解像度・空間補間アルゴリズム等を検討し、3次元地質モデルの構築方法を組み立てる。

#### ②資料収集・整理と3次元データ化

モデル構築に必要な資料を収集・分類・整理し、座標情報を与えて3次元データ化する。十分なデータが揃えば、③3次元地質解析に移る。

#### ③3次元地質解析

##### ③-1 データクロスチェック

データの3次元的なクロスチェックを行い不適合を抽出し、抽出した不適合を修正するか棄却する。修正及び棄却の記録を残す。

##### ③-2 地質対比

3次元空間における地層の対比作業をおこなう。地質構造の情報が不十分な場合は、地質形成史や地質構造学等を考慮した補填データを追加する。

##### ③-3 補間用データ作成

地質対比データより、サーフェスモデル等の計算に用いる座標データセットを抽出する。

##### ③-4 空間補間処理

空間補間アルゴリズムを適用し、3次元地質モデルを作成する。作成した3次元モデルの形状が地質学的に妥当なものかチェックする。

##### ③-5 地質モデル構築

地質層序判定に基づき3次元地質モデルを作成する。必要に応じて地層ソリッドモデルやボクセルモデルを作成する。最終的に3次元地質モデルの形状が地質学的に妥当なものかチェックする。

#### ④成果品作成

構築した3次元地質モデルを用いて、地質断面・平面図等の図面出力や、データ交換用の3次元モデル作成、3次元可視化資料の作成、シミュレーション等に用いる二次利用データ出力等を行う。

図 6 地層ソリッドモデルを構築する基本的なワークフロー

## (1) データクロスチェック

収集した地質データや物理探査結果データを重ね合わせる際に、様々な誤差要因により3次元化した際に境界線などがずれてしまいサーフェスに段差や歪が生じた場合には、その不適合を修正する必要がある。

収集した地質データ（地質断面図等）や物理探査結果データ（2次元S波速度構造分布等）を重ね合わせる際に、データ精度をはじめとした様々な誤差要因により3次元化した際に境界線などがずれてしまいサーフェスに段差や歪が生じる場合がある。そのような場合、2次元データの交点、2次元データと1次元データの交点、1次元データの相互関係についてクロスチェックを行い、抽出した不適合については交点の修正または棄却する。棄却する例としては、例えばいくつかのデータがある中で、1次元データのみ他のデータと乖離がある場合は、そのデータは適当でないものと判断し、作成データとしては利用しない。

上記のように、不適合を修正または棄却した場合には、トレーサビリティのために記録を残す必要がある。

トレーサビリティの考え方は第Ⅱ編5章に示す。

## (2) 地質対比

地質モデルを作成するために、地質調査データの同じ条件（同一時代、同じ地質種・地質体、類似物性値等）の境界を判別し、境界データとしてグルーピングを行う必要がある。

地質対比は、地質調査の進展で変わる場合は、地質層序やグルーピングの考え方もそれに合わせて修正する。また、同じカテゴリ・グループの地質境界面でも、異なる地質境界面の集合体となる場合があり、地質対比もプロセスに従い修正する。液状化評価においては、一つの評価法として完新統や更新統（実務では、それぞれ沖積層、洪積層と呼ばれることが多い）の区分により液状化対象層を決定する方法があるが、更新統でも N 値の小さい砂層が存在する等、液状化発生条件を満たす場合は、工学的判断により液状化対象層として考える必要がある。

ボーリング柱状図に示される土質・岩種分類は、様々な調査目的や古い年代のデータを扱うため、一般に統一化してモデル化に利用する。本ガイドライン（案）においては、図 7 に示す土質区分との対応表を作成し 8 種に統一化したものを基本とした。収集したボーリング柱状図に座標情報を与え、8 種に統一化した土質区分をもとに 3 次元化したモデルデータ（土質区分モデル）を作成する。

なお、土質区分は、液状化リスク評価に与える影響が大きいことから、精度向上のためにも正確に把握し、同じ土質区分でも粒度構成や N 値が異なる場合には可能な限り細分化することが望ましい。特に、表層の「表土・人工土」については、盛土材料によって様々であるため、使用されている材料を把握し「表土・人工土」における土質区分を設定することが重要である。最近のボーリング柱状図では、盛土材料の土質が明記されていることが多い。土質区分の設定にはそれらを参考にするほか、必要であれば追加調査により盛土材料を把握することが望ましい。

### 既存ボーリングにおける土質区分



### 土質区分モデル

土質区分	Code	土質区分例
表土・人工土	10	埋土、盛土、表土、人工土等
ローム	20	ローム、シラス、火山灰等
腐植土	30	腐植土、泥炭、有機質土等
粘性土	40	粘土、粘性土、泥、シルト等
砂質粘性土	50	砂質粘土、泥砂互層等
砂質土	60	砂、細砂、粗砂、シルト質砂等
砂礫	70	礫、砂混じり礫、玉石、崖錐等
岩盤	80	花崗岩、土丹、軟岩等

図 7 土質・岩種区分の統一化

### (3) 補間用データ作成

土質区分モデルや地質対比データよりサーフェスモデルを作成するために、補間用データを作成する。

ボーリングなどの地質境界のデータを補間して、サーフェスモデルを作成する際のデータとして、補間計算用のデータを作成する。補間用のデータ作成における留意点としては、例えば隣接するデータ間で大きな乖離がないか確認することが重要である。乖離がある場合は、元の入力データよりその妥当性を精査する必要がある。

#### (4) 空間補間処理

補間用データを用いて、空間補間処理を行い、サーフェスモデルを作成する。

サーフェスモデル作成のための補間アルゴリズムとしては、逆距離加重法、三角補間法、クリギング、最適化原理、NURBSなどが用いられており、3次元地質モデル作成に用いる補間アルゴリズムとパラメータの違いは、モデルの形状に影響を与える。表現したい地質境界面の特徴を表現できる方法を選択することが重要である。

土質区分の空間補間には、逆距離加重法を例(図8)に示す。これは、各測定点による重み(求めたい点から各測定点までの距離の逆数と任意の乗数から算出)を計算し、測定点の土質区分モデル毎にそれらを足し合わせる。この値を、求める点に対する土質区分モデル毎の影響度合いを示すものと仮定する(全体を1としたときの割合を計算する)。この値が最も大きいものを、求める点での土質区分モデルとする。

IDW(Inverse Distance Weighted) : 逆距離加重法  
求める点の近傍の測定点を抽出し、距離の逆数に応じた重みをかけて補間する。

$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} f_i$$

$F$  : 求める点の値 (補間値)  
 $w_i$  : 測定点の重み  
 $f_i$  : 測定点の値  
 $h_i$  : 測定点と求める点との間の距離  
 $p$  : 距離の乗数

図8 逆距離加重法 (IDW) の計算手法

## (5) 地質モデル構築

地質層序判定※に基づき、地層ソリッドモデルに属性（地質年代）を与え、3次元地質モデルを作成する。

3次元地質モデルの妥当性評価として、収集した地質文献等に基づき把握した地質層序により地形形成過程や地層累重の法則等の自然法則に則ることを確認する。併せて、入力データとモデルの誤差について、複数の断面によって確認する。誤差が大きく、地質構造の情報が不十分な場合は、断面図等より推定できる補間用データを追加し、モデルを再作成する。最終段階として、調査範囲において地層の逆転がないか等の地質学的/地質工学的判定を行い、調査範囲外等の地層境界面における不要部分のトリミングを行う。

地質モデルは、地質調査成果である地表地質踏査、ボーリングや物理探査等の地盤情報を用い、地質学的解釈により地質境界の空間連続性を推定して作成されるべきものである。大きな地質単元（沖積層・洪積層のような部層・累層単位）は、土質や物性値の変化により客観的な地質対比を行うことにより、モデル化が可能である。

一方、部層・累層内の細かい土質区分（粘性土・砂質土・礫質土等）は、碎屑物の供給源となる後背地の地質や、堆積環境により分布・性状が左右され複雑な構造となり易い。このような細かい土層変化は、地質対比の決め手となる鍵層がなければ、モデル作成に主観の入り込む余地が大きくなってしまうため、より客観的な手法を採用することが望ましい。本ガイドライン（案）における3次元地質モデルは、地震応答解析結果を用いた液状化評価が可能となるように、地表から工学的基盤までを対象とした。なお、作成する地質単元境界は、調査地の地質状況や対象とする地震外力に応じて変更してもよい。

### 【大きな地質単元境界のサーフェスモデル：3次元地質モデル】

完新統底面、更新統底面、新第三系上面、先第三系上面（工学的基盤標高モデル）

---

\* 地質層序判定：柱状図の土層区分に対して、完新統や更新統（実務では、それぞれ沖積層、洪積層と呼ばれることが多い）といった地質年代を判定すること。

## 4.2. 3次元物性構造解析の概要

3次元地質モデルに対し、作成するメッシュごとに土質区分およびN値を与え、ボクセルモデル（図9参照）を作成する。なお、土質区分については、3次元地質モデル作成時において8区分に統一した土質区分を利用するものを基本とする。また、N値については、ボーリング柱状図に記載されているN値をそのまま利用できる。作成したボクセルモデルに対し、液状化評価に必要な地盤の物理特性（密度、S波速度、細粒分含有率、平均粒径）、動的特性（動的変形特性）および地下水位を設定する。物性値は、地質・地形および土質区分ごとに設定することが望ましい。地盤の物理特性や動的特性については、S波速度はPS検層および物理探査結果、その他は室内土質試験結果より得られるものである。したがって、それぞれの物性データが各地質・土質区分に対してどの程度存在するか収集・整理することが重要である。

3次元物性モデルの空間補間方法の手順は以下の通りであり、次頁以降にその詳細を示す。

- 1) ボクセル化
- 2) 液状化評価に必要な物性値の整理（地盤定数の設定）
- 3) 物性値の付与（物性モデルの作成）

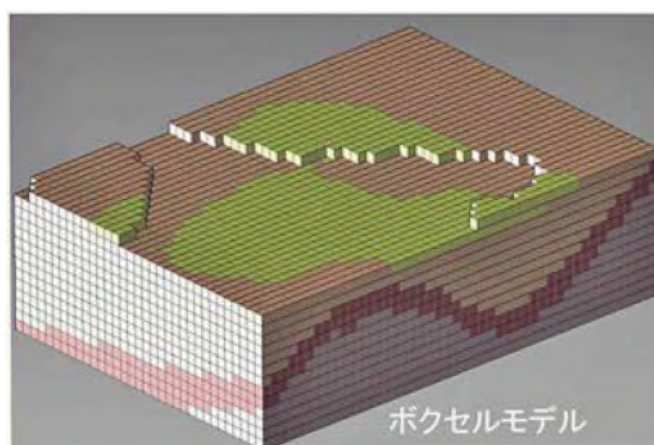


図9 ボクセルモデルの例  
(3次元地盤モデル作成の手引きより)



## (1) ボクセル化

3次元地質解析より得られたソリッドモデルおよびサーフェスモデルから作成するメッシュ解像度に応じてボクセル化する。

ボクセル化したモデルにおいて、土質区分モデルから土質区分および N 値を与える。その際には、既往のボーリング情報に加えて、微地形区分判読、追加ボーリング、物理探査および PDC 等による調査によって詳細な地盤構造を評価し、ボクセルモデルの物性境界面として反映させることが望ましい。

土質区分や N 値の空間補間には、逆距離加重法を適用することが考えられるが、物性境界については、2次元3次元の物理探査等によって、地形区分に代表されるような物性境界を詳細に把握することが可能であるため、それらを土質区分モデルに反映させることができる。

## (2) 液状化評価に必要な物性値の整理（地盤定数の設定）

土質区分や N 値と関連付けて、液状化評価に必要な地盤物性パラメータおよび地下水位をボクセルモデルに対応付けするためのデータを作成する。

液状化判定に必要な地盤物性パラメータとして、地層区分毎の土質区分に対して、湿潤密度、S 波速度、細粒分含有率 (Fc)、平均粒径 ( $D_{50}$ )、動的変形特性、地下水位についてモデルパラメータを設定する必要がある。作成した物性モデル用データより、各地質・地形区分および土質区分に対してどの程度のデータ密度であるか分布状況を把握し、地質・地形区分および土質区分ごとに物性値の設定が可能かどうか検討を行う必要がある。

湿潤密度は、土の湿潤密度試験結果より得られる試験値の平均値から求めることを基本とするが、一般値（例えば、道路橋示方書）を用いる場合がある。

S 波速度は、PS 検層および物理探査結果より得られた試験値から求めることを基本とするが、既往の N 値からの換算式（例えば、道路橋示方書）や調査地で得られた試験値の S 波速度と N 値の関係式による方法または J-SHIS の AVS30 を用いる場合がある。

細粒分含有率 (Fc) は、土の粒度試験結果より得られる試験値の平均値から求めることを基本とするが、一般値（例えば、道路橋示方書）を用いる場合がある。

平均粒径 ( $D_{50}$ ) は、土の粒度試験結果より得られる試験値の平均値から求めることを基本とするが、一般値（例えば、道路橋示方書）を用いる場合がある。

動的変形特性については、地盤材料の変形特性を求めるための繰り返し三軸試験結果より得られた試験値によって代表値を求めることを基本とするが、土研式 (1982)<sup>20</sup>によって求める場合がある。なお、用いる解析コードによっては、試験値をそのまま利用できるが、利用できない場合は数式モデル (H-D モデルや R-O モデル等) としてモデル化する必要がある。

地下水位については、既往ボーリング柱状図に記載されている孔内水位を用いて地下水位分布図を作成し、ボクセルモデルに反映することを基本とする。地下水位は液状化判定結果に大きく影響するため、第 II 編 5 章で詳述するとおり留意が必要である。

### (3) 物性値の付与（物性モデルの作成）

作成したボクセルモデルに対して、整理した地盤定数を設定する。付与方法については、整理した各地層と土質区分ごとに平均値を付与することを基本とする。

なお、データ量が十分にある場合は、土質区分や N 値で用いた空間補間と同様、逆距離加重法により、補間により物性値を付与することも可能である。

作成したボクセルモデルより液状化評価を実施し、既存の被害結果等から妥当性を確認する。結果と大きく異なる場合は、4.2 節 (2) 地盤定数の設定を再検討し、設定したボクセルモデルをチューニングすることが必要となる。

## 5. 3次元地盤構造モデル作成時の留意点

3次元地盤構造モデルの作成時の留意点を以下に示す。液状化評価の際に特に影響が大きいため注意してモデル化することが重要である。

### (1) 地下水位の評価・設定

地盤の液状化は、地下水位以深の砂層で発生する現象であるため、可能な限り資料収集や調査を行い、面的な地下水位コンターを作成した上で適切な地下水位を設定することが望まれる。

本ガイドライン（案）で対象としているハザードは液状化であるため、当然地下水位以深のみ生じる事象であり、液状化判定では地下水位の影響が非常に大きい。したがって、地下水位を適切に推定することは極めて重要である。

インフラ施設の耐震性を検討する場合、その耐震性に影響を与える因子であるにも関わらず、その情報が十分に得られない場合には、実務上いわゆる「安全側」に設定することが多々ある。しかし、液状化に関するハザードマップにおける地下水位は極めて大きな影響を与える因子であることから、可能な限り資料収集や調査を行い、面的な地下水位コンターを作成した上で適切な地下水位を設定することが必要となる。

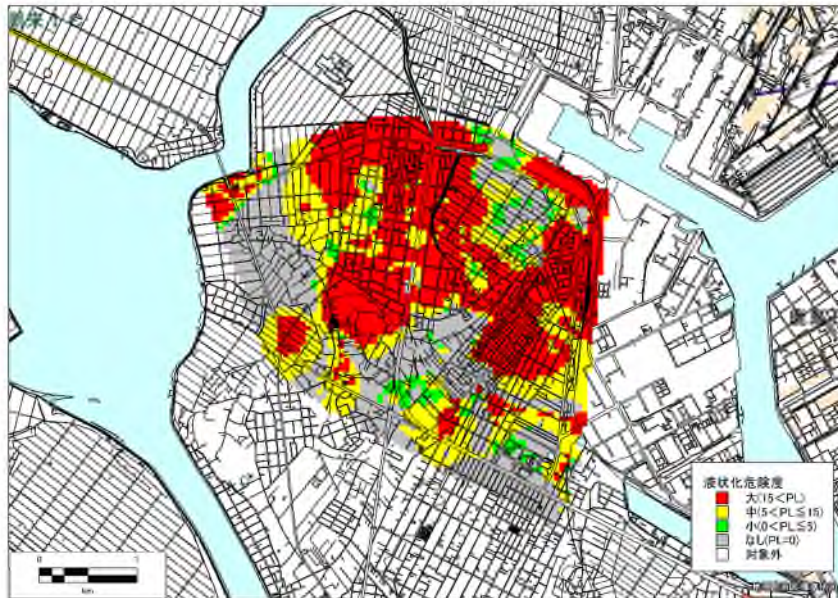
地下水位については、季節変動、地形、自由水面を有する河川、湖沼、海との距離などを念頭において設定する必要がある。季節変動については、ボーリング調査月が様々であるため考慮して設定することは困難である。なお、人工埋立地盤等では宙水となっている場合等があるため、初期水位の把握が重要である。集められた情報の精度によるが、集めたボーリングの孔内水位を単なる補完するのではなく、埋め立ての条件等を踏まえて推定することが望ましい。

また、ボーリング調査以降で液状化対策が実施され地下水位が変化していないか等を確認し、留意点として液状化対策考慮の有無等を明記しておく必要がある。

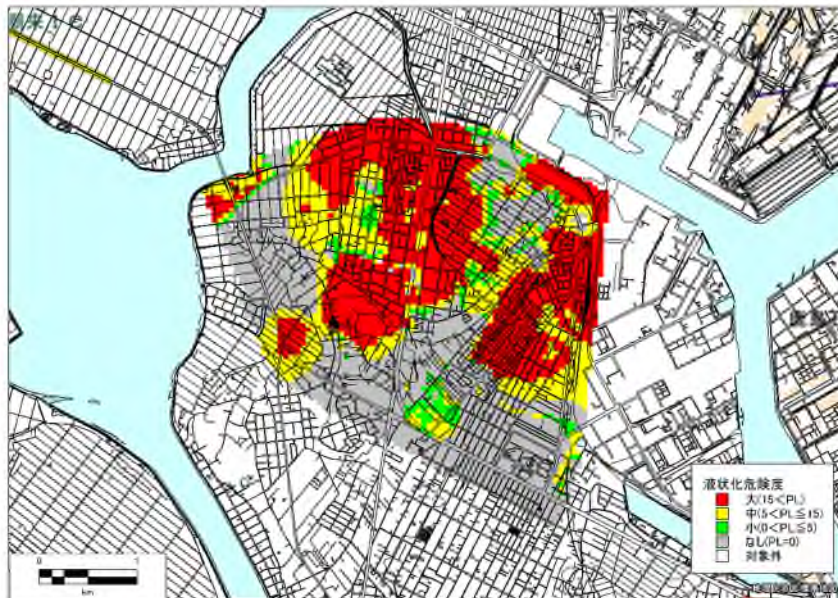
設定した水位において、隣接メッシュで極端に水位が異なる場合、調査時の孔内水位をそのまま読んで値を入れてあるのか、孔口標高で見るとどうなのかといった細かいチェックが必要である。事前にDEMにより対象地区の標高分布も確認し、変動が激しければその影響も考慮するなどの対応が必要となってくる。

### 【事例】

参考として、地下水位を GL-1m に一律とした場合と、調査結果に基づき適切に設定した場合の液状化指標値 (PL 値) マップを示す。GL-1m とした場合には液状化危険度大と評価されるエリアが広がり、過大評価となることが分かる (図 10)。



(a) 地下水位を GL-1m として推定した液状化指標値マップ (PL 値)



(b) 既往調査結果に基づき設定した水位を用いて推定した液状化指標値マップ (PL 値)

図 10 地下水位の設定による液状化指標値 (PL 値) の違い

## (2) 人工改変地の把握・評価

これまで液状化被害の多くは、人の手が加わった人工改変地で発生している。可能な限り資料収集や調査を行い、面的な人工地盤をモデルに組み込むことが望まれる。

液状化リスクを評価する上では、過去の地形変遷を調査し、人工改変を把握することも含め、表層地質を正確に把握することが極めて重要であり、これらに着目して精度の高い液状化ハザードマップを作成することが求められる。

収集整理した既存資料より人工改変履歴があった場合には、その範囲で液状化被害の影響が大きいと考えられるため、改変範囲を把握する必要がある。収集資料より改変範囲を把握できることが望ましいが、不明確な場合は追加調査の実施を検討する。

以下には、既往資料により人工改変地の存在がわかり、その人工改変地域に対して物理探査から得られる S 波速度の分布の違いにより人工改変地の分布状況を把握できた事例を示す。

【事例】

ここでは、神栖地区で、3次元微動探査を実施し、液状化被害箇所の調査結果として指摘（橋本ら、2015）されていた採掘跡地と液状化被害箇所の関連について検討を行った事例を示す。3次元微動探査結果から、道路被害・建物被害があった箇所は表層5mまでのS波速度分布が相対的に低い箇所であることが明らかとなった（図11）。また、S波速度が200m/sとなる深度が周辺よりも深い箇所は、既存資料による採掘跡地の池の分布と概ね対応していることがわかった（図12）。本事例は、3次元微動探査によって得られた表層地盤物性の不均質性や、道路・建物被害を引き起こす要因のひとつとして考えられる過去の採掘による表層地盤の不整形性を考慮して3次元地盤構造モデルを構築したものである。



図11 道路・建物被害（橋本ら、2015）と表層5mまでのS波速度分布

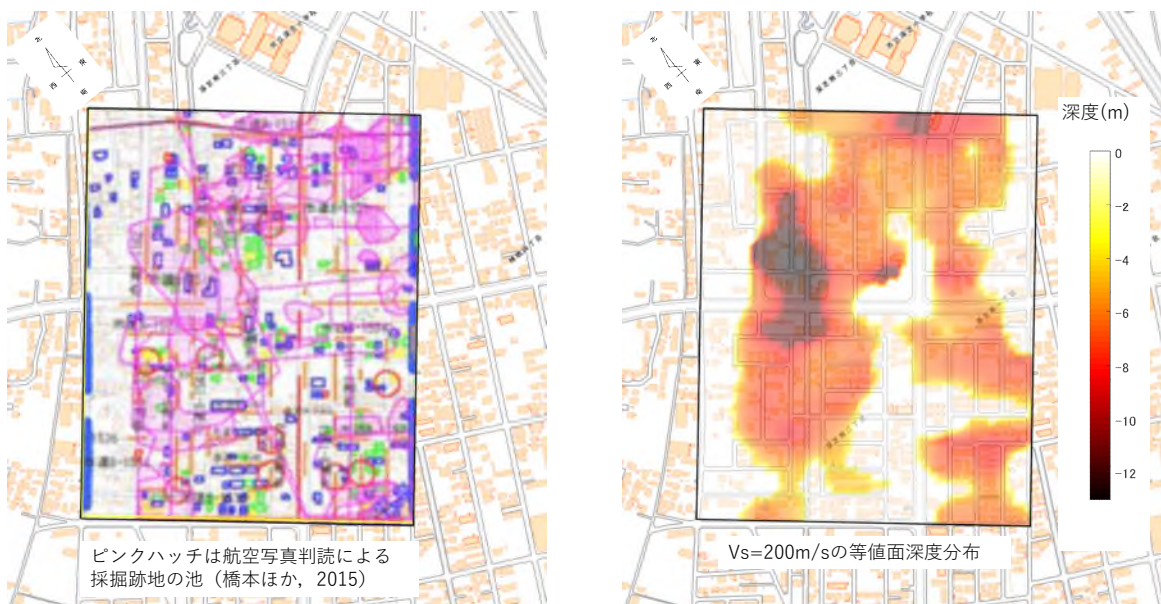


図12 採掘跡地の池の分布（橋本ら、2015）（左）とS波速度の等値面深度分布（右）

### (3) トレーサビリティの確保

3次元地盤構造モデルのトレーサビリティを確保するには、データの信頼性について評価した記録を残す必要がある。本ガイドライン（案）では、次の内容で地盤情報の信頼性評価を行い収集資料一覧表に記録した例を示す。

#### ① 既存資料リストの作成

既存資料における事実と解釈を明確にする必要があるため、生データに近い事実データと解釈の加わっているデータ（断面図等）を区別した。

#### ② 位置精度を目安にデータの正確さを分類

【レベル A】：平面図で 5m 未満（例 ボーリング）

【レベル B】：平面図で 5m 以上～50m 未満（例 断面図、コンター図等）

【レベル C】：平面図で 50m 以上～250m 未満

（例 50m メッシュで評価されているような情報）

【レベル D】：平面図で 250m 以上（例 250m メッシュで評価されているような情報）

【レベル E】：数値で精度を評価できない（例 論文の添付図レベル、エリアや代表値としての評価等）

#### ③ 既存地質調査資料の評価

「地質調査性能基準」に則り、既存地質調査資料を評価・記録（図 13）し、情報の使用優先順位を決める指標とした。

#### ④ データの分布密度

平面的なデータの分布密度を把握するために、資料の対象範囲やデータの分布を図示した。ボーリングデータ・PDC データについてはメッシュ密度図を作成した。

#### ⑤ 3次元地盤構造モデルのデータ形式

国土交通省の推進する BIM/CIM を参考に、CIM 導入ガイドライン案<sup>22</sup>に示される 3次元データ/モデル形式を参考とした。



◆地質調査性能基準による地盤情報の評価

地質調査品質の評価例（湾岸埋立地における施設設計を想定）

ランク	沖積層		人工地質体			
	岩相と分布	分布	同定	分布	物理特性調査	汚染調査
A	<input type="checkbox"/> 沖積層堆積過程のモデル化	<input type="checkbox"/> 100年段階での年代認定に基づく過去2万年間の形成史の確立	<input type="checkbox"/> 構築過程の解明	<input type="checkbox"/> 層厚cmオーダー、広がり0.1mオーダーでの3次元分布の認定	<input type="checkbox"/> 沈下・液状化・斜面崩壊予測モデルの作成	<input type="checkbox"/> 汚染機構解明と浄化対策の策定
B	<input type="checkbox"/> 地表および地下試料に基づく3次元岩相分布の解明	<input type="checkbox"/> 500年段階での年代認定に基づく形成史の解明	<input checked="" type="checkbox"/> 構成物質の同定と詳細断面の作成	<input type="checkbox"/> 構成物質と地下水の流れの方向の認定	<input type="checkbox"/> 3次元物理・力学特性の認定	<input type="checkbox"/> 3次元汚染範囲と汚染速度の認定
C	<input type="checkbox"/> 地表および海上からの沖積層の地下分布の探査	<input type="checkbox"/> 階層相認定と複数階層の年代認定	<input checked="" type="checkbox"/> 地下試料等による人工地質体の同定と断面の作成	<input checked="" type="checkbox"/> 人工地質体と自然地質体の境界認定	<input checked="" type="checkbox"/> 各種試験等による物理・力学特性の認定と断面図の作成	<input type="checkbox"/> 表層における汚染の有無と汚染源（地下浸透箇所）の認定
D	<input checked="" type="checkbox"/> 現地における地質層序の認定及び地形資料・既存地質資料に基づき岩相分布の認定	<input checked="" type="checkbox"/> 層序の認定と既存の形成史への対比	<input checked="" type="checkbox"/> 地表試料による人工地質体の同定	<input checked="" type="checkbox"/> 履歴調査、文献調査等による埋立時期の確認、既存資料からの分布範囲の予測	<input checked="" type="checkbox"/> 原位置における物理・力学特性の確認	<input checked="" type="checkbox"/> 資料等調査による有害物質存在の有無の確認
評価	D	D	B	C	C	D
総評	○○○構造物設計の地質リスク評価に必要な地質調査品質を満たしている（ランク外無し）					



引用：3次元地質解析技術コンソーシアム,2019,「3次元地質解析技術マニュアルVer1.5」

入力アプリ 資料毎に評価する



評価値をシートに入力する

図 13 地質調査性能基準による既存調査資料評価の例

## 6. 3次元地盤構造モデルの拡張性

地盤が液状化する可能性（リスク）を指標値として算出する方法は、これまで多くの研究・開発が行われている。実務的運用の範疇においては確立されており、基本的な考え方はこの数十年変わっていない。詳細については、古い資料ではあるが「埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）」<sup>23</sup>（以下、液状化ハンドブック）によくまとめられているので参照するとよい。図 14 に液状化に対する検討の流れを示す。

液状化の予測手法は、表 3 に各種液状化予測法の分類を示すように大きく 3 つに分けられる。

- ① 微地形や液状化履歴をもとに予測する概略の方法
- ② 粒度・N 値の指標を用いる簡易な方法
- ③ 室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な方法

②の方法での課題は指摘（安田ら,2009）<sup>24</sup>（風間ら,2015）<sup>25</sup>されるものの、これまで各種構造物の設計基準で採用されていることや、ある程度の精度があるために実務でもよく利用される。その代表的な手法が、道路橋示方書で採用されている  $F_L$  法である。図 15 にいわゆる  $F_L$  法の変遷<sup>26</sup>を示す。図 15 から分かるとおり、地盤の液状化は 1964 年新潟地震以降、建設技術者の間で広く認識されるようになり、現在では社会基盤施設に対する地盤の液状化の予測と対策に関する技術基準が数多く整備されてきている。（表 4）

最近では「リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き」（国土交通省都市局都市安全課,令和 3 年 2 月）<sup>27</sup>が案として取りまとめられている。

本ガイドライン（案）で作成される 3 次元地盤構造モデルは、他指針、基準類の液状化判定に広く活用、展開でき、インフラ施設の液状化被害予測以外の分野においても地震動や液状化による被害予測などの防災・減災対策の検討も可能である。また、予算や時間の制約により、はじめに作成した時点では粗い調査に基づく地盤構造モデルであっても、今後調査が追加された場合にはそれを反映した精度向上が可能であり、当初より作成したものが無駄とならず拡張することが可能である。そのためにも、地盤構造についても BIM/CIM 化の推進が期待され、作成されたモデルの管理と公開方法の早急な整備が期待される。「3 次元地盤構造モデル」を用いて、液状化判定の高度化を図り、より効果的な対策に繋げることが可能となる。

インフラ施設の液状化被害予測以外の分野においても、地震動や液状化による被害予測などの防災・減災対策の検討において活用が可能である。

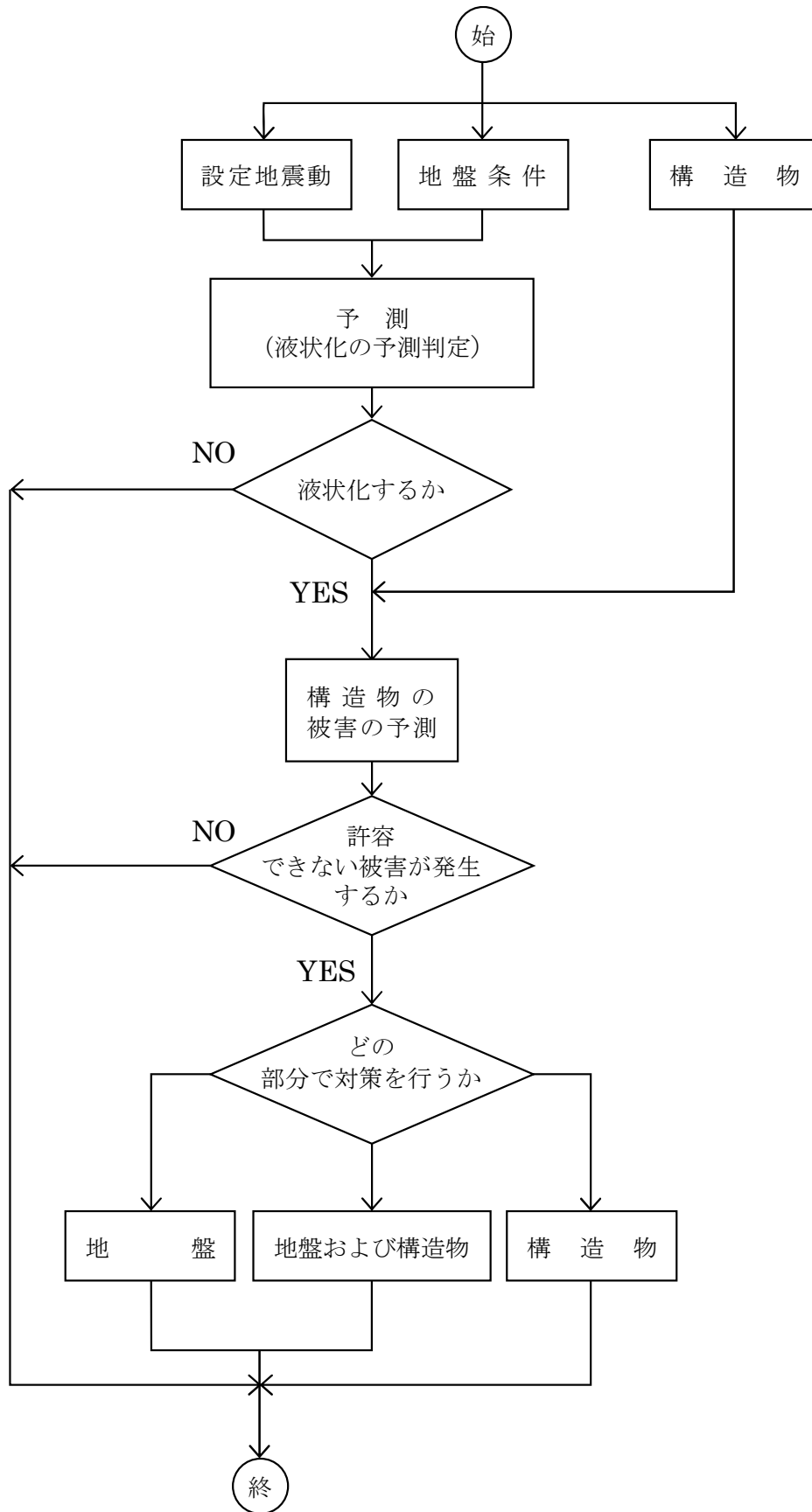


図 14 液状化に対する検討の流れ（出典：液状化ハンドブック）

表 3 各種液状化予測法の分類（出典：液状化ハンドブック）

地盤の液状化強度の 推定方法	地震動レベルなどの推定方法	予 測 法 の 例
—	マグニチュード・震央距離	栗林・龍岡ら <sup>28</sup> 、若松 <sup>29</sup>
微 地 形	—	古藤田・若松ら <sup>30</sup>
粒度・N値	—	危険物の規制に関する規則 <sup>31</sup>
	地表の最大加速度	道路橋示方書・同解説
	地表の最大加速度・ マグニチュード	建築基礎構造設計指針 <sup>33</sup>
	全応力モデル	港湾の施設の技術上の基準・ 同解説 <sup>34</sup>
繰返し三軸試験等	全応力モデル	Seed and Idriss <sup>35</sup> 、石原 <sup>36</sup>
	有効応力モデル	Finn et al. <sup>37</sup> 、井合ら <sup>38</sup>

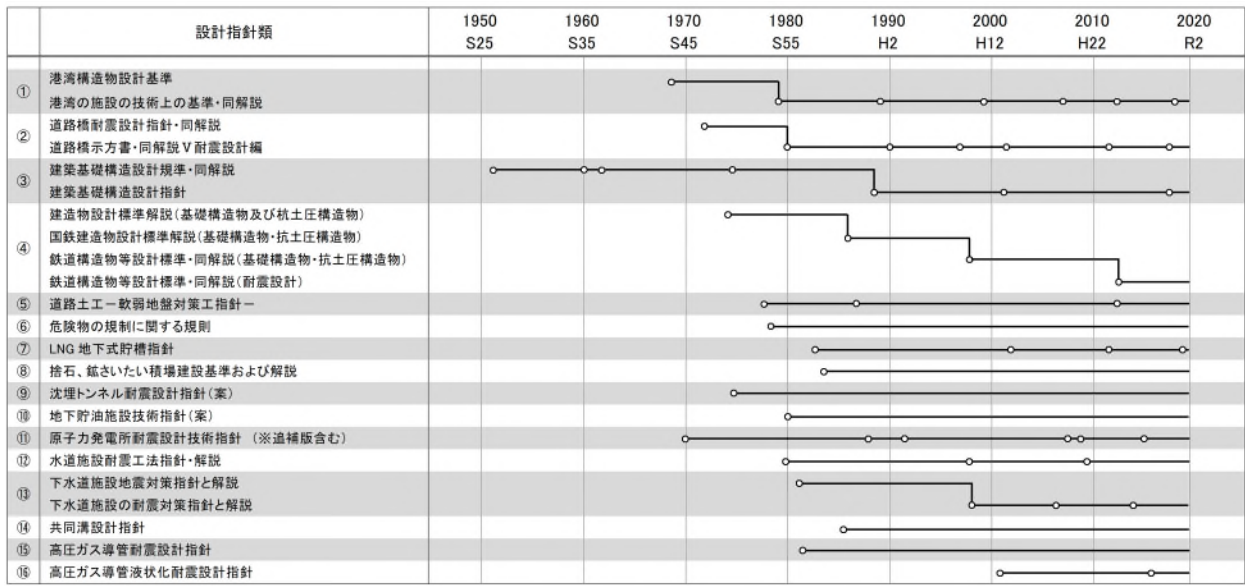


図 15 各種構造物の設計基準の編成

表 4 液状化の判定法に関する耐震設計指針・基準

①	1	港湾構造物設計基準	日本港湾協会	1968年
	2	港湾の施設の技術上の基準・同解説		1979年3月
	3	〃		1989年2月
	4	〃		1999年4月
	5	〃		2007年4月
	6	〃 (部分改訂)		2012年8月
	7	〃		2018年5月
②	1	道路橋耐震設計指針・同解説	日本道路協会	1972年4月
	2	道路橋示方書・同解説V耐震設計編		1980年5月
	3	〃		1990年2月
	4	〃		1996年12月
	5	〃		2002年3月
	6	〃		2012年3月
	7	〃		2017年11月
③	1	建築基礎構造設計規準・同解説	日本建築学会	1952年11月
	2	〃		1960年11月
		〃		1961年7月
	3	〃		1974年11月
	4	建築基礎構造設計指針		1988年1月
	5	〃		2001年10月
④	1	建造物設計標準解説(基礎構造物及び抗土圧構造物)	日本国有鉄道	1974年6月
	2	国鉄建造物設計標準解説(基礎構造物・抗土圧構造物)	土木学会	1986年3月
	3	鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物)	鉄道総合技術研究所	1997年4月
	4	鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)		2012年9月
⑤	1	道路土工—軟弱地盤対策工指針—	日本道路協会	1977年1月
	2	〃		1986年11月
	3	〃		2012年8月
⑥		危険物の規制に関する規則	消防庁	1978年2月
⑦	1	LNG地下式貯槽指針	日本ガス協会	1981年12月
	2	〃		2002年8月
	3	〃		2012年4月
	4	〃		2019年9月
⑧		捨石、鉱さいたい積場建設基準および解説	日本鉱業協会	1982年12月
⑨		沈埋トンネル耐震設計指針(案)	土木学会	1975年3月
⑩		地下貯油施設技術指針(案)	土木学会	1980年5月
⑪	1	原子力発電所耐震設計技術指針	日本電気協会 電気技術基準調査委員会	1970年10月
	2	〃		1987年8月
	3	原子力発電所耐震設計技術指針 追補版		1991年6月
	4	原子力発電所耐震設計技術指針		2007年9月
	5	〃		2008年12月
	6	〃		2015年5月
⑫	1	水道施設耐震工法指針・解説	日本水道協会	1979年12月
	2	〃		1997年3月
	3	〃		2009年7月
⑬		下水道施設地震対策指針と解説	日本下水道協会	1981年10月
		下水道施設の耐震対策指針と解説		1997年8月
		〃		2006年8月
		〃		2014年5月
⑭		共同溝設計指針	日本道路協会	1986年3月
⑮	1	高圧ガス導管耐震設計指針	日本ガス協会	1982年3月
	2	〃		2000年3月
	3	〃		2004年3月
	4	〃		2013年4月
	5	〃		2020年12月
⑯	1	高圧ガス導管液状化耐震設計指針	日本ガス協会	2001年12月
	2	〃		2016年3月