

ISSN 1346-7328

国総研資料 第1152号

令和3年3月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1152

March 2021

3次元地盤構造モデル作成ガイドライン(案)

インフラ施設の液状化ハザードマップ整備を目的として

3D ground structure model creation guideline (Proposed)

-For the purpose of developing a liquefaction hazard map for infrastructure facilities

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

3次元地盤構造モデル作成ガイドライン（案）
インフラ施設の液状化ハザードマップ整備を目的として
3D ground structure model creation guideline (Proposed)

-For the purpose of developing a liquefaction hazard map for infrastructure facilities-

概要

国土交通省国土技術政策総合研究所では、インフラ施設のネットワークにおける液状化対策の重点化及び優先度評価の検討、ならびにインフラ施設の液状化ハザードマップ整備に資する、地質・地盤の分布の複雑さや液状化被害要因となる地盤特性を反映した3次元地盤構造モデルを実際の地域を対象に試作し、高精度な液状化被害予測を行う方法を検討した。

本資料は、その検討を踏まえて3次元地盤構造モデルの作成方法を示したものである。

キーワード : 液状化、インフラ、3次元、地盤構造モデル、ハザードマップ

Synopsis

National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) is planning to consider prioritization and priority evaluation of liquefaction measures for the network of infrastructure facilities and prepare liquefaction hazard maps for infrastructure facilities. for that purpose, we created a three-dimensional ground structure model for actual districts experimentally that the complexity of the distribution of ground and geological features and the ground property which cause liquefaction damage are reflected. On the basis of this model, we examined a method for highly accurate prediction of liquefaction damage.

This proposed guideline shows how to create a three-dimensional ground structure model based on the examination.

Key Words : liquefaction, infrastructure, 3D, modeling soil-foundation-structure, hazard map

目 次

第Ⅰ編 インフラ施設の液状化被害予測における着目点	1
1. 本ガイドライン（案）の背景及び目的	1
2. 3次元地盤構造モデルを活用したインフラ施設の液状化ハザードマップ整備の流れ	2
【参考】インフラ施設の液状化被害	3
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	4
1. 3次元地盤構造モデルの作成手法	4
2. モデル作成に必要な地盤情報と収集方法	6
3. 地盤情報を得るための追加調査	8
4. 3次元地盤構造モデルの空間補間方法	11
5. 3次元地盤構造モデル作成時の留意点	23
6. 3次元地盤構造モデルの拡張性	29
【巻末】液状化リスク評価のための3次元地盤構造モデルの作成事例およびその他の留意事項	34
1. 新潟地区における3次元地盤構造モデルの作成事例	34
2. 神栖地区における3次元地盤構造モデルの作成事例	49
3. 福岡地区における3次元地盤構造モデルの作成事例	65
4. 地震動の設定について	77

第 I 編 インフラ施設の液状化被害予測における着目点

1. 本ガイドライン（案）の背景及び目的

道路や下水道等のインフラ施設においては、構造物ごとの指針・基準類で示される液状化対策が行われるが、インフラ施設のネットワークとしての液状化被害リスクは十分に把握されているとは言えない。また、過去の地震より液状化発生分布とインフラ施設の液状化被害との比較から、インフラ施設の液状化被害は地表面から浅い表層部分の地盤構造や人工改変状況といった地盤特性と密接に関連していることが指摘されており^{1,2}等、これらの地盤特性を考慮して液状化対策の重点化や優先度評価を行うことが、国土強靱化を進める上で重要である。

インフラ施設のネットワーク全体の液状化被害リスクの評価を行うには、ハザードマップのような液状化被害予測の面的な分布とネットワークを構成している構造物等の要素の重ね合わせを行うことが必要である。

液状化ハザードマップとしては自治体等で公表されているものも存在するが、そのほとんどは内閣府の防災マップ作成技術資料と国土庁の液状化地域ゾーニングマニュアルの手法^{3,4}等を参考に250mメッシュでの微地形区分に基づいて、地層構成や物性値をメッシュ内もしくは近傍のボーリングデータで代表させている。このため、被害を算定し被害の全体像や被害規模を明らかにするという行政の防災・減災対策の検討においては十分な精度を持っているが、250mメッシュではより狭い範囲内の液状化を表現することができないことや、地盤特性に大きな仮定を含むため不確実性があるという課題もあり、250mメッシュより狭い範囲でかつ広域でネットワークとして分布するインフラ施設に対しては、液状化対策の重点化や優先度評価といった検討にそのまま利用することはできない。

国土交通省国土技術政策総合研究所では、令和元年度から令和2年度に「インフラ等の液状化被害推定手法の高精度化」に関する研究として、国立研究開発法人土木研究所との共同研究により、インフラ施設のネットワークとしての液状化対策の重点化や優先度評価といった検討に向け、地質・地盤の分布の複雑さや液状化被害要因となる地盤特性を反映できる3次元地盤構造モデルを作成し、これに基づいた高精度な液状化被害予測を行う方法を検討してきた。

本ガイドライン（案）は、上記の共同研究のうち「3次元地盤構造モデルによる高精度液状化評価手法の開発」について、国土技術政策総合研究所委託研究（委託先：一般社団法人全国地質調査業協会連合会）において実施した成果を踏まえ、地質・地盤の分布の複雑さや液状化被害要因となる地盤特性を反映した3次元地盤構造モデルの作成方法について示したものである。

なお、本作成方法は、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。

2. 3次元地盤構造モデルを活用したインフラ施設の液状化ハザードマップ整備の流れ

図1にインフラ施設の液状化ハザードマップ整備の流れを示す。このうち、本ガイドライン(案)では、液状化ハザードマップ整備のための3次元地盤構造モデル作成について示した。

本ガイドライン(案)により作成される3次元地盤構造モデルは、これまで広く採用されている液状化ハザードマップ作成手法(例えば文献1)にも適用することが可能であり、精度向上を図った液状化ハザードマップ(F_L 値や P_L 値分布等)を作成することができる。これにインフラ施設の位置情報や液状化に対する要求事項を設定することにより、インフラ施設の液状化リスクマップを作成することができる。

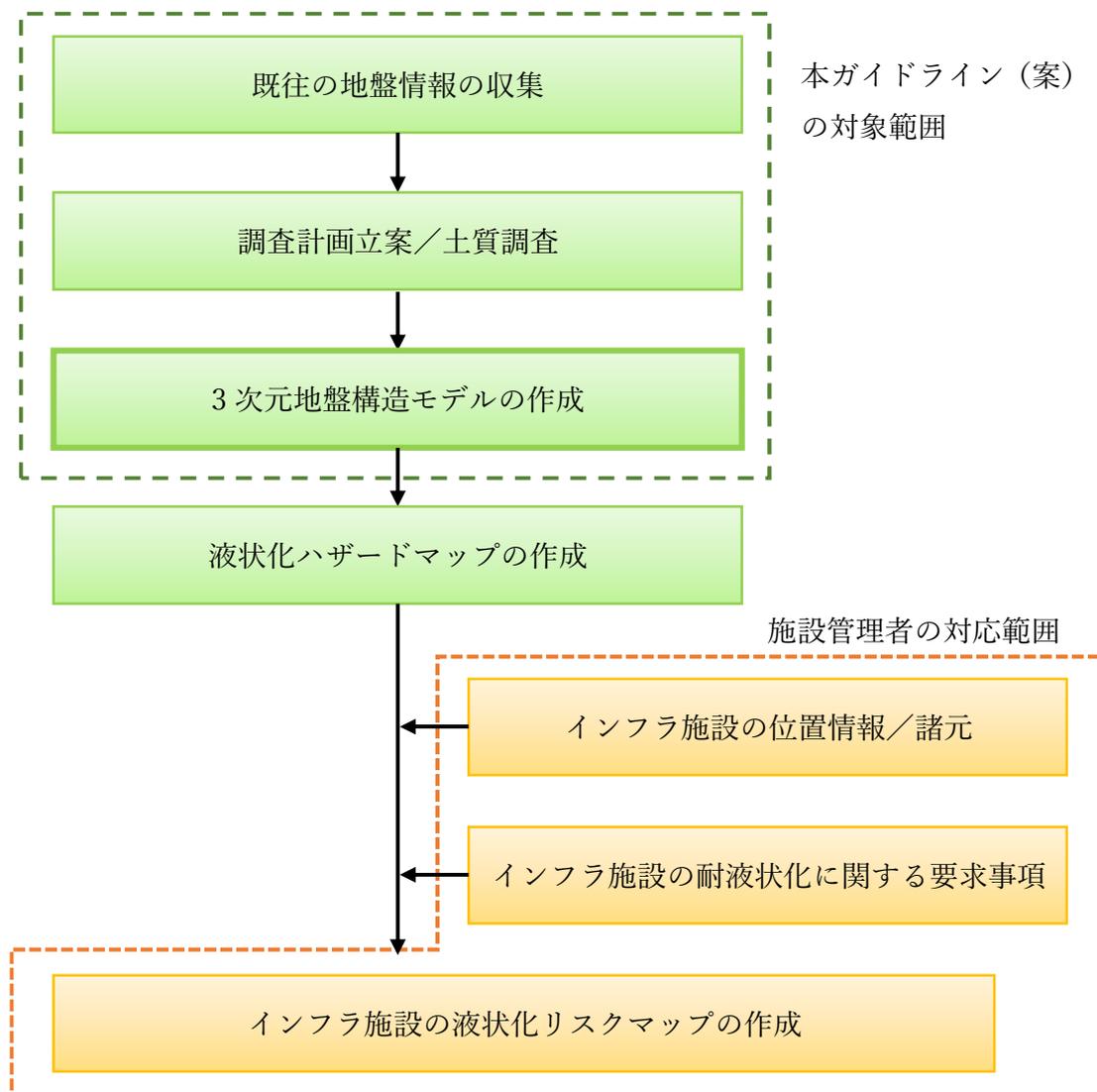


図1 インフラ施設の液状化ハザードマップ整備の流れ

【参考】インフラ施設の液状化被害

既存資料^{5,6,7,8,9,10,11}より、過去の地震時液状化に伴うインフラ施設や地盤被害が発生した地点における主な地盤特性を表 1 にまとめた。これらの既存資料により液状化に影響する主な地盤特性は、地下水位の高い軟弱地盤か人工改変地に大別される。特に道路、下水道のインフラ施設については、表層部の非液状化層厚や表層平均 N 値と被害に強い相関が認められることが確認されている。

したがって、インフラ施設の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地盤液状化マップを作成することが求められる。

表 1 過去の被害から想定される液状化に影響する地盤特性

施設	地震	主な被害	影響する主な地盤特性など
道路	2011 年 東北地方太平洋沖地震	道路通行機能への支障	・非液状化層厚 3m未満 ・舗装厚さ(路床改良含む)1.2m未満
	2018 年 北海道胆振東部地震	道路通行機能への支障	・低地部・段丘部の谷埋盛土造成地(人工改変地)
下水道	2007 年 能登半島地震	管路施設の浮上り	・埋戻し土 ・表層地盤の平均 N 値(砂質土 $N \leq 7$ 、粘性土 $N \leq 5$) ・地下水位 GL-3m 以浅
	2016 年 熊本地震	管路施設被害	・地下水位が高い軟弱な低地盤高地域 ・三角州・海岸低地、後背湿地※、干拓地等(※後背湿地は埋戻し地盤が要因)。
	2011 年 東北地方太平洋沖地震	管路施設被害	・東北地方:管路施設の埋戻し地盤のみ ・関東地方(主に東京湾岸部や旧河川の埋立地域):管路施設埋戻し部周辺の道路や宅地地盤も含めて全面が対象
	2018 年 北海道胆振東部地震	管路施設被害	・低地部・段丘部の谷埋盛土造成地(人工改変地) ・液状化対策工法の未施工による埋戻し土
地盤	1964 年 新潟地震	噴水・噴砂・亀裂等	・表層地盤の平均 N 値(深さ 8m 以浅 $N < 12$) ・人工地形(盛土・埋立地)
	2011 年 東北地方太平洋沖地震	噴水・噴砂・亀裂等	・三角州・海岸低地、埋立地 ・旧河道・旧池沼 ・ローム台地間の規模の小さい谷底低地 ・砂州・砂礫州における埋戻し地盤(人工改変地)
	2018 年 北海道胆振東部地震	地盤の陥没 土砂流出・堆積 噴砂	・低地部・段丘部の谷埋盛土造成地(人工改変地)

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¹²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。

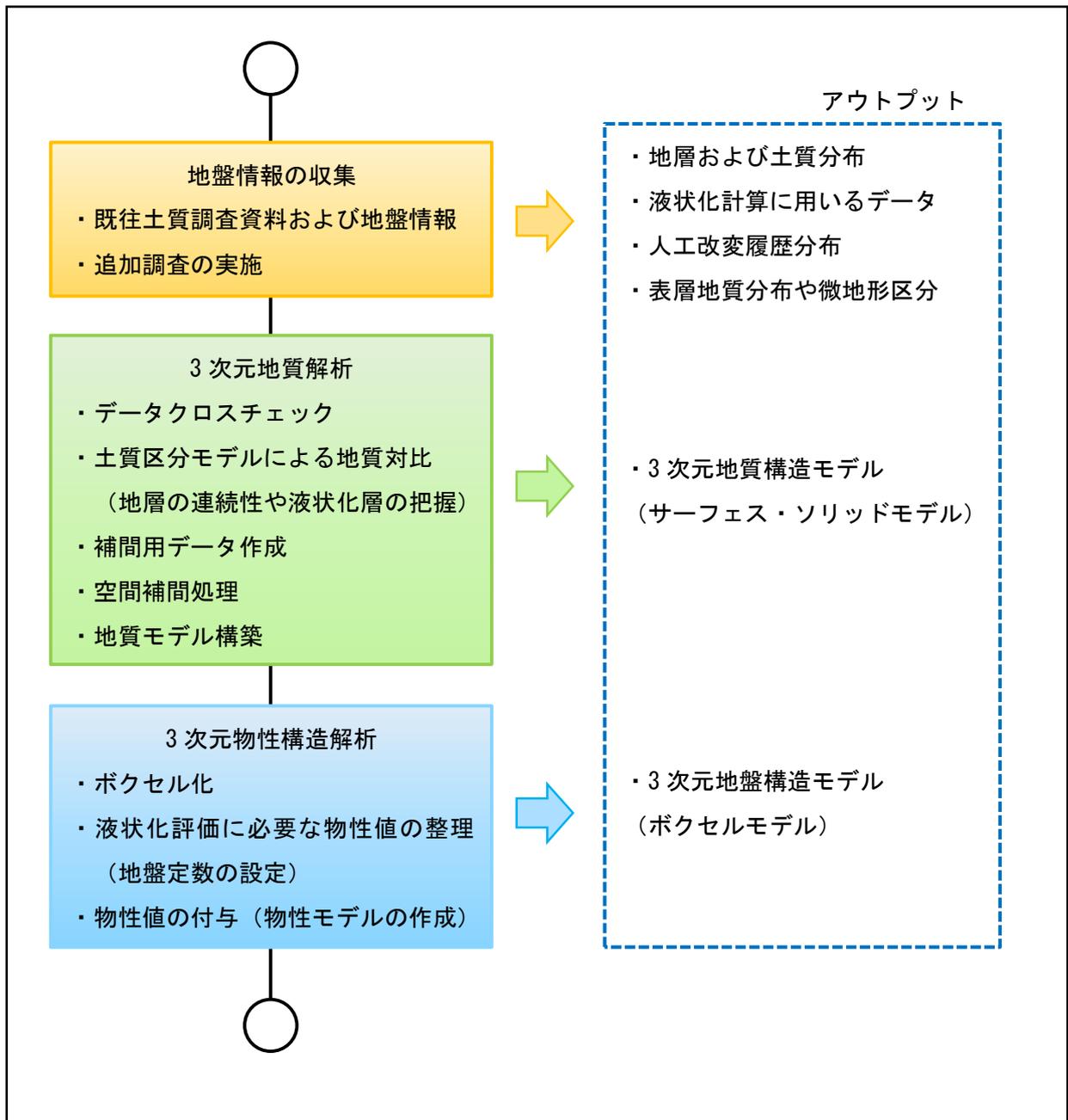


図 2 液状化ハザードマップ作成を考慮した3次元地盤構造モデル作成ワークフロー

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（kunijiban¹³、全国電子地盤図¹⁴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-SHIS¹⁵）
- ・南海トラフ、首都直下モデル（内閣府¹⁶）
- ・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¹⁷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。

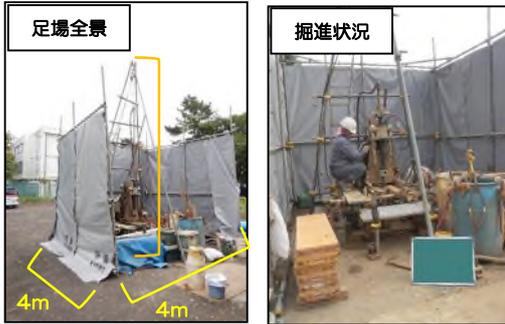
表 2 に物理探査の利活用例一覧表を示す。これらの手法の中で、微動探査は、雑振動を信号源とするため都市部での適用性が高い。3 次元微動探査は、地盤改良や掘削による人工改変等が行われた範囲を特定し、詳細な 3 次元 S 波速度構造を求めることに適している。2 次元微動探査は、深さ 50m 程度までの工学的基盤面の連続性をモデル化する際に適用される。1 次元微動探査は、基盤まで達する既往ボーリングが少ない場合のボーリングを補完してモデル化を行う際に適用される。2 次元表面波探査は、氾濫原堆積物などの液状化対象層の詳細な分布形状等を微地形区分と対比させてモデル化する際に適用される。

図 3 に追加調査内容の概要図を示す。

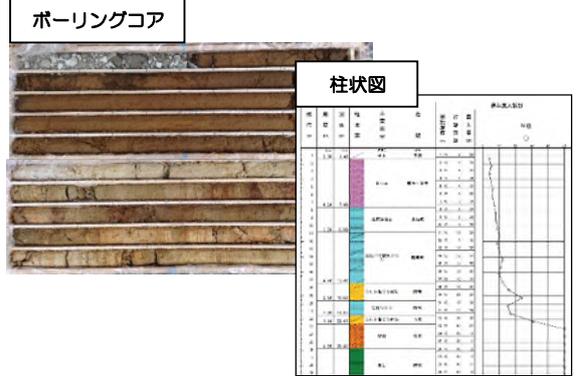
表 2 物理探査の利活用例一覧表

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"> 旧河道が発達し、基盤深度が深い 既往文献で基盤構造が不足 広域を対象とした工学的基盤の分布
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"> 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 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
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"> 基盤の凹凸が大きく既往ボーリング資料が不足 内陸断層など地盤構造の急変点が存在
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"> 人工改変地が広く分布 過去に被害集中地域が存在 過去に砂利採取などの人工改変が行われた範囲の特定 重要構造物等の詳細調査対象

ボーリング調査



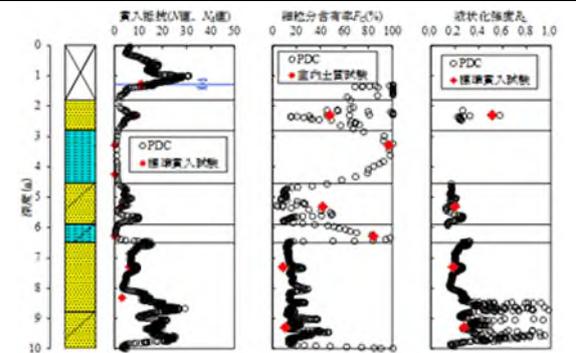
※占有面積は約 16m² 程度



液状化ポテンシャルサウンディング (PDC)

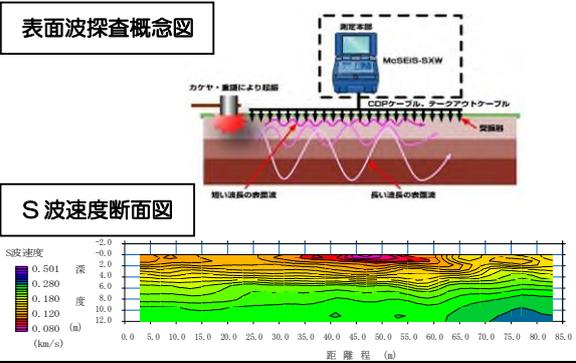
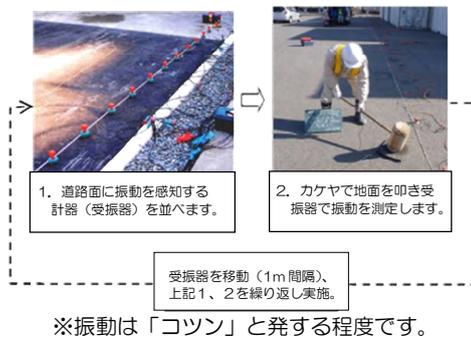


PDC 配置状況 (2m×3m)
 ※一般的なボーリング調査の占有面積が約 16m²、
 ※占有面積は 6m²



PDC による調査事例

2次元 表面波探査



3次元 微動探査

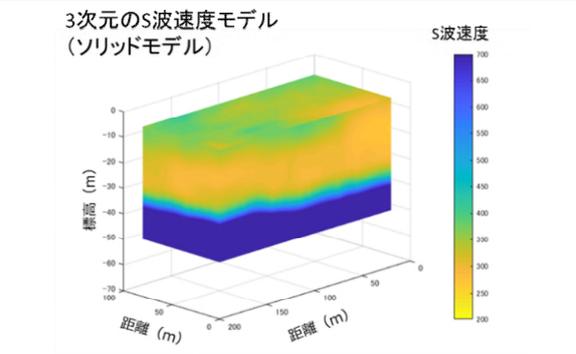
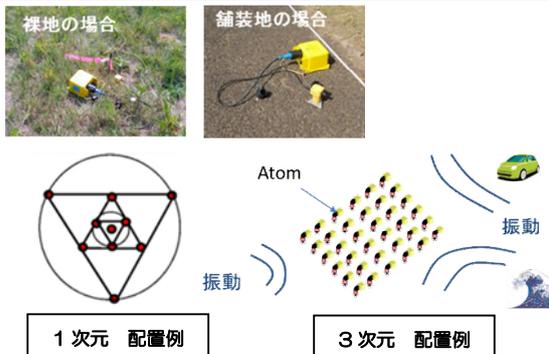


図 3 追加調査の概要図

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。

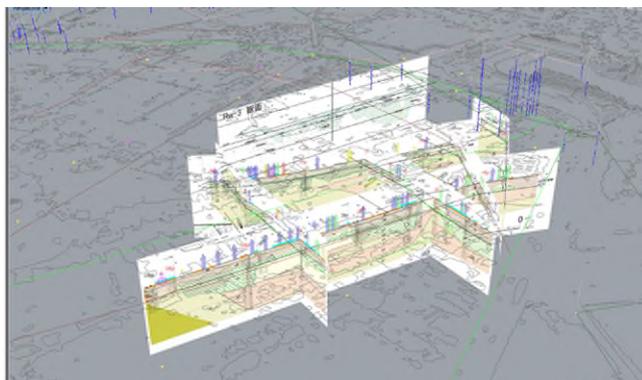


図4 地質断面図を用いた地盤モデル作成例
(橋本ら(2015)¹⁸の断面図を利用)

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¹⁹))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

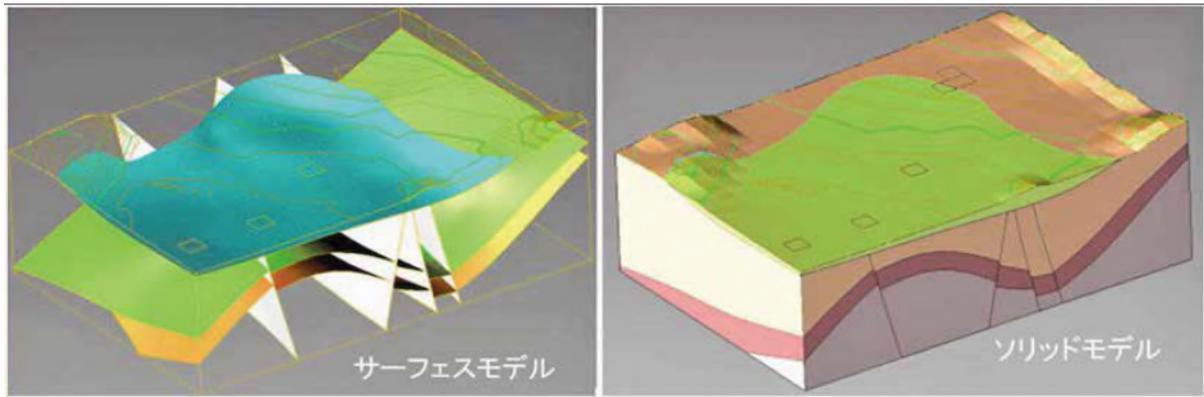
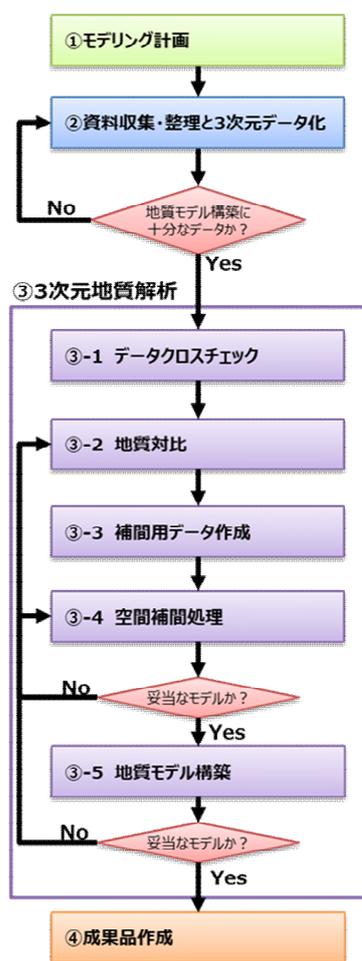


図 5 サーフェスモデルおよび地層ソリッドモデルの例
(3次元地盤モデル作成の手引きより)



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	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、しらす、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）

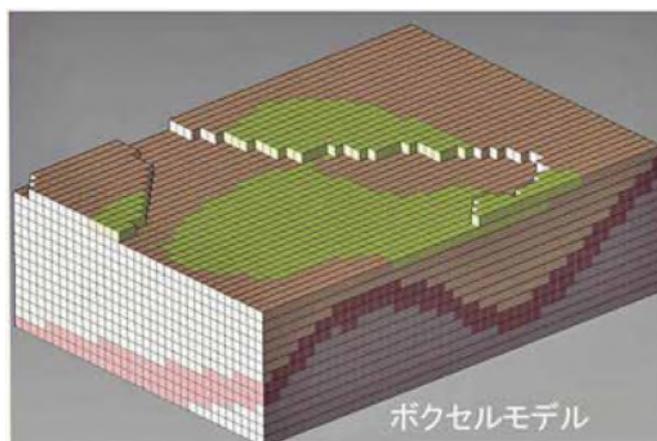


図9 ボクセルモデルの例
(3次元地盤モデル作成の手引きより)

(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)²⁰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。

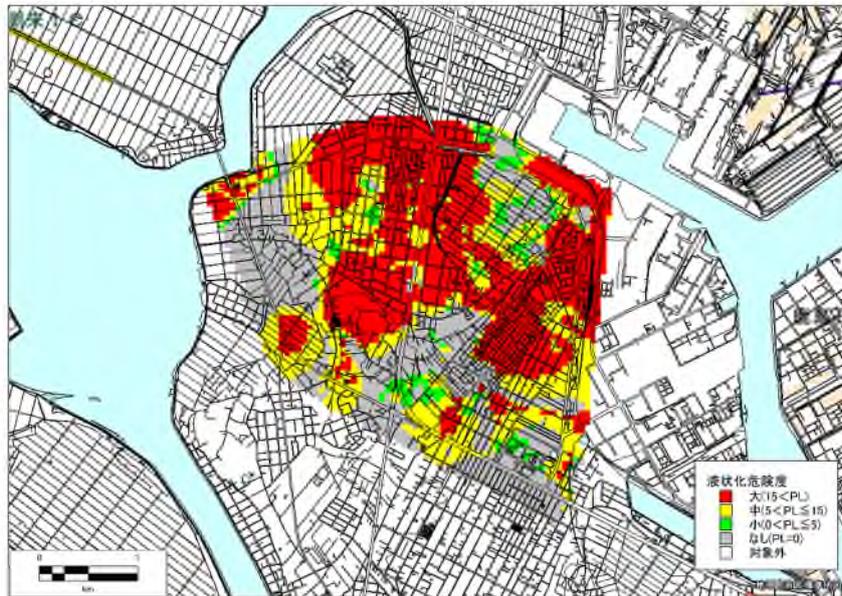
地下水位については、季節変動、地形、自由水面を有する河川、湖沼、海との距離などを念頭において設定する必要がある。季節変動については、ボーリング調査月が様々であるため考慮して設定することは困難である。なお、人工埋立地盤等では宙水となっている場合等があるため、初期水位の把握が重要である。集められた情報の精度によるが、集めたボーリングの孔内水位を単なる補完するのではなく、埋め立ての条件等を踏まえて推定することが望ましい。

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。

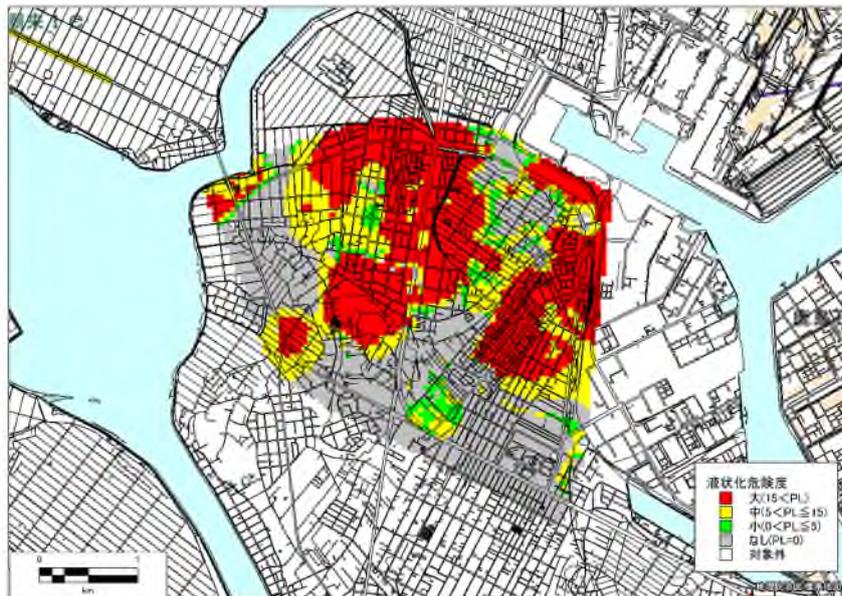
設定した水位において、隣接メッシュで極端に水位が異なる場合、調査時の孔内水位をそのまま読んで値を入れてあるのか、孔口標高で見るとどうなのかといった細かいチェックが必要である。事前にDEMにより対象地区の標高分布も確認し、変動が激しければその影響も考慮するなどの対応が必要となってくる。

【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 (P_L 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 (P_L 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 (P_L 値)

図 10 地下水位の設定による液状化指標値 (P_L 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個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

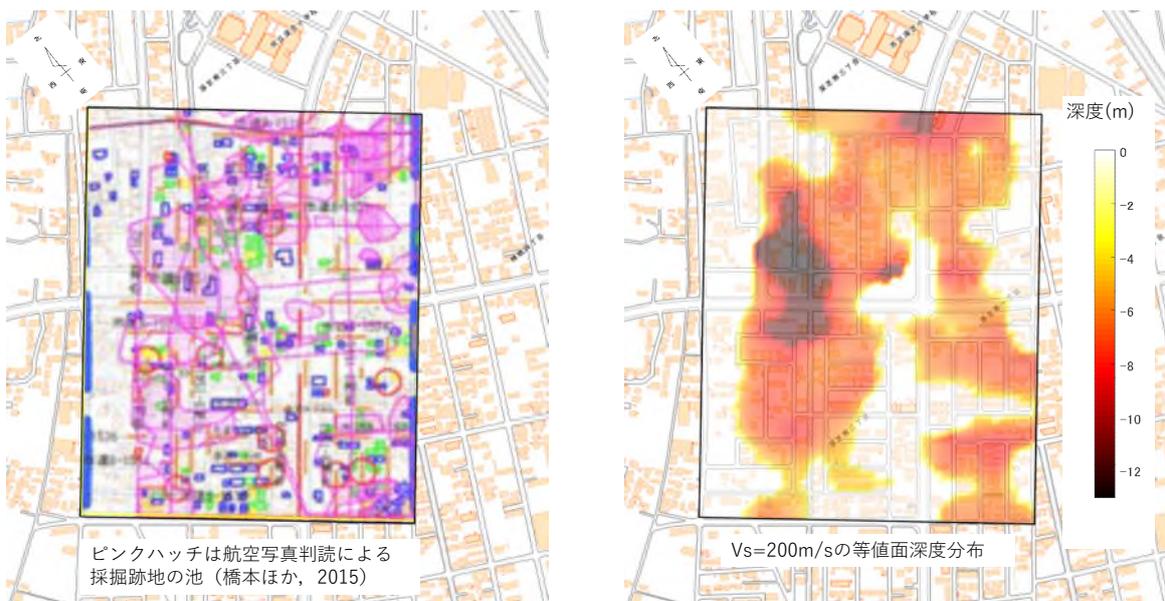


図12 採掘跡地の池の分布（橋本ら、2015）（左）とS波速度の等値面深度分布（右）

(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²²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"/> 過剰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）」²³（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）²⁴（風間ら,2015）²⁵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²⁶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）²⁷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。

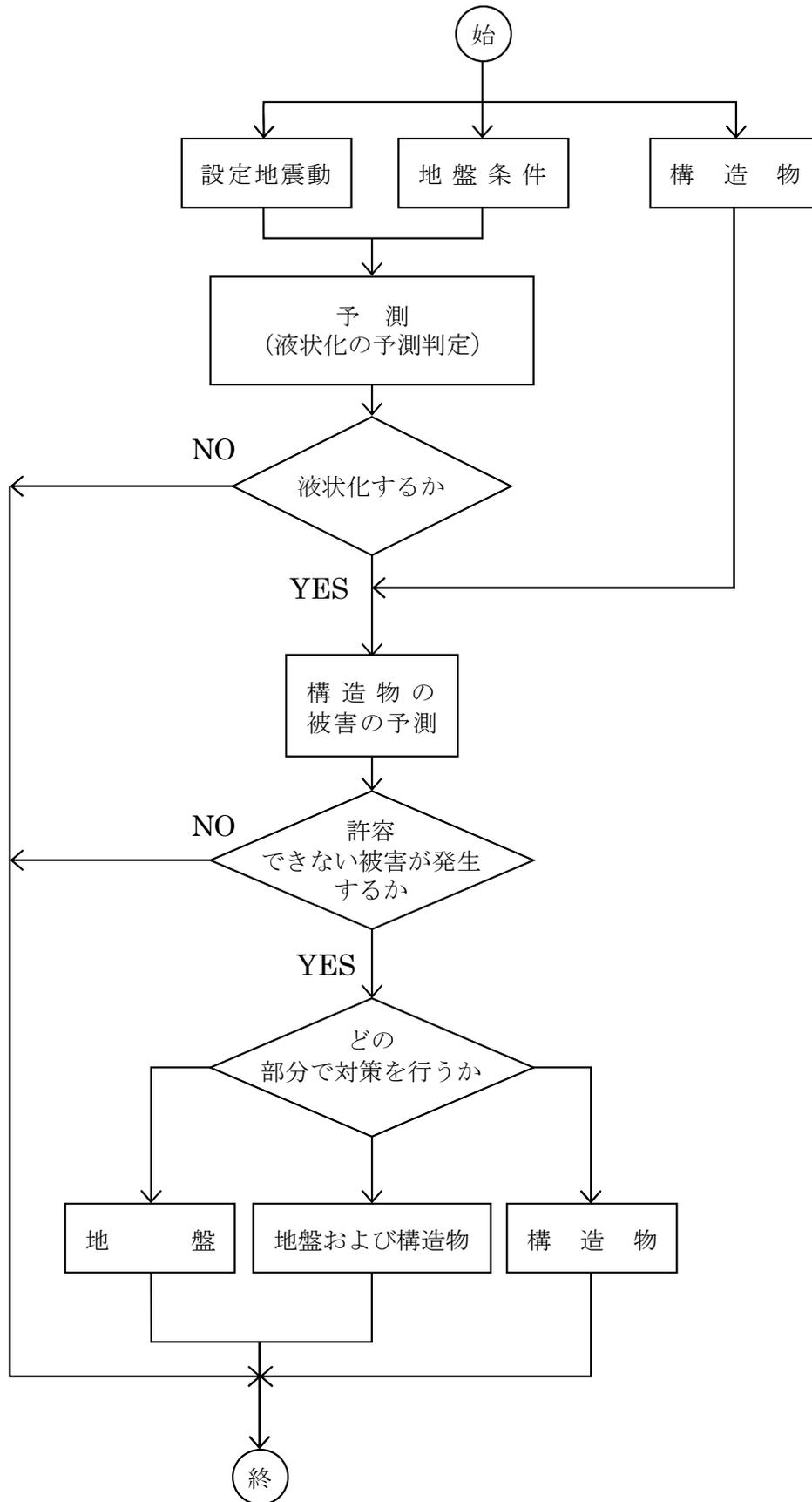


図 14 液状化に対する検討の流れ（出典：液状化ハンドブック）

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 ²⁸ 、若松 ²⁹
微 地 形	—	古藤田・若松ら ³⁰
粒度・N値	—	危険物の規制に関する規則 ³¹
	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 ³³
	全応力モデル	港湾の施設の技術上の基準・ 同解説 ³⁴
繰返し三軸試験等	全応力モデル	Seed and Idriss ³⁵ 、石原 ³⁶
	有効応力モデル	Finn et al. ³⁷ 、井合ら ³⁸

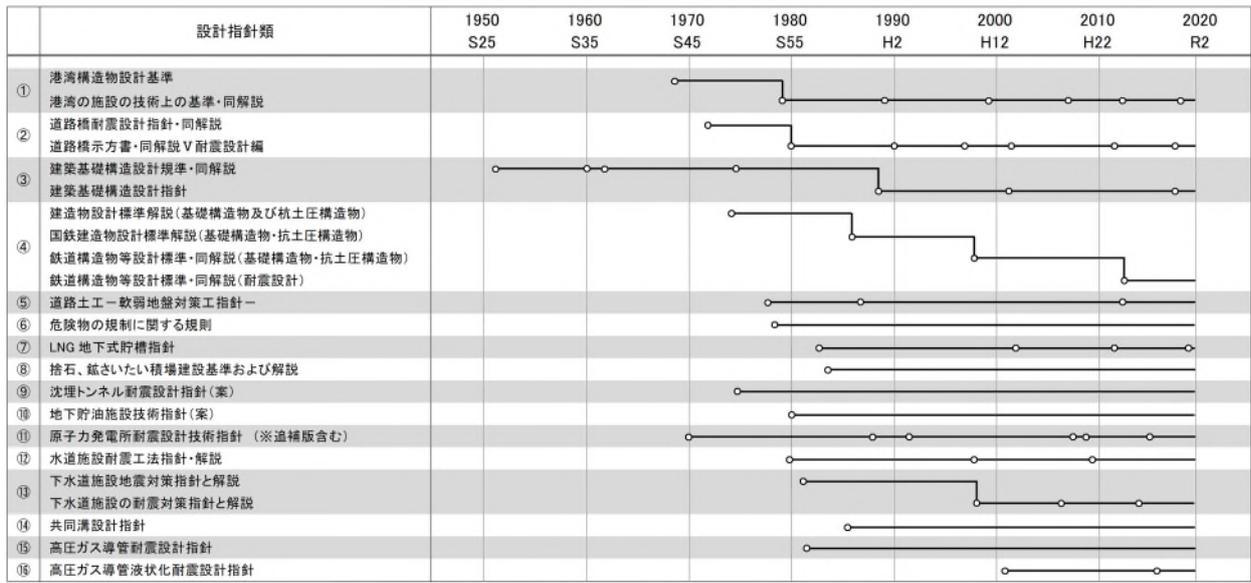


図 15 各種構造物の設計基準の編成

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 土木学会	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)		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

【巻末】液状化リスク評価のための3次元地盤構造モデルの作成事例およびその他の留意事項

本ガイドラインは3次元地盤構造モデルの作成方法について示している。ここでは、本ガイドラインの作成方法に準じて作成した3次元地盤構造モデルを用いて、過去の液状化による被害が生じた地震に対してインフラ施設のハザードマップを作成し、地盤モデルの妥当性や課題等について検討したものである。

1. 新潟地区における3次元地盤構造モデルの作成事例

1.1. 3次元地盤構造モデルの作成範囲

社会インフラの強靱化を推進するために、インフラ施設の液状化被害推定手法を高精度化することが重要である。取り組み方針は、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮した3次元地盤構造モデルの構築、個別インフラ施設の液状化リスクの評価とした。目的の達成、取り組み方針から、新潟地区における広域な調査対象範囲（0次モデル作成範囲と呼ぶ）を、下記の観点で設定した（図16）。

- ・人口集積度・道路密集度が高い新潟市街地を対象とする。
- ・既往の液状化ハザードマップにおいて液状化リスクの高い範囲を優先に実施する。
- ・信濃川周辺の氾濫原堆積物は液状化対象層と考えられ、層厚変化による検討を実施する。

0次モデル作成範囲のうち、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮するために、3次元地盤構造モデルを作成する範囲（1次モデル作成範囲と呼ぶ）として、液状化評価の指標を自然条件などの関連する条件の違いによって検討可能な範囲を設定した。

- ・人口密集度が高く、重要インフラ施設を含む緊急輸送路周辺での液状化履歴が確認される。
- ・液状化想定層の分布、地盤情報豊富で比較的想定可能な地域
（地質モデル構築に十分なデータの入手が可能で情報公開が可能）
- ・複数の液状化しやすいとされる地形（砂丘間堆積物、埋立地、氾濫原、旧河道など）が分布する範囲。
- ・過去の地震災害で液状化が認められた地点が含まれる災害履歴情報の明確な範囲。
- ・既往の想定で液状化危険度の高い範囲。

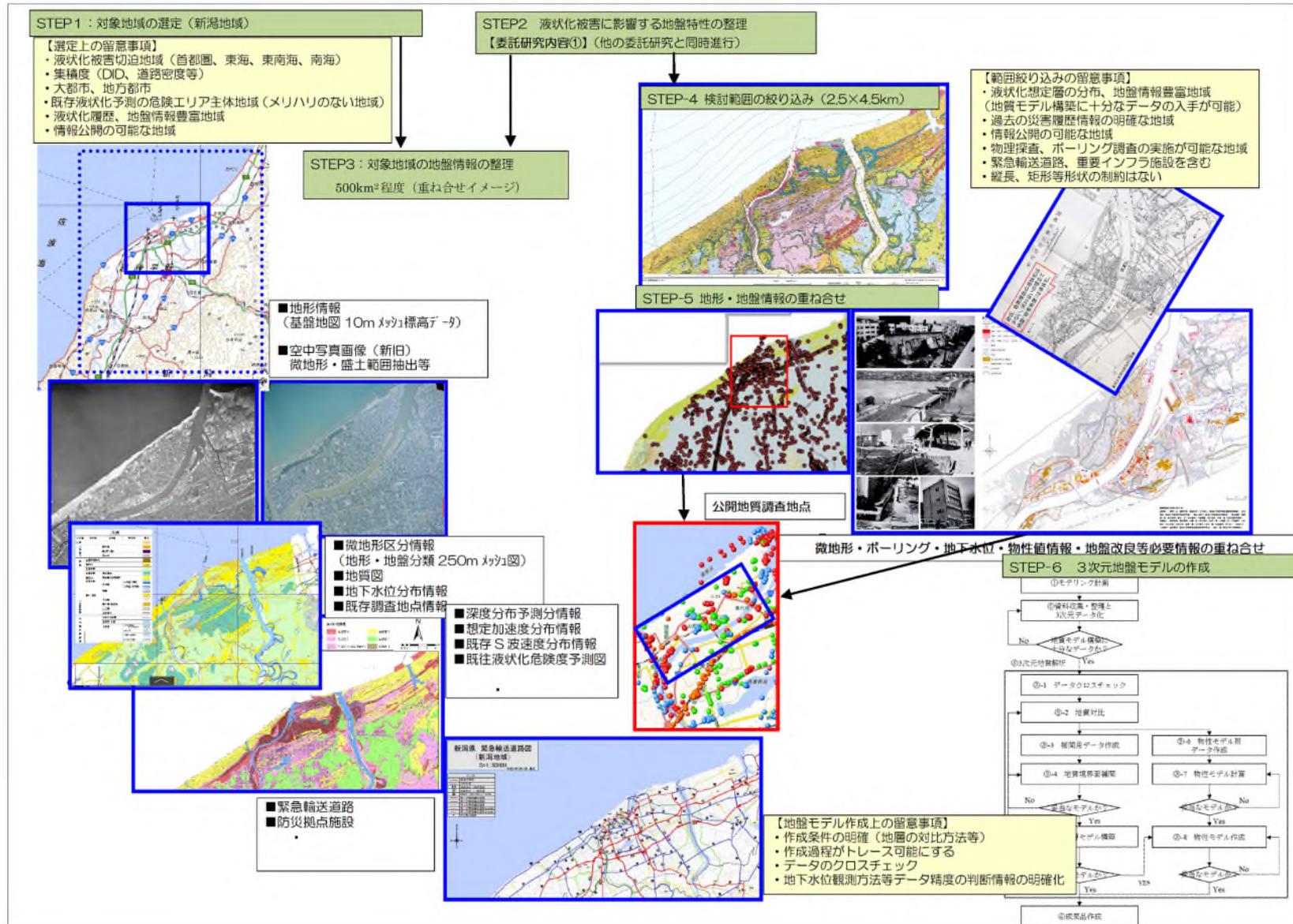


図 16 調査エリアの絞り込み

1.2. 地盤情報の収集

1.2.1. モデル作成に必要な地盤情報の整理

新潟地区におけるモデル作成のために収集した地盤情報等に係る資料は、表 5 に示すリストの通りである。

表 5 地盤情報に係る資料リスト

区分	種別	収集資料		発行年	データ属性	位置情報	解釈レベル	0次モデル 使用	3次元地盤モデ ル使用
		名称							
地形情報	DEM	国土地理院数値標高データ5mメッシュ		2015	事実	A	—	—	○
	DEM	国土地理院数値標高データ10mメッシュ		2014	事実	B	—	—	○
	DEM	国土地理院数値標高データ250mメッシュ		不明	事実	C	—	○	—
	地形解析図	傾斜図		—	事実	A	—	—	○
	地形解析図	陰影図		—	事実	A	—	—	○
	地形区分図	J-SHIS地形分類		2019	解釈	C	—	○	—
	古地図・治水履歴	江戸から昭和期における信濃川後部の流路変遷		2002	解釈	E	D	—	○
地盤情報	古地図・治水履歴	信濃川【下流】の現状		—	解釈	E	D	—	○
	地質図	新潟及び内野「図幅」5万分の1		2016	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟北部」2万5千分の1(初期整備版)		1977	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟南部」2万5千分の1(初期整備版)		1977	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟北部」2万5千分の1		2009	解釈	B	D	—	○
	地質図	治水地形分類図「新潟南部」2万5千分の1		2009	解釈	B	D	—	○
	地質図	越後平野の地盤と防災		2018	解釈	C	D	—	○
	地質図	シームレス地質図20万分の1		2015	解釈	C	D	○	—
	地質図	新潟県地盤図		2002	解釈	C	D	—	○
	地質図・断面図	越後平野中央部における沖積層層序の再検討		2002	解釈	D	C	—	○
	断面図・古地図	新潟市周辺の表層地質		1963	解釈	E	D	—	○
	地質断面図	新潟及び内野「図幅」5万分の1		2016	解釈	C	D	—	○
	地質断面図	ボーリングデータベースに基づく越後平野の沖積層モデル		2011	解釈	C	C	—	○
	地質断面図	ほくりく地盤情報システム		—	解釈	C	—	—	○
	既存地盤モデル	新潟県地震被害想定調査報告書(平成10年)		1998	解釈	D	—	—	—
	既存地盤モデル	J-SHIS AVS30		2019	解釈	C	—	○	—
	ボーリング	ほくりく地盤情報システム		—	事実	—	—	—	○
	ボーリング	kunijiban		—	事実	A	—	—	○
	ボーリング	国土地盤情報データベース		—	事実	A	—	—	○

収集したボーリングデータの位置図を図 17 に示す。ボーリングデータは、主に公開データとなっている Kunijiban および「ほくりく地盤情報システム³⁹⁾」からデータを収集した。

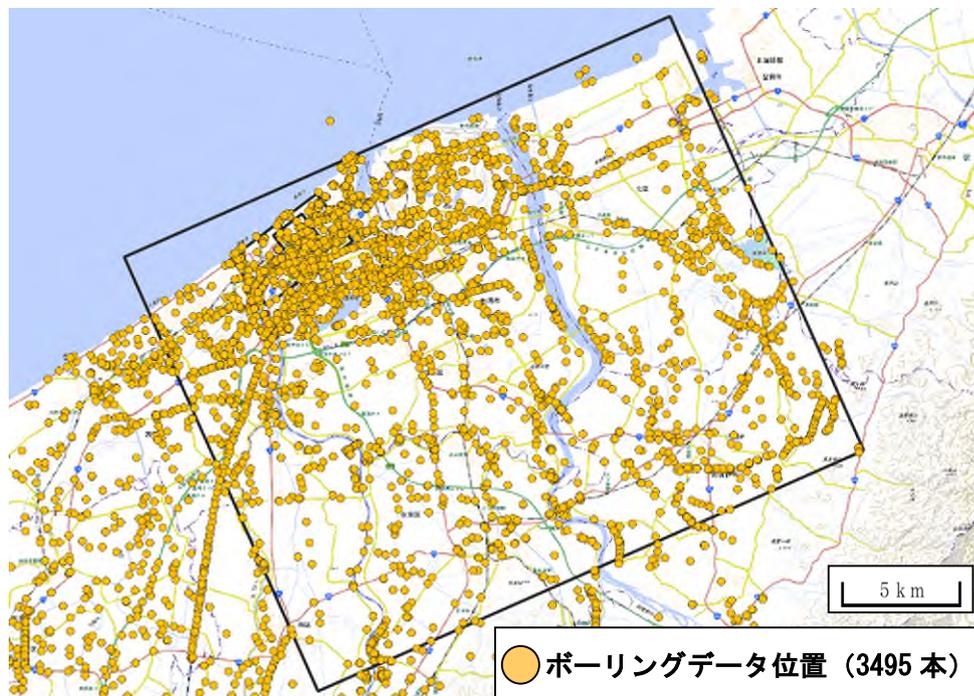


図 17 対象範囲周辺において収集したボーリングデータ位置図

1.3. 追加調査計画の立案

新潟地区の現地調査の方針は以下の通りとした。

- 人口密集度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴箇所及び液状化予測でのリスクの高い地域を対象として、微地形区分ごとの地盤特性に焦点を当てて調査を実施する。
- 新潟平野の工学的基盤は 100m 程度以上と深いことから、微動探査を実施して、既存データと合わせて工学的基盤深度を把握する。
- 浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫平野、盛土埋土）ごとにボーリング調査および PS 検層を実施して、地層分布、物理探査（表面波探査、3次元微動探査）との関係を把握する。また、サンプリングの実施、室内土質試験により地層ごとの物性値を把握して地盤の深さ方向の精度の向上を図る。
- PDC を多地点で実施することにより、地下水位、液状化・非液状化層厚を把握、表層 10m のモデル精度の向上を図る。
- 2次元表面波探査、3次元微動探査の実施により、地盤の連続性・非連続性を把握して3次元地盤構造モデルを作成し、地盤構造モデルの精度の向上を図る。

また、以下の理由により、ボーリング等の調査深度、調査手法、調査位置を決定した。

- 対象地域の工学的基盤の確認は、ボーリング調査で確認し、微動探査により補完する。
- ボーリング調査は、浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫平野、盛土埋土）ごとに3孔実施して、地層分布、物理探査との関係を把握する。各孔の氾濫平野（後背湿地）で 20m、砂州～旧河道で 50m 深度までの液状化対象層程度の深度とする。
- 地震動特性に影響が大きい動的変形特性を把握するために、砂質土層、粘性土層を対象にサンプリング、室内土質試験を実施する。
- ボーリングを補完するために PDC を 19 箇所実施する。

追加調査数量表をに、追加調査位置図をにそれぞれ示す。

表 6 追加調査数量表

追加調査	
調査項目	実施数量
・機械ボーリング	3 孔、計 90m
・PS 検層	3 孔、計 90m
・サンプリング（試料採取）	4 本
・PDC	19 箇所、計 182m
・物理探査（表面波探査）	11 測線、総延長 5.76km
・物理探査（1次元微動探査）	9 箇所
・物理探査（3次元微動探査）	1 領域（200m×500m）

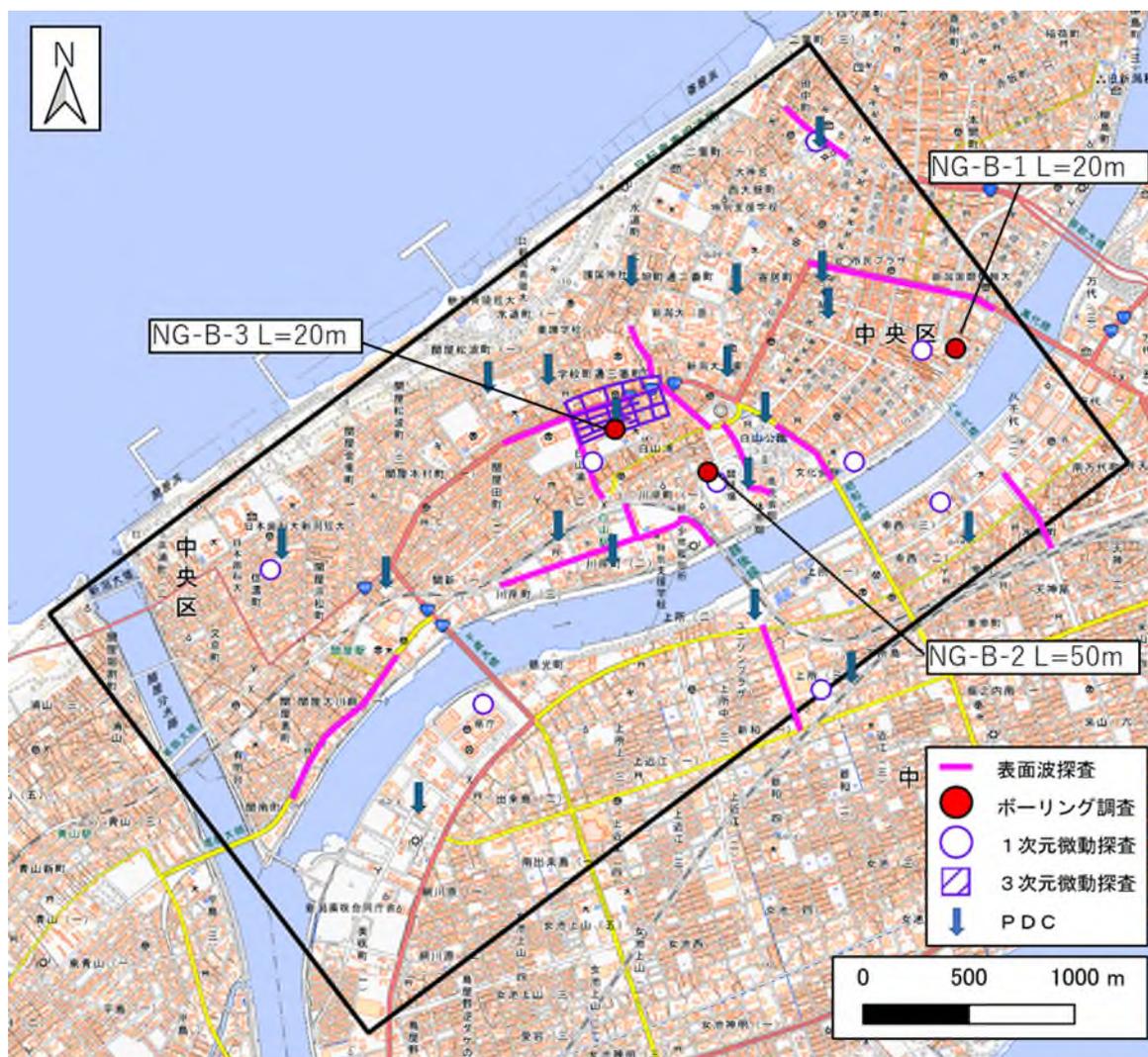


図 18 追加調査位置図

1.4. 3次元地盤構造モデルの作成

1.4.1. 3次元地盤構造モデルの作成手法

3次元地盤構造モデルを構築するためのアルゴリズム（計算手法）は、可能な限り客観性を持たせて比較検討が可能なアルゴリズムを採用した。

一般的な地層ソリッドモデルソフトウェアで採用されている手法として、サーフェスモデルは最適化原理（Horizon2000,BS-Horizon）を、3次元地盤構造モデルのボクセルモデルはIDW（Inverse Distance Weighted：逆距離加重法）を採用した。

1.4.2. サーフェスモデル等の構成

サーフェスモデルは、平面的分布に関しては「治水地形分類図(初期整備版)」、地質層序（深度方向）に関しては、「新潟及び内野「図幅」5万分の1」および、既往の地質調査報告書をベースに試作した。それらに対し、ボーリング柱状図や物理探査結果などの事実、他の文献と異なる部分に関しては、随時変更を加えた。図19にサーフェスモデルの例を示す。

本モデルの構築にあたり使用したボーリングデータ（調査結果含む）は、約825本である。

3次元地盤構造モデルでは、6つの地層についてサーフェスモデルで表現した。本地域ではSmm1層の下面が工学的基盤として設定されることから、以上の6つの地層に設定した。

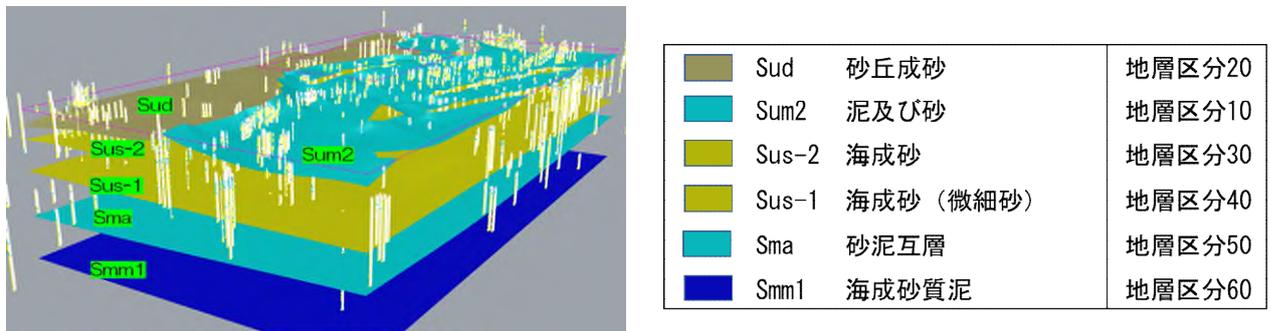


図19 サーフェスモデルの例（南西から望む）

1.4.3. ボクセルモデル（土質・N値）の構成

ボクセルモデルの作成にあたり、地層区分を設定した。地層区分は表7に示す通り、6区分に分類した。

表7 ボクセルモデルの構成

時代	地層名		記号	堆積物	地層区分	
完新世	白根層	上部	砂丘堆積物	Sud	砂丘成砂	地層区分20
			後背湿地堆積物	Sum2	泥及び砂	地層区分10
		海成層		Sus-2	砂（中間部N値高い）	地層区分30
				Sus-1	砂（中間部N値高い）	地層区分40
			Sma	砂泥互層	地層区分50	
	中部	汽水～海成層	Smm2	濁成泥		
		Smm1	海成砂質泥	地層区分60		
更新世		下部	淡水～汽水成層	Sl1	砂泥互層	
中期～後期	蒲原層群		K	泥、砂、礫及び泥炭		

図 20～図 22 に、各地層区分上面のボクセルモデルの例を示す。

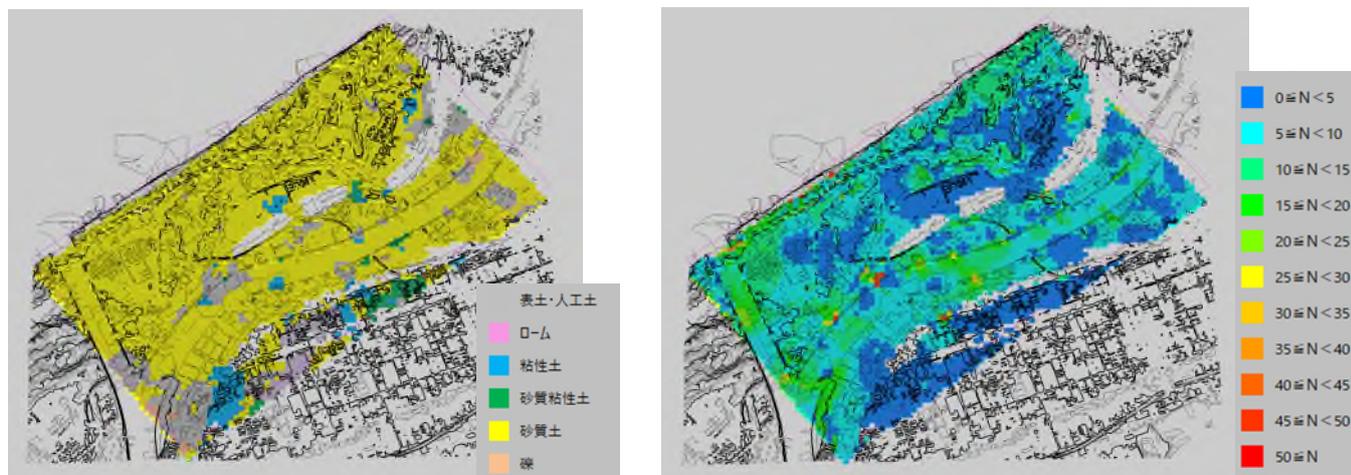


図 20 ボクセルモデル【地層区分 10・20 上面】の例 (左：土質、右：N 値)

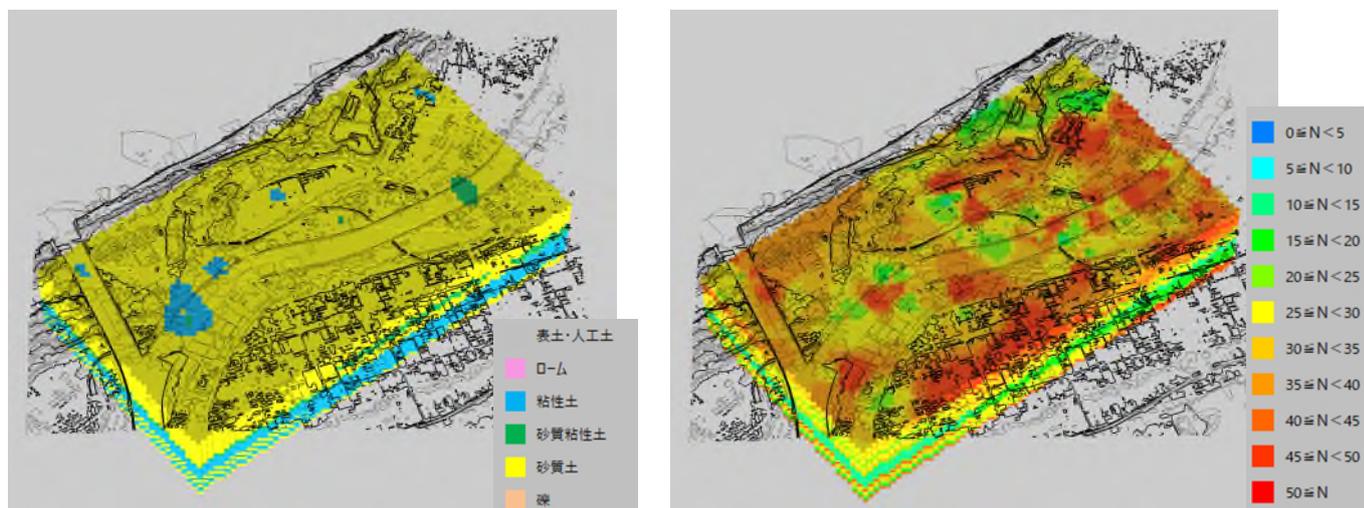


図 21 ボクセルモデル【地層区分 40 上面】の例 (左：土質、右：N 値)

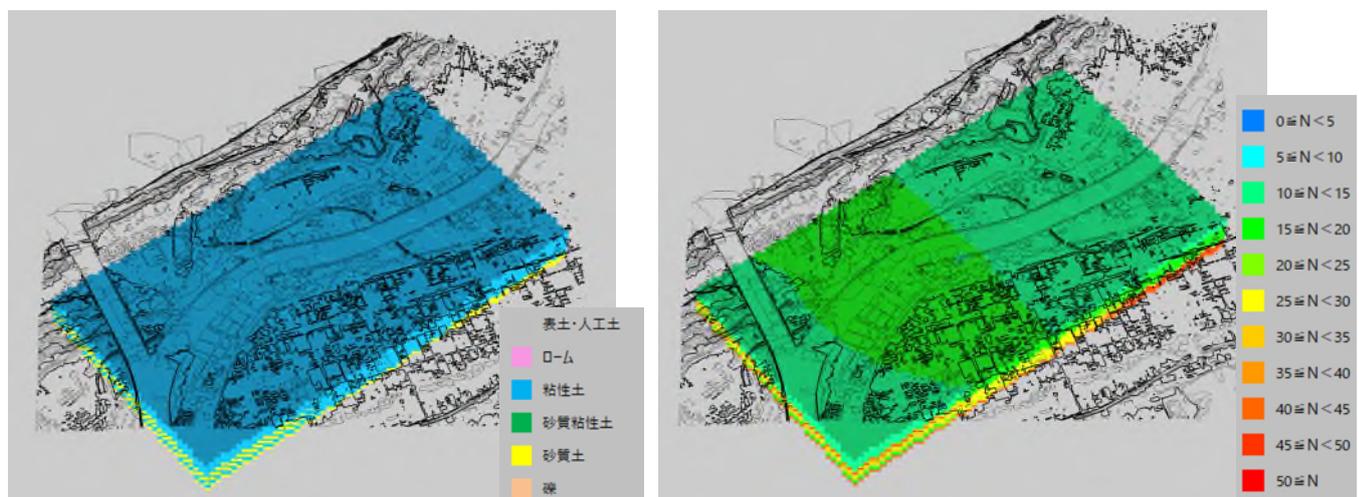


図 22 ボクセルモデル【地層区分 60 上面】の例 (左：土質、右：N 値)

1.4.4. 地下水位

PDC の結果から、地形状況や河川等の流況状況を参考に地下水位コンター図を作成した。図 23 に PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図を示す。この地下水コンター図を入力データに地層モデル同様、最適化原理 (BS-Horizon) を用い、地下水サーフェスモデルを作成した。サーフェスモデルの鳥観図を図 24 に示す。

このサーフェスモデルより、各メッシュにおける水位を抽出し、液状化解析に用いる地下水位として設定した。

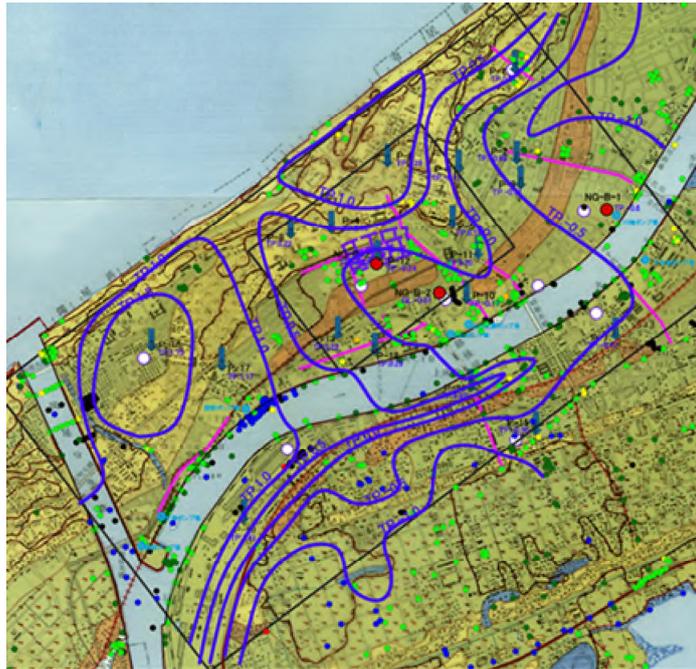


図 23 PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図

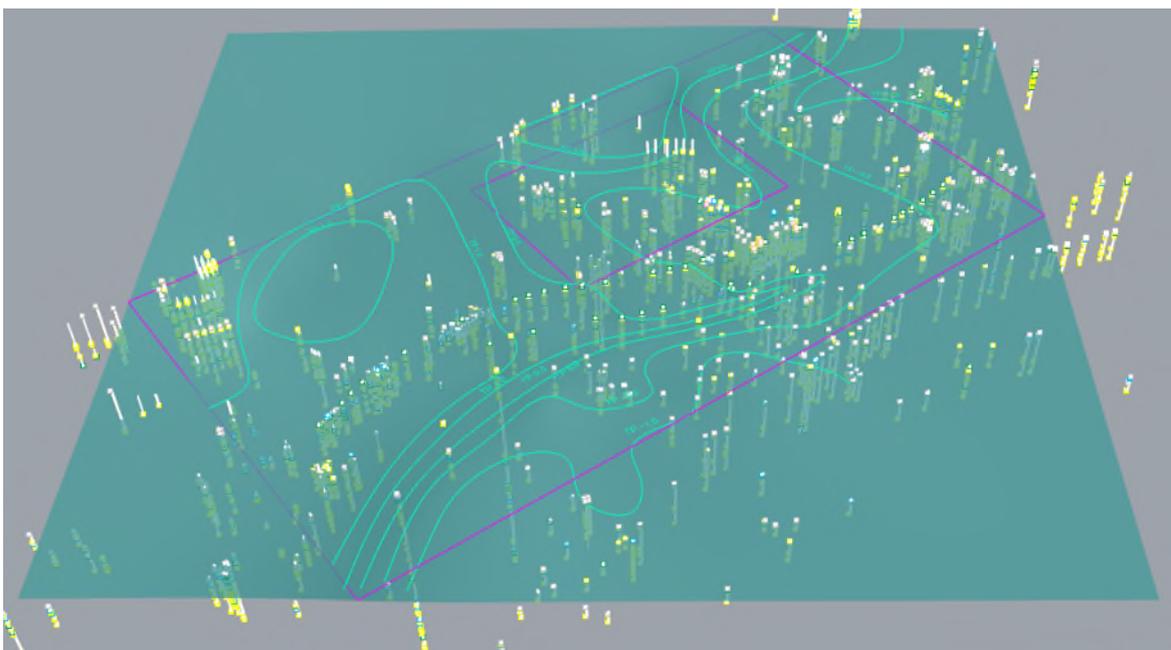


図 24 PDC 調査結果に基づく地下水サーフェスモデル図

1.4.5. 物性値

S波速度は1次元微動探査に基づき作成したN値とS波速度の換算式を用い、ボクセルモデルに割り当てた。

新潟地区においては、計9地点で1次元微動探査を実施した。計9地点のS波速度と3次元N値モデルとして構築されたN値について、地層ごとに対比した。その結果を図26に示す。図中赤丸は、3次元N値モデルのN値と1次元微動探査のS波速度の対比結果、黒丸は、道示によるN値と道路橋示方書による換算S波速度である。赤点線は、赤丸の点の回帰式であり、回帰にあたっては、S波速度はN値の1/3乗に比例することを確認した。

Sud（砂丘成砂）やSmm（海成砂質泥）等においては、道路橋示方書の換算式と同様な傾向が認められおり、当該式を用いることの妥当性が示されているものと考えられる。その一方で、Sus上部（海成砂上部）は、道路橋示方書の砂質土式の換算係数より小さい値を示している。このことは、道路橋示方書の換算式を用いた場合、剛性を小さく評価する恐れがあることを示している。1次元微動探査のS波速度を考慮することで、現地状況に即したN値とS波速度の対応関係を把握でき、解析モデルにその結果を反映できるものと考えられる。ここで、3次元N値モデルから換算したS波速度構造モデルを図25に示す。新換算式を用いることで、解析モデルに物理探査結果を反映できるものと考えられる。新潟地区では、N値と1次元微動探査のS波速度の対比結果を得られた換算式を用い、解析モデル構築に使用した。

図26に新潟地区の地層ごとのVs-Nのクロスプロット図を示す。

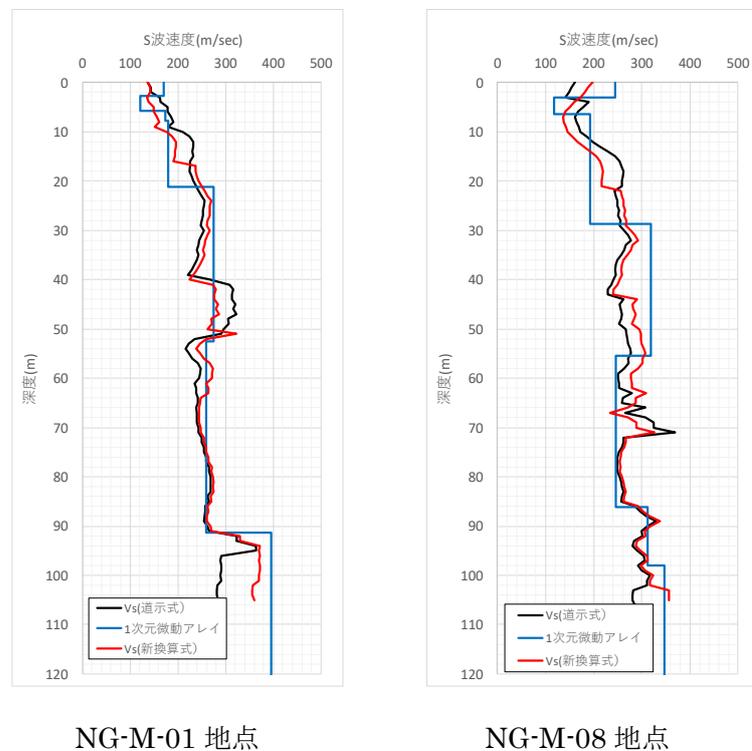


図25 新潟地区における1次元微動探査結果と3次元N値モデルから換算したS波速度構造モデル（赤：本検討による換算式、黒：道路橋示方書の式）の例

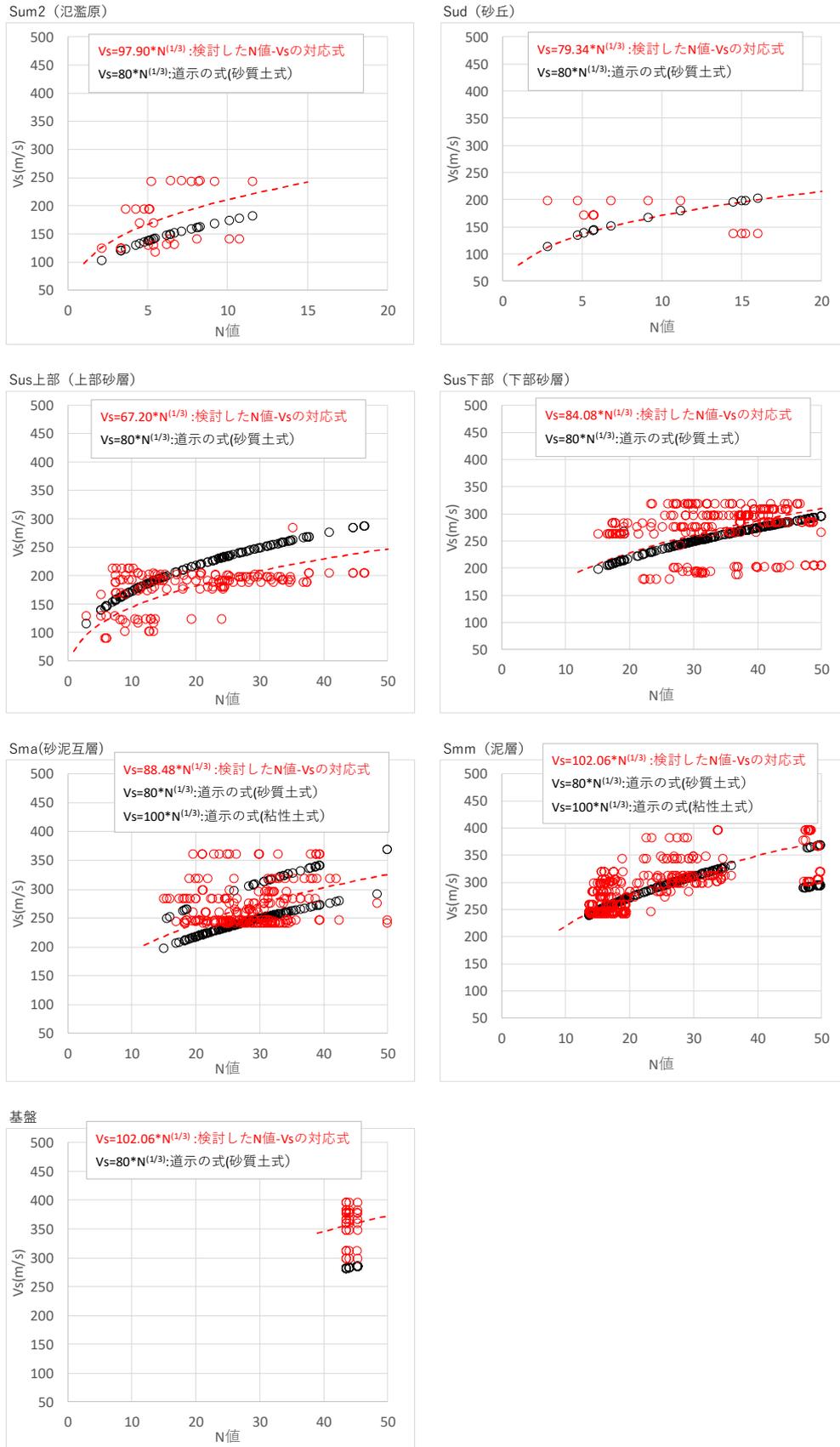


図 26 新潟地区の地層ごとの V_s - N のクロスプロット図

1.5. 既往地震の液状化被害による評価

1.5.1. 地震動の設定

地震動の設定は、当該地域で過去に大きな液状化被害を発生させた1964年の新潟地震を対象とした。入力地震動は、「1964年新潟地震の際の新潟市の工学的基盤における地震動の推定」（野津ら,第49回地盤工学研究発表会,2014.7）で設定された再現波形を使用した（図 27）。

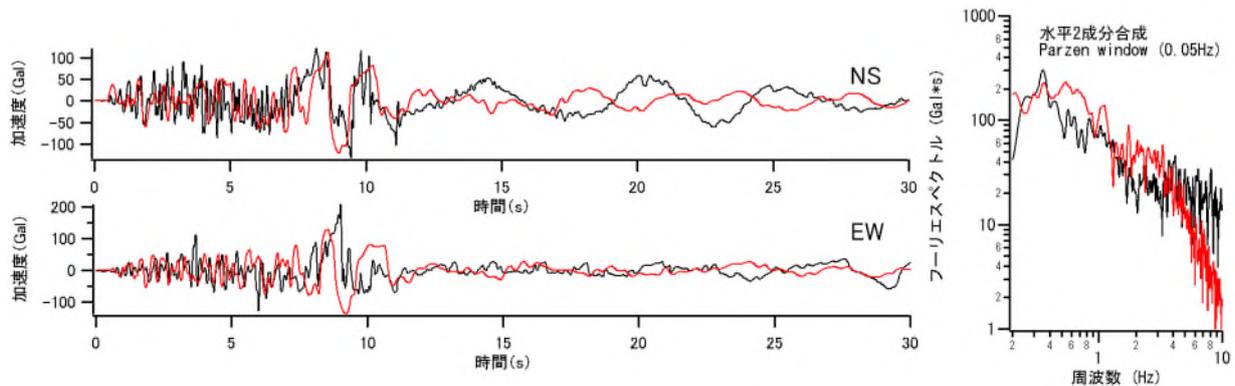


図 27 1964 年新潟地震（再現波（图中赤線））の加速度波形およびフーリエスペクトル

1.5.2. 地震応答解析

地震応答解析は、等価線形解析（SHAKE）⁴⁰とした。図 28に、地震応答解析結果による地表最大加速度分布図を示す。

解析の結果、地表面の応答加速度の最大値は467galで、全体的に加速度は入力に対して大きくなっている。特に、信濃川沿いの箇所では応答加速度が大きくなる傾向であり、沿岸部では応答加速度が100gal未満の箇所が見られる。

1.5.3. 液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップ

道路橋示方書（2017）に基づき深度0～10mの平均 F_L と平均 R を対象に、土質定数の低減係数（ D_E ）を算出し、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを作成した。図 29に、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを示す。

信濃川北西部の範囲において、低減係数が1/3を示すメッシュが散在し、土の強度及び支持力の低下の度合いが大きくなっている。その他の範囲は、低減係数は2/3または1が多く、土の強度及び支持力の低下の程度は低くなっている。

1.5.4. 液状化指標値（ P_L 値）マップ

メッシュごとの液状化判定は、道路橋示方書（2017）に準拠して実施した。液状化抵抗率（ F_L ）は R/L （ R ：動的せん断強度比、 L ：地震時せん断強度比）で表されるが、予測の精度向上を図るため、 L は地震応答解析結果により算出した。図 30に、液状化指標値（ P_L 値）マップを示す。

深度20mまでの F_L 値を用いて算出した P_L 値をマップに整理すると、信濃川沿いの広範囲で危険度が大きい（ $P_L \geq 15$ ）に該当するメッシュが分布する。

1.5.5. 液状化指標値 (Dcy 値) マップ

液状化に伴う水平変位 Dcy (≒沈下量) を建築基礎構造設計指針 (2019) に準拠して実施した。図 31 に、液状化指標値 (Dcy 値マップ) を示す。

信濃川沿いの領域では、液状化の程度が大($0.2 < Dcy \leq 0.4$)～中($0.1 < Dcy \leq 0.2$)に該当するメッシュが多く分布している。

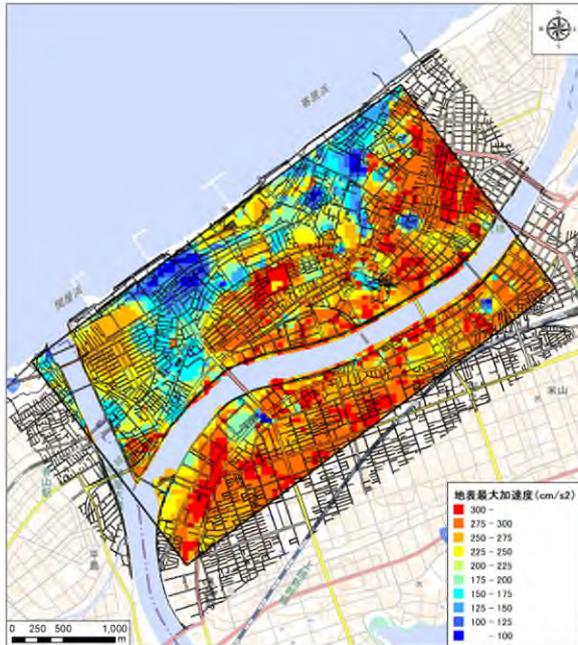


図 28 地震応答解析結果による地表最大加速度分布図

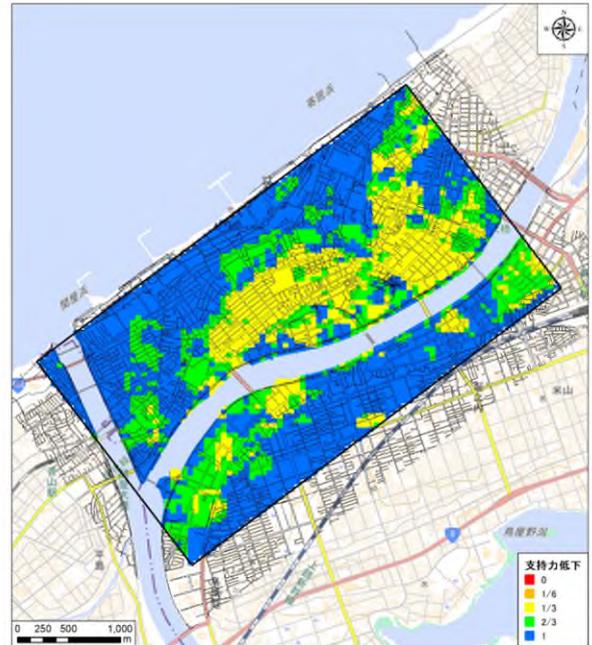


図 29 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

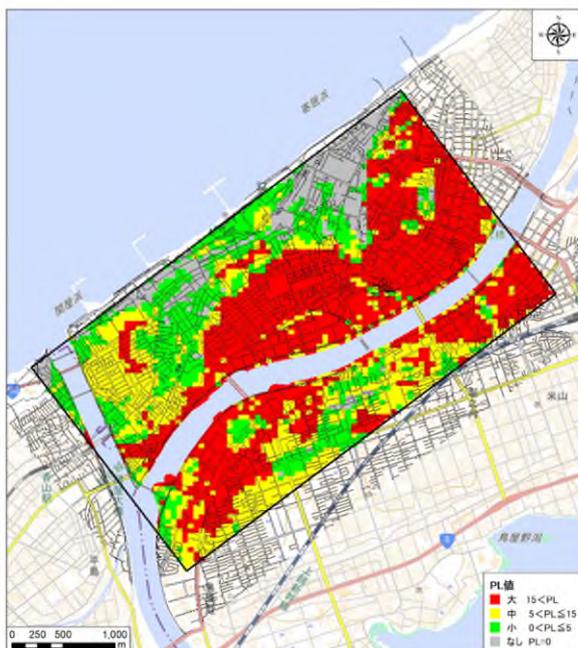


図 30 液状化指標値 (PL 値マップ)

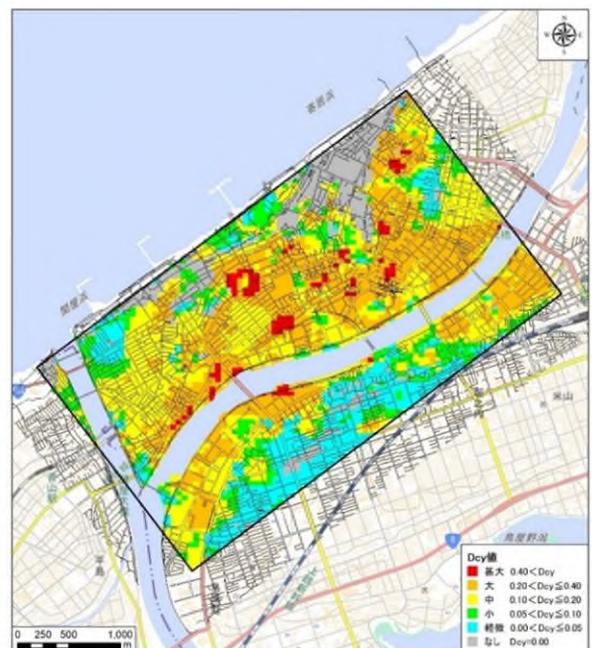


図 31 液状化指標値 (Dcy 値マップ)

1.5.6. 1964年新潟地震における被害実績との対比

図 32 に P_L 値と実被害箇所⁴¹⁾の比較を、図 33 に既存の液状化危険度マップにおける液状化危険度マップとの比較をそれぞれ示す。ここで実被害とは参考文献に示される被害のうち、本マニュアルで対象とする道路施設に関連する被害（亀裂、波状変形、陥没および地盤の膨れ上がり）を対象とした。

本ガイドライン（案）で作成した3次元地盤構造モデルによる液状化危険度マップと既往の液状化しやすさマップでは、液状化危険度の高い範囲（本研究のマップでは液状化危険度「大」、既往のマップでは危険度ランク4の範囲）は概ね整合する結果となった。既往の液状化しやすさマップは過去の地震における液状化発生状況や地形地質等に関する情報を元に作成されたものであり、比較的精度の高いものであると考えられる。

新潟地区は3次元的な地形の起伏や人工地盤が少ないことから、3次元地盤構造モデルに基づく液状化危険度マップは地形情報に基づく液状化危険度マップとほぼ同等の結果を与えている。このような地形を呈する地区においては3次元地盤構造モデルの作成は液状化危険度マップの高精度化に大きな影響を与え難いものと考えられる。



図 32 P_L 値と実被害箇所の比較

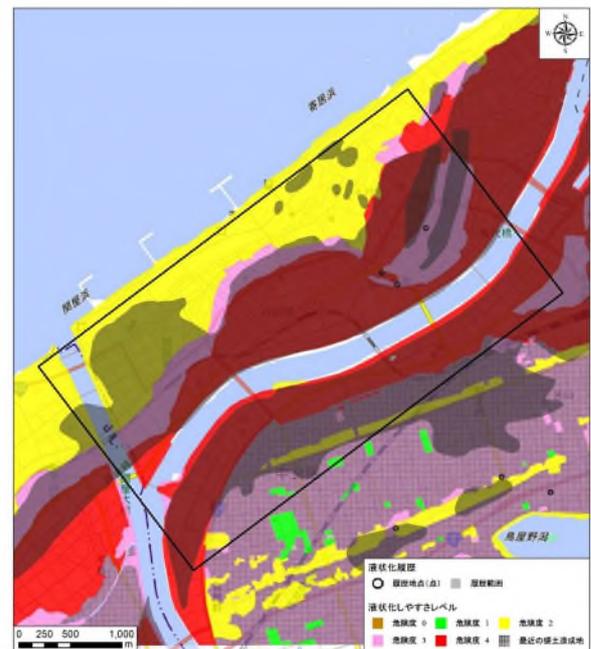


図 33 既存の液状化危険度マップ
(北陸地方整備局「新潟県内の液状化しやすさマップ」)

1.6. インフラ施設のハザードマップの作成

1.6.1. 道路施設（平面道路）の液状化被害ハザードマップ

国土技術政策総合研究所資料 第1034号・土木研究所資料 第4363号（平成30年4月）における知見等をもとに、道路の液状化に伴う危険度（道路危険度）を、下のように区分し、マップに表現した。（図 34）

- ・ A：危険性が高い（道路舗装厚^{※1}が0.8m未満）
- ・ B：危険性あり（非液状化層厚3m未満かつ直下に液状化層あり）
- ・ C：危険性は低い（非液状化層厚3m以上または深度3m以内に非液状化層^{※2}が分布）

※1 道路舗装厚は、路床改良を含んだものである。

※2 $F_L \geq 1$ の地層、洪積層、岩盤など

ただし、道路舗装厚の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。また、液状化対策実施の有無に関する資料も収集できていないことから、危険度区分には反映させていないことに留意されたい。

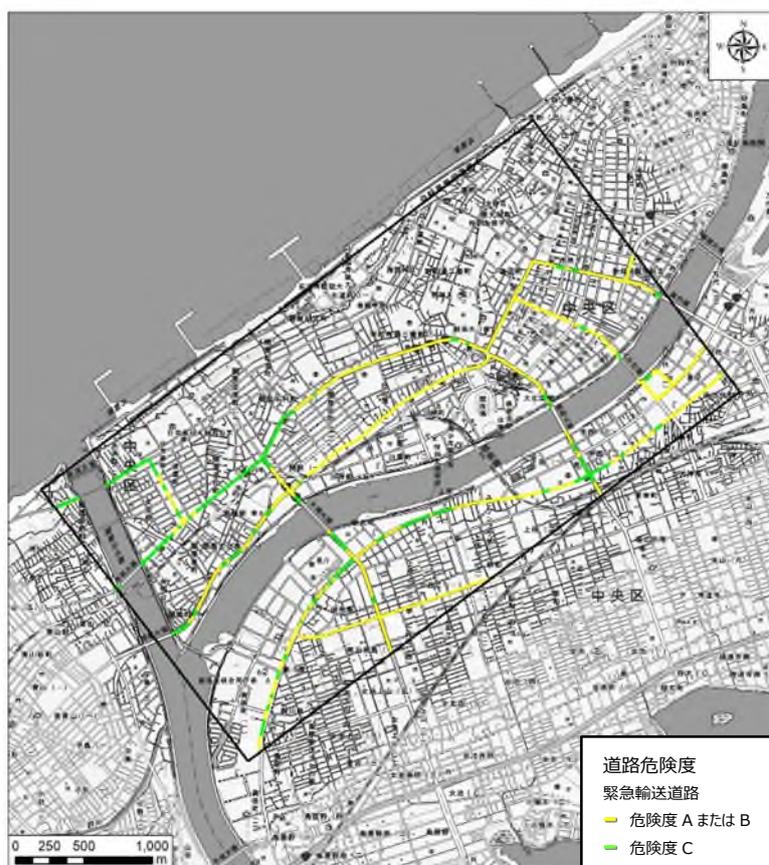


図 34 道路施設（緊急輸送道路）の液状化被害

1.6.2. 下水道施設（管路や人孔等）の液状化被害ハザードマップ

土木研究所成果報告書⁴（平成21年）における知見等をもとに、下水管路の液状化に伴う危険度（下水危険度）を、以下のように区分し、マップに表現した。（図 35）

- ・ A：危険性が高い（埋戻土の液状化対策工が未実施）
- ・ B：危険性あり（砂層土の平均N値 ≤ 7 または粘性土の平均N値 ≤ 5 ）
- ・ C：危険性は低い（砂層土の平均N値 > 7 かつ粘性土の平均N値 > 5 ）

※1 砂層土の平均N値は、深度5m以内に分布する砂質土のN値を平均したものである。

※2 粘性土の平均N値は、深度5m以内に分布する粘性土のN値を平均したものである。

ただし、埋戻土の液状化対策工の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。

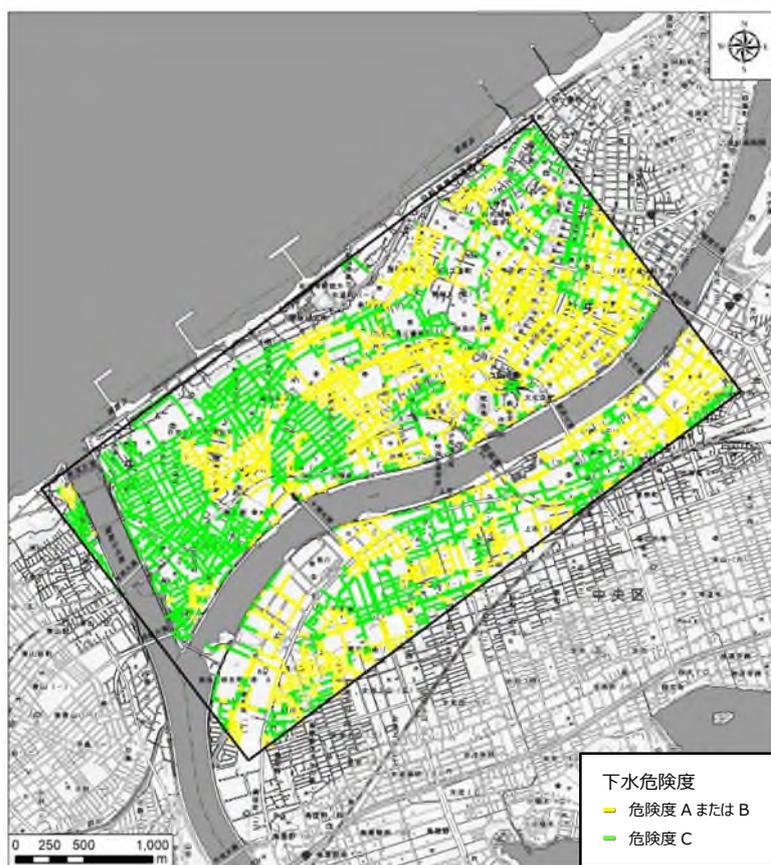


図 35 下水道施設の液状化被害

2. 神栖地区における3次元地盤構造モデルの作成事例

2.1.3 次元地盤構造モデルの作成範囲

社会インフラの強靱化を推進するために、インフラ施設の液状化被害推定手法を高精度化することが重要である。取り組み方針は、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮した3次元地盤構造モデルの構築、個別インフラ施設の液状化リスクの評価とした。目的の達成、取り組み方針から、神栖地区における広域な調査対象範囲（0次モデル作成範囲と呼ぶ）を、下記の観点で設定した（図 36）。

- ・人口・道路の密集している地区を含む範囲
- ・既往の被害想定で液状化危険度の高い箇所を含む範囲
- ・液状化層が広く分布すると考えられる沿岸低地を含む範囲

0次モデル作成範囲のうち、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮するため、3次元地盤構造モデルを作成する範囲（1次モデル作成範囲と呼ぶ）として、液状化評価の指標を自然条件などの関連する条件の違いによって検討可能な範囲を設定した。

- ・人口密集度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴
 - ・地盤情報が比較的想定可能な地域（地質モデル構築にデータの入手が可能地域）
 - ・2011年東北地方太平洋沖地震の際に、液状化による道路被害が集中
 - ・土砂の採掘跡地が埋められた人工造成地盤が存在
- ⇒液状化評価指標を条件の違いで検討が可能

【調査計画】

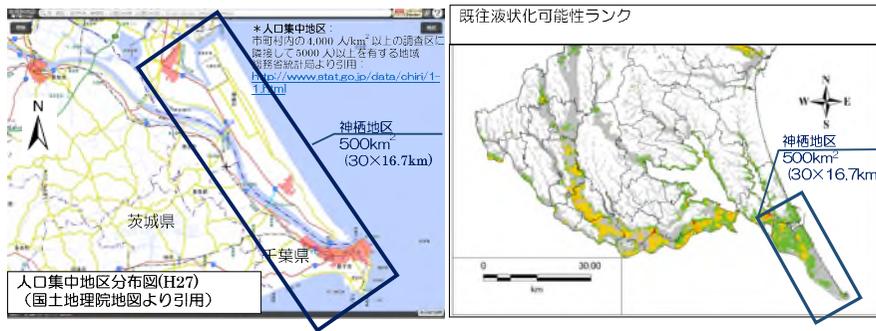
■ 既往調査の整理

神栖市や茨城県では、これまでも防災・減災対策が進められており、各種調査により液状化に関する検討結果も公表されている。表に各調査のアウトプットと指標をまとめた。

調査	アウトプット	指標
神栖市液状化ハザードマップ (神栖市, 2014年3月)	(宅地の) 液状化被害の可能性	宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案)(国文庫, 2013)
茨城県地震被害想定調査報告書 (茨城県, 2018年12月)	(地盤の) 液状化の可能性と液状化による沈下量	液状化可能性(岩崎ら, 1980) 沈下量(内閣府, 2012)

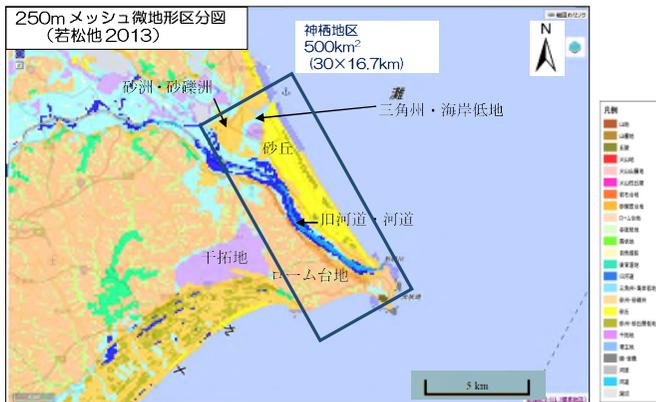
■ 対象地域の選定(対象面積 500km²)

- ・ 神栖市全域に加えて、利根川を挟んだ千葉県銚子市の一部を対象とする。
- ・ 2011年東北地方太平洋沖地震において液状化被害の多かった範囲を優先に実施する。



■ 対象地域の地形・地盤情報の整理

500km²程度(重ね合せイメージ)
空中写真、地形区分および地盤区分、既往調査資料、既往液状化予測図の整理



【解説】

- ・ 人口集中度が高い地域である。
- ・ 緊急輸送路が指定されている。
- ・ 被害が起こった地域である。

↓

- 災害時の緊急輸送の要となる
- 液状化被害が大きくなる可能性がある

【地盤モデル詳細範囲選定理由】

- ・ 人口集中度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴
- ・ 地盤情報が比較的想定可能な地域(地質モデル構築にデータの入手が可能地域)
- ・ 2011年東北地方太平洋沖地震の際に、液状化による道路被害が集中
- ・ 土砂の採掘跡地が埋められた人工造成地盤が存在する

→液状化評価指標を条件の違いで検討が可能

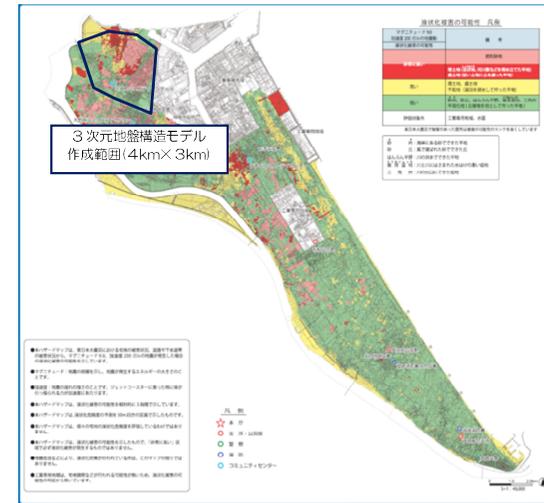


図 36 調査エリアの絞り込み

2.2. 地盤情報の収集

2.2.1. モデル作成に必要な地盤情報の整理

神栖地区におけるモデル作成のために収集した地盤情報等に係る資料は、表 8 リストの通りである。

表 8 地盤情報に係る資料リスト

収集資料			発行年	データ属性	位置精度	数量	解釈レベル	0次モデル使用	3次元地盤モデル使用	備考
区分	種別	名称								
地理情報	基盤地図	海岸線	2014~2019	事実	A				○	
	基盤地図	行政区画境界線	2014~2019	事実	A					
	基盤地図	道路線	2014~2019	事実	A				○	5mメッシュDEMに投影
	基盤地図	道路構成線	2014~2019	事実	A				○	5mメッシュDEMに投影
	基盤地図	軌道の中心線	2014~2019	事実	A				○	5mメッシュDEMに投影
	基盤地図	水域	2014~2019	事実	A					
	基盤地図	水涯線	2014~2019	事実	A				○	
地形情報		総務省統計局 人口集中地区境界図	2015	解釈	B					
	DEM	国土地理院数値標高データ5mメッシュ	2015	事実	A			-	○	
	DEM	国土地理院数値標高データ10mメッシュ	2014	事実	B			-	○	
	DEM	国土地理院数値標高データ250mメッシュ	不明	事実	C			○	-	
	地形解析図	傾斜図		事実	A				○	5mメッシュDEM用いてQGISにて作成
	地形解析図	陰影図		事実	A				○	5mメッシュDEM用いてQGISにて作成
	地形解析図	標高段彩図		事実	A				○	5mメッシュDEM用いてQGISにて作成
地形区分図	J-SHS地形分類		2019	解釈	C		D	○	-	
地盤情報	地質図	茨城県 1982 潮来・八日市場・鏡子 表層地質図 5万分の1	1989	解釈	B		D※	-	○	※図幅説明書不明
	地質図	治水地形分類図「鏡子」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	治水地形分類図「鹿島矢田部」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	治水地形分類図「小舟」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	治水地形分類図「神栖」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	治水地形分類図「常陸鹿島」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	治水地形分類図「佐原東部」2万5千分の1	2012	解釈	B		D	-	○	
	地質図	シームレス地質図 20万分の1	2015	解釈	C		D	○	-	
	既存地盤モデル	J-SHS AVS30	2019	解釈	C		D※	○	-	※微地形区分由来
	既存地盤モデル	神栖市の既存液状化データ 250mメッシュ	2017?	解釈	D		D	○	-	
	文献	東日本大震災による神栖市深芝・平泉地区の採掘跡地における液状化被害の分布	2015	解釈	B		D	-	○	
	ボーリング	kunijiban	-	事実	A	-	-	-	○	
	ボーリング	既往地質調査報告書	-	事実	A	79	-	-	○	
ボーリング	国土地盤情報データベース	-	事実	A	199	-	-	○	kunijibanと重複	

収集したボーリングデータの位置図を図 37 に示す。ボーリングデータは主に、公開データとなっている Kunijiban および神栖市からの提供データを収集した。



図 37 対象範囲周辺において収集したボーリングデータ位置図

2.3. 追加調査計画の立案

神栖地区の現地調査の方針は以下の通りとした。

- 人口密集度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴箇所及び液状化予測でのリスクの高い地域を対象として、微地形区分ごとの地盤特性に焦点を当てて調査を実施する。
- 浅層の液状化対象層について微地形（砂州、三角州・海岸低地、干拓地）ごとにボーリング調査およびPS検層を実施して、地層分布、物理探査（表面波探査、3次元微動探査）との関係を把握する。また、サンプリングの実施、室内土質試験により地層ごとの物性値を把握して地盤の深さ方向の精度の向上を図る。
- PDCを多地点で実施することにより地下水位、液状化・非液状化層厚を把握、表層10mのモデル精度の向上を図る。
- 物理探査により、実被害の大きかった人工改変地範囲を把握し、3次元地盤構造モデルの精度の向上を図る。

また、以下の理由によりボーリング等の調査深度、調査手法、調査位置を決定した。

- 対象地域の工学的基盤の確認は、ボーリング調査によるPS検層で確認し、補完する。ボーリングの掘削深度は25～40m程度の液状化対象層程度の深度とする。
- ボーリング調査は浅層の液状化対象層について微地形（砂州、三角州・海岸低地、干拓地）ごとに3孔数孔実施して、地層分布、物理探査との関係を把握する
- 地震動特性に影響が大きい動的変形特性を把握するために、地域の埋土層、沖積の砂質土層や粘性土層、洪積の砂礫層を狙ってサンプリング、室内土質試験を実施する。
- ボーリングを補完するためにPDCを20箇所実施する。

追加調査数量表を表9に、追加調査位置図を図38にそれぞれ示す。

今回の作成例では、実被害のあった箇所について重点的に追加調査を計画したが、追加調査位置図を見ても地盤情報が乏しい箇所が見られる。現状の課題として、インフラ施設の被害がどのような地盤状況に特に影響が大きいのか不明確であるため、追加調査をどの場所でどの程度実施すればよいか把握することは困難である。

表 9 追加調査数量表

追加調査	
調査項目	実施数量
・機械ボーリング	4 孔、計 128m
・PS 検層	4 孔、計 123m
・サンプリング（試料採取）	12 本
・PDC	20 箇所、計 182m
・物理探査（表面波探査）	4 測線、総延長 11.7km
・物理探査（3次元微動探査）	1 領域（600m×480m）

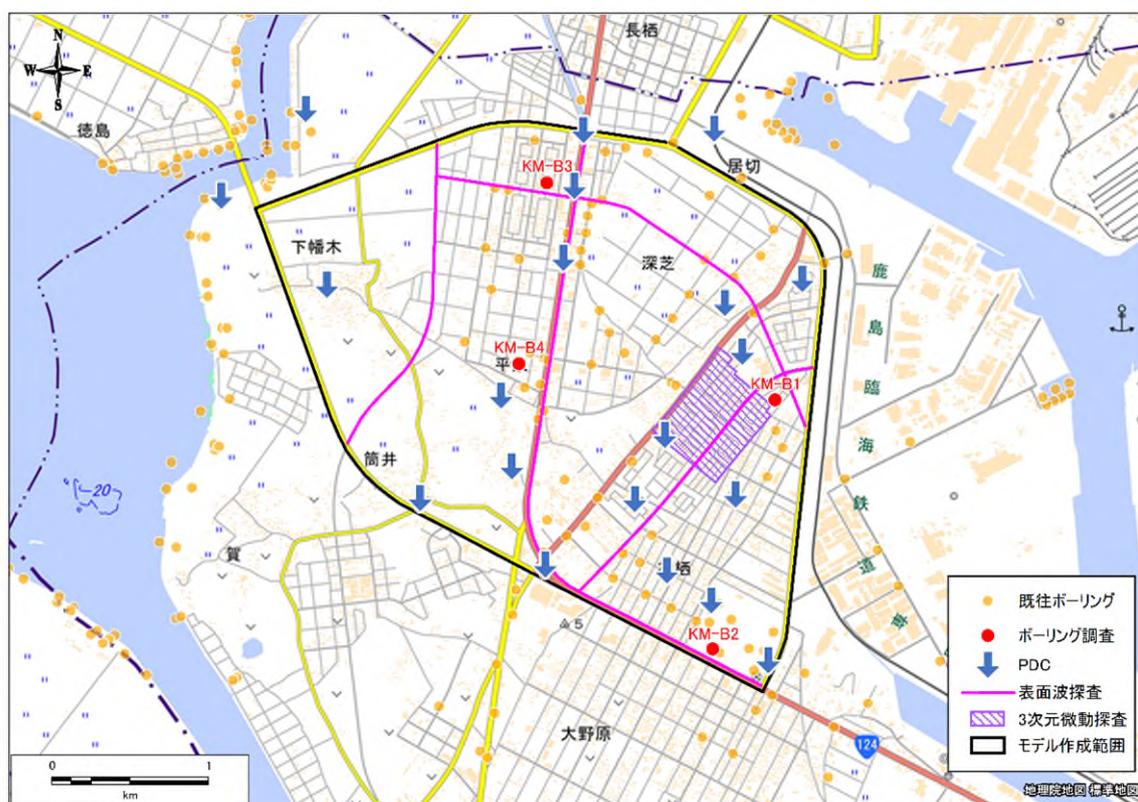


図 38 追加調査位置図

追加調査によるボーリングや PS 検層の結果から土砂採掘跡の埋め戻しの基底面と S 波速度 200m/s の対応が比較的良いことが分かったため、人工改変地において 3 次元微動探査を実施して、埋め戻しの分布を把握することを試みた。図 39 に、S 波速度 200m/s の等値面深度分布を示す。図より、液状化評価に影響が大きい埋め戻しの詳細な深浅状況の違いが確認できる。

また、左図ではボーリングのみで作成したコンター図（黒線）、右図では、微動探査を考慮して作成したコンター図（黒線）を示している。図より、ボーリングのみで作成したコンター図では、人工改変形状を表現できていないことが確認できる。

以上より、微動探査結果を取り入れることで、人工改変地の埋め戻し状況を加味したモデル作成につなげることが可能となった。

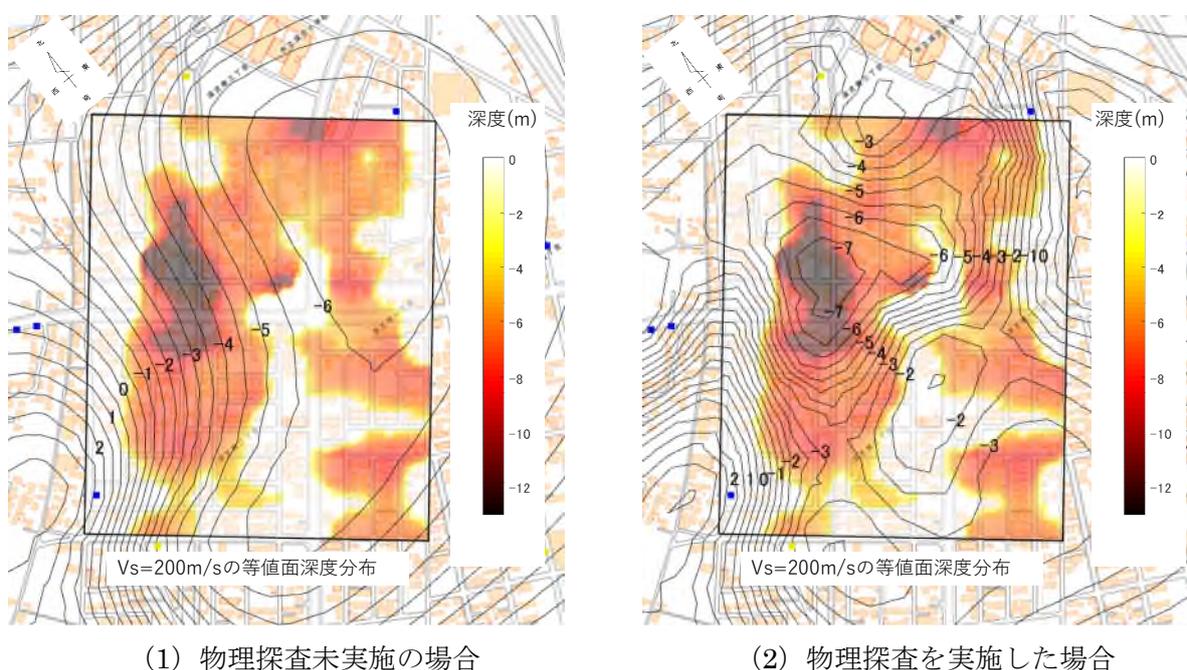


図 39 物理探査実施有無の比較

2.4. 3次元地盤構造モデルの作成

2.4.1. 3次元地盤構造モデルの作成手法

3次元地盤構造モデルを構築するためのアルゴリズム（計算手法）は、可能な限り客観性を持たせて比較検討が可能なアルゴリズムを採用した。

一般的な地層ソリッドモデルソフトウェアで採用されている手法として、サーフェスモデル（地質境界面）は最適化原理（Horizon2000,BS-Horizon）を、3次元地盤構造モデルのボクセルモデルはIDW（Inverse Distance Weighted：逆距離加重法）を採用した。

2.4.2. サーフェスモデル等の構成

サーフェスモデルは、平面的分布に関しては「治水地形分類図(初期整備版)」、地質層序（深度方向）に関しては、既往の地質調査報告書をベースに試作した。サーフェスモデルでは、埋土層、完新統、更新統の3つの地層についてサーフェスモデルで表現した。

それらに対し、ボーリング柱状図や物理探査結果などの事実、他の文献と異なる部分に関しては、随時変更を加えた。なお、本モデルの構築にあたり使用したボーリングデータ（調査結果含む）は302本である。

作成した地層ソリッドモデルの例を図40に示す。

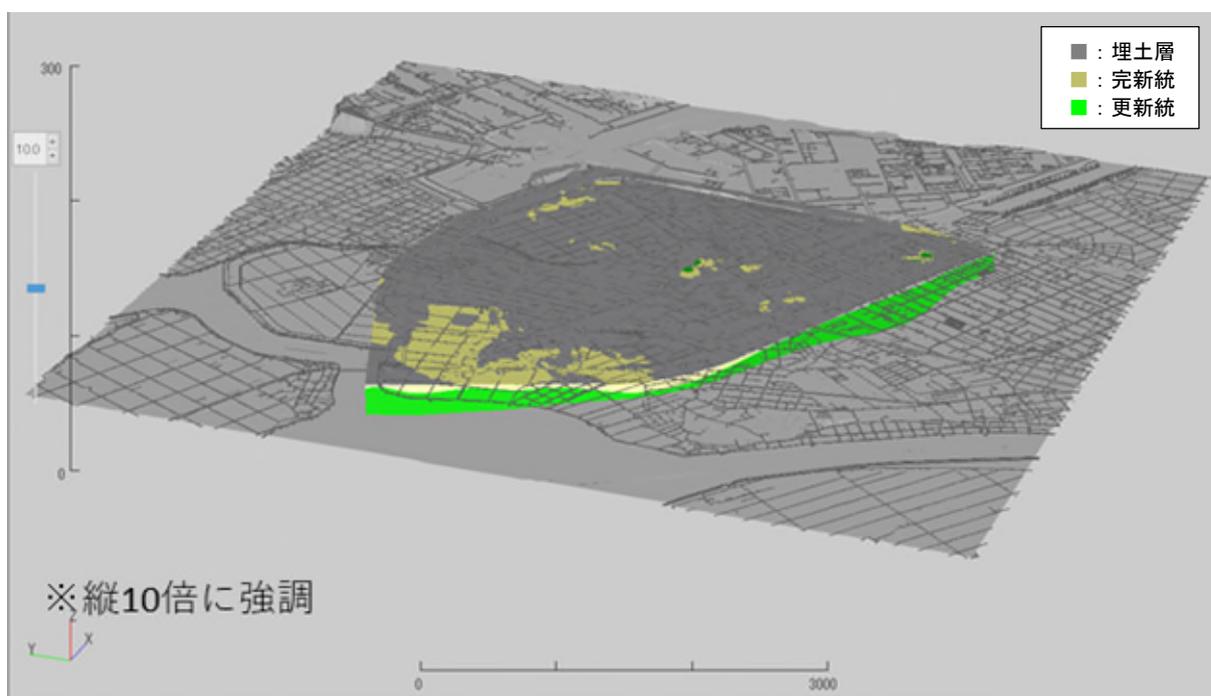


図40 地層ソリッドモデルの例

2.4.3. ボクセルモデル（土質・N値）の構成

ボクセルモデルの作成にあたり、地層区分を設定した。地層区分は前節の3区分に分類した。3次元ボクセルモデルの例を図41～図42にそれぞれ示す。

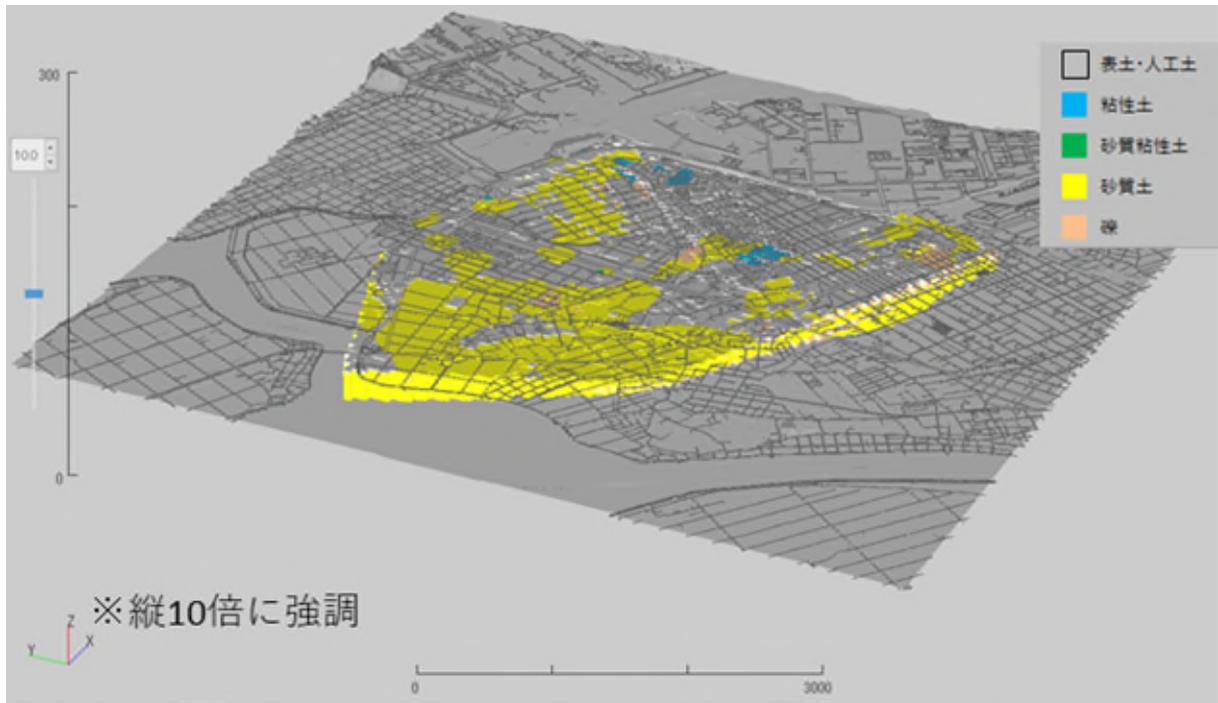


図 41 3次元土質区分ボクセルモデルの例

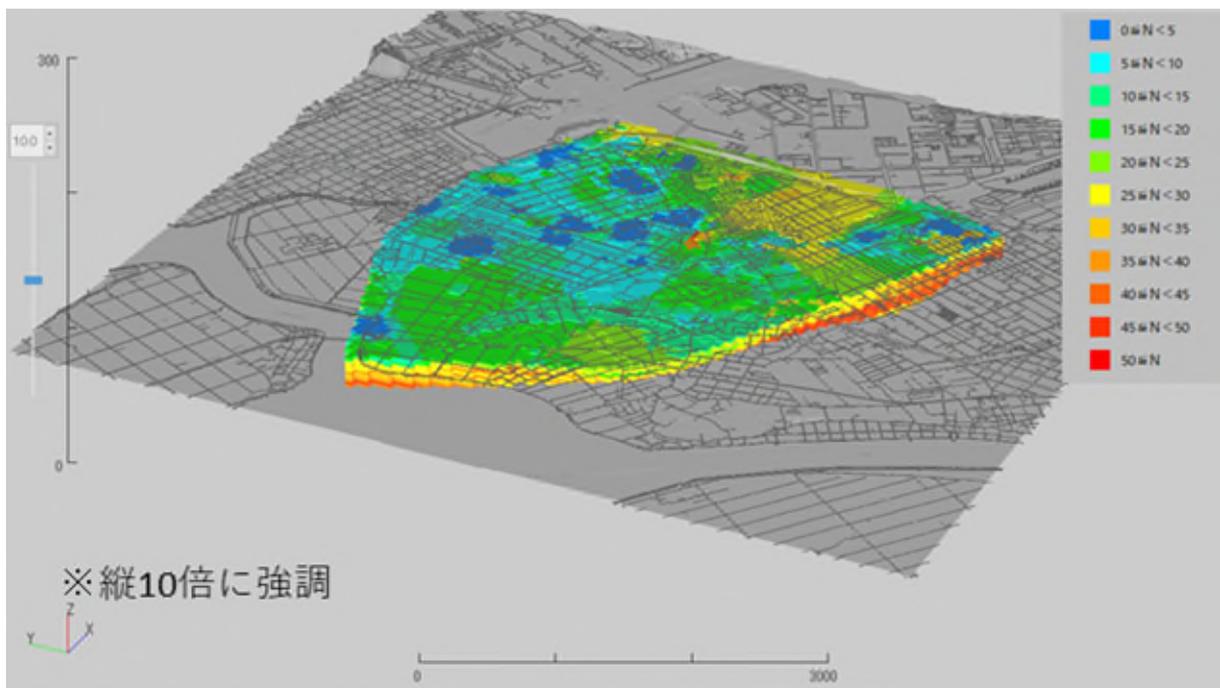


図 42 3次元N値ボクセルモデルの例

2.4.4. 地下水位

PDC 結果から、地形状況や河川等の流況状況を参考に地下水位コンター図を作成した。この地下水コンター図を入力データに地層モデル同様、最適化原理 (BS-Horizon) を用い、地下水サーフェスモデルを作成した。PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図と地下水サーフェスモデル図を図 43 に示す。

このサーフェスモデルより、各メッシュにおける水位を抽出し、液状化解析に用いる地下水位として設定した。なお、作成に用いた地下水位は、液状化対策前のもので設定したものである。

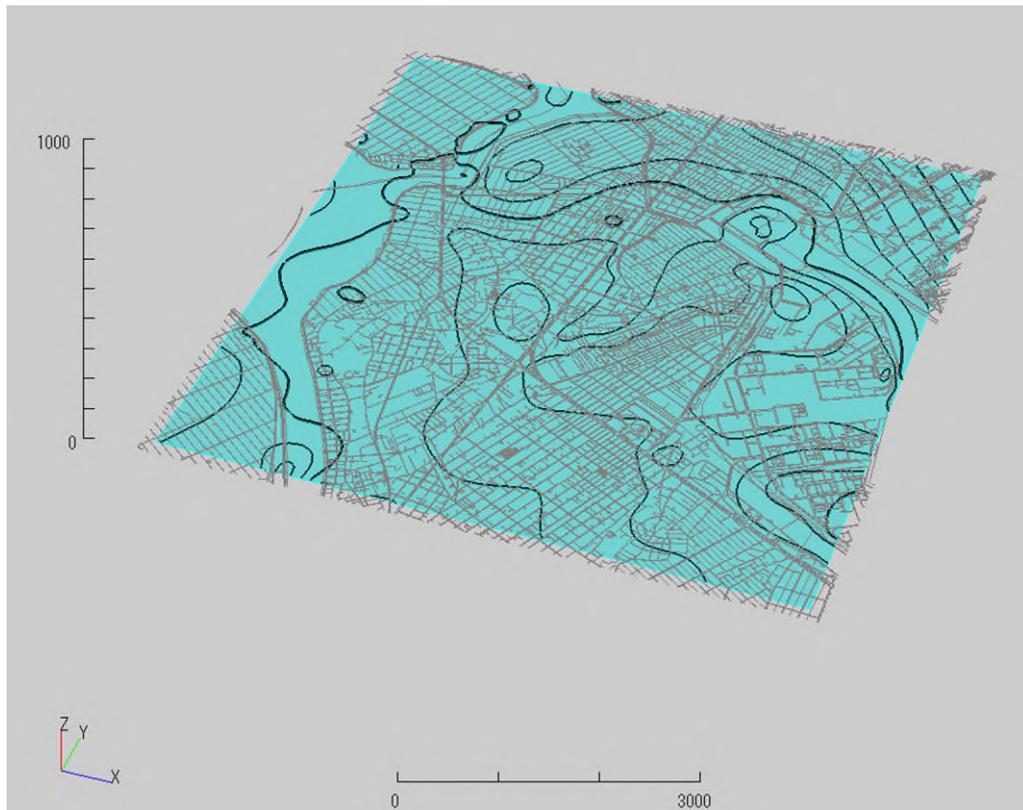


図 43 PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図と地下水サーフェスモデル図

2.4.5. 物性値

解析に用いた物性値は、現地調査・室内土質試験の結果または道路橋示方書に基づく一般値をもとに設定し、3次元地盤構造モデルを基にメッシュごとに作成したボクセルモデルへ物性値を割り当てた。

表 10 に地震応答解析および液状化判定に用いた地盤定数の一覧を示す。各層の S 波速度は、道路橋示方書による N 値と S 波速度の関係より算出したが、物理探査を実施したエリアについては探査結果より得られた S 波速度を適用した。なお、動的変形特性については、室内土質試験結果があるものはそれらを利用し、ないものについては土木研究所による特性を適用した。図 44 に使用した室内試験結果に基づく動的変形特性を示す。動的変形特性試験の結果は、地震応答解析への利用を踏まえて、H-D (Hardin-Drnerich) モデルに準拠して整理を行ったが、R-O (Ramberg-Osgood) モデルをはじめ各種提案がなされており、再現性などを加味して適宜選択する必要がある。

表 10 地盤定数一覧表

地質分類	土質分類	単位体積重量 (kN/m ³)	細粒分含有率 (%)	平均粒径 (mm)	塑性指数	
沖積	表土・人工土	土質不明	16.7	56.6	0.02	—
		粘性土	16.7	56.6	0.03	—
		砂質土	18.2	11.9	0.23	—
	粘性土	17.8	56.6	0.03	—	
	砂質粘性土	17.8	56.6	0.04	10	
	砂質土	18.3	22.7	0.14	—	
	砂礫	19.2	8.2	1.69	—	
洪積	粘性土	17.8	56.6	0.03	—	
	砂質粘性土	17.8	56.6	0.04	—	
	砂質土	18.3	9.84	0.23	—	
	砂礫	19.2	6.05	1.28	—	

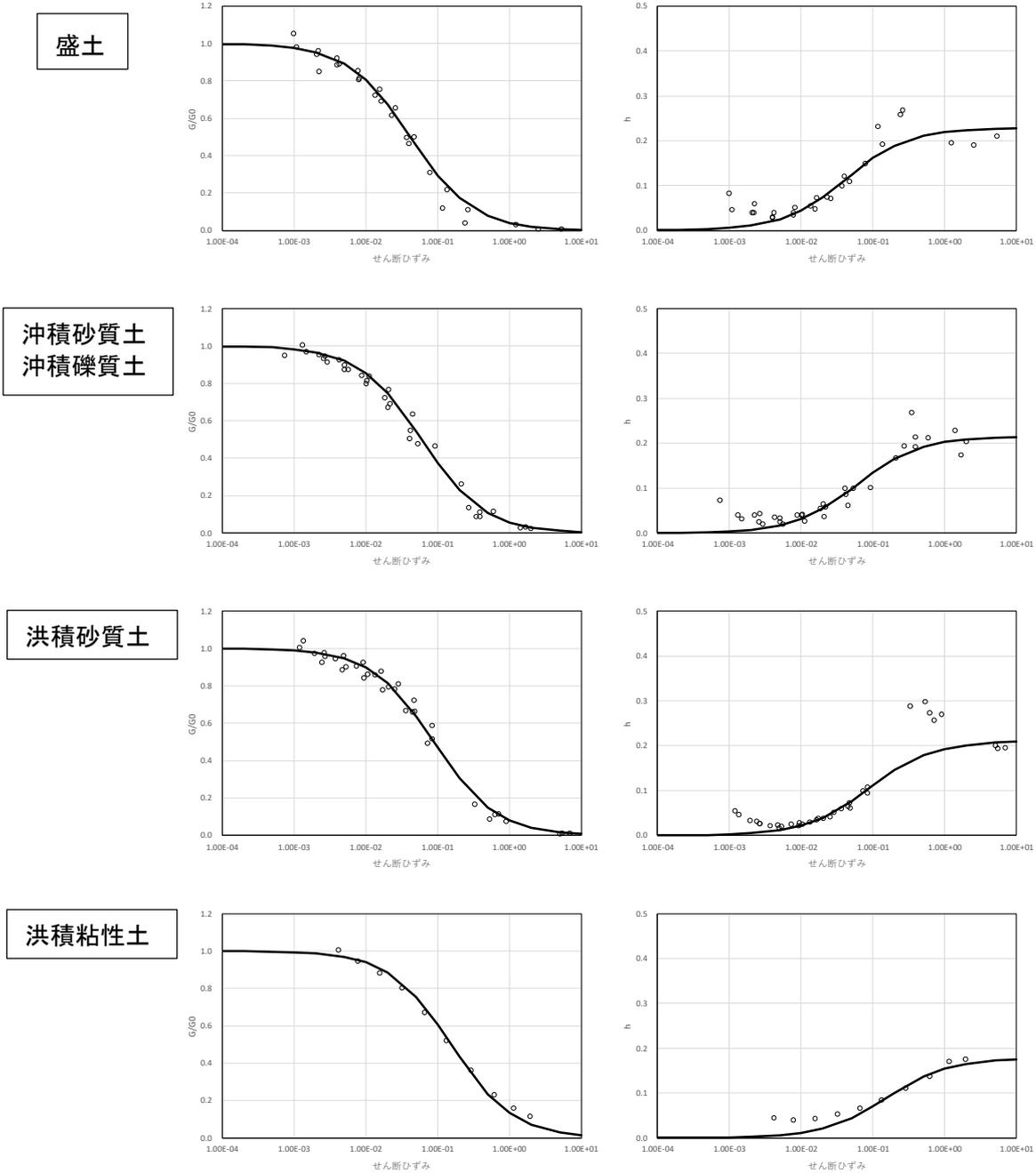


図 44 使用した室内試験結果に基づく動的変形特性

(左図 : G/G_0 - γ 曲線、右図 h - γ 曲線)

2.5. 既往地震の液状化被害による評価

2.5.1. 地震動の設定

地震動の設定は、当該地域で過去に大きな液状化被害を発生させた2011年の東北地方太平洋沖地震を対象とした。当該地域の比較的近傍にあるKiK-net波崎2では、地表の地震記録が得られている。そこで、地表の観測波形よりKiK-net波崎2の地盤構造を用いて工学的基盤相当まで線形弾性体として引き戻した波形を入力地震動として使用した（図 45）。

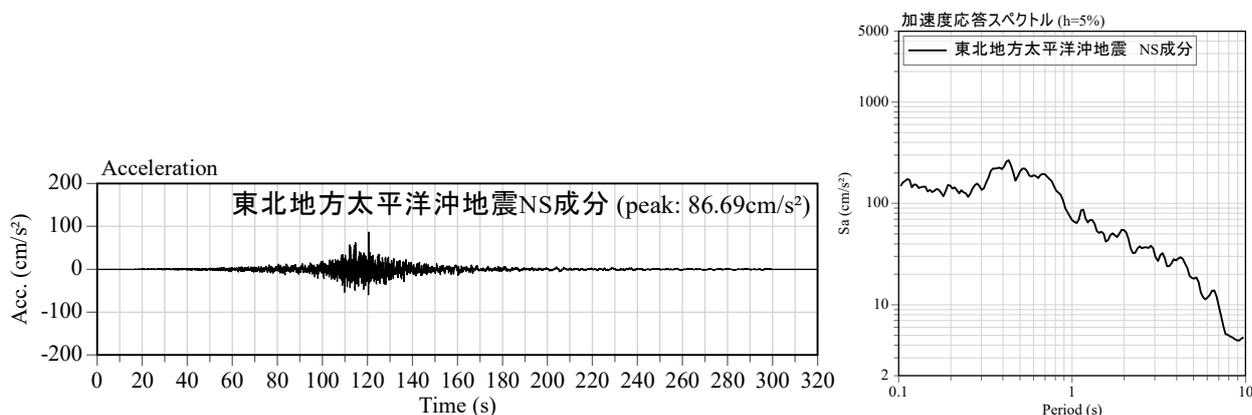


図 45 東北地方太平洋沖地震の加速度波形および加速度応答スペクトル (h=5%)

2.5.2. 地震応答解析

解析手法は等価線形解析 (SHAKE) とした。図 46に、地震応答解析結果による地表最大加速度分布図を示す。

入力加速度に対して、ほとんどのメッシュにおいて応答加速度は増幅して大きくなっており、最大値は371galであった。

2.5.3. 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下) マップ

道路橋示方書 (2017) に基づき深度0~10mの平均FLと平均Rを対象に、土質定数の低減係数 (D_E)を算出し、液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下) マップを作成した。図 47に、液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下) マップを示す。

低減係数は1/6や1のエリアが多いが、一部中央部や東部では0となっており、東北地方太平洋沖地震で被害が多かったエリアで支持力が低下する結果となっている。

2.5.4. 液状化指標値 (P_L値) マップ

メッシュごとの液状化判定は、道路橋示方書 (2017) に準拠して実施した。液状化抵抗率 (F_L) はR/L (R: 動的せん断強度比、L: 地震時せん断強度比) で表されるが、予測の精度向上を図るため、Lは地震応答解析結果により算出した。図 48に、液状化指標値 (P_L値) マップを示す。

深度20mまでのF_L値を用いて算出したP_L値をマップに整理すると、一部についてはなし (P_L=0) となっているものの、中~大となっているエリアが多い。

2.5.5. 液状化指標値 (Dcy 値) マップ

液状化に伴う水平変位 Dcy (≒沈下量) を建築基礎構造設計指針 (2019) に準拠して実施した。図 49 に、液状化指標値 (Dcy 値マップ) を示す。

大部分では、液状化の程度が軽微 ($0 < D_{cy} \leq 0.05$) であるが、国道 124 号線付近では、大 ($0.2 < D_{cy} \leq 0.4$) ~ 小 ($0.05 < D_{cy} \leq 0.1$) となっているメッシュが多く見られる。

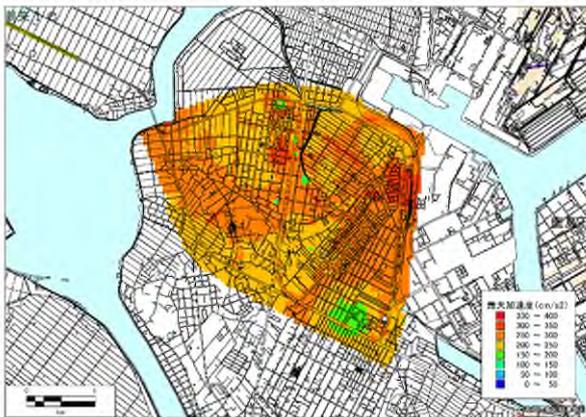


図 46 地震応答解析結果による地表最大加速度分布図

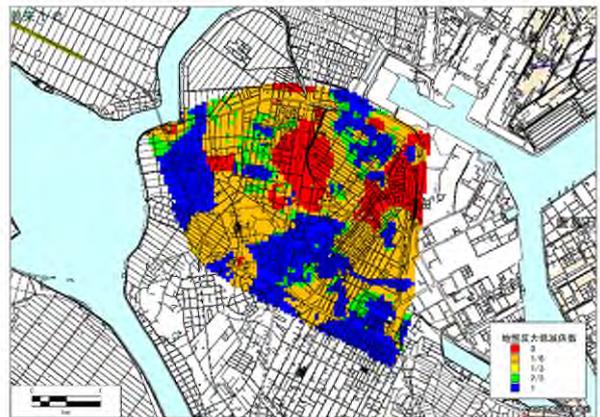


図 47 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

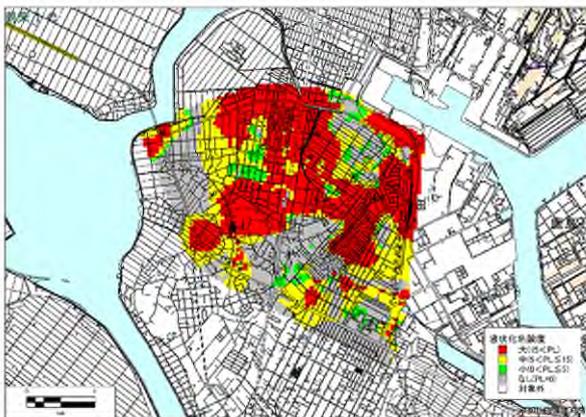


図 48 液状化指標値 (PL 値マップ)

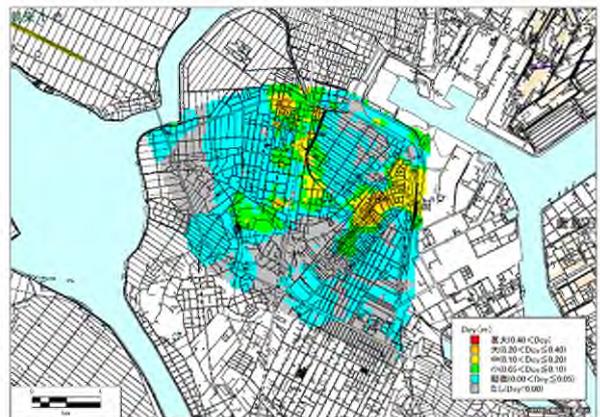


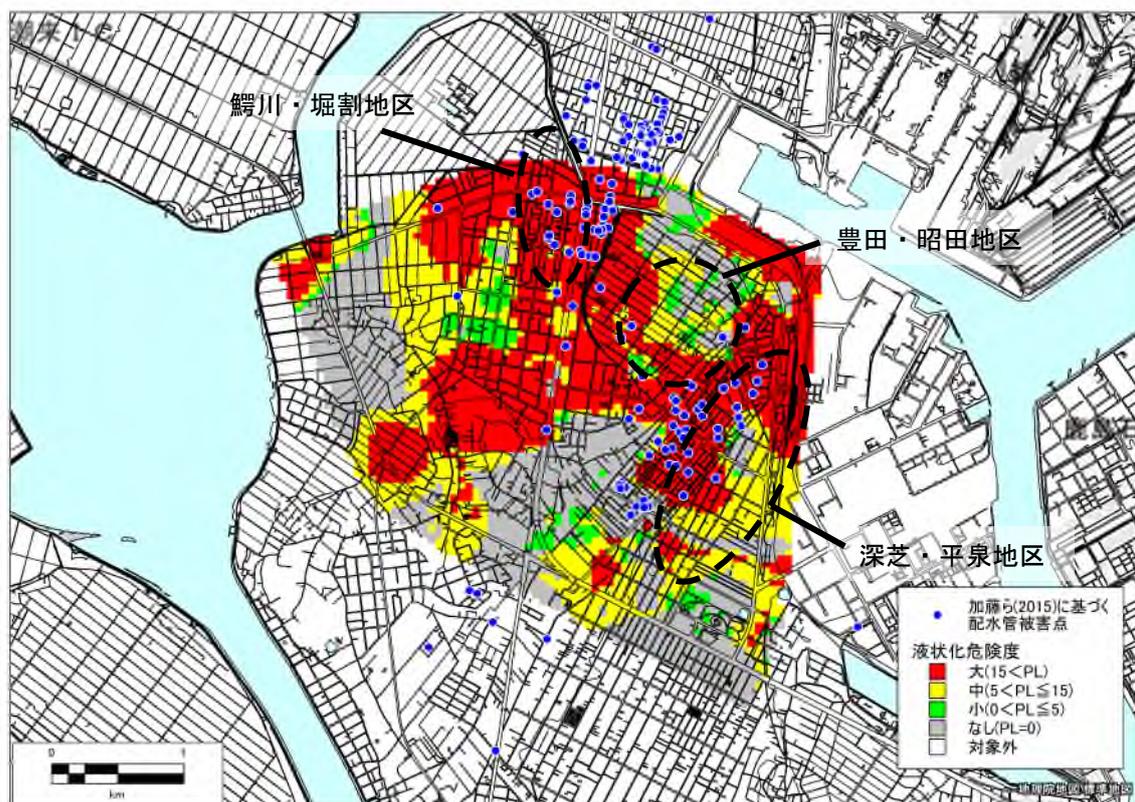
図 49 液状化指標値 (Dcy 値マップ)

2.5.6. 2011年東北地方太平洋沖地震における被害実績との対比

作成した液状化ハザードマップと加藤ら（2015）⁴²における2011年東北地方太平洋沖地震時の当該地の水道管路（配水管）被害地点結果と比較した（図50）。水道管の被害地点では、液状化危険度は多くで「大」を示しており、概ね整合していることが確認できる。

深芝・平泉地区では地面を掘削した後、緩い土で埋め戻した箇所が点在しており、道路も住宅も含めて被害があった。本事例で作成した地盤モデルでは、道路上の比較的良い地盤で調査した結果を基にモデル化している。

また、 $P_L=0$ となっている豊田・昭田地区においては、碁盤目状にある道路間の砂利を掘削し、その後埋め戻して住宅が建てられたものである。人工改変前の原地盤については締まった砂であるため、道路だけ締まった砂地盤で、その間は埋め戻した緩い砂になっている。また、地下水位も浅い状況にある。したがって、この地区が $P_L=0$ の結果になっているのは狭い道路において得られた地盤情報で作成された地盤モデルとなっており、配水管の被害がないのも締まった砂地盤にある道路に埋設されているためであると考えられる。



※鰐川・堀割地区では、東北地方太平洋沖地震後に「市街地液状化対策事業」で地区全体の液状化対策が行われた。

図50 液状化ハザードマップ（ P_L 値分布図）と実被害との比較

2.6. インフラ施設のハザードマップの作成

2.6.1. 道路施設（平面道路）の液状化被害ハザードマップ

国土技術政策総合研究所資料 第1034号・土木研究所資料 第4363号（平成30年4月）における知見等をもとに、道路の液状化に伴う危険度（道路危険度）を、下のように区分し、マップに表現した。（図 51）

- ・ A：危険性が高い（道路舗装厚^{※1}が0.8m未満）
- ・ B：危険性あり（非液状化層厚3m未満かつ直下に液状化層あり）
- ・ C：危険性は低い（非液状化層厚3m以上または深度3m以内に非液状化層^{※2}が分布）

※1 道路舗装厚は、路床改良を含んだものである。

※2 $F_L \geq 1$ の地層、洪積層、岩盤など

ただし、道路舗装厚の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。また、液状化対策実施の有無に関する資料も収集できていないことから、危険度区分には反映させていないことに留意されたい。

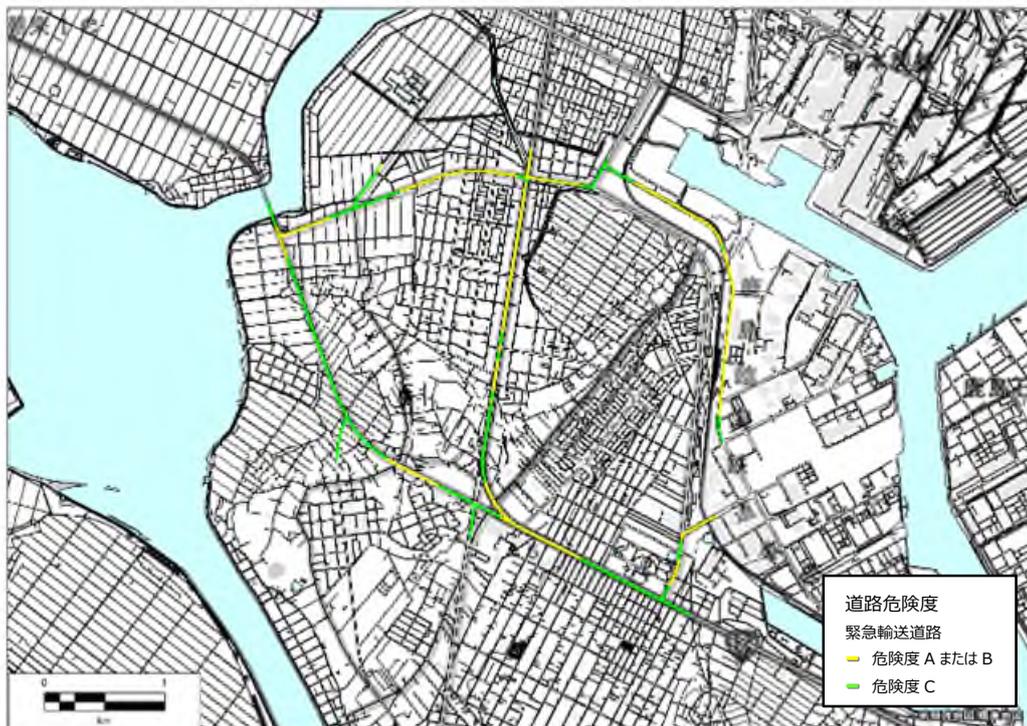


図 51 道路施設（緊急輸送道路）の液状化被害

2.6.2. 下水道施設（管路や人孔等）の液状化被害ハザードマップ

土木研究所成果報告書12(平成21年)における知見等をもとに、下水管路の液状化に伴う危険度（下水危険度）を、以下のように区分し、マップに表現した。（図 52）

- ・ A：危険性が高い（埋戻土の液状化対策工が未実施）
- ・ B：危険性あり（砂層土の平均N値 ≤ 7 または粘性土の平均N値 ≤ 5 ）
- ・ C：危険性は低い（砂層土の平均N値 > 7 かつ粘性土の平均N値 > 5 ）

※1 砂層土の平均N値は、深度5m以内に分布する砂質土のN値を平均したものである。

※2 粘性土の平均N値は、深度5m以内に分布する粘性土のN値を平均したものである。

ただし、埋戻土の液状化対策工の資料は使用せず、危険度AまたはBと危険度Cのいずれかに判定を行った。

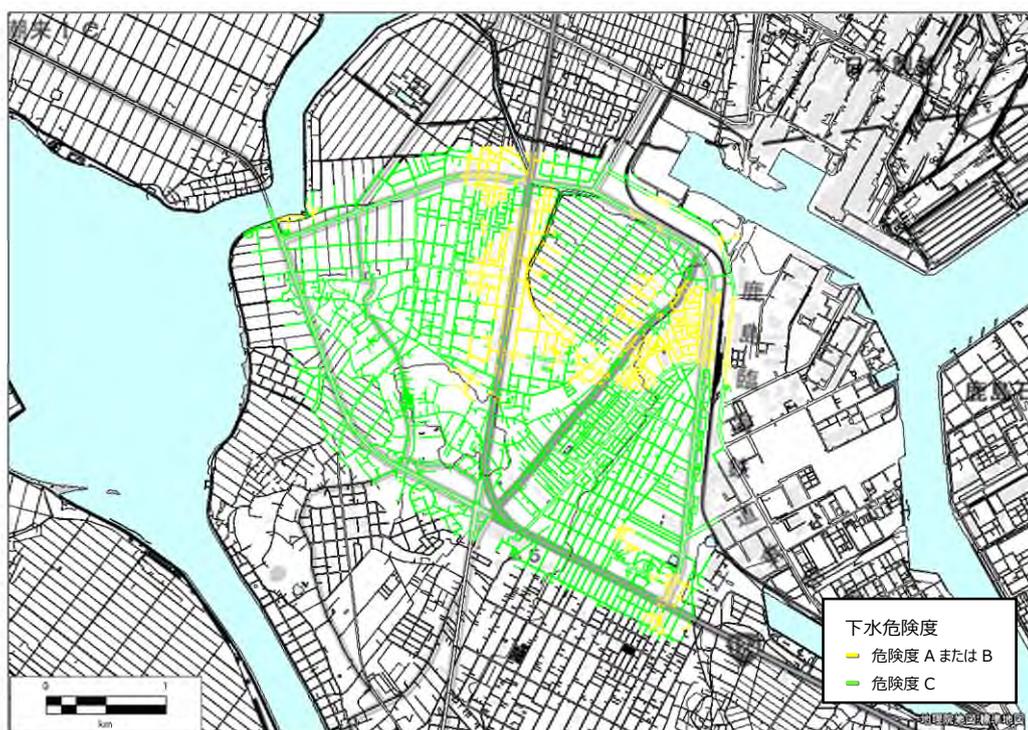


図 52 下水道施設の液状化被害

3. 福岡地区における3次元地盤構造モデルの作成事例

3.1. 3次元地盤構造モデルの作成範囲

社会インフラの強靱化を推進するために、インフラ施設の液状化被害推定手法を高精度化することが重要である。取り組み方針は、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮した3次元地盤構造モデルの構築、個別インフラ施設の液状化リスクの評価とした。目的の達成、取り組み方針から、福岡地区における広域な調査対象範囲（0次モデル作成範囲と呼ぶ）を、下記の観点で設定した（図53）。

- ・人口・道路の密集している地区を含む範囲
- ・既往の被害想定で液状化危険度の高い箇所を含む範囲
- ・液状化層が広く分布すると考えられる沿岸低地を含む範囲

0次モデル作成範囲のうち、液状化被害に関連する地層の連続性など地盤構造の複雑さを考慮するために、3次元地盤構造モデルを作成する範囲（1次モデル作成範囲と呼ぶ）として、液状化評価の指標を自然条件などの関連する条件の違いによって検討可能な範囲を設定した。

- ・人口・道路の密集している範囲
- ・地盤情報が豊富で、地盤条件を比較的想定可能な範囲
- ・複数の液状化し易いとされる地形（埋立地、氾濫原、砂州など）が分布する範囲
- ・過去の地震災害で液状化が認められた地点が含まれる範囲
- ・活断層である警固断層など、地質分布を大きく規制する地質構造の含まれる範囲
- ・既往の想定で液状化危険度の高い範囲

3.2. 地盤情報の収集

3.2.1. モデル作成に必要な地盤情報の整理

福岡地区におけるモデル作成のために収集した地盤情報等に係る資料は、表 11 に示すリストの通りである。

表 11 地盤情報に係る資料リスト

区分	収集資料		発行年	データ属性	位置精度	数量	解釈レベル	0次モデル使用	3次元地盤モデル使用	備考
	種別	名称								
地理情報	基盤地図	行政界	2019	事実	A	—	—			
	基盤地図	水域	2019	事実	A	—	—		○	
	基盤地図	道路	2019	事実	A	—	—			
地形情報	DEM	国土地理院数値標高データ 5mメッシュ	2016~2019	事実	A	—	—			
	DEM	国土地理院数値標高データ 10mメッシュ	2016	事実	B	—	—			
	DEM	国土地理院数値標高データ 250mメッシュ	2011	事実	C	—	—	○		
	地形解析図	傾斜図	—	事実	A	—	—		○	DEMから作成
	地形解析図	陰影図	—	事実	A	—	—		○	DEMから作成
	地形区分図	土地履歴調査「福岡」	2016	解釈	B	—	D		○	
	地形区分図	数値地図25000「土地条件」	2014	解釈	B	—	D		○	
地盤情報	地質図	5万分の1地質図「福岡」	1994	解釈	B	—	D		○	
	地質図	シームレス地質図20万分の1	2015	解釈	C	—	D	○		
	地質図	5万分の1土地分類調査「福岡」	1984	解釈	B	—	D			
	地質図	福岡市地盤図	1981	解釈	B	—	D			
	地質図	福岡地盤図	1981	解釈	B	—	D		○	
	地質図	福岡地盤図(南部編)	1992	解釈	B	—	D		○	
	既存地盤モデル	J-SHIS AVS30	2019	解釈	C	—	D	○		
	既存地盤モデル	地震被害想定 地盤モデル	1997	解釈	B	—	D	○		自治体から提供
	ボーリング	国土地盤情報検索サイト「Kunijiban」	2019	事実	A	—	—		○	九州地盤情報共有DBと重複
	ボーリング	九州地盤情報共有データベース2018	2018	事実	A	15699	—		○	
	ボーリング	福岡市所有データ	—	事実	A	435	—		○	ホームページから

収集したボーリングデータの位置図を図 54 に示す。ボーリングデータは主に、地盤工学会九州支部・九州地盤情報システム協議会による九州地盤情報データベース⁴³より収集した。

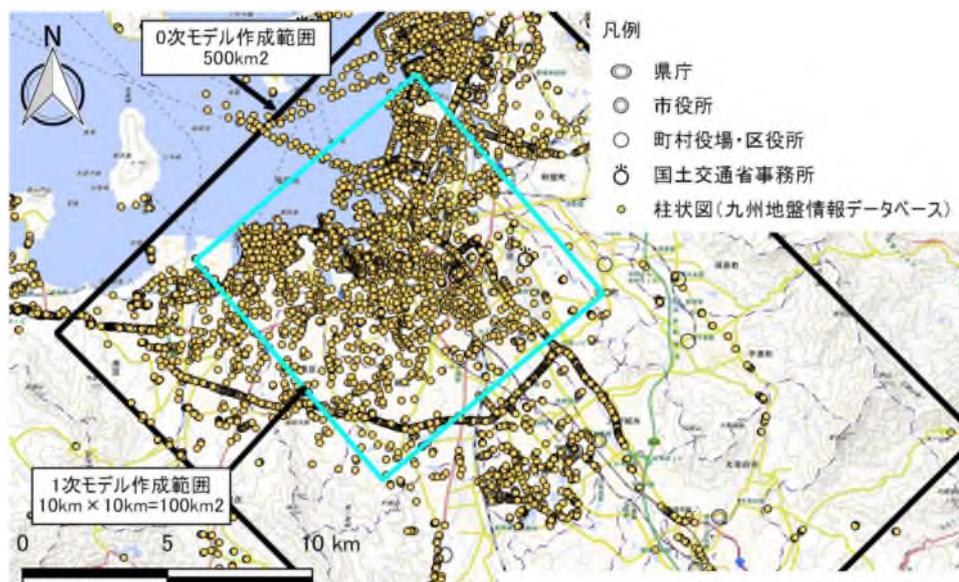


図 54 対象範囲周辺において収集したボーリングデータ位置図

3.3. 追加調査計画の立案

福岡地区の現地調査の方針は以下の通りとした。

- 人口密集度が高く、緊急輸送路周辺での液状化履歴箇所及び液状化予測でのリスクの高い地域を対象として、微地形区分ごとの地盤特性に焦点を当てて調査を実施する。
- 浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫原低地）ごとにボーリング調査/PS 検層を実施して、地層分布、物理探査（2次元微動探査）との関係を把握する。また、サンプリングの実施、室内土質試験により地層ごとの物性値を把握して地盤の深さ方向の精度の向上を図る。
- PDC を多地点で実施することにより地下水位、液状化・非液状化層厚を把握、表層 10m のモデル精度の向上を図る。
- 2次元微動探査により、基盤層の不陸および地表までの S 波速度分布の把握し、3次元地盤構造モデルの精度の向上を図る。

また、以下の理由によりボーリング等の調査深度、調査手法、調査位置を決定した。

- 対象地域の工学的基盤の確認は、ボーリング調査による PS 検層で確認し、補完する。ボーリングの掘削深度は 30～50m 程度の液状化対象層程度の深度とする。
- ボーリング調査は浅層の液状化対象層について微地形（砂州、氾濫原低地）ごとに 2 孔実施して、地層分布、物理探査との関係を把握する
- 地震動特性に影響が大きい動的変形特性を把握するために、沖積の砂質土層、洪積の砂質土層や粘性土層を狙ってサンプリング、室内土質試験を実施する。
- ボーリングを補完するために PDC を 19 箇所実施する。

追加調査数量表を表 12 に、調査位置図を図 55 にそれぞれ示す。

表 12 追加調査数量表

追加調査	
調査項目	実施数量
・機械ボーリング	2 孔、計 100m
・PS 検層	2 孔、計 100m
・サンプリング（試料採取）	7 本
・PDC	19 箇所、計 167m
・物理探査（2次元微動探査）	3 測線、総延長 3.5km

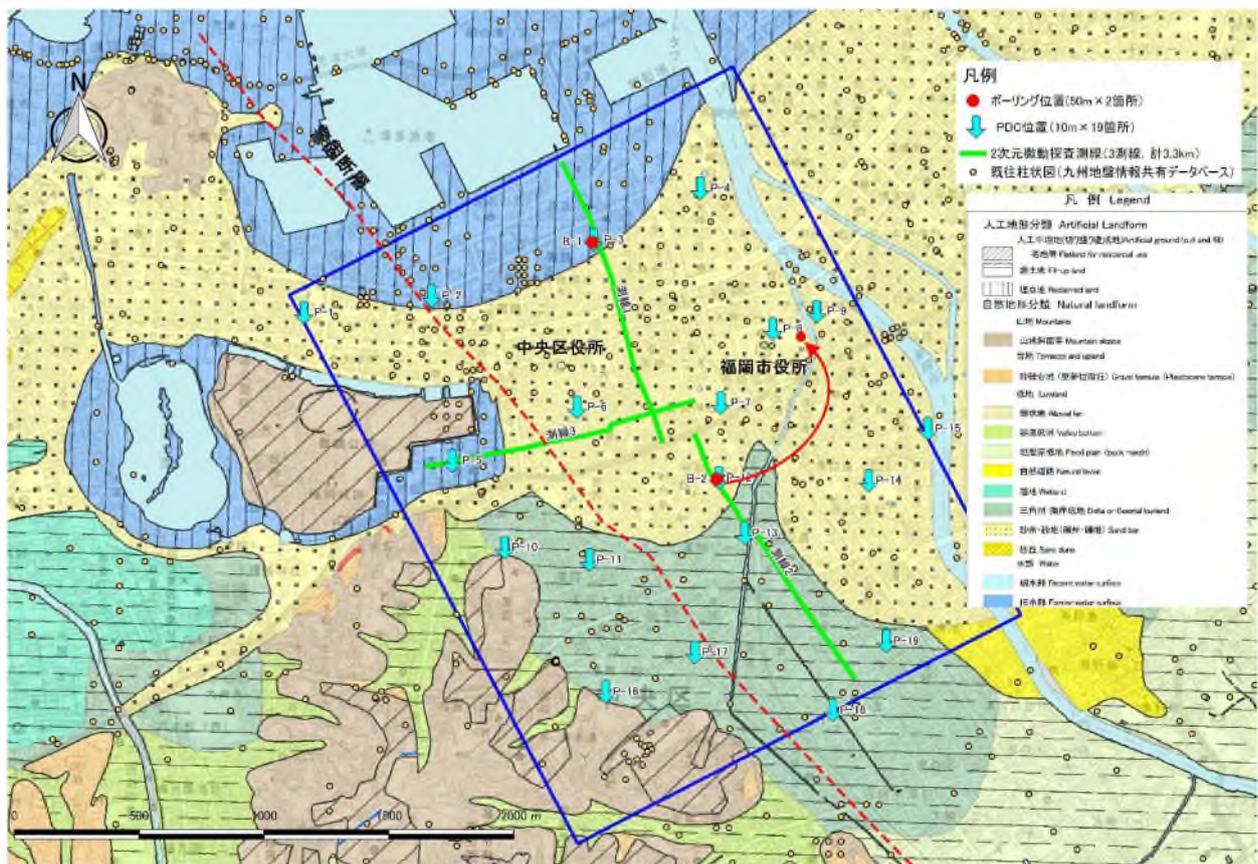


図 55 追加調査位置図

3.4. 3次元地盤構造モデルの作成

3.4.1. 3次元地盤構造モデルの作成手法

3次元地盤構造モデルを構築するためのアルゴリズム（計算手法）は、可能な限り客観性を持たせて比較検討が可能なアルゴリズムを採用した。

一般的な地層ソリッドモデルソフトウェアで採用されている手法として、サーフェスモデル（地質境界面）は最適化原理（Horizon2000,BS-Horizon）を、3次元地盤構造モデルのボクセルモデルは、IDW（Inverse Distance Weighted：逆距離加重法）を採用した。

3.4.2. サーフェスモデル等の構成

サーフェスモデルは、平面的分布に関しては「治水地形分類図(初期整備版)」、地質層序（深度方向）に関しては、既往の地質調査報告書をベースに試作した。サーフェスモデルでは、完新統として埋土・盛土層、沖積層、更新統として大坪砂礫層、須崎層上部、須崎層下部、仲原礫層、基盤岩類の7つの地層についてサーフェスモデルで表現した。

それらに対し、ボーリング柱状図や物理探査結果などの事実、他の文献と異なる部分に関しては、随時変更を加えた。なお、本モデルの構築にあたり使用したボーリングデータ（調査結果含む）は4380本である。

作成した地層ソリッドモデルの例を図40に示す。

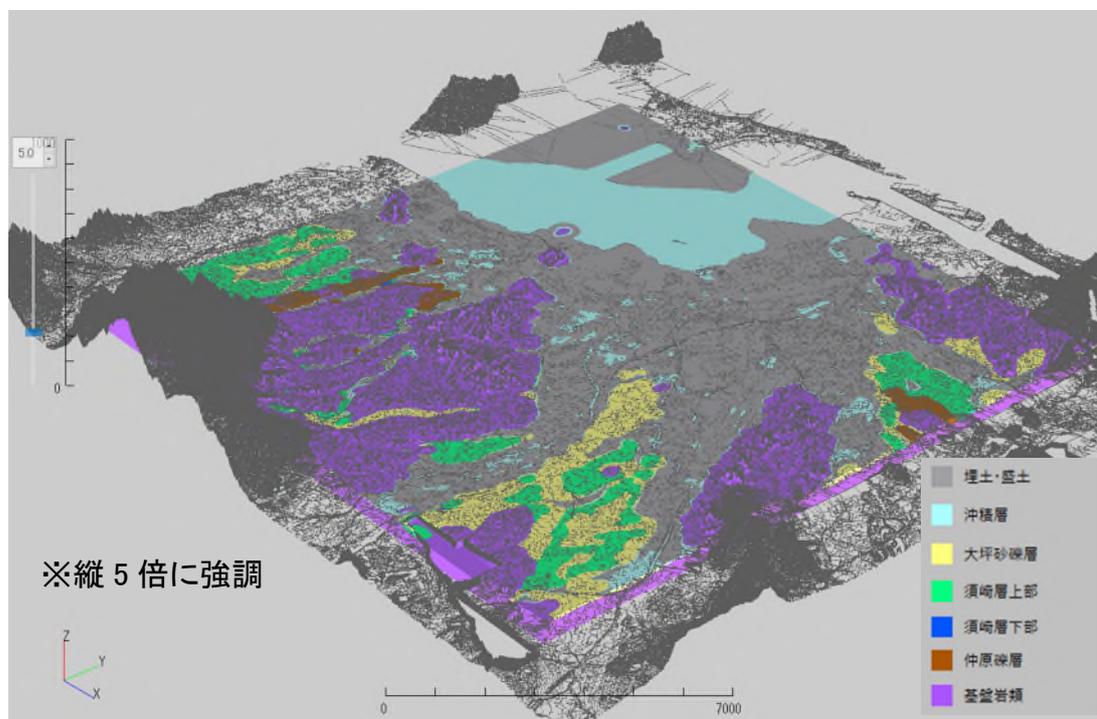


図 56 地層ソリッドモデルの例

3.4.3. ボクセルモデル（土質・N値）の構成

ボクセルモデルの作成にあたり、地層区分を設定した。地層区分は前節の3区分に分類した。3次元ボクセルモデルの例を図57～図58にそれぞれ示す。

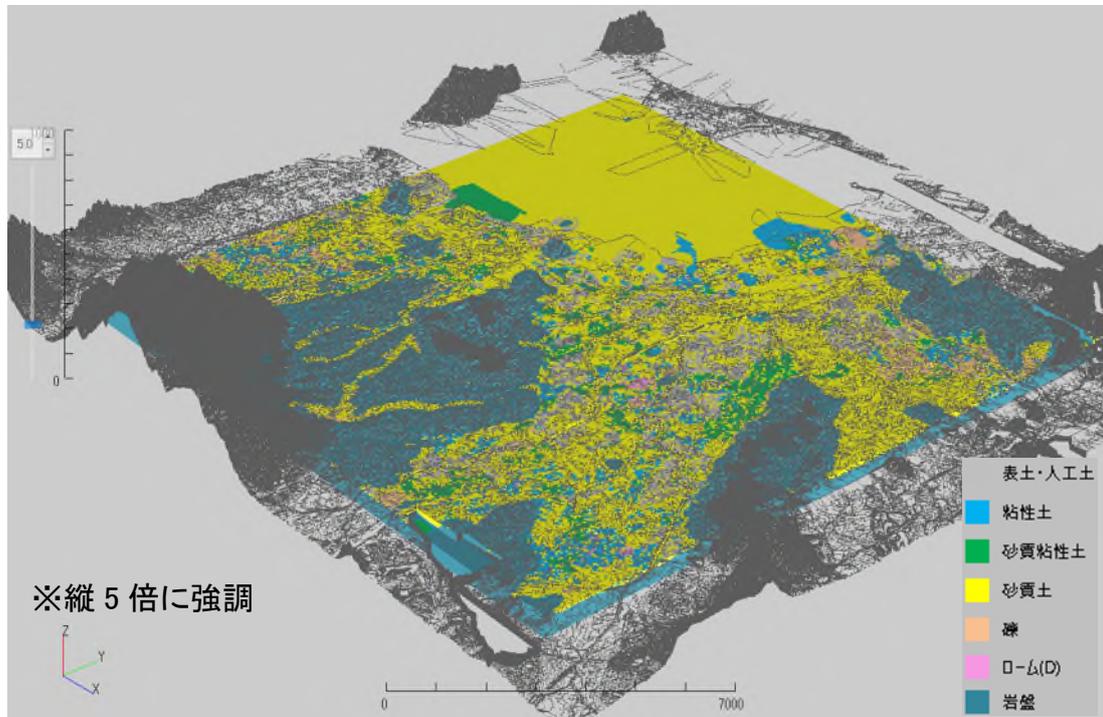


図57 3次元土質区分ボクセルモデルの例

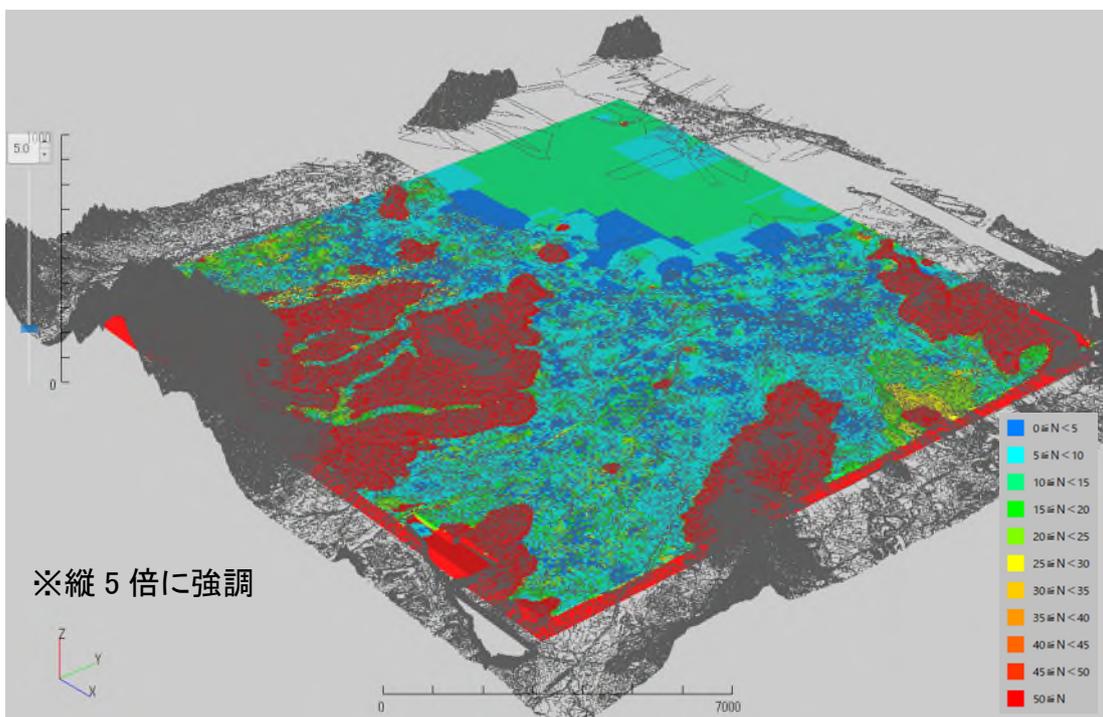


図58 3次元N値ボクセルモデルの例

3.4.4. 地下水位

ボーリング柱状図および PDC に記載された孔口標高と孔内水位標高を図 59 に、設定した地下水位の分布を図 60 に示す。

不圧地下水位と推測されるボーリング柱状図に記載された初期水位と本研究で実施した PDC 調査で確認された孔内水位の標高（全 1552 本）は、孔口標高と相関が認められた。そのため、地下水位は、孔内水位の標高を目的変数、孔口標高を説明変数とした線形回帰モデルから設定した。

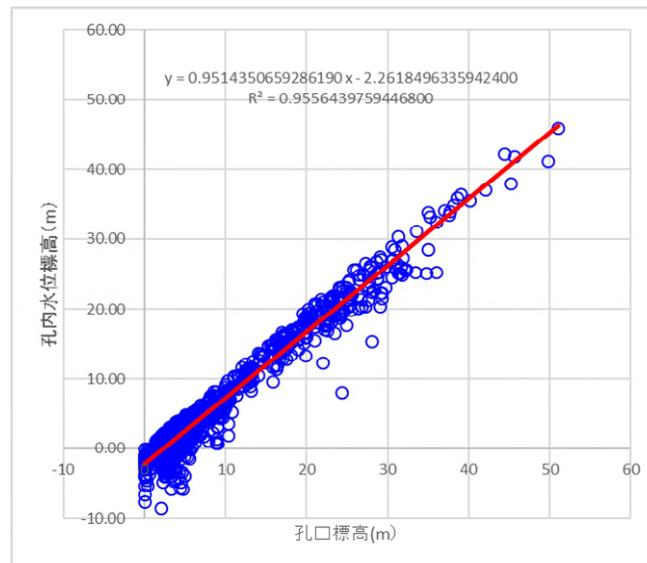


図 59 ボーリング柱状図および PDC に記載された孔口標高と孔内水位標高

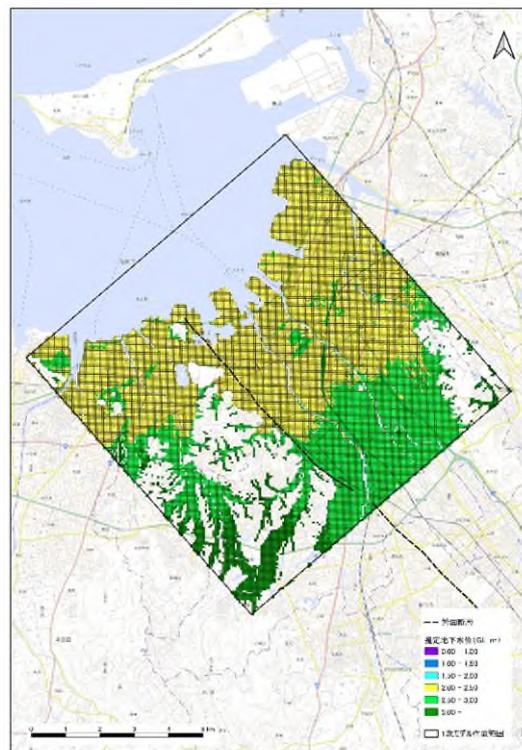


図 60 設定した地下水位の分布（解析で考慮しない水域・岩盤露出部を除く）

3.4.5. 物性値

解析に用いた物性値は、現地調査・室内土質試験の結果または一般値をもとに設定し、3次元地盤構造モデルを基にメッシュごとに作成したボクセルモデルへ物性値を割り当てた。

S波速度(Vs)は、2次元微動探査結果（一部はPS検層結果含む）をもとに整理した地層ごとの平均値から設定した。

表13に地震応答解析および液状化判定に用いた地盤定数の一覧を示す。

表13 地盤定数一覧表

地層	記号	土質区分	FL対象	湿潤密度 yt kN/m ³	飽和密度 ysat kN/m ³	S波速度 Vs m/s	土層区分	土層種別	細粒分含有率 FC %	塑性指数 Ip %	平均粒径 D50 mm	10%粒径 D10 mm	ひずみ依存曲線	備考	
盛土・埋土	B-a	表土・人工土	○	15.0	17.0	170	0	0	28	1	0.02	0.1	土研式h		
	B-c	粘性土		14.9	16.9	170	0	2	59	1	0.04	0.1	土研式g		
	B-sc	砂質粘性土	○	15.8	17.8	170	0	4	44	1	0.46	0.1	土研式g		
	B-s	砂質土	○	15.9	17.9	170	0	0	19	1	0.39	0.1	土研式h		
	B-g	砂礫	○	19.0	21.0	170	0	1	11	1	2.00	0.1	土研式h		
沖積層	Ch-c	粘性土		13.5	15.5	200	0	2	78	1	0.03	0.1	土研式g		
	Ch-sc	砂質粘性土	○	16.1	18.1	200	0	4	44	1	0.04	0.1	土研式g		
	Ch-s	砂質土	○	16.7	18.7	200	0	0	20	1	0.74	0.1	試験値1		
	Ch-g	砂礫	○	19.0	21.0	200	0	1	10	1	1.10	0.1	土研式h		
大坪砂礫層	Ot-c	粘性土		14.1	16.1	250	1	2	71	1	0.03	0.1	土研式i		
	Ot-sc	砂質粘性土		16.0	18.0	250	1	4	31	1	0.04	0.1	土研式i		
	Ot-s	砂質土		16.3	18.3	250	1	0	22	1	0.94	0.1	土研式h		
	Ot-g	砂礫		19.0	21.0	250	1	1	17	1	1.10	0.1	土研式h		
	Ot-v	ローム		13.3	15.3	250	1	0	51	1	0.10	0.1	土研式h		
須崎層	上部層	Su-c	粘性土		16.1	18.1	280	1	2	69	1	0.02	0.1	試験値2	
		Su-sc	砂質粘性土		17.9	19.9	280	1	4	44	1	0.04	0.1	試験値2	
		Su-s	砂質土		17.5	17.7	280	1	0	24	1	0.56	0.1	試験値3	
		Su-g	砂礫		19.0	21.0	280	1	1	14	1	2.00	0.1	土研式h	
	下部層	Sl-c	粘性土		16.1	18.1	350	1	2	69	1	0.02	0.1	土研式i	
		Sl-sc	砂質粘性土		17.9	19.9	350	1	4	44	1	0.04	0.1	土研式i	
		Sl-s	砂質土		15.7	17.7	350	1	0	24	1	0.56	0.1	土研式h	
		Sl-g	砂礫		19.0	21.0	350	1	1	14	1	2.00	0.1	土研式h	
中原礫層	Nb-c	粘性土		15.5	17.5	400	1	2	75	1	0.03	0.1	土研式i		
	Nb-sc	砂質粘性土		16.0	18.0	400	1	4	65	1	0.04	0.1	土研式i		
	Nb-s	砂質土		17.5	19.5	400	1	0	30	1	0.15	0.1	土研式h		
	Nb-g	砂礫		19.0	21.0	400	1	1	0	1	2.00	0.1	土研式h		
基盤岩類	岩盤		25.0	25.0	640	2	-	-	-	-	-	-	基盤層		

FL対象 ○：FL計算の対象層（砂質粘性土、砂質土、砂礫）、それ以外の土質区分（粘性土、沖積層および岩盤）は対象外
土層区分 0：沖積層、1：洪積層、2：その他
土層種別 0：砂質土、1：礫質土、2：粘性土、3：その他、4：粘性土(砂式)
塑性指数 仮値を入力（Ip、D10による液状化判定の必要性を判定することは困難なため）
10%粒径 仮値を入力（Ip、D11による液状化判定の必要性を判定することは困難なため）
ひずみ依存曲線 土研式g：沖積粘性土、土研式h：砂質土・礫質土、土研式i：洪積粘性土、試験値1～3：本委託研究の試験結果に基づく設定曲線
土研式は「土研資料第1778号 地盤の地震時応答特性の数値解析法-SHAKE：DESRA-」昭和57年2月に記載の方法による

3.5. 既往地震の液状化被害による評価

3.5.1. 地震動の設定

2005年福岡県西方沖地震相当を想定し、J-SHIS（地震ハザードステーション）⁴⁴より公開されている警固断層帯北西部による地表の計測震度を使用した。

3.5.2. 地震応答解析

本項では、地震応答解析は実施せず、計測震度の結果を用いて最大加速度を算定した。図 61 に、計測震度より換算した地表最大加速度分布図を示す。

沿岸部においては加速度が大きく、 500cm/s^2 以上を示す。

3.5.3. 液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップ

道路橋示方書（2017）に基づき深度0～10mの平均 F_L と平均 R を対象に、土質定数の低減係数（ D_E ）を算出し、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを作成した。図 62に、液状化指標値（土の強度及び支持力の低下）マップを示す。

室見川右岸～大濠公園にかけての範囲と検討範囲の北東部において、低減係数が0～1/3を示すメッシュが散在し、土の強度及び支持力の低下の度合いが大きくなっている。それ以外は、低減係数は2/3または1が多く、土の強度及び支持力の低下の程度は低くなっている。

3.5.4. 液状化指標値（ P_L 値）マップ

メッシュごとの液状化判定は、道路橋示方書（2017）に準拠して実施した。液状化抵抗率（ F_L ）は R/L （ R ：動的せん断強度比、 L ：地震時せん断強度比）で表されるが、予測の精度向上を図るため、 L は地震応答解析結果により算出した。図 63に、液状化指標値（ P_L 値）マップを示す。

深度20mまでの F_L 値を用いて算出した P_L 値をマップに整理すると、海岸沿いの埋立地および低地では、危険度が大きい（ $P_L \geq 15$ ）に該当するメッシュが大部分を占めている。それに対し、台地では危険度が小さい（ $0 < P_L \leq 5$ ）または液状化発生の危険性がない（ $P_L = 0$ ）に該当するメッシュが多くなっている。

3.5.5. 液状化指標値 (Dcy 値) マップ

液状化に伴う水平変位 Dcy (≒沈下量) を建築基礎構造設計指針 (2019) に準拠して実施した。図 64 に、液状化指標値 (Dcy 値マップ) を示す。

図より、海岸沿いの埋立地および低地では、液状化の程度が甚大($Dcy > 0.4$)～中($0.1 < Dcy \leq 0.2$)に該当するメッシュが多く分布している。台地では、軽微($0 < Dcy \leq 0.05$)、なし($Dcy = 0$)に該当するメッシュが多く、液状化の程度が小($0.05 < Dcy \leq 0.1$)のメッシュが散在している。

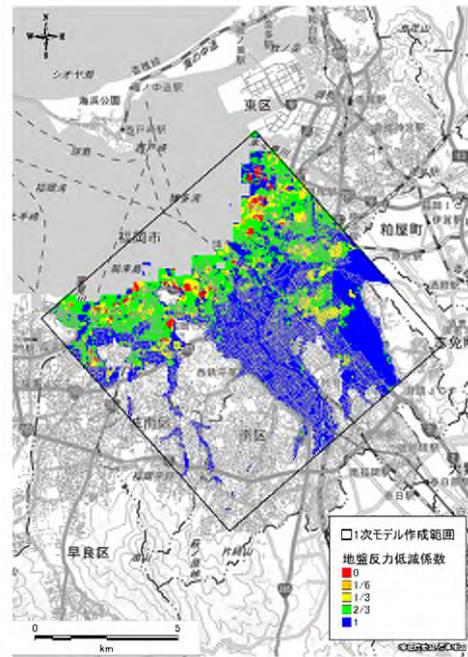
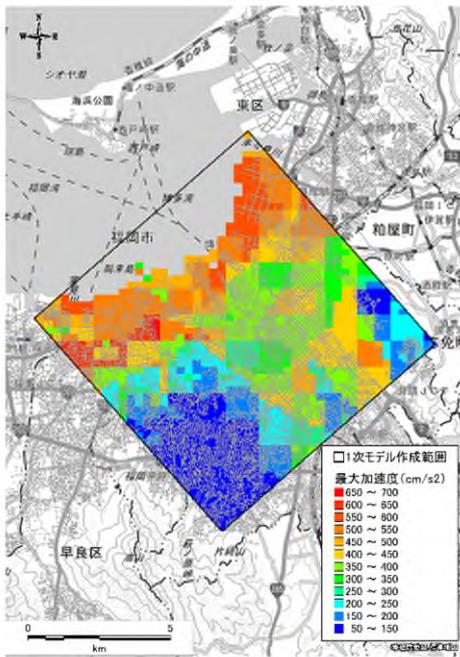


図 61 地震応答解析結果による地表最大加速度 図 62 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

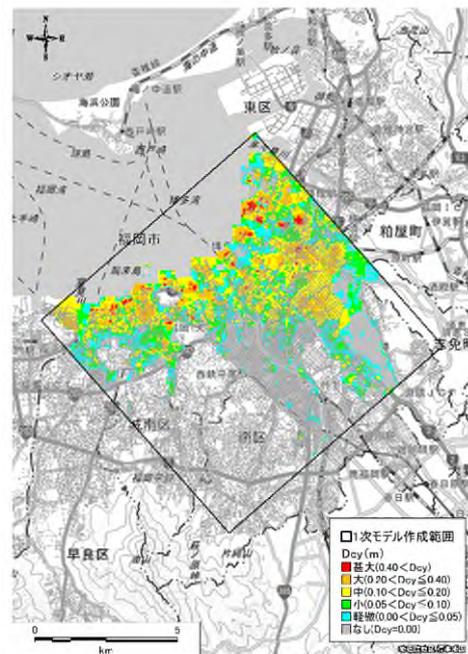
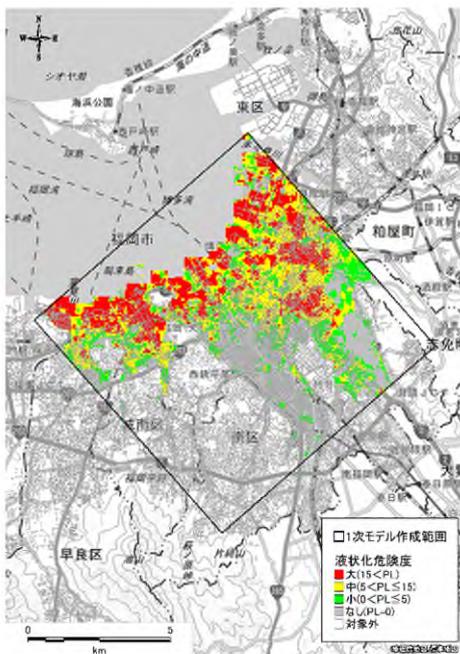


図 63 液状化指標値 (PL 値マップ)

図 64 液状化指標値 (Dcy 値マップ)

3.5.6. 2005年福岡県西方沖地震における被害実績との対比

2005年福岡県西方沖地震での液状化履歴と、本研究成果による液状化危険度マップとの対比について図65に示す。本ガイドライン(案)で作成した3次元地盤構造モデルによる液状化危険度マップは、警固断層帯北西部を想定とした結果である。なお、想定地震動については、J-SHISによる警固断層帯北西部の想定結果を利用した。

2005年福岡県西方沖地震での液状化履歴は、沿岸域を中心として主に埋立地において地盤の液状化被害が集中している。一方、想定されている液状化危険度も主に埋立地において危険度が中～大の結果となっており、液状化履歴と概ね合致している。また、内陸部においては一部の地域で、危険度が中～大となっている。

なお、液状化強度の予測方法について、沖積砂層の堆積年代や液状化強度の経年変化を考慮した液状化強度の結果を用いると、より実被害履歴と整合が良くなる例もある⁴⁵。

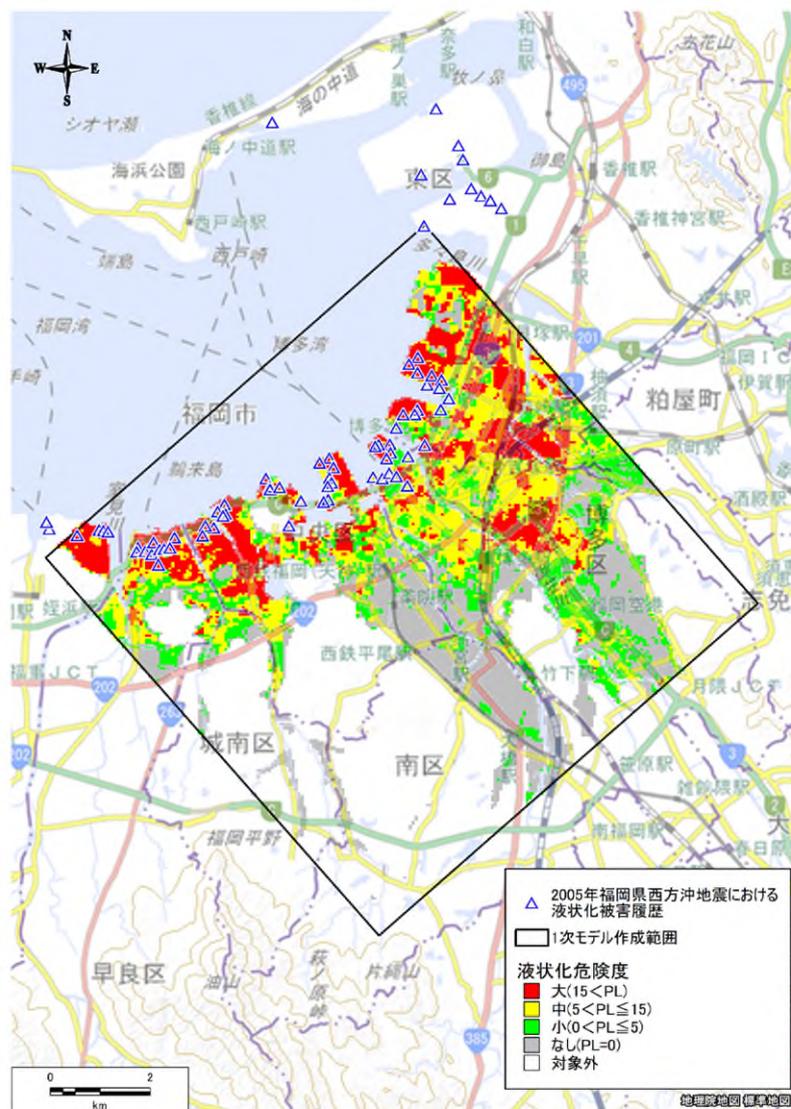


図 65 液状化危険度マップと2005年福岡県西方沖地震における被害実績との対比

4. 地震動の設定について

前述のハザードマップ作成事例において、液状化判定の際の地震外力では、地震応答解析結果を用いた。

地震応答解析に用いる入力地震動は、対象とする地震により適切に選択する必要があるが、道路橋示方書等各種基準で設定されている標準的な地震動を採用することが可能である。一方で、対象地域特有の地震環境を適切に評価する必要がある場合には、地震環境調査を実施し、検討対象地域に影響のある地震を選定することが望ましい。

検討対象地域に影響のある地震の選定にあたっては、既往の観測記録や国や自治体の実施している地震被害想定調査が参考になる（例えば、防災科学技術研究所の J-SHIS）。選択された対象地震動は、特定の地震が起こった場合のシナリオ型の想定となる。シナリオ型の地震動は、地震動が時刻歴波形として、J-SHIS や内閣府（G 空間情報センター）等により公開されているものがある。観測記録については、既往文献⁴⁶等で紹介されているように国土交通省を含む多数の機関において強震観測記録が公開されている。

なお、公開されている地震動や観測記録、各種基準で設定されている標準的な地震動はそれぞれ設定（観測）されている地層がある。例えば、防災科学技術研究所の観測記録（K-NET）は地表面のものであるし、内閣府による南海トラフ巨大地震の地震動は工学的基盤面（主に $V_s=350\sim 700\text{m/s}$ ）で設定されている。この設定されている地層が第 II 編で構築した 3 次元地盤構造モデルのモデル底面と一致させることが重要であるため、一致していない場合には必要に応じて引き戻し解析を行う必要がある。

また、建築基礎構造設計指針などにおいては、レベル 1 地震動として $1.5\text{ m/s}^2\sim 2.0\text{ m/s}^2$ の地表加速度を、レベル 2 地震動として 3.5 m/s^2 の地表加速度を決めている。これらを外力として一律に評価し、その地域の液状化しやすい場所を把握するような場合は、地震応答解析は不要となる。

このように、地震応答解析の実施は必ずしも必要ではなく、利用目的に応じて選択することができる。

一方、工学的基盤や地形の不整形性が顕著である場合には、本ガイドライン（案）で作成した 3 次元地盤構造モデルを活用した 3 次元地震応答解析を行うことにより、局所的な地震動の増幅を考慮することができる。ただし、広範囲における 3 次元地震応答解析は解析モデルが大規模なものとなりやすく、液状化ハザードマップ作成においては現状いくつか課題がある。

◆参考文献

- 1 小荒井衛, 中埜貴元, 宇根寛: 液状化リスク評価のための液状化被害と地形との関係性 —利根川中下流域・東京湾岸地域の被害を対象に一, 地学雑誌, Vol.127, No.3, pp.409-422, 2018.
- 2 公益社団法人地盤工学会, 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団: 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書, 2019.
- 3 内閣府 (防災担当): 地震防災マップ作成技術資料, 2005.
- 4 国土庁防災局震災対策課: 液状化地域ゾーニングマニュアル, 1998.
- 5 土木研究所: 大規模地震に対する既存地下構造物の液状化に関する研究, 平成 21 年度 土木研究所成果報告書.
- 6 国土交通省 下水道地震・津波対策技術検討委員会: 東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後の対策のあり方, 2012.
- 7 若松加寿江, 先名重樹: 2011 年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生と土地条件, Vol.15, No.2, pp.25-44, 2015.
- 8 国土技術政策総合研究所: 平成 28 年度熊本地震における下水道管路施設被災の特徴, 国土技術政策総合研究所資料 No.997, 2017.
- 9 国土技術政策総合研究所, 土木研究所: 道路平面部における液状化被害の影響要因に関する検討, 国土技術政策総合研究所資料 No.1034, 土木研究所資料 No.4363, 2018.
- 10 山路昂央, 平出亮輔, 濱田知幸, 岡安裕司: 平成 30 年北海道胆振東部地震における下水道管路施設の被害傾向分析, 土木技術資料, Vol.62, No.10, pp.50-53, 2020.
- 11 須志田健, 櫻井英文: 平成 30 年北海道胆振東部地震で被災した札幌市清田区里塚地区の市街地の復旧, 土木技術資料, Vol.62, No.12, pp.32-35, 2020.
- 12 一般社団法人 全国地質調査業協会連合会, 一般財団法人日本建設情報総合センター: 3 次元地盤モデル作成の手引き 建設現場の生産性向上に向けて, 2016.
- 13 国土交通省, 国立研究開発法人土木研究所, 国立研究開発法人港湾空港技術研究所: 国土地盤情報検索サイト kunijiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>
- 14 地盤工学会: 全国電子地盤図, <https://www.geo-stn.bosai.go.jp>
- 15 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 16 一般社団法人 社会基盤情報流通推進協議会: G 空間情報センター, https://www.geospatial.jp/gp_front/
- 17 S. Senna, A. Wakai, A. Yatagai, K. Jin, H. Matsuyama, H. Suzuki, and H. Fujiwara : Modeling of the subsurface structure from the seismic bedrock to the ground surface for a broadband strong motion evaluation in Japan, Proc. of 7th Int. Conf. of Earthquake Geotechnical Engineering, pp.4931~4939, 2019.
- 18 橋本隆雄, 安田進, 庄司学: 東日本大震災による神栖市深芝・平泉地区の採掘跡地における液状化被害の分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.I_376~I_386, 2015.
- 19 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2017.
- 20 建設省土木研究所: 地盤地震時応答特性の数値解析法—SHAKE: DESRA—, 土研資料第 1778 号, 1982.
- 22 国土交通省 (2020) 技術調査: BIM/CIM 基準要領等 (最新版), http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000064.html
- 23 財団法人沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版) 運輸省港湾局監修, 1997.
- 24 安田進, 石田栄介, 細川直行: 液状化ハザードマップにおける作成方法の現状と今後のあり方, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.188~194, 2009.
- 25 風間基樹, 河井正, 森友宏, 金鍾官, 山崎智哉: 東日本大震災の液状化被害に見る液状化研究の課題, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.49~59, 2015.
- 26 一般社団法人地盤工学会: 地震による地盤災害の課題と対策 2011 年東日本大災害の教訓と提言 (要約版), 平成 23 年度 学会提言の検証と評価に関する委員会, 2011.
- 27 国土交通省都市局都市安全課: 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, https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000044.html
- 28 栗林栄一, 龍岡文夫, 吉田精一: 明治以降の本邦の地震液状化履歴, 土木研究所彙報, No.30, pp.45~62, 1974.
- 29 若松加寿江: 日本の液状化履歴マップ, 東京大学出版会, 2011.

-
- 30 古藤田喜久雄, 若松加寿江, 翠川三郎 : Seismic microzoning on soil liquefaction potential based on geomorphological land classification, 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.2, pp.127~143, 1988.
- 31 消防庁 : 危険物の規制に関する規則, 1978.
- 33 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, 2019.
- 34 日本港湾協会編 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018.
- 35 H.Bolton Seed, Izzat M.Idriss : Analysis of soil liquefaction, niigata earthquake, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.93, No.SM3, pp.83~108, 1967.
- 36 石原研而 : 動土質力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 37 W.D.L.Finn, G.R.Martin, K.W.Lee : An effective stress model for liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No.GT6, pp.517~533, 1977.
- 38 井合進, 松永康男, 亀岡知弘 : Strain space plasticity model for cyclic mobility, 土質工学会論文報告集, Vol.32, No.2, pp.1~15, 1992.
- 39 北陸地盤情報活用協議会 : ほくりく地盤情報システム, <https://www.hokuriku-jiban.info/>
- 40 P.B.Schnabel, J.Lysmer, H.B.Seed : SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 41 新潟大学理学部地質鉱物学教室 : 新潟地震地盤災害図 (縮尺 : 1/3,000), 1964.
- 42 加藤蒼二, 鋤田泰子 : 鹿島地域の液状化噴砂と埋設管路被害との空間的關係, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.404~415, 2015.
- 43 地盤工学会九州支部, 九州地盤情報システム協議会 : 九州地盤情報共有データベースシステム
- 44 防災科学技術研究所 : J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 45 S. Yasuda, H. Nagase, Y. Tanoue : Microzonation for seismic geotechnical hazards and actual damage during the 2005 fukuoka-ken seiho-oki earthquake, Soils and Foundations, Vol.51, No.2, pp.215~226, 2011.
- 46 公益社団法人日本地震学会 : 情報誌「日本地震学会ニュースレター」, <https://www.zisin.jp/publications/news.html>

謝 辞

「インフラ等の液状化被害推定手法の高精度化」に関する研究の遂行および本ガイドライン（案）のとりまとめにあたっては、委託研究「インフラ施設の液状化評価のための3次元地盤構造モデルの作成手法の開発」アドバイザー会議委員として、東京電機大学 名誉教授・同総合研究所 客員教授 安田進氏、東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 古関潤一氏、京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 教授 三村衛氏、日本大学 生産工学部 土木工学科 教授 森田弘昭氏の各位より多岐に渡りご指導・ご助言を頂きました。また、共同研究の枠組みを通じ、国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ地質チーム上席研究員 阿南修司氏、同土質・振動チーム上席研究員 佐々木哲也氏より、多角的な協力を頂きました。

ここに記して深甚なる謝意を表します。

「インフラ等の液状化被害推定手法の高精度化」に関する研究

国土技術政策総合研究所 研究体制

国土交通省 国土技術政策総合研究所

●インフラ施設の液状化評価のための3次元地盤構造モデルの作成手法の開発

企画部	併任	社会資本マネジメント研究センター	国土防災研究官	植田 彰
企画部	企画課		課長	尾崎 悠太
道路構造物研究部	道路地震防災研究室（研究当時 企画部 企画課）		主任研究官	長屋 和宏
企画部	企画課		研究官	稲見 俊輝

●下水道施設の液状化リスク評価手法の検討

下水道研究部	下水道研究室		室長	岡安 祐司
下水道研究部	下水道研究室		研究官	平出 亮輔

●道路土工構造物の液状化リスク評価手法の検討

・液状化時の道路土工構造物の挙動に関する実験

道路構造物研究部	構造・基礎研究室		室長	七澤 利明
道路構造物研究部	構造・基礎研究室		主任研究官	伊藤 浩和
道路構造物研究部	構造・基礎研究室		主任研究官	藤田 智弘
道路構造物研究部	構造・基礎研究室		研究官	佐々木惇郎

・道路土工構造物の機能低下リスクに関する調査

道路構造物研究部	道路基盤研究室		室長	渡邊 一弘
道路構造物研究部	道路基盤研究室		主任研究官	藤原 年生

●液状化等のリスク情報の提供に関する検討

・情報分析意思決定支援システムの被害推測機能の改良

道路構造物研究部	道路構造物管理システム研究官			
	（研究当時 道路地震防災研究室 室長）		片岡 正次郎	
道路構造物研究部	道路地震防災研究室		室長	増田 仁
国土交通省不動産・建設経済局情報活用推進課	係長			
	（研究当時 道路構造物研究部 道路地震防災研究室 研究官）			大道 一步
道路構造物研究部	道路地震防災研究室		研究官	石井 洋輔

.....

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 1152 March 2021

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675