

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】

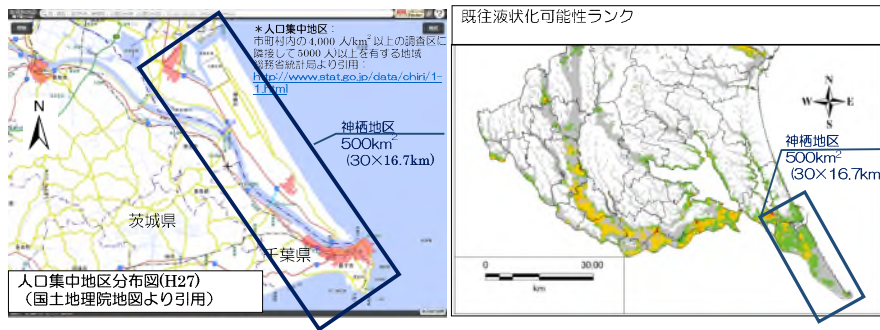
■ 既往調査の整理

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)

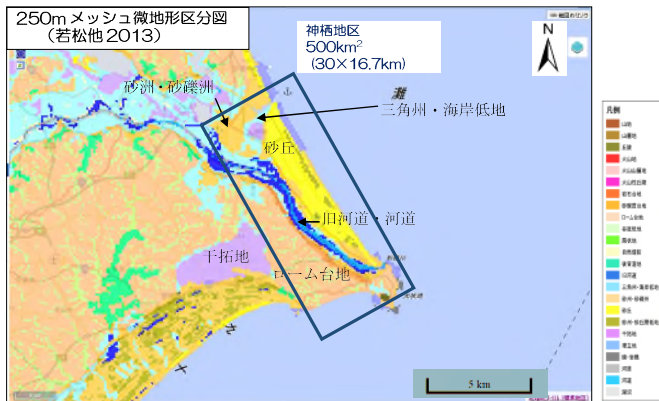
■ 対象地域の選定(対象面積 500km²)

- ・ 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

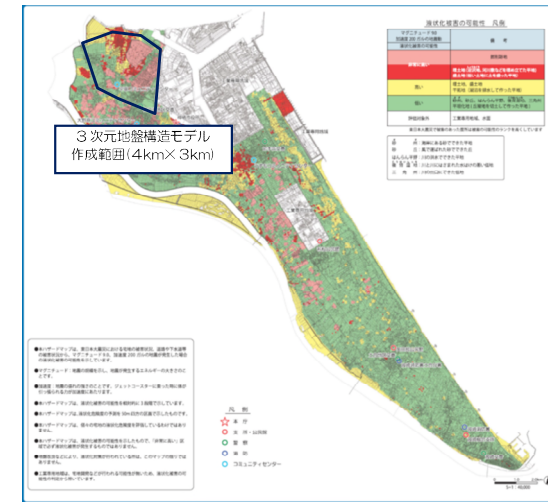


図 36 調査エリアの絞り込み

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※	○	-	※微小地区分由来
	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）

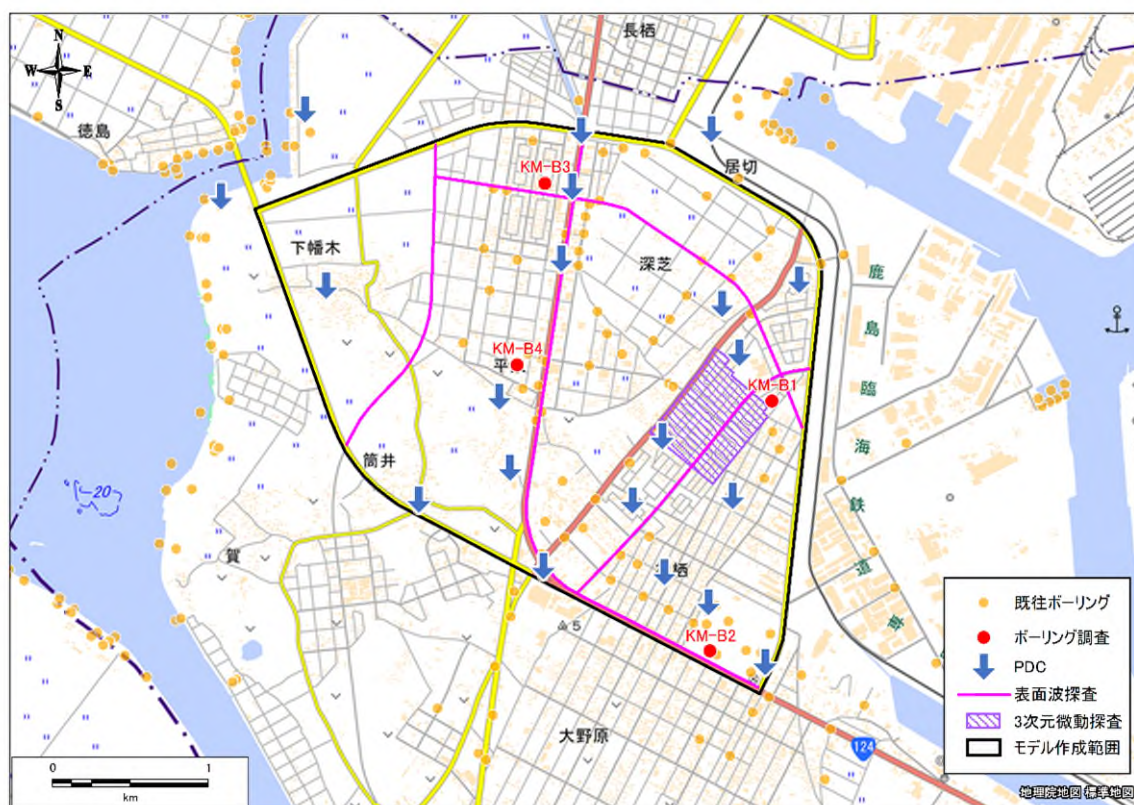


図 38 追加調査位置図

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。

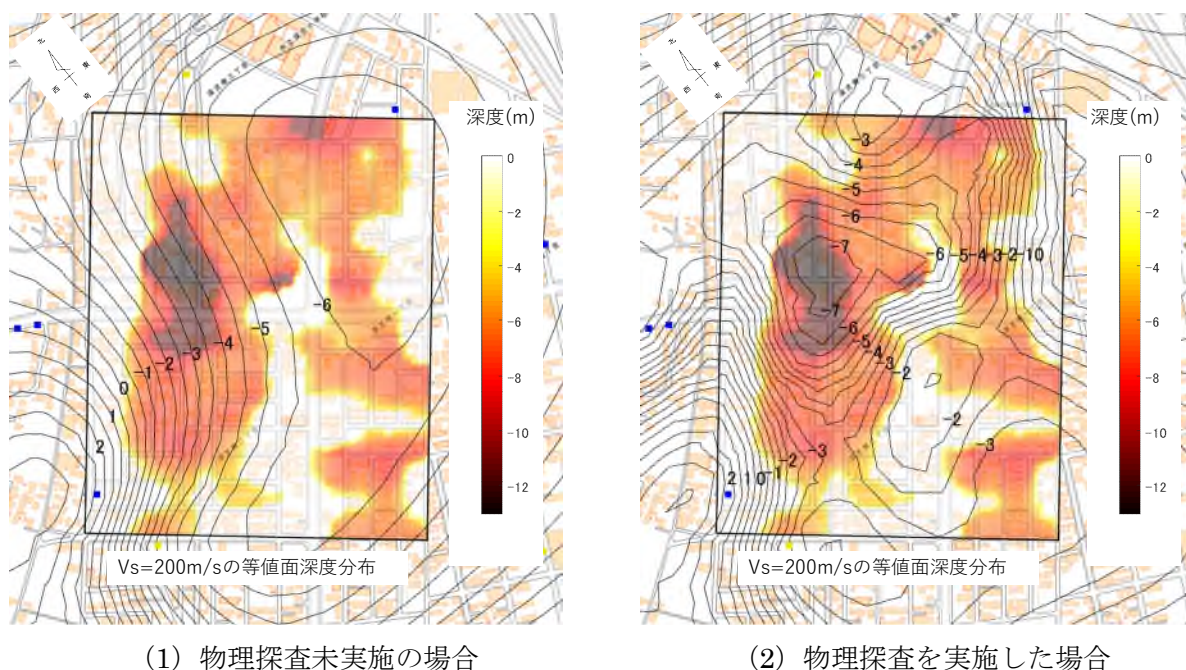


図 39 物理探査実施有無の比較

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。

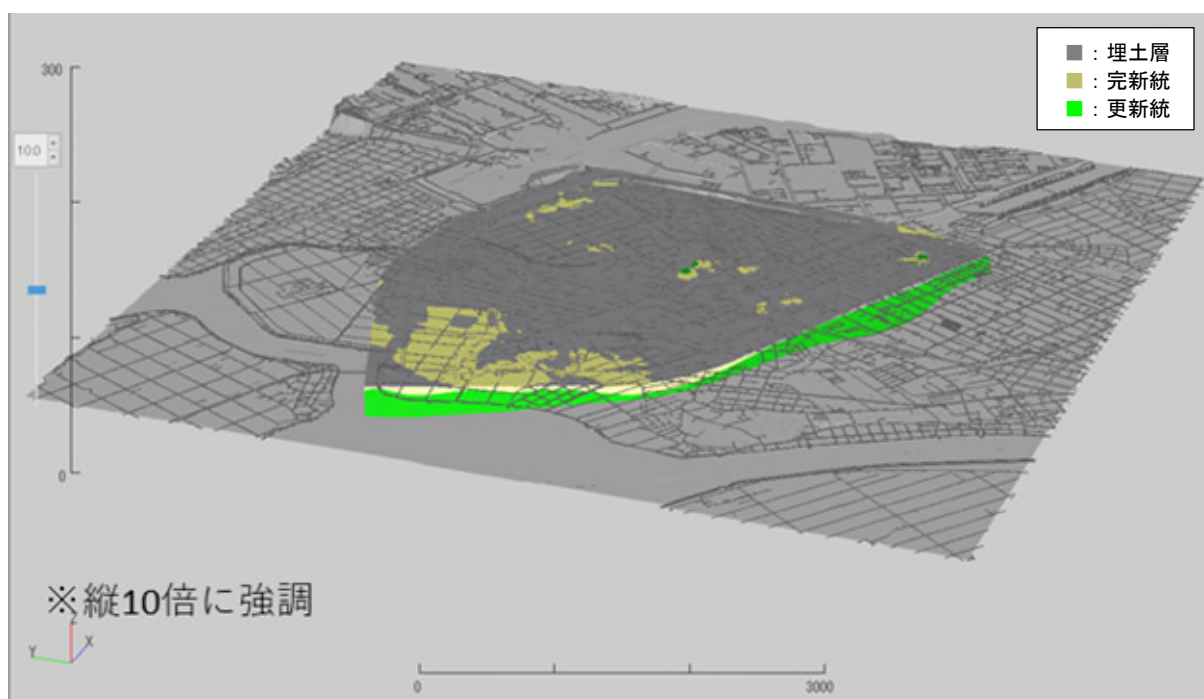


図 40 地層ソリッドモデルの例

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。

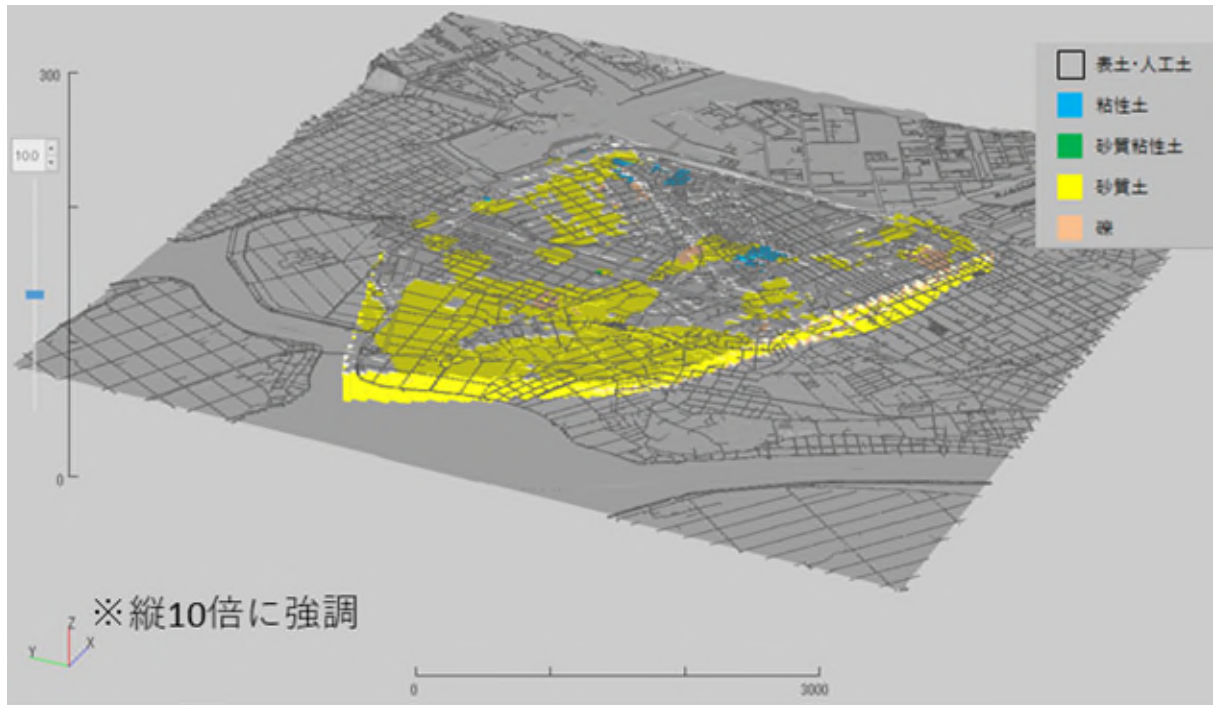


図 41 3次元土質区分ボクセルモデルの例

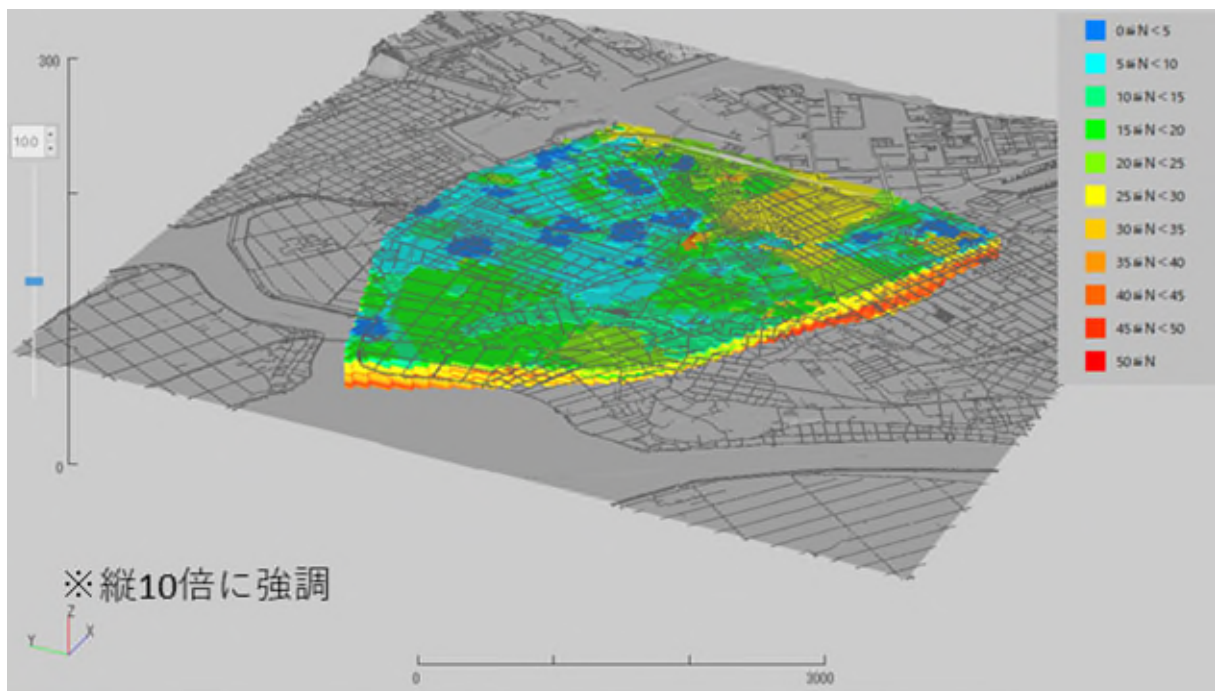


図 42 3次元N値ボクセルモデルの例

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。

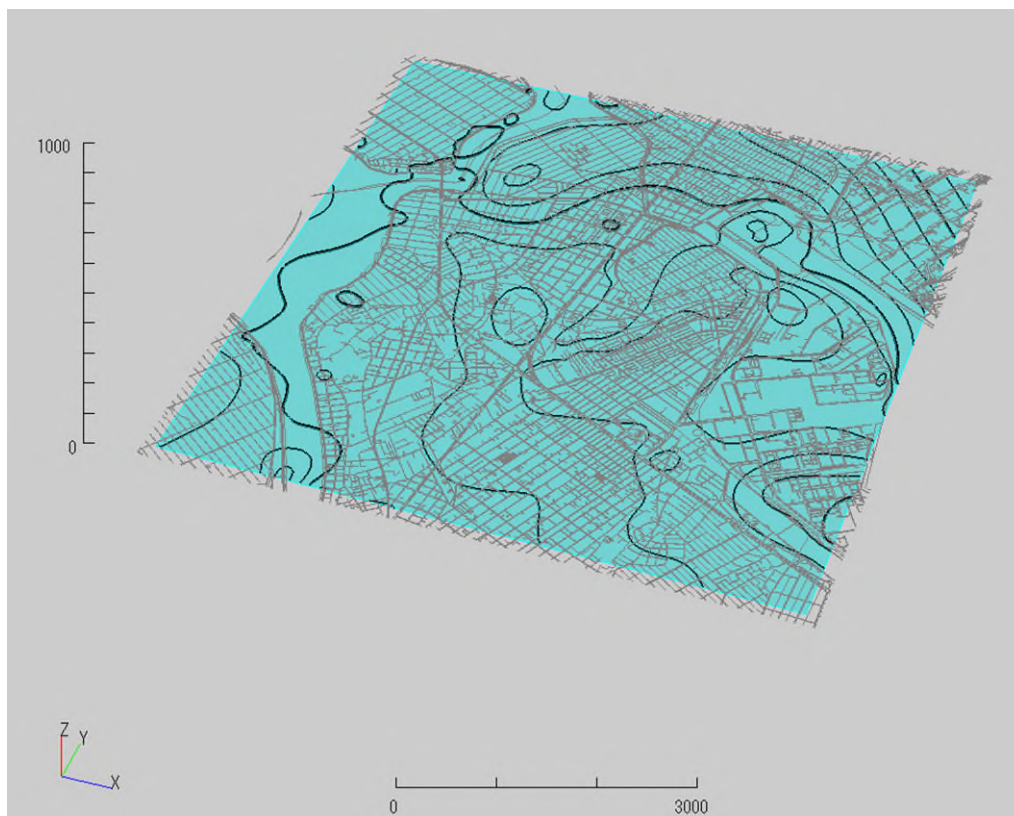


図 43 PDC 調査結果に基づく地下水位コンター図と地下水サーフェスモデル図

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	—	

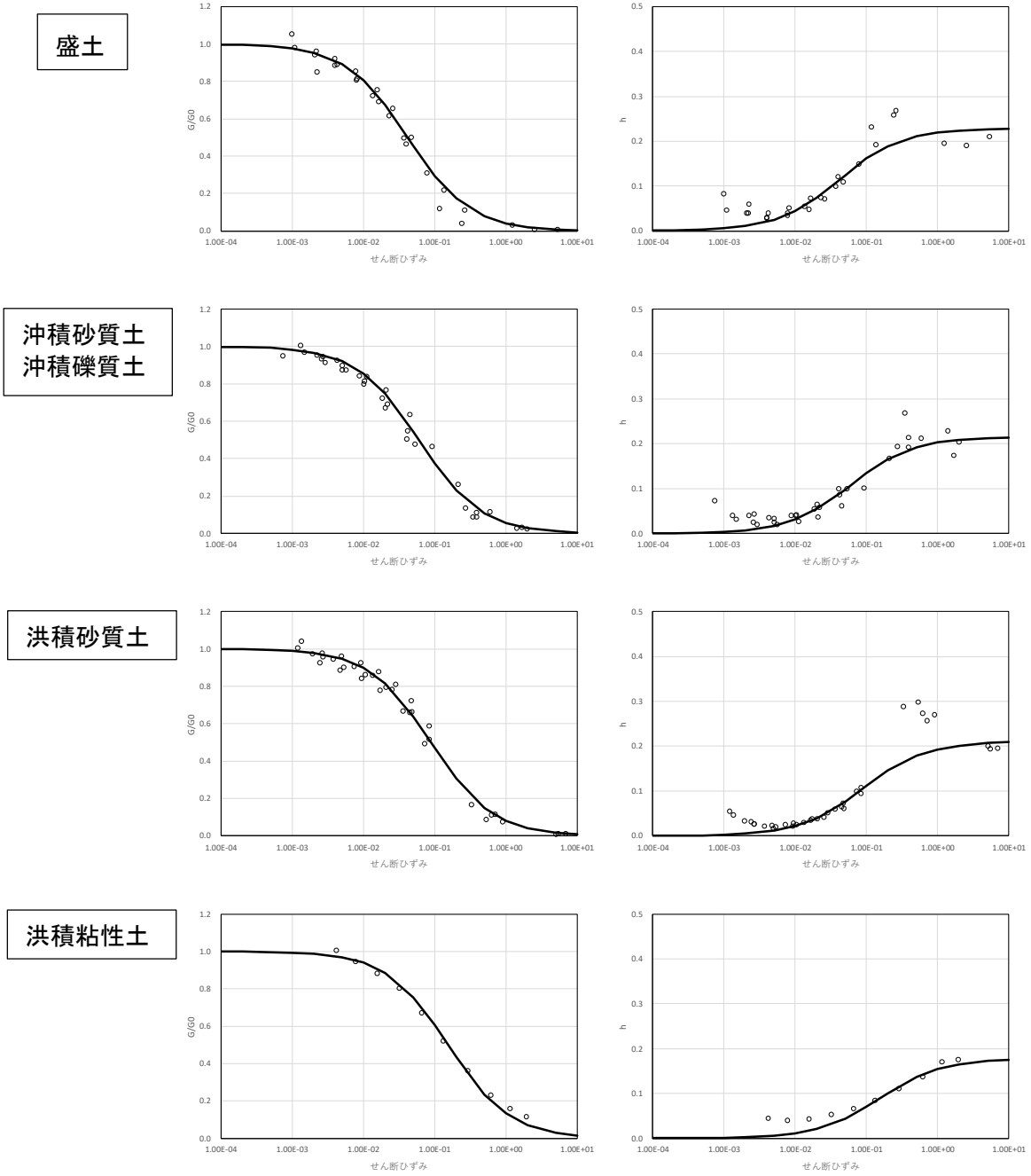


図 44 使用した室内試験結果に基づく動的変形特性

(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）。

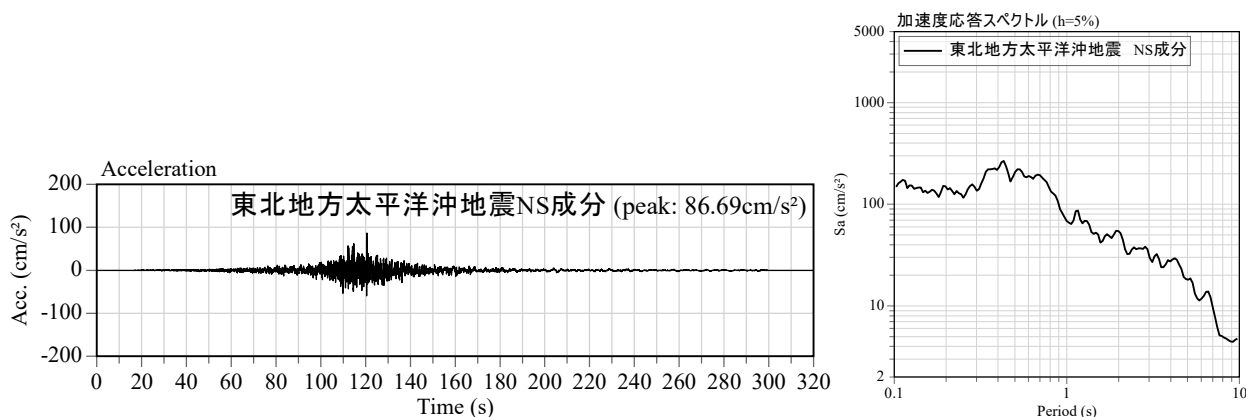


図 45 東北地方太平洋沖地震の加速度波形および加速度応答スペクトル (h=5%)

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。

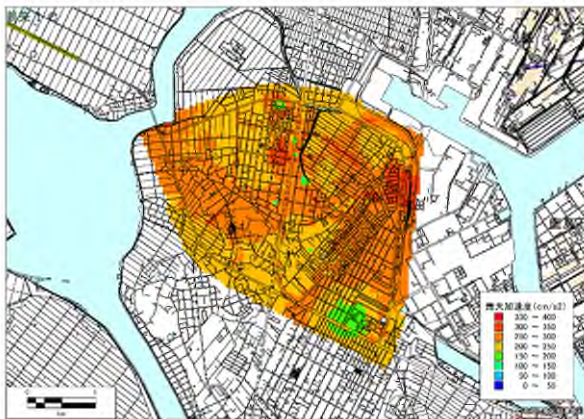


図 46 地震応答解析結果による地表最大加速度分布図

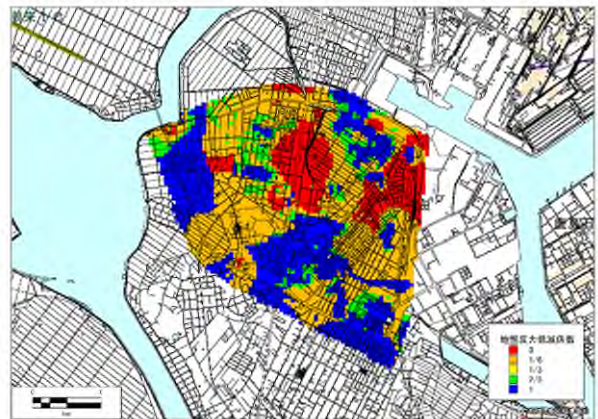


図 47 液状化指標値 (土の強度及び支持力の低下マップ)

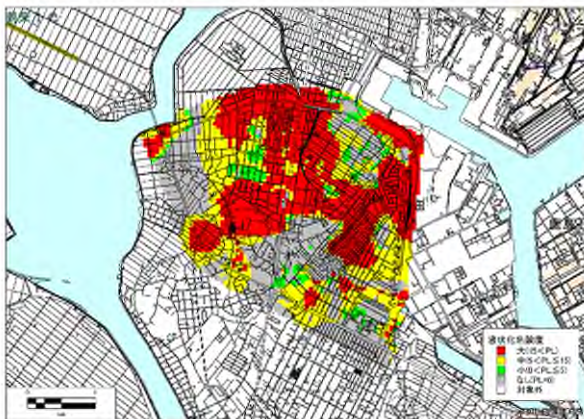


図 48 液状化指標値 (PL 値マップ)

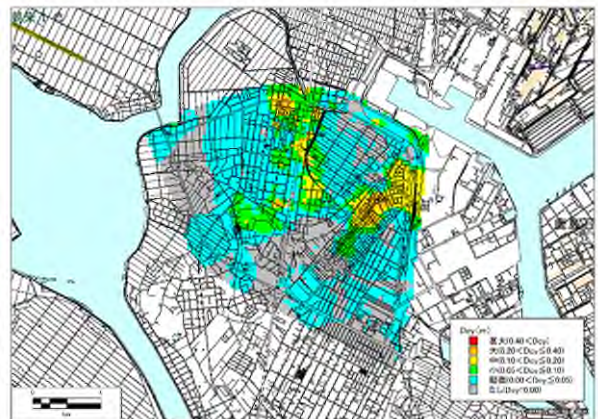


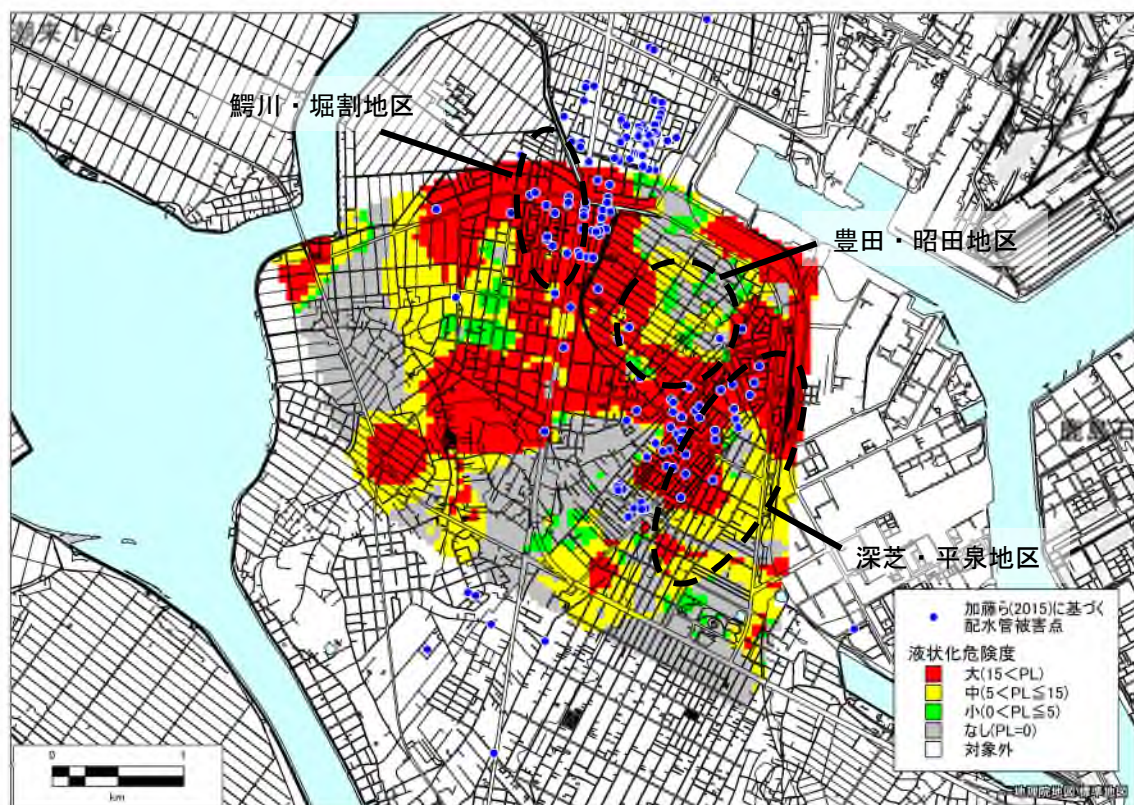
図 49 液状化指標値 (Dcy 値マップ)

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。



※鰯川・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。

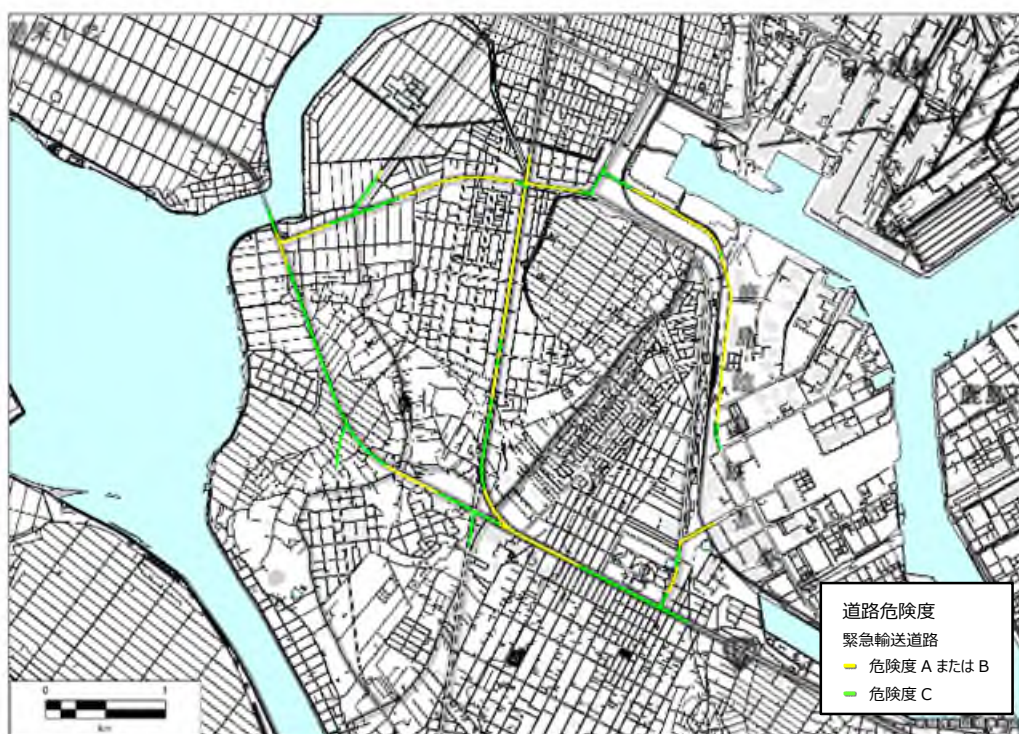


図 51 道路施設（緊急輸送道路）の液状化被害

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。

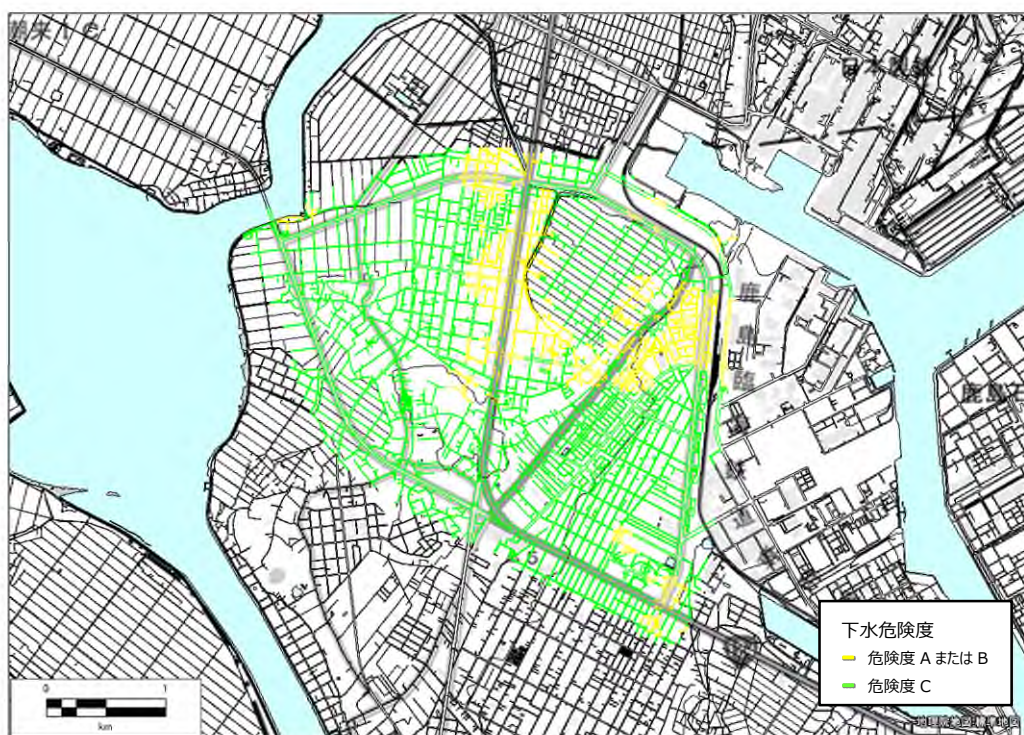


図 52 下水道施設の液状化被害