

第3 液状化の予測

1 概要

液状化とは、地下水の豊富な砂質の地盤が地震による震動で液体状になる現象のことである。

図 2.3-1 に地盤が液状化するメカニズムを示した。

地震前 1) の地盤は、砂の粒子同士が接した状態で安定しており、その間隙を地下水(間隙水)が埋めている(地盤が粘土質の場合は、粒子が砂よりも小さいため、間隙水が発生する状態にはならない)。

このような地盤が地震によって揺られる 2) と、間隙水にかかる圧力が上昇して砂粒同士の接合が離れることにより流動化して、一部は地表に噴砂として噴出する。

地震後 3) には、間隙水が消失した間隙を砂の粒子が埋めることにより、地盤が沈下して、建物を傾かせたりするなどの被害が発生する。

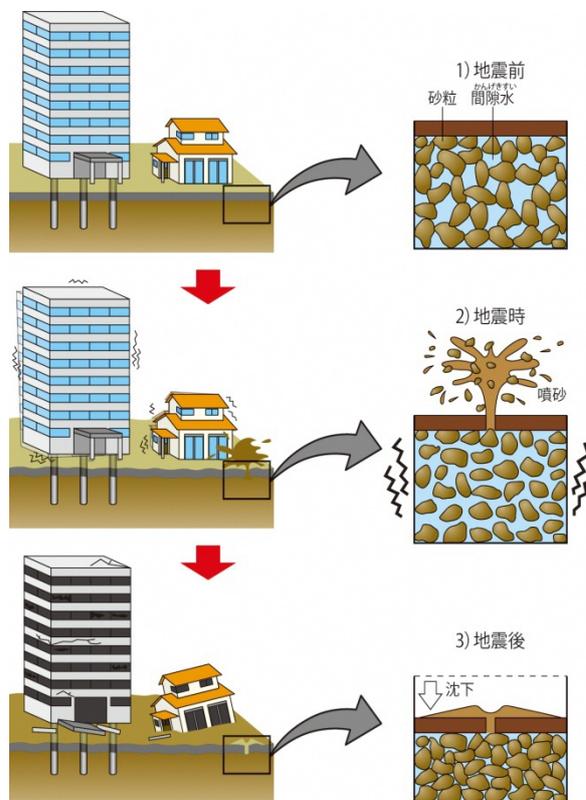


図 2.3-1 液状化のメカニズム

一般的に液状化が起りやすい条件としては、以下のことが挙げられる。

- ① 揺れが大きい場合の方が小さい場合より液状化しやすい。
- ② 同じ震度であっても、継続時間の短い地震（兵庫県南部地震など）よりも、継続時間の長い地震（東北地方太平洋沖地震、南海トラフの地震など）の方が液状化しやすい。
- ③ 自然に形成された地盤よりも、埋立地などの人工地盤の方が液状化しやすい。また、以前に河川だったところに砂が堆積して出来た地盤（旧河道）も液状化しやすい。
- ④ 粒子の細かい粘土、シルトを主体とする地盤よりも砂を主体とする地盤の方が液状化しやすい（砂を全く含まない地盤では、液状化は発生しない）。
- ⑤ 同じ砂質地盤でも、締まった地盤よりも緩い地盤の方が液状化しやすい。
- ⑥ 同じ砂質地盤でも、地下水位が高い方が液状化しやすい（地下水位が低い地盤では液状化は発生しない）。
- ⑦ 同じ砂質地盤でも、時代の新しい（完新世）地盤（沖積層）の方が液状化しやすい。更新世以前の砂質地盤は、液状化しにくい。

①、②は、地震の特性の違いによるものであり、③以降は地盤及び地下水位の違いによるものである。液状化の予測においては、このような条件が反映される。

以上を踏まえて、液状化予測手法については、船橋市（2011）¹や千葉県（2016）⁴でも採用し、実績も豊富であることから、メッシュごとに液状化指数（ P_L 値）を求める方法

を採用し、予測を行った。加えて、液状化による建物被害の想定に用いるため、メッシュごとの地盤沈下量についても予測を行った。

2 予測手法

液状化予測計算は、船橋市（2011）¹及び千葉県（2016）⁴でも採用されている**道路橋示方書***（日本道路協会（2012）¹³）の方法に準じて、後述するFL法及びこれを深度方向に重み付けして積分したFL法を用いた。前節の地震動予測結果及び前項で設定した地盤モデルを用いて予測計算を行う。

以下に、採用した手法について述べる。

（1）FL法

FL法とは、検討対象とする地盤（本調査では50mメッシュごとに作成した地盤モデル）の液状化対象層を抽出し、液状化対象層それぞれについて、液状化に対する抵抗力と地震力の強さを比較し、液状化に対する抵抗率（FL値）を求める手法である。

① 液状化予測対象メッシュ

液状化予測対象とするメッシュは沖積層及び埋立土層が分布する範囲、すなわち低地台地境界図における低地に該当するメッシュとした。ただし、台地においても表層に軟弱層が分布している場合は、液状化対象層に含めた。

② 液状化対象層

以下の全てに該当する地盤を液状化対象層とした。

- ・地下水位以深で、地表から深さ20mまでの沖積層の砂質土層。
- ・細粒分含有率FC*が35%以下の土層。

③ FL値

FL値は、次式で与えられる。

$$F_L = R/L \quad \text{——— (式 2.3-1)}$$

ここで、R：液状化抵抗比

L：繰り返しせん断強度

FL値が1.0を下回る層については、液状化するものと見なす。

***道路橋示方書**：橋や高架の道路等を設計するための日本道路協会より刊行されている技術指針。「V耐震設計編」には砂質地盤の液状化の判定手法（FL法）が示されており、地震被害想定調査においては広く参照されている。兵庫県南部地震等の知見を踏まえて何度か改訂されている。

***細粒分含有率FC**：地盤を構成する粒子は、粒子の大きい順に「礫」「砂」「シルト」「粘土」と呼ばれる。細粒分含有率は、これらのうち液状化しにくい細かい粒子である「シルト」「粘土」が地盤全体の中で占める割合のことである。

④ 液状化抵抗比 R の求め方

液状化抵抗比 R とは、地盤がどれだけ液状化しにくいを示す指標であり、 N 値や地震動のタイプ等を考慮して、以下の式により与えられる。

$$R = c_w R_L \quad \text{—— (式 2.3-2)}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} \quad (N_a < 14)$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \cdot 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} \quad (14 \leq N_a)$$

ここで、

<砂質土の場合>

$$N_a = N_1 + \Delta N$$

$$N_1 = 1.7 \cdot N / (\delta_v' + 0.7)$$

$$\Delta N = 0 \quad (0\% \leq FC < 8\%)$$

$$\Delta N = 20.769 \times \log_{10}(FC) - 18 \quad (8\% \leq FC < 40\%)$$

$$\Delta N = 15.27 \quad (40\% \leq FC)$$

<礫質土の場合>

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50} / 2)\}$$

ここに、

R : 液状化抵抗比

c_w : 地震動特性による補正係数*

R_L : 繰返し三軸強度比*

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧* 1kgf/cm² 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

ΔN : 亀井ほか (2002) ¹⁴による東京低地における細粒分の影響を補正する N 値

FC : 細粒分含有率(%) (粒径 75 μ m 以下の土粒子の通過質量百分率*)

D_{50} : 平均粒径* (mm)

(タイプ I ^{*1} の地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

*地震動特性による補正係数：地震の揺れの継続時間が長いか短いかによって液状化のしやすさが異なることから、これを考慮するために導入した係数。

*繰返し三軸強度比：地盤の強度を表す指標。正式には「繰返し三軸試験」という室内土質試験で測定されるが、ここでは N 値による推定式で算定される。

*有効上載圧：地盤内のある 1 点において、より上位の地盤の荷重により受ける圧力（全上載圧）から、地下水による浮力を引いたもの。

*通過質量百分率：細粒分含有率の測定方法として、よくほぐした土粒子を網目の大きさの異なる様々なふるいにかけることが行われる。通過質量百分率は、全土粒子のうちどれだけの割合がふるいを通じたかを質量の比で表した値。

*平均粒径：地盤を構成する土粒子を大きい順に並べたと仮定したときに、中央にくる粒子の大きさ。

(タイプⅡ^{※2}の地震動の場合)

$$c_w = 1.0 \quad (R_L \leq 0.1)$$

$$c_w = 3.3R_L + 0.67 \quad (0.1 < R_L \leq 0.4)$$

$$c_w = 2.0 \quad (0.4 < R_L)$$

※1 タイプⅠ：大きな振幅が長時間繰り返して作用する地震動（プレート境界型の大規模な地震）を表したものである。

※2 タイプⅡ：継続時間は短い極めて強度を有する地震動（兵庫県南部地震のような内陸型地震）を表したものである。千葉県北西部直下地震および船橋市役所直下の地震はタイプⅡに該当する。

⑤ 繰り返しせん断強度 L の求め方

繰り返しせん断強度 L とは、地盤内のある 1 点にかかる地震力の大きさを表す指標であり、地表加速度から以下の換算式を用いて求める。

$$L = r_d \cdot \alpha / g \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad \text{——— (式 2.3-3)}$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

$$\sigma_v = \{ \gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2} (x - h_w) \} / 10$$

$$\sigma'_v = \{ \gamma'_{t1} h_w + \gamma'_{t2} (x - h_w) \} / 10$$

ここに、

L ：繰り返しせん断強度

r_d ：繰り返しせん断強度の深さ方向の**低減係数***

α ：地表最大加速度 (gal)

g ：重力加速度 (980gal)

σ_v ：全上載圧* (kgf/cm²)

σ'_v ：有効上載圧 (kgf/cm²)

x ：地表面からの深さ (m)

γ_{t1} ：地下水位面より浅い位置での土の**単位体積重量*** (tf/m³)

γ_{t2} ：地下水位面より深い位置での土の**単位体積重量** (tf/m³)

γ'_{t2} ：地下水位面より深い位置での土の**有効単位体積重量*** (tf/m³)

h_w ：地下水位の深さ (m)

* (繰り返しせん断強度の深さ方向の) **低減係数**：地震力の大きさである繰り返しせん断強度が地盤内でどのような分布をするかは、地震の種類、大きさや地盤状況によって異なる。しかしながら、過去の地震時の状況を調べた結果では、ある深さにおける繰り返しせん断強度は、地表における値からある一定値を深さに乗じた値を引くことで近似できるとされており、深さに乗じる値を低減係数と呼んでいる。

***全上載圧**：地盤内のある 1 点において、より上位の地盤の荷重により受ける圧力。

***土の単位体積重量**：単位体積当たりの土の重さ。本調査では土質区分、 N 値ごとに設定している。

***土の有効単位体積重量**：単位体積重量から、地下水の重量 (1tf/m³) を引いたもの。

(2) P_L 法

日本道路協会 (2012) ¹³ に示された手順に従って、地表からの各深度での F_L 値を算出し、その値を深さ方向に重みをつけて足し合わせ (図 2.3-2 参照)、地点での液状化危険度を表す P_L 値を算出し、この P_L 値によって液状化危険度の判定を行う。液状化危険度判定は、岩崎ほか (1980) ¹⁵ による図 2.3-2 及び表 2.3-1 に示すような関係により判定を行う。 F_L 値から P_L 値を計算した例を表 2.3-2 に示す。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad \text{—— (式 2.3-4)}$$

ここに、

P_L : 液状化指数

F_L : 液状化に対する抵抗率

x : 地表面からの深さ (m)

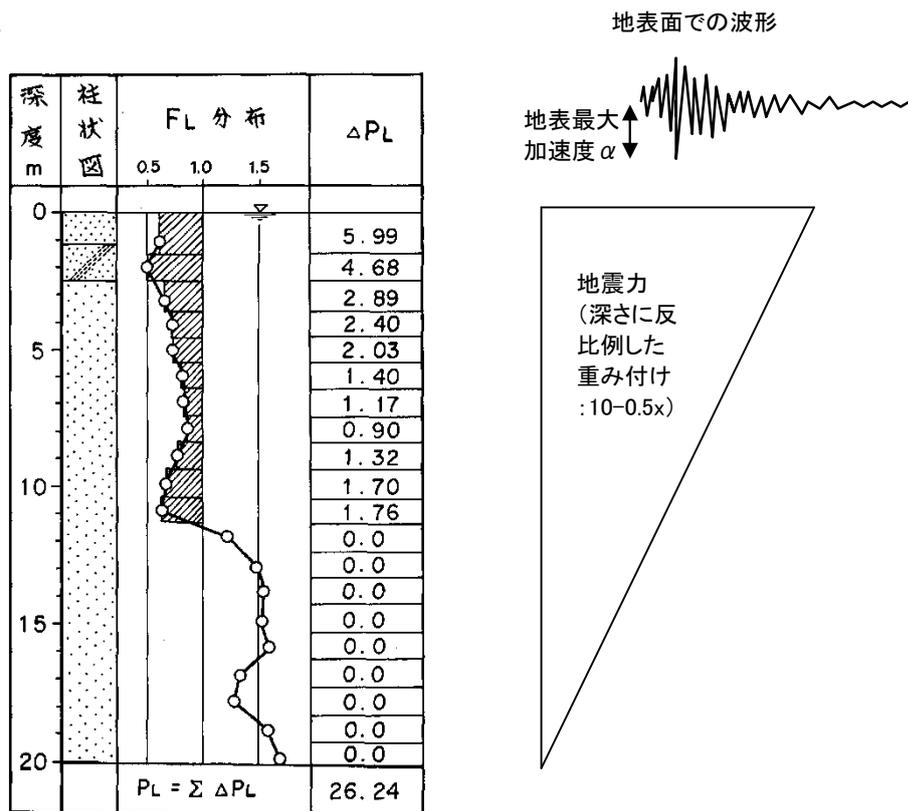


図 2.3-2 P_L 値の概念図 (岩崎ほか (1980) ¹⁵ に加筆)

表 2.3-1 P_L 値による液状化危険度判定区分

	$P_L=0$	$0 < P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$P_L > 15$
P_L 値による液状化危険度判定	液状化危険度は低い。	液状化危険度はやや高い。	液状化危険度は高い。	液状化危険度は極めて高い。

表 2.3-2 P_L 値の計算例

P_L 値 32.014

判定深度 Z (m)	判定層厚 ΔZ (m)	FL	(1-FL)	重み関数 W	ΔPL
1.00	1.00	0.727	0.273	9.50	2.595
2.00	1.00	0.688	0.312	9.00	2.804
3.00	1.00	0.573	0.427	8.50	3.627
4.00	1.00	0.592	0.408	8.00	3.262
5.00	1.00	4.269	0.000	7.50	0.000
6.00	1.00	0.673	0.327	7.00	2.286
7.00	1.00	0.637	0.363	6.50	2.357
8.00	1.00	0.615	0.385	6.00	2.312
9.00	1.00	0.547	0.453	5.50	2.493
10.00	1.00	1.359	0.000	5.00	0.000
11.00	1.00	0.460	0.540	4.50	2.428
12.00	1.00	0.544	0.456	4.00	1.825
13.00	1.00	0.537	0.463	3.50	1.620
14.00	1.00	0.529	0.471	3.00	1.412
15.00	1.00	0.660	0.340	2.50	0.851
16.00	1.00	0.554	0.446	2.00	0.892
17.00	1.00	0.582	0.418	1.50	0.626
18.00	1.00	0.559	0.441	1.00	0.441
19.00	1.00	0.636	0.364	0.50	0.182
20.00	1.00	0.592	0.408	0.00	0.000

(3) 沈下量

内閣府（2012）¹⁶の方法に従って、液状化に伴う地盤の沈下量を求める。

沈下量の計算については、全液状化対象層について F_L 値の計算結果より体積ひずみ（＝各層の沈下量）を求め、これを合計することにより求める。沈下量の計算の流れを図2.3-3に示す。

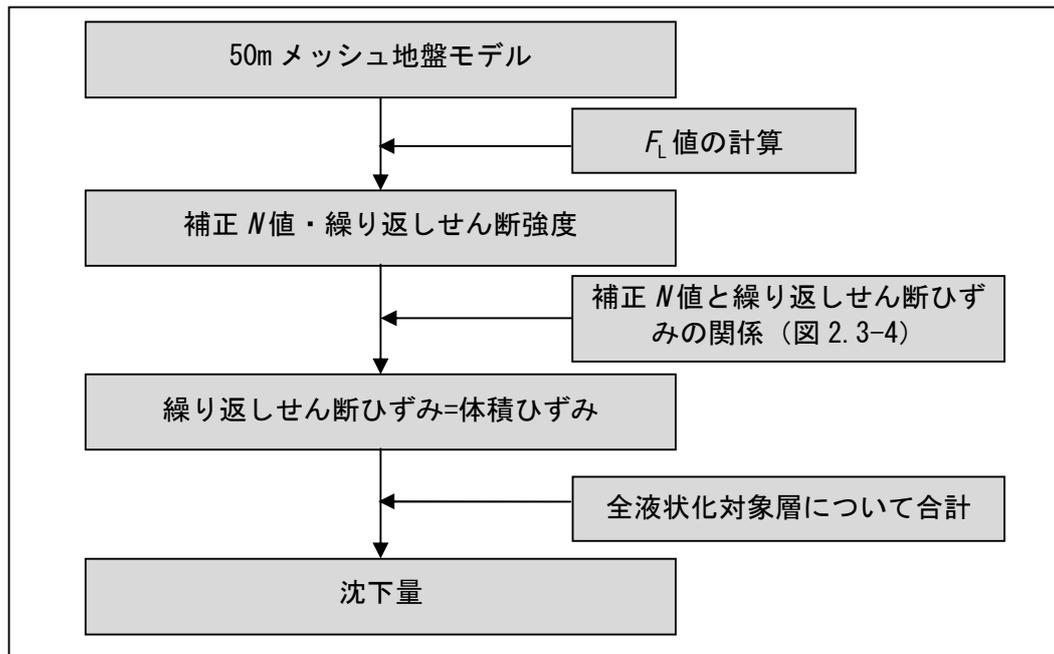


図 2.3-3 沈下量計算の流れ

まず、建築基礎構造設計指針（日本建築学会（2001）¹⁷）に示されている補正 N 値と繰り返しせん断ひずみの関係（図2.3-4）を用いて、検討対象とする層の補正 N 値 N_a （横軸）と繰り返しせん断強度 L （縦軸：図中では応力比）をプロットし（補正 N 値、繰り返しせん断強度については、 F_L 値の項を参照）、プロットした点に対応する繰り返しせん断ひずみの値を繰り返しせん断ひずみ γ_{cy} 曲線から読み取る。例えば $N_a=15$ 、 $L=0.3$ とすると、 $\gamma_{cy}=2\%$ の曲線と重なることから、 $\gamma_{cy}=2\%$ であると読み取れる。

プロットした点が曲線と曲線の間に来る場合は、それぞれの曲線の γ_{cy} の値を対数補間することにより求める。このとき、繰り返しせん断ひずみ 8% の曲線より左側にプロットされる場合には $\gamma_{cy}=8\%$ とし、 0.5% より右側にプロットされる場合には、 $\gamma_{cy}=0.5\%$ とする。

せん断ひずみと体積ひずみとは異なる概念である（図 2.3-5）が、ここでは両者を同等であるとみなして、繰り返しせん断ひずみ γ_{cy} を体積ひずみ ε_v として読み替える。そして、沈下量 S を次のようにして推定する。

$$S = \sum_{i=1}^n (H_i \times \varepsilon_{vi}) \quad \text{— (式 2.3-5)}$$

ここに、

S : 沈下量

H_i : $F_L < 1.0$ となる砂質土層 i の層厚

ε_{vi} : $F_L < 1.0$ となる砂質土層 i の体積ひずみ

n : $F_L < 1.0$ となる砂質土層数

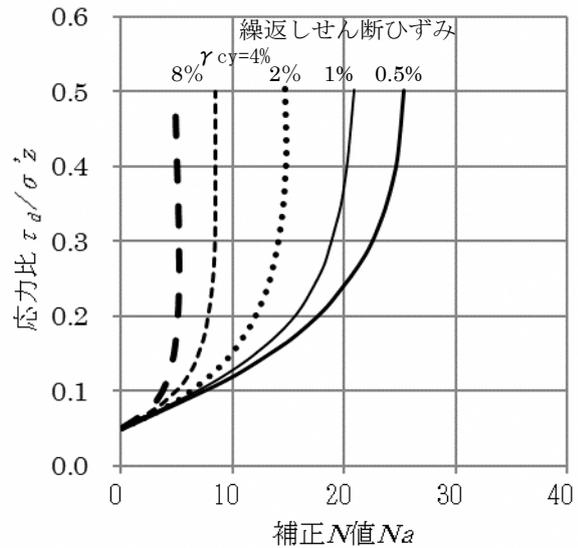
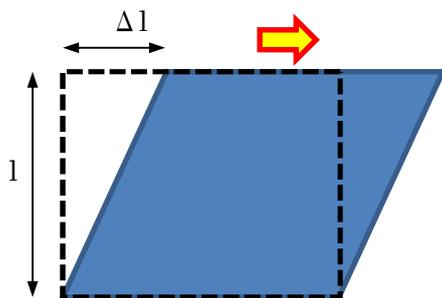
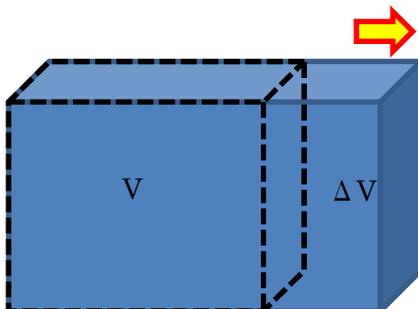


図 2.3-4 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係

(日本建築学会 (2001) ¹⁷, p66, 図 4.5.7 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係に加筆)



高さ 1 の長方形 (点線) の上辺を右に Δl だけ移動して平行四辺形 (青色) に変形させたとき、「 $\Delta l/l$ 」の値を「せん断ひずみ」という。



体積 V の箱 (点線) の右側面を引っ張って ΔV だけ横長に膨張させた (青色) とき、「 $\Delta V/V$ 」の値を「体積ひずみ」という。

図 2.3-5 せん断ひずみ (上) と体積ひずみ (下) の概念

3 物性値

液状化危険度予測計算のために必要な物性値については、千葉県（2016）⁴と同様に設定した。

（1）地下水位

液状化予測計算のための地下水位については、収集したボーリングデータから低地部のデータを抽出し、孔内水位の値を面的に補間して求めた（図2.3-6）。

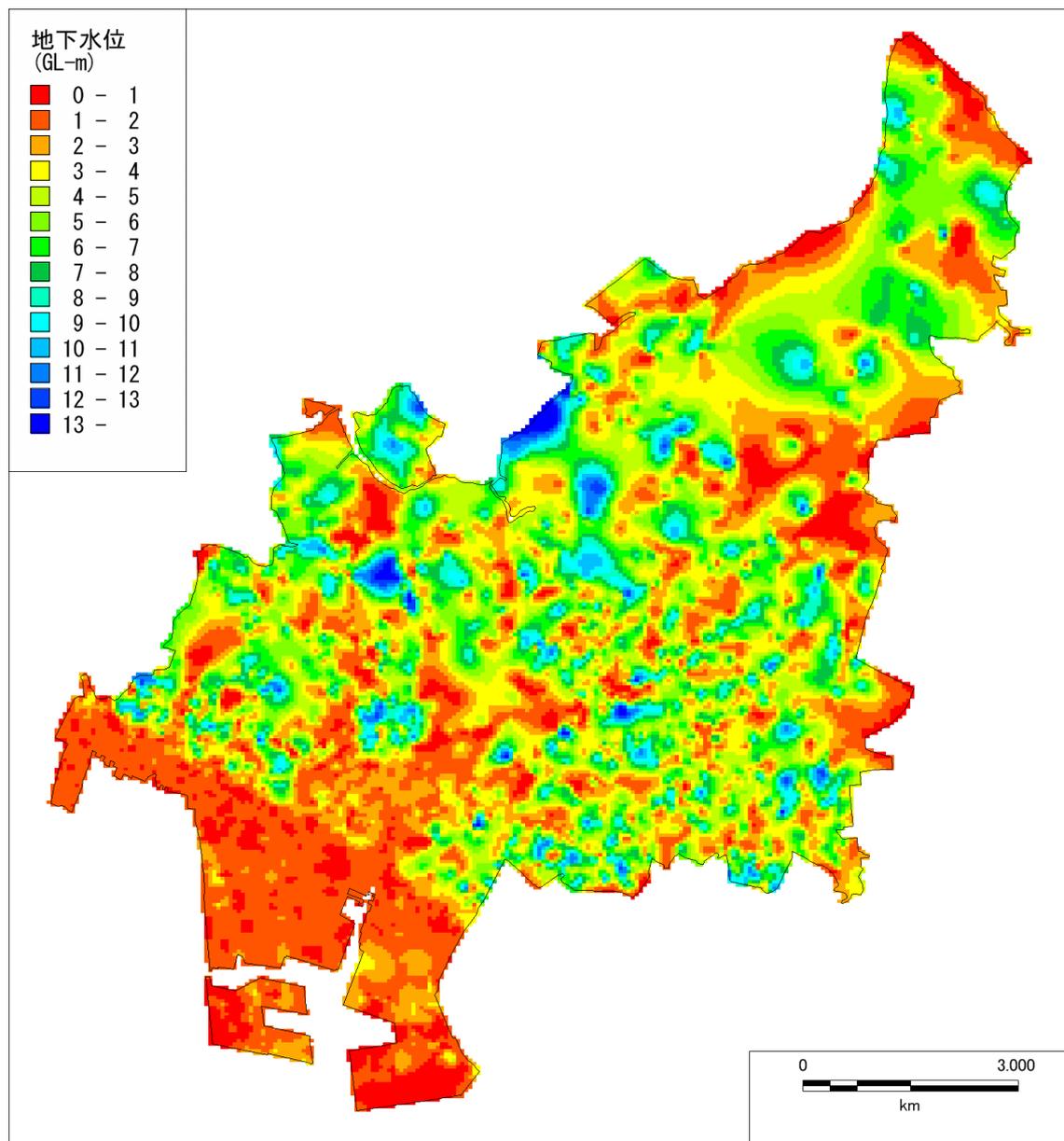


図2.3-6 設定した地下水位の分布

(2) 細粒分含有率

液状化計算の入力パラメータである細粒分含有率について、表 2.3-3 のように設定した。

表 2.3-3 設定した液状化対象層の細粒分含有率

地形	土質区分	記号	係数a	係数b
埋立地	埋土(砂)	Fs	-0.0197	1.4564
	埋土(全土質)	F	-0.0367	1.6854
低地	盛土(砂)	Bs	-0.0153	1.4746
	盛土(全土質)	B	-0.0303	1.6986
	沖積砂	As	-0.0240	1.6035

※係数 a、係数 b : $\log(Fc)=a \times N+b$ 式の係数 a、b

※埋土、盛土については、砂であることが読み取れる場合は(砂)の係数を、土質区分不明の場合は(全土質)の係数を用いた。

4 予測結果

千葉県北西部直下地震が発生した場合の液状化の予測結果を図2.3-7～2.3-8に、船橋市役所直下の地震(タイプⅠ)を図2.3-9～2.3-10に、船橋市役所直下の地震(タイプⅡ)を図2.3-11～2.3-12に示した。

液状化危険度については、市南部の低地において液状化危険度の高い領域が広がっている。これに対して市の北側の台地では、河川沿いに液状化危険度の高い領域が分布する以外は、液状化危険度は低くなっている。

地震ごとの液状化危険度分布を比較すると、千葉県北西部直下地震が、他と比べて液状化危険度が高い領域がやや広がっている。

図2.3-13に、千葉県(2016)⁴⁾による千葉県北西部直下地震の液状化危険度予測結果を示した。今回の予測結果(図2.3-7)と比較すると、市南部の低地の液状化危険度の高い領域がやや狭くなっているが、概ね傾向は一致している。両者の相違については、今回の予測には新たなボーリングデータを反映して地盤モデルの精度を向上させたことによるものと考えられる。

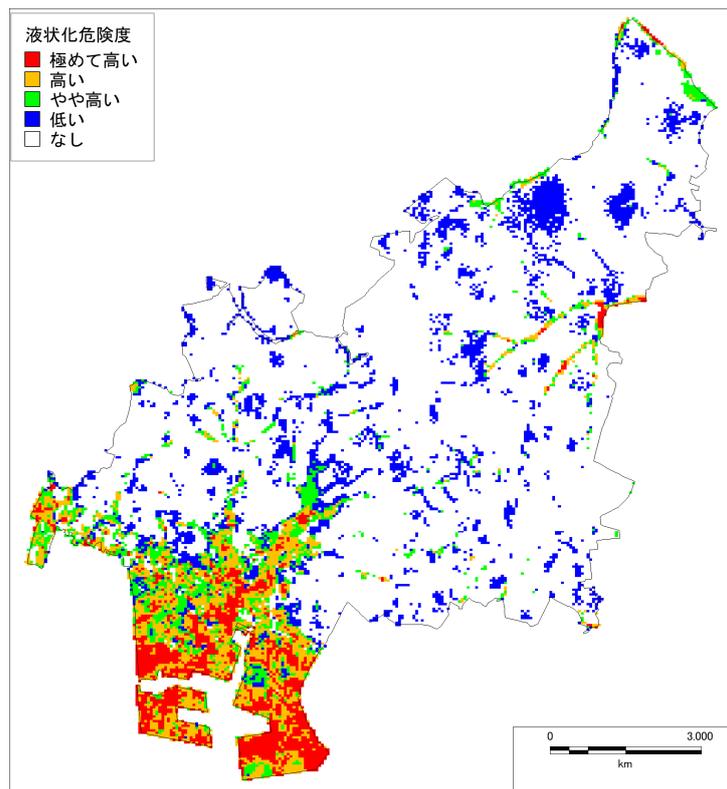


図 2.3-7 液状化危険度（千葉県北西部直下地震）

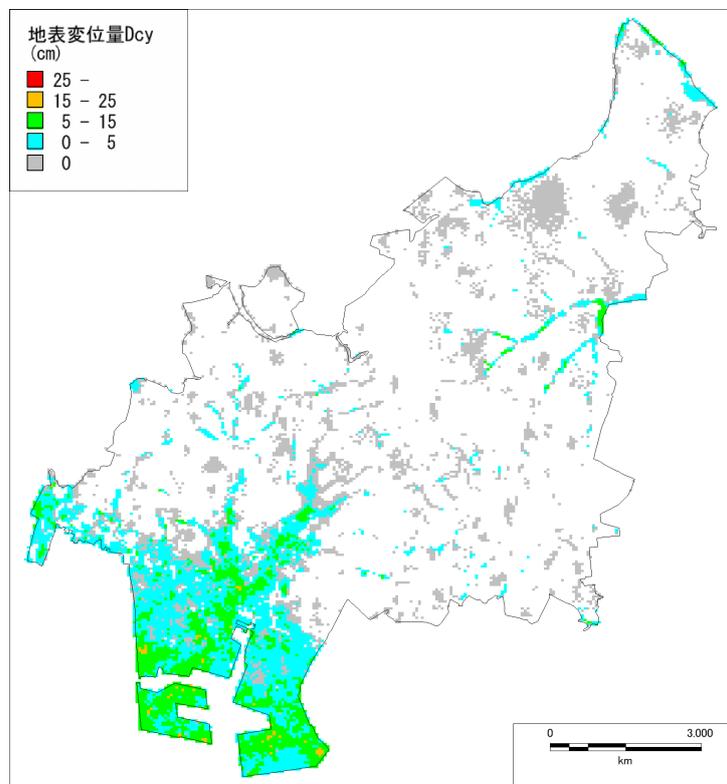


図 2.3-8 液状化に伴う沈下量（千葉県北西部直下地震）

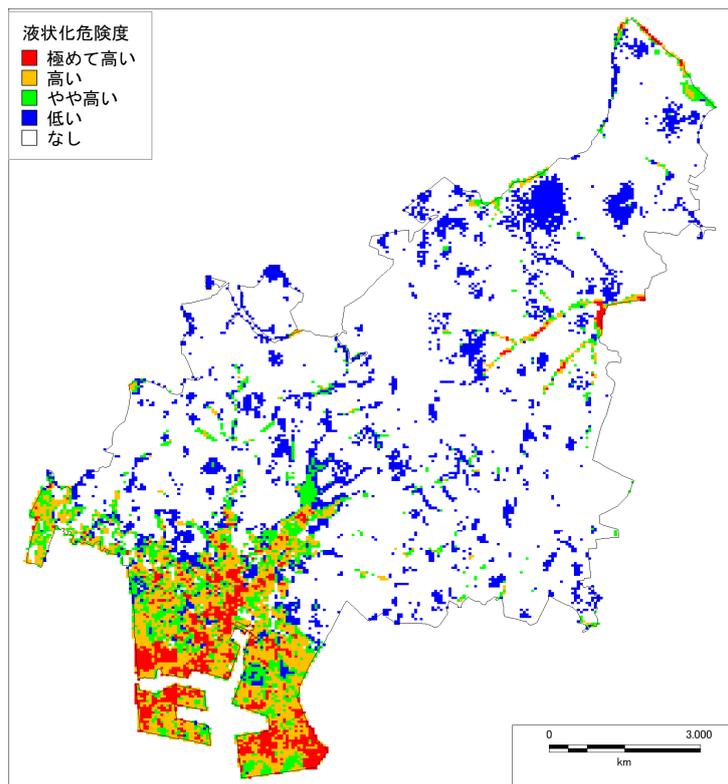


図 2.3-9 液状化危険度（船橋市役所直下の地震（タイプ I））

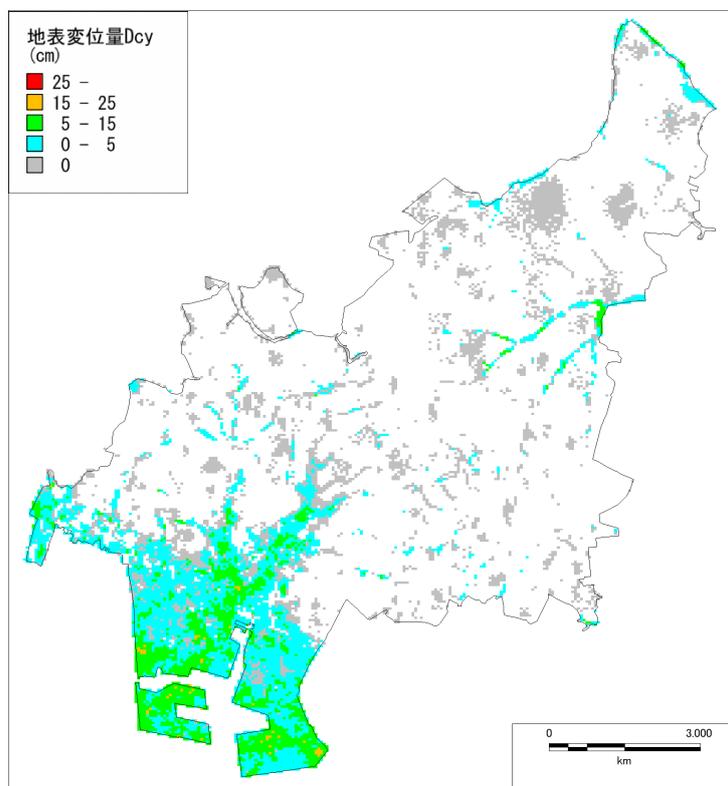


図 2.3-10 液状化に伴う沈下量（船橋市役所直下の地震（タイプ I））

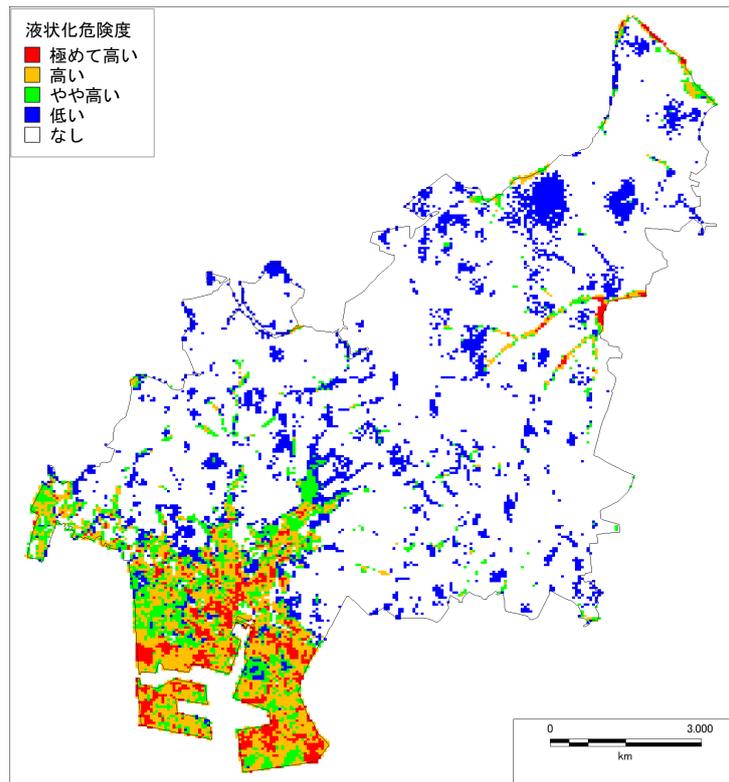


図 2.3-11 液状化危険度（船橋市役所直下の地震（タイプⅡ））

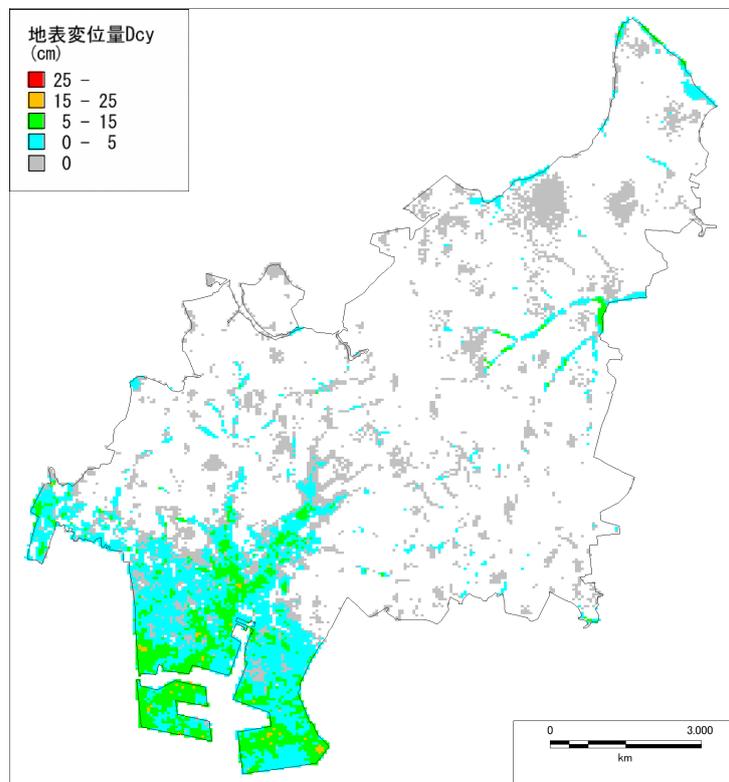
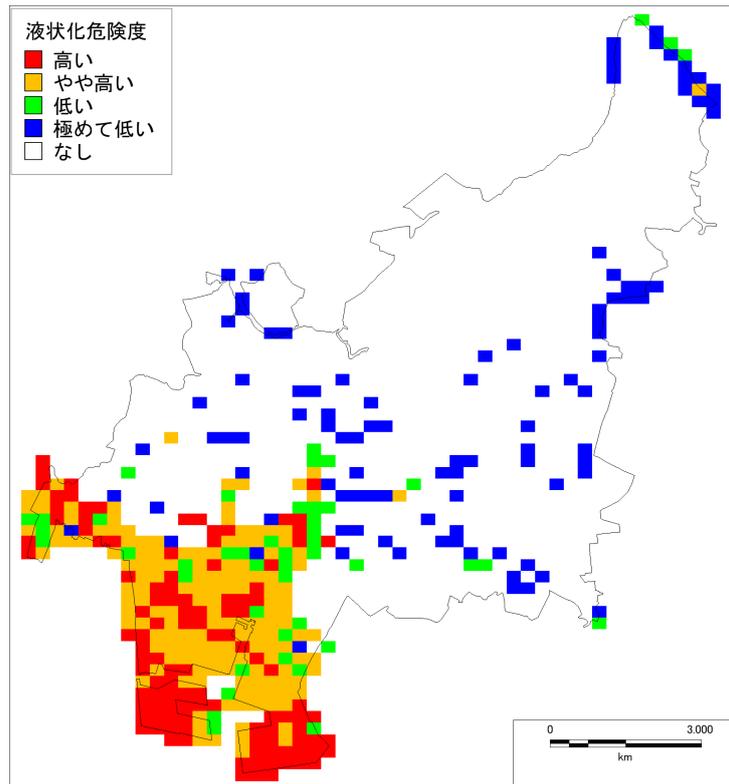


図 2.3-12 液状化に伴う沈下量（船橋市直下の地震（タイプⅡ））



※東北地方太平洋沖地震において液状化被害を受けた教訓を踏まえ、本市では、千葉県(2016)⁴の液状化危険度の表記の「高い」を「極めて高い」、「やや高い」を「高い」、「低い」を「やや高い」、「極めて低い」を「低い」と表記した。

図 2.3-13 千葉県北西部直下地震 液状化危険度
(千葉県(2016)⁴による想定 250mメッシュ)