

第3章 液状化危険度予測

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振動で液体状になる現象のことである。

図 3.1-1 に地盤が液状化するメカニズムを示す。

地震前の地盤 1) 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。

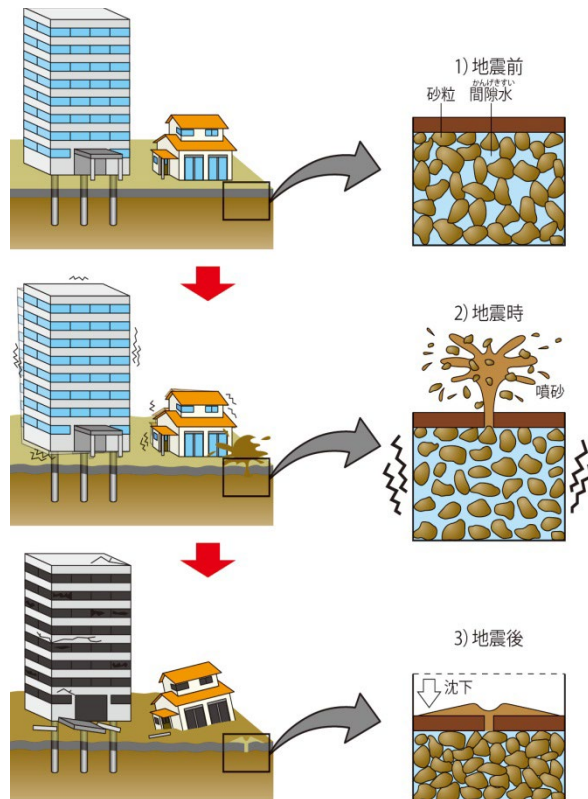


図 3.1-1 液状化のメカニズム

一般的に液状化が起こりやすい条件としては、以下のことが挙げられる。

- (a) 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。
- (b) 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（大正関東地震、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。
- (c) 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。
- (d) 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。）
- (e) 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。
- (f) 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。）
- (g) 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（洪積層）は、液状化しにくい。

(a)、(b)は、地震の特性の違いによるものであり、(c)以降は地盤及び地下水位の違いによるものである。上記の条件が液状化の予測結果に反映される。

以上を踏まえて、液状化予測手法については、国・自治体でも採用し、実績も豊富であることから、メッシュごとに液状化指数（ F_L 値）を求める方法を採用し、液状化予測を行った。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

液状化予測計算は自治体の被害想定調査において通常採用されている**道路橋示方書** *（2017）²¹の方法に準じて、後述する F_L 法及びこれを深度方向に重み付けして積分する P_L 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った。以下に、採用した手法について述べる。

（1） F_L 法

F_L 法とは、検討対象とする地盤（本業務では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とを比較し、液状化に対する抵抗率（ F_L 値）を求める手法である。

① 液状化対象層

本業務においては、東日本大震災の液状化履歴を考慮するため、**建築基礎構造設計指針** *（2019）²²を参照して洪積層の砂層も液状化対象に入れている。

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 までの砂質土層。
- ・ 細粒分含有率 F_c *が 35%以下の土層。

② F_L 値

F_L 値は、次式で与えられる。

$$F_L = R/L \quad \text{———（式 3.2-1）}$$

R：液状化抵抗比、L：繰返しせん断強度

F_L 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（ F_L 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。阪神・淡路大震災等の知見を踏まえて何度か改訂されている。

***建築基礎構造設計指針**：建築物の基礎設計に関する規定を示しており、日本建築学会から出版されている。建築物の基礎の設計に関連して、液状化する地盤の判定方法について明記されている。

***細粒分含有率 F_c** ：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。

③ 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かを示す指標であり、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。

$$R = c_w R_L \quad \text{——— (式 3.2-2)}$$

$$R_L = \begin{cases} R_L = 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ R_L = 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \cdot 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

$$N_a = \begin{cases} C_{Fc}(N_1 + 2.47) - 2.47 & (D_{50} < 2\text{mm}) \\ \{1 - 0.36\log_{10}(D_{50}/2)\}/N_1 & (D_{50} \geq 2\text{mm}) \end{cases}$$

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma_{vb}' + 70)$$

$$C_{Fc} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 20)/30 & (10\% \leq F_c < 40\%) \\ (F_c - 16)/12 & (40\% \leq F_c) \end{cases}$$

ただし、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 100kN/m² 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

C_{Fc} ：細粒分含有率による N 値の補正係数

σ_{vb}' ：標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効上載圧 (kN/m²)

F_c ：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 の地震動の場合)

$$c_w = 1.0$$

(タイプ II 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：継続時間は短いが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。

④ 繰返しせん断強度 L の求め方

繰返しせん断強度 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た。

$$L = r_d \cdot \alpha / g \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad \text{——— (式 3.2-3)}$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

ここに、

L : 繰返しせん断強度

r_d : 繰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)

(2) P_L 法

道路橋示方書 (2017) 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 3.2-1 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った。液状化危険度判定は、岩崎ら (1980) ²³による図 3.2-1 及び表 3.2-1 に示すような関係により判定を行った。

液状化危険度で用いる地盤モデルが 250m であるため、 P_L 値が 250m メッシュで出力される。詳細評価を行うために、 P_L 値を微地形ごとに平均化し、50m メッシュの P_L 値を算出した。 P_L 値の平均化計算までの流れを図 3.2-2 に示す。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad \text{——— (式 3.2-4)}$$

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)

* (繰返しせん断強度の) 低減係数 : 地震力の大きさである繰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。

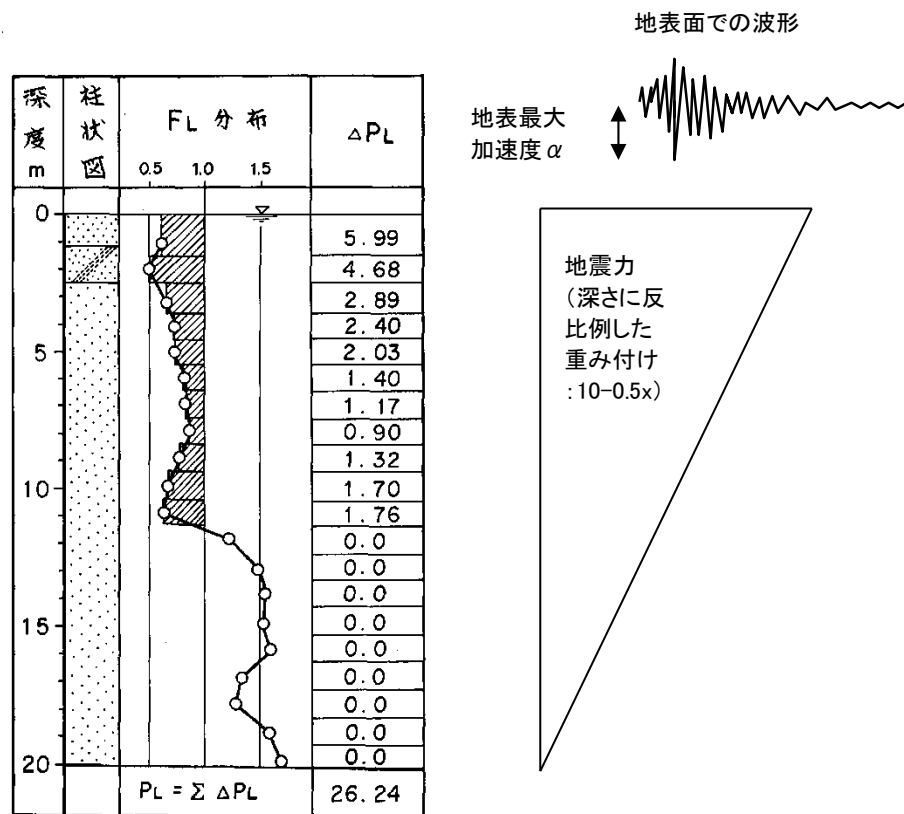


図 3.2-1 PL 値の概念図 (岩崎ほか (1980) に加筆)

表 3.2-1 PL 値による液状化危険度判定区分 (岩崎ほか (1980))

PL	PL=0	0<PL≤5	5<PL≤15	PL>15
PL 値による液状化危険度判定	液状化危険度はかなり低い。	液状化危険度は低い。	液状化危険度は高い。	液状化危険度は極めて高い。

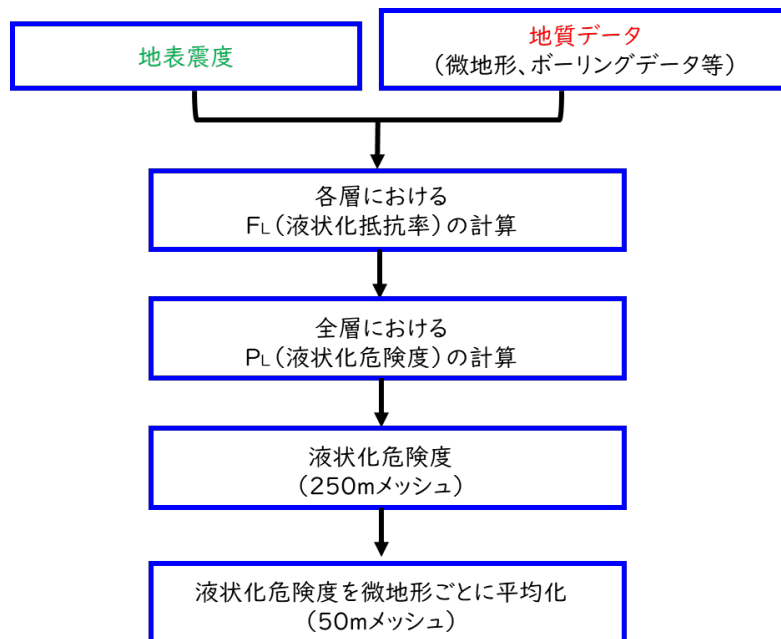


図 3.2-2 液状化危険度の平均化計算までの流れ

(3) 沈下量

内閣府（2012a）²⁴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た。250m メッシュで出力された沈下量を詳細評価するために、微地形ごとに平均化を行い、50m メッシュの沈下量を算出した。沈下量の計算の流れを図 3.2-3 に示す。

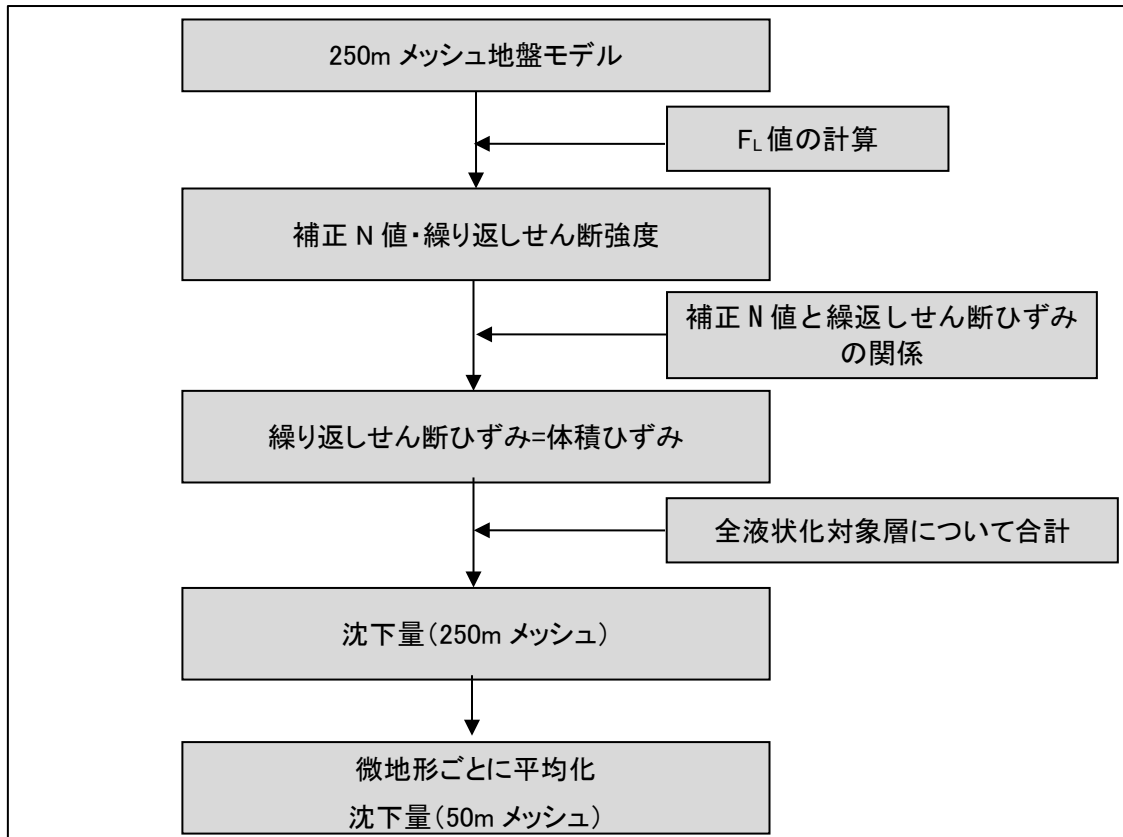


図 3.2-3 沈下量計算の流れ

まず、建築基礎構造設計指針（2001）²⁵に示されている補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係（図 3.2-4）を用いて、検討対象とする層の補正 N 値 N_a （横軸）と繰返しせん断強度 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返しせん断ひずみの値を繰返しせん断ひずみ 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 3.2-5）が、ここでは両者を同等であるとみなして、繰返しせん断ひずみ 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。

$$S = \sum_{i=1}^n (H_i \times \varepsilon_{vi}) \quad \text{— (式 3.2-5)}$$

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

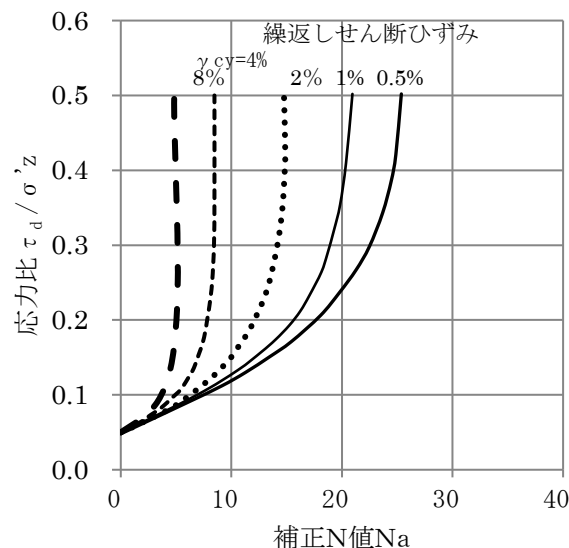
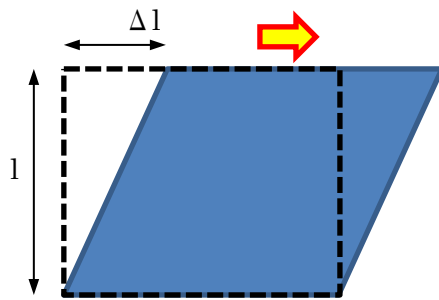
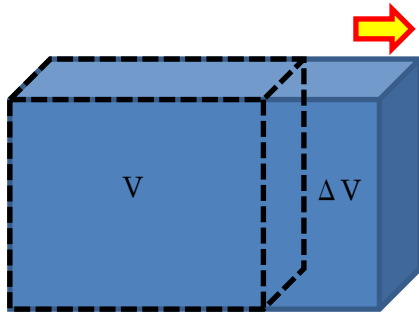


図 3.2-4 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係
(建築基礎構造設計指針（2001）、p66、補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係に加筆)



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 3.2-5 せん断ひずみ（上）と体積ひずみ（下）の概念

3 予測結果

液状化危険度分布及び液状化に伴う沈下量を、図 3.3-1～図 3.3-3 に示す。

ここで、図 3.3-1～図 3.3-3 の判定対象外メッシュは、液状化対象層がないメッシュであり、液状化計算の対象外としたものである。また、沈下量分布の灰色メッシュは、沈下量の計算は行ったが沈下量 0cm となったメッシュを示している。液状化危険度が高い箇所については、重要な構造物に対してより詳細な調査及び液状化対策が一般には必要とされる。液状化危険度が極めて高い箇所については、液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避とされる。

3 地震とも、北部のローム台地を除いたエリアで液状化危険度が高い及び極めて高いが示されており、市内を相対的にみると沈下量も大きくなった。入力地震動も大きいことも要因であるが、液状化対象地域では緩い砂が多く堆積し、液状化しやすい地盤が比較的厚く分布するため、液状化の可能性が高くなる傾向になったと考えられる。

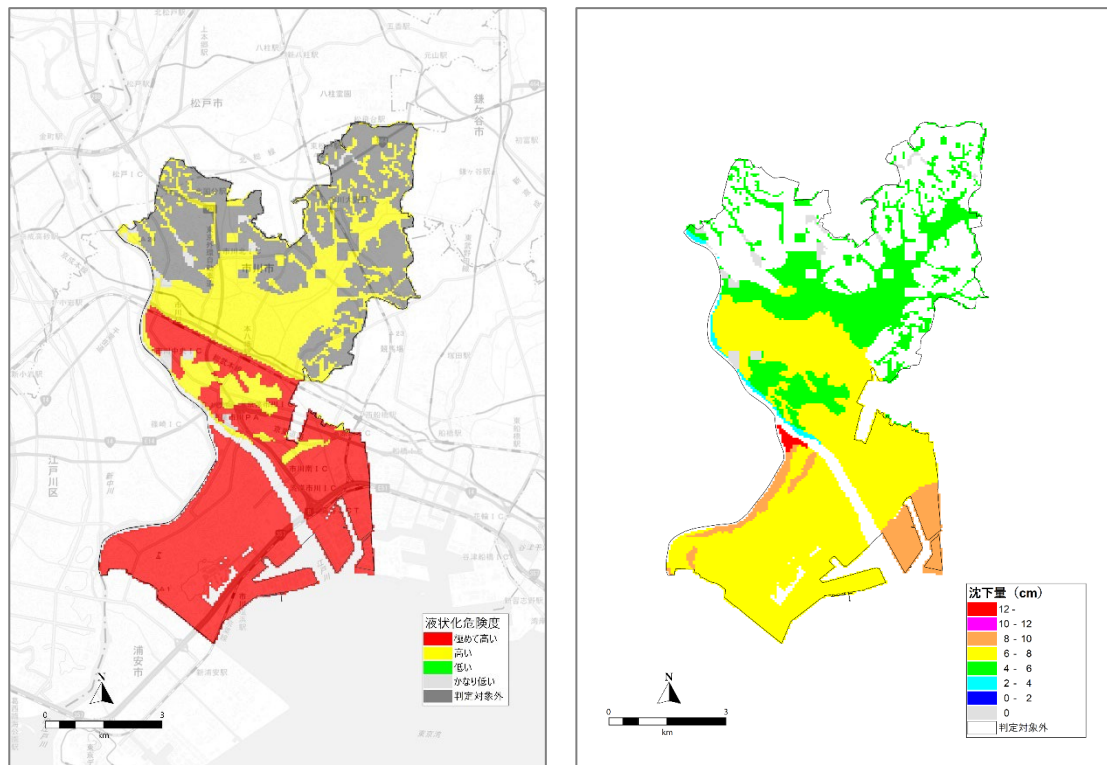
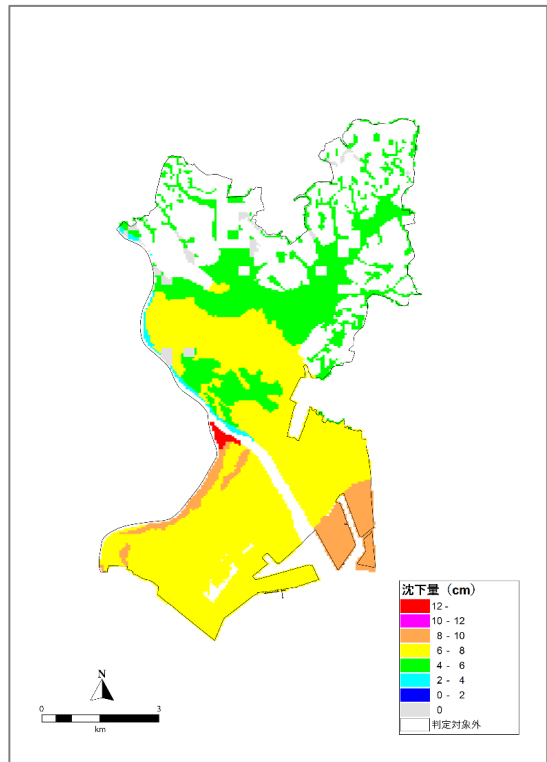
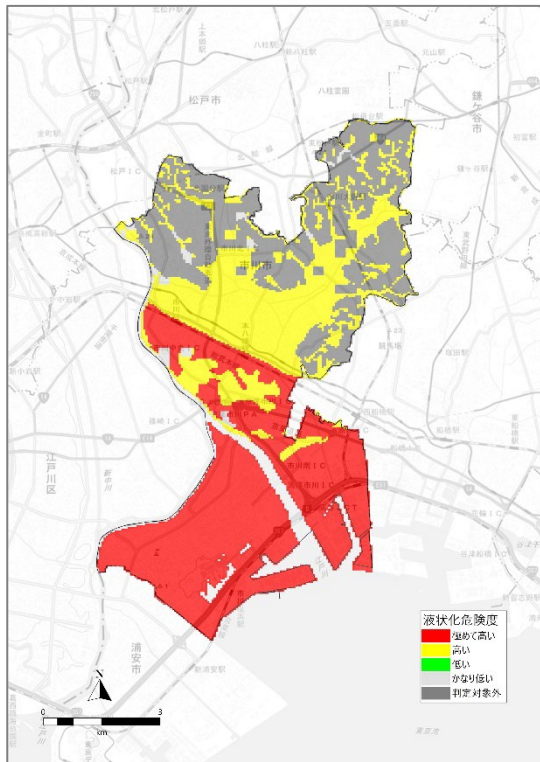


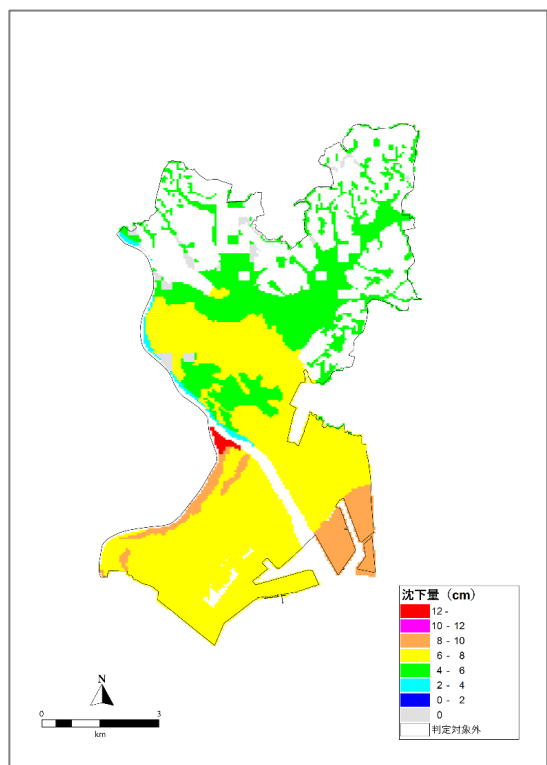
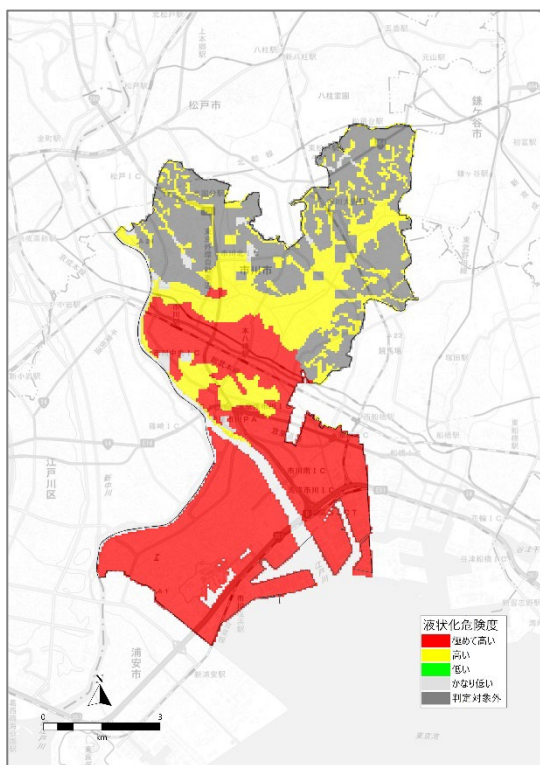
図 3.3-1 東京湾直下地震 液状化分布



液状化危険度

沈下量

図 3.3-2 千葉県北西部直下地震 液状化分布



液状化危険度

沈下量

図 3.3-3 大正型関東地震 液状化分布