

2-1. 宅地の液状化被害の可能性判定

「宅地の液状化被害の可能性判定」は、ボーリング調査結果等の地盤情報に基づき各層の液状化に対する安全率 (F_L) を算定し、これを基に算定される非液状化層厚 (H_1) と地表変位量 (D_{cy} 値)、または液状化指標値 (P_L 値) から図-2.1.1(a)、(b)に示す判定図・判定表を使用し、液状化被害の可能性を5区分3段階で判定するものである。

本手引きにおける「宅地の液状化被害の可能性判定」に係る基本的な作業は、『国土交通省都市局都市安全課：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説(案)、平成25年4月』に従うことを標準とする。なお、液状化安全率 (F_L) の算定にあたっては、最新版の「建築基礎構造設計指針」及び「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」の液状化判定手法に従うこととし、対象地域の液状化に対するニーズや地域特性に応じ、最適と思われる判定手法を利用されたい。ただし、判定に用いた手法については、宅地の液状化危険度マップ等に明示することが必要となる。

- ・ 「建築 H_1 — D_{cy} 法」 : 「建築基礎構造設計指針 (2019 改定)」を基本とし、非液状化層厚 (H_1) と地表変位表 (D_{cy} 値) との関係から判定する手法
- ・ 「建築 H_1 — P_L 法」 : 「建築基礎構造設計指針 (2019 改定)」を基本とし、非液状化層厚 (H_1) と液状化指標値 (P_L 値) との関係から判定する手法
- ・ 「道示 H_1 — P_L 法」 : 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(H29.11)」を基本とし、非液状化層厚 (H_1) と液状化指標値 (P_L 値) との関係から判定する手法

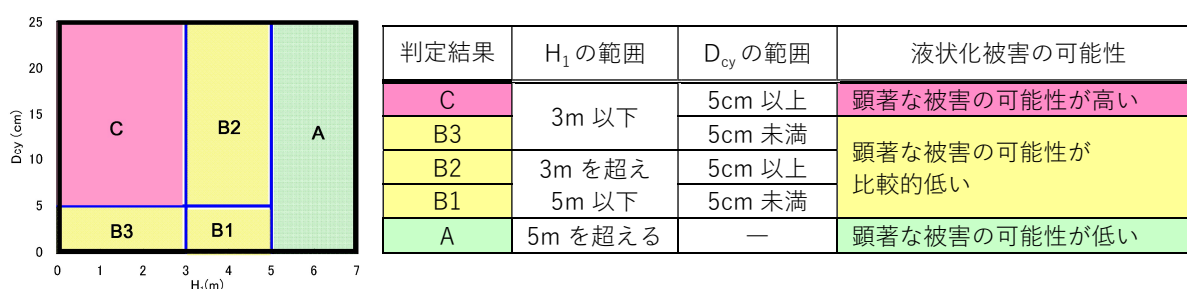


図-2.1.1(a) H_1 — D_{cy} 判定図・数値表

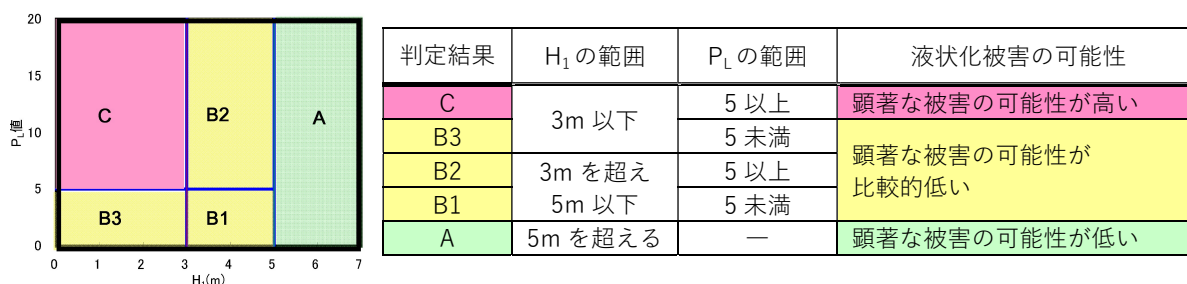


図-2.1.1(b) H_1 — P_L 判定図・数値表

「国交省都市局都市安全課：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説(案)、平成25年4月」より

(1) 対象とする地震動の強さ

『液状化による宅地の被害リスク』では、戸建て住宅等の供用期間中に発生する可能性の高い地震動レベルや、2011年の東北地方太平洋沖地震での液状化被害の実態（震度5弱～5強程度から液状化被害が発生）を踏まえ、対象とする地震動は震度5程度の中地震を基本とする。なお、中地震程度の地震動条件は、地表面最大加速度： $\alpha=200\text{gal}$ 、マグニチュード： $M=7.5$ を標準とする。

■ 「建築基礎構造設計指針（2019改定）」を基本とする場合

- ・ マグニチュード : 7.5
- ・ 想定最大加速度 α_{\max} : 200 (gal)

■ 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（H29.11）」を基本とする場合

- ・ 想定震度 k_{hgl} : 0.20
(k_{hgl} : 液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度)

一方、各々の市区町村では地域防災計画等を策定する際、各地域で発生が想定される地震や地震動を設定している。本手引きでは、『液状化による宅地の被害リスク』の評価に際し、中地震程度の地震動を標準とするが、地域防災計画等において各地域で設定している地震動を用いて評価することを妨げるものではない。このため、上記の中地震程度の地震動条件を対象とした「宅地の液状化被害の可能性判定」を実施したうえで、さらに、中地震程度の地震動を上回る地震動を対象とした検討・評価を行う必要がある場合には、検討条件等を慎重に設定する必要がある。

(2) 宅地の液状化被害の可能性判定に必要となる情報

「宅地の液状化被害の可能性判定」では、各層の液状化に対する安全率 (F_L)、非液状化層厚 (H_1)、地表変位量 (D_{cy} 値)、液状化指標値 (P_L 値) を算定することから、ボーリング調査結果等から得られる地盤情報が必要となる。これら地盤情報の収集については、手引き本編4章「4-3. 資料の収集」を参照されたい。本節では、液状化に対する安全率 (F_L) の算定において、必要となる地盤情報の一般的なものを示す。なお、以下に示す各地盤情報が十分に収集できない場合は、既往の研究成果等を参照するなど、地域特性に応じた地盤情報の設定を検討されたい。

- 地層構成
- 地下水位
- 標準貫入試験 (N 値)
- 粒径加積曲線の50%通過粒径 (D_{50})、10%通過粒径 (D_{10})
- 細粒分含有率 (F_c)
- 塑性指数 (I_p)
- 土の単位体積重量

(3) 液状化判定を行う判定対象層

「建築基礎構造設計指針(2019改定)」及び「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(H29.11)」に記載されている沖積層、埋立て地盤及び盛土地盤の判定対象層の規定を表-2.1.1及び表-2.1.2に示す。

表-2.1.1 「建築基礎構造設計指針(2019改定)」による判定対象層

基本とする基準	地表面から 20m 程度以浅の土層		
	沖積層	埋立て地盤・盛土地盤	
	細粒分含有率が 35%以下の土層	細粒分含有率が 35%以上の低塑性シルト 液性限界に近い含水比を持ったシルト	
		粘土分含有率が 10%以下の土層	塑性指数が 15 以下の土層
「建築基礎構造設計指針」	○	○	○

※○印：判定対象層となる

表-2.1.2 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(H29.11)」による判定対象層

基本とする基準	沖積層の砂質土層で下記の条件に該当する場合	
	地下水位が地表面から 10m 以内にあり、かつ、 地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層	
	50%粒径 10mm 以下で、かつ 10%粒径が 1mm 以下の土層	
	細粒分含有率が 35%以下の土層	細粒分含有率が 35%を超える土層 塑性指数が 15 以下の土層
「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」	○	○

※○印：判定対象層となる

本手引きで行う「宅地の液状化被害の可能性判定」は、『宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説(案)』に従うことを標準とする。表-2.1.3に当該指針における判定対象層の規定を示す。

表-2.1.3 「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説(案)」による判定対象層

基本とする基準	地表面から 20m 程度以浅の沖積層・埋立土・盛土				
				50%粒径 10mm 以下で、かつ 10%粒径が 1mm 以下の土層	
	細粒分含有率が 35%以下の土層	細粒分含有率 35% を超える土層		細粒分含有率が 35%以下 の土層	細粒分含有率 35% を超える土層
		粘土分含有率が 10%以下 の土層	塑性指数 が 15 以下 の土層		塑性指数が 15 以下の土層
「建築基礎構造設計指針」	○	○	○	-----	
「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」	-----			○	○

※○印：判定対象層となる

(4) 液状化に対する安全率 (F_L) の算定

液状化に対する安全率 (F_L) は、最新版の「建築基礎構造設計指針」及び「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」に準拠し算定する。なお、『国土交通省：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説、平成 25 年 4 月』より、沖積層で圧密時間が 400～500 年以上経過していることが明らかな場合には、地盤生成年代効果を考慮することができるものとする。ただし、地盤の生成年代による補正係数 (C_h) は、 $C_h=1.4$ を上限とする。

a) 「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会：2019 改定)」を基本とする場合

各深さにおける液状化発生に対する安全率 F_L は次式により算定する (地盤生成年代効果については『宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説』に準拠)。

$$F_L = C_h \cdot (\tau_L / \sigma_z') / (\tau_d / \sigma_z')$$

ここで、 F_L : 液状化に対する安全率

τ_L / σ_z' : 液状化抵抗比

τ_d / σ_z' : 等価な繰返しせん断応力比

C_h : 地盤生成年代による補正係数 (C_h)

① 液状化抵抗比の算出方法

液状化抵抗比 (τ_L / σ_z') は、図-2.1.2 のせん断ひずみ振幅 5% の曲線を用いて求める。また、 N_a は以下の式により算定する。

$$N_a = N_I + \Delta N_f$$

ここで、 N_a : 補正 N 値

N_I : 換算 N 値 $N_I = C_N \cdot N$

ΔN_f : 細粒分含有率 F_C に応じた補正 N 値増分で図-2.1.3 による

$$C_N : \text{拘束圧に関する換算係数 } C_N = \sqrt{100 / \sigma_z'}$$

σ_z' : ボーリング調査時の有効土被り圧 (kN/m^2)

② 等価な繰返しせん断応力比の算出方法

検討地点の地盤内の各深さに発生する等価な繰返しせん断応力比は次式により算定する。

$$(\tau_d / \sigma_z') = \gamma_n \cdot (\alpha_{\max} / g) \cdot (\sigma_z / \sigma_z') \cdot \gamma_d$$

ここで、 τ_d : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (kN/m^2)

σ_z' : 検討深さにおける有効土被り圧 (鉛直有効応力) (kN/m^2)

γ_n : 等価な繰返し回数に関する補正係数で、 $\gamma_n = 0.1 \cdot (M - 1)$
ただし、 M は地震のマグニチュード ($M = 7.5$ を標準とする)

α_{\max} : 地表面における設計用水平加速度 ($\alpha_{\max} = 200\text{gal}$ を標準とする)

g : 重力加速度 (980gal)

σ_z : 検討深さにおける全土被り圧 (鉛直全応力) (kN/m^2)

γ_d : 地盤が剛体でないことによる低減係数で、 $\gamma_d = 1 - 0.015z$
 z はメートル単位で表した地表面からの検討深さ

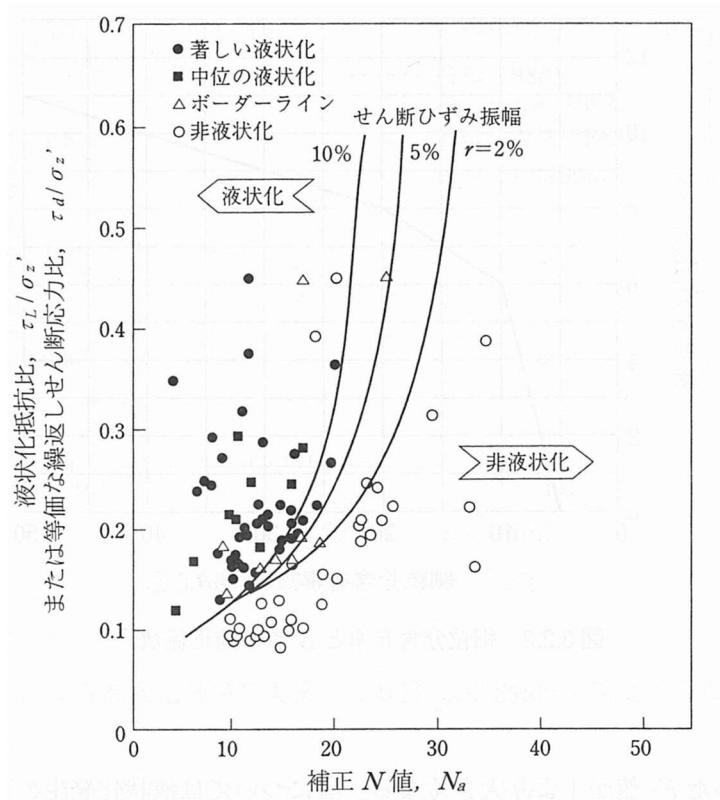


図-2.1.2 補正 N 値と液状化抵抗、動的せん断ひずみの関係

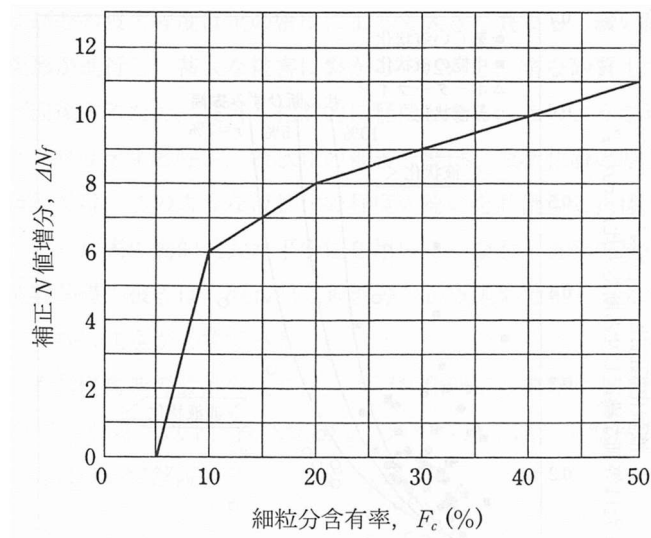


図-2.1.3 細粒分含有率と N 値の補正係数

(「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会 : 2019 改定)」より)

b) 「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（（公社）日本道路協会：H29.11）」を基本とする場合
 液状化の判定を行う必要がある土層に対しては、液状化に対する安全率 F_L を算出し、この値が 1.0 以下については液状化が生じると判定する。なお、地盤生成年代効果については、『宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説』に準拠し、考慮できるものとする。

$$F_L = C_h \cdot R / L$$

$$R = c_w \cdot R_L$$

$$L = \gamma_d \cdot k_{hgL} \cdot (\sigma_v / \sigma_v') \quad \gamma_d = 1.0 - 0.015x$$

ここで、 F_L : 液状化に対する安全率

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

C_h : 地盤生成年代による補正係数 (C_h)

c_w : 地震動特性による補正係数

(レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動 (タイプ I) の場合)

$$c_w = 1.0$$

(レベル 2 地震動 (タイプ II) の場合)

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3 R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

R_L : 繰り返し三軸強度比 R_L は次式で算定する

$$R_L = 0.0882 \sqrt{(0.85 N_a + 2.1) / 1.7} \quad (N_a < 14)$$

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

$$N_a = c_{FC} \cdot (N_I + 2.47) - 2.47 \quad (D_{50} < 2\text{mm})$$

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10} \cdot (D_{50} / 2)\} N_I \quad (D_{50} \geq 2\text{mm})$$

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

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

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_I : 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

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)

c_{FC} : 細粒分含有率による N 値の補正係数

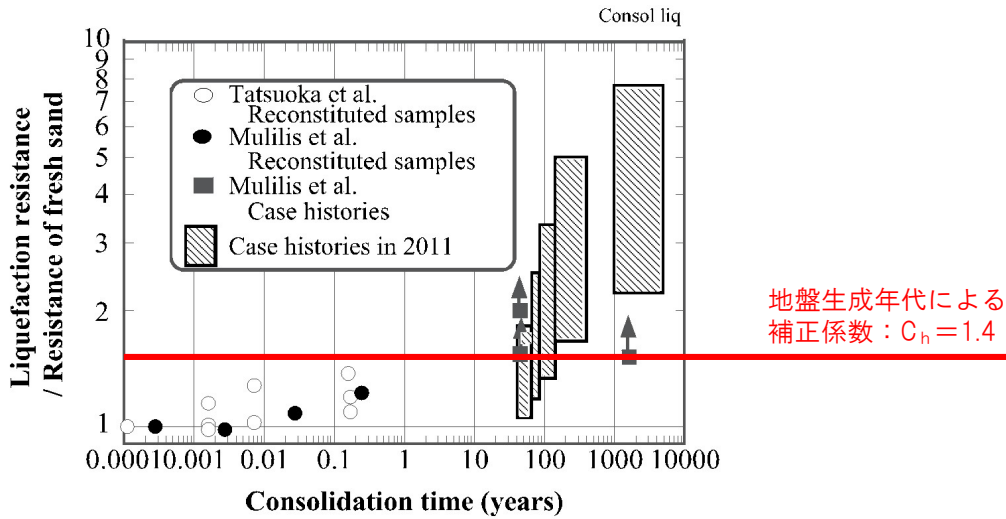
FC : 細粒分含有率 (%) (粒径 75 μ m 以下の土粒子の通貨百分率)

D_{50} : 50% 粒径 (mm)

- γ_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数
- k_{hgl} : 液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度 ($k_{hgl}=0.2$ を標準する)
- σ_v : 地表面からの深さ x (m) における全上載圧 (kN/m^2)
- σ_v' : 地表面からの深さ x (m) における有効上載圧 (kN/m^2)
- x : 地表面からの深さ (m)

c) 地盤生成年代効果の評価

沖積層で圧密時間が 400~500 年以上経過していることが明らかな場合には、最新の技術的知見を反映し、地盤生成年代効果を考慮することができるものとする。液状化強度増加率の経時変化を図-2.1.4 に示す。なお、地盤生成年代による補正係数 (C_h) は、 $C_h=1.4$ を上限とする。



出典：「田口・東畑・青山・大坪：東北地方太平洋沖地震による東京湾周辺地帯の液状化に基づく年代効果の検討、第 47 回地盤工学研究発表会（八戸）、pp.1603-1604、2012 年 7 月」

図-2.1.4 液状化強度増加率の経時変化

(「国土交通省都市局都市安全課：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説（案）、平成 25 年 4 月」より)

(5) 非液状化層厚 (H₁) の設定

非液状化層厚 (H₁) とは、表-2.1.4 に示す条件を満足する連続した層厚のことを指す。非液状化層厚 (H₁) と液状化層厚 (H₂) の関係を図-2.1.5 に示す。なお、埋立土・盛土内にある N 値が 2 以下の粘性土層は非液状化層厚 (H₁) に含めないものとする。

表-2.1.4 非液状化層厚 (H₁)

	地下水位より浅い層	地下水位より深い層				
		液状化安全率 (F _L 値) が 1.0 より大きい層	N 値が 2 より大きい粘性土層 (埋立土・盛土)	細粒分含有率 35% を超える層 (沖積層・埋立土・盛土)		50% 粒径 10mm 以上で、または 10% 粒径が 1mm 以上の土層 (沖積層・埋立土・盛土)
				粘土分含有率 10% 以上の層	塑性指数 15 以上の層	
「建築基礎構造設計指針」を基本とする場合	○	○	○	○	○	-----
「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」を基本とする場合	○	○	○	-----	○	○

※○印：非液状化層(H₁)となる

※ 1：粘性土層とは、細粒分含有率が 50% 以上の地盤を想定している。

※ 2：粘土分含有率が 10% ちょうど、あるいは、塑性指数が 15 ちょうど層に関しては、液状化判定の対象層として F_L を計算したうえで、非液状化層厚に加えるか判定する。

※ 3：粘性土層 (細粒分含有率が 50% 以上の層) であっても、N 値が 2 以下の層、または、液状化判定の対象層として F_L を計算しその結果が 1.0 より小さい層については、非液状化層厚に加えないこととする。

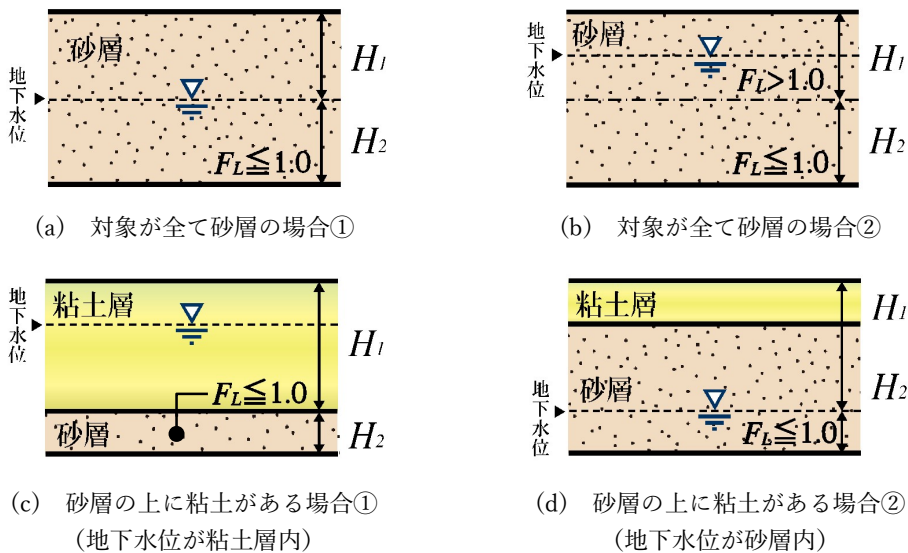


図-2.1.5 非液状化層厚 (H₁) と液状化層厚 (H₂) の関係

(「国土交通省都市局都市安全課：宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針・同解説 (案)、平成 25 年 4 月」より)

(「国土交通省都市局都市安全課：市街地液状化対策推進ガイダンス、令和元年 6 月」より)

(6) 地表変位量 (D_{cy} 値) の算定

水平成層地盤における動的水平変位、残留水平変位、沈下量などの液状化程度の子測は、地盤応答解析によるほか、液状化判定の後、以下の手順によることができる。このため、本手引きにおける地表変位量 (D_{cy} 値) は、「建築基礎構造設計指針 (2019 改定)」内の『3.2 節 地盤の液状化』、“2. 液状化に伴う地盤物性と地盤変形量の予測”に準拠し算定する。

- ① 図-2.1.6 から、N_a、(τ_d/σ_z') に対応する各層の繰返しせん断ひずみ γ_{cy} を推定する。
- ② 各層のせん断ひずみが同一方向に発生すると仮定し、これを次式により下層から鉛直方向に積分して振動中の地表最大水平変位 D_{cy} (m) を算定する。

$$D_{cy} = \sum (\gamma_{cyi} \cdot H_i / 100)$$

ここで、

γ_{cyi} : i層の繰返しせん断ひずみ (%)

H_i : i層の層厚 (m)

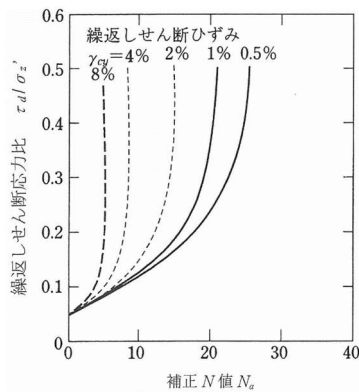


図-2.1.6 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係

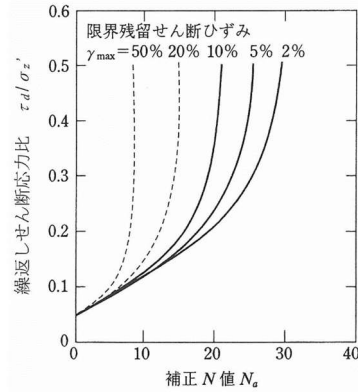


図-2.1.7 補正 N 値と限界残留せん断ひずみの関係

- ③ 地表最大水平変位 D_{cy} を液状化程度の指標とする場合、表-2.1.5 のように評価するのが一般的となる。

表-2.1.5 地表最大水平変位 D_{cy} と液状化程度の関係

D _{cy} (m)	液状化の程度
0	なし
~0.05	軽微
0.05~0.10	小
0.10~0.20	中
0.20~0.40	大
0.40~	甚大

同様に、沈下量 S (m) を求めたいときは、図-2.1.6 をそのまま使い、γ_{cy} を体積ひずみ ε_v と読みかえればよい。

(「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会：2019 改定)」より)

(7) 液状化指標値 (P_L 値) の算定

液状化指標値 (P_L 値) とは、浅い部分の液状化が特に構造物に大きな影響を与えることを考慮して、図-2.1.8 に示すように深さに対する重みを考慮し、(1 - F_L) の値を 20m の深さまで積分することで定義したものとなり、次式により算定する。また、液状化指標値 (P_L) の評価は、表-2.1.6 のように示されるのが一般的である。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot W(z) \cdot dz$$

ここで、

F_L : 液状化に対する安全率

W(z) : 深さ方向の重み関数 (図-2.1.8)

判定深度 20m $W(z) = 10.0 - 0.5 \cdot z$

Z : 地表面からの深さ (m)

dz : ある深度の F_L が分布すると想定される土層厚 (m)

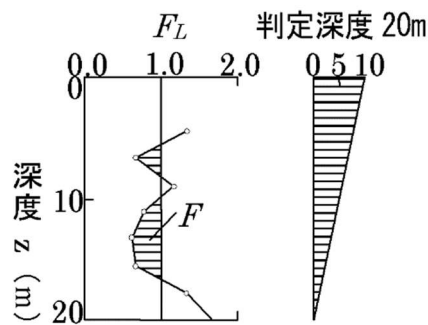


図-2.1.8 判定深度と重み関数の関係

表-2.1.6 液状化指標値 (P_L) と液状化による影響の関係

P _L = 0	液状化による被害発生の可能性はない
0 < P _L ≤ 5	液状化による被害発生の可能性は低い
5 < P _L ≤ 15	液状化による被害発生の可能性がある
15 < P _L	液状化による被害発生の可能性が高い

(「国土交通省都市局都市安全課：市街地液状化対策推進ガイダンス、令和元年6月」より)

<参考： P_L 値の判定深度を 10m とした場合の「宅地の液状化被害の可能性判定」の評価事例>

2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化被害が集中した地区を対象とした“住宅被害の調査結果”によると、表層付近に存在する液状化層（特に深度 10m までの液状化層）が、戸建て住宅の液状化被害に大きな影響を与えたことが報告されている。そのため、深度 20m 以上の地盤情報に加え、深度 10m 程度の地盤情報（スクリーウエイト貫入試験結果等）も活用し、「宅地の液状化被害の可能性判定」を実施することができれば、地盤情報の空白域における被害リスク評価の精度も向上する。以下、液状化被害集中地区における地盤情報を収集し、液状化の判定深度を 20m 及び 10m とした場合の「液状化指標値（ P_L 値）」を算定し、それぞれの値を指標とした場合の「宅地の液状化被害の可能性判定」の評価結果を参考例として示す。なお、液状化の判定深度を 10m とした場合、元来の判定方法（判定深度 20m）の結果と異なる場合があるので、両者の比較検証を行うなど、その扱いには留意して頂きたい。

① 検討対象地区の概要

液状化被害を受けた住宅に対する傾斜量や沈下量の調査結果※1が収集できた「千葉県我孫子市（都～布佐西地区）」、「茨城県潮来市（日の出地区）」、「千葉市美浜区（磯辺 8 丁目）」、「茨城県神栖市（堀割地区）」を対象とし検討を行った。検討対象地区の代表例として、図-2.1.9 に千葉県我孫子市（都～布佐西地区）、図-2.1.10 に茨城県潮来市（日の出地区）の代表的な地盤状況をそれぞれ示す。

図-2.1.9 及び図-2.1.10 に示すように、2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化被害が集中した地区では、地表から概ね GL-10.0m 程度以浅に位置する「砂質土地盤」が液状化し戸建て住宅に被害を及ぼしたと考えられている※2、※3。

※1：橋本、安田、山口（2012）：東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめり込み沈下量の関係、第 47 回地盤工学研究発表会（八戸）、2012 年 7 月。

※2：千葉県我孫子市（2014.11）：我孫子市市街地液状化対策事業計画策定業務 報告書。

※3：茨城県潮来市：日の出地区液状化対策検討委員会 報告書。

記号	地層名	特徴	N値（平均値）
Bs	埋土	細砂主体、小礫の混入	1~14 (6.3)
Bc	埋土	黒ボク主体、草根の混入	1~3 (2.1)
As	沖積砂質土	細砂、シルト質細砂、シルト混り細砂主体	1~9 (3.9)
Ac	沖積粘性土	層厚：3m~30m シルト、砂混りシルト、砂質シルト主体	0~4 (1.4)
Ds	洪積砂質土	-	-
Dc	洪積粘性土	-	-

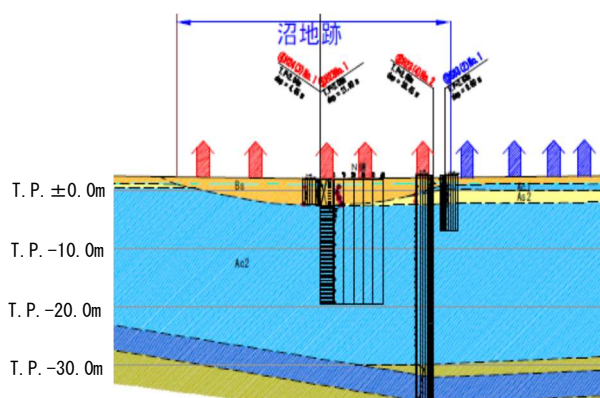


図-2.1.9 千葉県我孫子市（都～布佐西地区）の代表的な地盤状況

（「千葉県我孫子市：我孫子市市街地液状化対策事業計画策定業務 報告書、平成 26 年 11 月」より）

地質時代区分	地質名		地層記号	上層	N値 (平均値)	主な構成土質
現世	表土、盛土		B F	砂質土 粘性上	1/35~10 (5.7)	細砂、粘土
	埋土(浅深土)			砂質土	1/40~26 (12.1)	シルト混じり細砂 細砂
第四紀 完新世	完新統 (沖積層)		As1	砂質土	2/35~19 (9.7)	シルト質細砂 シルト混じり細砂 細砂
			Ac	粘性土	0(自沈)~4 (0.5)	シルト
				挟在 砂質土	2~9 (4.2)	シルト質細砂
As2	砂質土	3~50以上 (31.9)	シルト混じり細砂 細砂			
更新世 中期~後期	下総層群	石崎層	De	砂質土	9~50以上 (36.4)	シルト混じり細砂 シルト質細砂 細砂
			挟在 粘性上	19~26 (21.3)	シルト 砂質シルト	

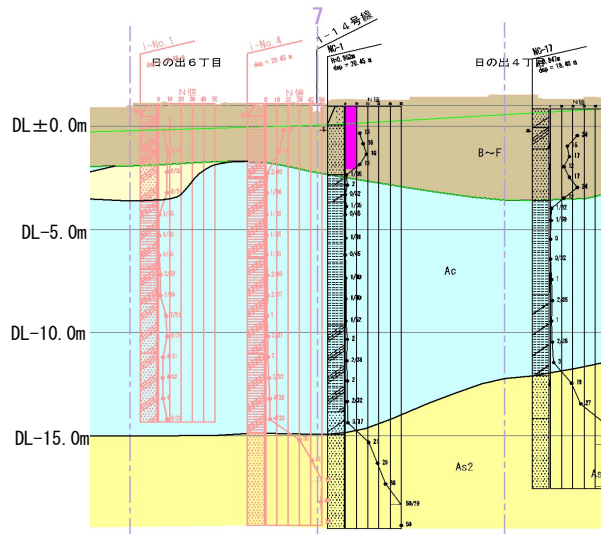


図-2.1.10 茨城県潮来市（日の出地区）の代表的な地盤状況

(「茨城県潮来市：日の出地区液状化対策検討委員会 報告書、第3章」より)

また、2016年熊本地震により液状化被害を受けた「熊本市（近見地区）」も検討対象地区とした。図-2.1.11に熊本市（近見地区）の代表的な地盤状況を示す。図-2.1.11より、熊本市（近見地区）では、地表から概ねGL-20.0m程度までに砂質土が堆積し、震災時には、主に氾濫原堆積物である砂質土（As1）が液状化し戸建て住宅に被害を及ぼしたと考えられている※4。

※4：熊本市（H29.6）：熊本市液状化対策技術検討委員会（第1回）議事資料

地質年代	地層区分		N値 [※]			
	地層名	記号	個数	平均		
完新世	氾濫原堆積物	沖積第1粘性土	Ac1	17	0~ 5	11
		沖積第1砂質土	As1	56	1~ 27	8.8
更新世	有明粘土層	沖積第2砂質土	As2	73	2~ 37	10.9
	アカホヤ火山灰層	火山灰質砂質土	K.Ah	15	3~ 25	14.3
新第四紀	有明粘土層	沖積第2粘性土	Ac2	35	0~ 4	0.8
		沖積第3砂質土	As3	15	2~ 9	4.9
更新世	島原海灣層	沖積第3粘性土	Ac3	2	2~ 4	3.0
		沖積第4砂質土	As4	4	6~ 27	15.5
更新世	託麻礫層	洪積礫質土	Dg	6	50~ 300	113.8

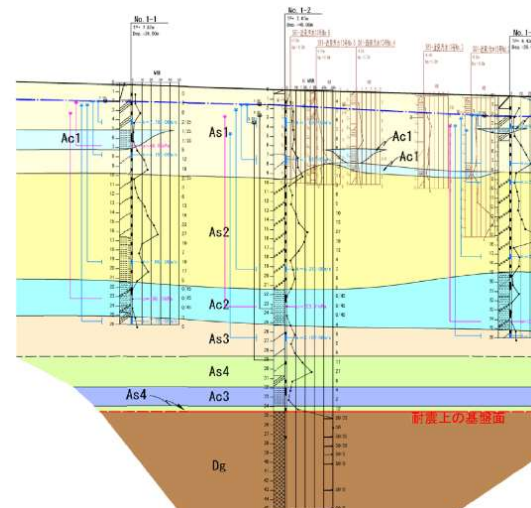


図-2.1.11 熊本市（近見地区）の代表的な地盤状況

(「熊本市：熊本市液状化対策技術検討委員会（第1回）議事資料、平成29年6月」より)

② 液状化の判定深度を 20m 及び 10m とした場合の液状化指標値 (P_L 値) の算定

各検討対象地区において、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 ((公社)日本道路協会：H29.11)」に準拠し液状化安全率 (F_L) を求め、その値から判定深度を 20m 及び 10m とした場合の『液状化指標値 (P_L 値)』を算定した。図-2.1.12 に、判定深度 20m 及び 10m それぞれの場合における『液状化指標値 (P_L 値)』の算定方法を示す (以降、判定深度 20m の液状化指標値を「P_{L20}」、判定深度 10m の液状化指標値を「P_{L10}」と称す)。図-2.1.12 に示すように、液状化安全率 (F_L) に対する深度方向の重みについては、両者の重みの面積が等しくなるよう重み関数を設定している。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot W(z) \cdot dz$$

ここで、

F_L : 液状化に対する安全率

W(z) : 深さ方向の重み関数 (図-2.1.12)

・判定深度 20m : W(z) = 10.0 - 0.5 · z

・判定深度 10m : W(z) = 20.0 - 2.0 · z

Z : 地表面からの深さ (m)

dz : ある深度の F_L が分布すると想定される土層厚 (m)

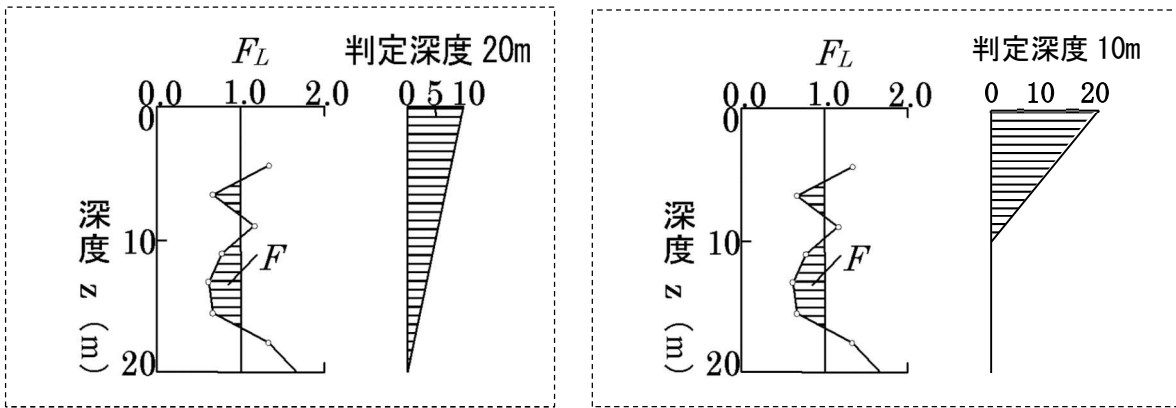


図-2.1.12 判定深度と重み関数の関係 (左側：判定深度 20m、右側：判定深度 10m)

③ 液状化指標値 P_{L10} による「宅地の液状化被害の可能性判定」の評価

③-1 東北地方太平洋沖地震の液状化被害地区に対する検討結果

図-2.1.13 に、判定深度を 20m とした場合の「道示 $H_1 - P_{L20}$ 判定図」を、図-2.1.14 に判定深度を 10m とした場合の「道示 $H_1 - P_{L10}$ 判定図」を示す。両図を比較すると、判定深度 10m の結果（図-2.1.14）において全体の約 80% のプロットが、判定深度 20m の結果（図-2.1.13）と比較し上方へ移動することが認められる。ただし、それぞれの判定結果（C 判定、B3 判定、B2 判定）に差異は認められない。

判定深度 10m の結果が判定深度 20m の結果と比較し上方へ移動する要因は、我孫子市や潮来市の代表的な地盤状況（図-2.1.9、図-2.1.10）で示したように、東北地方太平洋沖地震の被害地区では、地表から概ね GL-10.0m 程度以浅に位置する「砂質土地盤」が液状化し、GL-10.0m 程度以深は粘性土層が堆積する、または、砂質土層が堆積していてもその N 値は大きく、液状化安全率 (F_L) が 1.0 を超えるためである。

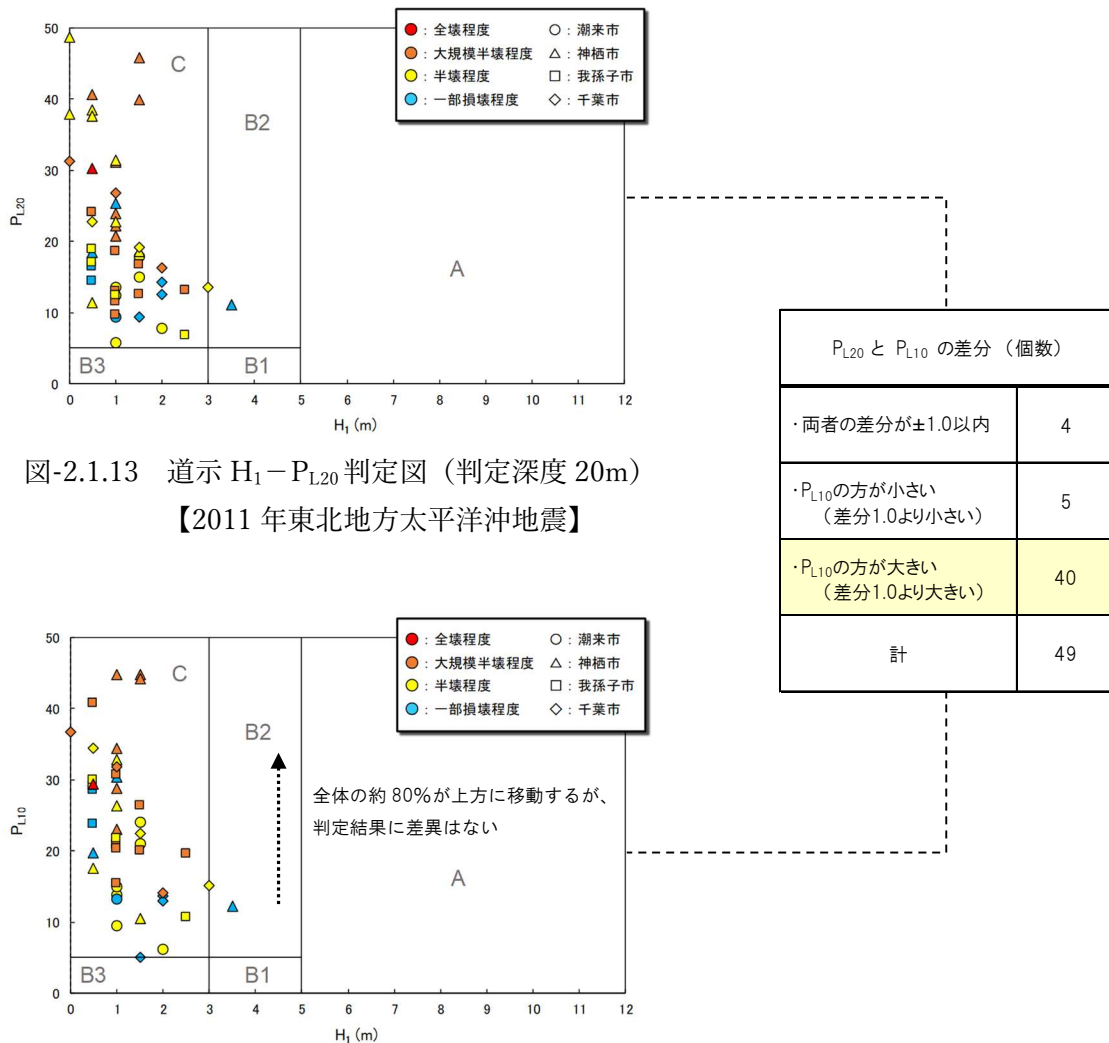


図-2.1.13 道示 $H_1 - P_{L20}$ 判定図 (判定深度 20m)
【2011 年東北地方太平洋沖地震】

図-2.1.14 道示 $H_1 - P_{L10}$ 判定図 (判定深度 10m)
【2011 年東北地方太平洋沖地震】

③-2 熊本地震の液状化被害地区に対する検討結果

図-2.1.15 に、判定深度を 20m とした場合の「道示 $H_1 - P_{L20}$ 判定図」を、図-2.1.16 に判定深度を 10m とした場合の「道示 $H_1 - P_{L10}$ 判定図」を示す。両図を比較すると、判定深度 10m の結果（図-2.1.16）において全体の約 75% のプロットが、判定深度 20m の結果（図-2.1.15）と比較し下方に移動することが認められる。なお、それぞれの判定結果（C 判定、B3 判定、B2 判定）にほぼ差異は認められないが、1 プロットのみランクダウン（C 判定→B3 判定）する。

判定深度 10m の結果が判定深度 20m の結果と比較し下方へ移動する要因は、熊本市（近見地区）の代表的な地盤状況（図-2.1.11）で示したように、熊本地震の被害地区では、地表から概ね GL-20.0m 程度まで連続して砂質土が堆積し、 P_L の算定にあたっては、GL-10m 程度以深の $F_L \leq 1.0$ の値も加算するため P_{L20} の値が大きくなり、深度 10m 以浅に対し改良した F_L の重み係数の影響があまり効かなかったためである。

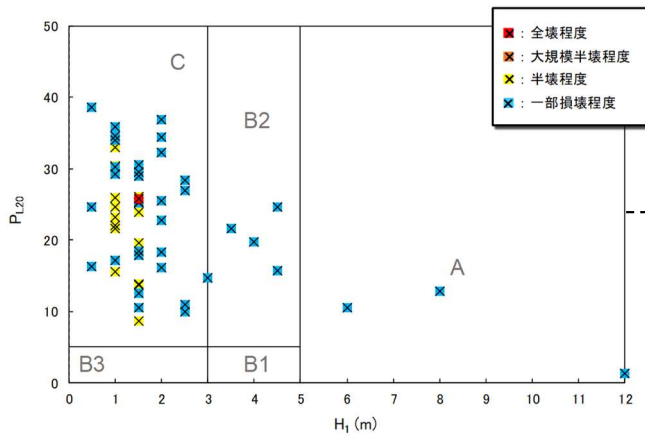


図-2.1.15 道示 $H_1 - P_{L20}$ 判定図（判定深度 20m）
【2016 年熊本地震】

PL20 と PL10 の差分（個数）	
両者の差分が±1.0以内	5
PL10の方が小さい （差分1.0より小さい）	39
PL10の方が大きい （差分1.0より大きい）	8
計	52

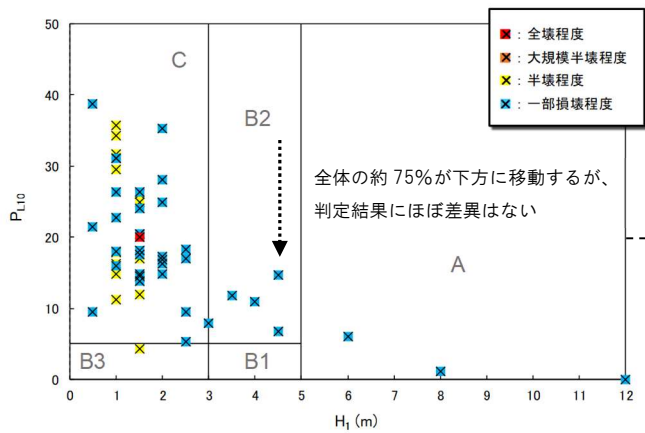


図-2.1.16 道示 $H_1 - P_{L10}$ 判定図（判定深度 10m）
【2016 年熊本地震】

④ 深度 10m 程度までの地盤情報及び液状化指標値 P_{L10} の活用方法

既存ボーリング調査結果等の地盤情報が充実していない自治体では、深度 20m 程度以上の地盤データは集まりにくく、深度 10m 程度の地盤情報も活用することでその評価精度は高まる。そのため、判定深度 10m の液状化指標値 P_{L10} を評価指標として用い、深度 20m 程度以上のボーリング調査結果のみならず、建築確認申請時の地盤データ、下水道施設等の設計に際して実施されたボーリング調査結果、また、スクリーウエイト貫入試験等、判定深度 10m 程度までの地盤データも活用することが望ましい。

ただし、前述した評価事例で示したように、液状化対象層が位置する深度の状況に応じて液状化指標値 P_{L10} による評価結果に違いが生じることから、液状化被害に起因する土層が主に深度 10m 以浅に存在する場合に限るなど、検討対象地区における液状化対象層の分布状況を確認することが必須となる。なお、液状化指標値 P_{L10} を指標とし「宅地の液状化被害の可能性判定」を評価する場合は、液状化指標値 P_{L20} による評価結果との比較検証を行う、また、地盤工学の有識者等から検証結果に対する意見聴取を行う、さらに、「宅地の液状化危険度マップ」への反映にあたっては凡例表現を変更するなど、慎重な扱いに留意して頂きたい。

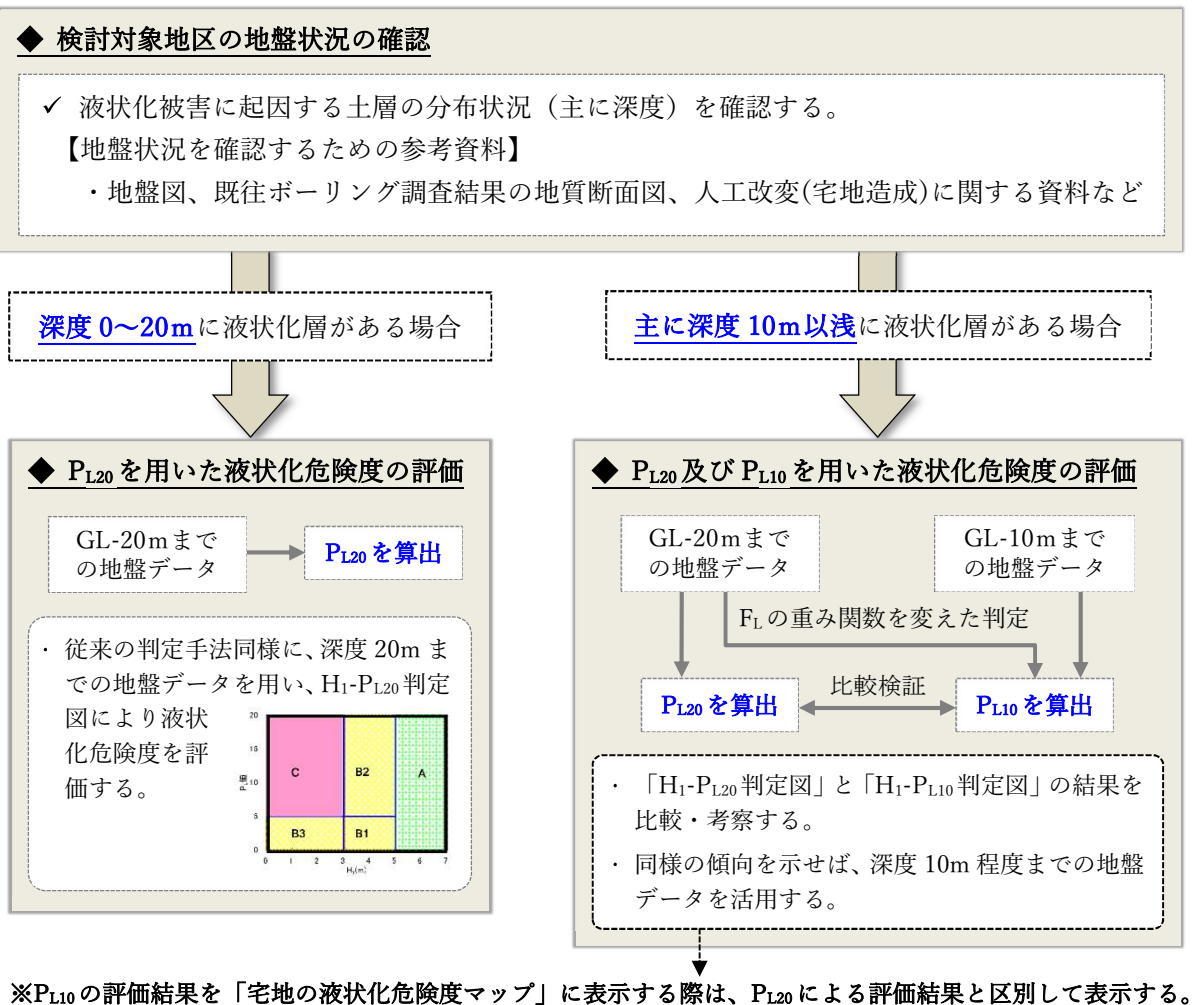


図-2.1.17 深度 10m 程度までの地盤情報及び液状化指標値 P_{L10} の活用フロー案

⑤ 液状化指標値 P_{L10} を活用した「宅地の液状化危険マップ」の作成イメージ

深度 20m 以上の地盤データを収集しようとする場合、それらは主に、道路や橋梁、また、河川堤防等の土木構造物を対象とした調査・設計で実施されたものとなる。これらの地盤データは数に限りがあり、対象範囲全域を網羅的に把握できるほどの地点で行われていないことから、「宅地の液状化危険度マップ」において空白表示となる箇所が多くなり、リスクコミュニケーションツールとして十分な情報を満たさないことも考えられる。そのため、深度 10m 程度までの地盤データを有効活用し、空白表示を減らした「宅地の液状化危険度マップ」を作成できるよう、工夫を図ることが重要となる。

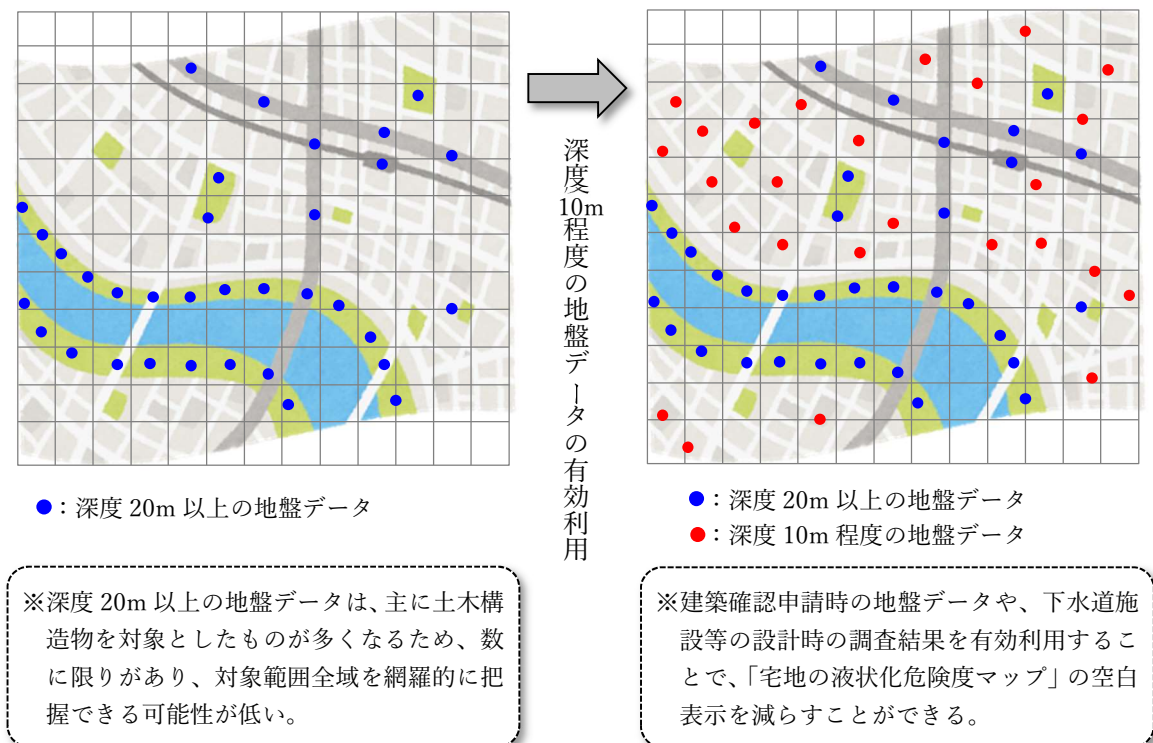


図-2.1.18 深度 10m 程度までの地盤情報の有効活用による「宅地の液状化危険度マップ」の作成例(イメージ)

(8) 「宅地の液状化危険度マップ」の作成

本手引きで作成する液状化ハザードマップは、「地域の液状化発生傾向」に関する情報を示した地図情報と、「宅地の液状化危険度マップ」並びに「液状化被害と対策・対応の理解を促す情報」を示した災害学習情報との2面での構成を標準とする。しかし、臨海部に位置し大半が埋立地からなる地域では、微地形区分や人工改変地の分布から評価した「地域の液状化発生傾向図」だけでは、対象地域内のどこで液状化発生傾向が強くなり、液状化危険度にどの程度の違いがあるのかが表れにくい場合がある。

本節では、微地形区分や人工改変地の分布のみでは一様の評価結果となる地区を対象とし、既往ボーリング調査による地盤情報を用いて宅地の液状化被害の可能性判定を行い、『宅地の液状化危険度マップ』を作成した事例を示す。

<参考：大半が埋立地からなる地域における「宅地の液状化危険度マップ」の作成例>

千葉県美浜区磯辺8丁目地区は、2011年東北地方太平洋沖地震で甚大な液状化被害を被った地区である。当該地区は、昭和33年～50年代初頭に造成された比較的新しい臨海部の埋立地であり、埋め立て前は海底であった(図-2.1.19)。埋立地の施工方法に関する資料は残っておらず、施工方法から土質を推定することは困難であるが、「千葉県(2013.12):千葉県液状化対策推進委員会-第4回資料-」によると、震災時には、盛土及び浚渫土の砂層部分が主に液状化したと考えられており、これら盛土及び浚渫土の分布状況は磯辺8丁目地区内で大きくばらついている(図-2.1.20)。また、当該地区の住宅は、概ね“木造2階建ての布基礎”であるにも関わらず被災程度もばらついている(図-2.1.21)。

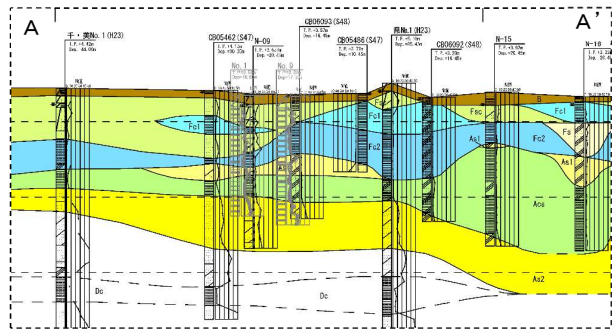


図-2.1.20 地質断面図

図-2.1.19 土地条件図(昭和44年、国土地理院)(千葉県:千葉県液状化対策推進委員会-第4回資料-、平成25年12月)

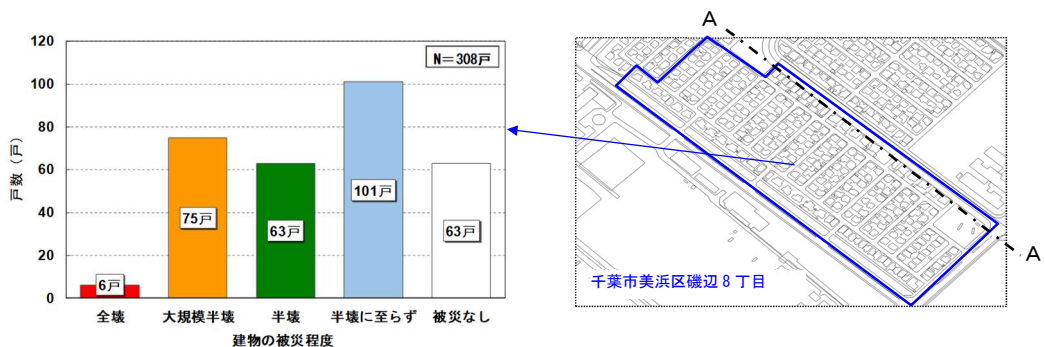


図-2.1.21 建物被災程度の頻度分布(千葉県美浜区磯部8丁目)

図-2.1.22 に千葉市美浜区磯辺 8 丁目を対象とした『液状化発生傾向図』を、図-2.1.23 に『宅地の液状化危険度マップ』をそれぞれ示す。当該地区全体は埋立地であることから、図-2.1.22 に示すように、地形情報に基づく評価のみでは液状化発生傾向の違いが把握できず、また、事前液状化対策の優先度検討も実施できない。一方、図-2.1.23 に示すよう、地盤情報に基づく『宅地の液状化危険度マップ』によると、ボーリングデータから得られる地盤情報の違いによって液状化被害の可能性判定結果度の違いが把握でき、また、事前液状化対策の優先度検討も実施できる。

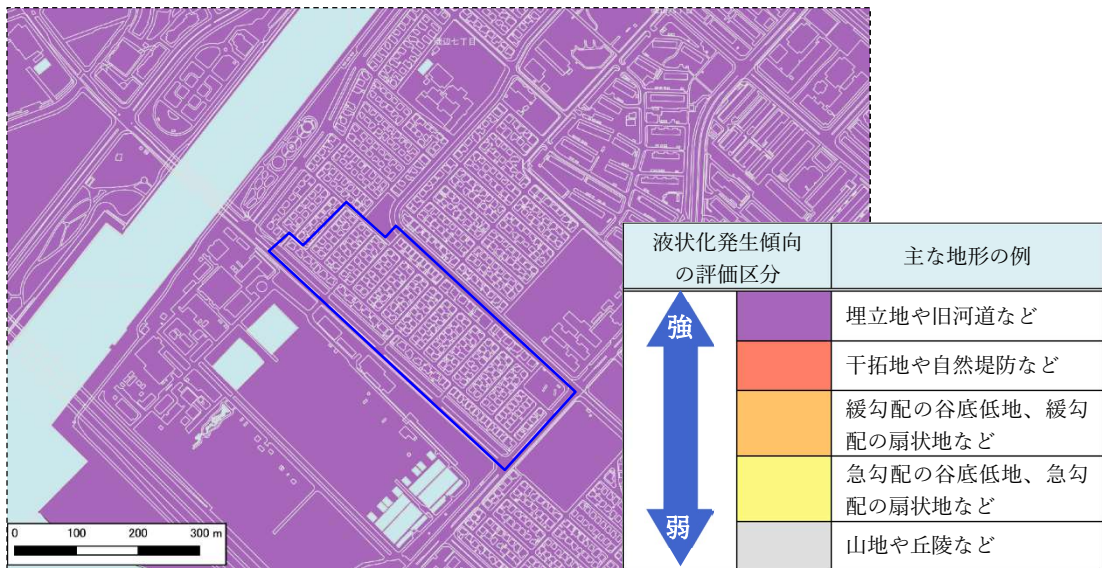


図-2.1.22 液状化発生傾向図（千葉市美浜区磯辺 8 丁目）

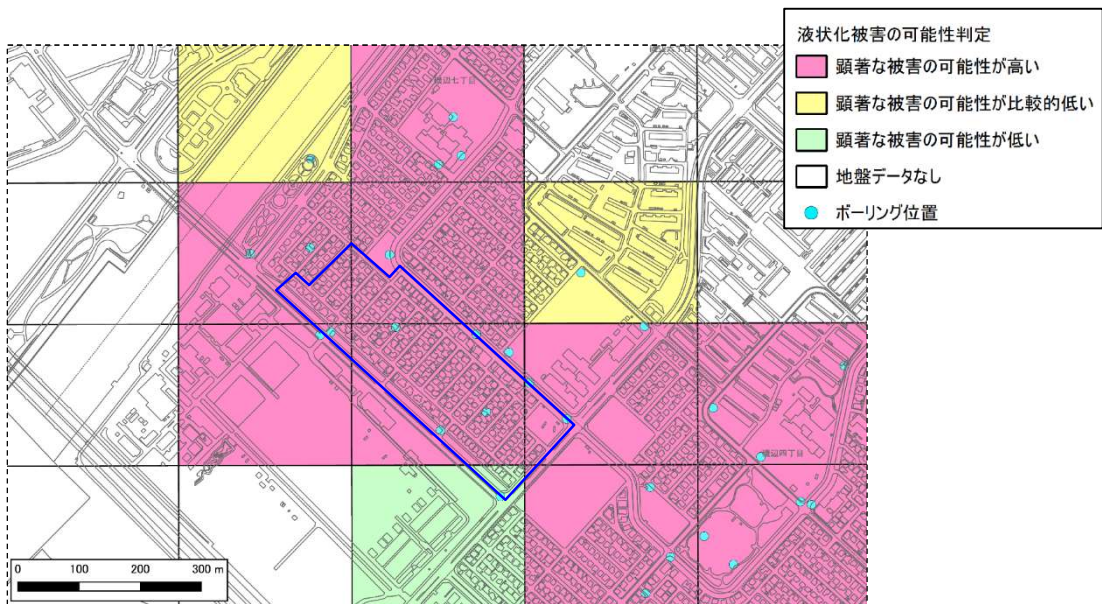


図-2.1.23 宅地の液状化危険度マップ（千葉市美浜区磯辺 8 丁目）

2-2. 戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価方法

「戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価」は、地盤を弾性体とみなし、建物荷重が作用している地盤が液状化した時の弾性沈下量を“戸建て住宅のめり込み沈下量”として簡易的に評価するものである。また、めり込み沈下量が大きいほど住宅の傾斜量も大きくなることから、過去の地震における液状化被害調査結果から、地盤が液状化した際の“戸建て住宅の傾斜量”も推定可能となる。なお、本手引きにおける「戸建て住宅のめり込み沈下の簡易評価」に係る基本的な作業は、『日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019 改定）』に示される多層地盤の即時沈下量の算定方法を標準とする。

(1) めり込み沈下量及び傾斜量による戸建て住宅の液状化による宅地の被害リスクの評価

住宅の液状化被害については、過去の地震における液状化被害から、1/100 程度以上の変位勾配で傾いた住宅に住んでいると、めまいや吐き気等の健康障害が生じることが報告されており（表-2.2.1）、沈下量よりは傾斜量の方が問題となる。しかし、液状化による住宅の傾斜量を直接推定できる方法は今まで開発されておらず、液状化による宅地の被害リスクの評価にあたって傾斜量を指標とすることは難しい。ただし、地震時および常時において一般に、沈下量自体が大きいほど傾斜量が大きくなる傾向にある（図-2.2.1 及び図-2.2.2）。このため、本手引きでは、液状化による住宅のめり込み沈下量を簡易的に算定し、めり込み沈下量から推定できる傾斜量とあわせて、液状化による宅地の被害リスクの評価を行うこととした。図-2.2.1 及び図-2.2.2 に、2011 年東北地方太平洋沖地震の際の住宅の液状化被害を調査^{※1}し、平均めり込み沈下量と傾斜角の関係を整理した図を示す。

※1：橋本、安田、山口（2012）：東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめり込み沈下量の関係。第 47 回地盤工学研究発表会（八戸）、2012 年 7 月。

表-2.2.1 床の傾斜角と健康障害

（「国土交通省都市局都市安全課：市街地液状化対策推進ガイドンス【資料編】、平成 28 年 2 月」より）

傾斜角		健康障害	文献
度	分数(ラジアン)		
0.29°	5/1000 (=1/200)	傾斜を感じる。	藤井ほか(1998)
0.34°	6/1000 (=1/167)	不同沈下を意識する。	藤井ほか(1998)
0.46°	8/1000(=1/125)	傾斜に対して強い意識、苦情の多発。	藤井ほか(1998)
0.6° 程度	1/100 程度	めまいや頭痛が生じて水平復元工事を行わざるを得ない。	安田・橋本(2002) 安田(2004)
~1°	~1/60	頭重感、浮動感を訴える人がある。	北原・宇野(1965)
1.3°	1/44	牽引感、ふらふら感、浮動感などの自覚症状が見られる。	宇野・遠藤(1996)
1.7°	1/34	半数の人に牽引感。	宇野・遠藤(1996)
2° ~3°	1/30~1/20	めまい、頭痛、はきけ、食欲不振などの比較的重い症状。	北原・宇野(1965)
4° ~6°	1/15~1/10	強い牽引感、疲労感、睡眠障害が現れ、正常な環境でものが傾いて見えることがある。	北原・宇野(1965)
7° ~9°	1/8~1/6	牽引感、めまい、吐き気、頭痛、疲労感が強くなり、半数以上で睡眠障害。	北原・宇野(1965)

$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.13 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$

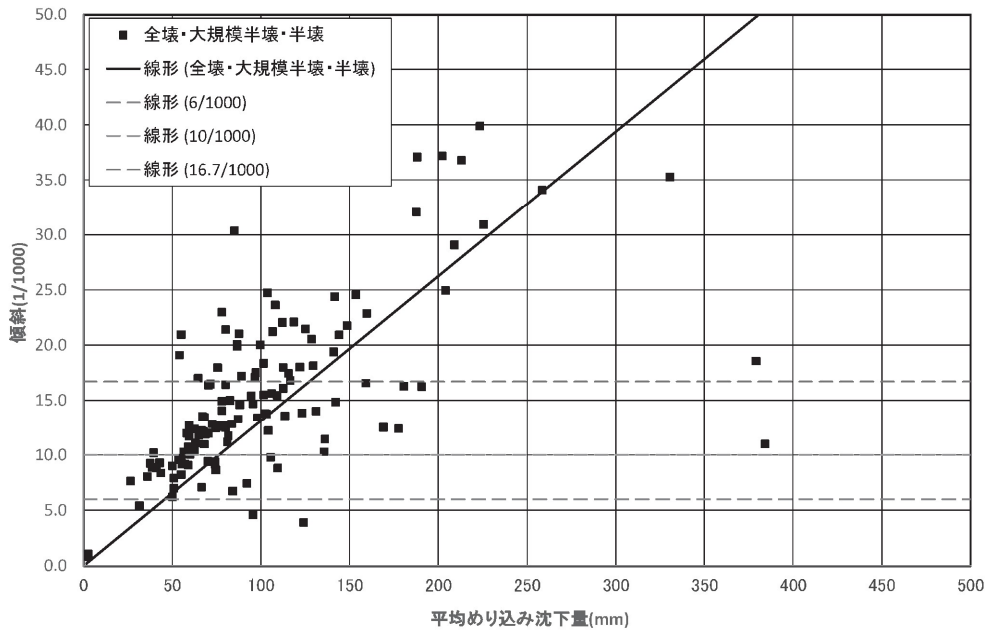


図-2.2.1 2011年東北地方太平洋沖地震における戸建て住宅のめり込み沈下量と傾斜角の関係
(千葉市と習志野市【住宅が密集している地区】のデータのみ)

$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.07 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$

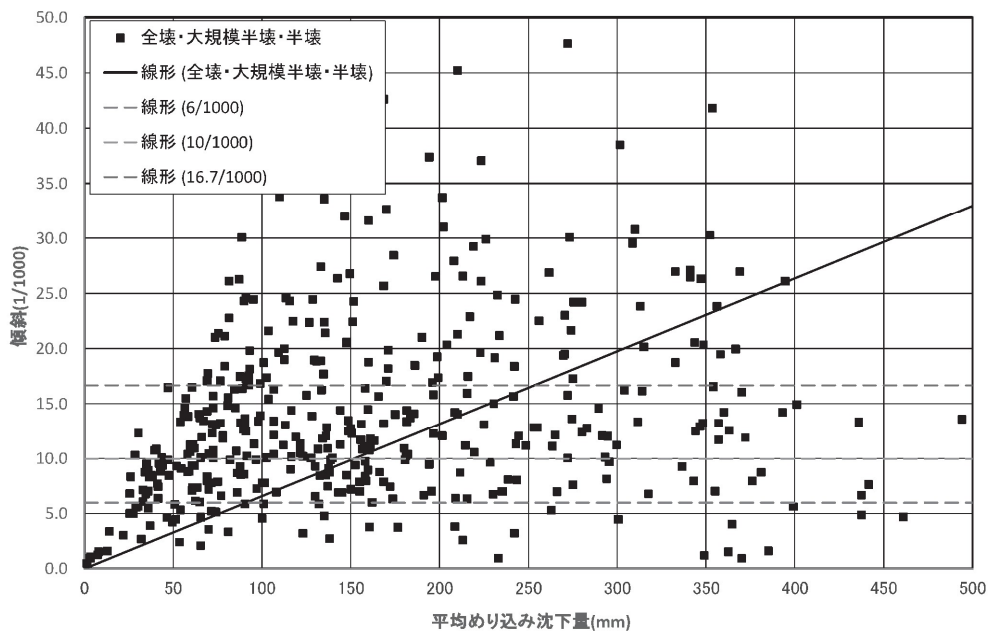


図-2.2.2 2011年東北地方太平洋沖地震における戸建て住宅のめり込み沈下量と傾斜角の関係
(神栖市と潮来市【住宅があまり密集していない地区】のデータのみ)

(「造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書 -液状化から戸建て住宅を守るための手引き- (公社)地盤工学会関東支部」より)

(2) むり込み沈下量の算定

戸建て住宅のむり込み沈下量は、対象地点における地盤情報や建物情報を基に、液状化安全率 (F_L) と液状化強度比 (R_L) に応じたせん断剛性低下率から“液状化後地盤の弾性係数”を求め、『日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019 改定）』に示されている多層地盤の弾性沈下量の算定式に準拠し求める。

① 多層地盤の弾性沈下量の算定式

図-2.2.3 に示すような多層地盤の弾性沈下量は、「スタインブレナーの近似解」を用い近似的に求めることができる。なお、「スタインブレナーの近似解」では、載荷幅に対して層厚が極端に薄いと解の精度が低下する傾向があるため、弾性沈下量算定用の地層を設定する際は、地層分割を細かくし過ぎないように注意する。

$$S_E = \left\{ \frac{I_s(H_1, \nu_{s1})}{E_{s1}} + \sum_{k=2}^n \frac{I_s(H_k, \nu_{sk}) - I_s(H_{k-1}, \nu_{sk-1})}{E_{sk}} \right\} qB$$

$$I_s = (1 - \nu_s^2)F_1 + (1 - \nu_s - 2\nu_s^2)F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[l \cdot \log_e \frac{\left(1 + \sqrt{l^2 + 1}\right) \sqrt{l^2 + d^2}}{l \left(1 + \sqrt{l^2 + d^2 + 1}\right)} + \log_e \frac{\left(l + \sqrt{l^2 + 1}\right) \sqrt{1 + d^2}}{l + \sqrt{l^2 + d^2 + 1}} \right]$$

$$F_2 = \frac{d}{2\pi} \tan^{-1} \frac{l}{d\sqrt{l^2 + d^2 + 1}}$$

ここで、

- S_E : 弾性沈下量 (m)
- I_s : 係数
- q : 基礎に作用する荷重度 (kN/m^2)
- B : 基礎の短辺長さ (m)
- L : 基礎の長辺長さ (m)
- l : L/B
- d : H/B
- H : 地表面から対象層下端までの距離 (m)
- ν_s : 地盤のポアソン比
- E_s : 地盤の弾性係数 (kN/m^2)

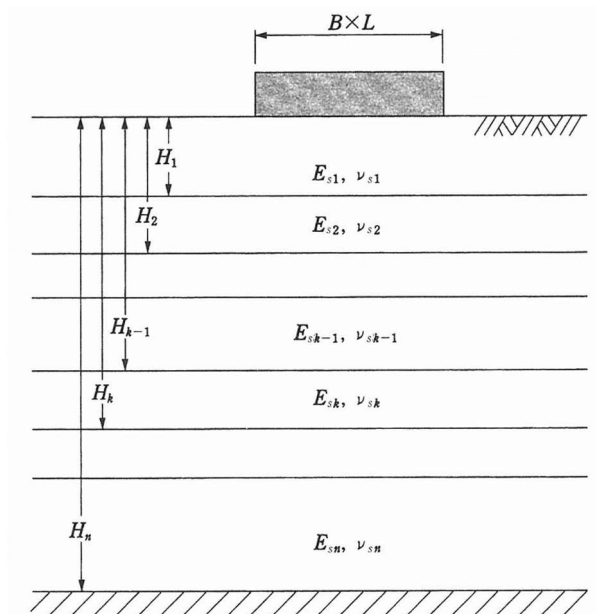


図-2.2.3 多層地盤における弾性沈下量の算定式

(「建築基礎構造設計指針（日本建築学会：2019 改定）」より)

なお、図-2.2.3 で示す弾性沈下量は隅角部の沈下量であるため、図-2.2.4 に示すような矩形内部の点 N における沈下量は、矩形載荷面 I ~IV の隅角部の沈下量を合計した次式で得られる。

$$S_E = \frac{q}{E_s} (I_{sI} B_I + I_{sII} B_{II} + I_{sIII} B_{III} + I_{sIV} B_{IV})$$

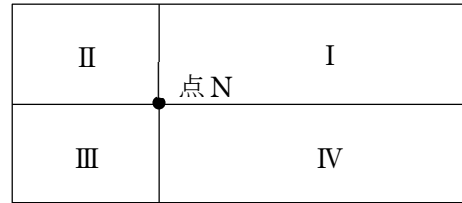


図-2.2.4 矩形載荷面

(「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会：2019 改定)」より)

② 液状化後地盤のせん断剛性低下率の設定

液状化した地盤のせん断剛性の低下割合は、地盤の性質 (粒径や液状化強度) や液状化の程度によって異なる。繰返しねじりせん断試験により液状化を発生させ、さらに一定の繰返し載荷を続けた後に単調載荷試験を行い、液状化後のせん断応力-せん断ひずみの関係を求めると図-2.2.5^{*1} のようになる。このような試験から、液状化した地盤のせん断剛性の低下割合 (せん断剛性低下率) と液状化安全率 F_L 、細粒分含有率 F_C の関係をまとめた例を図-2.2.6^{*1} に示す。図-2.2.6 は、液状化した土の応力-ひずみ関係を図-2.2.5 に示すバイニリアーモデルで仮定し、この第 1 勾配の G_1 を液状化前のせん断剛性 (N 値から求めた G_N や $\gamma = 10^{-3}$ 時の $G_{0,i}$) で除した値と、細粒分含有率 F_C 、並びに、液状化安全率 F_L との関係を整理したものである。

また、図-2.2.6 に広範囲な条件の試験データを付け加え、液状化後のせん断剛性 G_1 を液状化強度比 R_L 、液状化安全率 F_L 、有効拘束圧 σ'_c と関係付けたものが図-2.2.7^{*1} となる。図-2.2.7 で示される液状化後地盤のせん断剛性比は、自重応力下の砂質土地盤がせん断剛性の低下によって変形すると仮定した“静的な FEM 地盤変形解析 (ALID)”による建物などの沈下量の推定に用いられる。

*1：安田、吉田、安達、規矩、石川 (2016)：液状化に伴う残留変形の静的評価法。日本地震工学論文集、第 16 巻、第 10 号、2016 年。

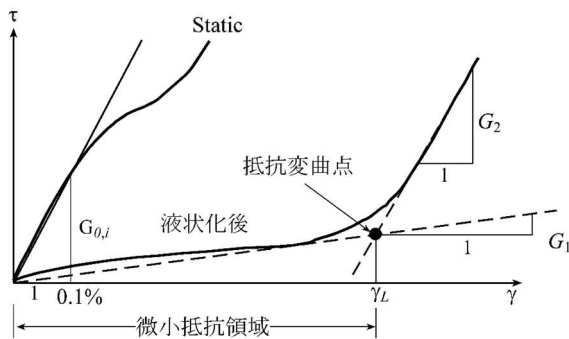


図-2.2.5 液状化に伴うせん断応力-せん断ひずみ、せん断剛性の低下の概念図

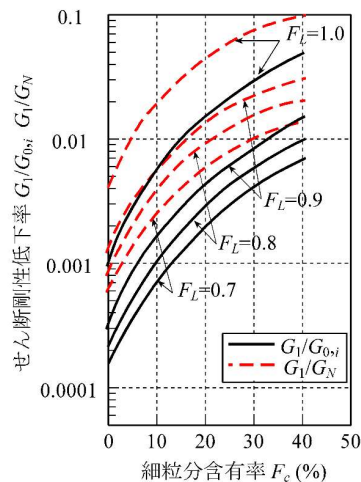
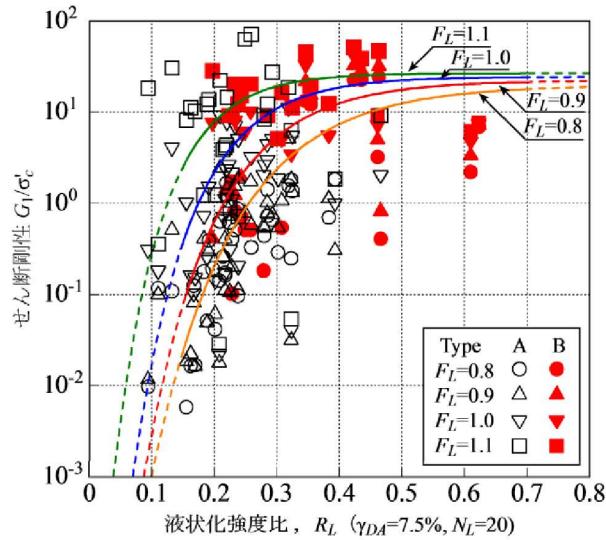


図-2.2.6 せん断剛性低下率と F_C 、 F_L の関係

(「造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書 - 液状化から戸建て住宅を守るための手引き - (公社)地盤工学会関東支部」より)



$$G_1/\sigma_c' = ae^{(-\exp(-b(R_L-c)))} \quad \text{ただし } 0.8 < F_L < 1.1 \text{ の範囲}$$

ここで、 $a = 23.6F_L + 0.98$ 、 $b = 9.32F_L^3 - 10.8F_L^2 + 13.27F_L - 0.806$ 、 $c = -1.40F_L^3 + 3.87F_L^2 + 4.14F_L + 1.95$

図-2.2.7 F_L ごとの液状化強度比とせん断剛性比の関係 (安田ら^{*1})

図-2.2.7 に示した繰返しねじりせん断試験の結果では、液状化安全率 F_L が 0.8 程度以上のせん断剛性比しか得られない。これは、試験装置と試験方法の制約上生じているものである。しかし、中地震程度の地震動条件で液状化判定を実施する場合、0.8 程度より小さい液状化安全率 F_L が算定されることもある。そこで、 F_L が 0.8 程度より小さい範囲まで、図-2.2.7 に示す式の適応範囲を拡大させる必要があるが、これは繰返しねじりせん断試験で求めることは無理であり他の方法から求めるしかない。

その一つの方法として被災事例からの逆算があり、豊田ら^{*2} は河川堤防の被災事例に対する逆解析から、 F_L が 0.8 程度より小さい範囲におけるせん断剛性を推定している。なお、逆解析に用いられた被災事例は、1994 年北海道南西沖地震及び 1995 年兵庫県南部地震で沈下した 10 か所の河川堤防の被災事例となる。この方法によると、液状化に伴う河川堤防の沈下量の実測値に合う F_L が小さい範囲におけるせん断剛性比を求めると、図-2.2.8 の曲線に示すような結果となる。この図は、図-2.2.7 に示す式の関係をも、せん断剛性比 G_1/σ_c' と液状化強度比 R_L との関係ではなく、液状化安全率 F_L との関係で整理し、かつ、 F_L が 0.8 以上では図-2.2.7 に示す式と一致させてある。

以上より、本手引きによって算定する戸建て住宅のめり込み沈下量は、多層地盤の弾性沈下量を「スタインプレナーの近似解」を用い近似的に求めることとし、液状化後地盤のせん断剛性の低下割合は図-2.2.7 及び図-2.2.8 に示す考え方を標準とする。これらの方法によって、めり込み沈下量を試算した事例を P.82~P.84 に示すので参照されたい。

^{*2}：豊田、杉田、石原 (2005)：河川堤防の地震被災事例に基づく液状化地盤の剛性に関する検討、日本地震工学・200 大会—梗概集、pp.226-227、2005 年。

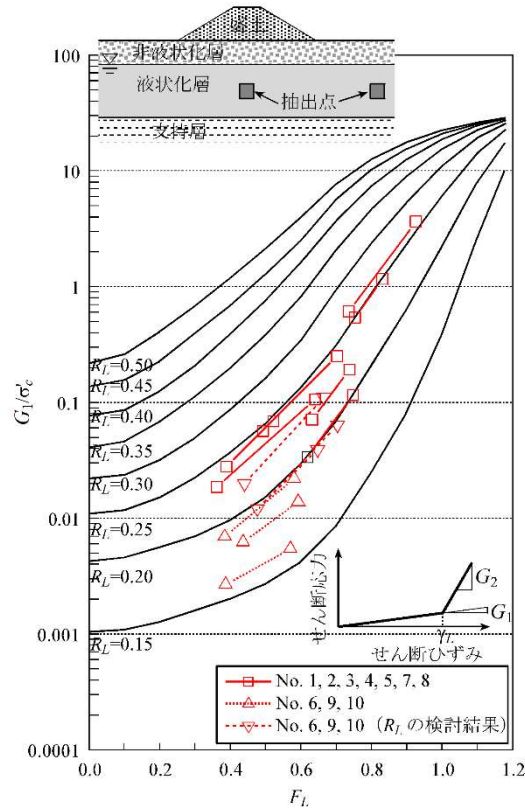


図-2.2.8 F_L が0.8より小さい範囲のせん断剛性比と F_L 、 R_L の関係（豊田ら^{※2}）

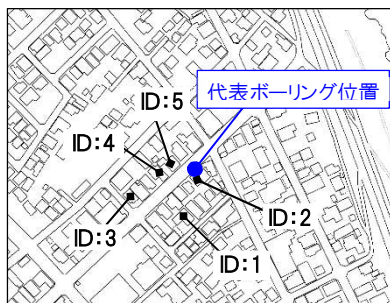
<参考： F_L 、 R_L に応じたせん断剛性比 (G_1/σ_c') の参考値>

		F_L							
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
G_1/σ_c'	$R_L=0.15$	0.00100	0.00110	0.00129	0.00160	0.00205	0.00274	0.00422	0.00861
	$R_L=0.20$	0.00393	0.00459	0.00562	0.00698	0.00964	0.01510	0.02944	0.06871
	$R_L=0.25$	0.01000	0.01153	0.01486	0.02208	0.03648	0.06486	0.13335	0.30761
	$R_L=0.30$	0.01905	0.02399	0.03236	0.05012	0.08770	0.16368	0.34754	0.95060
	$R_L=0.35$	0.03631	0.04539	0.06683	0.11092	0.19409	0.37154	0.80538	2.04174
	$R_L=0.40$	0.06531	0.08610	0.12445	0.20654	0.38905	0.75858	1.63305	3.71535
	$R_L=0.45$	0.12023	0.15382	0.22387	0.39355	0.67608	1.27350	2.48313	5.62341
	$R_L=0.50$	0.18621	0.26792	0.41976	0.69663	1.21619	2.17771	4.04576	7.94328

③ せん断剛性低下率の下限値の設定

図-2.2.7 及び図-2.2.8 に示した液状化後地盤のせん断剛性低下率をそのまま用い、スタインブレナーの近似解により戸建て住宅のめり込み沈下量を算定すると、過大な沈下量が算定される場合があるという点に注意が必要となる。静的な FEM 地盤変形解析 (ALID) では図-2.2.5 に示すよう、液状化した土の応力-ひずみ関係をバイニリアーモデルと仮定し、その第 1 勾配を G_1 として求めると同時に微小抵抗領域と第 2 勾配の G_2 も設定し解析に用いる。このため、 F_L や R_L が小さな値を示しせん断ひずみが大きく発生する場合であっても、せん断剛性が G_2 に移行することで、ひずみが極端に大きくならないようになっている。これに対し、スタインブレナーの近似解では、液状化した土の応力-ひずみ関係を線形と考え、せん断剛性 G_1 のみを用いることから、 F_L や R_L が小さな値を示す場合には、算定されたせん断ひずみが微小抵抗領域を超えてしまい、実情よりも算定される沈下量が過大となる可能性がある。このため、スタインブレナーの近似解による戸建て住宅のめり込み沈下量の算定においては、図-2.2.7 及び図-2.2.8 に示す考え方を踏まえたうえで、液状化後地盤のせん断剛性低下率の下限値を設定する必要がある。

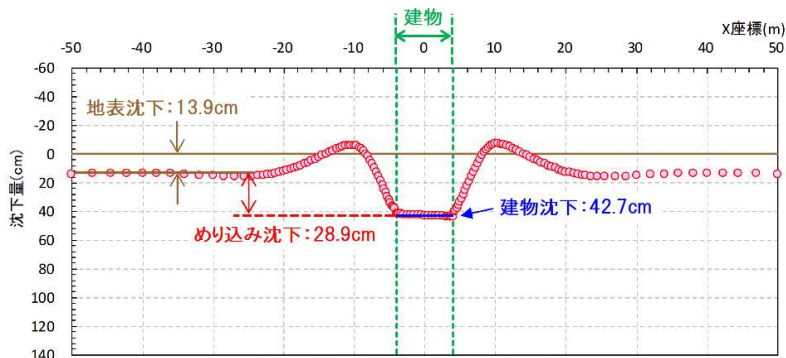
そこで、2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化被害が集中した「千葉県我孫子市 (都～布佐西地区)」、「茨城県潮来市 (日の出地区)」、「千葉市美浜区 (磯辺 8 丁目)」、「茨城県神栖市 (堀割地区)」、並びに、2016 年熊本地震で液状化被害が発生した「熊本市近見地区」を対象とし、建物調査から求めためり込み沈下量と、静的自重 FEM 解析 (ALID) 及びスタインブレナーの近似解それぞれの方法により算定しためり込み沈下量について比較検証を行った。なお、スタインブレナーの近似解によるめり込み沈下量の算定にあたっては、液状化後地盤のせん断剛性低下率 (G_1/G_0) の下限値を 1/500、1/300、1/200 の 3 種類と設定した。



(a) 代表ボーリング位置と建物調査の位置

建物 ID	めり込み沈下量 (調査結果)
1	28.1cm
2	30.3cm
3	20.1cm
4	17.8cm
5	4.8cm

(b) 建物調査^{※3}から求めためり込み沈下量



(c) 静的自重 FEM 解析 (ALID) の結果

図-2.2.9 千葉県我孫子市 (都～布佐西地区) におけるめり込み沈下量の算定例

※3: 橋本、安田、山口 (2012): 東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめり込み沈下量の関係. 第 47 回地盤工学研究発表会 (八戸)、2012 年 7 月.

表-2.2.2 に、建物調査から求めためり込み沈下量、静的自重 FEM 解析 (ALID) 及びスタインプレナーの近似解それぞれから求めためり込み沈下量との比較結果を示す。この比較結果より、スタインプレナーの近似解から求めためり込み沈下量は、液状化後地盤のせん断剛性低下率の下限値を 1/300、もしくは、1/200 とした場合に、建物調査から求めためり込み沈下量及び静的自重 FEM 解析 (ALID) 結果と近い値を示すことが確認できた。

表-2.2.2 算定しためり込み沈下量の比較結果

検討地区名	F _L 値 (液状化層厚)	めり込み沈下量(cm)				
		調査結果	静的自重 FEM 解析 (ALID)	スタインプレナーの近似解		
				剛性低下率の 下限値 1/500	剛性低下率の 下限値 1/300	剛性低下率の 下限値 1/200
我孫子市(都～布佐西)	0.37 (3.70m)	20～30 程度	28.9	27.4	16.6	11.0
潮来市(日の出)	0.55 (4.85m)	10 程度	8.0	24.8	16.2	11.7
千葉市(磯部8丁目)	0.55 (4.00m)	10 程度	6.5	13.0	7.9	5.2
神栖市(堀割)	0.39 (2.70m)	10～20 程度	33.9	25.3	15.3	10.1
熊本市(近見)	0.70 (8.00m)	10～20 程度	18.8	52.5	31.8	21.0

「戸建て住宅のめり込み沈下量」は、『宅地の液状化危険度マップ』により液状化による宅地の被害リスクを感じた住民や事業者が自ら地盤調査等を実施し、より具体的な宅地の液状化被害をイメージするために活用することを想定している。住民や事業者の宅地液状化に対する危機意識を高めるためにも、本手引きでは、沈下量がやや大きく算定される『せん断剛性低下率の下限値：1/300』により、戸建て住宅のめり込み沈下量を算定することを標準とする。

ただし、『せん断剛性低下率の下限値：1/200』を用い、戸建て住宅のめり込み沈下量を算定することを妨げるものではなく、戸建て住宅の“平均的なめり込み沈下量”を算定したい場合においては『せん断剛性低下率の下限値：1/200』を用いるなど、住民や事業者との宅地液状化に関するリスクコミュニケーションの場面に応じ、せん断剛性低下率の下限値の値を使い分けることが重要となる。

(3) 液状化による戸建て住宅の被害程度の推定

戸建て住宅のめり込み沈下の算定結果、及び、めり込み沈下量から推測される傾斜量を内閣府公表の被害認定フローに適用することで、戸建て住宅の液状化による被害程度を推定することができる(図-2.2.10)。そのため、住民や事業者との宅地液状化に関するリスクコミュニケーションにおいては、めり込み沈下量の算定結果及び傾斜量の推定結果とあわせ、推定される被害程度も情報として活用することが良い。

<被害認定フロー(液状化等の地盤被害による被害)>

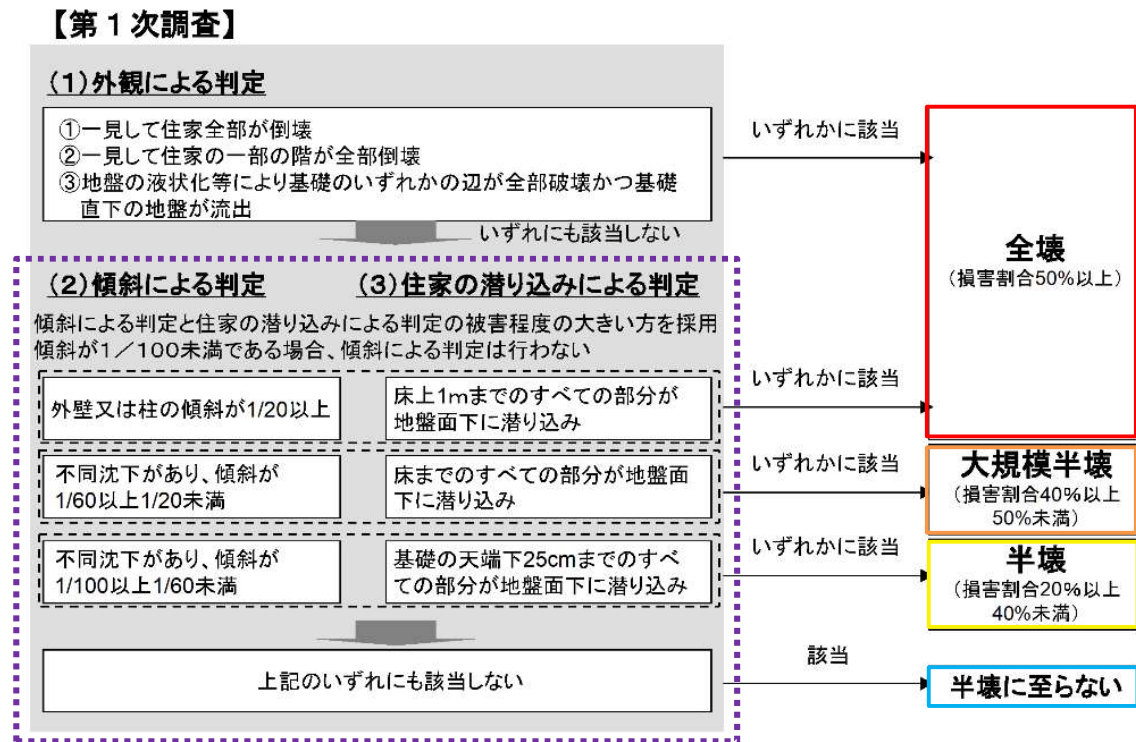


図-2.2.10 液状化等の地盤災害による被害認定フロー

(「内閣府(防災担当): 災害に係る住家の被害認定基準運用指針(平成30年3月)」に一部加筆)

(4) 戸建て住宅のめり込み沈下量の試算事例

図-2.2.11 に示す建物条件及び地盤条件について、戸建て住宅のめり込み沈下量を試算する。試算にあたっては、想定する地震を中地震程度（設計水平震度： $k_{hgL}=0.20$ 、地震動タイプ：タイプ I）とし、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（（公社）日本道路協会：H29.11）」に準拠し液状化判定を実施した。なお、液状化判定対象層とならない「地下水位より上位の砂質土」と「GL-5.0m～20.0m 粘性土層」は、めり込み沈下量の算定対象としていない。また、せん断剛性低下率の下限値は 1/300 とし試算を行った。

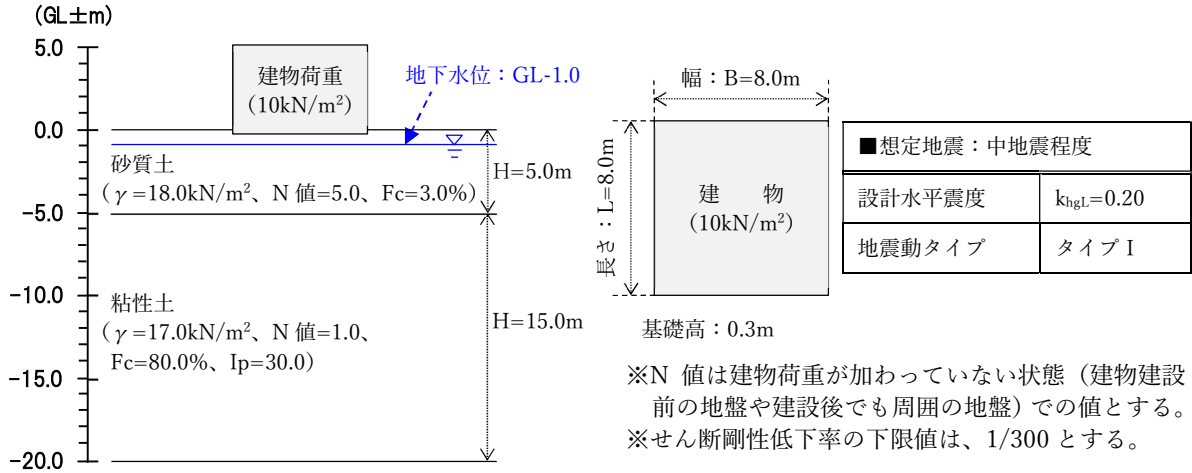
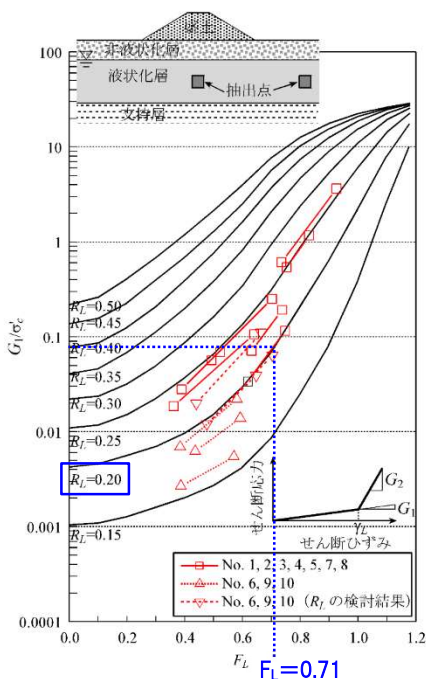


図-2.2.11 試算事例の条件図

<砂質土に対する液状化判定結果（GL-3.0m で試算）>

- ・液状化強度比： $R_L=0.20$
- ・液状化安全率： $F_L=0.71$

<液状化安全率と液状化強度比の値に応じたせん断剛性低下率>



- ・ $R_L=0.20$ 、 $F_L=0.71$ （ <0.8 ）なので左図より、
 $G_1/\sigma'_c \cong 0.0825$
- ・建物直下の地盤において、 $K_0=0.5$ と仮定すると、有効上載圧 $\sigma'_v=44.0\text{kN/m}^2$ より有効拘束圧 σ'_c は、
 $\sigma'_c = (1+2 \times 0.5) / 3 \times 44.0 = 29.3 \text{ kN/m}^2$
- ・液状化後のせん断剛性 G_1 は、
 $G_1 = 0.0825 \times 29.3 = 2.4\text{kN/m}^2$
- ・地下水位以下の砂質土のせん断剛性低下率 G_1/G_0 は、
 $E_0 = 2800 \times N = 2800 \times 5.0 = 14,000 \text{ kN/m}^2$
 $G_0 = E_0 / 2(1 + \nu_0) = 14,000 / 2(1 + 0.33) \cong 5,263 \text{ kN/m}^2$
 $G_1/G_0 = 2.4 / 5,263 \cong 0.00046$ （ $0.5/1,000$ ）
- ・上記で算定されたせん断剛性低下率 G_1/G_0 は、1/300 より小さな値であるため、本試算に用いるせん断剛性低下率は、
 $G_1/G_0 = 1/300$ と設定する。

<例：せん断剛性低下率を 1/300 とした場合のめり込み沈下量の試算結果>

建物荷重	q	10.0	(kN/m ²)	—
基礎の短辺長さ	B	8.0	(m)	計算時は (8.0/2=4.0m) とする
基礎の長辺長さ	L	8.0	(m)	〃
地表から地層下端までの距離 (地下水位より上)	H ₁	1.0	(m)	地表面から当該地層下端までの距離
地表から地下端までの距離 (液状化層：砂質土)	H ₂	5.0	(m)	〃
液状化層の液状化強度比	R _L	0.20		道路橋示方書 (H29.11) より算定
液状化層の液状化安全率	F _L	0.71		〃
液状化層の有効拘束圧	σ _{c'}	29.3	(kN/m ²)	〃
地盤のポアソン比 (非液状化層)	ν	0.33	—	砂質土の一般値
地盤のポアソン比 (液状化前の液状化層)	ν ₀	0.33	—	〃
地盤のポアソン比 (液状化後の液状化層)	ν ₁	0.50	—	液状化後は ν=0.5 とする
地盤のヤング係数 (地下水位より上)	E	14,000	(kN/m ²)	E=2800・N で算定 (N=5.0)
地盤のヤング係数 (液状化前の液状化層)	E ₀	14,000	(kN/m ²)	E=2800・N で算定 (N=5.0)
地盤のせん断剛性 (液状化前の液状化層)	G ₀	5,263	(kN/m ²)	G ₀ =E ₀ /(2×(1+ν ₀)) で算定
地盤のせん断剛性 (液状化後の液状化層)	G ₁	17.54	(kN/m ²)	G ₁ /G ₀ =1/300 より算定
地盤のヤング係数 (液状化後の液状化層)	E ₁	52.62	(kN/m ²)	G ₁ =E ₁ /(2×(1+ν ₁)) で算定

沈下係数 (I _{s1}) 【地下水位より上】	F ₁	0.014	—	非液状化層
	F ₂	0.049	—	〃
	I _s	0.034	—	〃
沈下係数 (I _{s2}) 【液状化層：砂質土】	F ₁	0.186	—	液状化層
	F ₂	0.080	—	〃
	I _{s1}	0.139	—	〃

・めり込み沈下量：

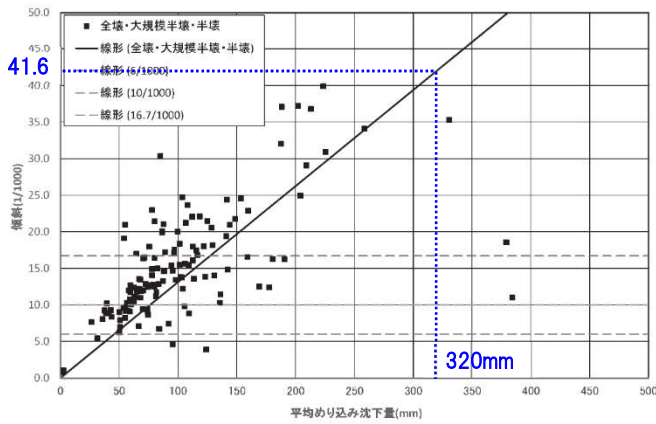
$$S_E = \{(0.034/14,000) + ((0.139 - 0.034) / 52.62)\} \times 10 \times 4 \times 4 = 0.32 \text{ (m)}$$

・住宅の潜り込みによる被災程度の推定：

- ・住宅の基礎高：30cm、算定しためり込み沈下量：32cm
- ・30cm - 32cm = -2cm
- ・床までのすべての部分が地盤面下に潜り込む (図-2.2.10 より)
- ・予測される被害程度 ⇒ 大規模半壊

・ 傾斜角による被災程度の推定：

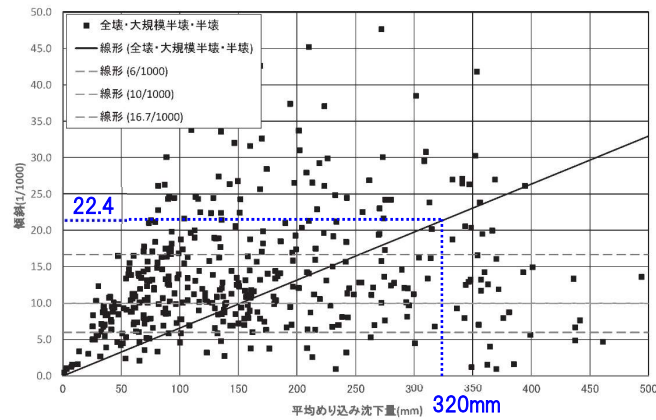
①対象建物の周辺に住宅が密集している場合



・ 傾斜角 θ は

$$\begin{aligned} \theta (1/1,000) &= 0.13 \times \text{めり込み沈下量} \\ &= 0.13 \times 320\text{mm} \\ &= 41.6 / 1,000 \end{aligned}$$

②対象建物の周辺に住宅が密集していない場合



・ 傾斜角 θ は

$$\begin{aligned} \theta (1/1,000) &= 0.07 \times \text{めり込み沈下量} \\ &= 0.07 \times 320\text{mm} \\ &= 22.4 / 1,000 \end{aligned}$$

③傾斜角による被災程度の推定

- ・ 上記①の場合：41.6/1,000
- ・ 上記②の場合：22.4/1,000
- ・ 内閣府の被害判定フローより予測される被害程度 ⇒ 大規模半壊

<被害認定フロー（液状化等の地盤被害による被害）>

【第1次調査】

(1) 外観による判定

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊
- ③地盤の液状化等により基礎のいずれかの辺が全部破壊かつ基礎直下の地盤が流出

いずれかに該当

全壊
(被害割合50%以上)

(2) 傾斜による判定

- 傾斜による判定と住家の潜り込みによる判定の被害程度の大きい方を採用
傾斜が1/100未満である場合、傾斜による判定は行わない
- 外壁又は柱の傾斜が1/20以上
 - 床1mまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み
 - 不同沈下があり、傾斜が1/60以上1/20未満
 - 床までのすべての部分が地盤面下に潜り込み
 - 不同沈下があり、傾斜が1/100以上1/60未満
 - 基礎の天端下25cmまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み

いずれかに該当

大規模半壊
(被害割合40%以上
50%未満)

いずれかに該当

半壊
(被害割合20%以上
40%未満)

上記のいずれにも該当しない

該当

半壊に至らない

2-3. 簡易評価結果を活用するうえでの留意点

(1) せん断剛性低下率の下限値の設定

戸建て住宅のめり込み沈下量や傾斜量の簡易評価は、住民や事業者が宅地の液状化被害をより具体的にイメージし、宅地液状化に対する危機意識を高めるために活用されることを目的としている。そのため、本手引きでは、「スタインブレナーの近似解」を用い、沈下量がやや大きく算定される『せん断剛性低下率の下限値：1/300』を用いることを標準とする。

ただし、戸建て住宅の“平均的なめり込み沈下量”を算定したい場合においては『せん断剛性低下率の下限値：1/200』を用いるなど、住民や事業者との宅地液状化に関するリスクコミュニケーションの場面に応じ、せん断剛性低下率の下限値の値を使い分けることを妨げるものではない。

(2) 簡易的な評価であることを理解したうえでの活用

本手引きで示す「戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価」は、戸建て住宅の液状化被害を簡易に評価することを目的としたものであり、液状化に伴う住宅の沈下・傾斜対策に係わる実務的な計画・設計検討に活用できるほどの精度が確保されていないことに留意されたい。なお、地震応答解析や静的自重 FEM 解析（ALID など）を活用すれば、液状化の発生や住宅の沈下量を詳細に解析することができ、より信頼度の高い沈下量を求めることができる。ただし、地震応答解析や静的自重 FEM 解析（ALID など）を活用する際には、高度な技術的判断が必要となることから、有識者等から解析結果に対する意見聴取を行うなど、慎重な扱いに留意して頂きたい。