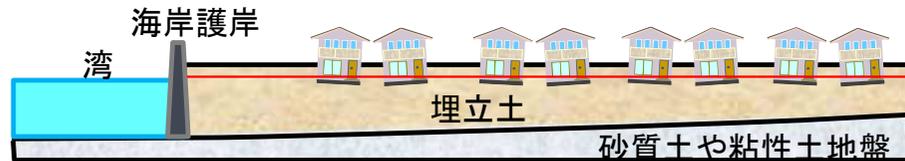


## 4. 造成宅地で液状化が発生し易い原因と一般のハザードマップに記載されていない理由

### 2011年東日本大震災で液状化した地点の大半は人工改変地

- 人工改変地の多くは戦後の核家族化や人口増加に伴って住宅地用に造成されたものであり、特に締固めて造成しなかった地盤に対策を施さないまま戸建て住宅が建てられていたため、無数の戸建て住宅に被害を与えた。

タイプ① 海岸や河岸などの広い埋立地（東京湾岸など）



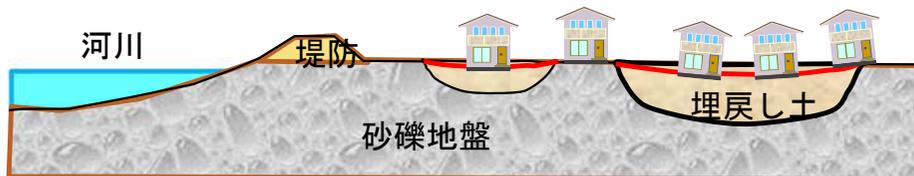
タイプ② 池・水路・河道などの局所的な埋立地



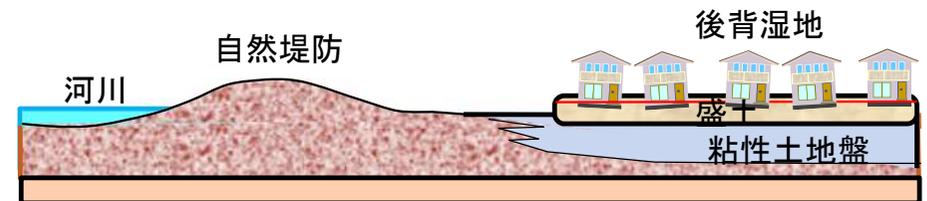
タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地



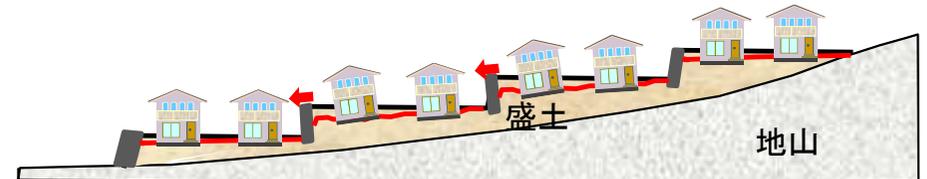
タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地（神栖市など）



タイプ⑤ 粘性土地盤上の盛土地（久喜市など）



タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地（東海村など）



タイプ①や②は古くから液状化による住宅被害が多く発生してきたので広く認識されているので、③～⑥<sup>37</sup>だけに事例を挙げてみる。

## タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地の被災事例

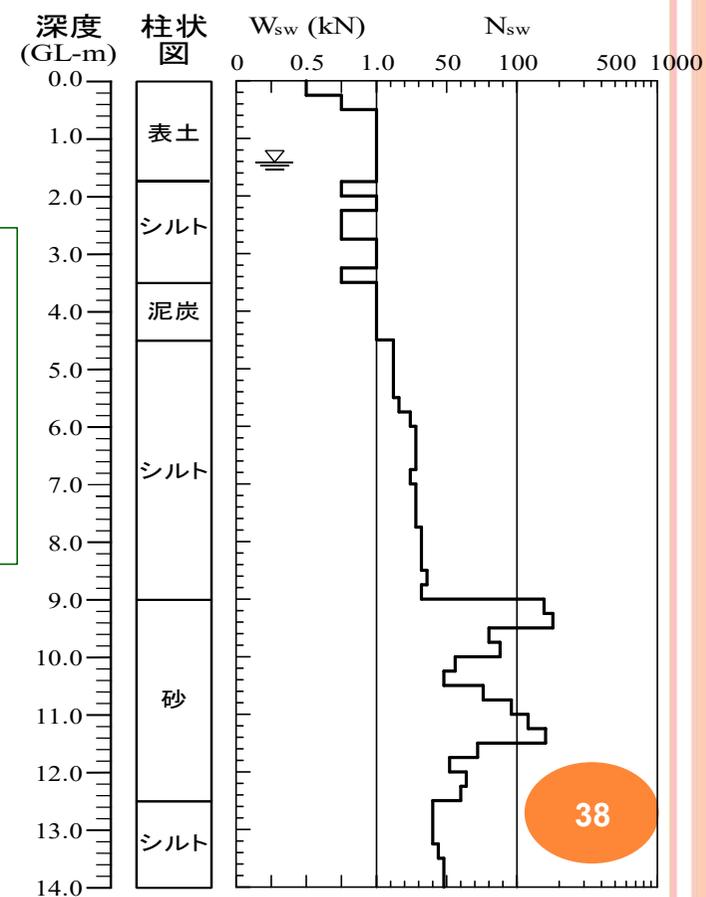
2003年十勝沖地震の際に生じた掘削し埋め戻した土の液状化による被害



規矩大義・安田進・田中智宏・石川敬祐・掛川智仁・伊藤忠・浜野義明：2003年十勝沖地震における住宅基礎の被害，第39回地盤工学研究発表会，No.978，pp.1953-1954，2004.

- ☆軟弱地盤であったため，この住宅では地盤を強固にするよう特別にGL -3 m程度まで掘削し，礫混じり砂質土で埋め戻して，その上に家を建てられていた。
- ☆このような局所的な液状化はハザードマップには当然示されない。

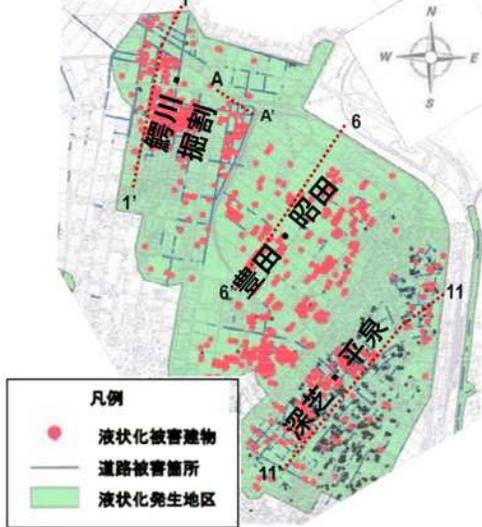
### 周囲の原地盤の地盤状況



# タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地 東日本大震災時の神栖市での液状化被害

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，Vol.71，No.4，pp. I376-I386，2015.

神栖の液状化地点



(神栖市による)

治水地形分類図



(地理院地図による)

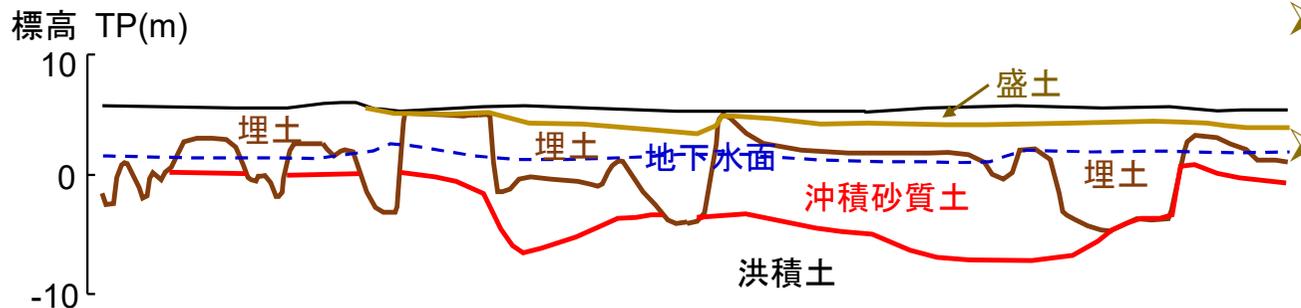
砂利掘削・埋め戻した箇所の被害



現在行われている掘削状況



深芝・平泉地区を通る断面に見られる掘削・埋戻し状況



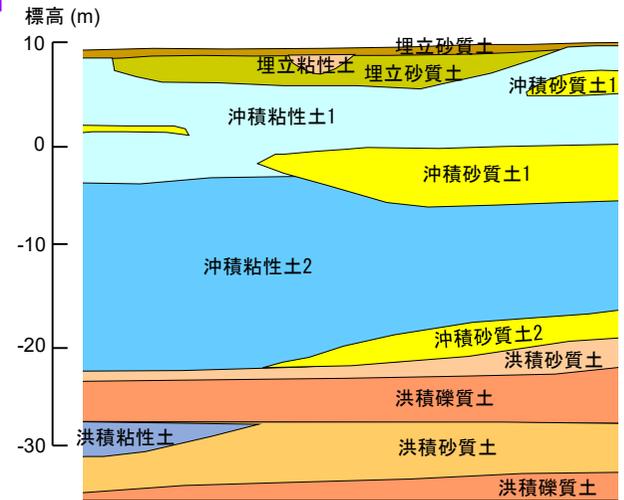
- 砂州・砂丘で建設用の砂利を採取し、埋め戻した箇所が液状化。
- 掘削後の埋土ではボーリングが行われていない！
- 地震後に行った表面波探査で断面が推定できた。

## タイプ⑤ 粘性土地盤上の盛土地

東日本大震災時の南栗橋における液状化被害



## 土質断面(地震後の調査による)



(地盤工学会の  
東日本大震災合  
同報告をもとに  
作成)

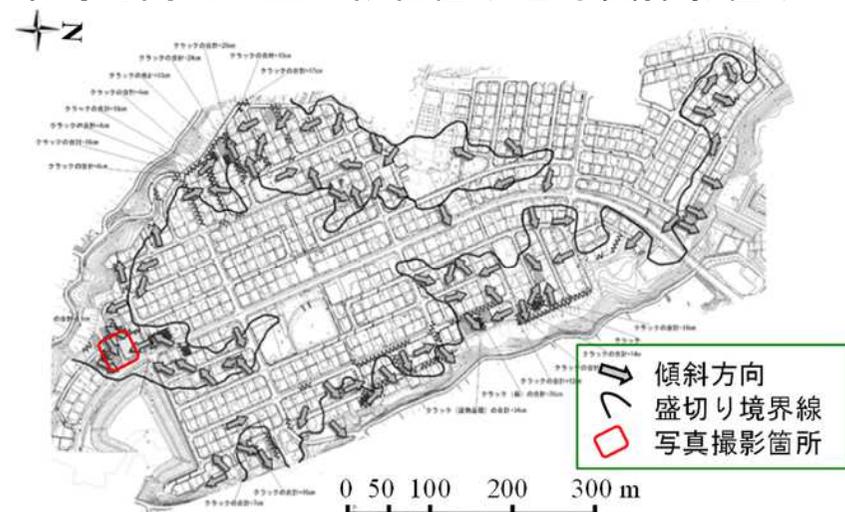
## 2004年新潟県中越地震での被害



## タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地

### 丘陵地や台地の谷埋め盛土における東日本大震災時の液状化被害発生事例

#### 東海村南台の盛土被害箇所と写真撮影箇所



(大山らに加筆)

#### 液状化による被害状況



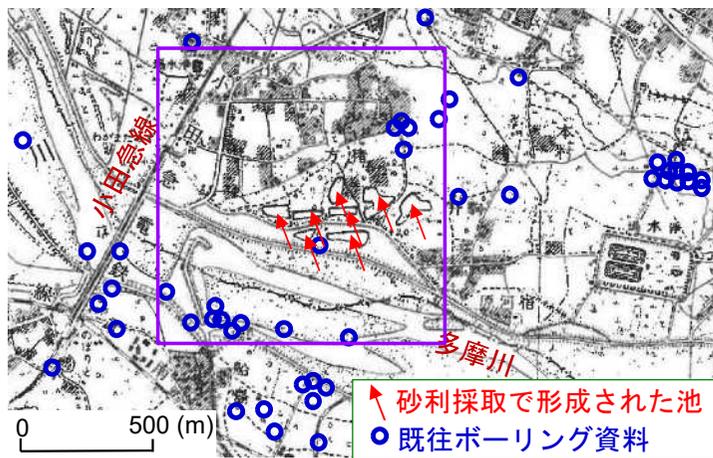
橋本隆雄・大山丈吉・安田進：東日本大震災による東海村南台団地・緑ヶ丘団地の被害分析及び復旧対策について，地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—，pp. 366-374，2014.

- ☆地震後の地盤調査によると盛土の上流側では地下水位はGL-1m程度と浅かった。
- ☆盛土造成後建設後山からの浸透水が多いとか，暗渠排水管が老朽化したといったことにより発生しているのではないかと考えられる。
- ☆盛土造成宅地では造成後戸建て住宅が建てられる前に地盤調査は無し。

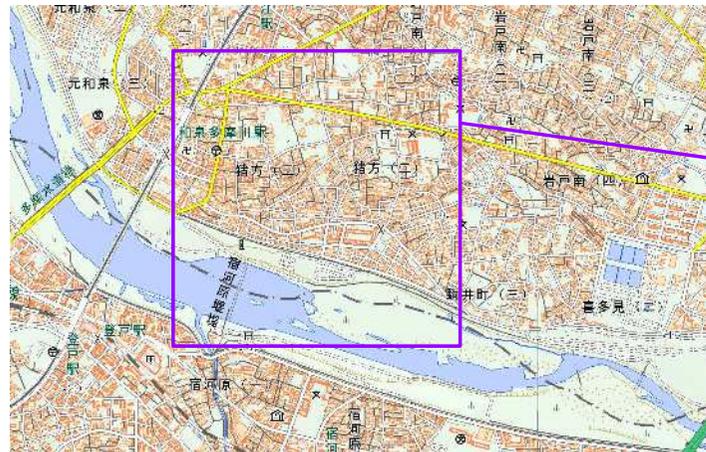
# 人工改変地における既往ボーリングの不足とハザードマップでの見落とし

## 多摩川沿いのタイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地に関する事例

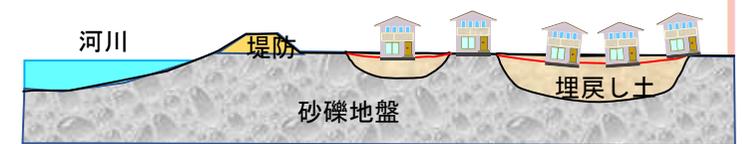
### 多摩川沿いの砂利採取地の事例



(国土地理院1/25000、1955年測量旧版地形図に加筆)



(地理院地図)



掘削跡の埋土はハザードマップに考慮されていない

- 掘削跡地を住宅地にする際にボーリングが行われていないので、 $P_L$ 値などによる液状化の定量的な判定は行えず、液状化ハザードマップに考慮されていない。
- 微地形による液状化ハザードマップにおいても。掘削作業は一時期だけなので旧版地形図で調べる場合でも昔の地形図だけでなく、時系列で調べていく必要がある。

## 多摩川沿いの狛江市における砂利採掘跡の池に関する情報

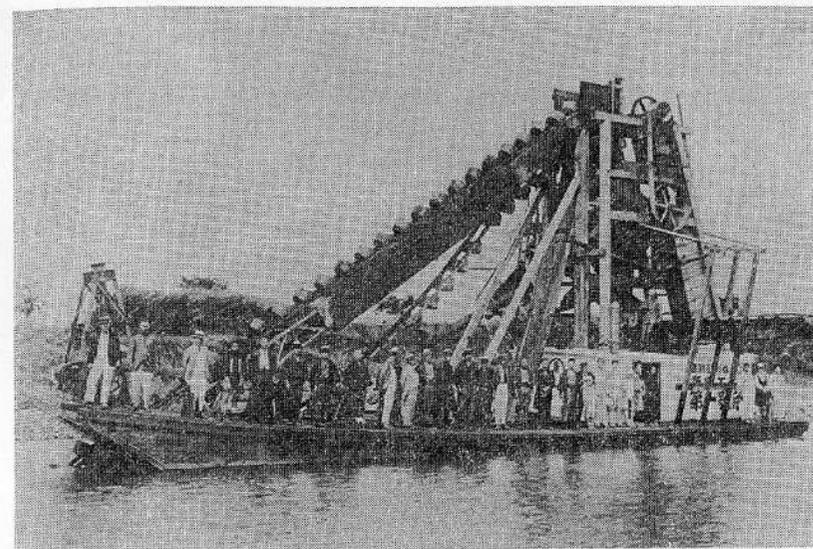


図6-24 砂利採掘船（浮岳堯侃提供）



（狛江市史、1985）



## 多摩川17km～35kmの間における砂利採取で形成したと考えられる池の調査結果



- 多摩川は急流河川で砂利が豊富にあり都心に近いため、明治時代から河川敷の砂利の採取が行われてきた。
- さらに1923年関東地震後や第2次世界大戦の復興にあたって多く採取されてきた。
- 河川内の土砂を採取し過ぎて橋脚の洗掘被害が発生したり堰からの取水が困難になったため、河川内の土砂採取が禁止されるようになり、堤内地の田畑を掘削して砂利を採取するようになってきた。
- 住宅地化にともなって掘削池は残土などで埋められて、現在は住宅地やグランドとして使用されている。

## 砂利採取池が示されている旧版地形図の測量年

図幅	地区番号	1920	1940	1960	1980(年)
武蔵府中	F1			×	○+
	F2			×	○ ○ ○ ○ +
溝口	M1, M2		×	○ ○	+
	M3, M4, M5, M6		×	○ ○ ○ ○	+
	M7		×	○ ○	+
東京西南部	T1, T3		×	○ ○	+
	T2	×	○ ○	○ ○	+
	T4		×	○ ○	+
川崎	K1, K5	×	○ ○	○ ○ ○ ○	+
	K2, K4	×	○ ○	+	
	K3		×	○ ○ ○ ○	+

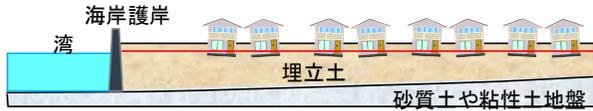
×:砂利採取池なし ○:砂利採取池表示有 +:砂利採取跡地利用済



- 砂利の採取は一時期だけなので、古すぎる旧版地形図だけを参考にしてはいけない。

安田進：多摩川沿いの砂利採取跡地における液状化のリスク, 第78回土木学会年次学術講演会講演集, III-52, 2024.

### タイプ① 海岸や河岸などの広い埋立地



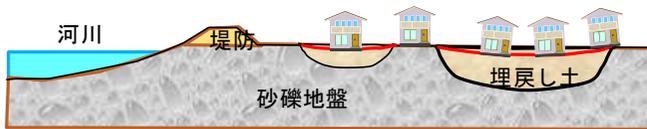
### タイプ② 局所的な埋立地



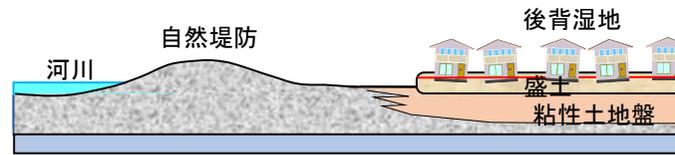
### タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地



### タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地



### タイプ⑤ 粘性土地盤上の盛土地



### タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地



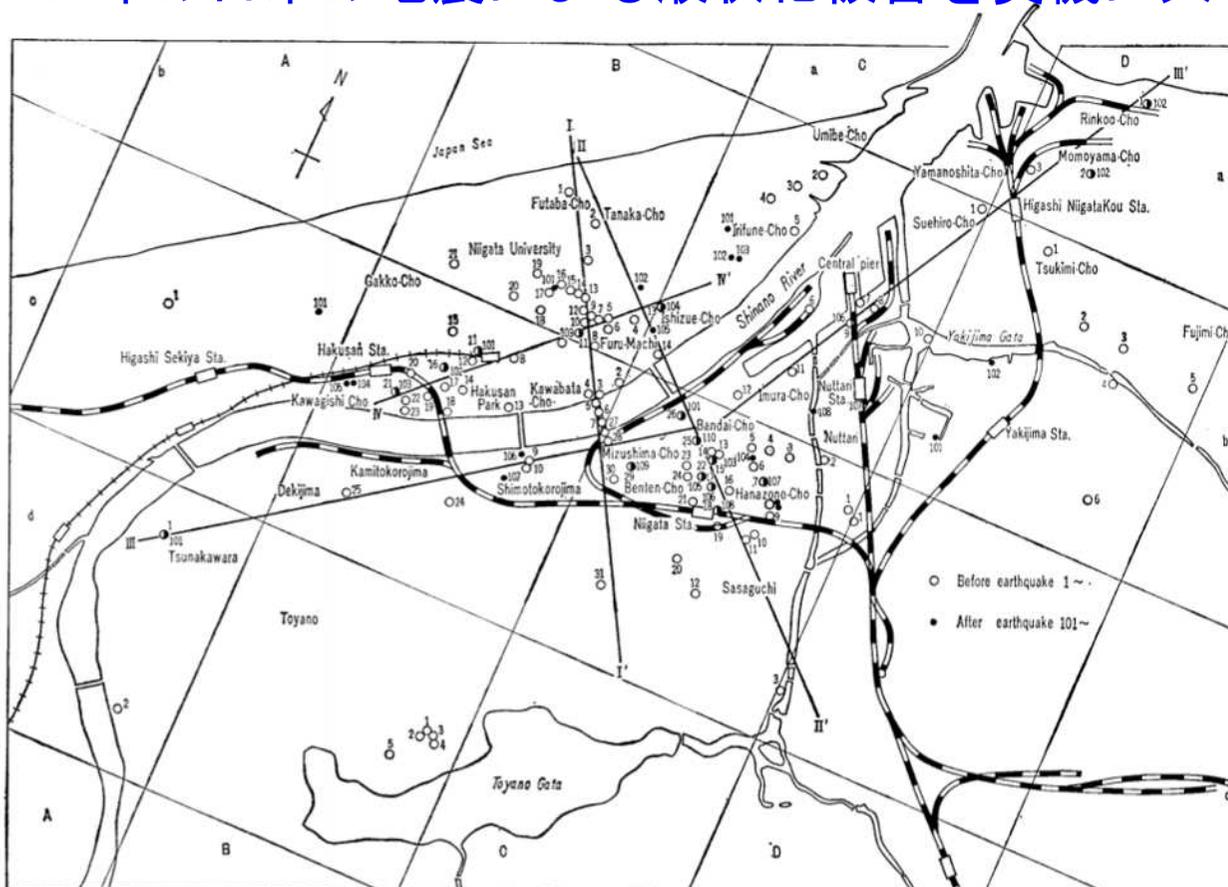
- 人工改変地の戸建て住宅地では**造成後の地盤状況を把握するボーリングは一般に行われない**。戸建て住宅には支持力確認のためのスクリーウエイト貫入試験が行われる程度。したがって、既往の**タイプ②～⑥の人工改変地では液状化の判定を行える既往ボーリングがない**。
- **タイプ①**は広く中・高層建物建築用のボーリングがあるが、公開されないものが多い。
- 液状化ハザードマップ作成時に既往ボーリングデータがない箇所では、**周囲の異なった種類の地盤のデータを用いて液状化判定を行う**。また、**⑥は丘陵・台地のため対象外**にされる。したがって、**タイプ①以外の液状化しやすい人工改変地の戸建て住宅地は、液状化ハザードマップに危険性が表示されない本質的な課題がある。(危険である)**

●	同様に液状化しないメッシュと判断	
■		

- : 粘性土からなる後背湿地
- : 砂質土による盛土造成宅地
- : 液状化判定を行う既往ボーリング

## 5. 液状化の判定を行う地盤調査方法と最近開発された簡易地盤調査方法

1964年の日米の地震による液状化被害を契機に大々的に開始された研究

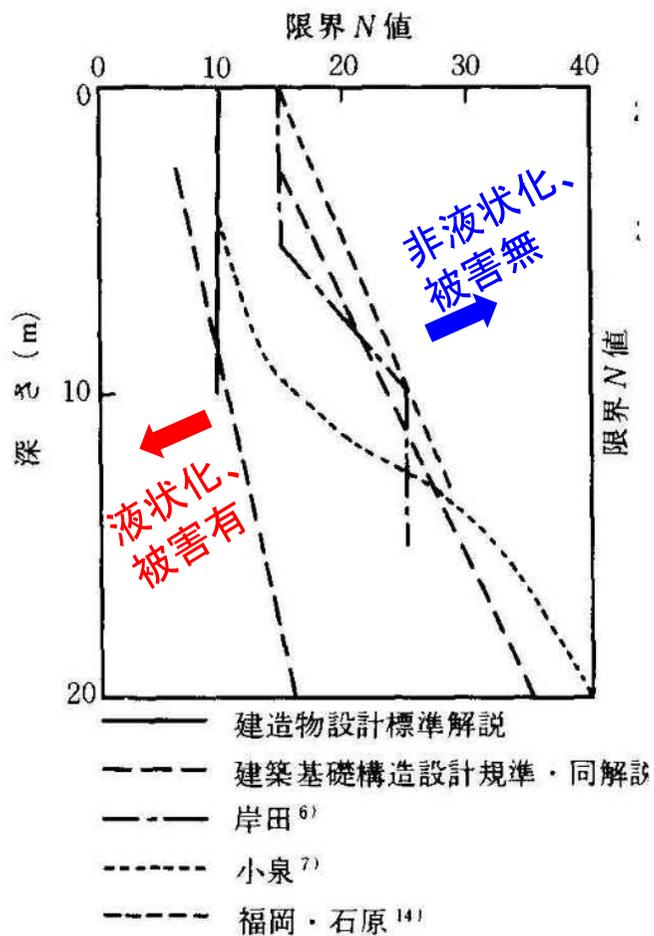


米国：アラスカ地震、  
日本：新潟地震

新潟市では1957年に市の中心部で大震災が発生したため、復興にあたって大型建物などが整備され地盤調査が行われていた。さらに新潟地震後に調査が多く行われた。

(Kishida、1966による)

日本ではまず新潟で液状化した箇所としなかった箇所の地盤の違いの研究から開始



まもなく種々の研究が行われるようになってきた

- ・ 繰返し三軸試験による基礎的な研究
- ・ 振動台による模型実験
- ・ 過去の液状化発生履歴の調査

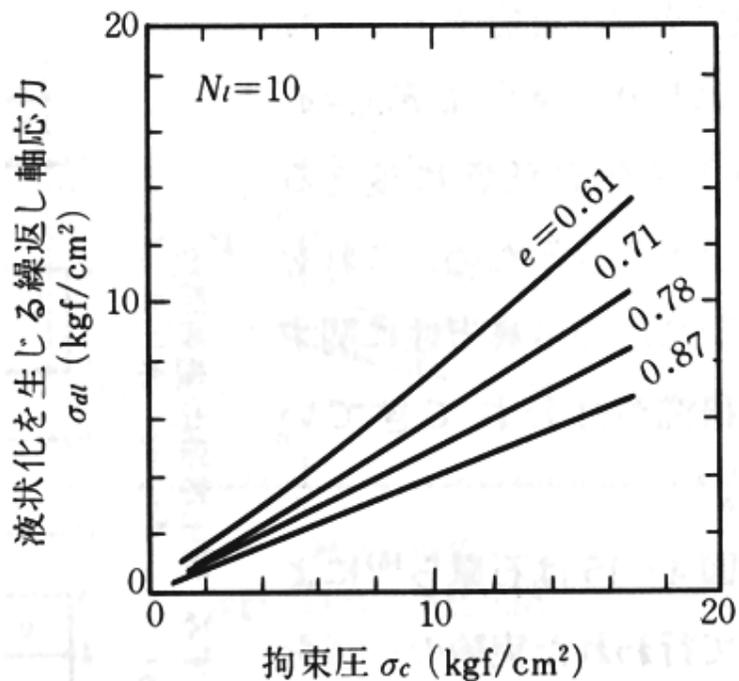
(栗林、龍岡、吉田、1974による)



## 米国では主にSeedらにより研究開始

- ・ 繰返し非排水三軸試験で液状化を再現
- ・ 液状化に影響を及ぼす要因の解明
- ・ 液状化強度と発生せん断力をもとにした予測方法の開発

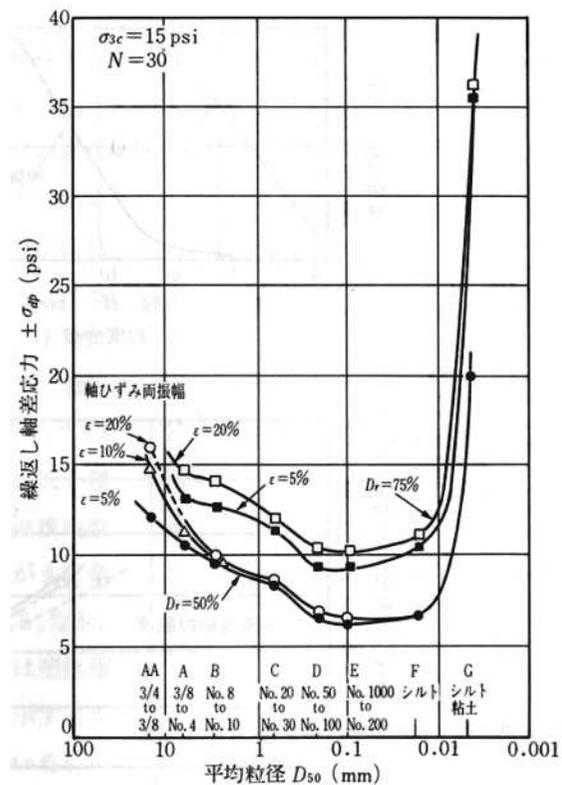
### 拘束圧の影響



(Lee and Seed, 1967)

せん断応力 $\tau$ →せん断応力比 $\tau/\sigma'_c$ で表示

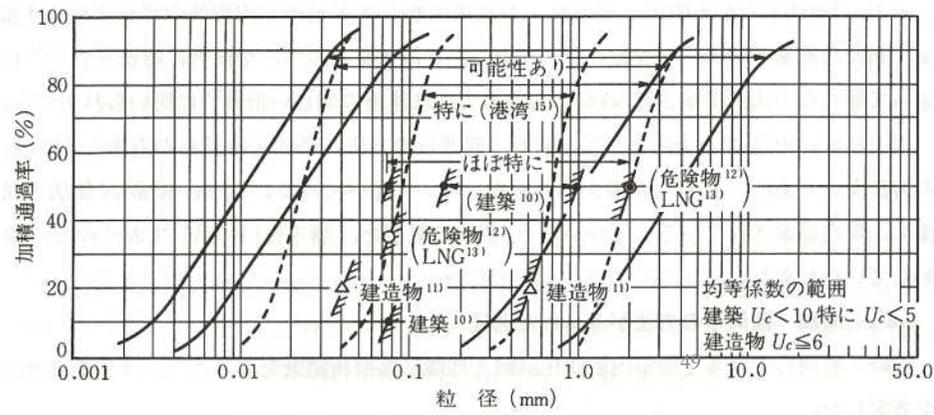
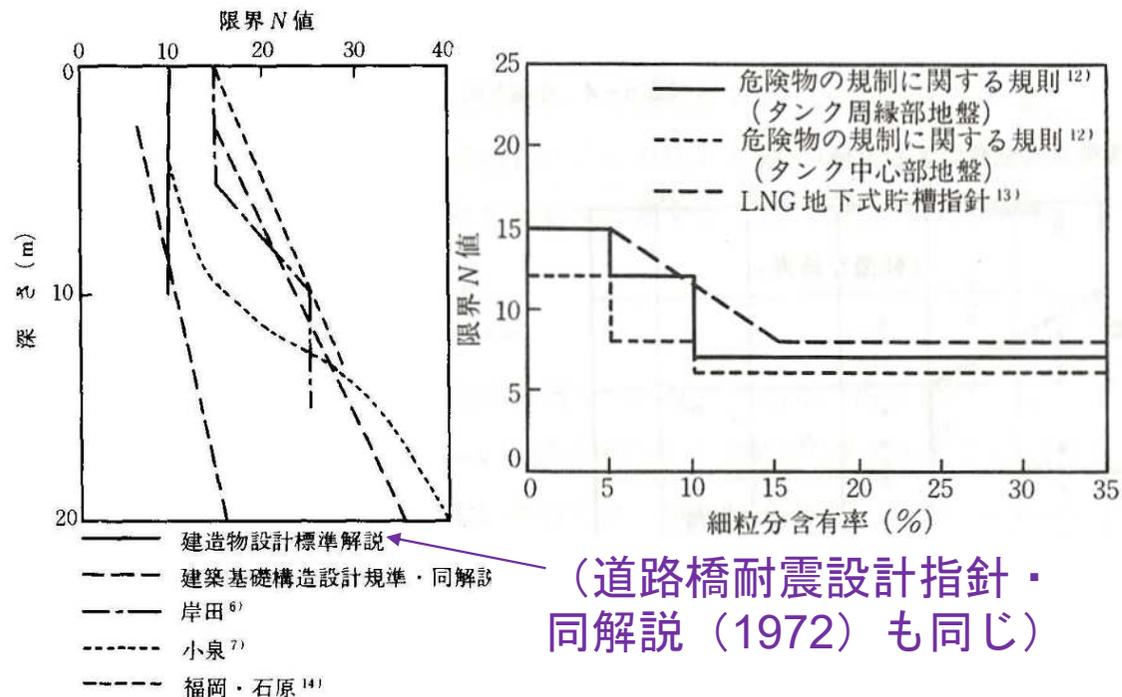
### 粒径の影響



(Lee & Fitton, 1969)

# 日本における限界N値法による液状化発生の判定方法の開発

- ☆新潟地震の経験をもとに日本で開発。
- ☆標準貫入試験によるN値と粒径、（加速度など）をもとに液状化するかしらないか判定。
- ☆1970年から港湾、道路橋、建築、鉄道、タンクで限界N値法による液状化判定方法を導入。



## $F_L$ 値法による液状化判定方法の開発

### 1964年の地震から数年間の米国での技術開発

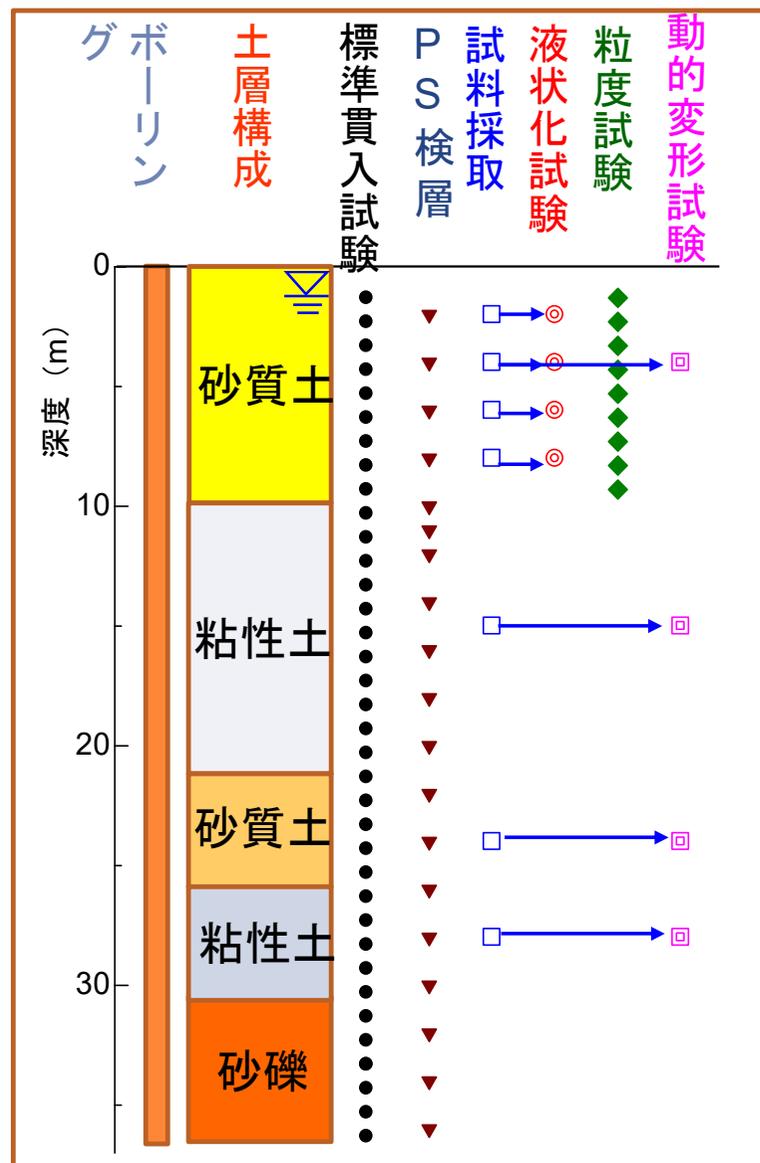
- ☆地震時に地盤内で発生する繰返しせん断力と、液状化強度を比較して液状化の発生を判断する方法が提案された。
- ☆Seed & Idrissにより繰返しせん断力を手計算で推定する簡易方法が1971年に提案された。

### 日本におけるその後の技術開発

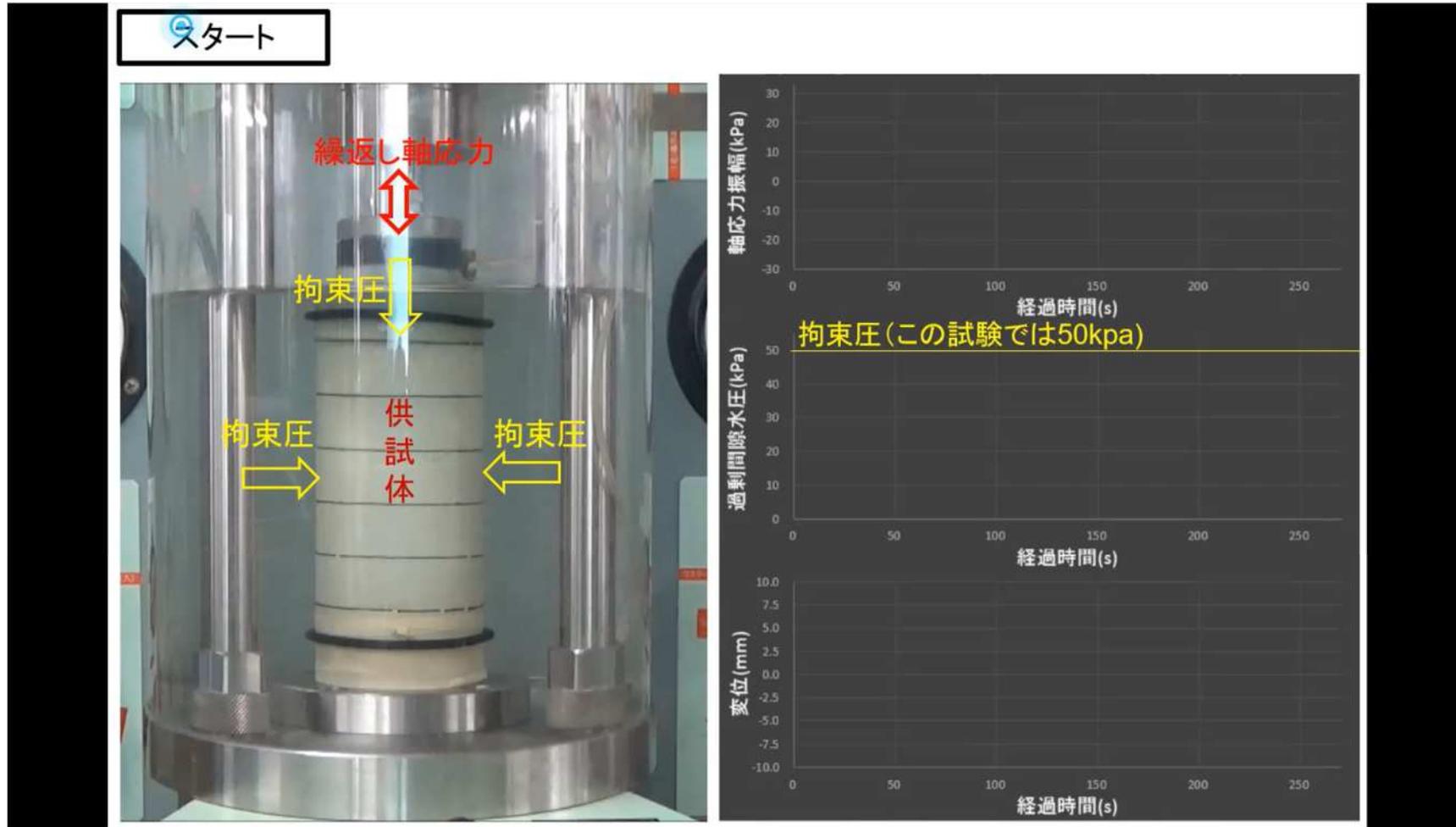
- ☆液状化検討対象地点から不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験で液状化強度比 $R$ を求める技術の開発が進んだ。
- ☆コンピュータの発展によって地震応答解析も行われるようになり、地震応答解析で求めた繰返しせん断力比 $L$ と繰返し三軸試験で求めた液状化強度比 $R$ をもとに、液状化に対する安全率（抵抗比） $F_L=R/L$ で液状化の判定を行う方法が確立された。
- ☆不攪乱試料の液状化試験から得られた $R$ と $N$ 値・粒径を対応させ、 $N$ 値・粒径から $R$ を簡易的に推定する方法が開発された。
- ☆Seed & Idrissの方法を修正した $L$ の簡易判定方法が開発され、 $R$ の簡易推定方法と合わせて設計基準類に導入され始めた。

# 地震応答解析や室内液状化試験に基づく詳細な判定方法

全応力法の場合

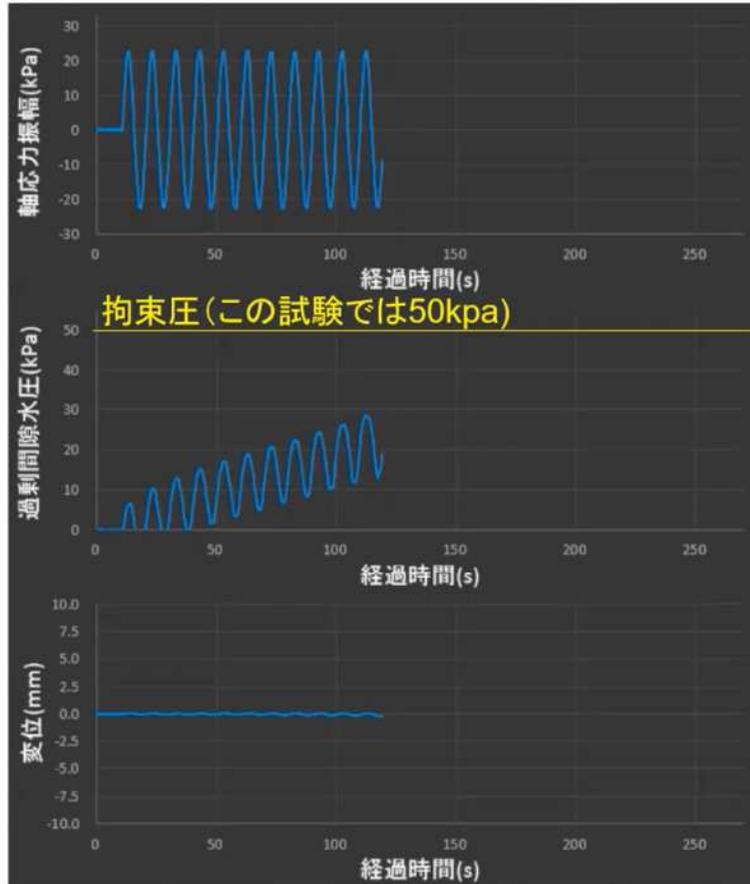
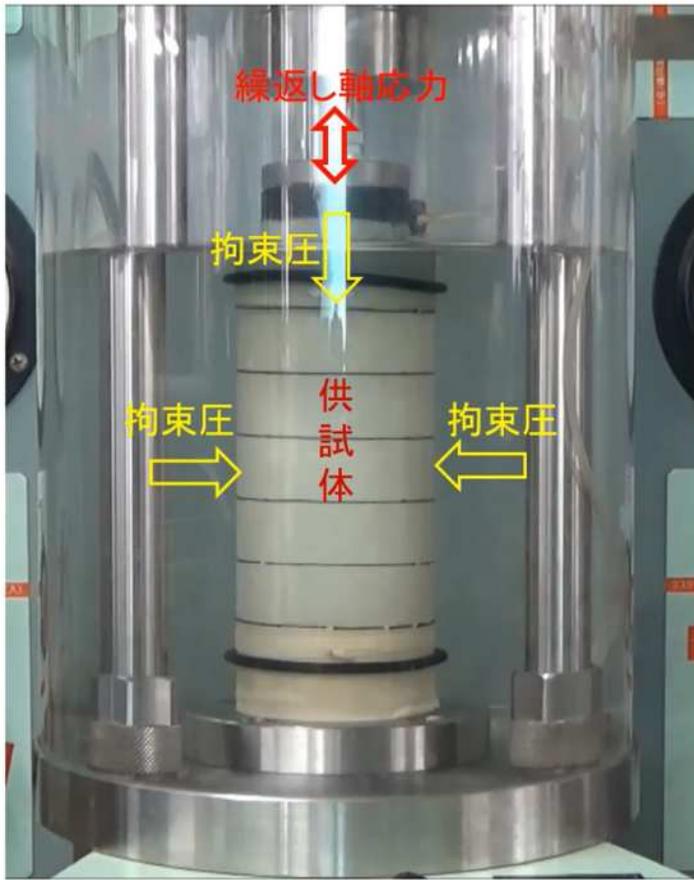


# 繰返し三軸試験装置による液状化試験例（前半）

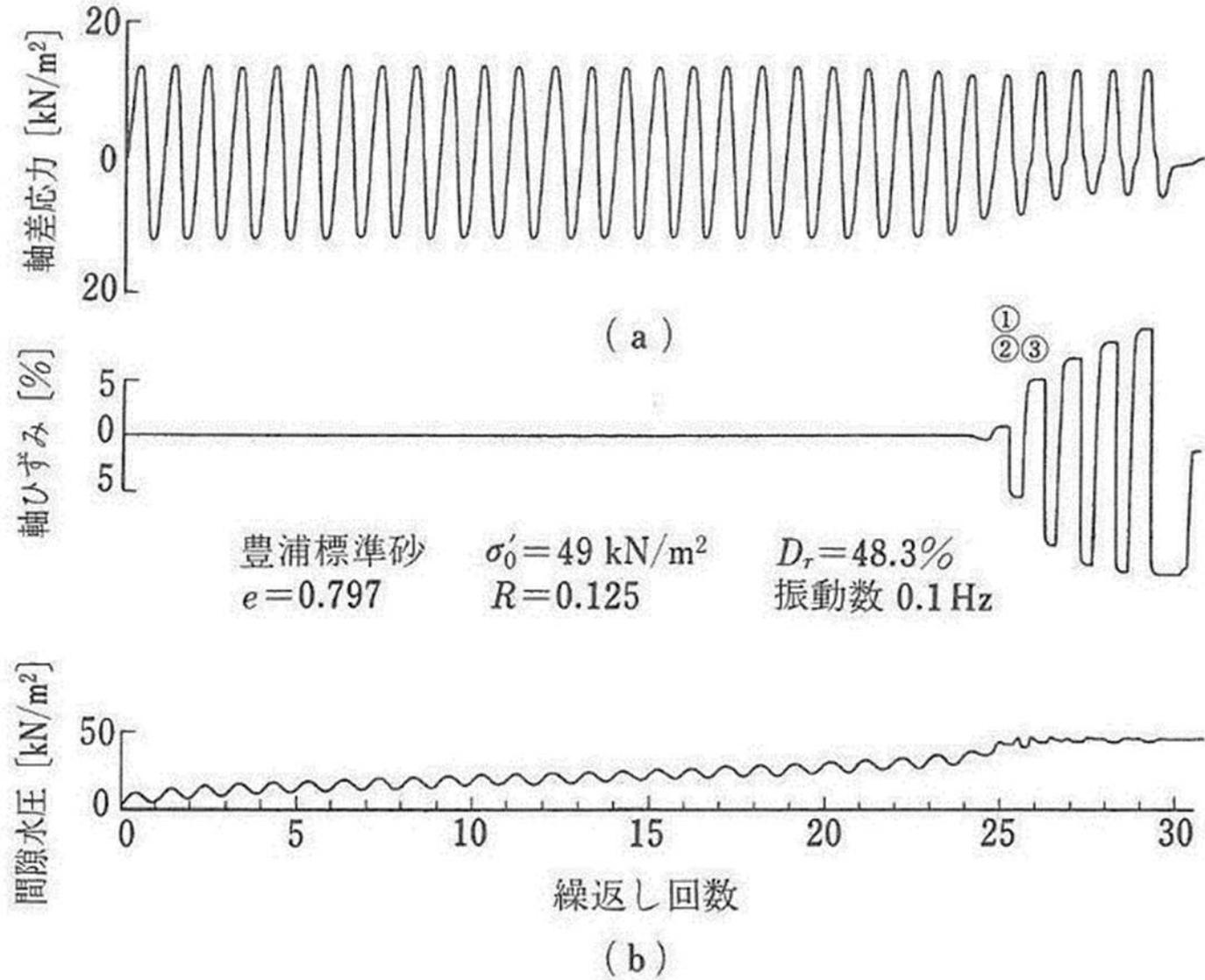


# 繰返し三軸試験装置による液状化試験例（後半）

スタート

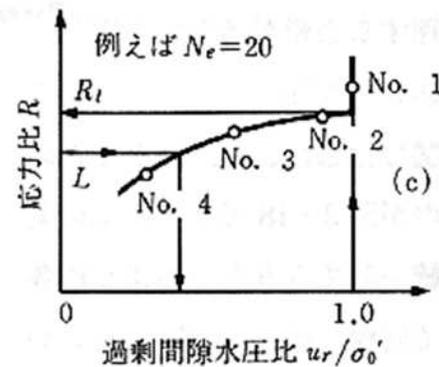
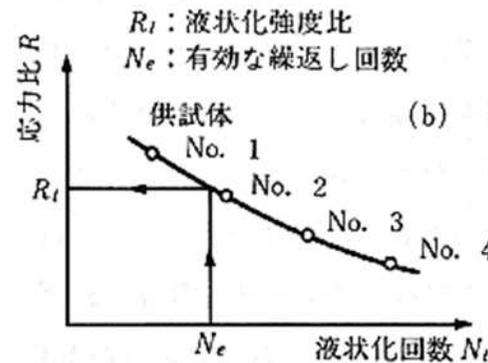
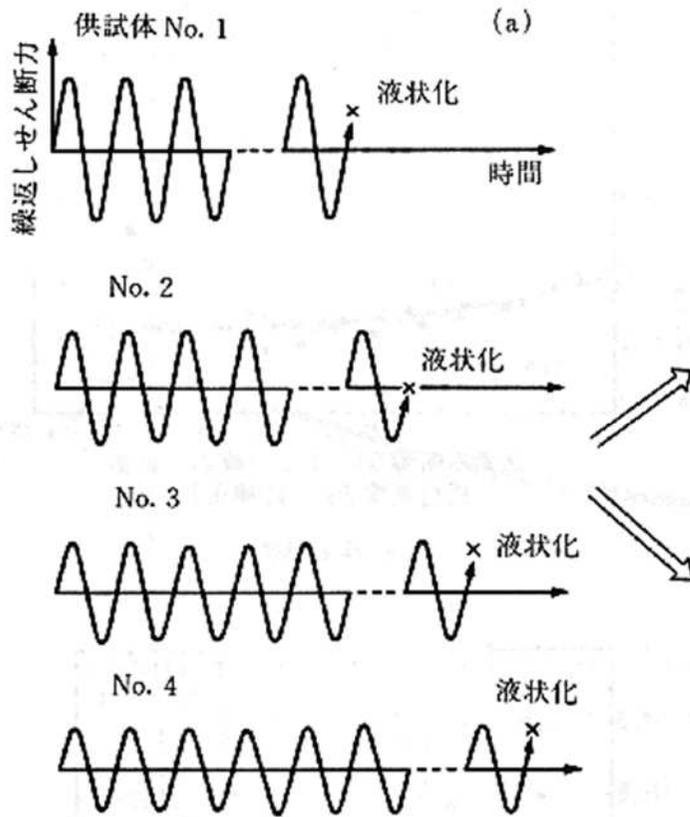


# 液状化試験結果例



## 液状化強度繰返し三軸試験から液状化強度を 求める方法

## ある深さにおける液状化発生の 有無を判定する方法



$R$ : その深さの液状化強度比  
 (乱さない試料を採取し繰返し三軸試験を行って求める)

$L$ : その深さで地震によって生じる繰返しせん断力比  
 (コンピュータで地震応答解析を行って推定)

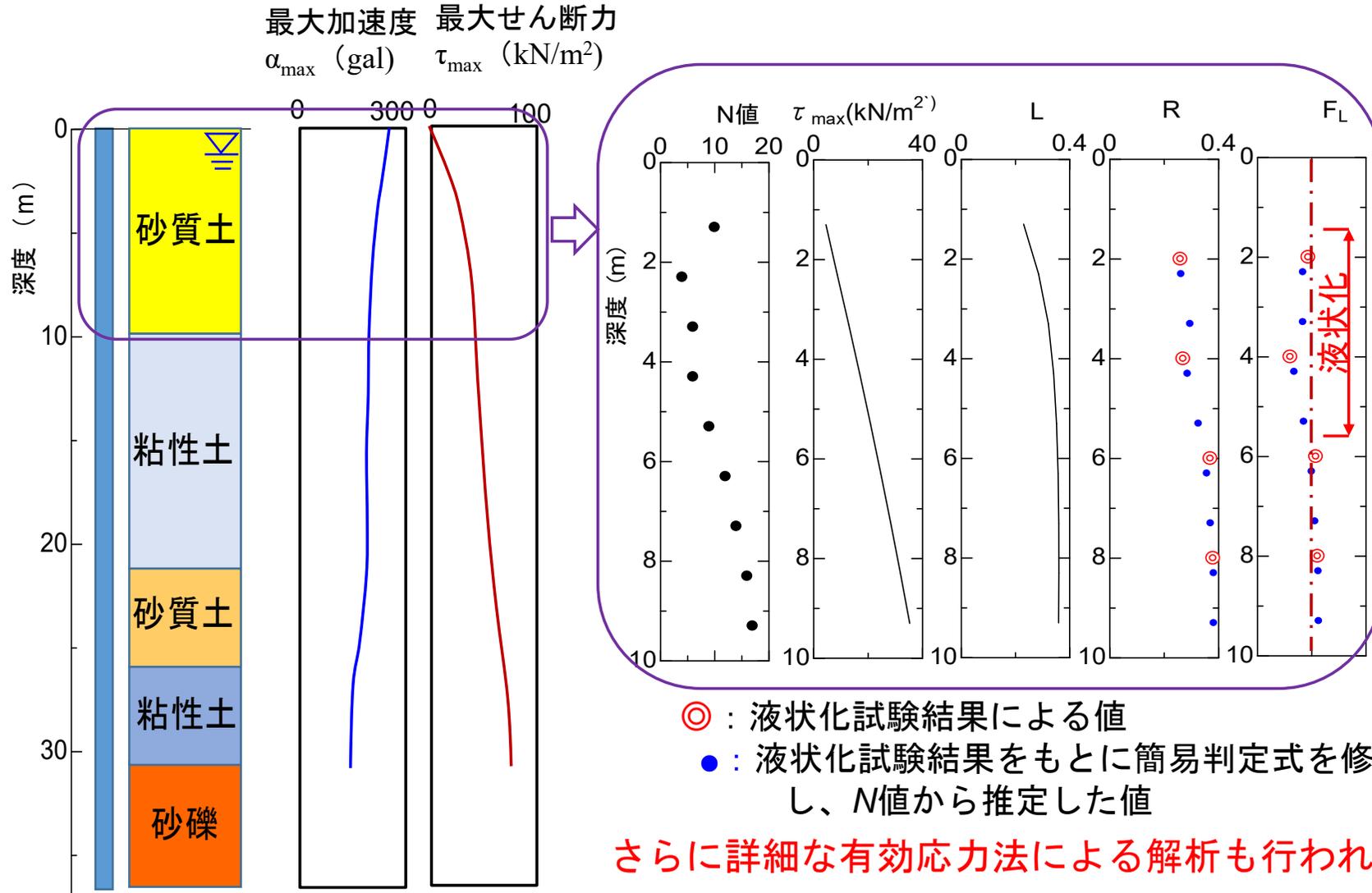
$F_L$ : その深さでの液状化に対する安全率 (抵抗比)

$$F_L = \frac{R}{L}$$

$F_L < 1$ : 液状化する

$F_L \geq 1$ : 液状化しない

# 地震応答解析も行った時の液状化判定結果の説明図（全応力法）



## N値と手計算から $F_L$ 値を推定する簡易液状化判定方法の開発

日本では1978年頃からこの手法が開発され始め、現在はほとんどの構造物の設計基準類に取り入れられている(ただし、それぞれの基準類で手法は異なる)

### N値を用いて液状化強度比 $R$ を推定する理由

- 日本では地盤調査は一般的に標準貫入試験で行うのでN値を用いるのが便利。
- 新潟地震の被災調査でN値と液状化の発生に関係があることが見られた。
- 液状化しやすい土の条件のうち、①緩く堆積しているかどうかはN値より、②砂質土かどうかは標準貫入試験用サンプラーで採取した土の粒度試験より、③地下水位はボーリングから分かる。
- 従って、N値と粒径から $R$ を推定する簡易式が開発できるはずである。

### 手計算で繰返しせん断力比 $L$ を推定する方法が開発された経緯

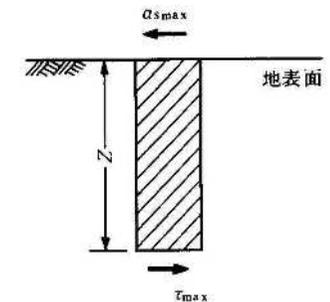
- 1971年に米国でSeed & Idrissが簡易的に $L$ を推定する方法を提案。
- 水平地盤内の土柱を想定し、地表最大加速度と同じ加速度で水平方向に剛体運動をしている場合に土柱の底面に働く最大せん断力 $\tau_{max}$ を次式で表した。

$$\tau_{max} = m \alpha_{s,max} = (\gamma Z/g) \alpha_{s,max}$$

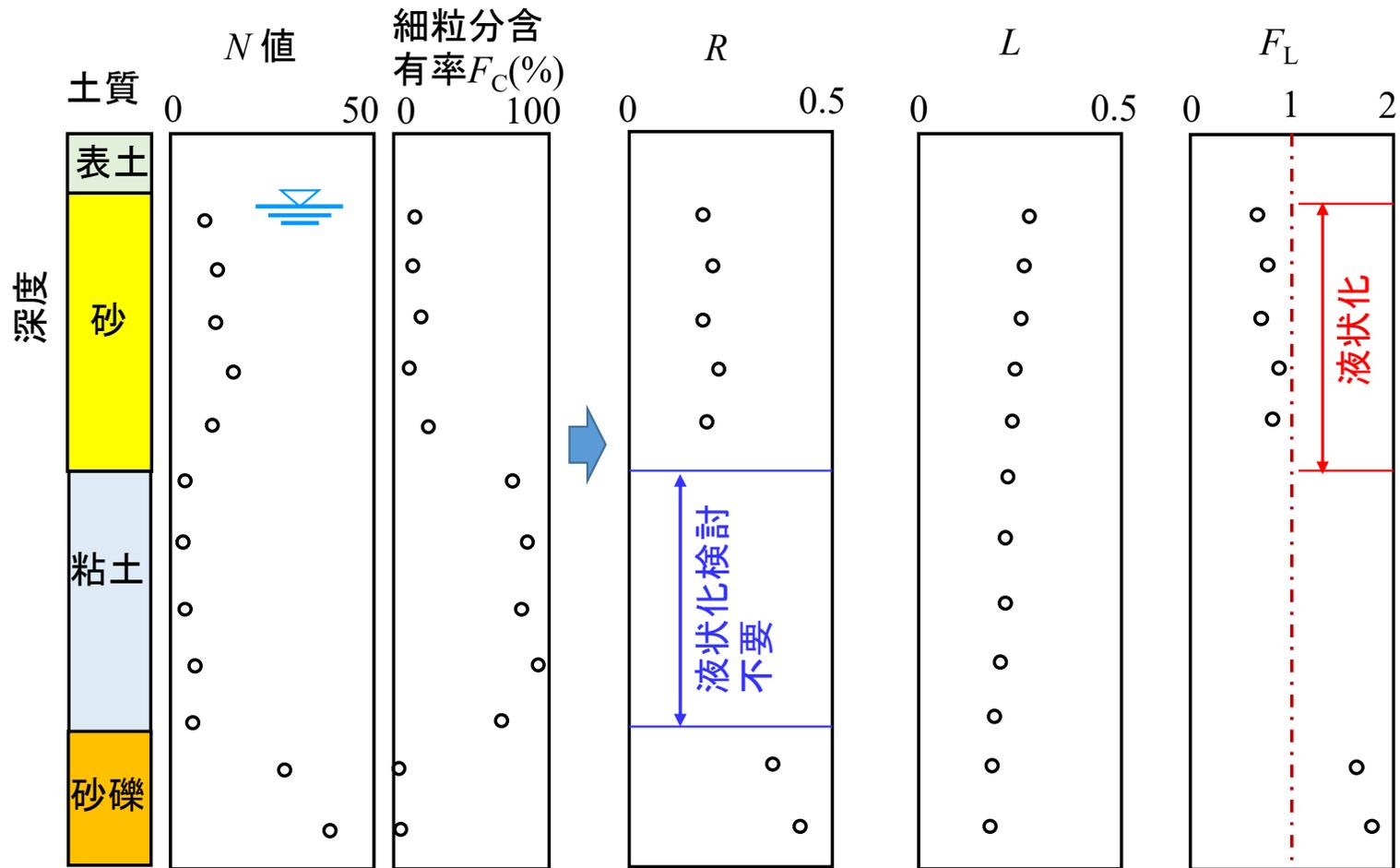
- 深さ方向の補正係数 $r_d$ を導入し、有効上載圧 $\sigma_v'$ で除して次式のように表した。

$$L_{max} = r_d (\alpha_{s,max} / g) (\sigma_v' / \sigma_v')$$

- 日本で地震応答解析が行われ $r_d$ の深度分布が求められて、それを用いて $L$ を推定する方法が定着。



# N値と手計算から $F_L$ 値を推定する簡易液状化判定方法の結果の説明図



## 検討対象地点で液状化が構造物に与える影響を評価する指標の液状化指数 $P_L$ の求め方

一般の液状化ハザードマップの指標に多く用いられてきた。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5z) dz$$

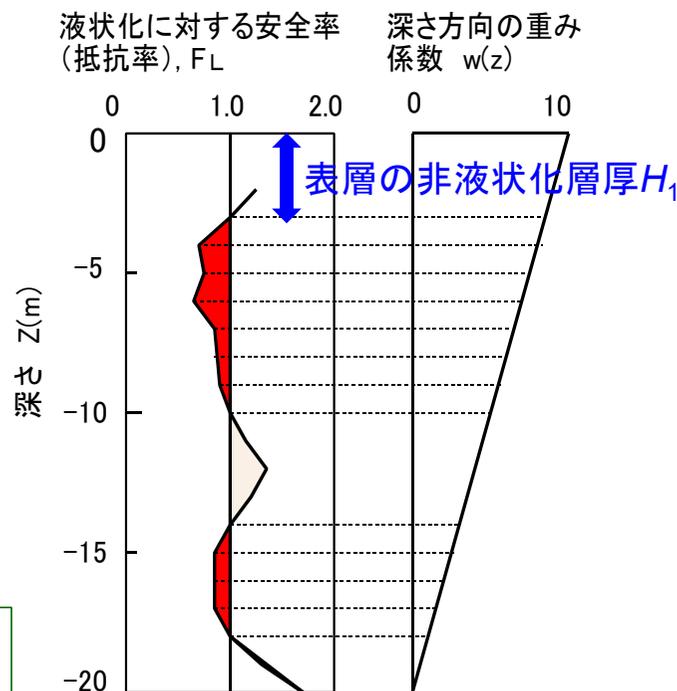
ただし $F_L > 1$ の場合は $(1 - F_L)$ は0

$P_L$ 値を用いた構造物の被害の判断：

$P_L < 5$ ：液状化による被害は受けないと判断

$P_L > 15$ ：液状化による甚大な被害を受けると判断

岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例、第5回日本地震工学シンポジウム、pp. 120-126、1978.

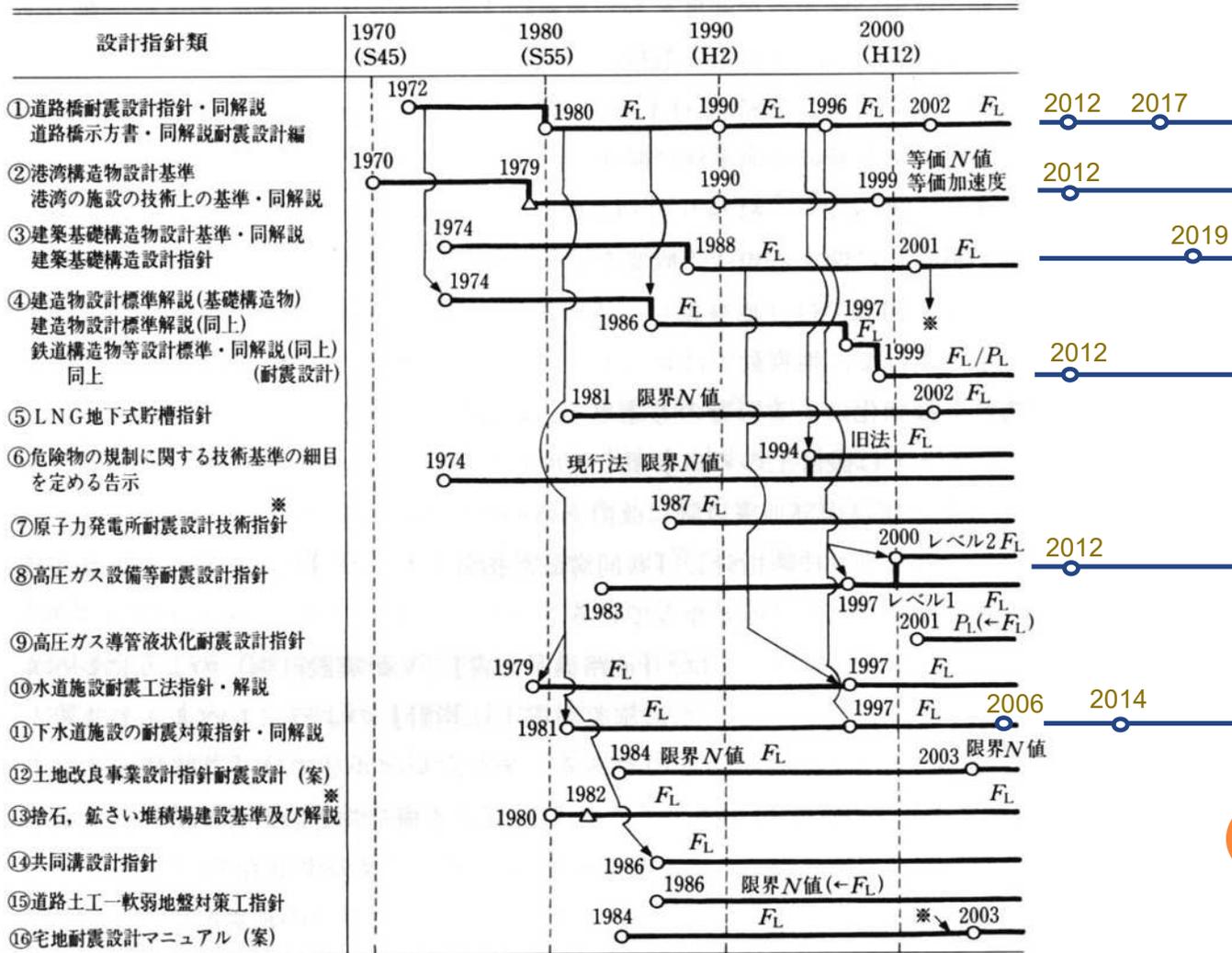


- 液状化が発生するかどうかの判定ではなく、液状化により構造物が被害を受けるか否かの評価手法。
- $P_L = 5$ や $15$ の閾値は構造物の種類によって異なるはずである。

# 日本の設計基準類においてN値を用いて液状化簡易判定を行う式の開発・改正の経緯

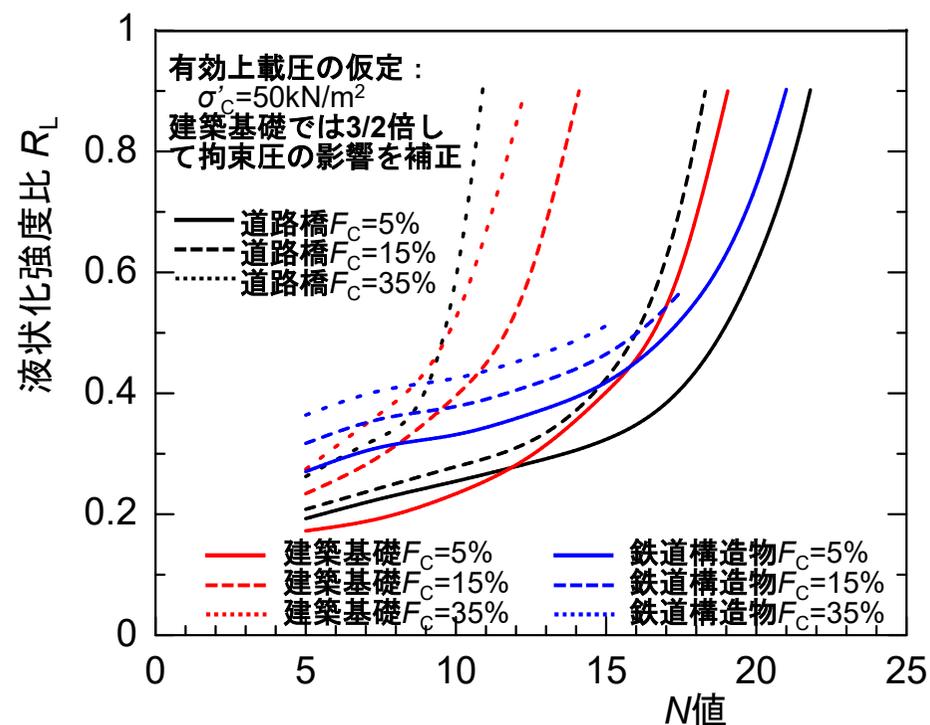
(地盤工学会：液状化対策工法、2004で整理した表に追記)

- 国内だけで約10種類も異なった液状化簡易判定方法が用いられている。
- 導入当初から改正が重ねられているものもある一方、見直しはされていない方法もある。
- 海外では別の方法が用いられている。



## 道路橋、建築、鉄道の代表的な設計基準類で推定される液状化強度比の試算例

- ☆ある地盤の液状化判定を複数の基準類の方法で行った場合、判定結果は同じになるとは限らない。特に細粒分を多く含む砂では液状化強度比 $R_L$ がかなり異なる場合がある。
- ☆3つの設計基準類で $N$ 値が5~20、細粒分含有率 $F_C$ が5~35%における液状化強度比 $R_L$ を試算してみた例を以下に示す。 $N$ 値が小さく $F_C$ も少ない場合は3つの設計基準類で推定される $R_L$ は比較的合っているが、その他は推定結果がかなり異なる。
- ☆簡易判定方法はあくまで簡易法であって、推定誤差はかなりあることに留意が必要である。液状化のメカニズムに従うと、繰返し三軸試験などで液状化特性を求めて地震応答解析と組み合わせて判定を行う“詳細法”が本来の液状化判定方法であることを念頭に置いておく必要がある。



安田進：設計基準類における液状化判定方法の導入・改定の経緯と留意事項、基礎工、Vol.50、No.7、pp.63-66、2022。

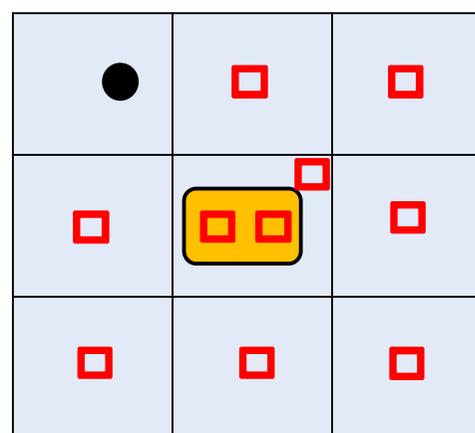
## 標準貫入試験より簡易なスクリーウエイト貫入試験（SWS試験、旧名称はスウェーデン式貫入試験）により液状化判定を行う方法の開発

本年、地盤工学会関東支部の研究委員会によって開発し、その手法をWebで公開

[https://jibankantou.jp/group/jibandb3\\_sws.html](https://jibankantou.jp/group/jibandb3_sws.html)

### 開発の目的

- 【ボーリング+標準貫入試験】で液状化判定を行うと100万円程度かかるため、液状化が考慮されずにいる。一方、SWSだと10万円程度で判定ができるため液状化対策が進むと考えられる。
- SWSだと狭いスペースで調査できるので、新設はもとより既設の住宅の庭でも調査可能。
- SWSは戸建て住宅の支持力の判定のために用いられているが、液状化判定用には用いられていない。土質（粒径）と地下水位が試験・測定できれば液状化の簡易判定が行える。
- 液状化のハザードマップを作成する際に、既往のボーリングがないメッシュをSWSで調査すると安価に液状化判定が行える。特に、人工改変で造られた住宅地では一般にボーリングが行われていないので、有効である。また、調査用のスペースが狭くて良いので、住宅の庭などジャストポイントで調査し易い。



- : 粘性土からなる  
後背湿地
- : 砂質土による盛  
土造成宅地
- : 既往ボーリング
- : 新規SWSによる地  
盤調査と液状化  
判定

## SWSによる調査、液状化簡易判定の手順例

- (1)地質図や周囲の既往の地盤調査結果などを収集して、調査深度を決定
- (2)SWS試験実施
- (3) $W_{SW}$ と $N_{SW}$ からN値へ換算（例：稲田の式を利用）
- (4)SWS試験孔(調査した孔か別孔)で地下水位測定
- (5)液状化検討対象層の判断



(6)SWS試験孔(調査した孔か別孔)の所定の深度(液状化検討対象深度)で土の試料採取

(7)採取した土の粒度試験

(8)換算 $N$ 値と $F_C$ 、地下水位をもとに $F_L$ の深度分布を推定

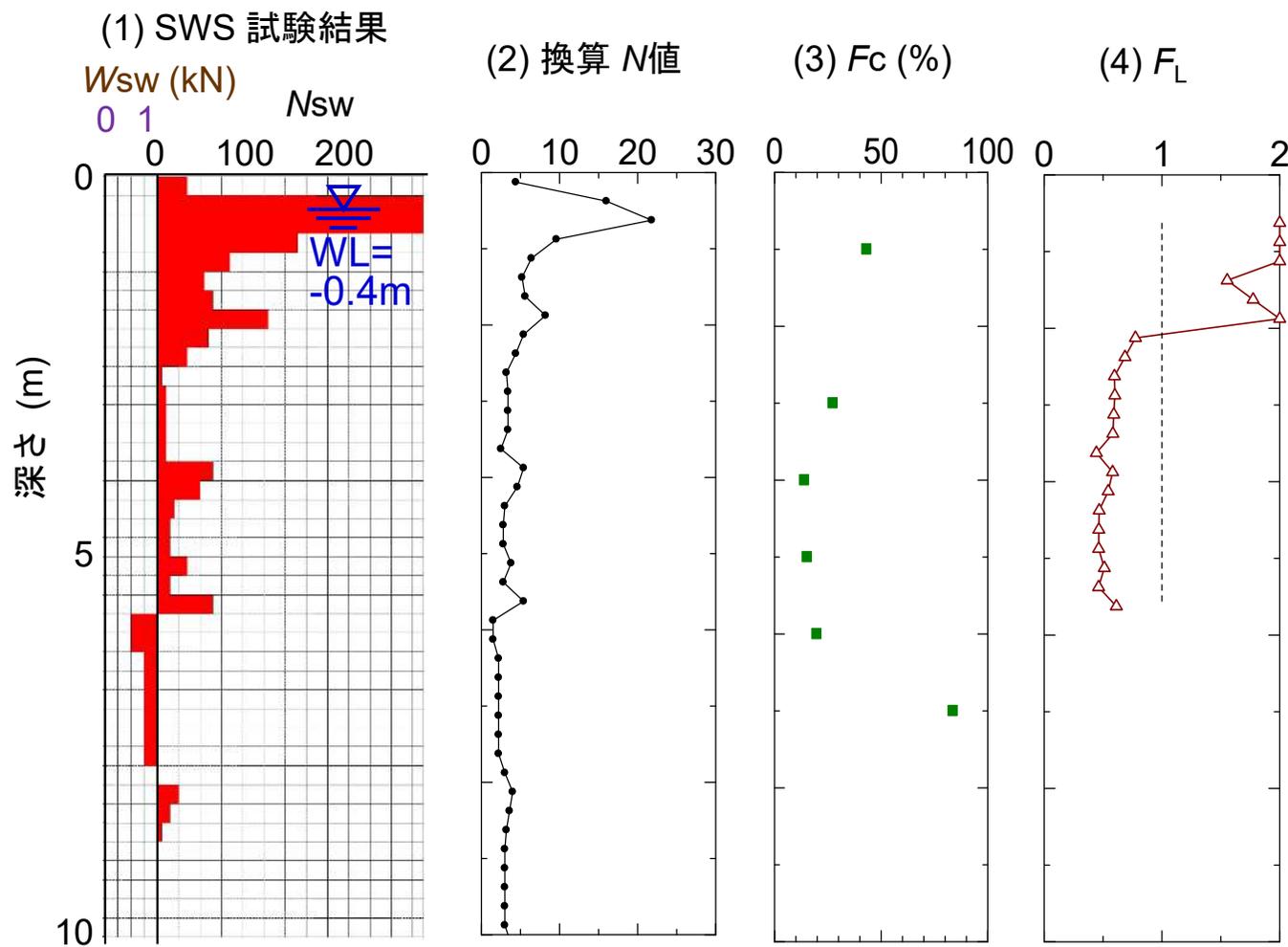


採取できる土の試料が少量なので、最近開発されたスマホで撮影すだけで粒径加積曲線が得られる「AIによる電腦粒度」も有効。

<https://www.kiso.co.jp/>



## 東日本大震災で液状化が発生した箇所での調査結果例



王寺秀介・安田進・佐々木修平・末政直晃・辻浩平・清木隆文：簡易地盤調査による宅地の液状化に対する安全性検討，第16回日本地震工学シンポジウム、2023年11月（発表予定）

## 6. 国土交通省で出された住宅地向けの液状化ハザードマップの作成方法

国土交通省で2021年2月に「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」を公表

[https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_tobou\\_tk\\_000044.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000044.html)

### 手引きが作成された背景

#### 戸建て住宅の液状化対策の現状

- 東日本大震災で約27000棟の被害が生じたのにもかかわらず、その後に建てられている戸建て住宅でもほとんど液状化を考慮した対策が施されていない。
- 既設はもとより新築の戸建て住宅に対する安価で有効な液状化対策工法の開発が遅れている。

#### 戸建て住宅の液状化対策が進まない理由

- 液状化による被害（少しでも傾斜するとめまいや吐き気がして生活できないや、避難路が通れないなど）が認識されていない。
- 現行の液状化ハザードマップではどんな被害が発生するか実感がわからない。戸建て住宅に特化した液状化ハザードマップが必要である。
- 液状化に対する行政、住宅メーカー、住民間のリスクコミュニケーションがとれていない。66

# 液状化ハザードマップの作成手順

ボーリング等の地盤情報を用いた危険度マップだけでは、既往ボーリングがないメッシュの評価ができない。

→微地形分類図を基に作成する液状化発生傾向図も必要のため、平行して両ハザードを作成するようになっている。

(国土交通省による)

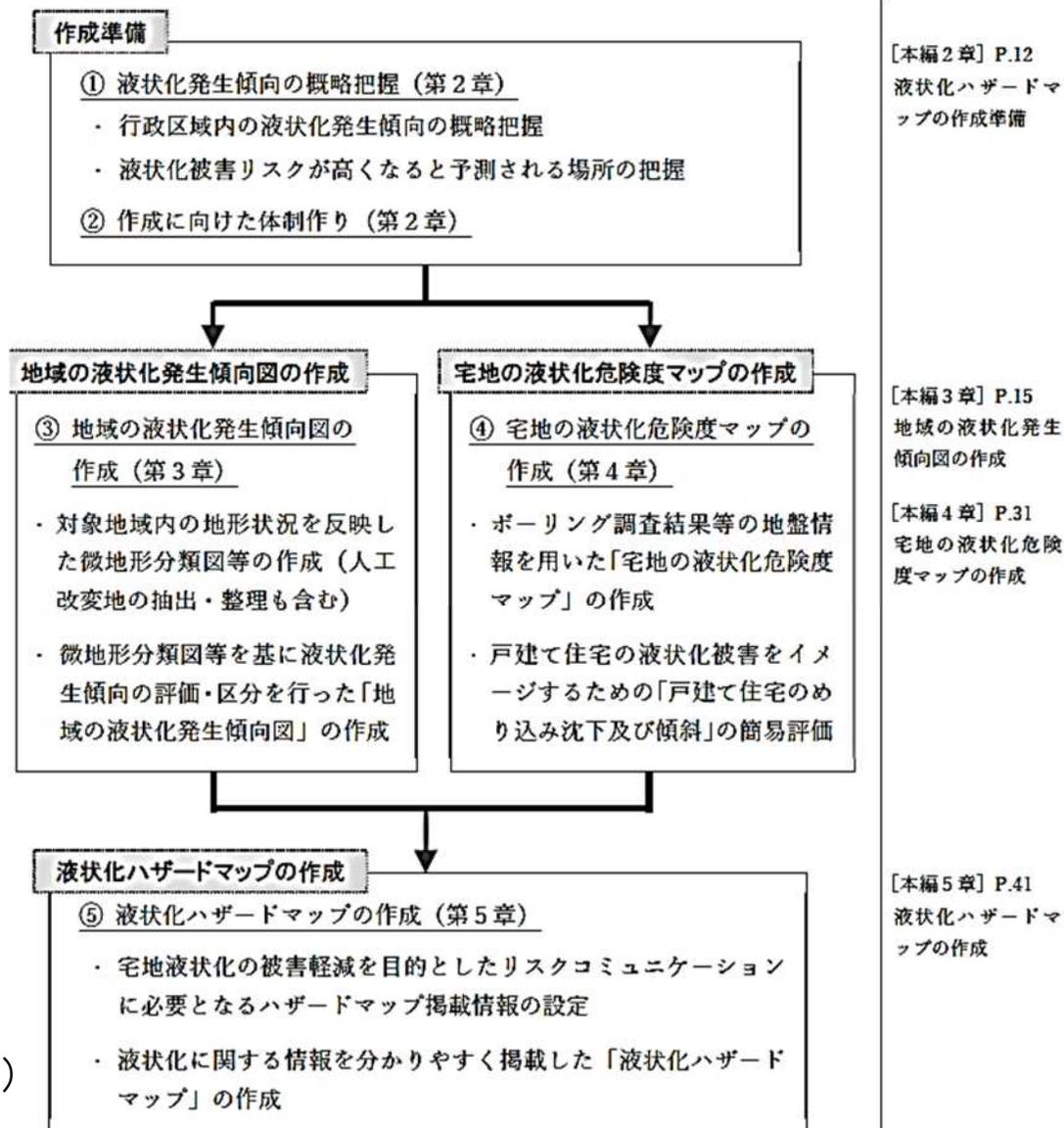
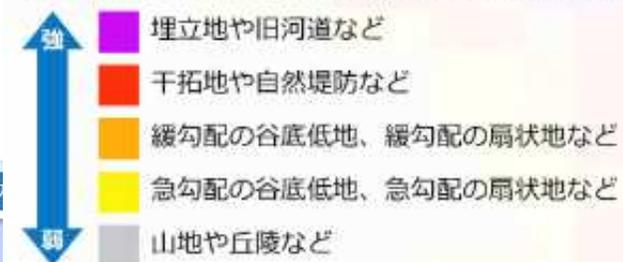


図-2.1 液状化ハザードマップの作成手順

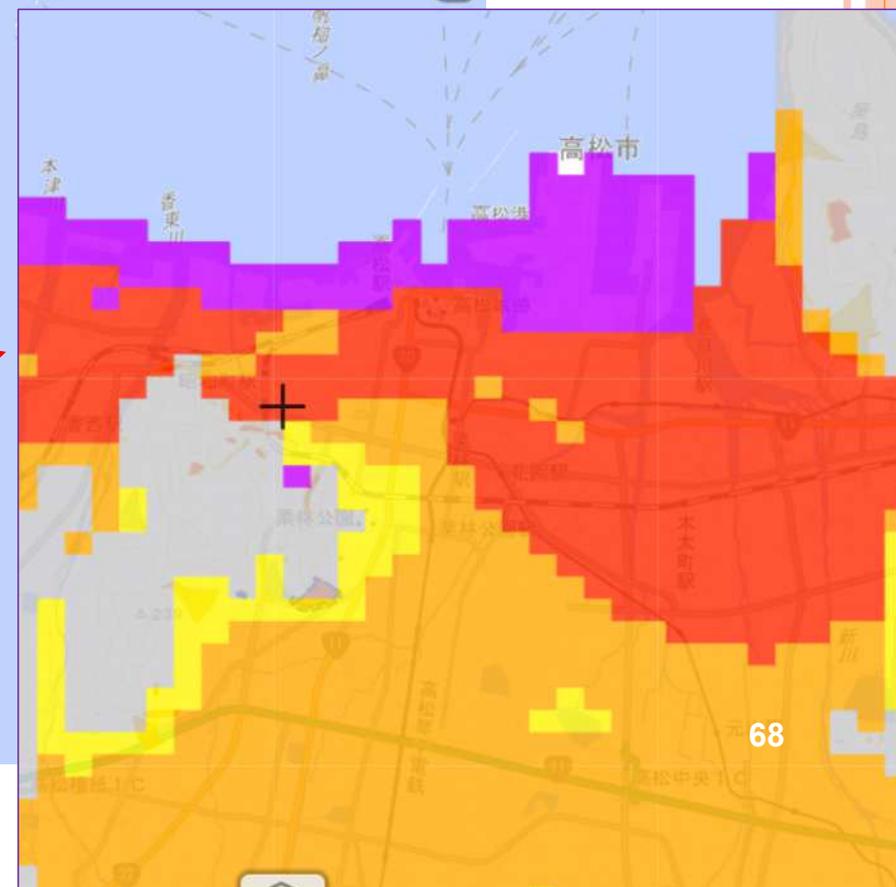
## 2-2. 液状化発生傾向の概略把握

液状化ハザードマップの作成準備として、国土交通省による「地形区分に基づく液状化の発生傾向図」等の資料を収集・確認し、行政区域内の液状化発生傾向を概略的に把握し、液状化ハザードマップを作成するための計画を立案する。

### 凡例<詳しい解説>

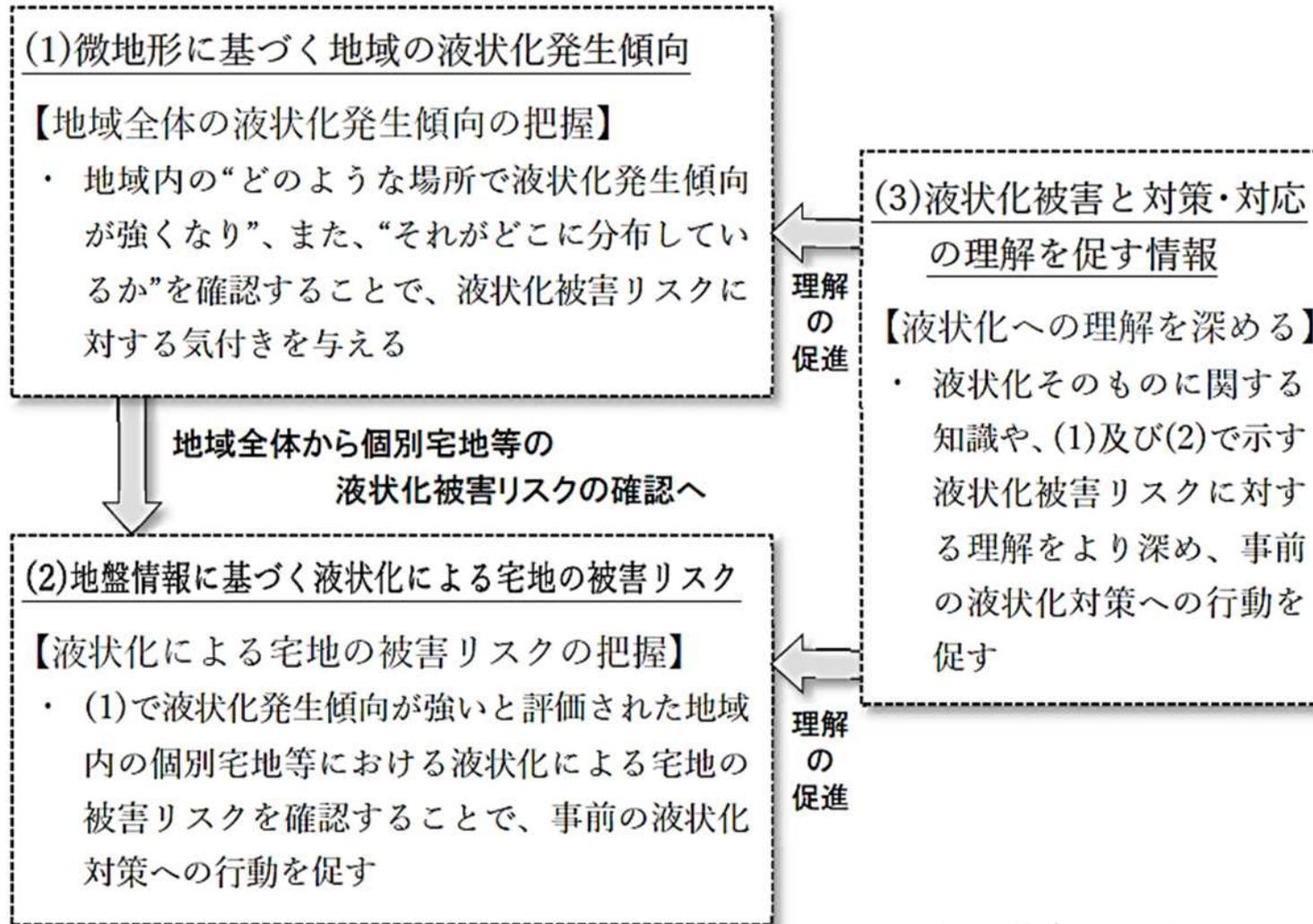


全国の液状化発生傾向図は大まかな微地形分類をもとに作成して国交省で公表された。



(国土交通省による)

## 手引きで重視する情報



(国土交通省による)

## 微地形に基づく地域の液状化発生傾向図の作成方法

表-3.4 手引きで標準とする微地形の「液状化発生傾向の評価区分」

液状化発生傾向の評価区分		微地形（自然地形）及び人工改変地	
		微地形(自然地形)	旧河道、砂丘縁辺部、砂丘間低地・砂州間低地
		人工改変地	埋立地 <sup>※1</sup> 、砂利(砂鉄)採取後の埋戻し地、低地(湿地)上の盛土造成地 <sup>※2</sup>
		微地形(自然地形)	三角州・海岸低地、自然堤防、砂州上・砂丘上の凹地
		人工改変地	干拓地 <sup>※3</sup> 、浅い谷や凹地の盛土地、谷埋め盛土造成地
		微地形(自然地形)	砂州・砂礫洲、氾濫低地、後背低地
		微地形(自然地形)	砂丘(砂丘縁辺部、砂丘間低地を除く)、扇状地 <sup>※4</sup> 、谷底低地
	微地形(自然地形)	山地・丘陵、山麓堆積地形、台地 <sup>※5</sup>	

※1 微地形分類（自然地形）における「旧水部（埋立地）」を含む。

※2 谷底低地を除く、後背低地や氾濫低地、三角州・海岸低地、砂丘間低地・砂州間低地の低地面や干拓地上に盛土した造成地。

※3 微地形分類（自然地形）における「旧水部（干拓地）」を含む。

※4 盛土造成されていない「扇状地上の旧河道」を含む。

※5 盛土造成されていない「台地上の浅い谷・凹地」を含む。

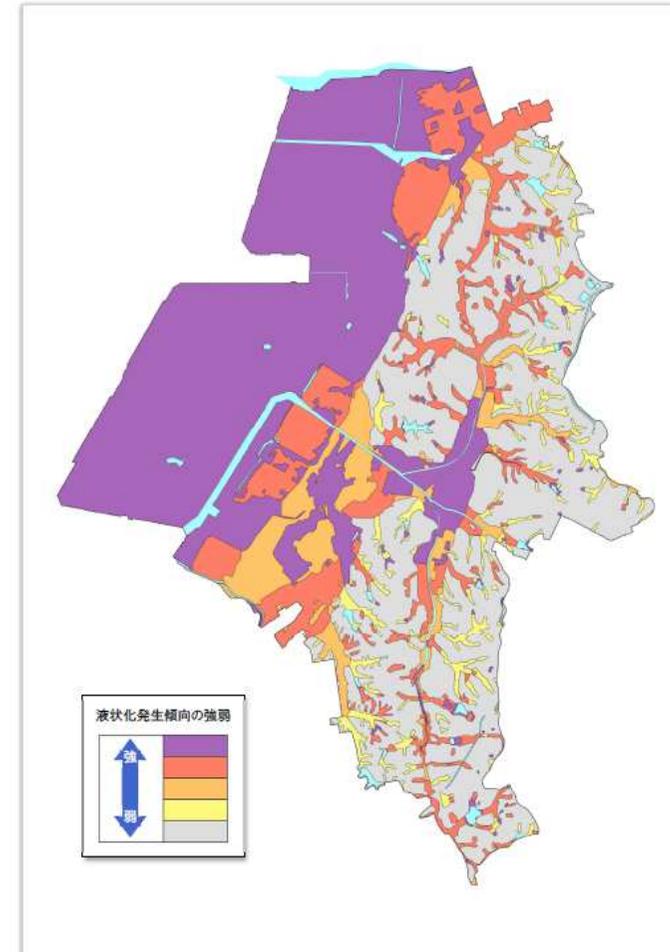
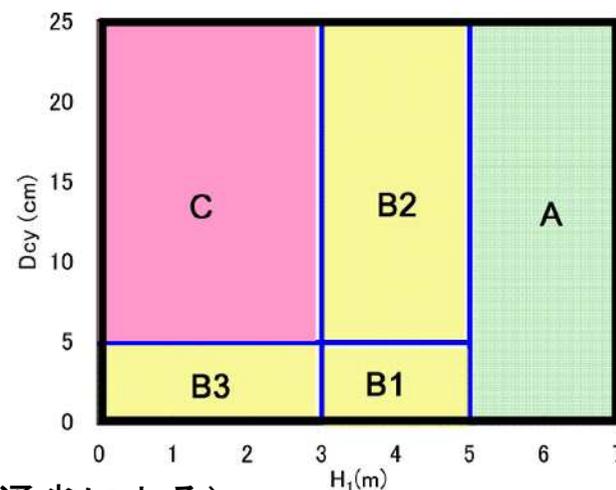
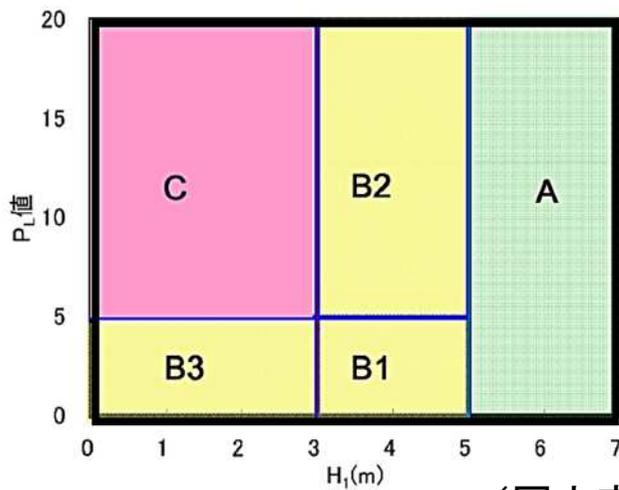


図-4.3.26 液状化発生傾向図（B市）

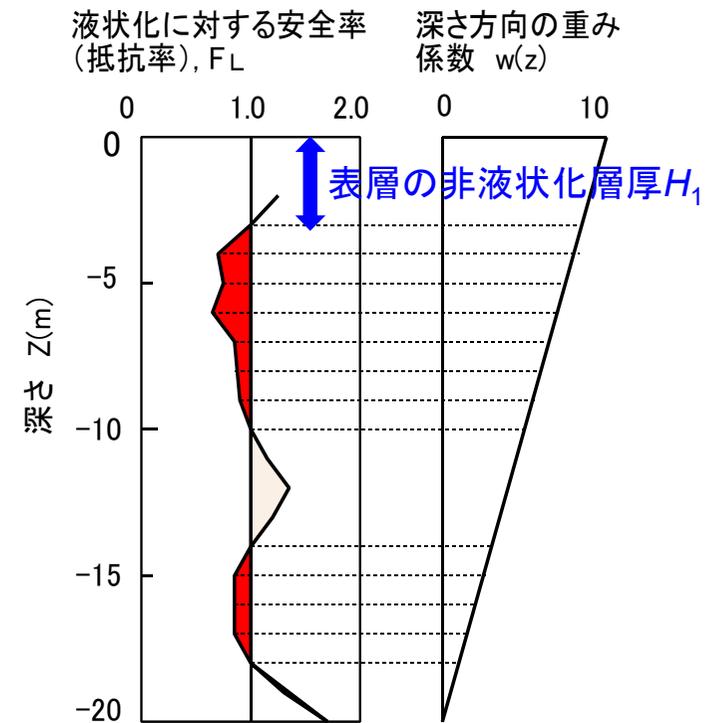
（国土交通省による）

## 地盤情報に基づく液状化による宅地の被害リスクの検討方法

判定結果	液状化被害の可能性
C	顕著な被害の可能性が高い
B3	顕著な被害の可能性が比較的低い
B2	
B1	
A	顕著な被害の可能性が低い



(国土交通省による)



## 手引きに載せてある2種類のマップの比較例

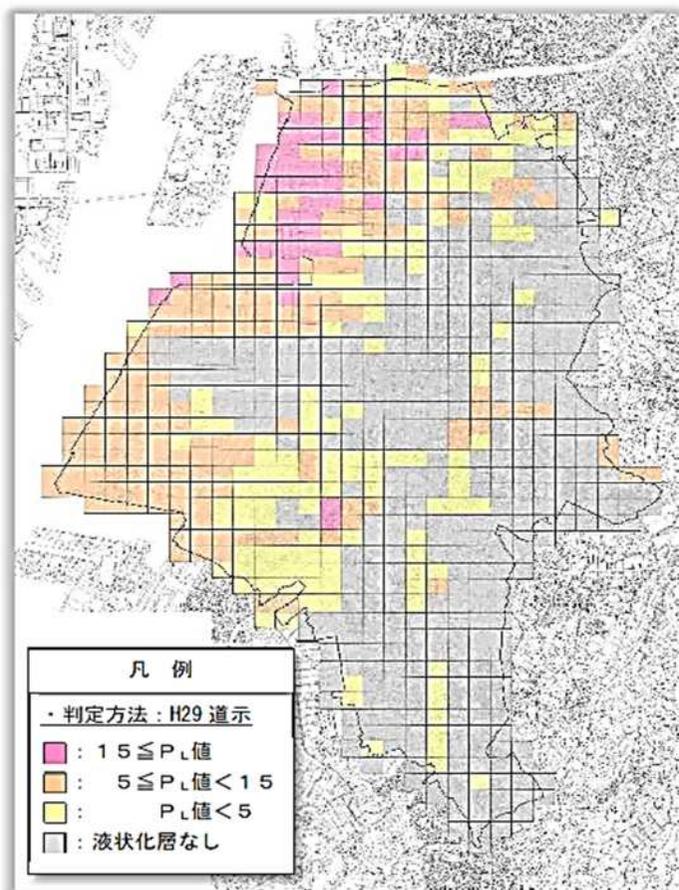


図-4.4.6  $P_L$  分布図 (B 市)

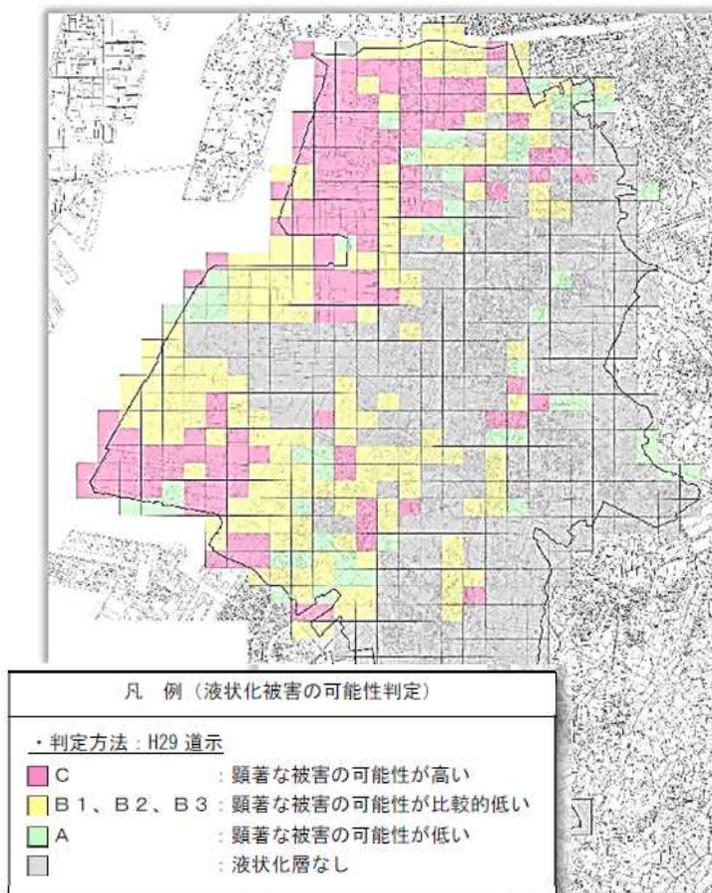


図-4.4.10  $H_1$ - $P_L$  分布図 (B 市)

手引きが公表された後に  
手引きに従って2023年に  
宅地の液状化ハザード  
マップが作成された例

### 鹿嶋市

<https://city.kashima.ibaraki.jp/soshiki/52/71193.html>

### 大洗町

<https://www.town.oarai.lg.jp/cat1/sumai/takuchitochi/8837/>

(国土交通省による)

## 市街地の液状化は火災や津波からの避難行動に障害を与えることなど、 実際に生じる種々被害のリスクも明記

2011年東日本大震災の際に液状化が自動車の走行に影響を与えた例

- ①東京湾岸埋立地で多くの自動車が動けなくなった。



- ②太平洋岸の埋立地で、構内道路が液状化で突上げて車両通行困難になった火力発電所もあった。

- ③宮城県の大川町で津波からの避難に影響を与えた。



<http://www.youtube.com/watch?v=Baw7Pe6uEdg>



動画を撮られた人の証言  
避難場所まで  
通常:10分  
液状化のため:45分  
直後に津波来襲

# 東日本大震災時に浦安で地震直後から連続撮影された写真における地震直後の液状化による道路の状況

ここを本震が襲ったのは14:47  
大きな余震が襲ったのは15:16

(写真撮影：小川氏)

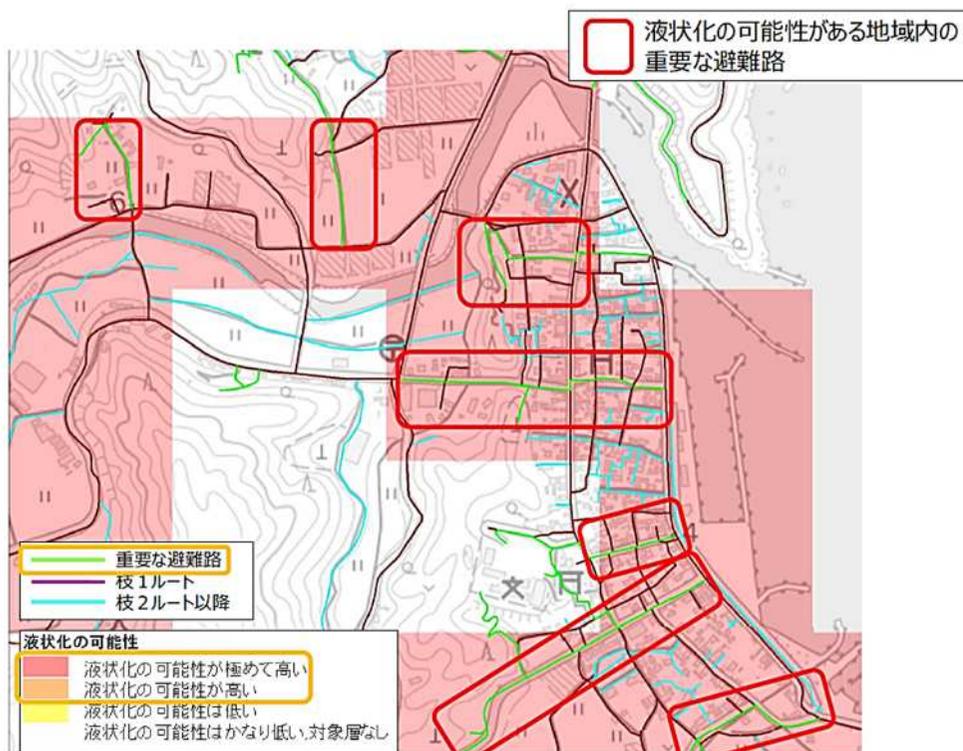


Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. and Kanemaru, Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, Issue 5, pp.793-810, 2012.

一般の自治体では、液状化ハザードマップに関係なく、避難路・避難場所の設定が別個に行われている。

→自治体で定める避難計画に液状化による通行障害を考慮する必要あり

高知県では、令和3年3月に「避難路の液状化対策検討のための手引き」が出された。

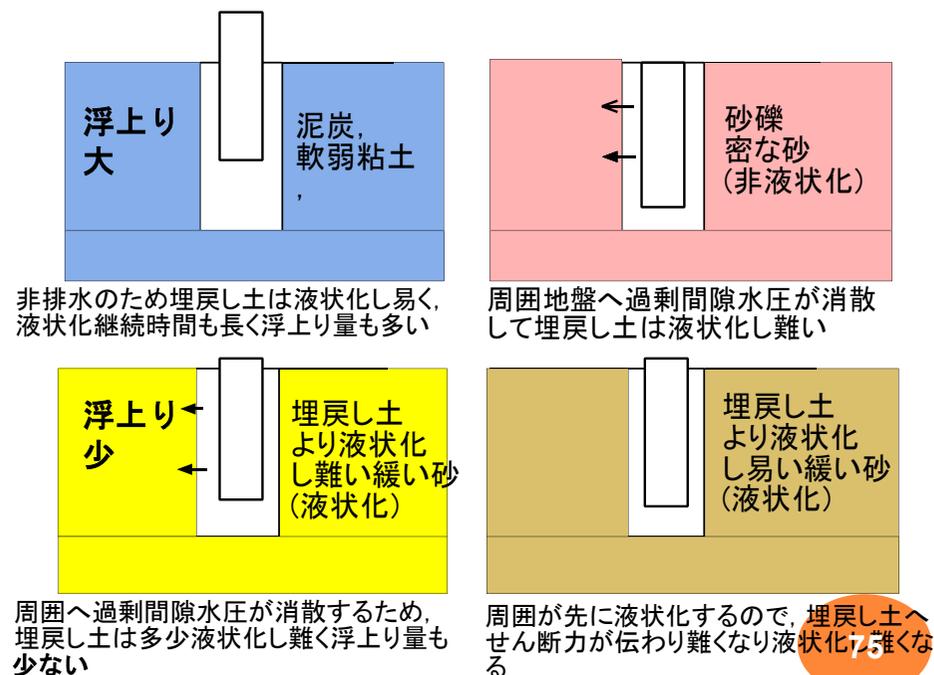


(高知県による)

図 2-5 対策を実施すべき避難路の抽出例

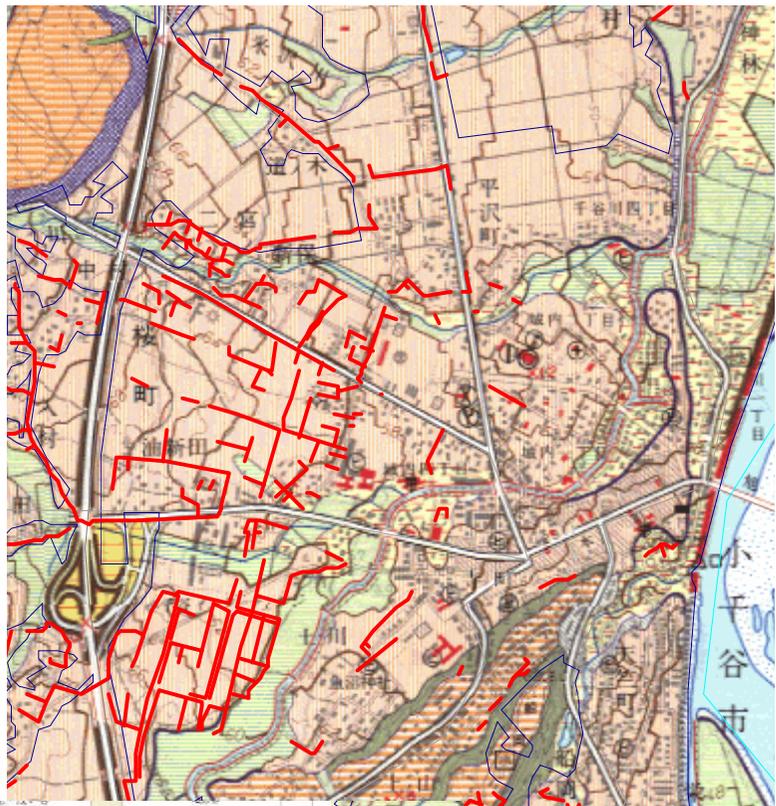
さらに、マンホールの浮上り対策箇所の選定が間違っている。。。

→液状化しない軟弱粘土地盤で大きく浮き上がり、液状化し易い砂地盤ではは少ないので、液状化ハザードマップで液状化し易い箇所を選定するのは間違い。



# 2004年新潟県中越地震時の下水マンホール・管渠の被害箇所と液状化ハザードマップの比較

## 新潟県中越地震での被災管路箇所 現在の新潟県内の液状化しやすさマップ



— 被災害査定管路  
— 処理区域

(下水道地震対策技術検討委員会による)



(国土交通省北陸地方整備局による)

液状化履歴		液状化危険度	
■	液状化履歴	■	危険度 4
○	液状化履歴(点)	■	危険度 3
		■	危険度 3(盛土造成地)
		■	危険度 2
		■	危険度 1
		■	危険度 0



突出した下水道マンホールに衝突した車

(下水道地震対策技術検討委員会による)





手順1：スクリーウエイト貫入試験（SWS試験、旧名称はスウェーデン式貫入試験）によって簡易調査を行って液状化判定を行う

試験機（自動式）



試験機（手動式）



試料採取装置例



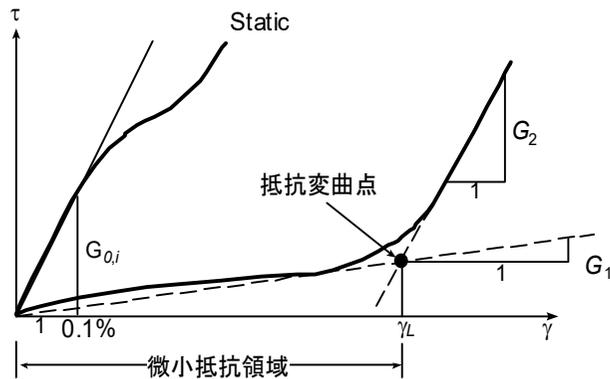
地下水位測定装置例



## 手順 2 : 液状化する層のせん断剛性の低下率を求める

### 液状化後地盤のせん断剛性低下率の設定

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



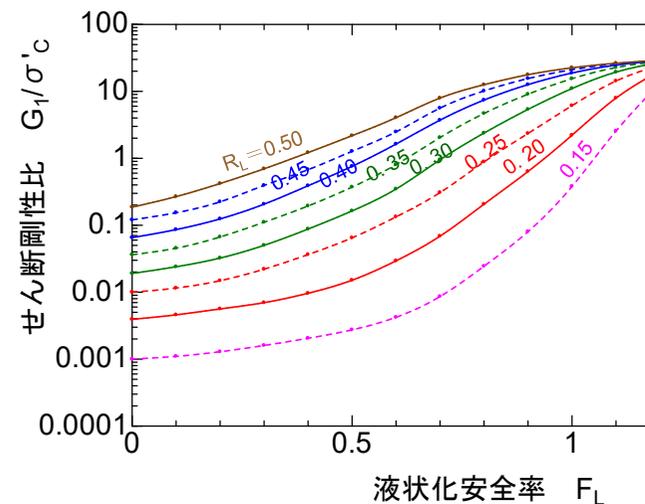
$\sigma'_c$  : 有効平均主応力

		$F_L$							
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$G_1/\sigma'_c$	$R_L=0.15$	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

ALIDで  
用いている  
方法を利用

### せん断剛性低下率の下限値の設定

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。



手順3：多層地盤の弾性沈下量の算定式を利用してめり込み沈下量を求める

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

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

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

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

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密度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $B$  : 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)
- $\nu_s$  : 地盤のポアソン比
- $E_s$  : 地盤の弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)

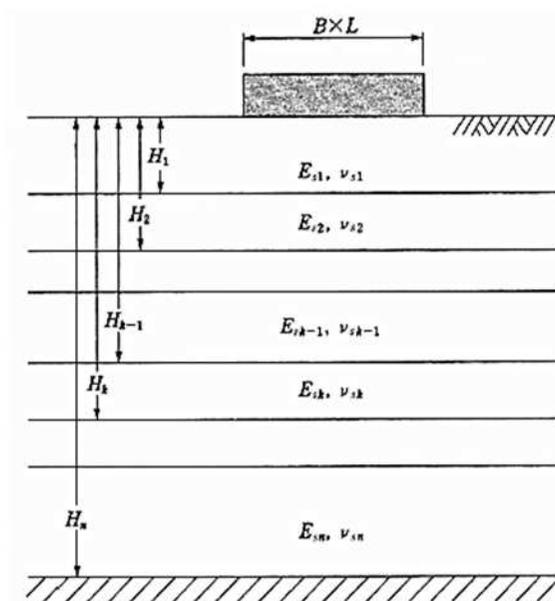
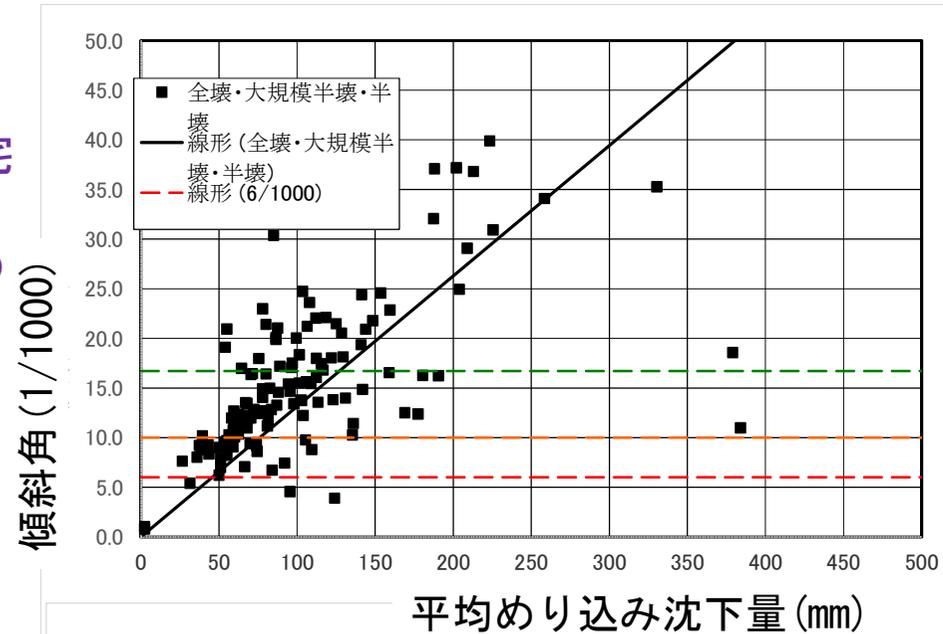


図-2.2.3 多層地盤における弾性沈下量の算定式

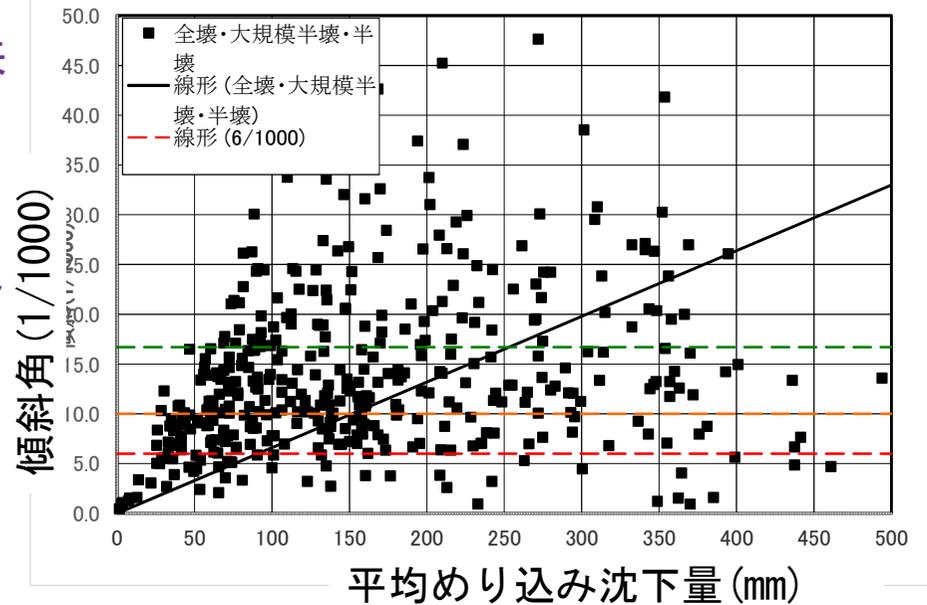
(「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会：2019 改定)」より) (国土交通省による)

手順4: 東日本大震災における  
めり込み沈下量と傾斜角の  
実測の関係をを用いて  
めり込み沈下量から傾斜角  
を推定する

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



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)

## 手順5：傾斜角やめり込み沈下量によって家屋の被災程度を判断する

<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】



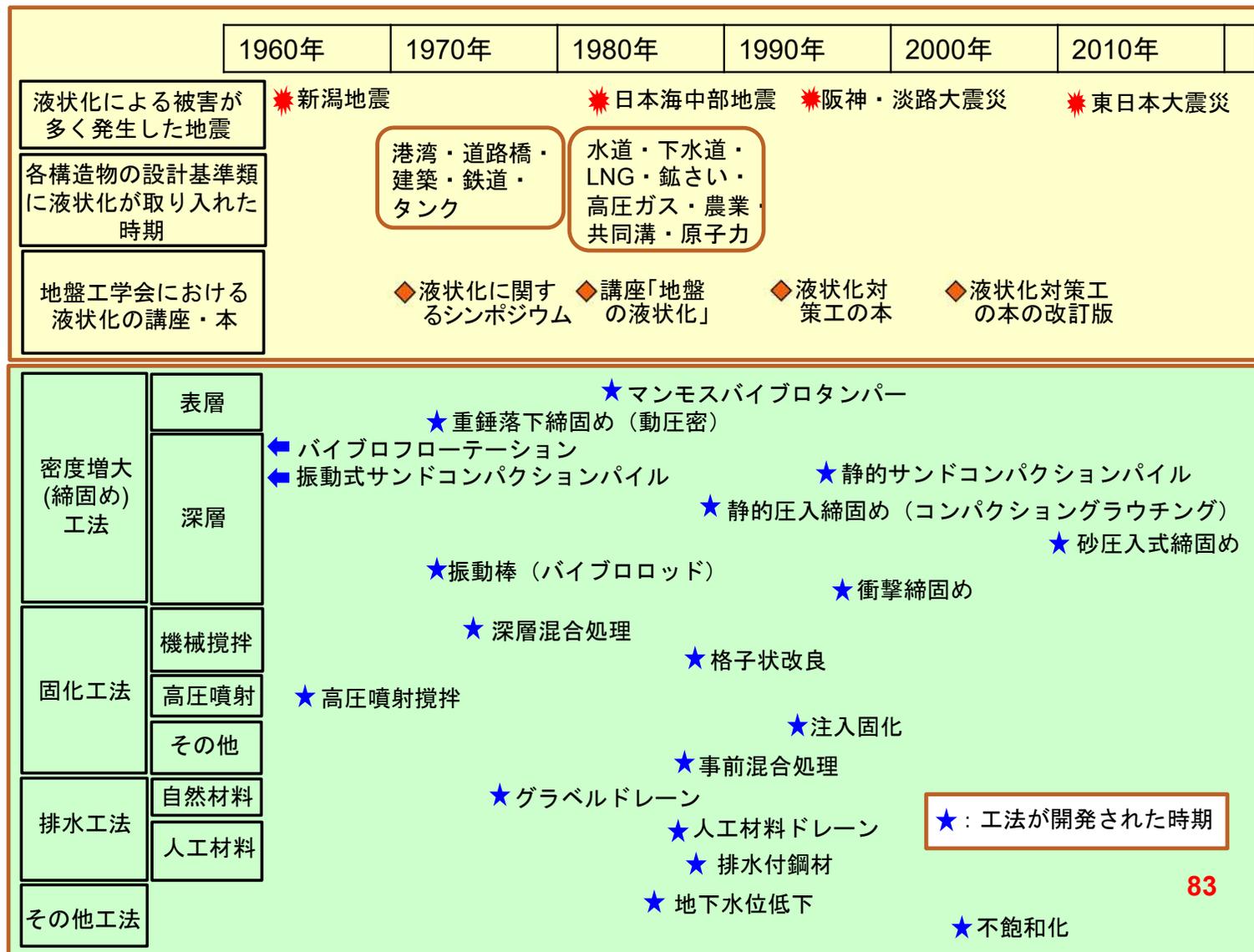
前述した東日本大震災で液状化が発生した箇所での調査結果例では、液状化による戸建て住宅のめり込み沈下量は、50.7 cmとなり  $\theta = 35/1000$  となって、内閣府の「災害に係る住家の被害認定基準運用指針 令和3年3月」<sup>1)</sup>に従うと、「大規模半壊」となると推定された。

(国土交通省による) 図-4.5 液状化等の地盤災害による被害認定フロー

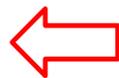
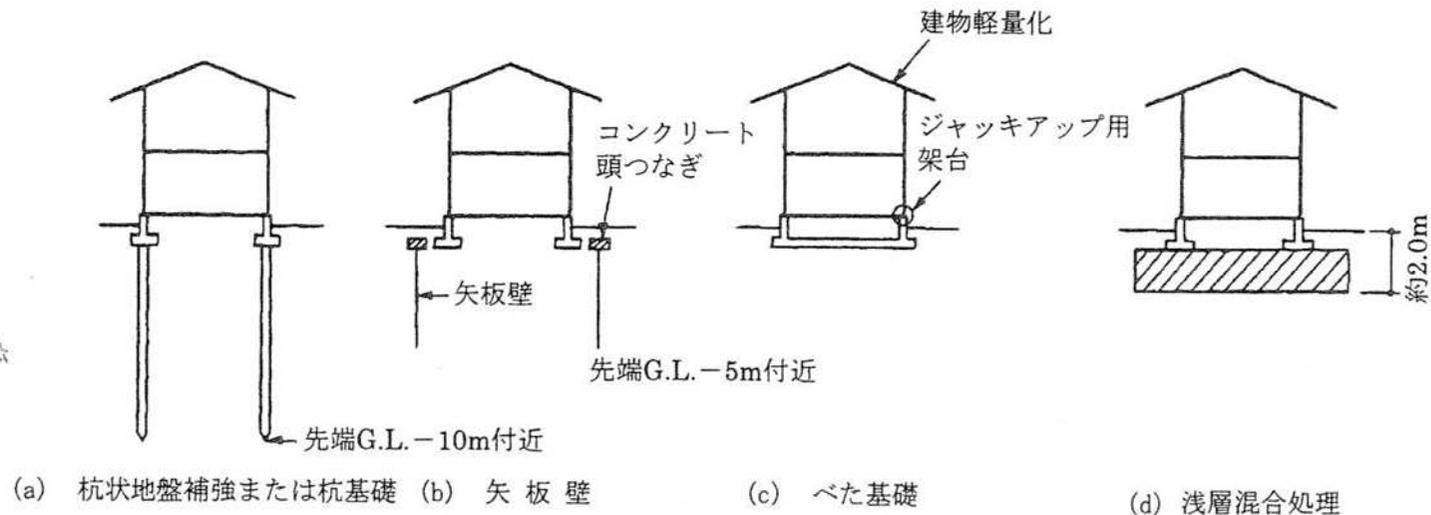
(「内閣府(防災担当): 災害に係る住家の被害認定基準運用指針(平成30年3月)」に一部加筆)

# 8. 個々の住宅の液状化対策方法

## 液状化を設計に取り入れた時期と対策工法の開発経緯



## 東日本大震災前に「日本建築学会：小規模建築物基礎設計の手引き（1988）」に示されていた対策方法



注：東日本大震災ではべた基礎の建物で液状化により沈下したものがあったので、べた基礎は液状化対策として十分ではない場合もある。

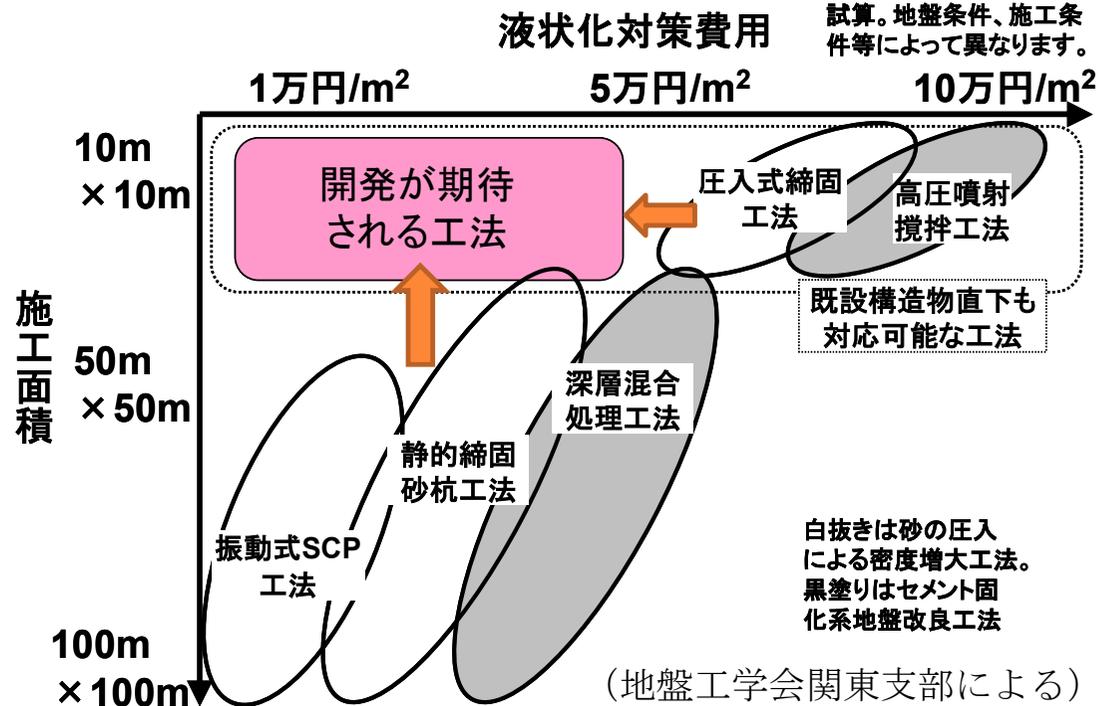
## 戸建て住宅への既往の地盤改良方法の適用性の考え方

新設・既設の戸建て住宅に液状化対策を施す場合に制約を受ける特有な条件

- 個々の宅地のスペースが狭いので、狭隘な場所で施工ができる小型の施工機械が必要。
- 家屋が隣接していると隣家に悪影響を与えないように注意する必要がある。
- 個々の財産なので公共構造物に比べて多大な費用をかけにくく、安価な対策しか実施し難い。
- 新設の場合と既設の場合で対策に必要な費用が大幅に異なる。

地盤工学会関東支部造成宅地の耐震対策に関する研究委員会：液状化から戸建て住宅を守るための手引き，209p.，2013.

### 施工面積と対策工費の関係

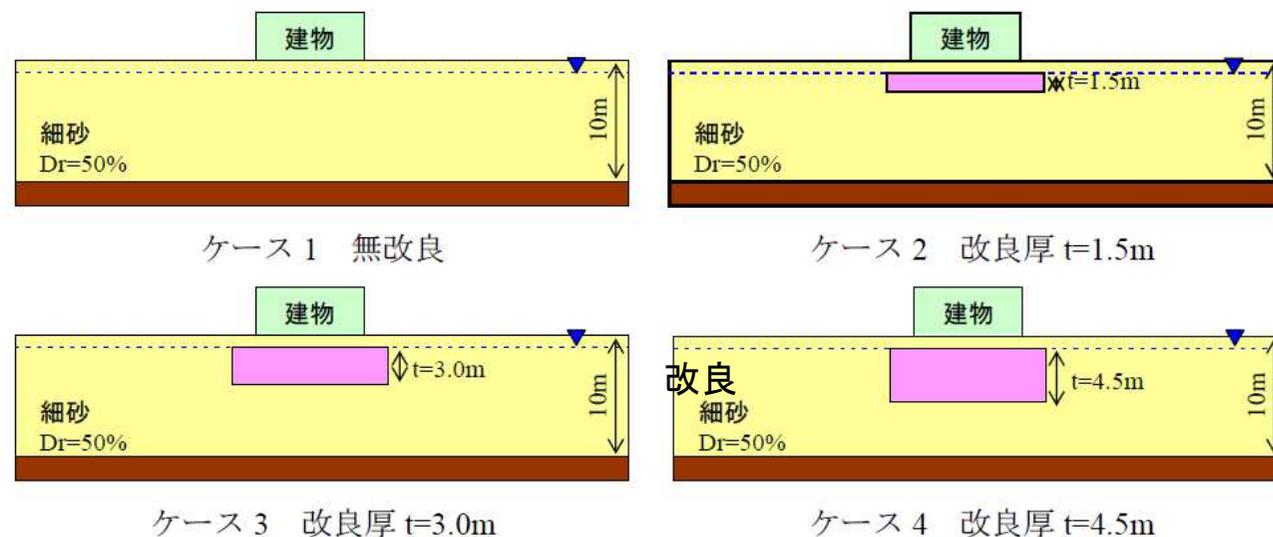


大型の施工機械で大量施工が可能になるほどコストは低い。施工面積が小さいと施工機械が小型化して施工能率が低下したり、運搬費用などの間接的な費用がコストに占める割合が大きくなりコストは高くなる

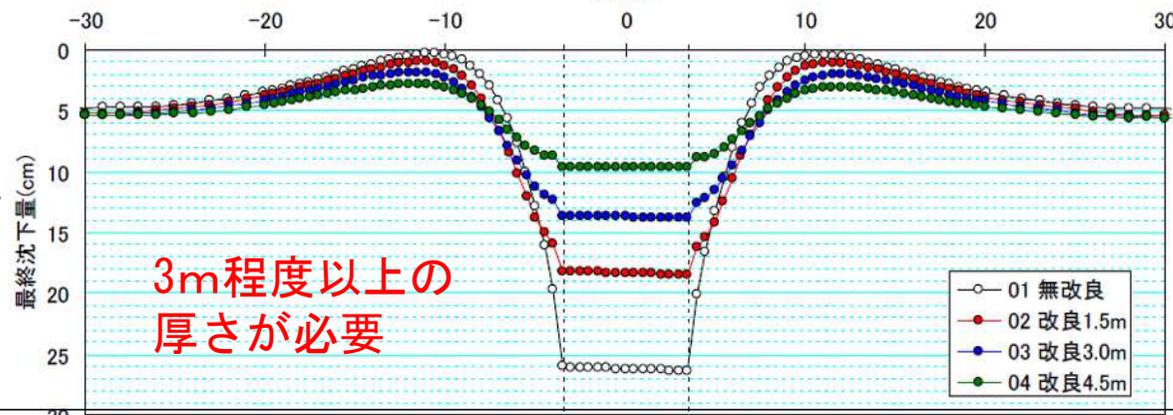
## 地盤改良の考え方

- ①全層の液状化の発生を防ぐ。
- ②下層が液状化しても、表層を改良するか地下水位を下げて非液状化層厚を増してめり込み沈下量を軽減する。

## 浅層盤状改良の厚さとめり込み地下量の関係に関する検討



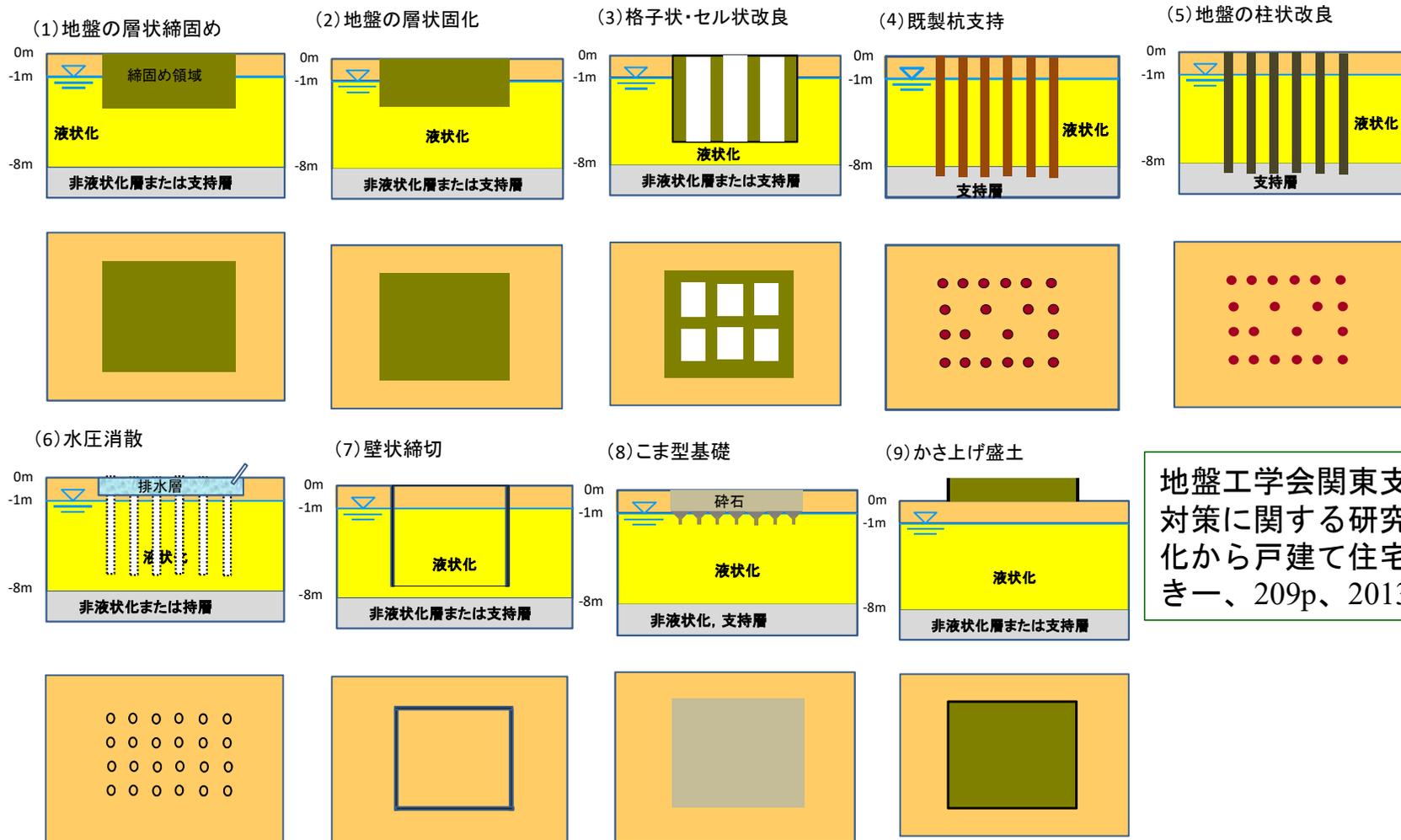
詳細な有効  
応力解析  
GEOASIAによ  
る解析結果



地盤工学会浅層盤状改良による宅地の液状化対策研究委員会：浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究報告書，2012.

# 東日本大震災を受けて地盤工学会関東支部で検討した対策案

## 狭い土地に個々の家屋を新設する場合

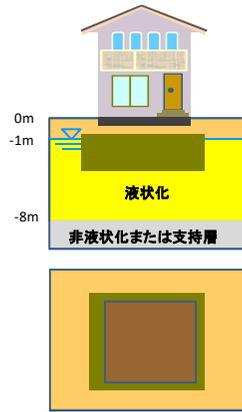


(注) アイデアだけのものも含む

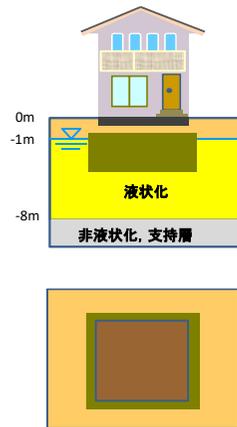
地盤工学会関東支部：造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書—液状化から戸建て住宅を守るための手引き—、209p、2013.

# 狭い土地にある既設の住宅に対策を施す場合

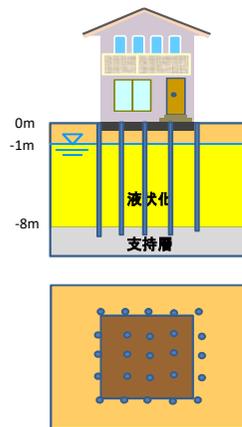
(1) 建物直下の層状締め



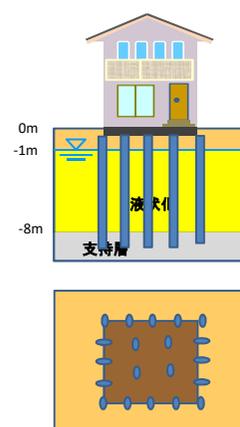
(2) 建物直下の浸透固化



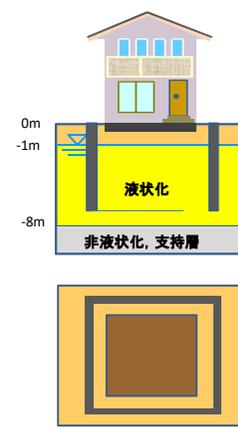
(3) 既製杭支持



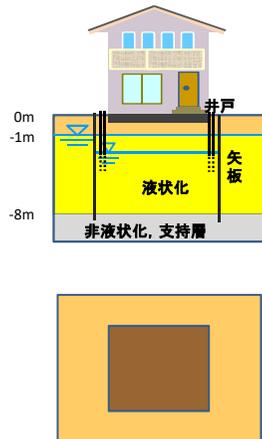
(4) 柱状改良



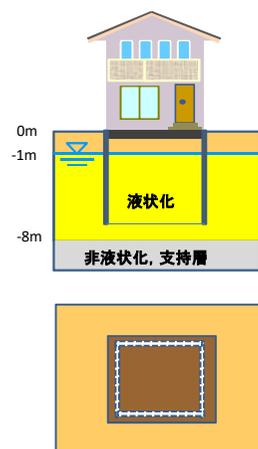
(5) 家の周囲の格子状改良



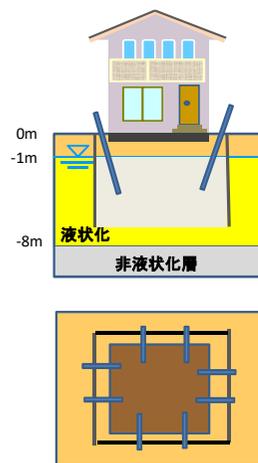
(6) 地下水水位低下



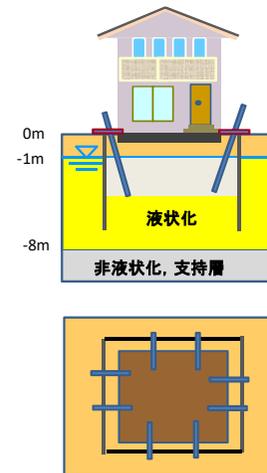
(7) 壁状締め切り



(8) 不飽和化



(9) 過圧密

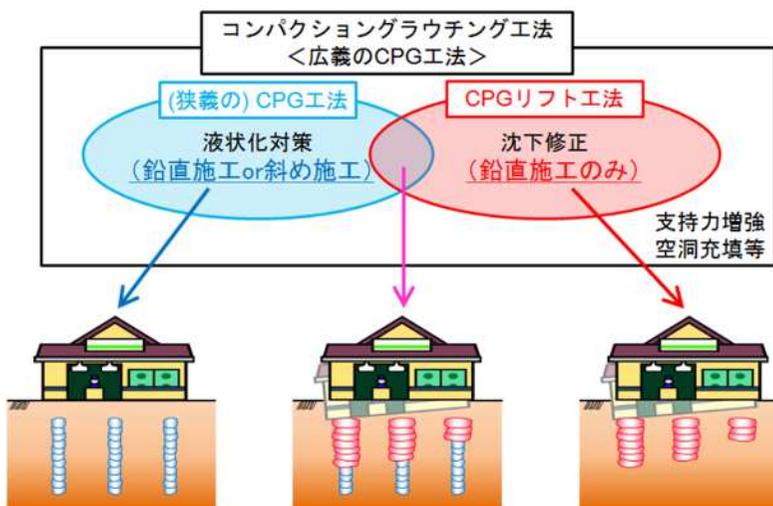
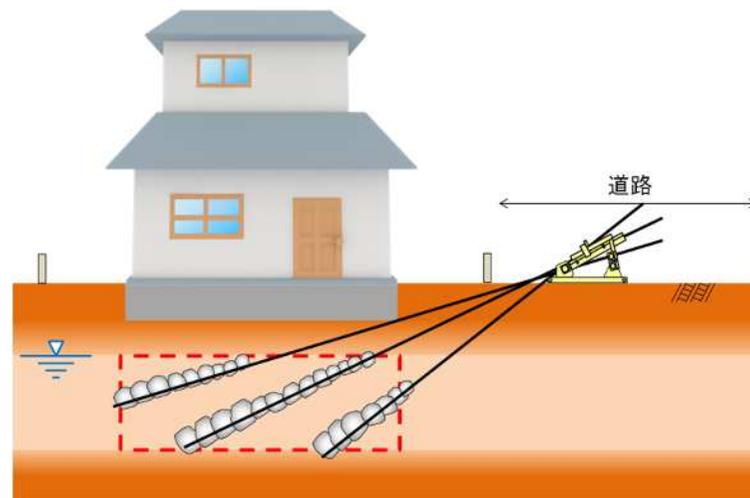
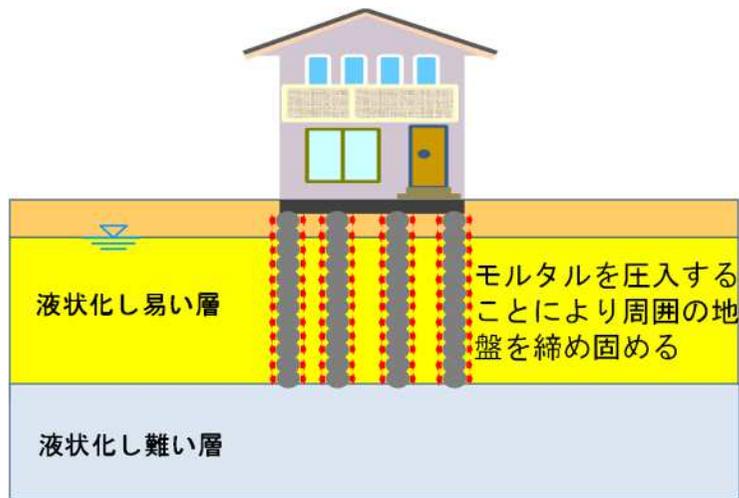


(注) アイデアだけのものも含む

# 東日本大震災後に検討、開発された個々の宅地の対策方法例

## ①既設住宅への圧入式締固め工法

三信建設工業(株)

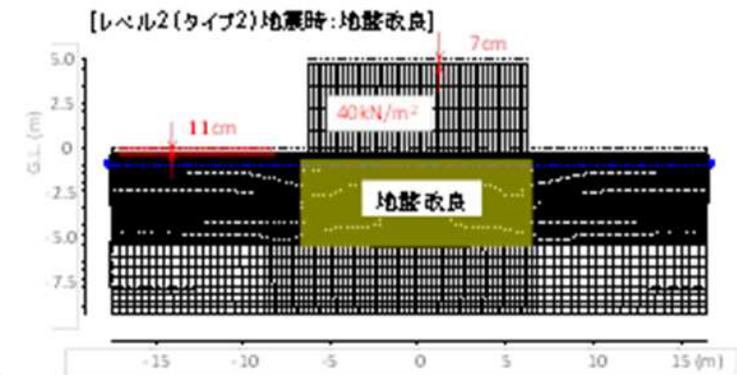
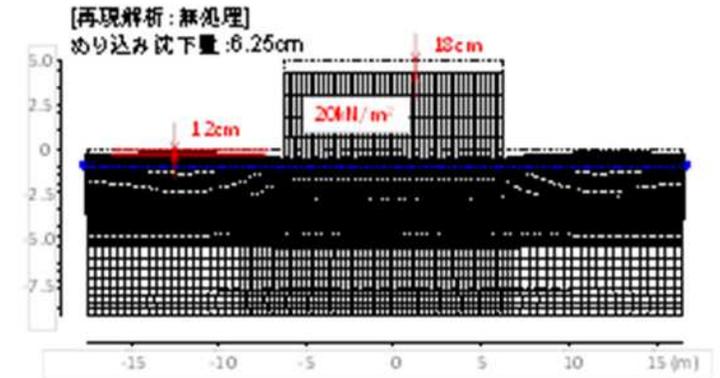
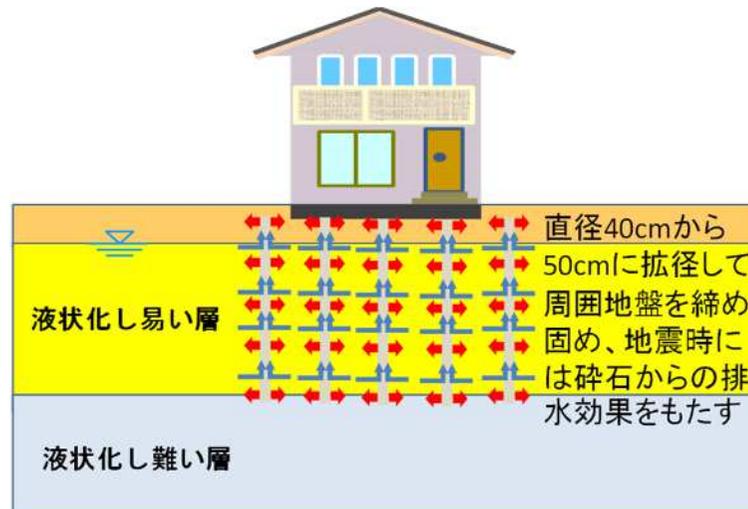


河野聡平・足立雅樹・岡見強・新坂孝志：静的圧入締固め工法(CPG工法)による戸建て住宅の液状化対策実証実験，第48回地盤工学研究発表会，pp.935-940，2013.

## ②新築の戸建て住宅用に小型化した碎石締固め・排水工法

(株)不動テトラ

### 新設の住宅に適用した事例



戸建て住宅の液状化による変形解析例

原田健二・大林淳・吉富宏紀：宅地地盤の液状化対策工法の開発と適用—小型締固め式グラベルドレン工法—、地盤工学会誌、Vol.61、No.4、pp.22～25、2013.

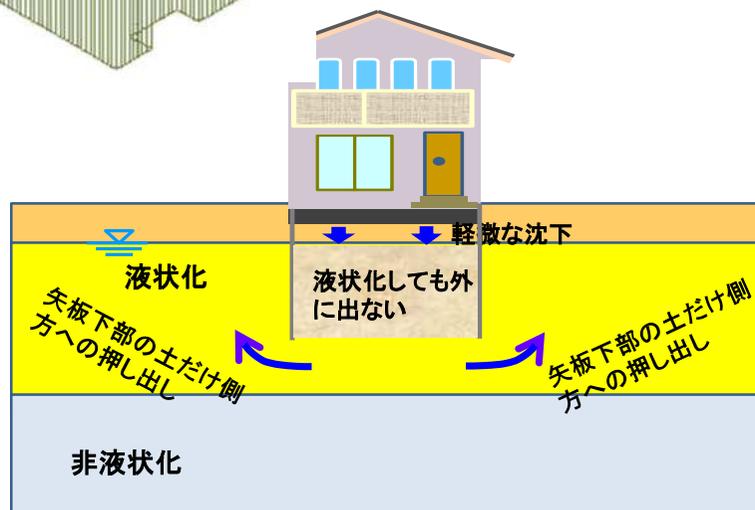
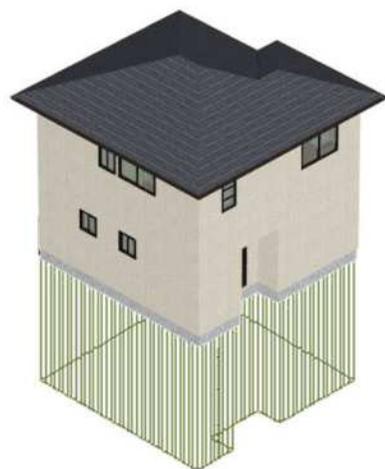


### ③新築・既設の戸建て住宅への矢板締切工法

住友林業(株)

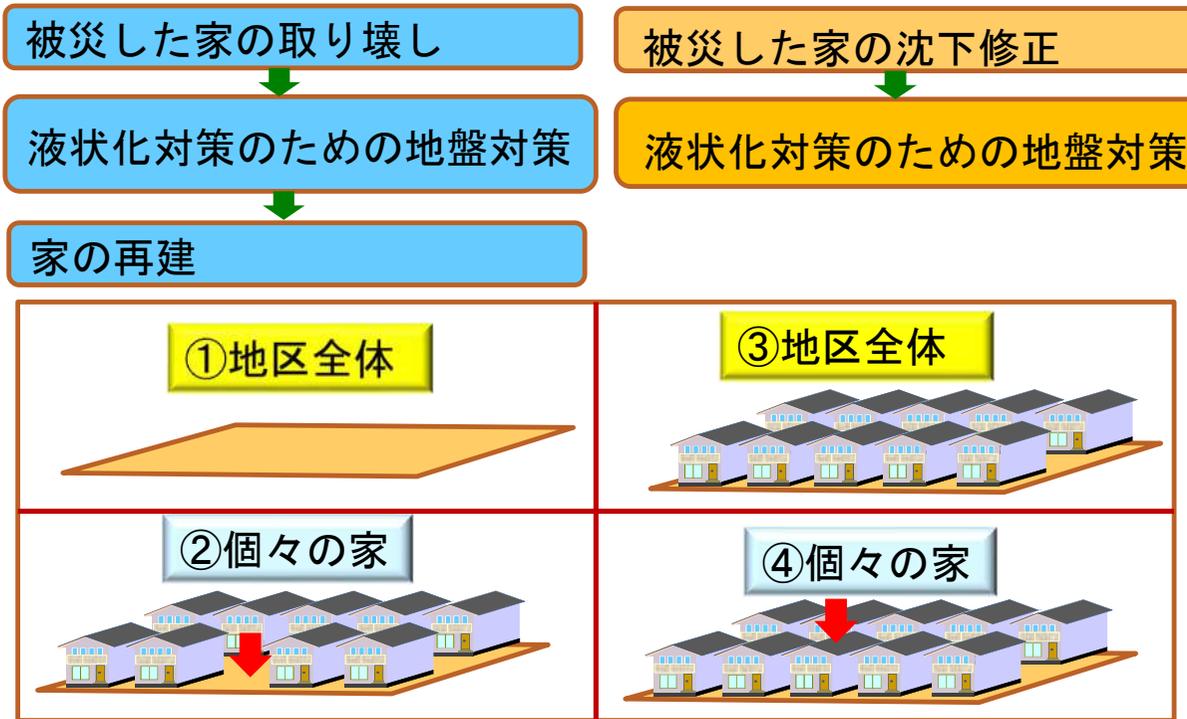
新設の住宅に適用した事例

既設の建物に適用した事例



平出務・安田進・藤野一・金子雅文・佐々木修平・三上和久・尾澤知憲：薄鋼矢板を用いた液状化被害軽減工法の開発、地盤工学会特別シンポジウム－東日本大震災を乗り越えて－，pp. 454-462，2014.

## 9. 市街地全体の液状化対策方法



日本の方法

- 殆どの戸建て住宅では沈下修正を行っただけで液状化対策は行われていない。
- 一度液状化した地盤は再液状化し易いので、将来の地震で再度被災する危険性を有している。
- いくつかの住宅や地区では②、③による対策が施された。
- ほんの一部の住宅で④の対策が行われた。

広範囲に液状化が発生し多くの戸建て住宅が被災したクライストチャーチの復興方法



## 都市における復興で行われた地区全体の液状化対策

- 東日本大震災の8か月後に国土交通省により「市街地液状化対策事業」が創設。ある地区内の道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを、一体化して液状化対策を施そうとするもの。
- この事業に必要な費用は公共施設を公費で賄う一方、宅地内は住民が負担する方式であり、この事業を適用できる条件としては、i) 面積が3,000㎡以上でありかつ区域内の家屋が10戸以上のもの、ii) 土地所有者・借地権者それぞれの2/3以上の同意が得られるもの、iii) 公共施設と宅地との一体的な液状化対策が行われているものと認められるもの、とされた。
- この事業では二つの大きな課題があった。一つめは技術的な課題で、既存の住宅地を家が建ったままでどんな方法で対策を施せるかであり、二つ目の課題は住民の合意形成をいかにとるかである。

### 地下水位低下工法



(国土交通省による)

### 格子状地中壁工法

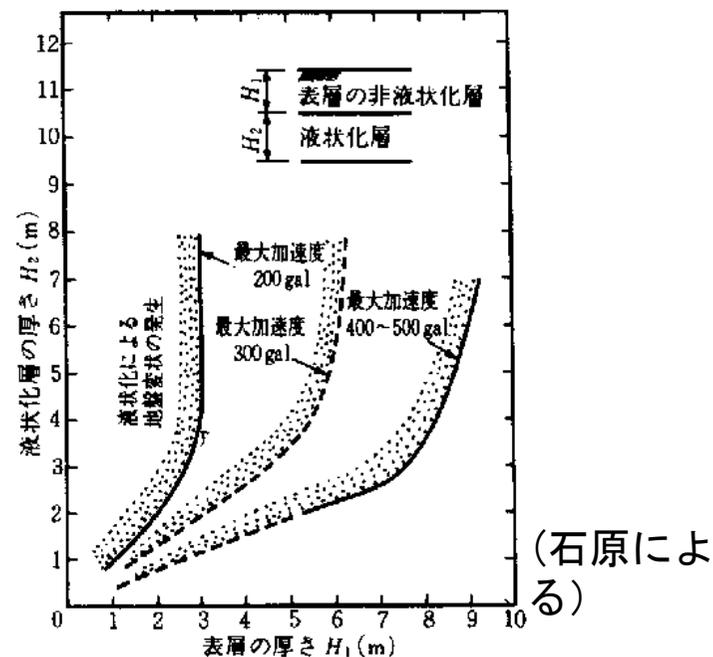
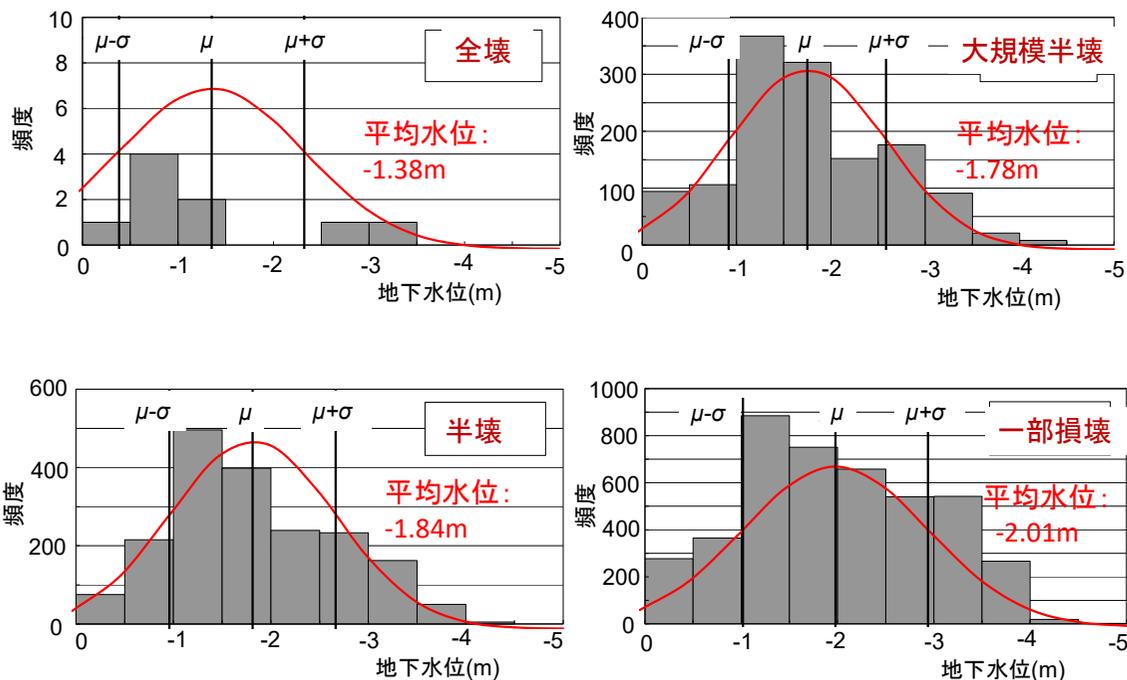


国土交通省都市局都市安全課「市街地液状化対策推進ガイダンス」  
[http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_tobou\\_fr\\_000005.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_fr_000005.html)

# 地下水位低下工法を実施するために実証実験などで検討された事項

## 1) 地下水位の低下量の設定方法

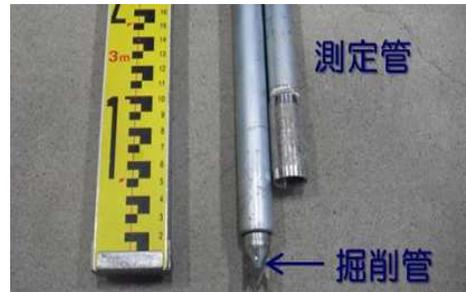
地震後に調べられた浦安市の被災程度と地下水位(浦安市による)



## 3つの地震で被害を生じた地下水位の境界

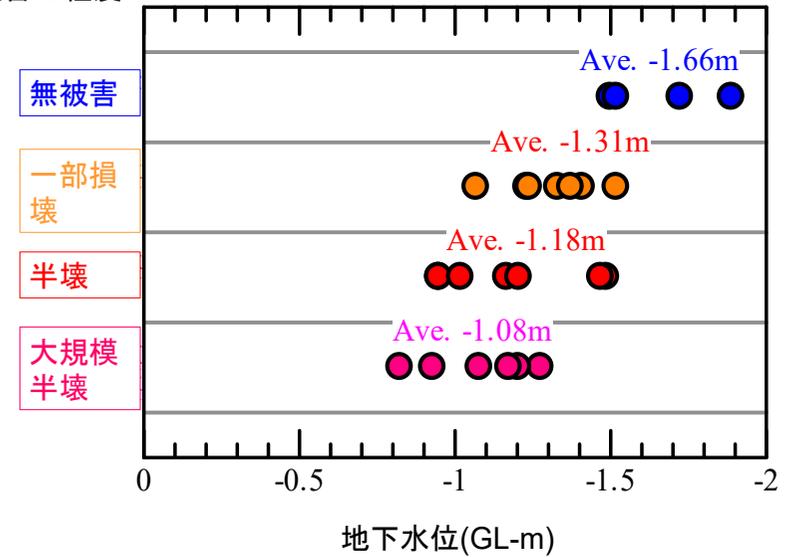
地震	住宅地	被害と無被害の境の地下水位
1983年日本海中部地震	秋田市新屋松美町	地震動の推定値によって異なるが、GL-1.5m~-2.5m
2000年鳥取県西部地震	米子市安倍彦名団地	地下水位が深いと傾きが小さくなり、10/1,000の傾きで判断するとGL-1.6m程度
2007年新潟県中越沖地震	柏崎市橋場町	地下水位が深いと被害程度が軽くなる

# 東日本大震災で被災した浦安の2地区の宅地における地下水位の調査例

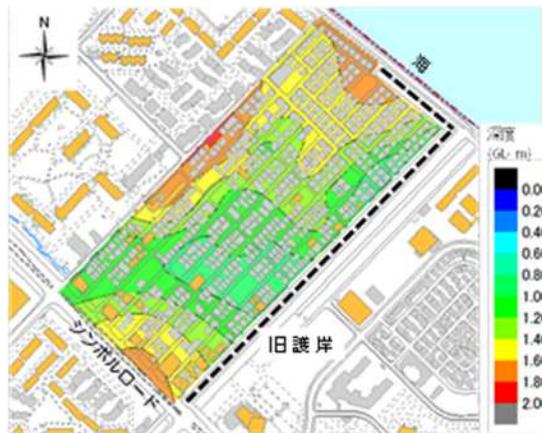


## 地下水位と住宅被害の関係

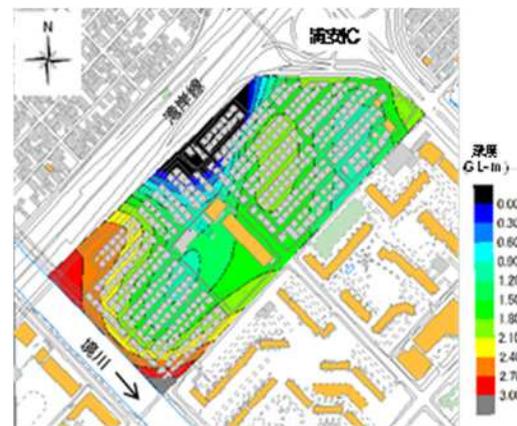
被害の程度



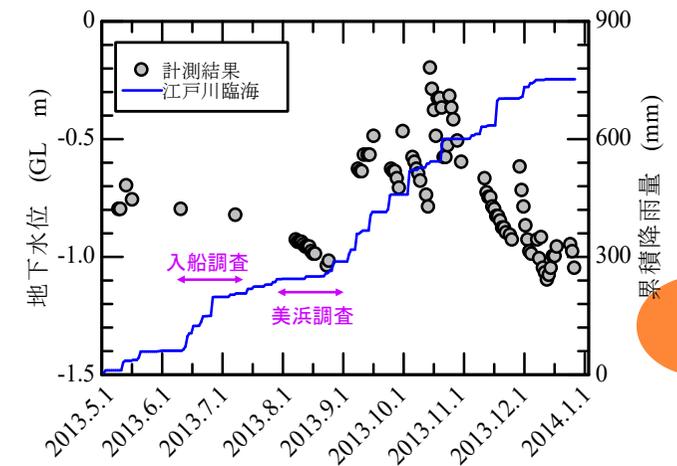
### 入船4丁目の地下水位分布



### 美浜3丁目の地下水位分布



## 地下水位の時間変化と累積降雨量



安田進・石川敬祐：地下水位低下が戸建て住宅の液状化対策に与える効果，日本地震工学会論文集，第15巻，第7号（特集号），pp.205-219，2015.

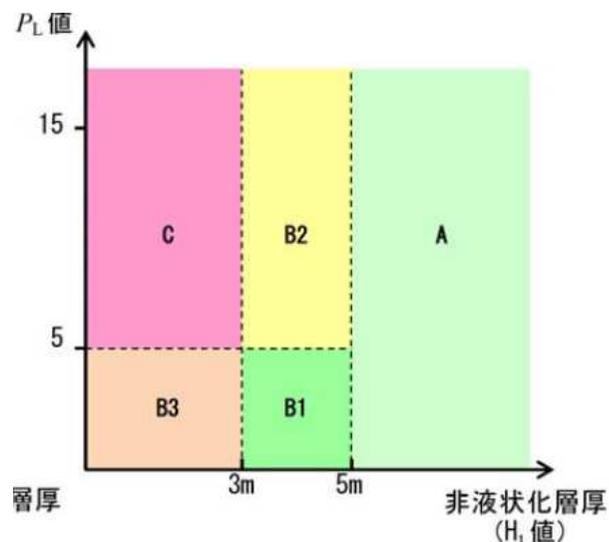
# 国土交通省で平成26年3月に出された市街地液状化対策推進ガイドンス

表 4-8 公共施設・宅地一体型液状化対策工法における効果の目標値の設定

判定結果	H <sub>1</sub> の範囲	D <sub>cy</sub> の範囲	P <sub>L</sub> 値の範囲	地下水位低下工法	格子状地中壁工法
C	3m 未満	5cm 以上	5 以上	不可	不可
B3		5cm 未満	5 未満	不可 (※)	不可
B2	3m 以上	5cm 以上	5 以上	液状化被害軽減の 目標として可	不可
B1	5m 未満	5cm 未満	5 未満		
A	5m 以上				

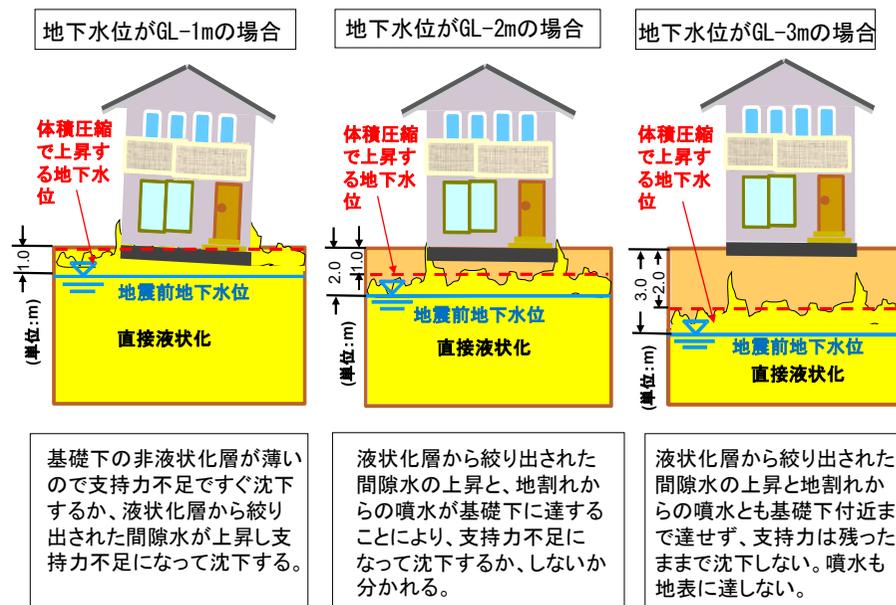
(※) 原則不可であるが、専門家からなる委員会等で詳細、且つ、高度な検討を行った結果の

判断についてはこの限りではない。



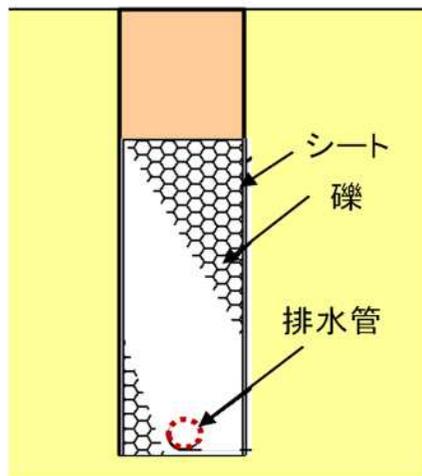
(b) H<sub>1</sub>~P<sub>L</sub>判定図

地下水位を3m程度の深さまで下げておくとめり込み沈下し難いメカニズムとして考えられる一案



## 2) 地下水位の低下方法

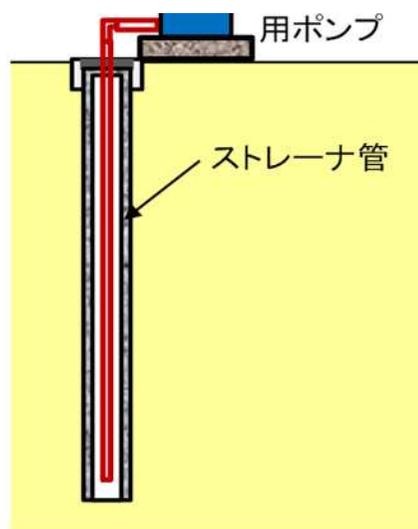
① 開削工法で排水  
管設置



② 推進工法で  
排水管設置

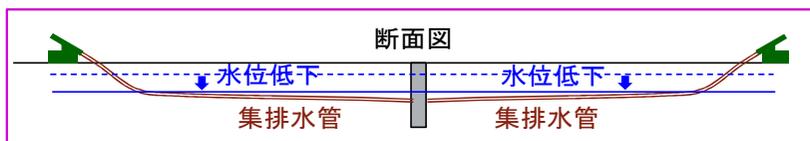
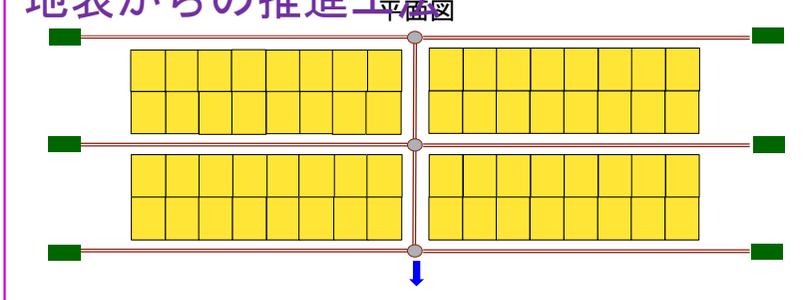


③ 浅井戸の設置

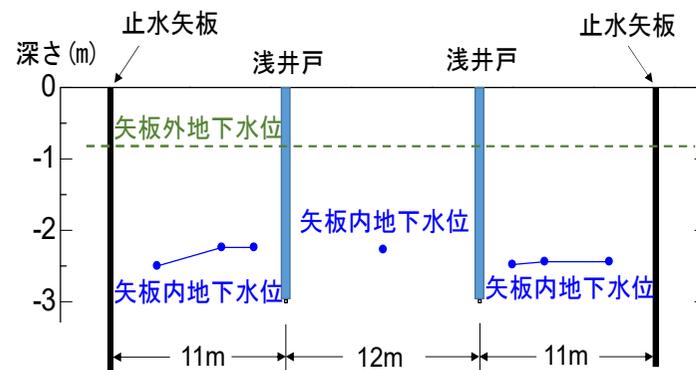


今後市街地  
で対策が施  
されるため  
には排水管  
設置方法の  
開発が大切

地表からの推進工法

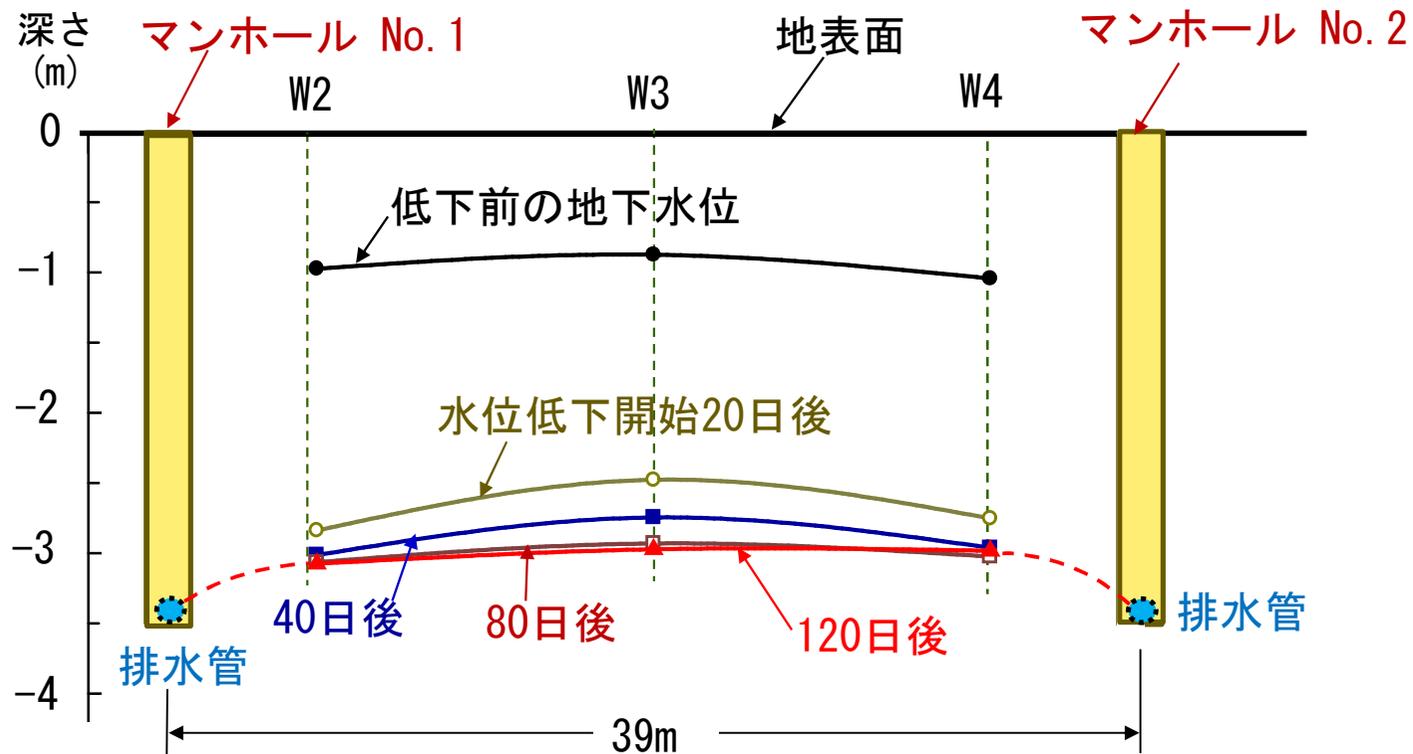


浅井戸方法



### 3) 水位低下のための排水管や浅井戸の設置間隔

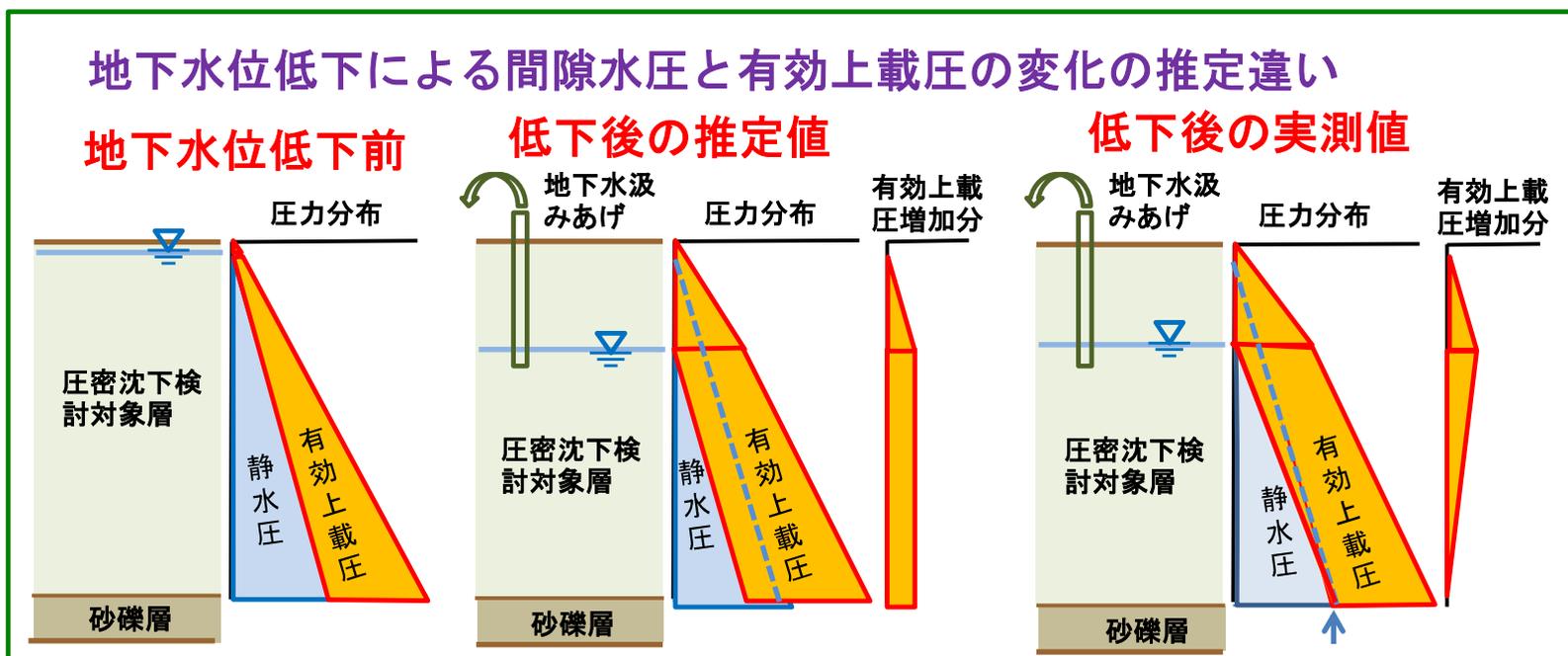
- ①当初は宅地内へも排水管を設置することを想定
- ②実証実験結果によると、40m程度離れた道路だけに設置する配置で宅地内の地下水位も下がった。→宅地内への設置は不要になった。



#### 4) 地下水位低下に伴う地盤の沈下量の推定方法

- ①従来の方法：大きな沈下量
- ②実証実験や詳細な地盤によって得られた知見：沈下量は少ない
  - <理由1> 間隙水圧の低下分布が仮定と異なる
  - <理由2> 表層が過圧密になっていることが多い

都市名	実験結果	
	期間	地表面沈下量 (cm)
神栖市	60 日後	0.1 ~ 0.5
我孫子市	最終	約 5



# 千葉市美浜区磯辺4丁目の集排水管位置と地下水位低下結果

対策前（2018年9月3日時点）

宅地数：260宅地

宅地の標高：

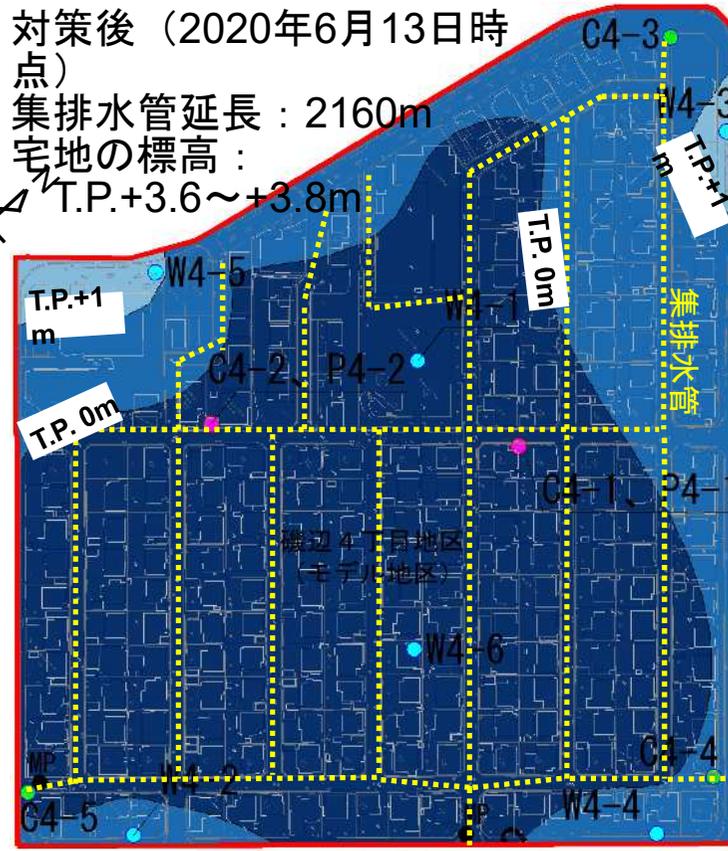
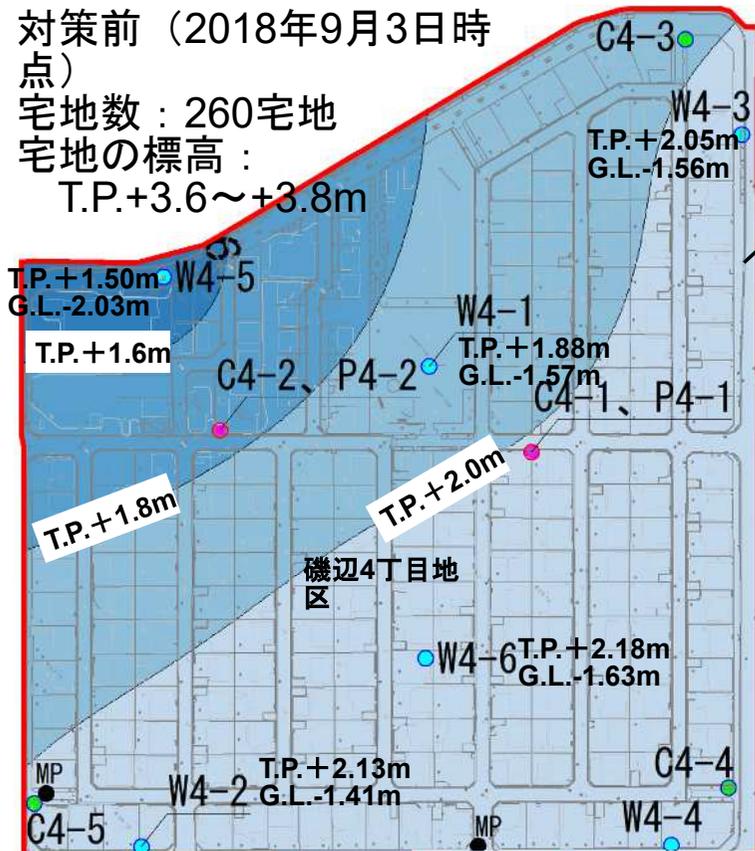
T.P.+3.6~+3.8m

対策後（2020年6月13日時点）

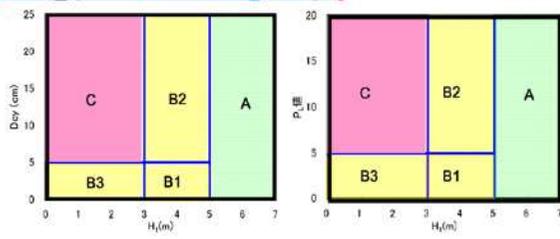
集排水管延長：2160m

宅地の標高：

T.P.+3.6~+3.8m



- 止水矢板
- 測定
- ：地下水位
- ：地表面標高
- ：間隙水圧 + 地表面標高



(千葉市による) 100 (m)

すべての地点がCでないことを確認して  
事業終了

- 地下水位低下工法で6都市，格子状地中壁工法で1都市，側方流動対策で1都市が対策された。
- 2,016年熊本地震の復旧にあたっては地下水位低下工法が適用されている。
- コンビナートでは大型のタンクや建物は液状化対策を施すようになっているが，道路や倉庫などの小規模構造物では対策が施されていないので，このような敷地全体の対策を施すと良い。

# 宅地液状化防止事業 (国土交通省)

能登半島地震で被災した都市では地区全体の対策を検討中。

ご清聴有難うございました

## 宅地液状化防止事業(防災・安全交付金)

### 事業概要

主に宅地の用に供され、大地震時等に液状化現象が発生する可能性のある地域において、災害の発生を抑制するため、道路・下水道等の公共施設と隣接宅地等との一体的な液状化対策を推進する。

### 交付対象事業・基礎額

宅地の液状化を防止するために行われる事業に要する費用：補助率  $1/4$ ※

※熊本地震および北海道胆振東部地震の被災宅地の復旧は  $1/2$

※実施主体が地方公共団体である優先すべき事前対策で、立地適正化計画における防災指針に即して行われる場合は  $1/2$

### 要件

下記の各号に該当する地区で行われるものであること

- ① 当該宅地の液状化により、公共施設（道路、公園、下水道、河川、水路その他公共の用に供する施設をいう。）に被害が発生するおそれのあるもの
- ② 変動予測調査等により、液状化による顕著な被害の可能性が高いと判定された3,000㎡以上の一団の土地の区域であり、かつ、区域内の家屋が10戸以上であるもの
- ③ 公共施設と宅地との一体的な液状化対策が行われていると認められるもの

### 交付金事業者

- 都道府県・市町村
- 宅地所有者等

### 事業の特徴

災害により現に被害を受けた造成宅地においても、上記の要件を満たす場合は、再度災害による被害拡大を防止するため、本事業を活用することができる。

