

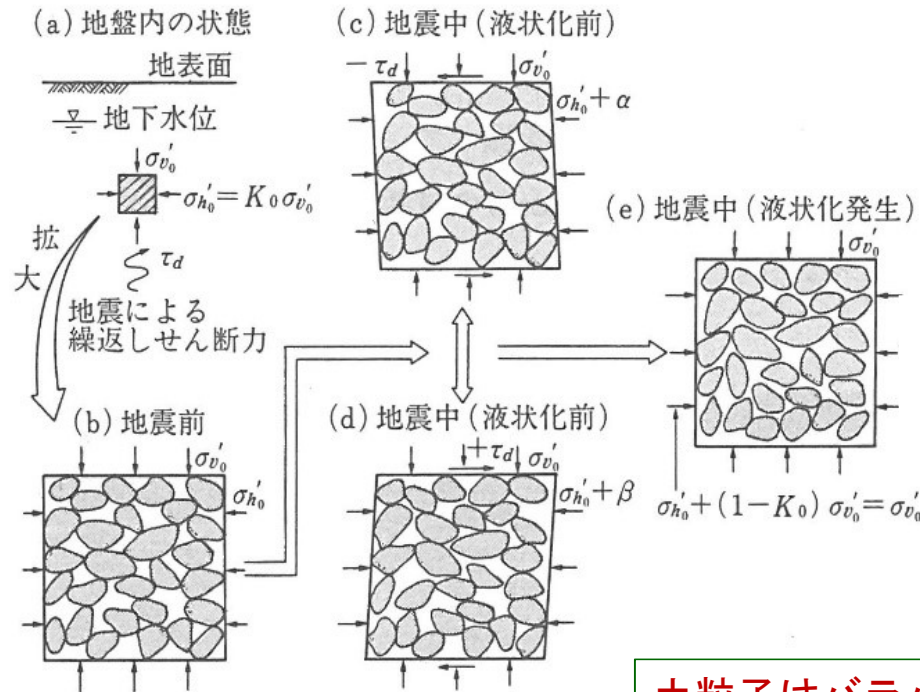
## 市街地および個々の住宅における液状化調査・対策の動向

1. 液状化によって種々の構造物に生じる被害の特徴
2. 液状化により戸建て住宅がめり込み沈下し傾くメカニズム
3. 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
4. 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
5. 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
6. 地盤工学会で出された簡易地盤調査による住宅のめりこみ沈下量・傾斜角の計算方法
7. 個々の住宅の液状化対策方法
8. 市街地全体の液状化対策方法

東京電機大学 名誉教授 安田 進

# 1. 液状化によって種々の構造物に生じる被害の特徴

## 液状化発生メカニズム



$\sigma_{v_0}'$ は土粒子間力で支え、間隙水圧は静水圧

土粒子の噛み合わせが徐々にはずれ、 $\sigma_{v_0}'$ は土粒子間力と間隙水圧で分担

土粒子はバラバラになり  $\sigma_{v_0}'$ は間隙水圧だけで支えて過剰になる  
 →地表に砂とともに噴出  
 →圧縮により地盤が沈下

### 液状化が発生する条件

- ①地下水位以下の、
- ②緩く堆積した、
- ③砂層に、
- ④震度5弱程度以上の地震が襲った場合

地下水位が深いと液状化する層が薄くなったり、深い層が液状化しても地表まで過剰間隙水圧が伝播してこなくて構造物が被害を受け難い。

### 液状化による被害が発生し易い条件

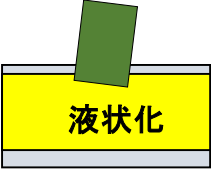
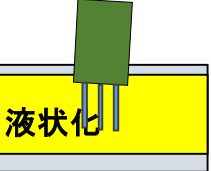
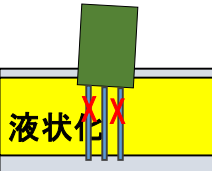
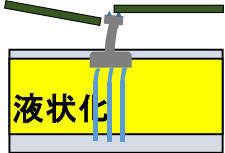
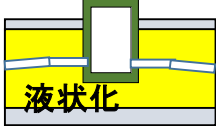


- ①地下水位が浅く、
- ②緩く堆積した、
- ③砂地盤に、
- ④震度5弱程度以上の地震が襲った場合

## 液状化により各種構造物で生じる被害形態(1)

**直接基礎の構造物**：地表に建てられた建物やタンクなど種々の構造物は**自重により沈下**する。

**杭基礎の構造物**：杭先端地盤が液状化すると沈下する。また、先端は液状化しなくても表層が液状化すると**水平方向の地盤反力が減少**し、水平方向に大きく変形し、杭が破損したり、上部の橋桁が落橋する。

**地中構造物**：地中に埋まっているマンホールや防火水槽、下水道管など軽い構造物は**浮き上がる**。  
 “ドロ水”の単位体積重量は水より重く、 $17\sim 19\text{kN/m}^3$ もあるため、コンクリート製の構造物でも中に空洞があれば浮き上がる。

構造物	被害形態
直接基礎構造物	<p>沈下・傾斜</p> 
杭基礎構造物	<p>沈下・傾斜</p>  <p>杭の曲げ</p>  <p>上部構の過大な変形</p> 
地中構造物	<p>浮上り</p>  <p>抜け</p>  <p>破損</p> 

## 被害事例



## 液状化による戸建て住宅の模型の沈下・傾斜を再現した振動台実験



東京電機大学  
の中型振動台  
(3m×2m)を  
用いた実験例



## 液状化により各種構造物で生じる被害形態 (2)

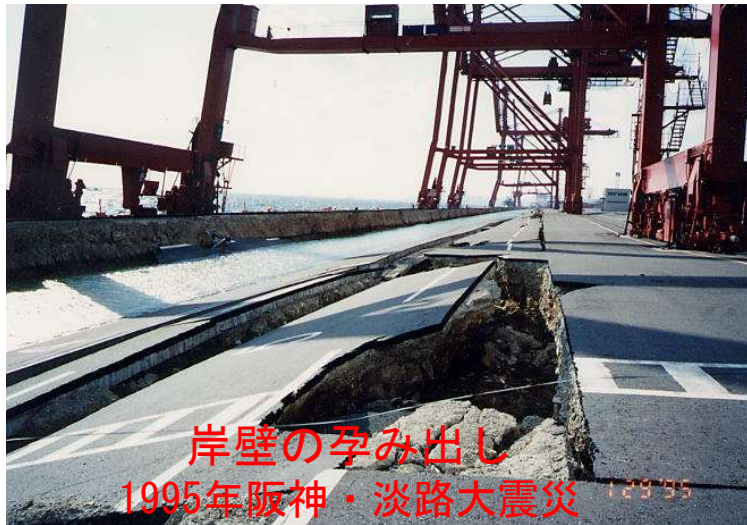
**岸壁や護岸および背後地盤**：背後の地盤が液状化すると岸壁や護岸に加わる**土圧が増える**。また基礎下の地盤が液状化すると支持力がなくなる。これらにより岸壁や護岸が海や川に向かって孕み出す。

**土構造物**：河川堤防やアースダム、鉱さい集積場といった土構造物では**地盤の強度やせん断剛性が減少**するため、滑ったり沈下する。

**岸壁や護岸および背後地盤**：岸壁や護岸の孕み出しにより液状化した地盤が**水平方向に流動**し、直接基礎の構造物の基礎は引き裂かれ、杭基礎の変形、埋設管の引っ張られて被害が生じる。

**緩やかな傾斜地盤**：岸壁・護岸背後地盤の流動と同様に各種構造物の被害を甚大にする。

構造物	被害形態
岸壁・護岸構造物	<p>矢板の孕み出し      ケーソンの前傾・沈下</p>
土構造物	<p>すべり                      沈下</p>
地盤全体の流動	<p>岸壁・護岸背後地盤</p> <p>緩やかな傾斜地盤</p>



岸壁の孕み出し  
1995年阪神・淡路大震災



堤防の崩壊  
2011年東日本大震災



護岸の孕み出しによる背後地盤の流動  
1995年阪神・淡路大震災



護岸背後地盤の流動による杭基礎の被害  
1995年阪神・淡路大震災

## 2011年東日本大震災により東京湾岸で生じた液状化被害の特徴

- ▶ 青森県から神奈川県まで広い範囲で液状化した。
- ▶ 橋梁や中層建物などの被害は目立たなかった。
- ▶ 戸建て住宅、住宅地の平面道路、ライフライン、河川堤防は各地で甚大な被害を受けた。戸建て住宅や平面道路では液状化を考慮して建設が行われてこなかった。また、液状化を考慮していなかったライフラインが多く存在していた。
- ▶ 建物自体は被災しなかったアパートにおいても、入口の段差が発生し、ライフラインが被災したため、しばらくはマンション内で生活が出来ない状況に陥った。

### 浦安市での被災・無被災事例

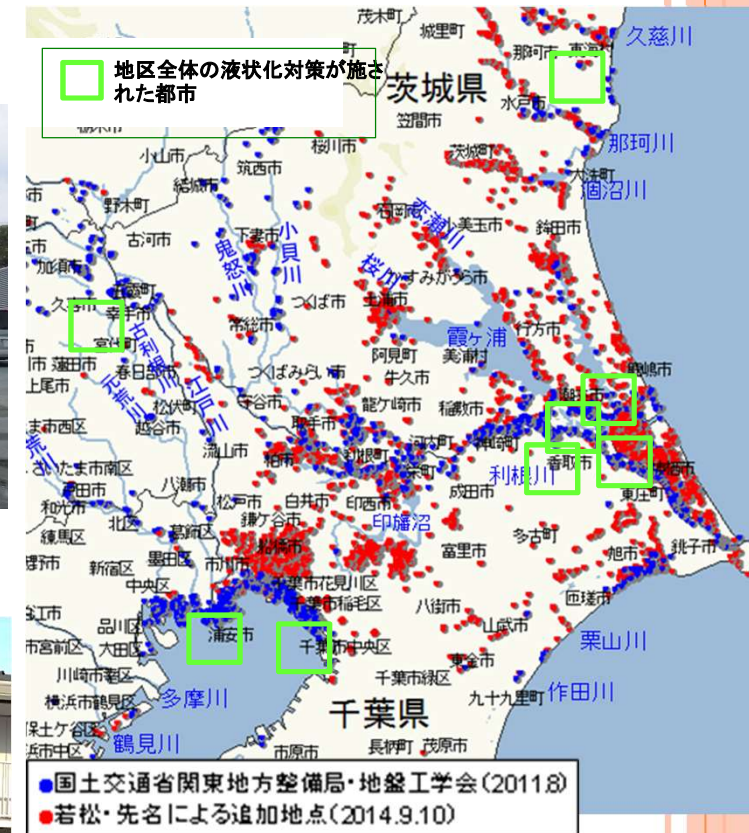
液状化を考慮して設計してあった高架橋は被害なし



戸建て住宅・道路・ライフラインでは甚大な被害発生



### 関東地方の液状化発生地点



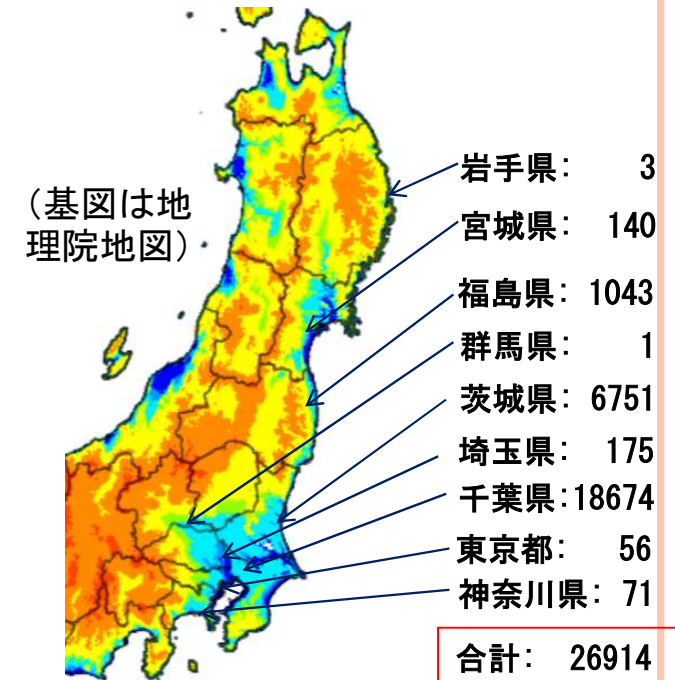
(若松・先名による)



# 東京湾岸の戸建て住宅の被害状況



## 東日本大震災での液状化による戸建て住宅の被害数



\* 国土交通省都市局調べ（平成23年9月27日調査時点）

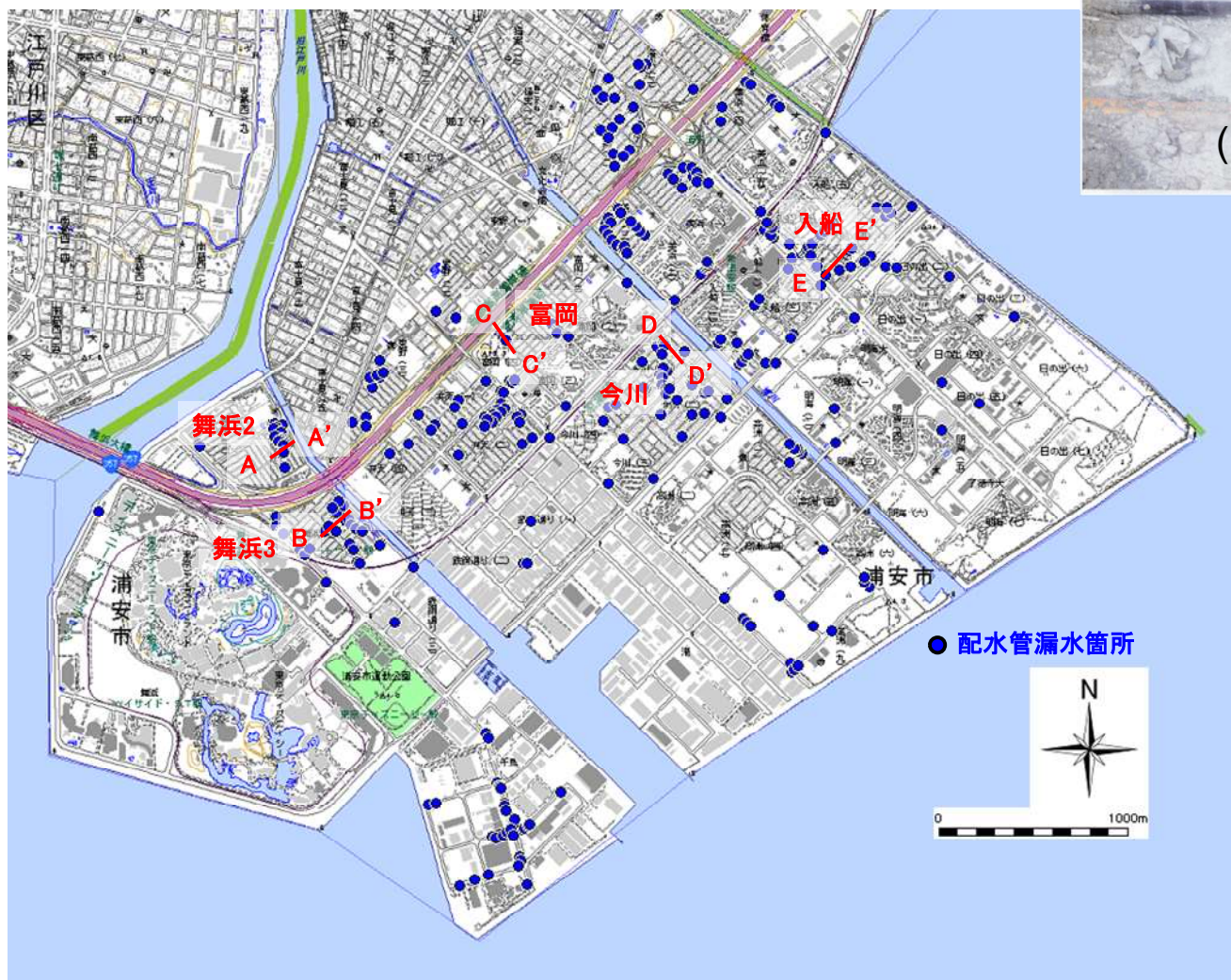
\* 津波により家屋が流出した場合等については、上記被害件数に計上されていない。

## 東京湾岸の市街地の平面道路の被害状況



# 東京湾岸の上下水道、ガス、通信の地中埋設管の被害例（浦安での配水管被害箇所）

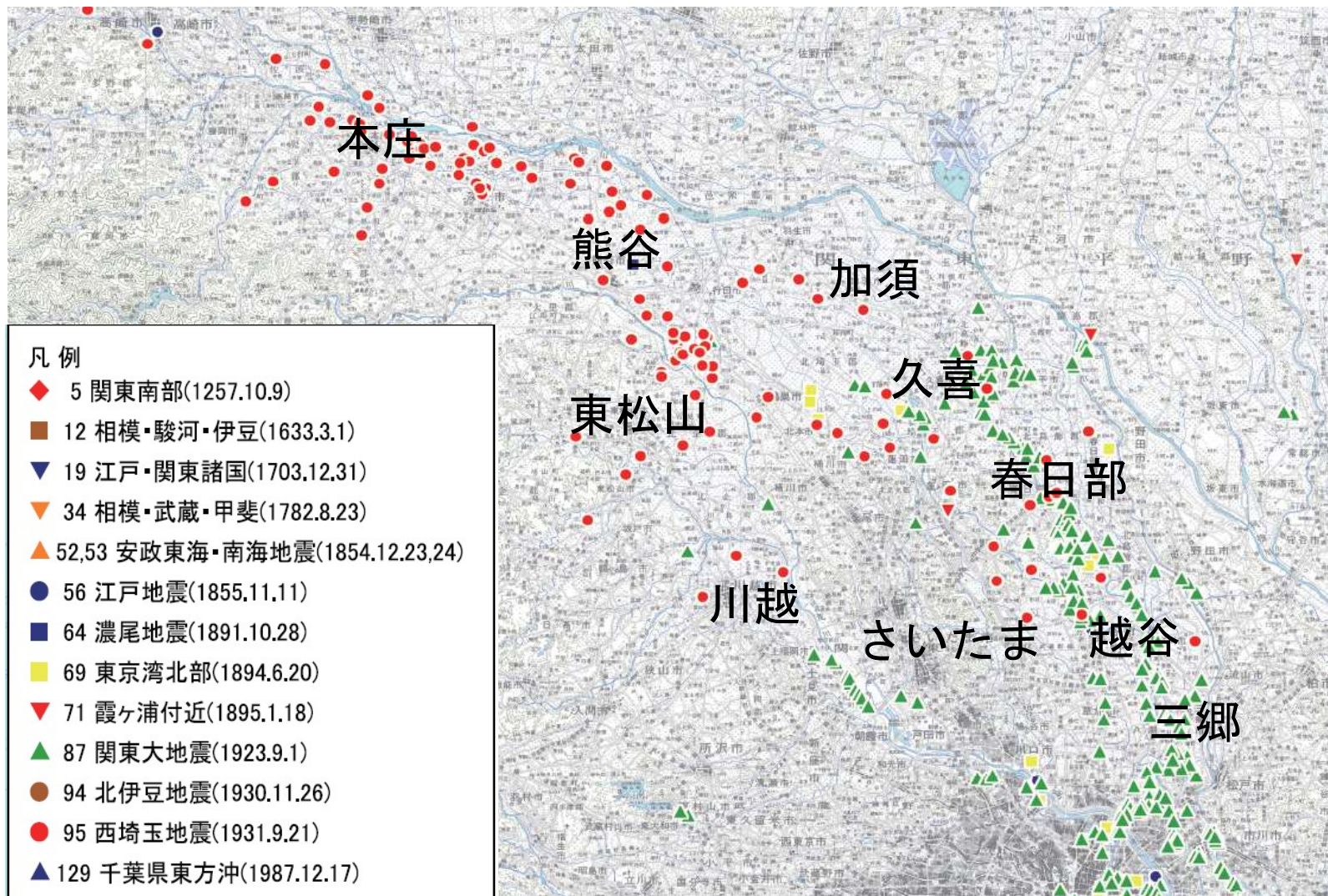
## 浦安市内の配水管漏水箇所



安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・斉藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，第16巻，第3号，pp.183-200，2016.

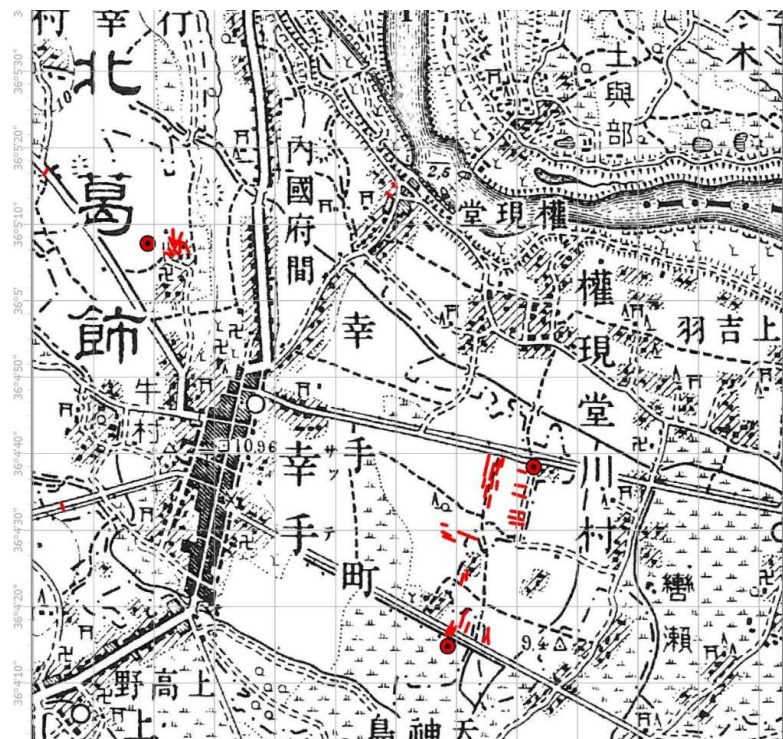
# 過去の地震時における埼玉県内で液状化が発生した箇所

## ①1923年関東地震と1931年西埼玉地震による液状化発生箇所



若松加寿江：日本の液状化履歴マップ745-2008、東京大学出版会、2011.

## ②1923年関東大震災における埼玉県の液状化被害例

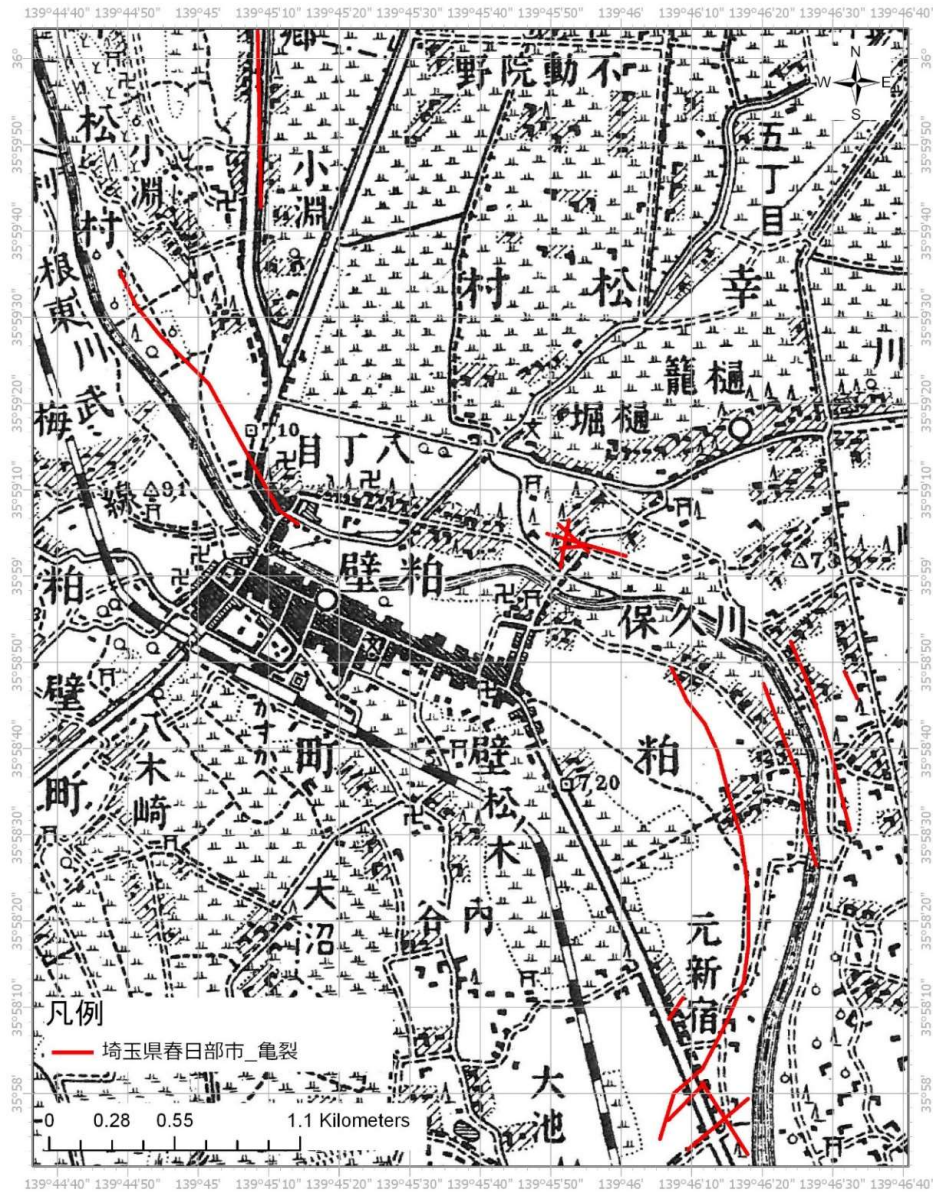


地質調査所によると、幸手の旧市街を取り巻く宅地や田畑に多数の地割れや噴砂孔を生じ、多量の砂水を噴出。

中川や古利根川沿いにも地割れが発生との証言もあった。



地質調査所によると、古利根川の北岸の畑、宅地、道路で川に並行な地割れ群ができた。その中でも杉戸小学校から杉戸駅にかけて大きな地割れや陥落地帯ができ、校舎などが傾斜・倒壊した。地割れや陥落地帯の幅は、最大5.4mもあり、多量の水、砂、浮石を噴出し、校庭が傾斜・倒壊した。



地質調査所によると、古利根川沿いの宅地、畑に多数の地割れができ、多量の砂水を噴出したため付近一帯15cm湛水し、砂も12cm堆積した。川久保の生垣が、古利根川の方に最大1.5m移動するなど、地盤の永久変位も発生した。地割れによって引き裂かれて半壊した家屋が少なかった。

また、元新宿では、国道4号線を斜めに横切る地割れが100mの間隔で2本でき、2本の地割れにはさまれた箇所は1m近く沈下したなどの証言もあった。

## 2011年東日本大震災により埼玉県で液状化した箇所

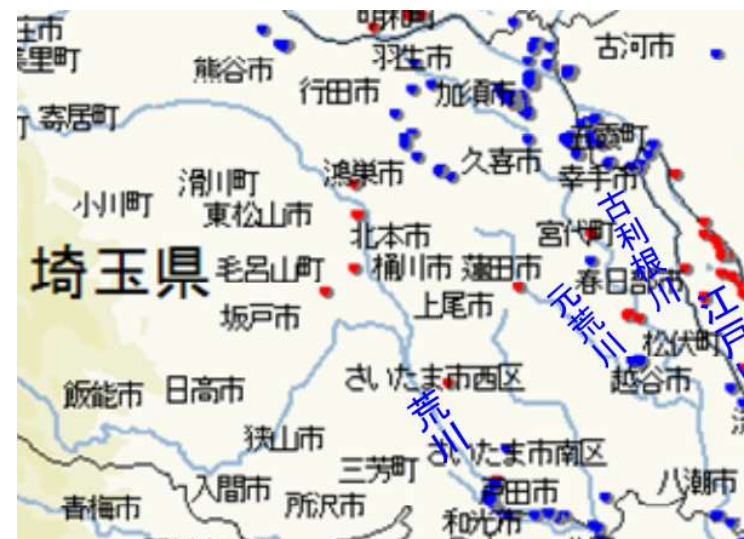
埼玉県でまとめられた液状化が発生した市町村



■液状化が発生した市町村

<https://www.pref.saitama.lg.jp/a1102/ekijyo/ukahasseibunpu.html>

若松・先名がまとめた液状化発生地点  
(埼玉県内の切り取った図)



●国土交通省関東地方整備局・地盤工学会(2011.8)  
●若松・先名による追加地点(2014.9.10)

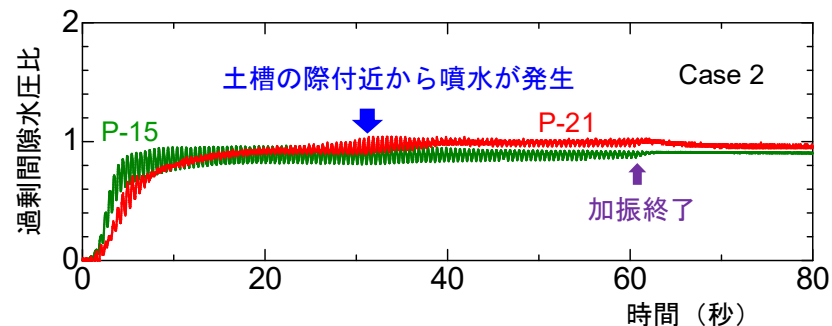
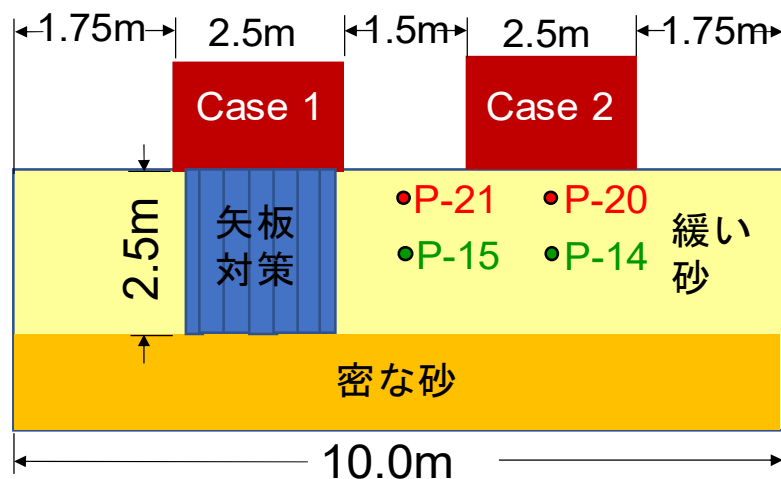
若松加寿江・先名重樹：2011年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生条件と土地条件，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.2，pp.25～44，2015。

## 2. 液状化により戸建て住宅がめり込み沈下し傾くメカニズム

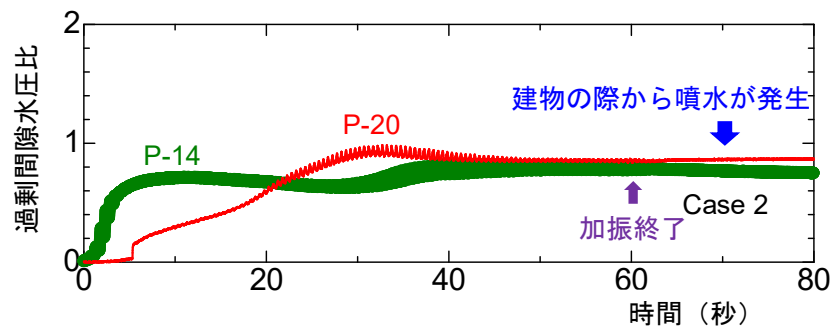
### 建築研究所の大型振動台を用いた実験

最終めり込み沈下量 = -4.1 cm

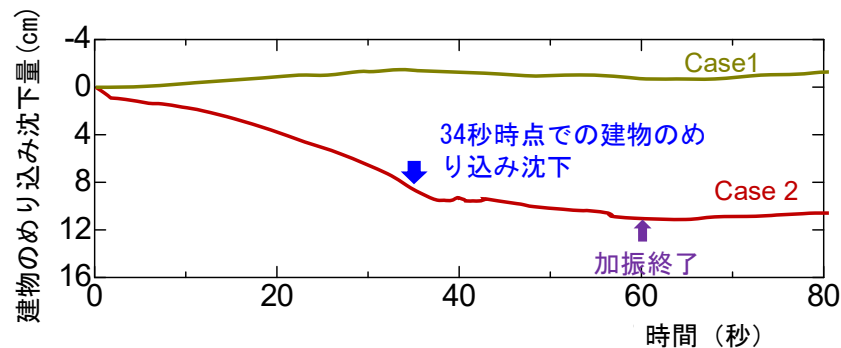
最終めり込み沈下量 = 14.1 cm



(1) 建物から離れた地盤での過剰間隙水圧比



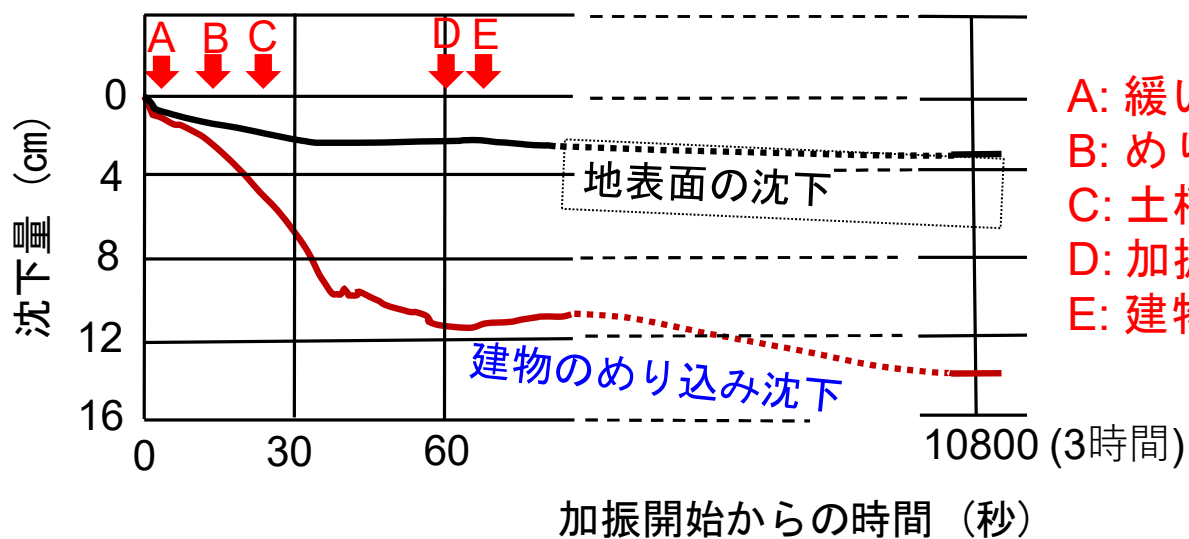
(2) 建物直下の地盤での過剰間隙水圧比



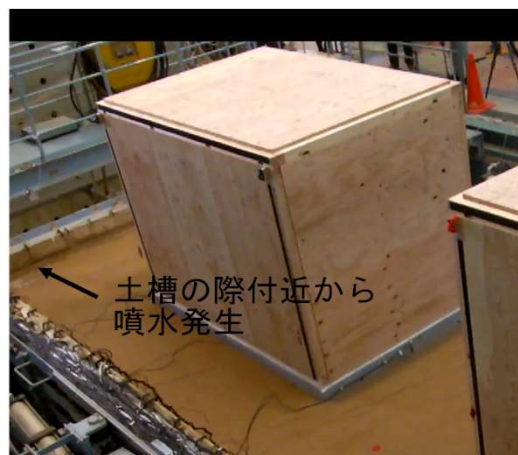
(3) 建物のめり込み沈下量



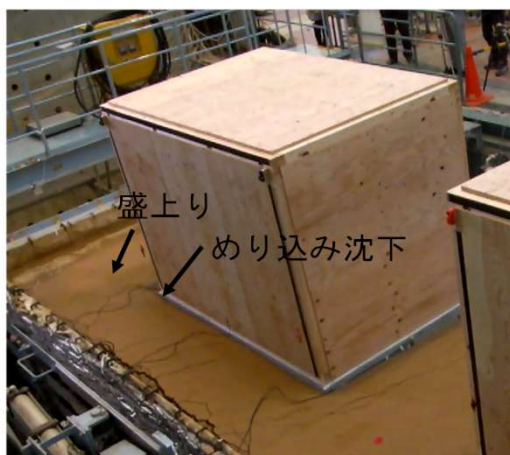
# 建物のめり込み沈下と地表面の沈下の時間経過



- A: 緩い砂で液状化が発生
- B: めり込み沈下が加速
- C: 土槽の際付近から噴水発生
- D: 加振終了
- E: 建物際から噴水発生



(1) 26秒後に土槽の際付近から噴水発生

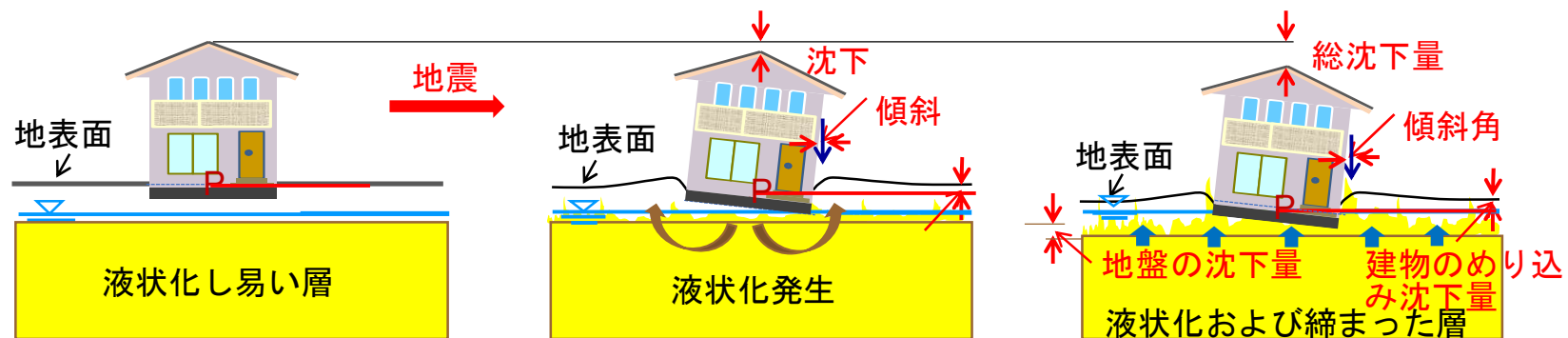


(2) 34秒後でのめり込み沈下状況



(3) 70秒後に建物際から噴水発生

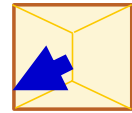
## 振動台実験や地震時の動画などから考察される液状化による建物のめり込み沈下や傾斜発生メカニズム



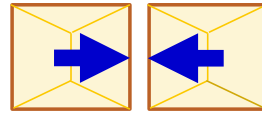
- (1) 噴水や噴砂が発生してできた穴に落ち込んで建物がめり込み沈下するのではなく、液状化によって軟化（せん断剛性が急減）した地盤に建物の荷重によりめり込んで沈下する。その際建物下の地盤を横方向に押しつけるため、建物周囲の地表面が少し盛り上がる。
- (2) 液状化層からの間隙水の絞りだしおよびそれに伴う体積圧縮はゆっくりと生じるため、地表面の沈下もゆっくり生じる。

# 建物の傾斜が生じる主要なメカニズム

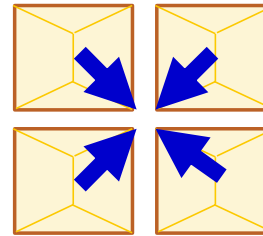
近接している住宅同士が傾斜に与える影響の事例



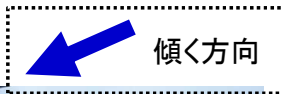
(a)1棟独立



(b)2棟が近接

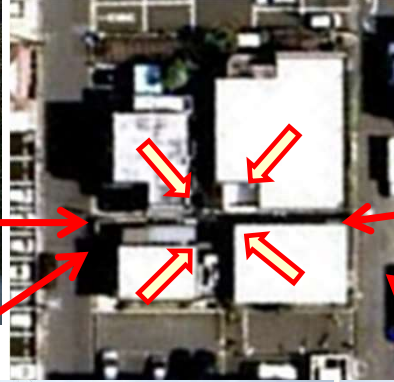


(c)4棟が近接

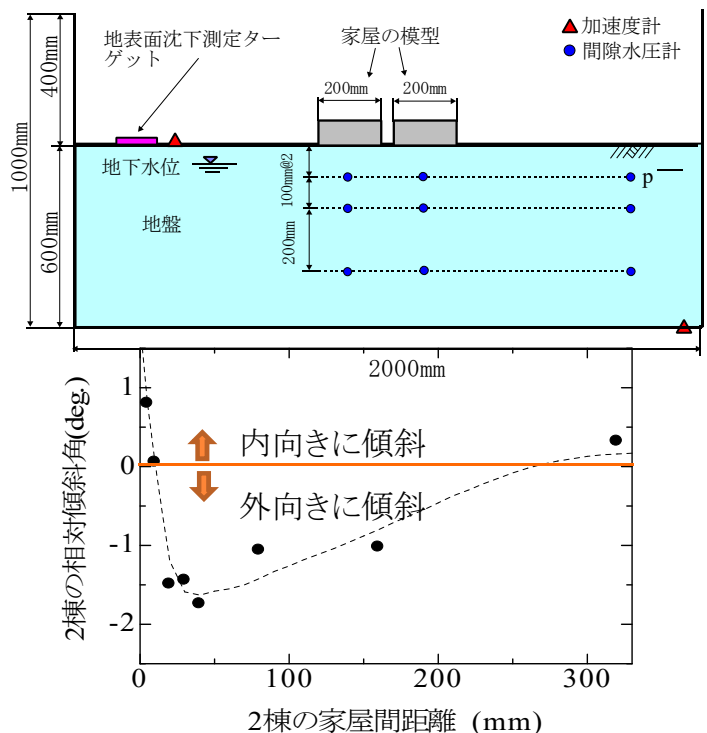




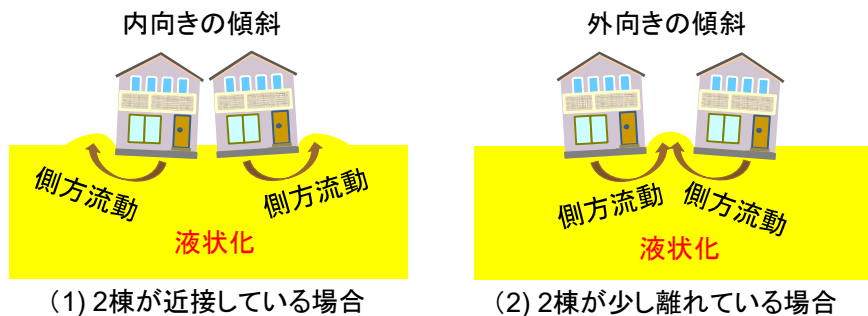
4棟の傾斜例  
(浦安)



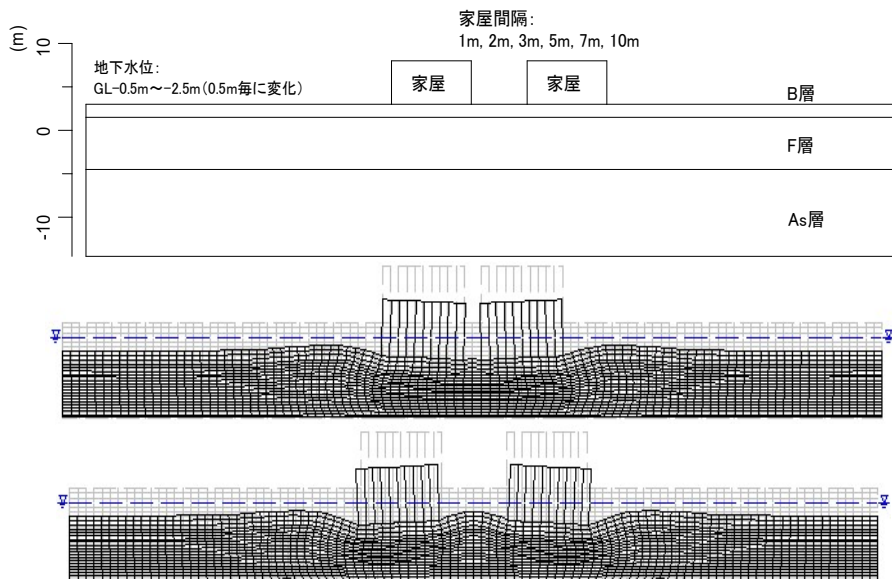
## 模型を用いた振動台実験



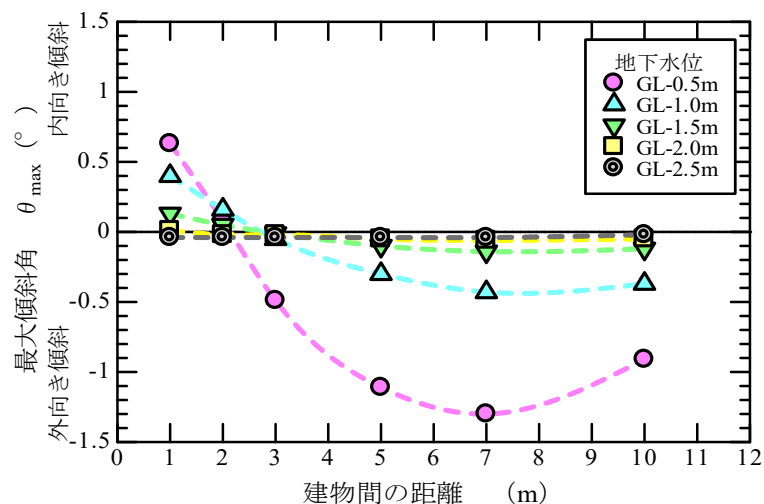
## 2棟間で傾斜が生じるメカニズム (私案)



## 地下水位の影響に関する残留変形解析“ALID”での解析例



- 近接していると内向きの傾斜が大。
- 地下水位が深くなると傾かなくなる。





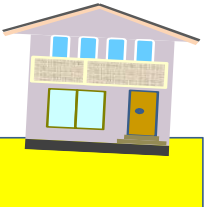
安田進・石川敬祐：  
地下水位低下が戸建て住宅の液状化対策に与える効果，日本地震工学会論文集，第15巻，第7号（特集号），pp.205-219，2015.

## 東日本大震災からの復旧・復興時に生じた問題

傾いた家の中で生活するとめまいや吐き気などの障害が生じる



東日本大震災の約2か月後に内閣府から出された被害判定基準

分類		全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊
判定基準	傾斜角	> 50/1000 	16.7/1000 ~ 50/1000 	10/1000 ~ 16.7/1000 	<10/1000
	沈下量	床上1mまで	床まで	基礎の天端 25cmまで	

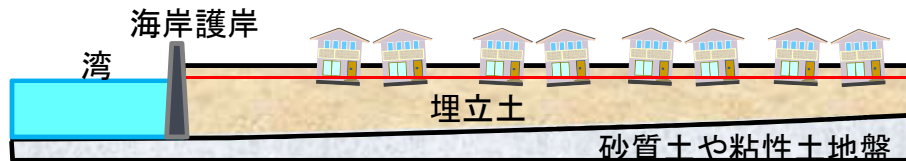
- 液状化により少し傾くだけで生活できなくなり、被災後持ち上げて水平化する沈下修正が必要。
- 沈下修正だけ(液状化対策なし)でも300万円~500万円程度必要、他に外構などと修復費も必要。

### 3. 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

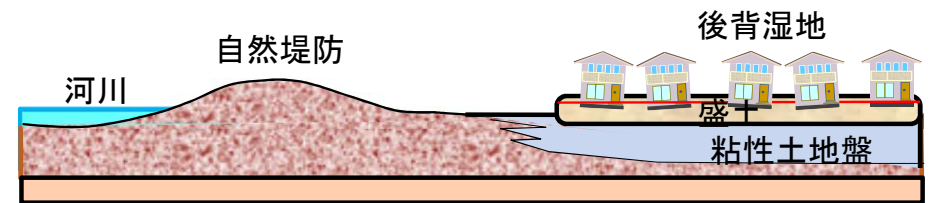
#### 2011年東日本大震災で液状化した地点の大半は人工改変地

- 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⑤ 粘性土地盤上の盛土地（久喜市など）



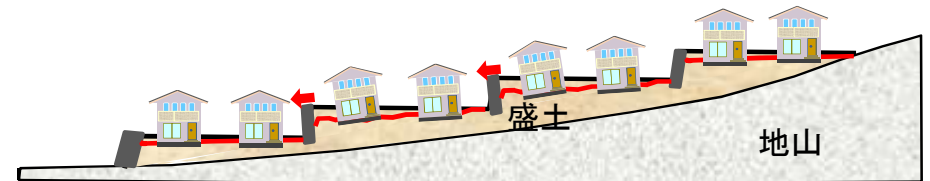
タイプ② 池・水路・河道などの局所的な埋立地



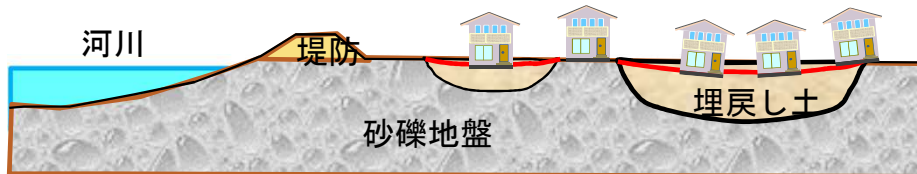
タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地



タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地（東海村など）



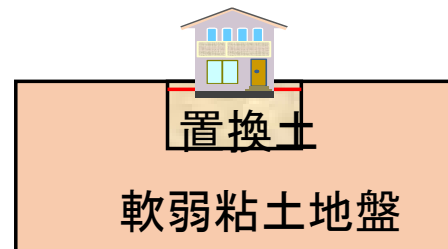
タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地（神栖市など）



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>23</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

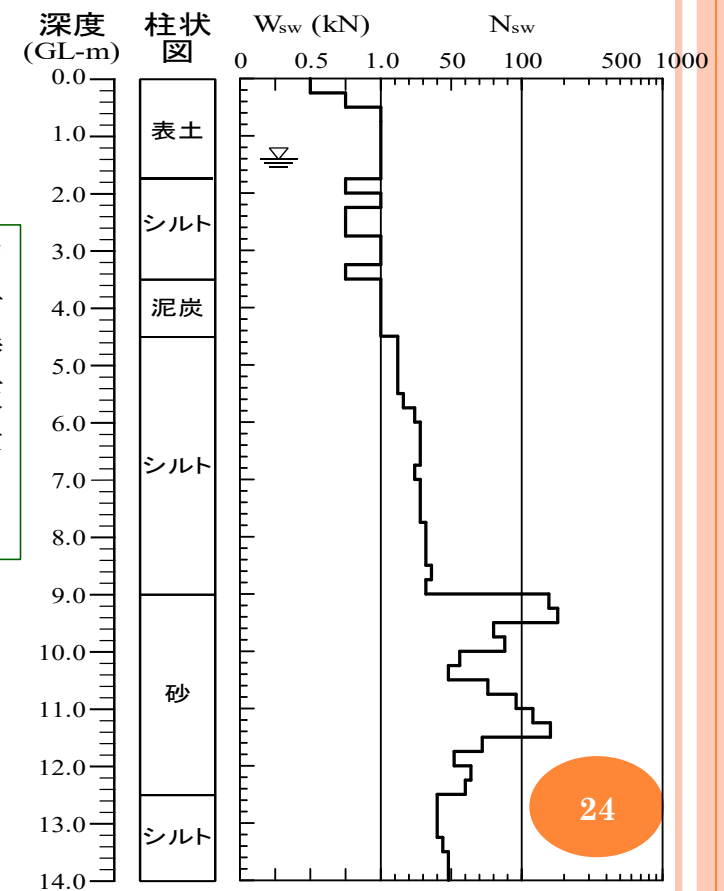


規矩大義・安田進・田中智宏・石川敬祐・掛川智仁・伊藤忠・浜野義明：2003年十勝沖地震における住宅基礎の被害，第39回地盤工学研究発表会，No.978，pp.1953-1954，2004.

☆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

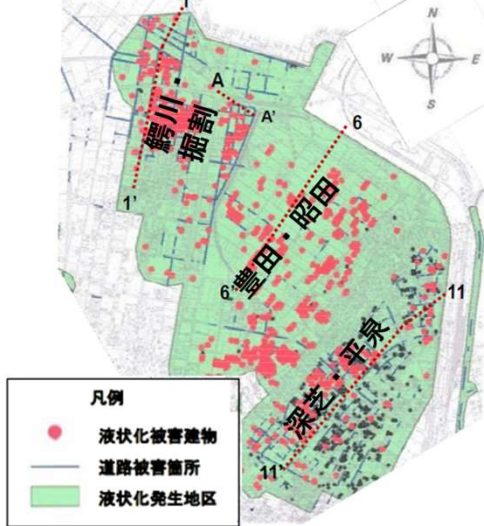




# タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地 東日本大震災時の神栖市での液状化被害

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)

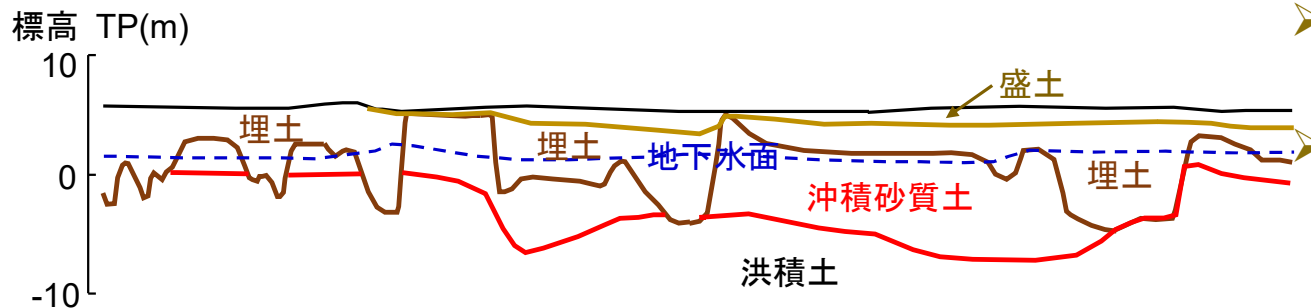
砂利掘削・埋め戻した箇所



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



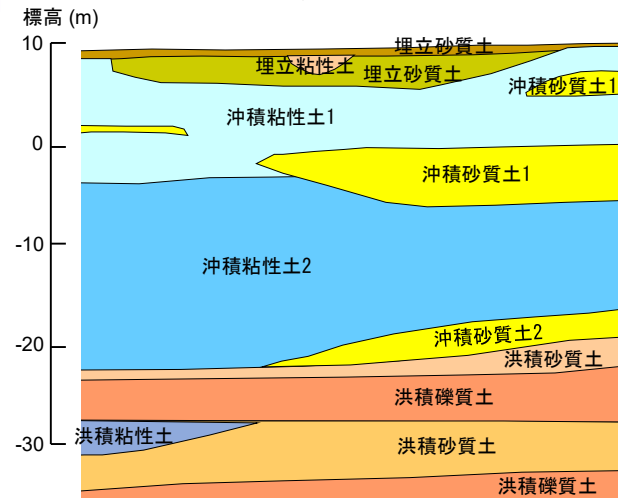
- 砂州・砂丘で建設用の砂利を採取し、埋め戻した箇所が液状化。
- 掘削後の埋土ではボーリングが行われていない！
- 地震後に行った表面波探査で断面が推定できた。

## 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)

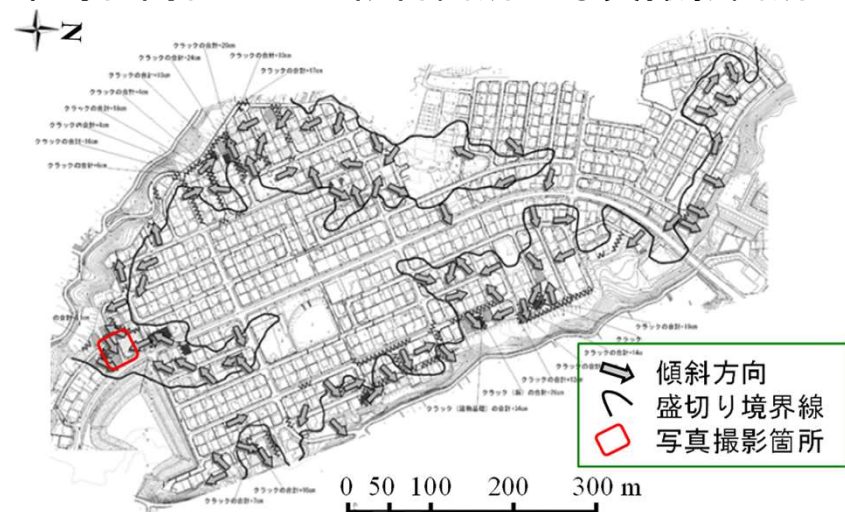
## 2004年新潟県中越地震での被害



## 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



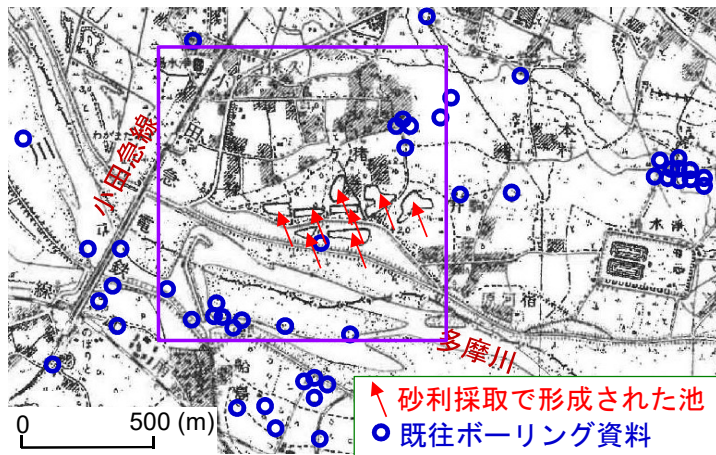
橋本隆雄・大山丈吉・安田進：東日本大震災による東海村南台団地・緑ヶ丘団地の被害分析及び復旧対策について，地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—，pp. 366-374，2014.

- ☆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。

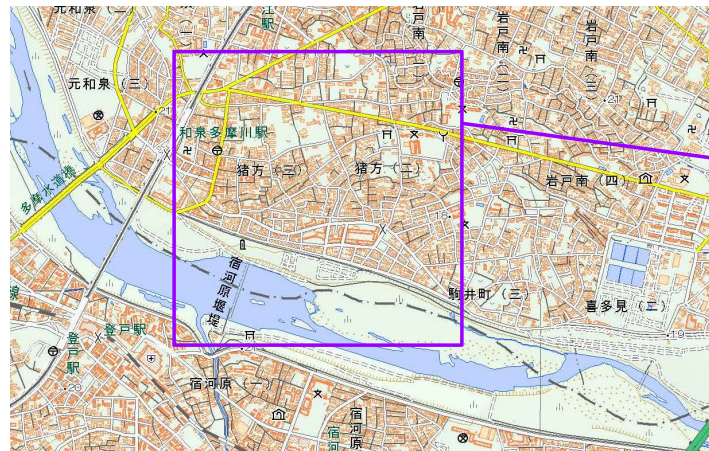
# 人工改変地における既往ボーリングの不足とハザードマップでの見落とし

## 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

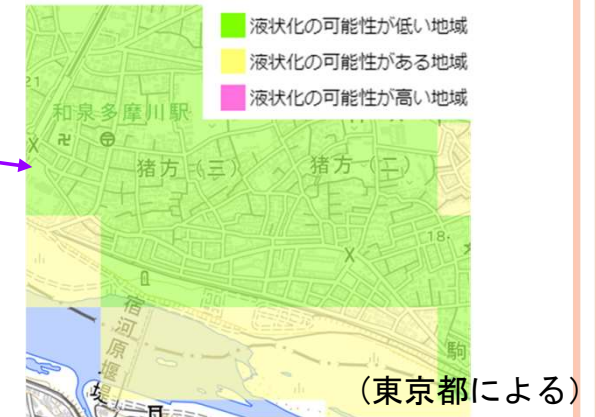
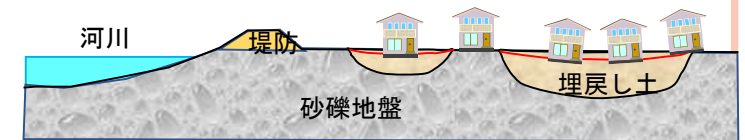
### 多摩川沿いの砂利採取地の事例



(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なく、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

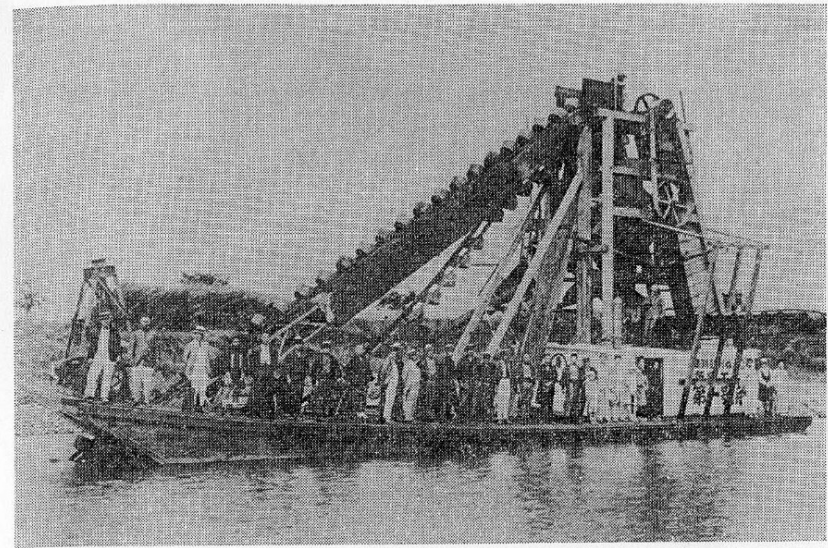
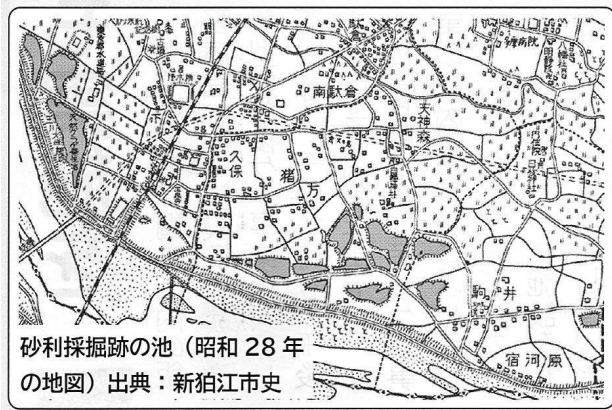


図6-24 砂利採掘船（浮岳堯侃提供）



（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



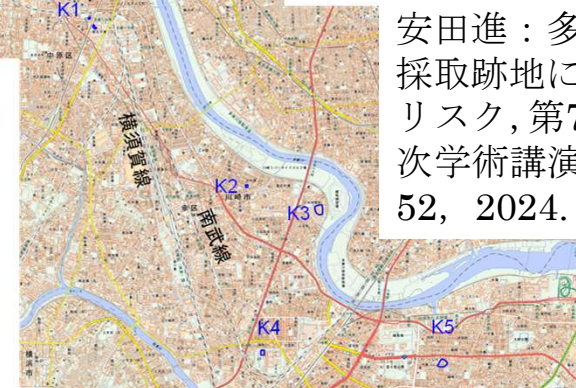
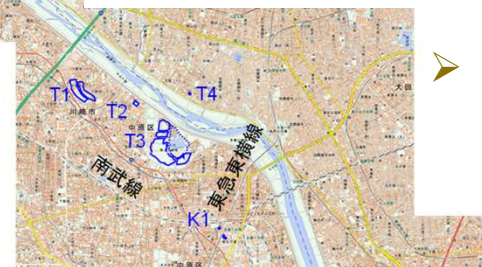
(現在の国土地理院2万5千分の1地形図に追記)

- 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		×	○ ○ ○	+

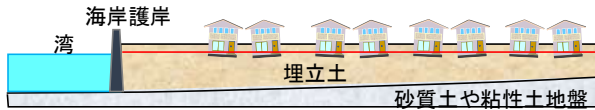
×:砂利採取池なし ○:砂利採取池表示有 +:砂利採取跡地利用済



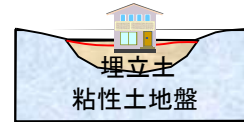
- 砂利の採取は一時期だけなので、古すぎる旧版地形図だけを参考にはいけない。

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



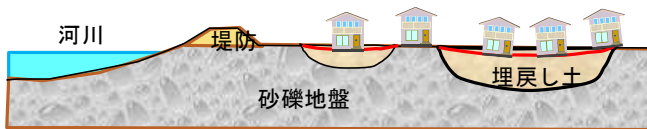
### タイプ② 局所的な埋立地



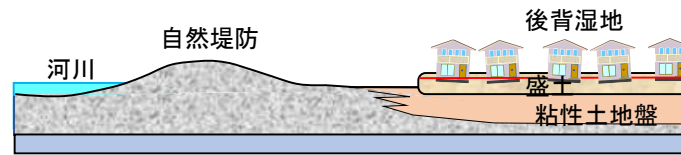
### タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地



### 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



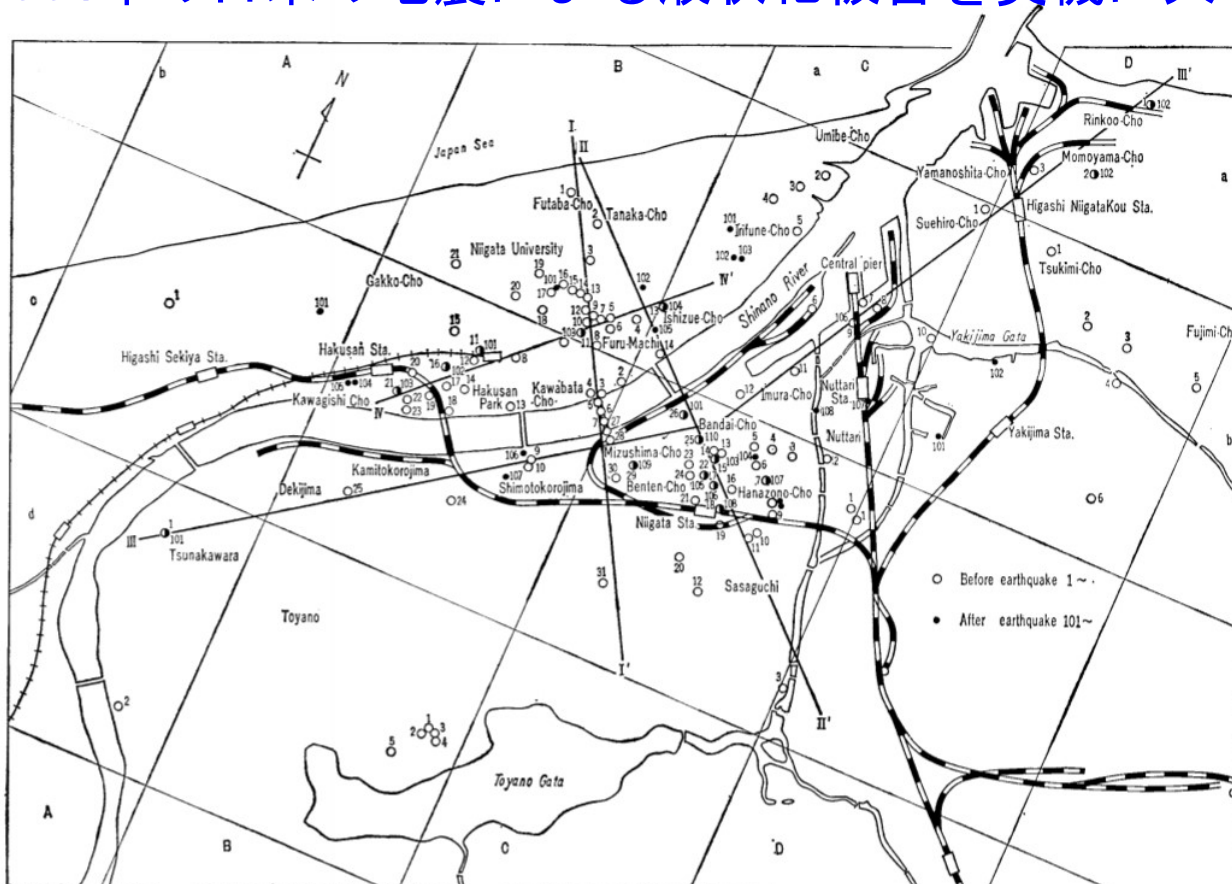
- 人工改変地の戸建て住宅地では**造成後の地盤状況を把握するボーリングは一般に行われない**。戸建て住宅には支持力確認のためのスクリーウエイト貫入試験が行われる程度。したがって、既往の**タイプ②～⑥の人工改変地では液状化の判定を行える既往ボーリングがない**。
- **タイプ①**は広く中・高層建物建築用のボーリングがあるが、公開されないものが多い。
- 液状化ハザードマップ作成時に既往ボーリングデータがない箇所では、**周囲の異なった種類の地盤のデータを用いて液状化判定を行う**。また、**⑥は丘陵・台地のため対象外**にされる。したがって、**タイプ①以外の液状化し易い人工改変地の戸建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

## 4. 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



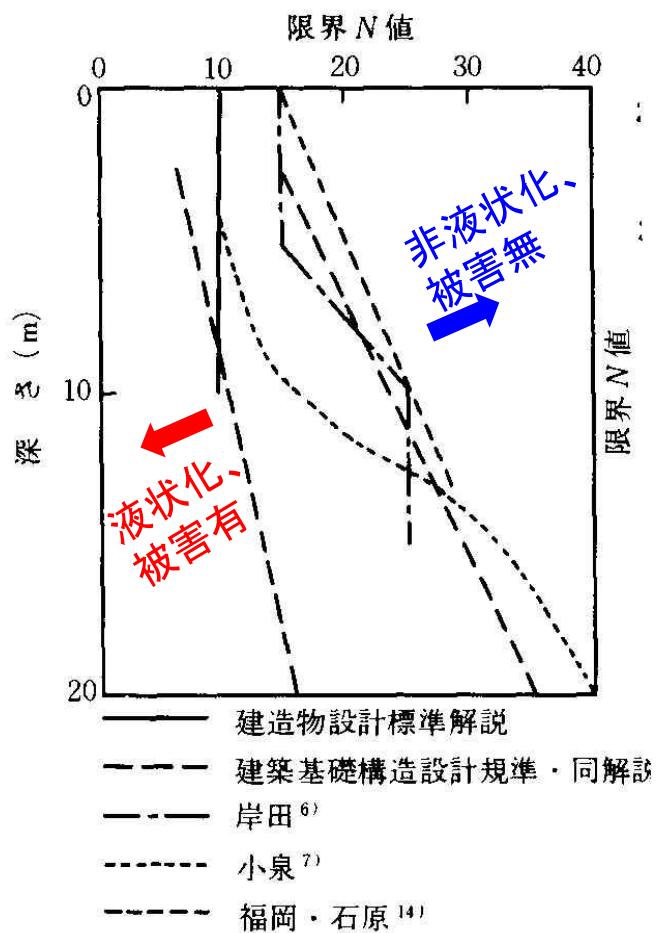
米国：アラスカ地震、  
日本：新潟地震

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

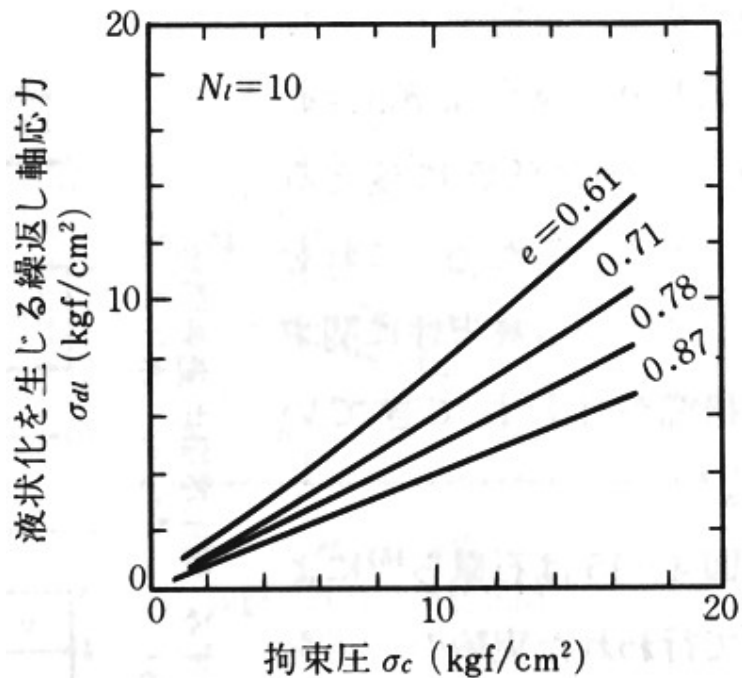
(栗林、龍岡、吉田、1974による)



## 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

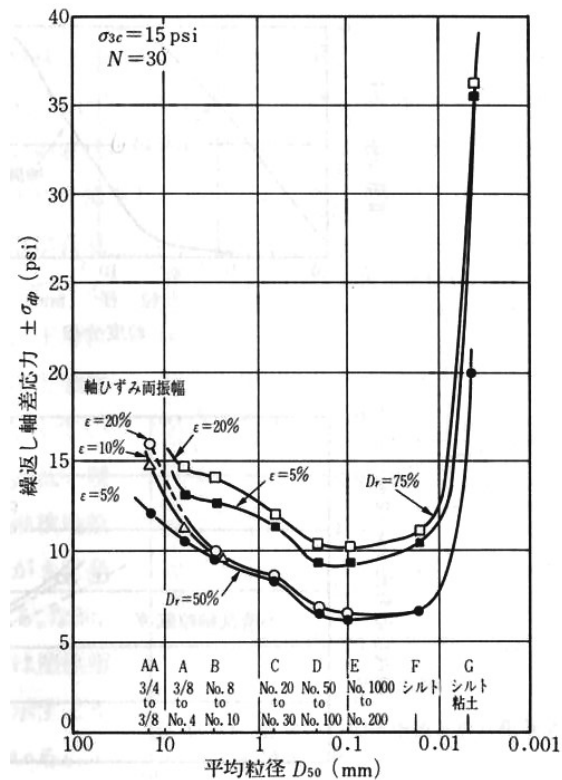
### 拘束圧の影響



(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



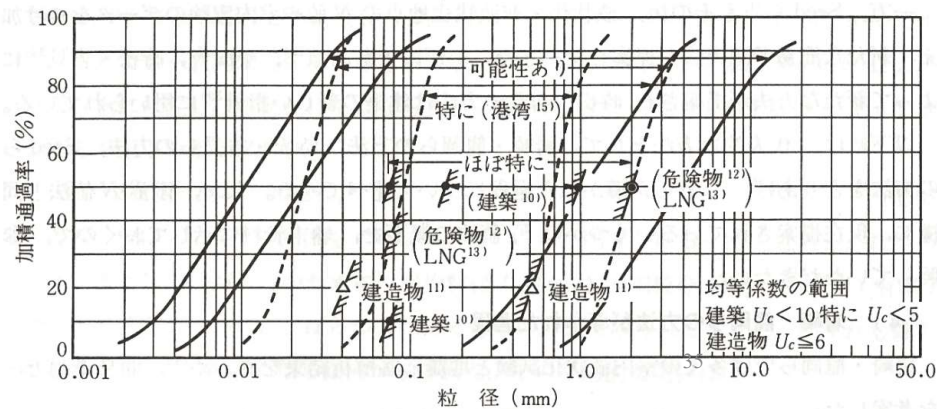
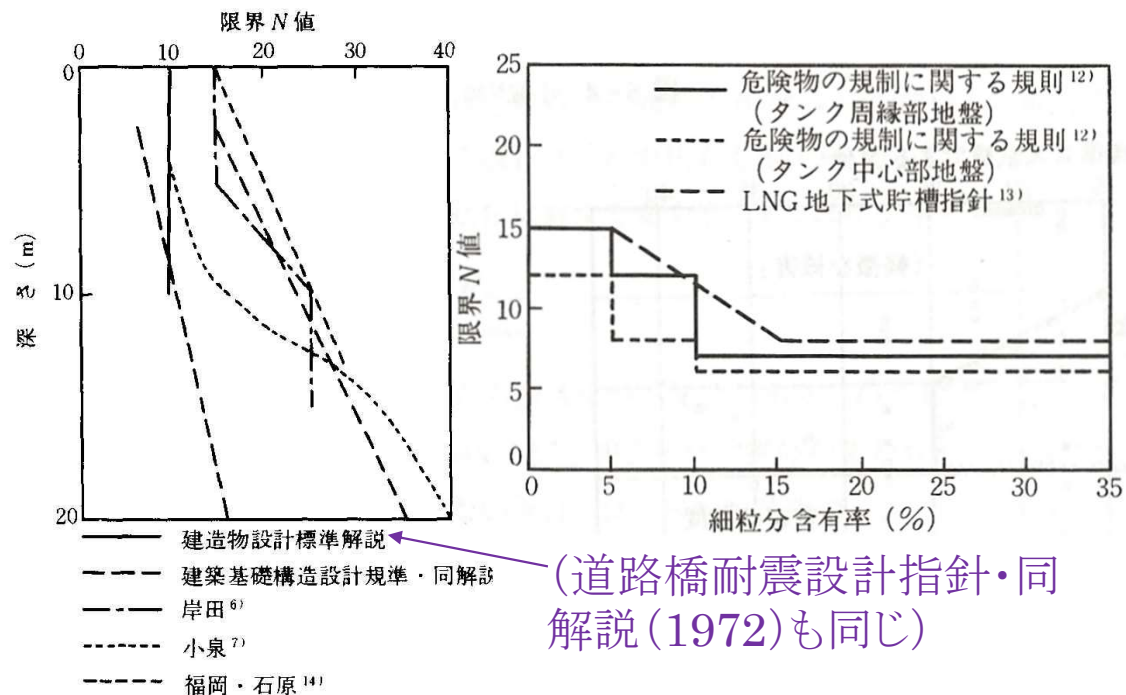
(Lee & Fitton, 1969)

# 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

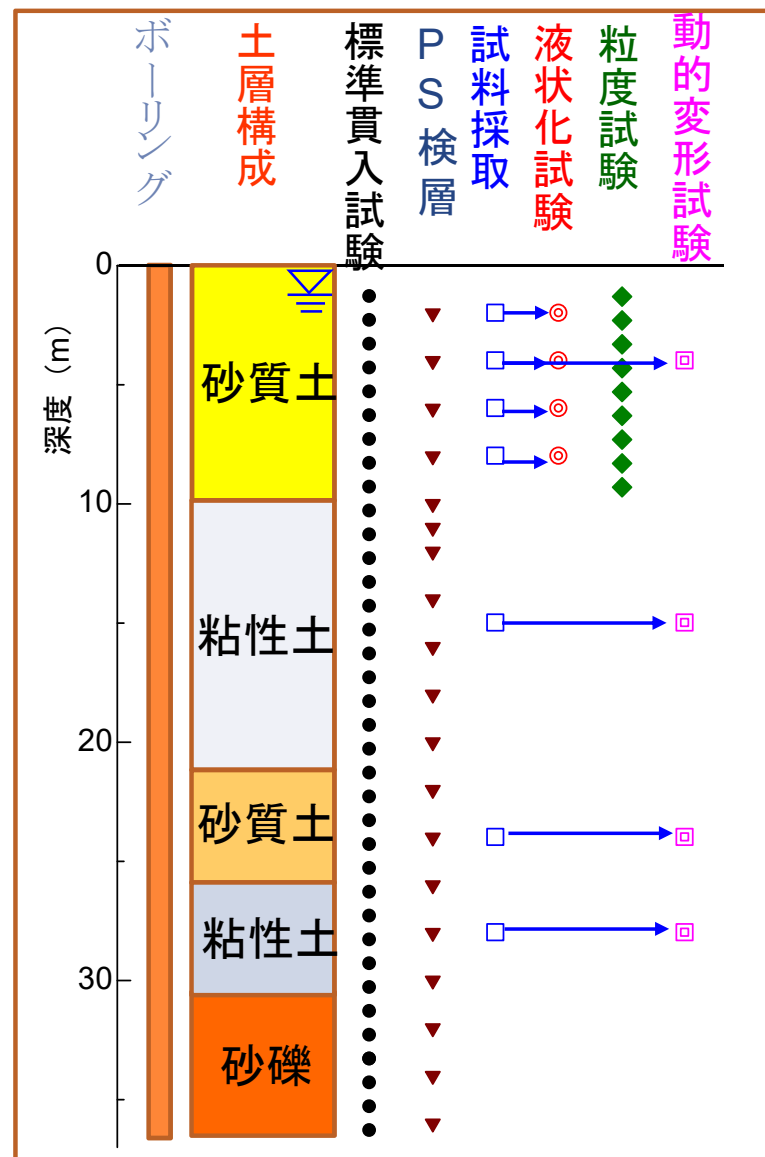
- ☆地震時に地盤内で発生する繰返しせん断力と、液状化強度を比較して液状化の発生を判断する方法が提案された。
- ☆Seed & Idrissにより繰返しせん断力を手計算で推定する簡易方法が1971年に提案された。

### 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。

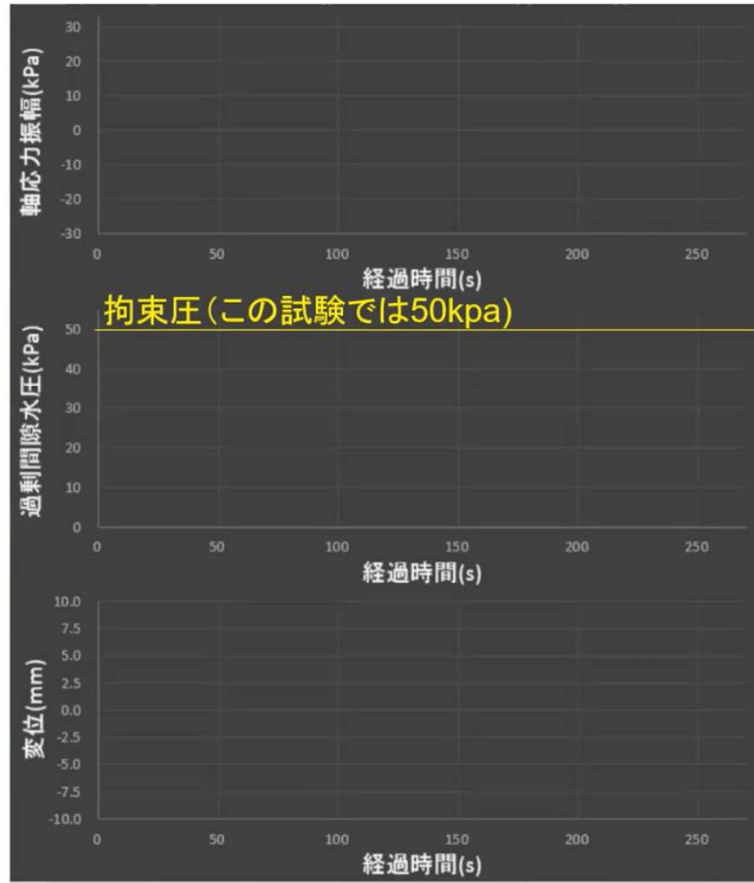
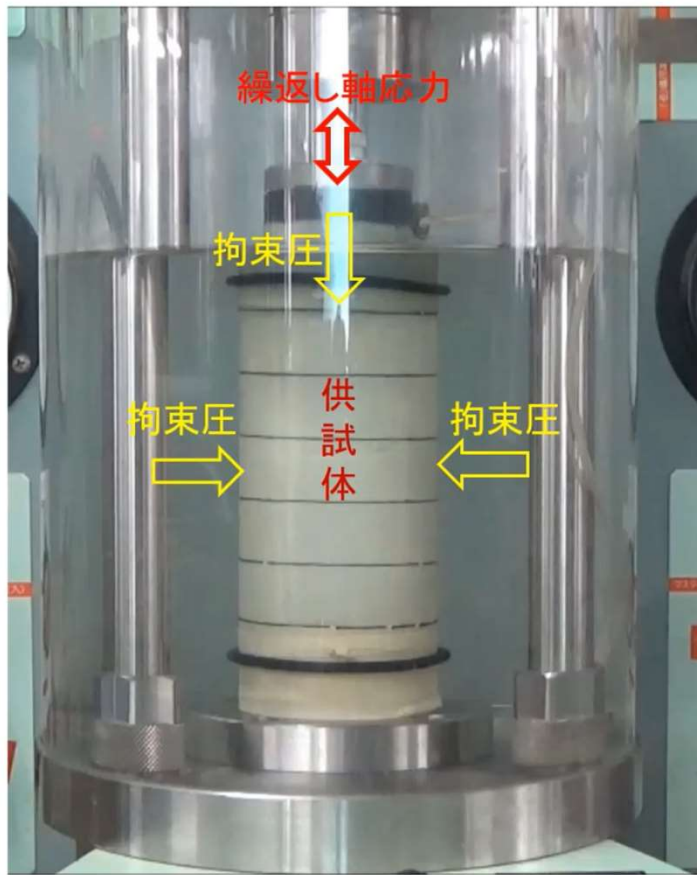
# 地震応答解析や室内液状化試験に基づく詳細な判定方法

全応力法の場合



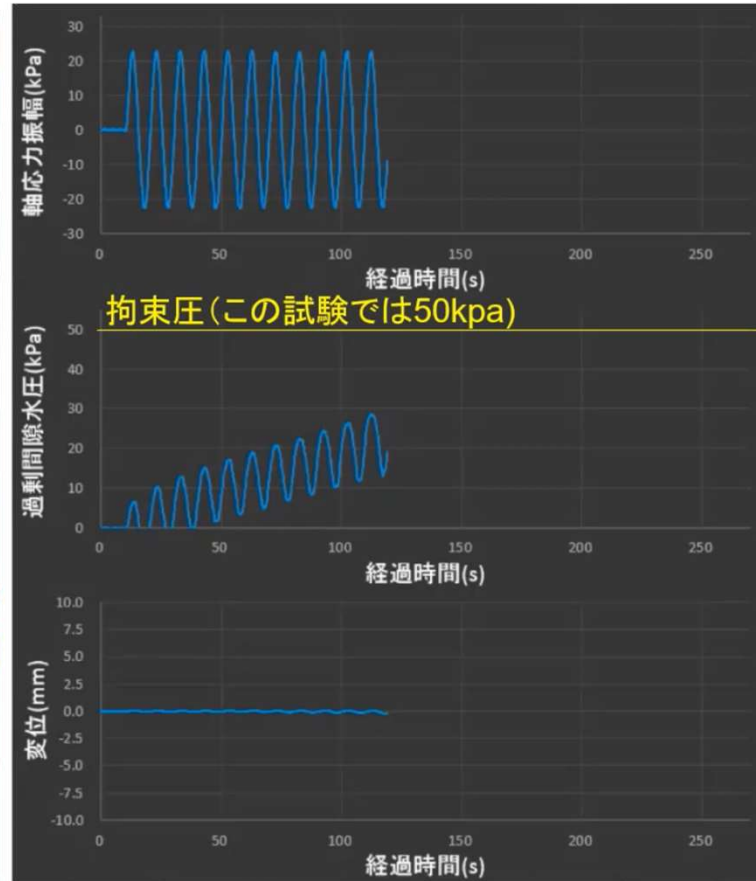
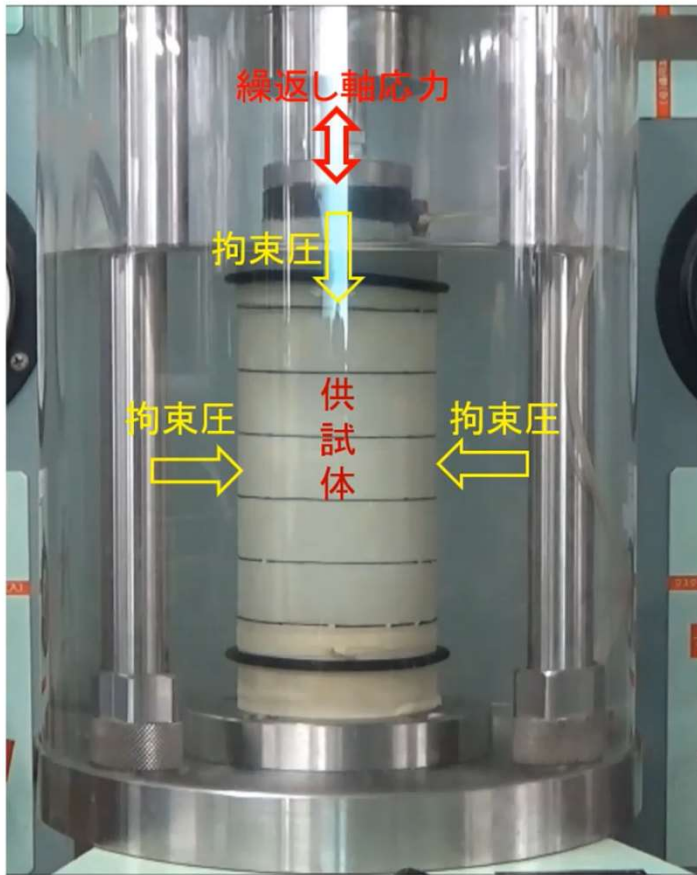
# 繰返し三軸試験装置による液状化試験例（前半）

スタート

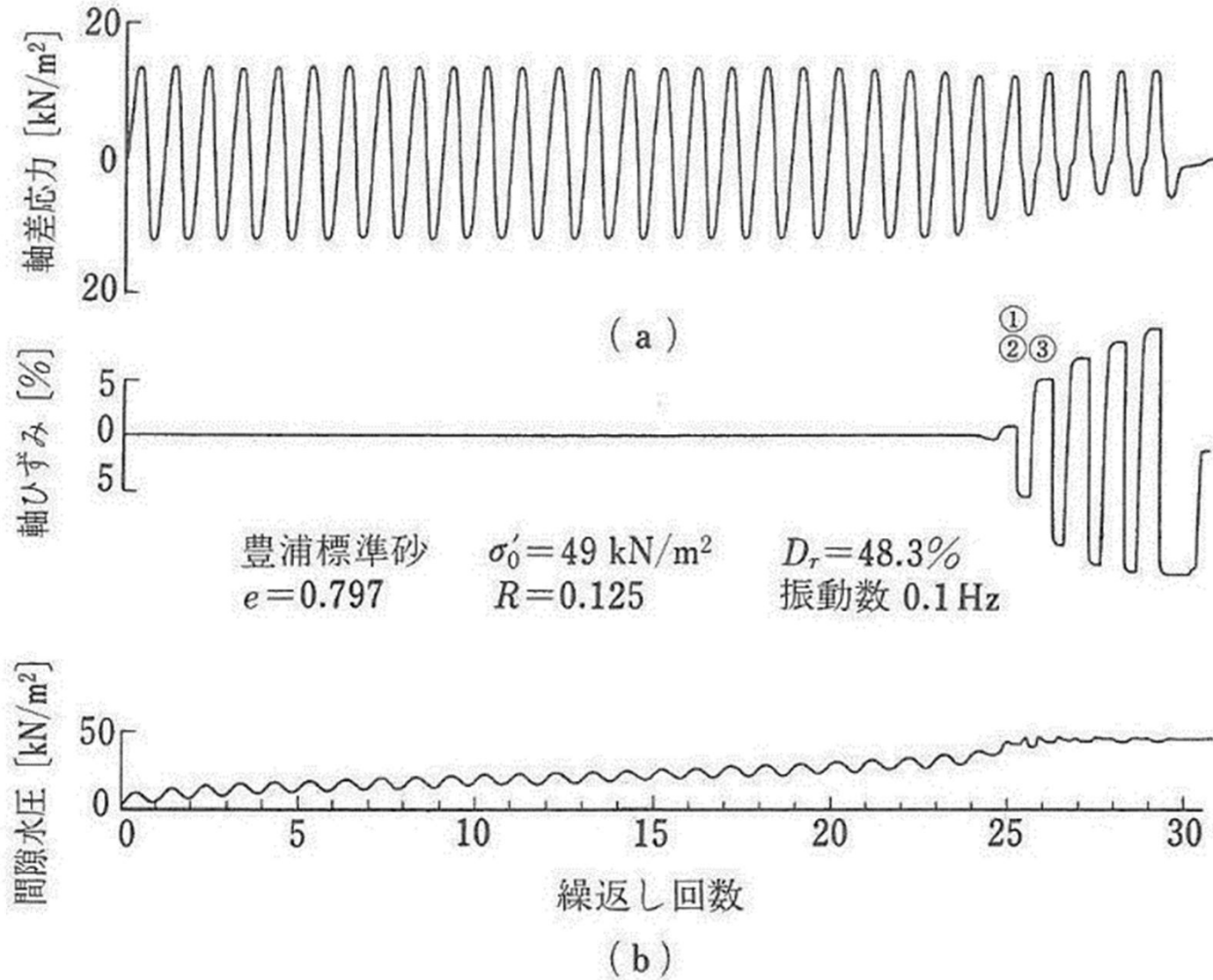


# 繰返し三軸試験装置による液状化試験例（後半）

スタート



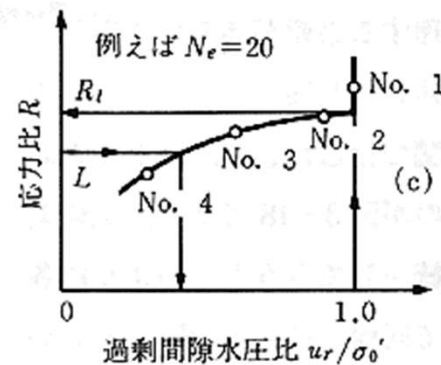
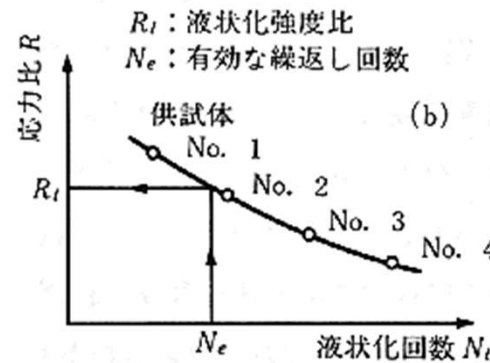
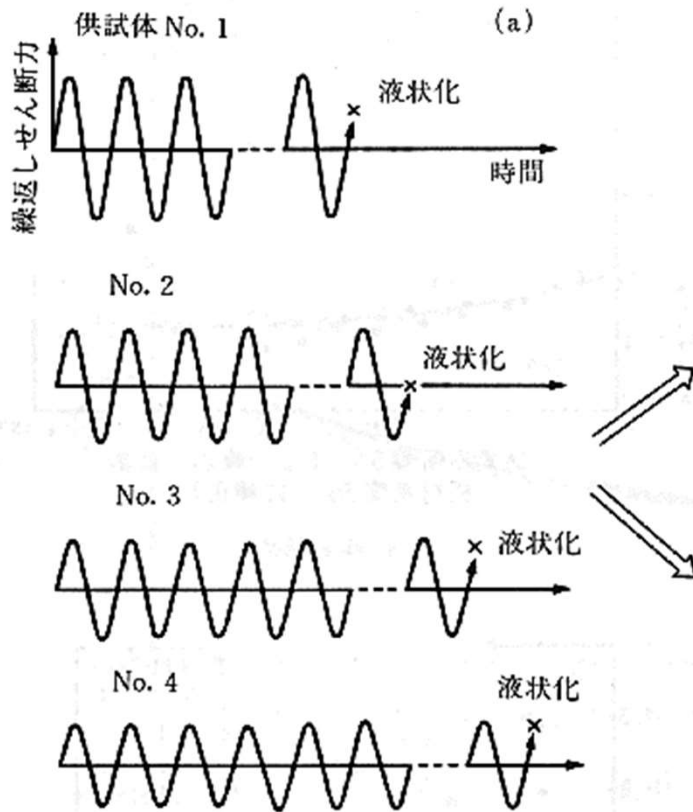
# 液状化試験結果例





## 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)

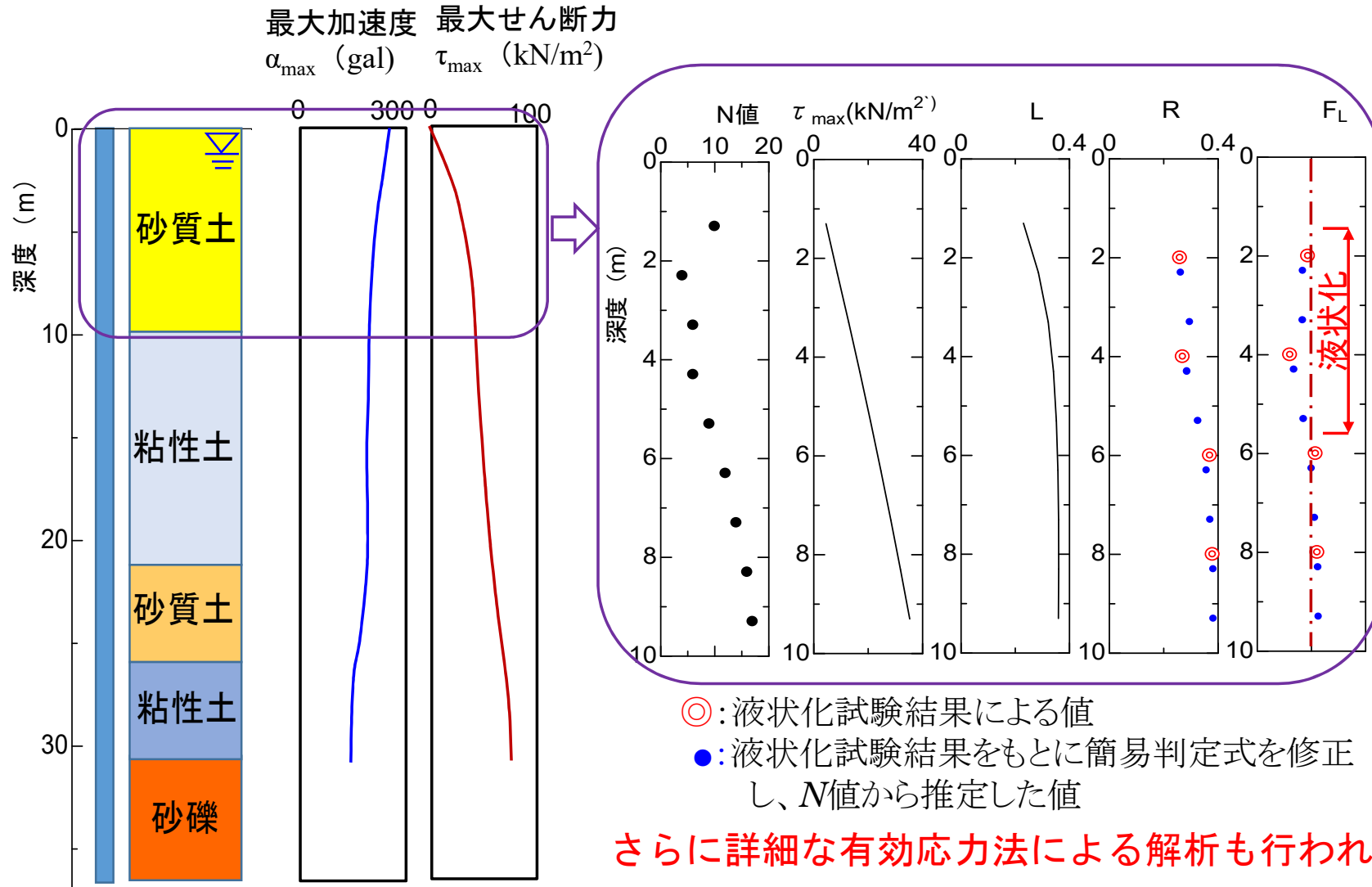
$F_L$  : その深さでの液状化に対する  
安全率 (抵抗比)

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

$F_L < 1$  : 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

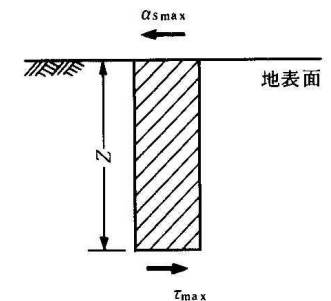
- 1971年に米国でSeed & Idrissが簡易的に $L$ を推定する方法を提案。
- 水平地盤内の土柱を想定し、地表最大加速度と同じ加速度で水平方向に剛体運動をしている場合に土柱の底面に働く最大せん断力 $\tau_{\max}$ を次式で表した。

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

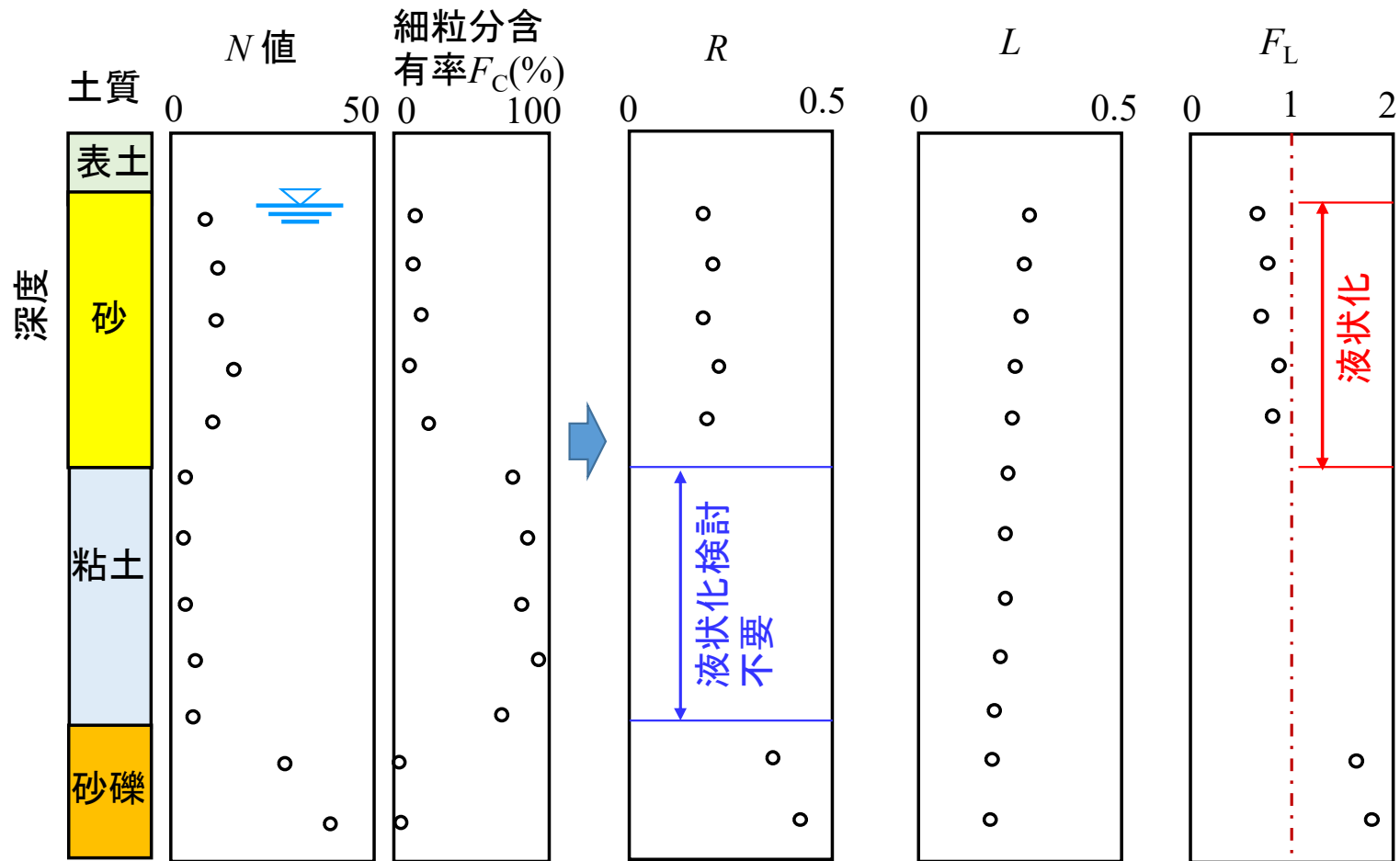
- 深さ方向の補正係数 $r_d$ を導入し、有効上載圧 $\sigma_v'$ で除して次式のように表した。

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

- 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。

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

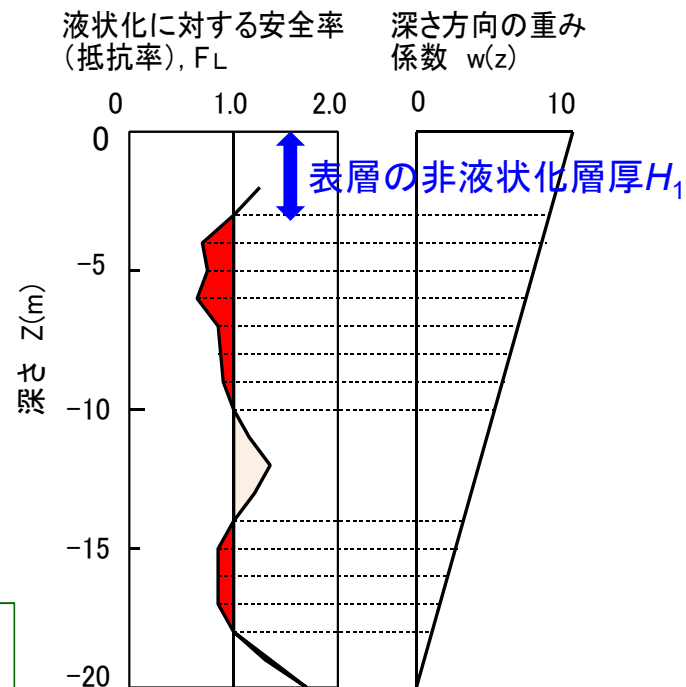
ただし $F_L > 1$ の場合は $(1 - F_L)$ は0

$P_L$ 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。