

土木学会耐震工学委員会

耐震性評価のための地盤調査・土質試験の  
運用事例ワークショップ

## 各種地盤における実地震・加振による サウンディング値の変化

2021年11月16日  
(株) 不動テトラ  
原田 健二



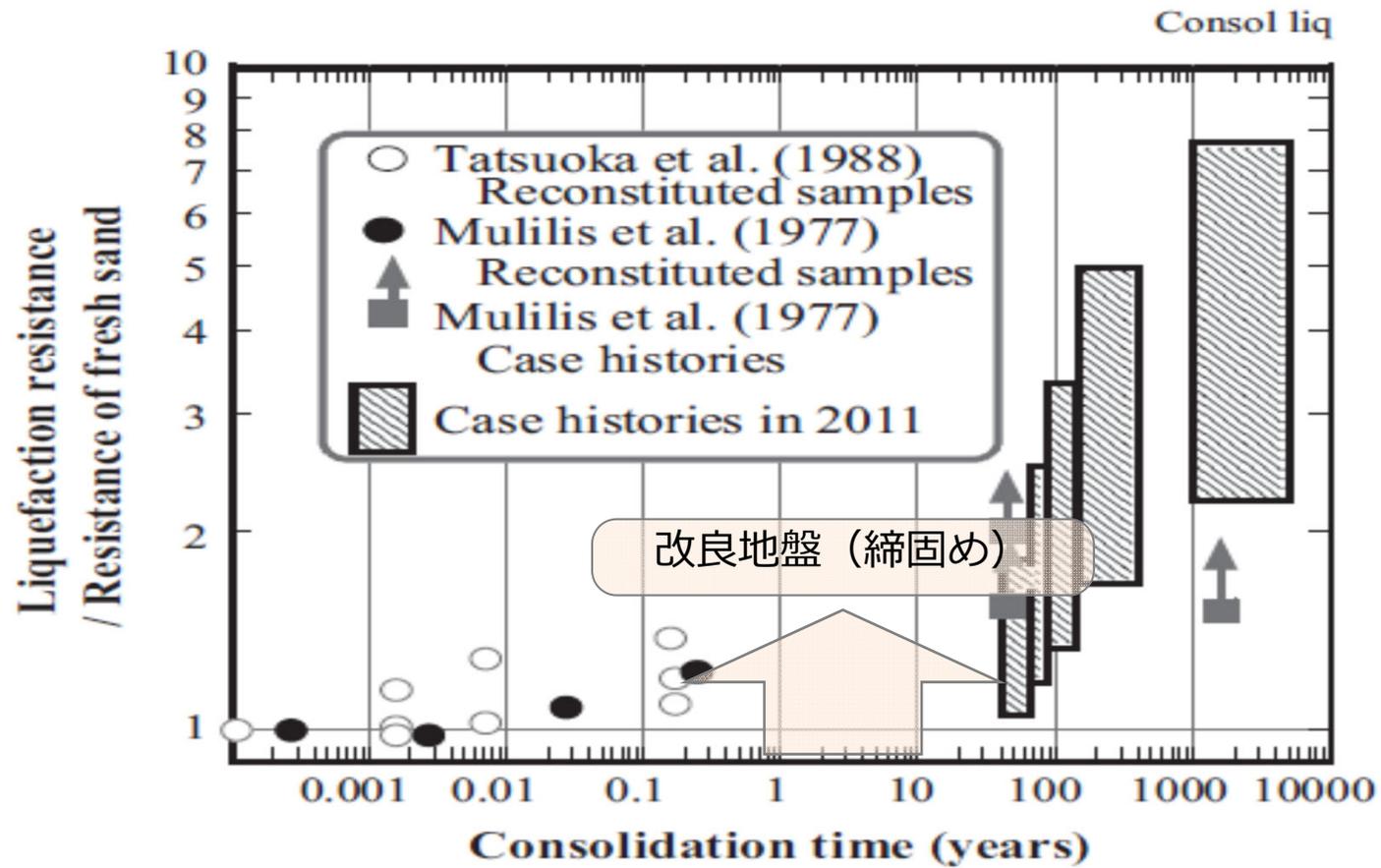
## 目次

## 頁

<b>1. 対象地盤</b>	2
<b>2. 整理した実験・調査事例一覧</b>	3
<b>3. 整理結果</b>	4
振動台・加振実験の事例	4
実地震による調査事例	11
<b>4. まとめ</b>	19
<b>【参考文献】</b>	20

# 1. 対象地盤

1) Towhata et al. (2014)



模型地盤

埋立地盤

沖積層

洪積層

人工地盤

自然地盤

## 2. 整理した実験・調査事例一覧

### 〔振動台・加振実験〕

No	文献	実験場所	土槽・材料条件	加振条件	サウンディング	備考
①	Sasaki and Taniguchi (1982)	土木研究所	・両脇にgravel pile ・高さ3m×幅12m ・千間山砂 (Dr=45%)	200gal×3回 1min (5Hz)	コーン貫入試験 qc値	グラベル ドレーン 含む
②	1.菅野・中澤 (2009)	石狩湾新港 (2007)	石狩湾新港 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">埋立地盤</span> (格子状: B, H=8m)	地表面水平震度 Kh=0.25	N-value	格子状 固化 含む
	2.楠ら (2011)	————	・545×462×708mm ・相馬5号珪砂 (Dr=50%)	15秒 カケヤ打撃	簡易動的コーン貫入 試験 (PANDA)	
③	矢部・古関ら (2021)	東京大学 (2020)	・未改良・改良地盤 (岐阜珪7号砂Dr=60%→90%) ・2820×900×600mm	100→500gal (段階加振) 正弦波20波 (5Hz)	qc値	締固め (SCP) 含む

### 〔実地震〕

No	文献	地震名	サウンディング場所	加速度	サウンディング	備考
④	Koizumi (1966)	1964年 新潟地震	新潟市 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">埋立・沖積層</span> Old town section Rail road sta. section	150~200gal(?)	N-value	
⑤	Takahashi and Tanimoto (1996)	1995年 兵庫県南部地震	神戸市ポートアイランド Untreated <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">埋立地盤</span> Sand drain Compaction	350gal	N-value	締固め (RC) 含む
⑥	1.石井ら (2012)	2011年東北地方 太平洋沖地震	浦安市中町 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">埋立地盤</span> (格子状: B, H=8m)	地表面水平震度 Kh=0.25	スウェーデン式 サウンディング Nsw	
	2.安田・橋本 (2017)		我孫子市住宅地 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">埋立・沖積層</span>	517.5gal (柴崎台)	N-value	

# 3. 整理結果

2) Sasaki et al. (1982)

## 振動台・加振実験の事例

### ① 振動台実験 (土研)

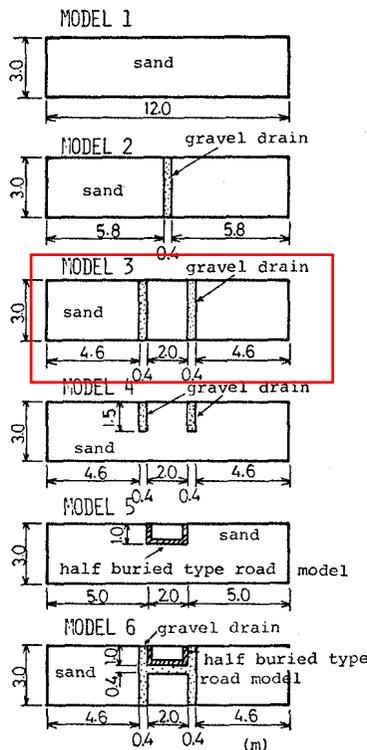


Fig. 1. Models used in the shaking table tests

実験概要

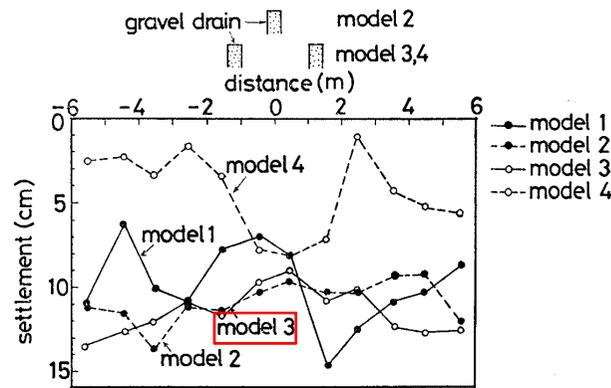


Fig. 8. Final settlement of the model ground surface caused by liquefaction

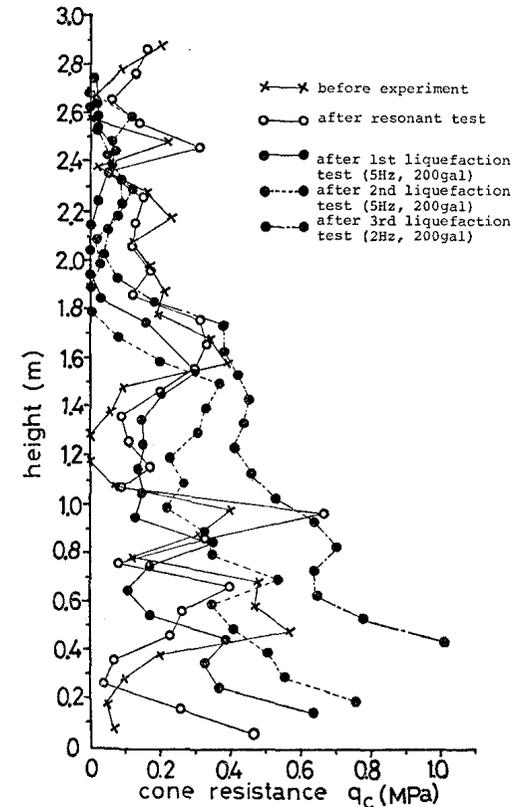
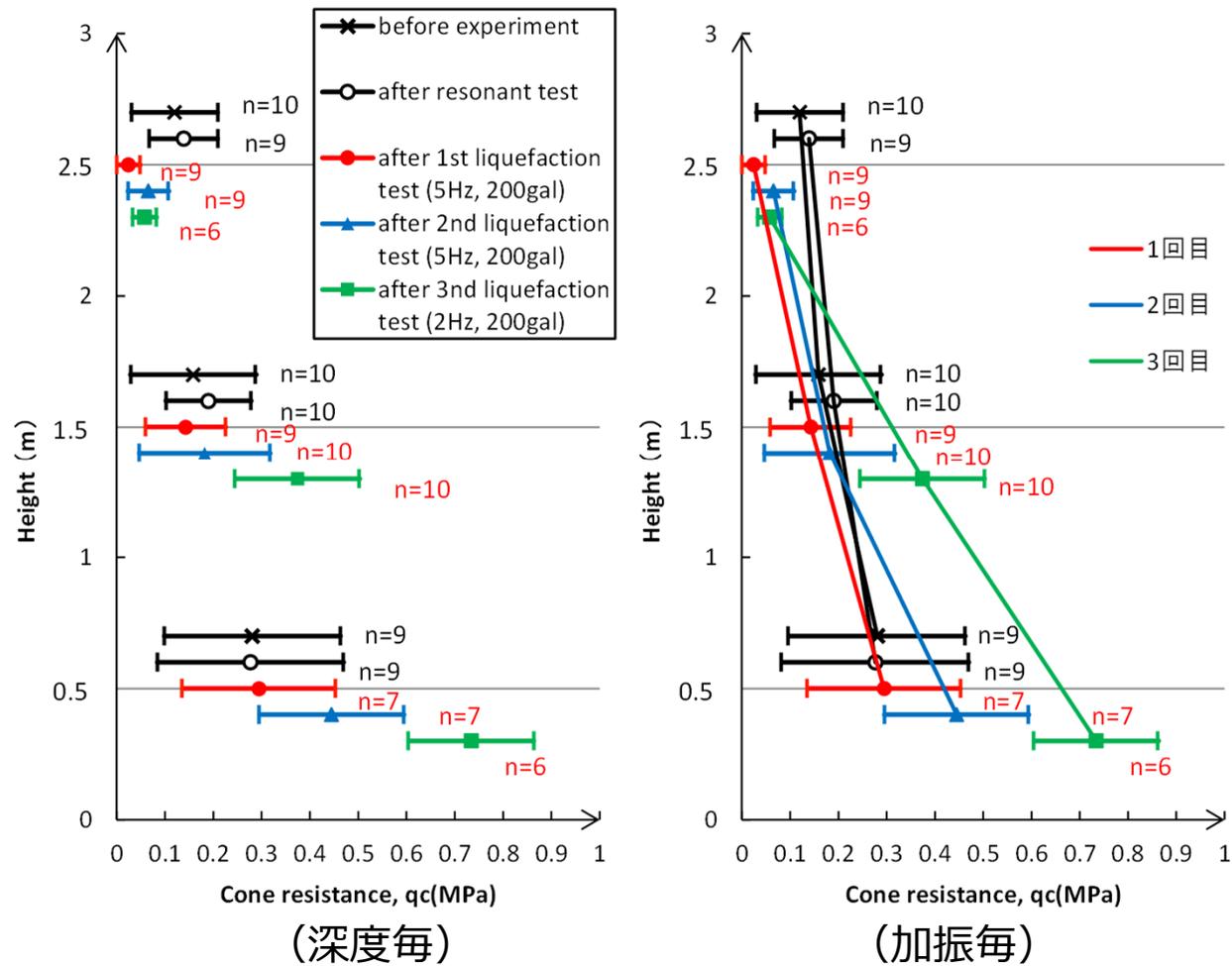


Fig. 12. Variation of the cone resistance of the model ground by liquefaction and reliquefaction (model 3)

実験結果

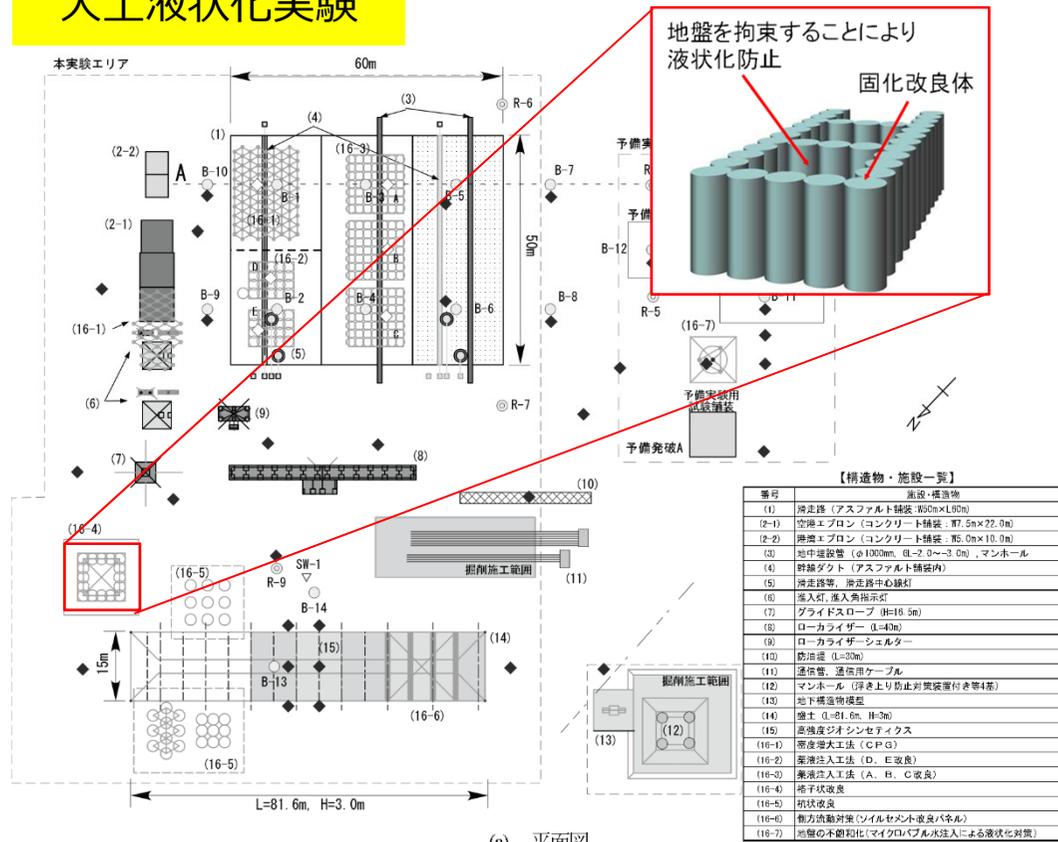
上層・中層・下層の平均値・標準偏差をとってみると・・・



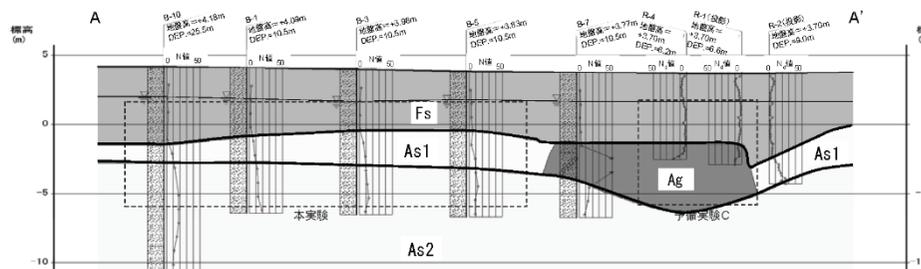
再液状化により上層部では緩み、下層部では加振毎に密になっている。  
(地盤の沈下は深度に応じて均一に密実化するのではない。)

## ② 人工液状化（石狩新港）・加振実験

### 人工液状化実験



(a) 平面図



(b) 地層想定断面図

図-7 石狩サイト平面図および地層想定断面図

## 打撃加振実験

## 4) 橋ら (2013)

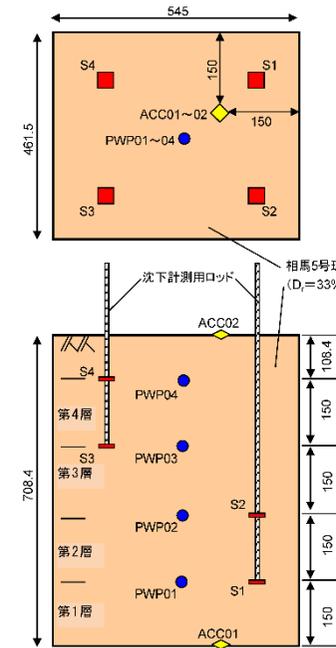


図-9 土槽の諸元およびセンサ配置(単位: mm)

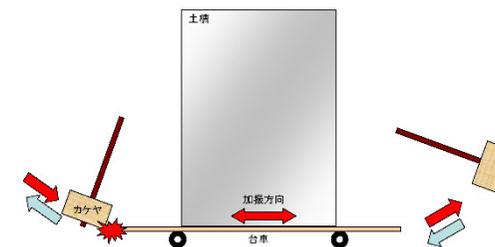


図-10 液状化試験結果

## 3) 菅野・中沢 (2009)

## 実験概要

模型地盤と現場実験結果を貫入抵抗値比率と体積変化の経時変化

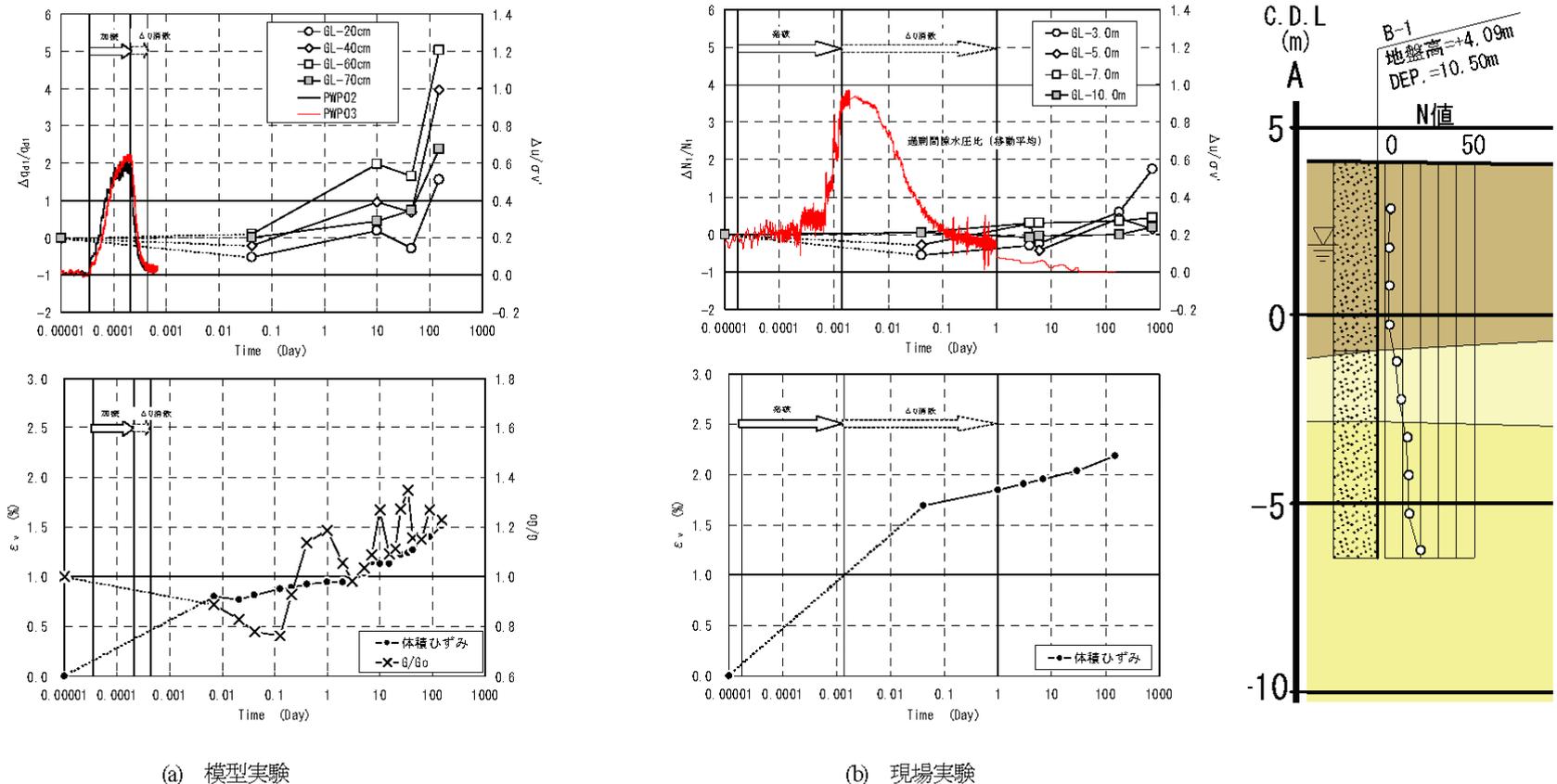


図-16 模型実験と現場実験の液状化後地盤挙動のとりまとめ

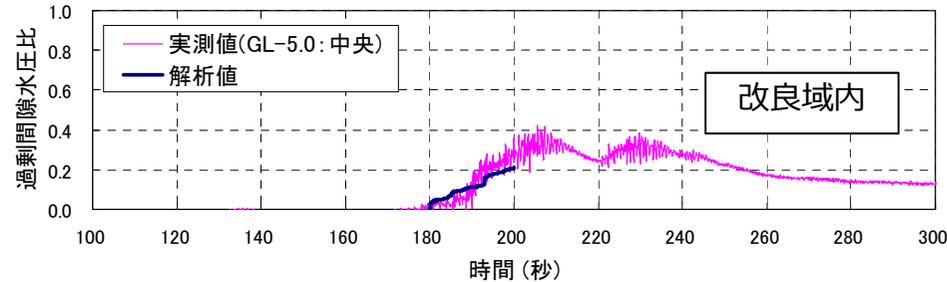
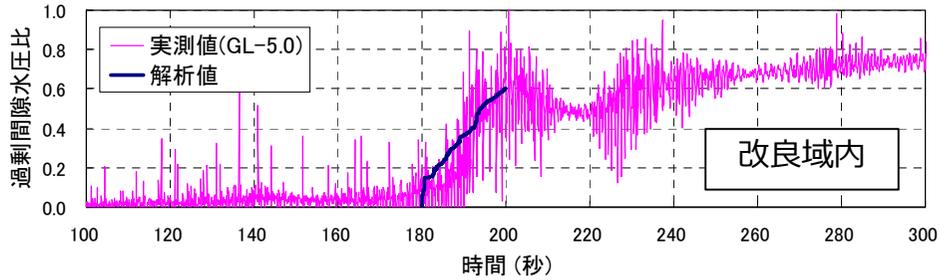
\* 体積ひずみは、模型実験では地表面沈下量を液状化層厚で割って求め、現場実験では  $N \rightarrow Dr \rightarrow e$  を換算して前後の変化より算出している。

模型実験では貫入抵抗値は浅部では1~10日の間は低下し、その後増加しており、この傾向は深部ほど顕著である。現場実験もほぼ同様である。

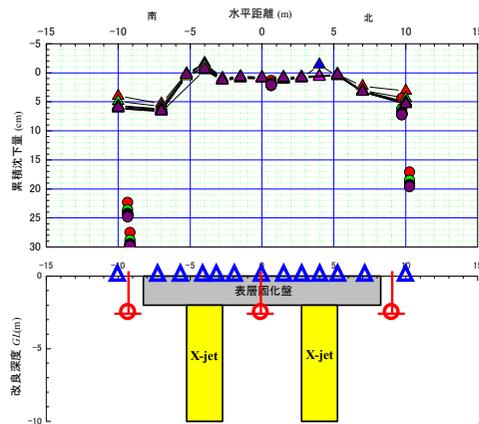
# 改良地盤（格子状固化改良）

3) 菅野・中澤 (2009)

過剰間隙水圧比



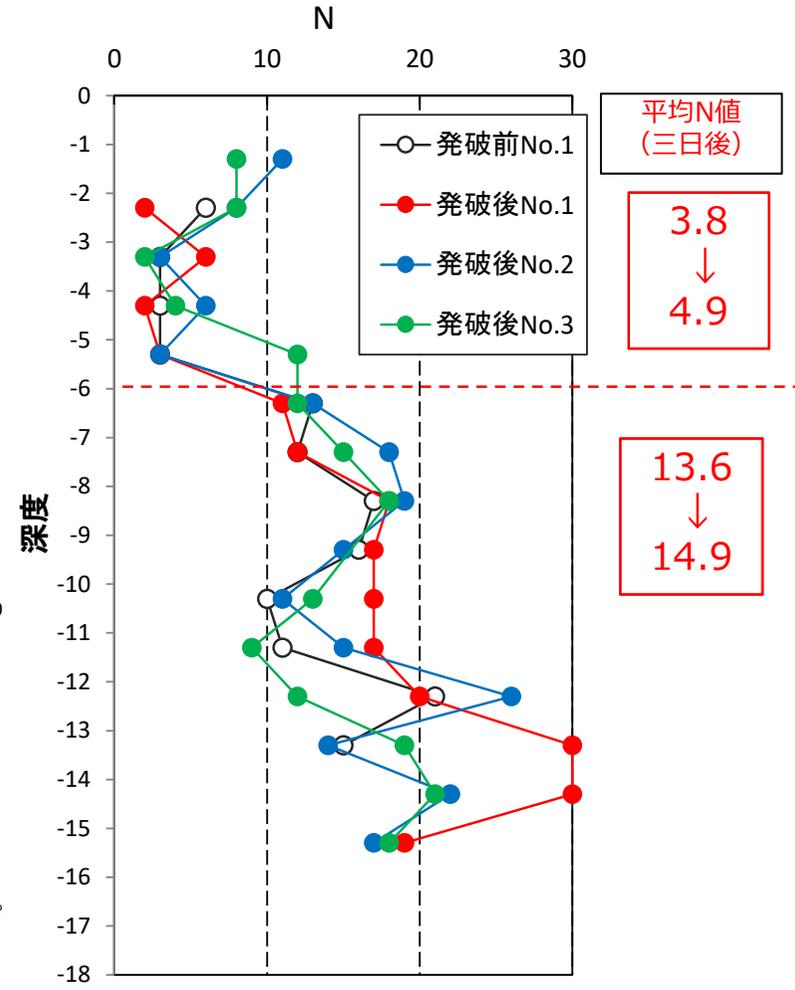
地表面沈下



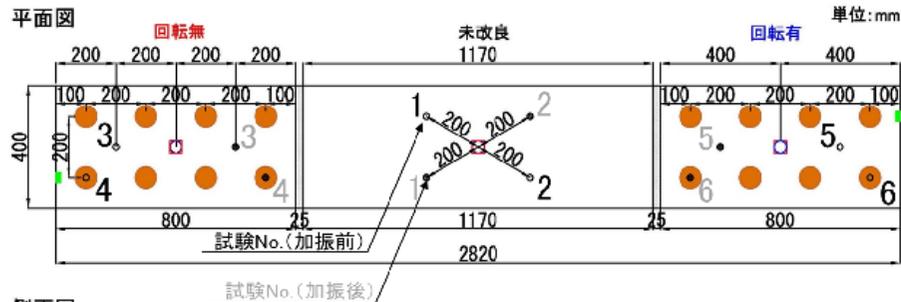
b)-b)断面方向

改良効果

改良地盤（格子内）では改良効果として水圧抑制による沈下もほとんど発生していないため上下層N値の変化はほぼ無い。



### ③ 振動台実験 (東大: 2020年)

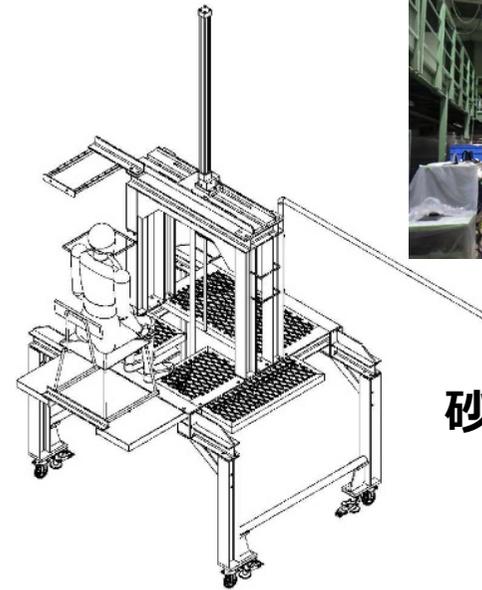


図・2 模型地盤の概要図 (上:平面図, 下:断面図)

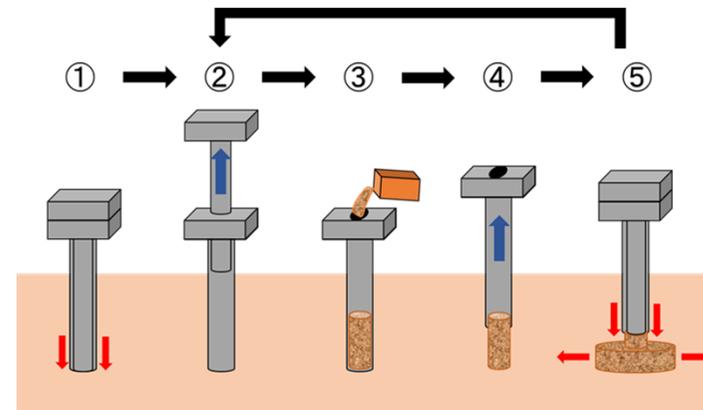
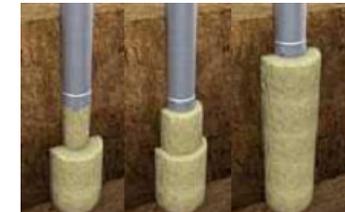


実験概要

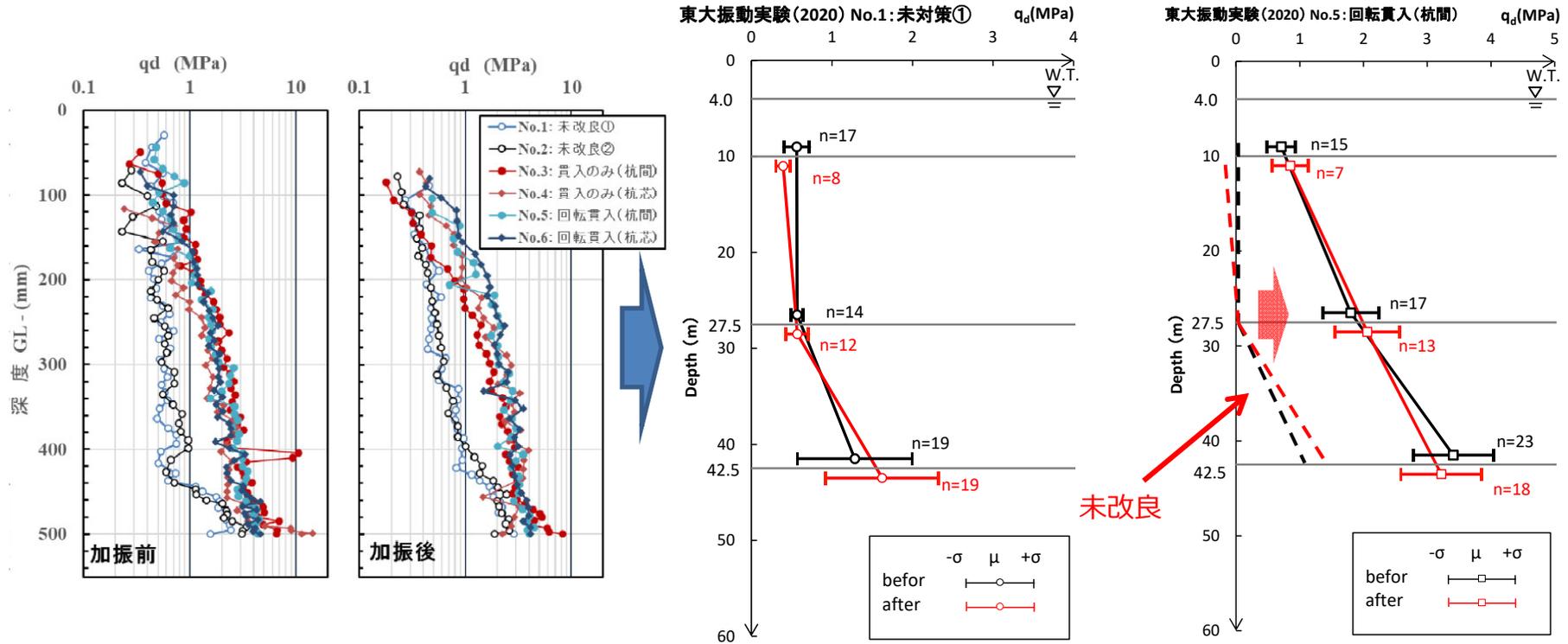
5) 矢部ら (2021)



砂杭造成装置



上層・中層・下層の深度毎に平均値・標準偏差を求めてみると・・・



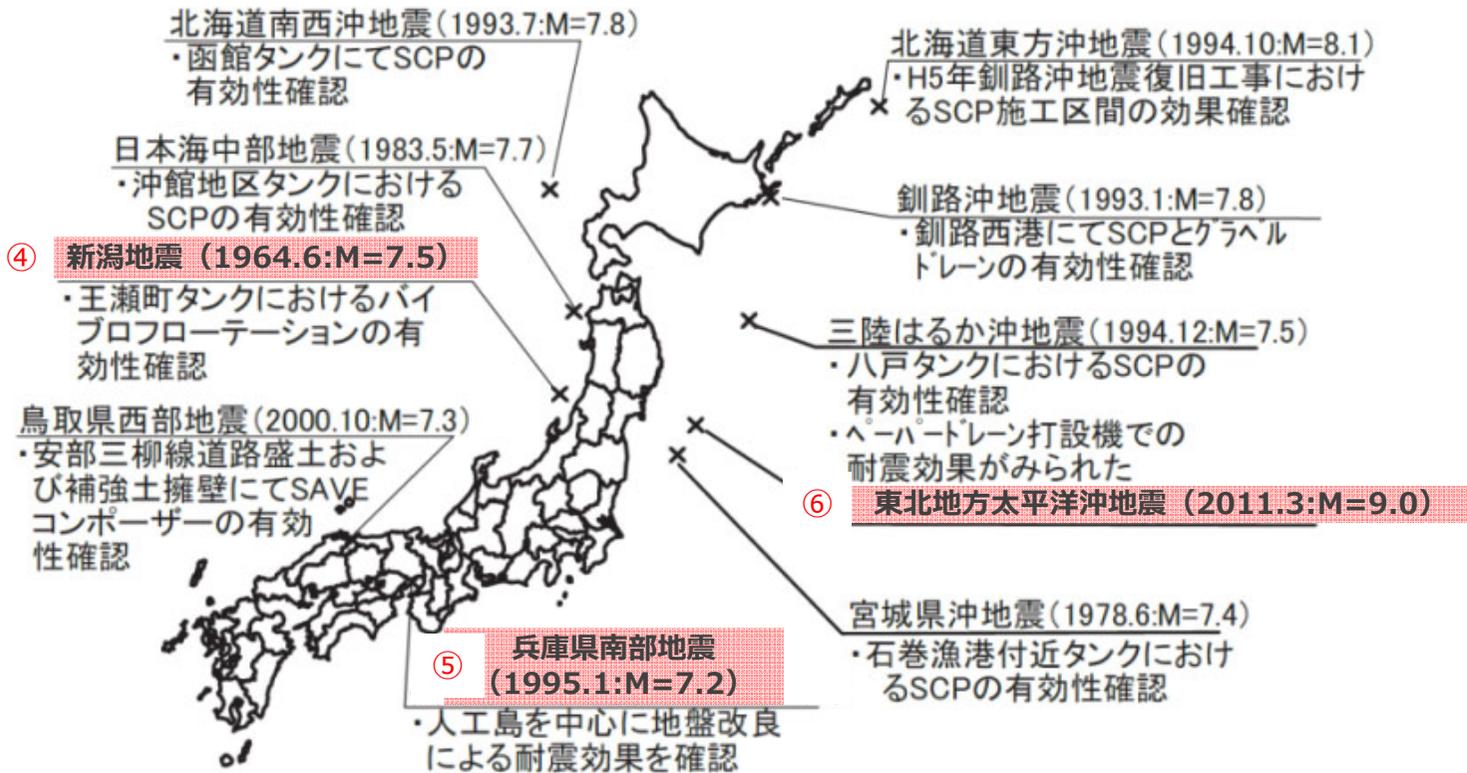
5) 矢部ら (2021)

(未改良)

(締固め改良)

未改良地盤は、上部では若干緩む一方で下部では密になる。  
改良地盤はほとんど変化しない。

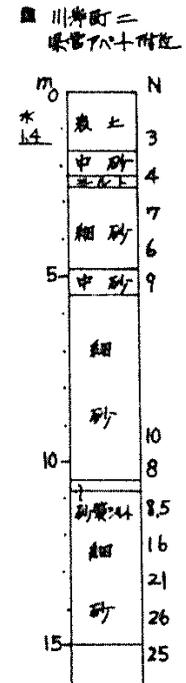
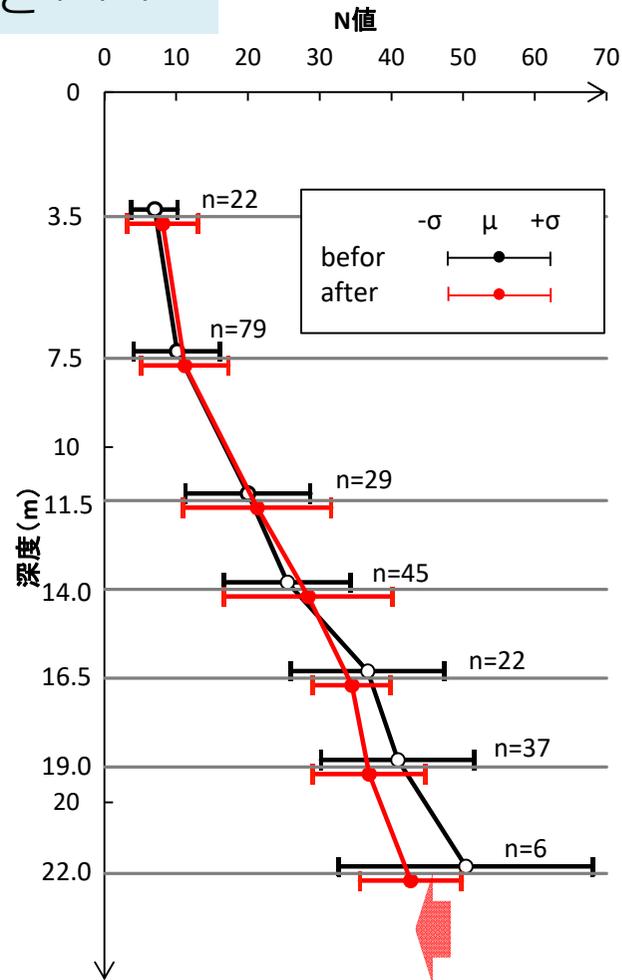
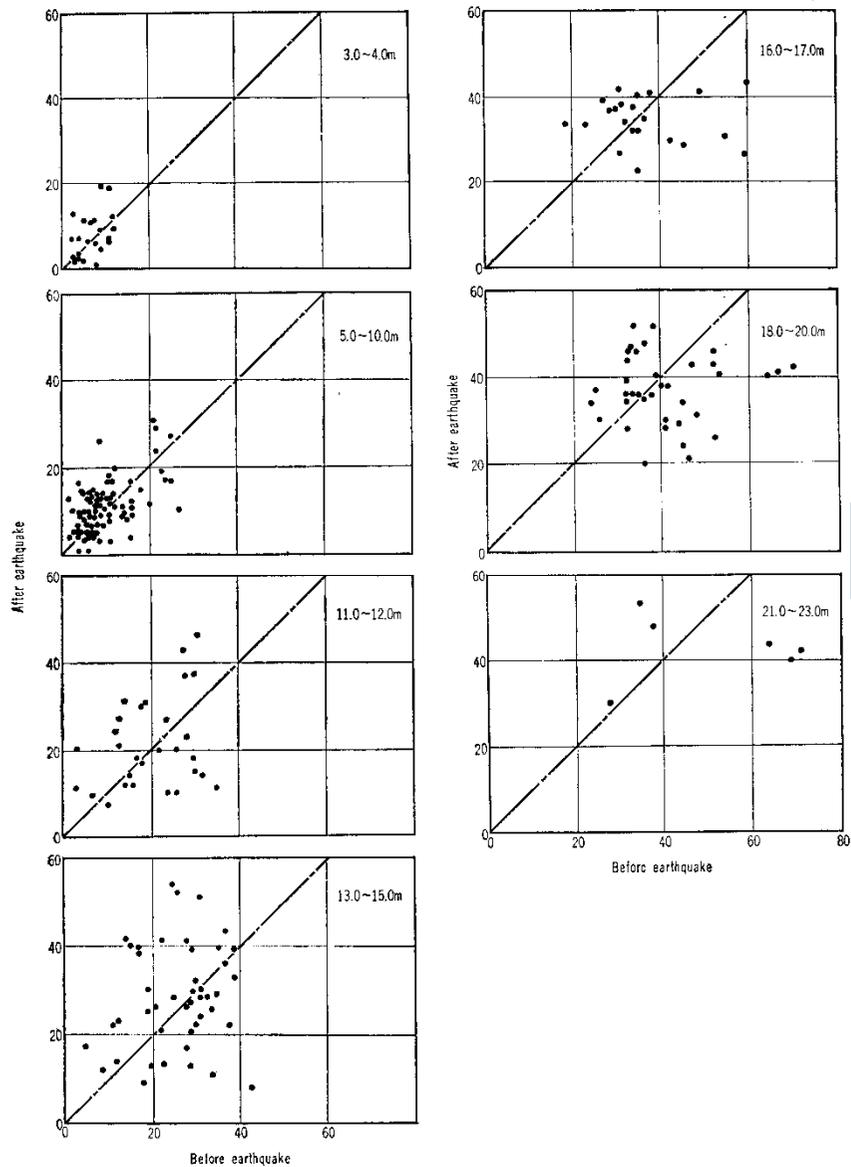
# 実地震による調査事例



対象の地震



深度毎に平均値と標準偏差を求めて整理すると・・・



上層・中層は若干N値は増加しているが、N値が30以上の下層では緩んでいる。

7) Koizumi (1966)

# ⑤ 1995年兵庫県南部地震

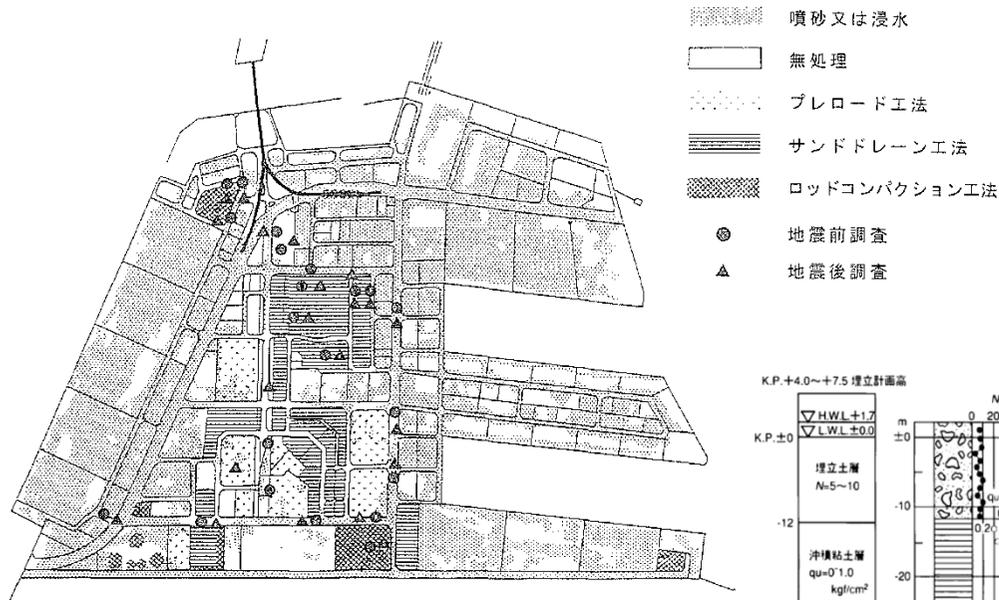
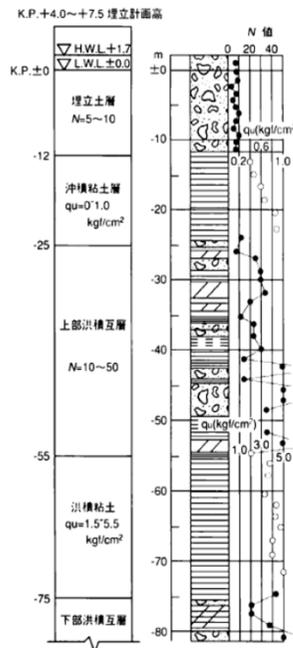


図-1 標準貫入試験位置



標準土層図<sup>9)</sup>

## 調査位置と粒度分布

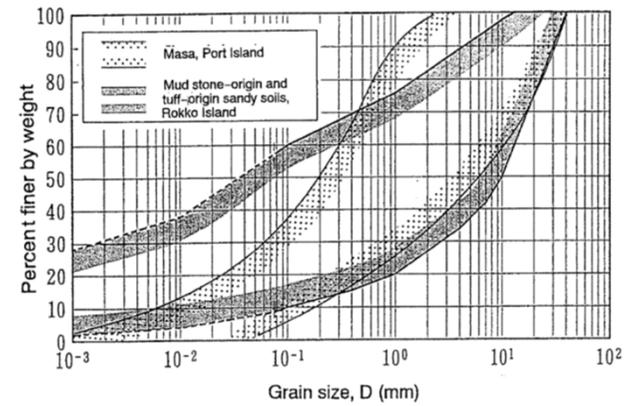


Fig. 2. Grain size distribution curves for fill soils at Port and Rokko

8) Takahashi and Tanimoto (1996)

深度毎に平均値と標準偏差を求めて整理すると・・・

Table 1 Changes in *N*-value before and after the earthquake

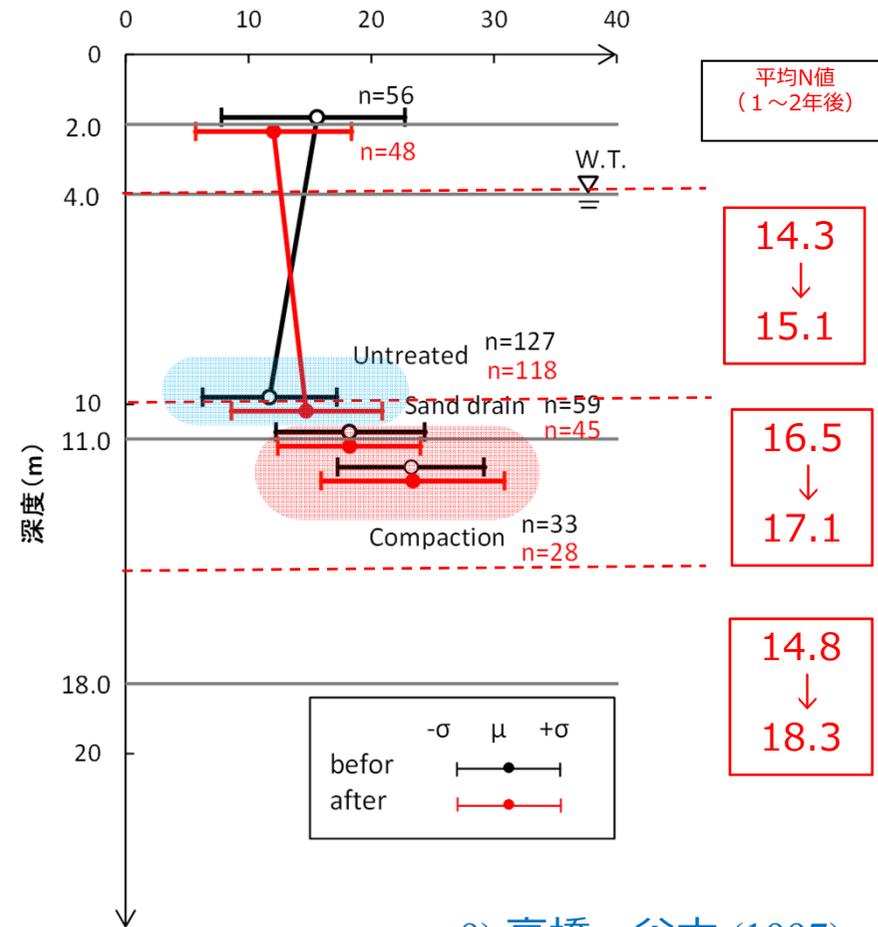
	Before the earthquake			After the earthquake			Increase in <i>N</i> -value	
	Average	Standard deviation	Number of data	Average	Standard deviation	Number of data		
Total	15.29	7.46	275	15.87	7.10	239	0.58	
Above ground water level	15.59	8.38	56	12.06	6.38	48	-3.53	
Below ground water level	15.21	7.23	219	16.82	6.96	191	1.61	
Ground improvement method (below groundwater level)	Untreated	11.72	5.48	127	14.72	6.13	118	3.00
	Sand drain	18.22	6.20	59	18.24	5.81	45	0.02
	Compaction	23.27	5.99	33	23.39	7.46	28	0.12

Table 2 Changes in *N*-value with depth before and after the earthquake

	Before the earthquake			After the earthquake			Increase in <i>N</i> -value
	Average	Standard deviation	Number of data	Average	Standard deviation	Number of data	
Above +1.0	15.59	8.38	56	12.06	6.38	48	-3.53
Upper layers +1.0 to -5.0	14.31	8.03	77	15.18	6.97	67	0.87
Middle layers -5.0 to -10.0	16.49	6.69	75	17.08	7.12	60	0.59
Lower layers below -10.0	14.82	6.71	67	18.30	6.53	64	3.48

地下水位以浅では過剰間隙水の上昇と表層のゆりこみによって地盤が乱されN値が減少したのに対し、地下水位以深では液状化に伴う密度増加によりN値は増加する。この傾向は深度が深くなるほど顕著である。N値の大きな改良地盤ではN値の変化はほとんどない。

1995年兵庫県南部地震 N値



9) 高橋・谷本 (1997)

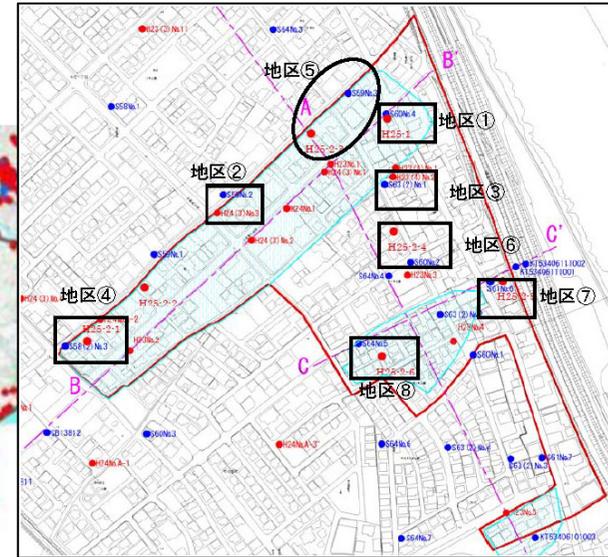
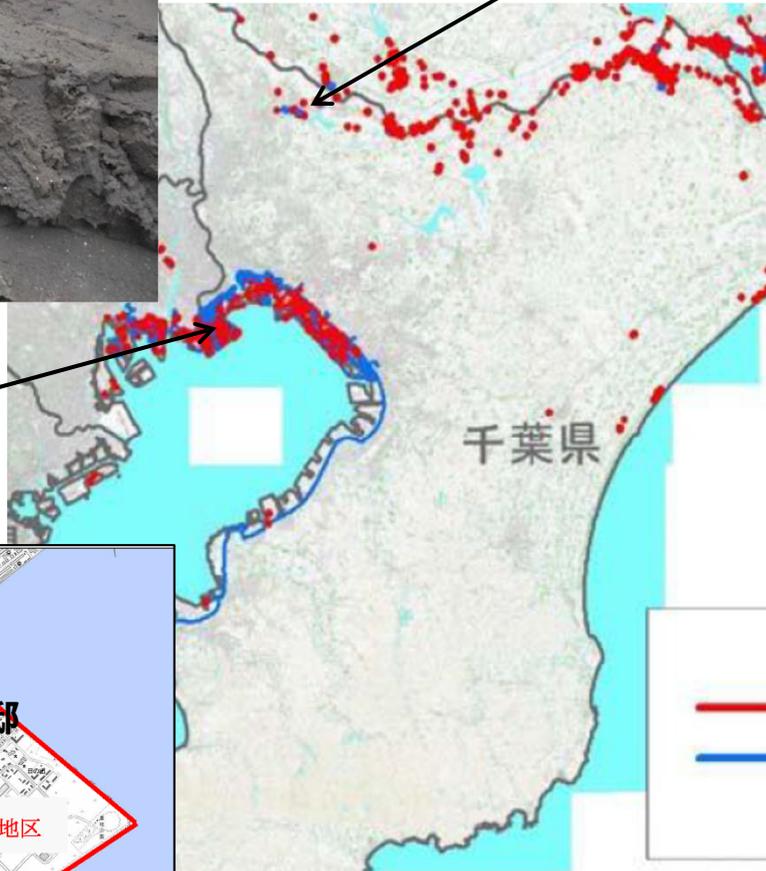
# ⑥2011年東北地方太平洋沖地震

## 2. 我孫子市

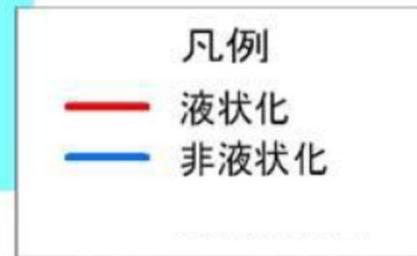


## 1. 浦安市

10) 石井ら (2012)



11) 安田ら (2016)



調査位置と被災状況

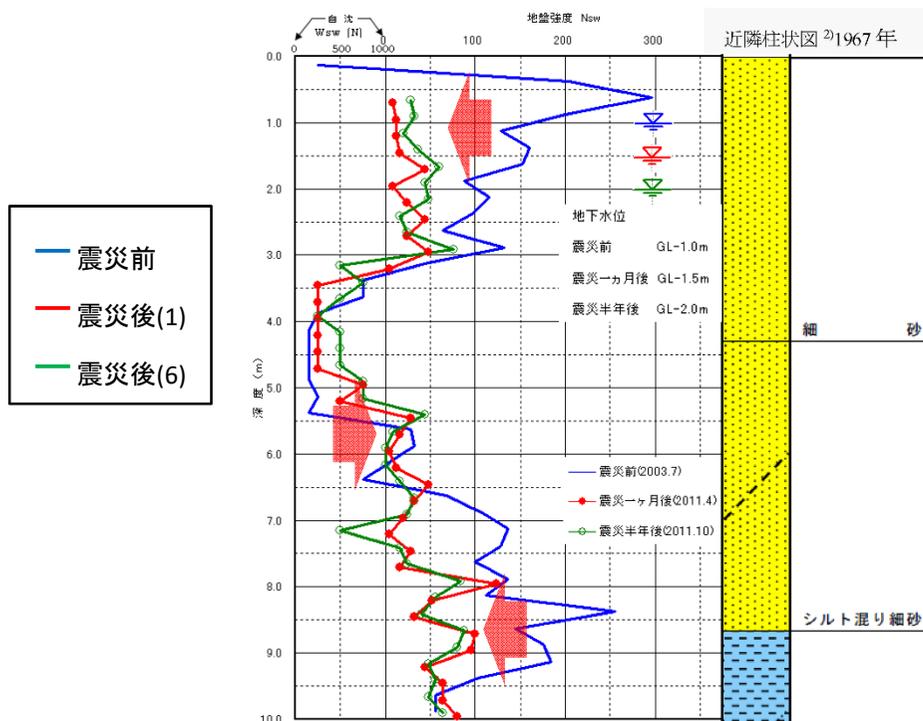


図3 A邸 地盤強度分布図

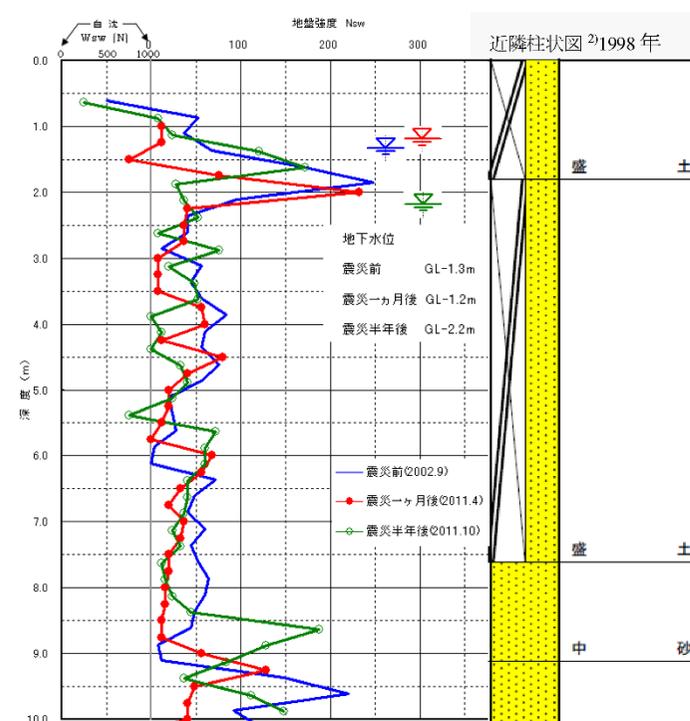
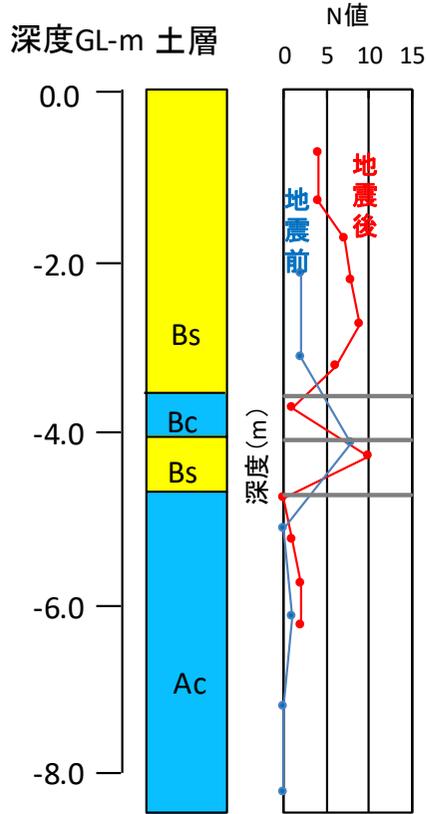


図5 C邸 地盤強度分布図

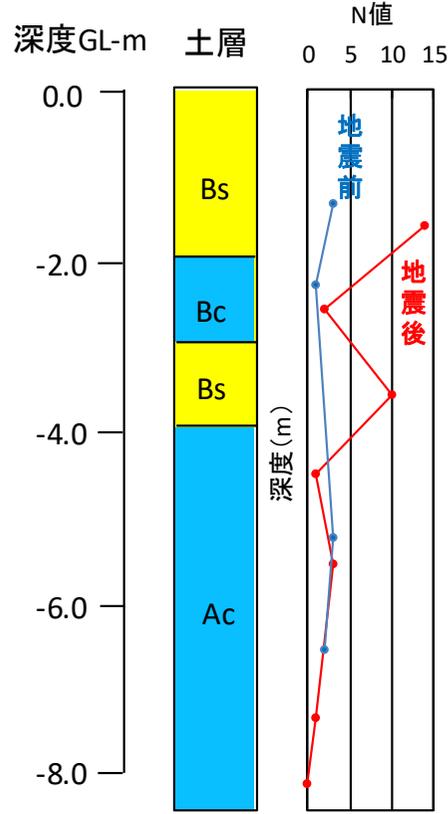
同じ液状化の被害を受けた地点でも地震による地盤強度の低下や乱れが顕著に表れた地点（A邸）と変化がみられなかった地点（C邸）がある。

# 我孫子市（標準貫入試験）

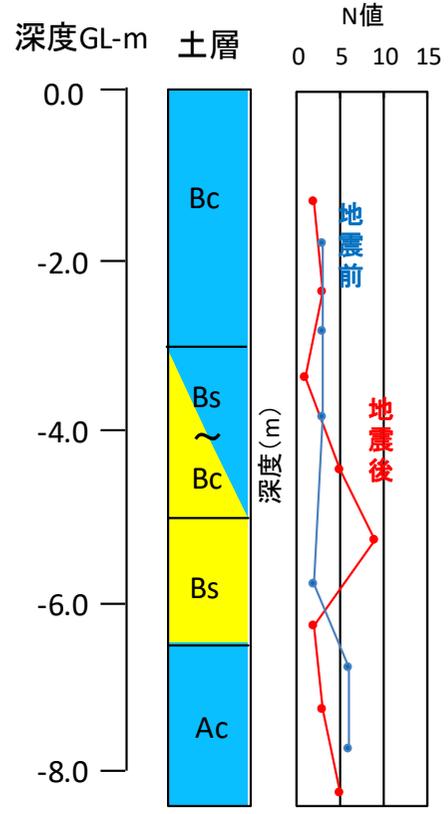
1) 安田ら (2016)



(1) 地区①



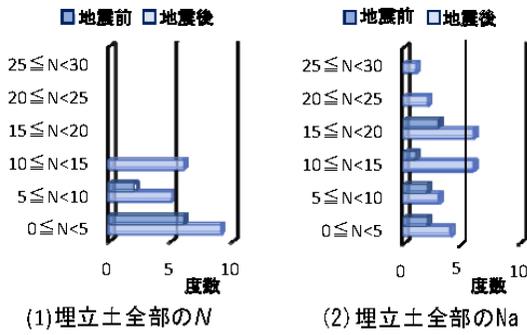
(2) 地区⑤



(3) 地区⑦

地震前平均N値: 3.8  
地震後平均N値: 6.5

地震前平均Na値: 11.4  
地震後平均Na値: 13.4



平均値で見ると、N値は地震前に比べて1.7倍、Na値で1.1倍大きくなっている。

## 4. まとめ

まとめとして地盤別に安田先生のコメントを基に整理すると・・・

### ● 模型地盤

- 下層ではN値が上がり、浅いところ（上層）ではN値は変化しないか若干小さくなる。（①, ②, ③）

### ● 実地盤

- 緩い層が薄く表層に堆積している場合は、液状化後の排水で締まってN値が上がる。（⑥2）
- 緩い層が厚く堆積している場合は、深い所では液状化後の排水によって締まってN値が上がる浅いところでは下層で発生した過剰間隙水圧の噴き上げによって乱されてN値は変化しないか小さくなる。（④, ⑤, ⑥1）
  - 深くてN値が高いところ（ $N > 30$ ）ではN値が小さくなる。（④）
- 地下水位より浅いところでは地盤の乱れにより緩んでN値は小さくなる。（⑤, ⑥1）

### ● 改良地盤（模型・実地盤）

- 締固めでは改良によりN値は大きくなり、格子状固化改良では改良によりN値は変化しないが、せん断変形・水圧抑制により地震前後のN値は変化しない。（②1, ③, ⑤）

その他の情報として・・・

●液状化地盤の強度の変化過程

- 過剰間隙水圧消散過程で換算N値に変化がないか、低下傾向が認められ、消散後は回復傾向に転じ、もとの換算N値よりも大きくなる。この傾向は、土骨格の安定が早い深い層ほど顕著である。

●地震前後のN値変化の要因

- 安田先生により以下の表のようにまとめられている。

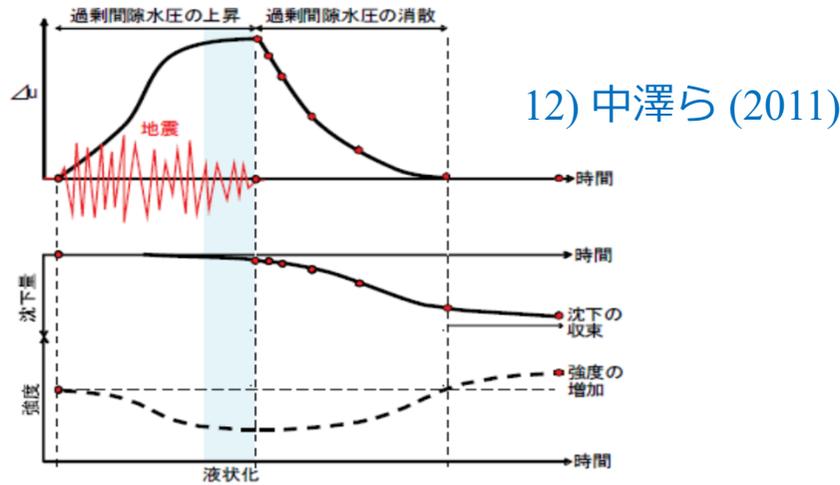


図-1 液状化による地盤挙動の概念

表1 N値が変化する要因として考えられること

段階	N値が増加する可能性がある要因	N値が減少する可能性がある要因
地震前の地盤調査時期から地震発生までの段階	①エイジング効果 ②交通荷重などによる密度化	①近接掘削工事などによるゆるみ
地震で液状化した段階	①間隙水の絞り出し、噴出による密度化	①噴出時の攪拌によるゆるみ、不均質化 ②エイジング効果の解除 ③密な砂ではせん断変形による体積膨張

その他に地盤調査を実施する人による測定差もある。

11) 安田ら (2016)

●おわりに

- 古関先生 (参考文献13) は、“液状化履歴により全体的には密度は増加するが、再液状化強度は増加する場合と減少する場合がある。”としており関連ありそうです。
- 土研の方より阪高報告書に地震前後のN値の変化についての記述があるとのことで、入手する予定です。

## 【 参考文献 】

- 1) Towhata et al. (2014) Liquefaction in the Kanto region during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, Soils and Foundations, 54(4), 859-873.
- 2) Sasaki et al. (2021) Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction, Soils and Foundations, 22(3), 1-14.
- 3) 菅野・中澤 (2009) 液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1195, 1-354.
- 4) 楠ら (2013) 液状化後地盤性状の長期的変化に関する室内模型実験, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.4, 326-336
- 5) 矢部ら (2021) 締固め砂杭工法を模擬した模型地盤における加振前後のサウンディング試験, 土木学会, 第3部門, III-84.
- 6) 不動建設 (1964) 新潟地震震害調査記録
- 7) Koizumi (1966) Changes in density sand subsoil caused by the Niigata earthquake, soils and Foundation, 6(2), 38-44.
- 8) Takahashi and Tanimoto (1996) Change of SPT N-values measured on reclaimed land due to the 1995 Hyogo-Ken Nambu earthquake, KIG Forum, 95-104.
- 9) 高橋・谷本 (1997) 兵庫県南部地震における埋め立て地盤のN値の変化, 地盤工学会, 1081-1082
- 10) 石井ら (2012) スウェーデン式サウンディング試験データからみた地震前後の時系列による地盤強度の変化, 1~2.
- 11) 安田ら (2017) 東日本大震災で液状化した地盤における地震前後のN値の比較, 地盤工学会, 1595-1596.
- 12) 中澤ら (2011) 制御発破による人口液状化地盤の密実化およびN値回復過程に関する現地調査, 土木学会論文集C, Vol.67, No.4, 422-440.
- 13) 古関 (2021) 展望 砂地盤の再液状化挙動に関する土質試験・模型実験, 地盤工学会誌, 69(11), 3