



MIDAS × Yoshida

液状化現象を理解する 現象、設計と解析

関東学院大学・工学総合研究所

東北学院大学・工学部

吉田 望 教授

吉田 望

Nozomu YOSHIDA

関東学院大学
工学総合研究所研究員
東北学院大学
名誉教授・客員教授

液状化現象
設計
液状化解析の精度
液状化判定の精度
液状化後の挙動

学歴

1974年 京都大学大学院工学研究科建築専攻 修士課程修了
1977年 京都大学大学院工学研究科建築専攻 博士課程
学位論文：筋かい材の弾塑性性状に関する研究

経歴

1977年～1980年 京都大学防災研究所研修員
1979年～2002年 佐藤工業株式会社
原子力施設の耐震設計 → 専門を地震地盤工学に
1985年～1986年 University of British Columbia, Canada (Post doctral fellow)
2002年～2005年 応用地質株式会社
2005年～2017年 東北学院大学工学部 教授
2017年～2020年 関東学院大学総合研究推進機構 教授
2017年～ 東北学院大学工学部 客員教授・名誉教授
2020年～2023年 関東学院大学防災・減災・復興学研究所 所員
2023年～ 関東学院大学工学総合研究所・研究員
2024年～ 台湾科学技術大学 客員教授

AGENDA

液状化現象を理解する 現象、設計と解析

関東学院大学・工学総合研究所
東北学院大学・工学部
吉田 望 教授

MIDAS × Yoshida

- session.1 液状化により生じる現象
- session.2 液状化のメカニズム
- session.3 液状化した地盤の性質液体か固体か？
- session.4 液状化の定義と指針間の違い
- session.5 地中構造物の浮き上がり
- session.6 液状化後の地盤の沈下
- session.7 設計指針における考え方 液状化の発生予測
- session.8 液状化強度の再現と良い試料採取
- session.9 二次液状化
- session.10 液状化に伴う流動
- session.11 液状化直後の強度再液状化
- session.12 液状化解析の精度

session.1

液状化により生じる現象

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 噴砂・噴水



1983年能代市
落合三面球場

1964年新潟市
新潟空港



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 地盤の動き

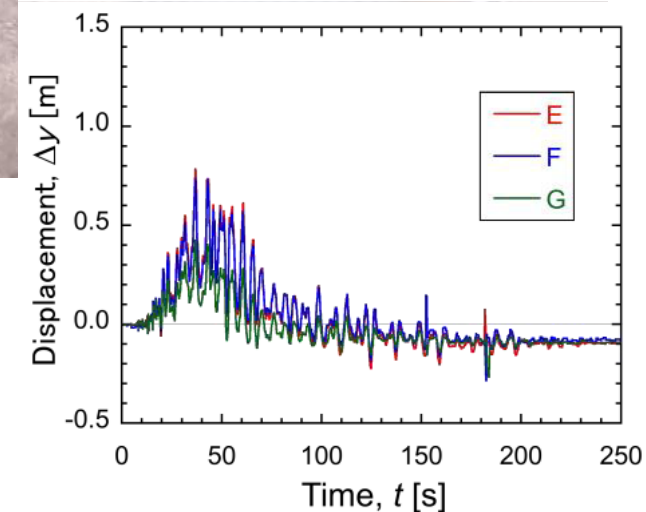
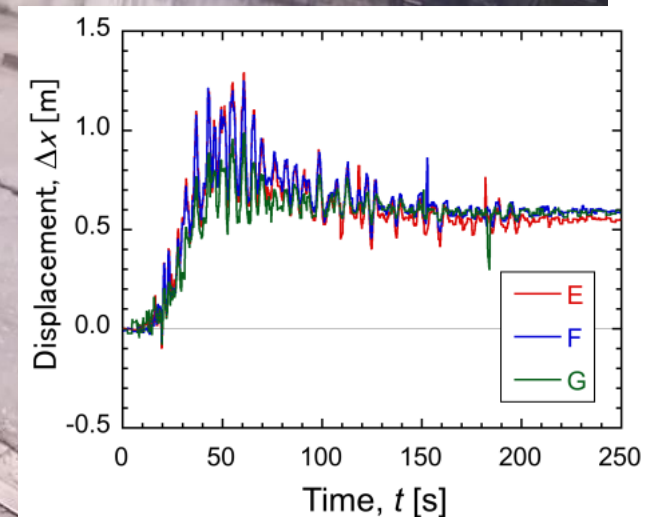


2011年浦安

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



2000年に1回の海底隆起
海底にも活断層のリスク



■ 能登半島地震，内灘地区

- 近い位置で相対変位大

▶ 液状化解析の可能性は？

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化で起こる現象

■ 沈下・不同沈下

1990年フィリピン・ルソン島地震



- 最近は起こりにくい：直接基礎がなくなってきた

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 過剰間隙水圧消散後の沈下



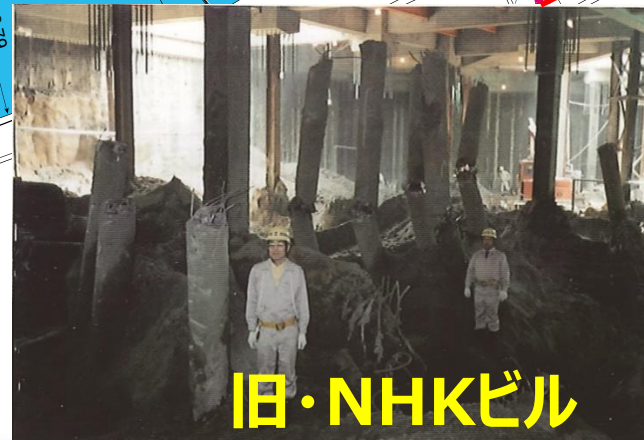
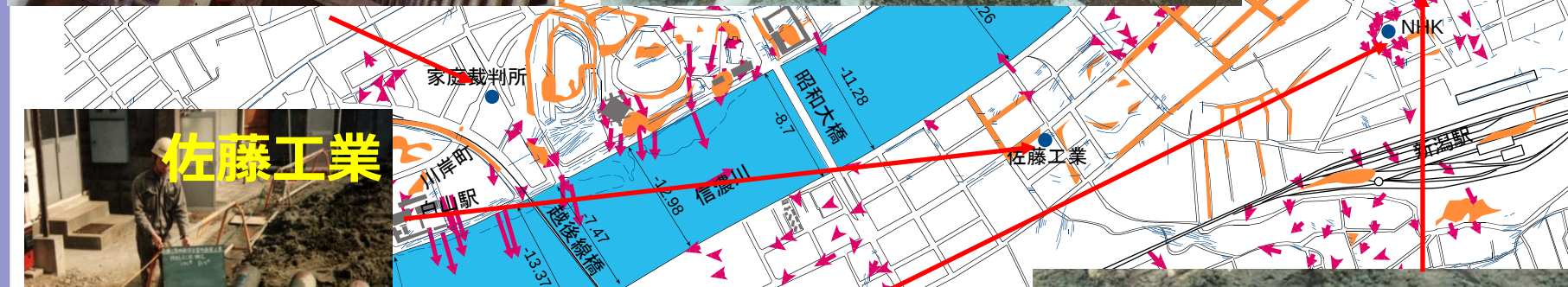
ポートアイランド
1995年兵庫県南部地震



浦安駅前
2011年東北地方太平洋沖地震

液状化に伴う流動に伴う地中構造物の被害

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



■ 地盤の変位による被害

浮き上がり

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



1993 釧路沖地震



1964 新潟地震



1994 北海道南西沖地震
陶野郁雄氏提供



1983
日本海中部地震



2003
十勝沖地震

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

■ 昔：受動的被害

- 土に期待されていた機能が失われる
 - ▶ 沈下，傾斜，浮き上がり
 - ▶ 機能が失われることが予測できれば良い
 - ◆ 液状化の発生が予測されると対策
 - ◆ 液状化後の挙動は不必要

■ 今：受動的＋能動的被害

- 地盤が外力として作用する
- 液状化しない対策は困難な事も
 - ▶ 地震力が大きくなった
- 性能設計
 - ▶ 構造物の性能が保持できれば
 - ▶ 地盤の変位が重要

session.2

液状化のメカニズム

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

液状化の経時変化

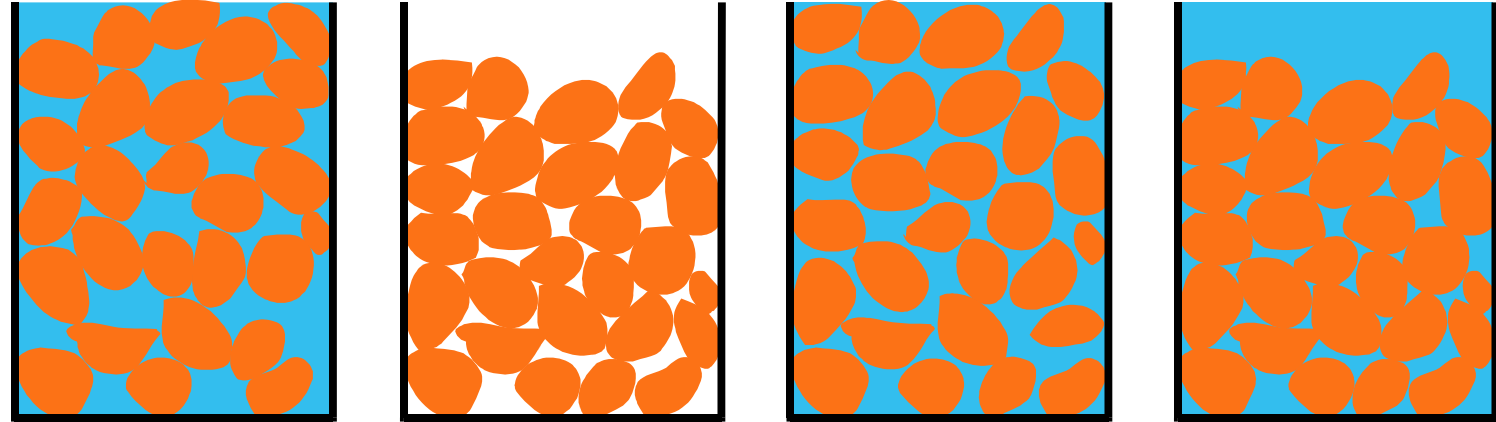
13

- 地震のはじめ：過剰間隙水圧発生前
- 部分液状化：過剰間隙水圧の発生
 - 長周期化
 - 支持力低下
 - サイクリックモビリティ
- 液状化中
 - 準液状化と同様
 - 地中構造物の浮き上がり（の始まり）
 - 大変位（の始まり）
- 地震後：過剰間隙水圧の消散
 - 地盤沈下
 - 液状化に伴う流動
- 再液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化のメカニズム

14

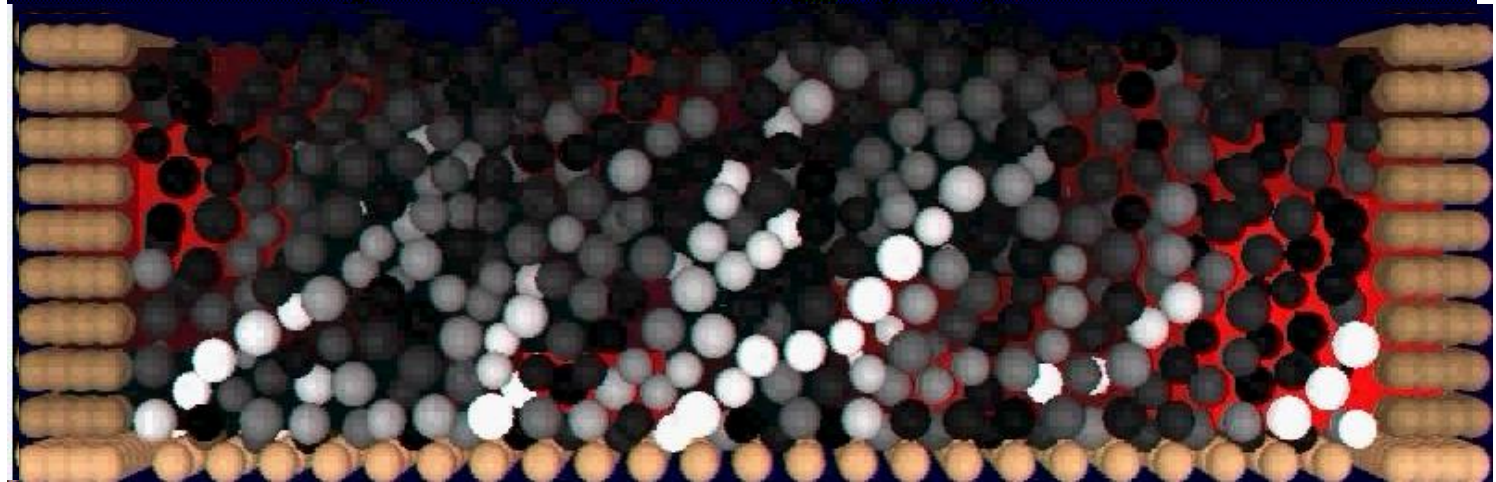


- 乾燥砂であれば体積変化（ダイレイタンス）
- 水で飽和していると体積変化できない
 - せん断により横方向変位→空隙に落ち込めない
 - 土骨格が荷重を受け持てなくなる→有効応力の減少
 - ▶ 代わりに間隙水が受け持つ→過剰間隙水圧の上昇
- 時間が経つと排水して体積変化
 - 噴砂は異なるメカニズム

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化のメカニズム

15



■ 流動

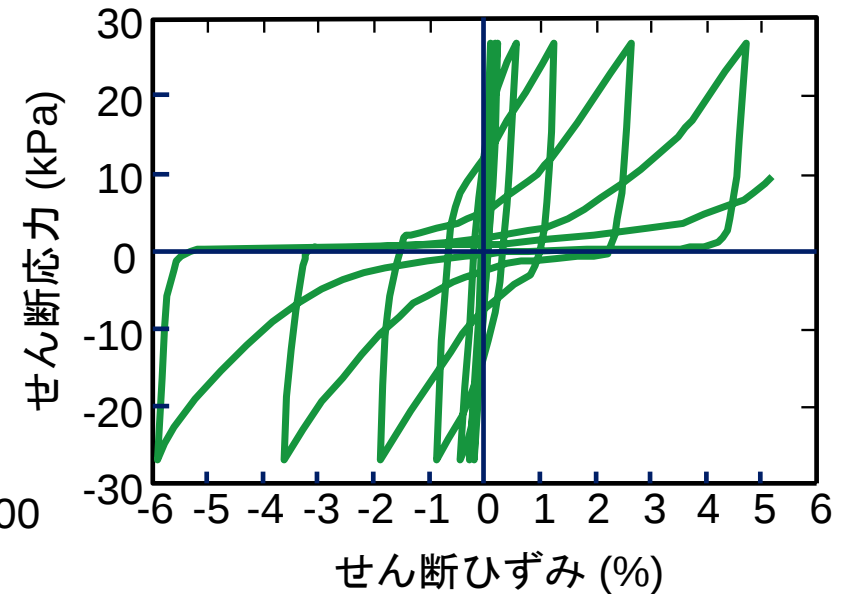
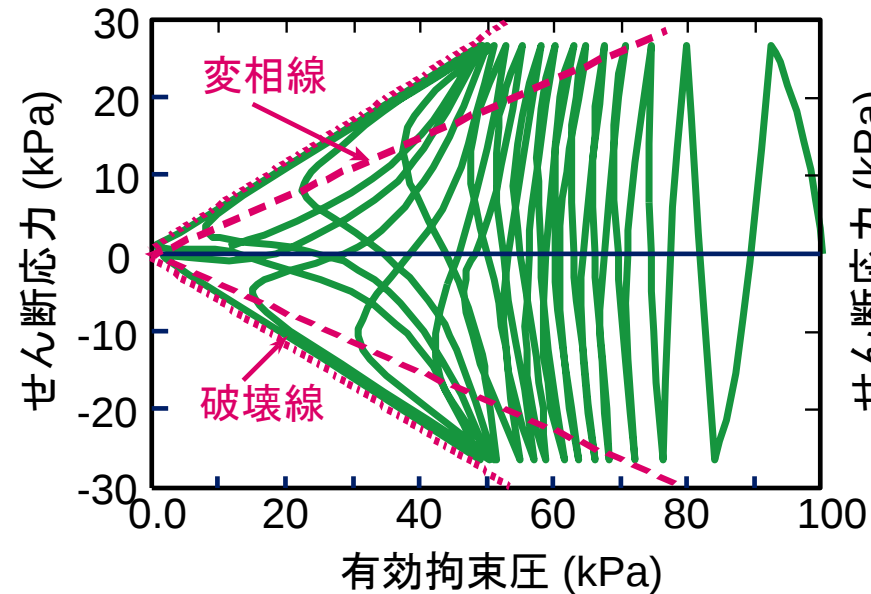
- 粒子を重ねさせていた力がなくなる
 - ▶ ばらばらになる
 - ▶ 次に反対側で構造ができるまではばらばらが維持される

■ サイクリックモビリティ

- 粒子構造の再構築
 - ▶ 斜め方向に粒子が積み上がる
- 液体状ではない

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

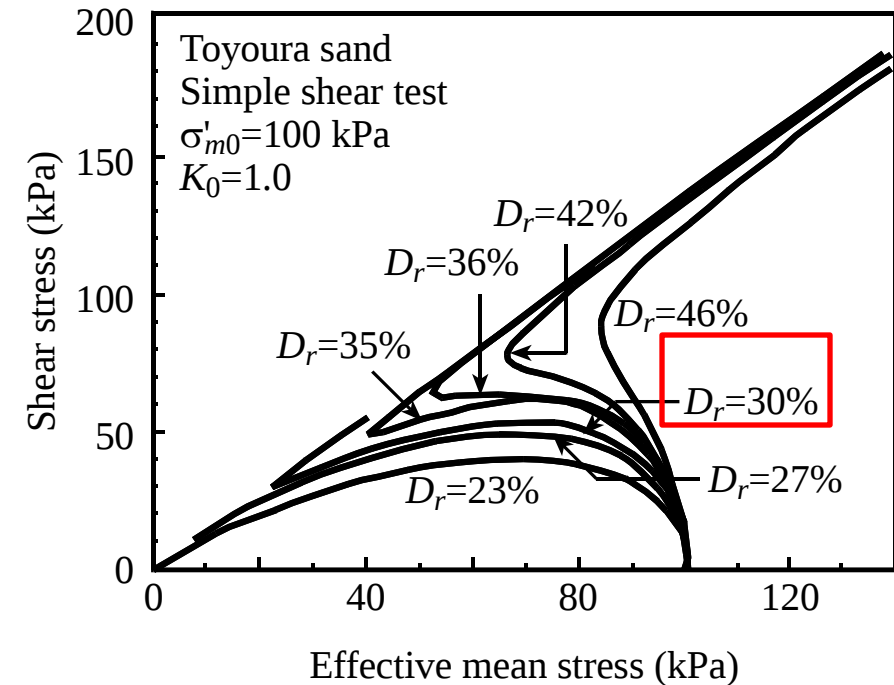
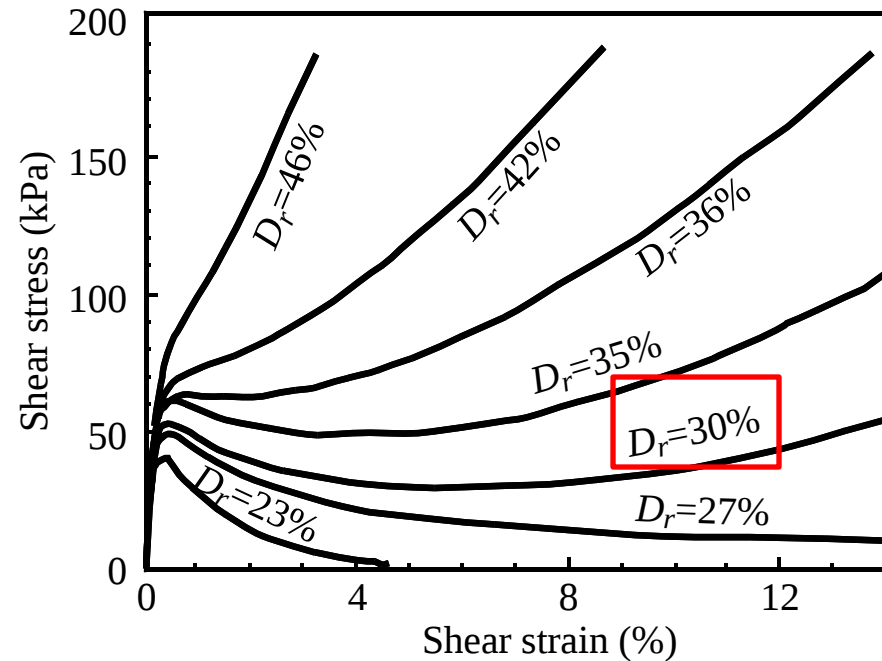
■ サイクリックモビリティと変相角



- ダイレイタンシーが負から正へ変化する
 - ▶ 体積が膨張しようとする。しかし、等体積であるので、有効拘束圧が増える。強度が増加する

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ サイクリックモビリティは必ず起こる



関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

間隙水圧の増加が先か，有効力の減少が先か

18

■ Seed & Lee

- 飽和した砂が振動を受けると，体積減少が起きる。ここで，非排水状態では体積変化は過剰間隙水圧の上昇として現れる。しかし，全応力は一定なので，有効応力が減少し，有効応力が0となると液体状の挙動となる

■ 三笠

- この表現にはあいまいなところがあって，そのままではまずい
- 「振動作用を受けると間ゲキが狭められようとし……」
 - ▶ すでに土の骨組みに何か変化が起きている
- 土の骨組みがせん断を受けて構造が変わり，有効応力が減る，そのため，釣合条件をみたすべく上載荷重のうち有効応力でささえ切れないものが間ゲキ水圧にかたがわりし，その結果として間ゲキ水圧が上昇する

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

間隙水圧の増加が先か，有効力の減少が先か

19

■ 図書による液状化の定義（92図書）

番号	メカニズム	数
①	ダイレイタンシーにより，体積が減少→非排水なので，体積が減少できない→（荷重を支えるために）過剰間隙水圧が発生→有効応力が減少	66
②	粒子間のかみ合わせが外れる→粒子が間隙水中に浮き，有効応力が減少→全応力を支えるために過剰間隙水圧が発生する。	22
③	クイックサンド，ボイリング	3
④	上向き浸透流	3

- 文献を引用しているものはほとんど無い
 - ▶ Seedの論文に引きずられている？

■ 原因

- 連続体としてとらえるのか，粒状体としてとらえるのか
 - ▶ 連続体：①
 - ▶ 粒状体：②

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

相対密度 D_r (%) の常識？

地盤工学会(1995)：地盤調査法

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

N値	相対密度 D_r (%)	内部摩擦角 (度)	
		Peck	Meyerhof
0～4	非常に緩い (very loose)	28.5以下	30以下
4～10	緩い (loose)	28.5～30	30～35
10～30	中位の (medium)	30～36	35～40
30～50	密な (dense)	36～41	40～45
50以上	非常に密な (very dense)	41以上	45以上

■ 教科書等に現れる表

- 間違いです！

■ 負の値も100%以上もあります (日本では)

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

相対密度 D_r (%) の常識？

■ 2013年版では

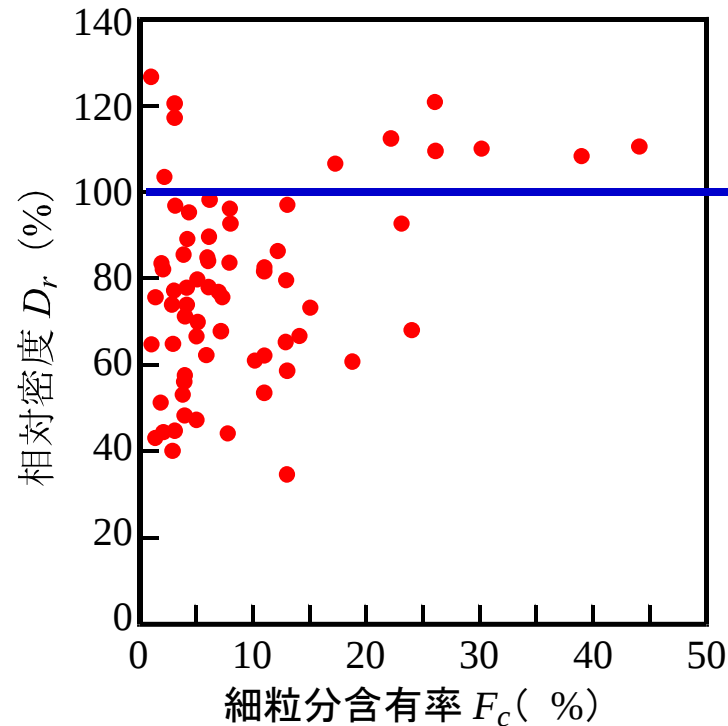
N値	相対密度 D_r (%)	内部摩擦角 (度)		現場判定法
		Terzaghi & Peck	Meyerhof	
0～4	非常に緩い (very loose)	28.5以下	30以下	φ13の鉄筋が容易に手で貫入
4～10	緩い (loose)	28.5～30	30～35	ショベル (スコップ) で掘削可能
10～30	中位の (medium)	30～36	35～40	鉄筋を5ポンド (=22.2N) ハンマで打ち込み容易
30～50	密な (dense)	36～41	40～45	同上, 30cm程度貫入
50以上	非常に密な (very dense)	41以上	45以上	同上, 5~6cm貫入, 掘削につるはし必要, 打込み時金属音

- 相対密度の数値が消えた
- Peck → Terzaghi & Peck (編集者の勘違い)
- 現場判定法は日本のデータ
- N値と相対密度の関係式は再考を要する
 - 平間ら, Seedらのデータ (次のページ)

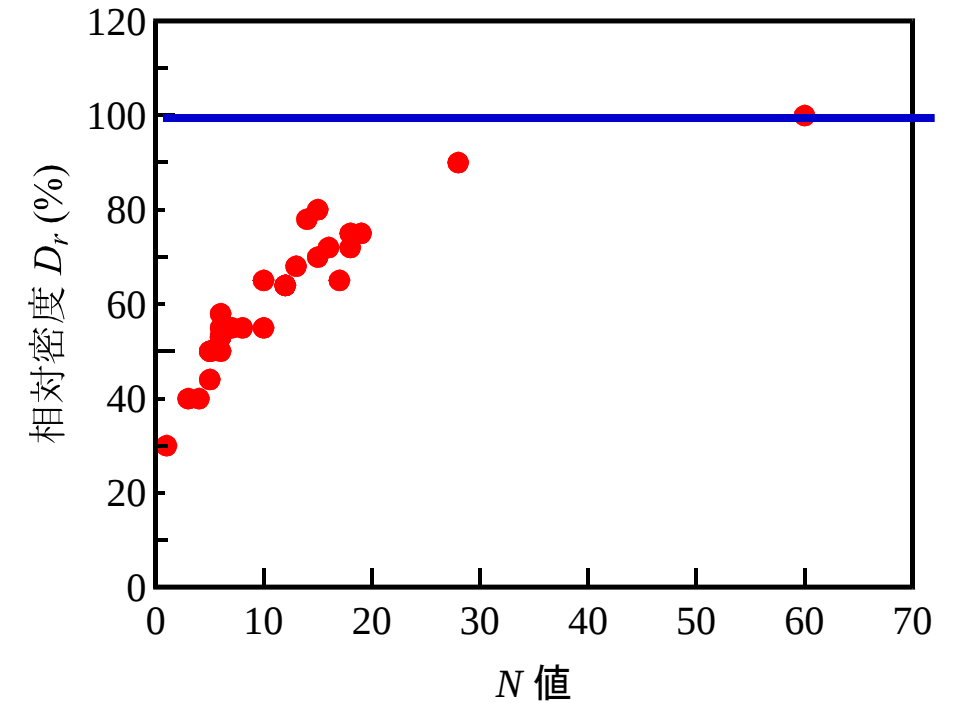
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

相対密度 D_r (%) の常識？

22



宮城県の事例



Seedら

- 相対密度の最小値は40%程度
- 日米の方法の差（最小密度）
 - 日本：モールドを100回叩く F_c 5%まで 15%程度までは可能？
 - アメリカ：錘を置いて10分加振

液状化のメカニズム

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



アメリカ
ASTM

日本
地盤工学会



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ：液状化現象とは

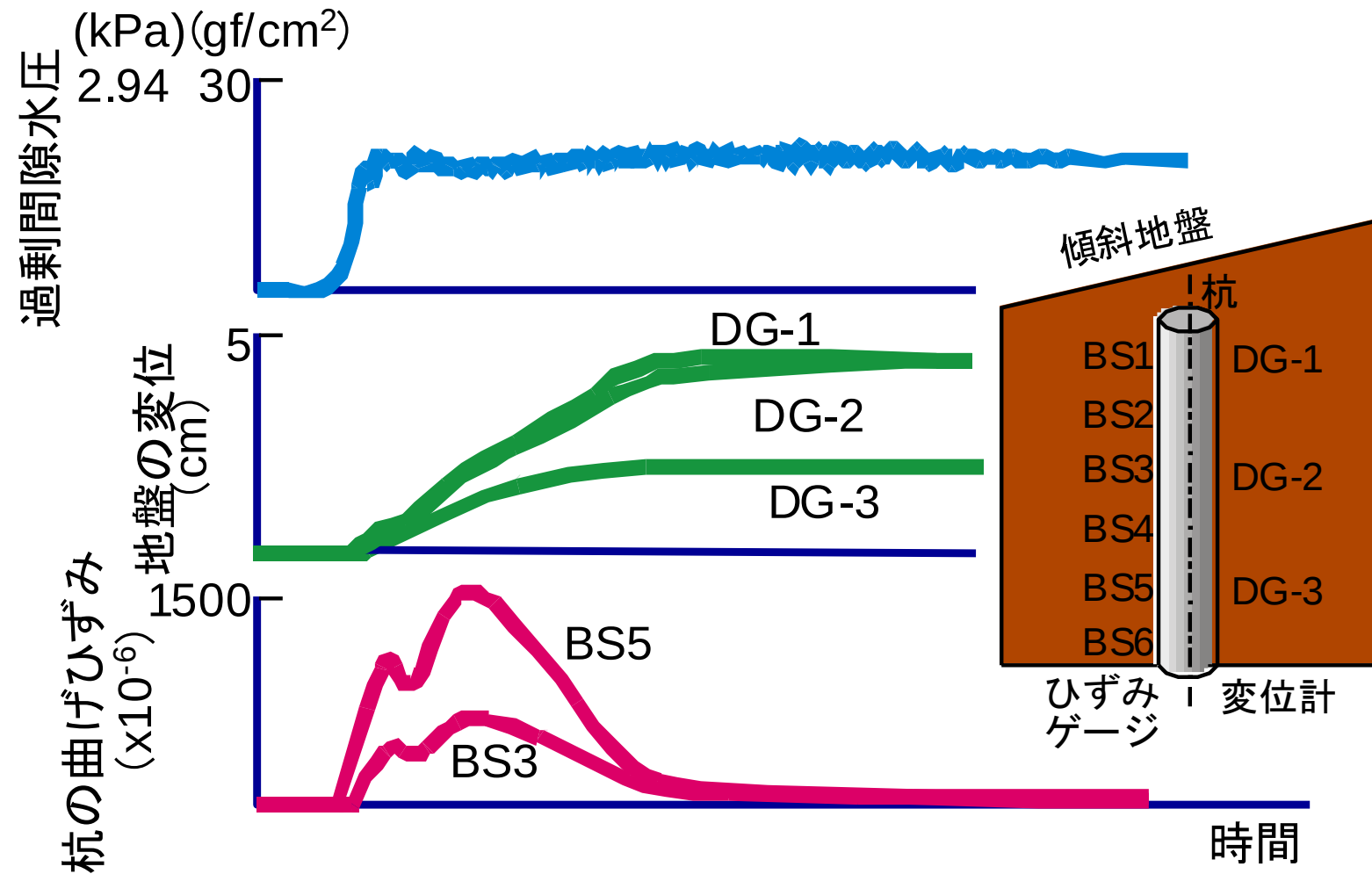
- 繰返しせん断により有効応力が減少
 - 全応力を支えるために過剰間隙水圧が発生
 - 地盤の支持力が低下
 - 骨格構造はそれほど変わらない
- ひずみが大きくなると、新しい骨格が出来る
 - サイクリックモビリティ
 - 骨格構造が乱れる
- 地震が終わると
 - 過剰間隙水圧の消散
 - ▶ 地盤沈下
 - 液状化に伴う流動

session.3

液状化した地盤の性質 液体か固体か？

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液体らしい挙動



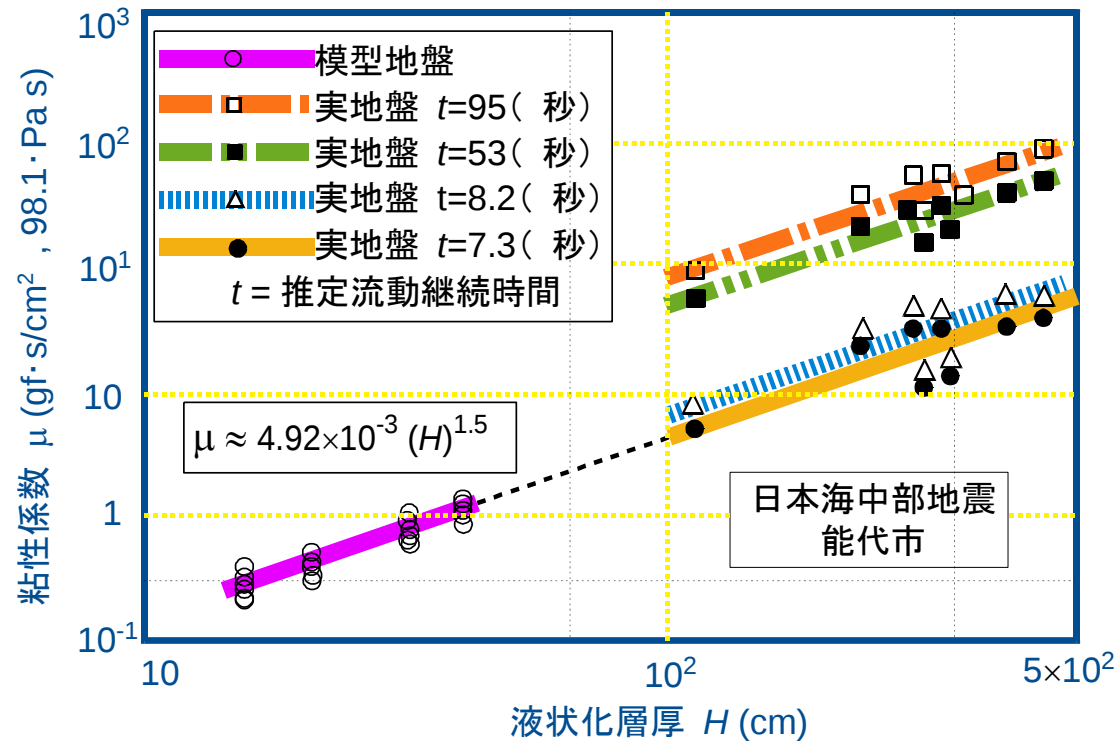
関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

■ 液体説の問題

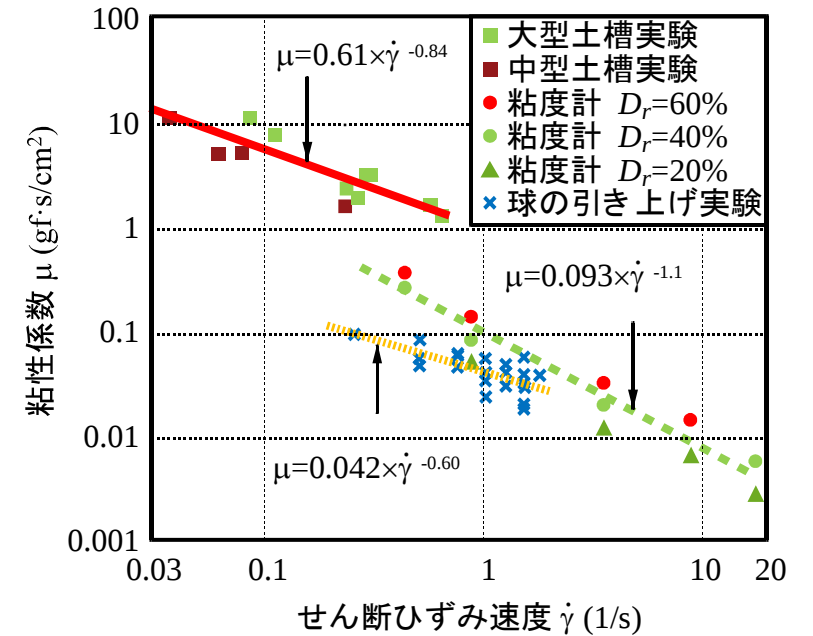
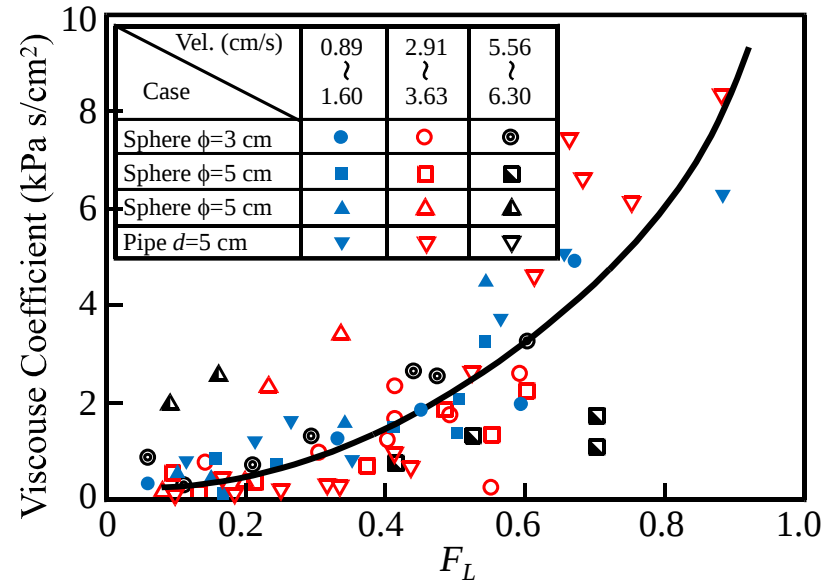
- 傾斜地盤の実験では、振動を止めると流動が止まってしまう。
- 地震被害では、流動の継続時間は長そうに思える。



- 実現象と合わない？

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 粘性係数



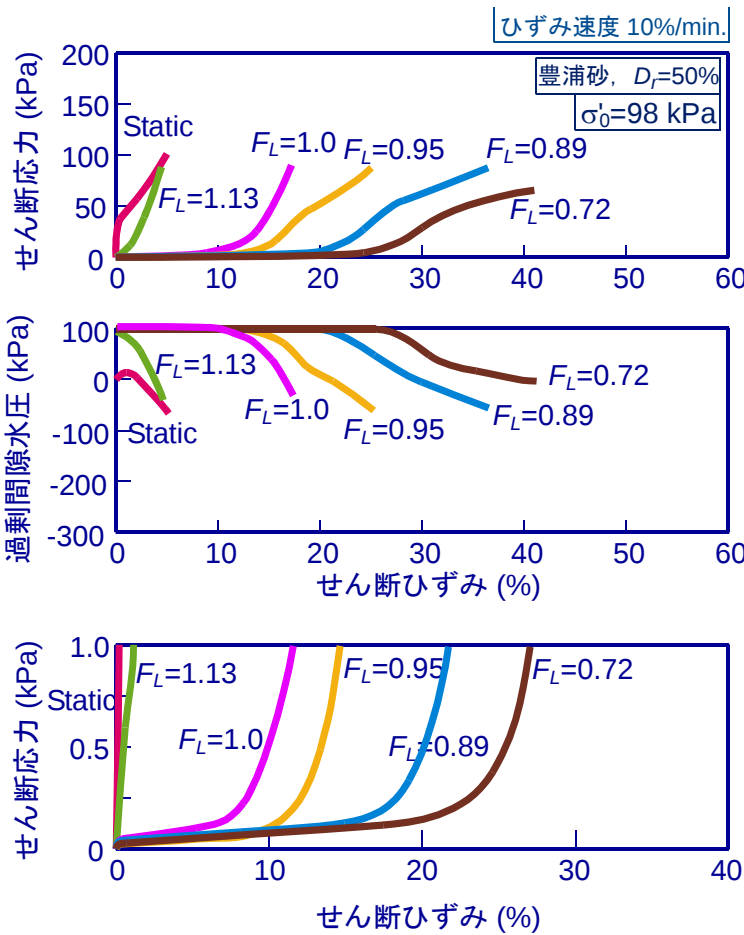
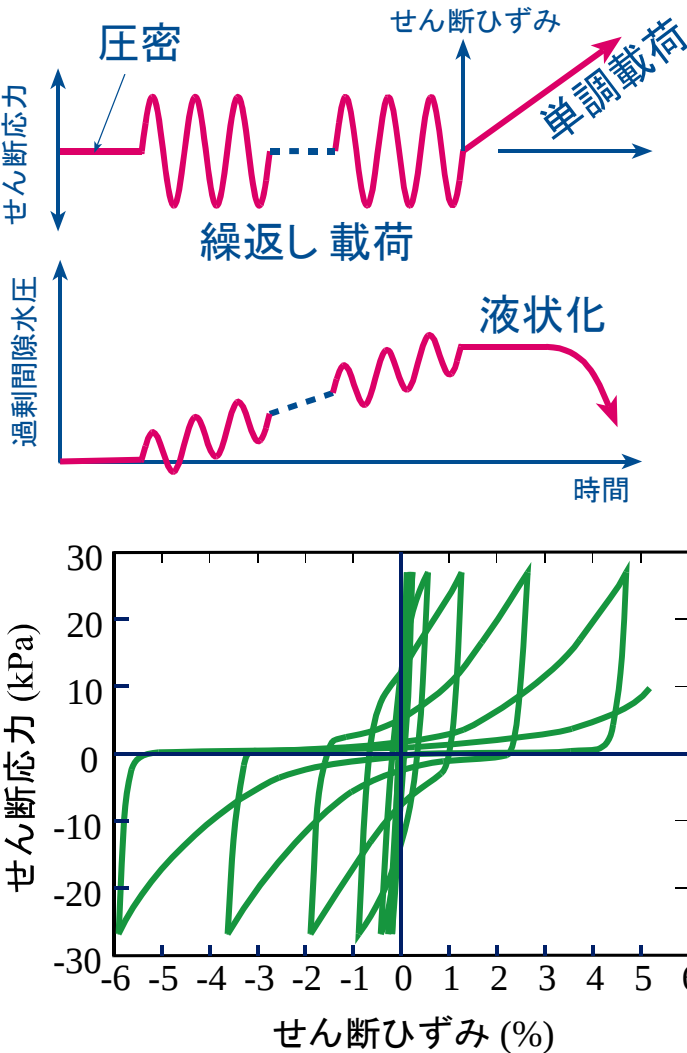
● 粘性係数の代表値

- ▶ 水 : $1 \times 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$ (温度により変化)
- ▶ マヨネーズ : $8 \times 10^{-3} \text{ kPa} \cdot \text{s}$

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

固体らしい挙動

■ 固体らしい挙動



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

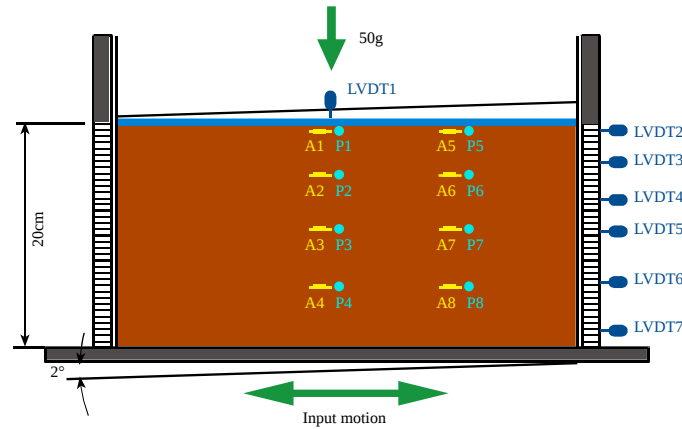
液体か固体か

■ 液体と固体

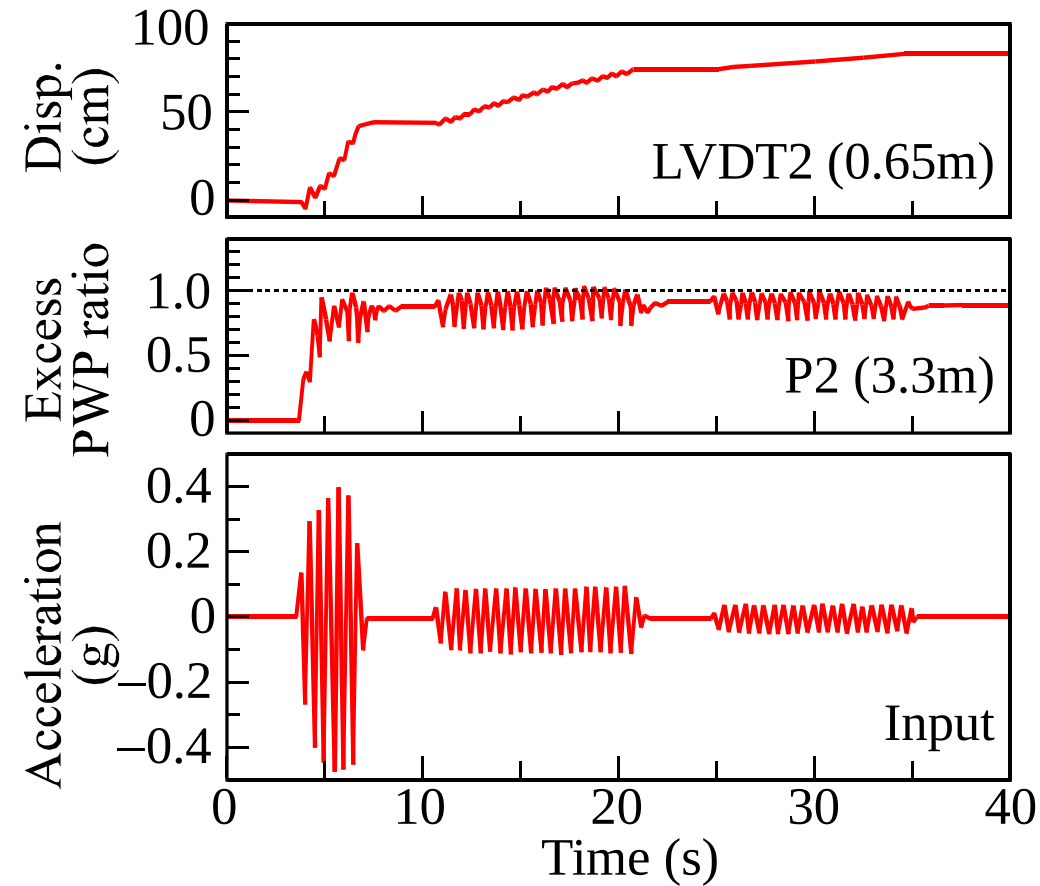
- 静的な実験では固体
 - ▶ ただし，有効応力はほとんど0→容易に骨格構造が崩れる
 - ▶ すぐに新しい骨格構造が形成
 - ▶ この繰返しで，液体のように挙動する
- 振動実験で，振動中は流体
 - ▶ 振動を止めると変位も止まる
- 流体の状態を維持するには，**駆動力**が必要
 - ▶ 小さい振動
 - ▶ 上向き浸透力
 - ◆ 液状化層厚
- 大ひずみになるとサイクリックモビリティが起こる
 - ▶ 固体の挙動

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 駆動力 = 小さい振動

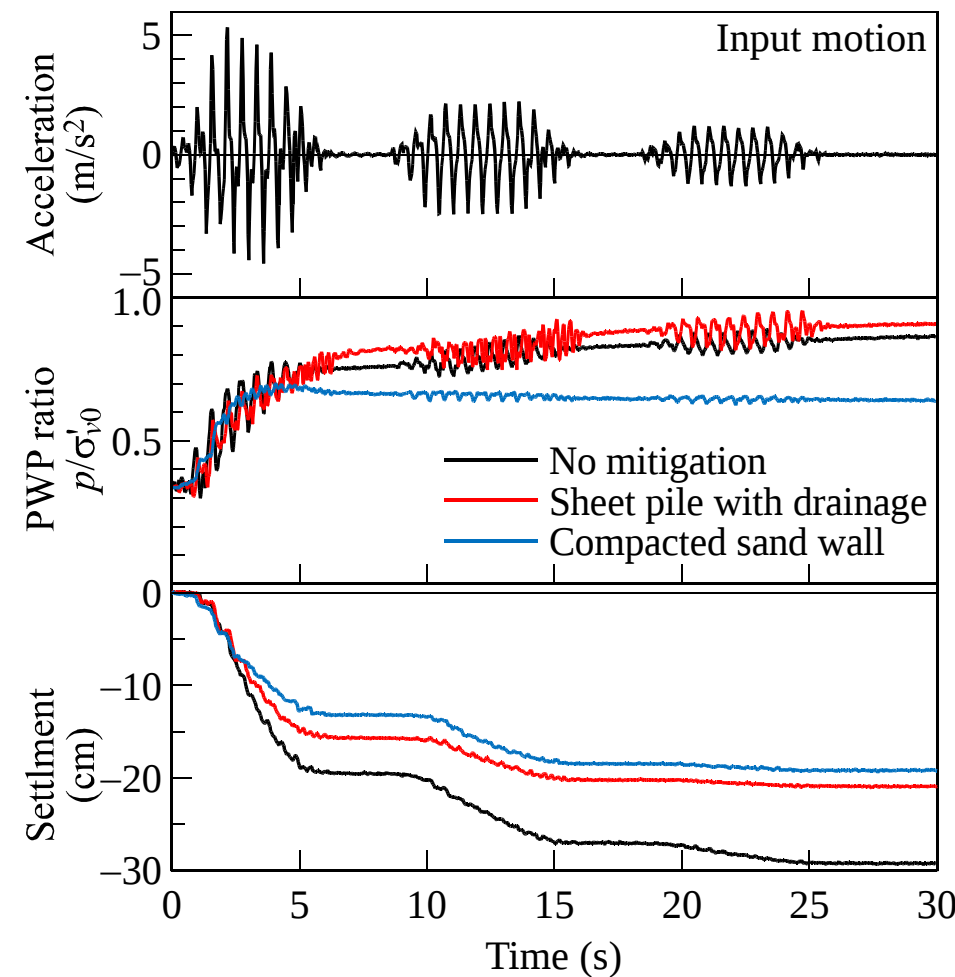
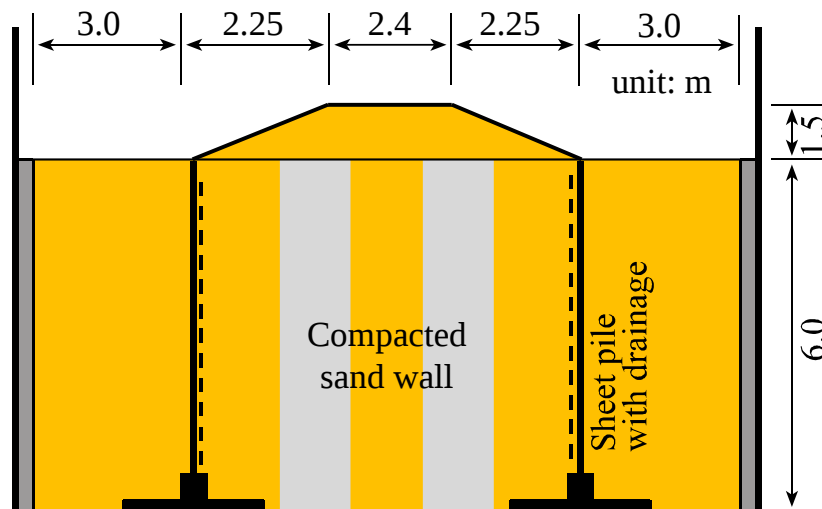


加振中のみ変位



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 駆動力 = 小さい振動



液状化したら，土はどろどろに？

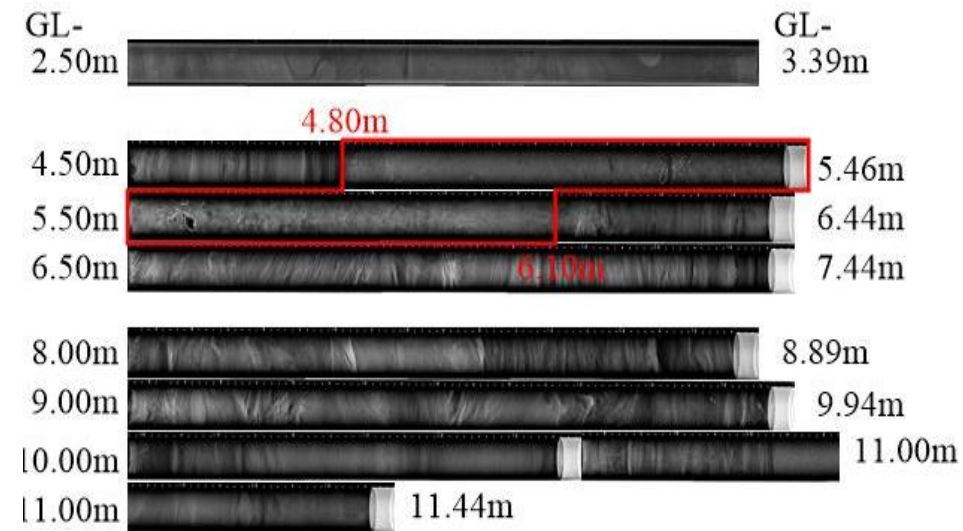
関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授



西宮市



浦安市

- 目に見えて動くほど隙間はない
- 噴砂は例外

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

まとめ

■ 液状化≠液体

- 昔は、初期液状化（有効応力 = 0）から載荷を続けると液体状になると考えられた（完全液状化）
- 昔：初期液状化→部分液状化→完全液状化（液体状）
 - ▶ 大ひずみだから液体状になるわけではない
- 今；部分液状化→初期液状化 = 液状化
 - ▶ 必ずサイクリックモビリティが起こる→固体化

■ 静的な繰返しせん断だと固定

■ 液体を維持するためには駆動力が必要

- 小さい振動
- 上向き浸透流

■ 噴砂は別の話

- 土の骨格がどろどろに壊れるほど間隙は大きくない

session.4

液状化の定義と指針間の違い

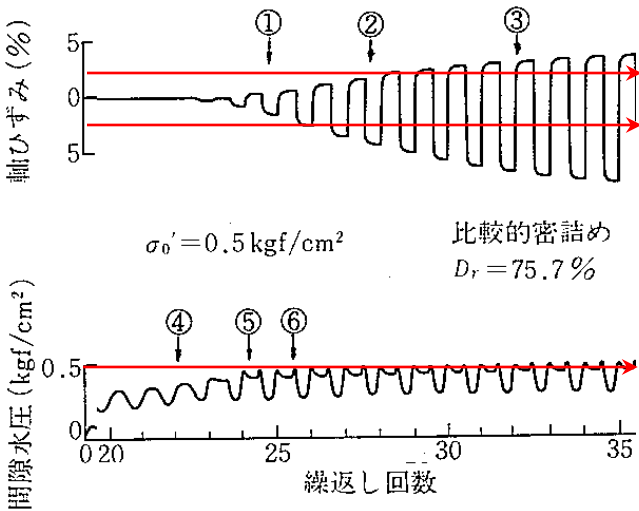
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化判定

	着目点	液状化時点の判断方法	判断方法がとられている理由
①	ひ ず み	ひずみ振幅の急増点	破壊現象が生じ始めるとの考え
②	ひ ず み	軸ひずみ両振幅 (DA)=5%	構造物が被害を受けるひずみに達したのではないかとの考え
③	ひ ず み	軸ひずみ両振幅10～25%	大ひずみが生じ，構造物は必ず被害を受けるのではとの考え
④	間隙水圧	急増し始める時点	液状化し始めたとの考え
⑤	間隙水圧	飛び出し現象が生じ始める時点	液本化し始めたとの考え
⑥	間隙水圧	$u / \sigma'_0 = 1.0$ (または，一定値) に達した時点	有効拘束圧が0となり液状化したとの考え

安田：1988年時点

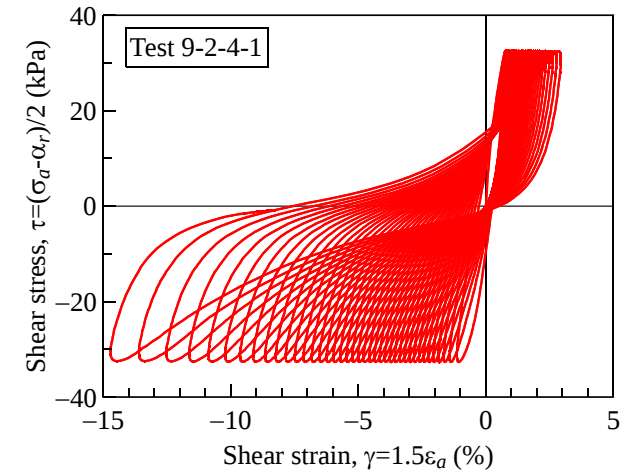
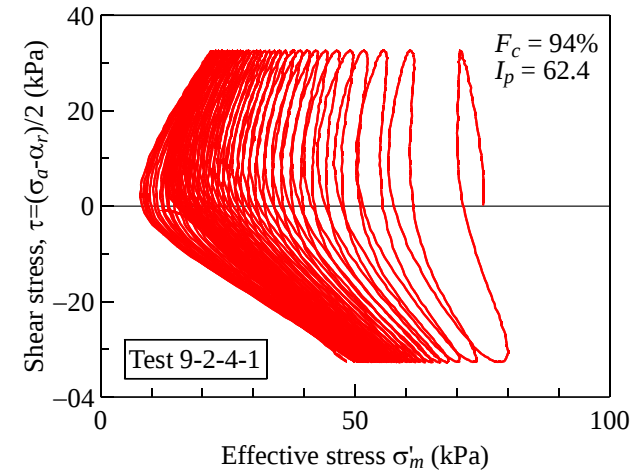
- DA=5%がよく用いられるが、本来は構造物との耐力との兼ね合いで決めるべき



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 設計指針

- ひずみで定義



■ 実現象

- 振動台実験，遠心力载荷試験
 - ▶ 過剰間隙水圧で定義
 - ◆ ひずみを計測するのは難しい
- 地震被害
 - ▶ 噴砂で判定

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化強度の定義

38

■ 地盤工学会

- 複数の基準

■ 道路橋示方書

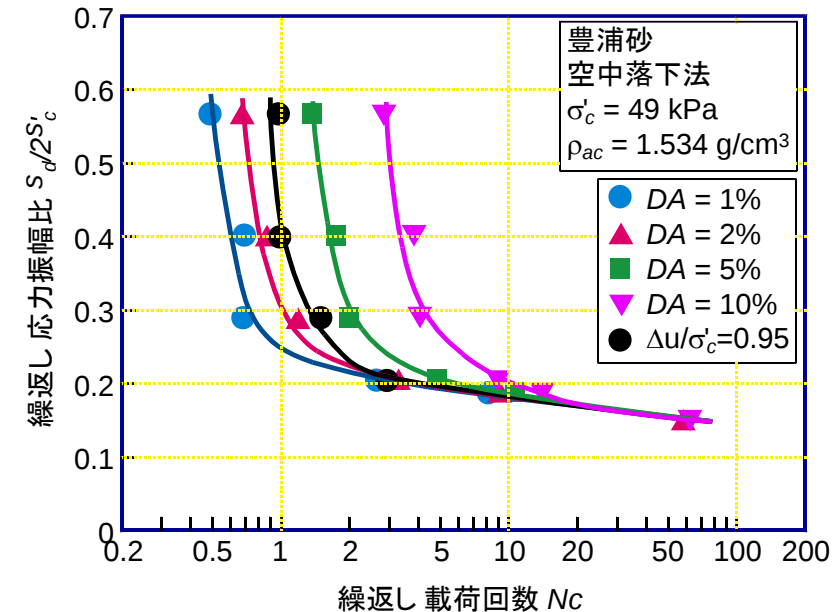
- DA=5%, 20回
 - ▶ 液状化強度が安定する
 - ▶ Seed (1971)

■ 建築基礎構造設計指針

- $\gamma=5\%$ (DA=6.67%), 15回
 - ▶ 詳細は後で

■ 多くの論文ではDA=5%が用いられている。

- 地盤工学会の試験法の影響
 - ▶ DAで整理
- 土木の研究者・技術者の発表が多い。
- 建築では補正する必要がある



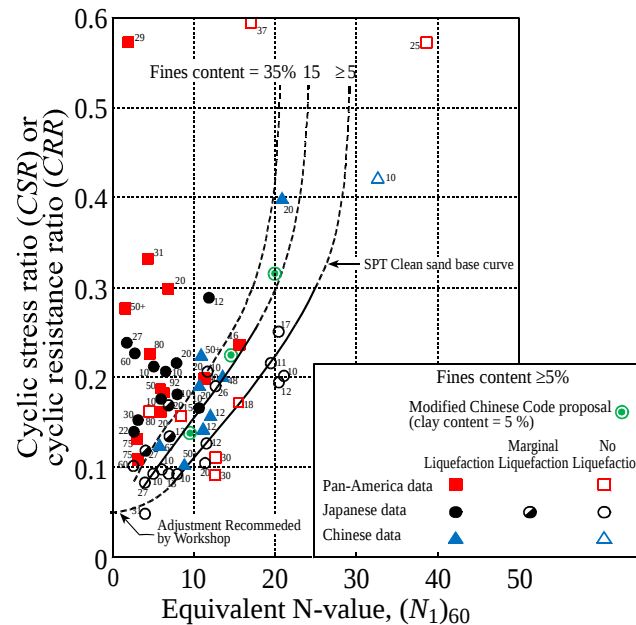
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ Idriss & Boulanger (2008)

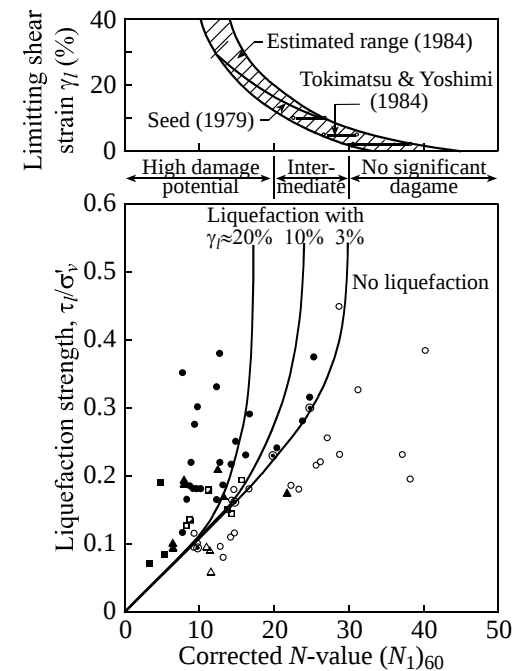
- De' Alba (1976) : 過剰間隙水圧比 $r_u=100\%$
- Yoshimiら (1984) : $DA=5\%$
- Vaid & Sivathayalan (1996) : $\gamma=3\%$

■ NCEER Workshop (1996, 1998)

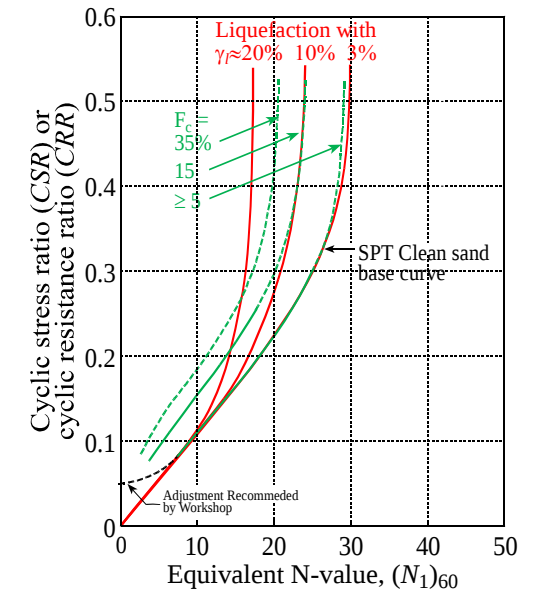
- $\gamma=3\%$ ($DA=4\%$) , 15回



NCEER



Seed, Tokimatsu, etc.

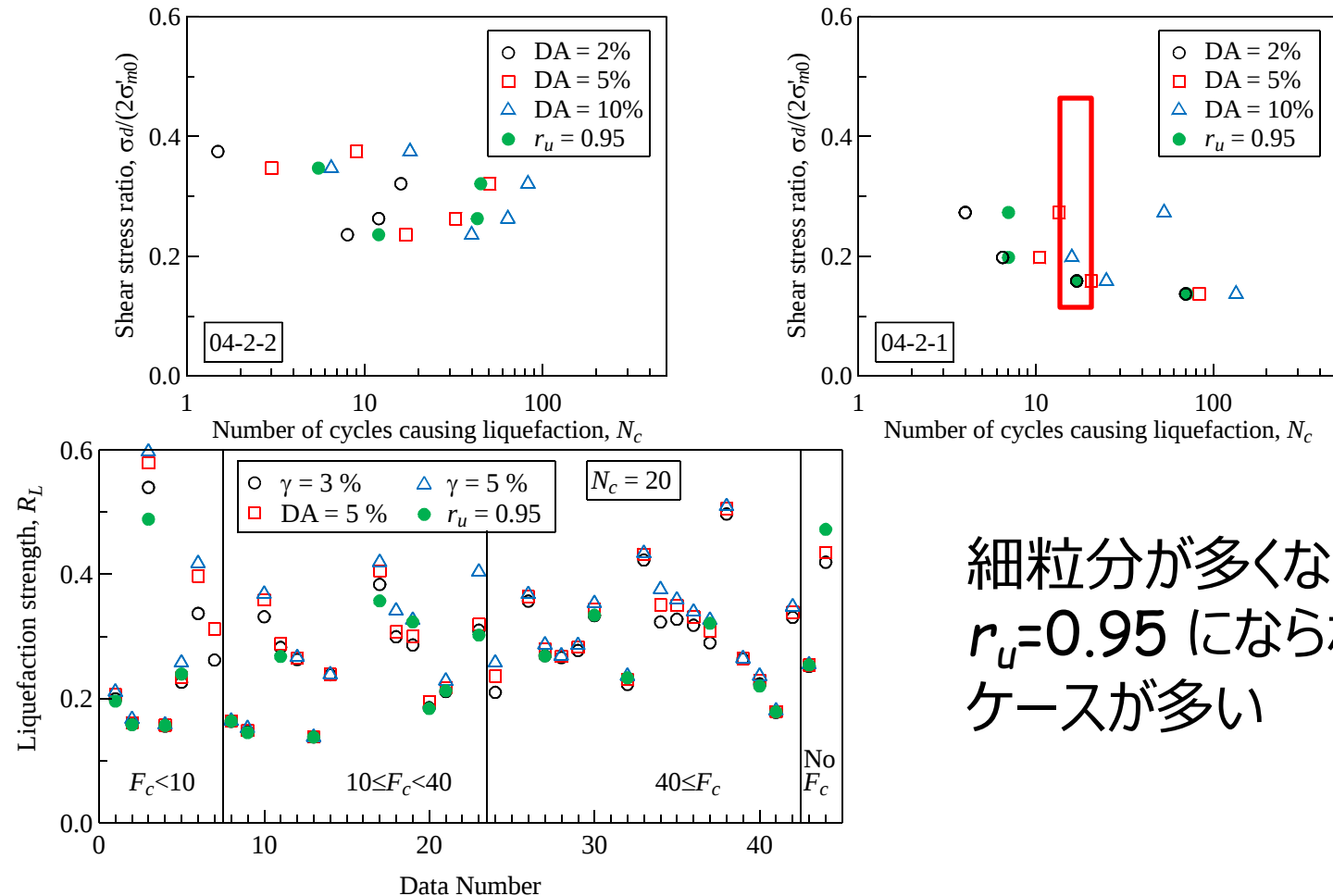


重ね合わせ

技術者の判断で

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 約50の液状化強度試験より
 - ▶ 報告書ではなめらかに結んでいることが一般的

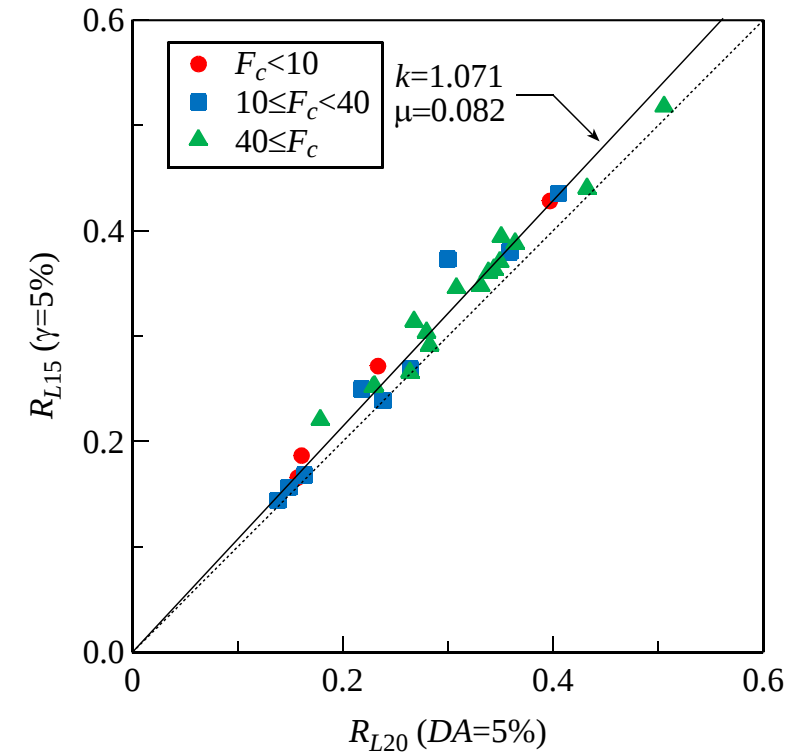
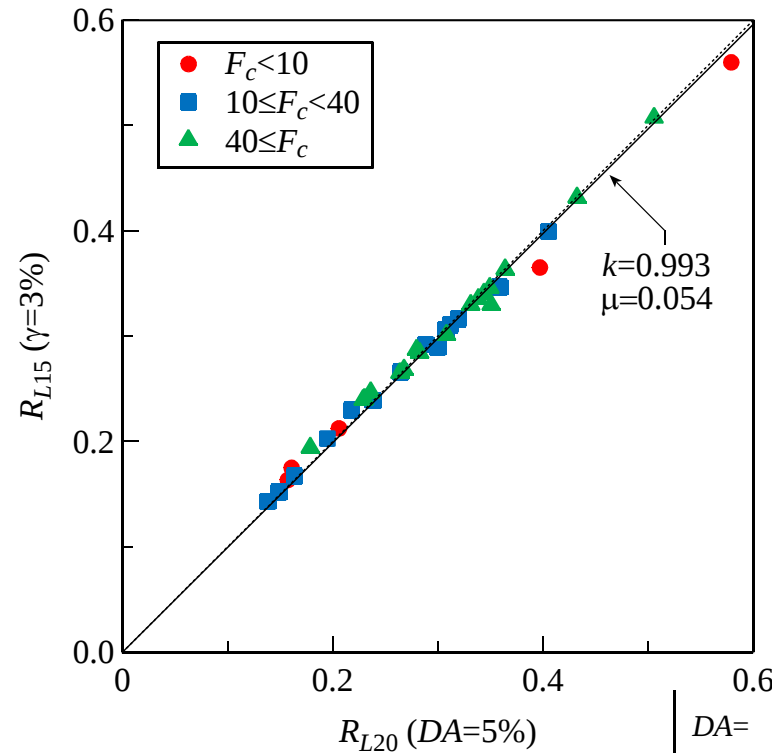


細粒分が多くなると
 $r_u=0.95$ にならない
ケースが多い

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

指針間の違い

建築基礎構造設計指針が
約8%大きい

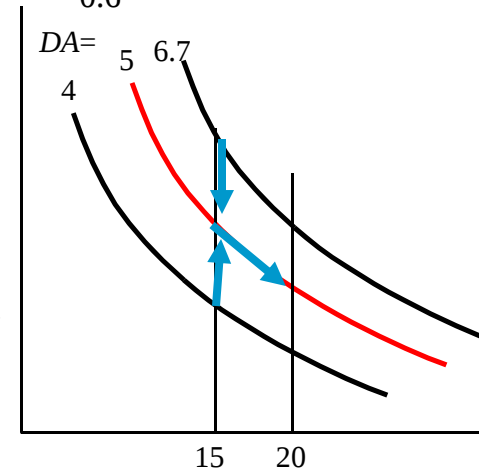


NCEER vs 土木

$\gamma=3\%$ vs $DA=5\%$: R_L 大
15 vs 20 : R_L 小

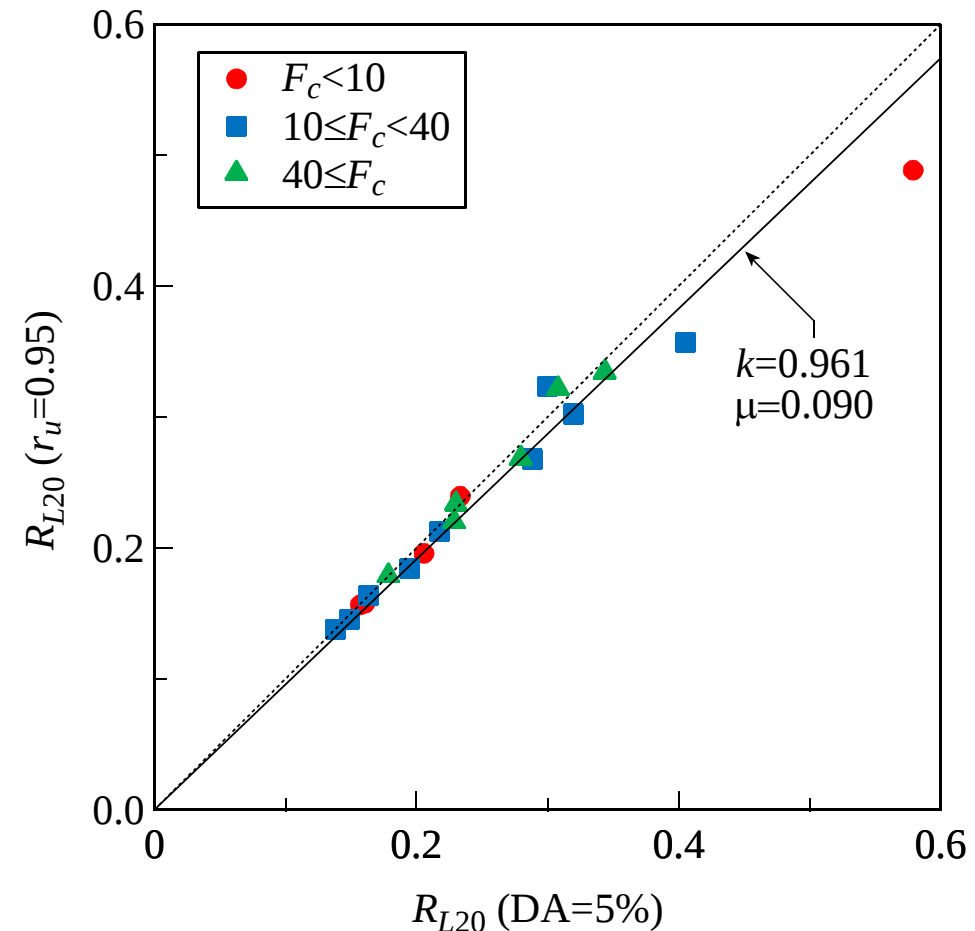
建築 vs 土木

15 vs 20 : R_L 小
 $\gamma=5\%$ vs $DA=5\%$: R_L 小



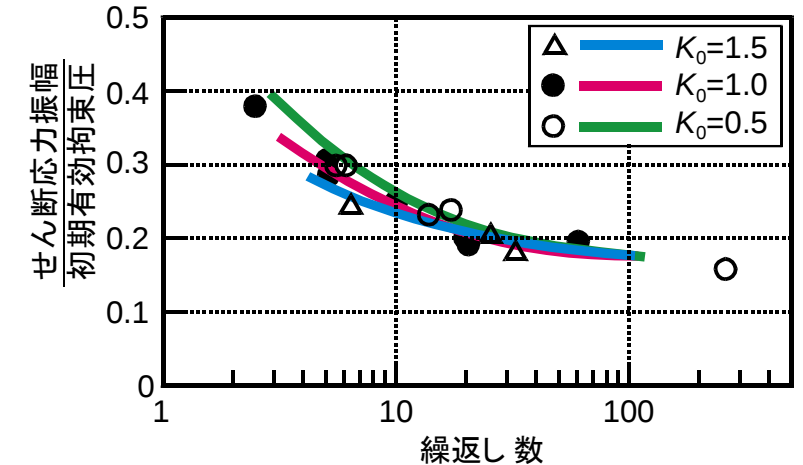
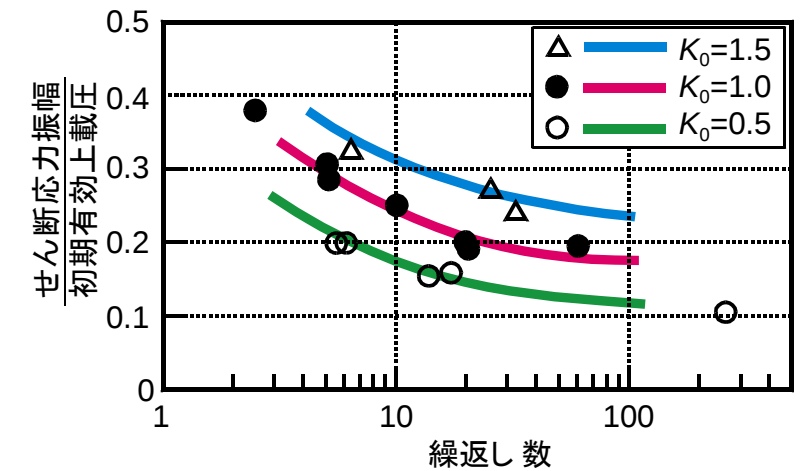
初期液状化との違い

- 細粒分が多いと，初期液状化しない
- 初期液状化したら20回（DA=5%）との差は多くない（4%）



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

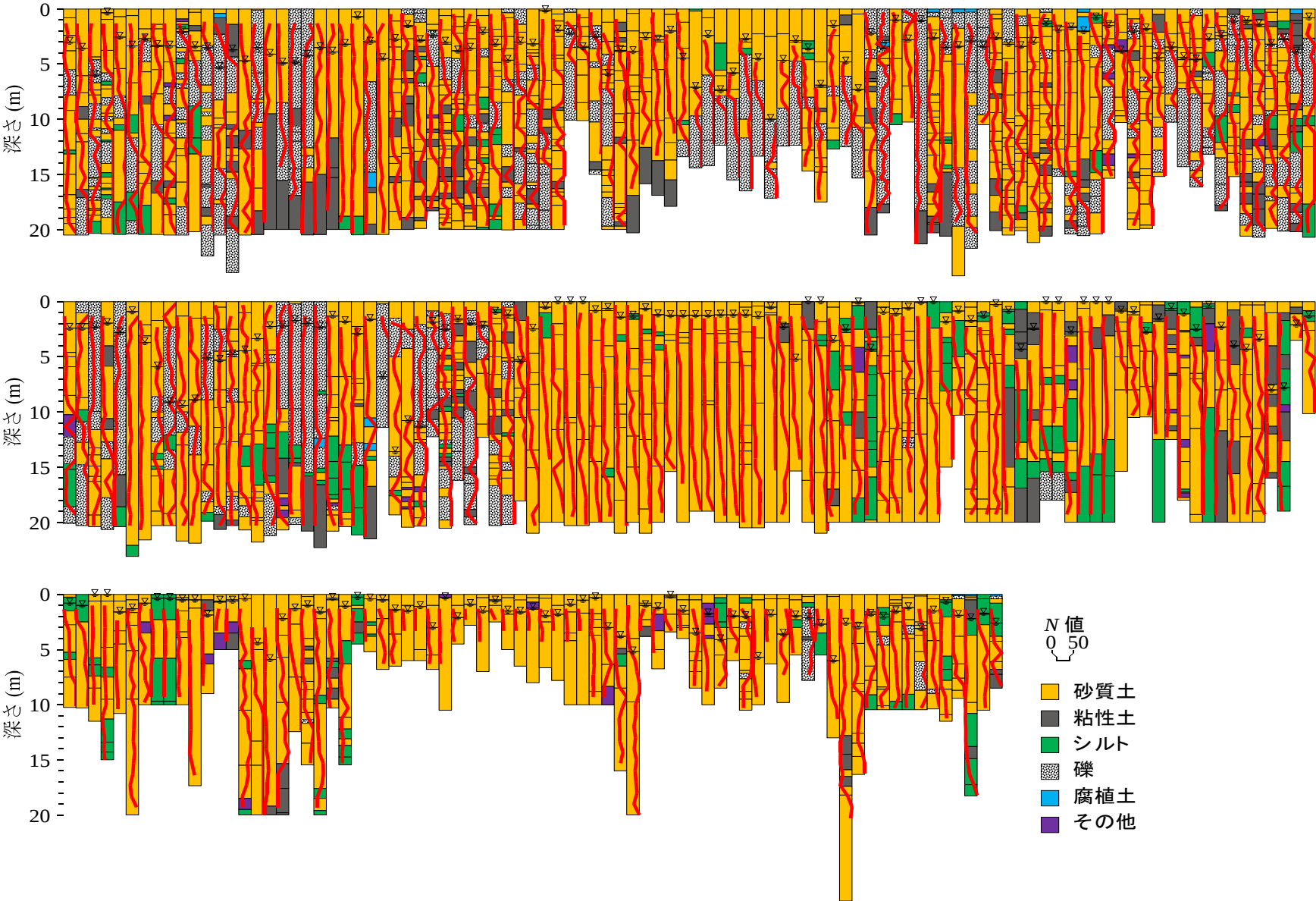
- せん断強度→せん断強度比
 - 何で無次元化？
- 実験は初期有効拘束圧
 - K_0 の影響が除去できる
 - 拘束圧の影響はある
 - ▶ しばしば忘れられている
- 一次元解析では初期有効上載圧
 - $K_0=0.5$ として液状化強度曲線を2/3倍にする必要



$$\sigma'_m = \frac{1+2K_0}{3} \sigma'_v = \frac{2}{3} \sigma'_v$$

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

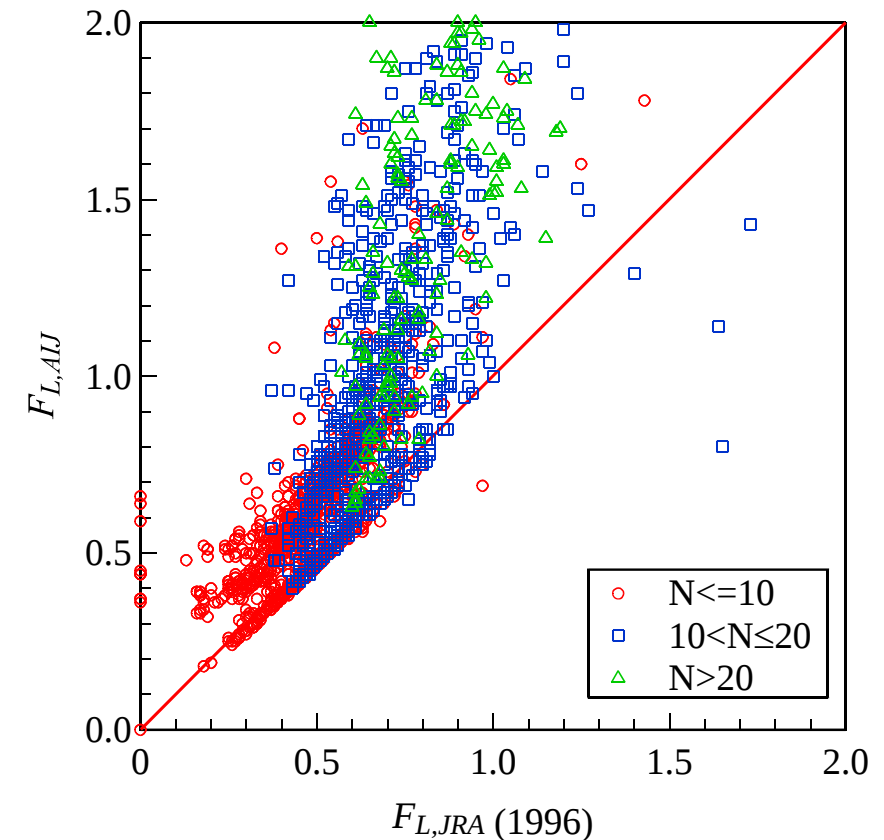
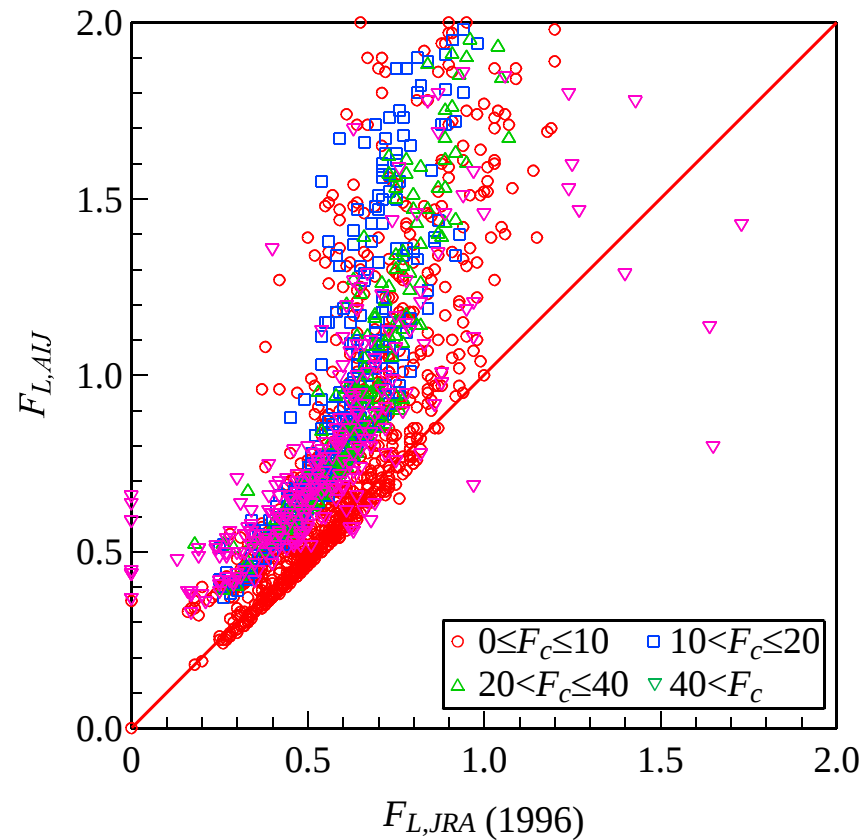
指針間の比較：道路橋示方書と建築基礎構造設計指針



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 道路橋1996 vs 建築基礎構造設計指針

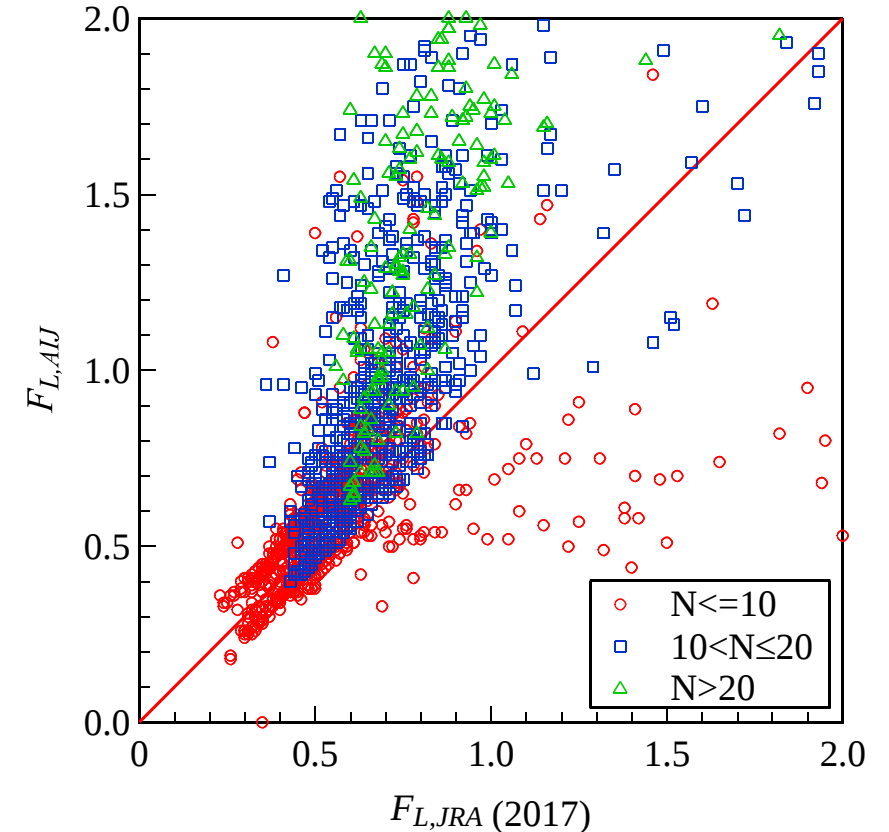
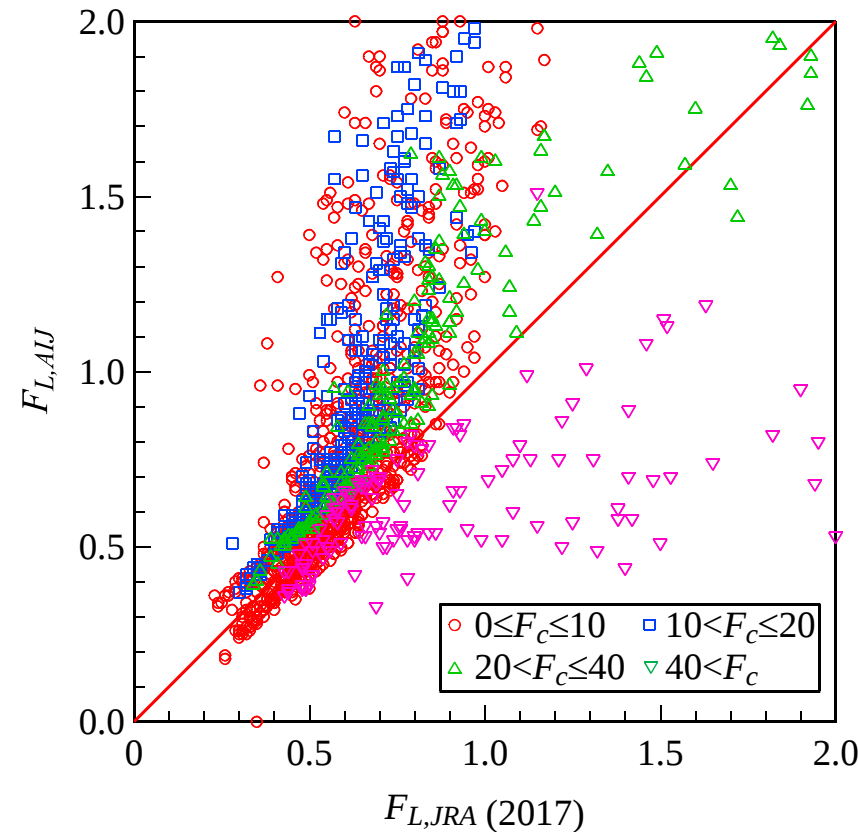
- 外力は同じ



- 建築基礎構造設計指針の方が液状化しにくい

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 道路橋2017 vs 建築基礎構造設計指針



- 細粒分含有率，N値の小さいところで道路橋示方書の F_L が大きくなった

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

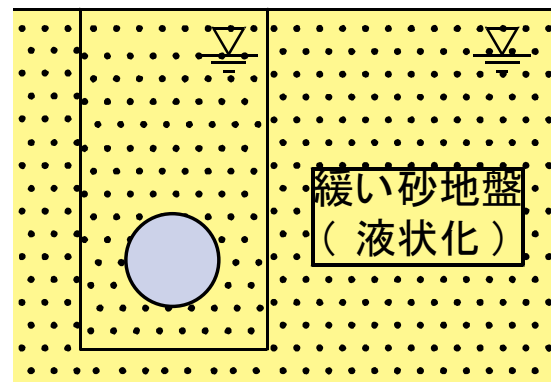
まとめ

- 液状化の定義は，指針，実務により異なる
 - 実験は $DA=5\%$ が多い
 - 道路橋示方書： $DA=5\%$
 - 建築基礎構造設計指針： $\gamma=5\% \rightarrow DA=6.67\%$
 - 世界的（NCEER）： $\gamma=3\% \rightarrow DA=4\%$
 - 振動台，原位置：過剰間隙水圧
- 外力としての繰返し数も違う
 - 道路橋示方書：20回
 - 建築基礎構造設計指針，NCEER：15回
- 三軸試験と一次元解析では異なる液状化強度曲線を使う

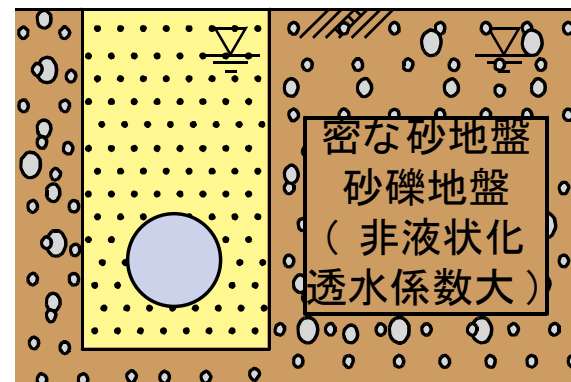
session.5

地中構造物の浮き上がり

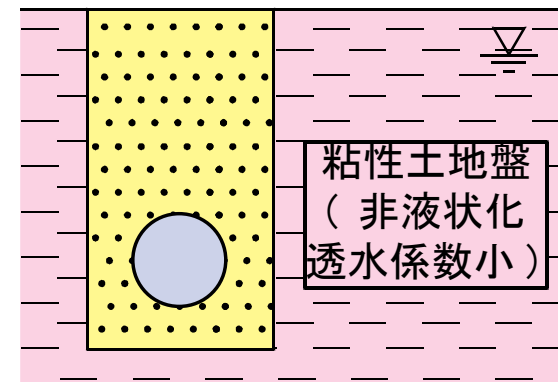
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



(a) 原地盤が緩い砂地盤



(b) 原地盤が密な砂地盤や
透水係数が大きい地盤

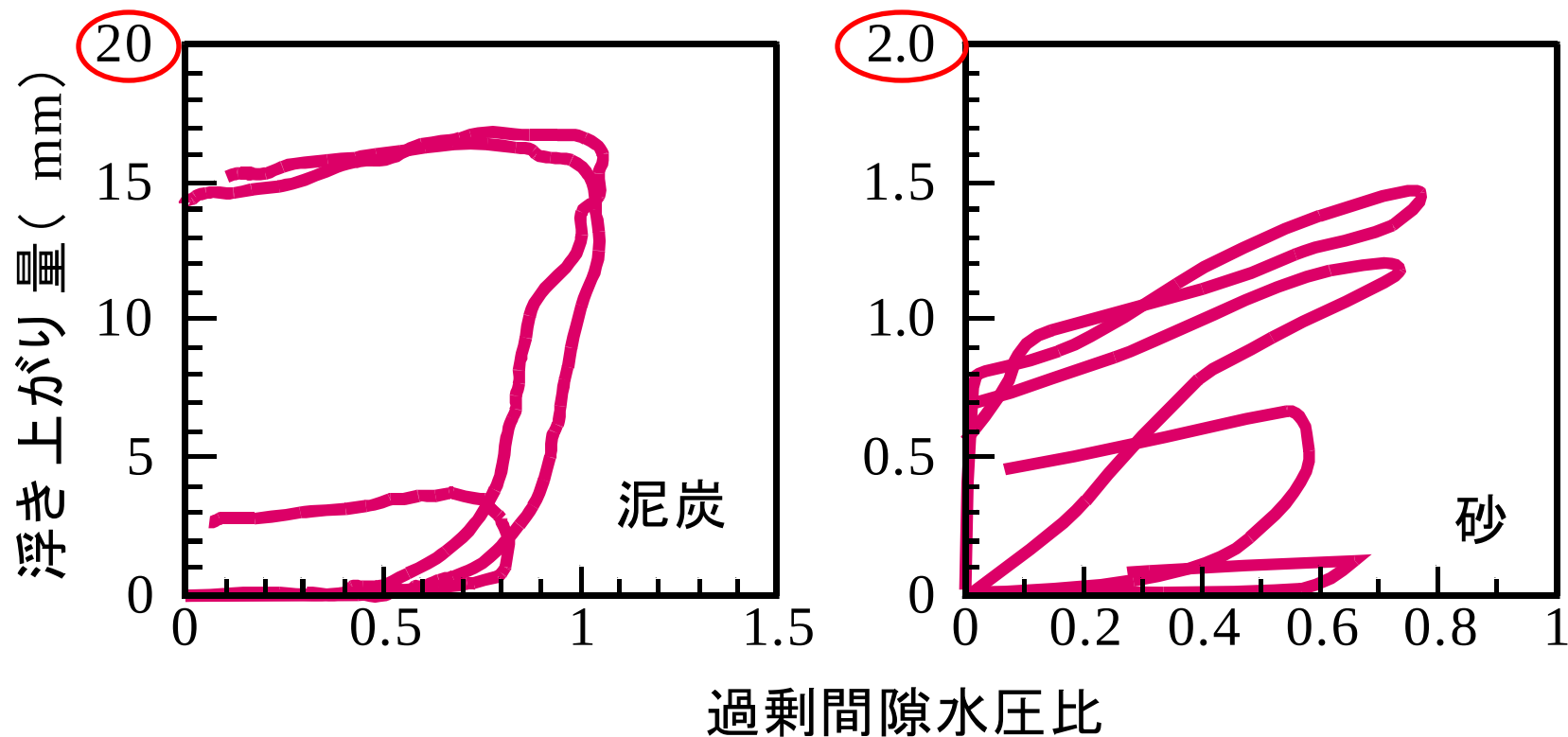


(c) 原地盤が透水係数の
小さい粘性土地盤

- 周辺の土の状況により大きく異なる
- 液状化の程度が違う
- 噴砂はない



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

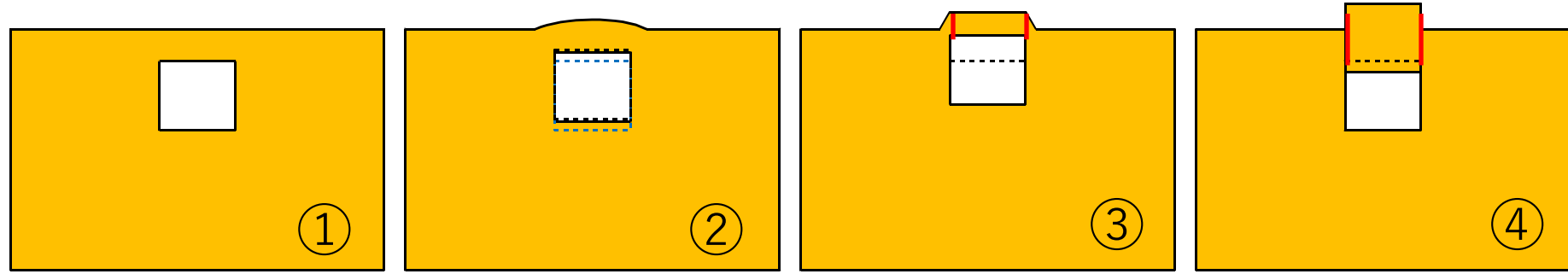


- 浮き上がる際に，土が下に回り込む必要
 - その土の供給源は？
 - ▶ 周辺の同じ深さ付近の土
 - ▶ マンホールの横の埋戻し部

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

浮き上がりの解析

51



①地震前

②少し過剰間隙水圧発生

- FEMで普通に解析可能

③地面に亀裂

- FEMでは解析できない
 - ▶ 工夫をすれば可能かも

④地表に浮き上がり

- 特殊な解析法でないと無理

合わせるだけなら

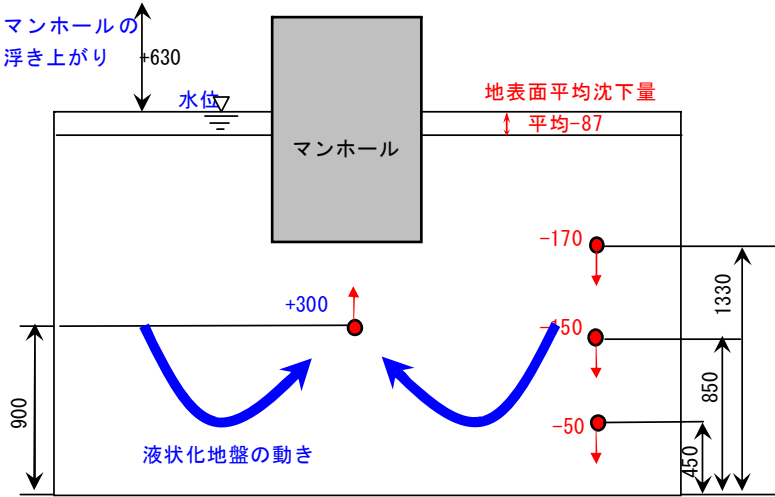
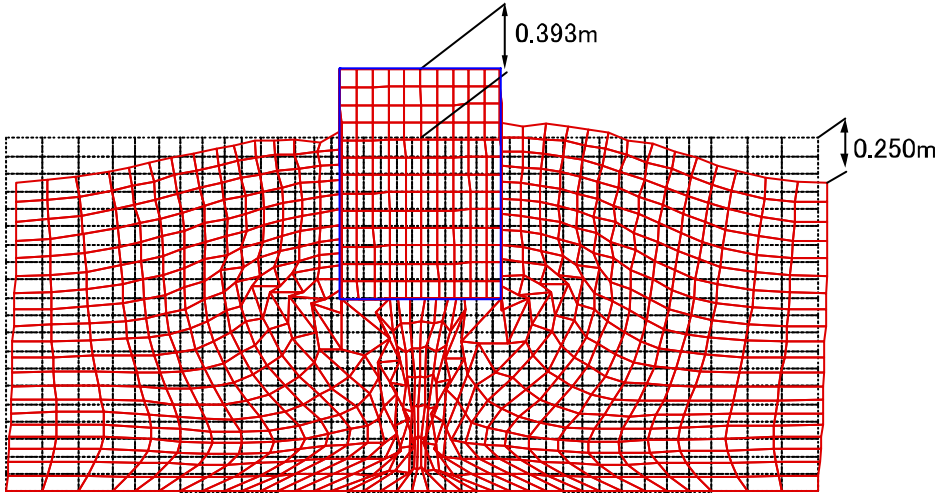
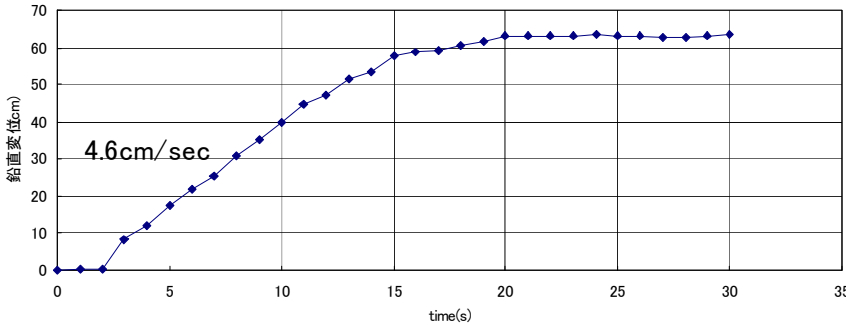
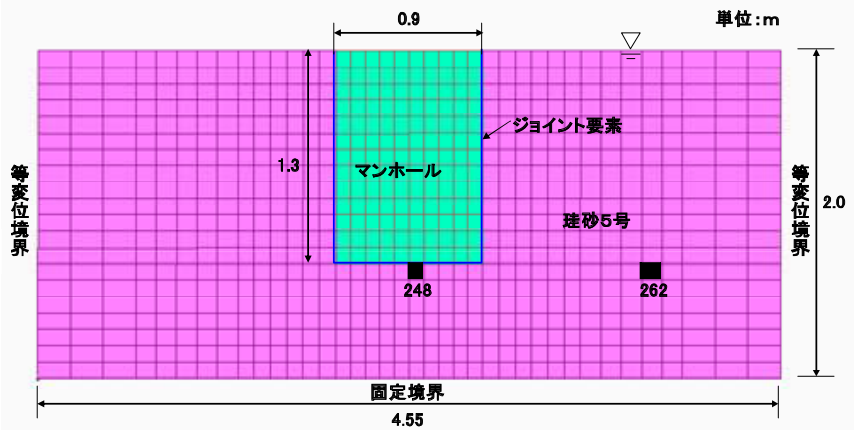
52

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

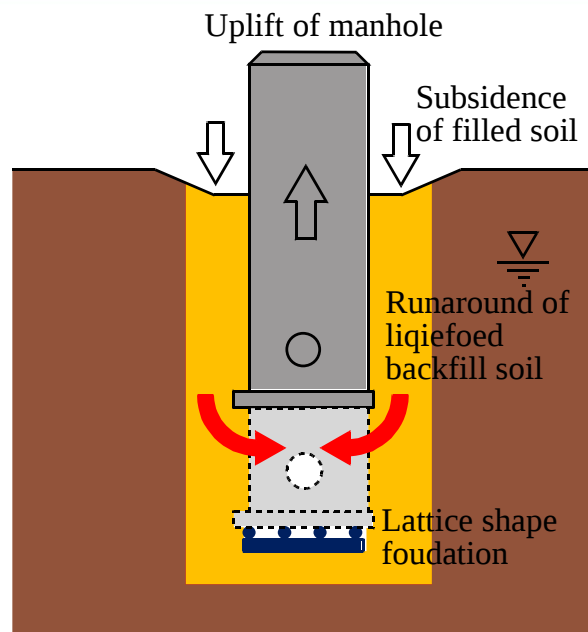


関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

合わせるだけなら



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

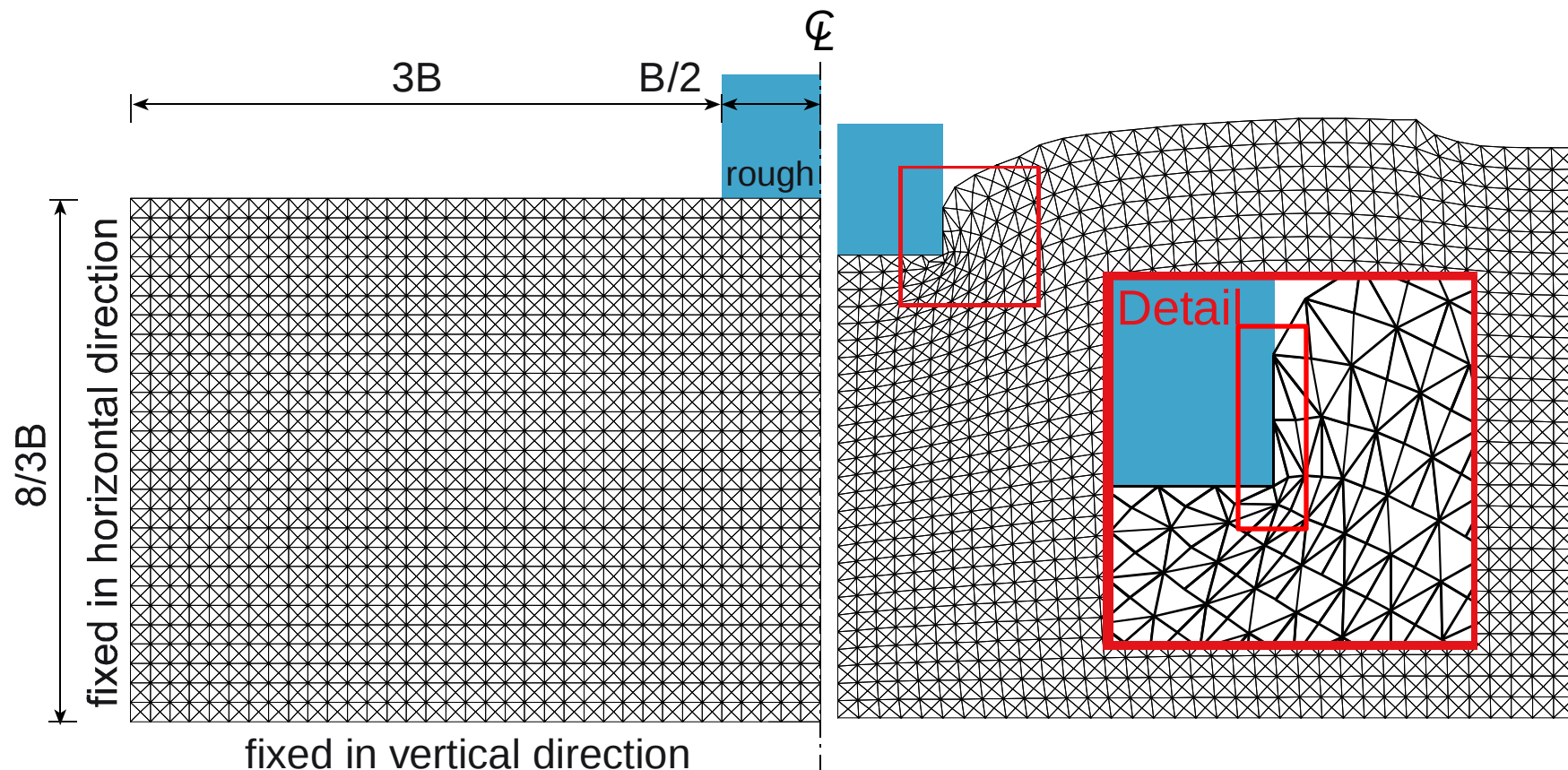


- 地面の変形状態
- 側面の拘束条件
 - なし
 - 過剰間隙水圧の発生だけをあわせればよい

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 貫入が可能な解析法

- ALE (Arbitrary Lagrangean-Eulerian)



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

56

- 浮き上がりを決めるのは
 - 浮力
 - ▶ 過剰間隙水圧の発生量
 - 側方の抵抗力
 - ▶ 有効応力の減少量
- 浮き上がり量により解析の難易度が異なる
 - 少し
 - ▶ 過剰間隙水圧による剛性低下
 - 亀裂
 - ▶ FEMでは. . . .
 - 地表に
 - ▶ 土の回り込みを考慮できる解析

session.6

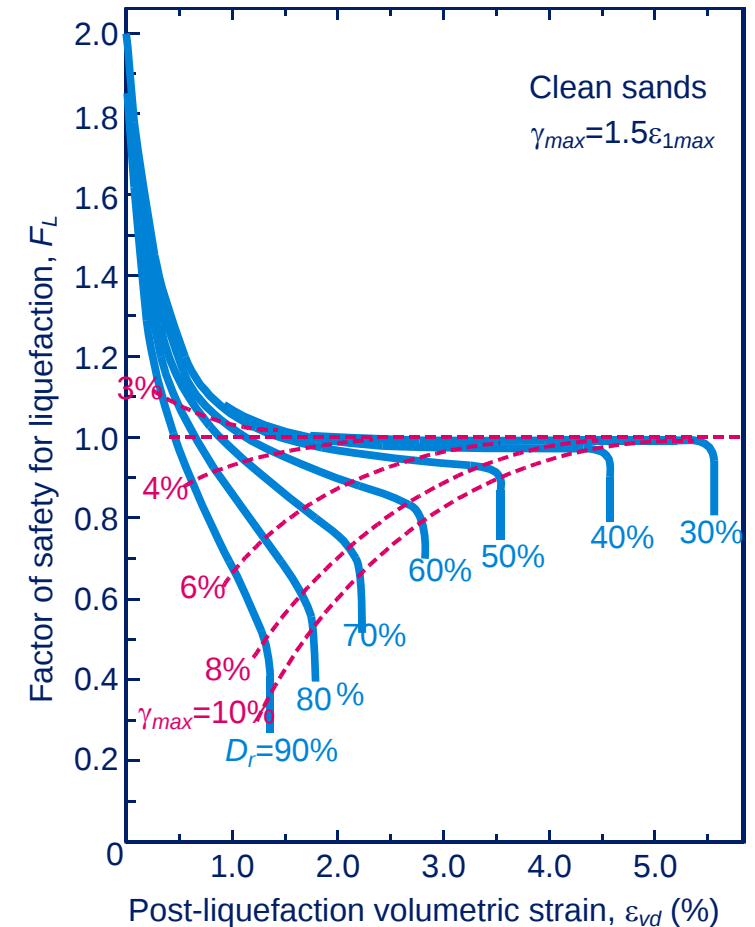
液状化後の地盤の沈下

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

過剰間隙水圧の消散による体積変化

58

- 相対密度に依存
- 液状化後の載荷量に依存
- $F_L = 1$ は $\gamma_{max} = 3.5\%$
 - DA=5%→3.75%
 - 建築基礎構造設計指針
▶ 5%
- きれいな砂に対するデータ

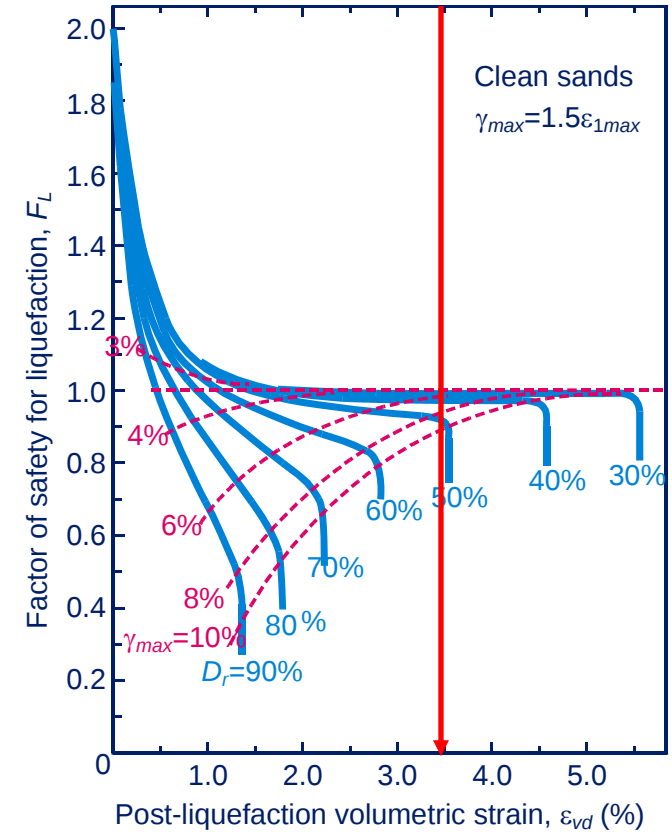


単純せん断試験

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

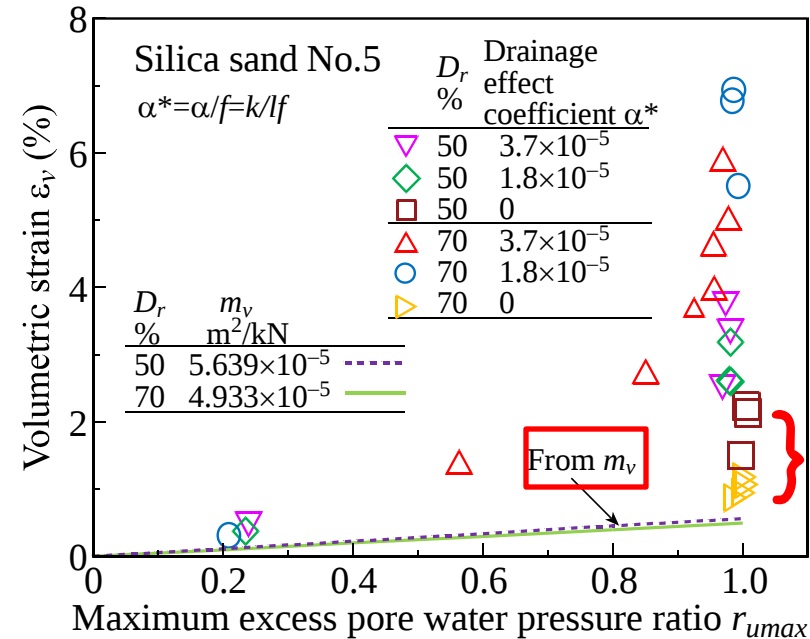
■ 最大沈下量か

- 富士川砂 $e_{max}=1.064$, $e_{min}=0.529$
- $D_r=50\%$: $e=0.7965$
- $e \rightarrow e_{min}$ の間隙比の変化
 $0.7965 - 0.529 = 0.2675$
- 体積ひずみ
 $0.2675 / (1 + 0.7965) = 0.149$ (15%)

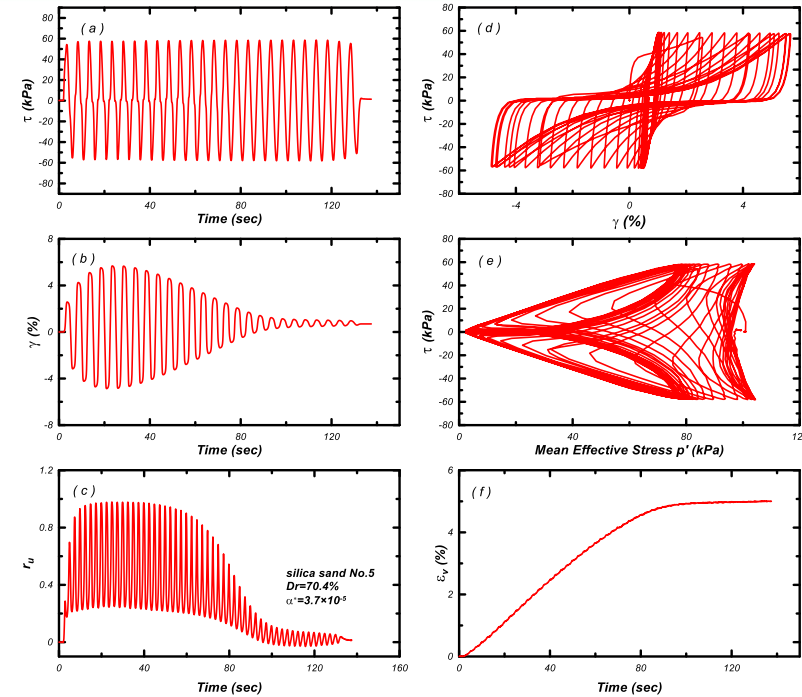


関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 繰返し载荷中の排水

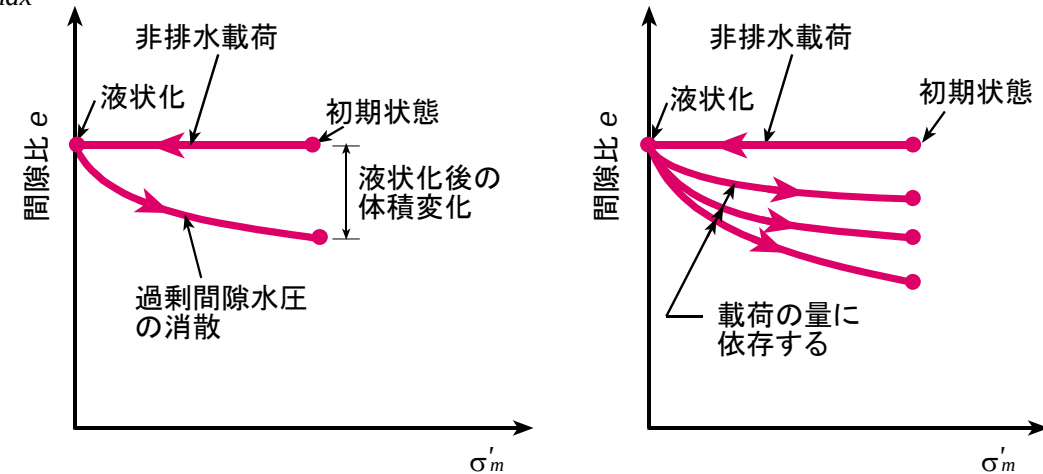


非排水



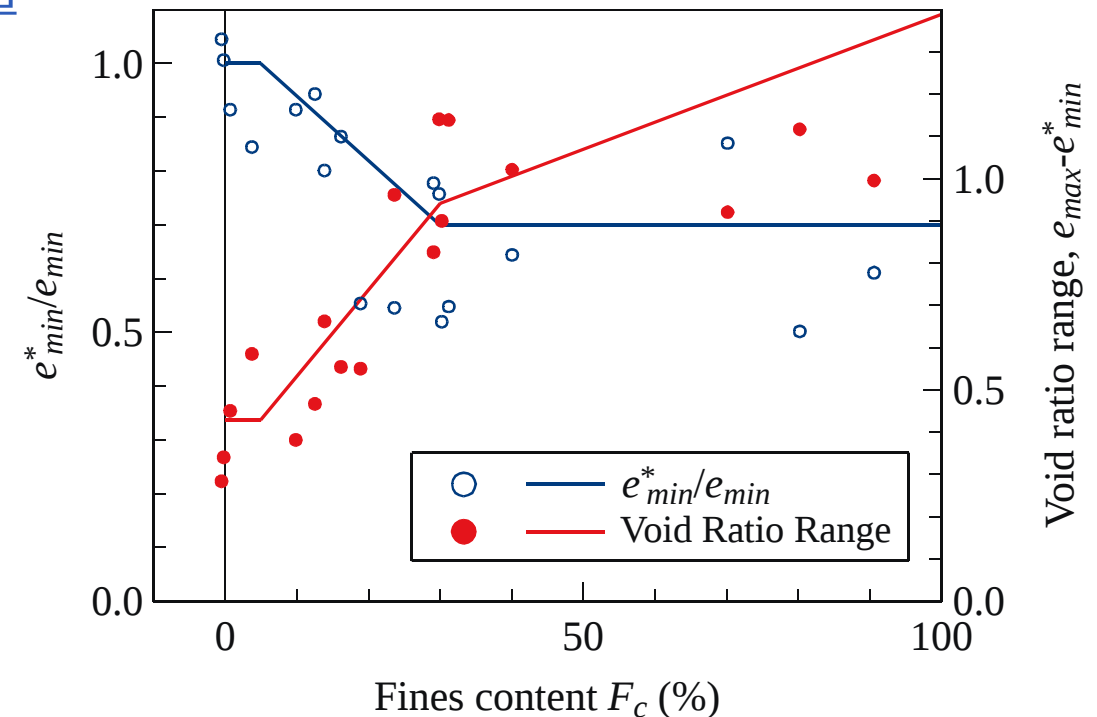
$$d\sigma'_m = \bar{K} \sigma'_m d\varepsilon_v$$

$$d\sigma'_m = \frac{1}{c} \left(\sigma'_m + \frac{\sigma'_{m0}}{e^{\varepsilon_{v0}/c} - 1} \right) d\varepsilon_v$$



■ 細粒分があるとき

- 相対密度の問題 e_{max} , e_{min} の求め方
 - ▶ 密度試験は、 $F_c=5\%$ まで
- 細粒分と e_{min} の関係
 - ▶ e_{min}^* : 実質の最小値
 - ▶ e_{min} : 学会の方法
- 最大・最小間隙比と F_c



関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

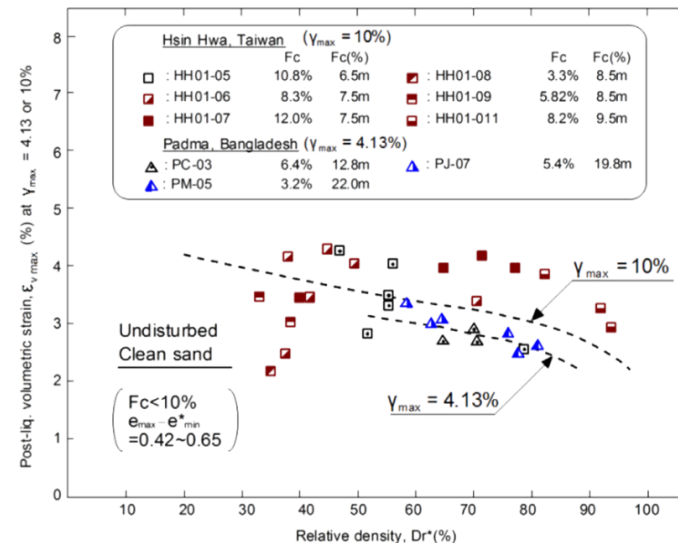
- Cubrinovski and Ishihara, 2002より C_D^* を計算

$$C_D^* = \frac{9}{(e_{\max} - e_{\min}^*)^{1.7}}$$

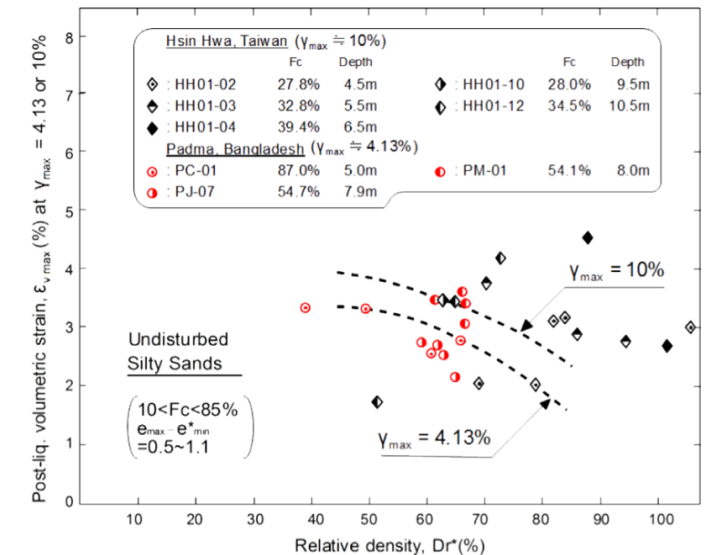
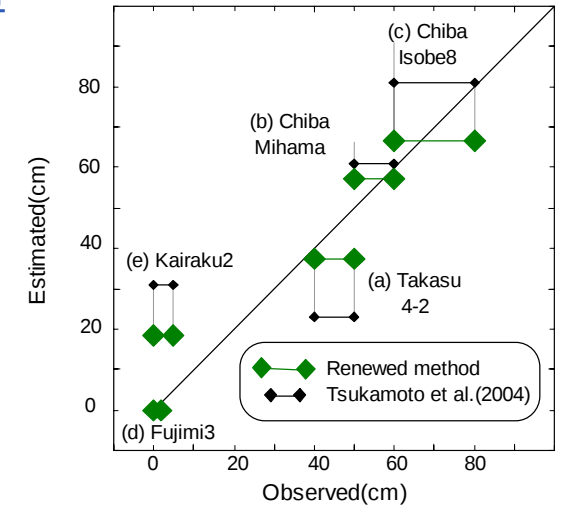
- 相対密度の計算

$$C_D^* = \frac{N_1}{(D_r^*)^2} \rightarrow D_r^* = \sqrt{\frac{N_1}{C_D^*}}$$

- 実験例を元に算定 (台湾・バングラデシュ)



きれいな砂



シルト質砂

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

■ 排水と非排水で沈下量が異なる

- 排水すると、体積ひずみが増える
 - ▶ 載荷量の違い？
- 排水を考慮した解析では？？

■ 相対密度の補正式

- 地盤工学会の方法： $F_c=5\%$ まで
 - ▶ 実務では余り役に立たない？
- 補正式はこれから？

session.7

設計指針における考え方 液状化の発生予測

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

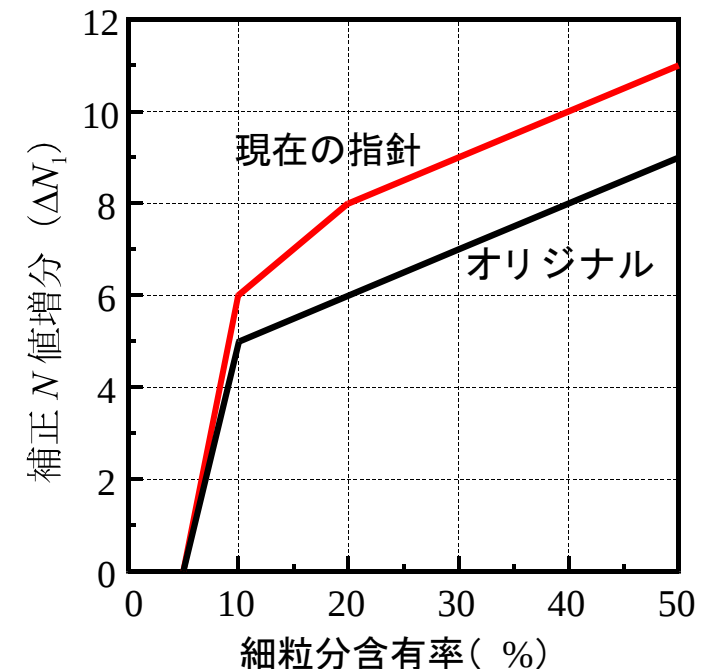
設計指針における考え方：液状化する材料

港湾の施設の技術上の基準	道路橋示方書
均等係数の小さい砂 ($U_c < 3.5$) 均等係数の大きい砂 ($U_c \geq 3.5$)	以下の3つの条件に該当する原則として 沖積層の飽和砂質土層 ①地下水位が現地盤面から10m 以内にあり、かつ現地盤面から20m 以内の深さに存在する飽和砂質土層 ②細粒分含有率 F_c が35%以下の土層または F_c が35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層 ③平均粒径 D_{50} が10mm 以下で、かつ10%粒径 D_{10} が1mm 以下である土層
建築基礎構造設計指針	鉄道構造物等設計標準
・20m 程度以浅の飽和土層 ・細粒分含有率 F_c が35%以下の土層 ただし、以下の土層も検討する。 ・埋立てあるいは盛土地盤では、粘土分含有率が10%以下または塑性指数が15%以下の土層。 ・細粒土を含む礫 ・透水性の低い土層に囲まれた礫	以下の3つの条件に該当する土層 ①地下水位が現地盤面から10m 以内 ②現地盤面から20m 以内の土層 ③平均粒径 D_{50} が10mm 以下、かつ、10%粒径 D_{10} が1mm 以下の土層 ④細粒分含有率 F_c が35%以下、または F_c が35%を超えても粘土分含有率 P_c が15%以下の土層

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 建築基礎構造設計指針を例にすると

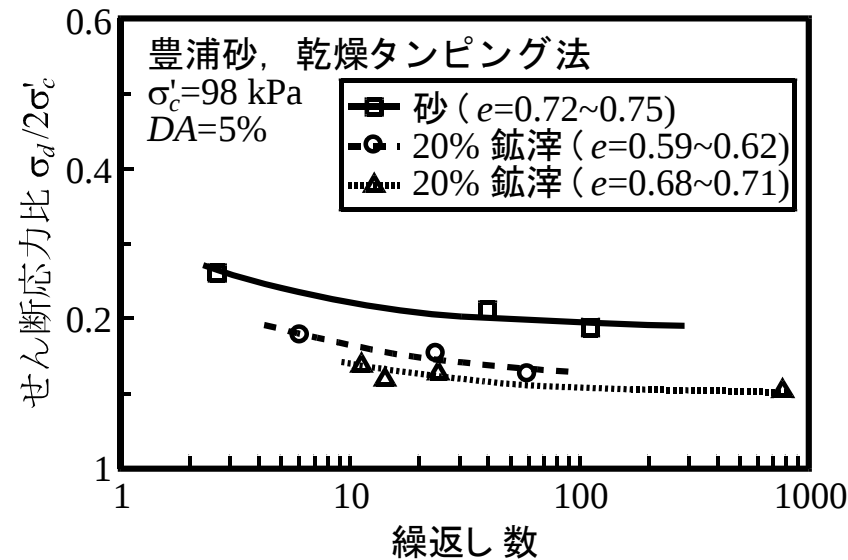
- 20m程度以浅の飽和土層（洪積砂も検討する）
- 細粒分含有率 F_c が35%以下の土層
ただし、以下の土層も検討する。
 - ▶ 埋立てあるいは盛土地盤では、粘土分含有率が10%以下または塑性指数が15%以下の土層。
 - ▶ 細粒土を含む礫
 - ▶ 透水性の低い土層に囲まれた礫
- 細粒分含有率については、もっと大きくても実施
 - ▶ 計測していないことが多い
 - ▶ 安全側
- ▶ 細粒分が多いときの液状化強度は？



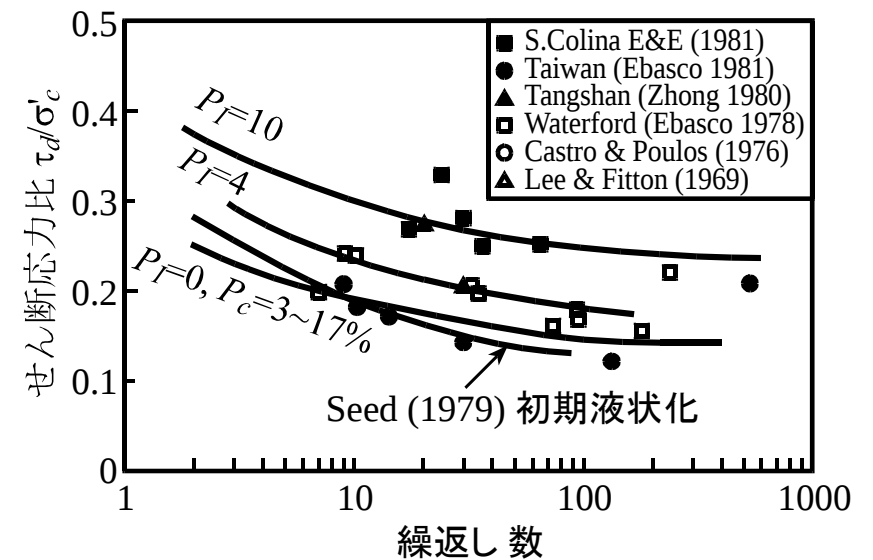
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

■ 設計指針は細粒分が増えると液状化強度が上がるが

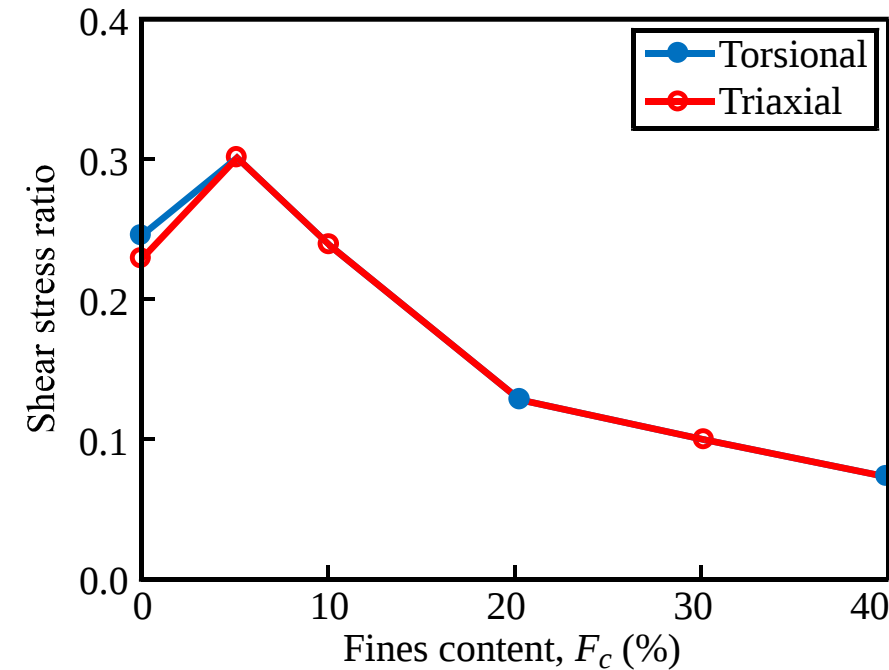
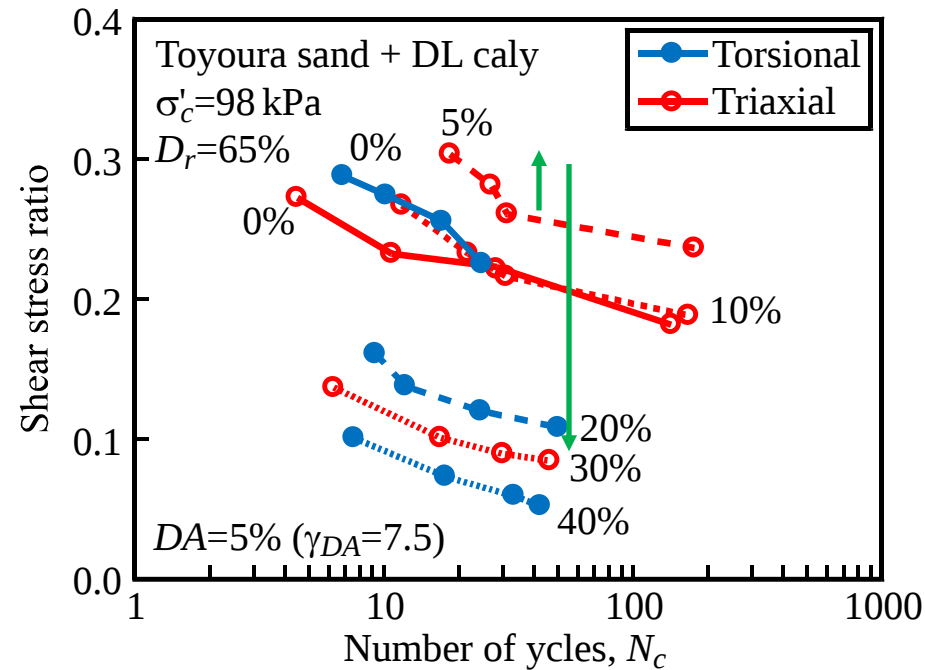


細粒分が増えると液状化
強度は小さくなる



粘土の性質が強くなると
液状化強度は大きくなる

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



細粒分とある程度粒径が大きい2段階の粒径分布となる材料

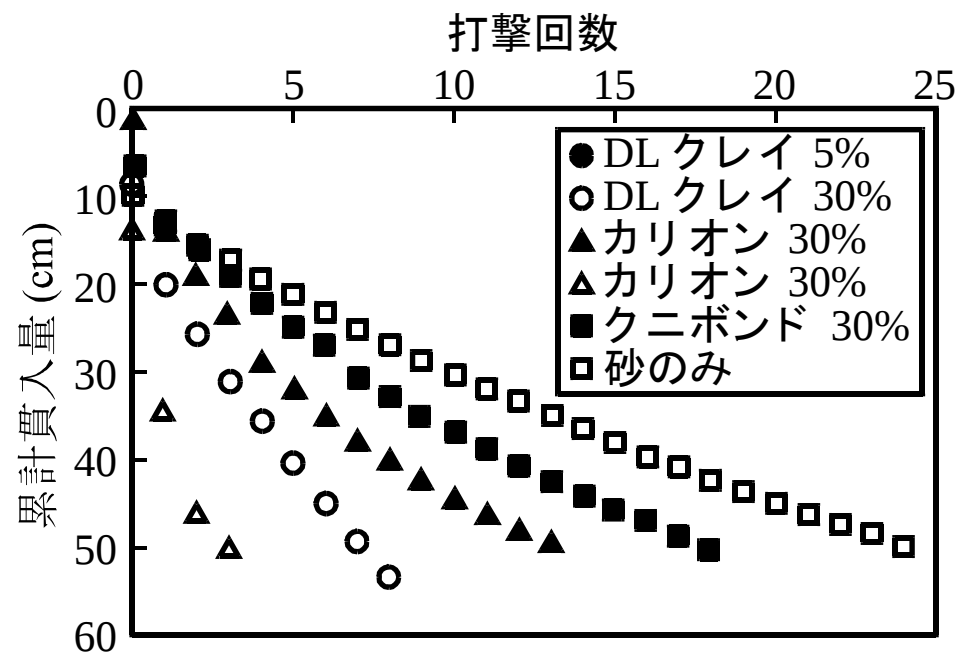
大きい粒径の骨格の間隙に細粒分が入り込むような状態

1 0 %程度以上細粒分が混じると、大きい粒子の骨格を緩くする（間隙比が大きい）と同時に、細粒分の骨格も緩くなる（間隙比が大きい）。

細粒分が大きい粒子の骨格の接点に入り込むと、ベアリングのように働く

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 細粒分が増えるとN値も小さくなる



- 結果として、N値が同じ条件で細粒分を増やすと液状化強度は大きくなる
▶ 設計指針の考え方

F_L による液状化判定

$$F_L = R / L$$

- R : 液状化抵抗（液状化強度比）
- L : 地震時外力によるせん断応力比
- 比
 - 分母は有効上載圧
- L : 最大せん断応力に対応する外力より
- 名称
 - 液状化による抵抗率
 - 液状化安全率

力の釣合いではない
 $F_L \leq 1$ で液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 基礎構造設計指針以外の設計指針

$$L = r_d k_s \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = r_d \left(\frac{\alpha_{max}}{g} \right) \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = r_d \left(\frac{\alpha_{max}}{g} \right) \frac{m_v g}{\sigma'_{v0}} = \boxed{r_d} (m_v \alpha_{max}) \frac{1}{\sigma'_{v0}}$$

■ 建築基礎構造設計指針

$$L = \boxed{r_n r_d} \left(\frac{\alpha_{max}}{g} \right) \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

- r_n : 地震の繰返し数補正

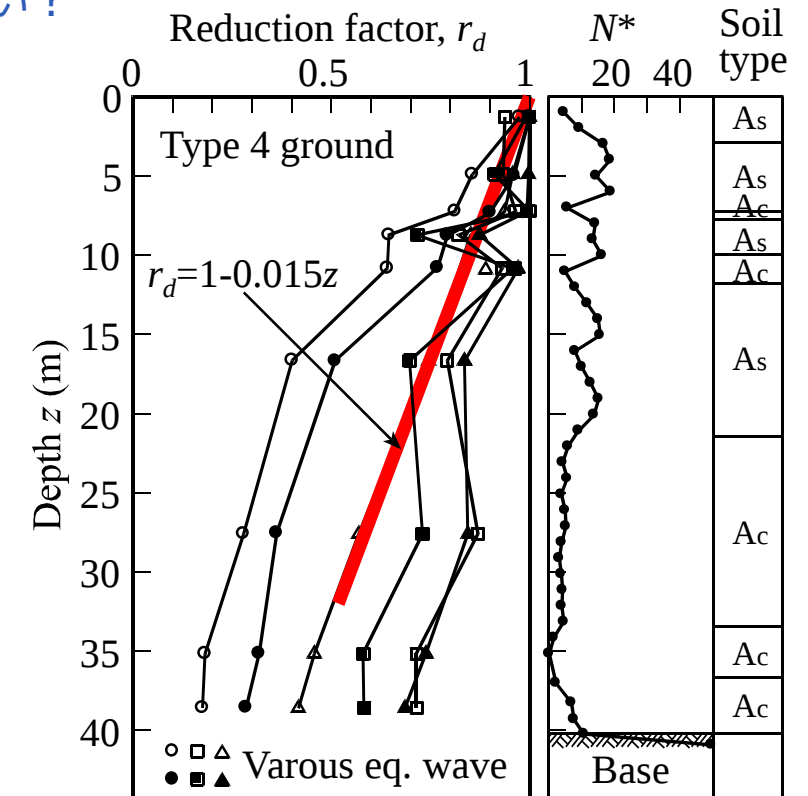
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ r_d とは

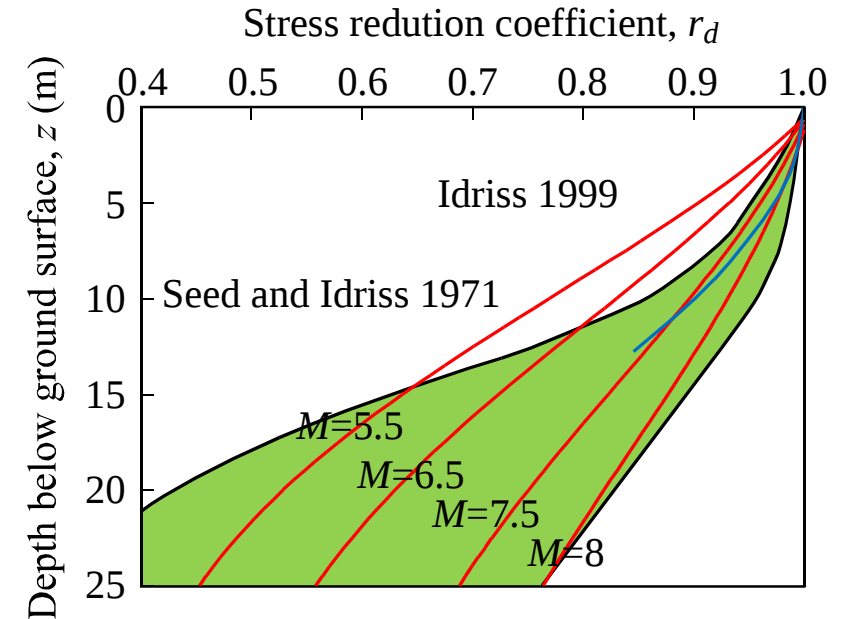
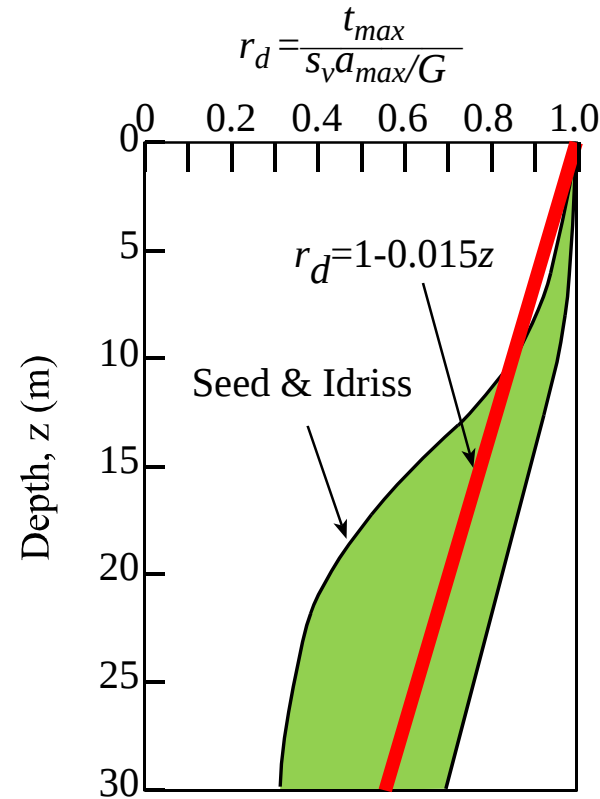
- オリジナル（岩崎，龍岡）
 - ▶ 地盤の弾性的性質に起因した深さ方向の補正係数
 - ◆ どのように計算したのかよくわからない？
- 現在の解釈
 - ▶ せん断応力の低減率

$$L = r_d (m_v \alpha_{max}) \frac{1}{\sigma'_{v0}}$$

$$r_d = \frac{\tau_{max}}{\sigma_v \alpha_{max} / g}$$



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



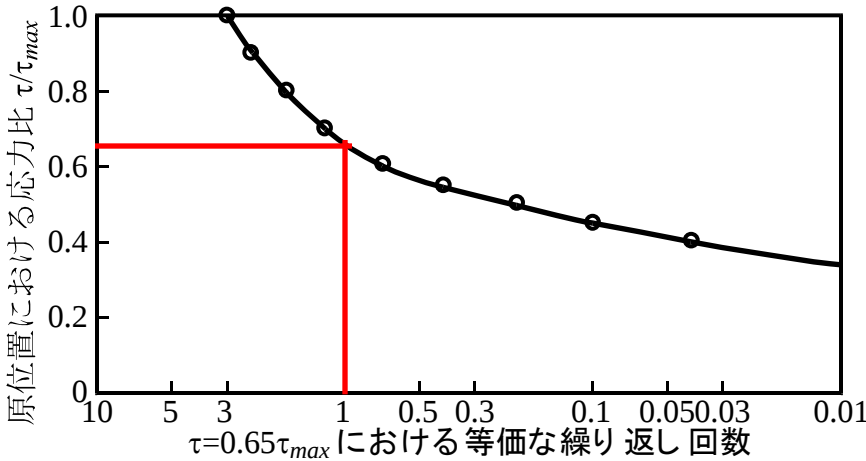
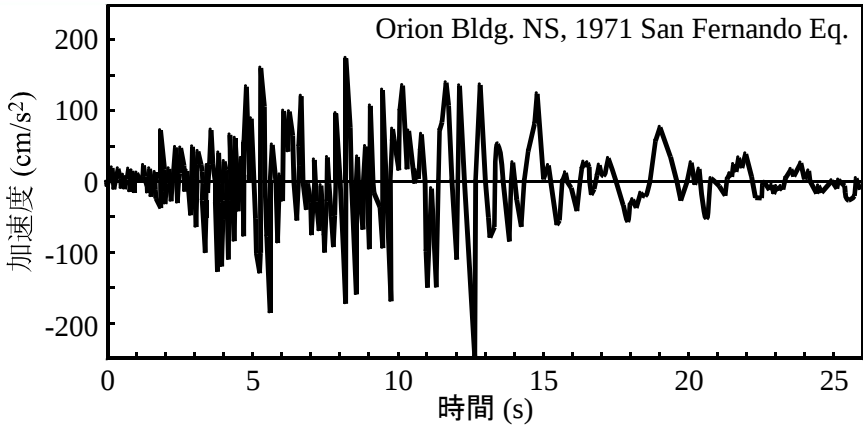
- 北米では15mまで、日本は20mまで
 - 北米の指針の項参照
- 解析は全部SHAKE
- 振動モードに依存するはずなのに、基盤の深さが入っていない

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

r_n とは

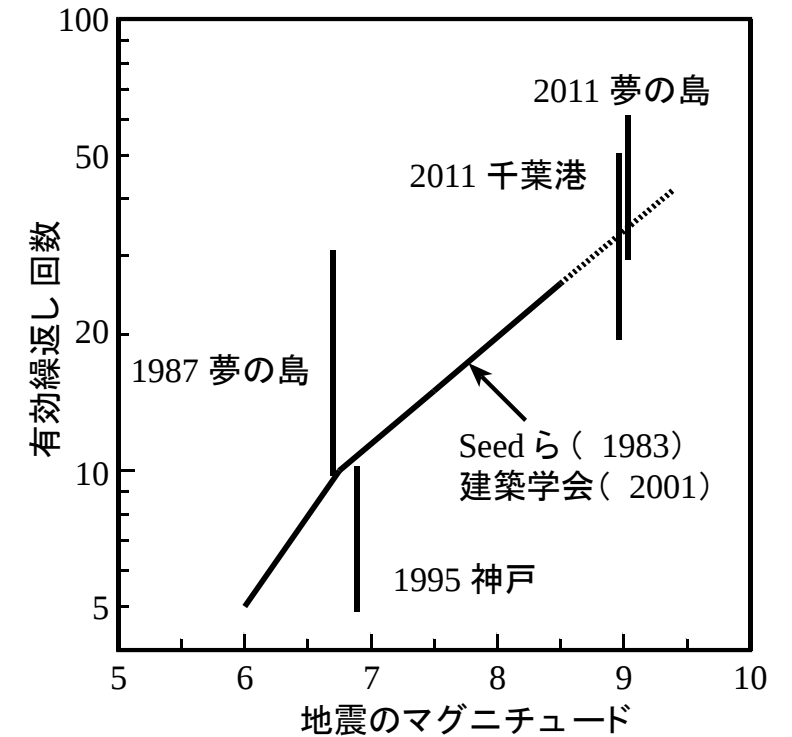
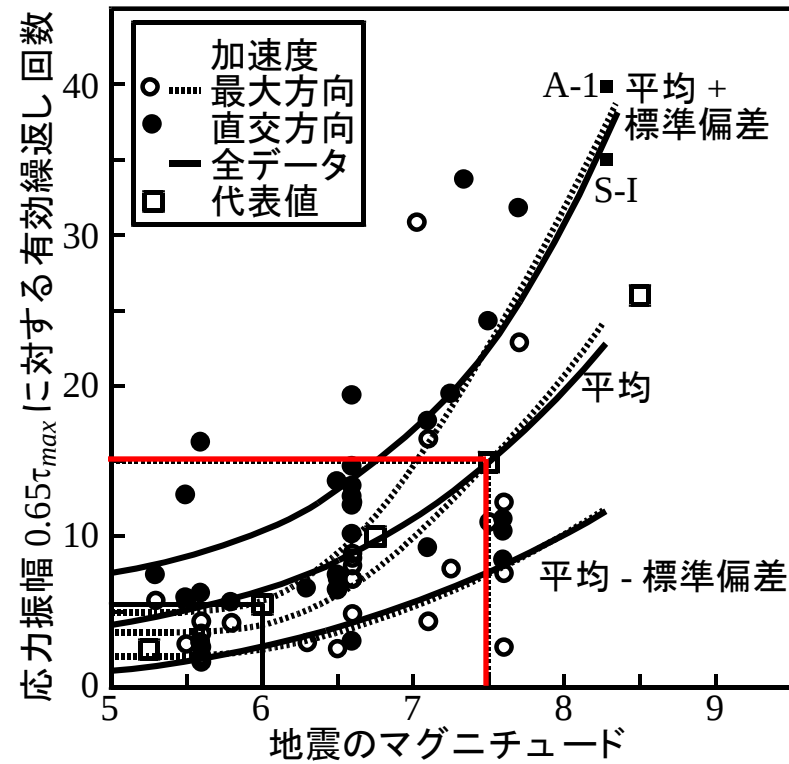
- 加速度時刻歴
- $0.65 \tau_{max}$ に対する有効繰返し数
 - 累積損傷度理論と同じ

	正側			負側		
振幅	N	k	N_e	N	k	N_e
τ_{max}	—	—	—	—	3.00	3.00
$0.70 \tau_{max}$	2	1.20	2.40	2	1.20	2.40
$0.65 \tau_{max}$	1	1.00	1.00	2	1.00	2.00
$0.60 \tau_{max}$	—	—	—	2	0.70	1.40
$0.55 \tau_{max}$	6	0.40	2.40	—	—	—
$0.50 \tau_{max}$	1	0.20	0.20	3	0.20	0.60
$0.45 \tau_{max}$	1	0.10	0.10	2	0.10	0.20
$0.40 \tau_{max}$	2	0.04	0.08	3	0.04	0.12
$0.35 \tau_{max}$	1	0.02	0.02	6	0.02	0.12
$0.30 \tau_{max}$	—	—	—	—	—	—
合計			6.20			9.84



材料にかかわらず同じ液状化強度
曲線を使っている

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



- $M > 8.5$
 - ▶ 延長して構わない
 - ▶ 道路橋示方書では繰返しの効果は液状化強度
 - ◆ 0.9~0.8程度になる (指針には入っていない)
 - ▶ 基礎構造設計指針では外力項
 - ◆ $(7.5-1)/(9-1)=81\%$ 整合性はある

地表最大加速度 α_{max}

■ 定義

- 液状化したと考えた時の加速度
 - ▶ 基礎構造設計指針（1985）
 - ◆ かなり大きな地震時に地表面付近で観測されている200cm/s²程度を想定しておけばよいと思われる
 - ▶ 基礎構造設計指針（2001）
 - ◆ 損傷限界用：150~200cm/s²，終局限界検討用：350cm/s²
 - ▶ 液状化したサイトの最大加速度（川岸町，ポートアイランド）
- 液状化しないと考えた時の加速度
 - ▶ 道路橋示方書（1980）
 - ◆ 従来の耐震設計指針などを考慮するとともに実測結果を参照
 - ▶ 道路橋示方書（1996）
 - ◆ 液状化解析しない， F_L =安全率法
 - ▶ 北米
 - ◆ 求め方まで記述

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

地表最大加速度 α_{max}

77

- 建築基礎構造設計指針（1985）
 - ▶ 地表面における設計用水平加速度値は不明確な要素が多く、かつ、局地的な地盤条件の影響が出やすい、
 - ▶ ある土層が一旦液状化すると、それ以後は、液状化層以浅には、地震波が伝わりにくくなる、
 - ▶ 液状化発生に関する検討方法は、構造物のない水平地盤を対象としているが実際は構造物のある場合が問題
- 建築基礎構造設計指針（2001）
 - ▶ 地表面水平加速度値は、本来、地盤応答の結果で、地盤特性に大きく影響を受ける
 - ▶ 損傷限界検討用として $150 \sim 200 \text{ cm/s}^2$ 、終局限界検討用として 350 cm/s^2 程度と推奨する
- 道路橋示方書（1996） 松尾の論文
 - ▶ 地表面最大加速度は、その地点が液状化することにより地盤の加速度応答が変化することは考慮されていない
 - ▶ 液状化の発生を考慮する＝液状化解析。簡易法では不可能
 - ▶ F_L 法は安全率法で、外力の大きさに比例して応力が生じることを仮定している

しかし、2011年の地震後の検討では

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

土木研究所による検討（2011年地震）

78

	液状化	非液状化
$F_L \leq 1$	53	35
$F_L > 1$	0	24

- **東京湾岸**では，古い埋立て地盤や自然地盤では $F_L \leq 1$ の判定となったが非液状化箇所が多い
 - 液状化が発生したのは戦後に埋め立てた地盤がほとんど
 - 液状化箇所と非液状化箇所ではボーリングデータから有意な差を見つけることは困難であった。
- **利根川下流**周辺地域では，液状化判定上は同じ液状化するとの結果であるが，非液状化箇所は相対的に F_L が大きいし， $F_L \leq 1$ となる層では層厚が薄い。

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

土木研究所による検討（2011年地震）

79

■ PLの検討

- 液状化発生箇所ではPLが大きい箇所が多い
- 非液状化地点ではPLの小さな箇所が多い。
 - ▶ PLを5, 15で区切って被害や液状化発生の有無を論じるには無理があるように見える。

	液状化	非液状化
$0 \leq P_L \leq 5$	2	35
$5 < P_L \leq 15$	12	13
$15 < P_L$	39	11

■ その他

- 地盤の造成年代の影響
 - ▶ 古い地盤ほど液状化しにくいこと
- 細粒分が非塑性（非塑性だと液状化が起こりやすい）
- 孔内水位より求めた地下水位が正しくなかった可能性がある

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 外力項

$$L = r_n \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

$$r_n = 0.1(M - 1)$$

■ 道路橋示方書との違い

$$F_L = \frac{c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 R_L}{L} = \frac{c_1 c_2 c_5 R_L}{L} = \frac{c_1 c_5 R_L}{L / c_2} = \frac{C_r R}{r_n L}$$

$$C_r = 0.9 \frac{1 + 2K_0}{3} = 0.57$$

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 液状化強度

$$R = aC_r \left[\frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{C_s} \right)^n \right]$$

■ $a=0.45$, $n=14$ (実験式)

■ C_s の値

- 三軸試験
- 単純せん断試験

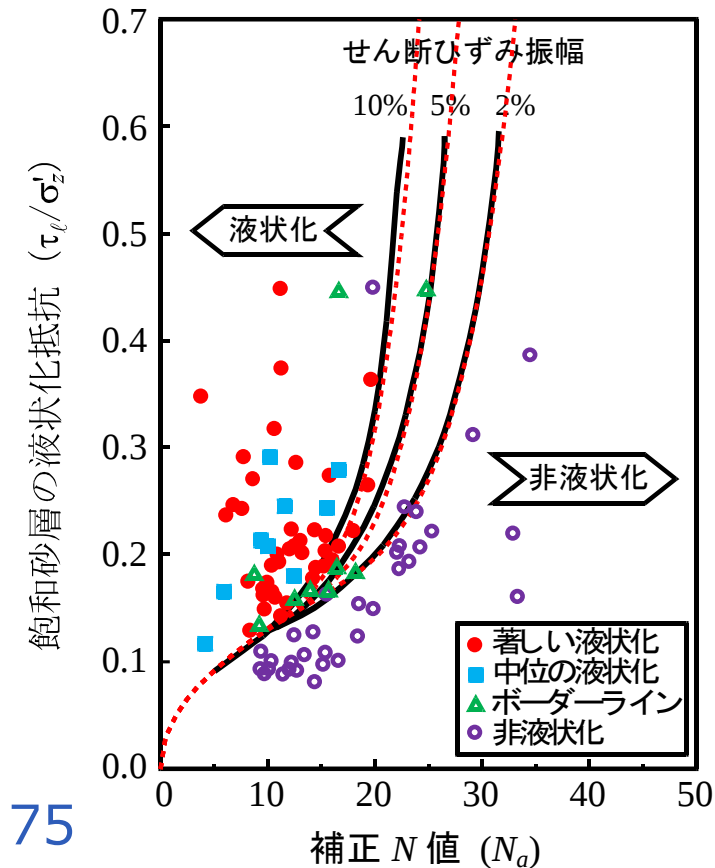
$$C_a = 97 - 19 \log DA$$

$$C_s = 94 - 19 \log \gamma$$

▶ $\gamma=2, 5, 10\%$ で $C_s=88.3, 80.7, 75$

■ 困ったこと

- 図から読み取る
 - ▶ 式は上記
- ボーダーラインとは？



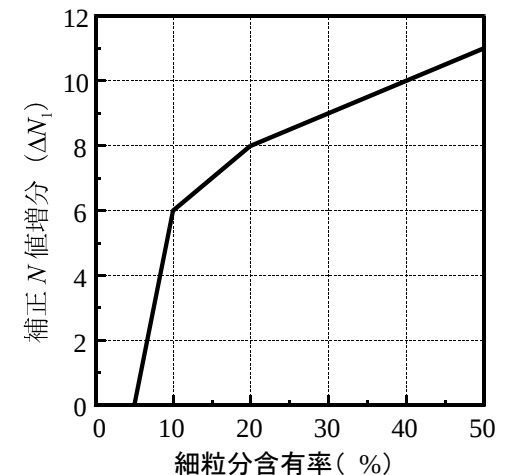
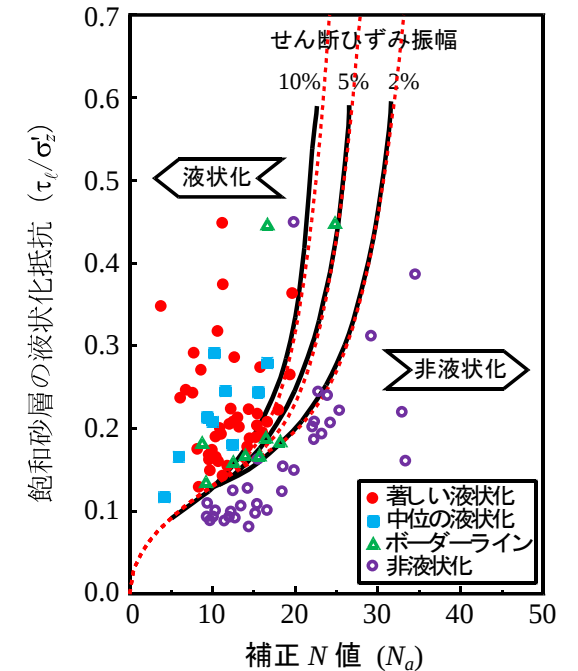
$\gamma=5\%$ を用いる
道路橋示方書と異なる

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- $N_a < 5$ はどようするの？
▶ たぶん起こらない

$$N_1 = \sqrt{\frac{98}{\sigma'_v}} \cdot N$$

- ◆ N 値が小さくても N_1 は大きく
- ◆ $F_c > 10\%$ で $\Delta N > 6$
- ▶ どうしても計算したい
 - ◆ 原論文の値を使う
 - $N_a = 0$ で $R = 0$
 - ◆ 道路橋示方書を流用
 - 最小値 0.098
 - ◆ 北米の指針を流用
 - 最小値 0.05



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 凍結試料の実験式

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma'_o} = a \left\{ \frac{D_r}{100} + \left(\frac{D_r}{C} \right)^n \right\}$$

▶ 三軸試験

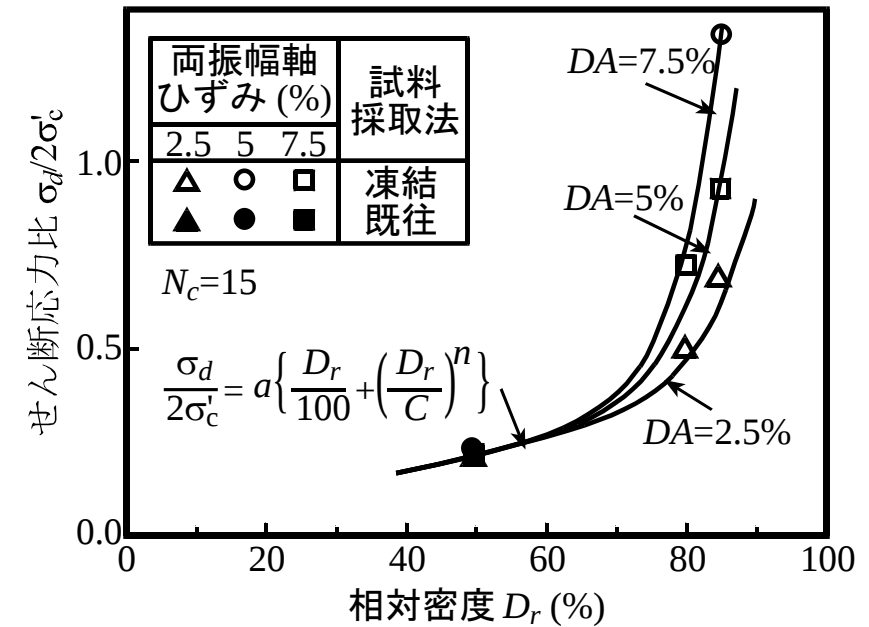
◆ 係数は前頁

- N 値と相対密度の関係 (Meyerhof)

$$D_r = 16\sqrt{N_1 + \Delta N_f}$$

↑ 細粒分の効果

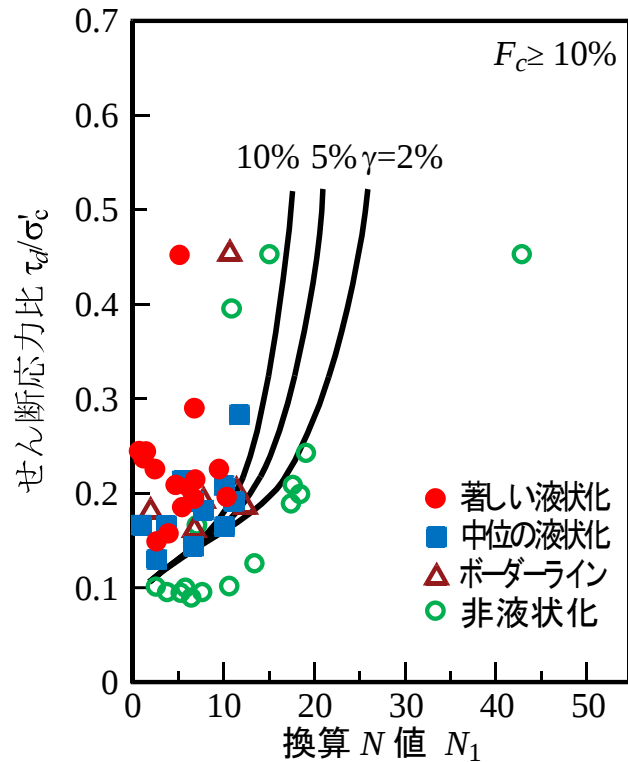
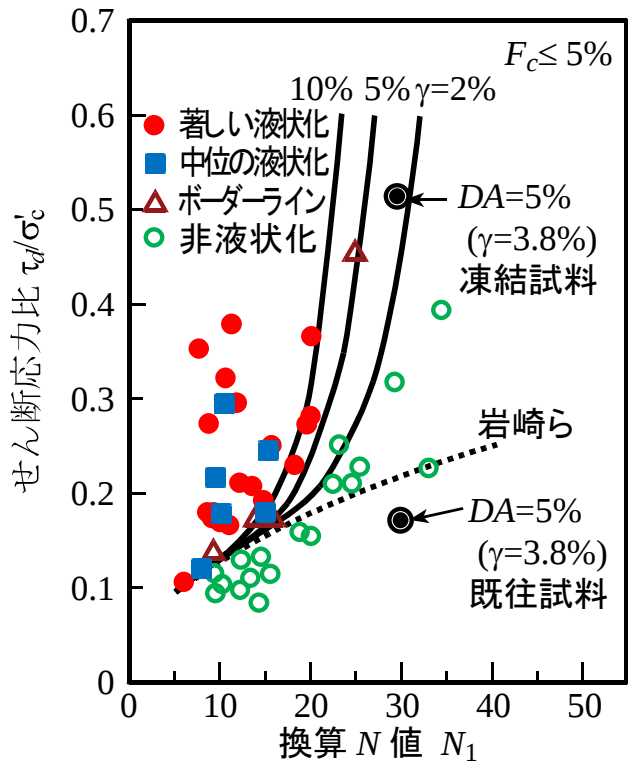
$$D_r = 21\sqrt{\frac{100N}{\sigma + 70}} = 21 \times \sqrt{\frac{100}{170}} \times \sqrt{\frac{170N}{\sigma + 70}} = 16\sqrt{N_1}$$



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

建築基礎構造設計指針：細粒分補正

▶ 原論文



- ▶ 平行移動すれば重なりそう
◆ ΔN で表現する理由

F_c (%)	ΔN_f
0～5	0
5～10	上下を線形補間
10～	$4+0.1F_c$

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

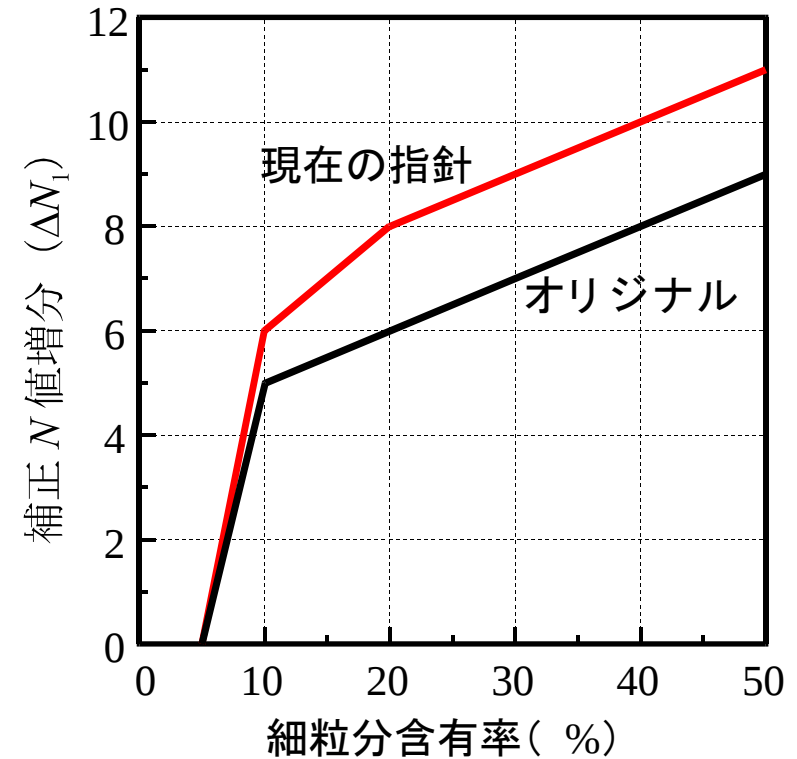
▶ 指針

◆ 最新の知見に基づいて
(時松・吉見)
根拠論文は不明

$$\Delta N = \begin{cases} 0 & F_c \leq 5\% \\ 1.2F_c - 6 & 5\% < F_c \leq 10\% \\ 0.2F_c + 4 & 10\% < F_c \leq 20\% \\ 0.1F_c + 6 & 20\% < F_c \leq 50\% \end{cases}$$

オリジナル

$$\Delta N = \begin{cases} 0 & F_c \leq 5\% \\ \text{線形補間} & 5\% < F_c \leq 10\% \\ 0.1F_c + 4 & 10\% < F_c \end{cases}$$



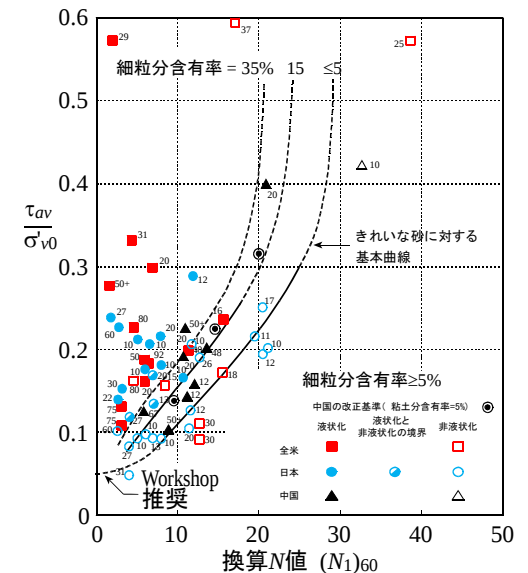
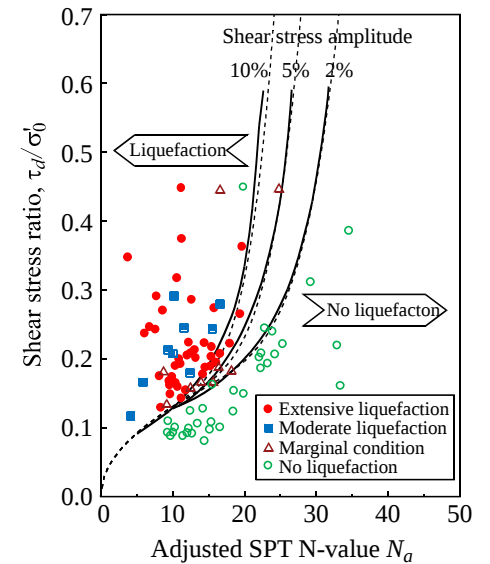
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 基本的な違い

- 液状化強度式
 - ▶ N 値, F_c , σ'_c のみでは無理
- 地表面最大加速度
 - ▶ 液状化したサイトと液状化しないと考えたサイト
- 繰返し回数：マグニチュードによる補正
- 細粒分補正
 - ▶ N 値が同じだったという前提

■ 設計指針の精度

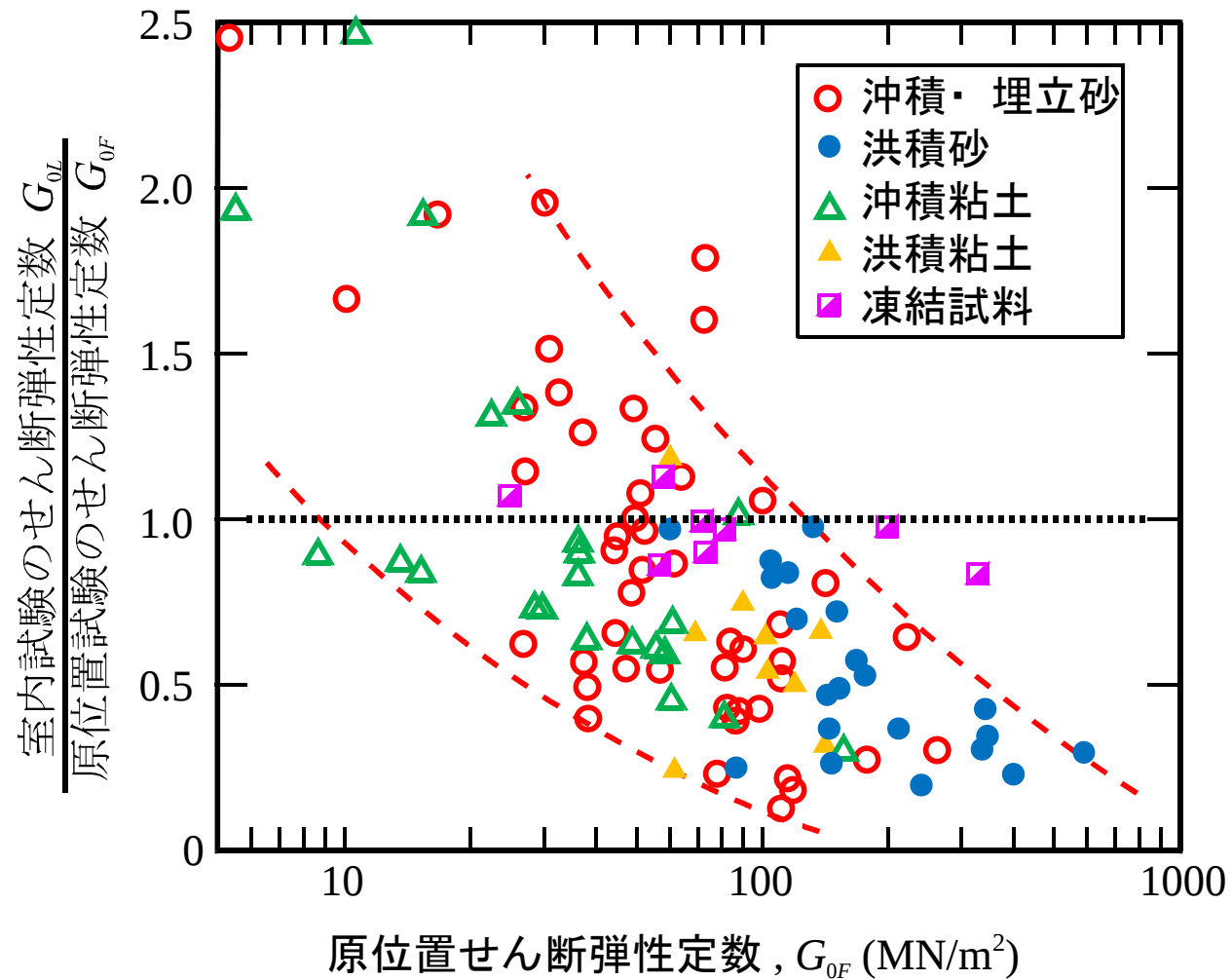
- 安全側
- 平均値



session.8

液状化強度の再現と 良い試料採取

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

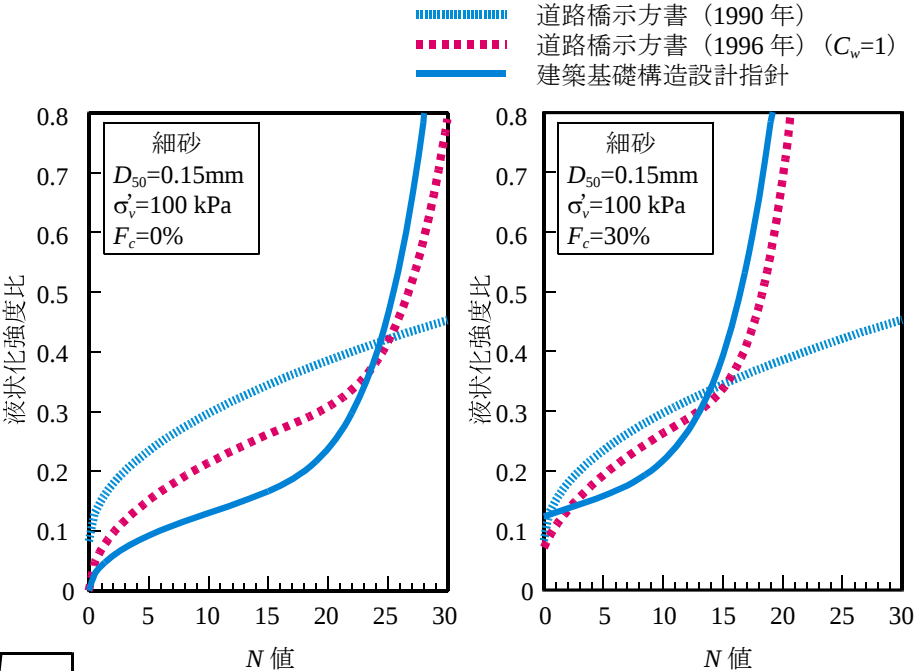
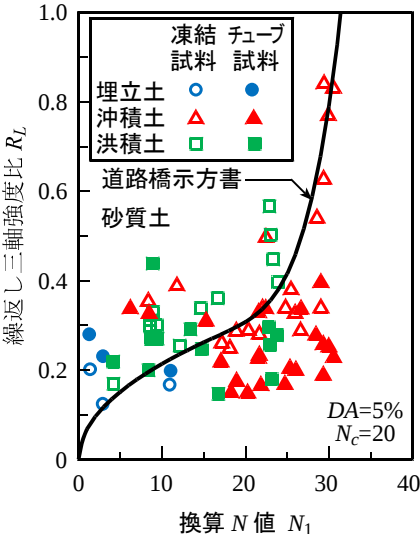
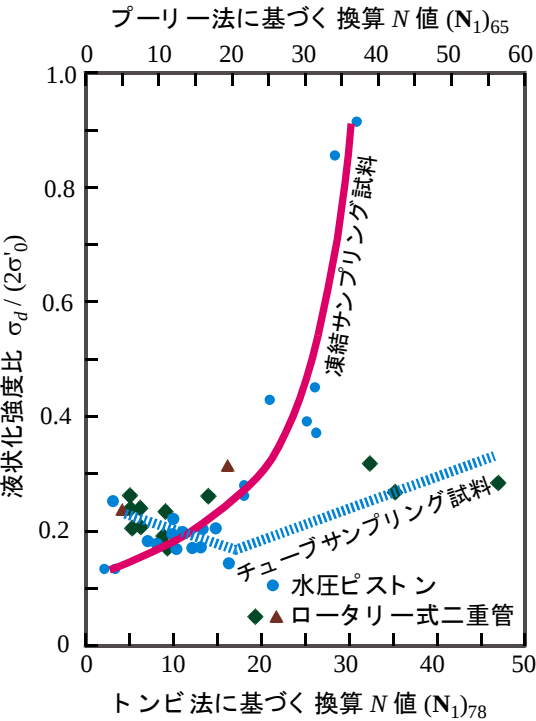


関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

試料採取時の乱れ

■ いわゆる不撓乱試料

- 不撓乱とは差がある



道路橋示方書

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 密度と弾性定数を合わせれば原位置の液状化強度が得られる

- SH 約1000回載荷
- 振幅 0.08~0.2%
- 密度が変わらない載荷

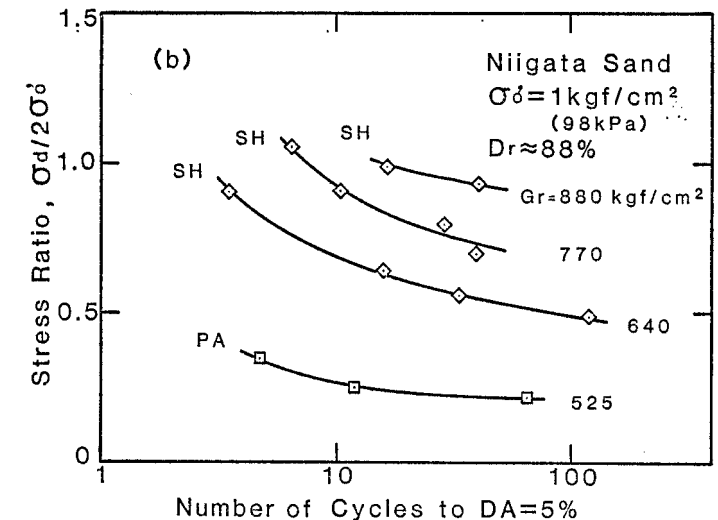
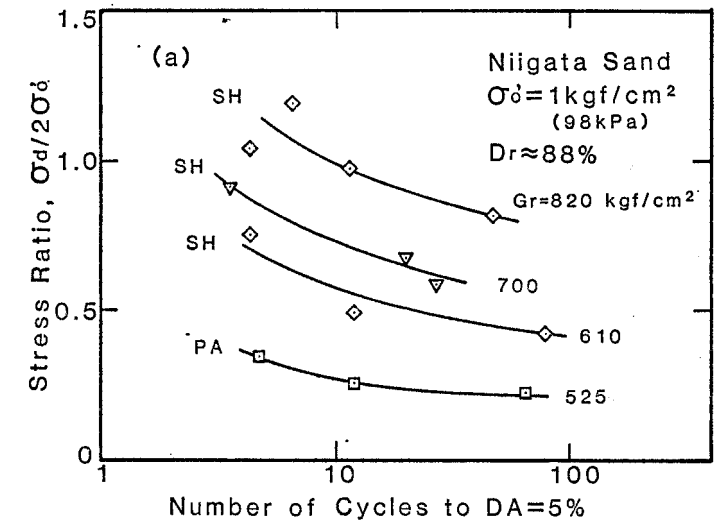
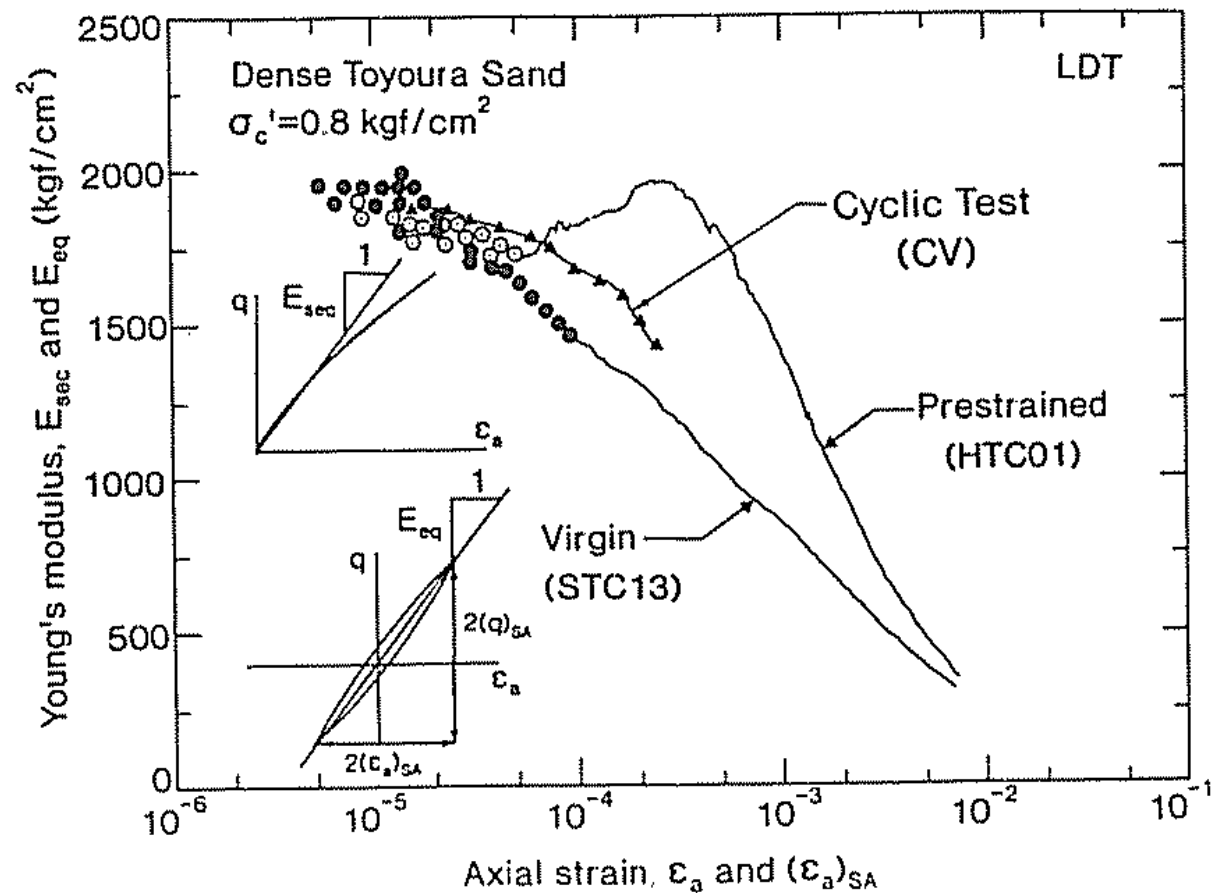


Fig. 6. Effect of preshearing on liquefaction characteristics of dense sand

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 繰返しせん断では弾性定数は変わらない



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

試料の乱れの補正法

■ 補正法の問題

- 現状では可能性のみが指摘されているが、認められていない

■ 問題は

- 弾性定数を大きくしても、年代効果を復元できない
- 年代効果のうち、セメンテーションを考慮できない
 - ▶ だけでもなさそう

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

年代効果

■ 年月と共に強度が増加

- 砂の粒子間の間隙が狭くなるために発生する密度増加で、 N 値が増加
- 粘性土：セメンテーションが強くなる
 - ▶ 砂でも含まれている粘性土により効果
 - ◆ 細粒分が多いと液状化強度が増加する

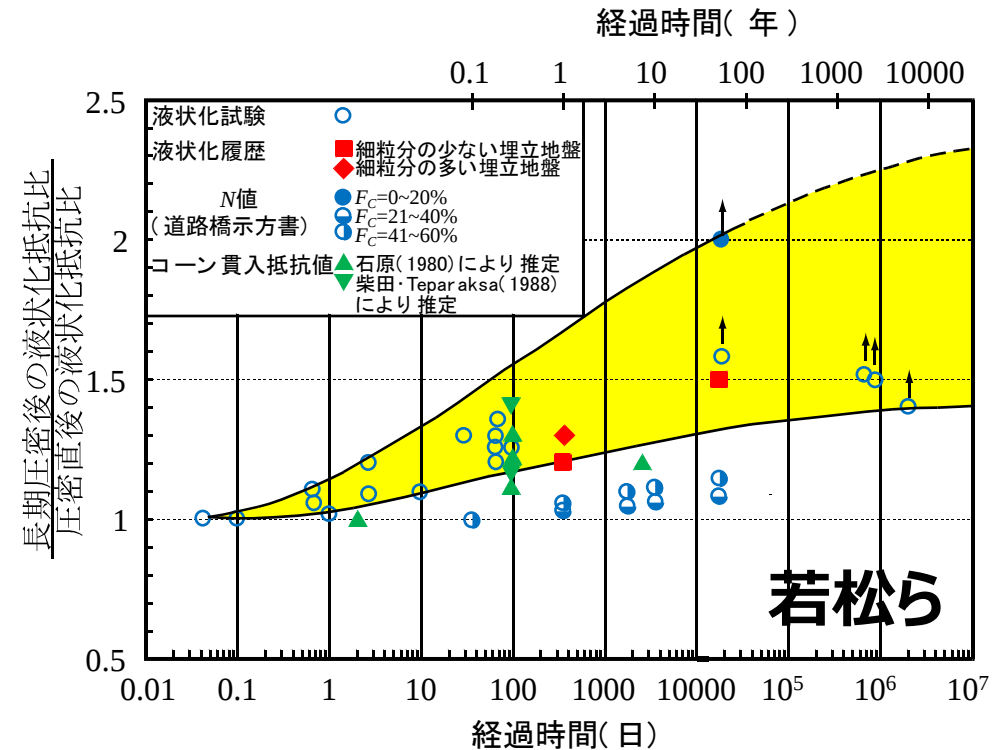
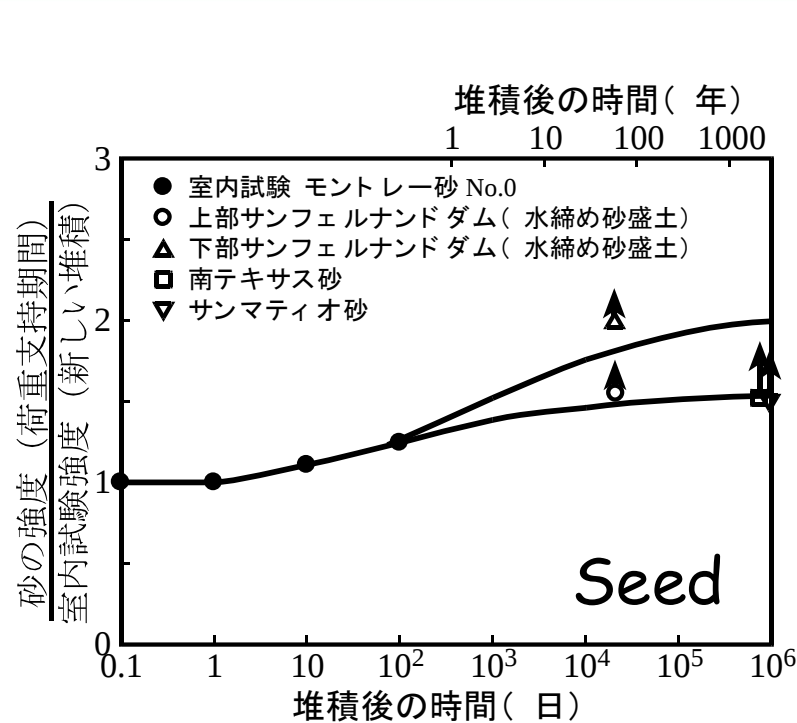
■ Schmertmann（第25回Terzaghi lecture）

- 年代効果は全ての土に起こる
- 多くの土の重要な力学特性を50～100%増加させる
 - ▶ 砂ではせん断弾性係数や液状化強度を増加させる
- 年代効果は工学的な時間スパンでは主に内部摩擦角の増加として現れ、粘着力は増加しない

■ Youdら

- 500年より若い地盤は古い地盤に比べて液状化しやすい

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



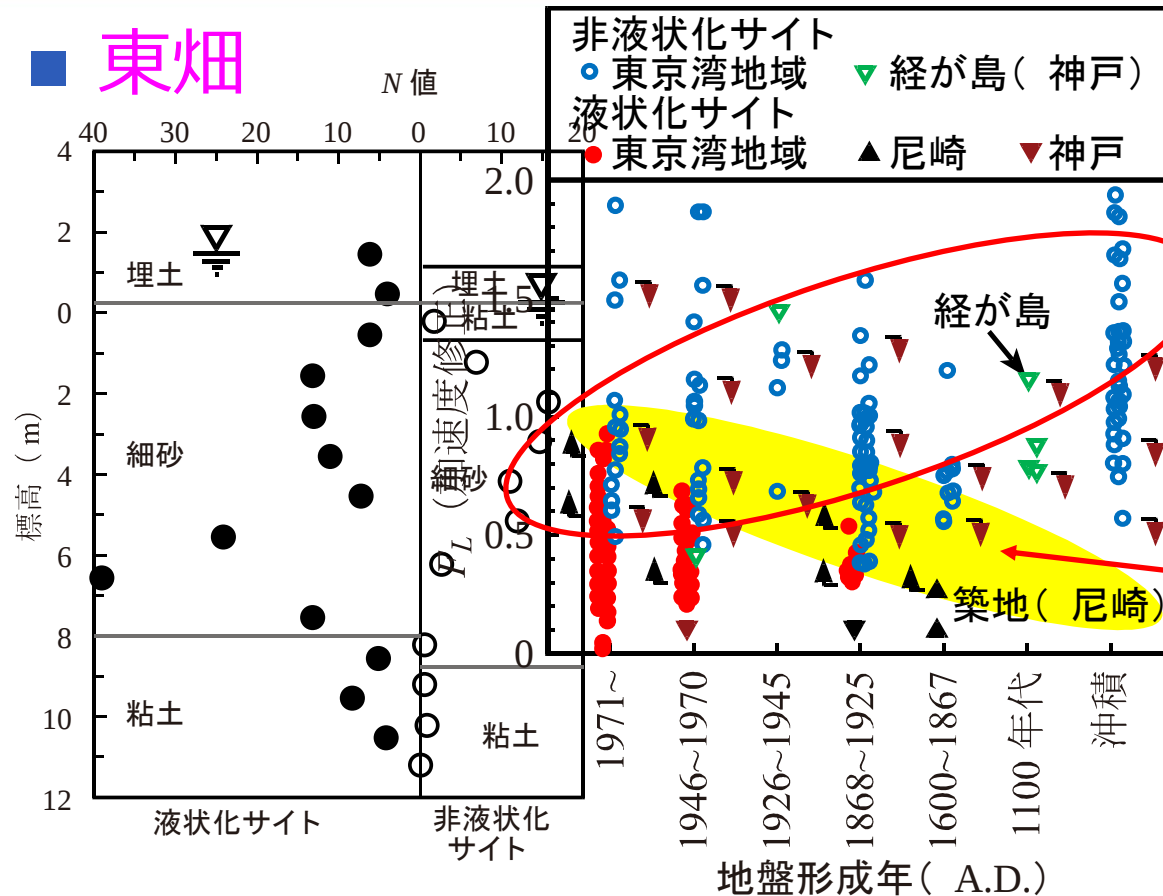
■ Seed : 実験値 (100日) で25%, もっと古いと75%

■ 若松ら : 東京湾

▶ 液状化強度 R_L の増加 ■ (試験, コーン貫入よりの予測) は
N 値より求めた R_L の増加より大きい

◆ N値は土の微細な構造に基づく増加を反映していない可能性

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



FLは大きくなる
液状化が起きにくい

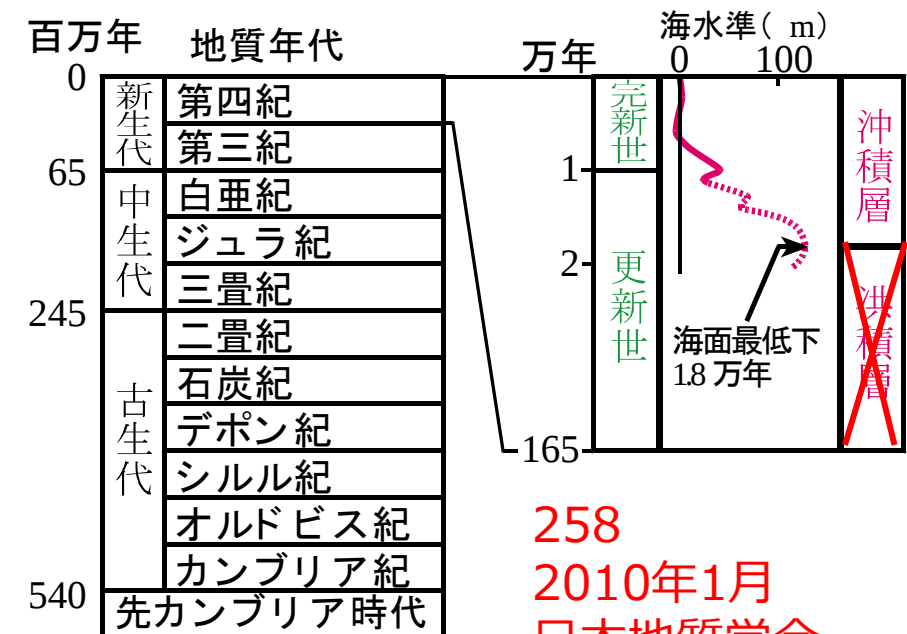
FLの可能な範囲
古くなるほど小さく
液状化しやすくなるよう
に見える

- 同じN値でも液状化するところとしないところがある
- 液状化が観測されてもどの層か分からない
 - ▶ 予測の最小, 最大可能性で範囲を限定
- 埋立て後400年で40%増加

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 洪積砂の液状化

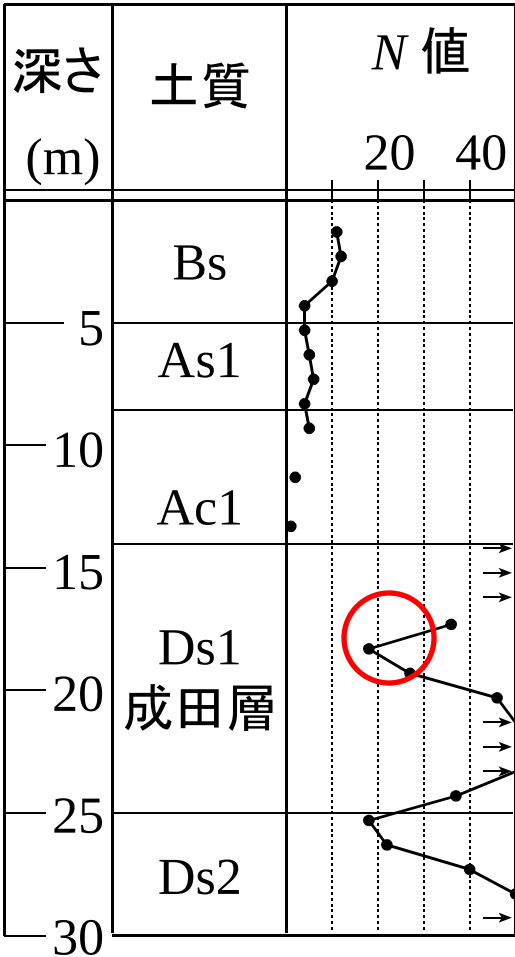
- 設計指針：液状化した事例はない
 - ▶ 実はある（遺跡発掘調査より）（1例のみ）
- N 値の小さい洪積層は液状化の可能性あり
 - ▶ 成田層，熱田層
 - ▶ 更新世という意味では
 - ◆ 7号地層
- 研究
 - ▶ 沖積と洪積を分けて液状化を扱っているものもある
 - ◆ 洪積砂は試料採取時の乱れが影響か？



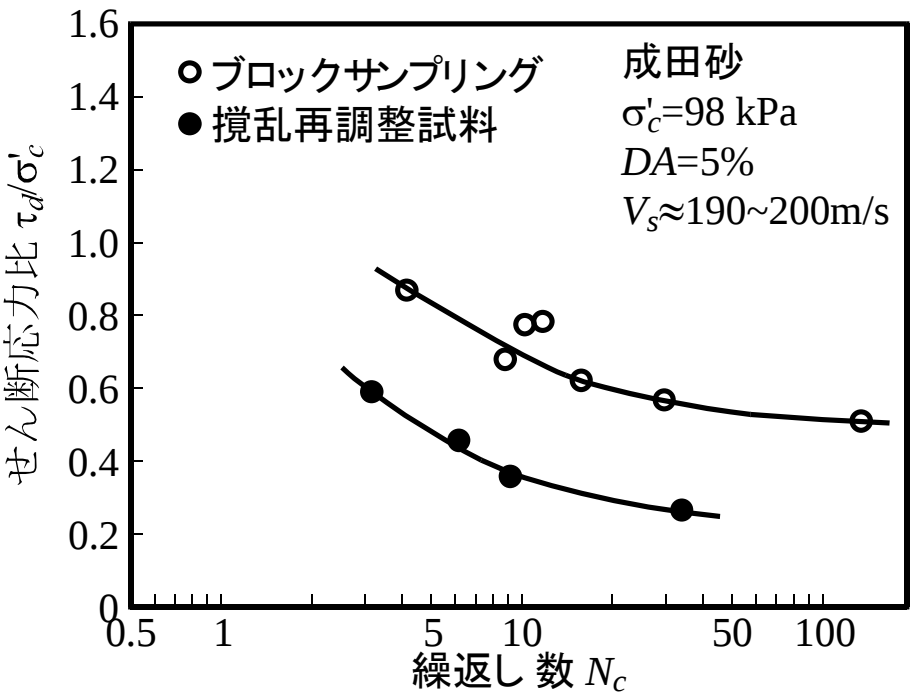
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

年代効果

■ 成田砂



N値が小さい例



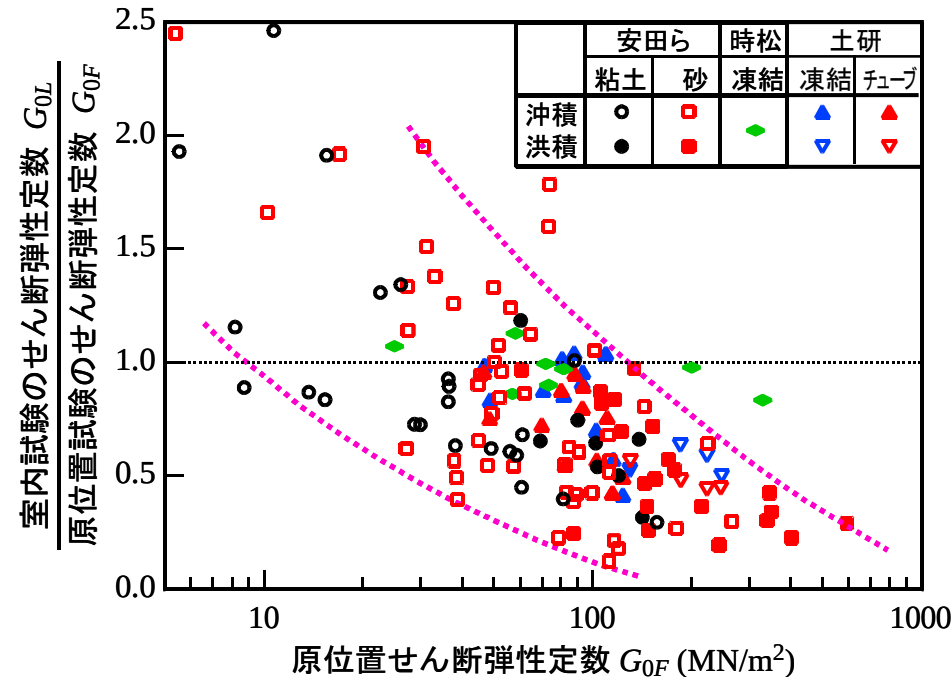
国生ら。
1983

- N値が20以下も
- 上の例
 - ▶ $V_s = 80N^{1/3} \rightarrow N = 15.6$ ($V_s = 200 \text{ m/s}$)
- 水平成層とは考えにくい
- 全体としては問題なし？

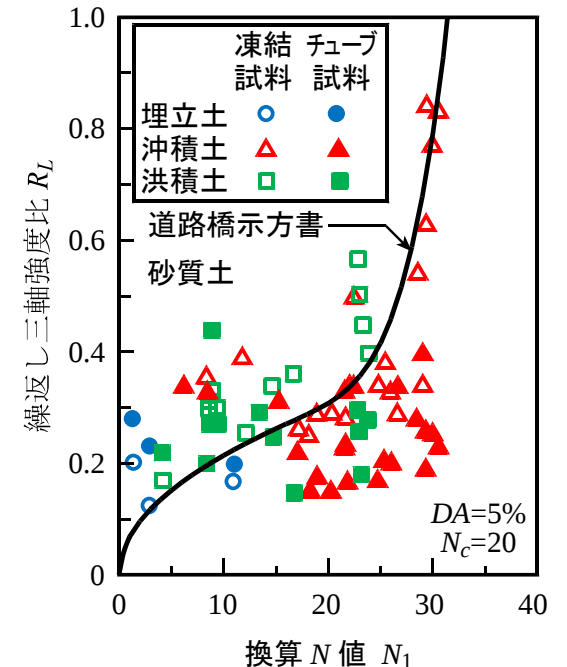
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 凍結サンプリングは不撓乱か？

● 土研のデータ



- ▶ 凍結とチューブ試料に特別な差は無い
- ◆ 液状化強度には大きな差があった



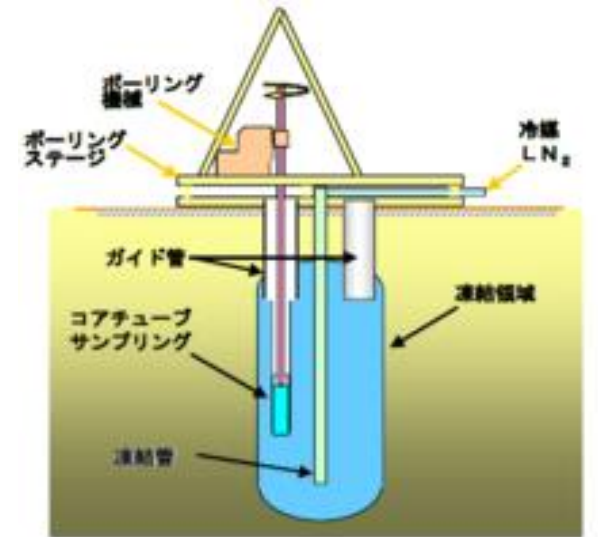
V_s から求めるのが最もよい

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

乱れのない試料の採取方法

99

- 凍結サンプリング：東京ソイル
 - 細粒分が多い土には不適
 - 非常に高価（5000万～1億円）
- GSサンプリング：アテック吉村
 - 柔らかい土
 - 5倍程度
- GPサンプリング：基礎地盤コンサルタンツ
 - 固めの土，礫など
 - 10倍程度
- 小規模凍結サンプリング
 - 期待中



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

100

- 攪乱試料→不攪乱試料の変換
 - 実務的にはほとんど無理
- チューブサンプリングは役にたたない？
 - そんなことはない。色々なことが分かる
- 良い試料を採取することが重要
 - コストに見合うときには
 - ▶ 特に洪積の砂

session.9

二次液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

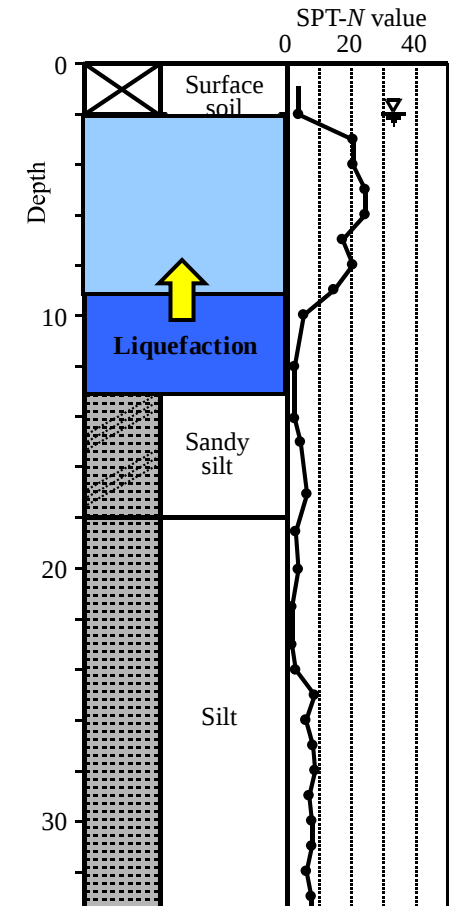
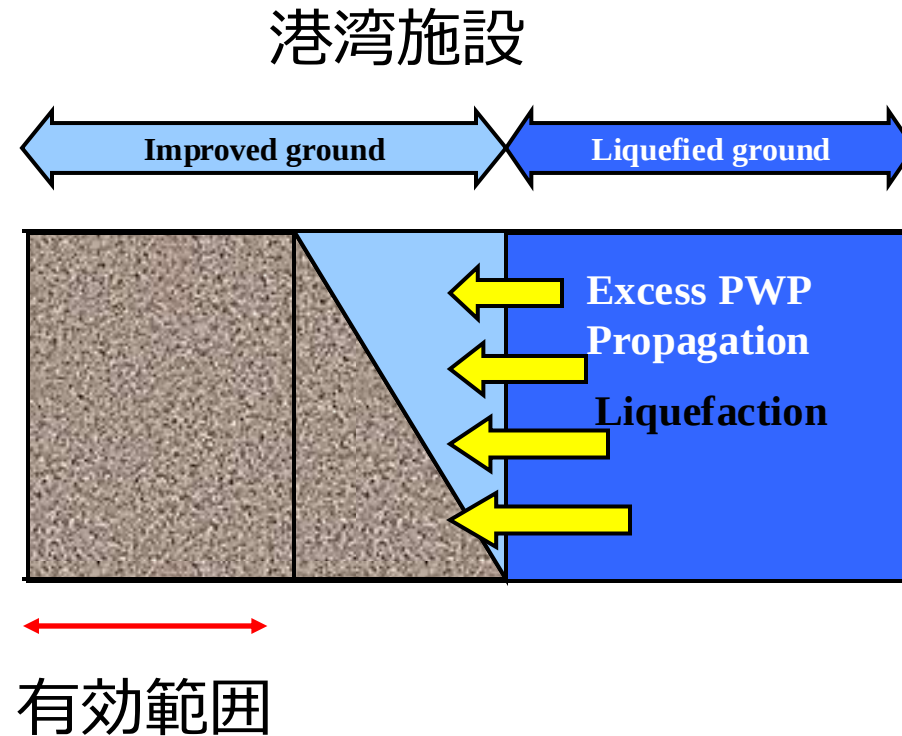
東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

二次液状化

102

- 液状化 → 過剰間隙水圧消散 = 隣接要素へ移動
- 隣接要素で過剰間隙水圧が増加

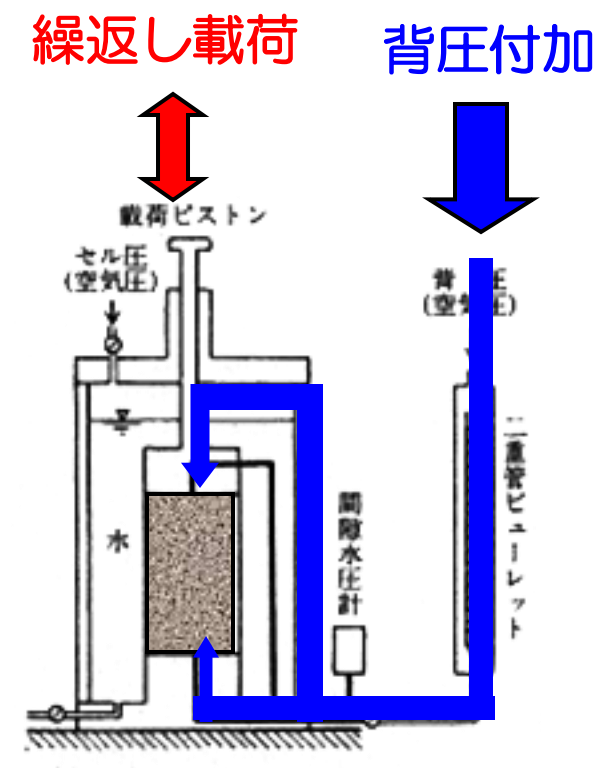
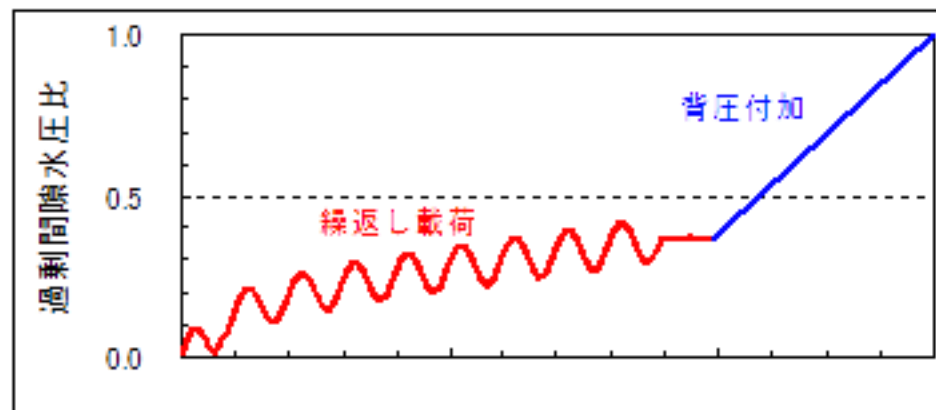


建築では
摩擦杭は
使用不可

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 試験装置と試料

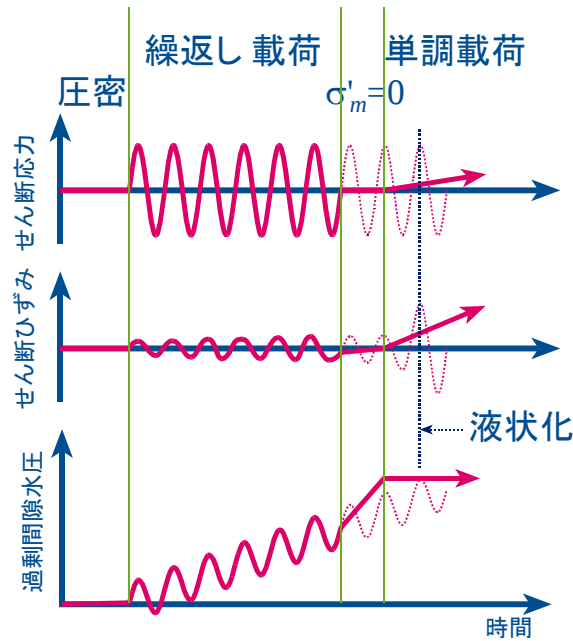
- 三軸試験機
- 豊浦砂, $D_r=50\%$
- 地震による振動・・・繰返し載荷
- 過剰間隙水圧の伝播・・・背圧付加



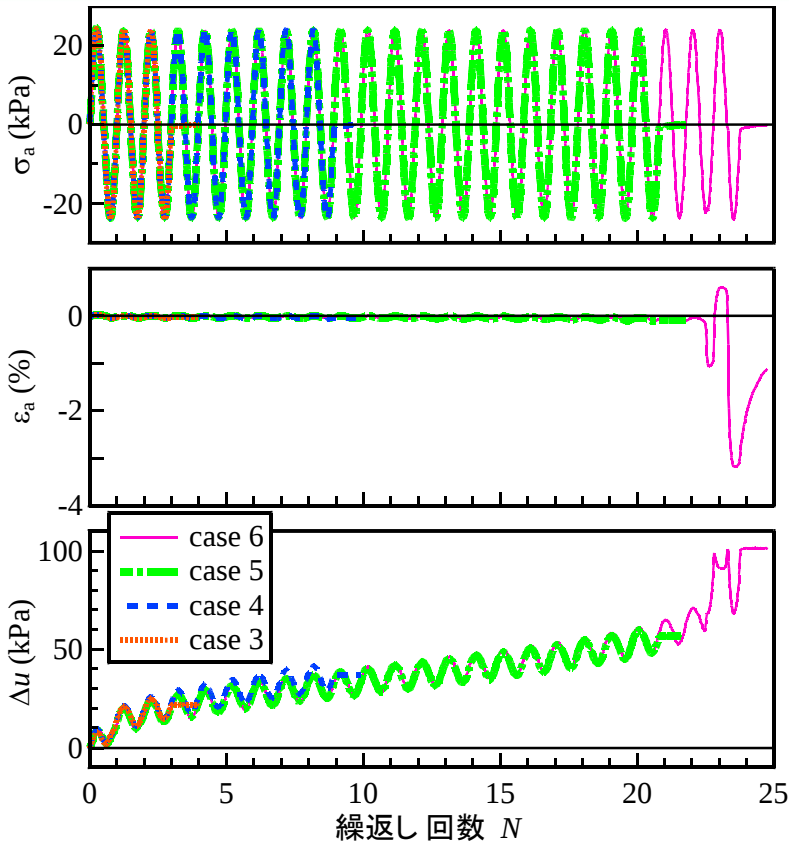
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

二次液状化

■ 載荷方法



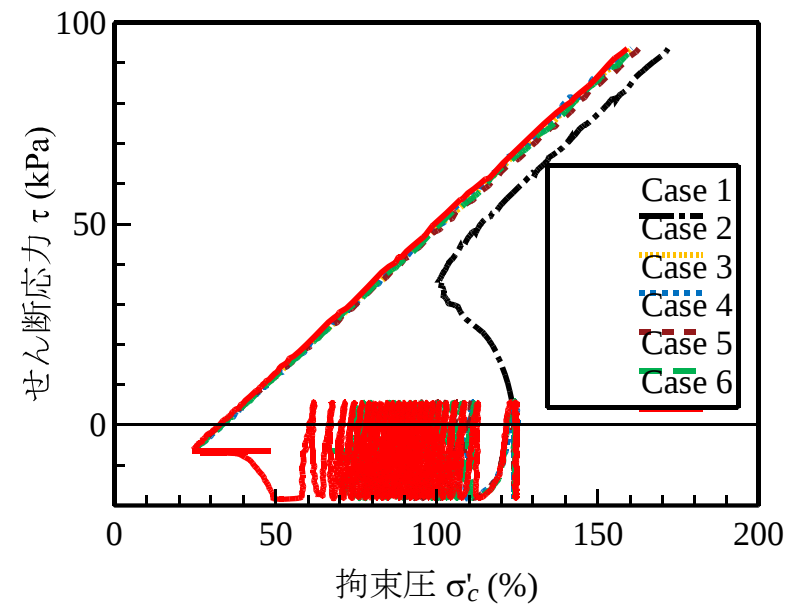
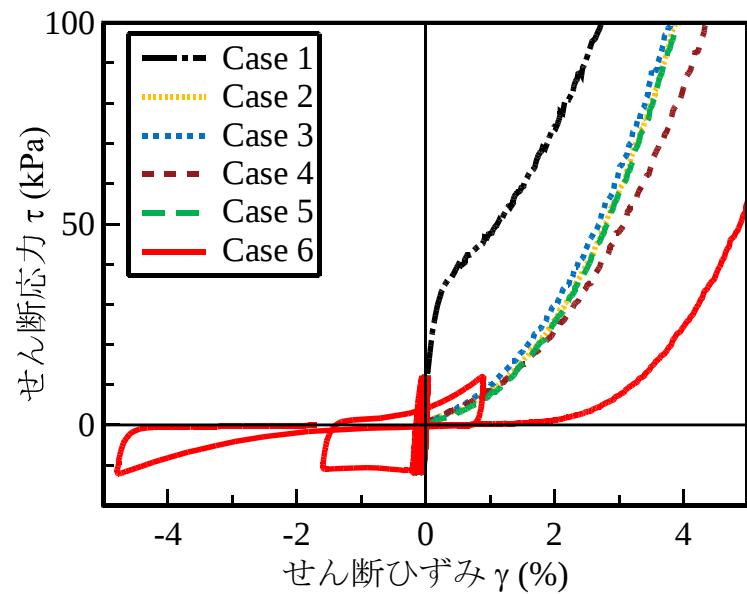
Case	過剰間隙水圧比 (%)	両振幅軸ひずみ (%)
1	通常の単調載荷	
2	背圧により有効応力0	
3	20	0.04
4	40	0.05
5	60	0.09
6	100	3.80



- Case5と6の間（過剰間隙水圧比0.8）はできなかった

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

二次液状化



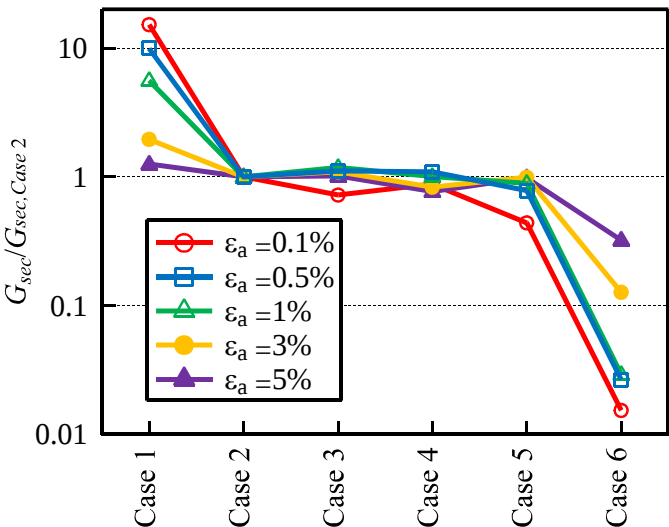
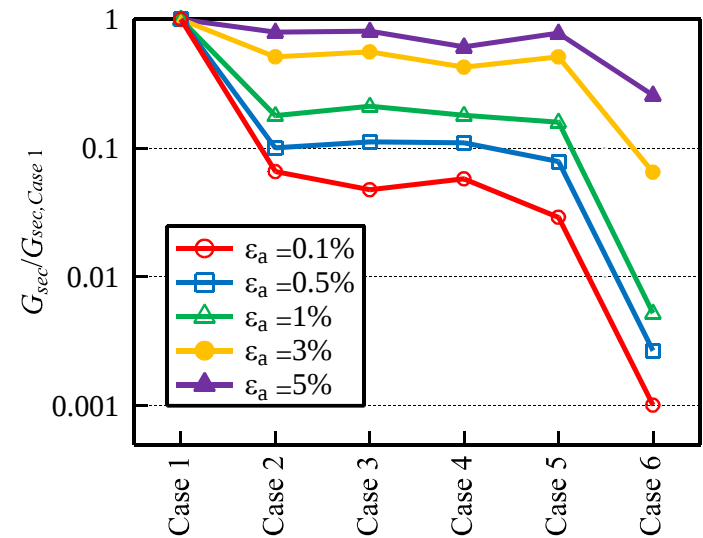
- 過剰間隙水圧比 0.8
 - ▶ 繰返しが終わるまでに液状化

Case	過剰間隙水圧比 (%)	コメント
1	通常の単調載荷	
2	背圧により有効応力0	
3	20	0.04
4	40	0.05
5	60	0.09
6	100	丁度液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

二次液状化

■ 二次液状化による剛性



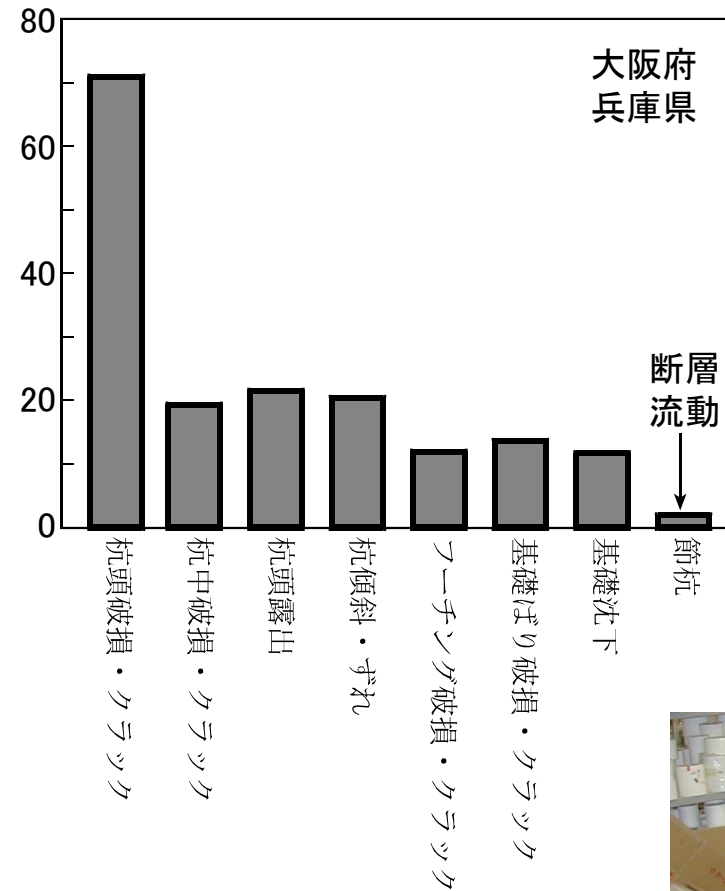
- 二次液状化では、剛性は十分にある
- 液状化で大事なのは、繰返しせん断による劣化
- サイクリックモビリティに入ると粒子構造が乱れる

Case	過剰間隙水圧比 (%)	コメント
1	通常の単調載荷	
2	背圧により有効応力0	
3	20	0.04
4	40	0.05
5	60	0.09
6	100	丁度液状化

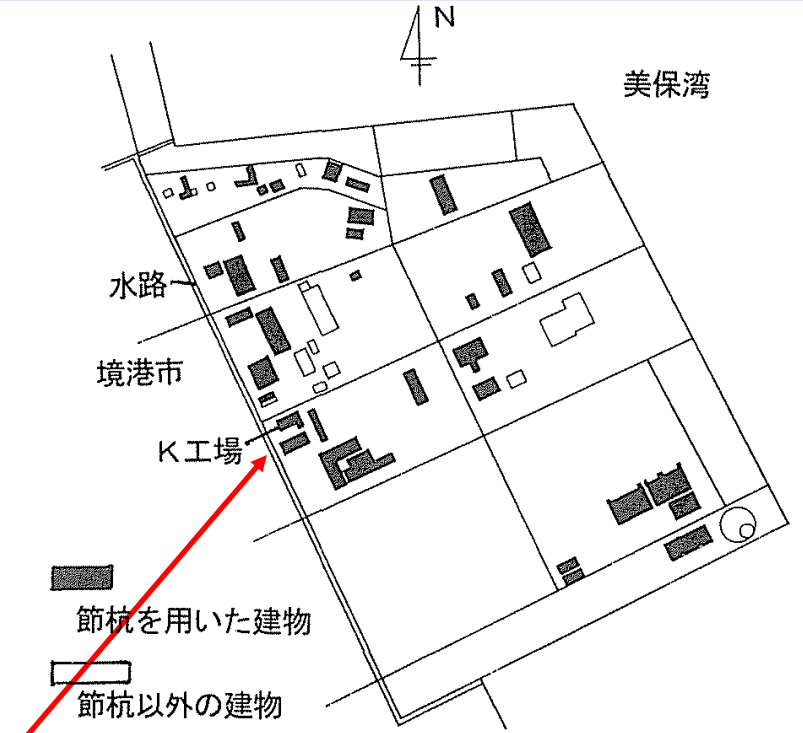
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

摩擦杭（節杭）の効果

支持杭は抜け上がり
節杭は32/34は無被害



兵庫県南部地震



竹ノ内工業団地

なぜ，摩擦杭が？

$F_c > 85\%$

液状化しない（1998）

支持層が深い

鳥取県西部地震



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 有効応力 = 0 が液状化ではない
 - 有効応力 = 0 でも耐力がある
- 過剰間隙水圧の出入りで性質が変わる
 - 現状の解析では無理

session.10

液状化に伴う流動

液状化に伴う流動

110

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 流動の結果

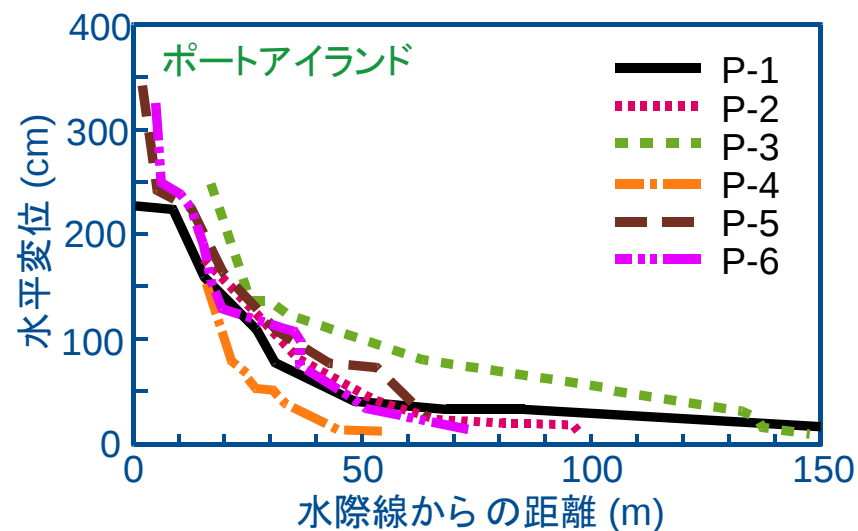


設計法に取り入れられ
ることはなかった



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 1995年兵庫県南部地震の衝撃



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化に伴う流動

113

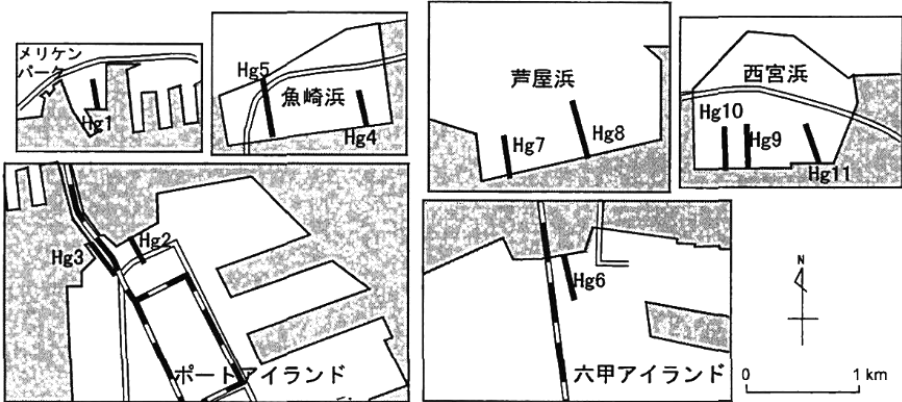
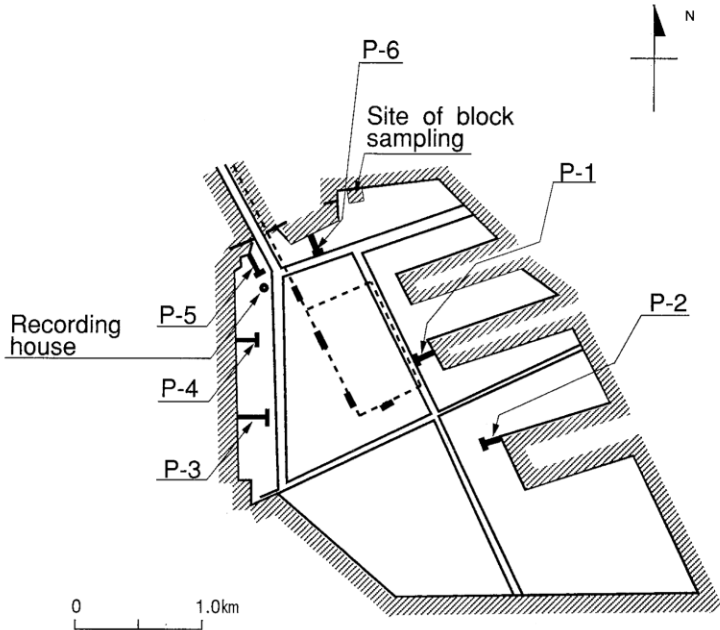
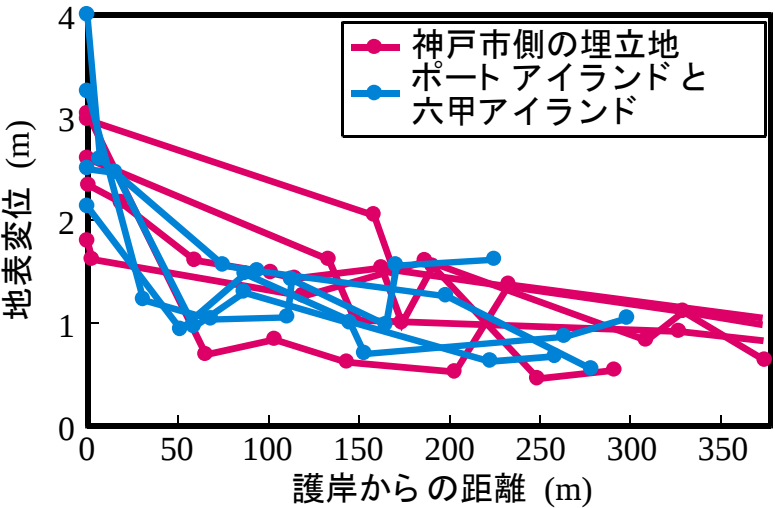
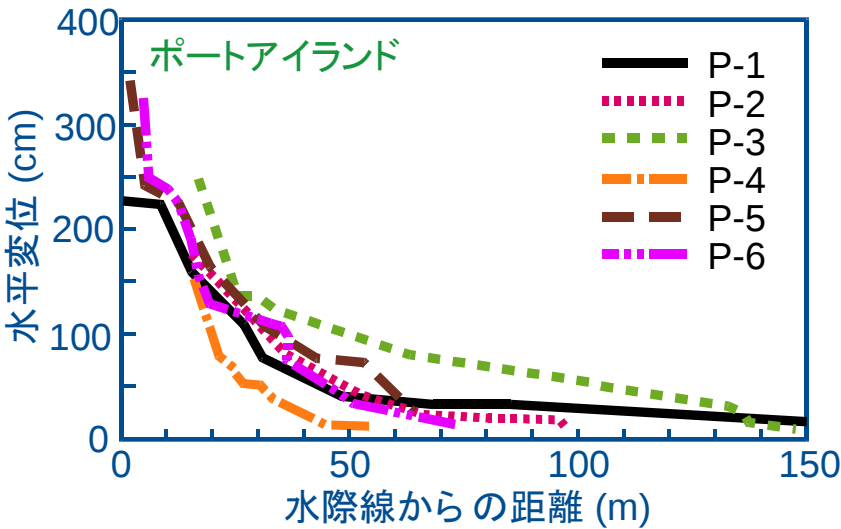
■ 流動現象とは

- 液状化に伴い、地盤が（主として）水平方向に移動
 - ▶ いつ発生するか？
 - ◆ 地震の揺れが収まっても
 - 前山：地震後30分
 - 昭和大橋：地震後80秒
 - メリケン埠頭：地震後数十分
 - 内灘地区：ほぼ即時
- 振動台実験の失敗
 - ▶ 加振を止めると、変位も止まってしまう
 - ▶ 加振を続けると、たとえば、傾斜地盤は水平になる
- 液状化した地盤は、固体か液体か？
 - ▶ 振動を止めると変位が止まるのであれば、固体
 - ▶ 噴砂は、局所的な現象で、地盤全体が液体というわけではない？

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化に伴う流動

■ 背後地盤の挙動



関東学院大学
工学総合研究所研究員、

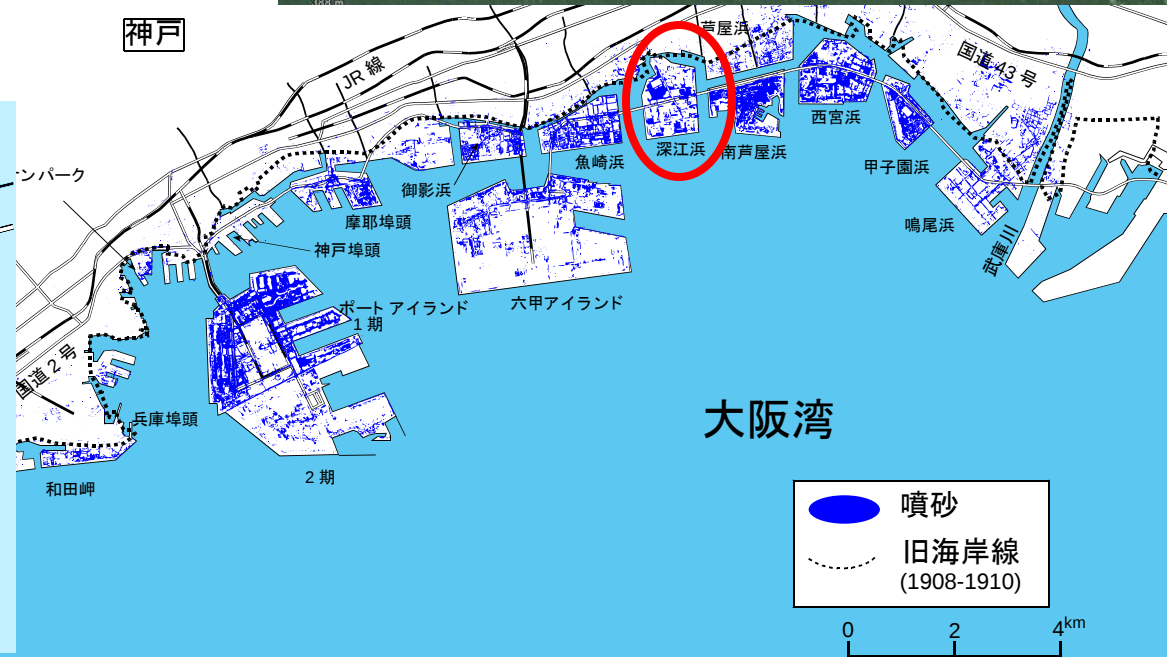
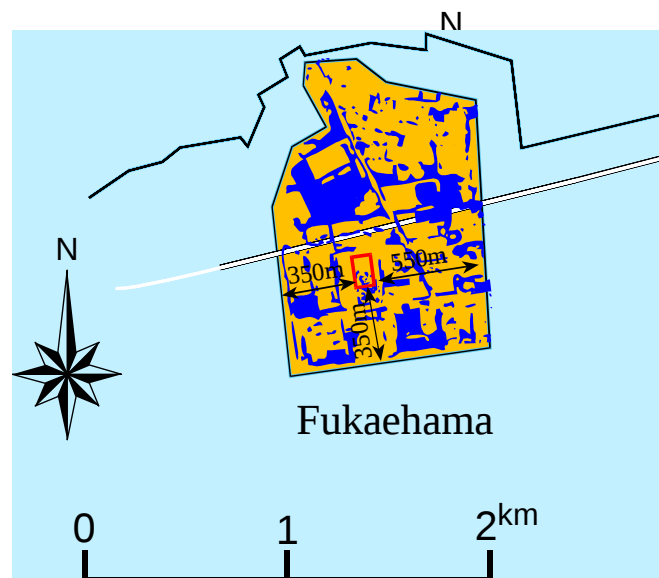
東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

液状化に伴う流動

■ 深江浜の杭

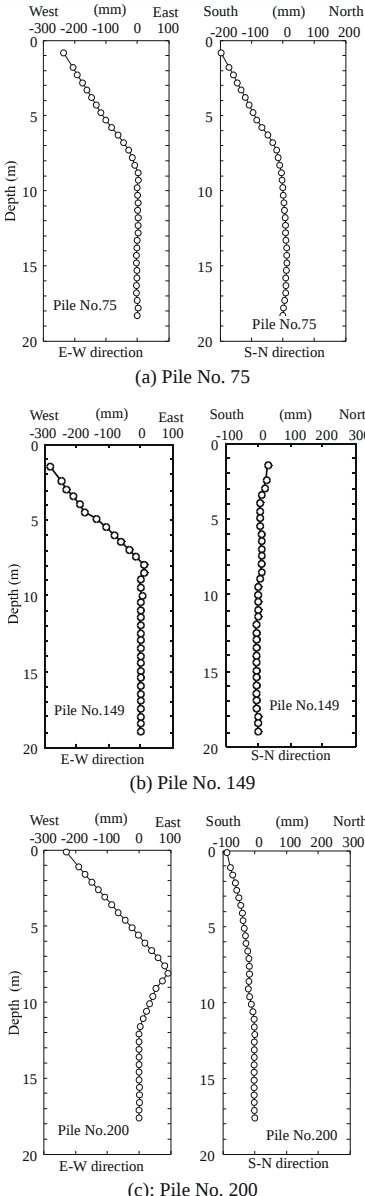
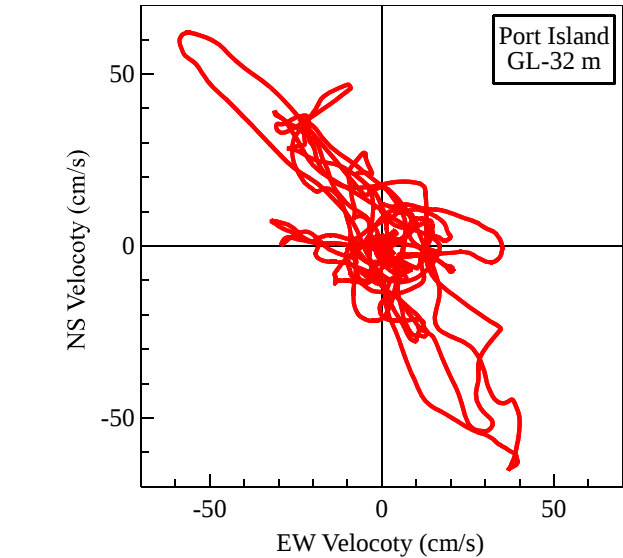
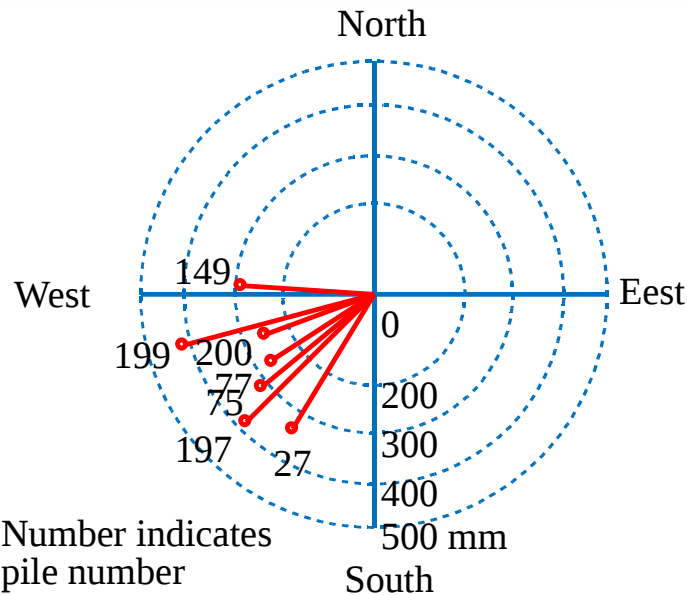
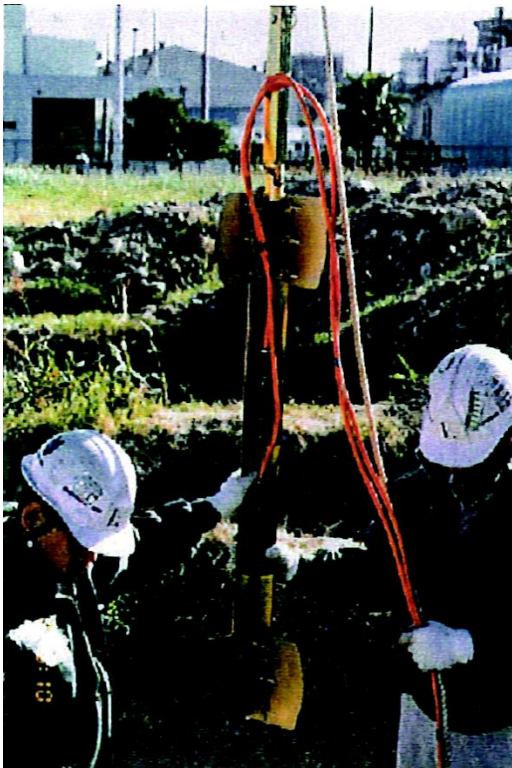
- 1964～1970埋立て
- 10年以上前に打設
- その後放置（上部構造なし）
- 全面で液状化



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化に伴う流動

- 傾斜計調査

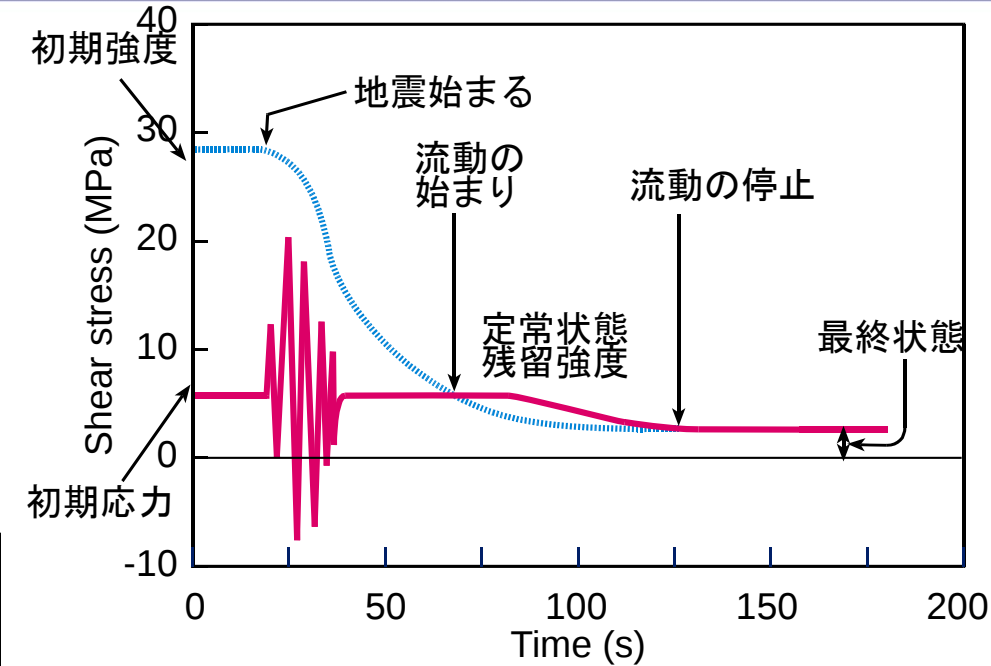
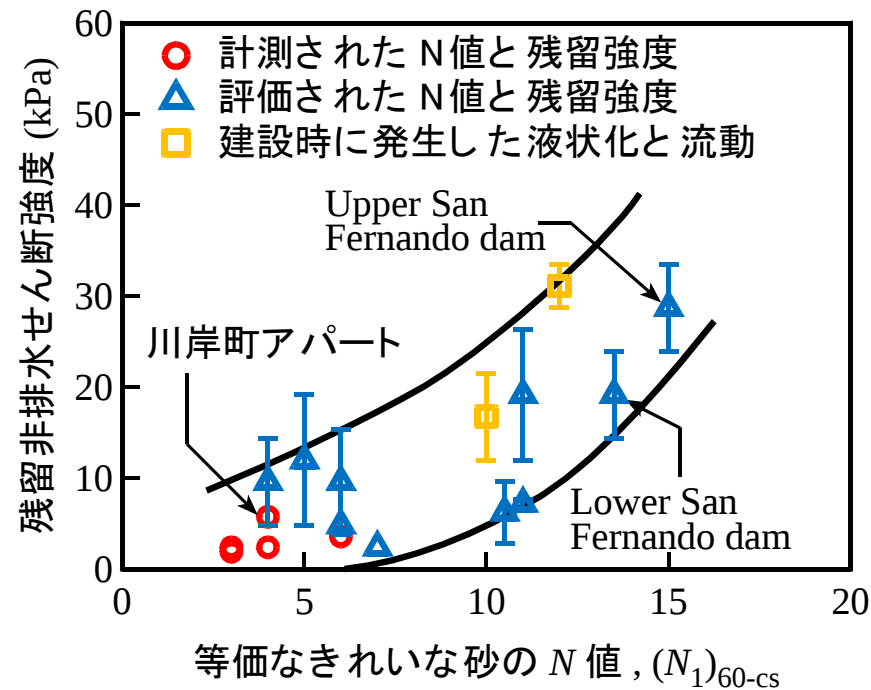


関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 流動の予測

■ 北米方式

- 残留強度による方法

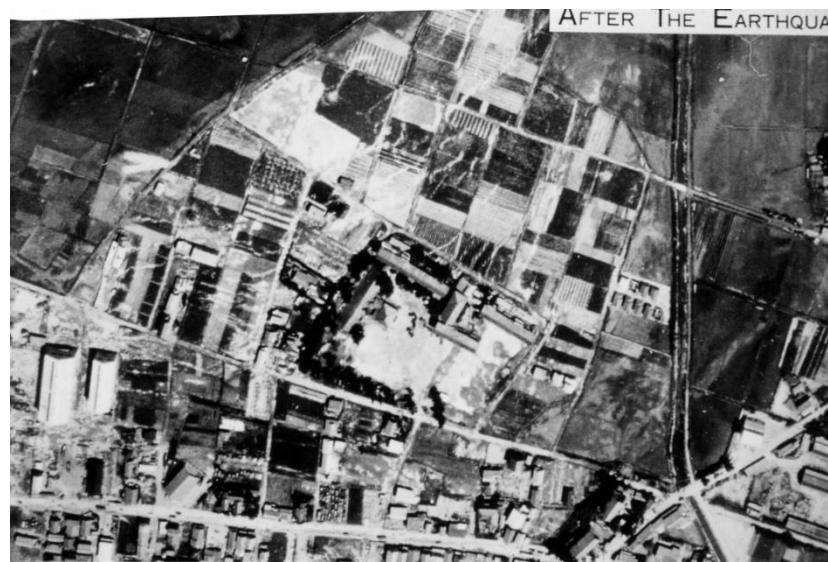


残留強度が大きい
 (日本の事例になあわない)

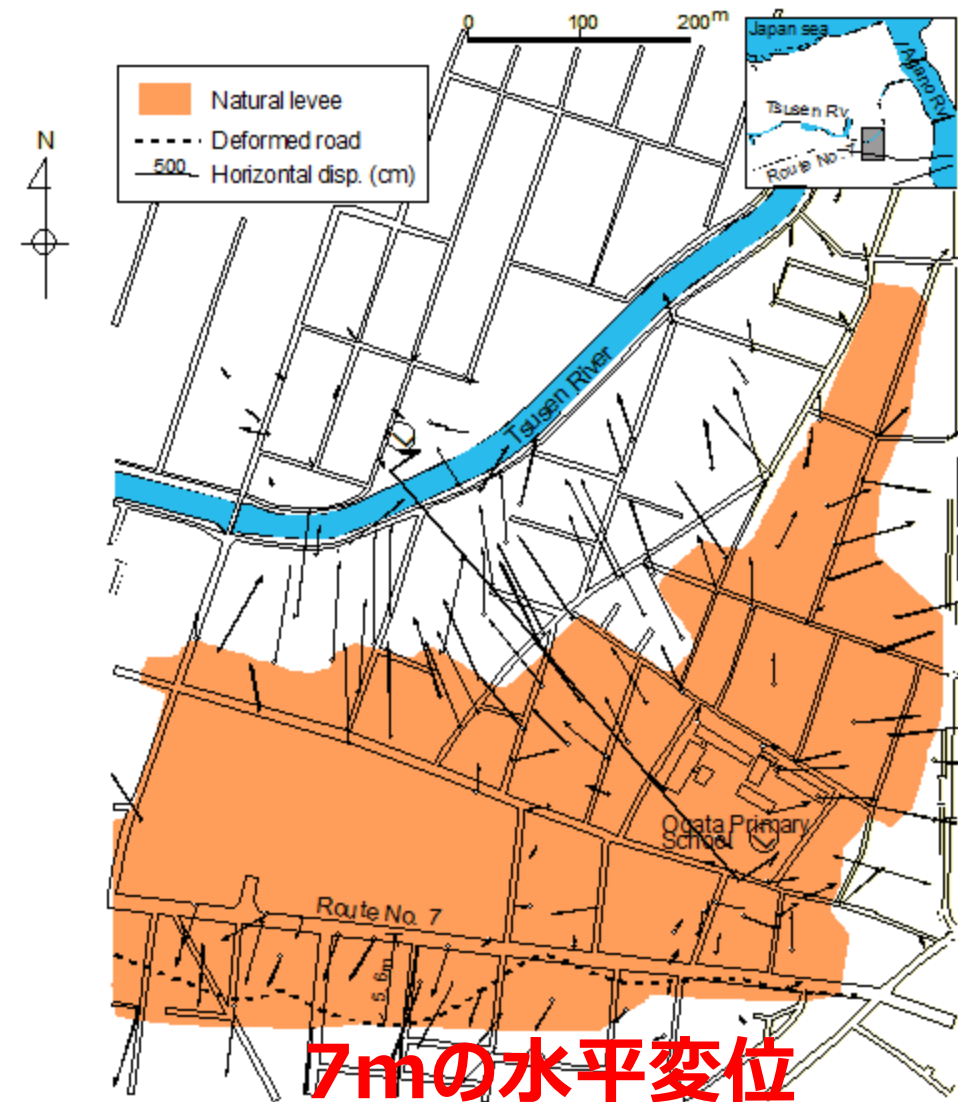
大きな傾斜のあるケース

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 日本の事例より

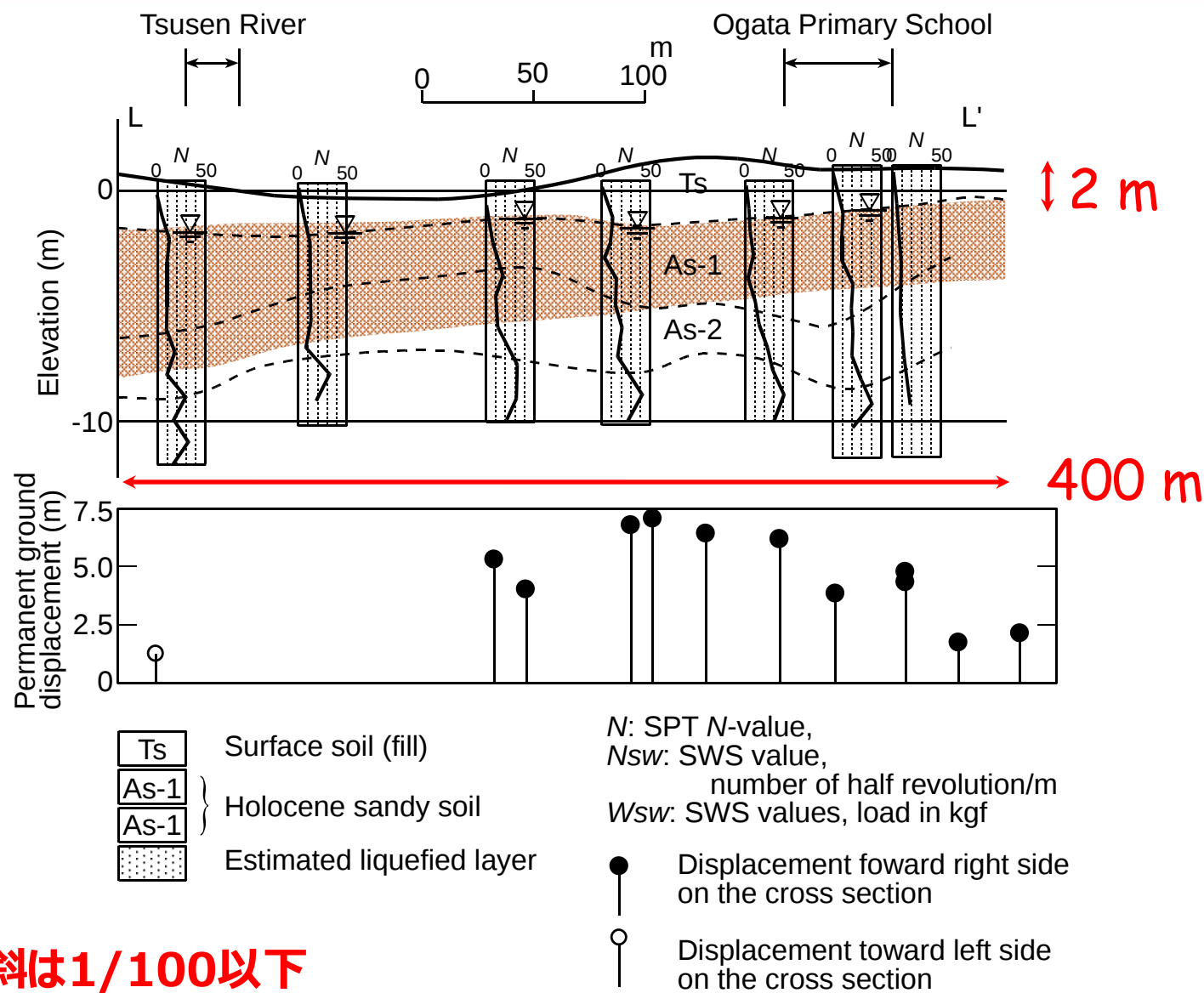


海老ヶ瀬地区（新潟市）



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

液状化に伴う流動



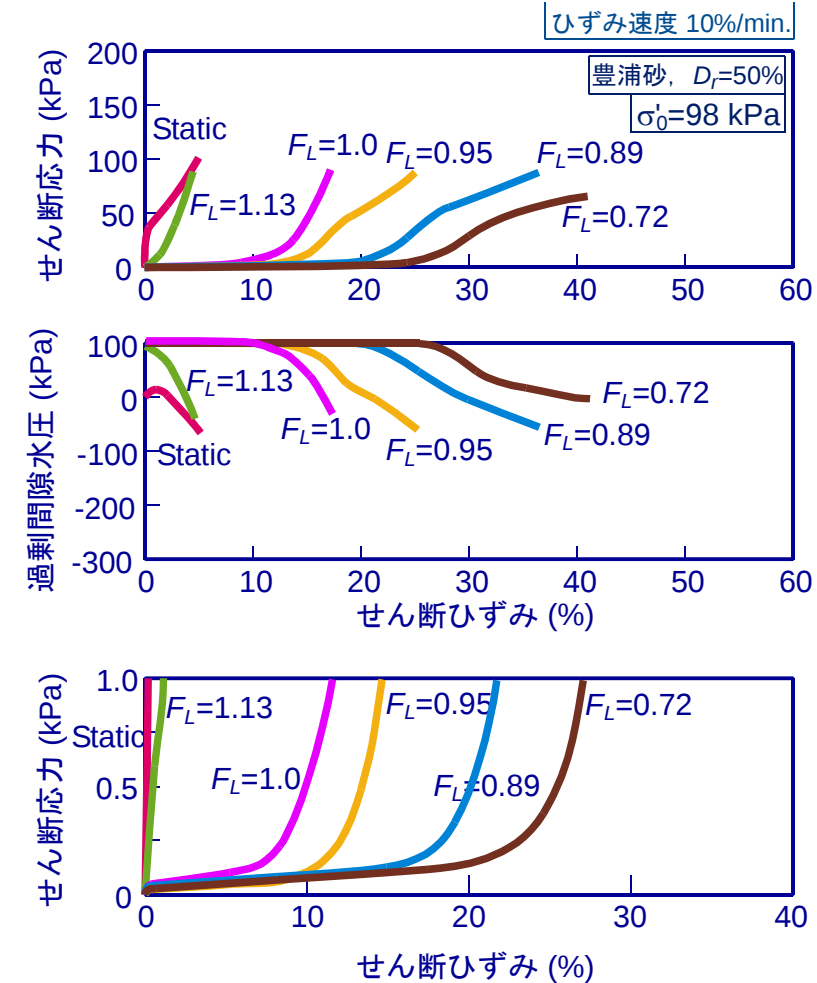
● 傾斜は1/100以下

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 日本の事例を説明するためには

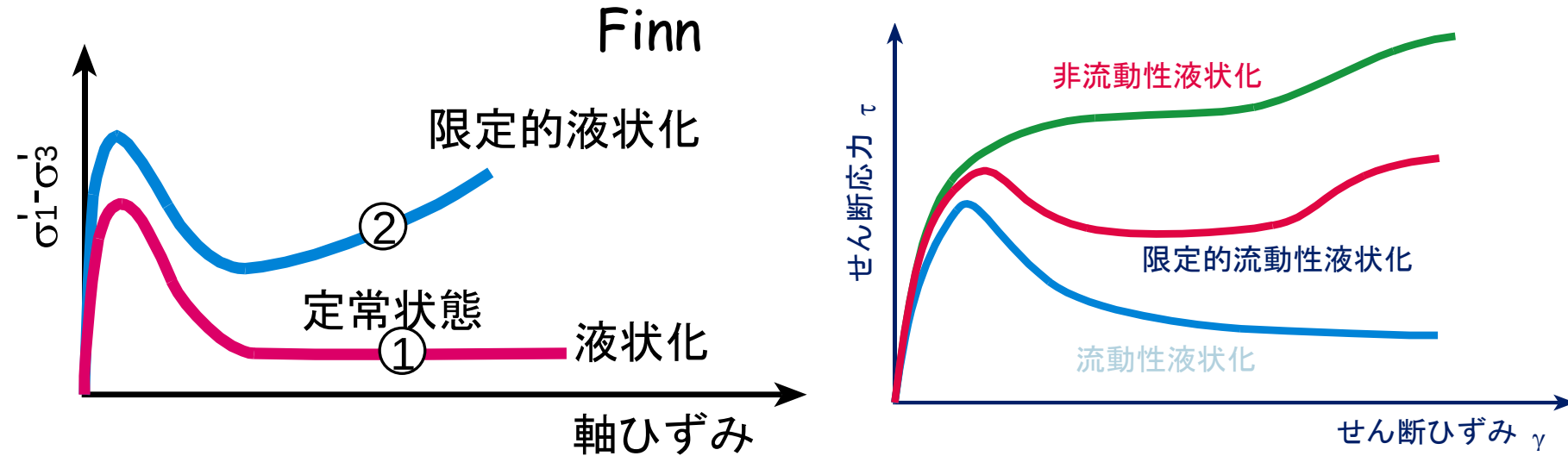
- ほぼ水平地盤でm単位の変位が発生
- 駆動力（初期せん断応力）の例
 - ▶ 地盤の傾斜 $\approx 1/100$
 - ▶ 浮力を考慮した単位体積重量 = 10 kN/m^3
深さ = 10 m
地下水位は地表
 - ▶ 初期応力 = $10 \text{ kN/m}^3 \times 10 \text{ m} / 100 = 1 \text{ kPa}$

■ メカニズムや解析はこの条件で大きな変位が発生するものである必要



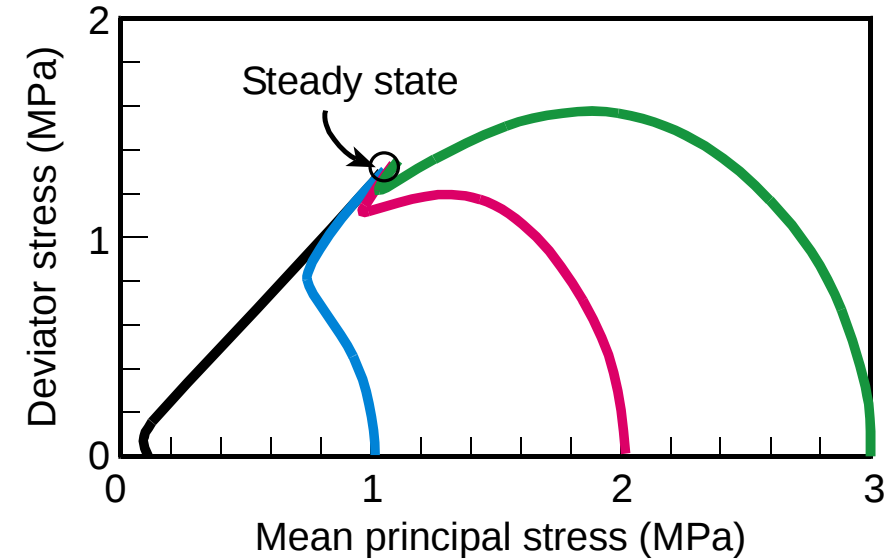
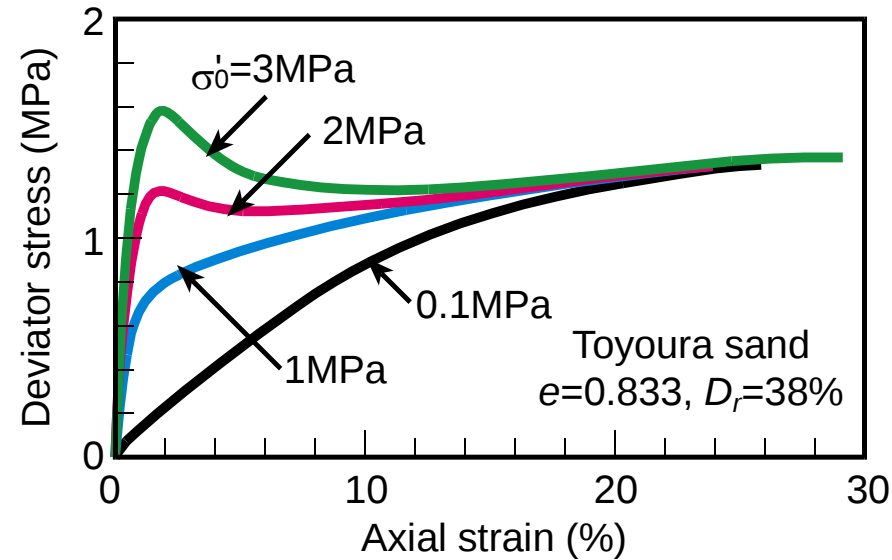
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 流動と限定的流動



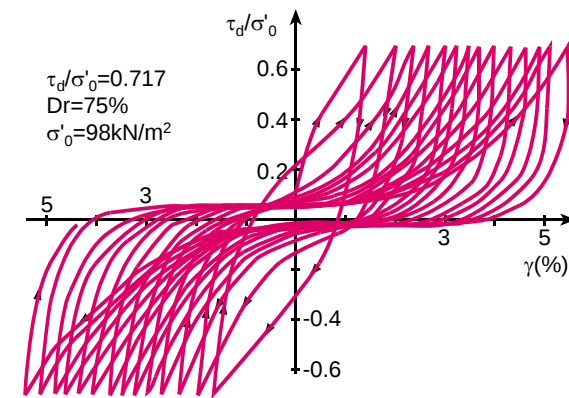
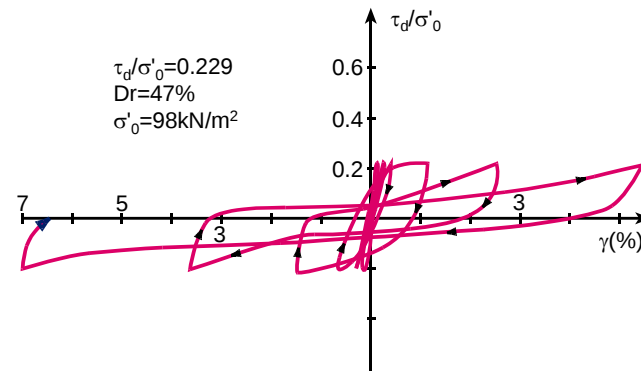
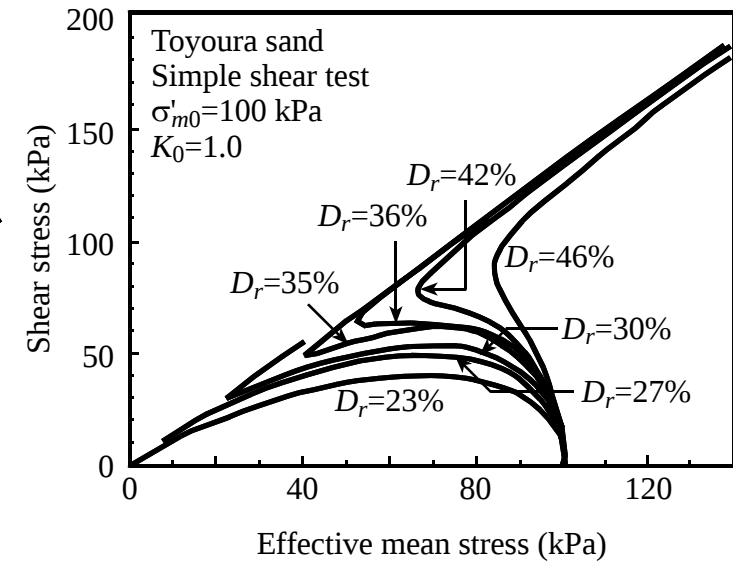
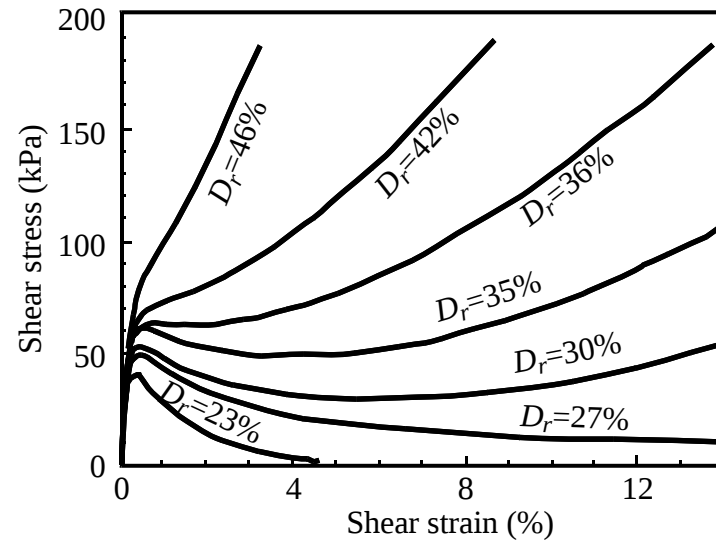
- 液状化により耐力が減少するがその後
 - ▶ 流動：耐力が回復しないので変位は無限大（不安定）
 - ▶ 限定的流動：耐力が回復するので、有限の変位で止まる

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



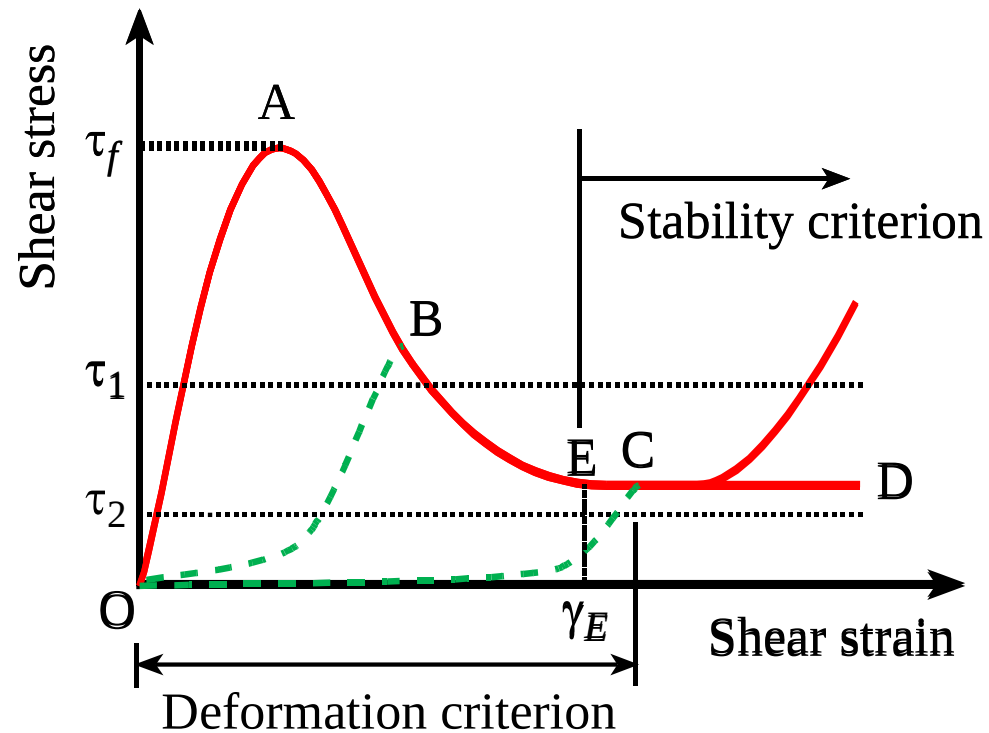
- 日本の事例
 - ▶ 1/100でも m単位の変位
 - ◆ $(20-10)(\text{kN/m}^3) \times 10(\text{m}) \times 0.01 = 1 \text{ kPa}$
 - ▶ 図は, 単位がMPa
 - ▶ 初期拘束圧は高い 1~3MPa
- 単調載荷の結果から思い込んでいた？
 - ▶ ピーク時ひずみは2%程度

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



- 実地盤の最小の相対密度は40% (30%)
▶ すべては非流動性液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



■ 安定問題

- 初期せん断応力大きい

■ 変形問題

- 初期せん断応力が小さい

ALIDの開発へ

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

125

■ 発生時期

- 地震後
- 地震中

■ 異なる考え方

- 残留強度
 - ▶ 安定問題：変位の予測は困難
- 繰返しに伴う劣化
 - ▶ 変形問題：変位の予測は可能

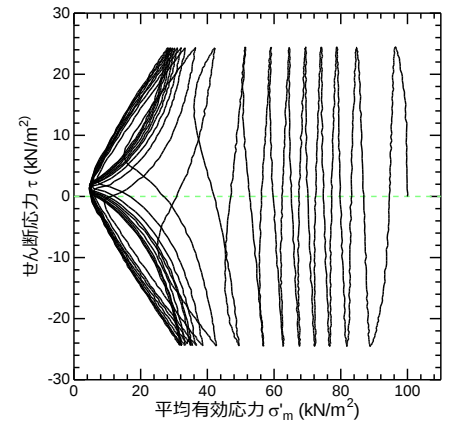
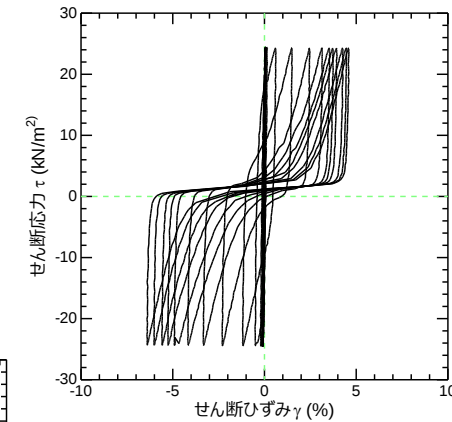
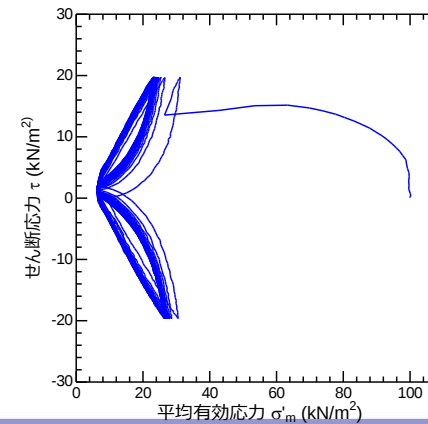
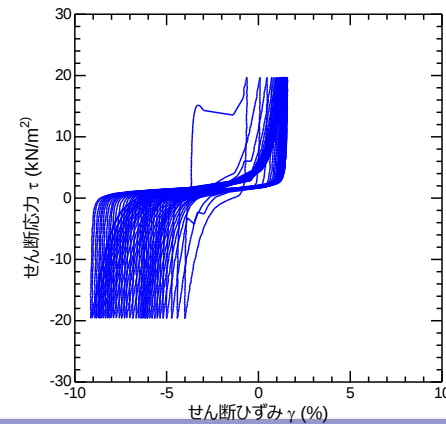
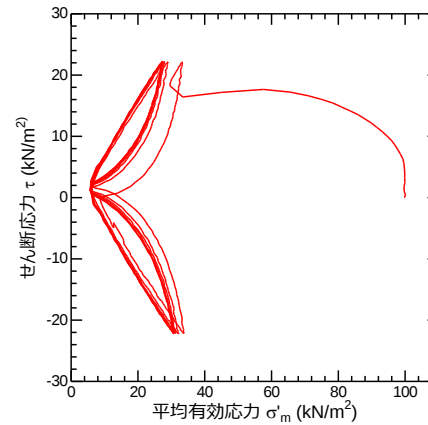
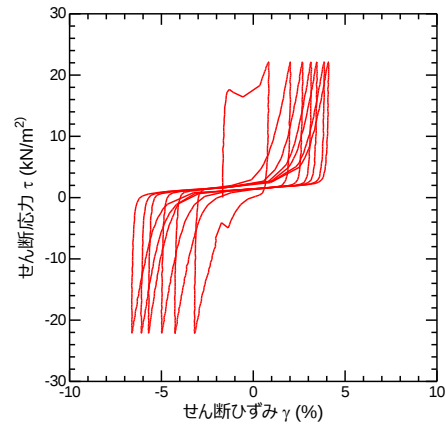
■ 固体→液体→固体

- FEMなどで解析する個は困難？

session.11

液状化直後の強度 再液状化

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



2回目

1回目

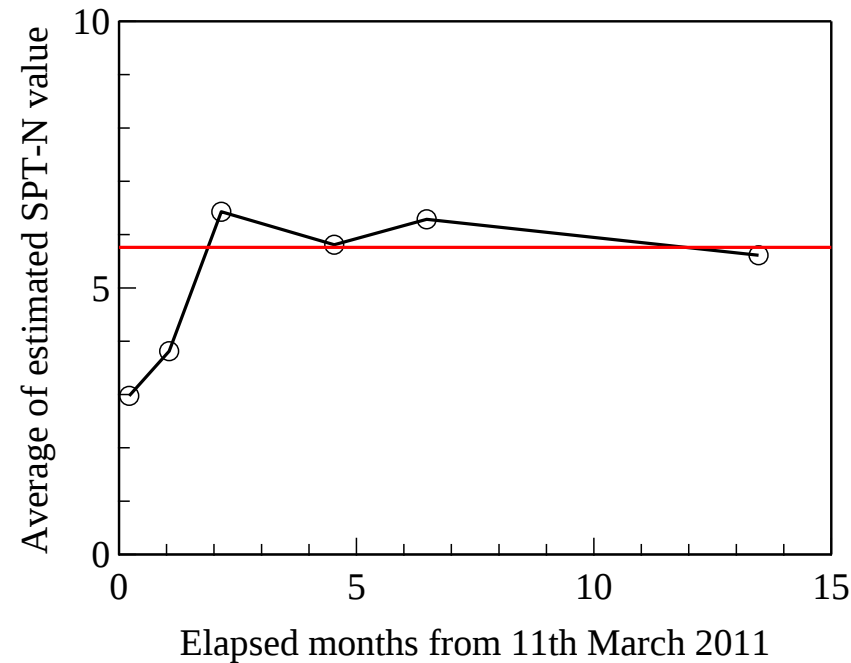
3回目

■ 液状化すると骨格構造が乱れる

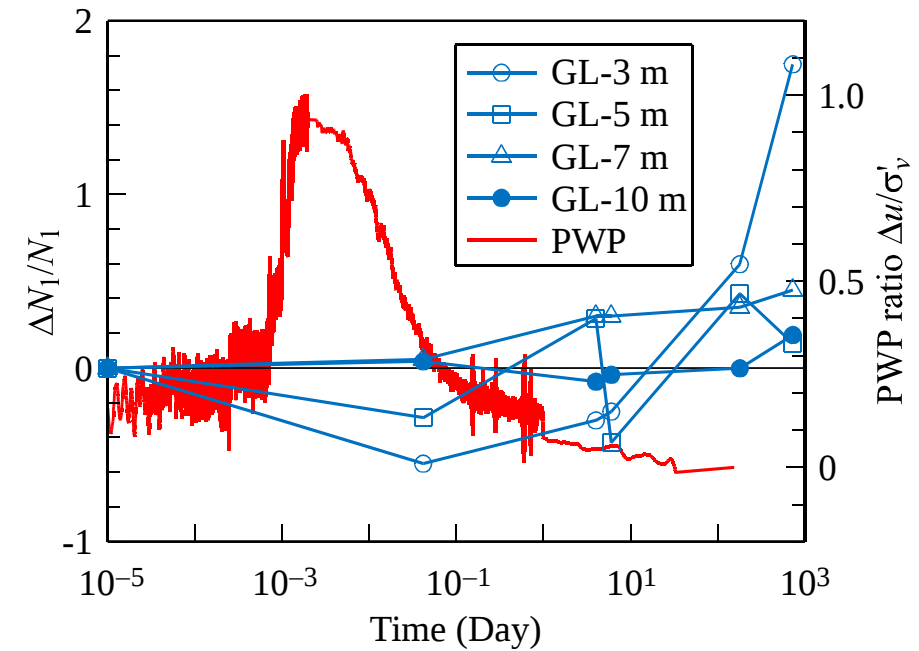
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 地震後のN値の回復

- いつの解析をするのか？



東北地方太平洋沖地震
浦安市



発破による液状化後
北海道石狩市

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

- 変相線を超える（サイクリックモビリティ）と骨格構造が乱れる
- 液状化すると、すぐには骨格構造は乱れたまま
- 地震前の状態に戻るには月単位の日時が

session.12

液状化解析の精度

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

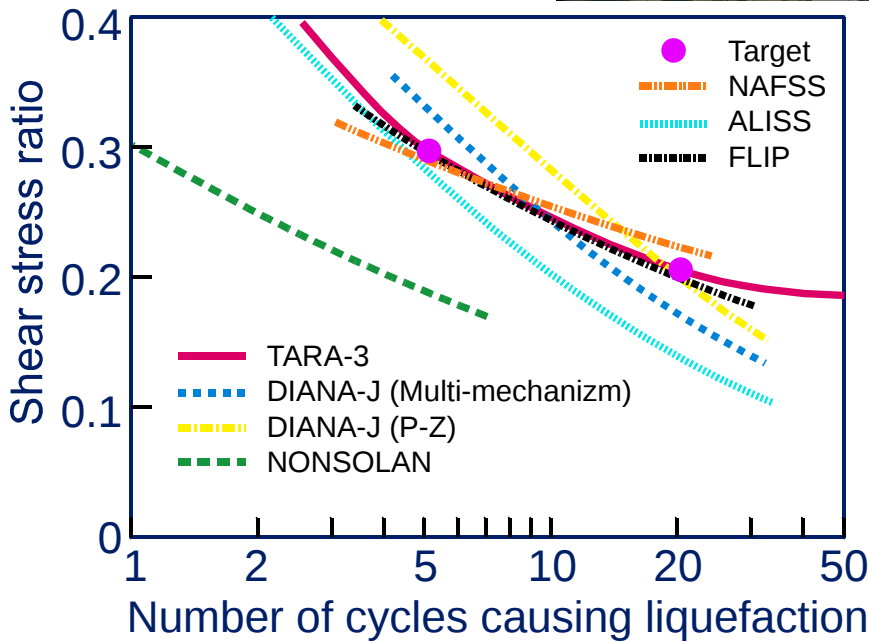
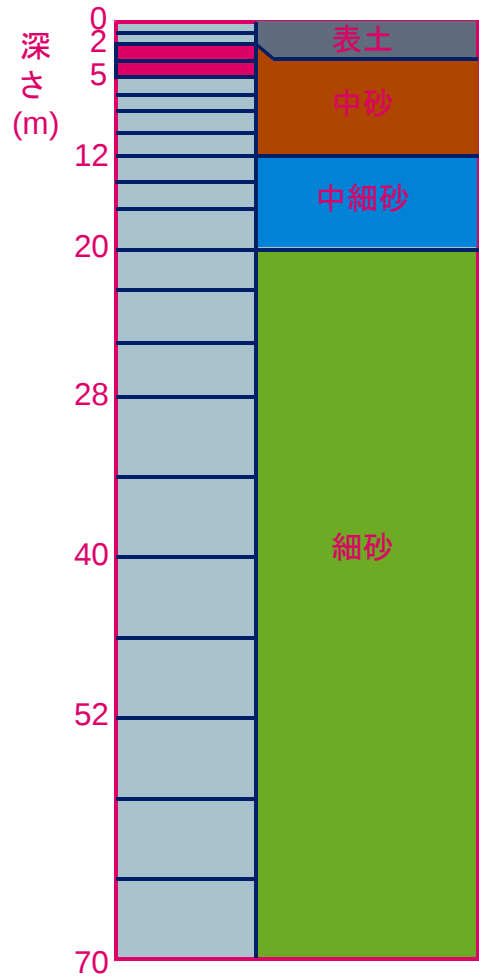
一斉解析，ブラインドテスト

131

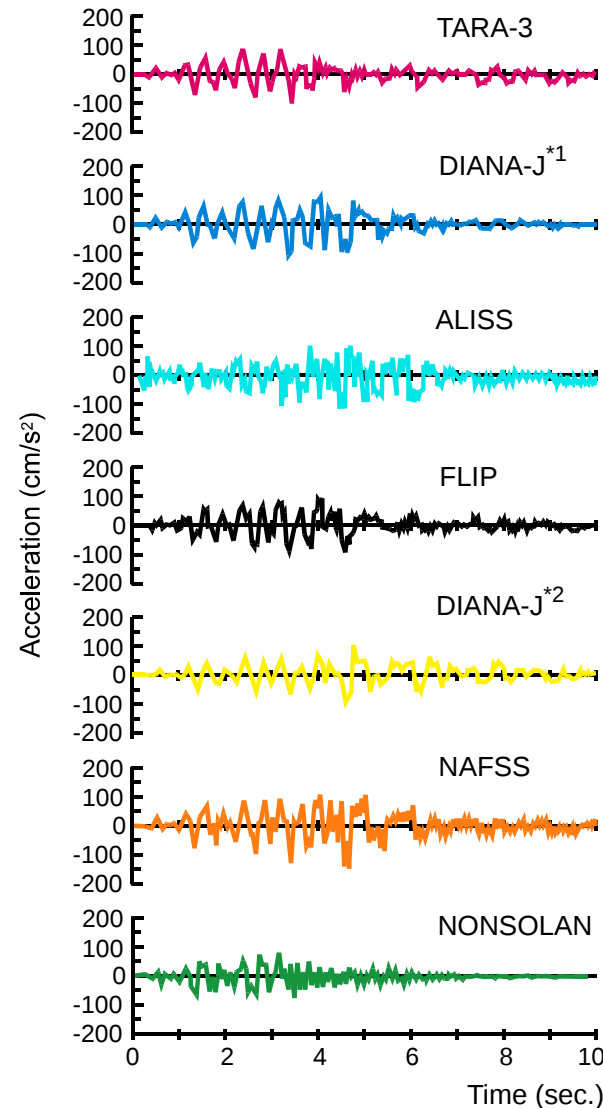
- 多くの解析が比較できる
- 一斉解析
 - 同じ条件で解析
 - 結果が既知
 - 再計算可能
- ブラインドテスト
 - 条件のみ与える
 - 結果は未知

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

地盤と堤体盛土（1989 地盤工学会）

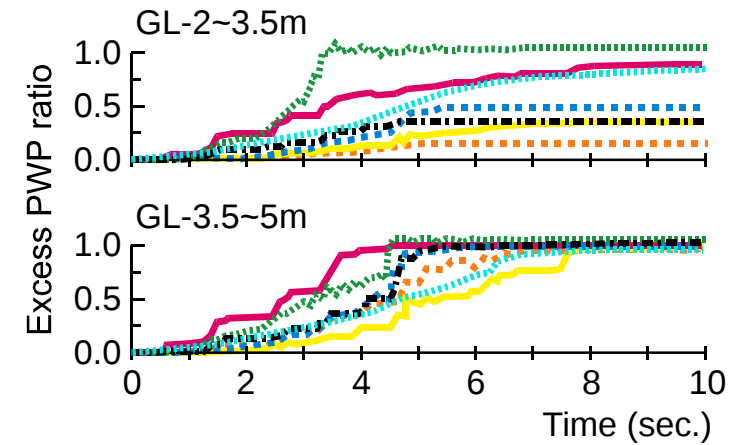


関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授



*1 Multi-mechanism model

*2 Paster-Zienkiewicz model



Legend for Excess PWP ratio plots:

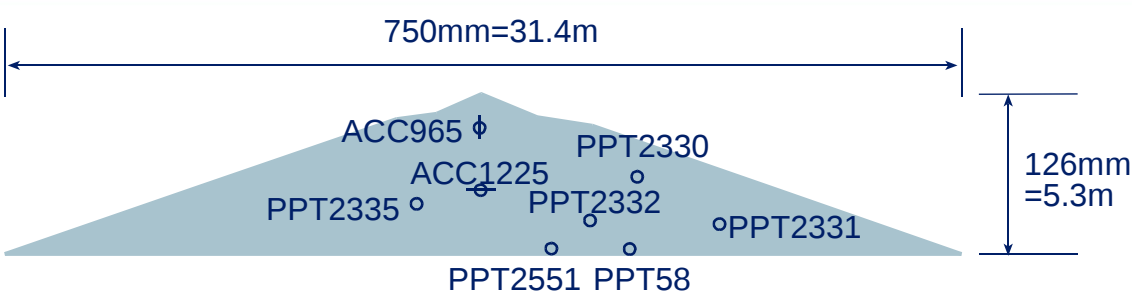
- TARA-3 (solid magenta line)
- DIANA-J^{*1} (dotted blue line)
- ALISS (dotted cyan line)
- FLIP (dashed black line)
- DIANA-J^{*2} (solid yellow line)
- NAFSS (dotted orange line)
- NONSOLAN (dotted green line)

*1 Multi-mechanism model
*2 Paster-Zienkiewicz model

- プログラムによるばらつきは大きい
- 液状化しない？ する？
 - 構成モデル

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

地盤と堤体盛土（1989 地盤工学会）

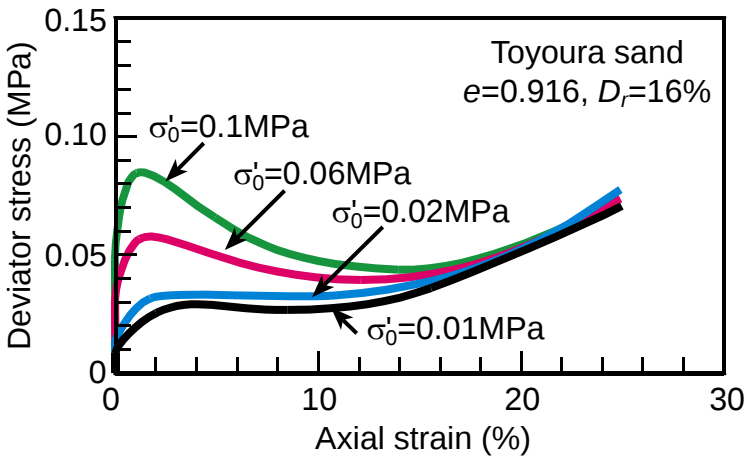
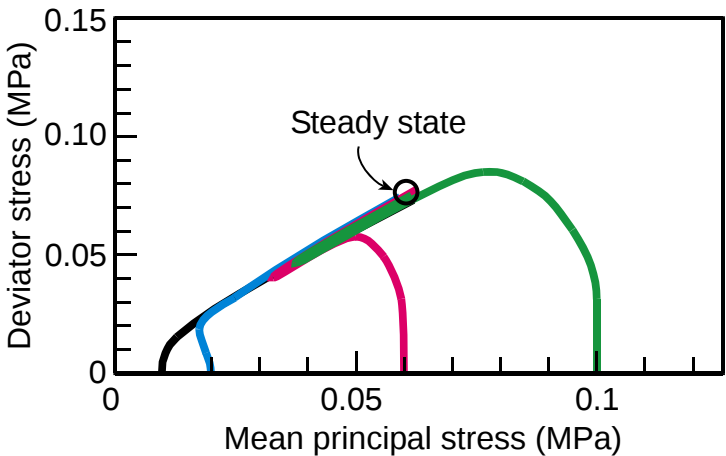


Code	沈下 (mm)
TARA-3	1.8
DIANA-J*	0.05
ALISS	≈0
FLIP	4.5
DIANA-J**	0.59
NAFSS	0.03
NONSOLAN	1.25
Test	1.9

* Multi-mechanism model
** Pastor-Zienkiewicz model

遠心力载荷試験

- 30～50gの加速度
 - ▶ 模型サイズを1/30～1/50に出来る
 - ▶ 土では拘束圧が重要（有効応力の原理）
 - ▶ 拘束圧で挙動が異なる

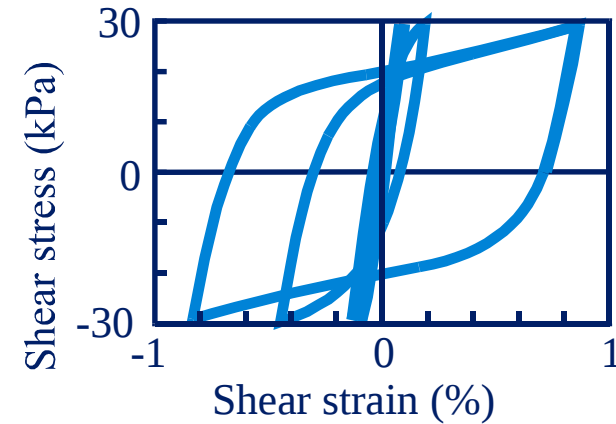
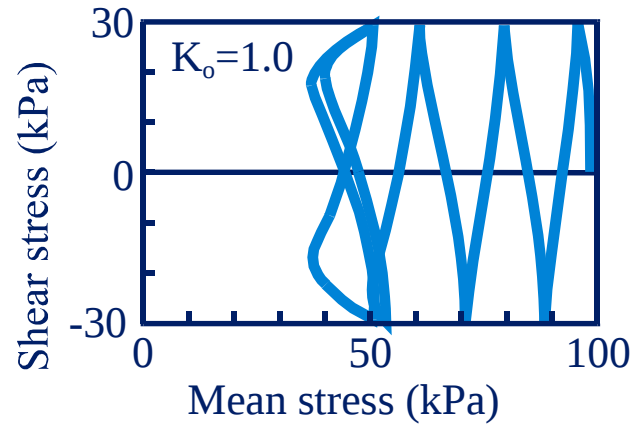


関東学院大学
工学総合研究所研究員、

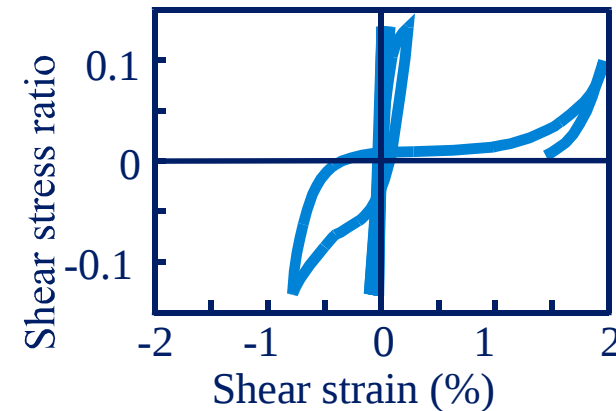
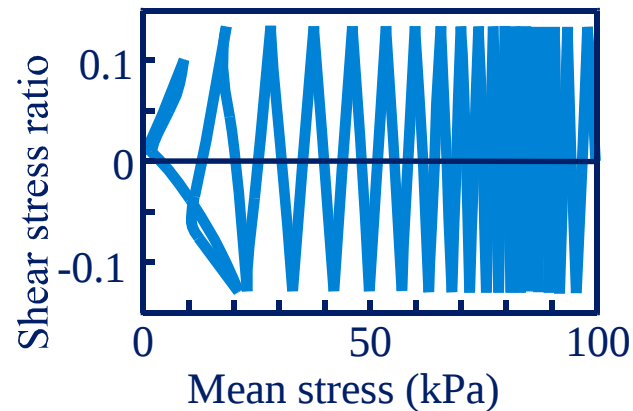
東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

■ 西モデル



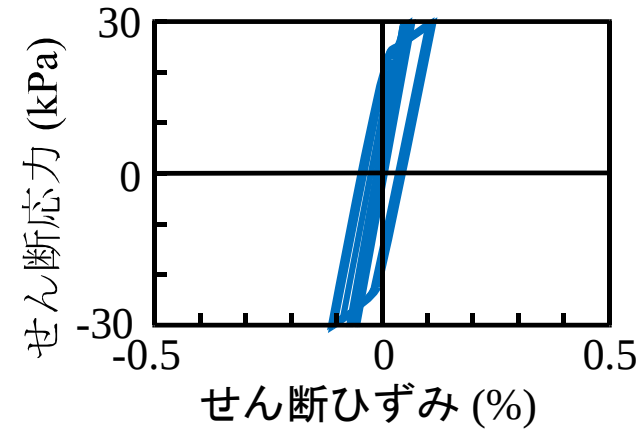
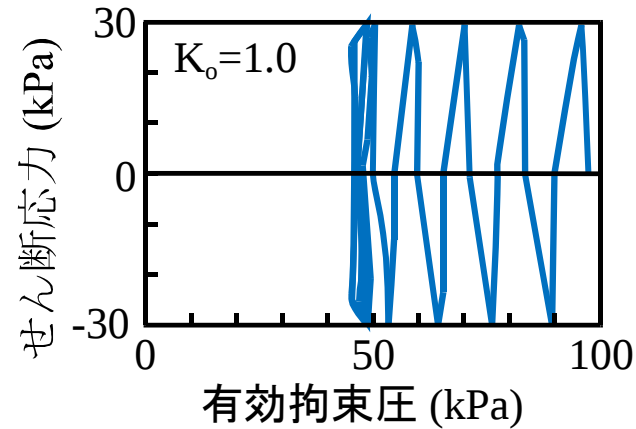
1989年



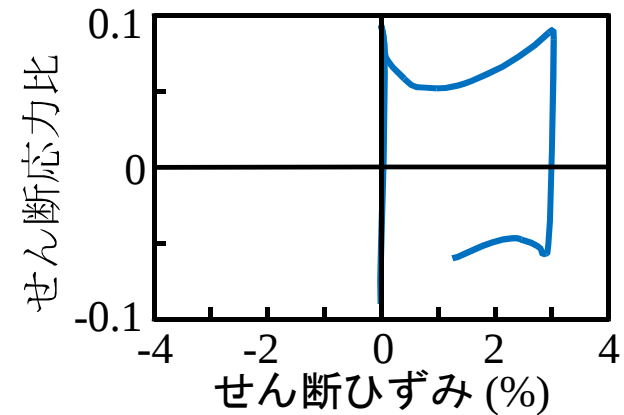
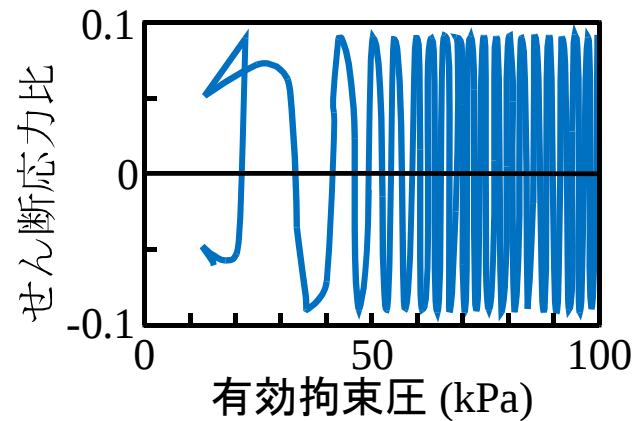
1991年

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ P-Zモデル



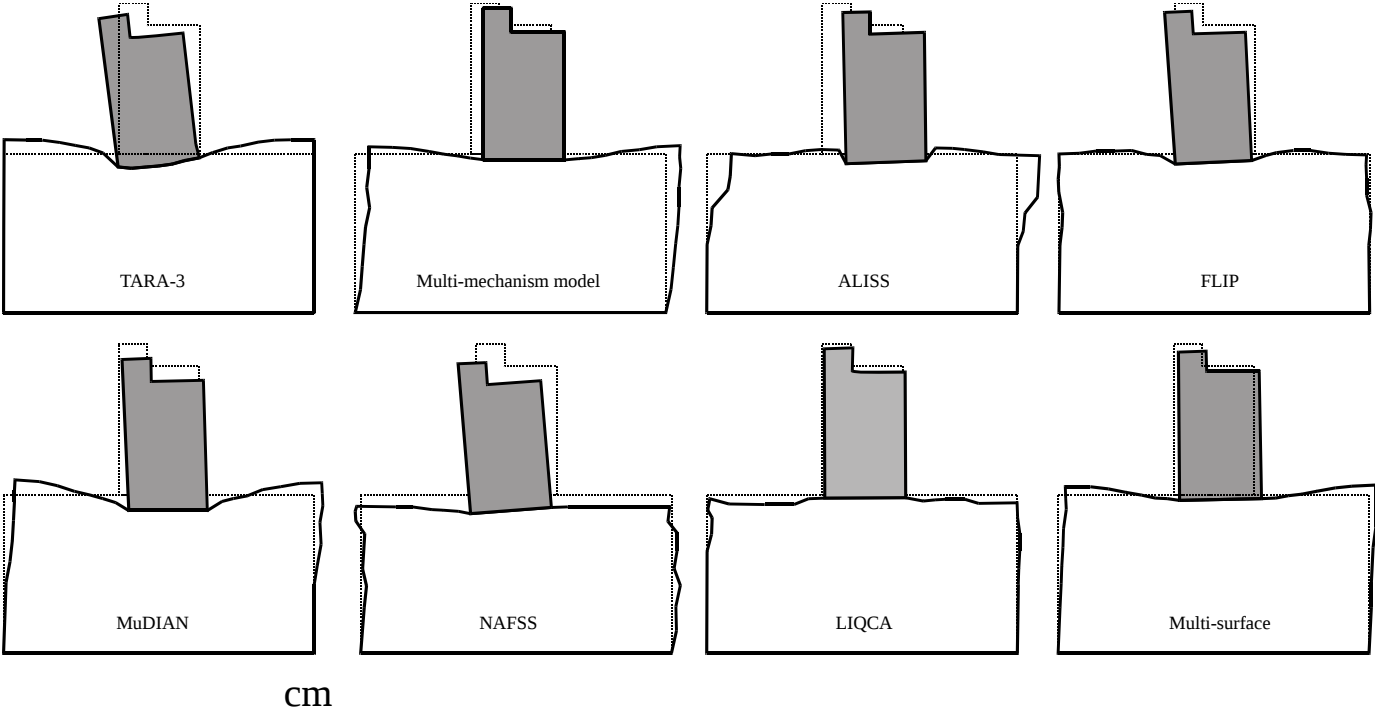
1989年



1991年

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

地盤改良（1991）

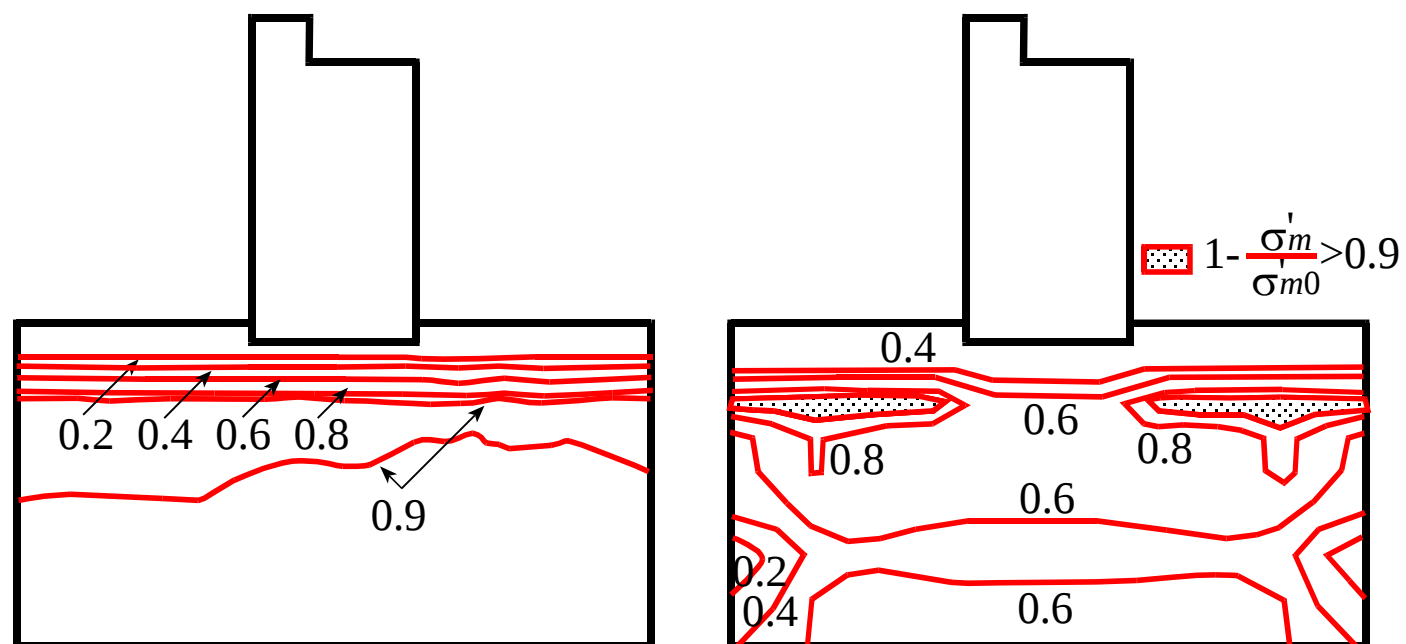


Code/Model	V	H
TARA-3	0. 5	0. 7
Multi-mechanism	2. 4	6. 2
ALISS	3. 7	9. 2
FLIP	15. 4	18. 1
MuDIAN	9. 1	0. 8
NAFSS	2. 2	2. 0
LIQCA	6. 4	2. 1
Multi-surface	6. 4	2. 1

川岸町アパート
地震終了時点

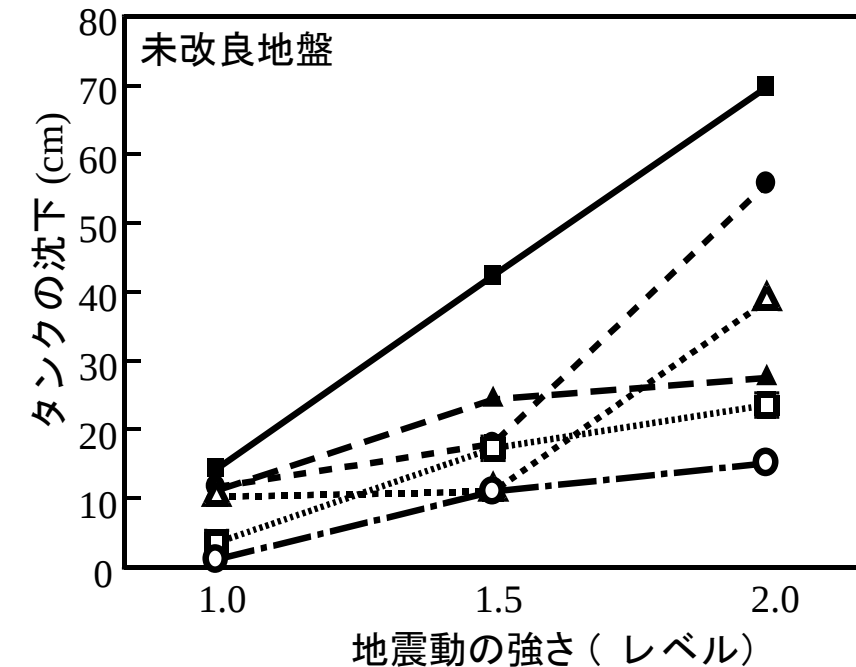
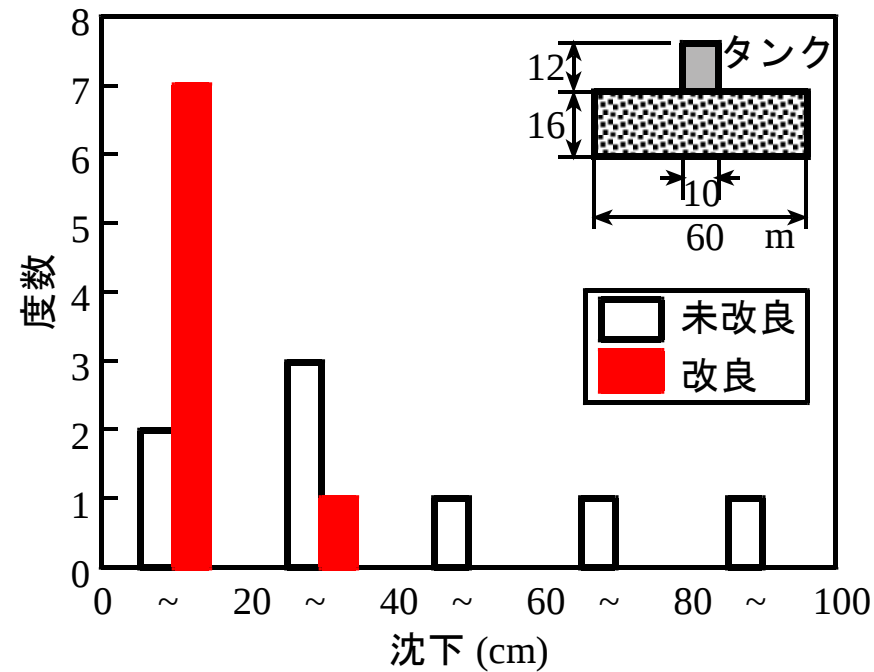
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

■ 構造物直下の過剰間隙水圧



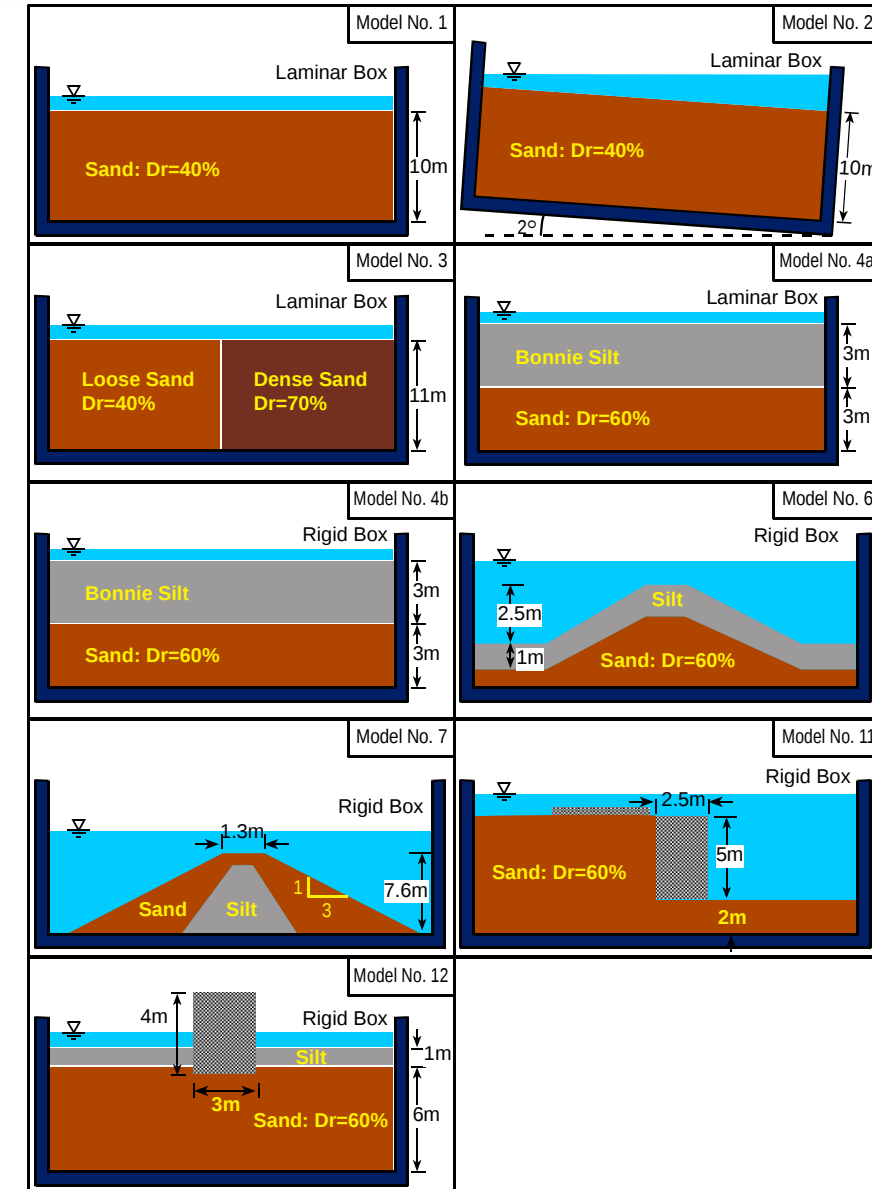
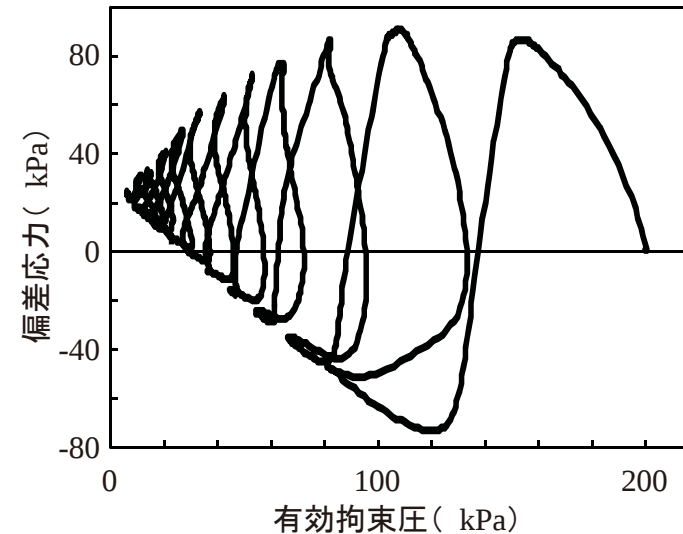
関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- タンク地下の地盤改良の影響



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

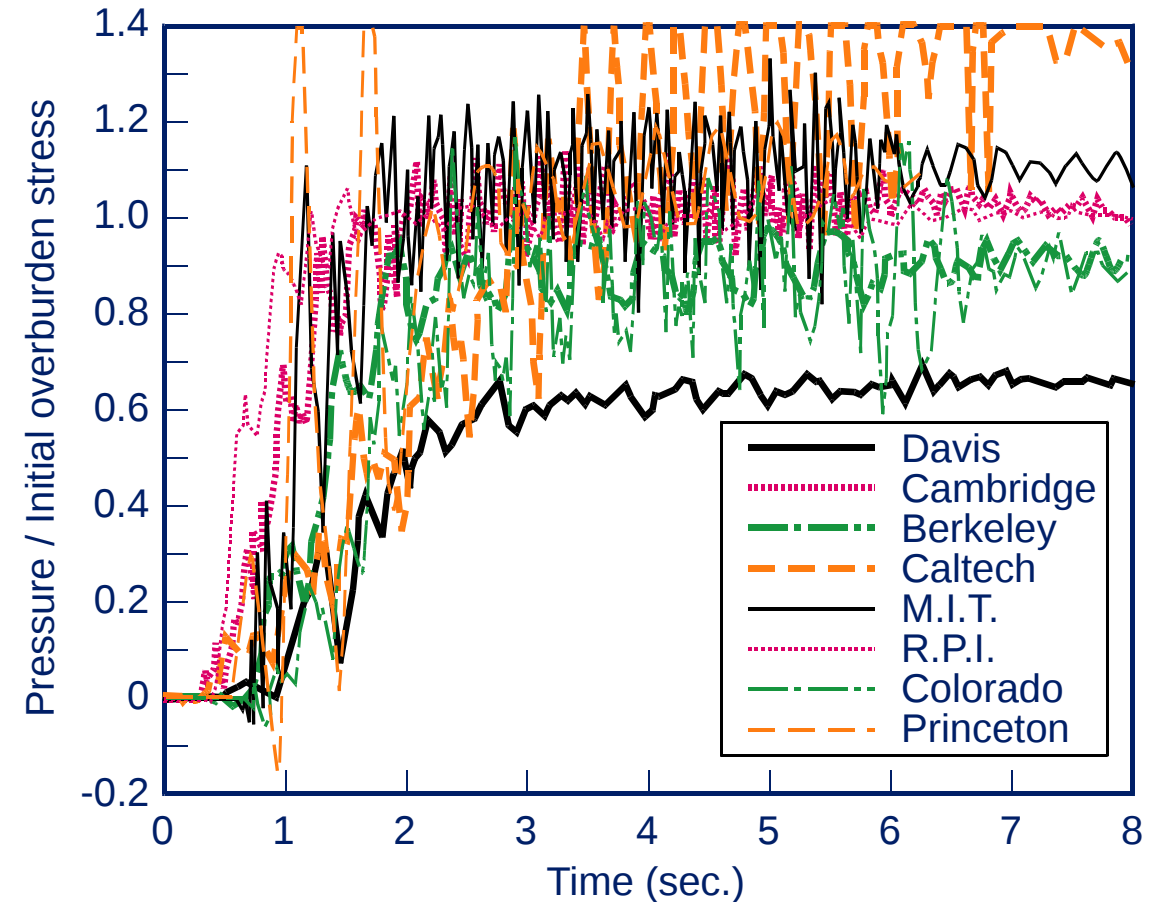
- 全てのケースで良い結果だったプログラムはなかったし、全てのプログラムが良い結果を示した実験ケースはなかった (Scott)
- 北米は実験を大事にしない
▶ LEAPプロジェクト



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

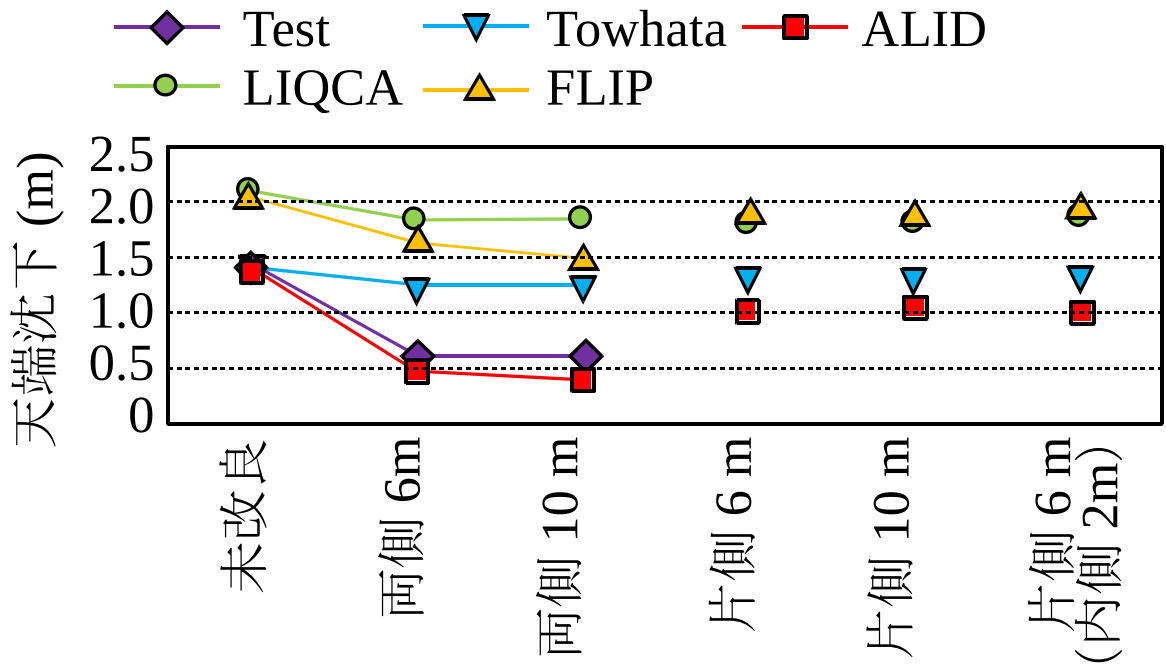
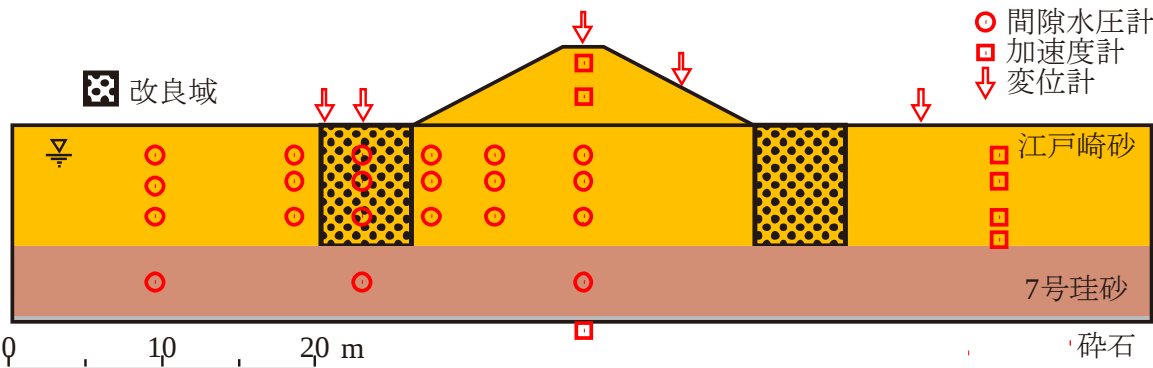
■ 実験は正しいのか？

- VELACS事前実験
 - ▶ 同じ装置，地震波で加振



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

河川堤防の地震時変形量の解析手法



Towhata : $h=10\%$
FLIP : 7 号珪砂
ALID : Pattern 3

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

一斉解析，ブラインとテストの問題

143

■ なぜあったのか，合わなかったのか

- たまたま運がよかった
- 技術者がよかった
- プログラムがよかった

作成者とユーザーでは
熱心さが違う

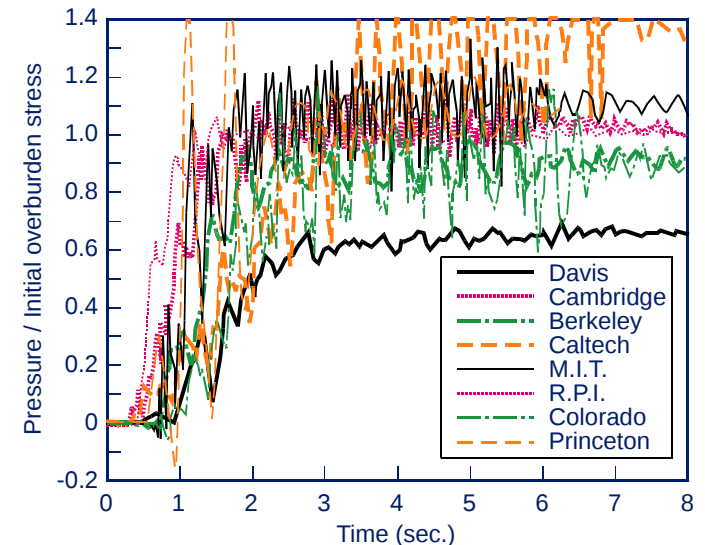
一般にはこれと考えられている

■ 反省が出来ない

- 与条件が常に満たされているとは限らない
 - ▶ 例1：足柄ブラインドテスト
 - ▶ 例2：浮き上りブラインと
- なぜ，差が出たのか
 - ▶ 同じプログラムでも

■ 実験は正しいのか

VELACS 事前テスト



関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

一斉解析、ブラインドテストの問題

名前	所属	手法	ケース1						
安達 健司	地盤ソフト工房	ALID/FLUSH	8.0cm						
大波 正行			0.8cm						
内山不二夫	(株)構造計画研究所	NANSSI/2D	(2.5秒)						
渦岡 良介	東北大学	LIQCA	14.3cm						
小堤 治	FLIP研究会窓口 (株)日本科学技術研修所	FLIP大変形解析	7.2cm						
一井 康二	(独)港湾空港技術研究所	FLIPアンケート	13.4cm						
西山 誠治	(株)日建設計シビル	FLIP低拘束圧下要素試験	3.0cm						
佐藤 成	パシフィックコンサルタンツ	FLIP物性値標準設定	7.9cm						
北出 圭介	ニシキコンサル	FLIP物性値簡易設定	9.4cm						
蔡 飛	群馬大学	FEM(有効応力解析) (180gal20波で予測)	1.0cm→10cm						
田中 忠次									
原田大	東京大学	FEM(弾塑性)	-1.1cm						
東畑 郁生	東京大学	直感	14.0cm						
小林 義和	日本大学	粘性流体 (180gal20波で予測)	1.4cm →2.8cm						
湯浅 明	船橋解析センター	FLIP	15cm						
委員会									
安田 進	東京電機大学	ALID/SHAKE							
山下 丈二	東京電機大学(安田研)		41cm		57.6cm	16.9cm			
小宮 真悟	東京電機大学(安田研)	低拘束圧	1.7cm		3.2cm	0.9cm			
佐々木 哲也	(独)土木研究所	予測式(粘性流体)	16cm	18cm	23cm	5cm	5cm		
中瀬 仁	東電設計(株)	DEM	25.2cm		24.3cm				
吉田 望	応用地質(株)	工学的判断	1.5cm	0.2cm	10.0cm	1.0cm	0.5cm	4.0cm	
毛利 栄征	(独)農業工学研究所	直感	21cm		50cm				
松島 健一	(独)農業工学研究所	直感	12cm						
河端 俊典	神戸大学	直感	35cm		50cm				
			平均(500gal,60波予想のみ)	13.6cm	18.2cm	25.0cm	6.6cm	5.4cm	15.2cm
実験		加振終了時	11.1cm	28.5cm	25.4cm	9.8cm	6.1cm	17.5cm	
		終了後25秒後	11.4cm	28.5cm	26.3cm	10.5cm	7.0cm	29.2cm	
		加振開始(2.5秒)	3.5cm						

○ P1
● P2
□ P3
■ P4
◇ P5
△ P1C
▲ P2C

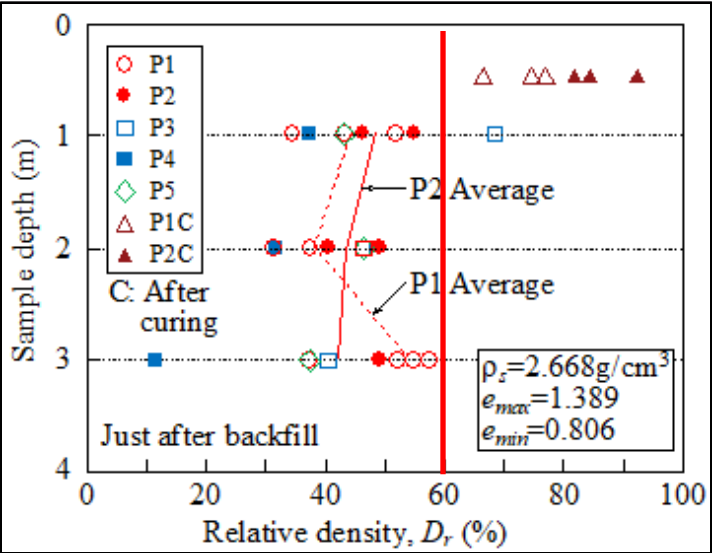
C: After curing

Just after backfill

P2 Average

P1 Average

$p_s = 2.6$
 $e_{max} = 1$
 $e_{min} = 0$



■ 地盤は設定値よりかなり緩かった

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

まとめ

145

■ 液状化解析は信用できないか？

- 結果が分かっているならば、ある程度は表現可能
- 未知の事象に対しては、ばらつく
 - ▶ 技術者の判断，過去の経験が重要
 - ◆ 一斉解析，被害報告書
- 解析に際しては
 - ▶ 実験値をターゲットとして，シミュレーション
 - ◆ 設計指針は基本的に実験式
 - ▶ 同じような考え方で解析

おわり

ご静聴、ありがとうございました

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

数字はPPTのスライド番号です。複数のスライドが同じ文献からの引用である場合、最初のスライドにのみ文献が示されています。
吉田が著作権を持っているものについては、引用していないこともあります。

- 5) 浦安市における液状化ならびに対策技術の調査・検討に関する報告会【報告】
- 6) 2024.01.21_サンデーモーニング_能登半島地震・兵庫県南部地震
 - ・ 熊曦, 小林俊一, 阪田 義隆: 監視カメラの記録動画の解析による令和6年能登半島地震発生時の地盤振動の推定, 第59回地盤工学研究発表会, 論文番号25-11-4-05, 2024
- 9) 河村壮一, 西沢敏明, 和田曄暎: 20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害, 日経アーキテクチャー, 1985年7月27日号, pp. 130-134
 - ・ Yoshida, N. and Hamada, M.: Damage to foundation piles and deformation pattern of ground due to liquefaction-induced permanent ground deformations, Proc., 3rd Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, San Francisco, CA, pp. 147-161, 1990
 - ・ 地震予知総合研究振興会(1989): 地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究, 昭和63年度調査・研究報告書(第1分冊)
 - ・ ホテル新潟解体工事記録, 福田組, 1986
 - ・ 新見芳男, 高橋賢之助, 久富洋, 清水勇, 野中稔, 大藺征夫: 新潟交通独身寮復元工事施工記録, 清水建設研究所報, No.6, pp. 91-156, 1965(おこす, 清水建設, 映画のビデオ化)
- 10) 新潟日報社(1964): 新潟地震の記録 自然との半月の戦い, 107pp.
- 15) 科学技術振興機構: 研究人材のための e-learning, 地盤の液状化と軽減技術コース, https://jrecin.jst.go.jp/seek/html/e-learning/686/index_686.html[2021.09.18]
- 17) Hosono, Y. and Yoshimine, M.: Liquefaction of sand in simple shear condition, Proc. of the 3rd International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, 2004, pp. 129-136, 2004
- 18) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, J. SM, Vol. 92, No. SM6, pp 105-134, 1966
 - ・ 小泉安則: 新潟地震における砂の密度の変化, 土と基礎, 第13巻2号, pp. 12-19, 1965
- 19) 吉田望: 図書・報告書など, 文献に示される用語と被害, 液状化に係わる被害のメカニズムと名称を考える委員会成果報告書, 地盤工学会・関東支部, pp. 61-70, 2023
- 20) 地盤工学会(1995): 地盤調査法, p.201 648pp.
 - ・ Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H.: Foundation Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1955
 - ・ Meyerhof, G. G.: Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, Proc. of the ASCE, Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 81, No. SM1, paper 866, pp. 1-19, 1956

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

- 21) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会 (2013) : 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, p.305 1259pp.
 - ・ 土質工学会: 土質基礎工学ライブラリー4 土質調査試験結果の解釈と適用例, 土質工学会, 1979, 365pp
 - ・ Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H.: Foundation Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1955
- 22) 平間国興, 森田伸: 砂の相対密度の実際工事への適用に関する検討, 大林組技術研究所誌, No.25, pp.95-98, 1982
 - ・ Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971): Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273
 - ・ D4254-16 standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, ASTM, 2016
- 23) <https://www.youtube.com/watch?v=9uZgZxRCDYE>
 - ・ <https://www.youtube.com/watch?v=mrO1YfETkc4>
- 26) Hamada, M. Ohtomo, K., Sato, H., Iwatate, T. (1992): Experimental Study of Effects of Liquefaction-induced Ground Displacement on In-ground Structures, Proc., 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, Vol. 1, pp. 481-492
- 27) 濱田政則, 若松加寿江 (1998) : 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 189-208
- 28) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 189-208, 1998
 - ・ 土居賢彦, 佐藤博, 浜田政則, 湯浅明: 液状化している砂の物性に関する実験的研究, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1187-1190, 1993
- 29) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫 (1999) : 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 71-89
- 30) 吉田望, 永瀬英生, 三浦均也 (1999) : 講座・液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 地盤の流動化に伴う発生のメカニズムと解析法 (その1), 土と基礎, Vol. 47, No. 8, pp. 47-52
- 31) Okamura, M., Abdoun, T. H., Dobry, R., Sharp, M. K. and Toboada, V. M. (2001): Effects of sand permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, Soils and Foundations, Vol. 41, No. 6, pp. 63-77
- 32) Alam, M.J., Fukui, S., Towhata, I., Honda, T., Tamate, S., Tanaka, T., Uchiyama, J., and Yasuda, A.: Centrifuge model tests on mitigation effects of underground walls on liquefaction-induced subsidence of embankment, Proc. 11th Int. Conf Soil Dynamics and Earthquake Engineering and the 3rd Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, Vol.2, 537-544, 2004.
- 33) 南荘淳, 久保田耕司, 森田悠紀雄: 阪神高速5号線 埋立層のテストピット調査, 第31回土質工学研究発表会, pp.371-372, 1996
 - ・ 石井一郎, 平舘亮一, 東畑郁生, 中井正一, 関口徹, 澤田俊一, 濱田善弘: 2011年東北地方太平洋沖地震で液状化被害を受けた浦安市の地盤特性, 地盤工学ジャーナル, Vol. 12, No. 1, pp. 91-107, 2017
- 36) 安田進 (1988) : 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 243pp.

関東学院大学
工学総合研究所研究員、

東北学院大学
名誉教授・客員教授

吉田 望 教授

- 38) 日本道路協会 (2017): 道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 302pp., 丸善
 - ・ 日本建築学会 (2001) : 建築基礎構造設計指針, 2001改訂, 486pp.
- 39) Idriss, I. M. and Boulanger, R. W.: Soil liquefaction during earthquakes, EERI Publication No. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 237pp., 2008
 - ・ Alba, P. D., Seed, H. B., M. ASCE and Chan, C. K.: Sand liquefaction in large-scale simple shear tests, J. GE, ASCE, Vol. 102, No. GT9, pp. 909–927, 1976
 - ・ Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y.: Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp. 131–145, 1984
 - ・ Vaid, Y. P., and Sivathayalan, S.: Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests, Canadian Geotechnical Journal Vol. 33, No. 5, pp. 281–289, 1996
 - ・ Proc, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt Lake City, Utah, Technical Report NCEER-97-0022
 - ・ Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M. (1985): Influence of SPT procedure in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, ASCE, pp. 1425-1445
- 41) 吉田望：室内試験で得られた繰返しせん断試験の補正，第16回日本地震工学シンポジウム，論文番号Day3-G417-13，2023
- 43) Ishihara, K., Iwamoto, S., Yasuda, S. and Takatsu, H.: Liquefaction of anisotropically consolidated sand, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 261-264, 1977
- 49) 安田進 他：2003年十勝沖地震による音別町の下水道の被害，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第III部門，pp. 421-422，2004
- 50) 中根美香，規矩大義，内山明日香：周辺地盤の土質の違いとマンホールの地震時浮き上がりに関する模型実験，土木学会第60回年次学術講演会，III，pp.290-291，2005
- 52) 足立有史，浦野和彦，三原正哉：大型せん断土槽を用いたマンホールの浮上がり実験と有効応力解析，ハザマ研究年報，2009.12，pp. 1-7
- 55) Aubrama, D., Rackwitzb, F., Wriggersc, P., and Savidis, S. A.: An ALE method for penetration into sand utilizing optimization-based mesh motion, Computers and Geotechnics, Vol. 65, pp. 241–249. 2015
- 58) Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of Settlements in sand deposits following liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, 173-188.
- 59) Nagase, H. and Ishihara, K. (1988): Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp. 65-76
- 60) 齋藤正平，仙頭紀明：間隙水圧消散工法の排水に伴う沈下量予測と再液状化に対する抵抗性，土木学会東北支部技術研究発表会（平成24年度），論文番号III-11

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 61) Ishihara, K., Harada, K., Lee, W.F., Chan, C.C., and Safiullahe, M.M.: Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples, *Soils and Foundations*, Vol. 56, No. 3, PP. 533-546, 2016
- 62) 原田健二, 石原研而: 攪乱・不攪乱試料に基づく簡易な液状化による沈下予測法, 土木学会第68回年次学術講演会, pp. 107-108
- 67) 古関潤一, 石原研而, 藤井光久: 細粒分を含む砂の三軸液状化試験, 第21回土質工学研究発表会, 札幌, pp. 595-596, 1986
 - ・ Chung, K.Y. and Wong, I.H.: Liquefaction potential of soils with plastic fines, *Proc. of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Southampton, pp. 887-895, 1982
- 68) 佐藤正行 (1997): 埋立地盤の液状化と護岸構造物の地震被害のメカニズムに関する研究, 埼玉大学学位論文
- 69) 福井晶浩, 小林孝彰, 佐々真志, 後藤翔矢: 細粒分を含む砂質土の液状化強度とN値に関する室内試験, 第53回地盤工学研究発表会, 高松, pp. 1837-1838, 2018
- 72) 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論文集, pp. 641-648, 1978
- 73) Seed, H. N. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. Soil Mechanics and Foundations*, Div. ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273, 1971
 - ・ Idriss, I. M.: An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, *Proc. TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction*, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration, January
- 74) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. SM*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273, 1971
- 75) 新井洋: 2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の液状化に関する等価繰返し回数, 第47回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1559-1560, 2012
 - ・ 森健, 吉田望: 簡易液状化判定法に対する繰返し数の評価に関する研究, 平成23年度土木学会東北支部技術研究発表会, 秋田, III-13, 2012
 - ・ 石川敬祐, 安田進, 青柳貴是: 海溝型巨大地震時の合理的な簡易液状化判定手法に関する研究, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 9, No. 2, pp.169-183, 2014
- 78) 土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム: 東北地方太平洋沖地震における液状化の発生を踏まえた液状化判定法の検証, 14pp.+附資料, 2013
- 81) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, *SF*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74, 1983
- 83) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, *SF*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74, 1983
- 84) 時松孝次, 吉見吉昭: 細粒分含有率とN値を用いた液状化判定法と液状化対策, *建築技術*, No. 420, pp. 109-114, 1986

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 85) 時松孝次, 吉見吉昭: 細粒分含有率とN値を用いた液状化判定法と液状化対策, 建築技術, No. 420, pp. 109-114, 1986
 - ・ Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y.: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, SF, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74, 1983
- 88) 砂質土: 安田進, 山口勇: 室内および原位置で求めた動的せん断定数, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価—室内試験法および試験結果の解釈と適用—に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 115-118, 1984
 - ・ 時松孝次: 室内試験, 原位置試験及び地震記録から求めた土の動的性質, 第2回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, pp. 11-16, 1989
- 89) 地盤工学会 (2000): 土質試験の方法と解説—第1回改訂版—, pp.635-702 のうちせん断試験に関する部分全部 p.652
 - ・ 地盤工学会室内試験規格・基準委員会 (2010): 地盤材料試験の方法と解説 訂正第2刷, 地盤工学会, 1156pp. (p.745)
- 90) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil liquefaction Evaluation by elastic shear moduli, SF, Vol. 26, No. 1, pp. 25-35, 1986
- 91) Teachavorasinskun, S. and Tatsuoka, F.: Effects of cyclic pretraining on the subsequent monotonic stress-strain relationships of sands, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp. 495-498, 1992
- 93) Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi, Y.: Soil liquefaction Evaluation by elastic shear moduli, SF, Vol. 26, No. 1, pp. 25-35, 1986
 - ・ 建設省土木研究所耐震技術研究センター動土質研究室, 全国地質調査業協会連合会: 平成8年度 地盤の液状化抵抗の評価に関するサウンディング・サンプリング手法の実証実験報告書, 1997
 - ・ Teachavorasinskun, S. and Tatsuoka, F.: Effects of cyclic pretraining on the subsequent monotonic stress-strain relationships of sands, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp. 495-498, 1992
 - ・ Kiyota, T., Koseki, J., Sato, T. and Tsutsumi, Y.: Effects of sample disturbance on small strain characteristics and liquefaction properties of Holocene and Pleistocene sandy soils, SF, Vol. 49, No. 4, pp. 509-523, 2009
- 93) 澤田亮, 川西智浩, 大木基裕: 洪積砂地盤の液状化強度に関する検討, 土木学会第60回年次学術講演会, pp. 205-206, 2015
 - ・ Schmertmann, J. H.: The mechanical aging of soils, J. of GE, Vol. 117, No. 9, pp. 1288-1330, 1991
 - ・ Youd, T. L. and Perkins, D. M.: Mapping liquefaction-induced ground failure potential, J. GT, Vol. 104, No. GT4, pp. 433-445, 1977
- 94) Seed, H. B.: Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes, J. GT, Vol. 105, No. GT2, pp. 201-255, 1979
 - ・ 若松加寿江, 安田進, 吉田望, 吉原正: 埋立地における液状化履歴 (その3) エージングが液状化抵抗に及ぼす影響, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp. 1063-1066, 1992
- 95) Towhata, I., Taguchi, Y., Hayashida, T., Goto, S., Shintaku, Y., Hamada, Y. and Aoyama, S.: Liquefaction perspective of soil ageing, Geotechnique, Vol. 67, No. 6, pp. 467-478, 2017

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 96) 森伸一郎, 沼田淳紀: 東京層砂層の液状化強度に関する一考察, 土木学会論文集, No. 589/III, pp. 141-154, 1998
- ・ 安浩輝, 内田明彦, 田屋裕司, 畑中宗憲: 不攪乱砂質土試料による液状化強度曲線の定式化, 日本建築学会大会学術梗概集, pp.419-420, 2002
 - ・ 三上武子, 吉田望: 砂質土の液状化強度曲線の経験式, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 1513-1514, 2010
 - ・ 第四紀下限変更に伴う諸問題検討に関する報告, 日本第四紀学会, <http://www.geosociety.jp/name/content0057.html>[2020.02.05]
- 97) 国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江差靖行 (1983): 密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討 (その1) 密な砂の動的強度特性, 電力中央研究所報告, 研究報告383025, 44pp.
- 98) 松尾修: 道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集 No.757,III-66,pp.1-20,2004
- 102) Yoshida, N. and Mikami, T.: Behavior of sand during secondary liquefaction, proc. 7ICEGE (7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering), pp. 5784-5791, 2019
- 107) 金井重夫・小椋仁志・須見光二: 摩擦杭基礎の地震に対する安全性, 基礎工, Vol. 24, No. 11, pp. 69-73, 1996
- ・ 小椋仁志, 細田光美, 古塚昭広 (2001): 鳥取県西部地震で液状化した埋立地における摩擦杭 (節杭) を用いた建物の状況, 第36回地盤工学研究発表会, pp. 1725-1726
- 110) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. (1986): Study on liquefaction induced permanent ground displacements, Association for Development of Earthquake Prediction
- 111) 20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害, 日経アーキテクチャー, 1985年7月27日号, pp. 130-134
- ・ ホテル新潟解体工事記録, 福田組, 1986; ホテル新潟新築工事の伴う地質調査報告書, 鹿島建設, 応用地質, 1986
- 112) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. (1996): Soil Characteristics and Ground Damage, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects on the January 17 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake, pp. 109-118
- 114) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. (1996): Soil Characteristics and Ground Damage, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects on the January 17 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake, pp.109-118
- ・ Hamada, M. and Wakamatsu, K. (1998): Liquefaction-induced ground displacement triggered by quaywall movement, Special Issue of Soils and Foundations, No. 2, pp. 85-95
 - ・ 濱田政則, 若松加寿江 (1998): 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 189-208
- 115) 大成建設技術研究所 (1998): 上部工の存在しない状態で被災した杭の損傷調査結果および解析事例; 堀越研一, 立石章, 大津宏康: 上部工の存在しない状態で被災した杭の損傷調査結果, 杭基礎の耐震設計に関するシンポジウム論文集・報告書, 土木学会地震工学委員会杭基礎耐震設計研究小委員会, pp. 60-66, 2001.9

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 117) Seed, H. B., Seed, R. B., Harder, L. F. and Jong, H. -L. (1988): Re-evaluation of the slide in the Lower San Fernando Dam in the earthquake of February 9, 1971, Report No. UCB/EERC-88/04, University of California, Berkeley
 - Seed, R. B. and Harder Jr., L. F. (1990): SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength, Proc., H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, Vol. 2, pp. 351-376
- 118) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. (1986): Study on liquefaction induced permanent ground displacements, Association for Development of Earthquake Prediction
- 120) Yoshida, N.: Simplified method to evaluate liquefaction-induced flow, Preprint, 2nd Kenji Ishihara Colloquium series on earthquake geotechnical engineering, Seismic lateral displacements, August 22-23, San Diego, U.A.
- 121) Finn, W. D. L. (2000): State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 20 2000, Special Issue, the 9th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 1-15
 - Ishihara, K. (1996): Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications
- 122) Ishihara, K.: Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications, 1996.
- 123) Hosono, Y. and Yoshimine, M.: Liquefaction of sand in simple shear condition, Proc. of the 3rd International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, 2004, pp. 129-136, 2004
- 124) Yoshida, N., Yasuda, S. and Ohya, Y. (2005): Two Criteria for Liquefaction-induced Flow, Proc., Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference, Osaka, Japan, pp. 109-116
- 127) 石川敬祐, 及川晃介, 安田進: 砂の液状化後の体積ひずみに液状化履歴が及ぼす影響, 第56回地盤工学研究発表会, 13-1-6-06, 2021
- 128) Kiyota, T., Ikeda, T., Yokoyama, Y. and Kyokawa, H., "Effect of in-situ sample quality on undrained cyclic strength and liquefaction assessment," Soils and Foundations, Vol. 56, No. 4, 691-703, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.07.009>
 - 楠謙吾, 中澤博志, 菅野高弘, 大久保陽介, 規矩大義, 藤田大樹: 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 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4 (地震工学論文集第32巻), I_326-I_336, 2013.
- 132) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会: 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1989
- 135) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会: 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1989
 - 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1991
- 137) 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1991
- 139) 土木学会地震工学委員会: レベル2地震動による液状化研究小委員会活動報告書, レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集, 2003

関東学院大学
工学総合研究所研究員、
東北学院大学
名誉教授・客員教授
吉田 望 教授

- 140) Arulanandan, K. and Scott, R. F. ed.: Proc. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, Balkema, 1993
- Manzari, M.T., Ghoraiya, M.E., Kutter, B.L, Zeghal, M, Abdoun, T, Arduino, P, Armstrong, R.J., Beaty, M, Carey, T, Chen, Y, Ghofrani, A, Gutierrez, D., Goswami, N., Haigh, S.K.i, Hung, W-Y, Iai, S, Kokkali, P., Lee, C-J, Madabhushi, S.P.G, Mejial, L., Sharp, M., Tobita, T., Uedak, K., Zhoug, Y., , Ziotopoulou, K.: Liquefaction experiment and analysis projects (LEAP): Summary of observations from the planning phase, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 113, pp. 714-743, 2018.
- 141) Arulanandan, K. and Scott, R. F.: Project VELACS - Control test results, J. GT, Vol. 119, No. 8, pp. 1276-1292, 1993
- 142) 国土技術研究センター（2002）：河川堤防の地震時変形量の解析手法
- 143) Proc. of International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Odawara, 1992
- 144) 液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究（その2），地盤工学会，2002.3