

地盤の液状化判定法の検証と 高度化に向けた取り組み

独立行政法人 土木研究所
地質・地盤研究グループ
主任研究員 石原雅規

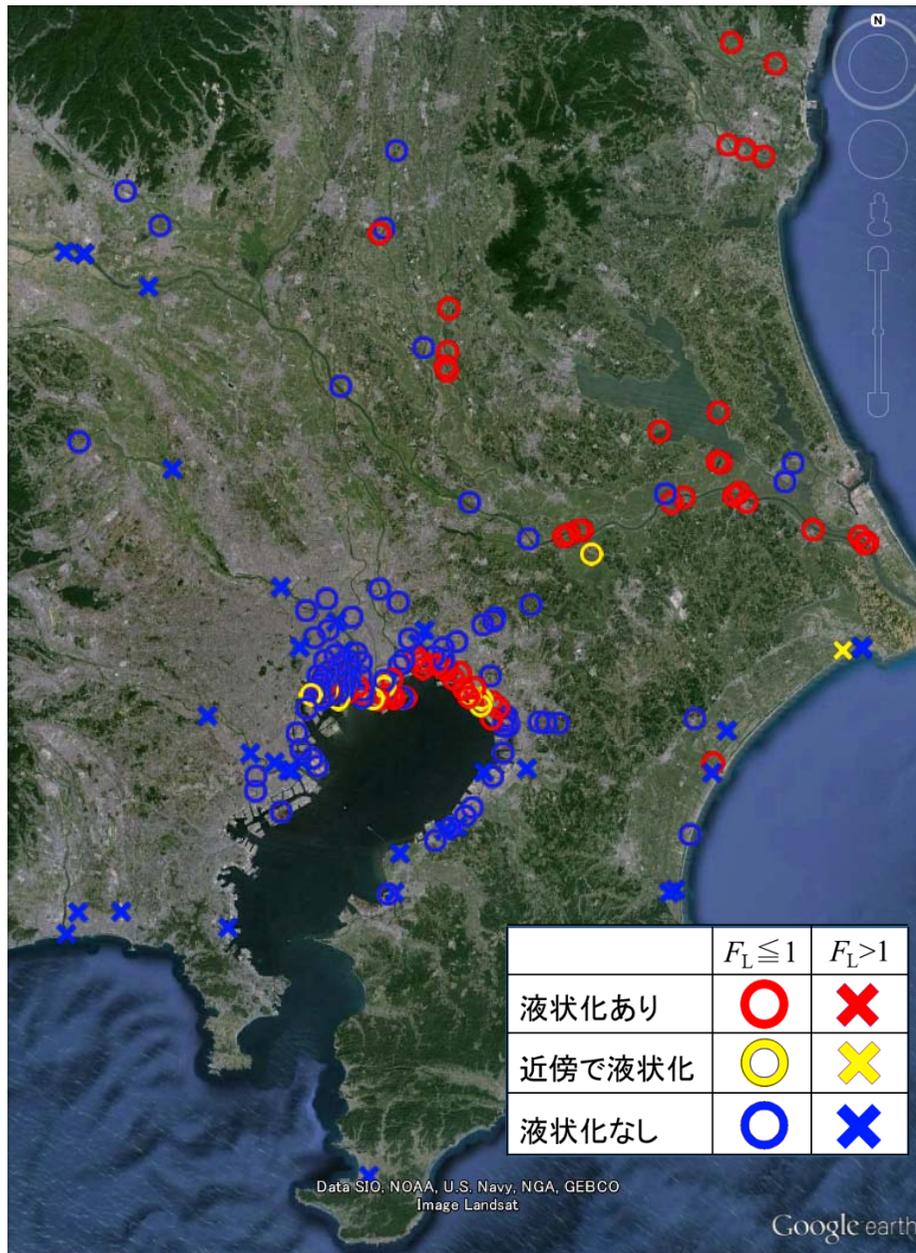
内容

1. 液状化判定法の検証
2. 細粒分を含む砂の液状化強度評価式の見直し
3. 埋立地で発生した液状化に関する分析
4. 造成年代(液状化履歴)に係る遠心模型実験

東日本大震災の液状化に関する課題

- 東京湾北部の最大加速度はそれほど大きくない(200gal程度)が、激しく液状化した。これは今まで経験したこともない継続時間の長さ大きな余震が影響したのではないか？
⇒液状化判定法で見逃しがあったのでは！
⇒継続時間や余震の影響は？
- 埋立地の噴砂は、非常に細かいさらさらの砂(シルト)が主体。液状化判定ではすでに細粒分の効果を考慮(量だけ)しているが、細粒分の性質により効果が違うのではないか？
⇒細粒分の影響は？
- 埋立地、旧河道等の新しい地盤では液状化被害が顕著であったが、自然地盤(古い)での液状化は非常に少ない。
⇒造成年代の影響は？

液状化判定結果と実際の液状化を比較



○197箇所の液状化の有無を確認
○同じ箇所のボーリングデータから液状化判定を実施

○液状化した箇所はすべて「液状化する」と判定（見逃しは無かった）⇒
現行の液状化判定法は、設計等の観点からは有効

○液状化しなかったが $F_L \leq 1$ となる箇所（×空振り）の多くは、液状化した地域の周辺に分布

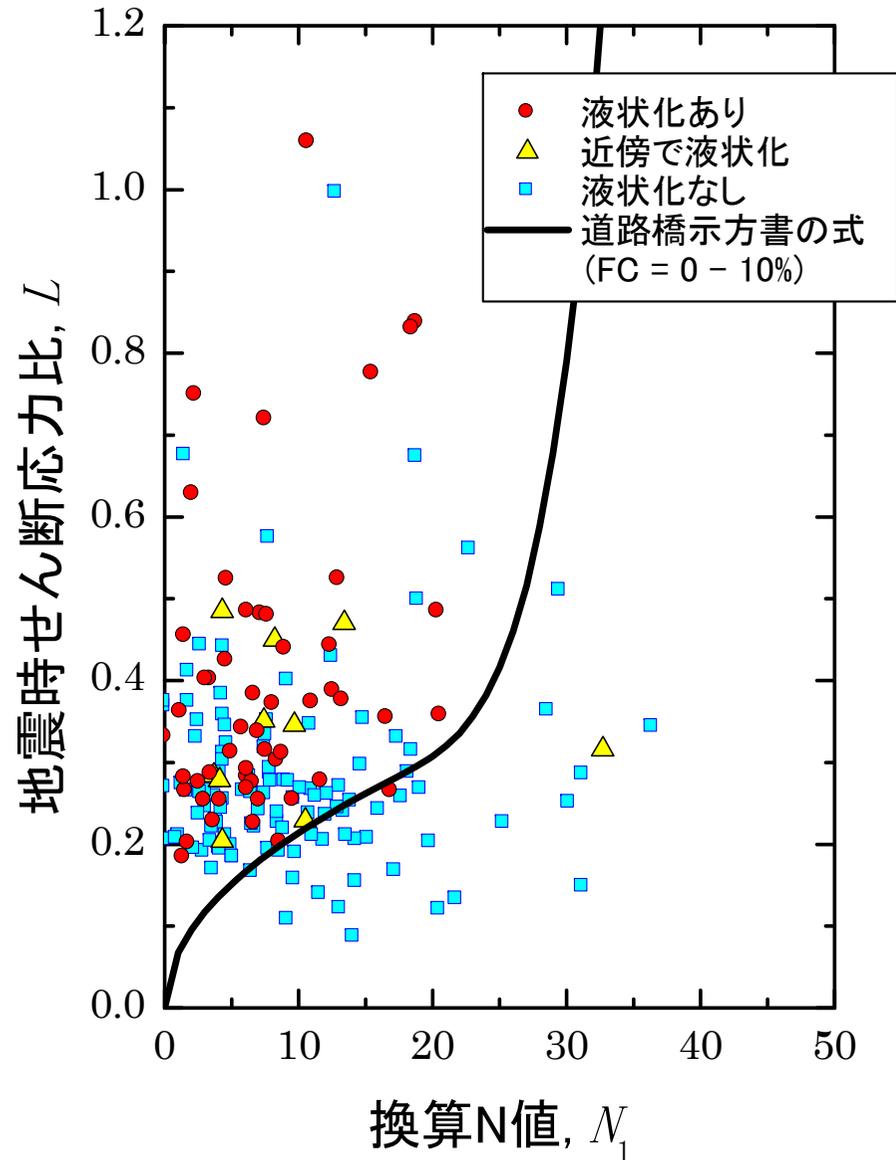
周辺地域と比較すると相対的に液状化しにくい地盤

- F_L の値が比較的大きい
- $F_L \leq 1$ となる層厚が薄い
- 細粒分含有率の影響
- 地盤の造成年代の影響

が考えられる。

○液状化せず $F_L > 1$ となる箇所（△）は、神奈川県内や千葉県南部など地震動の小さな地域や群馬県などの比較的地盤の良い地域に分布。

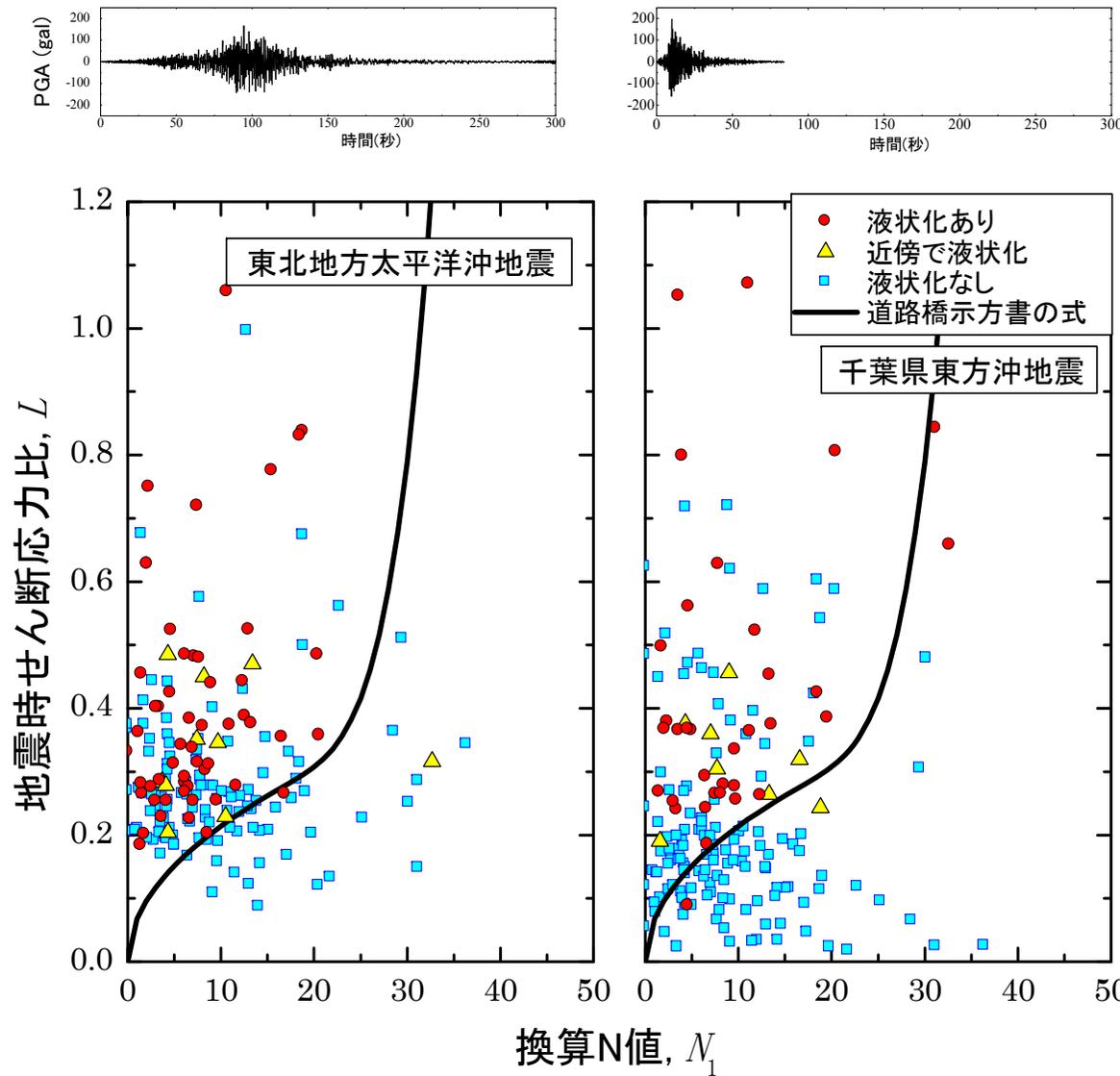
地盤の強度と液状化の状況



○液状化強度推定式より上 ($F_L \leq 1$ の範囲) に液状化した箇所がプロットされており、現行の液状化判定法と整合していることが確認できる。

○今回液状化判定を実施した箇所は、比較的弱い地盤の箇所が多く、換算N値が20を超えるような箇所は比較的少なかった。

地震動継続時間の影響

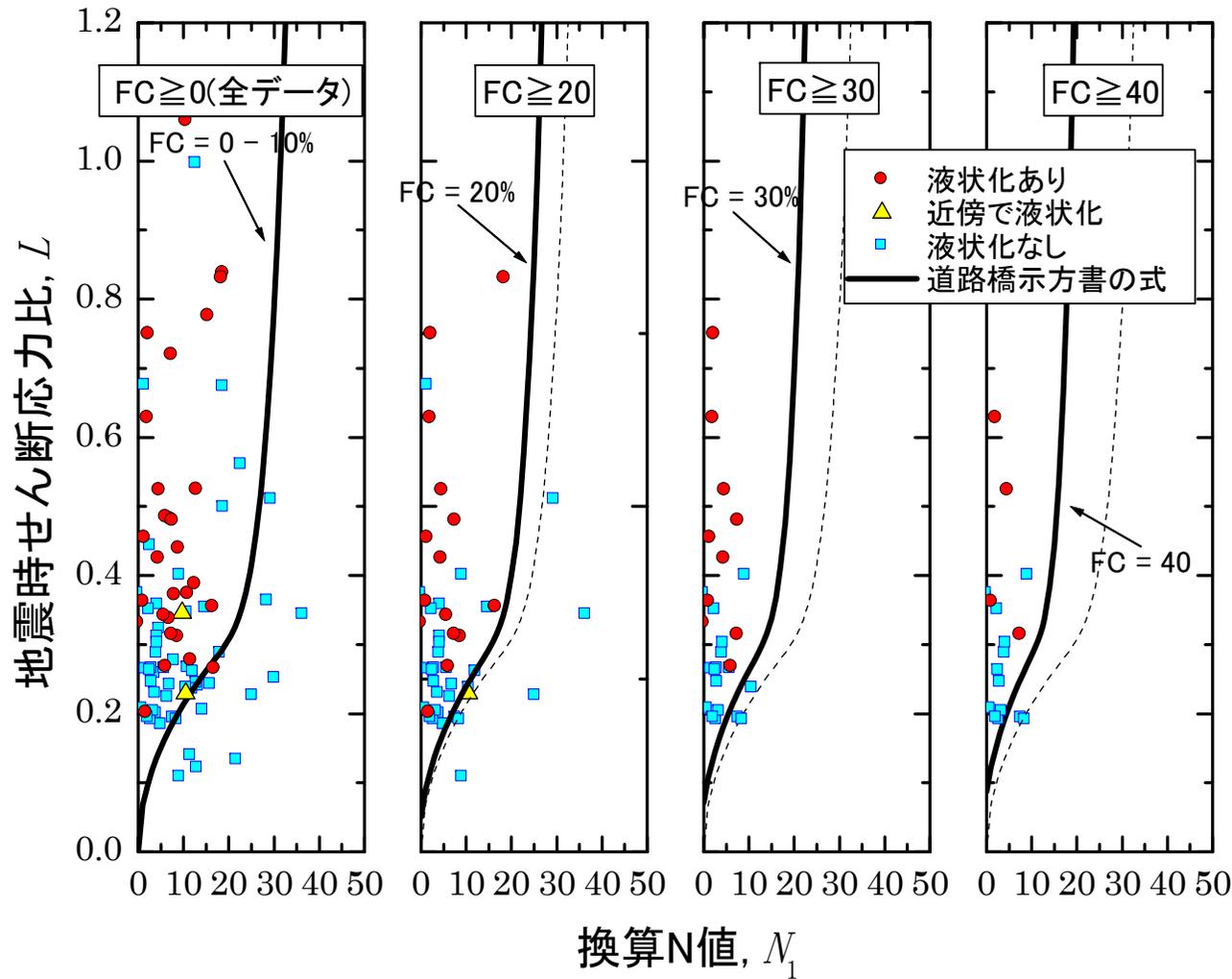


○1987年千葉県東方沖地震（浦安など東京湾岸等で液状化が発生。継続時間短い）と比較。

○優位な差は確認できず。

しかし、液状化の程度や液状化の範囲に影響したのとは考えられる。

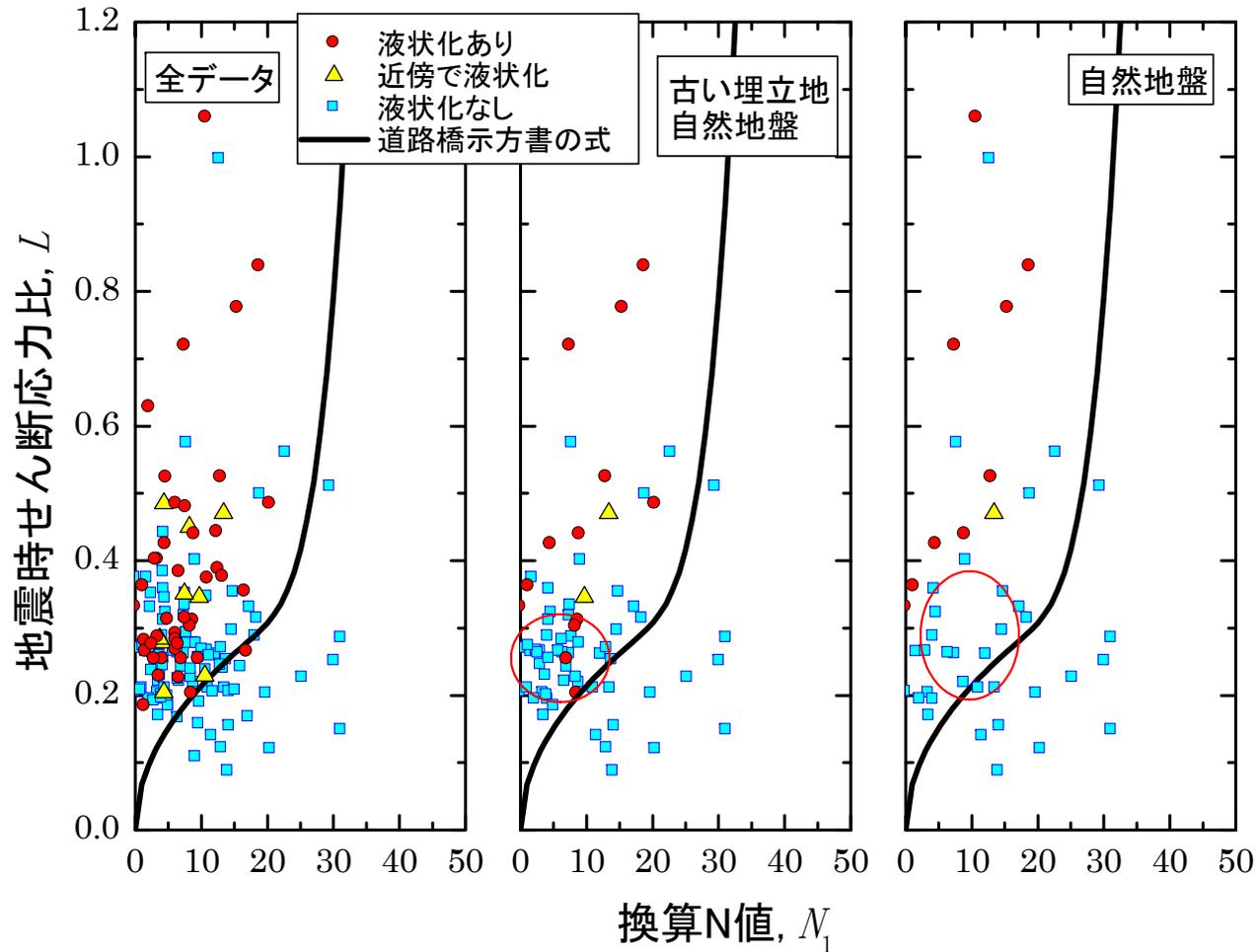
細粒分の影響



○現状の液状化判定の細粒分の補正と整合

○細粒分の比較的多い範囲で安全側の評価をしている可能性

造成年代の影響



○新しい埋立地（昭和）、古い埋立地（昭和以前）、自然地盤の3種類に分類

○地震時せん断応力比の小さい範囲（丸で囲んだ辺り）の液状化した箇所が自然地盤の方が少ない。（新しい地盤ほど液状化しやすい）

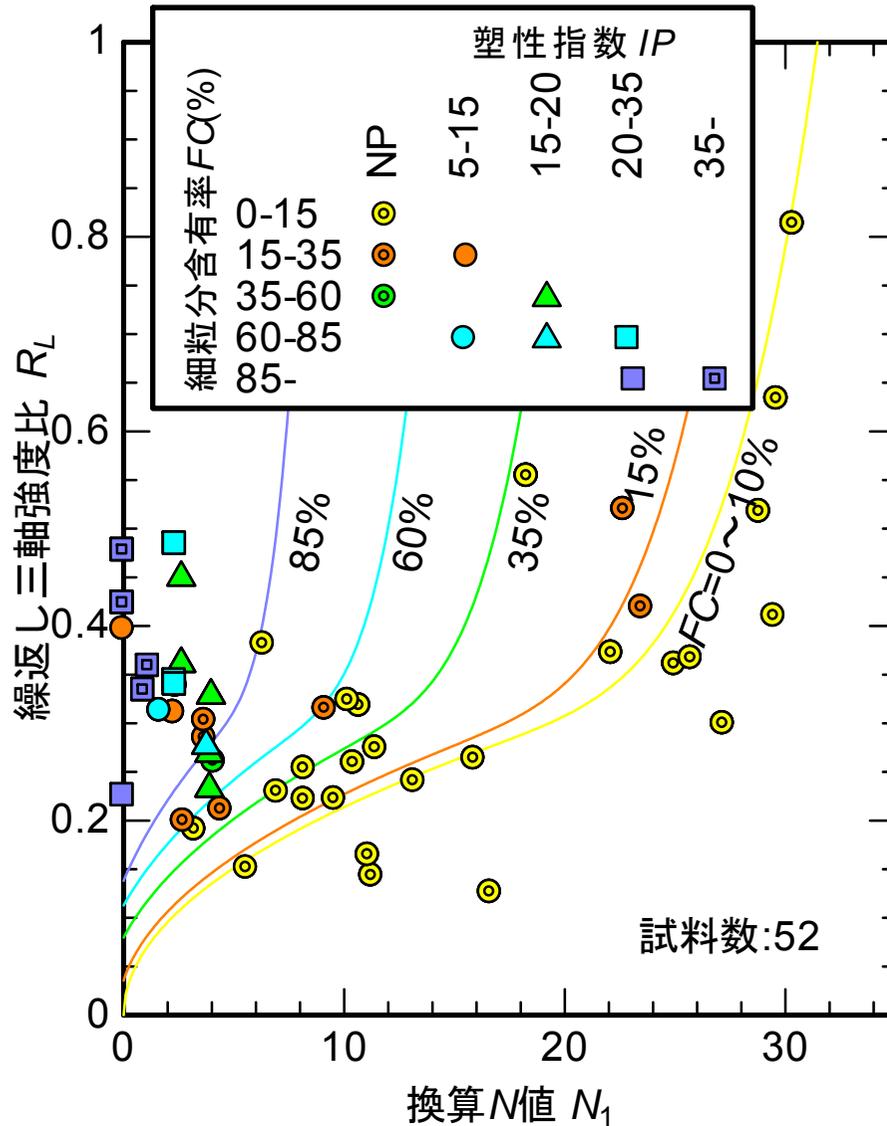
本検討内容・バックデータは、

土木研究所資料第4280号「東北地方太平洋沖地震における液状化を踏まえた液状化判定法の検討」に整理

内容

1. 液状化判定法の検証
2. 細粒分を含む砂の液状化強度評価式の見直し
3. 埋立地で発生した液状化に関する分析
4. 造成年代(液状化履歴)に係る遠心模型実験

細粒分を含む砂に関する液状化試験結果

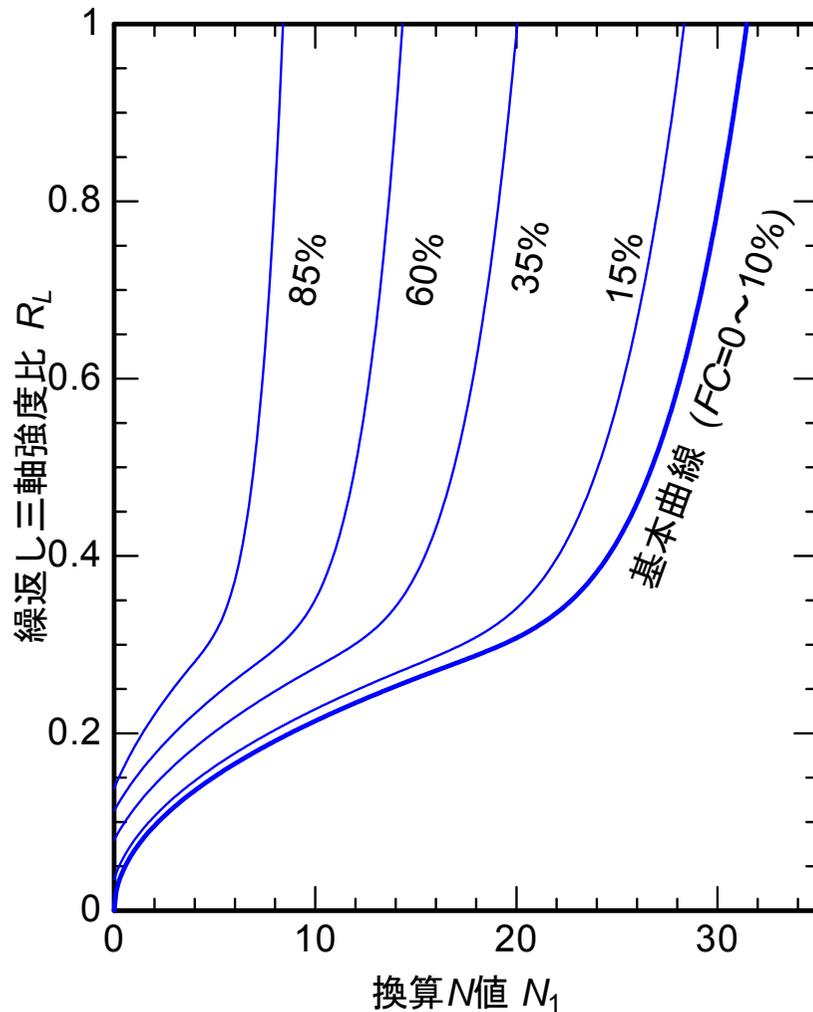


- 震災以降、土木研究所では、関東地方14地点において、乱れの少ない試料の採取、液状化試験を実施。

- 原位置試料と室内試験供試体の粒度、密度、初期剛性の相違が比較的小さいデータを選別することで、細粒分含有率 FC の増加に伴って液状化強度 (繰返し三軸強度比 R_L) が増加する傾向が明瞭に認められる。

- 現行の液状化強度評価式では、 FC が大きくなった場合に、液状化強度をやや小さめに評価する傾向あり。
→ 合理化の余地あり。

細粒分を含む砂に関する現行の液状化強度評価式



- 細粒分を含まない ($FC \leq 10\%$) の砂に関する乱れの少ない試料(凍結サンプリング試料)の液状化試験から得られた $R_L \cdot N_1$ 関係式 = 「基本曲線」

(N_1 : 有効上載圧 100kN/m^2 相当に換算した N 値)

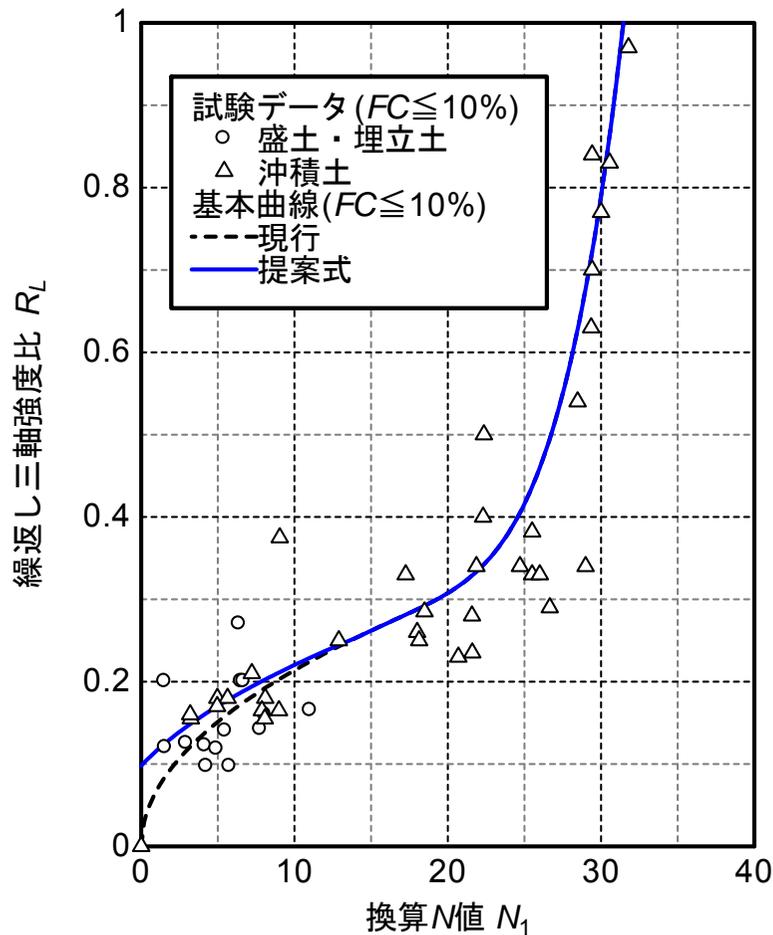
- 基本曲線を FC に応じてシフトさせることで、細粒分による液状化強度の増加を考慮.

- 基本曲線は、 N_1 が小さくなり0付近に近づくとき R_L が急激に減少.

→ N_1 が小さな場合に R_L を過小評価しやすく、 FC が大きいても R_L が大きくなりにくい.

→ まずは、基本曲線を見直す.

基本曲線の見直し



・盛土・埋立土に関する $FC < 10\%$ の緩い砂であっても、 R_L は最小で 0.1 程度。

→ N_1 が小さい領域において、 $R_L = 0.10$ 程度が下限となるように式を修正。

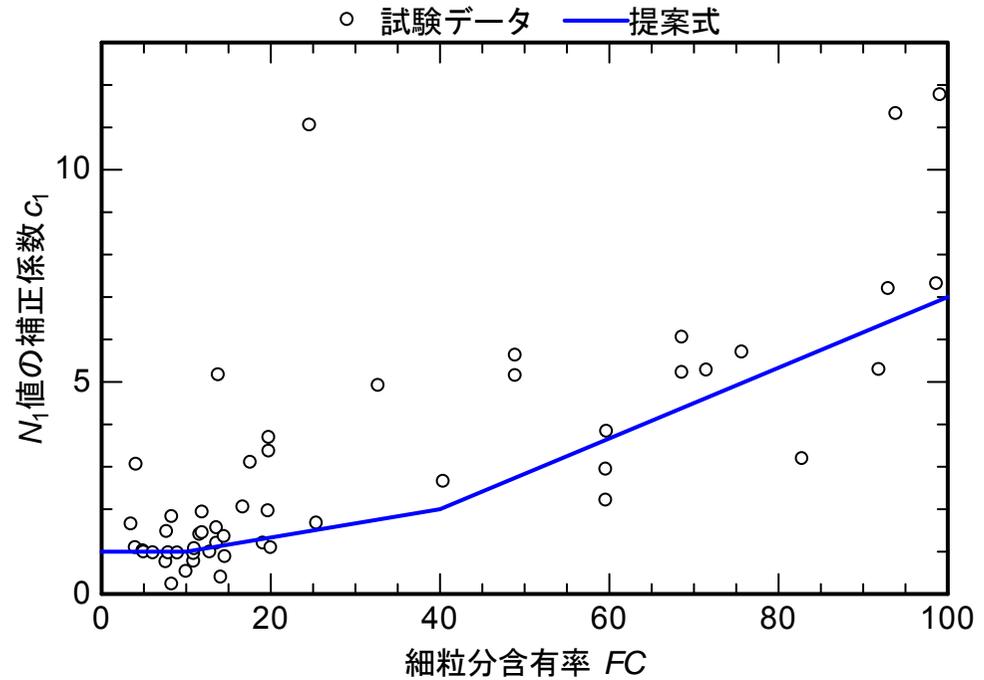
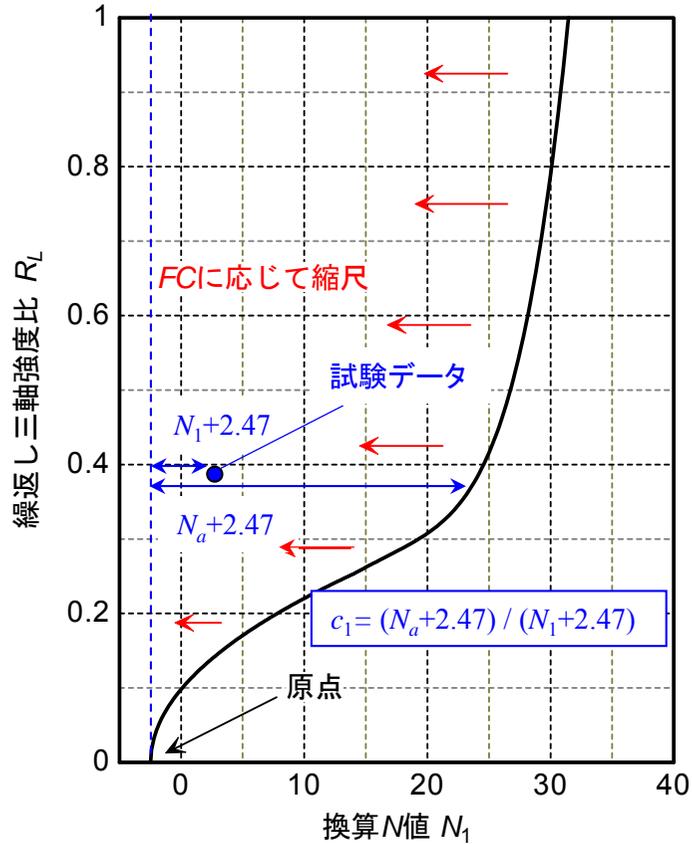
基本曲線 (現行):

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_1/1.7} & (N_1 < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_1/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_1 - 14)^{4.5} & (14 \leq N_1) \end{cases}$$

基本曲線 (提案):

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_1 + 2.1)/1.7} & (N_1 < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_1/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_1 - 14)^{4.5} & (14 \leq N_1) \end{cases}$$

細粒分含有率FCによる補正係数 c_1

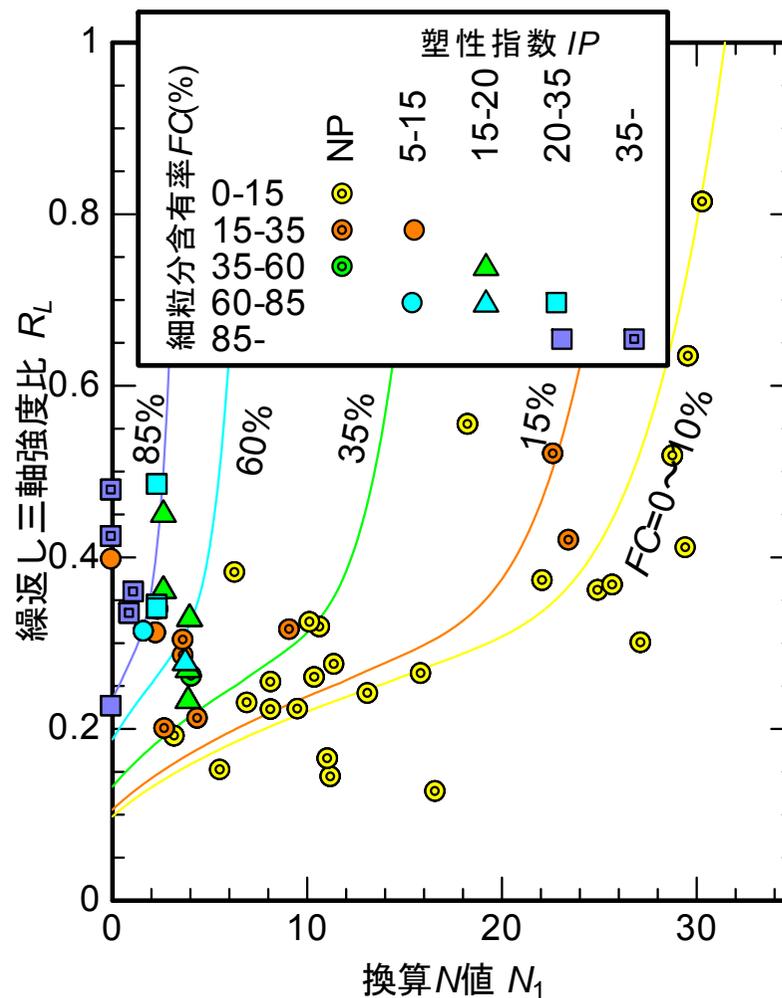
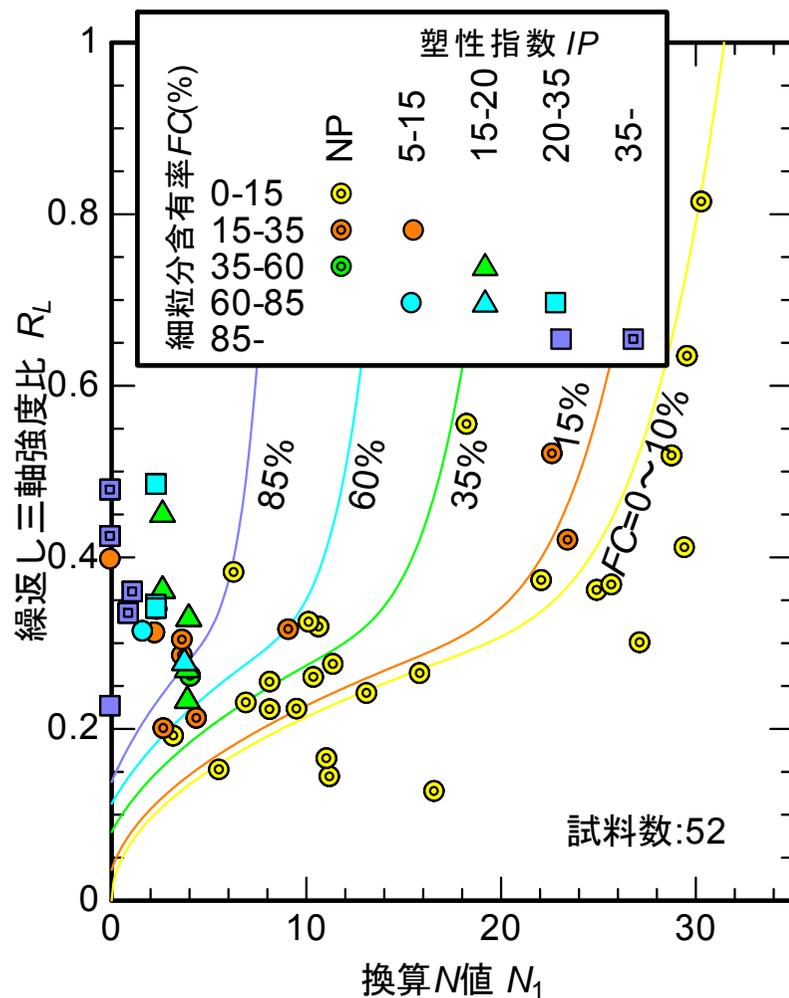


提案式

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (FC < 10\%) \\ \frac{FC + 20}{30} & (10\% \leq FC < 40\%) \\ \frac{FC - 16}{12} & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

- 提案基本曲線で $R_L = 0$ となる点 ($N_1 = -2.47$) を原点とし、 FC の大きさに応じて基本曲線を横軸方向に縮尺するように、 N_1 値の補正係数 c_1 を設定。

液状化試験データと液状化強度評価式(新旧)の比較



- 新たに提案する基本曲線と補正係数 c_1 を用いることで、 FC の大きな領域において、液状化試験結果を適切に近似。

提案式の検証(液状化・非液状化事例との比較)

地震名	発生年	マグニ チュード	地震動 タイプ	液状化	周辺で 液状化	非液状化	計	
新潟地震	1964	7.5	I	18	0	6	24	
十勝沖地震	1968	7.9	I	3	0	0	3	
宮城県沖地震	1978	7.4	I	16	0	17	33	
日本海中部地震	1983	7.7	I	34	0	12	46	
千葉県東方沖地震	1987	6.7	I	9	3	72	84	
釧路沖地震	1993	7.8	I	3	0	2	5	
北海道南西沖地震	1993	7.8	I	4	0	2	6	
兵庫県南部地震	1995	7.2	II	94	0	14	108	
東北地方太平洋沖地震	2011	9.0	I	29	2	54	85	
				計	210	5	179	394

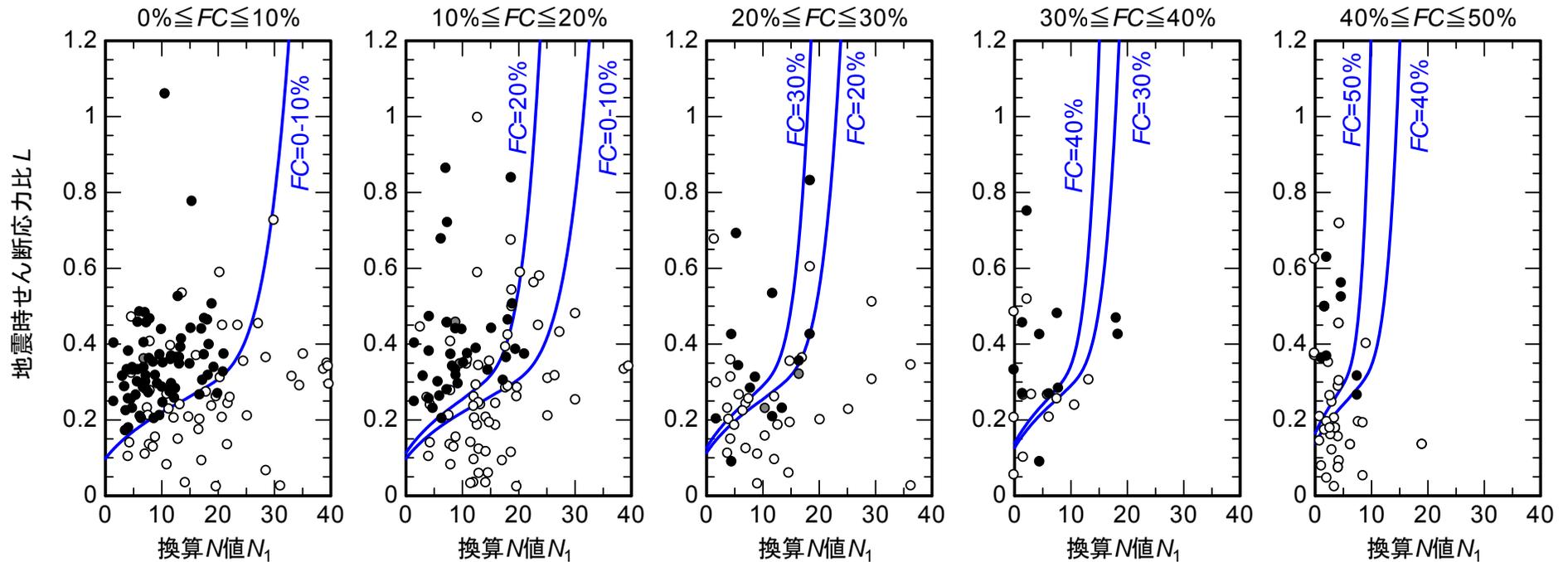
東北地方太平洋沖地震のほか、兵庫県南部地震を含む過去の9地震における液状化・非液状化事例と比較することで提案式の検証を実施。

ここでは、地盤の実挙動と貫入抵抗の相関関係に主眼を置き、収集した394本のボーリングデータより、10m以浅の液状化判定対象層の中から F_L が2番目に小さい値を示す深度を抽出し、提案式と比較。

提案式の検証(液状化・非液状化事例との比較)

タイプ I 地震動

● 液状化 ○ 周辺で液状化 ○ 非液状化 — 提案式

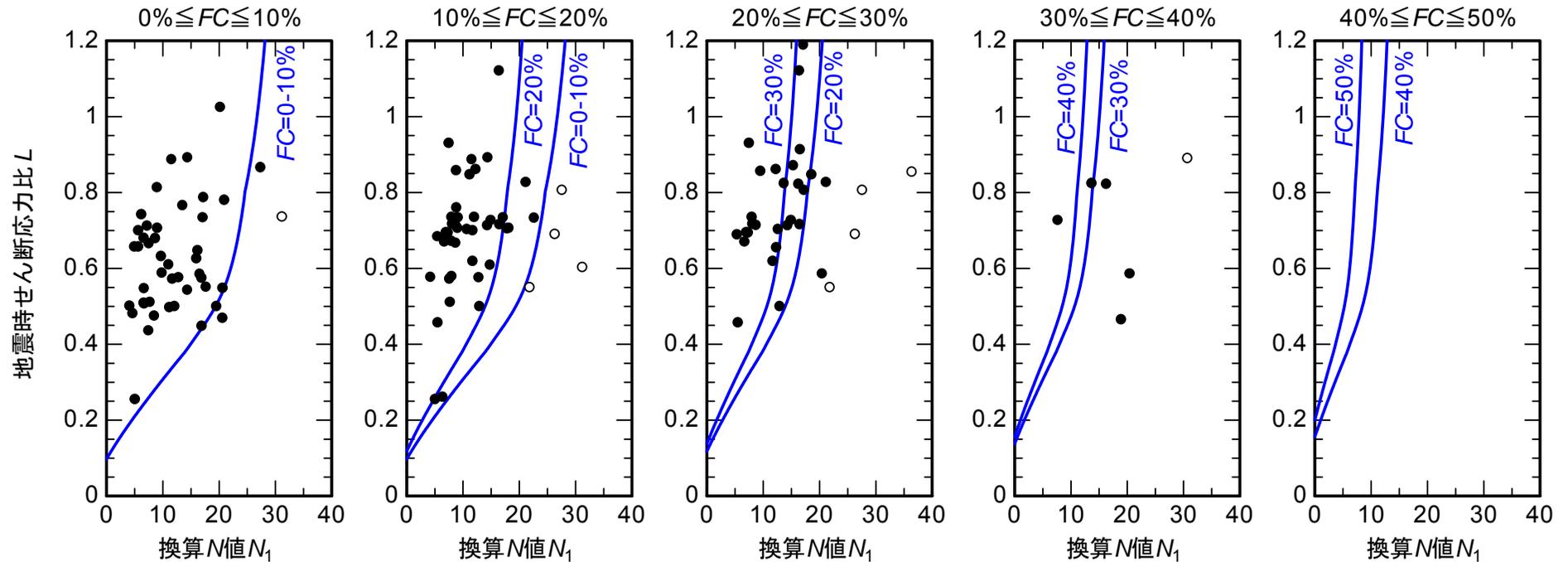


提案式は、既往の地震による液状化・非液状化事例とも概ね整合。

提案式の検証(液状化・非液状化事例との比較)

タイプII地震動

● 液状化 ○ 周辺で液状化 ○ 非液状化 — 提案式



提案式は、既往の地震による液状化・非液状化事例とも概ね整合。

内容

1. 液状化判定法の検証
2. 細粒分を含む砂の液状化強度評価式の見直し
3. 埋立地で発生した液状化に関する分析
4. 造成年代(液状化履歴)に係る遠心模型実験

背景・目的

- 東京湾沿岸の埋立地では、本震直後の強い余震が液状化の発生に及ぼした可能性が指摘されているが、その詳細は明らかになっていない。
- 噴砂等の平面分布より、埋立地において液状化が生じたとされているが、埋立層の下位にある沖積層(自然地盤)における液状化発生の有無については、把握することが難しく、明らかになっていない。

- ここでは、東京湾沿岸の埋立地に設置された地震観測所(花見川緑地:千葉県千葉市美浜区打瀬)で得られた鉛直アレー地震記録の分析を行い、上記について検討した結果を報告。

- 花見川緑地では、東北地方太平洋沖地震(2011/3/11)の本震(14:47)、余震(15:15)における貴重な地震記録が得られた。

※ 鉛直アレー地震記録: 地表、地中に鉛直方向に複数配置した地震計で得られた地震記録。

※ データ提供: 国総研地震防災研究室

観測点 位置図



- 花見川河口付近右岸の公園(花見川緑地)内.
- 過去の航空写真から、本地点の周辺は昭和50年代に埋立てにより造成されたことが確認されている.

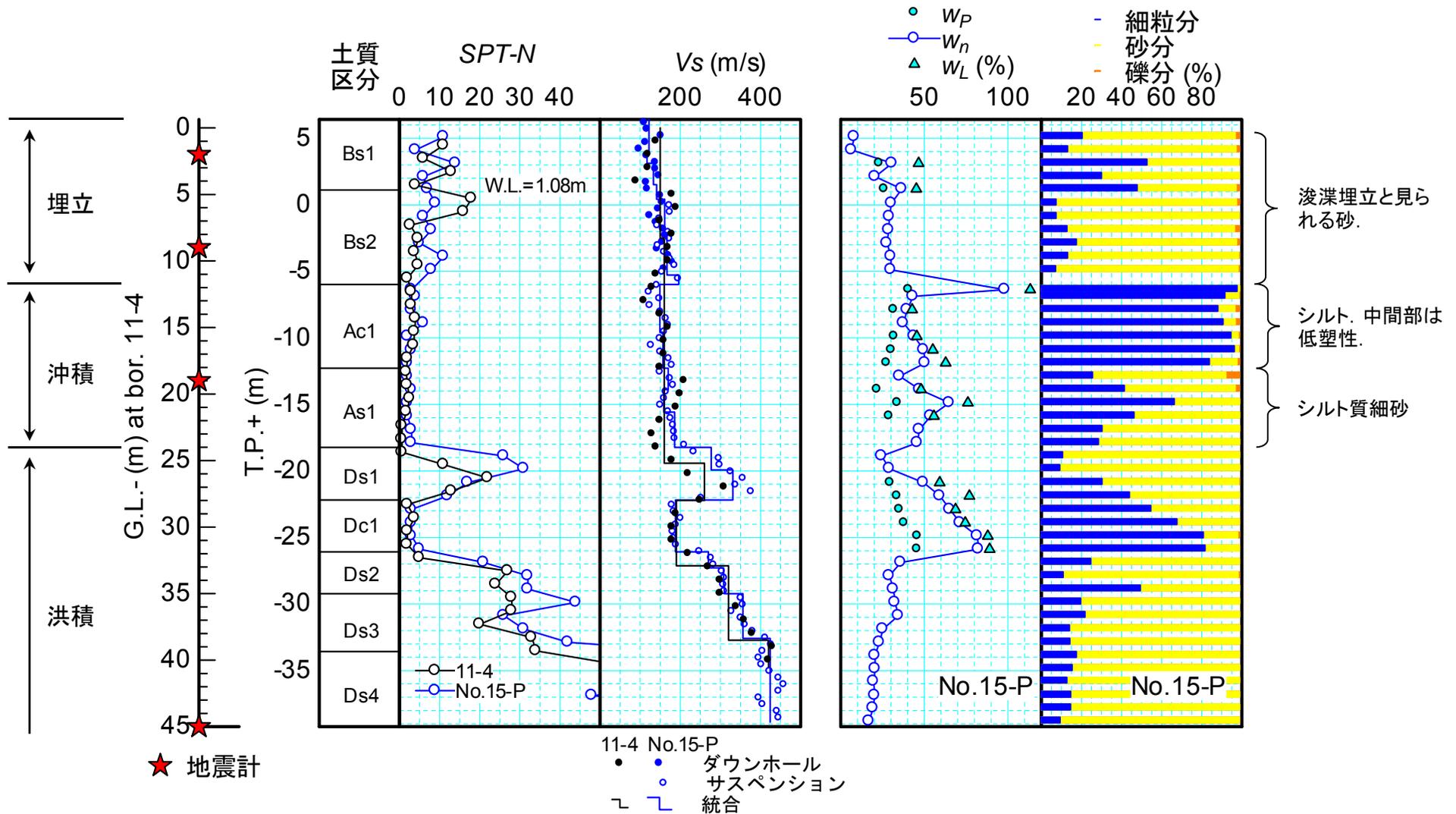
地震後の観測点付近の状況



- 公園内には、花見川と平行な方向に段差を伴う亀裂が発生.
- 亀裂から砂が噴きだした痕跡あり.

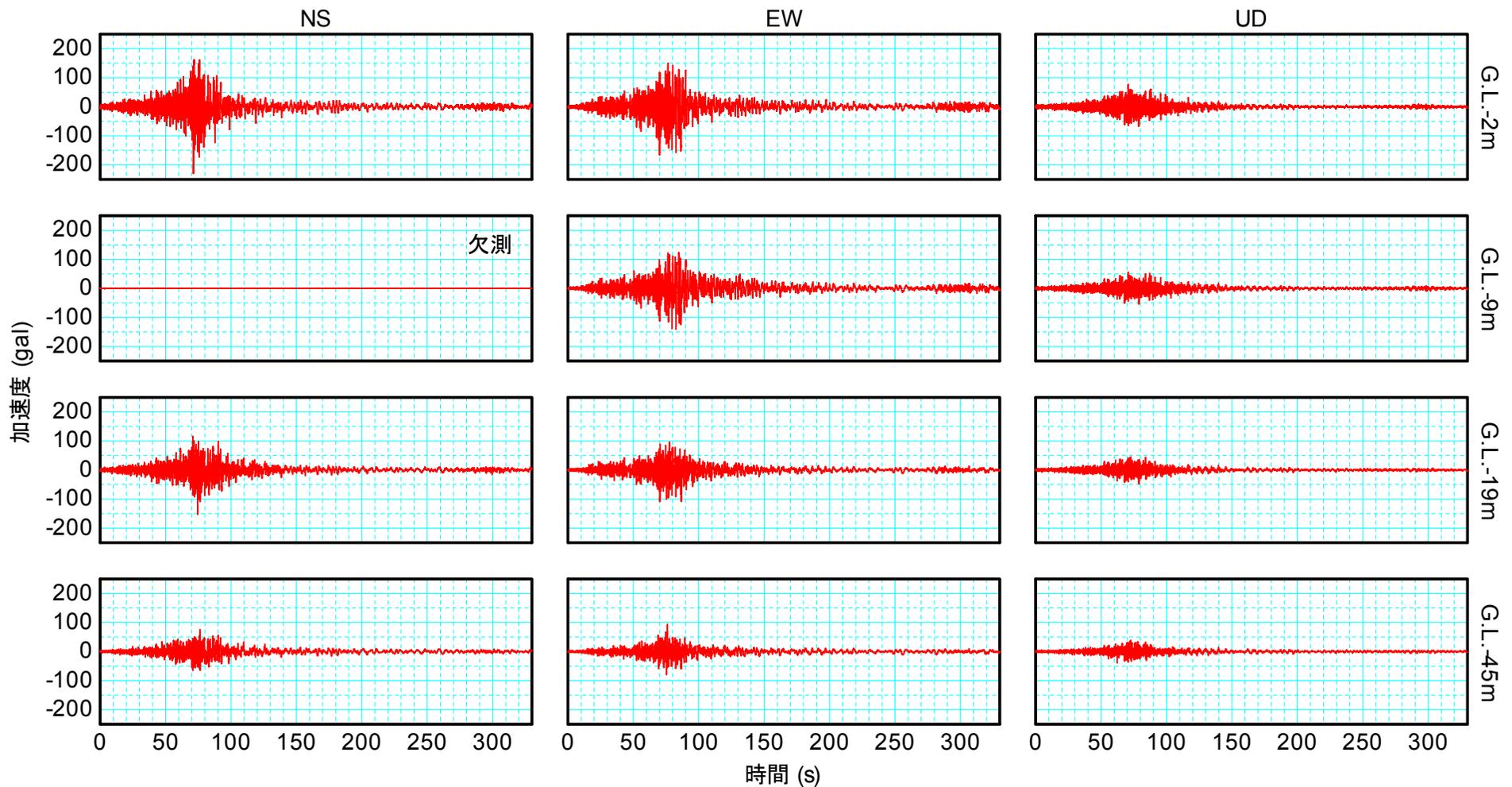
写真提供：国総研地震防災研究室
撮影日：2011年5月26日

土質柱状図と地震計配置



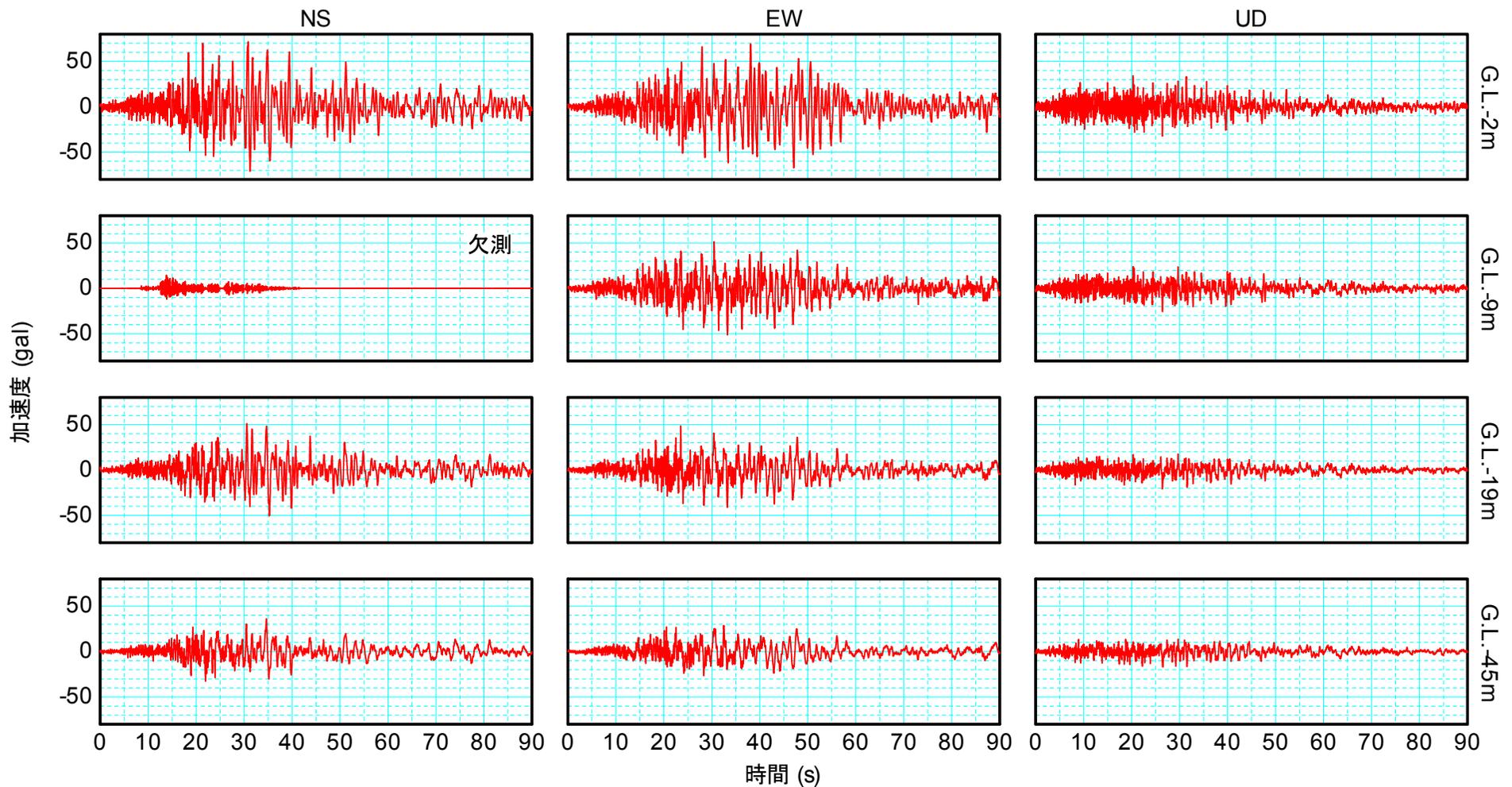
- 地震計は4深度に設置されている.
- 11-4: 地震計設置孔(H9), No.15-P: 追加調査孔 (H25)

3/11 14:47本震記録



- 地表面最大加速度 $PGA = 232.8 \text{ gal}$ (水平2成分合成).
- 計測震度 = 5.5 (6弱).
- 残念ながら, G.L.-9mのNS成分はデータが得られていない.

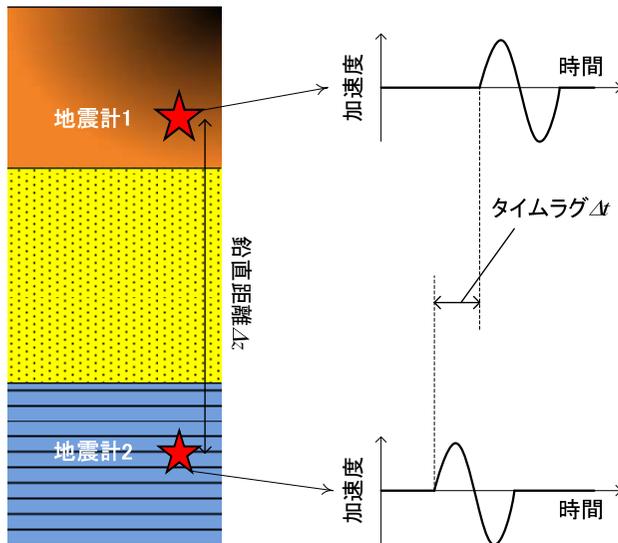
3/11 15:15余震記録



- 本震直後に発生した大きな余震(震源:茨城県沖).
- $PGA = 81.2\text{gal}$.
- 計測震度 = 4.6 (5弱) .

解析方法

1. EW成分を対象に、各深度の地震動波形を2.0秒程度ごとに切り出す。
2. 上下隣り合う地震計間でのフーリエ位相スペクトルの差分 $\Delta\phi$ と周波数 f の関係を直線近似し、その勾配から、2つの地震計間における水平動のタイムラグ Δt を求める(大町・田原: 2012)。
3. 位相速度 $c = (\text{地震計間の距離}\Delta z) / (\text{タイムラグ}\Delta t)$



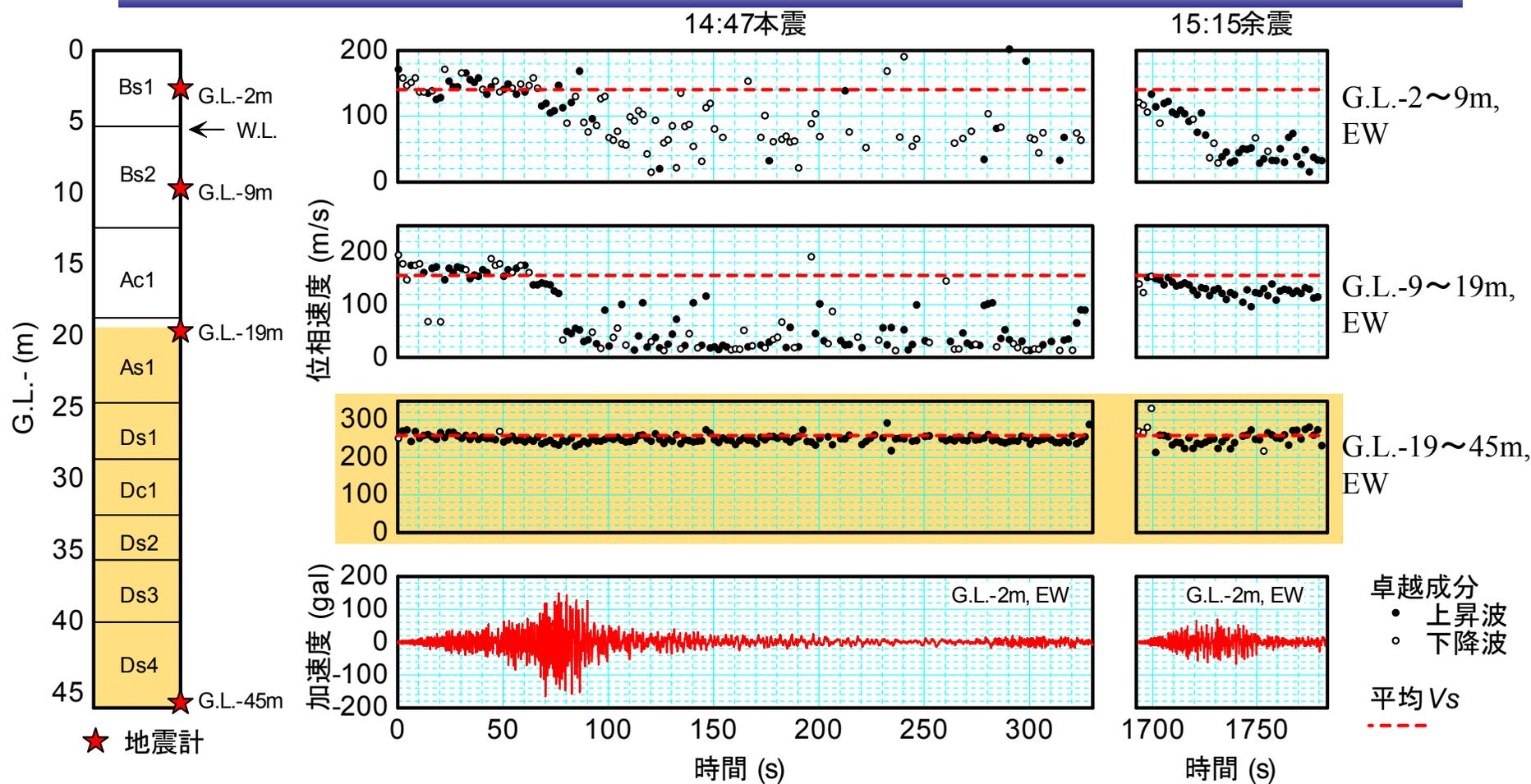
位相速度 c が鉛直下方から伝達するせん断波(SH波)の伝播速度=S波速度 V_s を表している場合、次の関係がある。

$$\text{剛性低下率 } G/G_0 = (S\text{波速度の低下率 } V_s/V_{s0})^2$$

つまり、 V_s の経時変化から各層の剛性低下度合いを推定可能。

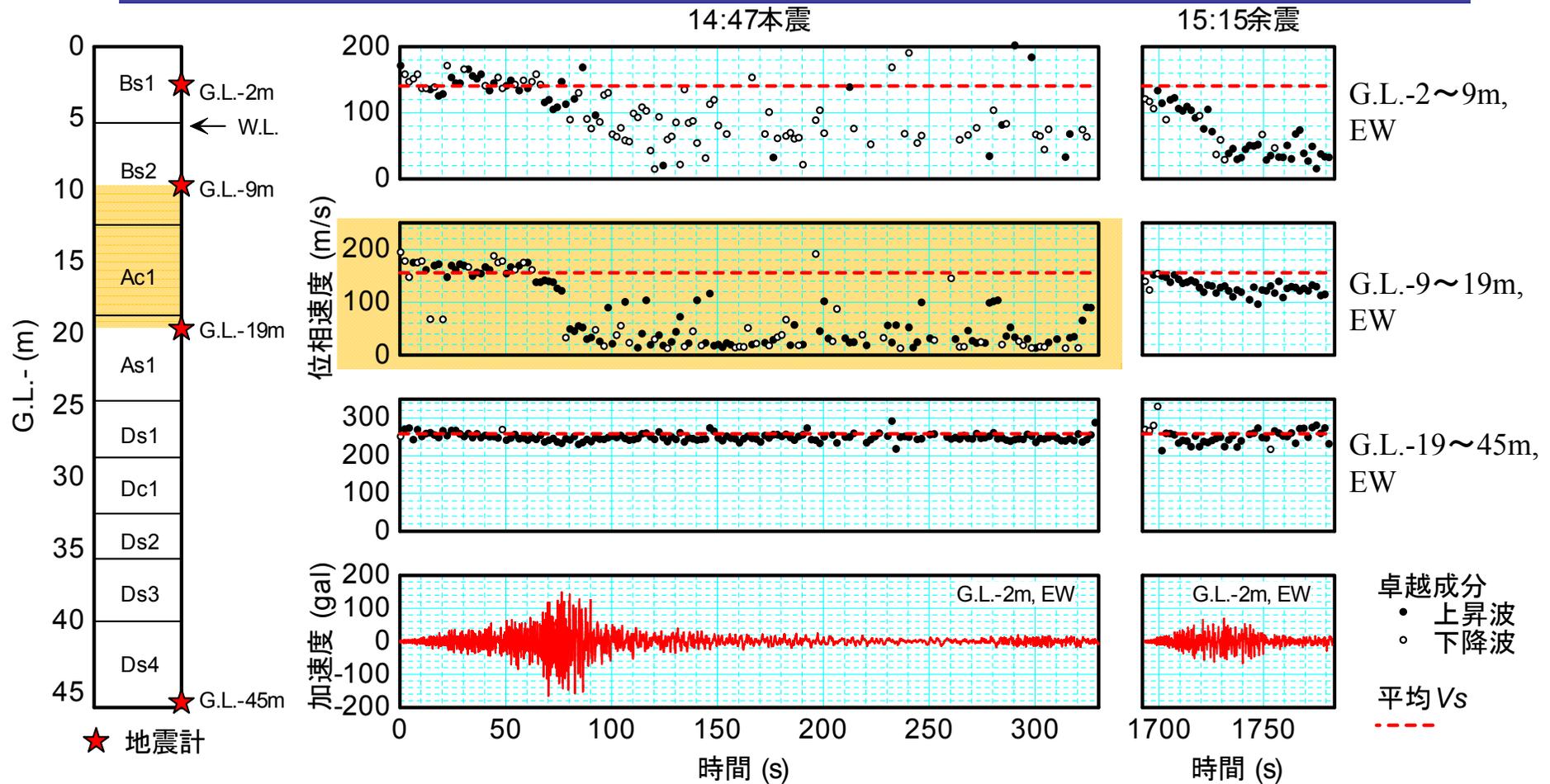
さらに、液状化した場合に剛性低下が起きると考えられることから、位相速度から液状化の発生が捉えられる可能性

3/11 14:47本震～15:15余震における位相速度の経時変化



- G.L.-19～45m (沖積シルト質砂As1, 洪積層Ds1～Ds4) では, 本震～余震を通じて, 位相速度 c ($\equiv V_s$) がほとんど変化しない。
→ ほとんど剛性低下が生じておらず, 液状化していないと見られる。

3/11 14:47本震～15:15余震における位相速度の経時変化

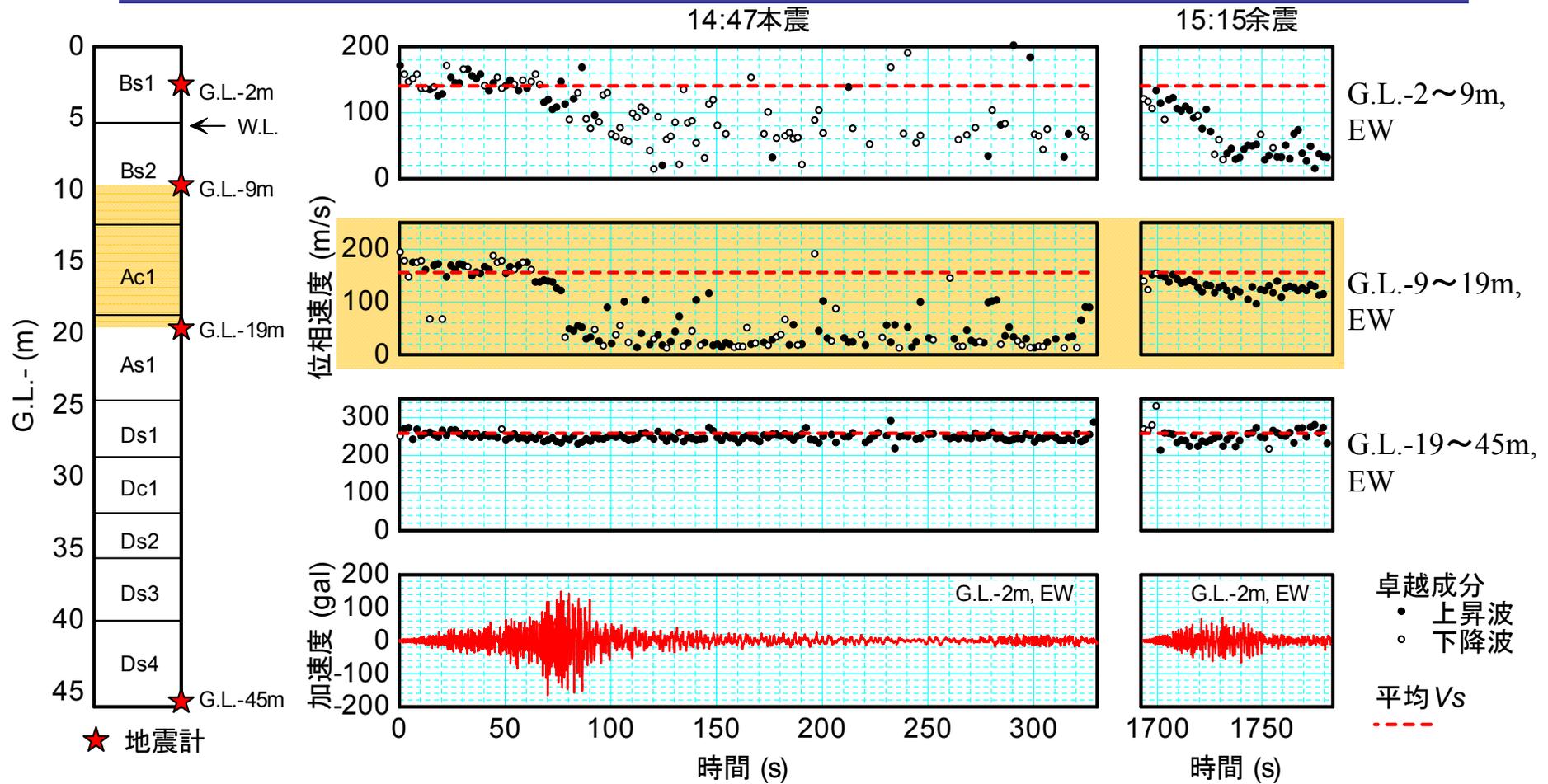


• G.L.-9～19m (埋立砂Bs2下部, 沖積砂質シルトAc1, 沖積シルト質砂As1上部) では, 本震の約80sより位相速度 c が著しく低下. 地震動が収まった後も c が元に戻らない.

→ 約80sで液状化が発生. 過剰間隙水圧が上昇し, 本震直後も剛性が低下したままの状態.

• なお, Ac1層の中間部は低塑性シルトであり, ここが液状化した可能性も否定できない.

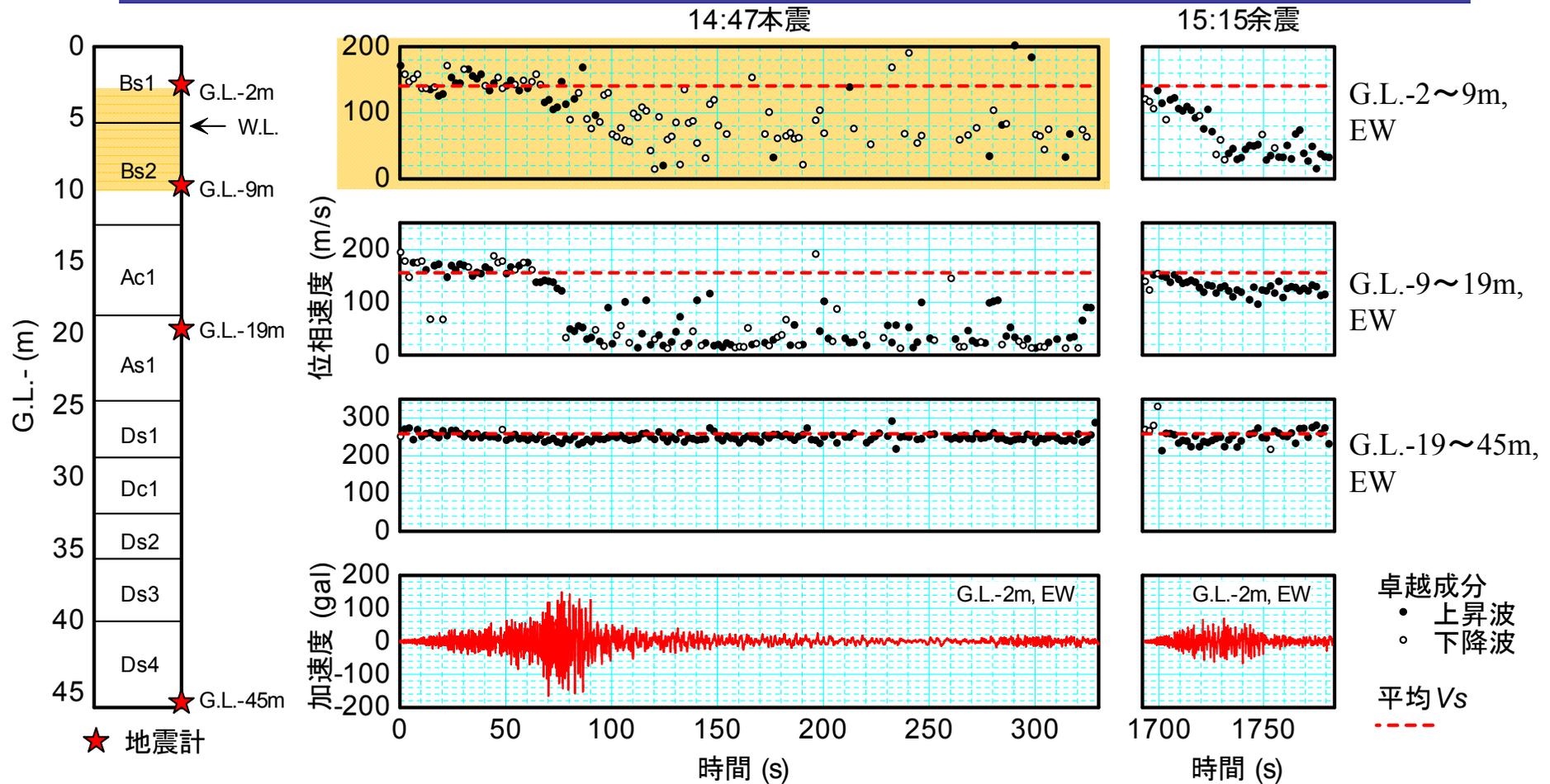
3/11 14:47本震～15:15余震における位相速度の経時変化



余震発生時には、G.L.-9～19m間の位相速度 $c \approx V_s$ であり、本震時に上昇した過剰間隙水圧は、ほぼ完全に消散していると思われる。

G.L.-9～19m間は、余震における位相速度 c の低下が軽微。余震では液状化していないと思われる。

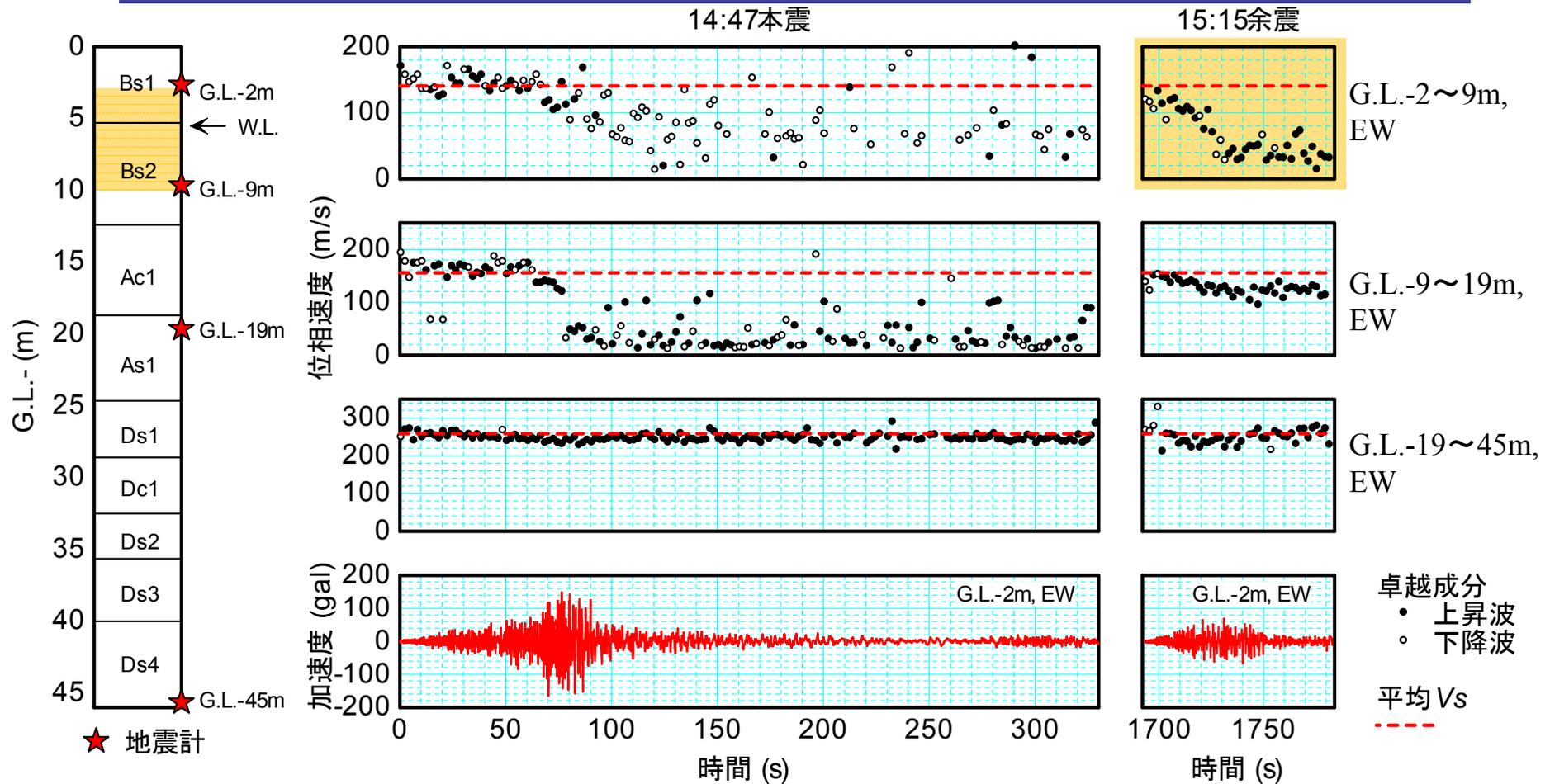
3/11 14:47本震～15:15余震における位相速度の経時変化



- G.L.-2～9m (埋立砂Bs2上部) では、本震の約70s程度より位相速度 c が低下し始める。
- その後、位相速度 c の算出結果が著しくばらつき、かつ、主として波動の下降成分が卓越。
→ 鉛直下方からのSH波の重複反射のみによってこのような挙動を示すことは考えにくい。
→ 表面波の影響？今後、さらなる検討が必要。

- Bs2上部には液状化が発生した可能性が高いと考えられるが、地震記録からその状況を把握することが困難。³⁰

3/11 14:47本震～15:15余震における位相速度の経時変化



• 余震開始時点ではG.L.-2~9m の位相速度 $c \cong V_s$. 本震で過剰間隙水圧が上昇していたとしても、余震開始時にはその影響が残っていない。

• 余震により位相速度 c が著しく低下. 余震で液状化が発生したと見られる。

• なお、余震では、波動の下降成分ばかりが卓越するような状況は認められない。

まとめ

14:47本震

- 沖積シルト質砂As1下部～洪積層では、せん断剛性がほとんど低下せず。
- 埋立砂Bs2下部～沖積砂質シルトAc1～沖積シルト質砂As1上部のいずれかにおいて液状化が発生。
- 埋立砂Bs2上部では、液状化が生じた可能性が高いと考えられるが、主要動の途中から波動の下降成分が卓越するという特異な挙動。今後、さらなる検討の余地あり。

15:15余震

- 余震開始時点では、いずれの層においても、せん断剛性が本震前の状態に回復。
- 余震により、埋立砂Bs2上部は液状化したと見られる。
- 以深では液状化が発生していないと見られる。

•本地点において、乱れの少ない試料採取を行い、室内試験を実施中。今後は、繰返し三軸試験結果との対比、数値解析等を行い、さらなる液状化の実態解明、室内試験法や液状化判定法の検証等を進めていきたい。

4. 造成年代（液状化履歴）に係る 遠心模型実験

内容

1. 液状化判定法の検証
2. 細粒分を含む砂の液状化強度評価式の見直し
3. 埋立地で発生した液状化に関する分析
4. 造成年代(液状化履歴)に係る遠心模型実験

東日本大震災の液状化に関する課題

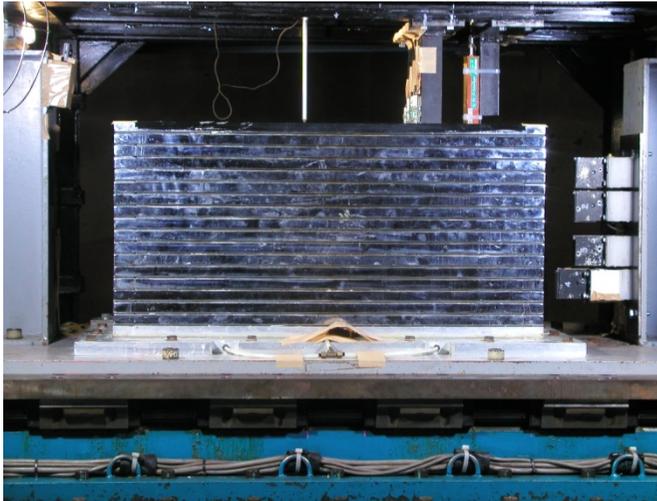
○地盤の造成年代によって液状化のしやすさが違うが、そのメカニズムに不明なところが多い

- ・セメンテーション(砂→砂岩)
- ・安定した構造
 - ・時間
 - ・微小な繰返し
 - ・地震履歴(液状化履歴)
 - ・ . . .

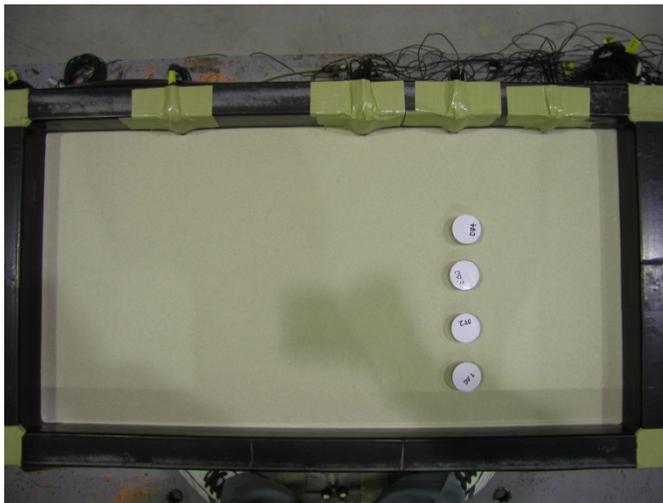
※要素実験、実際の液状化の有無からの研究は存在

○地震履歴(液状化履歴)に関する遠心模型実験を実施
検討状況を報告

遠心模型実験の概要

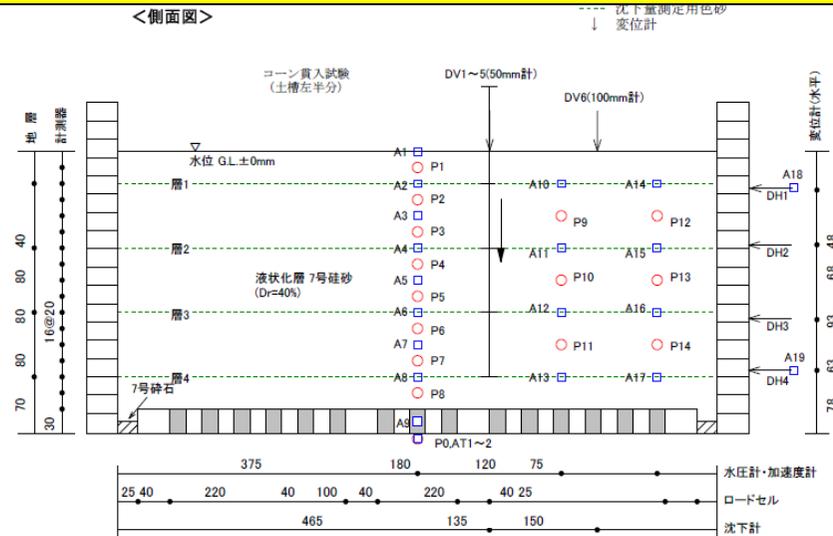


せん断土槽(横から撮影)



7号珪砂が詰まっている
(上から撮影。飽和前)

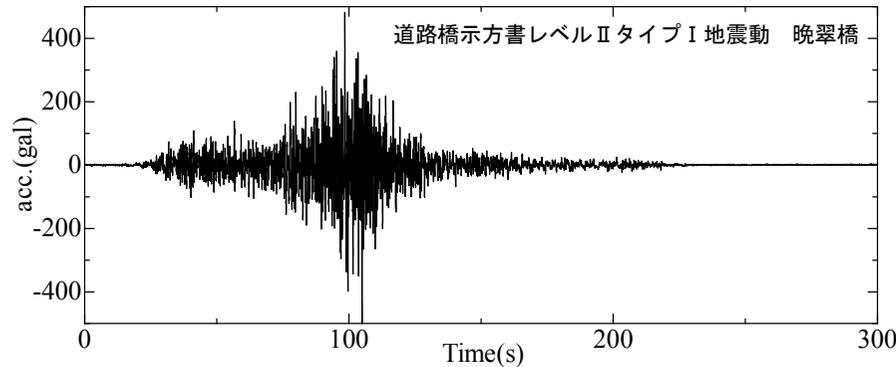
同じ密度でも加振履歴の有無で
液状化の仕方は違うのか



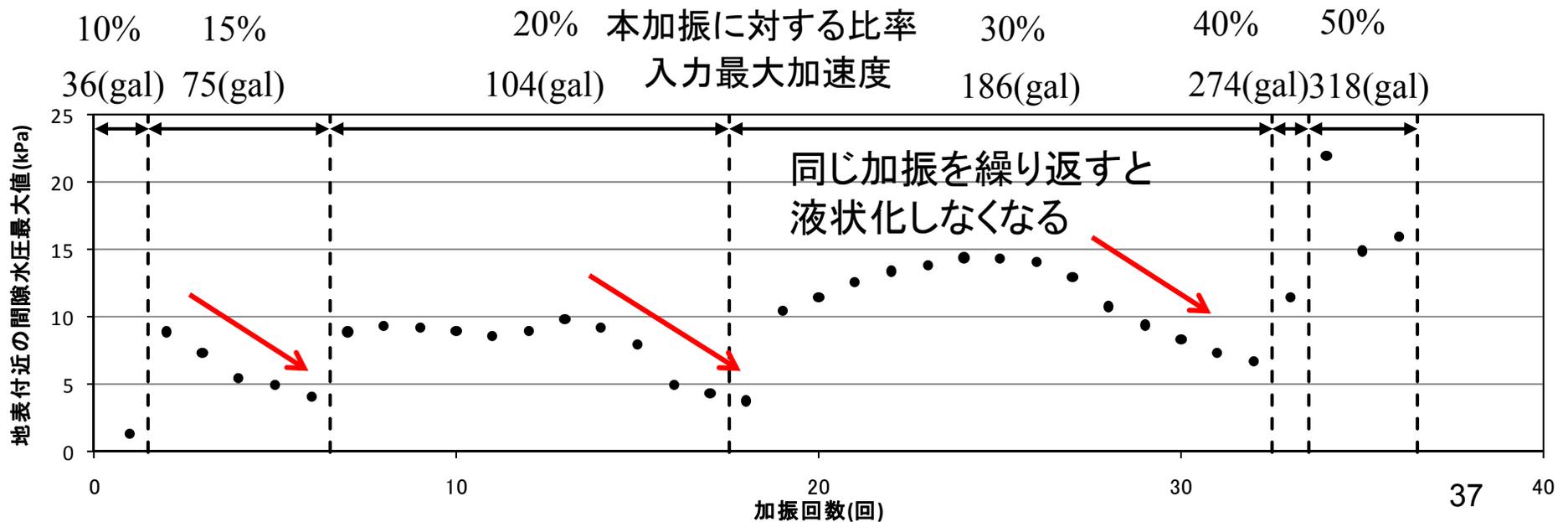
- Case1: 初期密度 ($D_r = \text{約}40\%$)
 多数の履歴加振
 密度を増加 ($D_r = \text{約}80\%$)
 本加振
- Case2: 初期密度 ($D_r = \text{約}80\%$)
 本加振

CASE1 履歴加振

入力波形(履歴と本加振は振幅の違いだけ)

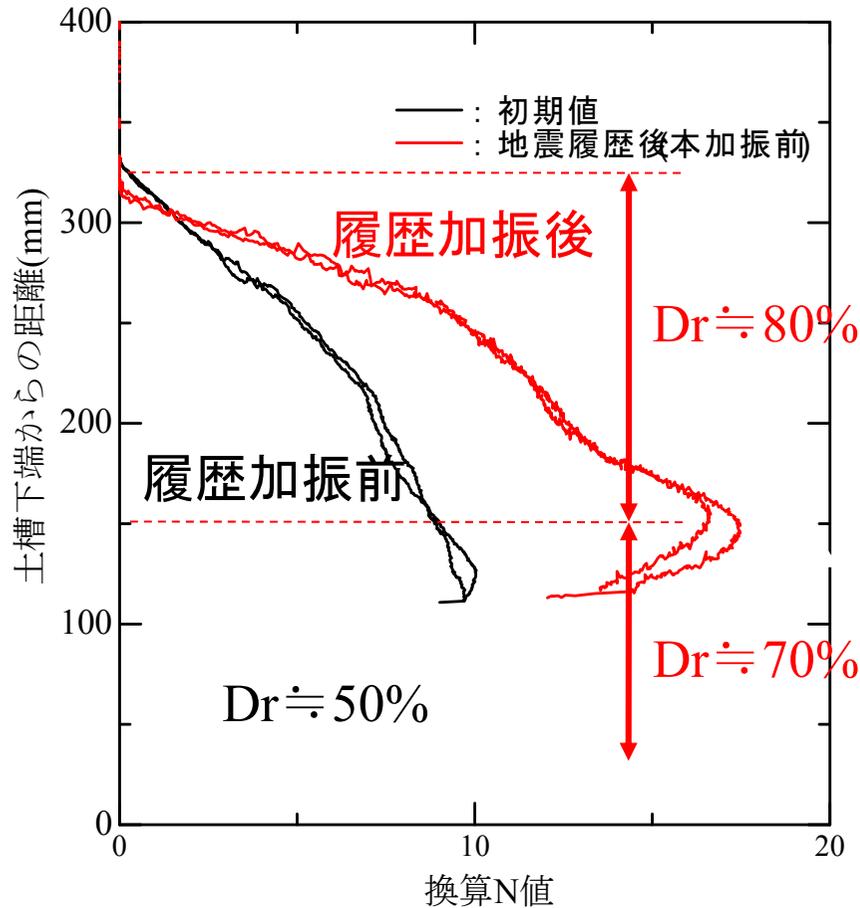


- 36回の履歴加振を実施
- 入力加速度を上げると徐々に深い層が液状化
(土槽の下の方の過剰間隙水圧の上り方は、中々変わらない)

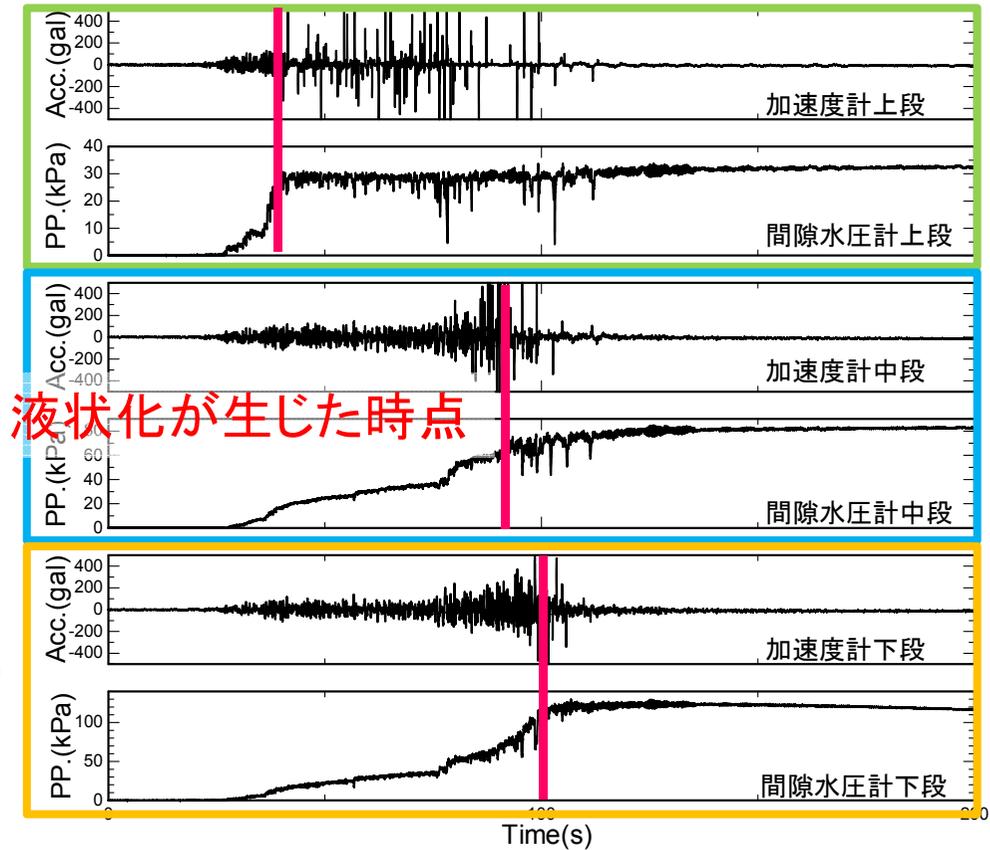


CASE1 本加振

コーン貫入試験



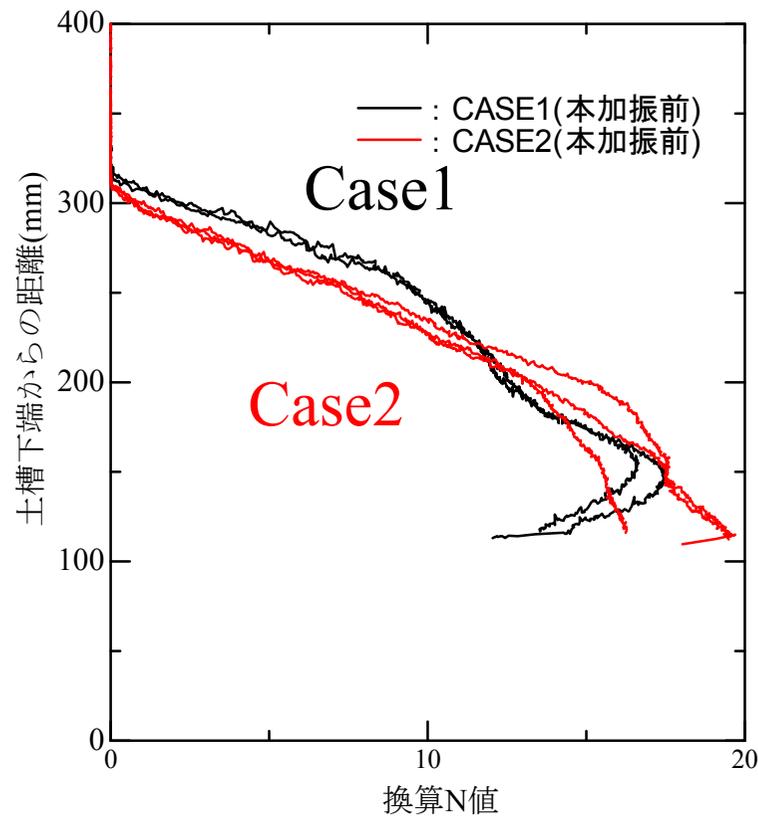
本加振 時刻歴図



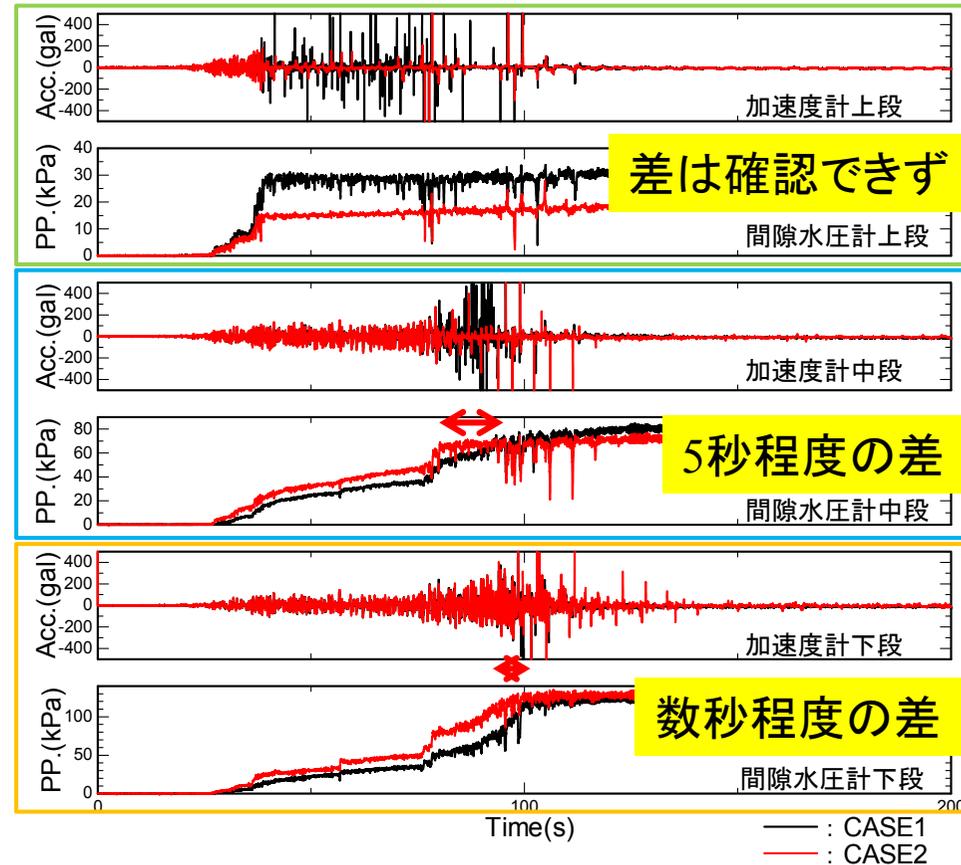
○コーン貫入試験結果によると、深い位置の密度は相対的に緩い状態であったが、液状化はゆっくり。

CASE2 本加振その1

本加振前コーン貫入試験



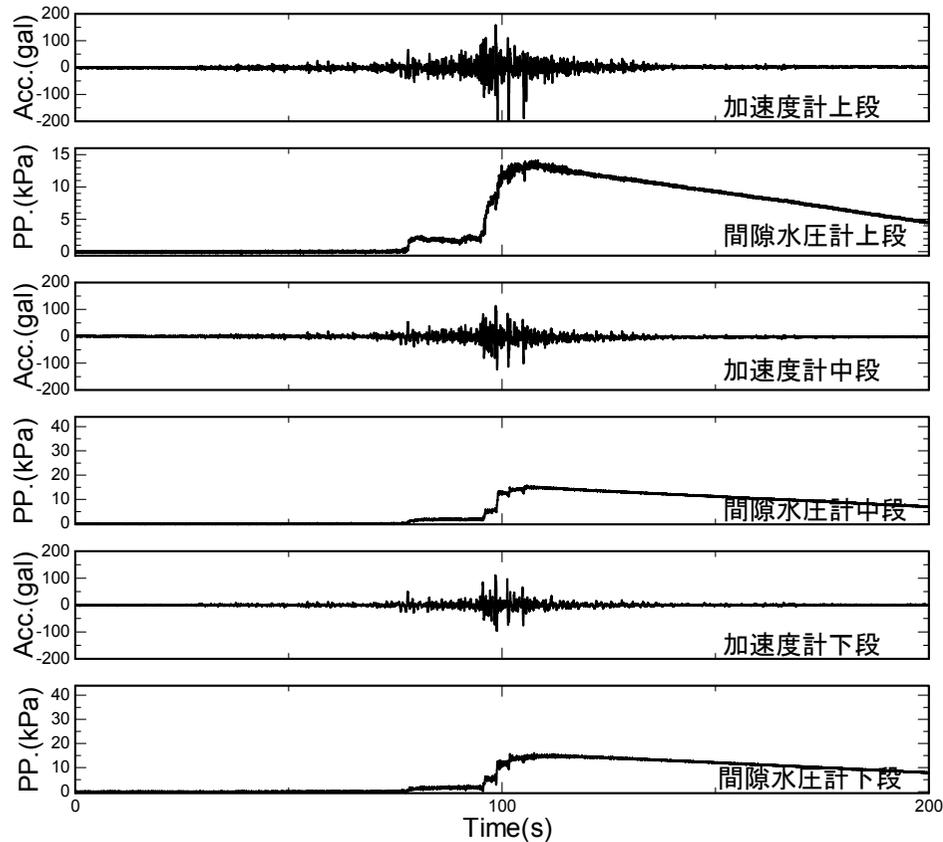
本加振時刻歴の比較



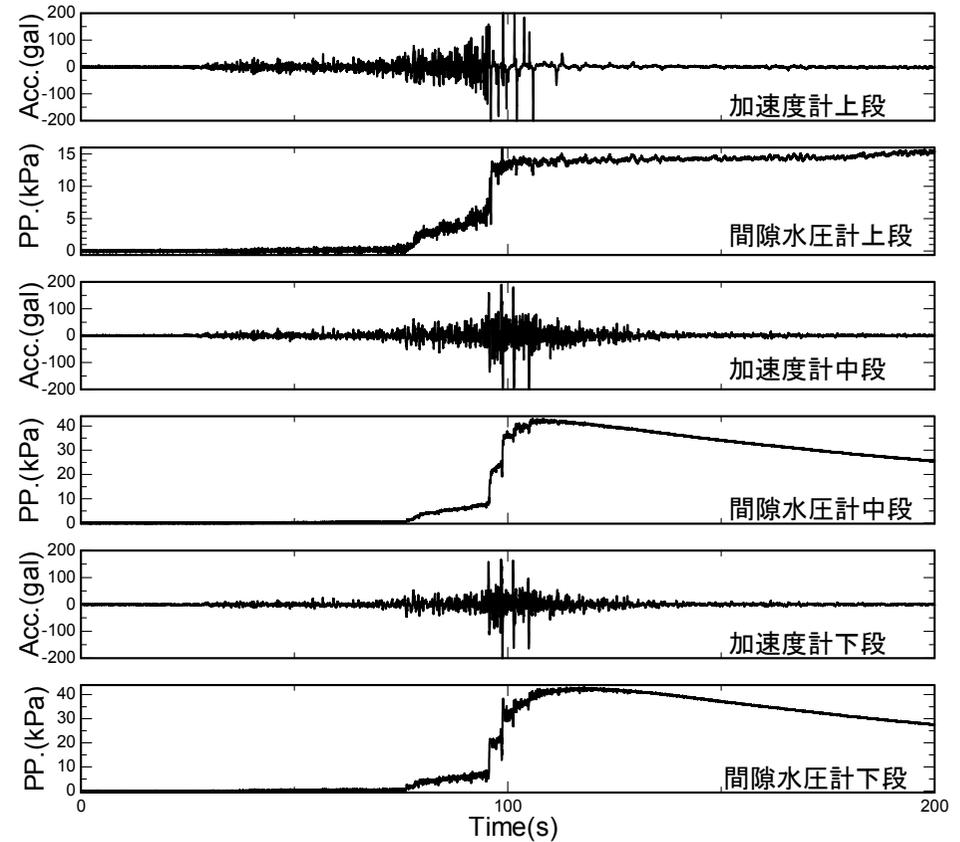
○深い位置では、液状化の生じた時点が加振履歴を与えた方が僅かに遅い（加振履歴を与えた方が僅かに液状化しにくい）³⁹

CASE2 本加振その2

CASE1 地震力30%(最終)



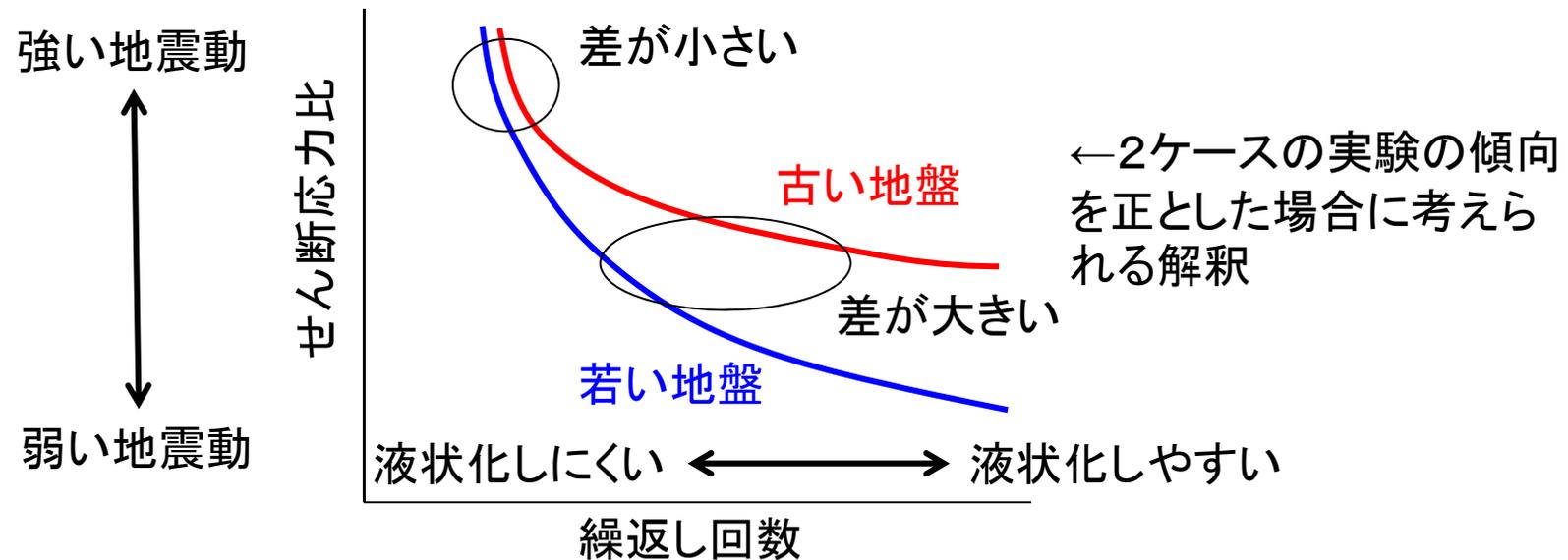
CASE2 地震力30%



- 特に深い位置では、水圧の上昇に大きな差。
- Case2の上端（地表付近）では、液状化が長期間継続
- 本加振その1の影響（地表付近は緩んだか）

まとめ

- Case1 (加振履歴有)とCase2 (加振履歴無)を比較
- 大きな加振で比較したところ、深い深度でわずかに液状化の発生に違い
(実験条件の僅かの違いの差の可能性は?)
- 小さな加振で比較したところ、液状化の発生に大きな違い
(大きな加振の影響は?)



- 実験結果の詳細な分析、追加実験を行う予定
(不明な点が多い造成年代の影響について検討を継続)