

地盤の動的物性を評価できる 繰返し孔内水平載荷試験

発表者 風間基樹 (川崎地質(株)取締役, 東北大学名誉教授)

発表 川崎地質(株)、中央開発(株)

技術開発参画 東北大学、東北工業大学、港湾空港技術研究所
(株) 不動テトラ

2025/10/10 R7年度 民間技術発表会(PAT) 仙台

1

発表内容

1. 開発の背景と目的

2. 開発の経緯と関連技術

- (1) 科学研究費 (2021.4~2024.3)→試験装置開発・室内試験
- (2) 国交省建設工学研究助成 (2024.10~2025.3)→現場適用試験
- (3) EUにおける技術動向

3. 開発技術

4. 現場適用実証試験

- (1) 2023年度下期 相馬港第3ふ頭SCP液状化対策工事現場
- (2) 2024年 08月 石川県河北郡内灘町室地区現場
10月 仙台市宮城野区中央開発東北支店駐車場
2025年 3月 不動テトラ総合研究所模擬SCP地盤改良地盤

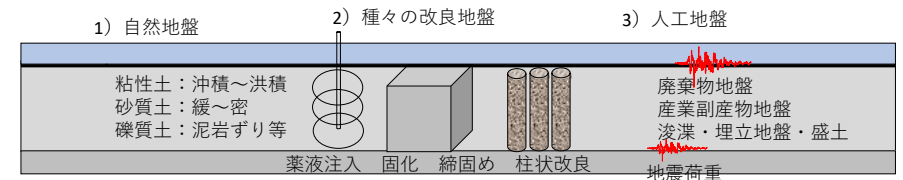
5. まとめ

1. 開発の背景と目的

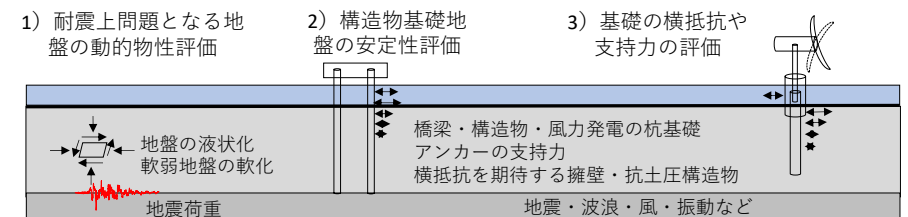
背景と必要性
従来の原位置調査技術との比較

背景と必要性：基礎地盤の耐震性能評価は耐震設計の基礎情報

➤ 我国の地盤は複雑かつ多様



➤ 対象によって要求性能が異なる耐震性能



➤ 当該技術の優位性：

地盤の動的物性を サンプリング試料によらない 原位置物性評価

4

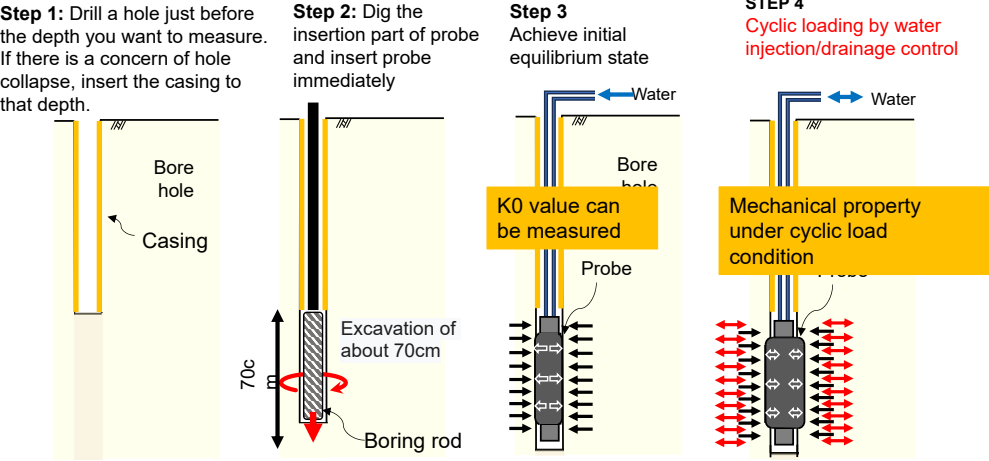
従来の原位置調査技術との比較

	繰返し PM試験 (本提案)	SPT 標準貫入試験	CPT, PDC, SWS コーン貫入試験 ビエゾドライブコーン スクレイドライバー貫入	表面波探査試験
調査 イメージ				
計測対象	繰返しによる 動的物性変化	重錘落下時 抵抗のN値	コーン等貫入時抵抗 (N値へ換算式あり)	せん断波速度 (地盤の弾性的性質)
分解能	1 m程度	1 m	数cm～数十cm	測定面内の数十cm 間隔格子占
費用	標準+	標準	既存手法には長所・短所がある	
特徴	繰返しによる 動的物性把握可	国内外に 広く普及	間隙水圧測定可 宅地等浅い地盤に適用	側線に沿った せん断波速度
原地盤 改良地盤への 適用性	対象を選ばない。 数値解析用物性評価に親和的	対象を選ばない。 情報が限定的 N=0～50	硬質・礫質地盤等に 適用不可 軟弱地盤・浅い地盤 にのみ適用可	弾性物性（初期せん断剛性） を計測、繰返し軟化や 液化化抵抗は適用不可

2. 開発経緯と関連技術

- 【1】 科学研究費補助金（2021.4～2024.3→試験装置開発・室内試験
- 【2】 国交省補助金（2024.10～2025.3） →現場適用試験（4か所）
- 【3】 EUにおける技術動向

CPM（Cyclic Pressuremeter Test）試験の手順



第8回ISP（International Symposium. on Pressuremeter）
Luxembourg 2025/9/2-5



2025年9月の会議での 現場試験のデモの様子

- ボアホールせん断試験
- セルフボーリング型の試験



9

孔内水平載荷試験の4つのタイプと繰返し載荷

ゾンデ挿入方式 ゾンデの材質	ボアホール掘削後 ゾンデ挿入タイプ 孔壁の乱れが懸念	掘削・挿入を同時 セルフボーリング 孔壁の乱れが小さい 機構がやや複雑
ゴムスリーブ を介した載荷 孔壁に柔軟に密着 スリーブ破れるリスク	ボアホール掘削時に 乱れの少ない地盤に適 中程度の硬い地盤 改良した地盤 + 繰返し載荷 今回紹介技術	軟弱な粘性土地盤 軟弱な砂質土地盤
鋼製プレート 介した載荷BHJ 孔壁に平均的に密着 礫質・硬質地盤に適 地盤物性異方性を評価可	硬い岩盤 深い地盤 不均質地盤 でも可	軟弱な粘性土地盤 軟弱な砂質土地盤 きれいな掘削がで きない地盤には不適 世界的に 現状未完成

液状化判定への適用可能性

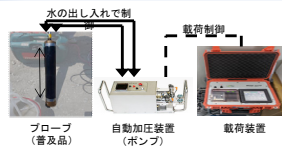
12

現状の液状化判定手法

標準貫入試験・コーン貫入試験
⇒締まった硬質地盤や礫質地盤で評価困難

サンプリング試料を用いた室内試験
⇒乱れの影響が無視できない

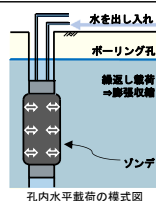
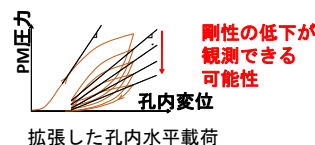
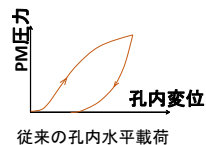
孔内水平載荷試験（PM試験）
⇒ほぼ全ての土質・岩盤・深度で適用可能だが、**静的な変形特性及び強度特性のみ**



新たな液状化判定手法

繰返し載荷に拡張した孔内水平載荷試験

⇒ほぼ全ての土質・岩盤・深度で、**動的物性評価が可能に？**



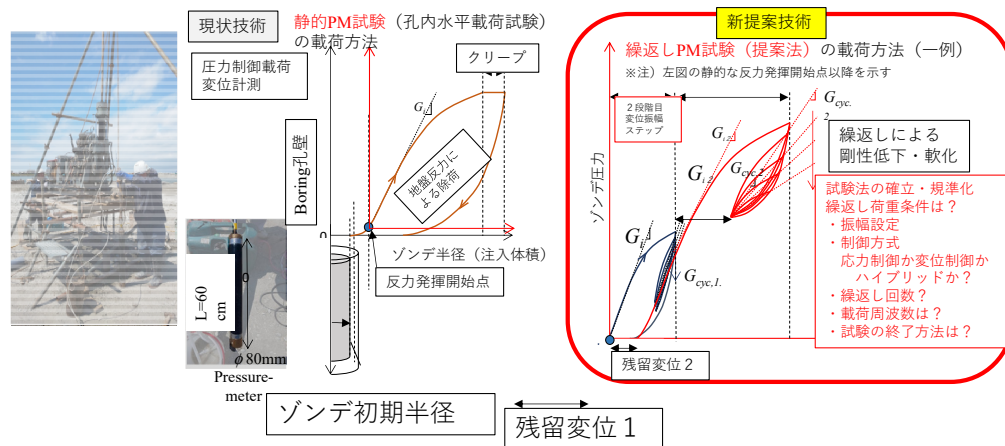
3. 開発技術

なぜ原位置繰返しプレッシャメータ試験か

14

孔内水平载荷試験：ボーリング孔内で行う力学試験

- ① サンプリング試料を不使用：軟弱土試料の乱れ大, 礫質地盤等はサンプリング困難
- ② 繰返し载荷時の剛性低下や強度喪失（液状化）を評価

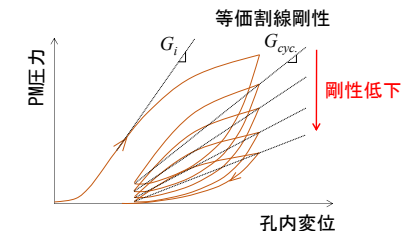


研究の背景

PMを用いた繰返し载荷試験

<変位制御型>

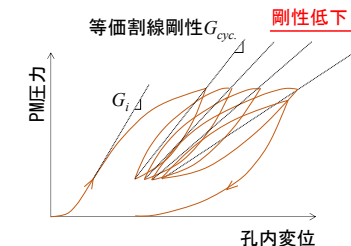
- ・ ゾンデへの水の注入量を制御
- ・ 変位が増大しない（体積一定）
- ・ 载荷によって剛性をゼロにすることができる
- ・ 硬い地盤では制御範囲外の過大な圧力が生じる



<変位制御型の繰返し载荷のイメージ>

<圧力制御型>

- ・ 計測される反力を制御
- ・ 圧力が増大しない
- ・ 剛性はゼロにならない
- ・ 軟らかい地盤では反力が生じにくいため、孔内変位が進展する



<圧力制御型の繰返し载荷のイメージ>

4. 現場適用実証試験

2023年	下期	福島県	相馬港第3ふ頭SCP液状化対策工事現場
2024年	8月	石川県	河北郡内灘町室地区現場
	10月	仙台市	宮城野区中央開発東北支店敷地内
2025年	03月	不動テトラ総合研究所	模擬SCP地盤改良地盤

2023年度
福島県相馬港第3ふ頭SCP液状化対策工事現場

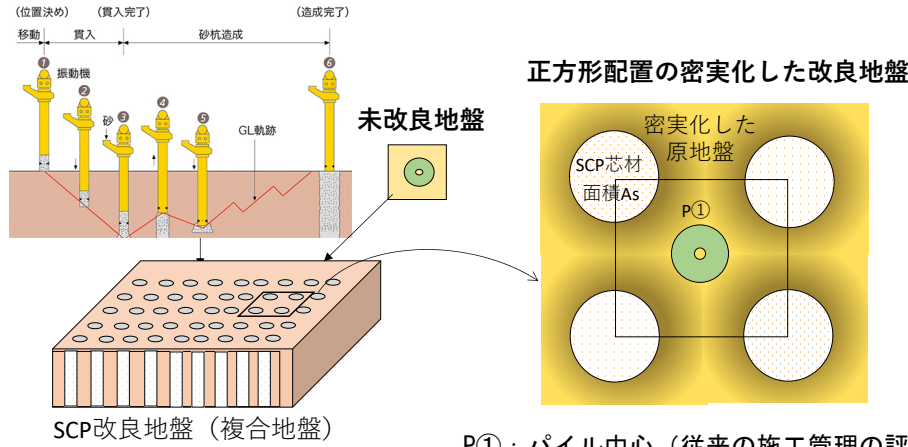
↓ 2022年福島県沖地震における対象地域の地震被害



福島県相馬港湾事務所提供

「未改良地盤とSCP改良後地盤に対しての実証試験

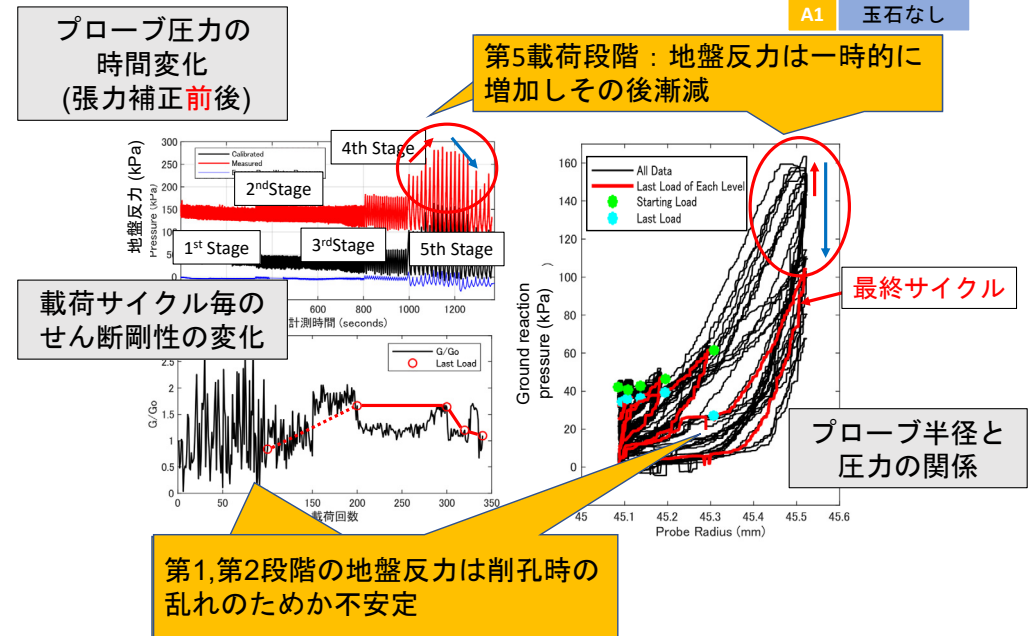
18



P①：パイル中心（従来の施工管理の評価点）
実地盤改良現場での施工管理を想定

実験結果 A1-未改良地盤 G.L.-9.5m

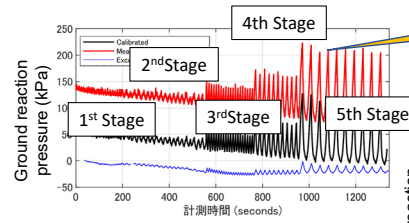
19



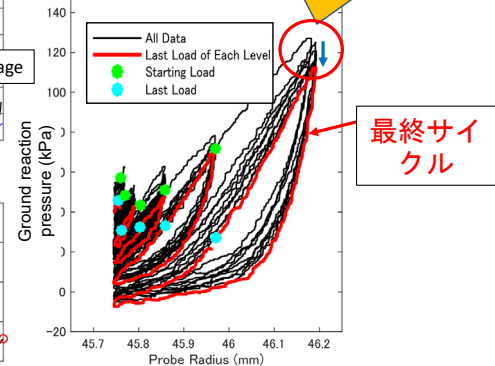
実験結果 A2-改良地盤 G.L.-9.4m

A1 With cobble

プローブ圧力の時間変化 (張力補正前後)



第5载荷段階：地盤反力は漸減せずにほぼ安定



载荷サイクル毎のせん断剛性の変化

プローブ半径と圧力の関係

2024年8月 石川県河北郡内灘町室地区現場

21



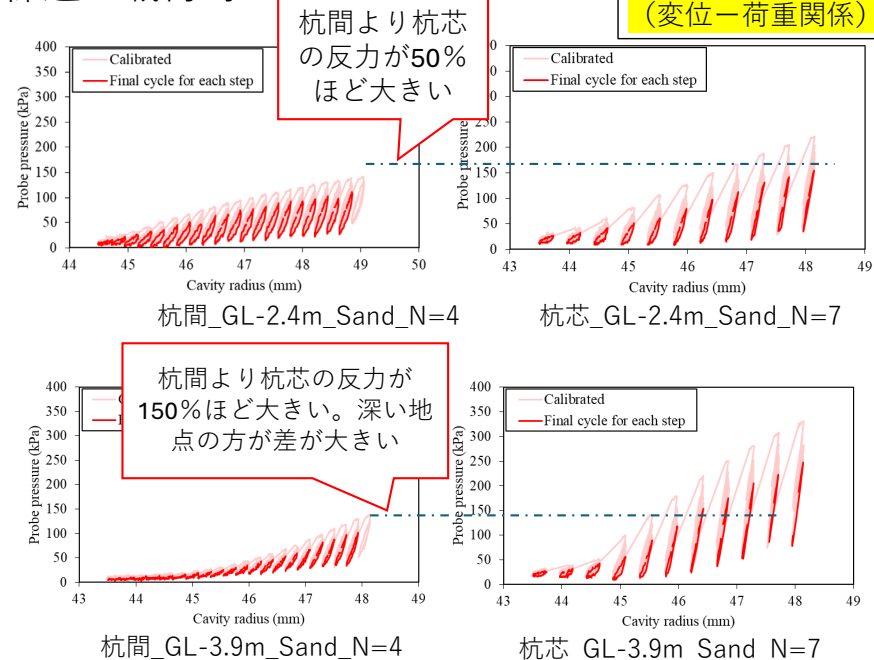
2025年3月不動テトラ総合研究所 模擬SCP地盤改良地盤

22

実験実施状況

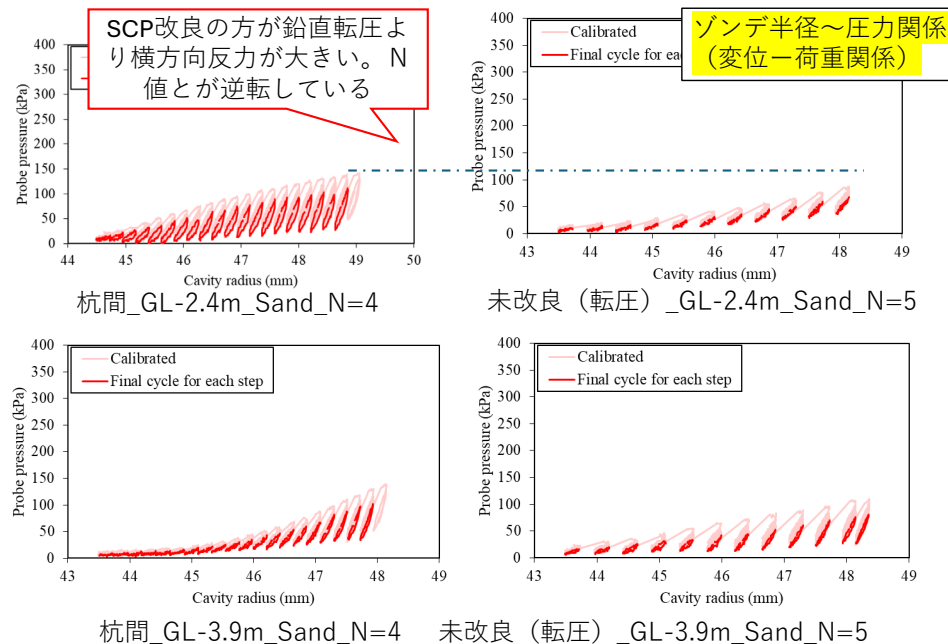


繰返し载荷時



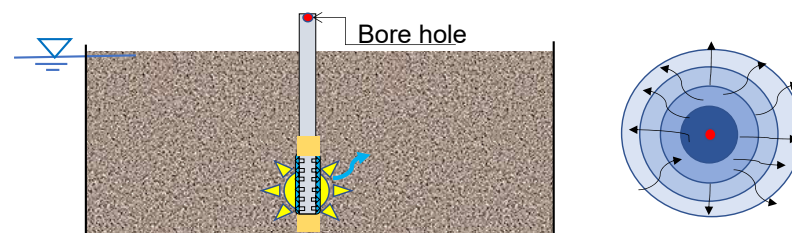
繰返し载荷時

杭芯、転圧地盤の変位振幅段階は杭間の繰返しの偶数回をスキップしている



5. まとめ

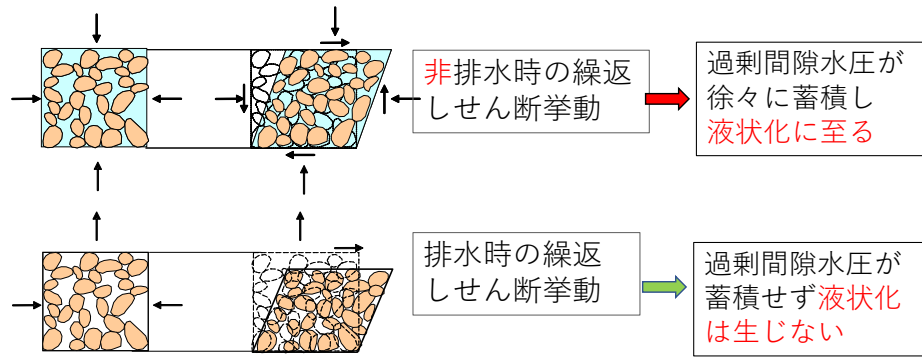
-実用化への期待-



繰返し载荷によって局所的に発生した過剰間隙水圧は半径方向に容易に消散する。载荷速度を上げて非排水条件を達成することは可能かもしれないが、デバイスの大改造が必要で費用も掛かる。何よりも地盤反力挙動が载荷速度に依存してしまう。

結論 → CPM試験で人為的に液状化を発生させることは困難。

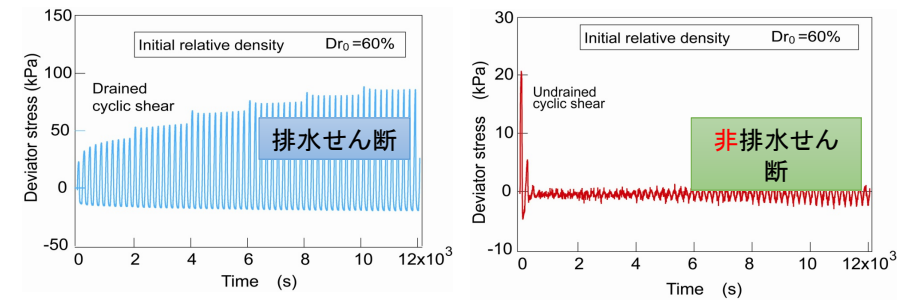
緩い砂地盤の繰返しせん断挙動の非排水時と排水時の違い



問題：非排水時の繰返しせん断挙動を排水時の繰返しせん断挙動から評価できるか？
ある繰返しせん断ひずみ履歴を与えた時の体積ひずみ量进行评估すればよい。

もちろん、土が繰返しせん断変形を受けたときのせん断抵抗は排水条件によって異なる。

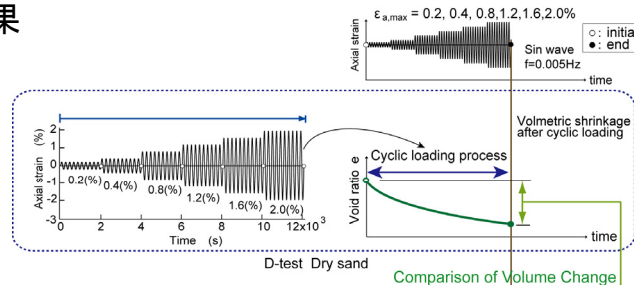
同じ繰返しせん断ひずみを与えたときのせん断応力応答



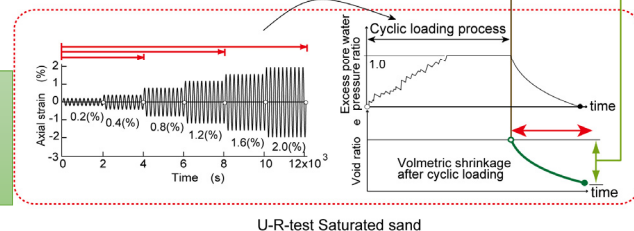
排水条件下のせん断応力応答は徐々に大きくなるが、非排水条件下のせん断応力応答は数サイクルで劇的に小さくなり、小さくなったままの状態を保つ

同じせん断ひずみを与えた場合の排水および非排水繰返しせん断後の体積変化に関する実験結果

繰返し排水せん断時の逐次体積変化量

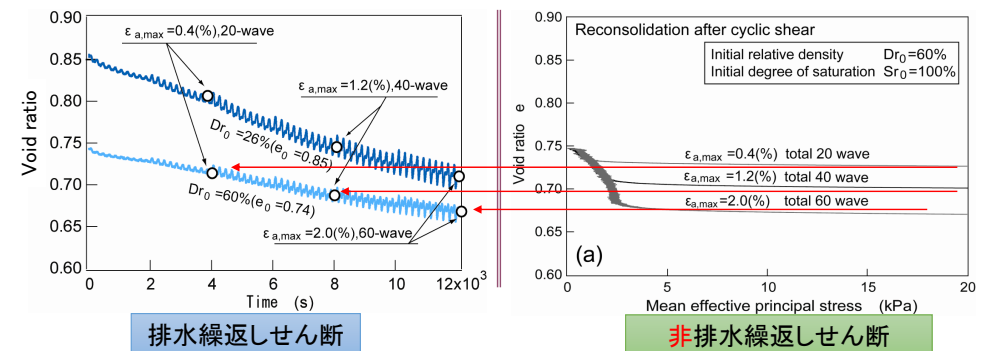


非繰返し排水せん断とその後の排水時体積変化量



異なる排水条件下の体積変化を比較できる

異なる排水条件下で同じ繰返しせん断ひずみ履歴を与えた時のせん断後の体積ひずみ量の比較



繰返しせん断ひずみ履歴が同じなら、せん断後の体積ひずみ量は、排水条件によらず同じとなった。

CPM 試験システム開発 のまとめ

- PM試験を繰返し試験できるように改良し、地盤改良現場で適用できることを実証した。
- 軟弱地盤では、掘削時に地盤が乱れるため、ひずみが小さいレベルでは反力が小さい。一方、周期的に載荷することで、比較的大きなひずみレベルでの地盤反力が減少するか安定するかを判定できる。
- 局所的に発生する過剰間隙水圧は容易に消散するため、載荷速度が遅いほど液状化は起こりにくい。機械・電子システムを改良して載荷速度を実際の地震動と同レベルまで上げることは可能だが、コストや普及の観点から現実的ではない。
- CPM試験は、
 - 地震時に地盤の液状化しないことを証明できる。
(CPM試験ではできない)
 - 地盤改良の施工管理（改良された地盤の性能評価）に利用できる。

孔内繰返し載荷試験の今後の展望

- CPM 試験条件に対応する排水繰返しせん断条件下での土の挙動を研究し、液状化に対する土の脆弱性を評価する必要がある。
- その場合、液状化の可能性を排水繰返しせん断試験の試験結果に基づいて定義する必要がある。これにより、緩い砂の液状化破壊と粘土質土のせん断破壊を区別できる。
- この技術が普及するかどうかは、試験データの蓄積が重要なポイント。種々の地盤の現場適用事例データの蓄積が必要。
- 試行的な活用を期待しています。