
地盤の可視化最前線



高野 大樹

港湾空港技術研究所 地盤研究領域
地盤改良研究グループ

研究の目的

大変形に至る変形プロセスを適切に評価し、
数値解析で精緻に予測する方法が必要

実験的なアプローチ

- 計測技術→点(離散的)での計測から面(全視野)での計測へ
- 可視化技術→土の変形プロセスを3Dで観察 (X線CT, 電子顕微鏡)

大変形, 進行的な破壊, 流動を評価可能な実験システム
高度な可視化技術+全視野計測技術

解析的なアプローチ

- FEMによる変形解析→メッシュの連結性のため理論的に解析が困難
- 粒子法による再現→デモンストレーションに留まる

変形プロセスを精緻に予測可能な解析技術

Advancedな可視化手法(X線CT, 透明土)+全視野計測技術
→土の変形過程をミクロな視点から読み解く
ミクロな情報を利用した新たな土の変形・破壊解析手法の開発

研究の目的

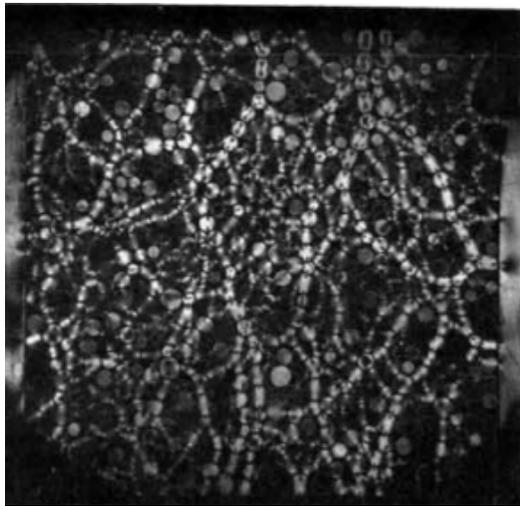
	可視化のスケール・対象	可視化のツール
マイクロ	粒子スケール $\mu\text{m}\sim\text{mm}$ 対象:要素試験	X線CT 応力発光
↓		
メソ	模型スケール $\text{cm}\sim\text{m}$ 対象:模型実験	透明土
↓		
マクロ	模型スケール $\text{m}\sim$ 対象:実際の工事	物理探査

応力発光粒子を用いた
粒状体の粒子間接触力分布の可視化

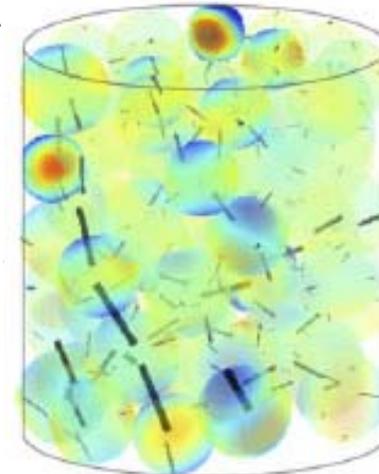
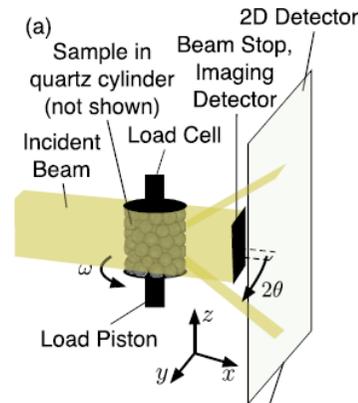
研究背景と目的

粒状体の変形・破壊挙動において、ミクروسケールでの粒子間接触力を定量評価することは、マクロな挙動を支配する粒子間の相互作用の解明において非常に有用である

既往の研究として、光弾性体を用いた研究やX線回折を用いた手法が挙げられる



Konishi, 1979.



Hurley et al., 2016.

- ▶ これらの手法は偏光器やシンクロトロンなど高価な設備に加え、粒子形状や材料の制限やトモグラフィに伴う計測間隔の制限がある

本研究では、粒状体の接触力を安価で連続的に把握する方法の提案を目的として、応力発光材料を用いて粒子間接触力の可視化を行い、換算した作用力の検証を行った

応力発光とは？

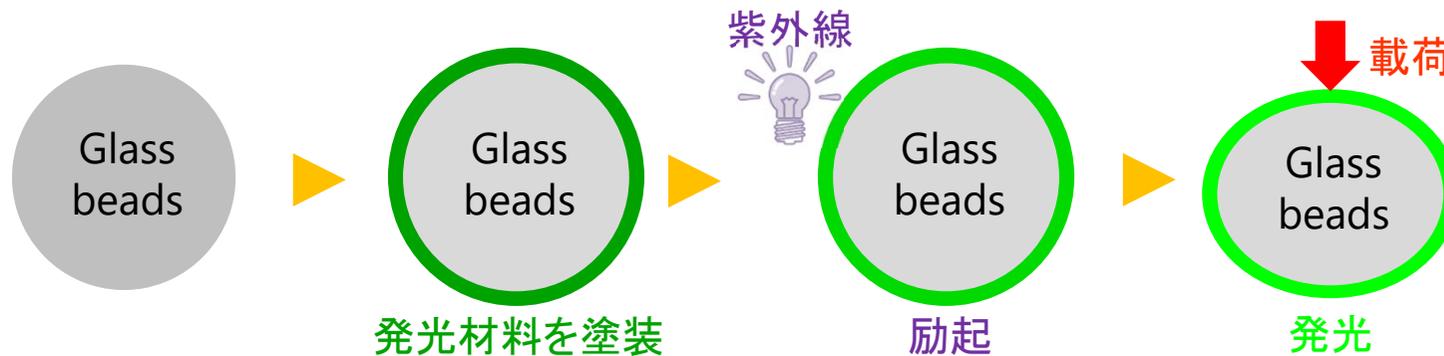


応力発光とは？

対象物の応力増分(ひずみ増分)に比例して発光する現象

Xu, C. N., Zheng, X. G., Akiyama, M., Nonaka, K., Watanabe, T., Appl. Phys. Lett., 76, 2, (2000).

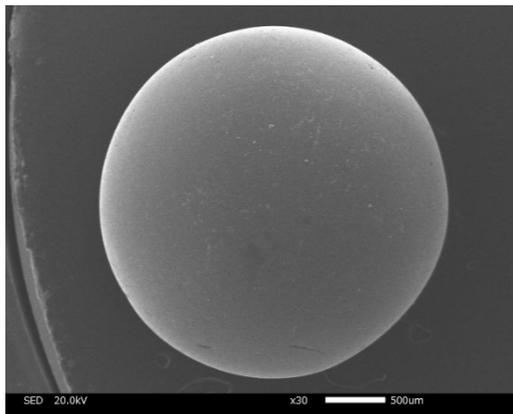
本研究では、ユーロピウムを発光中心としてドーブしたアルミン酸ストロンチウム(SAOE: Eu)を利用



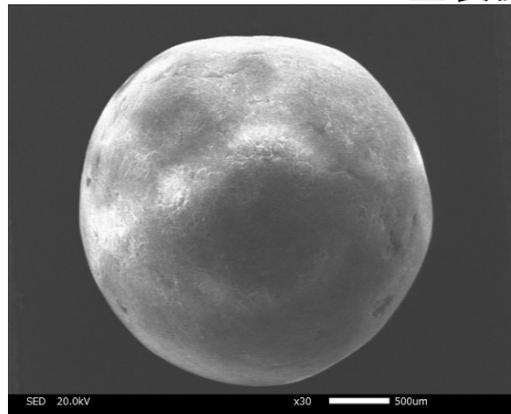
発光強度は塗膜の硬さや塗膜の厚さに影響を受けるため、均一な塗装が求められる

SEM

塗装前

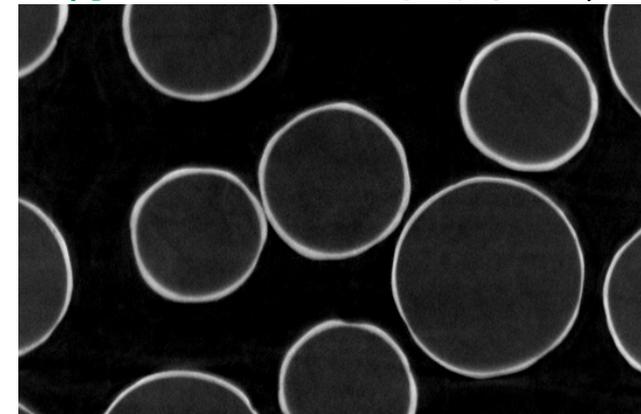


塗装後



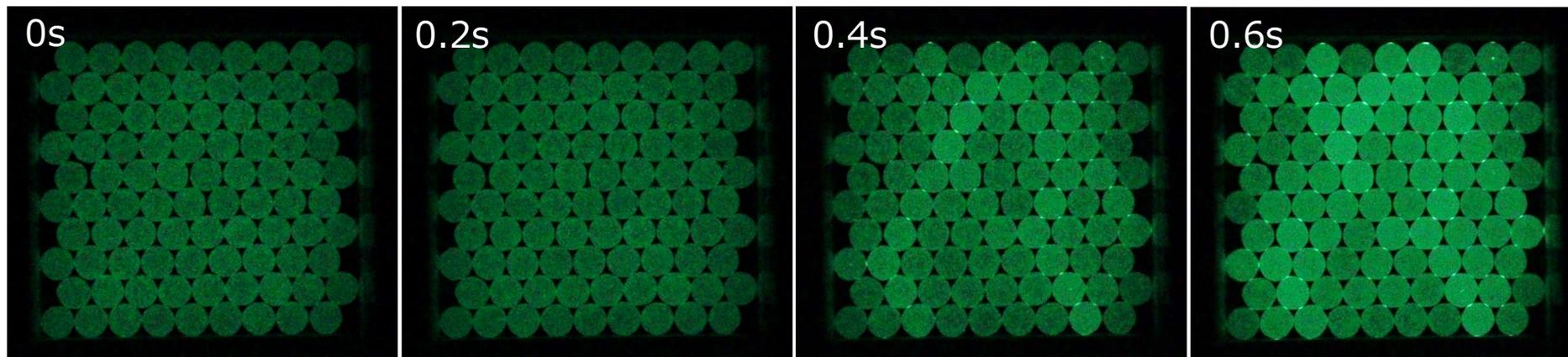
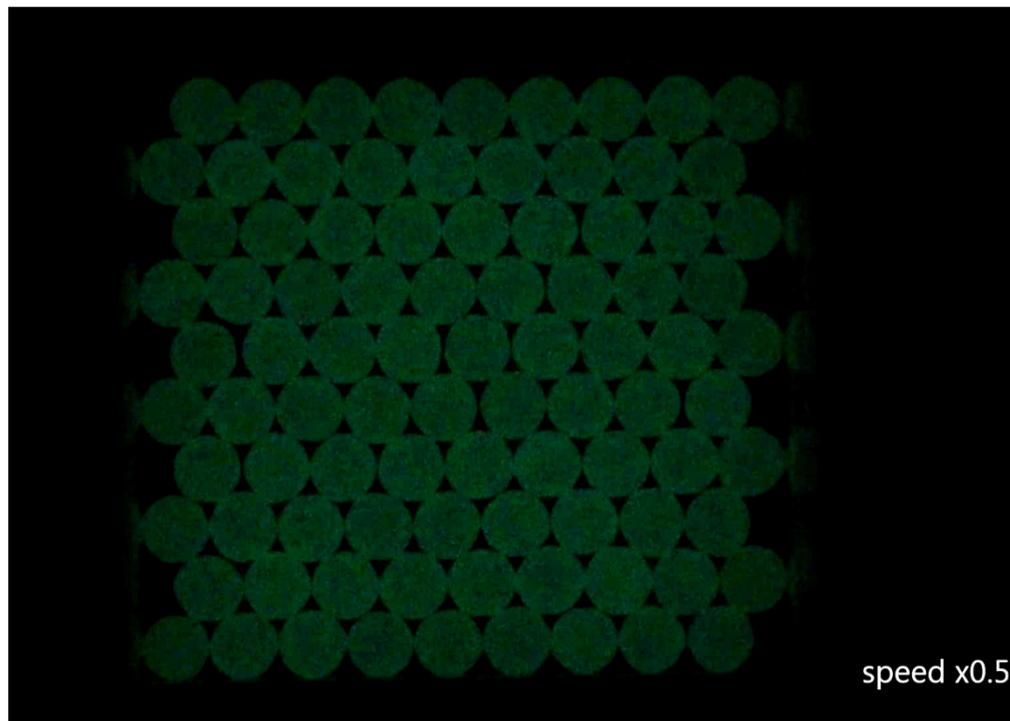
X線CT

平均塗膜厚69.67 μ m



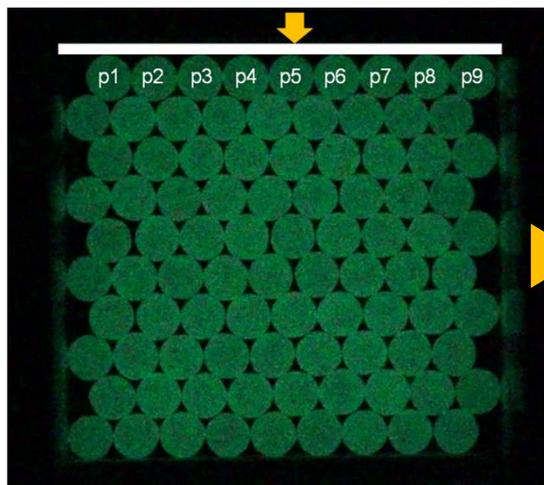
二次元供試体での载荷実験

すべての粒子が整列した状態の供試体でも载荷に伴って、
発光する粒子が連なる**応力鎖**の発生とその推移が確認できる

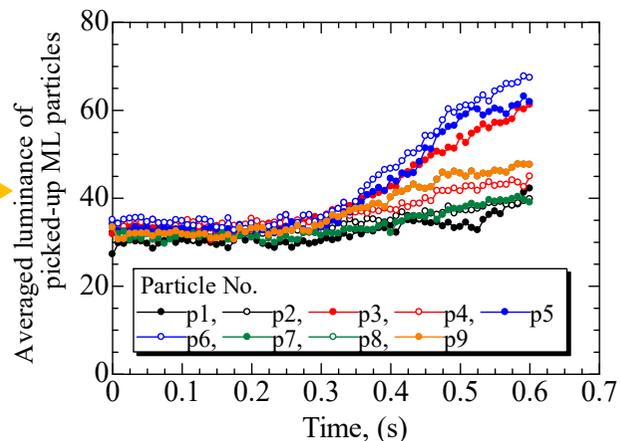


換算した力と計測した力の検証

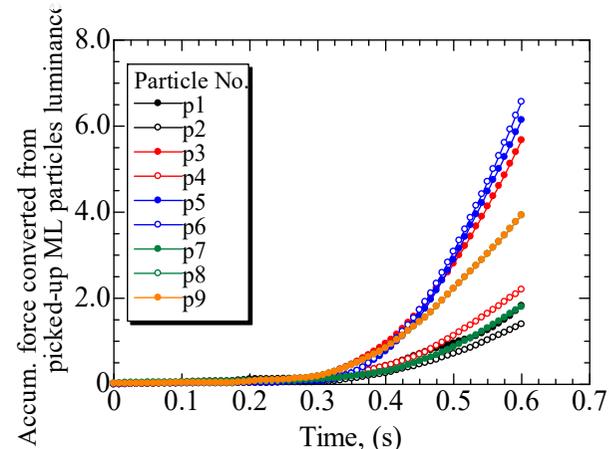
載荷板と接触する供試体の最も上の一列に着目して、
発光から換算した力とロードセルで計測した力を比較した



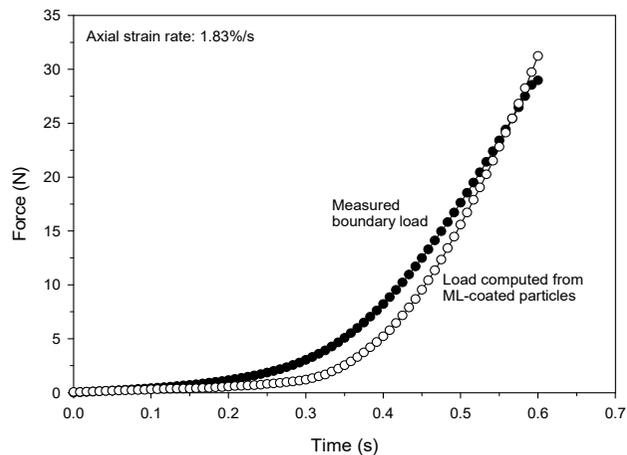
発光強度の経時変化



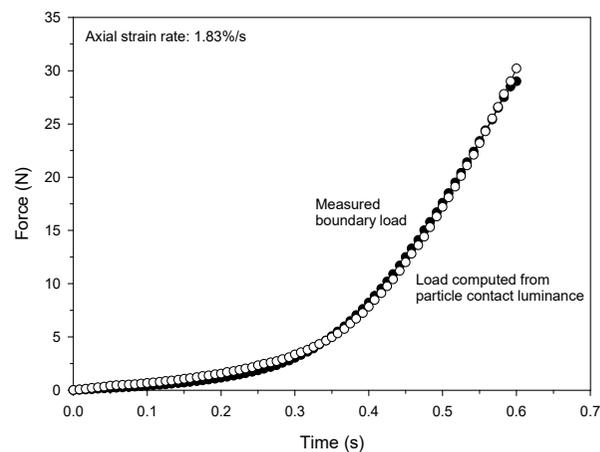
換算した各粒子の作用力を時間積分



粒子の平均発光強度から
換算した力の検証



接触点の発光から
換算した力の検証



液状化対策としての
静的圧入締固め(CPG)工法

締固めプロセスの可視化

静的圧入締固め工法 (コンパクショングラウチング工法、またはCPG工法)

液状化対策としての密実化工法

- 注入場所での機材が小さく、自由度が高い
- 削孔径が小さく、部分改良が可能：
既設構造物下で有利
- 騒音が小さい
- 国内の主要な実績として、羽田B滑走路、
仙台空港誘導路など

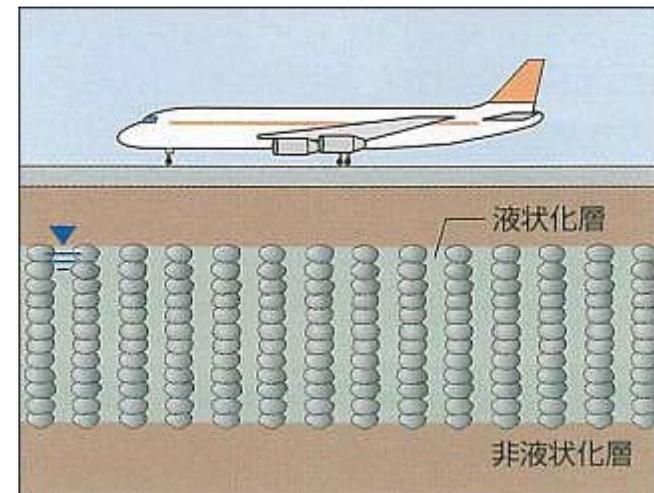
グラウトなどの圧入により

- ・ 側方応力(K値)増加
- ・ 緩い原地盤が密に

液状化強度の増加

近年の要望：

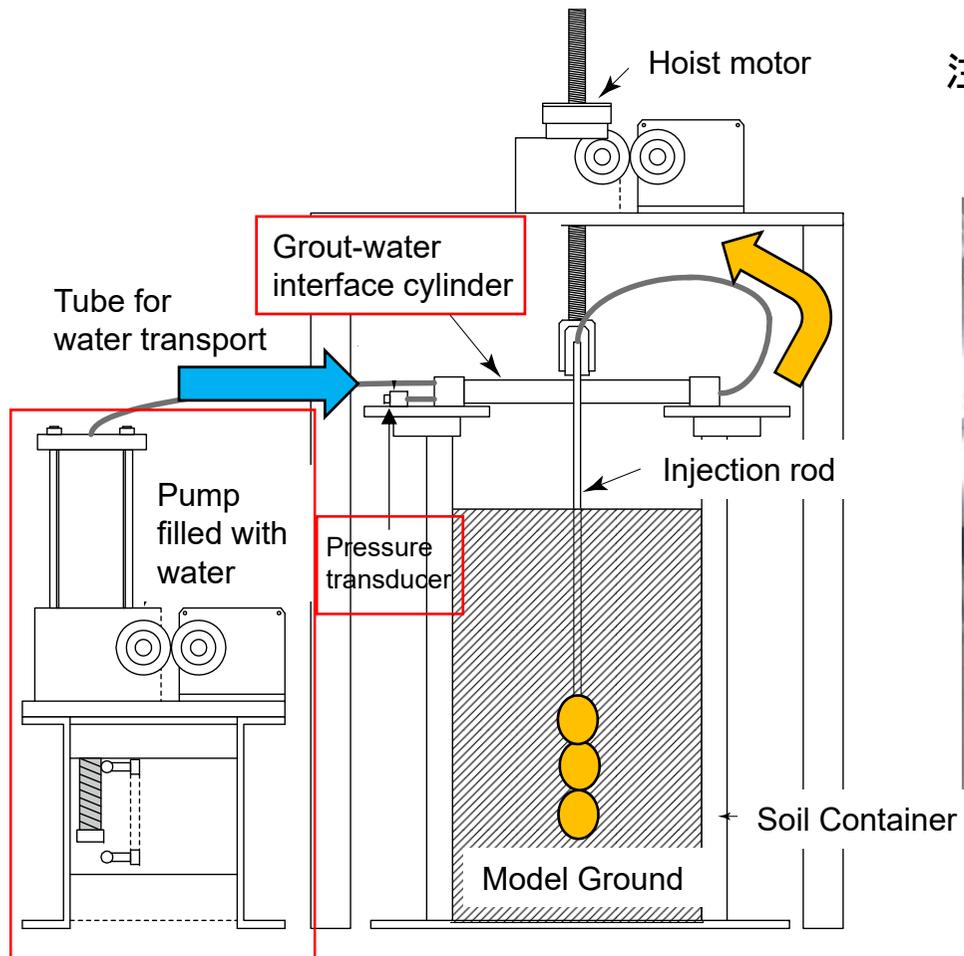
施工の効率化・短期化のため低改良率化
既設構造物との近接施工



イラスト：CPG工法研究会HPより

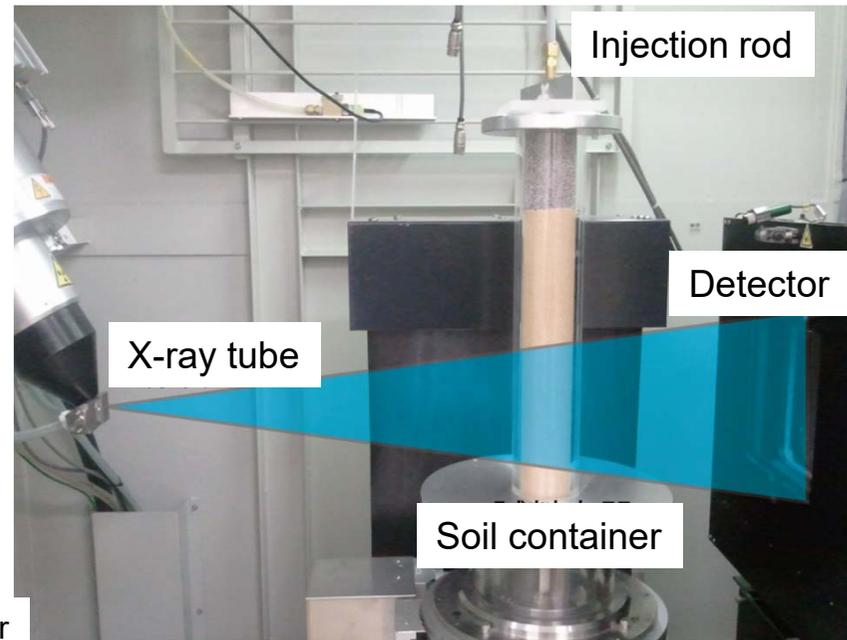
地盤内密度变化 (CT実験; 1G場)

実験概要



Schematic view of test setup

注入とCTスキャンを同時に実施

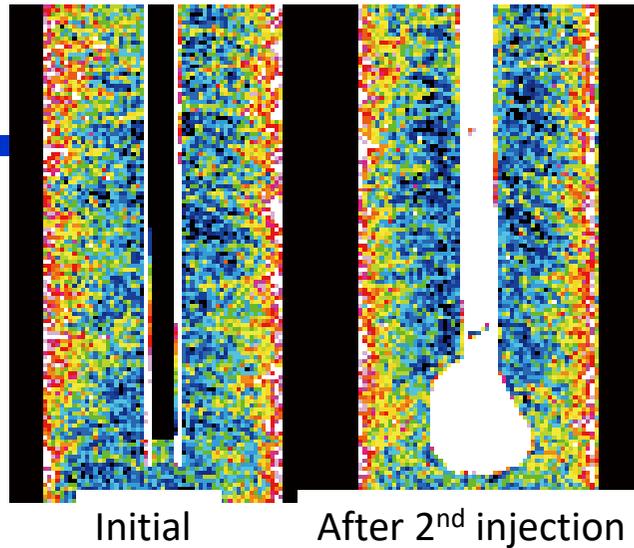


Φ60 mm ~ 150 mm

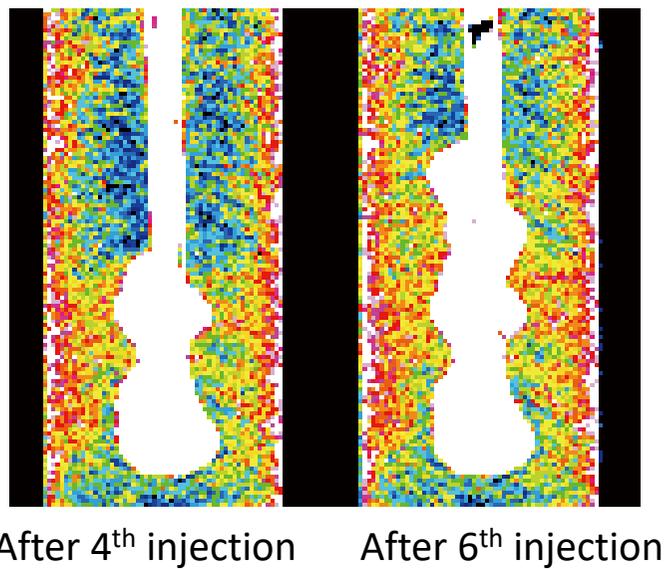
Photo in the X-ray scanner

地盤内密度変化

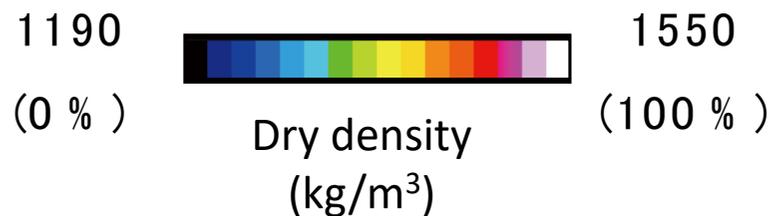
画像の輝度値 → 地盤の密度



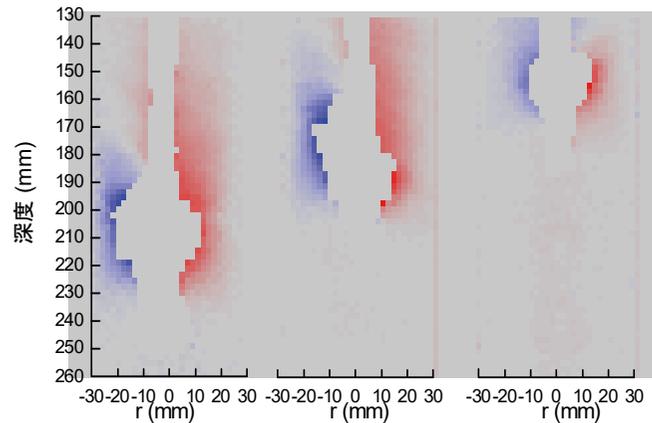
- ・密度変化は主にグラウトの側面で生じる
- ・約 25 % の相対密度変化
(30 % → 55 %)



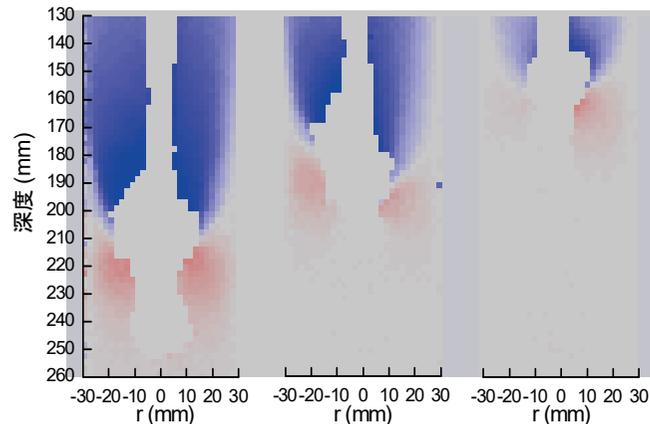
- ・グラウトの上部, 下部には密度変化無し



DIC解析による地盤内の変位場可視化



Step A Step B Step C
-10 10
Horizontal disp.



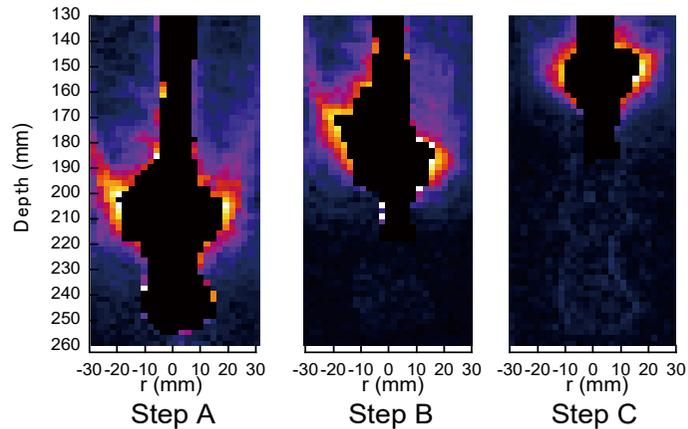
Step A Step B Step C
Vertical Disp.

水平方向の変位は注入中のグラウト周囲に集中
鉛直方向の変位は注入位置が浅くなるに従いち表面方向に卓越



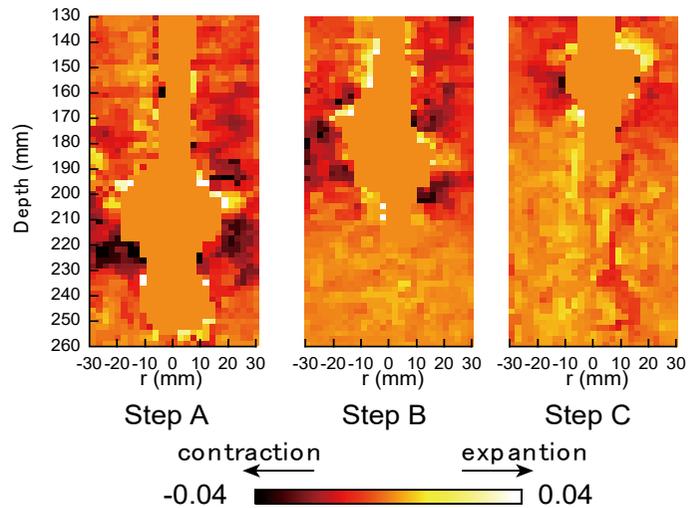
グラウト注入による変形モード
深い場所: 空洞拡張
浅い場所: 隆起

DIC解析: ひずみ分布



0 0.04

Incremental maximum shear strain

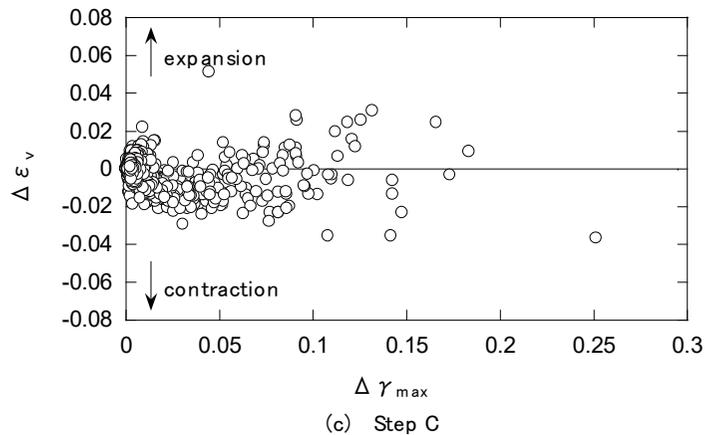
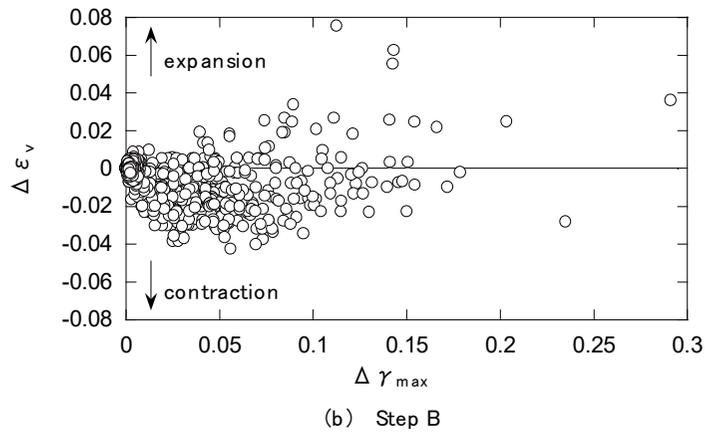
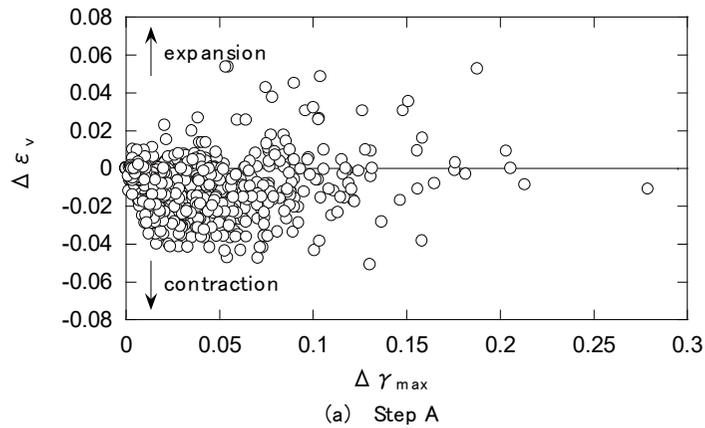


Incremental volumetric shear strain

せん断ひずみは注入中のグラウト周囲に集中
地表面方向のせん断帯
→ 上部の地盤が持ち上げられる

暗色: 体積収縮
5% の体積ひずみ増分
→ 23.5% の相対密度増加
密度分布と調和

体積収縮は注入場所が浅くなるに従い
小さくなる傾向



画像中の同じ場所における
せん断ひずみ-体積ひずみ関係

注入深度
深い

深い場所:
体積収縮がメイン

浅い場所
せん断ひずみ小: 収縮
せん断ひずみ大: 膨張

→ 浅い場所では塑性変形が生じやすい

効果を最大化するためには、注入深度により注入量を調整する必要がある。

浅い

地盤内密度变化(遠心模型実験)

透明土 (Transparent soil)

地盤挙動の可視化

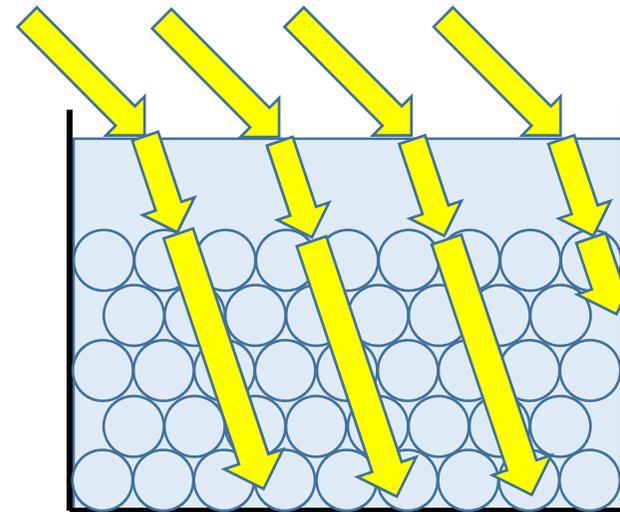
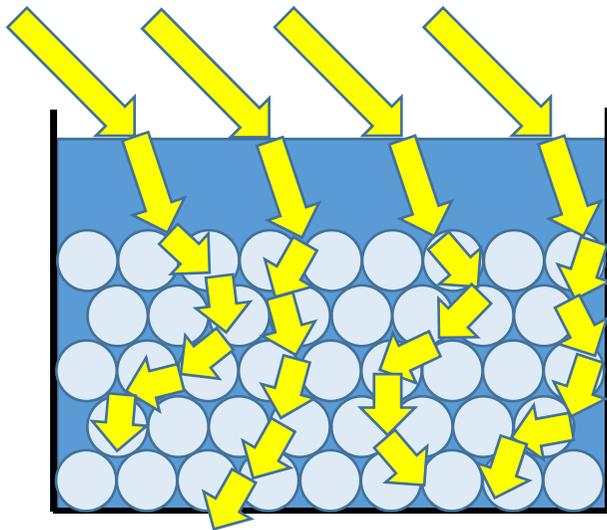
模型実験: アクリル窓等を通した2次元的な観察

→3次元的に可視化

透明土 (transparent soil; Ezzein & Bathurst, 2011)

粒状体と、間隙流体の屈折率を合わせて、地盤を透明にする技術

* 屈折率: 物質中での光の進み方の指標 (= 真空中の光速/物質中の光速)



粒状体と間隙流体の屈折率が異なる場合

粒状体と間隙流体の屈折率が同じ場合

使用材料

地盤材料 (石英粒子)

粒子密度: 2.21

D_{10}/D_{85} : 0.5 mm / 1.8 mm or 1.3 mm / 2.9 mm

e_{\max}/e_{\min} : 1.018 / 0.707 or 1.022 / 0.734

屈折率: 1.4585

間隙流体 (ミネラルオイル)

屈折率の異なるオイルを混合し、
石英粒子と同じ屈折率に調整

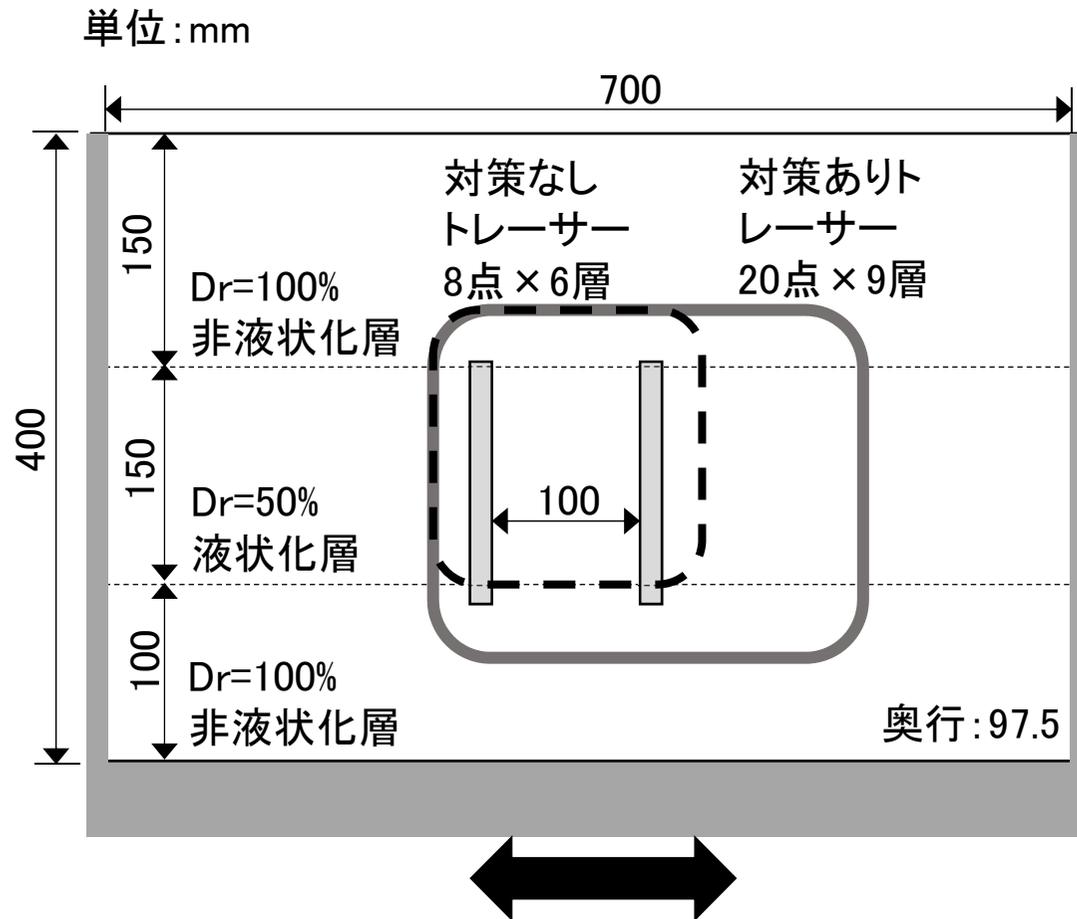
動粘度: 水の約10倍

注入したグラウト材

セメントと川崎粘土と混合
遅延材で固化時間を調整



実験の概要



・遠心加速度 30G

遠心場で地盤を飽和

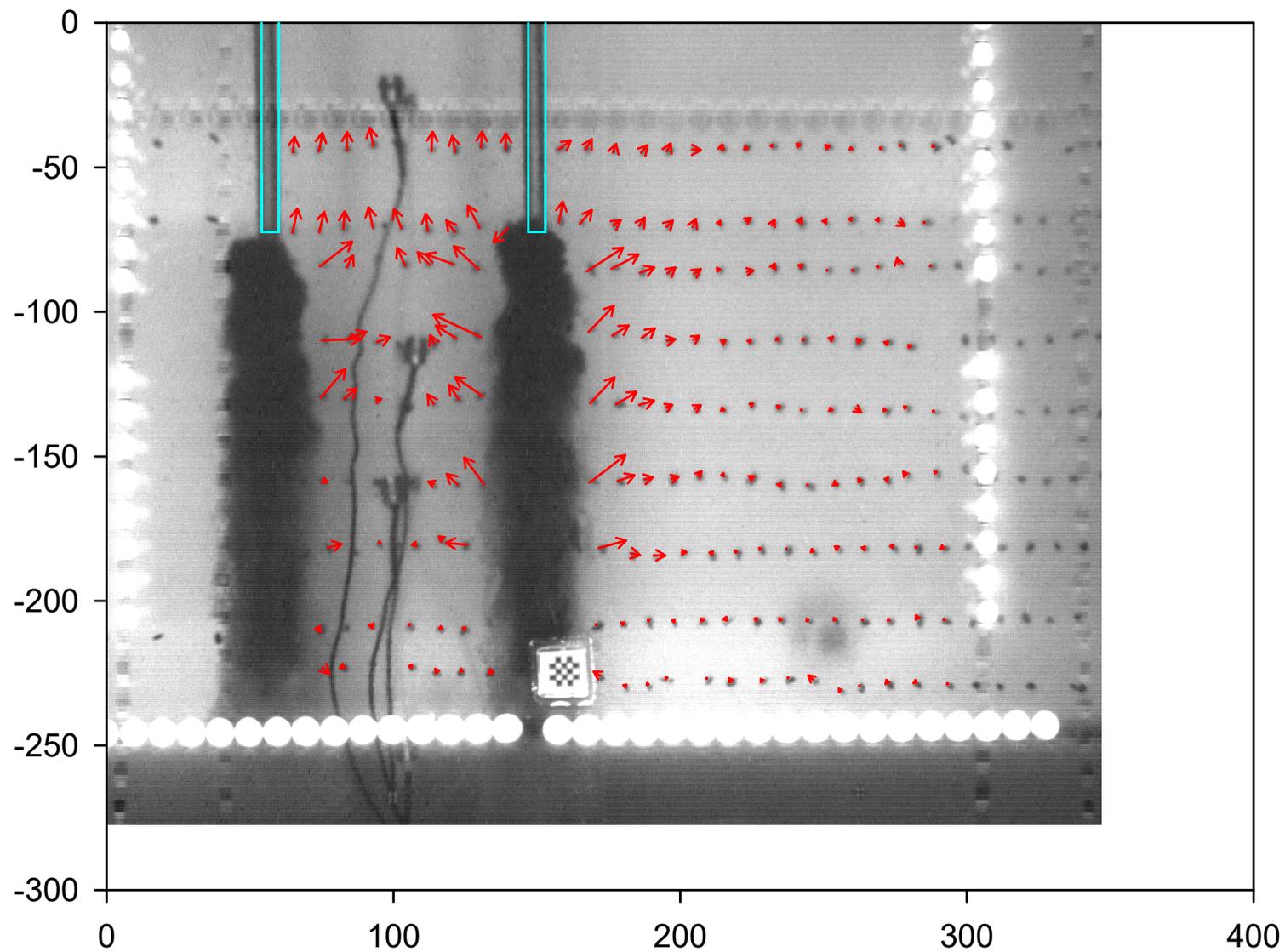
ボトムアップ形式でグラウト注入

sin波, 振幅0.6mm

周波数100Hz, 振動数20回

平均加速度400galで加振

実験結果（注入過程）



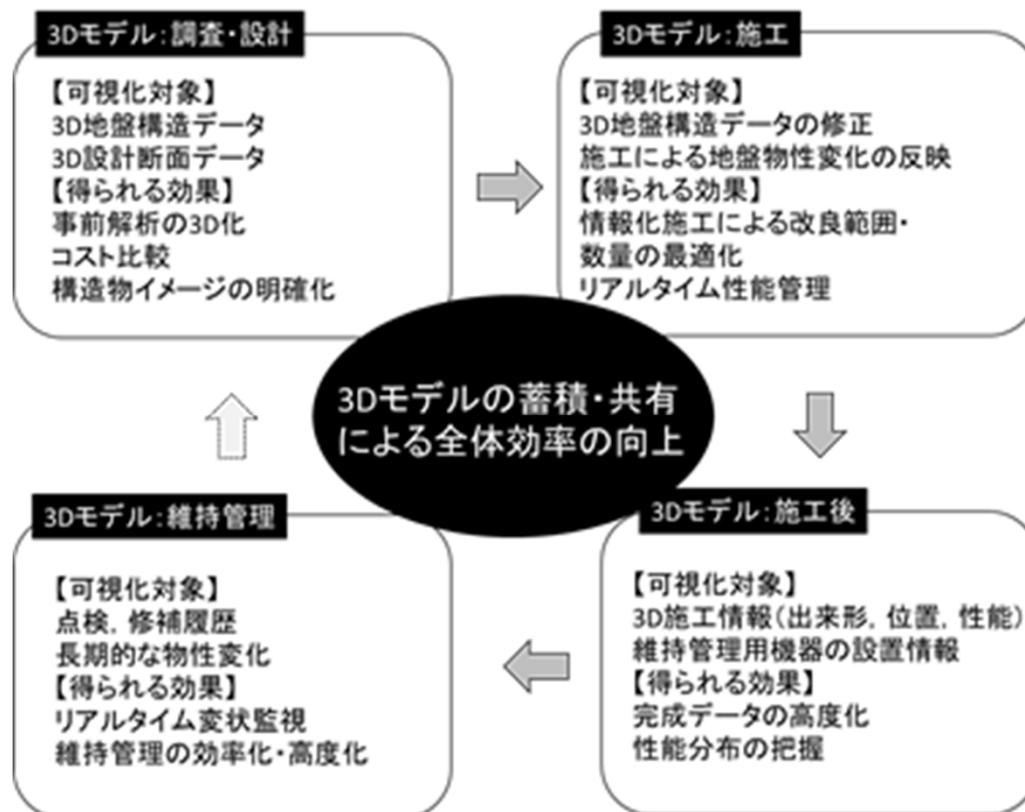
液状化効果の可視化

物理探査を用いたアプローチ

次の展開？

改良地盤の性能評価を目指したトモグラフィ技術の開発

事前調査-施工中-事後確認-維持管理の地盤改良事業全体プロセスにおける地盤性能を一括して定量モニタリングする物理探査を用いた可視化技術を構築し、数値解析と組み合わせた性能評価方法を提案する。

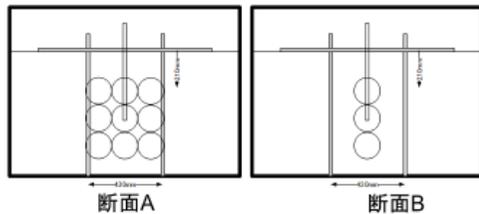


改良地盤の性能評価を目指したトモグラフィ技術の開発

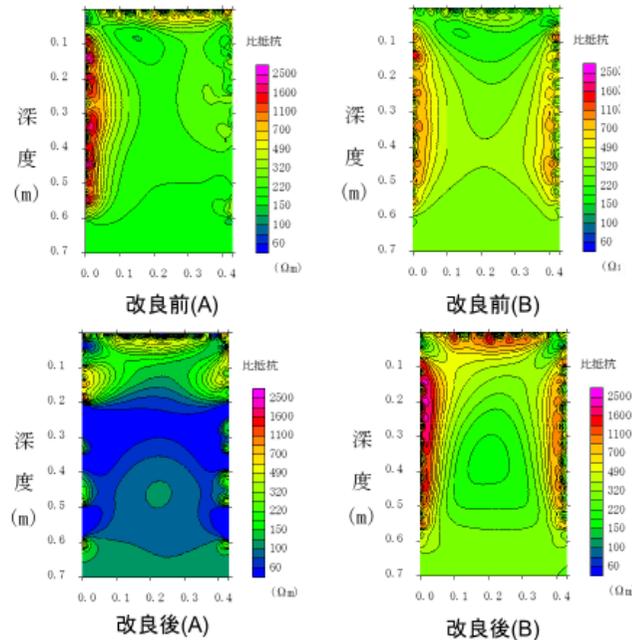
要素試験・模型実験での適用性, 適用範囲の検討

比抵抗, 弾性波など地盤改良工法の特性に併せた
物理探査技術の選択

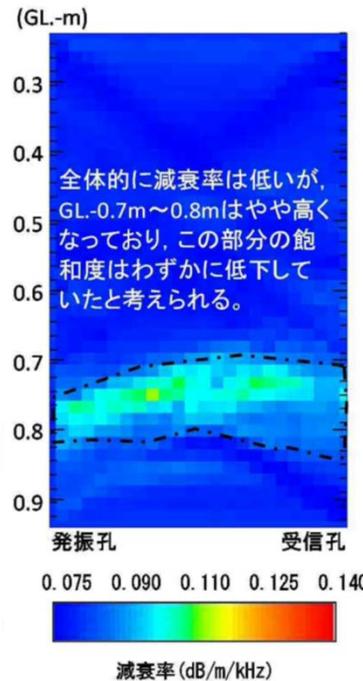
Case2 電極間すべてを改良したケース
3x3の改良体



電極間全体で比抵抗の低下が確認できる

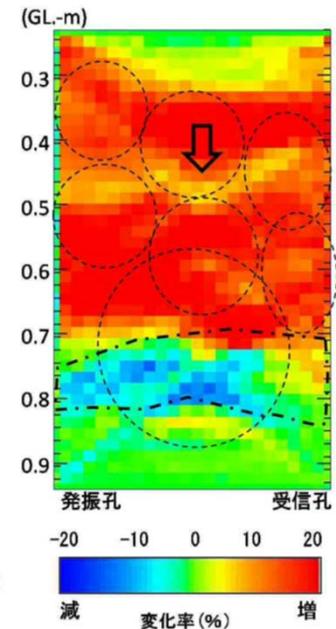


注入前の減衰率分布図



全体的に減衰率は低いが、
GL.-0.7m~0.8mはやや高くな
っており、この部分の飽
和度はわずかに低下して
いたと考えられる。

減衰率分布の差分



点線: 実際の薬液の浸透範囲
一点鎖線: 減衰率が減少した範囲

薬液注入 + 音響トモグラフィ

薬液注入 + 比抵抗トモグラフィ