

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 山口大学 大学院創成科学研究科

氏 名 : 吉本 憲正

研究課題名 : 分級構造を有する砂質土の繰り返しせん断挙動

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

分級構造を有する砂の液状化強度発現メカニズム

Mechanism of liquefaction strength development of sand with classified structure

山口大学 大学院創成科学研究科 准教授 吉本憲正

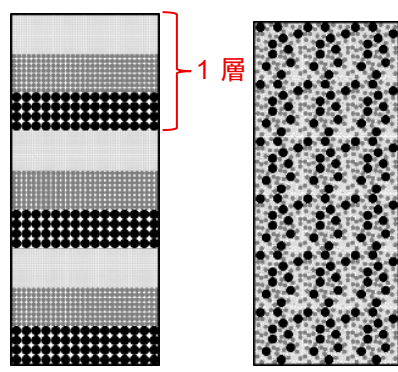
(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景・目的

不攪乱及び攪乱後の再構成試料の供試体を同密度で作製し、液状化試験を実施すると不攪乱供試体の方が高い液状化強度を発揮することが報告されている¹⁾。このような液状化強度差は、年代効果やミクロな粒子構造が消失した後の大変形領域においても存在し、その強度差が生まれる原因として、不攪乱供試体は分級構造を、再構成供試体は均質構造を有してことが要因の一つとして挙げられる。

分級構造とは、対象範囲において、粒径が大きい粒子ほど下層に堆積しているような層を形成するような構造のことである。図-1に分級構造及び均質構造の供試体模式図を示すが、(a) 分級構造の1層と示した部分のような堆積構造のことである。一方、均質構造とは、対象範囲で分級して堆積している試料を混合し、均質化したものであり、図-1(b)のようなイメージとなる。本研究における分級構造とは、既往研究²⁾と同様に粒径範囲がそれぞれ異なる粒子で構成される図中に赤で示している範囲を1層としている。図-1(a)は、3層で構成される分級構造の供試体模式図となる。

既往の研究³⁾より、排水単調条件下において分級構造のせん断強度の発現メカニズムは、大粒子のダイレイタンシー特性の影響が大きいことが明らかにされている。しかし、液状化に至るような非排水繰返しせん断において、両構造が具体的にどのような挙動の差異を示すかについては未解明である。そのため、本研究では、画像解析を適用し、供試体の繰返しせん断による変形挙動を分析することで、構造の違いによる液状化強度発現メカニズムを解明することを目的とする。



(a) 分級構造 (b) 均質構造
図-1 分級構造及び均質構造の供試体模式図

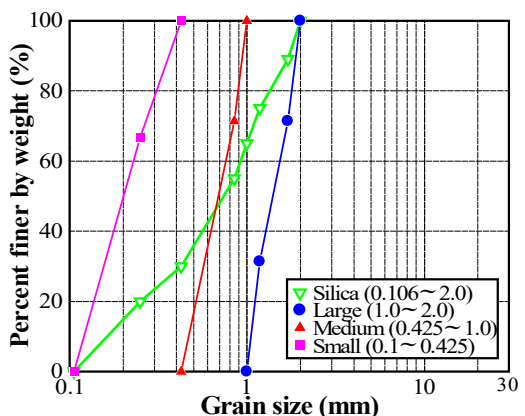


図-2 粒径加積曲線

表-1 物理特性

	Maximum dry density (g/cm ³)	Minimum dry density (g/cm ³)	Average grain size (mm)	Uniformity coefficient	Coefficient of curvature
Homogeneous	1.707	1.421	0.70	5.17	1.08
Large	1.570	1.345	1.50	1.59	0.81
Medium	1.624	1.348	0.69	1.62	0.91
Small	1.608	1.304	0.20	1.85	0.93

2. 実験方法

2.1 用いた試料

本研究で用いた試料の粒径加積曲線を図-2に示す。粒度分布は、既往の研究²⁾で用いられたものを参考に、同じ粒度に調整した三河珪砂を用い

た．分級構造では，粒径範囲が 1.0～2.00mm までを大粒子，0.425～1.0mm までを中粒子，0.106～0.425mm までを小粒子として堆積させた．また，表-1 に用いた三河珪砂の物理特性を示す．

2.2 供試体作製方法

供試体のサイズは，直径 50mm×高さ 100mm の円柱形である．本試験では，供試体を完全に飽和させるため水中落下法を採用し，モールド内に水を張った状態で砂を自重で沈降させ，水中で堆積させた．分級構造を有する供試体でも同様に，粒径の大きさに 3 種類に分け，順次堆積させた．分級構造でも層の組み合わせに応じて 6 層に分け，乾燥密度が 1.576g/cm³ になるよう所定の回数錘を自由落下させて作製した．

2.3 供試体条件

本研究の構造条件について分級 N 層を「CN」(N は層数を示している．)，均質構造を「HG」と称する．大粒子を「L」，中粒子を「M」，小粒子を「S」とし，構造条件が分級 3 層で堆積させた順番が大中小の場合「C3_LMS」となる．

2.4 三軸圧縮試験

本研究では，試験機の周囲に供試体を囲むように小型カメラを等間隔に 8 台設置している．この 8 台のカメラを用いてせん断中に供試体を一定間隔で同時に撮影を行うことにより，せん断中の供試体変形を画像として記録している．三軸圧縮試験の軸圧縮，側圧，背圧，軸変位等の計測や制御は PC により行っている．また，カメラによる供試体の撮影間隔は 10 秒，カメラの距離スケールは約 0.01mm/画素である．本試験では，カメラのスペースによる制約などから，試験機の制御プログラムを改良し，ひずみ制御⁴⁾による荷重振幅一定の繰返し三軸試験を行い，有効拘束圧 50kPa，背圧 200kPa の下，圧密非排水条件で試験を行った．載荷速度は 3mm/min に設定し，荷重振幅は 15N として液状化に至るまで繰返しせん断を行った．

2.5 三次元画像解析手法

供試体を覆うゴムスリーブに縦横それぞれ 5mm 間隔で直径 2mm の標点を描く．この供試体に対して，繰返しせん断中の標点の移動が取得できるように一定間隔で写真を撮影する．繰返しせん断試験後，MATLAB の幾何補正プログラムで全ての撮影画像を幾何補正し，得られた幾何補正画像に対して画像解析ソフト (Move-Tr/2D) を用いたパターンマッチング法により標点の xy 座標を取得する．その後，得られた平面座標について，奥行き方向の情報を加えるため，三角測量の考え方に基づき z 座標を求め，xyz の三次元座標を取得する．算出された座標を用いて各種ひずみを計算した．

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 実験結果

3.1 供試体全体の時刻歴結果

要素試験によって得られた各種構造条件における，供試体全体の軸荷重，軸変位，間隙水圧の時刻歴結果を図-3 に示す．図-3 より，均質構造ではせん断開始から 2 サイクル目の除

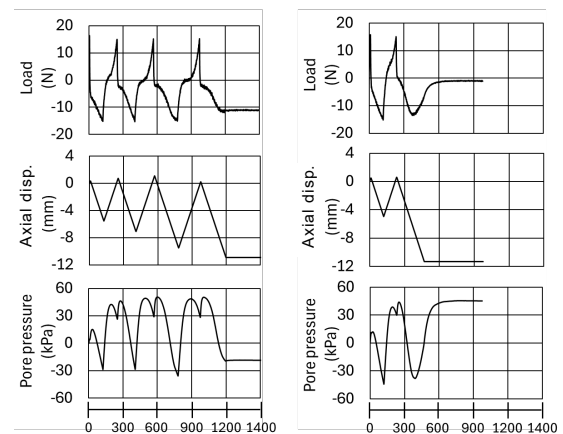
荷過程において、過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下による強度低下により、急激な繰返し荷重の減少が見られた。一方、分級構造では、繰返しせん断による1サイクル中の軸変位振幅が漸増するにともない、周期が次第に長くなる挙動を示し、液状化に至る繰返し回数が均質構造より多くなり、最終的には、4サイクル目において装置の伸張方向の変位の限界に達し装置が停止した。

図-4 に、均質構造及び分級構造の軸差応力・軸ひずみ関係を示す。いずれも圧縮側より伸張側に大きく軸ひずみが生じている。軸ひずみの蓄積過程において、分級構造の方が大変形に至るまでに多くのサイクルを要しており、液状化に対する抵抗が高いことがわかる。

3.2 供試体の局所ひずみ

図-5 に軸ひずみの時刻歴において各構造の画像解析を行った部分を色つきの線で示す。供試体の局所的变化が大きくみられる軸ひずみのピーク時に着目して解析を実施した。図-6 に均質構造及び分級構造の伸張時における供試体全体の軸ひずみが-5, -5.5, -7.0, -9.5%の時の局所軸ひずみ分布を色分けしたものを示す。図-6 より、均質構造では、供試体高さの中央部を中心として、上下対称な局所軸ひずみ分布を示し、供試体中央部分において、一様な局所軸ひずみ分布が生じている。一方、分級構造を有する供試体では、特定の層境界を起点として局所軸ひずみが増大する傾向が見られた。供試体全体の軸ひずみが増加するに伴い、変形は供試体下部に集中して発達する様子が確認できた。

次に図-7 に、各構造の1サイクル目の圧縮側及び伸張側のピーク軸ひずみ時の局所軸ひずみ分布を示す。分級構造では、大粒子、中粒子、小粒子を色分けして示している。図-7 より、均質構造においては、伸張側のピーク軸ひずみ時に、供試体中央部で局所軸ひずみが大きく発達するのに対し、分級構造では小粒子が存在する12, 13層目で局所軸ひずみが急増し始め、5,6層目を中心として供試体下部で局所軸ひずみが大きく



(a) 分級構造 (b) 均質構造
図-3 供試体全体の時刻歴結果

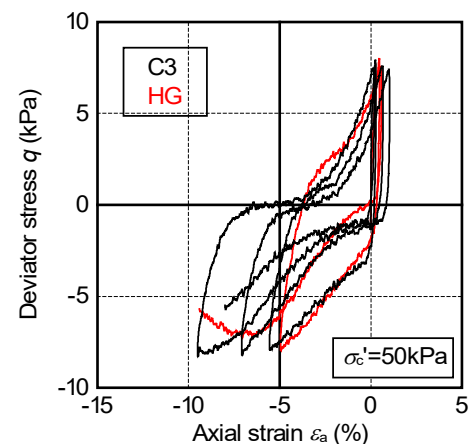
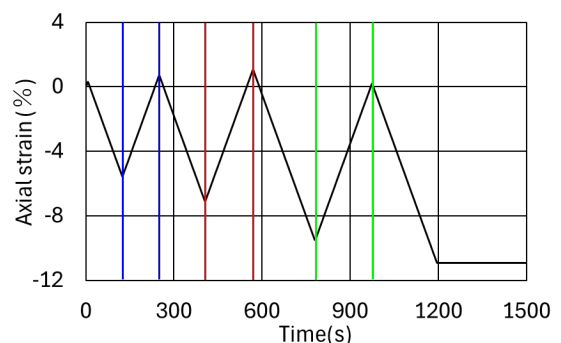
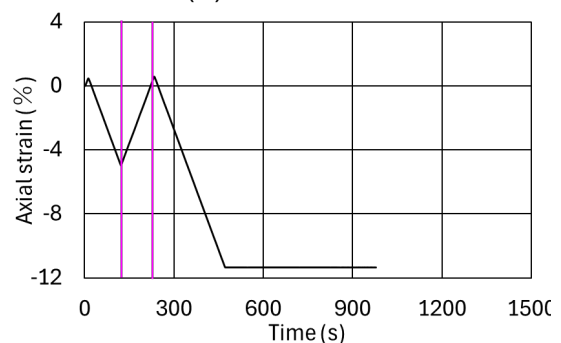


図-4 各構造の軸差応力・軸ひずみ関係



(a) 分級構造



(b) 均質構造

図-5 各構造の供試体画像解析部分

発生している。これは古山田ら³⁾の研究で明らかにされている通り、小粒子部分が弱層となり、局所的に大きく変形したためと考えられる。結果、弱層が存在することで大きく局所軸ひずみが生じた変形部分が均質構造よりも下方にずれた挙動となったと考えられる。

図-8(a)(b)に、各構造における所定の供試体全体の圧縮側及び伸張側の軸ひずみ時の局所体積ひずみの分布を示す。均質構造では、(a)(b)の圧縮側、伸張側ともに、局所体積ひずみが供試体全体に対して概ね一様に生じている。分級構造においては、伸張側載荷時に第10層付近を境として挙動が分かれ、それより下部では体積収縮、上部では体積膨張を示した。一方、圧縮側ではこの傾向が逆転し、下部で体積膨張、上部で体積収縮が生じる結果となった。このような供試体上下での相反する体積変化挙動は、局所的な過剰間隙水圧の不均一な分布を招き、液状化強度の差が生じる原因となっていると考えられる。

4. まとめ

- 1) 分級構造と均質構造では、初期乾燥密度が同じであっても液状化に至るまでの繰返し回数が分級構造の方が大きい値を示した。そのため、分級構造が液状化強度に影響及ぼす。
- 2) 伸張側に大きく軸ひずみが生じる条件の場合、同じ軸圧縮力の大きさで軸ひずみの蓄積過程において、分級構造の方が大変形に至るまでに多くの载荷サイクルを要しており、伸張側への液状化抵抗が高いことを示した。
- 3) 圧縮側における局所軸ひずみの結果より、均質構造が供試体中央で一様に局所軸ひずみが生じている一方で分級構造においては、小粒子の層を起点に、供試体下部付近で局所軸ひずみが大きく発生することが判明した。供試体の局所体積ひずみについて、均質構造では局所軸ひずみと同様に高さ方向に一様な局所体積ひずみの分布がみられた。分級構造では、供試体上下で別々の挙動を示し、伸張側載荷時には、下部において体積収縮、上部では体積膨張を示した。一方で圧縮側載荷時にはこの傾向が逆転し、

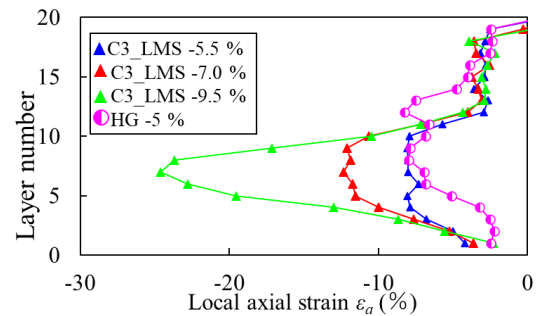


図-6 伸張側における局所軸ひずみ分布

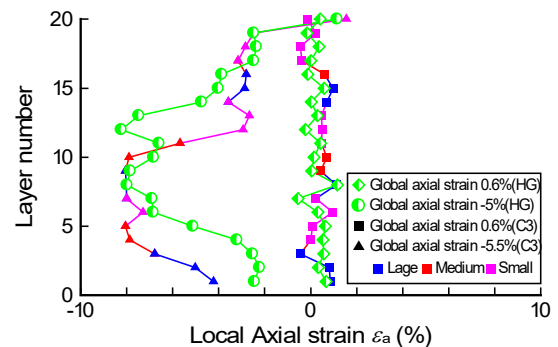


図-7 1サイクル目の圧縮側及び伸張側のピーク軸ひずみ時の局所軸ひずみ

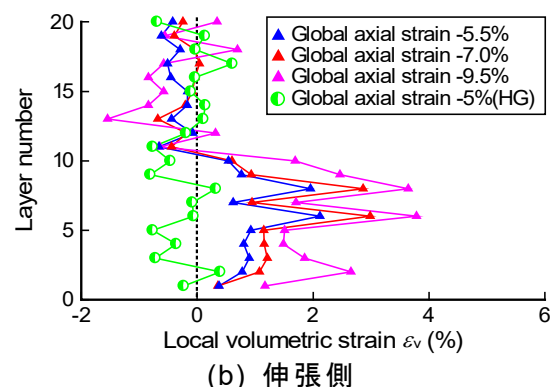
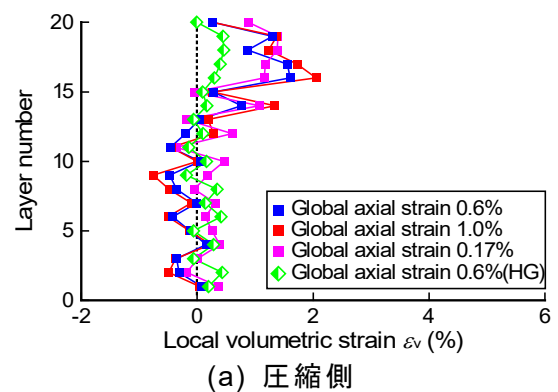


図-8 所定の供試体全体の軸ひずみ時の局所体積ひずみ分布

下部で体積膨張，上部で体積収縮が生じる結果となった．このことから供試体上下での相反する体積変化挙動は，局所的な過剰間隙水圧の不均一な分布を招き，液状化強度差の要因となっている可能性が示唆された．

参考文献

- 1) 小池令子，吉嶺充俊：砂の分級構造が液状化強度に及ぼす影響，土木学会第 57 回年次学術講演会講演集，Ⅲ-306, pp.611-612, 2002.
- 2) 長谷川実保，松村聡，高野大樹：分級構造を有する砂質土の強度変形特性（その 1），第 57 回地盤工学研究発表会講演集，20-4-2-05, 2022.
- 3) 古山田蒼汰，吉本憲正，多岐涼太，中田幸男：画像解析を用いた分級構造を有する砂質土の強度発現メカニズムの検討，地盤と建設，42 巻，1 号，pp.27-34, 2024.
- 4) 兵動正幸，四宮圭三，安福規之，村田秀一：定ひずみ速度繰返し三軸試験による粘性土と砂質土の動的強度について，土木学会論文集，No.523，Ⅲ-32, pp.9-18, 1995.

（ 発 表 論 文 ）

- 1) 森田晃生，古山田蒼汰，吉本憲正，中田幸男：分級構造を有する砂質土の繰返しせん断挙動，2026 年度土木学会中国支部研究発表会（投稿中）