

研 究 報 告

令和 7 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 : 分級及び積層構造を有する砂のせん断メカニズムの解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ～ 至 令和 7 年 3 月 31 日

分級及び積層構造を有する砂のせん断メカニズムの解明

Elucidation of Shear Mechanism of Sand with Classification and Laminated 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、液状化試験や三軸圧縮試験を実施すると、不攪乱供試体の方が高い液状化強度やせん断強度を発揮することが報告されている^{1),2)}。不攪乱供試体と再構成供試体の間で強度差が生じる原因として、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おり、堆積構造が異なることが一つの原因と考えられる。

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に堆積しているような構造のことである。一方、均質構造とは、対象範囲において、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る。そのため、対象範囲全体における粒度分布は分級構造と均質構造で同じであるが、高さ方向では分布が異なる。本研究における分級構造とは、既往の研究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範囲を1層とする。よって、図-1に示す分級構造及び均質構造の模式図における分級構造は、分級4層となる。

分級構造が高いせん断強度を発揮する要因として、異なる粒径の粒子が層を構成していることが考えられる。そのため、本研究では、画像解析を適用し、供試体局所の分析を実施し、分級構造のせん断強度発現メカニズムを解明することを目的とする。

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1.0～2.0mm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

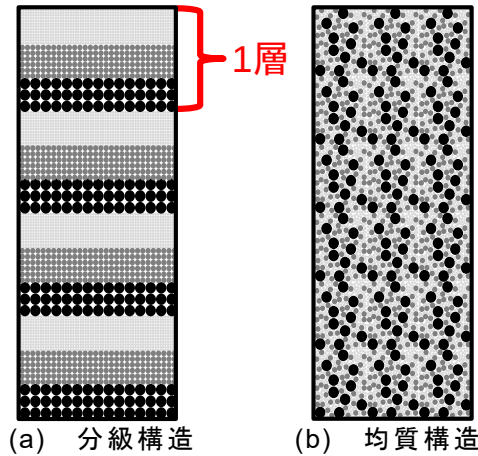


図-1 分級構造及び均質構造の供試体模式図

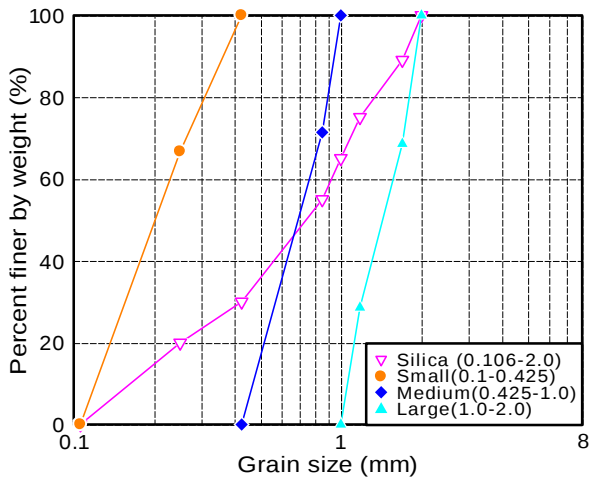


図-2 粒径加積曲線

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

積させた．また，表-1 に三河珪砂の物理特性を示す．

2.2 供試体作製方法

三軸圧縮試験の供試体のサイズは，直径 50mm×高さ 100mm の円柱状である．均質構造を有する供試体の作製方法は，ふるい分けた各粒径範囲の試料を再度混合し，6 層に分け，1 層につき 16.7mm になるよう所定の回数錘を自由落下させて作製した．分級構造を有する供試体でも同様に，粒径の大きさで 3 種類に分け，順番に堆積させた．分級構造でも層の組み合わせに合わせて 6 層に分け，乾燥密度が 1.532g/cm^3 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」，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，分級構造の堆積させた順番や各粒径範囲のみで構成される均質構造については，構造条件の後に「_」と一緒に添えるものとする．そのため，構造条件が分級 4 層で堆積させた順番が大中小のものは「C4_LMS」となり，大粒子のみで構成される均質構造は「HG_L」となる．

本研究で行った分級構造の供試体条件は，分級 2，3，4 層の 3 種類をそれぞれ「LMS」，「MSL」，「SLM」の順で堆積させた計 9 種類である．また，均質構造の供試体条件は，各粒径範囲の粒子のみで構成される 3 種類と，全ての粒径範囲を混合させたものの計 4 種類である．

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 Web 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．カメラによる供試体の撮影及び，三軸圧縮試験の側圧，背圧，軸変位等の計測や制御は PC により行っている．試験は，載荷速度 $0.1\%/min$ ，有効拘束圧 50kPa ，圧密排水条件で行った．撮影間隔は 10 秒である．また，カメラの距離スケールは約 $0.1\text{mm}/\text{画素}$ である．

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，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．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，奥行き方向を加えるため，三角測量の考え方に基づき z 座

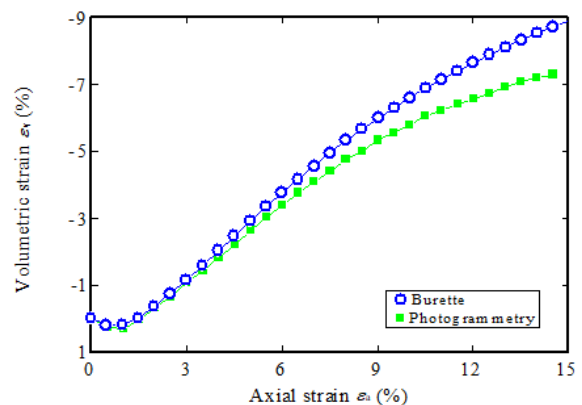


図-3 供試体全体におけるビューレット及び画像解析により得られる体積ひずみと軸ひずみの関係

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．

画像解析により得られた各種ひずみの精度について検討した．図-3 に、一例として試験時にビューレットの体積変化から求めた体積ひずみと、画像解析により得られた供試体全体の体積ひずみについて比較するために、体積ひずみと軸ひずみの関係を示す．図-3 より、ビューレットと画像解析の体積ひずみの誤差は、供試体全体の軸ひずみが 8%までは、1.0%以下におさまっており、その後徐々に誤差が大きくなっていく．供試体全体の軸ひずみ 15%では、誤差は約 1.7%となった．このことから、軸ひずみの小さい範囲において高い精度で画像解析が実施できることがわかる．

（実験調査によって得られた新しい知見）

3. 実験結果

3.1 供試体全体のせん断特性

図-4 に、供試体全体における各種均質構造と C4_LMS の主応力差と軸ひずみの関係を示す．各種分級構造はほぼ同じ挙動を示すため、図-4 では C4_LMS のみ示す．図-4 より、いずれの結果も载荷初期に急激な主応力差の増加を示し、軸ひずみ 3~5%の間で最大主応力差を示した後、緩やかに主応力差が低下する挙動を示した．また、いずれの構造条件においても、最大主応力差が現れてから主応力差が低下する挙動に至る過程で、供試体の中央部分において明確に樽状に変形した樽状変形部分が観察された．

図-5 に、供試体全体における各種構造条件の最大主応力差を示す．図-5 より、均質構造の最大主応力差について、HG_L が一番大きく、その次に HG_M, HG の順で大きく、HG_S が一番小さい最大主応力差であった．このことから、本研究で用いた試料においては、構成する粒子が大きくなるほど最大主応力差が大きくなる．分級構造の最大主応力差について、いずれの構造条件においても HG よりも大きい値を示した．このことから、分級構造は、分級による堆積構造の影響を受けることで最大主応力差が大きくなると考えられる．

図-6 に、画像解析により得られた供試体全体における各種均質構造と C4_LMS の体積ひずみと軸ひずみの関係を示す．図-6 より、いずれの結果も载荷初期に収縮挙動を示し、その後、膨張挙動へと推移する密な砂の典型的な挙動を示している．均質構造の膨張量について、HG_L と HG_M はほぼ同じ値を示し、次に HG_S が大きく、HG が一番小さい値を示した．このことから、粒子が大きいが方が膨張量が大きくなるといえる．また、分級構造の体積ひず

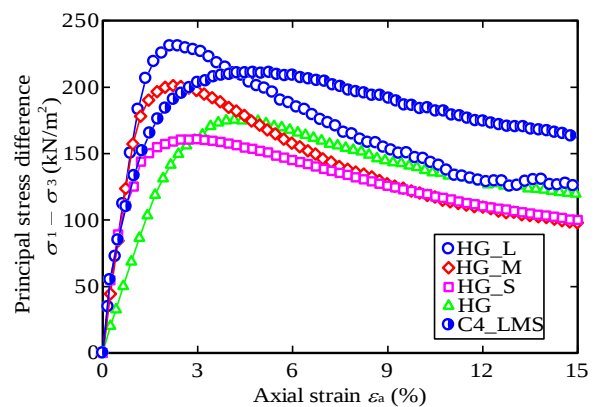


図-4 供試体全体における各種均質構造と C4_LMS の主応力差と軸ひずみの関係

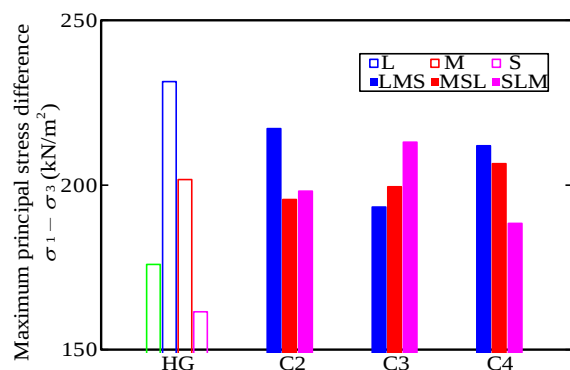


図-5 供試体全体における各種構造条件の最大主応力差

みは、HG より膨張量が大きくなることが確認できる。

3.2 供試体の樽状変形部分

三軸圧縮試験では、最大主応力差が現れ、供試体が破壊に至ると、図-7 に示すように、樽状に変形が集中する部分が見れる。そこで既往の研究³⁾を踏まえ、三軸圧縮試験において、樽状に変形している部分がせん断抵抗に大きく寄与していると考え、以降は、供試体の樽状変形部分について検討する。

以下に示す式(1)は、せん断強度の評価式⁴⁾である。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_3} = \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \right)_{\max} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}}{\sigma_3} \quad (1)$$

ここで、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は最大主応力差、 $d\varepsilon_v$ は体積ひずみ増分、 $d\varepsilon_a$ は軸ひずみ増分、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}$ は体積ひずみが収縮から膨張に移る変相位置における主応力差、変相時主応力差である。右辺第1項の最大主応力差が現れるときの体積ひずみ増分と軸ひずみ増分の比はダイレイタンスー係数となる。式(1)より、正規化された最大主応力差はダイレイタンスー係数と正規化された変相時主応力差の和で表されることを示している。

図-8 に、樽状変形部分における各種構造条件の局所最大主応力差とダイレイタンスー係数の関係を示す。図-8(a)より、各種分級構造の大粒子は HG_L と比べて、局所最大主応力差とダイレイタンスー係数はともに小さい値を示す。図-8(b)より、各種分級構造の中粒子は HG_M に比べて、局所最大主応力差とダイレイタンスー係数はともに、値は大きく変化していない。図-8(c)より、各種分級構造の小粒子は HG_S に比べて、局所最大主応力差とダイレイタンスー係数はともに大きい値を示す。このことから、せん断強度の高い大粒子はダイレイタンスー係数が低くなることで最大主応力差の値が小さくなり、せん断強度の低い小粒子はダイレイタンスー係数が高くなることで最大主応力差の値

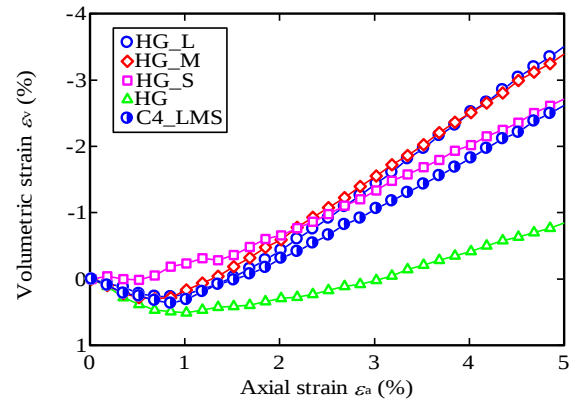


図-6 供試体全体における各種均質構造と C4_LMS の体積ひずみと軸ひずみの関係

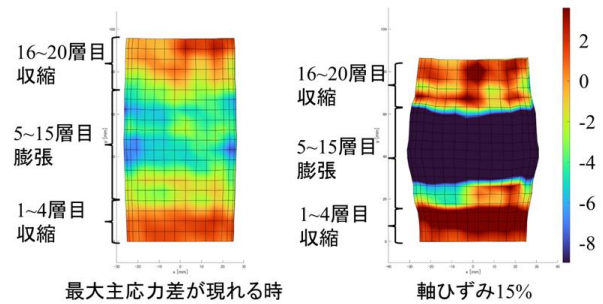
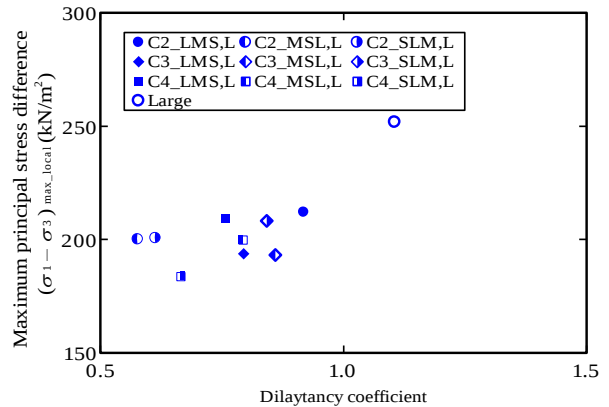
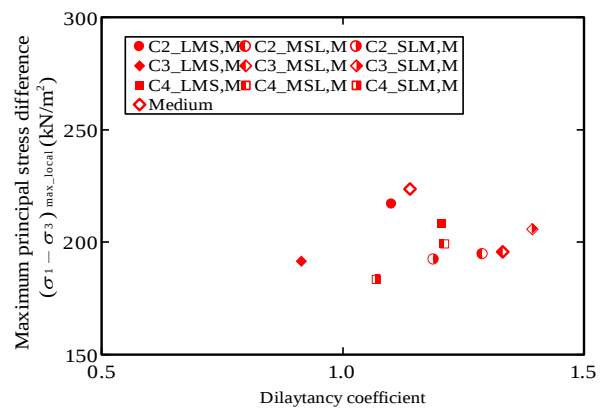


図-7 C4_LMS の最大主応力差が現れる直前と軸ひずみ 15%の時の要素の体積ひずみのコンター図



(a) 大粒子



(b) 中粒子

が大きくなることが確認された。

図-9 に、樽状変形部分における各種分級構造の各粒径の体積占有率を示す。体積は、それぞれ供試体全体において最大主応力差が現れるときの値である。図-9 より、いずれの分級構造においても小粒子の体積占有率が大粒子のものよりも、大きい割合を示している。このことから、樽状変形部分は、体積占有率が大きい小粒子の影響を強く受けると考えられる。図-8, 図-9 より、分級構造の樽状変形部分は、せん断強度が上昇した小粒子の影響を強く受けることで、せん断強度が上昇していると考えられる。

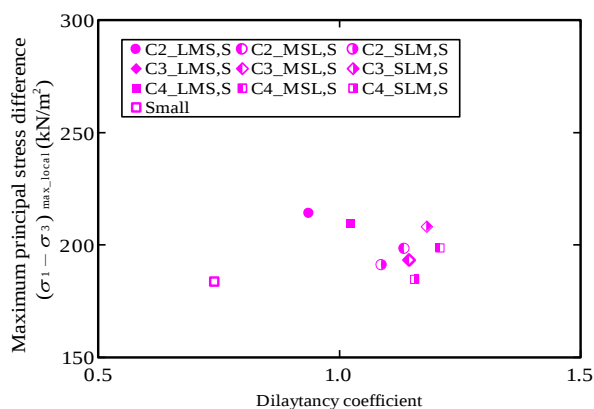
4. まとめ

- 1) 供試体全体の最大主応力差より、各種均質構造の結果から、本研究で用いた試料では、粒径が大きいほど最大主応力差の値は大きくなることがわかった。また、各種分級構造と HG は同密度であるが、各種分級構造の方が最大主応力差の値が大きくなった。
- 2) 樽状変形部分におけるダイレイタンスー係数について、分級構造において、大粒子はダイレイタンスー係数の値が小さくなることで最大主応力差の値が小さくなり、小粒子はダイレイタンスー係数が大きくなることで最大主応力差の値が大きくなることが確認された。
- 3) 樽状変形部分における各粒径の体積占有率について、分級構造における小粒子の体積占有率は大粒子のものよりも大きい値を示す。このことから、分級構造の樽状変形部分は、小粒子の影響を強く受けると考えられる。

以上のことから、分級構造の樽状変形部分において、せん断強度の低い小粒子がせん断強度の高い大粒子の影響を受けることでせん断特性が変化し、せん断強度が増加する。樽状変形部分は、高い体積占有率を示す小粒子の影響を強く受けることで、せん断強度が増加すると考えられる。これにより、分級構造は均質構造よりも強いせん断強度を発揮すると考える。

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) 多岐涼太, 小川泰世, 吉本憲正, 中田幸男: 平面ひずみ試験による分級構造を有する砂



(c) 小粒子

図-8 樽状変形部分における各種構造条件の局所最大主応力差とダイレイタンスー係数の関係

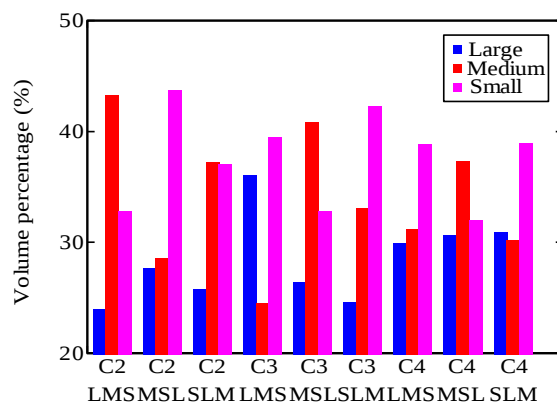


図-9 樽状変形部分における各種分級構造の各粒径の体積占有率

質土のせん断特性, 第 58 回地盤工学研究発表会, 2023.

- 4) 赤井浩一: 砂のせん断におけるダイレイタンスー効果, 土木学会論文集, 第 58 号, pp.76-81, 1957.

(発 表 論 文)

- 1) 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せん断強度とダイレイタンスー係数, 2025 年度土木学会中国支部研究発表会 (投稿中)
- 2) 古山田蒼汰, 吉本憲正, 中田幸男: 三軸圧縮試験における分級構造を有する砂質土のせん断強度発現メカニズム, 第 60 回地盤工学研究発表会 (投稿中)
- 3) 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三軸圧縮試験におけるせん断強度とダイレイタンスー係数, 令和 7 年度土木学会全国大会 (投稿中)