

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

Investigation on Strength Development Mechanism of Sandy Soil with Layered Structure Using Image Analysis

古山田 蒼汰¹⁾, 吉本 憲正²⁾, 多岐 涼太³⁾, 中田 幸男⁴⁾

1) Sota KOYAMADA, 修士課程, 山口大学大学院創成科学研究科, e005@yamaguchi-u.ac.jp

2) Norimasa YOSHIMOTO, 准教授, 山口大学大学院創成科学研究科, nyoshi@yamaguchi-u.ac.jp

3) Ryota TAGI, 技官, 国土交通省川崎国道事務所計画課, tagi-r8310@mlit.go.jp

4) Yukio NAKATA, 教授, 山口大学大学院創成科学研究科, nakata@yamaguchi-u.ac.jp

分級構造を有する不攪乱供試体の方が, 同じ乾燥密度の均質構造を有する再構成供試体よりもせん断強度が高い. 本研究では, 堆積させる順番が異なる砂質土に対して一連の平面ひずみ圧縮試験を実施, 画像解析より供試体の全体及び局所の変形を観察することで, 強度が生じるメカニズムを調査した. その結果, せん断帯の形成には層を構成する粒子の粒径が関係していた. また, せん断帯を含む層において分級構造は均質構造に比べて, 大粒子の最大主応力差の値は小さくなり, 小粒子の最大主応力差の値は大きくなっていった.

キーワード: 分級構造, 画像解析, せん断帯, コンター図, 粒径 (IGC: D-3, D-6)

1. はじめに

不攪乱及び再構成供試体に対して同じ密度で液状化試験を実施すると, 不攪乱供試体の方が高い強度を発揮することが確認されている^{1)~3)}. この強度の差は, 年代効果やミクロな粒子構造が消失した大変形領域でも存在する. これは, 再構成供試体は均質構造を有しており, 不攪乱供試体は分級構造を有していることが原因であると考えられている. つまり, 乾燥密度や相対密度だけでは液状化強度を正しく捉えられない可能性があるため, 構造による影響も考慮する必要があることを示唆している. これらの研究では, 液状化強度が高くなることを報告するに留まっており, 強度発現メカニズムについては未解明である.

ここで, 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, 均質化したものとなる. 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, 高さ方向では粒度分布は異なる. 分級構造は, 土石流などが発生した際に, 粒径の大きいものから堆積することにより形成される. 現在, 多くの設計では, 現場と同じ密度に調整された再構成供試体の試験結果を使用している. その場合, 構造による影響が考慮されないことが懸念される.

長谷川ら⁴⁾や松村ら⁵⁾は, 均質構造や分級構造を有する砂質土の三軸圧縮試験を実施するとともに, X線CTを用いることで, 載荷途中の供試体に生じる体積変化特性を調査している. 結果として, 均質構造に比べて分級構造において最大荷重が高いこと, 分級構造で

は, 最大粒径層の層内やその境界部で, 均質構造と比べて局所的に大きな膨張傾向があることを報告している. そして, 分級構造の強度発現のメカニズムを検討している.

多岐ら⁶⁾は, 均質構造や分級構造を有する砂質土の平面ひずみ圧縮試験を実施するとともに, 画像解析により, 圧縮試験中の供試体に生じる変形の観察を行っている. 結果として, 最大主応力差は密度に依存することなく, 堆積構造の影響を強く受けること, 均質構造に比べて分級構造において最大主応力差の値が大きいことを報告している.

上述したように, 既往の研究では, 画像解析から最大粒径層が膨張傾向にあることは言及しているものの, 粒径ごとの層にわけて, 対象層の応力ひずみ関係を示すなど詳細な分析は実施されていない.

本研究では, 均質構造や分級構造を有する砂質土に対して平面ひずみ圧縮試験を実施するとともに, せん断時の供試体画像に対して画像解析を実施する. この際, 層ごとの局所の主応力差や体積ひずみ等の変形を計算することにより分級構造の強度発現メカニズムについて検討する.

2. 試験方法

2.1 用いた試料

図-1に, 均質構造の供試体作製に用いた三河珪砂(Silica (0.106-2.0))の粒径加積曲線を示す. 図中には, 分級構造の供試体作製のために, ふるい分けした試料も併せて示している. それらは, 粒径範囲が1.0~2.0mm

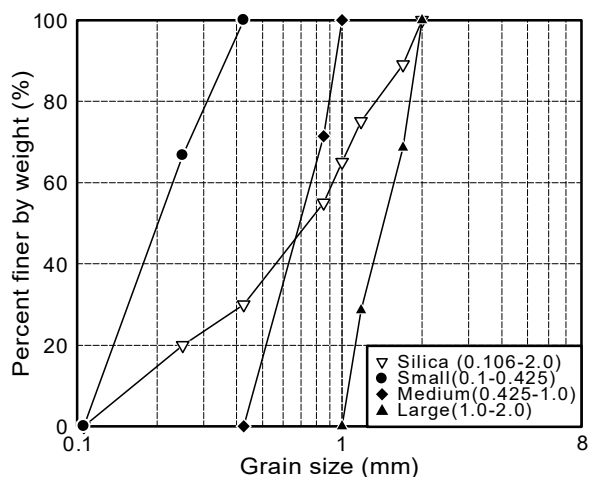


図-1 粒径加積曲線

表-1 用いた試料の物理的特性

	Maximum dry density (g/cm ³)	Minimum dry density (g/cm ³)	Average grain size (mm)	Uniformity coefficient	Coefficient of curvature
Homogeneous (0.106~2.0)	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

までを大粒子 (Large), 0.425~1.0mm までを中粒子 (Medium), 0.106~0.425mm までを小粒子 (Small) としている。それぞれの平均粒径は大粒子が 1.5mm, 中粒子が 0.72mm, 小粒子が 0.25mm である。

表-1 に、三河珪砂及び大粒子, 中粒子, 小粒子の物理特性を示す。均質構造の供試体作製に用いた三河珪砂は粒径幅が広く, ならかな粒度を有している。三河珪砂を分級構造用に三分割したそれぞれの試料 (大粒子, 中粒子, 小粒子) の粒度は, 均等係数や曲率係数が近く, 平均粒径のみが大きく異なるような試料となっている。

2.2 試験条件

表-2 に、本研究の実験における供試体の構造条件を示す。先述の通り, 供試体の高さ方向に粒度分布がすべて一定のものを均質構造と定義し, 高さ方向に異なる粒度の層で構成されるものを分級構造と定義する。表-2(a)は分級構造について示している。分級構造の供試体は, 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。サンプリングをする際の地層のどこを対象とするかにより, 層順が変わることを想定するために, 1 層内で堆積させる順番を変えたものを 3 種類作製した。また, 堆積させた供試体の下部からの順番を「_」と一緒に添えるものとする。そのため, 供

表-2 供試体の構造条件

(a) 分級構造

Structure	Classified 4 layer		
	Initial dry density (g/cm ³)	1.532	1.537
Category	C4_LMS	C4_MSL	C4_SLM
Structural Examples			

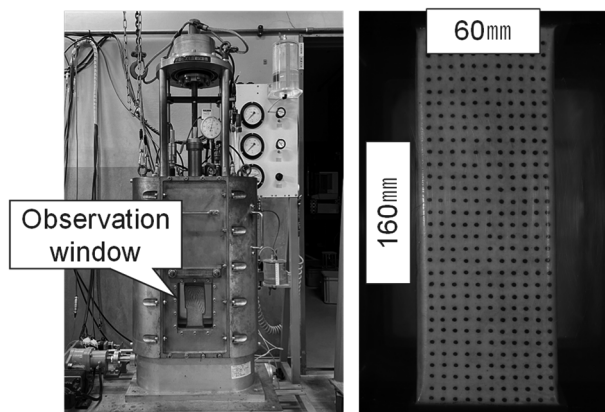
(b) 均質構造

Structure	Homogeneous			
	Initial dry density (g/cm ³)	1.668	1.530	1.530
Category	HG	HG_L	HG_M	HG_S
Structural Examples				

試体下部から大中小の順番で堆積させたものは「C4_LMS」となる。表-2(b)は, 均質構造について示している。均質構造の供試体は, ふり分けした各粒径範囲の試料を再度混合させたものと大粒子, 中粒子, 小粒子のみで構成されるもの計 4 種類を作製した。また, 各粒径範囲の試料を混合させたものや各粒径範囲の試料のみを「HG」とし, 各粒径範囲のみで構成されるものを「_」と一緒に添えるものとする。そのため, 均質構造のうち大粒子のみで構成されるものは「HG_L」となる。

2.3 供試体作製方法

供試体のサイズは, 高さ 160mm, 幅 60mm, 奥行き 80mm である。試料は気乾状態であり, 供試体は, 錘を自由落下できるランマーを用い, 落下回数を管理することでエネルギー一定のもと作製した。供試体の作製方法について, 供試体を 12 層に分け, 1 層当たり錘を 10 回, 合計 120 回自由落下させることで供試体を作製した。これにより, 供試体作製時のエネルギーをすべての構造について一定に管理している。錘を落下させ



(a) 平面ひずみ試験機 (b) 供試体画像

図-2 試験機及び供試体画像

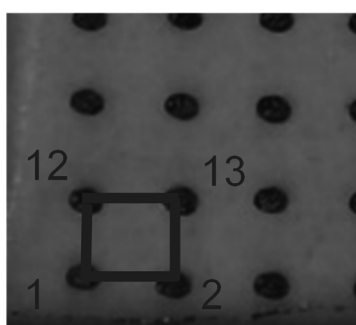


図-3 供試体画像拡大図

た後、層の表面を乱すことで、層の境界をなじませやすくした。

使用したランマーは、錘の重さが 127.70g で落下高さが 72.36mm であり、供試体と接する面の直径は 47.88mm の円形である。供試体の作製のしやすさとエネルギー管理を可能とするため、本ランマーを使用した。

供試体の初期乾燥密度は表-2 に示す通りで、C4_LMS と C4_SLM 及び HG_L と HG_M が約 1.53g/cm³、C4_MSL が約 1.54g/cm³、HG が約 1.69g/cm³、HG_S が約 1.66g/cm³ であった。

2.4 試験条件及び計測パラメータ

平面ひずみ圧縮試験は、拘束圧 100kPa の下、気乾状態、圧密排気条件の下で行った。軸ひずみ速度は 0.1%/min とし、軸ひずみ 15% で試験を終了した。なお、軸荷重は圧力室内に設置している荷重計で、拘束圧は圧力室に設置している圧力計で、軸変位は圧力室外に設置している変位計で、それぞれ計測している。ペダスタルにはポーラスメタルを用いており、供試体との境界部分にはろ紙を敷いた。供試体全体の軸ひずみにおいては、軸変位計を用いて測定した変位を供試体の圧密後の高さで除して軸ひずみを算出している。

図-2 に平面ひずみ試験機と、観察窓から見た供試体

の画像を示す。本装置は、平面ひずみ条件としている面をアクリル板で拘束し、その面から供試体が観察可能となっている。試験中は、デジタルカメラによりせん断時における供試体表面の撮影を行っている。本研究で用いたカメラの有効画素は、2230 万画素である。

2.5 画像解析による変形計測と体積ひずみの算出方法

本研究では、圧密排気条件で、供試体内部を飽和状態にしていないため、せん断時にビューレットへ流入する水の移動量から体積ひずみを計算することができない。また、分級構造のような均質な状態ではない供試体条件では、供試体内の各粒径の層ごとに異なる変形が生じている可能性もある。そのため、せん断中の体積ひずみについては、供試体の撮影面の奥行方向に均一に変形していると仮定して、画像解析により、観察面の変形量から求めることとした。

画像解析は、高さ 160mm、幅 60mm の供試体側面のせん断時における変化を 10 秒に 1 枚の間隔で撮影した画像を用いて行った。

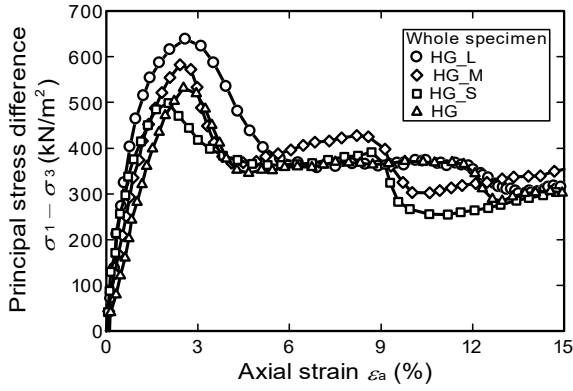
画像解析の流れを説明する。最初に、撮影画像全てに対して幾何補正を行い、カメラのレンズによる画像のひずみを補正する。幾何補正は「MATLAB」を用い、画像解析用の関数を組み合わせて実施している。幾何補正後の画像に対して、2 次元動画計測ソフトウェア「Move-tr/2D」を用い、図-2 に示した標点の座標を取得する。標点は、メンブレンにマジックを用いて点を打っている。標点の間隔は、多岐ら⁶⁾の研究と同様に 5mm とした。得られた座標結果を用いて、体積ひずみを算出している。画像は 1pixel あたり約 0.06mm となっている。

画像解析による体積ひずみの算出方法について詳述する。図-3 は、図-2 に示した観察窓から見た供試体表面の画像を拡大したものである。上述した手順で標点の座標を求めた後、図に示すように、ある四角形要素について、以下の式(1)を上下の辺に、式(2)を左右の辺に用いて x 軸ひずみ、y 軸ひずみをそれぞれ求める。ここで、「 l 」は四角形要素の辺のひずみであることを表す。

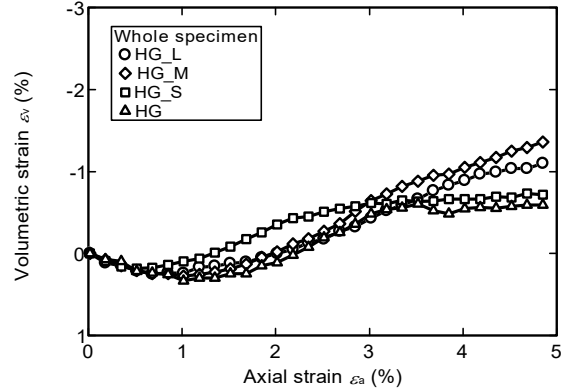
$$\varepsilon_x'' = \frac{(x_{i+1}-x_i)_n - (x_{i+1}-x_i)_0}{(x_{i+1}-x_i)_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y'' = \frac{(y_{i+1}-y_i)_n - (y_{i+1}-y_i)_0}{(y_{i+1}-y_i)_0} \quad (2)$$

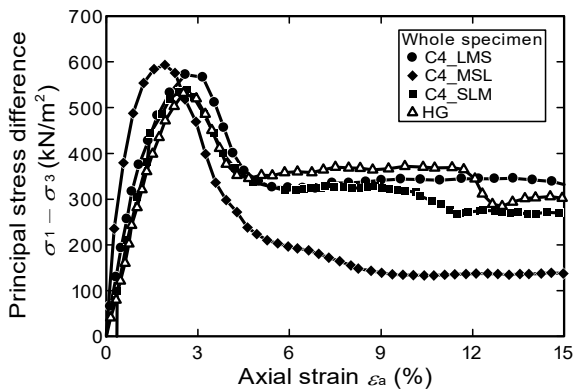
ここで、 ε_x'' は辺の x 軸ひずみ、 ε_y'' は辺の y 軸ひずみ、x は要素内の標点の x 座標、y は要素内の標点の y 座標を示している。また、 $i+1$ は標点 i の右隣の要素を、 $i+11$ は標点 i の上の要素を表す。つまり、 $(x_{i+1}-x_i)_n - (x_{i+1}-x_i)_0$ 、 $(y_{i+1}-y_i)_n - (y_{i+1}-y_i)_0$ はそれぞれある画像の四角形要素の x 軸及び y 軸方向の長さを、 $n=0$ のときは初期の供試体における値を表している。ある四角形要素の x 軸ひずみ ε_x'' 、y 軸ひずみ ε_y'' は上下及び左右の式(1),(2)より求められる辺の軸ひずみをそれぞれ平均したもの



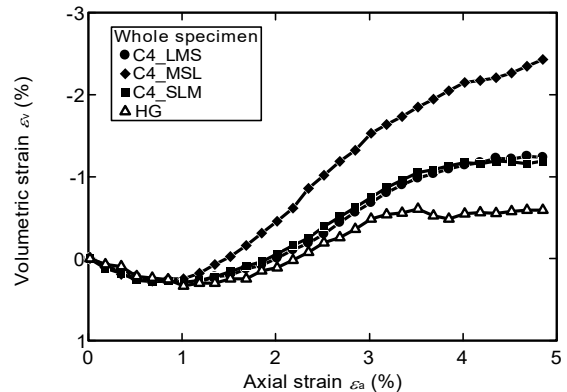
(a) 均質構造



(a) 均質構造



(b) 分級構造



(b) 分級構造

図-4 供試体全体における各種構造条件の主応力差と軸ひずみの関係

図-6 供試体全体における各種構造条件の体積ひずみと軸ひずみの関係

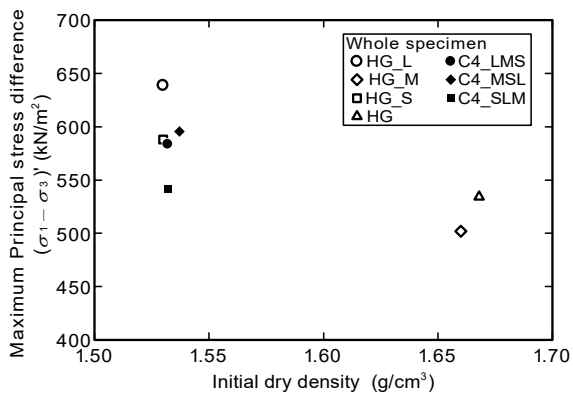


図-5 各種構造条件の最大主応力差と初期乾燥密度の関係

を用いる。以下の式(3)を用いて体積ひずみを求める。ここで、「'」は四角形要素のひずみであることを表す。

$$\varepsilon_v' = \varepsilon_x' + \varepsilon_y' \quad (3)$$

ここで、 ε_v' は要素の体積ひずみ、 ε_x' は要素のx軸ひずみ、 ε_y' は要素のy軸ひずみを示している。体積ひずみは、供試体は奥行き方向に均一に変形していると仮定していることから、面積ひずみと一致している。供

試体内の全ての四角形要素について体積ひずみを計算し、合計すると供試体全体の体積ひずみを得られる。

3. 供試体全体のせん断特性

3.1 供試体全体のせん断挙動

図-4に、供試体全体における各種構造条件の主応力差と軸ひずみの関係を示す。図-4(a)(b)より、各種構造条件において载荷初期に急激な主応力差の増加を見せ、軸ひずみが約2~3%の時ピークに達した。その後、軸ひずみが約4~5%まで主応力差が著しく低下した。軸ひずみが約5%以降はほぼ一定の値に落ち着く。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一定の値に落ち着くまでの間に一つ目のせん断帯が発生した。その後、再び主応力差が低下するのは二つ目のせん断帯が発生したからである。

図-5に各種構造条件における最大主応力差と初期乾燥密度の関係を示す。図-5より、均質構造の最大主応力差について、HG_Lが一番大きい値を示し、その次にHG_M、HGの順で大きく、HG_Sが一番小さい最大

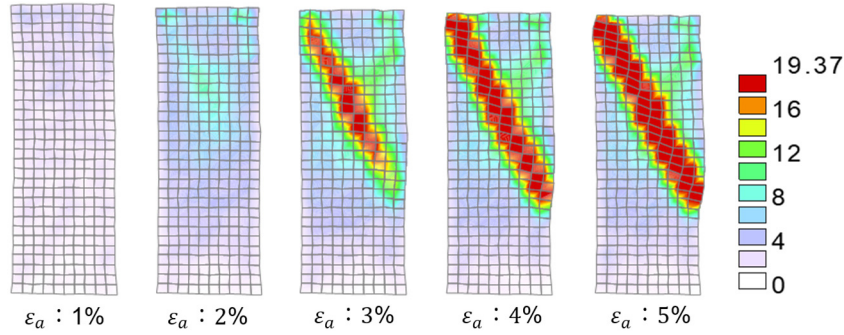


図-7 HGの軸ひずみ1%ずつの最大せん断ひずみのコンター図

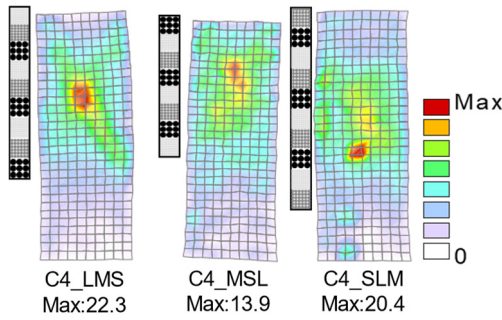


図-8 各種分級構造の最大主応力差が現れるときの最大せん断ひずみのコンター図

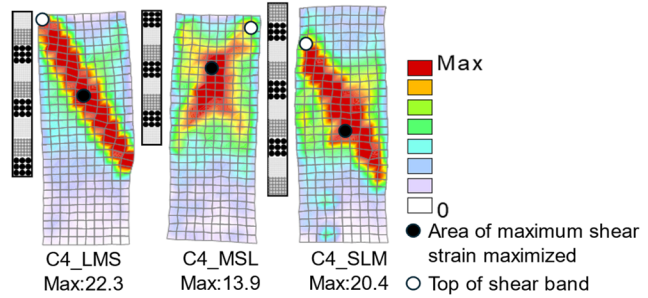


図-9 各種分級構造の二本目のせん断帯が現れる直前の最大せん断ひずみのコンター図

主応力差であった。このことから、粒子が大きくなるほど最大主応力差が大きくなるのがわかる。分級構造の最大主応力差について、HGよりC4_LMSとC4_MSLは大きい値を示し、C4_SLMはほぼ同じ値を示した。初期乾燥密度がC4_SLMよりもHGの方が大きいことを考慮すると、同密度であればHGよりも大きい値を示したと考えられる。このことから、層の順番を入れ替えた分級構造においても密度に依存することなく、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の値が大きくなると考えられる。

図-6に、供試体全体における各種構造条件の体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図-4において、いずれの構造条件も軸ひずみが5%以降は一定の値に落ち着くことから、体積ひずみについては軸ひずみ5%までで表示している。図-6(a)(b)より、いずれの構造条件においても軸ひずみが約1%までは収縮挙動を示し、その後は膨張挙動を示す。図-6(b)より、体積ひずみについて、いずれの分級構造もHGに比べて膨張量が多いことがわかる。

3.2 最大せん断ひずみのコンター図

各種分級構造における、せん断帯の発達過程について検討する。本研究では、最大せん断ひずみのコンター図を用いてせん断帯の発達過程を調査する。各要素

の最大せん断ひずみは、以下の式(4)を用いて各要素のせん断ひずみを算出し、その値を式(5)に代入することで算出した。

$$\gamma_{xy}' = \left| \frac{(x_{i+1}-x_i)_n - (x_{i+1}-x_i)_0}{(y_{i+11}-y_i)_0} \right| + \left| \frac{(y_{i+11}-y_i)_n - (y_{i+11}-y_i)_0}{(x_{i+1}-x_i)_0} \right| \quad (4)$$

$$\gamma_{max}' = \sqrt{(\epsilon_x' - \epsilon_y')^2 + \gamma_{xy}'^2} \quad (5)$$

ここで、 γ_{xy}' は要素のせん断ひずみ、 γ_{max}' は要素の最大せん断ひずみを表す。最大せん断ひずみは、モールのひずみ円の半径を意味している。コンター図は、最大せん断ひずみを四分割した値を四角形要素を構成する各標点に割り振ることで作成した。

図-7に、HGの供試体全体の軸ひずみ1%ずつのコンター図を示す。コンター図は、最大主応力差が現れた直後にせん断帯が形成されることから、最大主応力差が現れるときの最大せん断ひずみの最大値が赤色となるように作成している。図-7より、せん断帯が発生する前は十字に最大せん断ひずみが現れる。その後、十字の中心からせん断帯は発達していく。この時、十字の下端部よりも上端部に顕著に発達していく。この図より、最大せん断ひずみがたすき状に集中して発生しており、せん断帯が形成されていることがわかる。

図-8に、各種分級構造の最大主応力差が現れるときのコンター図を示す。図-8のコンター図は、図-7と同様の方法で作成している。コンター図の横に、分級構

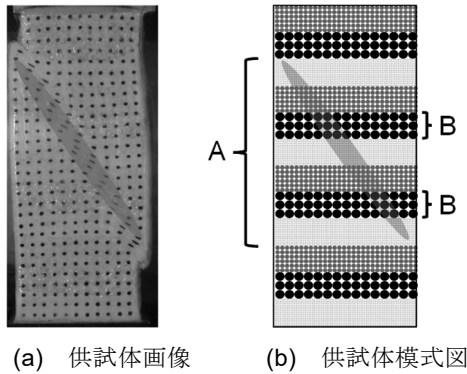


図-10 せん断帯発生時における供試体の画像及び供試体模式図

造を成す各粒子の層の位置を示している。図-8より、いずれの分級構造においても、大粒子から中粒子にかけて最大せん断ひずみの最大値が現れる。このことから、いずれの層序においても、供試体内での位置は異なるものの、大粒子と中粒子の部分で最大せん断ひずみが供試体内で最大となることがわかる。

図-9に、各種分級構造の二本目のせん断帯が現れる直前のコンター図を示す。図-9のコンター図も、図-7と同様の方法で作成し、コンター図の横に、分級構造を成す各粒子の層の位置を示している。図-9内の黒い丸は、図-8において最大せん断ひずみが最大化した部分で、白い丸は一本目のせん断帯の上端部を示す。図-9より、いずれの分級構造においてもHGと同様に最大せん断ひずみがたすき状に集中して発生しており、いずれもせん断帯が形成されていることがわかる。また、いずれの分級構造においてもせん断帯の上端部は、図-8の最大せん断ひずみが大きく発生している個所から斜め上の小粒子が配置されている付近に位置している。このことから、このような分級構造においては、せん断帯の形成には層を構成する粒子の粒径が関連していると考えられる。

4. せん断帯を含む層のせん断特性

4.1 せん断帯を含む層の調査方法

図-10に、せん断帯発生時における供試体の画像及び供試体模式図を示す。楕円はせん断帯を表している。せん断破壊はせん断帯の発生する範囲で生じている。そのため、せん断帯が含まれる図-10(b)のAで示す範囲の層がせん断特性に大きく寄与していると考えられる。よって、せん断帯を含む層における大粒子、中粒子、小粒子の各粒径範囲の層のせん断特性について調査する。例えば、大粒子のせん断特性については、Bで示す範囲の層の要素の各種ひずみなどを平均して求めたものを用いて検討する。この時、図-4より軸ひずみ

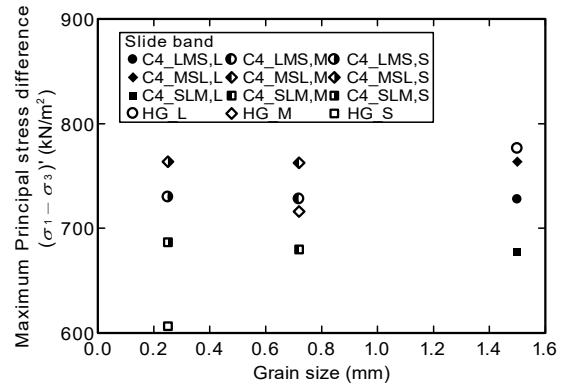


図-11 各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における最大主応力差と平均粒径の関係

5%以降は一定の値に落ち着くことから、供試体全体の軸ひずみ5%までの画像を用いて画像解析を行った。

せん断帯を含む層(赤実線で囲まれた範囲内)における各要素(図-3中に示す4つの標点で構成される四角形部分を要素として定義している。)の主応力差は以下の式(6)によって求めた。

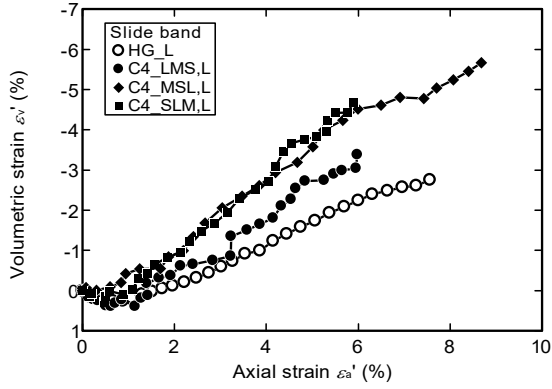
$$(\sigma_1 - \sigma_3)' = \frac{P}{A} \times \frac{100 - \varepsilon_y'}{100 - \varepsilon_v'} \quad (6)$$

ここで、 $(\sigma - \sigma)$ は要素の主応力差、 P は供試体全体の軸荷重、 A は供試体全体の断面積を示している。それぞれの粒子で構成される層全体の主応力差は、それぞれの粒子のみが含まれる要素の主応力差を平均して求めた。そのため、大粒子の層の主応力差は図-10の点線で囲った範囲内にある要素の主応力差を平均化したものとなる。軸ひずみも同様の方法で求めた。

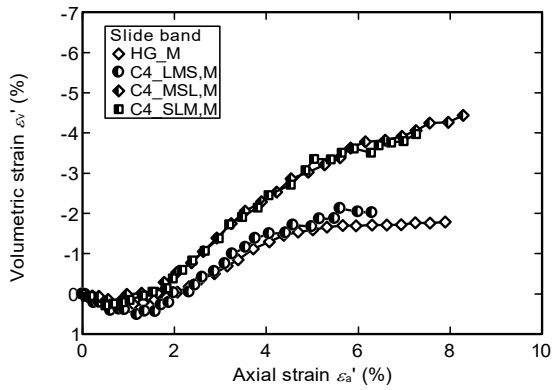
4.2 せん断帯を含む層のせん断挙動

図-11に、各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における最大主応力差と平均粒径の関係を示す。図-11より、各種分級構造の大粒子の最大主応力差は、HG_Lよりも小さい値を示した。中粒子の最大主応力差は、HG_Mと比べてC4_LMSとC4_MSLは大きい値を示し、C4_SLMは小さい値を示した。小粒子の最大主応力は、いずれもHG_Sよりも大きい値を示した。以上より、分級構造において大粒子の最大主応力差は小さくなっており、小粒子の最大主応力差は大きくなってきている。このことから、分級構造内の各粒子はお互いに影響を与え、各粒子の均質構造の最大主応力差とは、異なる値を示すと考えられる。

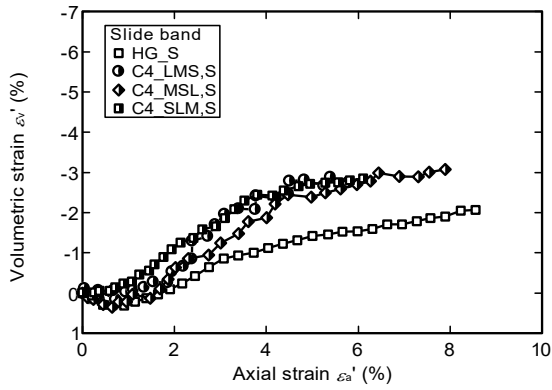
図-12に、各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図-12(a)(b)(c)より、いずれの分級構造においても、それぞれ同じ粒径のみで構成される均質構造に比べて概ね膨張量が多くなっている。膨張量の増加は、大粒子が一番多くなっており、その次に中粒子が多く、小粒子の



(a) 大粒子



(b) 中粒子



(c) 小粒子

図-12 各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における体積ひずみと軸ひずみの関係

膨張量の増加が一番少ない。このことから、分級構造にすることで体積の膨張量は多くなり、粒径が大きいほどその影響を強く受けると考えられる。

4.3 せん断帯を含む層のダイレイタンスー特性

各種構造条件のせん断体内の各粒子の層におけるダイレイタンスー係数について検討する。ダイレイタンスー係数とは、体積ひずみ増分と軸ひずみ増分の比で

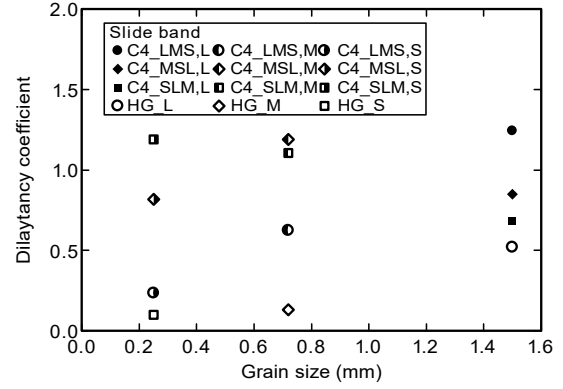


図-13 各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子におけるダイレイタンスー係数と平均粒径の関係

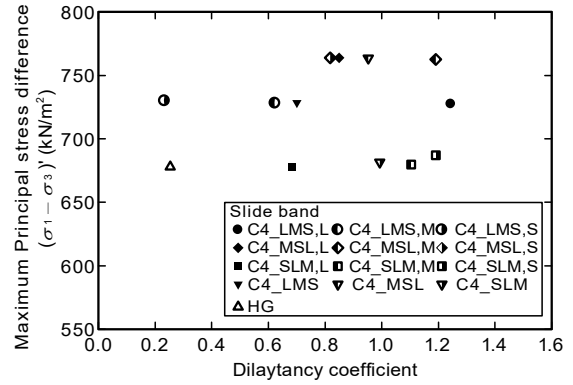


図-14 各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における最大主応力差とダイレイタンスー係数の関係

表されるせん断特性を評価する値の一つである。ダイレイタンスー係数は以下に示す式(7)^{7), 8)}により表される。

$$\left(\frac{d\varepsilon_v'}{d\varepsilon_a'}\right)_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)'}{\sigma_3} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}'}{\sigma_3} \quad (7)$$

ここで、 $d\varepsilon_v'$ は体積ひずみ増分、 $d\varepsilon_a'$ は軸ひずみ増分を、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}'$ は変相時主応力差を示している。変相時主応力差とは、体積ひずみが収縮挙動から膨張挙動へと転ずる体積変化の生じない、変相位置における主応力差である。式(7)より、ダイレイタンスー係数は最小主応力で正規化された最大主応力差と変相時主応力差の差で表されることを示している。本実験では、ダイレイタンスー係数を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で求めた。

図-13に、各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子におけるダイレイタンスー係数と平均粒径の関係を示す。図-13より、いずれの分級構造においても、それぞれ同じ粒径のみで構成される均質構造に比べて大きい値を示す。このことから、分級構造にすることで各粒子のダイレイタンスー係数の値は大きくなることがわ

かる。

図-14に、各種構造条件のせん断帯を含む層の各粒子における最大主応力差とダイレイタンスー係数の関係を示す。逆三角形の記号は、各種分級構造の結果を平均したものである。HGは、すべての粒子を混合させた供試体である。図-14より、HGに比べてC4_LMSとC4_MSLの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。C4_SLMは、ダイレイタンスー係数はHGよりも大きい値を示すが、最大主応力差はほぼ同じ値である。初期乾燥密度がC4_SLMよりもHGの方が大きいことを考慮すると、同密度であれば最大主応力差もHGより大きい値を示したと考えられる。このことから、せん断帯内を含む層において分級構造は、ダイレイタンスー係数が大きくなることでHGよりも最大主応力差が大きくなることわかる。

5. 結論

本研究では、堆積させる順番が異なる分級構造に対して平面ひずみ圧縮試験を実施し、分級構造を有する砂質土の強度発現メカニズムを調査した。試験結果より、層の順番を入れ替えても、分級構造の方が均質構造よりも初期乾燥密度が低いにも関わらず、供試体全体の最大主応力差が高くなった。せん断時の供試体全体の体積ひずみの膨張量も同様に層の順番に関係なく、均質構造よりも各種分級構造の方が多い。

最大せん断ひずみは、最大主応力差が現れる時、大粒子あるいは、中粒子を含む部分で最大となる。その後せん断帯は、その最大せん断ひずみが大きく発生している箇所から、斜め上の小粒子の端部を結ぶようにして発達する。このことから、分級構造におけるせん断帯の発達には、層を構成する粒子の粒径が関連していると考えられる。

せん断帯内の各粒子の層における最大主応力差について、大粒子が均質構造に比べて分級構造の方が小さい値を示したが、小粒子は分級構造の方が大きい値を示した。また、せん断帯内の各粒子の層における体積ひずみについて、分級構造の方が同じ粒径の均質構造よりも概ね膨張量が大きくなった。特に、大粒子は膨張量の増加が大きく、小粒子の膨張量の増加は小さかった。このことから、分級構造のせん断帯内において各粒子はお互いに影響を与え、各粒子の均質構造の最大主応力差とは、異なる値を示す。

せん断帯内の各粒子の層におけるダイレイタンスー係数について、同じ粒径の均質構造に比べて大きい値を示した。また、せん断帯内の各粒子の層における最大主応力差とダイレイタンスー係数の関係について、すべての粒子を混合させたHGの結果よりも、分級構

造におけるすべての粒子の結果の平均の方が、最大主応力差とダイレイタンスー係数のどちらも大きい値を示した。このことから、せん断帯内の各粒子の層について、分級構造にすることでダイレイタンスー係数が増加する。せん断帯を含む層のダイレイタンスー係数が増加することで、せん断帯を含む層においてHGよりも分級構造の方が最大主応力差が大きい値を示す。

以上のことから、分級構造のせん断帯内において、総じてせん断強度が低い小粒子がせん断強度の高い中粒子や大粒子の影響を受けることでせん断特性が変化し、高いせん断強度を発現していると考えられる。

謝辞

本研究は、一般財団法人 中国建設弘済会「技術開発支援事業」及び公益財団法人 土科学センター財団「研究助成事業」の助成を受けて実施したものです。記してここに謝意を表します。

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) Yoshimine, M., and Koike, R.: Liquefaction of clean sand with stratified structure due to segregation of particle size, Soils and Foundations, Vol.45, No.4, pp.89-98, 2005.
- 3) 古関潤一, ファウジ ウサマ ジュニアンシャー, 佐藤副司, 宮下千花: 浚渫土を用いて埋立てた砂質地盤の液状化挙動に関する実験的研究, 生産研究, 66 巻, 6 号, pp.53-56, 2014.
- 4) 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.
- 5) 松村聡, 長谷川実保, 高野大樹: 分級構造を有する砂質土の強度変形特性 (その 2), 第 57 回地盤工学研究発表会講演集, 20-4-2-06, 2022.
- 6) 多岐涼太, 吉本憲正, 小川泰正, 中田幸男: 平面ひずみ圧縮試験における分級構造を有する砂質土のせん断特性, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.41, No.1, pp.35-42, 2023.
- 7) 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.
- 8) Bishop, A.W.: Discussion on "Measurement of Shear Strengths of Soils", Géotechnique, Vol.2, pp.113-116, 1950.

(2024 年 6 月 24 日 受付)