

平面ひずみ試験における分級構造を有する砂質土のせん断特性

Shear Characteristics of Sandy Soil with Layered Structure by Plane Strain Test

多岐 涼太¹⁾, 吉本 憲正²⁾, 小川 泰正³⁾, 中田 幸男⁴⁾

1) Ryota TAGI, 修士課程, 山口大学大学院創成科学研究科, c008vew@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) Taisei OGAWA, 県職員, 広島県, t-ogawa72663@pref.hiroshima.lg.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試料の方が, 同じ乾燥密度の均質構造の再構成試料よりもせん断強度が高い. この強度差が生じるメカニズムの解明を最終目的とし, 本研究では, 堆積構造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し, 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せん断特性を調査した. その結果, 均質構造よりも分級構造の方が, 最大主応力差が高く, 体積膨張量が多く, 乾燥密度より堆積構造の影響を受けた. また, 分級構造では, すべり面範囲において最も多くの領域を占める粒子のせん断特性に近づくことなどが明らかとなった.

キーワード: 分級構造, すべり面, 体積ひずみ, ダイレイタンシ角, 画像解析

(IGC : D-3, D-6)

1. はじめに

不攪乱及び再構成供試体に対し, 同密度でせん断試験を実施すると, 不攪乱供試体において高いせん断強度を発揮する. このせん断強度の差は, 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, 不攪乱供試体において分級構造を形成していることが要因であると考えられている^{1),2)}.

分級構造とは, 対象範囲の粒度が均質ではなく, 大粒子が下層に存在し, その上に徐々に小さな粒径の粒子が存在し, 上層に小粒子が堆積しているような構造のことである. 一方, 再構成供試体は, 対象範囲で分級して堆積している試料を混合し, 均質化したものとなる. 設計では, 実地盤の密度に調整された再構成供試体の試験結果を使用することも多い. その場合, 上述のような強度差が加味されず, 実地盤に即したせん断強度が設計に反映されないと考えられる.

分級構造を形成する供試体に対する研究は, 上述した小池・吉嶺¹⁾, Yoshimine, M. and Koike, R.²⁾の他に古関ら³⁾のものがある. これらの研究は液状化特性に着目したものであり, 分級構造の方が均質構造よりも液状化強度が高いことを報告するに留まっており, そのメカニズムについては未解明である.

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, 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.

しかし分級構造を対象にした研究例は未だ少なく, メカニズムの解明には更なる研究が必要と考えられる. また, X線CTを適用した研究に見られるように, 意図的に供試体を不均質にしているため, メカニズムの解明に繋がる詳細な検討をするには, 供試体の部分的な範囲を取り出した局所的な部分に対して, 体積ひずみ等の変形について分析を行う必要がある.

本研究では, 均質構造や分級構造を有する砂質土における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し, 供試体の全体及び局所の変形を観察することで, 分級構造を有する砂質土のせん断特性を調査する.

2. 用いた試料及び試験方法

2.1 物理的特性

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までを大(Large)とし, 0.425~1.0mmまでを中(Medium), 0.106~0.425mmまでを小(Small)としている. それぞれの平均粒径は大が1.5mm, 中が0.72mm, 小が0.25mmである.

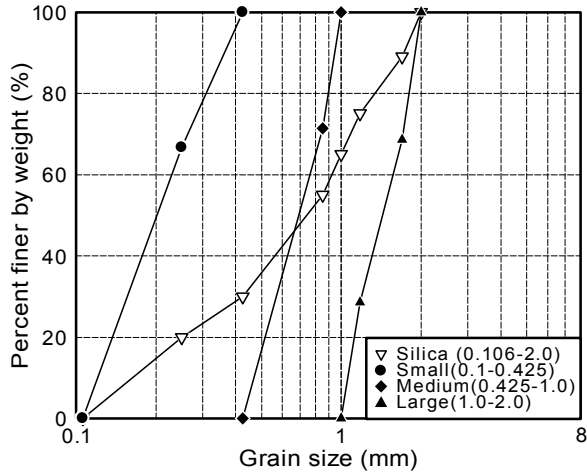


図-1 粒径加積曲線

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	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

表-1 に、三河珪砂および大粒子、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、なだらかな粒度を有している。三河珪砂を分級供試体用に三分割したそれぞれの試料(大, 中, 小)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。なお、本研究において、分級構造では粒径範囲が一番大きい粒子から一番小さい粒子で構成される範囲を一つの層としている。本研究では均質構造と分級構造の層の数を4層、3層、2層、1層と変化させて実験を実施した。また、均質構造の実験に用いた試料を大粒子、中粒子、小粒子に三分割したそれぞれの粒径範囲のみの均質な供試体を作製し、それらに対しても実験を実施した。

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。各構造における供試体の作製方法について、均質構造は三河珪砂(0.106-2.0)を

表-2 供試体の構造条件

(a) 分級構造

Structure	Classification			
	4 layer	3 layer	2 layer	1 layer
Initial dry density (g/cm ³)	1.532	1.531	1.531	1.530
Structural Examples				

(b) 均質構造

Structure	Homogeneous			
	Silica (0.106-2.0)	Large (1.0-2.0)	Medium (0.425-1.0)	Small (0.1-0.425)
Initial dry density (g/cm ³)	1.668	1.530	1.530	1.660
Structural Examples				

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。分級構造は、粒径範囲が大きい粒子から、小さい粒子へと、層の組み合わせに応じて12層に分けて堆積させた。錘の1層当たり及び合計の落下回数、均質構造の場合と同じ10回とし、錘を合計120回自由落下させている。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。

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。

なお、供試体の初期乾燥密度は、表-2 に示す通りで、分級構造および均質(大)、均質(中)が約1.53g/cm³であり、均質構造が約1.68g/cm³、均質(小)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、

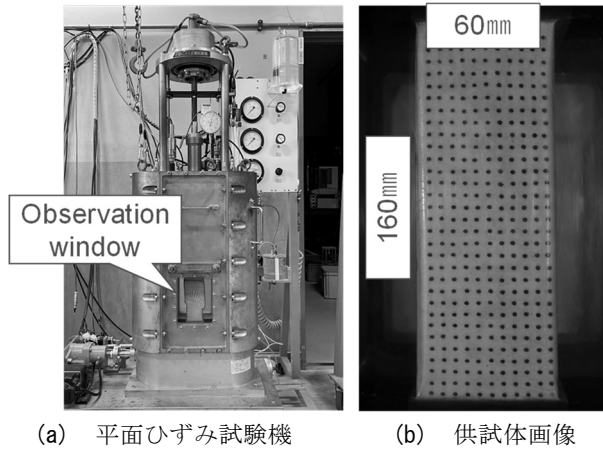


図-2 試験機及び供試体画像

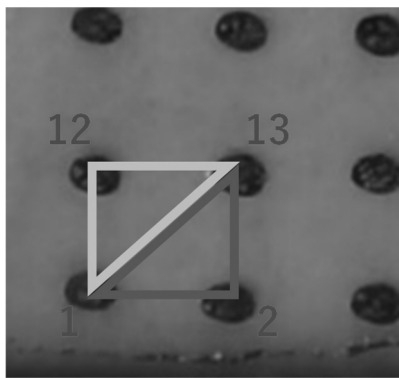


図-3 供試体画像拡大図

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。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数は、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かったため、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き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、撮影画像すべてに対して幾何補正を行い、カメラのレンズによるひずみを補正する。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。その座標結果を用いて、体積ひずみを算出している。画像は 1pixel あたり 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、ある四角形要素中の三角形について、以下の式(1)を適用し、面積を求める。

$$S = \left| \frac{x_i(y_{i+1}-y_{i+2})+x_{i+1}(y_{i+2}-y_i)+x_{i+2}(y_i-y_{i+1})}{2} \right| \quad (1)$$

ここで、 S は面積、 x は要素内の三角形を構成する標点の x 座標、 y は同様に標点の y 座標を示している。この式(1)を四角形要素内の二つの三角形について適用し、得られた面積を合計することで四角形要素の面積を算出する。

供試体内のすべての四角形要素について面積を計算し、合計すると、供試体全体の面積が得られる。そして、はじめに撮影した供試体画像の面積と、任意の軸変位の画像から得られる供試体面積との面積の差分を初期の供試体面積で除することにより面積ひずみを算出している。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、平面ひずみ条件で奥行きが一定であることから、面積ひずみと一致する。

3. 均質及び分級構造のせん断特性

3.1 せん断挙動

均質構造と各層数の分級構造の結果を比較する。図-4 に、均質構造及び分級構造の 1~4 層の軸ひずみと主応力差の関係を示す。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、明確な最大値(最大主応力差)を示した後、主応力差が著しく低下し、軸ひずみが約 5~7% の時点である一定の主応力差を保持している。いずれも最大主応力差から一定の主応力差に至る過程で明確なすべり面が観察された。その後、軸圧縮を続ける過程で構造条件によっては、主応力差が低下しているところで、二つ目のすべり面が観察された。

図-5 に、各堆積構造条件における最大主応力差及び体積ひずみが収縮から膨張へ転じる変相時主応力差の結果を示す。最大主応力差の結果より、初期乾燥密度は均質

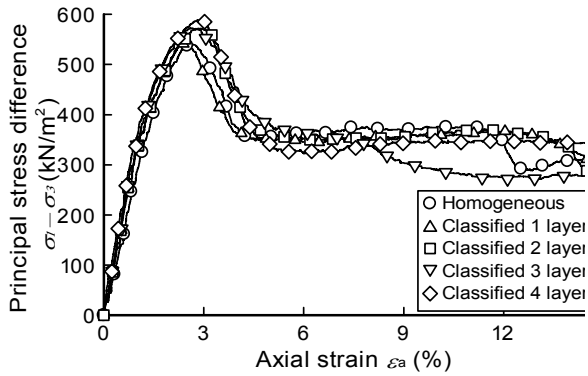


図-4 均質構造及び各分級構造における主応力差と軸ひずみの関係

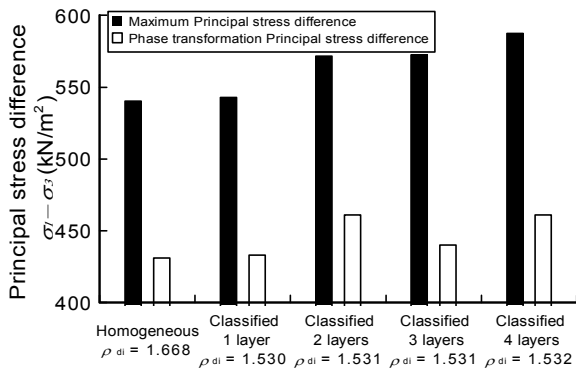


図-5 最大主応力差及び変相時主応力差

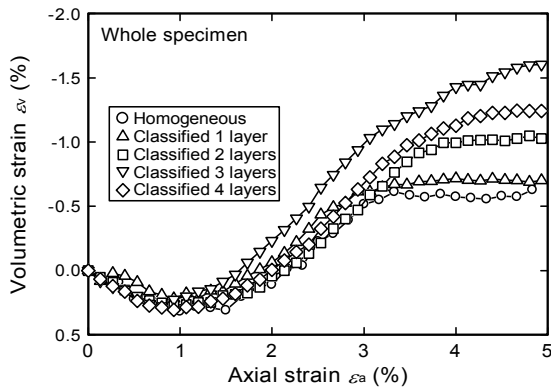


図-6 均質構造及び各分級構造における体積ひずみと軸ひずみの関係(供試体全体)

構造の方が密であったにもかかわらず、最大主応力差は分級4層のほうが大きい値を示している。また、分級2層と分級3層でも同様の結果がみられる。そのため、最大主応力差が密度に依存することなく、分級による堆積構造の影響を顕著に受けていると考えられる。一方で、分級1層と均質構造については、分級1層のせん断挙動及び最大主応力差は均質構造とほぼ変わらない結果とな

っている。しかし、初期乾燥密度は分級1層よりも均質構造のほうが大きいことから、分級1層も、分級による堆積構造の影響を受け、最大主応力差の値が大きくなっていることがわかる。

画像解析により得られた体積ひずみについて、各堆積構造条件における結果を比較する。図-6に、各堆積構造条件における軸ひずみと体積ひずみの関係を示す。ここで、軸ひずみは、供試体全体の圧密後の高さに対する軸変位量から算出されるものであり、供試体全体の平均的なものである。体積ひずみは、供試体全体の画像より2.5に記載の方法で算出したものである。いずれの結果も軸ひずみ5%までに最大主応力差を發揮し、その後軟化挙動に転じていることから、体積ひずみについては、軸ひずみ5%までで表示している。図より、いずれの結果も、載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。均質構造の結果に比べ、分級1層を除く分級2層～分級4層のほうが、最終的な体積ひずみの膨張量が多いことがわかる。

3.2 最大時、変相時の主応力差とダイレイタンシー角

均質構造と各分級構造における、せん断強度について検討する。本研究では、最小主応力で正規化した最大主応力差をせん断強度と呼ぶこととする。せん断強度は、一般に以下に示す式(2)^{6),7)}で表される。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}}{\sigma_3} + \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \right)_{max} \quad (2)$$

ここで、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は最大主応力差、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}$ は変相時主応力差、 $d\varepsilon_v$ は体積ひずみ増分、 $d\varepsilon_a$ は軸ひずみ増分である。また、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}$ について、変相時主応力差は、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(phase transformation)の軸ひずみにおける主応力差である。式(2)の右辺第2項は、ダイレイタンシー角と等価である。このことより式(2)は、せん断強度が、最小主応力で正規化された変相時主応力差とダイレイタンシー角との和で表されていることを示している。

図-5より、分級4層と分級2層の変相時主応力差の値が近い値を示している。しかし、両条件の最大主応力差を比較すると、分級4層のほうが大きいことは明らかである。また、分級4層の次に最大主応力差の大きい分級3層と分級2層の変相時主応力差を比較すると分級2層の値が大きいことがわかる。このことから、最大主応力差の大きい条件において、必ずしも変相時主応力差の値が大きいとは言えないことがわかる。先述の式(2)より、本研究の結果では、せん断強度の大小は変相時主応力差よりもダイレイタンシー角の影響をより強く受けているのではないかと考えられる。

本研究では、ダイレイタンシー角は最大主応力差が現

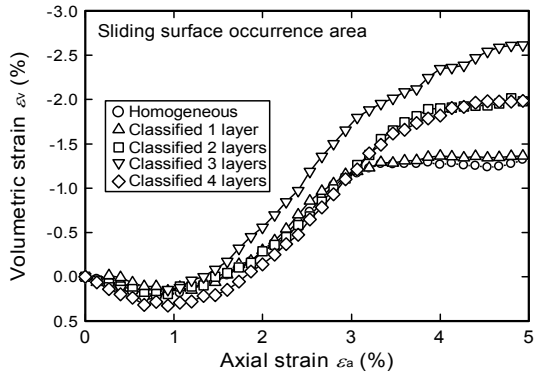


図-7 均質構造及び各分級構造における体積ひずみと軸ひずみの関係(すべり面)

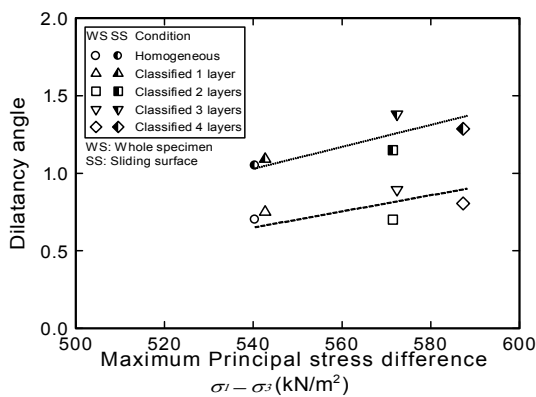


図-8 均質構造及び各分級構造におけるダイレイタンシー角と最大主応力差の関係

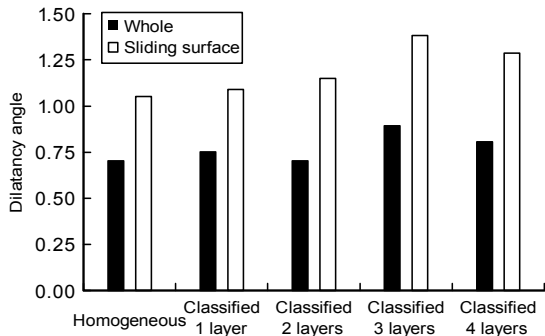


図-9 均質構造及び各分級構造におけるダイレイタンシー角

れる軸ひずみを中心とし、ノイズ等の影響を除去するため、その前後 0.2%の軸ひずみの範囲における体積ひずみを用いて算出した。具体的には、画像 1 枚ごとの体積ひずみの増分を求め、軸ひずみの増分と体積ひずみの増分より各画像間のダイレイタンシー角を求め、これよりダイレイタンシー角の平均値を算出し、これを各堆積構造条件におけるダイレイタンシー角の値とした。

せん断中の供試体を観察すると、すべり面は供試体全体に現れるわけではなく、供試体の一部に斜めに発生す

る。つまり、せん断破壊はすべり面の発生する範囲で生じており、その範囲がせん断抵抗に大きく寄与していると考えられる。そこで、ダイレイタンシー角については、供試体全体の体積ひずみを用いて算出する場合と、すべり面が発生する範囲の体積ひずみを用いて算出する場合の二通りの方法で求めた。

図-7 に、供試体内のすべり面が発生する範囲(後述する図-14 の赤枠内)において画像解析を行い算出した体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。この時の軸ひずみは、前述した方法で算出している。図より、図-6 で示した供試体全体における体積ひずみの結果よりも、すべての条件において、体積ひずみの膨張量が増加していることがわかる。

図-8 に、各堆積構造条件における供試体全体とすべり面発生範囲におけるダイレイタンシー角と最大主応力差の関係を示す。図より、供試体全体とすべり面発生範囲の両結果において、ダイレイタンシー角と最大主応力差には正の相関がみられる。また、すべり面発生範囲から得られたダイレイタンシー角の値のほうが、供試体全体より得られた値よりも大きいことがわかる。

図-9 には、各堆積構造条件における供試体全体とすべり面発生範囲のダイレイタンシー角の結果を示す。図-5 では変相時主応力差の値が分級 4 層と分級 2 層では類似していたが、この図のダイレイタンシー角では、分級 4 層のほうが明らかに大きな値を示していることがわかる。このことより、せん断強度がダイレイタンシー角に依存していることがわかる。

4. 均質及び分級構造のせん断特性に及ぼす粒径の影響

各堆積構造条件による結果と、三河珪砂の粒度を三分割した粒径範囲の粒子のみで構成される均質構造である、均質(大)、均質(中)、均質(小)との結果を比較する。

4.1 各粒径の均質構造のせん断特性

図-10 に、分割した粒径範囲の粒子のみで構成される均質構造と三河珪砂全体の粒度で構成される均質構造における軸ひずみと主応力差の関係を示す。図より、いずれの結果も载荷初期は、軸ひずみの増加に伴い急激に主応力差が増加している。最大主応力差を発揮した後は、主応力差が低下し軸ひずみが約 5~8%の間で、それぞれ一定の主応力差を示す。その後は、図-4 と同様に、条件によっては二つ目のすべり面が発生し、主応力差が低下する。

最大主応力差に着目すると、均質(大)と均質(中)のほうが三河珪砂全体の粒度で構成される均質構造の結果よりも大きく、均質(小)は均質構造の結果よりも小さい値を示す。また、最大主応力差の発生位置について、均質(中)は均質構造とほぼ同じ軸ひずみで最大主応力差が現

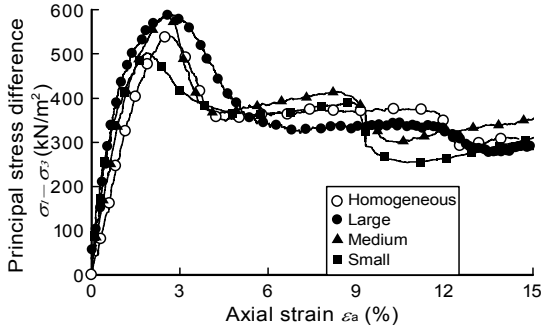


図-10 均質構造及び各粒径均質構造における主応力差と軸ひずみの関係

れるが、均質(小)は軸ひずみが小さい位置で、均質(大)は軸ひずみが大きい位置で最大主応力差が現れている。

図-11 に、分割した粒径範囲の粒子の均質構造と三河珪砂全体の粒度で構成される均質構造における軸ひずみと体積ひずみの関係を示す。図より、体積ひずみの膨張量は均質(中)が最も大きくなっているが、変相位置は、均質(小)が最も早い軸ひずみで現れていること、均質(大)は変相位置が遅いことがわかる。

図-12 に各堆積構造条件における最大主応力差と供試体全体とすべり面発生範囲のダイレイタンシー角の関係を示す。図中の点線はすべり面の、破線は供試体全体における結果の近似線となっている。図より、均質(小)のダイレイタンシー角は、他のダイレイタンシー角の結果と比較して小さいことがわかる。また、均質(大)については、同程度の最大主応力差の値に対してダイレイタンシー角が小さいことがわかる。

4.2 せん断強度の評価式の適用

式(2)の右辺第1項を左辺に移項し、式(3)とする。

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_3} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pt}}{\sigma_3} = \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \right)_{max} \quad (3)$$

式(3)を用いて、図-13 に、供試体全体とすべり面発生範囲における式(3)の左辺と右辺であるダイレイタンシー角の関係を示す。図中の点線はすべり面の、破線は供試体全体における結果の近似線となっている。また、直線は軸に対して 1:1 になるよう引かれている。図より、すべり面発生範囲内で求めたダイレイタンシー角を用いると、1:1 の直線上に結果が現れており、左辺と右辺が等しいことから、せん断強度の評価式が成り立っていることがわかった。

4.3 分級構造内の各粒径範囲のダイレイタンシー特性

4.1 及び 4.2 ですべり面発生範囲について着目することにより、せん断強度に関係しているすべり面の範囲での体積変化を追うことができたが、分級構造を構成する各粒径がどのような影響を与えているのかはわかっていない。また、各粒径の均質構造の結果との関係も明らかに

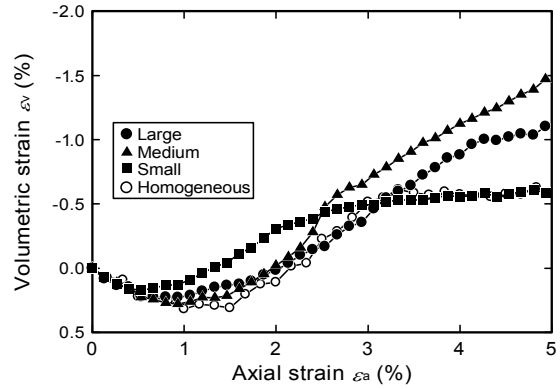


図-11 均質構造及び各粒径均質構造における体積ひずみと軸ひずみの関係(供試体全体)

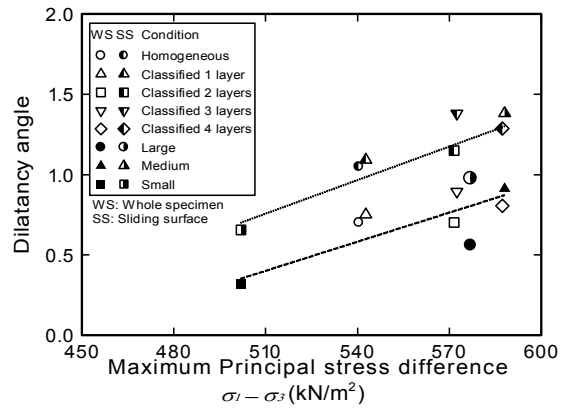


図-12 各堆積構造におけるダイレイタンシー角と最大主応力差の関係

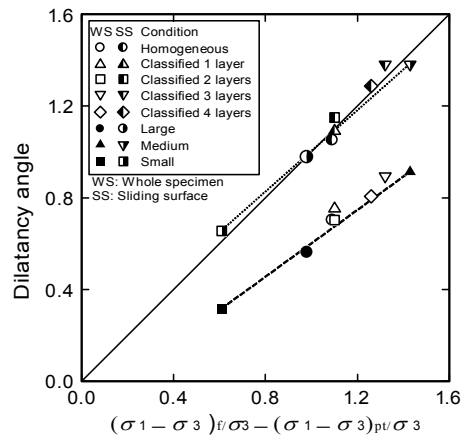


図-13 せん断強度の評価式とダイレイタンシー角の関係

はなっていない。そのため、すべり面発生範囲内における、大粒子、中粒子、小粒子の各粒径の体積ひずみの変化を検討する。

図-14 に、分級 2 層における、すべり面発生時の供試体画像および、供試体の模式図を示す。図中の画像のよ

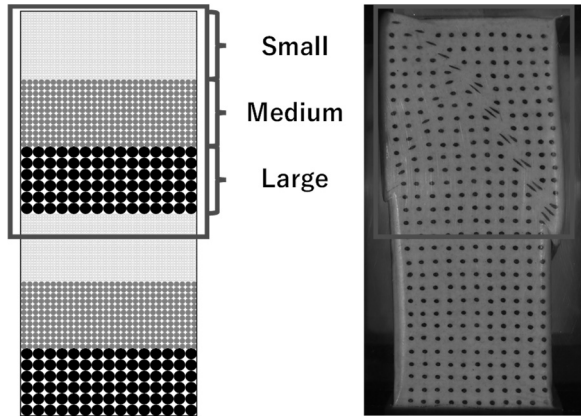


図-14 供試体模式図及びすべり面発生時における供試体画像

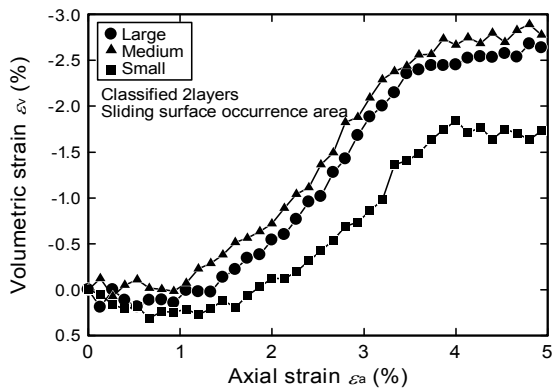


図-15 すべり面範囲における各粒径試料の体積ひずみと軸ひずみの関係(分級2層)

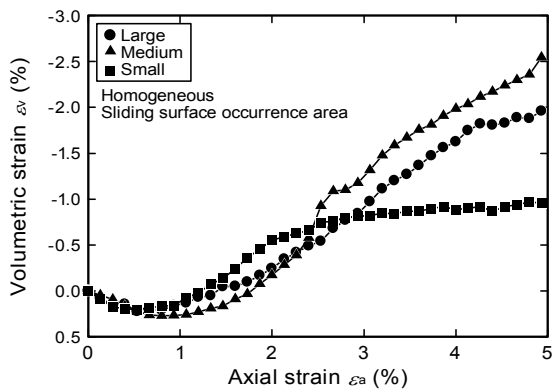


図-16 すべり面範囲における各粒径均質構造の体積ひずみと軸ひずみの関係

うに、せん断時において、供試体上方にすべり面が現れている。供試体画像および模式図内の枠は、このすべり面の範囲を示したものである。この枠内において先述の通り、画像解析を行い、大粒子、中粒子、小粒子の各粒径範囲における体積ひずみの変化を検討する。各粒径の範囲については、隣り合う標点で四角形要素を作り、こ

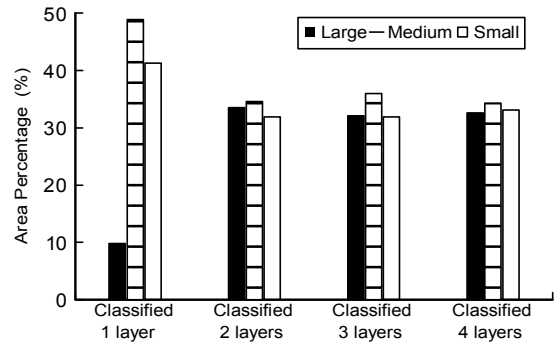


図-17 分級構造におけるすべり面範囲内の各粒径の面積占有割合

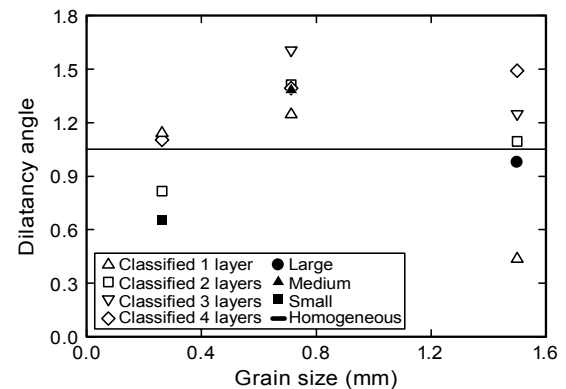


図-18 各粒径均質構造及び分級構造における各粒径のダイレイタンス角と粒径の関係

の要素から決定している。また、この標点はメンブレンに直接描かれているため、供試体の変形に合わせて移動する。そのため、変形による各粒径の境界は変わらない。

分級2層における、各粒径の軸ひずみと体積ひずみの関係を図-15に示し、図-16に、各粒径の均質構造における軸ひずみと体積ひずみの関係を示す。図-15より、各粒径の範囲で体積ひずみを算出すると、すべての粒径で体積ひずみの膨張が顕著に表れていることや、変相位置がすべての粒径で同じであることがわかる。図-16を見ると、いずれの粒子も変相位置が異なることや、各粒径の均質構造の体積膨張量が分級構造より少ないことが確認できる。しかし両図を比較すると、中粒子の体積膨張量や変相位置は近い値をしていることがわかる。これより均質構造では、中粒子において最も膨張量が多いことなどから、分級構造内の各粒径の体積ひずみ挙動は、中粒子の結果に近づいている。

このような結果が得られる理由を検討するため、すべり面発生範囲内に占める各粒径の面積に着目する。範囲は図-14と同様としている。図-17に、各分級構造におけるすべり面発生範囲内の各粒径の面積占有割合を示す。

すべり面は撮影画像より、明確にすべり面が現れている箇所を包含するように決定している。また、面積は、2.5の式(1)を適用し、積算することで算出している。図より、全ての分級構造の結果において、中粒子が占める面積の割合が最も高いことがわかる。このため、図-15及び図-16の結果を踏まえ、分級構造中の他の粒子の体積ひずみ挙動が中粒子の挙動に近づいたと考えられる。

図-18に、各粒径の均質構造および分級構造における各粒径のダイレイタンシー角と粒径の関係を示す。図より、分級1層の大粒子の結果を除き、小粒子と大粒子のダイレイタンシー角は、層構造になると各粒径の均質構造の結果よりも大きい値を示している。いずれの条件においても、最もダイレイタンシー角の値が高いのは中粒子の結果となった。これについて、図-17と図-18に基づき検討する。他の分級構造と大きく傾向が異なる分級1層の結果を除くと、中粒子が占める面積の割合が最も大きい分級3層が、ほかの粒径のダイレイタンシー角も大きな値を示した。このことより、すべての分級構造に対して最も大きな割合を占める中粒子の影響を大きく受けることにより、体積ひずみの挙動およびダイレイタンシー角の値が変化していると考えられる。他の結果と異なる特性を示した分級1層については、すべり面発生範囲内の大粒子の割合が極端に少ないことがわかる。さらに、中粒子が占める面積の割合は、他の分級構造の結果よりも大きい、同時に小粒子の割合もすべての分級構造の中で最も大きくなっている。図-12より、小粒子は最大主応力差、ダイレイタンシー角ともに最も小さい値を示すことがわかっており、中粒子の次に小粒子が大きく影響しているため、分級1層は他の分級構造の結果と比べ、ダイレイタンシー角の値が小さくなり、それに伴って最大主応力差の値が小さく現れたと考えられる。

5. 結論

本研究では、堆積構造が異なる種々の供試体に対して平面ひずみ圧縮試験を実施し、せん断特性を調査した。試験結果より、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、均質構造よりも分級構造の最大主応力差が高くなった。このことから、最大主応力差が密度に依存することなく、堆積構造の影響を強く受けていることが明らかとなった。せん断時の体積ひずみの膨張量も均質構造よりも分級構造の方が多い。

最大主応力差の値が大きいもの程、つまり分級構造で層数の多いもの程、供試体全体及びすべり面発生範囲から求まるダイレイタンシー角の値が概ね大きくなり、最

大主応力差がダイレイタンシー角の影響を顕著に受ける。すべり面発生範囲から求まるダイレイタンシー角の方が供試体全体から求めたダイレイタンシー角よりも高く、正規化された最大主応力差と正規化された変相時主応力差の差と良い一致を示した。

分級構造のすべり面発生範囲内における各粒径の体積ひずみ挙動は、各粒径の均質供試体の体積ひずみ挙動とは異なり、分級構造において顕著な膨張挙動を示した。分級構造の各粒径のダイレイタンシー角は、各粒径の均質構造ではなく、すべり面発生範囲内に占める面積の割合が大きい粒子の均質供試体のダイレイタンシー角に近づく。本研究における実験ではすべての分級構造においてすべり面範囲における中粒子が占める面積の割合が最も大きかった。したがって最大主応力差は中粒子の影響を顕著に受け、中粒子のせん断特性に近づく。

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: 砂の分級堆積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, 佐藤剛司, 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) 赤井浩一: 砂のせん断におけるダイレイタンシー効果, 土木学会論文集, 第 58 号, pp.76-81, 1957.
- 7) A. W. Bishop: Discussion on "Measurement of Shear Strengths of Soils", *Géotechnique*, Vol.2, pp.113-116, 1950.

(2023 年 6 月 19 日 受付)