

平面ひずみ状態における二種混合体の中間骨格構造に与える大粒子含有率の影響

山口大学大学院 正会員 ○田上 聖人
山口大学大学院 正会員 中田 幸男

1. はじめに

岩砕は、大きな石が砕かれてできた礫であり、切土やトンネル掘削によって大量に発生する。岩砕が混じった建設発生土は、礫などの大粒子と砂などの小粒子で、粒度分布が分級しており¹⁾、強度や破壊形態などの性質が、大粒子含有率の影響を受ける。そのため、大粒子含有率ごとの性質を把握することが重要である。大粒子含有率の影響を、より明確に把握する際に、二種混合体を用いることがある。二種混合体の性質は、大粒子含有率が低く、性質の主体が小粒子である構造は「小粒子骨格構造」、大粒子含有率が高く、性質の主体が大粒子である構造は「大粒子骨格構造」、それらの間に位置し、大粒子含有率によって性質が変化する骨格構造は「中間骨格構造」と定義される。この場合、小粒子骨格構造と中間骨格構造の境界は「小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b(\%)$ 」、中間骨格構造と大粒子骨格構造の境界は「大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a(\%)$ 」となる。著者ら^{2,3)}は、安息角実験において、二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響を検討した。この研究は、形状や粗度が異なる大粒子と小粒子で構成される二種混合体の、大粒子含有率ごとの安息角を測定するものである。その結果、中間骨格構造における安息角の増加率は、小粒子にかかわらず大粒子に依存し、大粒子がいびつであるほど、安息角の増加率が高くなること。小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a(\%)$ は、大粒子がいびつであるほど、小粒子の間隙比が小さいほど、小さくなること明らかになった。また、遠心模型装置を用いた支持力試験において、遠心力による拘束圧作用下の二種混合体の中間骨格構造を取得した。その結果、中間骨格構造では、載荷応力が増加傾向であり、中間骨格構造の範囲は、大粒子含有率が 10.1%～42.7%であることを示した^{3,4)}。これらの研究では、安息角や載荷応力などの強度を指標として、二種混合体の中間骨格構造を評価している。

本研究では、強度を指標とした中間骨格構造と破壊形態を指標とした中間骨格構造を示す大粒子含有率の範囲が一致するかを明らかにするために、様々な大粒子含有率の二種混合体に対して、平面ひずみ圧縮試験および画像解析(PIV)を実施する。得られた結果について「ピーク時の主応力差」「基準軸ひずみにおける主応力差」「せん断帯傾斜角」「せん断帯の幅」と大粒子含有率の関係を考察する。「ピーク主応力差」はピーク強度、「基準軸ひずみにおける主応力差」はピーク以降の強度、「せん断帯傾斜角」と「せん断帯の幅」は破壊形態を表す指標である。それぞれの指標をもとに、中間骨格構造における傾向や骨格構造の境界となる限界大粒子含有率について、検討を行う。

2. 二種混合体に対する平面ひずみ圧縮試験

2.1 試験装置・試料

図-1と図-2に平面ひずみ圧縮試験の概略図、写真-1に宇部珪砂3号A(大粒子)と豊浦砂(小粒子)の画像、図-3に各試料の粒度分布を示す。

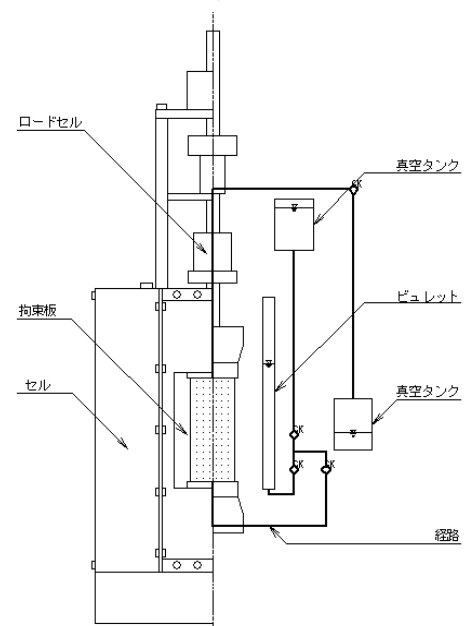


図-1 平面ひずみ圧縮試験機の概略図(正面)

キーワード 平面ひずみ圧縮試験, 主応力差, せん断帯, 粒径,

連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 地盤工学研究室

TEL 0836-85-7326

試験装置には、平面ひずみ圧縮試験機(図-1, 図-2)を用いた。この試験機は、供試体のサイズが、縦 80mm, 横 60mm, 高さ 160mm で、アクリル製の窓が設置され、試験中の供試体が観察できる。また、静的せん断の際に、供試体にせん断応力がかからないように、下部のペDESTALを左右に移動できるようになっている。

試料(写真-1, 図-3)には、大粒子試料として平均粒径 2.32mm の宇部珪砂 3号 A, 小粒子試料として平均粒径 0.22mm の豊浦砂を使用した。粒径比は、10.5 である。大粒子試料は、三軸圧縮試験での粒径の基準⁴⁾である「供試体寸法の 1/20 以下」を参考にして、選定している。

2.2 条件・手順

以下の条件および手順で、平面ひずみせん断試験を行った。

- 1) 自然乾燥状態の二種混合体試料を 10 層に分けて、各層ランマーで 10 回締固めて、供試体を作成する。
- 2) 供試体を自立させるために、負圧 30kPa をかけた状態で、試料の寸法を測定する。
- 3) 拘束圧 100kPa で、等方圧密を行う。
- 4) 拘束圧 100kPa, ひずみ速度 0.1%/min で、軸ひずみ 15% まで静的せん断を行う。せん断中は、ひずみ 0.1% ごとに供試体の全体写真(図-6)を取得する。

この 1)~4)の工程を、二種混合体試料の大粒子含有率を変えながら繰り返した。ただし、大粒子含有率が 70% 以上になると、大粒子が形成する間隙を小粒子が埋めることが出来ず、分離して均一な二種混合体試料を作成できなかったため、実験を行っていない。

2.3 試験結果

図-4 に応力ひずみ関係を示す。

図-4 から、大粒子含有率 0% (最も濃い寒色) の結果では、軸ひずみが約 1.5% で、ピーク強度約 550kPa になり、3% 付近で、残留強度約 400kPa になっている。体積ひずみは、軸ひずみ 1% 付近で収縮傾向から、膨張傾向に転じ、2~3% 付近で再び収縮傾向になった。一方で、100% (最も濃い暖色) の結果では、軸ひずみが約 5~6% で、ピーク強度約 900kPa になり、15% 付近で、その主応力差は約 650kPa になる。体積ひずみは、0~100% にわたって、軽い膨張挙動から収縮挙動に遷移している。0% と 100% の間の結果では、大粒子含有率が増加するにしたがって、ピーク強度と残留強度やそれぞれが現れる軸ひずみが、100% の結果に近づいている。

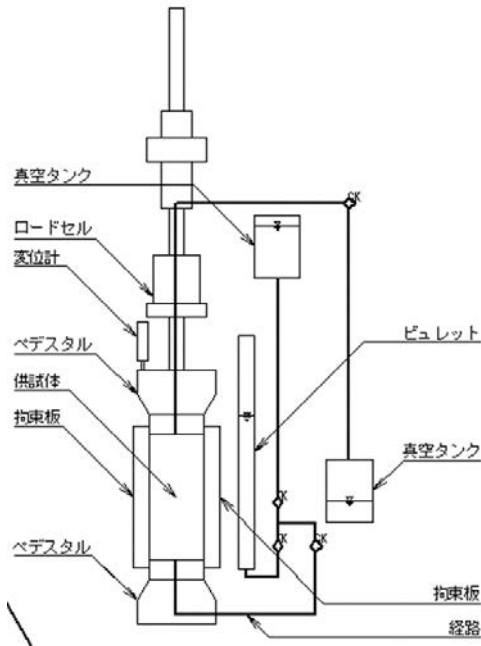


図-2 平面ひずみ圧縮試験機の概略図 (側面)



写真-1 宇部珪砂 3号 A(大粒子)と豊浦砂(小粒子)

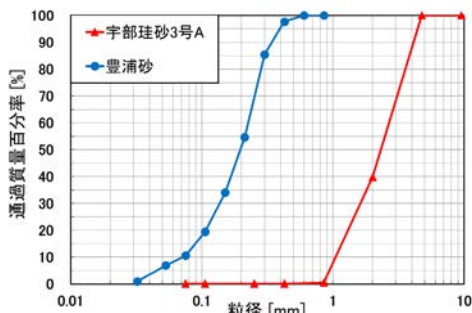


図-3 各試料の粒度分布

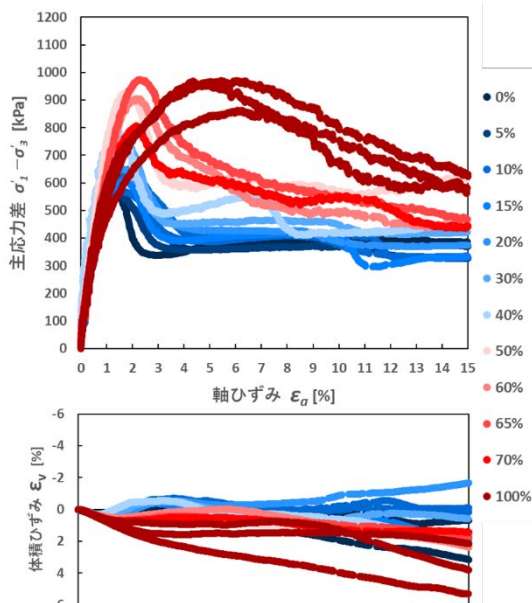


図-4 応力ひずみ関係

2.4 せん断帯傾斜角・せん断帯の幅の算出

図-5 に基準軸ひずみの定義, 図-6 に基準軸ひずみにおける供試体画像およびせん断帯傾斜角とせん断帯の幅の定義を示す.

せん断帯は, ピーク強度の軸ひずみでは明確には現れず, ピーク強度を超えた軸ひずみで現れる. そこで, 本研究のせん断帯傾斜角とせん断帯の幅は, 軸ひずみ 0.1%/min ごとに取得した画像のうち, 基準軸ひずみにおける画像を用いて算出している. ここで, 基準軸ひずみとは, 図-5 のように, ピーク強度に達した軸ひずみを A%, 残留強度に達した軸ひずみ B%とした場合, $2B-A\%$ の軸ひずみを指す. ただし, 図-4 大粒子含有率 100%の結果のように, 残留強度に至る軸ひずみが, 非常に大きい場合は, 軸ひずみ 15%を基準軸ひずみとしている.

図-6 の画像解析の結果における青い点は, 軸ひずみ 0%における特徴点. オレンジの点は, 基準軸ひずみにおける特徴点である. 分析では, 供試体の中央 1/3 の範囲で, 特徴点が水平方向に変位した場所をせん断帯と定義し, その角度と幅を算出している.

3. 平面ひずみ状態における二種混合体の中間骨格構造に与える大粒子含有率の影響

図-7 に, ピーク主応力差と大粒子含有率の関係, 図-8 に, 基準軸ひずみにおける主応力差と大粒子含有率の関係, 図-9 に, せん断帯傾斜角と大粒子含有率の関係, 図-10 に, せん断帯の幅と大粒子含有率の関係を示す. 図-7~図-10 では, 実験値が, 大粒子含有率 0%の平均値から変化し始めた大粒子含有率を, 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$, 大粒子含有率 100%の平均値と同等になった大粒子含有率を, 大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ としている. さらに, 図中の点線は実験値の傾向線, 一点鎖線は骨格構造の境界を表す. 大粒子含有率が, $0 \sim V_L^b\%$ の小粒子骨格構造を白色, $V_L^b \sim V_L^a\%$ の中間骨格構造を薄いグレー, $V_L^a \sim 100\%$ の大粒子骨格構造を濃いグレーで色分けしている.

図-7 より, ピーク時の主応力差は, 大粒子含有率が約 8.7%で上昇し始め, 約 52.7%以上の結果と同等になっていることから, 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 8.7\%$, 大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 52.7\%$ であり, 8.7%~52.7%が中間骨格構造であることがわかる. また, 中間骨格構造ではピーク主応力差は, 増加傾向を示し, 線形に推移している.

図-8 より, 基準軸ひずみにおける主応力差は, 大粒子含有率が 3.2%前後で上昇し始め, 約 44.1%で 100%の結果と同等になっていることから, 3.2%~44.1%が中間骨格構造であることが明らかになった. また, 中間骨格構造では, 増加傾向を示した.

図-9 より, せん断帯傾斜角は, 大粒子含有率が約 12.0%で減少し始め, 約 77.3%で 100%の結果と同等になっていることから,

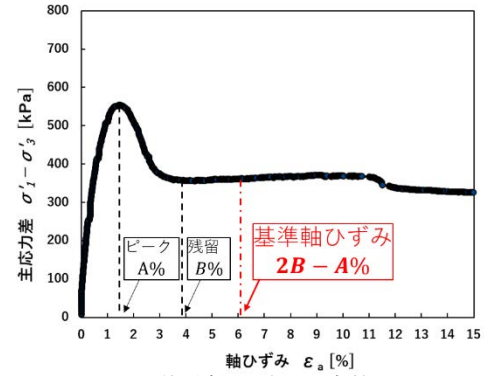


図-5 基準軸ひずみの定義

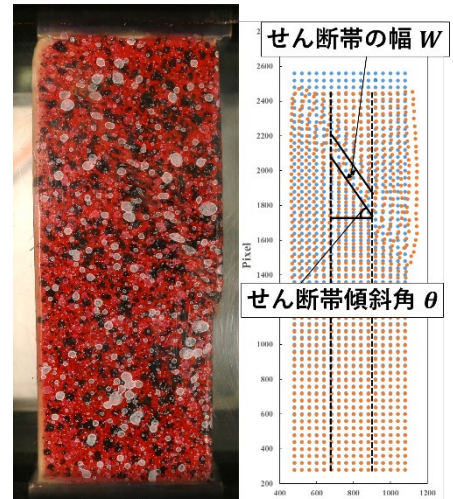


図-6 基準軸ひずみにおける供試体画像およびせん断帯傾斜角とせん断帯の幅の定義

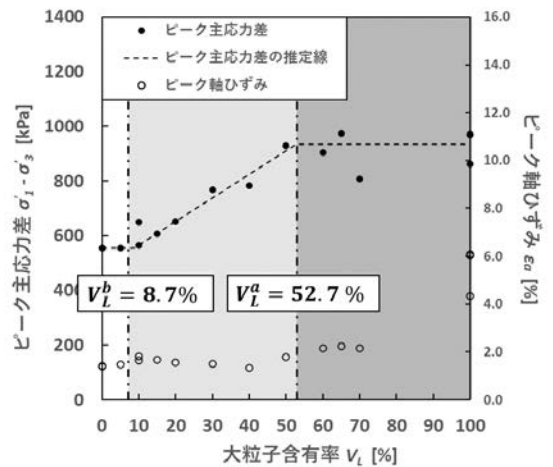


図-7 ピーク主応力差と大粒子含有率の関係

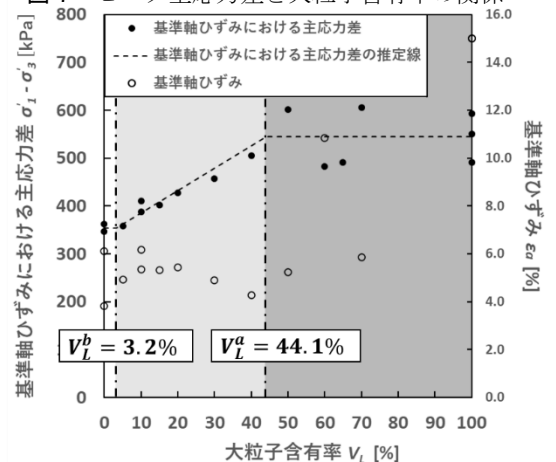


図-8 基準軸ひずみにおける主応力差と大粒子含有率の関係

12.0%~77.3%が中間骨格構造であることが明らかになった。ただし、65%前後で、試料が二種混合体として存在できなくなったため、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a は、65%前後である可能性がある。また、中間骨格構造では、減少傾向を示した。

図-10より、せん断帯の幅の実験結果は、大粒子含有率が約4.1%で上昇し始め、約81.2%で100%の結果と同等になっていることから、4.1%~81.2%が中間骨格構造であることが明らかになった。ただし、せん断抵抗角の結果と同様に、65%前後の可能性もある。また、中間骨格構造では、増加傾向を示した。

これらの結果より、同一の二種混合体試料であっても、「ピーク時の主応力差」「残留軸ひずみにおける主応力差」「せん断帯傾斜角」「せん断帯の幅」を指標とした中間骨格構造を示す大粒子含有率の範囲が、一致しないことが明らかになった。さらに、「ピーク時の主応力差」と「基本軸ひずみにおける主応力差」の結果からわかるように、ピーク強度とピーク以降の強度においても、中間骨格構造の範囲に差が生じている。これは、ピーク時の主応力差の時点では、初期の堆積構造が維持されているのに対し、基準軸ひずみでの主応力差、せん断帯傾斜角、せん断帯の幅では、破壊が生じて現れるので、初期の堆積構造が維持されていないことが、原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、強度を指標とした中間骨格構造と破壊形態を指標とした中間骨格構造を示す大粒子含有率の範囲が一致するかを明らかにするために、様々な大粒子含有率の二種混合体に対して、平面ひずみ圧縮試験および画像解析(PIV)を実施した。結果について、「ピーク時の主応力差」「基準軸ひずみにおける主応力差」「せん断帯傾斜角」「せん断帯の幅」と大粒子含有率の関係を考察し、中間骨格構造における傾向や骨格構造の境界となる限界大粒子含有率について、検討を行った。その結果、同一試料であっても、強度を指標とした中間骨格構造と破壊形態を指標とした中間骨格構造を示す大粒子含有率の範囲は一致せず、さらに、ピーク強度とピーク時と異なる軸ひずみにおける強度を指標とした場合でも、差が生じることが示された。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 22J15374 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 独立行政法人 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル，pp.12-14，2013.
- 2) 田上聖人，中田幸男，梶山慎太郎：微視的モデルによる二種混合体に対する小粒子骨格構造の限界大粒子含有率の評価，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.78，No.1，pp.32-44，2022.
- 3) 田上聖人：微視的モデルによる二種混合体の中間骨格構造の評価に関する研究，学位論文，2023.
- 4) 田上聖人，中田幸男，Jonathan Black：遠心模型実験における支持力特性に与える大粒子含有率の影響，第74回土木学会中国支部研究発表会概要集，2022.
- 5) 地盤工学会地盤調査法改定編集委員会：第7編 変形・強度試験 第3章 土の三軸試験，地盤材料試験の方法と解説—二分冊の2—，pp.552-660，2009.

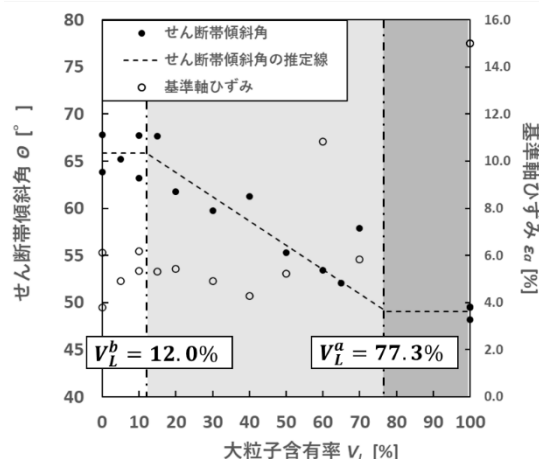


図-9 せん断帯傾斜角と大粒子含有率の関係

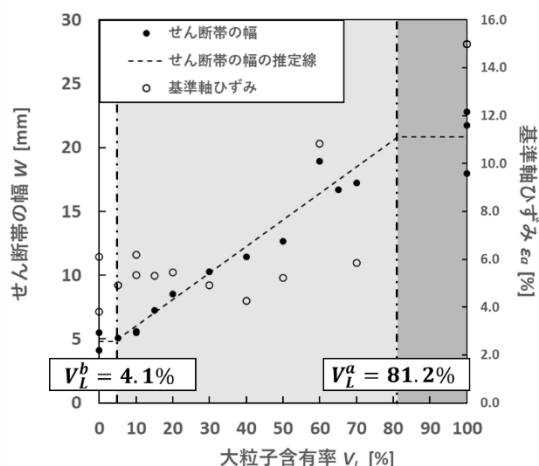


図-10 せん断帯の幅と大粒子含有率の関係