

博士論文

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

(Evaluation of intermediate skeleton structure for
binary granular mixture based on microscopic model)

2023年3月

田上 聖人

山口大学大学院 創成科学研究科

目次

第1章 序論	1-1
1.1 本研究の背景と課題	1-1
1.2 二種混合体に対する既往の実験・解析的研究	1-7
1.2.1 二種混合体の間隙比に関する既往の研究	1-7
1.2.2 二種混合体のせん断強度に関する既往の研究	1-8
1.3 二種混合体の骨格構造の限界大粒子含有率を評価する微視的モデル	1-9
1.3.1 二種混合体の間隙比に着目した Lade のモデル	1-9
1.3.2 二種混合体の力学的性質に着目した Ueda のモデル	1-10
1.4 本研究の目的	1-13
1.5 本論文の構成	1-14
参考文献	1-17
第2章 大粒子配置の異方性と粒子形状を考慮した微視的モデルの構築	2-1
2.1 概説	2-1
2.2 大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデル	2-2
2.3 大粒子配置の異方性および粒子形状を考慮した理論式	2-3
2.3.1 大粒子配置の異方性を考慮した球体大粒子型理論式	2-4
2.3.2 サンゴ礫を模した円柱大粒子型理論式	2-9
2.3.3 碎石を模した扁平楕円体大粒子型理論式	2-15
2.4 微視的モデルの検討すべきパラメーター	2-21
2.4.1 実験における検討事項	2-21
2.4.2 解析における検討事項	2-21
2.5 要約	2-22
参考文献	2-23

第3章 安息角実験による二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響 3-1

3.1 概説	3-1
3.2 試料および実験装置	3-2
3.2.1 試料	3-2
3.2.2 実験装置	3-3
3.3 実験方法	3-4
3.3.1 実験条件	3-4
3.3.2 実験手順	3-5
3.3.3 安息角・間隙比の算出および限界大粒子含有率の判定	3-6
3.4 二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響	3-7
3.4.1 大粒子比較実験結果	3-7
3.4.2 小粒子比較実験結果	3-10
3.4.3 地盤材料の工学的分類と限界大粒子含有率の比較	3-13
3.5 最小主応力方向の限界大粒子距離に与える粒子特性の影響と推定式	3-14
3.6 安息角における微視的モデルによる中間骨格構造の評価	3-19
3.7 要約	3-20
参考文献	3-21

第4章 個別要素法による二種混合体の微視的モデルにおける骨格構造モデルの妥当性 4-1

4.1 概説	4-1
4.2 解析方法	4-2
4.2.1 解析条件	4-2
4.2.1.1 解析粒子	4-2
4.2.1.2 安息角試験装置を再現したメッシュ	4-6
4.2.1.3 解析パラメーター	4-7
4.2.2 解析手順	4-9
4.2.3 安息角の算出	4-10
4.3 解析結果	4-11
4.3.1 安息角実験結果の再現性	4-11
4.3.2 鉛直方向と水平方向の大粒子間距離	4-14
4.3.3 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係	4-16
4.3.4 接点ベクトルの可視化	4-18
4.4 要約	4-20
参考文献	4-21

第 5 章 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価	5-1
5.1 概説	5-1
5.2 平面ひずみ圧縮試験の試料および実験装置	5-2
5.2.1 試料	5-2
5.2.2 実験装置	5-3
5.3 平面ひずみ圧縮試験方法および手順	5-4
5.3.1 実験条件	5-4
5.3.2 実験手順	5-5
5.3.3 せん断帯傾斜角・せん断帯の幅の算出	5-5
5.4 平面ひずみ圧縮試験結果	5-6
5.4.1 応力ひずみ関係	5-6
5.4.2 平面ひずみ状態における中間骨格構造と大粒子含有率の関係	5-7
5.5 遠心支持力模型実験の試料および実験装置	5-11
5.5.1 試料	5-11
5.5.2 実験装置	5-12
5.6 遠心支持力模型実験方法および手順	5-12
5.6.1 実験条件	5-12
5.6.2 実験手順	5-13
5.7 遠心支持力模型実験結果	5-14
5.7.1 沈下量と載荷応力の関係	5-14
5.7.2 沈下量 13mm の載荷応力における中間骨格構造と大粒子含有率の関係	5-15
5.8 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価	5-16
5.8.1 平面ひずみ状態における評価	5-17
5.8.2 沈下量 13mm の載荷応力における評価	5-18
5.8.3 拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーター	5-19
5.9 要約	5-20
参考文献	5-21

第 6 章 結論	6-1
-----------------	------------

第1章 序論

1.1 本研究の背景と課題

2mm以上の礫や石を含む粗粒土は、自然界に広く分布し、土構造物やその基礎に幅広く利用される地盤材料である(粗粒材料の変形と強度, 1986), (礫質土の力学特性に関する技術の現状報告, 2001). 粗粒土の大きな特徴の一つは、礫分と砂分の混合率によって、それぞれの性質が現れる程度が変動し、土全体の性質が大きく変化することである。その特徴が顕著な例として、人工地盤では「岩砕の地盤材料としての利用」、自然地盤では「サンゴ礫混じり土」が挙げられる。

岩砕とは、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、現地発生土として大量に発生する。岩砕は、ロックフィルダム内部の粗粒フィルター材や、外側を覆うロック材(写真 1-1)として利用(藤崎, 2014)や、擁壁等の裏込め材としての利用(道路土工-擁壁工指針, 1999)が挙げられるが、後述する問題から、混合率ごとの強度を把握することが難しいため、これまで利用が限定されてきた(佐藤, 2012)。しかし、近年、経済性や環境に対する配慮から、岩砕を含んだ現地発生土を地盤材料として用いる試みがなされている(花輪, 2011)。代表的なものに盛土材料(写真 1-2)があり、中岡ら(1994)、日笠山ら(1995)、森ら(1996)、森吉ら(2001)、平川ら(2008)、上本ら(2011)による締固め特性に関する研究や、吉村ら(1994)、大東ら(1994)、望月ら(2001)によるせん断強度に関する研究が行われている。さらに、道路土工-盛土工指針(2010)や道路土構造物技術基準・同解説(2017)では、盛土材料について、「盛土材料としては可能な限り現地発生土を有効利用することを原則とし、盛土材料として良好でない材料等についても適切な処置を施し有効利用することが望ましい」とされているため、今後こうした試みは、広がっていくと考えられる。



写真 1-1 ロックフィルダムの粗粒フィルター材とロック材 (藤崎, 2014)



写真 1-2 道路盛土材料として利用される岩砕(花輪, 2011)

サンゴ礫混じり土(写真 1-3)とは、「死骸化したサンゴが礫として砂や土に混じった混合土」のことで、サンゴの生息域である沖縄県や世界中の温暖で浅い海(図 1-1)に広く存在している。サンゴ礫混じり土に対しては、新城ら(1990)、新城ら(1993)、親泊(2001)、親泊ら(2004)、瀬戸内ら(2006)、高橋ら(2011)、Watabe et al.(2015)、新城(2015)、渡部ら(2016)、具志ら(2017)、Watabe et al.(2017)の研究があり、粒子(礫)自体が破壊される「破碎性」、サンゴ由来の「いびつで大きい礫形状」、一般的な地盤に比べて「緩い堆積」「せん断抵抗角が大きい」などの特殊性を持つことが報告されている。このうち「せん断抵抗角が大きい」という特性は、地盤材料としての活用が期待される性質であり、近年サンゴ混じり土の堆積している浅い海を利用して、沖縄那覇空港滑走路(写真 1-4)を始めとする様々な港湾施設の開発が進んでおり、今後さらにサンゴ礫混じり土を地盤材料として利用していく重要性が増すと予想される。

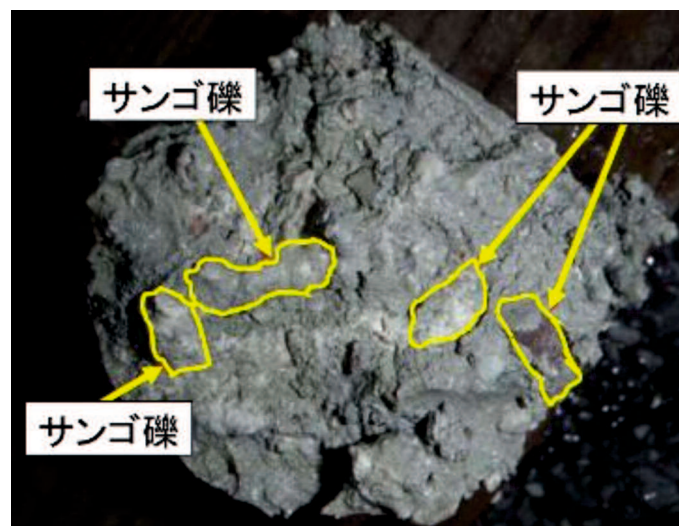


写真 1-3 サンゴ礫混じり土(河合ら,2015 より一部加工)

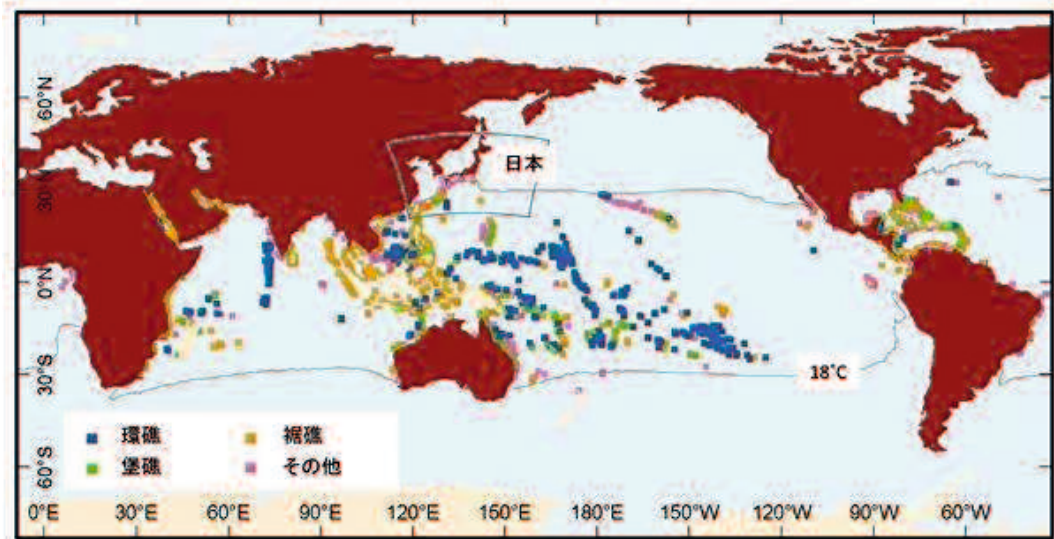


図 1-1 世界のサンゴ礁分布(国立研究開発法人 国立環境研究所ホームページ)



写真 1-4 サンゴ礫混じり土を地盤に含む那覇空港第二滑走路(内閣府沖縄総合事務局ホームページ)

「岩砕を含んだ現地発生土」や「サンゴ礫混じり土」は、粗粒土の中でも、礫分(大粒子)と砂分(小粒子)の粒径に差がある粗粒土である。(これ以降では、礫分を大粒子、砂分を小粒子と呼称する)。このような粗粒土には、「小粒子の影響が支配的で、大粒子の影響を受けない大粒子含有率(砂とみなすことが出来る)」と「大粒子の影響が支配的で、小粒子の影響を受けない大粒子含有率(礫とみなすことが出来る)」があり、双方の間では、大粒子含有率によって、大粒子と小粒子それぞれの影響が出現する程度が変化する。



図 1-2 地盤材料の工学的分類における 2mm 以上の礫を含む粗粒土の分類

土の工学的性質を推定することを目的とした地盤工学会基準 JGS0051「地盤材料の工学的分類」(地盤材料試験の方法と解説, 2009)は、2mm 以上の礫を含む粗粒土を図 1-2 のように分類している。特に、粗粒土は、粒度に基づいて分類がなされている。これによれば、性質の変化点となる大粒子含有率は、5%と 95%、または 15%と 85%である。一方で、粗粒土の性質は、粒子形状の影響を強く受けることが指摘されている(軽部, 1999)ことから、角ばった形状の岩砕や棒状のサンゴ礫を含む土は、この分類に従わない可能性が高い。

そのため、実験などから実際に、これら的大粒子含有率を把握することは、「粒径に差がある粗粒土の設計の指標になる」という工学的だけでなく、「個々の粒子形状と土全体の性質の関係の知見が得られる」「粒径だけでなく、粒子形状も考慮した分類ができる」という学術的な観点からも非常に重要であるが、粒子形状との関係を明らかにした研究はない。

これは、粗粒土は粒径の大きさから、通常の三軸圧縮試験などの要素試験が難しいことが一因である(礫質土の力学特性に関する技術の現状報告, 2001)。

三軸圧縮試験では、取り扱える試料の最大粒径が、供試体直径の 1/10 以下とされている(地盤材料試験の方法と解説, 2009)。そのため、非常に大きな試験装置が必要となり、コストや試験時間、必要試料量の増大を招く。また、使用する乱さない高品質試料は、サンプラーの先端と礫の接触で土が大きく乱されるため、取得が困難である。ポリマーを用いる方法(柳澤, 2004)や気泡を用いる方法(亀尾, 2003)などの、特殊なサンプリング方法が開発されているが、コストの面から、広くは用いられていない。大粒子含有率ごとの性質を調べるためには、非常に多くの調査が必要とされるため、こうした問題の影響がさらに大きくなる。

これまで、「粒状体の力学特性研究委員会(1973)」「粗粒土の強度乗数に関する研究委員会(1977)」「粗粒材料の試験に関する研究委員会(1981)」「礫質土の力学特性についての委員会(2001)」などにより、様々な検討がなされてきたが、根本的な解決には至っていない。

そのため、大粒子の影響を受けない大粒子含有率と、小粒子の影響を受けない大粒子含有率の、攪乱試料を用いた、要素試験よりも簡易な評価方法が必要とされている。



写真 1-5 クリンカアッシュ(若槻ら, 2007)



写真 1-6 再生碎石(山口県庁 HP より)

また近年、地盤材料としてリサイクル粗粒材料を用いる試みがなされている。その中に、クリンカアッシュ(写真 1-5)や再生碎石(写真 1-6)がある。

クリンカアッシュは、火力発電所から発生する生石灰のうち、微粉灰燃焼ボイラー内で燃焼によって生じた石炭灰の粒子が溶解して相互に凝集し、底部の水槽に落下したものであり、主に砂分・礫分で構成されている(若槻ら, 2007)。主な特徴としては、高いせん断強度、良い排水性、内部に空隙を持ち軽量を持つ。そのため、地盤改良を目的として、自然土と混合して利用する方法(吉本ら, 2021)(吉本ら, 2022)が検討されている。

再生碎石は、主にコンクリート構造物の解体現場で発生するコンクリート塊を破碎して生成されたものであり、産業廃棄物であるが、最終処分場の不足という問題に対応するため、地盤材料としての利用が推奨されている(廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用, 1998)、(建設発生土利用技術マニュアル, 2013)。また、コンクリート塊が発生するのは、解体現場だけでない。東日本大震災では、地震と津波の被害により、大量のコンクリート塊が発生している。これに対し、国土交通省は、宅地造成盛土への活用を検討し、実際に利用している(迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方, 2012)。

このように、リサイクル粗粒材料を自然土に混合して利用する場合、その含有率と強度の関係を把握することが重要であるが、含有率ごとに要素試験から明らかにすることは、粒径に関する問題から難しい。そのため、攪乱試料を用いた、要素試験よりも簡易な評価方法で、含有率と強度の関係を把握することが可能となれば、リサイクル材料の利用が容易になるという利点がある。



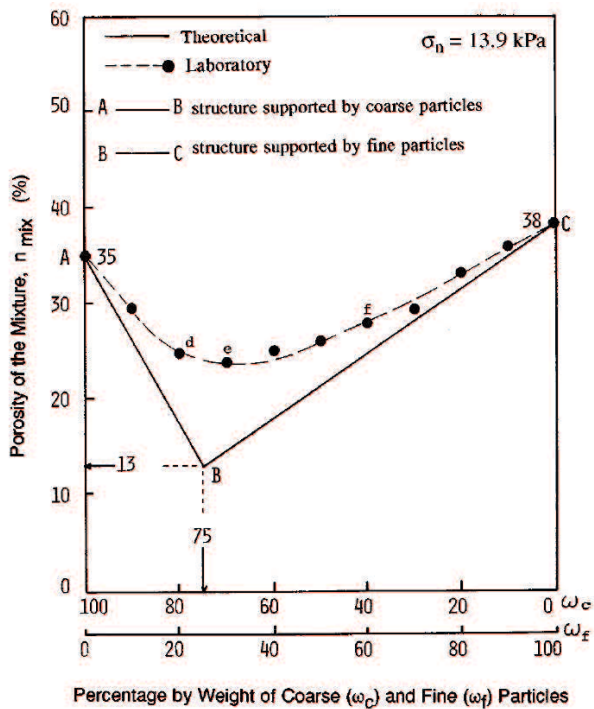
写真 1-7 二種混合体試料の例

大粒子と小粒子の混合率による性質の変化を、より簡易かつ明確に把握するための試料に、二種混合体試料(写真 1-7)がある。二種混合体とは、礫分を代表した 1 種類の大粒子試料と、砂分を代表した 1 種類の小粒子試料を混ぜ合わせた試料である。本研究では、二種混合体を粗粒土をモデル化したものとし、すべての実験と解析で用いる。二種混合体に対して行われた既往研究などを、続く 1.2 節、1.3 節で取り上げる。

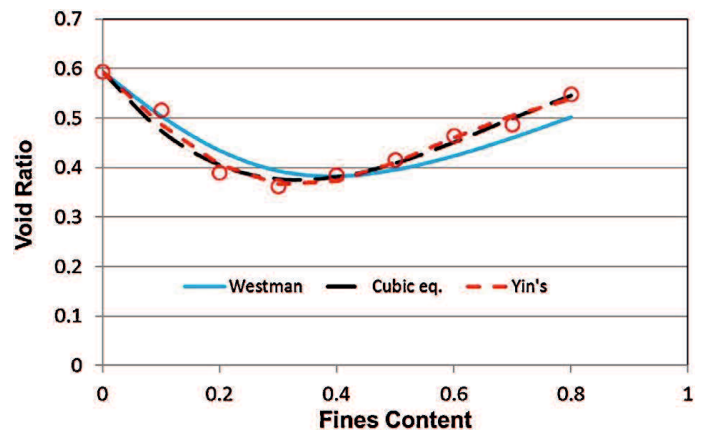
1.2 二種混合体に対する既往の実験・解析的研究

二種混合体の既往の研究には、おもに大粒子試料の含有率が、間隙比に与える影響を取り扱った研究と、せん断強度に与える影響を取り扱った研究の2種類がある。前者は二種混合体の物理的性質、後者は力学的性質に着目した研究である。

1.2.1 二種混合体の間隙比に関する既往の研究



A. 密度実験(Vallejo et al., 2001)

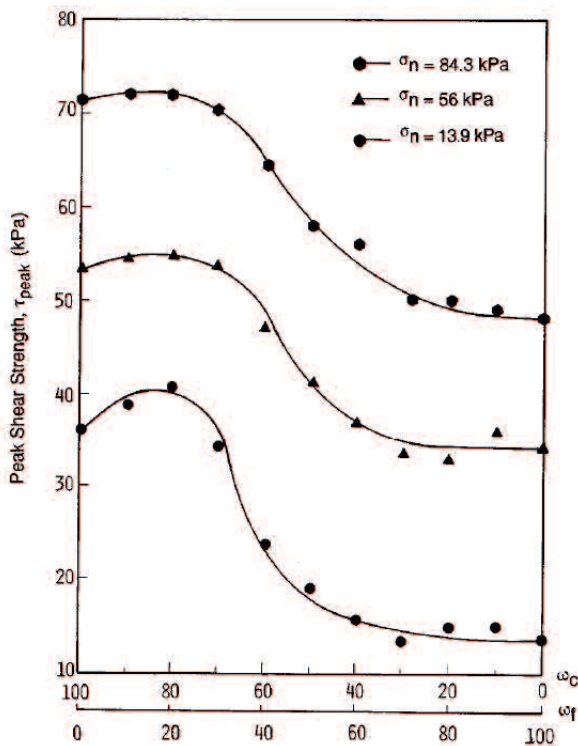


B. DEM 解析(Ng et al. 2018)

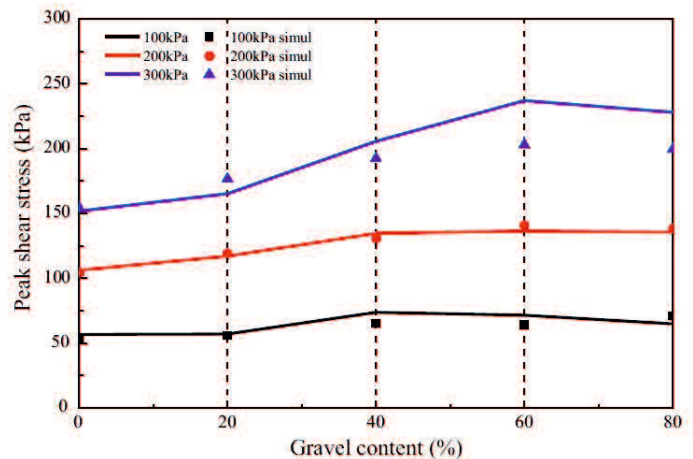
図 1-3 大粒子含有率(小粒子含有率)と間隙比の関係

間隙比の変化に着目した研究には、おもに大粒子と小粒子の粒径比が異なる二種混合体に対して、最小・最大密度試験を実施した実験的研究(McGeary, 1961), (井上ら, 1965), (大嶺ら, 1992), (Vallejo et al., 2001), (Hamidi, 2009)や、それを DEM で再現した数値解析的研究(上田ら, 2009), (Ng et al., 2018)がある。その結果、粒径比が大きいほど、大粒子単体試料や小粒子単体試料よりも、それらを混ぜ合わせた二種混合体の方が、間隙比が小さくなり、さらに大粒子含有率によって間隙比が変化すること、大粒子含有率が40%を超えると Walker-Holtz 法を適用できないこと(兵動ら, 2010)などが指摘されている。

1. 2. 2 二種混合体のせん断強度に関する既往の研究



A. 一面せん断試験(Vallejo et al., 2001)



B. DEM 解析(Xu et al. 2019)

図 1-4 大粒子含有率(小粒子含有率)とせん断強度(ピーク値)の関係

せん断強度に着目した研究には、大粒子試料に直径 5mm、小粒子試料に直径 0.4mm のガラスビーズの二種混合体に対して一面せん断試験を実施した Vallejo et al.(2001)や、大粒子試料を平均粒径 6.7mm の碎石、小粒子試料に平均粒径 0.56mm の砂の二種混合体に対して一面せん断試験を実施した Chang et al.(2016)、それらに類似した(Yanrong et al, 2012), (Xu et al, 2019), (Simoni et al, 2006), (新城, 2006)などの実験的研究がある。また、それを DEM で再現した(Xu et al, 2019), (Xu et al, 2019), (Ueda et al, 2012), (Ueda et al, 2012)などの数値解析的研究がある。Vallejo et al.(2001)の結果では、大粒子含有率が 0%~40% の場合は小粒子のせん断強度が支配的な小粒子骨格構造になり、70%~100% の場合は大粒子のせん断強度が支配的な大粒子骨格構造となること。小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 40%と大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 70%の間では、小粒子と大粒子の影響が混在して現れることが明らかにされた。また、大粒子含有率の違いがあるものの、主に 2 つの大粒子含有率で、せん断強度が変化することが、上記の実験的・数値解析的研究で示されている。さらに、2 つの大粒子含有率のうち、高い方の大粒子含有率は、1.2.1 で示した間隙比が最小となる大粒子含有率と、概ね一致することが確認された。

1.3 二種混合体の骨格構造の限界大粒子含有率を評価する微視的モデル

Lade et al.(1998), Ueda et al.(2011)は、攪乱試料を用いた簡易な実験の結果から、二種混合体の大粒子含有率ごとの工学的性質を、微視的モデルを用いて推定する研究を行った。その結果、大粒子含有率に応じた二種混合体の性質を推定する骨格構造モデルや、小粒子骨格構造と大粒子骨格構造の限界大粒子含有率(図 1-4, 1-5 V_L^a , V_L^b)を算出する理論式を構築した。

1.3.1 二種混合体の間隙比に着目した Lade のモデル

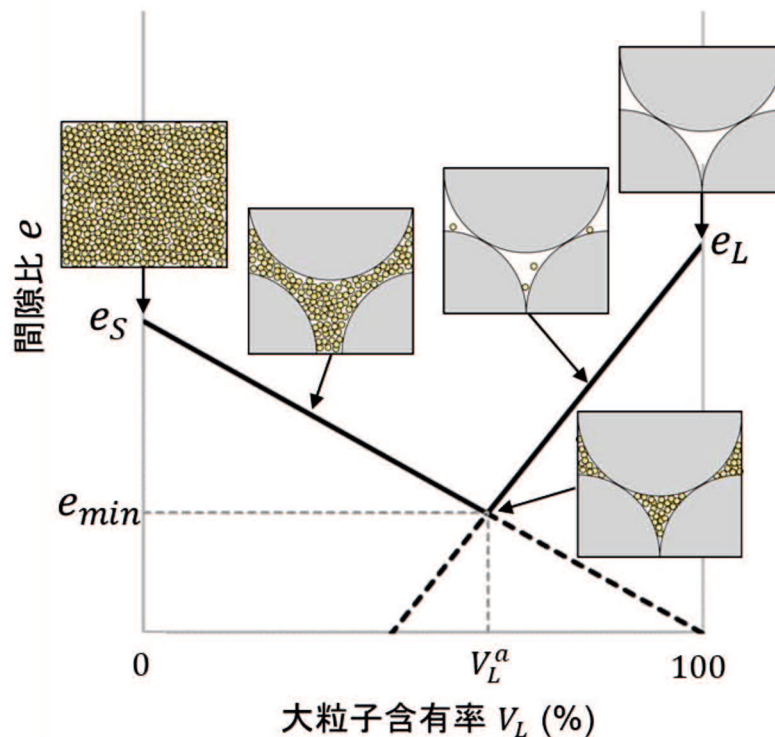


図 1-5 二種混合体の大粒子含有率による間隙比および骨格構造の概念図

Lade et al.(1998)は、二種混合体の間隙比に着目し、以下の検討を行った。

1.2.1 では、粒径の異なる二つの粒子を混合させた場合、二種混合体全体の間隙比が、大粒子試料、小粒子試料の単体での間隙比よりも小さくなることを示した。Lade et al. (1998)は、その現象を説明するため、McGeary(1961)の研究を参考にして、二種混合体が最密充填になるような理想的に充填される状況下で、粒子の配置を幾何学的に考察し、混合割合と間隙比の関係を表す図 1-5 の微視的な骨格構造モデルを提案した。図 1-5 は、大粒子含有率 $V_L\%$ に応じた間隙比の推移と骨格構造の移り変わりを表した概念図である。ここで、大粒子含有率 $V_L\%$ は、二種混合体の土粒子体積のうち、大粒子の土粒子体積が占める比率であり、間隙を含まない土粒子の体積百分率である。

このモデルでは、大粒子含有率 V_L が $0\% \sim V_L^a\%$ の区間では、空間中に大粒子の占める割合が増加するにつれて、二種混合体の間隙比が減少していく。大粒子含有率 V_L が $V_L^a\%$ まで到達すると、理論上、二種混合

体の間隙比が最小となる。大粒子含有率 $V_L^a\% \sim 100\%$ の区間では、大粒子含有率 V_L の上昇に伴い、大粒子試料間の小粒子が減少し、間隙が発生するため、二種混合体全体としての間隙比が増加していく。

Lade et al.(1998)は、大粒子含有率 V_L が $0\% \sim V_L^a\%$ の区間を、大粒子同士が接触せずに離れていることから、小粒子が二種混合体の骨格構造の主体となっているとみなし、小粒子骨格構造とした。同様に、大粒子含有率 $V_L^a\% \sim 100\%$ の区間を、大粒子同士が接触して、大粒子が二種混合体の骨格構造の主体となるとみなし、大粒子骨格構造とし、二種混合体の性質を小粒子骨格構造と大粒子骨格構造の2つに分類した。

さらに Lade et al. (1998)は、大粒子含有率 V_L と間隙比に関する様々な理論式を提案している。それらの式を変形し、本研究で用いるパラメーターに置き換えたものが式(1.1)、式(1.2)である。式(1.1)は、大粒子含有率 V_L が $0\% \sim V_L^a\%$ の小粒子骨格構造における二種混合体試料全体の間隙比 $e_{0 \sim V_L^a}$ 、式(1.2)は、大粒子含有率 $V_L^a\% \sim 100\%$ の大粒子骨格構造における二種混合体試料全体の間隙比 $e_{V_L^a \sim 100}$ の推移線を算出する理論式である。

$$e_{0 \sim V_L^a} = e_s \left(1 - \frac{V_L}{100}\right) \quad (1.1)$$

$$e_{V_L^a \sim 100} = (1 + e_L) \frac{V_L}{100} - 1 \quad (1.2)$$

ここで、 e_s は小粒子単体試料(図 1-5 の大粒子含有率 0%)の間隙比、 e_L は大粒子単体試料(図 1-5 の大粒子含有率 100%)の間隙比である。

式(1.1)、式(1.2)をもとに、小粒子骨格構造と大粒子骨格構造の境界となる大粒子含有率 $V_L^a\%$ を算出する理論式が式(1.3)である。

$$V_L^a = \frac{100(1 + e_s)}{e_L + e_s + 1} \quad (1.3)$$

1.3.2 二種混合体の力学的性質に着目した Ueda のモデル

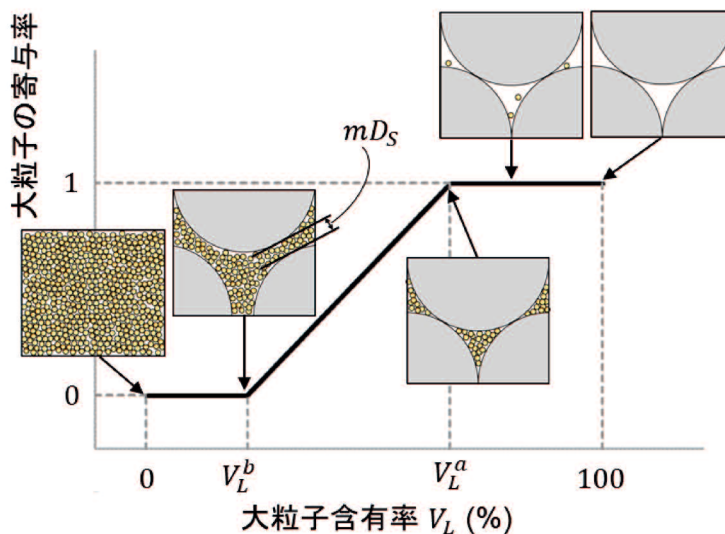


図 1-6 二種混合体の大粒子含有率による大粒子の寄与率の概念図

Ueda et al.(2011)は、二種混合体の力学的性質に着目することで、Lade et al. (1998)の骨格構造モデル(図 1-5)をさらに発展させ、主体となる骨格構造を3つに分割し、それぞれの境界となる小粒子含有率 V_S を算出する理論式を提案した。

Ueda et al. (2011)は、1.2.2 で示した二種混合体に対する室内実験の結果から、Lade et al. (2011)が大粒子同士が接触しないとした小粒子骨格構造において、すでに大粒子の影響が二種混合体に現れる現象に着目した。その現象を説明するために、Lade et al. (1998)が提唱した2つの骨格構造である小粒子骨格構造と大粒子骨格構造の間に、双方の中間骨格構造が存在するとし、図 1-6 に示す骨格構造モデルを提案した。図 1-6 は大粒子含有率 $V_L\%$ に応じた、二種混合体に対する大粒子の影響の寄与率と骨格構造の移り変わりを表した概念図である。図 1-6 中の大粒子含有率 $V_L^b\%$ における小図は、小粒子骨格構造から大粒子の影響が現れる際の、二種混合体の骨格構造である。大粒子含有率 $V_L^b\%$ では、大粒子の間の小粒子が mD_S の距離にわたって、均等に大粒子の影響を媒介すると仮定し、大粒子同士が直接接触しない条件下でも、二種混合体に大粒子の影響が現れる現象を説明した。ここで、 D_S は小粒子の粒径であり、 m は大粒子同士の距離を、小粒子の粒径で割った無次元パラメーターである。大粒子の影響を媒介するとは、「小粒子のみでは生じない接点力を、大粒子間の小粒子が伝達する」と解釈することが出来る。図 1-6 中の大粒子含有率 $V_L^b \sim V_L^a\%$ における二種混合体の性質は、小粒子骨格構造とも大粒子骨格構造とも異なるため、Ueda et al.(2011)は双方の遷移領域と考えて、中間骨格構造とした。これ以降の章では、中間骨格構造の範囲を定める、 V_L^b を小粒子骨格構造の限界大粒子含有率、 V_L^a を大粒子骨格構造の限界大粒子含有率と呼称する。

Ueda et al. (2011)は、この骨格構造モデルをもとに、小粒子骨格構造から大粒子の影響が現れ始める小粒子含有率、つまり、小粒子骨格構造の限界小粒子含有率 $V_S^b\%$ を算出する理論式を導出した。

$$V_S^b = \frac{100\{(\alpha + m)^3 e_L + (\alpha + m)^3 - \alpha^3\}}{(\alpha + m)^3 e_L + (\alpha + m)^3 + \alpha^3 e_S} \quad (1.4)$$

ここで、 α は大粒子と小粒子の粒径比であり、Ueda et al. (2011)は m を2前後の値としている。式(1.4)は、小粒子含有率 V_S を用いているが、本研究に合わせて、大粒子含有率 V_L を算出する形に書き直した理論式が式(1.5)である。

$$V_L^b = \frac{100(1 + e_S)\alpha^3}{(\alpha + m)^3(1 + e_L) + \alpha^3 e_S} \quad (1.5)$$

式(1.5)は、二種混合体は、大粒子と小粒子の2種類の粒子で構成されるため、小粒子含有率 V_S と大粒子含有率 V_L の間に

$$V_S = 100 - V_L \quad (1.6)$$

の関係が成り立つことから、式(1.4)に式(1.6)を代入することで、導出している。

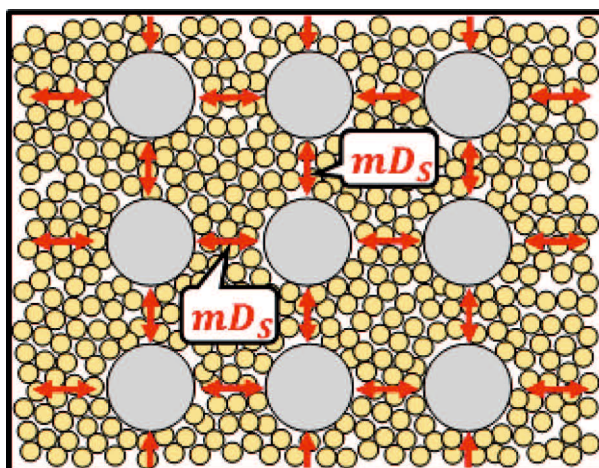


図 1-7 Ueda et al.(2011)の 理論式(1.5)における大粒子の配置

Ueda et al. (2011)が提案した、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^b を算出する理論式(1.5)を、より現実に近づける上で、2つの課題がある。

1つ目は、「大粒子の形状」である。Ueda et al. (2011)の理論式(1.5)では、大粒子の形状を球体として取り扱っている。しかし、実際の大粒子つまり石や礫は、岩砕のように非球形でいびつであることが多い。また、粗粒土のように粒径が大きい場合、粒子の形状が、土の性質に大きな影響を与えること(軽部, 1999)が知られている。そのため、理論式に大粒子の形状を考慮できるパラメーターを導入する必要がある。

2つ目は、「大粒子の配置」である。Ueda et al. (2011)の理論式(1.5)では、大粒子が、図 1-7 に示すように mD_s の間隔で、均等に配置されている。さらに Ueda et al.は、大粒子の配置を確定させるために、DEM解析で大粒子含有率 v_L^b %の状態の二種混合体を再現した解析から $m = 2$ とした。しかし、粒状体が堆積する場合、方向により構造や強度に異方性を有すること(地盤工学用語辞典, 2006)が示されている。これは、重力や締固めの影響で、粒子の配置に異方性が生じているためと考えられる。そのため、大粒子の等間隔な配置は、現実に即しているとは言えず、大粒子配置に異方性を持たせる必要がある。

微視的モデルの小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^b は、粗粒土における「小粒子の影響が支配的で、大粒子の影響を受けない大粒子含有率」、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^a は「大粒子の影響が支配的で、小粒子の影響を受けない大粒子含有率」に該当する。さらに、 $v_L^b \sim v_L^a$ %の中間骨格構造は、図 1-6 に示す通り、大粒子含有率に応じて性質が変化することから、「大粒子含有率による大粒子と小粒子それぞれの影響が出現する程度」を把握することが出来る。

つまり、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^b に、「大粒子形状」と「大粒子配置の異方性」を考慮し、微視的モデルを、より現実に近づけることで、攪乱試料と微視的モデルによる、簡易な粗粒土の評価が可能となる。

1.4 本研究の目的

本研究では、粗粒土の攪乱試料を用いた、要素試験よりも簡易な評価に貢献するために、「粗粒土の大粒子の影響を受けない大粒子含有率と、小粒子の影響を受けない大粒子含有率で定義される中間骨格構造の微視的モデルによる評価」を目的とする。具体的には、特に小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^b に対して、理論的・実験的・解析的検討を実施し、より現実に即した微視的モデルによる二種混合体の中間骨格構造の評価を行うことで、最終的に、微視的モデルの中で、拘束圧の影響を受けるパラメーターを明らかにする。

以下に、検討事項を示す。詳細は次節にて後述する。

<理論的検討>

- ・大粒子形状と大粒子配置の異方性を考慮した微視的モデルを構築する。
- ・実験的検討の粒子特性と限界大粒子含有率の関係をもとに、最小主応力方向の限界粒子間距離 d' (未知数パラメーター)の推定式を導出する。
- ・実験的検討の平面ひずみ圧縮試験および遠心支持力模型実験による拘束圧下での限界大粒子含有率と、微視的モデルの結果を比較し、微視的モデルで拘束圧の影響を考慮すべきパラメーターを明らかにする。

<実験的検討>

- ・安息角実験から、粒子形状などの粒子特性と安息角を指標とした中間骨格構造と大粒子含有率の関係を明らかにする。得られた結果から、粒子特性と中間骨格構造および限界大粒子含有率の関係を取得する。
- ・平面ひずみ圧縮試験から、拘束圧下におけるピーク時の主応力差を指標とした中間骨格構造と大粒子含有率の関係を明らかにする。得られた結果から拘束圧下での限界大粒子含有率を取得する。同時に、残留時の主応力差、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も明らかにし、ピーク時の主応力差を指標とした場合と比較して、考察する。
- ・遠心支持力模型実験から、拘束圧下での載荷応力を指標とした中間骨格構造と大粒子含有率の関係を明らかにする。得られた結果から、拘束圧下の限界大粒子含有率を取得する。

<解析的検討>

- ・DEM解析によって安息角実験の再現解析を実施する。
- ・大粒子配置の異方性に対する仮定の正当性を確認する。
- ・接点力、接点ベクトルの考察から、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにする。

1.5 本論文の構成

本論文は、以下の6章から構成される。

第1章 序論

第2章 大粒子配置の異方性と粒子形状を考慮した微視的モデルの構築

第3章 安息角実験による二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響

第4章 個別要素法による二種混合体の微視的モデルにおける骨格構造モデルの妥当性

第5章 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価

第6章 結論

各章の要点を以下に示す。

【第1章 序論】

粗粒土の特徴と問題、それらを顕著にとらえることが出来る二種混合体、研究の主題となる中間骨格構造や境界となる限界大粒子含有率について概説した。二種混合体に対する既往のせん断強度と間隙比に関する研究、さらに Lade et al. と Ueda et al. が提案した限界大粒子含有率を評価する微視的モデルを示し、課題を明らかにした。最後に、本論文の目的と、章構成およびフローを示した。

【第2章 大粒子配置の異方性と粒子形状を考慮した微視的モデルの構築】

Lade et al. と Ueda et al. の微視的モデルの課題である「大粒子配置の異方性」と「大粒子の形状」を考慮した微視的モデルの構築を試みた。ここでは、中間骨格構造において「最大主応力方向の限界大粒子距離 d 」と「最小主応力方向の限界大粒子距離 d' 」の2つのパラメーターとして導入することで、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルと球体大粒子型理論式を提案した。さらに、その球体大粒子型理論式をもとにして、大粒子の形状を考慮した円柱大粒子型理論式と扁平楕円体大粒子型理論式を提案した。最後に、実験および解析での検討事項についてまとめた。

【第3章 安息角実験による二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響】

二種混合体の中間骨格構造および境界となる限界大粒子含有率 V_L^p , V_L^a % に与える粒子特性の影響を、安息角実験で明らかにすることを試みた。これは、「礫の二種混合体の中間骨格構造における強度の傾向と限界大粒子含有率を把握する」「第2章で導入した最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の推定式を提案する」「第4章の DEM 解析で再現する実験方法や結果を得る」という3つの目的からなっている。実験では、様々な形状や粗度の大粒子試料と小粒子試料を組み合わせ、二種混合体の安息角と間隙比を取得した。取得した結果をもとに、中間骨格構造と限界大粒子含有率に与える粒子特性やその程度について考察し、 d' の推定式を提案した。さらに、 d' の推定式を組み込んだ微視的モデルの安息角実験結果における適用性を評価した。

【第4章 個別要素法による二種混合体の微視的モデルにおける骨格構造モデルの妥当性】

第3章で実施した安息角実験をDEMで再現し、第2章で提案した二種混合体の微視的モデルの骨格構造モデルの妥当性、および二種混合体内部の接点力の状態を明らかにすることを試みた。大粒子の座標データの分析では、大粒子形状を球体としたケースで、大粒子配置の異方性の仮定の正当性を確認し、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルの妥当性を示した。接点力・接点ベクトルの分析では、接点力を、大粒子と大粒子の接触による接点力、小粒子と小粒子の接触による接点力、大粒子と小粒子の接触による接点力に分けて、その大きさや大粒子含有率との関係を考察し、接点ベクトルは、安息状態の砂山の中で、強い接点ベクトルを可視化し、その方向や大粒子含有率との関係を考察することで、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにした。

【第5章 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価】

中間骨格構造および限界大粒子含有率 V_L^b 、 V_L^a %に与える拘束圧の影響を、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験で、明らかにすることを試みた。それぞれの指標は、ピーク時の主応力差と載荷応力である。また、平面ひずみ圧縮試験においては、残留時の主応力差、せん断帯傾斜角、せん断帯の幅を指標とした。中間骨格構造および限界大粒子含有率も取得し、ピーク時の主応力差と比較することで、それぞれが一致するかを示した。

ピーク時の主応力差と載荷応力を指標とした限界大粒子含有率と、微視的モデルから算出した限界大粒子含有率を比較し、微視的モデルのパラメーターの中で拘束圧の影響を考慮すべき重要なパラメーターを明らかにした。

【第6章 結論】

各章で得られた知見をまとめて結論とした。

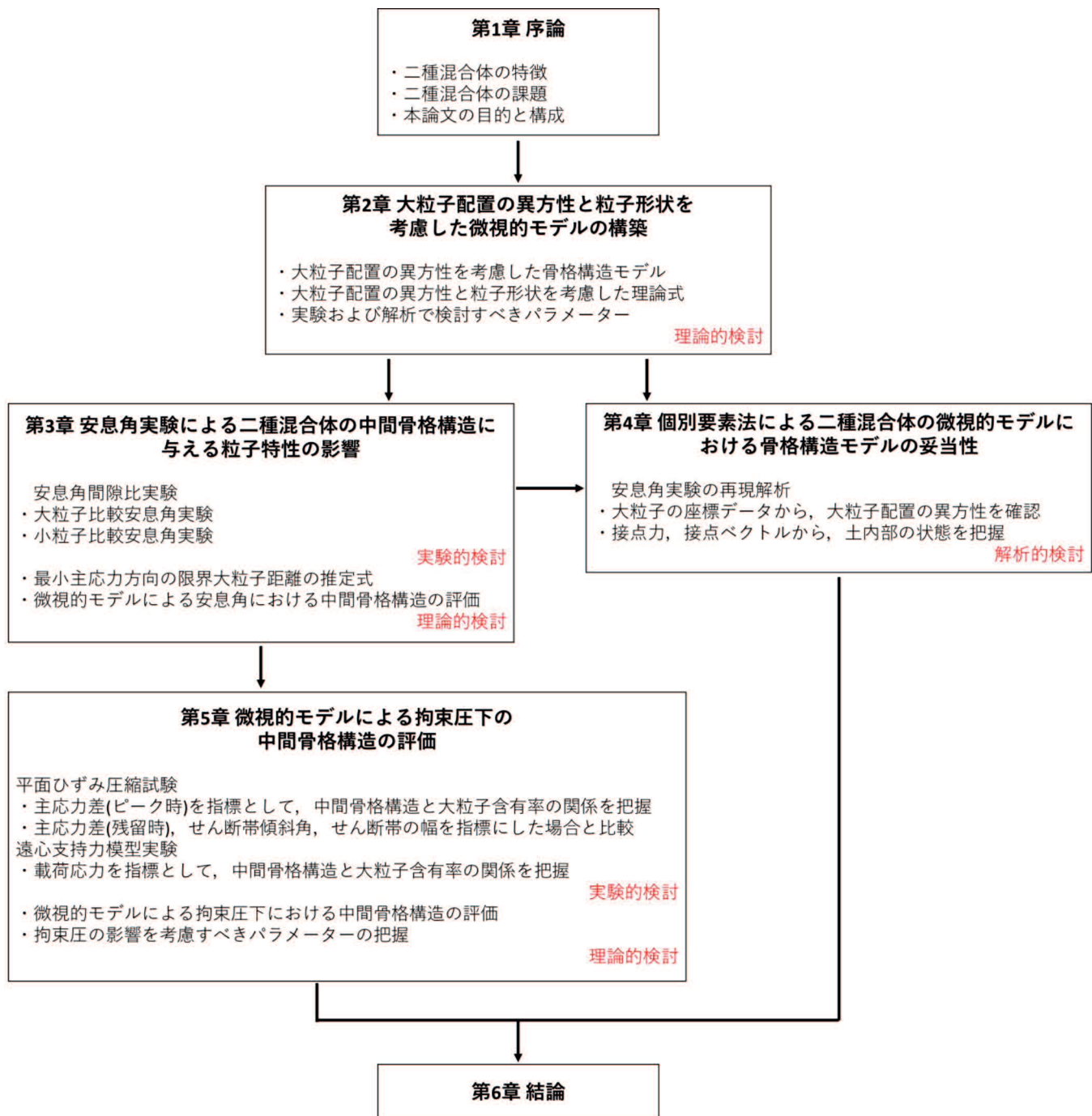


図 1-7 本論文の構成

参考文献

- Chang, W. and Phantachang, T. : Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils, *Engineering Geology*, Vol. 207, No. 3, pp. 78-90, 2016.
- Hamidi, A., Alizadeh, M. and Soleimani, S. : Effect of particle crushing on shear strength and dilation characteristics of sand-gravel mixtures, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-71, 2009.
- Lade, P. V., Liggio, C. D. and Yamamuro, J. A. : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1998.
- McGeary, R. K. : Mechanical packing of spherical particles, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 44, Issue 10, pp. 513-522, 1961.
- Ng, T., Zhou, W., Ma, G. and Chang, X. : Macroscopic and microscopic behaviors of binary mixtures of different particle shapes and particle sizes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 135, No. 15, pp. 74-84, 2018.
- Simoni, A. and Houlsby, G. T. : The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 523-549, 2006.
- Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada, Y. : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, *Granular Matter*, Vol. 13, No. 6, pp. 731-742, 2011.
- Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada Y. : Micro structures of granular materials with various grain size distributions, *Powder Technology*, Vol. 217, pp. 533-539, 2012.
- Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada Y. : Ball-bearing effect on shear behavior of binary granular mixture, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A2*, Vol. 68, No. 1, pp. 1-9, 2012.
- Vallejo, L. E. : Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 5, pp. 1097-1104, 2001.
- Xu, D., Tang, J., Zou, Y., Rui, R. and Liu, H. : Macro and micro investigation of gravel content on simple shear behavior of sand-gravel mixture, *Construction and Building Materials*, Vol. 221, pp. 730-744, 2019.
- Xu, D., Tang, Z. and Zhang, L. : Interpretation of coarse effect in simple shear behavior of binary sand-gravel mixture by DEM with authentic particle shape, *Construction and Building Materials*, Vol. 195, pp. 292-304, 2019.

Yanrong Li, dnan Aydin, Qiang Xu, Jun Chen : Constitutive Behavior of Binary Mixtures of Kaolin and Glass Beads in Direct Shear, KSCE Journal of Civil Engineering, 16(7), pp.1152-1159, 2012.

Yoichi Watabe, Shinji Sassa, Takashi Kaneko, Yukio Nakata : Mechanical characteristics of reconstituted coral gravel soils with different fractions of finger-coral fragments and silt matrix, Soils and Foundations, Volume 55, Issue 5, pp.1233-1242, 2015.

Yoichi Watabe, Shinji Sassa, Takashi Kaneko, Yukio Nakata : Mechanical characteristics of undisturbed coral gravel soils: The intergranular void ratio as a common governing parameter, Soils and Foundations, Vol 57, Issue 5, pp.760-775, 2017.

井上宗治 : 礫混り締固め土の礫率による密度補正法, 農業土木学会誌, 第 57 巻, 第 6 号, pp. 495-499, 1965.

上田高生, 松島亘志, 山田恭央 : 大・小粒子集合体のせん断強度に関する微視力学モデル, 応用力学論文集, Vol. 12, pp. 507-518, 2009.

上本雄也, 澁谷啓, 橋元洋典, 川尻峻三 : 砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, 181-190, 2011.

大嶺聖, 落合英俊 : 土構造に着目した混合土の一次元圧縮特性, 土木学会論文集, No. 457/III-21, pp. 127-136, 1992.

親泊正孝 : さんご礫混じり土に適用された強度試験とその結果に関する幾つかの考察, 土と基礎, 49-3, pp.8-11, 2001.

親泊正孝, 善功企 : 排水特性からみたサンゴ礫混じり土の強度評価上の区分方法, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.1-10, 2004.

金子崇, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正 : タイヤチップおよびその砂との混合土の動的変形特性および地震応答特性, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.1, pp.91-107, 2013.

亀尾佳宏, 杉村淑人, 竹内一郎, 武田伸二 : 気泡式ポーリングによる河床堆積物のコアサンプリングの適用性, 応用地質, Vol.44, No.4, pp.243-248, 2003.

軽部大蔵, 野並賢, 鶴ヶ崎和博, 山口充 : 相似粒度に調整した粗粒材料の強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp.201-211, 1999.

河合弘泰，園田慎一，渡部要一，松本昭二郎，池田政人，高田誠，北村良介：サンゴ礫混じり土の新サンプリング手法と力学特性について，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.3，pp.415-424，2015.

具志良太，江崎荘太：サンゴ礫混じり土調査・設計マニュアルの改訂について，沖縄ブロック国土交通研究会，No.20，2017

公益社団法人 日本道路協会：道路土工一擁壁工指針，1999.

公益社団法人 日本道路協会：道路土工一盛土工指針（平成 22 年度版），2010.

公益社団法人 日本道路協会：道路土構造物技術基準・同解説，2017.

国土交通省：迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方，2012.
https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi01_hh_000002.html

国立研究開発 国立環境研究所：世界のサンゴ礁分布（2022 年 12 月 28 日）
<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/53/10-11.html>

佐藤厚子，西本聡，福島宏文：岩砕材料による盛土の品質管理，地盤工学会誌，Vol.60，No.7，No.654，pp.18-21，2012.

地盤工学会：地盤工学用語辞典，p.168，2006.

地盤工学会地盤調査法改定編集委員会：第 2 編 地盤の工学的分類 第 2 章 地盤材料の工学的分類，地盤材料試験の方法と解説一二分冊の 1-1，pp. 53-80，2009.

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一二分冊の 2-1，pp. 552-660，2009.

地盤工学会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用，pp.31-32 pp.93-95，1998.

社団法人土質工学会：粗粒材料の変形と強度，pp. 1-2，1986.

新城俊也，宮城調勝，小宮康明，島袋進：さんご石灰質砂の力学特性，農業土木学会誌，Vol.59，No.10，pp.1181-1186，1990.

新城俊也，宮城調勝，小宮康明：サンゴ石灰質砂の強度変形特性，農業土木学会論文集，Vol.163，pp.95-

101, 1993.

新城俊也：さんご砂礫のせん断特性，琉球大学農学部学術報告，第48巻，pp.83-93, 2001.

新城俊也：非塑性細粒分を含有するさんご礁堆積物の力学特性，地盤工学ジャーナル，Vol.10, No.4, pp.445-459, 2015.

瀬戸内秀規，小宮康明：シリカ砂および石灰質砂の粒子形状と間隙比および内部摩擦角の関係，地盤工学ジャーナル，Vol.1, No.4, pp.169-174, 2006.

大東憲二，李弘揆，植下協：室内試験にもとづく現場締固め礫質土のせん断強度定数推定法，土木学会論文集，No.493/III-27, pp.31-37, 1994.

高橋研也，片山裕之，関本恒浩，青木健次，茅根創，磯部雅彦：サンゴ礁州島形成に及ぼす波・流れ・礫供給の影響に関する基礎的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.636-640, 2011.

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.

内閣府沖縄総合事務局開発建設部那覇空港プロジェクト室（空港整備課）ホームページ：那覇空港第2滑走路建設現場写真（2019年12月31日）

<http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/information/nahakuukou/genbanikki.html>

中岡時春，望月秋利，阪口理：粗粒材を含む盛土材料の締固め密度の推定，土木学会論文集，No.499/III-28, pp.177-185, 1994.

花輪正也：現地発生した岩砕を有効利用した経済的で安全性の高い道路盛土の構築に関する一考察，近畿地方整備局研究発表会論文集，施工・安全管理対策部門 No.01, 2011.

日笠山徹巳，西林清茂：粗粒材料の締固め特性に関する研究（その1）—砂分含有率が粗粒材料の締固め特性に及ぼす影響—，大林組技術研究所報，No.51, pp.39-42, 1995.

平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.64, No.2, 181-190, 2008.

藤崎勝利：新たなニーズから見たフィルダム建設工事における施工・品質管理技術の高度化，中央大学博士論文，2014.

兵動正幸，金郁基，中田幸男，吉本憲正：砂・粘土混合土の非排水せん断強度特性に及ぼす細粒分の影響，

土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 1, pp. 215-225, 2010.

望月秋利, 中岡時春, 阪口理, 脇阪良男: 室内試験による粗粒盛土材のせん断強度の推定, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.111-120, 2001.

森満雄, 阿部道雄, 森麟: 礫まじり土の締固め密度の推定に関する研究, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.159-171, 1996.

森吉昭, 内田善久, 中野靖, 吉越洋, 石黒健, 太田秀樹: 現場転圧された粗粒材料の高応力下における圧縮性状と材料定数, 土木学会論文集, No. 687/III-56, 233-247, 2001.

柳澤希実, 谷和夫, 金子進, 酒井運雄: 水溶性ポリマーの濃厚溶液を使用した新しいサンプリング方法のメカニズム, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.49-56, 2004.

山口県庁 廃棄物・リサイクル対策課ホームページ: 再生砕石写真(2023年2月10日)

<https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/soshiki/40/20802.html#1>

吉村優治, 小川正二: 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.99108, 1994.

吉本憲正, 中下明文, 大本尚樹: クリンカアッシュと自然土混合試料の圧密及びせん断特性, 地盤と建設, Vol.39, No.1, pp.67-74, 2021

吉本憲正, 多岐涼太, 中下明文, 大本尚樹: 様々な自然土とクリンカアッシュ混合土の圧密排水条件下の力学特性, 第7回地盤改良シンポジウム, 2022.

若槻好孝, 田中等, 内田裕二, 入江功四郎, 兵動正幸, 吉本憲正: クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 4, pp.271-285, 2007.

礫質土の力学特性についての研究委員会: 礫質土の力学特性に関する技術の現状報告, 礫質土の力学特性に関するシンポジウム発表論文集, 2001

渡部要一, 金子崇, 佐々真志: サング礫混じり土の力学特性, 港湾空港技術研究所報告, 第55巻第3号, 2016

第2章 大粒子配置の異方性と粒子形状を考慮した微視的モデルの構築

2.1 概説

第1章で示したように、「岩砕を含んだ現地発生土」や「サンゴ礫混じり土」のような粗粒土は、「小粒子の影響が支配的で、大粒子の影響を受けない大粒子含有率(砂とみなすことが出来る)」と「大粒子の影響が支配的で、小粒子の影響を受けない大粒子含有率(礫とみなすことが出来る)」があり、双方の間では、大粒子含有率によって、大粒子と小粒子それぞれの影響が出現する程度が変化する。さらに、粒度分布が分級していること、大粒子形状がいびつであることから、「地盤材料の工学的分類における 2mm 以上の礫を含む粗粒土の分類」(地盤材料試験の方法と解説, 2009)に従わない可能性が高いため、実際に要素試験などで大粒子含有率ごとの性質を、把握する必要がある。しかし、粒径の大きさの問題から、要素試験や用いる不攪乱試料の採取が難しい(礫質土の力学特性に関する技術の現状報告, 2001)。そのため、攪乱試料を用いた、要素試験よりも簡易な評価方法が必要とされている。

微視的モデルは、攪乱試料と簡易な試験から、二種混合体の小粒子骨格構造、中間骨格構造、大粒子骨格構造を評価することが可能なため、「岩砕を含んだ現地発生土」や「サンゴ礫混じり土」のような粗粒土を評価する上で、重要であると考えられる。

しかし、微視的モデルの骨格構造モデルにおける大粒子の配置は、大粒子が均等に並んだものであり、重力下での堆積による大粒子配置の異方性(地盤工学用語辞典, 2006)が考慮されていない。さらに、理論式において、大粒子形状が球体であるため、大粒子の形状の影響(軽部, 1999)を考慮されていない。

以上を踏まえ、本章では、微視的モデルの骨格構造モデルに、大粒子配置の異方性を考慮したパラメータを導入する。理論式に、大粒子配置の異方性と非球体大粒子の形状を表すパラメータを導入する。最後に、第3章以降での検討事項を示す。

以下に本章の構成を述べる。

まず、第2節で、骨格構造モデルに、大粒子配置の異方性を考慮したパラメータの導入を行う。次に、第3節では、大粒子配置の異方性を考慮したパラメータを導入した V_L^b の理論式を導出し、その理論式に、非球体大粒子の形状を表すパラメータを導入した理論式を導出する。第4節では、第3章以降での検討事項を示す。最後に、第5節では、本章で得られた知見をまとめる。

2.2 大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデル

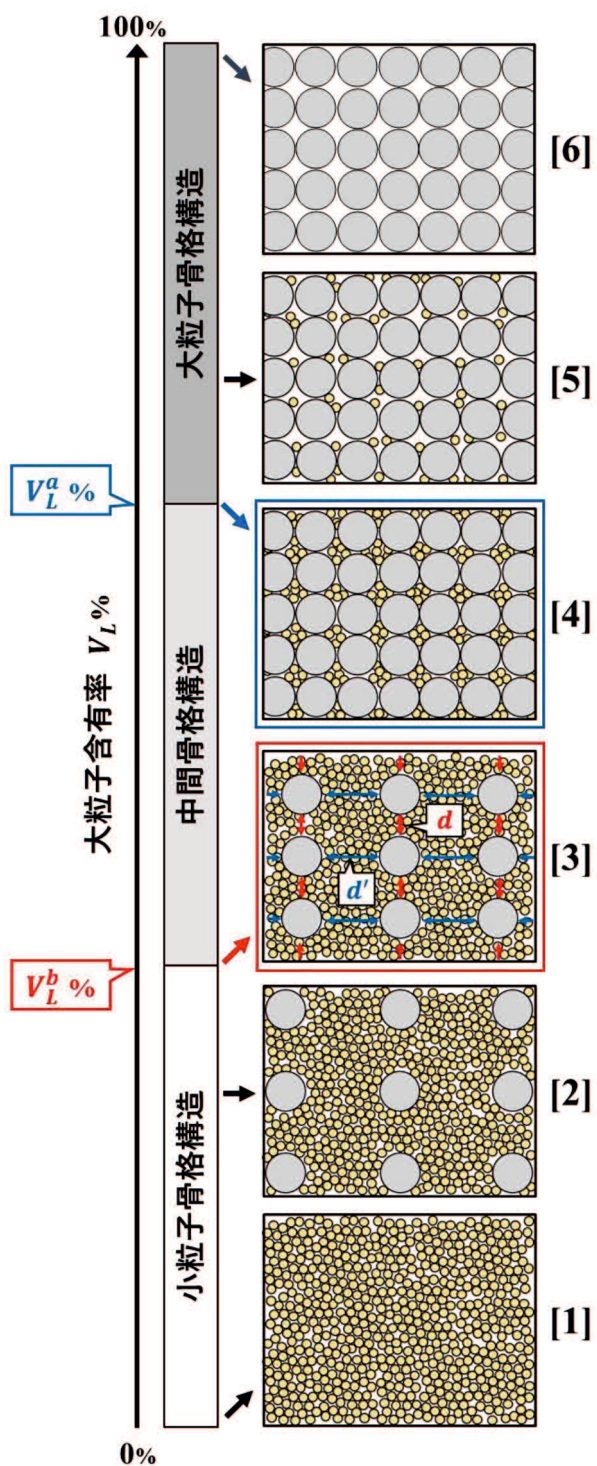


図 2-1 大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデル

図 2-1 に大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルを示す。

第 1 章 1.3.2 で示したように、Ueda et al.(2011)の微視的モデルでは、小粒子骨格構造と中間骨格構造の境界である小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b %において、大粒子の間の小粒子が mD_S の距離で、均等に大粒子の影響を媒介すると仮定する。この仮定をもとに、大粒子同士が直接接触しない条件下でも、二種混合体に大粒子の影響が現れる現象を説明した。ここで、 D_S は小粒子の粒径であり、 m は大粒子同士の距離を、小粒子の粒径で割った無次元パラメーターである。また、大粒子の影響を媒介するとは、「小粒子のみでは生じない接点力を、大粒子間の小粒子が伝達する」と解釈することが出来る。

しかし、粒状体が堆積する場合、方向により構造や強度に異方性を有すること(地盤工学用語辞典, 2009)が報告されている。これは、重力や締固めの影響で、粒子の配置に異方性が生じているためと考えられる。そのため、大粒子の等間隔な配置は、現実に即しているとは言えず、大粒子配置に異方性を持たせる必要がある。また、重力下における堆積では、最大主応力が、三次元空間における z 軸方向になり、最小主応力が x 軸方向と y 軸方向になるため、接点力についても異方性があると考えられる。

本研究では、「最大主応力方向は、大粒子同士が接近しており、最小主応力方向は、大粒子同士が離れている」という仮定の下、図 2-1 の[3]に示すように、 d と d' の 2 種類の大粒子間の距離を用いて、大粒子配置の異方性を表現した。ここで d と d' は、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b %における大粒子同士の距離を表すことから、限界大粒子距離と呼称する。 d は最大主応力方向の限界大粒子距離であり、Ueda et al. (2011)の大粒子同士の距離と同様に、 mD_S である。 d' は最小主応力方向の限界大粒子距離である。両者の大小関係は、 $d \leq d'$ の関係となる。また、微視的モデルは、初期の堆積状態を想定しているため、 d は三次元空間における z 軸方向、 d' は三次元空間における x 軸、 y 軸方向である。

2.3 大粒子配置の異方性および粒子形状を考慮した理論式

2.2 では、限界大粒子距離 d と d' を組み込むことで、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルを提案した。同様に、Ueda et al. (2011)の球体大粒子型理論式に、 d と d' を組み込み、大粒子配置の異方性を表現する。また、二種混合体にはサンゴ礫や碎石(岩砕)など、非球体形状の礫を含むものがある。これらは、粒径が大きいため、形状の影響を無視することはできない。そこで理論式に、大粒子の粒子形状を表現するパラメーターを組み込み、粒子形状を考慮した大粒子が非球体形状の V_L^b の理論式を提案する。

2.3.1 大粒子配置の異方性を考慮した球体大粒子型理論式

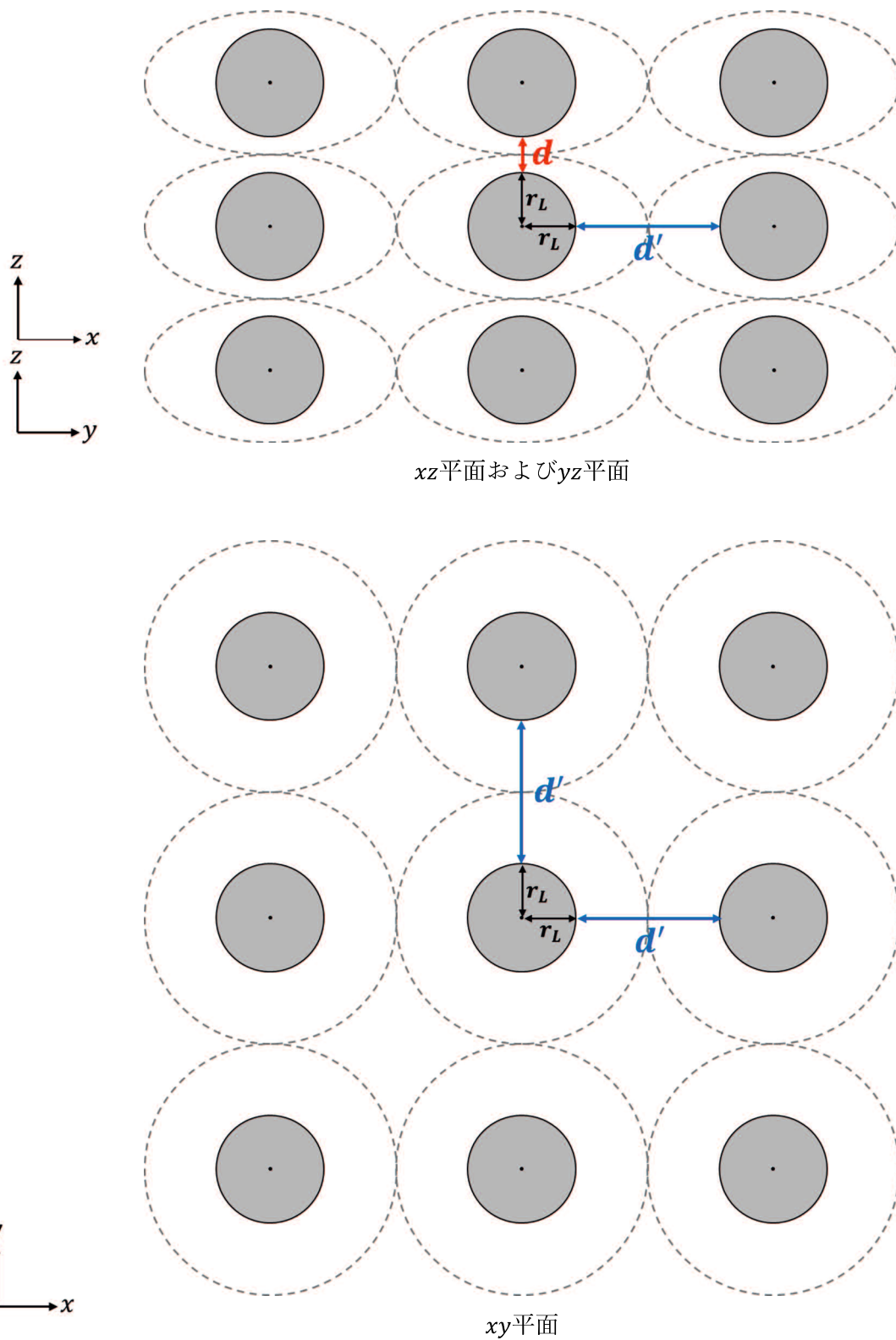


図 2-2 V_L^b (図 2-1 の状態[3])における球体大粒子と扁球仮想空間の配置

異方性を考慮して、図 2-2 のように、最大主応力方向に d 、最小主応力方向に d' の間隔で、球体大粒子を配置する。ここで、最大主応力方向は、鉛直方向 (z 軸方向)、最小主応力方向は、水平方向 (x 軸と y 軸方向) であり、 $d \leq d'$ の関係になっている。また、大粒子含有率が $V_L^p\%$ であるため、球体大粒子 (グレー) 以外の空間は、小粒子で満たされている。

球体大粒子の中心から、 z 軸方向に $r_L + \frac{1}{2}d$ の半短軸、 xy 平面方向に $r_L + \frac{1}{2}d'$ の半長軸を有する扁球仮想空間 (破線) を考える。扁球仮想空間は、内部に小粒子と球体大粒子を含んでいる。

このとき、扁球仮想空間の体積 V^{hyp} は、

$$V^{hyp} = \frac{4}{3}\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)^2 \quad (2.1.1)$$

元の球体大粒子の粒子体積 V_{solid}^L は、

$$V_{solid}^L = \frac{4}{3}\pi r_L^3 \quad (2.1.2)$$

となる。

両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ は、

$$\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)^2}{\frac{4}{3}\pi r_L^3} = \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)^2 \quad (2.1.3)$$

扁球仮想空間の体積 V^{hyp} は、両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ と元の球体大粒子の粒子体積 V_{solid}^L を用いて、

$$V^{hyp} = V_{solid}^L \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)^2 \quad (2.1.4)$$

と表せる。

扁球仮想空間による間隙比 $e_L (= e_{hyp})$ は、

$$e_L (= e_{hyp}) = \frac{V_{void}^{hyp}}{V^{hyp}} \quad (2.1.5)$$

であり、この式 (2.1.5) を変形すると

$$V_{void}^{hyp} = V^{hyp} e_L \quad (2.1.6)$$

式 (2.1.6) に式 (2.1.4) を代入すると

$$V_{void}^{hyp} = V_{solid}^L \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 e_L \quad (2.1.7)$$

となる。

扁球仮想空間内に含まれる小粒子の粒子と間隙の合計体積 V_b は、扁球仮想空間の体積 V^{hyp} と球体大粒子の粒子体積 V_{solid}^L の差であるから、

$$V_b = V^{hyp} - V_{solid}^L = \frac{4}{3}\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d \right) \left(r_L + \frac{1}{2}d' \right)^2 - \frac{4}{3}\pi r_L^3 \quad (2.1.8)$$

式(2.1.7)と式(2.1.8)を組み合わせることで、球体大粒子の集合体による間隙比 V_{void}^L は、

$$V_{void}^L = V_{void}^{hyp} + \frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi r_L^3} V_b$$

と表せる。

ここで、 $\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi r_L^3} V_b$ について補足すると、

- ・ V_{solid}^L → 球体大粒子の集合体の粒子体積
- ・ $\frac{4}{3}\pi r_L^3$ → 球体大粒子一つあたりの粒子体積
- ・ V_b → 球体大粒子一つあたりの扁球仮想空間と球体大粒子の体積差

$\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi r_L^3}$ で球体大粒子の個数、 $\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi r_L^3} V_b$ で「球体大粒子の個数分の V_b の体積」を意味している。

V_{void}^L の計算を進めると、

$$\begin{aligned} V_{void}^L &= V_{solid}^L \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 e_L + V_{solid}^L \times \frac{1}{\frac{4}{3}\pi r_L^3} \times \left[\frac{4}{3}\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d \right) \left(r_L + \frac{1}{2}d' \right)^2 - \frac{4}{3}\pi r_L^3 \right] \\ &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 (1 + e_L) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

を得る。

また、球体大粒子の集合体の間隙体積は、小粒子の粒子体積も含んでいる。球体大粒子を考慮しない(小粒子のみの)間隙比 e_s は、

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} \quad (2.1.10)$$

と定義される。

ここで、小粒子の集合体の間隙体積 V_{void}^S は、

$$V_{void}^S = V_{void}^L - V_{solid}^S \quad (2.1.11)$$

なので、小粒子の集合体の間隙比は、

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L - V_{solid}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \quad (2.1.12)$$

となる。

式(2.1.9)と式(2.1.12)を組み合わせる。

まず、式(2.1.12)を変形すると、

$$e_s = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \Rightarrow V_{void}^L = V_{solid}^S(1 + e_s) \quad (2.1.13)$$

となる。

この変形式(2.1.13)を式(2.1.9)の左辺に代入すると

$$\begin{aligned} V_{solid}^S(1 + e_s) &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 (1 + e_L) - 1 \right] \\ \Leftrightarrow \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} (1 + e_s) &= \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 (1 + e_L) - 1 \\ \Leftrightarrow \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^S} &= \frac{1 + e_s}{\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L} \right) \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L} \right)^2 (1 + e_L) - 1} \\ &= \frac{r_L^3(1 + e_s)}{\left(r_L + \frac{1}{2}d \right) \left(r_L + \frac{1}{2}d' \right)^2 (1 + e_L) - r_L^3} \end{aligned} \quad (2.1.14)$$

この式(2.1.14)の分母・分子を入れ替え、整理すると

$$\frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} = \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d \right) \left(r_L + \frac{1}{2}d' \right)^2 (1 + e_L) - r_L^3}{r_L^3(1 + e_s)} \quad (2.1.15)$$

となる。

ここで、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は以下のように定義される。

V_L^b の定義式

$$V_L^b = \frac{100V_{solid}^L}{V_{solid}^L + V_{solid}^S} \quad (2.1.16)$$

この定義式(2.1.16)の分母・分子を V_{solid}^L で除すと、

$$V_L^b = \frac{100 \times \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L}}{\frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L} + \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L}} \quad (2.1.17)$$

この式(2.1.17)に式(2.1.15)を代入して整理する。

$$\begin{aligned} V_L^b &= \frac{100}{\frac{r_L^3(1+e_S)}{r_L^3(1+e_S)} + \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)^2(1+e_L) - r_L^3}{r_L^3(1+e_S)}} \\ &= \frac{100r_L^3(1+e_S)}{r_L^3 + r_L^3e_S + \left(r_L + \frac{1}{2}d\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)^2(1+e_L) - r_L^3} \\ &= \frac{100r_L^3(1+e_S)}{\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)^2(1+e_L) + r_L^3e_S} \\ &= \frac{100 \times 8r_L^3(1+e_S)}{(2r_L + d)(2r_L + d')^2(1+e_L) + 8r_L^3e_S} \end{aligned} \quad (2.1.18)$$

この式(2.1.18)に $2r_L = D_L$ を代入すると、最終的に大粒子配置の異方性を考慮した球体大粒子型理論式(式(2.1.19))を得る。

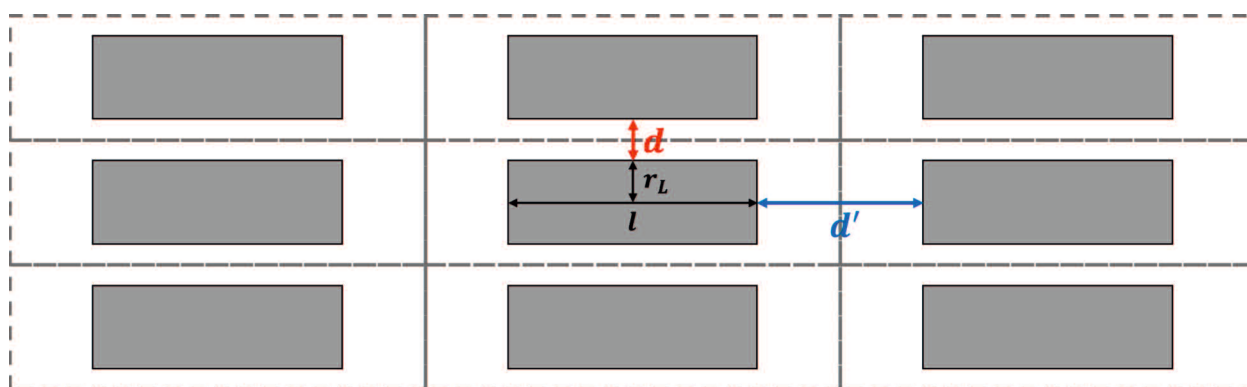
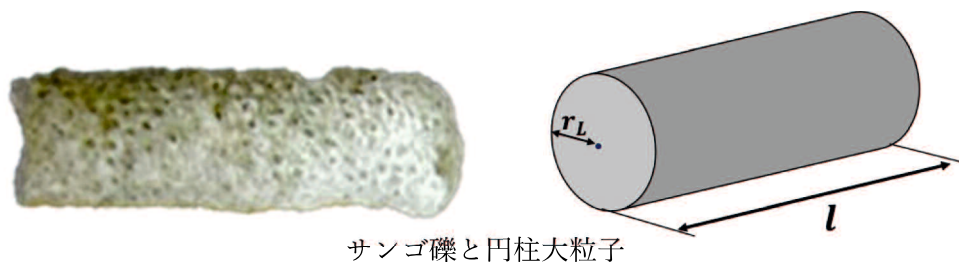
$$V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_S)}{(D_L + d)(D_L + d')^2(1+e_L) + D_L^3e_S} \quad (2.1.19)$$

また、式(2.1.19)中の限界大粒子距離 d と d' を 0、つまり球体大粒子同士が完全に接触する(図 2-1 の状態 [4])条件を与えると、

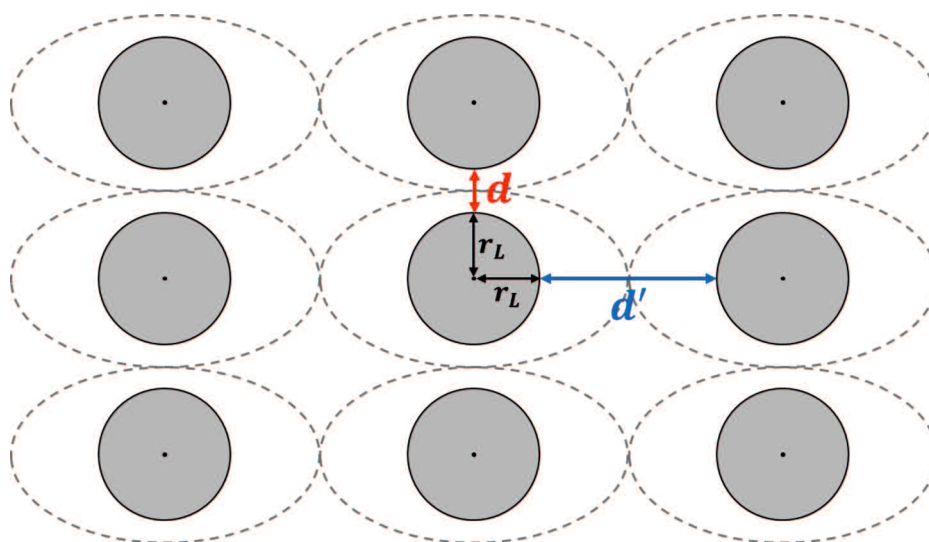
$$\begin{aligned} &\frac{100D_L^3(1+e_S)}{(D_L + d)(D_L + d')^2(1+e_L) + D_L^3e_S} \\ &= \frac{100D_L^3(1+e_S)}{D_L^3(1+e_L) + D_L^3e_S} \\ &= \frac{100(1+e_S)}{e_L + e_S + 1} = V_L^a \end{aligned}$$

となり、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a (Lade et al.の理論式)を、導くことが出来る。

2.3.2 サンゴ礫を模した円柱大粒子型理論式



xz平面



yz平面

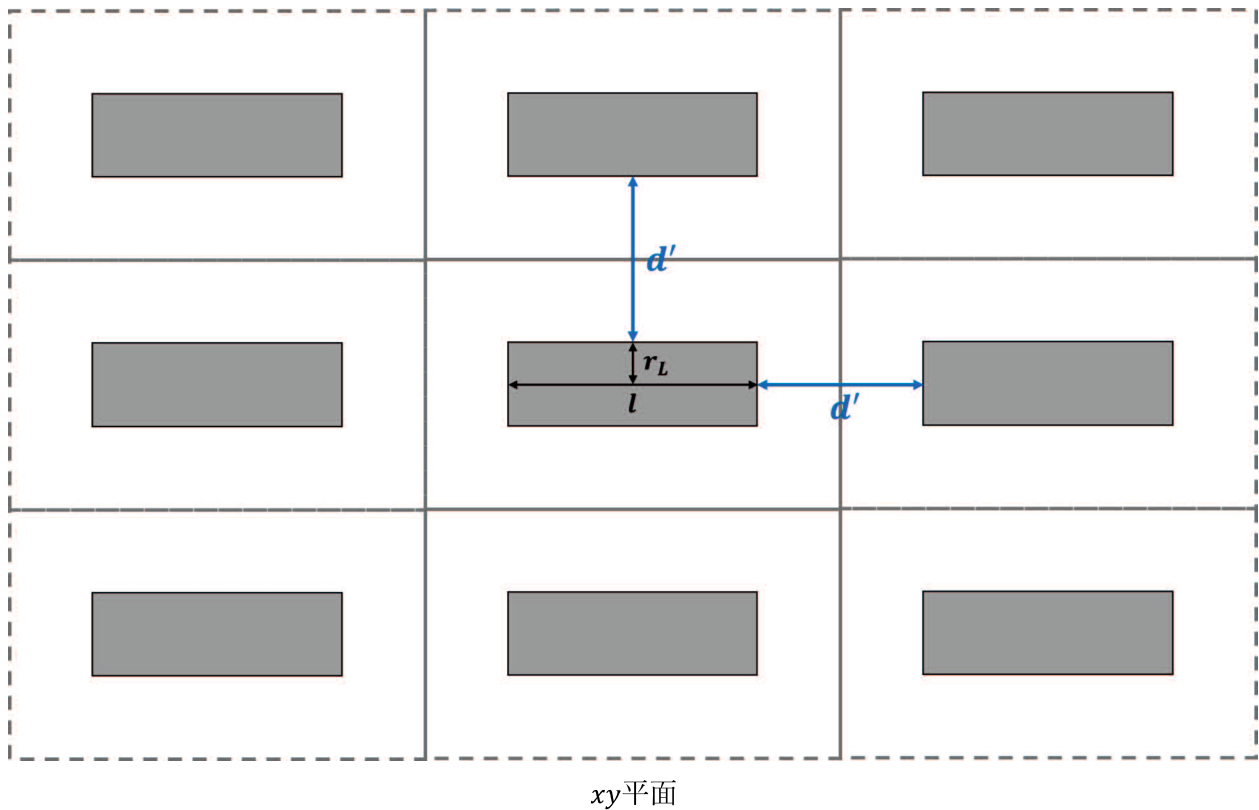


図 2-3 円柱大粒子と扁平円柱仮想空間の寸法および限界大粒子距離

サンゴ礫混じり土に含まれるサンゴ礫は、図 2-3 のように棒状のものがあ、その形状が粗粒土の性質に影響を与えている。ここでは、サンゴ礫を円柱大粒子として組み込み、サンゴ礫の粒子形状を考慮した円柱大粒子型理論式を導出する。

異方性を考慮して、図 2-3 のように、最大主応力方向に d 、最小主応力方向に d' の間隔で、円柱大粒子を配置する。ここで、最大主応力方向は、鉛直方向 (z 軸方向)。最小主応力方向は、水平方向 (x 軸と y 軸方向) であり、 $d \leq d'$ の関係になっている。また、大粒子含有率が $V_L^b\%$ であるため、円柱大粒子 (グレー) 以外の空間は、小粒子で満たされている。

円柱大粒子の中心から、 z 軸方向に $r_L + \frac{1}{2}d$ の半短軸、 x 軸方向に $l + d'$ の長さ、 y 軸方向に $r_L + \frac{1}{2}d'$ の半長軸を有する扁平円柱仮想空間 (破線) を考える。扁平円柱仮想空間は、内部に小粒子と円柱大粒子を含んでいる。

このとき、扁平円柱仮想空間の体積 V^{hyp} は、

$$V^{hyp} = \pi \left(r_L + \frac{1}{2}d' \right) \left(r_L + \frac{1}{2}d \right) (l + d') \quad (2.2.1)$$

元の円柱大粒子の粒子体積 V_{solid}^L は,

$$V_{solid}^L = \pi r_L^2 l \quad (2.2.2)$$

となる.

両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ は,

$$\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L} = \frac{\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) (l + d')}{\pi r_L^2 l} = \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) (l + d')}{r_L^2 l} \quad (2.2.3)$$

扁平円柱仮想空間の体積 V^{hyp} は, 両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ と元の円柱大粒子の粒子体積 V_{solid}^L を用いて,

$$V^{hyp} = V_{solid}^L \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) (l + d')}{r_L^2 l} \quad (2.2.4)$$

と表せる.

扁平円柱仮想空間による間隙比 $e_L (= e_{hyp})$ は,

$$e_L (= e_{hyp}) = \frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L} \quad (2.2.5)$$

であり, この式(2.2.5)を変形すると

$$V_{void}^{hyp} = V^{hyp} e_L \quad (2.2.6)$$

式(2.2.6)に式(2.2.4)を代入すると

$$V_{void}^{hyp} = V_{solid}^L \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) (l + d')}{r_L^2 l} e_L \quad (2.2.7)$$

となる.

扁平円柱仮想空間内に含まれる小粒子の粒子と間隙の合計体積 V_b は, 扁平円柱仮想空間の体積 V^{hyp} と円柱大粒子の粒子体積 V_{solid}^L の差であるから,

$$V_b = V^{hyp} - V_{solid}^L = \pi \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right) \left(r_L + \frac{1}{2}d\right) (l + d') - \pi r_L^2 l \quad (2.2.8)$$

式(2.2.7)と式(2.2.8)を組み合わせることで, 円柱大粒子の集合体による間隙比 V_{void}^L は,

$$V_{void}^L = V_{void}^{hyp} + \frac{V_{solid}^L}{\pi r_L^2 l} V_b$$

と表せる.

ここで, $\frac{V_{solid}^L}{\pi r_L^2 l} V_b$ について補足すると,

- V_{solid}^L → 円柱大粒子の集合体の粒子体積
- $\pi r_L^2 l$ → 円柱大粒子一つあたりの粒子体積

・ V_b → 円柱大粒子一つあたりの扁平円柱仮想空間と円柱大粒子の体積差

$\frac{V_{solid}^L}{\pi r_L^2 l}$ で円柱大粒子の個数, $\frac{V_{solid}^L}{\pi r_L^2 l} V_b$ で「円柱大粒子の個数分の V_b の体積」を意味している.

V_{void}^L の計算を進めると,

$$\begin{aligned} V_{void}^L &= V_{solid}^L \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')}{r_L^2 l} e_L + V_{solid}^L \times \frac{1}{\pi r_L^2 l} \times \left[\pi \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d') - \pi r_L^2 l \right] \\ &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right)\left(\frac{l + d'}{l}\right)(1 + e_L) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

を得る.

また, 円柱大粒子の集合体の間隙体積は, 小粒子の粒子体積も含んでいる. 円柱大粒子を考慮しない (小粒子のみの) 間隙比 e_s は,

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} \quad (2.2.10)$$

と定義される.

ここで, 小粒子の集合体の間隙体積 V_{void}^S は,

$$V_{void}^S = V_{void}^L - V_{solid}^S \quad (2.2.11)$$

なので, 小粒子の集合体の間隙比は,

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L - V_{solid}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \quad (2.2.12)$$

となる.

式(2.2.9)と式(2.2.12)を組み合わせる.

まず, 式(2.2.12)を変形すると,

$$e_s = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \Rightarrow V_{void}^L = V_{solid}^S (1 + e_s) \quad (2.2.13)$$

となる.

この変形式(2.2.13)を式(2.2.9)の左辺に代入すると

$$\begin{aligned} V_{solid}^S (1 + e_s) &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right)\left(\frac{l + d'}{l}\right)(1 + e_L) - 1 \right] \\ \Leftrightarrow \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} (1 + e_s) &= \left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right)\left(\frac{l + d'}{l}\right)(1 + e_L) - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Leftrightarrow \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^S} &= \frac{1 + e_S}{\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d'}{r_L}\right)\left(\frac{r_L + \frac{1}{2}d}{r_L}\right)\left(\frac{l + d'}{l}\right)(1 + e_L) - 1} \\
&= \frac{r_L^2 l (1 + e_S)}{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')(1 + e_L) - r_L^2 l}
\end{aligned} \tag{2.2.14}$$

この式(2.2.14)の分母・分子を入れ替え、整理すると

$$\frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} = \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')(1 + e_L) - r_L^2 l}{r_L^2 l (1 + e_S)} \tag{2.2.15}$$

となる。

ここで、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は以下のように定義される。
 V_L^b の定義式

$$V_L^b = \frac{100V_{solid}^L}{V_{solid}^L + V_{solid}^S} \tag{2.2.16}$$

この定義式(2.2.16)の分母・分子を V_{solid}^L で除すと、

$$V_L^b = \frac{100 \times \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L}}{\frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L} + \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L}} \tag{2.2.17}$$

この式(2.2.17)に式(2.2.15)を代入して整理する。

$$\begin{aligned}
V_L^b &= \frac{100}{\frac{r_L^2 l (1 + e_S)}{r_L^2 l (1 + e_S)} + \frac{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')(1 + e_L) - r_L^2 l}{r_L^2 l (1 + e_S)}} \\
&= \frac{100r_L^2 l (1 + e_S)}{r_L^2 l + r_L^2 l e_S + \left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')(1 + e_L) - r_L^2 l} \\
&= \frac{100r_L^2 l (1 + e_S)}{\left(r_L + \frac{1}{2}d'\right)\left(r_L + \frac{1}{2}d\right)(l + d')(1 + e_L) + r_L^2 l e_S} \\
&= \frac{100 \times 4r_L^2 l (1 + e_S)}{(2r_L + d')(2r_L + d)(l + d')(1 + e_L) + 4r_L^2 l e_S}
\end{aligned} \tag{2.2.18}$$

この式(2.2.18)に $2r_L = D_L$ を代入すると、最終的に大粒子配置の異方性を考慮した円柱大粒子型理論式(式(2.2.19))を得る。

$$V_L^b = \frac{100D_L^2l(1+e_S)}{(D_L+d')(D_L+d)(l+d')(1+e_L)+D_L^2le_S} \quad (2.2.19)$$

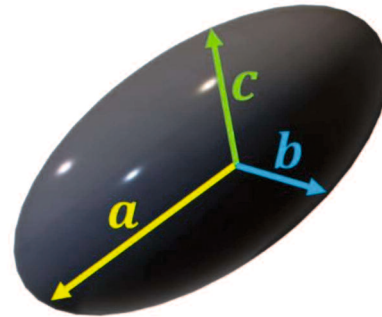
ここで、式中の l は円柱の長さである。

また、式(2.2.19)中の限界大粒子距離 d と d' を 0、つまり円柱大粒子同士が完全に接触する(図 2-1 の状態 [4])条件を与えると、

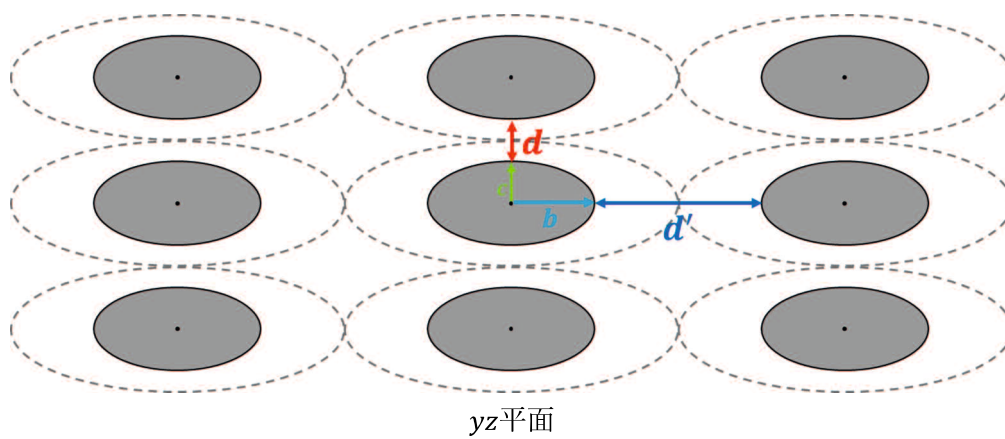
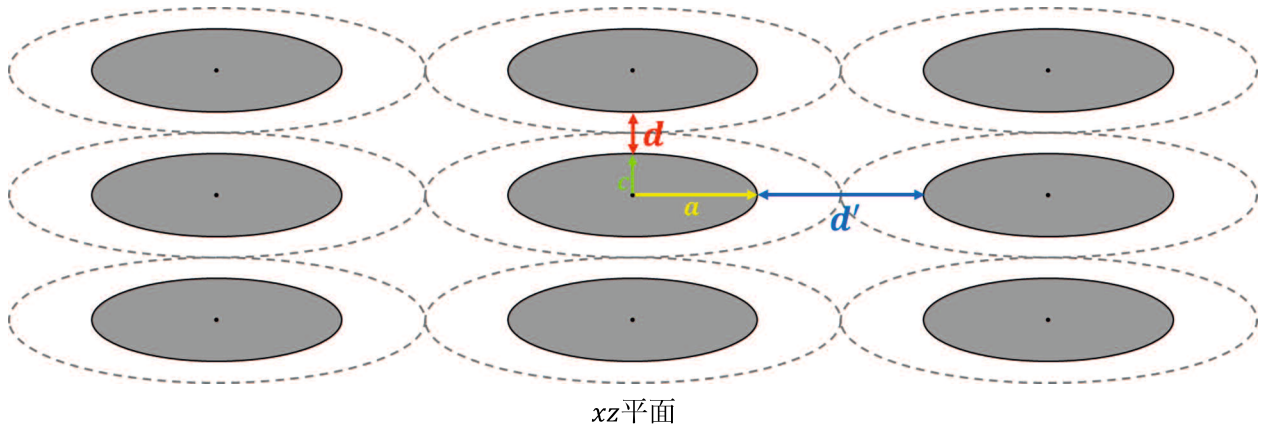
$$\begin{aligned} & \frac{100D_L^2l(1+e_S)}{(D_L+d')(D_L+d)(l+d')(1+e_L)+D_L^2le_S} \\ &= \frac{100D_L^2l(1+e_S)}{D_L^2l(1+e_L)+D_L^2le_S} \\ &= \frac{100(1+e_S)}{e_L+e_S+1} = V_L^a \end{aligned}$$

となり、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a (Lade et al.の理論式)を、導くことが出来る。

2.3.3 碎石(岩碎)を模した扁平楕円体大粒子型理論式



碎石と扁平楕円体大粒子



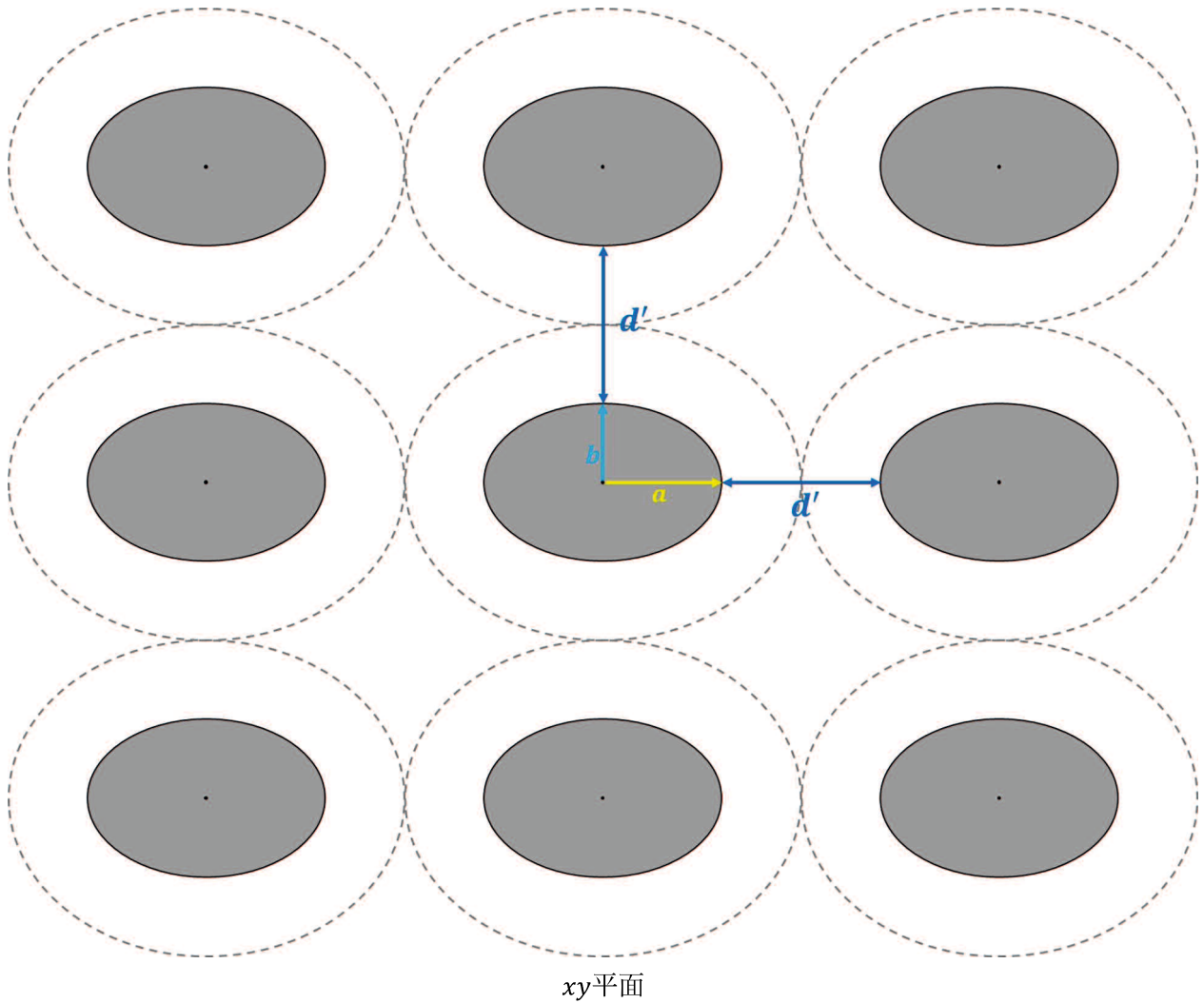


図 2-4 扁平楕円体大粒子と扁平円柱仮想空間の寸法および限界大粒子距離

砕石に限らず、球体でないいびつな形状の礫は多数存在する。ここでは、いびつな礫を扁平楕円体として組み込み、粒子形状のいびつさを考慮した扁平楕円体大粒子型理論式を導出する。扁平楕円体の x 軸方向の半長軸長さは a 、 y 軸方向の半中軸長さは b 、 z 軸方向の半短軸長さは c である。

異方性を考慮して、図 2-4 のように、最大主応力方向に d 、最小主応力方向に d' の間隔で、扁平楕円体大粒子を配置する。ここで、最大主応力方向は、鉛直方向(z 軸方向)、最小主応力方向は、水平方向(x 軸と y 軸方向)であり、 $d \leq d'$ の関係になっている。また、大粒子含有率が $V_L^b\%$ であるため、扁平楕円体大粒子(グレー)以外の空間は、小粒子で満たされている。

扁平楕円体大粒子の中心から、 z 軸方向に $c + \frac{1}{2}d$ の半短軸長さ、 x 軸方向に $a + \frac{1}{2}d'$ の半長軸長さ、 y 軸方向に $b + \frac{1}{2}d'$ の半中軸長さを有する扁平楕円体仮想空間(破線)を考える。扁平楕円体仮想空間は、内部に小粒子と扁平楕円体大粒子を含んでいる。

このとき、扁平楕円体仮想空間の体積 V^{hyp} は、

$$V^{hyp} = \frac{4}{3}\pi \left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right) \quad (2.3.1)$$

元の扁平楕円体大粒子の粒子体積 V^{hyp} は、

$$V_{solid}^L = \frac{4}{3}\pi abc \quad (2.3.2)$$

となる。

両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ は、

$$\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right)}{\frac{4}{3}\pi abc} = \frac{\left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right)}{abc} \quad (2.3.3)$$

扁平楕円体仮想空間の体積 V^{hyp} は、両者の比 $\frac{V^{hyp}}{V_{solid}^L}$ と元の扁平楕円体大粒子の粒子体積 V_{solid}^L を用いて、

$$V^{hyp} = V_{solid}^L \frac{\left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right)}{abc} \quad (2.3.4)$$

と表せる。

扁平楕円体仮想空間による間隙比 $e_L (= e_{hyp})$ は、

$$e_L (= e_{hyp}) = \frac{V^{hyp}}{V_{solid}^{hyp}} \quad (2.3.5)$$

であり、この式(2.3.5)を変形すると

$$V_{void}^{hyp} = V^{hyp} e_L \quad (2.3.6)$$

式(2.3.6)に式(2.3.4)を代入すると

$$V_{void}^{hyp} = V_{solid}^L \frac{\left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right)}{abc} e_L \quad (2.3.7)$$

となる。

扁平楕円体仮想空間内に含まれる小粒子の粒子と間隙の合計体積 V_b は、扁平楕円体仮想空間の体積 V^{hyp} と扁平楕円体大粒子の粒子体積 V_{solid}^L の差であるから、

$$V_b = V^{hyp} - V_{solid}^L = \frac{4}{3}\pi \left(a + \frac{1}{2}d'\right) \left(b + \frac{1}{2}d'\right) \left(c + \frac{1}{2}d\right) - \frac{4}{3}\pi abc \quad (2.3.8)$$

式(2.3.7)と式(2.3.8)を組み合わせることで、扁平楕円体大粒子の集合体による間隙比 V_{void}^L は、

$$V_{void}^L = V_{void}^{hyp} + \frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi abc} V_b$$

と表せる。

ここで、 $\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi abc} V_b$ について補足すると、

- ・ V_{solid}^L → 扁平楕円体大粒子の集合体の粒子体積
- ・ $\frac{4}{3}\pi abc$ → 扁平楕円体大粒子一つあたりの粒子体積
- ・ V_b → 扁平楕円体大粒子一つあたりの扁平楕円体仮想空間と扁平楕円体大粒子の体積差

$\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi abc}$ で扁平楕円体大粒子の個数、 $\frac{V_{solid}^L}{\frac{4}{3}\pi abc} V_b$ で「扁平楕円体大粒子の個数分の V_b の体積」を意味している。

V_{void}^L の計算を進めると、

$$\begin{aligned} V_{void}^L &= V_{solid}^L \frac{\left(a + \frac{1}{2}d'\right)\left(b + \frac{1}{2}d'\right)\left(c + \frac{1}{2}d\right)}{abc} e_L \\ &\quad + V_{solid}^L \times \frac{1}{\frac{4}{3}\pi abc} \times \left[\frac{4}{3}\pi \left(a + \frac{1}{2}d'\right)\left(b + \frac{1}{2}d'\right)\left(c + \frac{1}{2}d\right) - \frac{4}{3}\pi abc \right] \\ &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{a + \frac{1}{2}d'}{a}\right)\left(\frac{b + \frac{1}{2}d'}{b}\right)\left(\frac{c + \frac{1}{2}d}{c}\right) (1 + e_L) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

を得る。

また、扁平楕円体大粒子の集合体の間隙体積は、小粒子の粒子体積も含んでいる。扁平楕円体大粒子を考慮しない(小粒子のみの)間隙比 e_s は、

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} \quad (2.3.10)$$

と定義される。

ここで、小粒子の集合体の間隙体積 V_{void}^S は、

$$V_{void}^S = V_{void}^L - V_{solid}^S \quad (2.3.11)$$

なので、小粒子の集合体の間隙比は、

$$e_s = \frac{V_{void}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L - V_{solid}^S}{V_{solid}^S} = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \quad (2.3.12)$$

となる。

式(2.3.9)と式(2.3.12)を組み合わせる。

まず、式(2.3.12)を変形すると、

$$e_s = \frac{V_{void}^L}{V_{solid}^S} - 1 \Rightarrow V_{void}^L = V_{solid}^S (1 + e_s) \quad (2.3.13)$$

となる。

この変形式(2.3.13)を式(2.3.9)の左辺に代入すると

$$\begin{aligned}
V_{solid}^S(1+e_S) &= V_{solid}^L \left[\left(\frac{a + \frac{1}{2}d'}{a} \right) \left(\frac{b + \frac{1}{2}d'}{b} \right) \left(\frac{c + \frac{1}{2}d}{c} \right) (1+e_L) - 1 \right] \\
\Leftrightarrow \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} (1+e_S) &= \left(\frac{a + \frac{1}{2}d'}{a} \right) \left(\frac{b + \frac{1}{2}d'}{b} \right) \left(\frac{c + \frac{1}{2}d}{c} \right) (1+e_L) - 1 \\
\Leftrightarrow \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^S} &= \frac{1+e_S}{\left(\frac{a + \frac{1}{2}d'}{a} \right) \left(\frac{b + \frac{1}{2}d'}{b} \right) \left(\frac{c + \frac{1}{2}d}{c} \right) (1+e_L) - 1} \\
&= \frac{abc(1+e_S)}{\left(a + \frac{1}{2}d' \right) \left(b + \frac{1}{2}d' \right) \left(c + \frac{1}{2}d \right) (1+e_L) - abc} \tag{2.3.14}
\end{aligned}$$

この式(2.3.14)の分母・分子を入れ替え、整理すると

$$\frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L} = \frac{\left(a + \frac{1}{2}d' \right) \left(b + \frac{1}{2}d' \right) \left(c + \frac{1}{2}d \right) (1+e_L) - abc}{abc(1+e_S)} \tag{2.3.15}$$

となる。

ここで、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は以下のように定義される。

V_L^b の定義式

$$V_L^b = \frac{100V_{solid}^L}{V_{solid}^L + V_{solid}^S} \tag{2.3.16}$$

この定義式(2.3.16)の分母・分子を V_{solid}^L で除すと、

$$V_L^b = \frac{100 \times \frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L}}{\frac{V_{solid}^L}{V_{solid}^L} + \frac{V_{solid}^S}{V_{solid}^L}} \tag{2.3.17}$$

この式(2.3.17)に式(2.3.15)を代入して整理する。

$$\begin{aligned}
V_L^b &= \frac{100}{\frac{abc(1+e_S)}{abc(1+e_S)} + \frac{\left(a + \frac{1}{2}d' \right) \left(b + \frac{1}{2}d' \right) \left(c + \frac{1}{2}d \right) (1+e_L) - abc}{abc(1+e_S)}} \\
&= \frac{100abc(1+e_S)}{abc + abce_S + \left(a + \frac{1}{2}d' \right) \left(b + \frac{1}{2}d' \right) \left(c + \frac{1}{2}d \right) (1+e_L) - abc}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{100abc(1 + e_S)}{\left(a + \frac{1}{2}d'\right)\left(b + \frac{1}{2}d'\right)\left(c + \frac{1}{2}d\right)(1 + e_L) + abce_S} \\
&= \frac{100 \times 8abc(1 + e_S)}{(2a + d')(2b + d')(2c + d)(1 + e_L) + 8abce_S} \tag{2.3.18}
\end{aligned}$$

この式(2.3.18)に $2a = A$, $2b = B$, $2c = C$ を代入すると, 最終的に大粒子配置の異方性を考慮した扁平楕円体大粒子型理論式(式(2.3.19))を得る.

$$V_L^b = \frac{100ABC(1 + e_S)}{(A + d')(B + d')(C + d)(1 + e_L) + ABCE_S} \tag{2.3.19}$$

ここで, 式中の A は扁平楕円体の長軸長さ, B は中軸長さ, C は短軸長さである.

また, 式(2.3.19)中の限界大粒子距離 d と d' を0, つまり扁平楕円体大粒子同士が完全に接触する(図 2-1 の状態[4])条件を与えると,

$$\begin{aligned}
&\frac{100ABC(1 + e_S)}{(A + d')(B + d')(C + d)(1 + e_L) + ABCE_S} \\
&= \frac{100ABC(1 + e_S)}{ABCE_S} \\
&= \frac{100(1 + e_S)}{e_L + e_S + 1} = V_L^a
\end{aligned}$$

となり, 大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a (Lade et al.の理論式)を, 導くことが出来る.

2.4 微視的モデルの検討すべきパラメーター

2.4.1 実験における検討事項

2.3.1～2.3.3 で導出した、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 v_L^b の理論式(2.1.19), (2.2.19), (2.3.19)中の限界大粒子距離 d と d' は、理論的な解釈がない。そこで第3章で、様々な粒子特性の二種混合体に対して、安息角実験を実施し、 v_L^b を含めた最小主応力方向の限界大粒子距離 d' 以外のパラメーターを取得する。得られたパラメーターを用いて、理論式(2.1.19), (2.2.19), (2.3.19)から d' を逆算する(d は、Ueda et al. (2011)の研究を参考に、 $m = 2$ と仮定して算出)。最終的に、 d' が大粒子・小粒子の、どのような粒子特性の影響を受けるかを考察することで、 d' の推定式を提案する。

また、第5章では、平面ひずみ圧縮試験で「ピーク時の主応力差」、遠心支持力模型実験で「載荷応力」を指標として、拘束圧下での中間骨格構造($v_L^b \sim v_L^{a\%}$)と大粒子含有率の関係を取得する。実験で得られた結果と理論式(2.1.19), (2.2.19), (2.3.19)および第3章で提案する d' の推定式から算出した結果を比較し、微視的モデルにおいて、拘束圧の影響を考慮すべきパラメーターを明らかにしていく。

2.4.2 解析における検討事項

2.2 では、最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' を、骨格構造モデルに組み込むことで、大粒子配置の異方性を考慮した。

その際、導入したパラメーターである最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' は「 $d \leq d'$ の関係となる」と仮定した。そのため、この仮定の正当性を確認することで、骨格構造モデルの妥当性を示す必要がある。

そこで第4章では、DEMを用いて、第3章の安息角実験の再現解析を実施する。再現解析では、安息角実験で取得した、中間骨格構造における安息角の傾向や、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率に与える粒子特性の影響が、再現されるかを確認する。そのうえで、大粒子の座標データから、最大主応力方向(z 軸方向)と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)で、大粒子配置に異方性があり、 $d \leq d'$ の関係となっているかを確認する。さらに、接点力、可視化した接点ベクトルの分析から、二種混合体内部の接点力の状態を把握する。

2.5 要約

本章では、微視的モデルをより現実近づけるために、骨格構造モデルに「大粒子配置の異方性」、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b の理論式に、「大粒子の異方性」と「大粒子形状」を考慮したパラメーターの導入を行った。以下に得られた知見をまとめる。

1. 最大主応力方向の限界大粒子距離 d と最小主応力方向の限界大粒子距離 d' を導入することで、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルを提案した。

2. 最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' を導入し、大粒子配置の異方性を考慮した V_L^b の球体大粒子型理論式 $V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_s)}{(D_L+d)(D_L+d')^2(1+e_L)+D_L^3e_s}$ を提案した。

3. V_L^b の球体大粒子型理論式に、サンゴ礫を模した円柱大粒子を導入し、大粒子形状を考慮した V_L^b の円柱大粒子型理論式 $V_L^b = \frac{100D_L^2l(1+e_s)}{(D_L+d')(D_L+d)(l+d')(1+e_L)+D_L^2le_s}$ を提案した。

4. V_L^b の球体大粒子型理論式に、砕石(岩砕)を模した扁平楕円体大粒子を導入し、大粒子形状を考慮した V_L^b の扁平楕円体大粒子型理論式 $V_L^b = \frac{100ABC(1+e_s)}{(A+d')(B+d')(C+d)(1+e_L)+ABCe_s}$ を提案した。

5. 実験における検討事項として、第3章で、安息角実験から d' の推定式の導出すること。第5章で、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験から、拘束圧下での限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルのものと比較することで、微視的モデルにおいて、拘束圧の影響を考慮すべきパラメーターを明らかにすることを示した。

6. 解析における検討事項として、第4章で、DEMを用いて安息角実験の再現解析を行い、「大粒子の座標データ」の分析から、骨格構造モデルの妥当性を示し、「接点力」「可視化した接点ベクトル」の分析から、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにすることを示した。

参考文献

Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada, Y. : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, *Granular Matter*, Vol. 13, No. 6, pp. 731-742, 2011.

軽部大蔵, 野並賢, 鶴ヶ崎和博, 山口充 : 相似粒度に調整した粗粒材料の強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響, *土木学会論文集*, No. 617/III-46, pp.201-211, 1999.

地盤工学会 : *地盤工学用語辞典*, p.168, 2006.

地盤工学会地盤調査法改定編集委員会 : 第 2 編 地盤の工学的分類 第 2 章 地盤材料の工学的分類, *地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—*, pp. 53-80, 2009.

礫質土の力学特性についての研究委員会 : 礫質土の力学特性に関する技術の現状報告, *礫質土の力学特性に関するシンポジウム発表論文集*, 2001

第3章 安息角実験による二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響

3.1 概説

これまで、5mm程度のガラスビーズや砕石を大粒子とした二種混合体の、せん断強度と大粒子含有率に関する研究(Vallejo, 2001)(Chang et al., 2016)は、行われてきた。しかし、粒径の大きさの問題から、大きい大粒子を用いた研究は少ない。また、粒径が大きくなると、粒子形状の影響を無視できなくなる。特に、「岩砕を含んだ現地発生土」や「サンゴ礫混じり土」のような二種混合体は、粒子形状がいびつで、粒度が分級されているため、粒度に基づく「地盤材料の工学的分類(JGS 0051-2009)」(地盤材料試験の方法と解説, 2009)に従わない可能性がある。そのため、粒径が大きく、形状がいびつな大粒子を用いた実験を実際に行い、強度と大粒子含有率の関係と、そこから判断される中間骨格構造や限界大粒子含有率を評価する必要がある。

また、第2章で示した通り、最大主応力方向の限界大粒子距離 d と最小主応力方向の限界大粒子距離 d' は、Ueda et al.(2011)の研究を参考に、 $m = 2$ として d を確定させたとしても、 d' が未知数として残る。そのため、 d' 以外のパラメータを実験で取得し、大粒子と小粒子の、どのような粒子特性の影響を受けるかを考察することで、 d' の推定式を提案する必要がある。

そこで、本章では、様々な粒子特性を有する大粒子と小粒子を組み合わせた二種混合体に対して、安息角実験を実施し、中間骨格構造や限界大粒子含有率と粒子特性の関係を考察する。考察をもとに、 d' の推定式を提案し、 d' の推定式と理論式を用いて、安息角実験で得られた中間骨格構造の評価を行う。

安息角実験を選択した理由は、「実験装置の大型化が容易であること」「実験時間が短いため、多数の実験を行えること」「安息角が、拘束圧が非常に低い状態のせん断抵抗角と関係が深いこと」の3点である。

以下に、本章の構成を述べる。

第2節では、安息角実験に用いる試料と実験装置。第3節では、安息角実験の実験方法。第4節では、実験結果をもとに、中間骨格構造や限界大粒子含有率に与える粒子特性の影響を考察する。第5節では、実験で得られたパラメータと V_L^b の理論式から、最小主応力方向の限界大粒子距離 d' を逆算し、粒子特性との関係を考察することで、 d' の推定式を提案する。第6節では、提案した d' の推定式と V_L^b の理論式を用いて、安息角実験で得られた中間骨格構造の評価を行う。第7節では、本章で得られた知見をまとめる。

3.2 試料および実験装置

3.2.1 試料

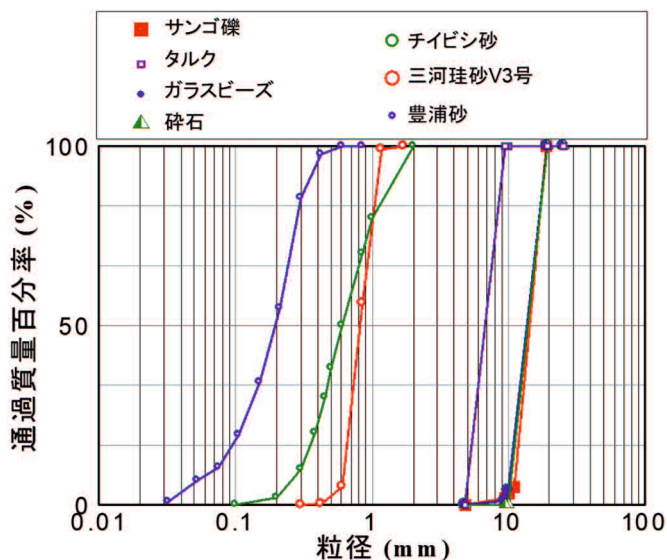


図 3-1 各試料の粒度分布



写真 3-1 サンゴ礫



写真 3-2 タルク

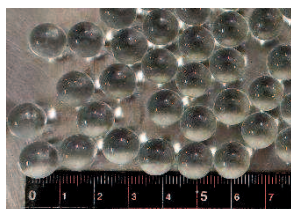


写真 3-3 ガラスビーズ



写真 3-4 砕石

表 3-1 各試料の土粒子密度と平均粒径および粒子の形状を表すパラメーター

試料区分	試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	平均粒径 $D_{50}[D_L, D_S]$ (mm)	長さ l (mm)	長軸長さ A (mm)	中軸長さ B (mm)	短軸長さ C (mm)
大粒子	サンゴ礫	2.845	13.9	36.1	-	-	-
	タルク	2.680	6.0	30.0	-	-	-
	ガラスビーズ	2.777	10.0	-	-	-	-
	砕石	2.500	12.8	-	17.1	12.8	7.3
小粒子	チイビシ砂	2.734	0.580	-	-	-	-
	三河珪砂V3号	2.657	0.820	-	-	-	-
	豊浦砂	2.635	0.202	-	-	-	-

表 3-1 に各試料の物性値および粒子特性を示す。大粒子試料は、平均粒径が 10mm 前後の形状の異なる礫として、サンゴ礁を形成する一般的なミドリイシ種のサンゴ礫(写真 3-1 平均粒径 13.9mm, 平均長さ 36.1mm), タルク(写真 3-2 粒径 6mm, 長さ 30mm), ガラスビーズ(写真 3-3 粒径 10mm), 碎石(写真 3-4 平均粒径 12.8mm)を用意した。ここで、平均粒径を 10mm 前後に統一したのは、粒度をもとにした地盤材料の工学的分類における 2mm 以上の礫を含む粗粒土の分類と、実際に安息角が変化する境界大粒子含有率が一致するかを明らかにするためである。また、タルクは、一般的には石筆と呼ばれ、科学名は含水珪酸マグネシウムである。タルクやガラスビーズは工業製品であり、実際の地盤には存在しないが、粗度が非常に低い大粒子として、追加している



写真 3-5 チイビシ砂

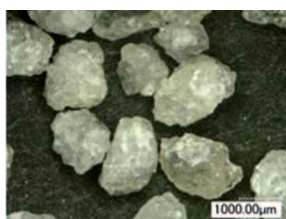


写真 3-6 三河珪砂 V3 号

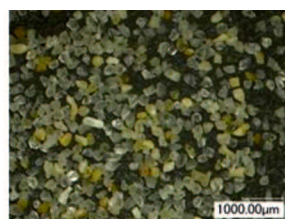


写真 3-7 豊浦砂

小粒子試料には、沖縄県チイビシ島で採取したチイビシ砂(写真 3-5, 平均粒径 0.580mm)の粒径を基準とし、チイビシよりも平均粒径が大きい V3 号三河珪砂(写真 3-6, 平均粒径 0.820mm), チイビシよりも平均粒径が小さい豊浦砂(写真 3-7, 平均粒径 0.202mm)を用意した。

3.2.2 実験装置



写真 3-8 大型安息角試験装置



写真 3-9 レーザー距離測定装置

本研究では、試料にサンゴ礫などの大型の礫を使用するため、実験装置を大型化する必要がある。試料に対する試験器具の大きさについては、原ら(2004)により、試料の寸法に対してモールドの内径が 10 倍程度であると、試料の大きさの影響が大幅に軽減されると報告されている。本実験ではこれを参考に、最も大きいサンゴ礫の長さ 30mm に合わせて、地盤工学会基準 JGS 0162-2009「礫の最小密度・最大密度試験方法」(地盤材料試験の方法と解説, 2009)で定められた、内径 300mm, 外径 320mm, 高さ 350mm, のモールドを中央に装着した大型安息角試験装置(写真 3-8)を新たに開発した。この装置は、上部にエアシリンダーを装着しており、空気圧によって中央のモールドを一定の速度(156mm/min)で引き上げて二種混合体の砂山を作成する。

作成した二種混合体の砂山の安息角と間隙比を同時に計測するために、レーザー距離測定装置(写真 3-9)を導入した。この装置は、0.1mm までの計測、スマートフォンからの遠隔操作が可能なレーザー距離計をアルミフレームの枠に装着しており、水平方向にスライドできるようにしたものである。

3.3 実験方法

3.3.1 実験条件

表 3-2 二種混合体を構成する粒子の組み合わせ

No.	記号	大粒子	小粒子
①	■	サンゴ礫	チイビシ砂
②	□	タルク	
③	●	ガラスビーズ	
④	▲	碎石	三河珪砂V3号
⑤	▲		
⑥	▲		

表 3-2 に、二種混合体を構成する粒子の組み合わせを示す。表 3-2 の①～④を比較するのが、大粒子比較実験であり、小粒子試料はすべてチイビシ砂である。表 3-2 の④～⑥を比較するのが、小粒子比較実験であり、大粒子試料はすべて碎石である。

安息角の測定方法には、明確な基準はなく、多種にわたる(松倉ら, 1939)。主な測定方法としては、試料を落下させてできる円錐の傾斜を測定する「注入法」と、試料の入ったモールドを引き上げることで拘束を排除してできる円錐の傾斜を測定する「排出法」がある。注入法は、粒径が小さく、粒度のばらつきが少ない試料に向けた方法であり、粗粒土試料に向かないため、本研究では、「排出法」を採用した。

間隙比の測定方法については、原ら(2004)の研究を参考にして決定した。具体的には、砂の最小密度試験では、モールドに試料を投入する際に漏斗を用いるが、粗粒土では、粒径の大きい礫が漏斗に引っ掛かり、試料内で粒度の偏りが起きてしまうため、ボウルなどで直接試料を投入する方法の方が、誤差が生じにくく、また体積の測定に関しては、試料表面を直接ノギスで計測する方法が、最も誤差が生じにくいことが報告されている。本試験では、レーザー測定器をノギスの代わりに利用した。

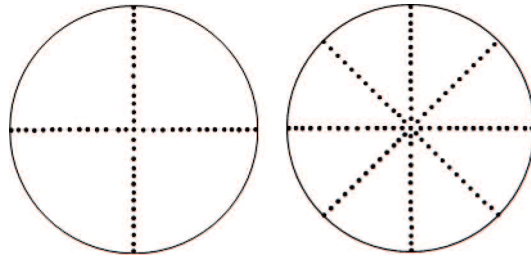


図 3-2 4方向計測法 と 8方向計測法

レーザー測定装置の測定点数については、原ら(2004)により、モールドの直径が 300mm の場合、測定点数が 10 点程度で間隙比の誤差が収束し、20 点以上でほぼ誤差がなくなることが確認されている。しかし、この結果は比較的平坦な粗粒土の表面を測定したものであるが、本実験では、砂山の斜面を測定するため、測定点数を増やす必要があった。そこで、著者らは精度を確保しつつ、効率的に実験を行える測定点数の検討を行った。検討では、同じ砂山に対し、1 方向あたり 15 点で 4 方向の計 60 点の測定と 8 方向の計 120 点の測定(図 3-2)を実施した。その結果、それぞれの誤差は、安息角で 1%以下、間隙比で最大 5%程度であった。このことから、効率性を担保したうえで、十分な精度を有する 4 方向の計 60 点による測定を採用した。

3.3.2 実験手順



写真 3-10 試料の混ぜ合わせの様子



写真 3-11 試料投入の様子



写真 3-12 稼働中の大型安息角試験装置



写真 3-13 出来上がった砂山

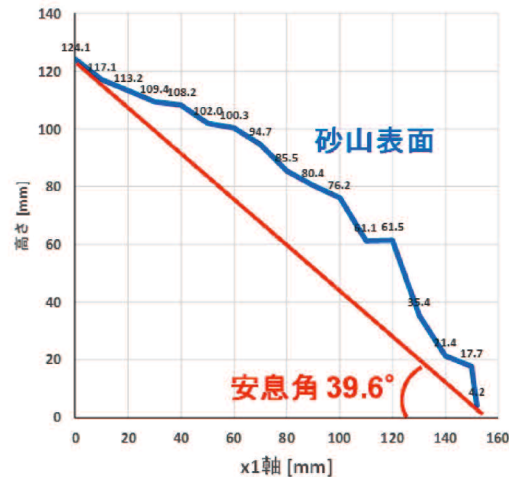


図 3-3 写真 3-13 における x_1 軸方向の形状データ

安息角実験の手順を以下に示す。

- (1) 目標の大粒子含有率になるように、大粒子試料と小粒子試料を用意し、それぞれを 10 分割して各ボウルで十分混ぜ合わせる (写真 3-10)。ボウルごとに大粒子と小粒子が分離しないように大型安息角試験装置のモールド内に投入する(一層の厚み約 35mm) (写真 3-11)。
- (2) 大型安息角試験装置を稼働させ、モールドを一定速度 15.6cm/min で上昇することで、二種混合体の砂山を作成する。(写真 3-13)
- (3) レーザー距離計測装置を用いて、出来上がった砂山の形状データ(図 3-3)を得る。これを直交するように 4 方向に対して行う。
- (4) 砂山を大粒子と小粒子に分け、それぞれの質量を測定する。

こうした測定を、約 10% ずつ大粒子含有率を変えながら繰り返し、試料の種類によるが、概ね 50%～70% まで実験を行った。それ以上の大粒子含有率では、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。

3.3.3 安息角・間隙比の算出および限界大粒子含有率の判定

実験後、安息角は、4 方向の形状データから得られる 4 つの平均をとって算出し、間隙比は、形状データと大粒子、小粒子それぞれの質量から算出した。

算出した安息角から小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ を、二乗近似の方法で判定した。

二乗近似の方法を以下に示す。

大粒子含有率 0% の実験値の平均 $\bar{\alpha}_s$ と、大粒子含有率 100% の実験値の平均 $\bar{\alpha}_L$ の差を α とする。 $\bar{\alpha}_s + \frac{\alpha}{10}$ 以上になる実験値から、 $\bar{\alpha}_L - \frac{\alpha}{10}$ 以下になる実験値に対して、最小二乗法で近似直線を求める。大粒子含有率 0% の実験値の平均 $\bar{\alpha}_s$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^b\%$ とし、大粒子含有率 100% の実験値の平均 $\bar{\alpha}_L$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^a\%$ とした。

3.4 二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響

3.4.1 大粒子比較実験結果

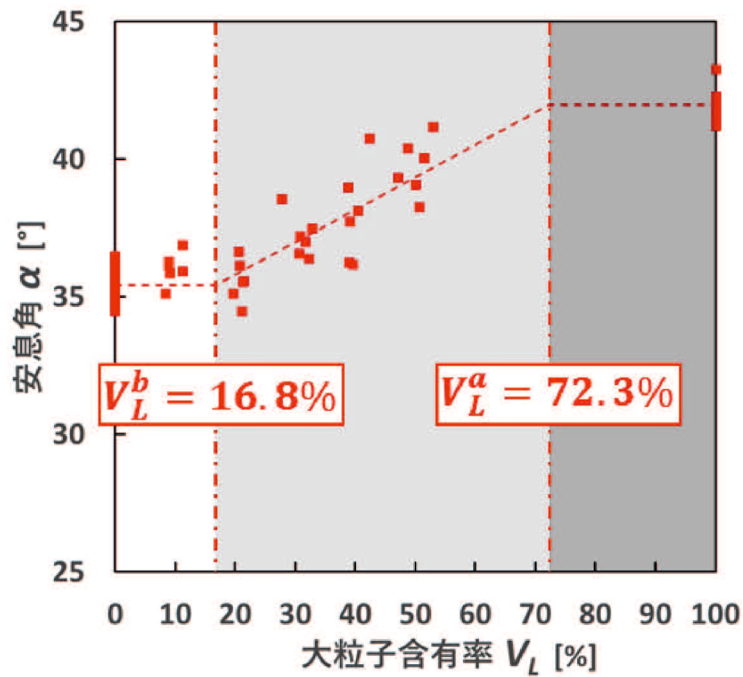


図 3-4 大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：サンゴ礫)

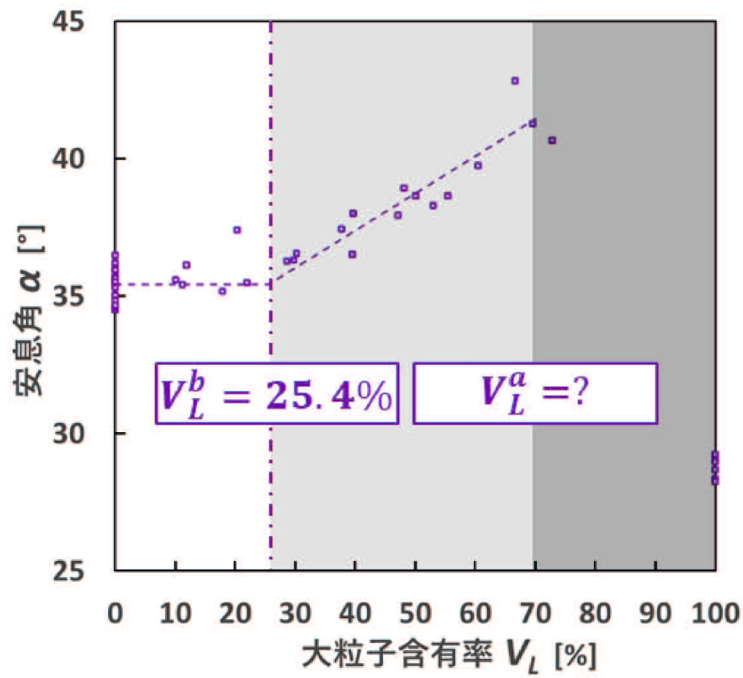


図 3-5 大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：タルク)

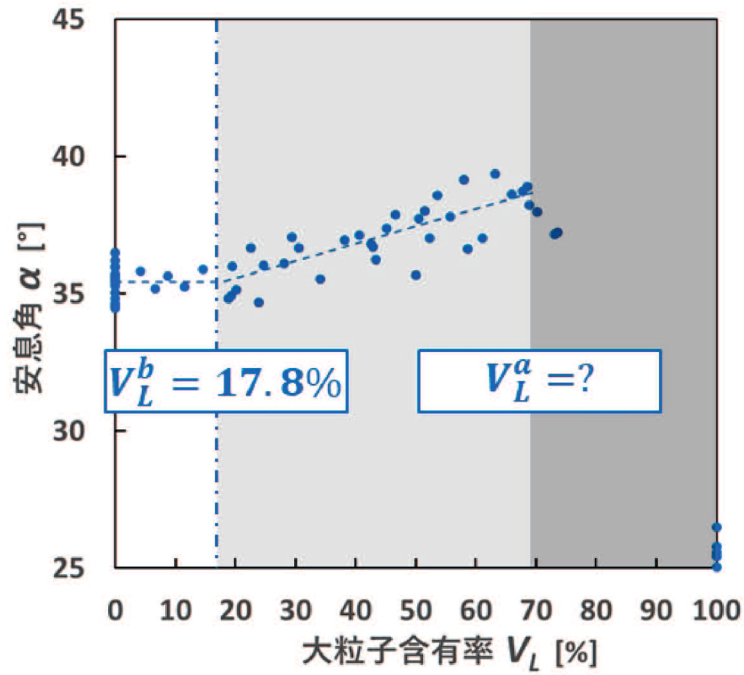


図 3-6 大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：ガラスビーズ)

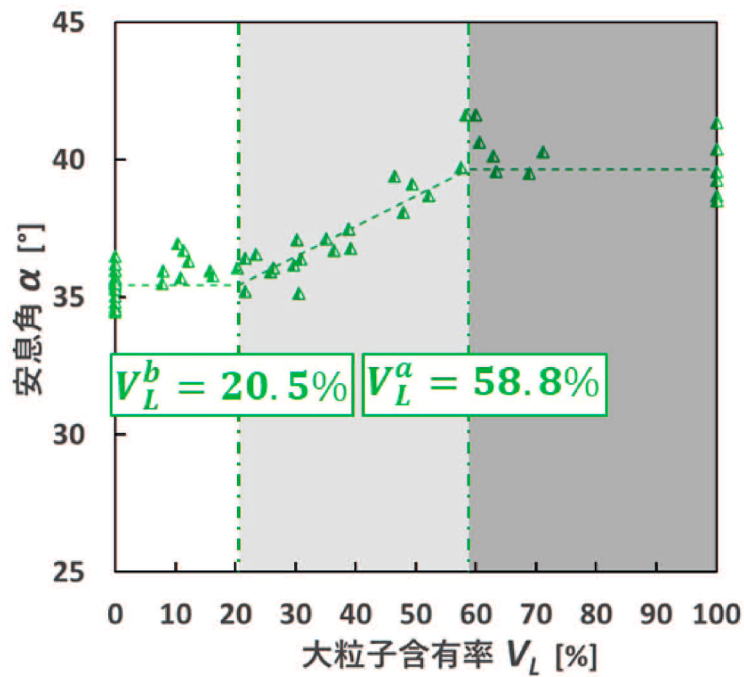


図 3-7 大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：碎石)

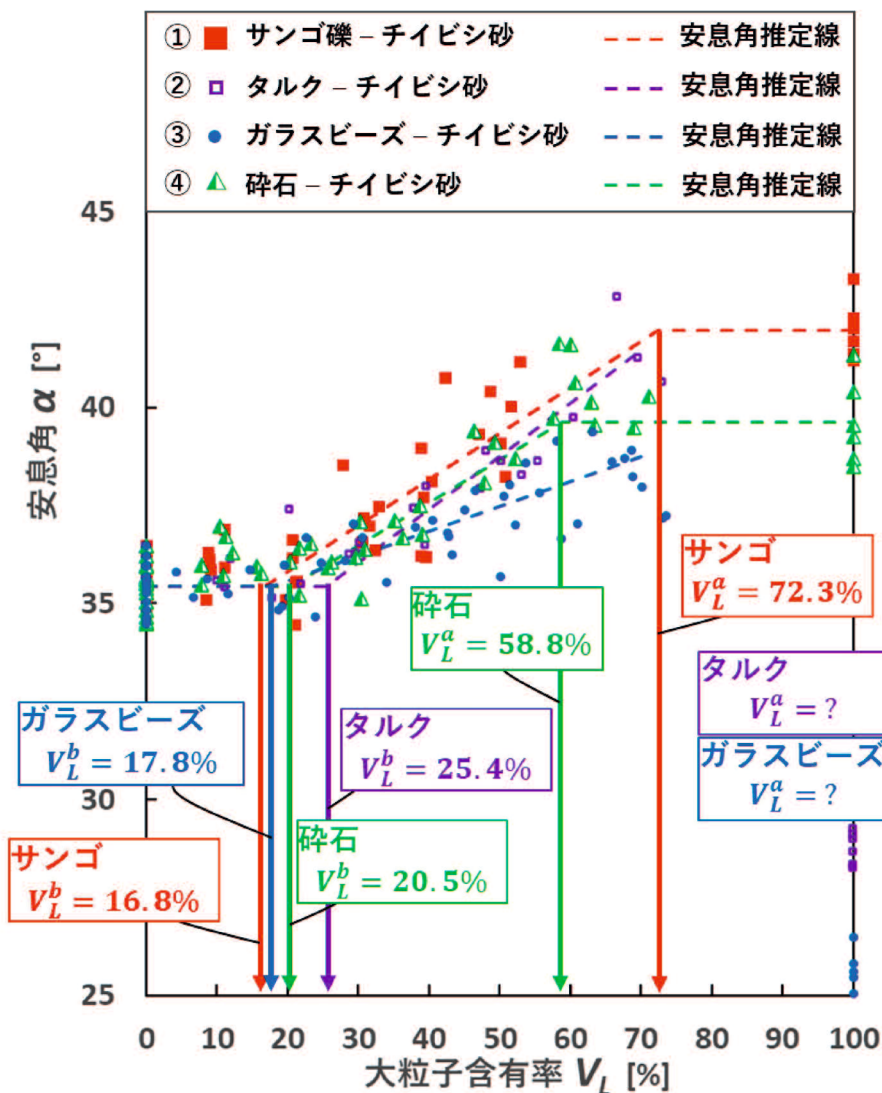


図 3-8 大粒子含有率と安息角の関係(大粒子比較実験まとめ)

図 3-4 に大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：サンゴ礫)，図 3-5 に大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：タルク)，図 3-6 に大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：ガラスビーズ)，図 3-7 に大粒子含有率と安息角の関係(大粒子：碎石)，図 3-8 に大粒子含有率と安息角の関係(大粒子比較実験まとめ)を示す。

まず，形状が異なり粗度がある，大粒子がサンゴ礫と碎石のケース(図 3-4，図 3-7)を比較し，限界大粒子含有率を考察する．小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は，サンゴ礫で 16.8%，碎石で 20.5%であった．サンゴ礫は平均最大長さ l が 36.1mm であり，碎石は平均最大(長軸)長さ A が 17.1mm であることから，平均最大長さが大きいほど， V_L^b が小さくなる．つまり，大粒子が大きいくびつであると，低い大粒子含有率であっても，二種混合体に大粒子の影響が現れることを意味している．大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a は，サンゴ礫で 72.3%，碎石で 58.8%であった．サンゴ礫の方が大きい値を示しているが，サンゴ礫は，大粒子含有率 50%前後で，大粒子が形成する間隙を小粒子が埋められなくなり，二種混合体として存在できなくなる．これは，大粒子と小粒子のサイズの比が非常に大きい時に見られる現象であり，Lade et al.(1998)でも確認されている．そのため，50%前後をサンゴ礫の V_L^a と捉えることもできる．

次に、形状が同じで、粗度が大きく異なる、サンゴ礫とタルクのケース(図 3-4, 図 3-5)を比較する。 V_L^b は、サンゴ礫で 16.8%, タルクで 25.4%であった。これは、形状が同じであっても、粗度が大きいと、 V_L^b が小さくなる。つまり、粗度が大きいと、低い大粒子含有率であっても、二種混合体に大粒子の影響が現れることを意味している。 V_L^a は、タルクが大粒子含有率 100%の安息角よりも大きい値を示したため、二乗近似の方法では、判定できなかった。

最後に、粗度がいずれも非常に低く、形状が異なる、タルクとガラスビーズのケース(図 3-5, 図 3-6)を比較した。 V_L^b は、タルクで 25.4%, ガラスビーズで 17.8%であった。形状が球体のガラスビーズの方が、 V_L^b は小さくなっている。 V_L^a は、どちらのケースも、大粒子含有率 100%の安息角よりも大きい値を示したため、二乗近似の方法では、判定できなかった。

図 3-8 をもとに、 $V_L^b \sim V_L^a$ % の中間骨格構造における安息角の傾向について考察する。タルクとガラスビーズは、小粒子試料(チイビン砂)よりも安息角が低いにもかかわらず、すべてのケースで増加傾向を示している。また、形状がいびつな大粒子のケースほど、安息角の増加率が高くなっていることが分かる。

3.4.2 小粒子比較実験結果

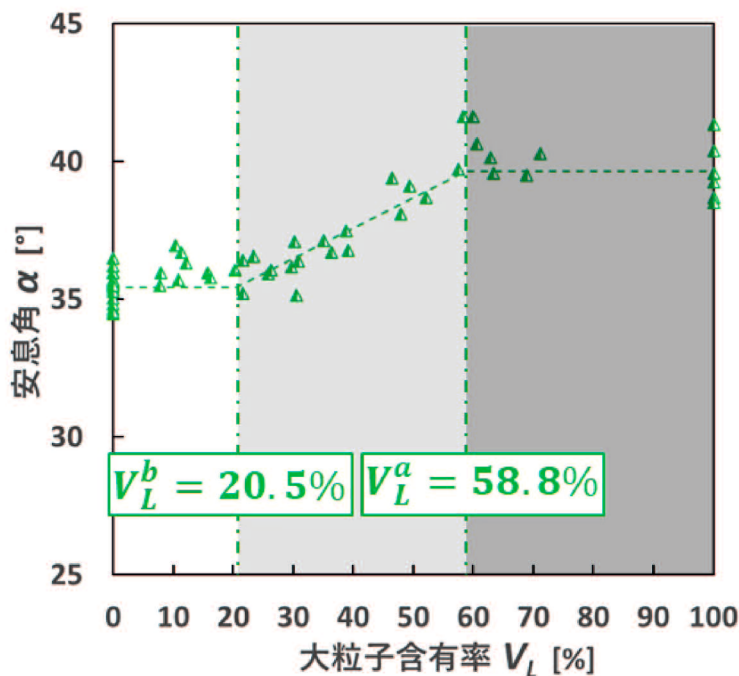


図 3-9 大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：チイビン砂)

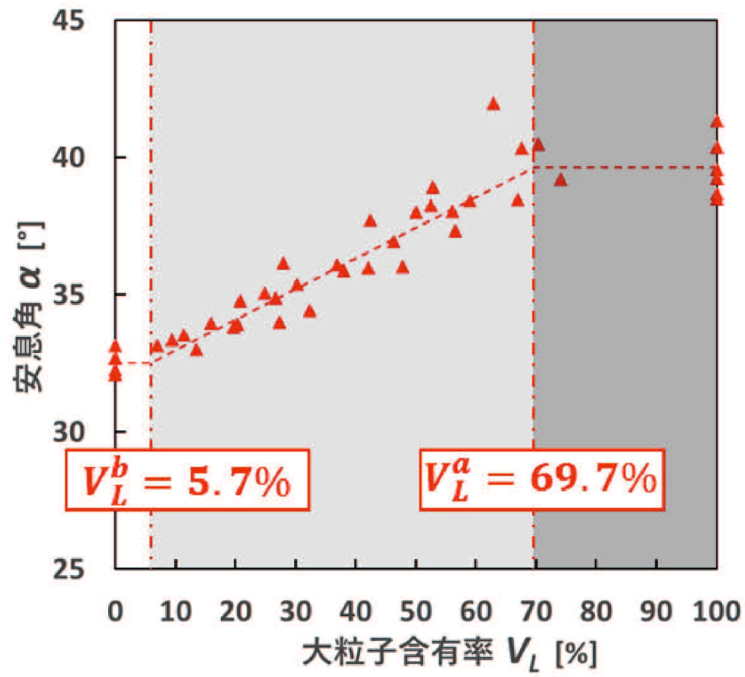


図 3-10 大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：三河珪砂 V3 号)

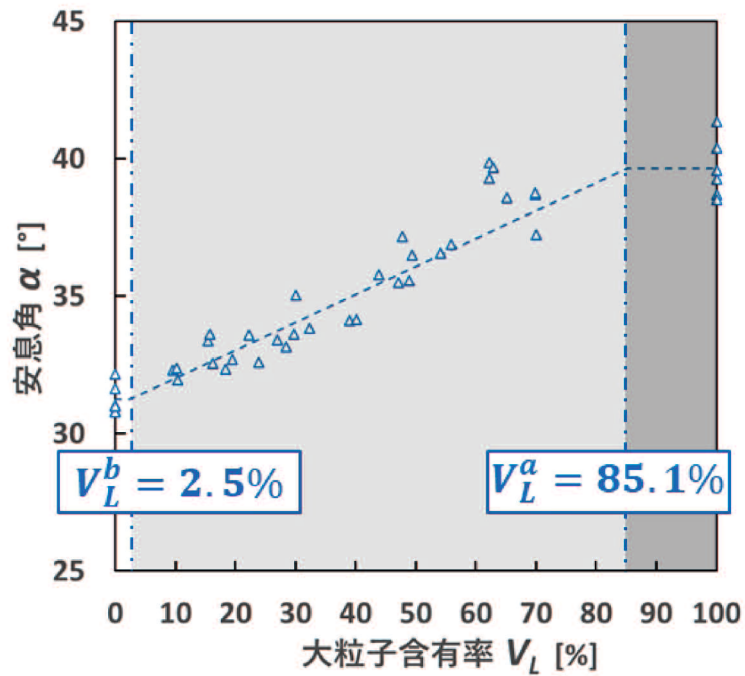


図 3-11 大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：豊浦砂)

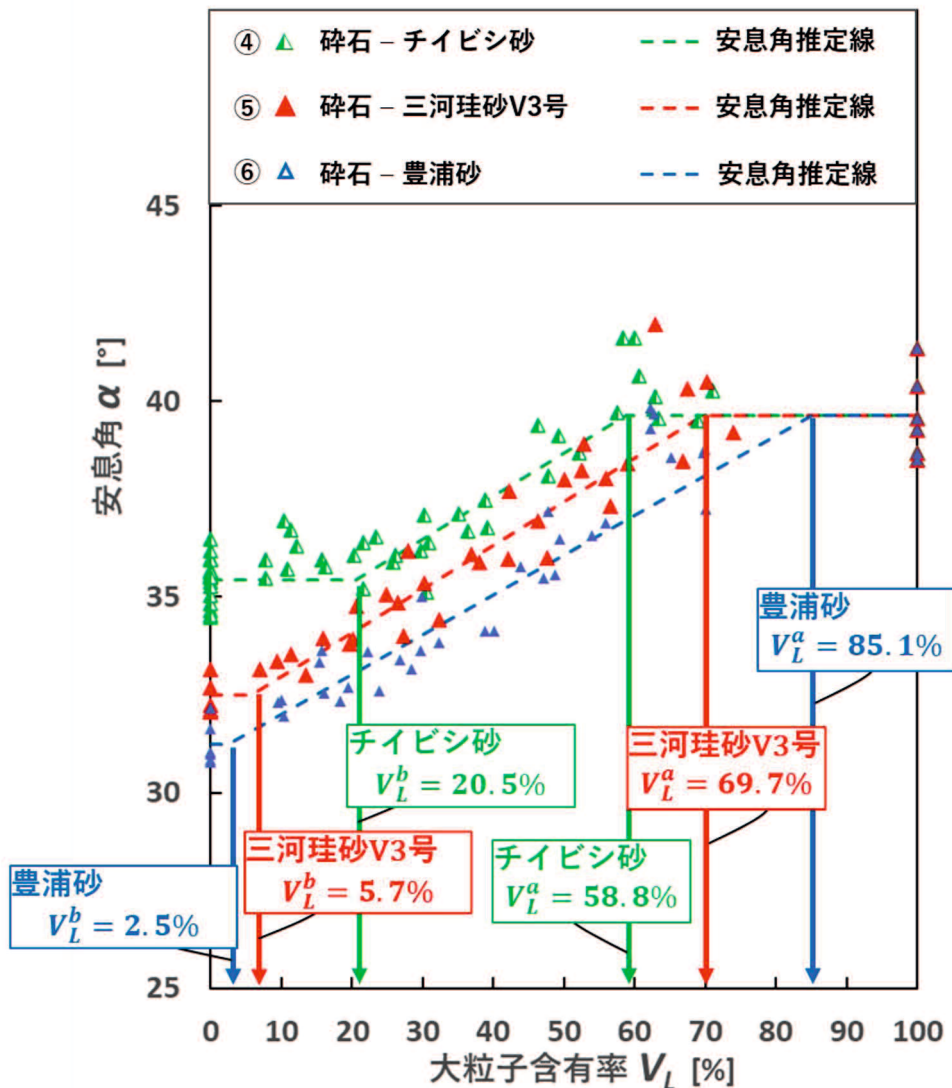


図 3-12 大粒子含有率と安息角の関係(小粒子比較実験まとめ)

図 3-9 に大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：チイビシ砂)，図 3-10 に大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：三河珪砂 V3 号)，図 3-11 に大粒子含有率と安息角の関係(小粒子：豊浦砂)，図 3-12 に大粒子含有率と安息角の関係(小粒子比較実験まとめ)を示す。

図 3-12 をもとに，限界大粒子含有率を考察すると，小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は，小粒子試料別に，豊浦砂 2.5% < 三河珪砂 V3 号 5.7% < チイビシ砂 20.5% の関係が得られた。小粒子試料の平均粒径は，豊浦砂 0.202mm < チイビシ砂 0.580mm < 三河珪砂 V3 号 0.820mm の関係であり， V_L^b と小粒子試料粒径の相関関係は確認できなかった。一方で，小粒子試料単体の間隙比が，豊浦砂 0.777 < 三河珪砂 V3 号 0.820 < チイビシ砂 1.154 であり， V_L^b と同じ大小関係になっていることが分かった。これは，大粒子試料が同一であっても，大粒子の間に存在する小粒子の密度が高いと，低い大粒子含有率から大粒子の影響が現れることを意味している。つまり，小粒子試料の特性のうち， V_L^b に影響を与えるのは，間隙比(密度)であり，比例関係であるといえる。 V_L^a は，小粒子試料別に，チイビシ砂 58.8% < 三河珪砂 V3 号 69.7% < 豊浦砂 85.1% であり， V_L^b とは逆の傾向が見て取れた。ただし，どのケースにおいても，65%前後で，二種

混合体として存在できなくなっている。

次に、 $V_L^b \sim V_L^a\%$ の中間骨格構造における安息角の傾向について考察する。

$V_L^b \sim V_L^a\%$ の中間骨格構造では、安息角が 3 ケースとも同じような増加率を示した。これは、大粒子が同じ碎石であったことが原因と考えられる。また、小粒子試料の安息角が高いほど、中間骨格構造における安息角も高くなることが分かった。

3.4.3 地盤材料の工学的分類と限界大粒子含有率の比較



図 3-13 地盤材料の工学的分類における 2 mm 以上の礫を含む粗粒土の分類



図 3-14 安息角を指標とした限界大粒子含有率(サンゴ礫-チイビシ砂)

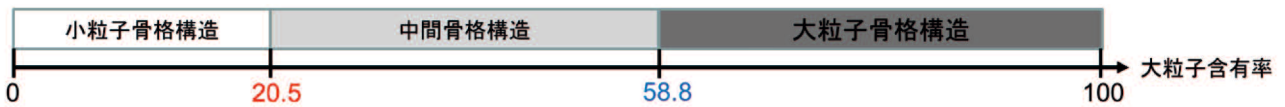


図 3-15 安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-チイビシ砂)



図 3-16 安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-三河珪砂 V3 号)



図 3-17 安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-豊浦砂)

図 3-13 に地盤材料の工学的分類における 2 mm 以上の礫を含む粗粒土の分類，図 3-14 に安息角を指標とした限界大粒子含有率(サンゴ礫-チイビシ砂)，図 3-15 に安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-チイビシ砂)，図 3-16 に安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-三河珪砂 V3 号)，図 3-17 に安息角を指標とした限界大粒子含有率(碎石-豊浦砂)を示す。

土の工学的性質を推定することを目的とした地盤工学会基準 JGS0051「地盤材料の工学的分類」(地盤材料試験の方法と解説，2009)は，2mm 以上の礫を含む粗粒土を図 3-13 のように分類している。これは，粒度に基づく分類である。しかし本実験で，工学的性質の一つである力学的性質(安息角)を試験した結果(図 3-14～図 3-17)からは，少なからず差が生じることが分かる。また，サンゴ礫-チイビシ砂(図 3-14)と

碎石-チイビシ砂(図 3-15)は、大粒子の粒径が似通っているが、いびつさが異なるため、限界大粒子含有率が異なる。碎石-チイビシ砂(図 3-15)と碎石-三河珪砂 V3 号(図 3-16)と碎石-豊浦砂(図 3-17)は、大粒子が碎石と同じであるが、小粒子の間隙比が異なるため、大粒子含有率が異なる。これらのことから、分類は粒径だけでなく、大粒子の形状や小粒子の間隙比についても、考慮する必要があると考えられる。

3.5 最小主応力方向の限界大粒子距離に与える粒子特性の影響と推定式

表 3-3 に、実験から得られたパラメーターと Ueda et al.の研究(2011)を参考に決定した m の値、および最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の計算結果を示す。また、 d' を逆算するために、 V_L^b の球体大粒子型理論式、円柱大粒子型理論式、扁平楕円体理論式(式(2.1.19)～式(2.3.19))を変形した逆算式が式(3.1)～式(3.3)である。

表 3-3 d' の推定に用いる実験結果と仮定した m および計算結果

大粒子	小粒子	V_L^b (%)	e_L	e_S	逆算式	d' の推定値 (mm)
① サンゴ礫	チイビシ砂	16.8	1.426	1.154	(3.2)	23.6
② タルク		25.4	0.709			10.1
③ ガラスビーズ		17.8	0.640		(3.1)	14.4
④		20.5				17.4
⑤ 碎石	三河珪砂 V3号	5.7	0.697	0.820	(3.3)	42.2
⑥	豊浦砂	2.5		0.777		78.6

$$V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_S)}{(D_L+d)(D_L+d')^2(1+e_L)+D_L^3e_S} \quad (2.1.19)$$

$$V_L^b = \frac{100D_L^2l(1+e_S)}{(D_L+d')(D_L+d)(l+d')(1+e_L)+D_L^2le_S} \quad (2.2.19)$$

$$V_L^b = \frac{100ABC(1+e_S)}{(A+d')(B+d')(C+d)(1+e_L)+ABCe_S} \quad (2.3.19)$$

$$d' = -D_L + \sqrt{\left\{ \frac{1}{V_L^b} - \frac{e_S}{100(1+e_S)} \right\} \times \frac{100D_L^3(1+e_S)}{(D_L+d)(1+e_L)}} \quad (3.1)$$

$$d' = \frac{-(D_L+l) + \sqrt{(D_L+l)^2 - 4 \left[D_Ll - \left\{ \frac{1}{V_L^b} - \frac{e_S}{100(1+e_S)} \right\} \times \frac{100D_L^2l(1+e_S)}{(D_L+d)(1+e_L)} \right]}}{2} \quad (3.2)$$

$$d' = \frac{-(A+B) + \sqrt{(A+B)^2 - 4 \left[AB - \left\{ \frac{1}{V_L^b} - \frac{e_S}{100(1+e_S)} \right\} \times \frac{100ABC(1+e_S)}{(C+d)(1+e_L)} \right]}}{2} \quad (3.3)$$

表 3-1 および表 3-3 の値をもとに、式(3.1)～式(3.3)を用いて、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b の理論式中で、未知数となっている d' を算出した。また、表 3-3 および図中の大粒子の長軸長さ L とは、サンゴ礫・タルクでは長さ l 、碎石では長軸 A 、ガラスビーズでは直径 D_L である。

横軸に大粒子試料に関するパラメーターを取る図 3-18 に d' と大粒子の長軸長さ L の関係、図 3-19 に d' と大粒子単体試料の間隙比 e_L の関係、図 3-20 に d' と小粒子単体試料の間隙比 e_s の関係を示す。

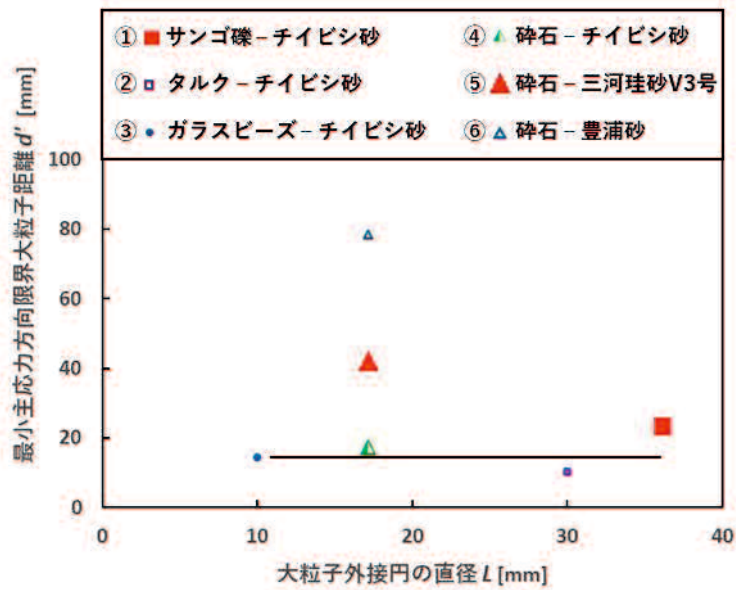


図 3-18 d' と大粒子の長軸長さ L の関係

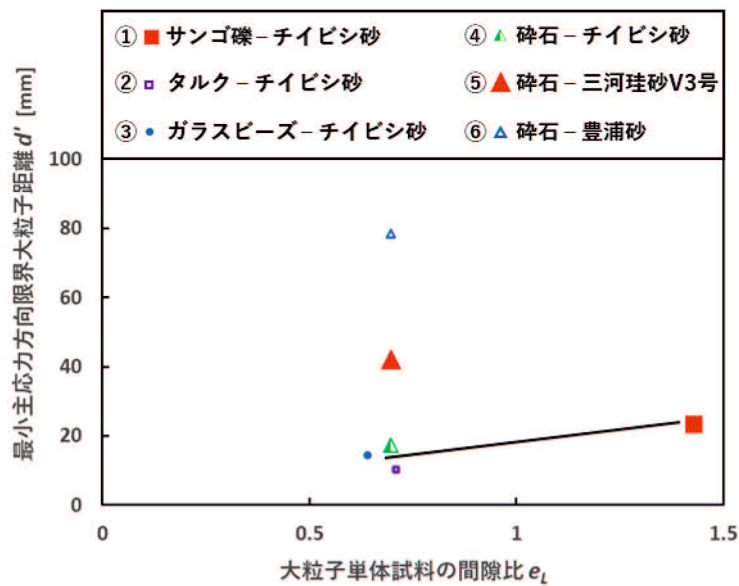


図 3-19 d' と大粒子単体試料の間隙比 e_L の関係

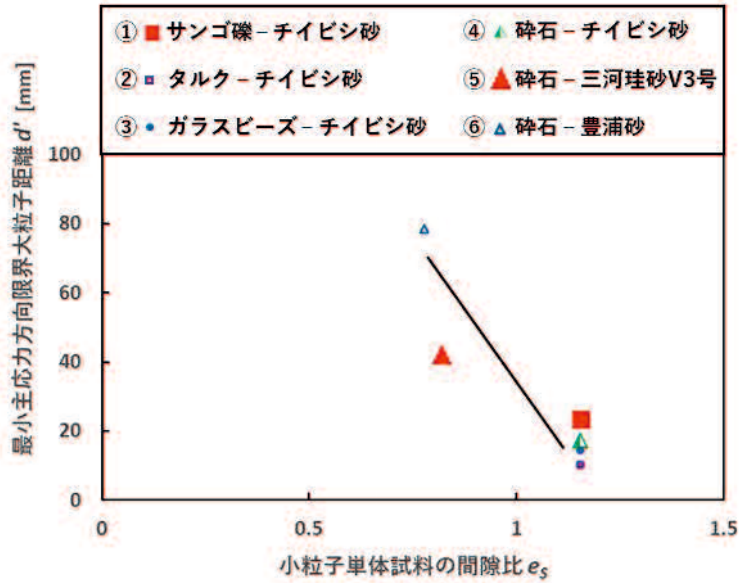


図 3-20 d' と大粒子単体試料の間隙比 e_s の関係

大粒子長軸長さ L との関係(図 3-18)からは、小粒子がチイビシ砂である大粒子比較実験結果(①~④)の d' は、大粒子長軸長さ L によらず、一定である。大粒子単体試料の間隙比 e_L との関係(図 3-19)からは、 d' が、大粒子単体試料間隙比 e_L の増加に伴い、緩やかに上昇している。小粒子単体試料の間隙比 e_s との関係(図 3-20)からは、 d' が、小粒子単体試料の間隙比 e_s の増加に伴い、減少している。これらの結果をまとめると、 d' は、大粒子単体試料の間隙比に比例し、小粒子単体試料の間隙比に反比例するパラメーターであると考えられる。

次に、 d' を大粒子長軸長さ L で除した d'/L と、大粒子長軸長さ L 、大粒子単体試料の間隙比 e_L 、小粒子単体試料の間隙比 e_s との関係を考察する。ここで、 d'/L は、大粒子の外接円の直径と d' の比であり、 d' の間隔が大粒子外接円の何倍の大きさであるかを意味する指標である。

図 3-21 に d'/L と大粒子の長軸長さ L の関係、図 3-22 に d'/L と大粒子単体試料の間隙比 e_L の関係、図 3-23 に d'/L と小粒子単体試料の間隙比 e_s の関係を示す。

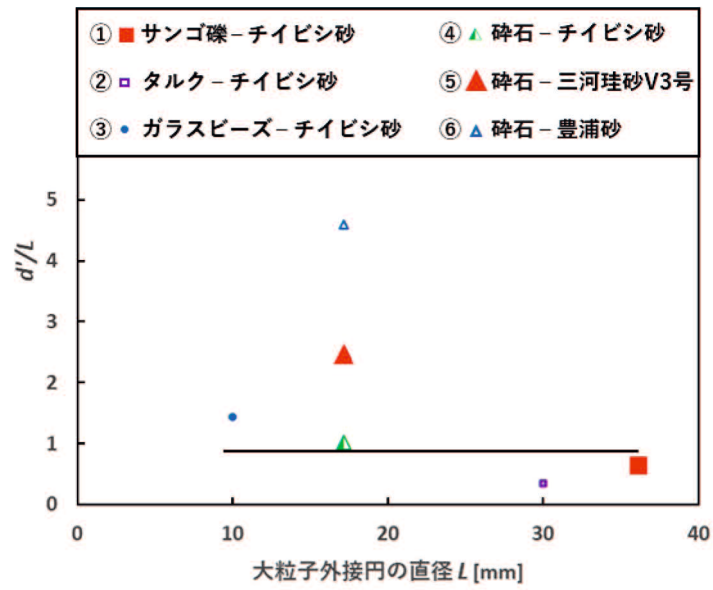


図 3-21 d'/L と大粒子の長軸長さ L の関係

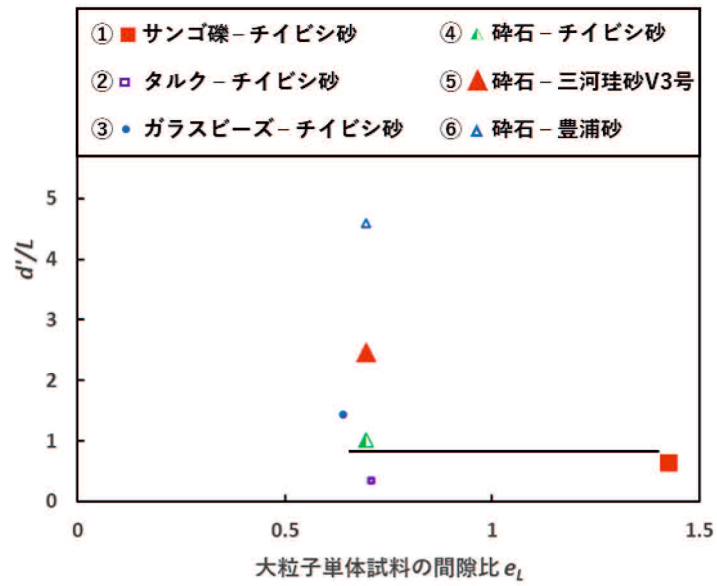


図 3-22 d'/L と大粒子単体試料の間隙比 e_L の関係

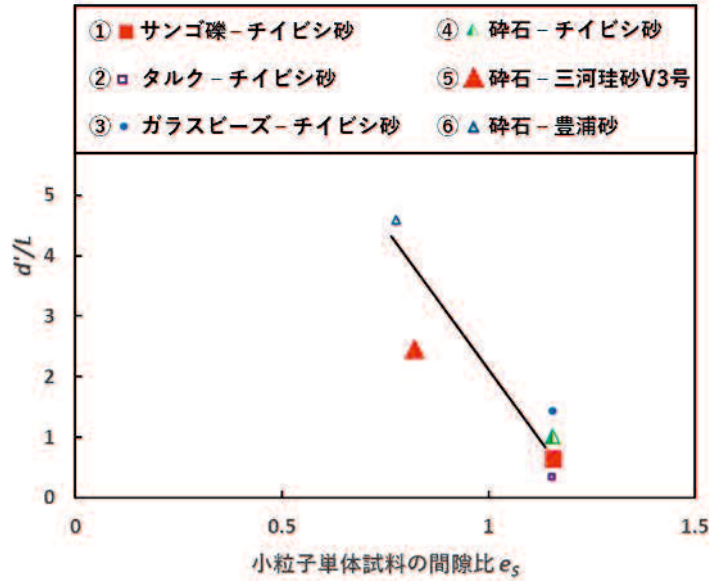


図 3-23 d'/L と小粒子単体試料の間隙比 e_s の関係

大粒子長軸長さ L との関係(図 3-21)からは、小粒子がチイビシ砂である大粒子比較実験結果(①~④)の d'/L が、大粒子長軸 L にかかわらず、おおよそ一定の値 $d'/L = 1$ となり、小粒子が異なると、値が変化する。大粒子単体試料の間隙比 e_L との関係(図 3-22)からは、 d'/L が、大粒子単体試料の間隙比にかかわらず、おおよそ一定の値 $d'/L = 1$ となり、小粒子が異なると、値が変化する。小粒子単体試料の間隙比 e_s との関係(図 3-23)からは、 d'/L が、小粒子単体試料の間隙比 e_s の上昇に伴い、減少している。つまり、理論式(2.1.19)~(2.3.19)中で、未知数となっている d' は、小粒子試料が同一であれば、どの大粒子であっても、大粒子の外接円の直径 L の n 倍の値をとり、 n は小粒子単体試料の間隙比 e_s の影響を受け、間隙比 e_s に対して、減少関数であることが明らかになった。これは、理論式(2.1.19)~(2.3.19)で算出する V_L^b が小粒子骨格構造と中間構造の境界であり、小粒子が空間の大部分を占めているためと推察される。

図 3-23 から、小粒子単体試料の間隙比 e_s の増加に伴い、 d'/L が線形に変化しているのが見て取れる。この結果に最小二乗法を施し、提案した推定式が、間隙比 e_s と大粒子の長軸長さ L から d' を算出する式(3.4)である。

$$d' = (-7.89e_s + 9.88)L \quad (3.4)$$

3.6 安息角における微視的モデルによる中間骨格構造の評価

表 3-4 式(3.4)を用いて推定された小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b の比較

大粒子	小粒子	推定式による d' の推定値 (mm)	推定値 V_L^b (%)	実験値 V_L^b (%)
① サongo礫	チイビシ砂	28.2	14.1	16.8
② タルク		23.4	11.4	25.4
③ ガラスビーズ		7.8	31.0	17.8
④		13.4	25.9	20.5
⑤ 碎石	三河珪砂V3号	58.4	3.5	5.7
⑥	豊浦砂	64.2	3.4	2.5

表 3-4 に、式(3.4)から推定した d' を用いて、式(2.1.19)~(2.3.19)から算出した小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b をまとめる。その結果、式(3.4)と式(2.1.19)~(2.3.19)から推定した V_L^b は、実験で確認された V_L^b を概ね推定できることが明らかになった。

これにより、式(3.4)と式(2.1.19)~(2.3.19)を用いることで、大粒子の粒度試験と粒子形状測定および、小粒子の密度試験の結果から、より現実に即した微視的モデルによる二種混合体の中間骨格構造の評価が可能であることが示された。

3.7 要約

本章では、様々な粒子特性を有する大粒子と小粒子を組み合わせた二種混合体に対して、安息角を実施し、中間骨格構造や限界大粒子含有率と粒子特性の関係を考察した。考察をもとに、 d' の推定式を提案し、最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の推定式と理論式を用いて、安息角実験で得られた中間骨格構造の評価を行った。以下に、得られた知見をまとめる。

1. 中間骨格構造における安息角は、大粒子単体試料の安息角にかかわらず、二種混合体の状態では増加傾向を示し、大粒子の形状がいびつであるほど、増加率が高くなる。また、大粒子が同一であると、増加率は等しくなり、小粒子の安息角が大きくなると、中間骨格構造における安息角も高くなる。

2. 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は、粗度があると大粒子形状がいびつであるほど、小さくなる反比例の関係にあること。小粒子の間隙比が小さいほど、小さくなる反比例の関係にあることが明らかになった。

3. 粒度をもとにした「地盤材料の工学的分類」による粗粒土の力学挙動の分類と、実際に工学的性質の一つである力学的性質(安息角)の結果をもとにした粗粒土の分類を比較すると、少なからず差が生じた。このことから工学的分類には、粒度だけでなく、大粒子は粒子形状、小粒子は間隙比の影響を考慮する必要がある。

4. 最小主応力方向の限界大粒子距離 d' は、小粒子試料が同一であれば、どの大粒子でも、大粒子の長軸長さ L の n 倍の値をとった。 n は小粒子単体試料の間隙比 e_s の影響を受け、間隙比 e_s が増加すると、減少するという反比例の関係であった。

5. 小粒子単体試料の間隙比 e_s と d'/L の関係をもとに、推定式 $d' = (-7.89e_s + 9.88)L$ が得られた。推定式から算出した d' を用いると、概ね実際に実験で得られた V_L^b を算出できることが明らかになった。これにより、大粒子の粒度試験と粒子形状測定および、小粒子の密度試験の結果から、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b を推定できる可能性が示された。

参考文献

Chang, W. and Phantachang, T. : Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils, *Engineering Geology*, Vol. 207, No. 3, pp. 78-90, 2016.

Lade, P. V., Liggio, C. D. and Yamamuro, J. A. : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1998.

Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada, Y. : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, *Granular Matter*, Vol. 13, No. 6, pp. 731-742, 2011.

Vallejo, L. E. : Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 5, pp. 1097-1104, 2001.

地盤工学会地盤調査法改定編集委員会：第2編 地盤の工学的分類 第2章 地盤材料の工学的分類，地盤材料試験の方法と解説一二分冊の1一， pp. 53-80, 2009.

地盤工学会地盤調査法改定編集委員会：第3編 物理試験 第10章 最小密度・最大密度試験，地盤材料試験の方法と解説一二分冊の1一， pp. 198-221, 2009.

原忠，國生剛治：砂礫の最小・最大密度に及ぼす影響因子の分析，*土木学会論文集*，No. 778/III-69, pp. 151-162, 2004.

松倉公憲，恩田裕一：安息角一定義と測定法にまつわる諸問題，*筑波大学水理実験センター報告*，Vol. 13, pp. 27-35, 1939.

第4章 個別要素法による二種混合体の微視的モデルにおける骨格構造モデルの妥当性

4.1 概説

第2章では、最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' を、骨格構造モデルに組み込むことで、大粒子配置の異方性を考慮した。

その際、導入したパラメーターである最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' は「 $d \leq d'$ の関係となる」と仮定した。そのため、この仮定の正当性を確認することで、骨格構造モデルの妥当性を示す必要がある。

そこで、本章では、DEMを用いて、第3章の安息角実験の再現解析を実施する。再現解析では、安息角実験で取得した、中間骨格構造における安息角の傾向や、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率に与える粒子特性の影響が、再現されるかを確認する。そのうえで、大粒子の座標データから、最大主応力方向(z 軸方向)と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)で、大粒子配置に異方性があり、 $d \leq d'$ の関係となっているかを確認する。さらに、接点力、可視化した接点ベクトルの分析では、接点力を、大粒子と大粒子の接触による接点力、小粒子と小粒子の接触による接点力、大粒子と小粒子の接触による接点力に分けて、その大きさや大粒子含有率との関係を考察し、接点ベクトルは、安息状態の砂山の中で、強い接点ベクトルを可視化し、その方向や大粒子含有率との関係を考察することで、二種混合体内部の接点力の状態を把握する。

以下に、本章の構成を述べる。

第2節では、第3章の安息角実験の再現解析の条件および手順を示す。第3節では、最大主応力方向(z 軸方向)と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)で、大粒子配置に異方性があり、 $d \leq d'$ の関係となっているかを確認する。さらに、接点力、可視化した接点ベクトルの分析から、二種混合体内部の接点力の状態を把握する。第4節では、本章で得られた知見をまとめる。

4.2 解析方法

4.2.1 解析条件

4.2.1.1 解析粒子形状



写真 4-1 安息角実験で用いたサンゴ礫



写真 4-2 DEM 上での円柱大粒子

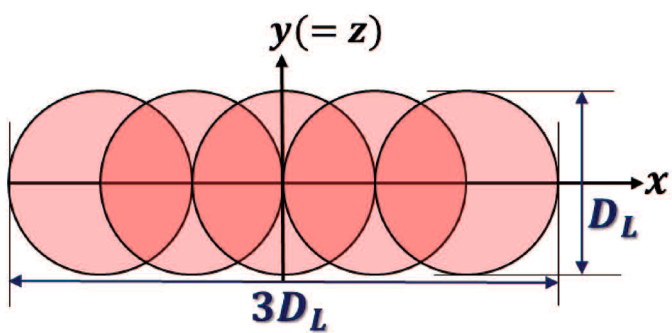


図 4-1 円柱大粒子の構造



写真 4-3 安息角実験で用いた碎石

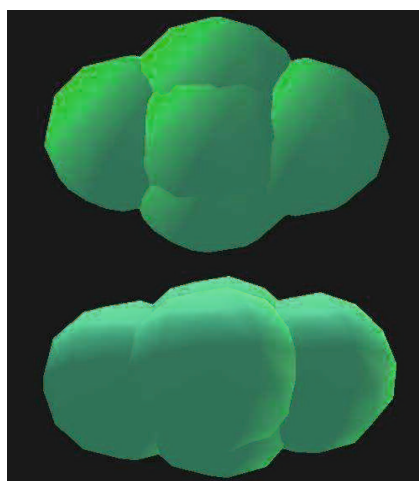


写真 4-4 DEM 上での扁平楕円体大粒子

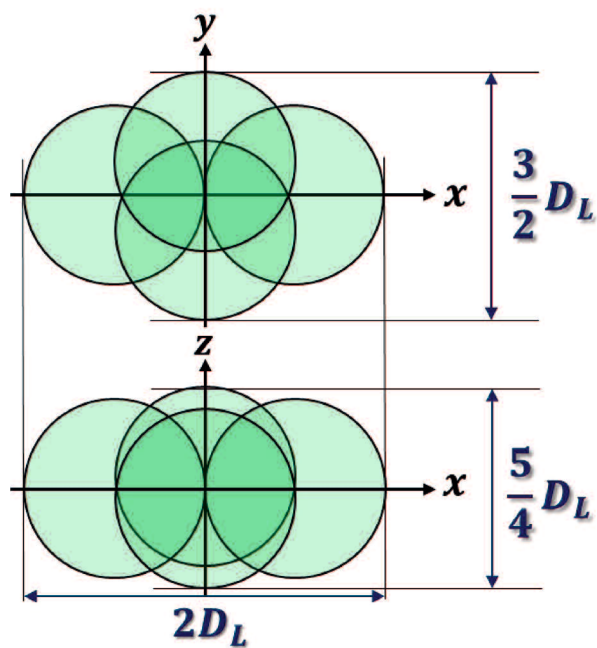


図 4-2 扁平楕円体大粒子の構造



写真 4-5 安息角実験で用いたガラスビーズ

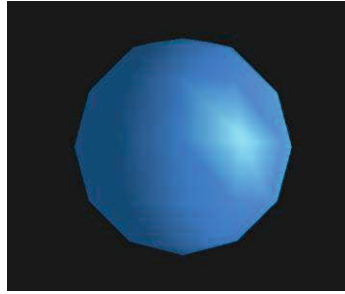


写真 4-5 DEM 上での球体大粒子

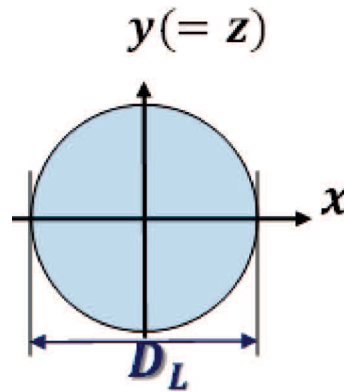


図 4-3 球体大粒子の構造

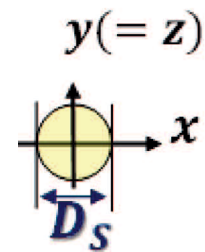


図 4-4 球体小粒子の構造

写真 4-1 に安息角実験で用いたサンゴ礫, 写真 4-2 に DEM 上での円柱大粒子, 写真 4-3 に安息角実験で用いた碎石, 写真 4-4 に DEM 上での扁平楕円体大粒子, 写真 4-5 に安息角実験で用いたガラスビーズ, 写真 4-5 DEM 上での球体大粒子を示す。

図 4-1 に円柱大粒子の構造, 図 4-2 に扁平楕円体大粒子の構造, 図 4-3 に球体大粒子の構造, 図 4-4 に球体小粒子の構造を示す。

DEM 解析では, 球体以外の粒子を表現する際, 球体を組み合わせることで, 複雑な形状の粒子を作成する(梶山ら, 2017)。サンゴ礫をモデル化した円柱大粒子は, 5 つの球体大粒子を, 球体大粒子の半径 r_L だけオーバーラップさせながら配置し, 直径と長さの比が 1:3 になるように作成した。扁平楕円体大粒子の構造は, x 軸方向には, 2 つの球体粒子をオーバーラップさせず, 隣接するように配置し, y 軸方向には, x 軸方向に 2 つ並んだ粒子の接点から球体粒子の半径 r_L ずらした位置に 2 つの粒子を配置し, z 軸方向に

は、 x 軸方向に 2 つ並んだ粒子の接点から球体粒子の半径の半分 $\frac{1}{2}r_L$ ずらした位置に 2 つの粒子を配置した。これにより扁平楕円体大粒子は、 x 軸方向に $4r_L$ 、 y 軸方向に $3r_L$ 、 z 軸方向に $2.5r_L$ の長さで、合計 6 個の構成粒子を有する構造になる。

DEM は、非常に計算負荷の大きい解析であるため、実際の粒径を用いることはできない。本研究では、解析負荷軽減のため、球体大粒子を直径 $D_L = 20mm$ 、球体小粒子を直径 $D_S = 8mm$ とした。この場合、円柱大粒子は直径 $D_L = 20mm$ 、長さ $L = 60mm$ 、扁平楕円体は長軸長さ $A = 40mm$ 、中軸長さ $B = 30mm$ 、短軸長さ $C = 25mm$ となる。

4.2.1.2 安息角試験装置を再現したメッシュ

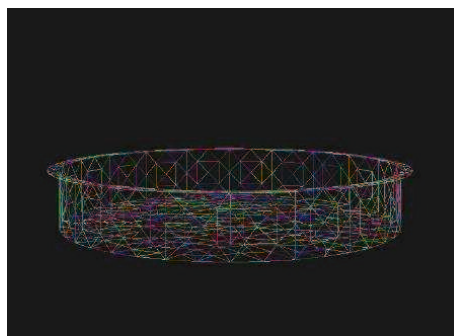


写真 4-6 下部モールドとモデルメッシュ

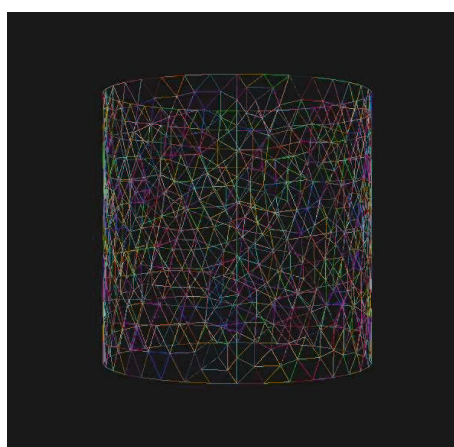


写真 4-7 上部モールドとモデルメッシュ

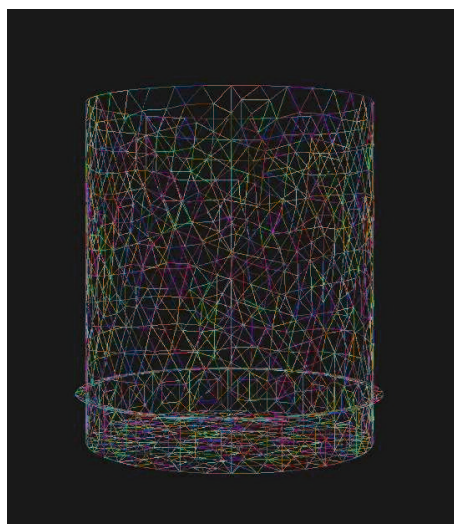
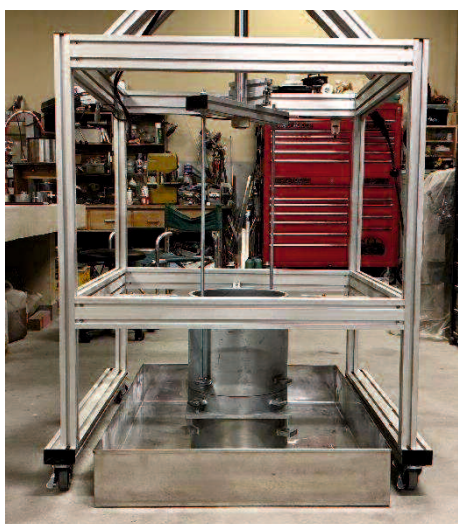


写真 4-8 組みあがった安息角試験装置とモデルメッシュ

写真 4-6～写真 4-8 に示すように、下部と上部のモールドの、粒子が接触する部分にメッシュを貼り付け、それぞれのモデルメッシュを作成した。モデルメッシュのサイズは、実験装置と同じく、下部モールドは、内径 300mm、深さ 50mm、ハッチが 10mm。上部モールドは、内径 300mm、高さ 300mm である。

4.2.1.3 解析パラメーター

表 4-1 解析に用いたパラメーター

	単位	大粒子			小粒子	メッシュ (試験器具)
		円柱	扁平楕円体	球体		
ポアソン比	-	0.30	0.27	0.26	0.17	0.29
密度	kg/m ³	2845	2680	2500	2657	8000
上昇速度	m/s					0.0026
粒子間摩擦	rad	0.5				
減衰率	-	0.8				
ヤング率	N/m ²	1.13 × 10 ⁸				
タイムステップ	s	PWaveTimeStep				

表 4-1 に、解析に用いたパラメーターを示す。

ポアソン比については、円柱大粒子は松原ら(2012)の研究、扁平楕円体大粒子は堀口ら(2011)の研究、球体大粒子とモールドメッシュは理科年表(2014)、小粒子は金子ら(1987)の研究をもとに、モデルにした試料や試験装置の材質を参考に決定した。密度については、大粒子と小粒子は、実験で用いた試料の土粒子密度、メッシュは、鋼鉄の密度を理科年表(2014)から引用した値を用いた。上昇速度は、安息角実験と同じである。

しかし、粒子間摩擦は測定の実験の困難さ、減衰率とヤング率は解析 PC の処理能力の制約から、現実とは異なる値を使用している。粒子間摩擦の測定方法は、確立されておらず、提唱されている方法も非常に煩雑な手順を行う必要があるものが多い。減衰率についても、値が小さいと解析粒子の運動が収束しにくくなり、解析に膨大な時間がかかる。そこで、中村ら(2016)の研究を参考に、解析粒子・メッシュの粒子間摩擦を 0.5rad、減衰率を 0.8 とした。

ヤング率についても解析時間の問題から、材料本来の値(本研究の材料では、 $1.0 \times 10^{12} \text{N/m}^2$ を超える)を使用できない。本研究で使用する Yade DEM では、1 ステップあたりに処理できる解析上の時間 Δt_c を、地震波の P 波に基づく PWaveTimeStep と呼ばれる式(4.1)によって計算される。

$$\Delta t_c = \frac{r}{\sqrt{E/\rho}} \quad (4.1)$$

式(4.1)でヤング率 E は分母に位置するため、ヤング率が大きくなると 1 ステップあたりに処理できる解析上の時間 Δt_c が小さくなり、解析に膨大な時間がかかってしまう。ヤング率を小さくするほど、解析時間を短くすることが出来るが、ヤング率が小さくし過ぎると解析結果に大きな影響を及ぼしてしまう。そこで、解析結果への影響を抑えつつ、可能な限りヤング率を小さくする方法として、Otsubo et al.(2017)の研究を参考にした。ここでは、「二つの粒子に最も荷重がかかる条件下で、粒子のオーバーラップが粒子直径の 1%以内に収まるように剛性やヤング率を決定する」方法が提唱されており、本研究でもこの方法を採用した。

ヤング率の算出は、以下のようなになる。

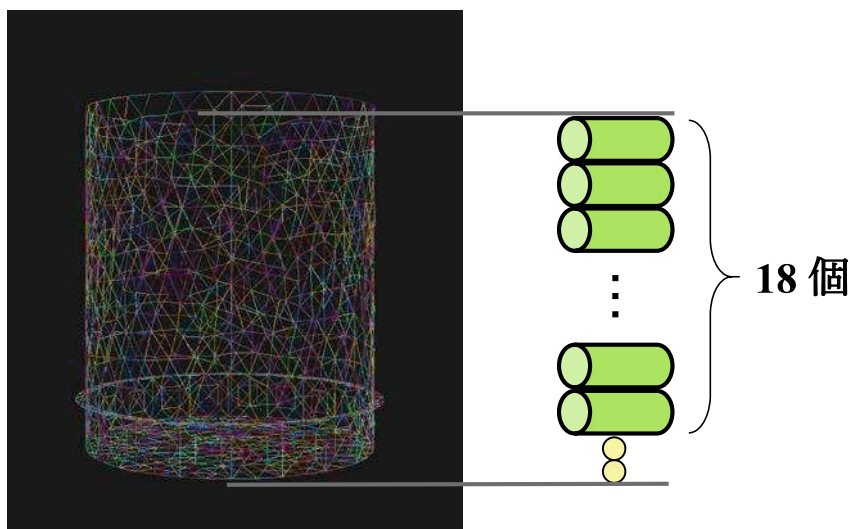


図 4-5 ヤング率算出のための条件

今回の DEM 解析で最も荷重がかかる条件は、図 4-5 のように、底面に 2 個の小粒子があり、その上に 18 個の円柱大粒子が乗る状態である。この条件の下、ばねを単純ばねとして計算を行い、ヤング率には $E = 1.13 \times 10^8 N/m^2$ を採用した。

4.2.2 解析手順

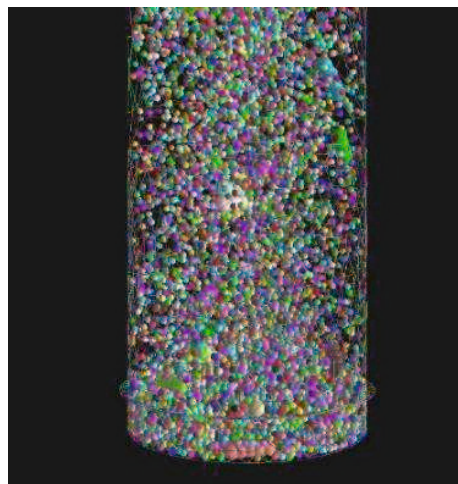


写真 4-9 粒子の充填

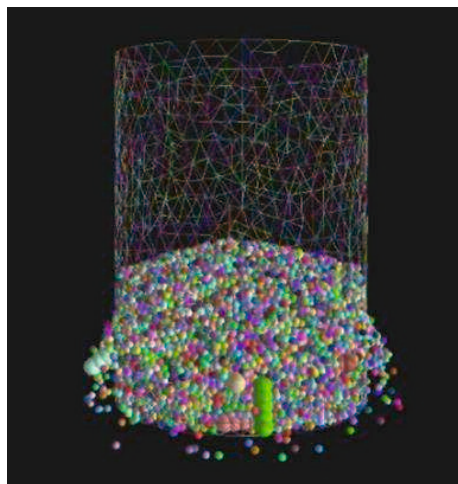


写真 4-10 稼働中の装置

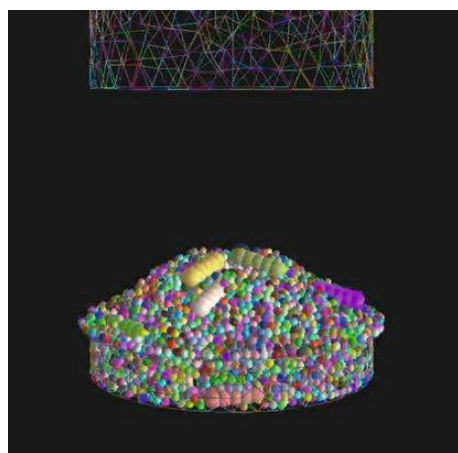


写真 4-11 出来上がった粒子の山

解析手順を以下に示す。

- 1) 上部モールドの上に，目標の大粒子含有率になるように，粒子を生成する。
 - 2) 粒子を自由落下させて，モールドメッシュに充填させる。(写真 4-9)
 - 3) 粒子間の接点力が落ち着くまで放置する。
 - 4) 上部モールドを 0.0026m/s で上昇させ，粒子を排出する。(写真 4-10)
 - 5) 粒子の運動がなくなるまで放置する。(写真 4-11)
- 1)~5)の手順を，目標の大粒子含有率を変えながら繰り返す。0%, 100%についても解析を行う。

4.2.3 安息角の算出

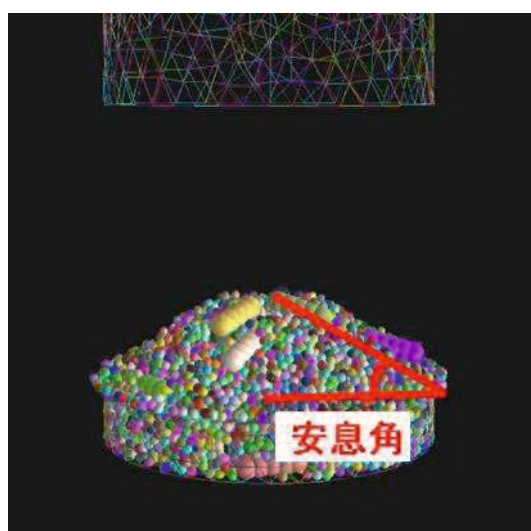


図 4-6 安息角再現解析における安息角の定義

図 4-6 に示すように，安息角の定義は実験と同様に，最も高い位置にある粒子とモールドの端を結んだ線と，水平線のなす角とした。一つの粒子の山に対し，頂点の粒子から直交するように 4 方向で安息角を測定し，その平均をとった。

4.3 解析結果

4.3.1 安息角実験結果の再現性

図 4-7 に安息角と大粒子含有率の関係(サンゴ礫-円柱大粒子), 図 4-8 に安息角と大粒子含有率の関係(碎石-扁平楕円体大粒子), 図 4-9 安息角と大粒子含有率の関係(ガラスビーズ-球体大粒子), 図 4-10 に安息角と大粒子含有率の関係(実験まとめ-DEM まとめ)を示す. 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率と大粒子骨格構造の限界大粒子含有率は, 安息角実験と同じく, 二乗近似の方法で判定している. 図中では, 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着色している.

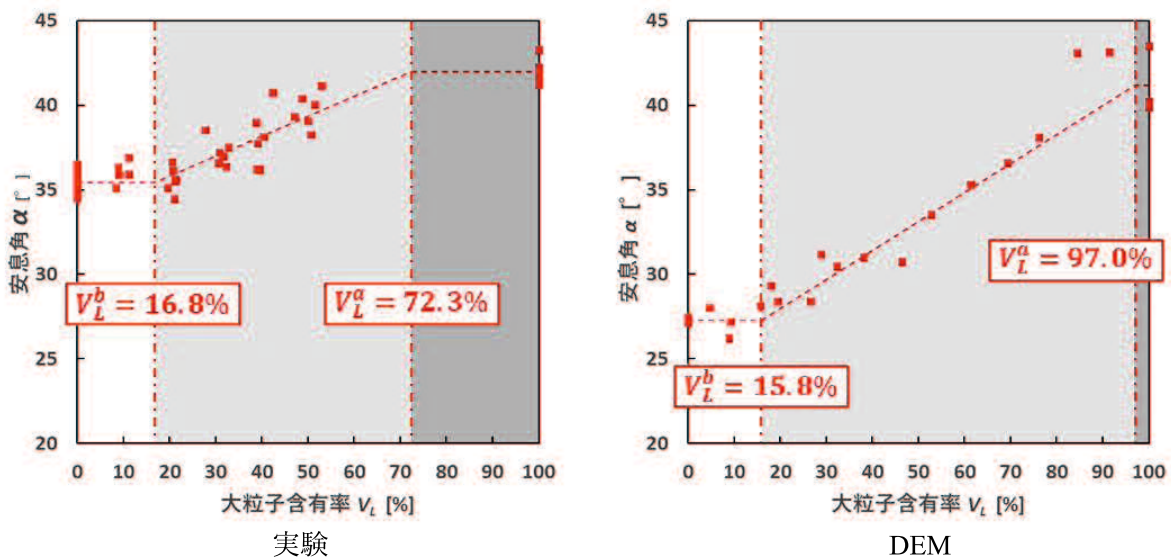


図 4-7 安息角と大粒子含有率の関係(サンゴ礫-円柱大粒子)

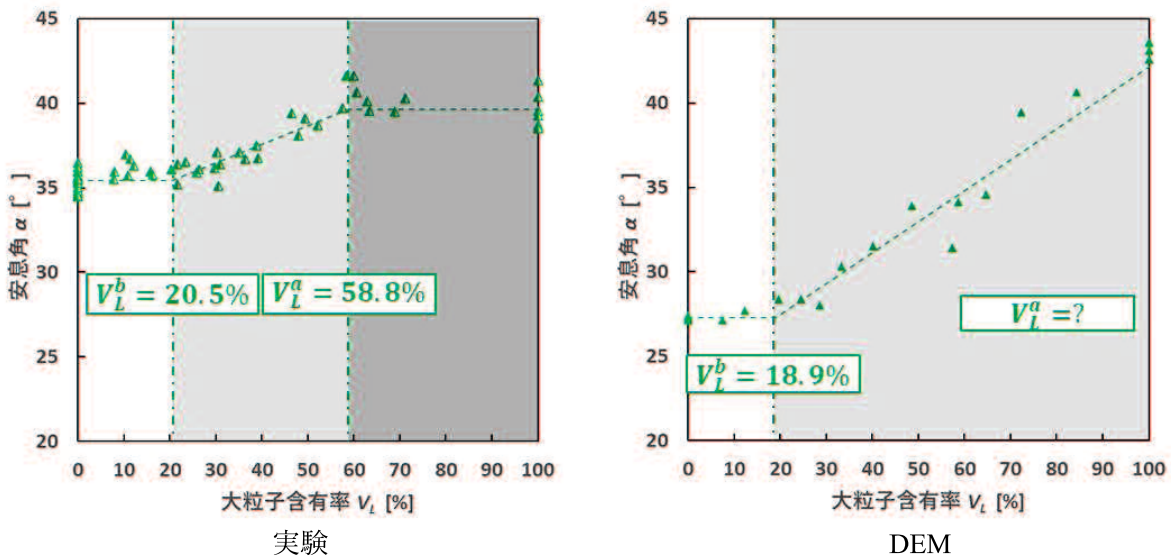
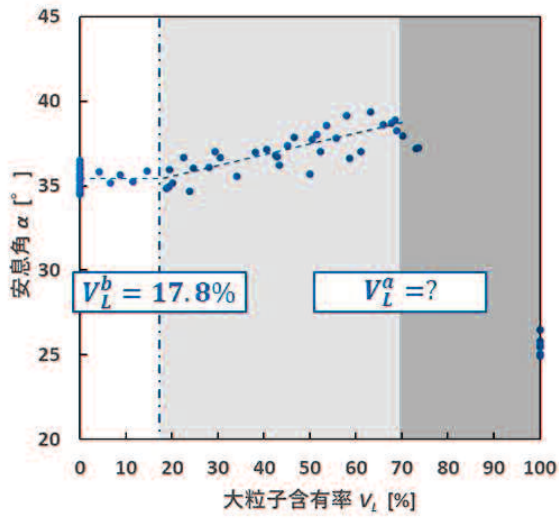
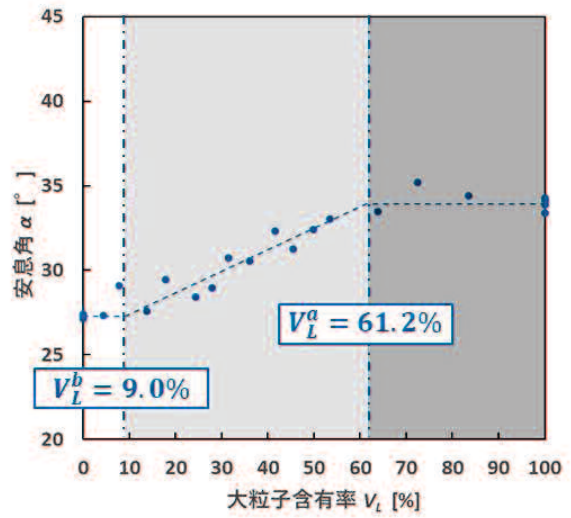


図 4-8 安息角と大粒子含有率の関係(碎石-扁平楕円体大粒子)

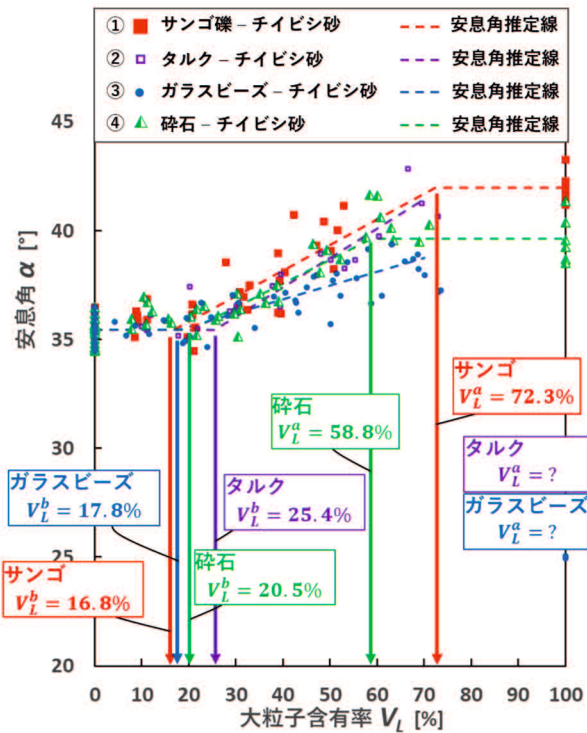


実験

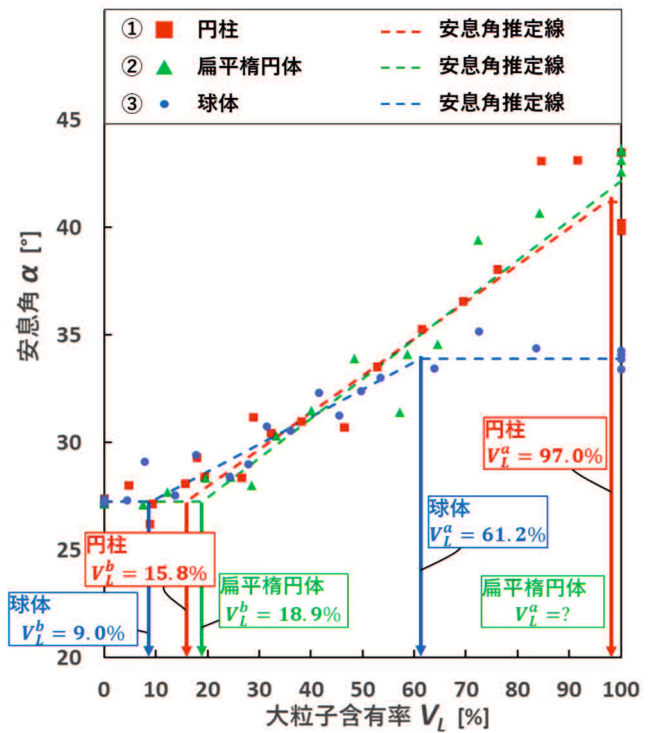


DEM

図 4-9 安息角と大粒子含有率の関係(ガラスビーズ-球体大粒子)



実験



DEM

図 4-10 安息角と大粒子含有率の関係(実験まとめ-DEM まとめ)

図 4-10 をもとに、まず、大粒子含有率 0%(小粒子単体試料)に着目すると、実験の安息角が約 35° であるのに対し、DEM は約 27° になっている。これは、安息角実験の大粒子比較実験に用いたチイビシ砂は、生物由来のいびつな形状であるのに対し、DEM の小粒子は、完全な球体であることが原因である。大粒子含有率 100%(大粒子単体試料)に着目すると、扁平楕円体大粒子が約 43° で最も大きく、円柱大粒子が約 42°、球体大粒子が約 34° となった。実験と比較すると、それぞれの大小関係がわずかであるが、円柱大粒子と扁平楕円体大粒子で逆転している。これは、実験のサンゴ礫は細かな凹凸があることや、ゆがみがあるのに対し、DEM の円柱大粒子は、x軸から見ると完全な回転対称性を持っているため、転がりやすくなり、安息角が低くなったことが、原因であると考えられる。しかし、球体大粒子に比べて、いびつな円柱大粒子と扁平楕円体大粒子の安息角が、明らかに大きいことは、実験と同じ傾向であるといえる。

小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は、実験と同様に、すべてのケースで取得することができ、円柱大粒子が $V_L^b = 15.8\%$ 、扁平楕円体大粒子が $V_L^b = 18.9\%$ 、球体大粒子が $V_L^b = 9.0\%$ であった。大小関係については、球体大粒子が最も小さくなっているが、実験と同様に、円柱大粒子が扁平楕円体大粒子に比べて、小さくなっている。小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a は、球体大粒子が $V_L^a = 61.2\%$ であった一方で、円柱大粒子と扁平楕円体大粒子 100%の安息角が、大粒子含有率 0%の安息角よりも高いにもかかわらず、円柱大粒子では $V_L^a = 97.0\%$ であった非常に大きい値になり、扁平楕円体大粒子では、取得できなかった。これは、実験に比べて大粒子が大きいこと、モールドメッシュとの接触の影響を受けたことが、原因であると考えられる。このことは、大粒子が小さい球体大粒子では、 V_L^a が取得できたことから推察される。しかし、 V_L^b ～大粒子含有率 50%の区間を見ると、大粒子形状がいびつであると、安息角の増加率が大きくなることを見て取れる。これは、実験結果と同じ傾向である。 V_L^b が取得できたことと、 V_L^b ～大粒子含有率 50%の区間における安息角の傾向から、大粒子含有率が低い区間では、ある程度の再現性があるといえる。

4.3.2 鉛直方向と水平方向の大粒子間距離

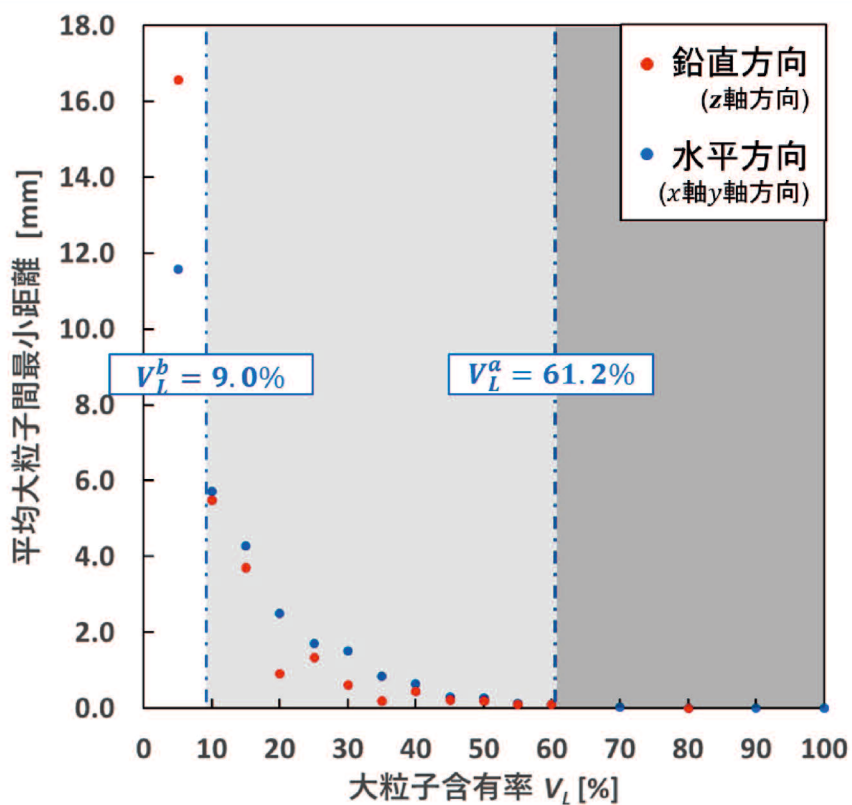


図 4-10 球体大粒子の平均大粒子間最小距離と大粒子含有率の関係

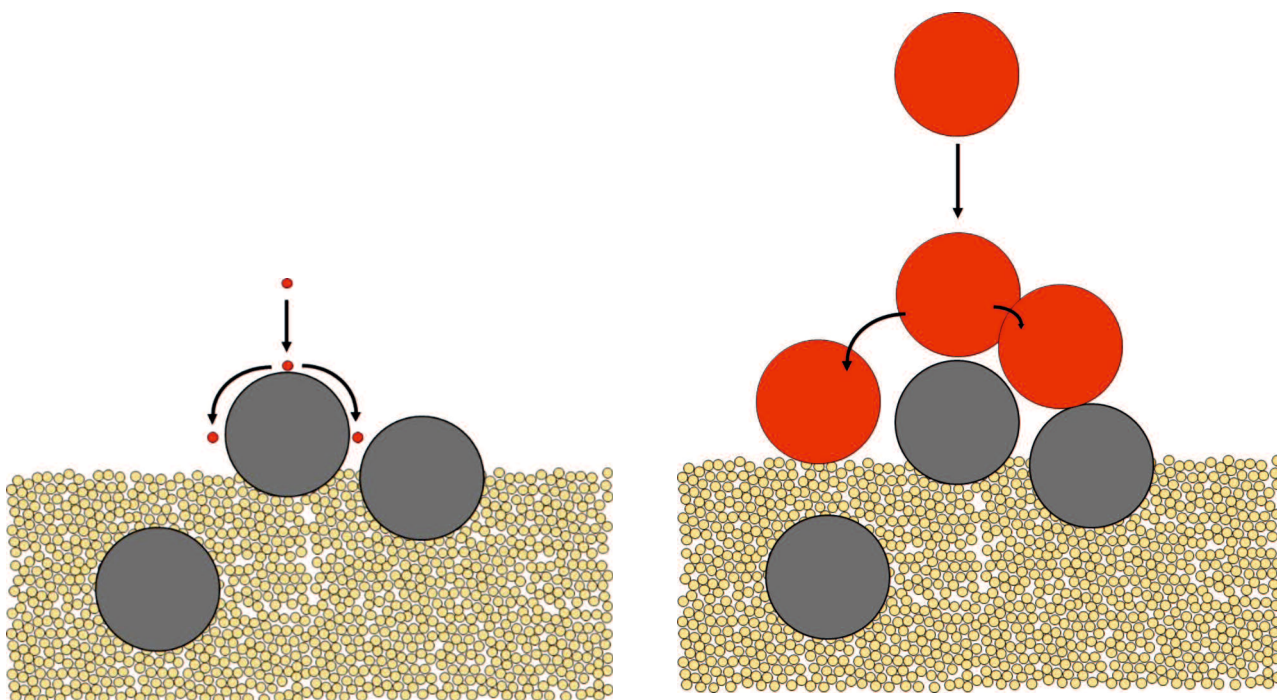


図 4-11 堆積中のイメージ

図 4-10 に、球体大粒子の平均大粒子間最小距離と大粒子含有率の関係、図 4-11 に堆積中のイメージを示す。平均大粒子間最小距離とは、各々の大粒子に一番近い大粒子の距離の平均である。また、鉛直方向とは z 軸を中心に 45° の範囲、水平方向とは x 軸と y 軸を中心に 45° の範囲を指す。

図 4-10 から、球体大粒子の二種混合体の中間骨格構造である、大粒子含有率 9.0~61.2%において、鉛直方向の平均大粒子間最小距離が、水平方向に比べて小さくなっている。これは、大粒子が形成する間隙への入り込みやすさが、影響していると考えられる。図 4-11 に示すように、表面に大粒子が出ている状態を考える。表面に出ている大粒子の上に、小粒子が落下した時、小粒子は粒径が小さいので、大粒子同士が形成する間隙が小さい場合でも、間隙に入り込むことが出来る。一方で、大粒子は粒径が大きいため、この間隙に入り込むことが出来ず、大粒子の上に積みあがっていく。大粒子含有率が非常に低い状態では、大粒子同士の間隙ができにくく、大粒子含有率が高くなると、大部分の大粒子が接触状態であるため、大粒子間の距離が 0 になる。そのため、この現象は、中間骨格構造で起こりやすくなる。

中間骨格構造において、鉛直方向の平均大粒子間最小距離が、水平方向に比べて小さいことが、明らかになったため、「最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸、 y 軸方向)の限界大粒子距離 d' は、 $d \leq d'$ の関係となる」とした微視的モデルの仮定の正当性が確認された。これにより、骨格構造モデルの妥当性が示されたと考えられる。

4.3.3 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係

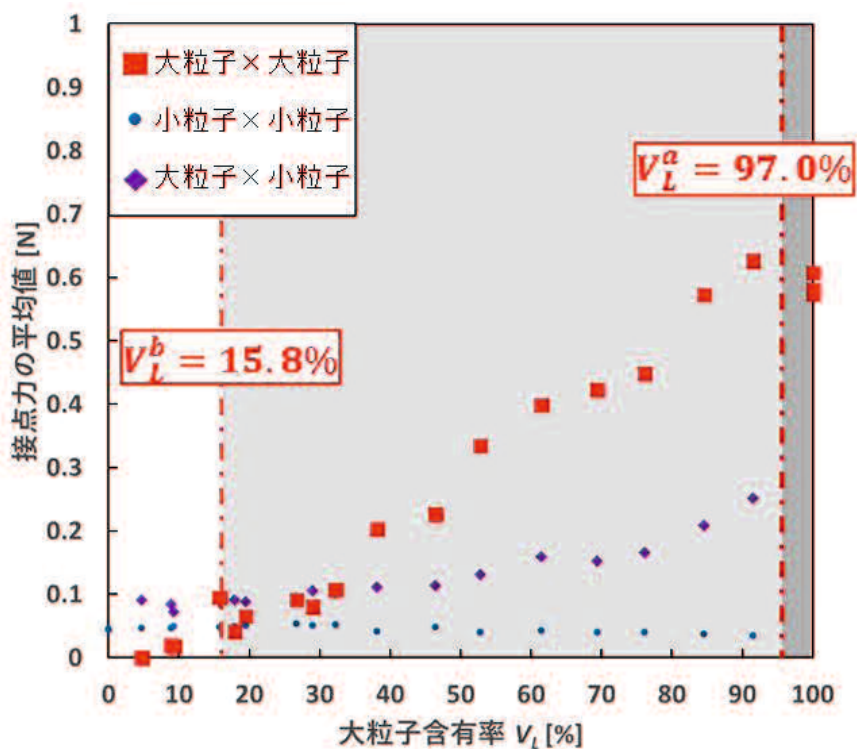


図 4-12 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(円柱大粒子)

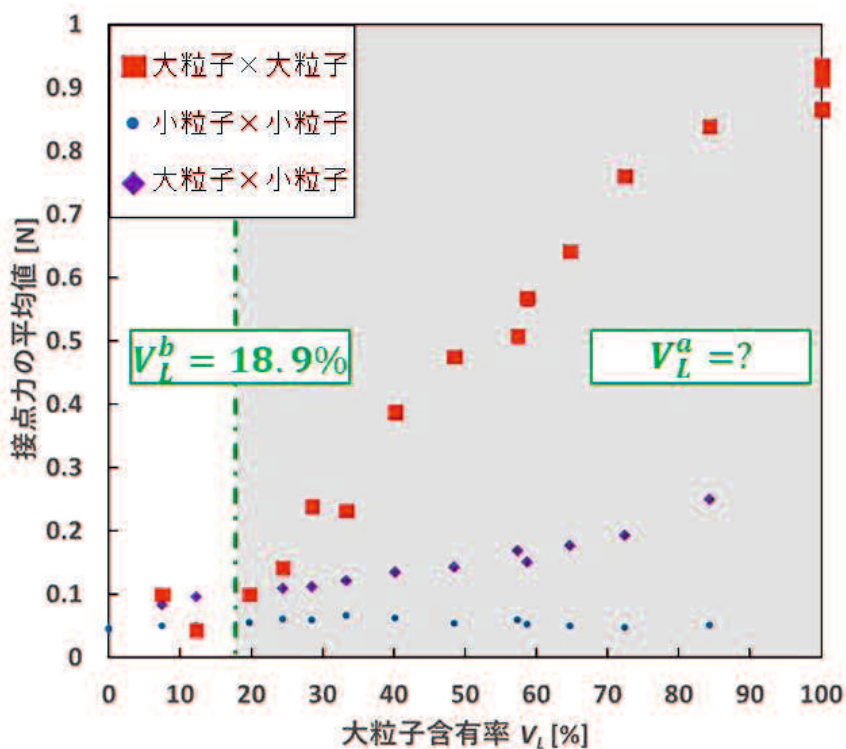


図 4-13 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(扁平楕円体大粒子)

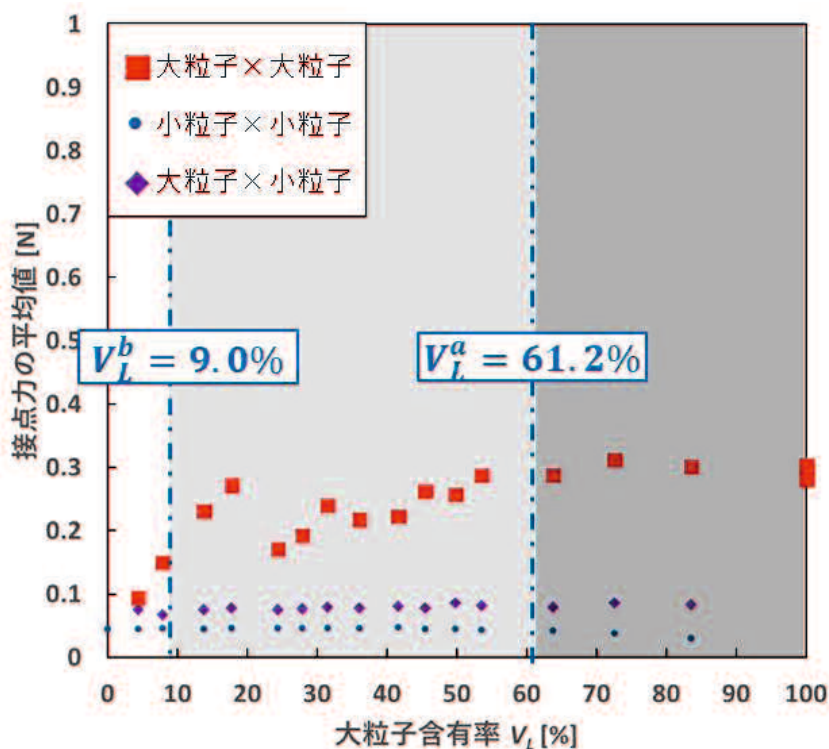


図 4-14 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(球体大粒子)

図 4-12 に安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(円柱大粒子), 図 4-13 に安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(扁平楕円体大粒子), 図 4-14 に安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係(球体大粒子)を示す. 図中の ■ は大粒子と大粒子の接触による接点力, ● は小粒子と小粒子の接触による接点力, ◆ は大粒子と小粒子の接触による接点力である.

図 4-12~図 4-14 から, 大粒子と大粒子の接触による接点力は, すべてのケースで, 中間骨格構造 ($V_L^b \sim V_L^a$ %) において, 増加していることが見て取れる. 一方で, 小粒子と小粒子の接触による接点力は, すべてのケースで, 大粒子含有率によらず, 小粒子単体(大粒子含有率 0%)の時と同じ 0.5N 前後の値を示した. 大粒子と小粒子の接触による接点力は, 球体大粒子のケースでは, ほとんど変化が見られなかったが, 円柱大粒子と扁平楕円体大粒子のケースで, 中間骨格構造 ($V_L^b \sim V_L^a$ %) において, 増加していることが見て取れた. 球体大粒子のケースでは, ほとんど変化が見られなかったのは, 他のケースに比べて, 大粒子と大粒子の接触による接点力が小さく, 大粒子と小粒子の接触による接点力に及ぼす影響も小さかったためと考えられる. また, それぞれの接点力の大小関係は, すべてのケースで, 中間骨格構造 ($V_L^b \sim V_L^a$ %) において, 小粒子と小粒子 < 大粒子と小粒子 < 大粒子と大粒子, となった.

これらのことから, 二種混合体内部では, 大粒子が接近している中間骨格構造において, 小粒子のみでは生じない強い接点力が, 小粒子に発生していることが明らかになった.

4.3.4 接点ベクトルの可視化

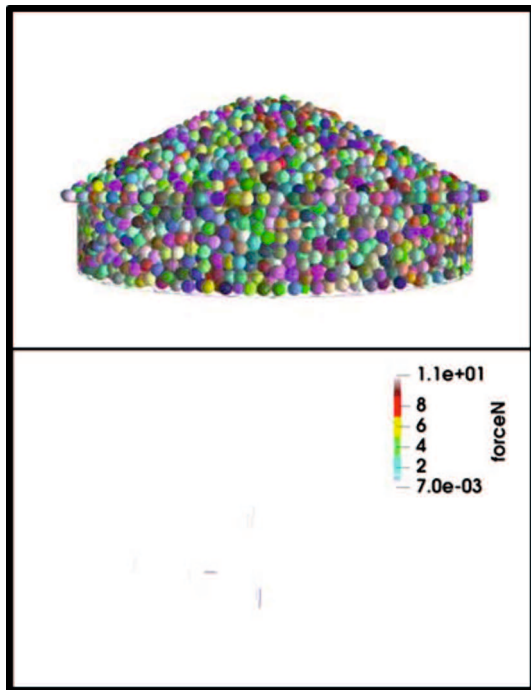


図 4-15 粒子の砂山と可視化した接点ベクトル
(大粒子含有率 $V_L = 9.3\%$)

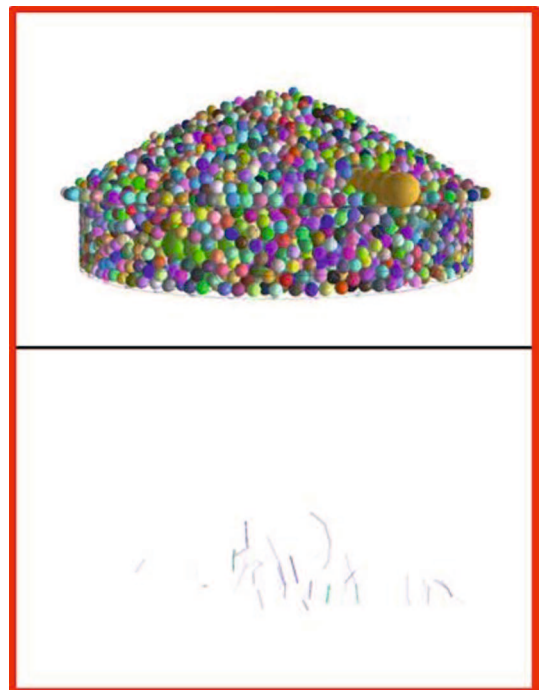


図 4-16 粒子の砂山と可視化した接点ベクトル
(大粒子含有率 $V_L = 15.7\%$)

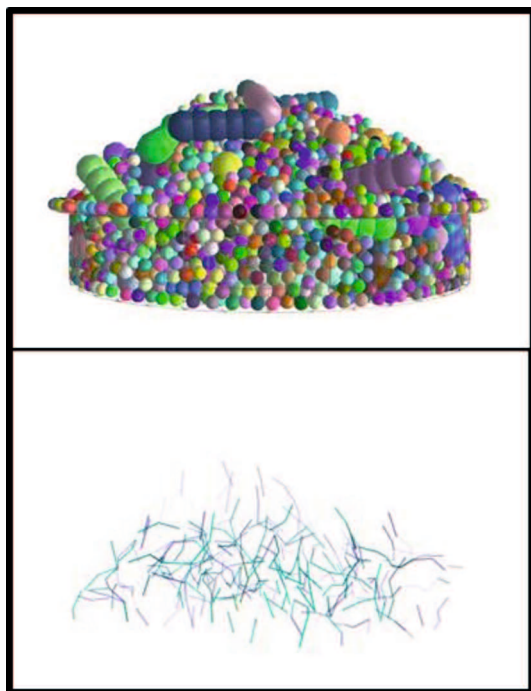


図 4-17 粒子の砂山と可視化した接点ベクトル
(大粒子含有率 $V_L = 52.8\%$)

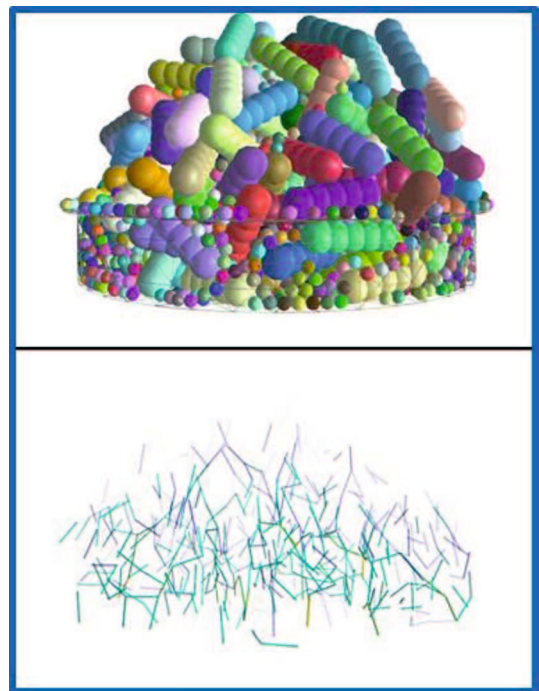


図 4-18 粒子の砂山と可視化した接点ベクトル
(大粒子含有率 $V_L = 91.5\%$)

図 4-15～図 4-18 に、大粒子含有率が 9.3%、15.7%、52.8%、91.5%における、大粒子が円柱の場合の粒子の砂山と可視化した強い接点ベクトルを示す。ここでは、小粒子 1 個の自重による接点力 $6.99 \times 10^{-3} [N]$ より大きい接点力を、強い接点ベクトルとして可視化している。また、 $V_L = 9.3\%$ は小粒子骨格構造の中央に最も近い大粒子含有率、 $V_L = 15.7\%$ は小粒子骨格構造の限界大粒子含有率に最も近い大粒子含有率、 $V_L = 52.8\%$ は中間骨格構造の中央に最も近い大粒子含有率、 $V_L = 91.5\%$ は大粒子骨格構造の限界大粒子含有率に最も近い大粒子含有率である。

図 4-15～図 4-18 より、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率に最も近い $V_L = 15.7\%$ から、強い接点ベクトルが現れ始め、大粒子含有率の増加に伴って、鉛直または、砂山の頂点方向に、連なりながら発達していることが見て取れる。一方で、水平方向は、鉛直方向に比べて、強い接点ベクトルの連なりが少ないことが見て取れた。

$V_L = 15.7\%$ から強い接点ベクトルが現れたのは、安息角の増加つまり砂山自体が大きくなったことで、自重が増加したこと。さらに、大粒子が増加し、小粒子が減少したことで、砂山を支える粒子の接点数が減少し、一つ当たりの接点力が増加したことが、原因であると考えられる。また、強い接点ベクトルが、鉛直方向に発達するのは、重力下における最大主応力の方向が鉛直方向(z軸方向)であり、最小主応力の方向が水平方向(x軸、y軸方向)であるためである。

これらのことから、二種混合体内部では、最大主応力(z軸)方向に、強い接点力が連なり、最小主応力方向(x軸、y軸方向)に、弱い接点力の空間が存在していることが明らかになった。

4.4 要約

本章では、DEMを用いて、第3章の安息角実験の再現解析を実施し、実験で取得した、中間骨格構造における安息角の傾向や、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b に与える粒子特性の影響が、再現されるかを確認した。そのうえで、「最大主応力方向(z 軸方向)と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)で、大粒子配置に異方性があり、 $d \leq d'$ の関係になる」という第2章の仮定の正当性を確認した。さらに、接点力、可視化した接点ベクトルの分析から、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにした。

以下に、得られた知見をまとめる。

1. 安息角実験の再現解析では、大粒子含有率 50%以下の中間骨格構造で、実験と同様に、大粒子形状がいびつであるほど、安息角の増加率が高くなること。さらに、 V_L^b が取得でき、粗度がある場合、大粒子形状がいびつであると V_L^b が小さくなることが明らかになったため、ある程度の再現性のある結果が得られたと考えられる。

2. 大粒子の座標データの分析により、鉛直方向の平均値大粒子間最小距離が、水平方向に比べて小さいことが確認できた。これにより、「最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' は、 $d \leq d'$ の関係となる」とした仮定の正当性が確認できたことから、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルに妥当性があると判断できた。

3. 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係の分析により、中間骨格構造において、大粒子と大粒子の接触による接点力および、大粒子と小粒子の接触による接点力が増加すること。小粒子と小粒子の接触による接点力は、大粒子含有率によらず、一定であること。それぞれの接点力の大小関係は、中間骨格構造において、小粒子と小粒子<大粒子と小粒子<大粒子と大粒子の関係になっていることが示された。これらのことから、二種混合体内部では、大粒子が接近している中間骨格構造において、小粒子のみでは生じない強い接点力が、小粒子に発生していることが明らかになった。

4. 可視化した強い接点ベクトルの分析から、中間骨格構造から、強い接点ベクトルが現れ始め、大粒子含有率の増加に伴って、鉛直または、砂山の頂点方向に、連なりながら発達していること。水平方向は、鉛直方向に比べて、強い接点ベクトルの連なりが少ないことが示された。このことから、二種混合体内部では、最大主応力方向(z 軸方向)に、強い接点力が連なり、最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)に、弱い接点力の空間が存在していることが明らかになった。

参考文献

Masahide Otsubo, Catherine O'Sullivan, Tom Shire : Empirical assessment of the critical time increment in explicit particulate discrete element method simulations, Computers and Geotechnics, No.86 pp.67-79, 2017.

梶山慎太郎, 中田幸男 : 粒子形状と粒子間摩擦係数が安息角に与える影響の評価, 土木学会中国支部第 69 回研究発表会発表論文集, NoIII-1, pp.163-164, 2017.

金子勝比古, 村田健司, 柴拓海, 大見美智人 : 花崗岩の弾性率とその評価— 岩盤の変形性の評価法に関する基礎的研究(第 2 報)—, 日本鉱業会誌, No.103, pp.9-15, 1987.

国立天文台 : 機械的物性-弾性に関する定数-理科年表, pp.393, 2014.

中村礼 : 礫分含有率に着目したサンゴ礫混じり土の間隙比およびせん断特性, 山口大学修士論文, 2016.

堀口直也, 五十嵐豪, 丸山一平 : 含水率の変化による骨材の体積変化に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011

松原仁, 原久夫 : 風化サンゴ骨格の破壊強度とその形状 : 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.4, pp.610-620, 2012.

第5章 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価

5.1 概説

第3章では、様々な粒子特性を有する大粒子と小粒子を組み合わせた二種混合体に対して、安息角を実施し、中間骨格構造や限界大粒子含有率と粒子特性の関係を考察した。また、考察をもとに、最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の推定式を提案し、 d' の推定式と理論式を用いて、安息角実験で得られた中間骨格構造の評価を行った。これにより、実験からは、拘束圧が低い状態の中間骨格構造を取得することが出来た。また、提案した d' の推定式と理論式の、拘束圧が低い状態における適用性を示した。

本章では、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験により、ピーク時の主応力差と載荷応力を指標として、拘束圧下の中間骨格構造と限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルの計算結果と比較・考察することで、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターを明らかにする。

平面ひずみ圧縮試験を選択した理由は、一方向が拘束されていることで、破壊形態を容易に捉えられるためである。平面圧縮試験では、ピーク時の主応力差に加えて、残留時の主応力差、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と限界大粒子含有率についても取得し、それぞれが一致するかを確認する。

遠心支持力模型実験を選択した理由は、遠心力による拘束圧を与えられる模型実験であること、さらに、遠心加速度のスケール効果により、用いる試料よりも、粒径の大きい試料の挙動を捉えられるためである。

以下に、本章の構成を述べる。

第2節では、平面ひずみ圧縮試験に用いる試料と実験装置。第3節では、平面ひずみ圧縮試験の実験方法。第4節では、実験結果をもとに、拘束圧下の中間骨格構造や限界大粒子含有率を把握する。第5節では、遠心支持力模型実験に用いる試料と実験装置。第6節では、遠心支持力模型実験の実験方法。第7節では、実験結果をもとに、拘束圧下の中間骨格構造や限界大粒子含有率を把握する。第8節では、第4節と第7節で把握した中間骨格構造や限界大粒子含有率と、微視的モデルの計算結果を比較・考察することで、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターを明らかにする。第9節では、本章で得られた知見をまとめる。

表 5-1 試料の物性値

	宇部珪砂 3 号 A (大粒子)	豊浦砂 (小粒子)
土粒子密度	2.626 g/cm ³	2.635 g/cm ³
平均粒径	2.32 mm	0.220 mm
粒径比	10.5	

5.2.2 実験装置

試験装置には、平面ひずみ圧縮試験機(図 5-2 および図 5-3)を使用した。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、下部のペDESTALを左右に移動できるようになっている。

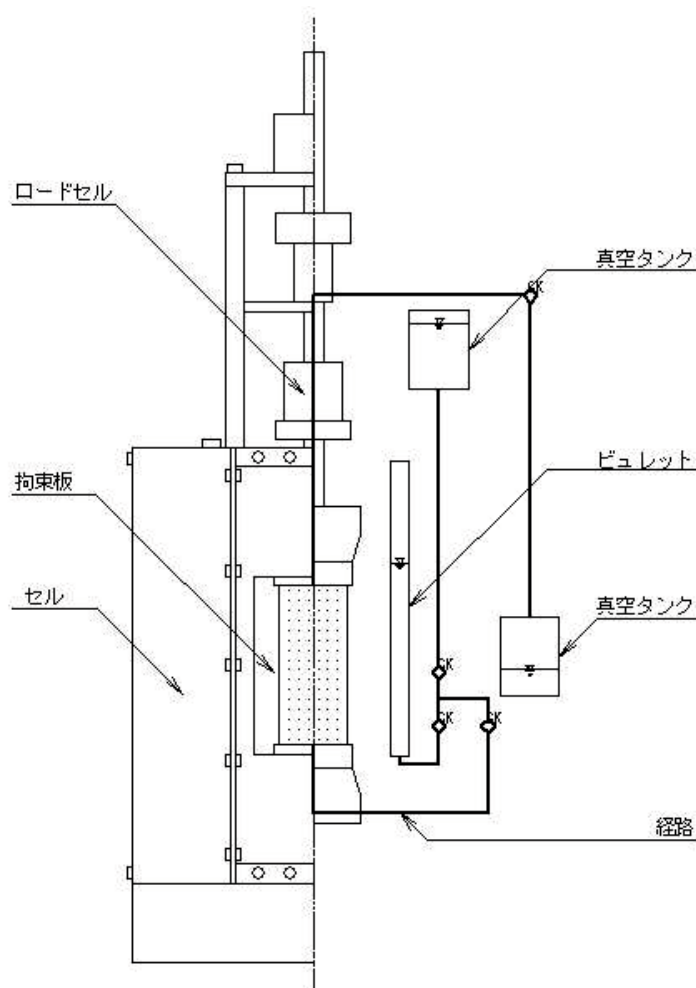


図 5-2 平面ひずみ圧縮試験機 (前面)

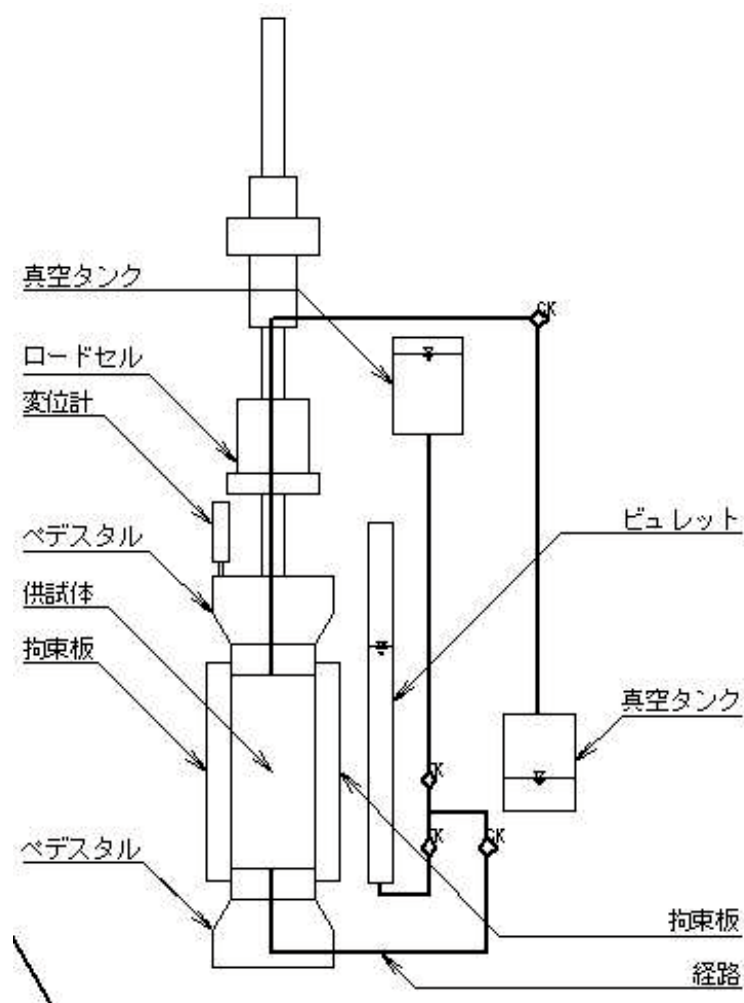


図 5-3 平面ひずみ圧縮試験機（側面）

5.3 平面ひずみ圧縮試験方法および手順

5.3.1 実験条件

供試体は、試料を 10 層に分け、各層ランマーで 10 回締め固めて、作成する。

本実験で用いる平面ひずみ圧縮試験機を用いて、せん断帯を評価した研究(Kajiyama, 2019)を参考に、実験条件を設定した。等方圧密時・静的せん断時の拘束圧を 100kPa とする。静的せん断時のひずみ速度 0.1%/min とし、軸ひずみ 15%まで行う。下部ペDESTアルにかかる水平荷重が、0 になるように、下部ペDESTアルを移動させる。これは、供試体にせん断応力がかからないようにし、直線的なせん断帯を得ることを目的にしている。PIV 解析を行うために、ひずみ 0.1%ごとに、供試体の全体写真を撮影する。

5.3.2 実験手順

以下に、試験手順を示す。

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つたので、実験を行っていない。

5.3.3 せん断帯傾斜角・せん断帯の幅の算出

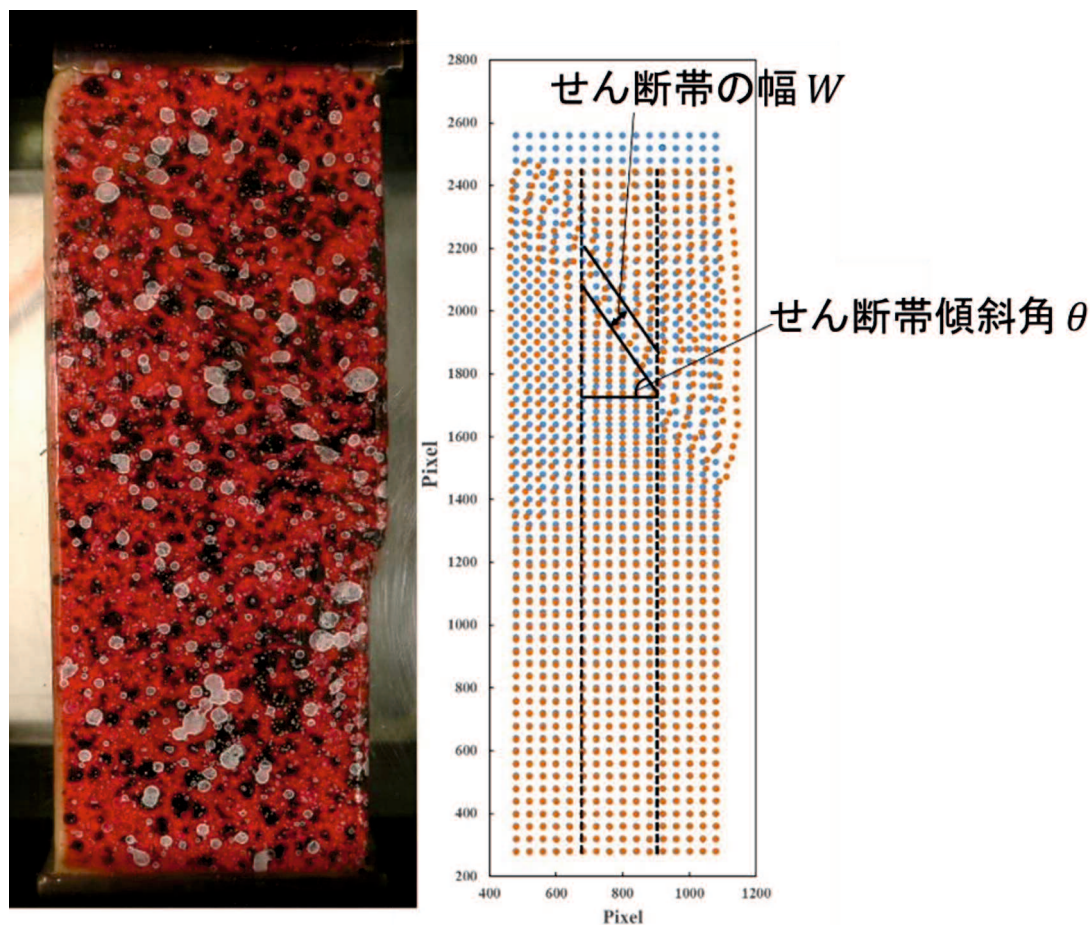


図 5-4 残留軸ひずみにおける供試体画像と画像解析の結果

せん断帯傾斜角とせん断帯の幅の算出には、軸ひずみ 0.1%/min ごとに取得した画像のうち、残留軸ひずみにおける画像を用いた。ここで、残留軸ひずみとは、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。

図 5-4 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、残留軸ひずみにおける特徴点である。分析では、図 5-4 のように、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。

5.4 平面ひずみ圧縮試験結果

5.4.1 応力ひずみ関係

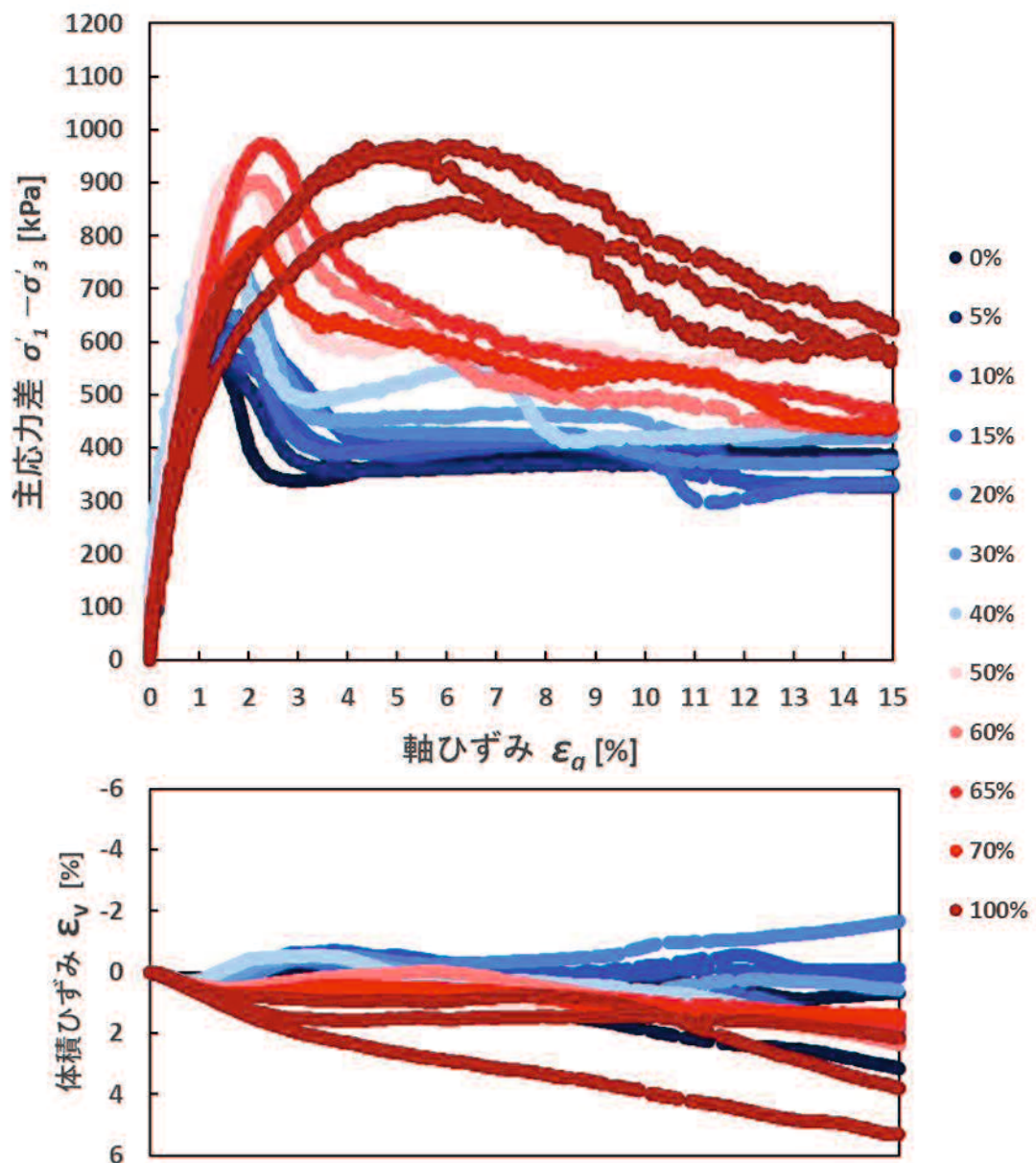


図 5-5 応力ひずみ関係

図 5-5 に、応力ひずみ関係を示す。

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、残留強度約 650kPa になる。体積ひずみは、0%の結果と比べてばらつきが大きいものの、おおよそ、収縮傾向を示し続けた。

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ことがわかる。

5.4.2 平面ひずみ状態における中間骨格構造と大粒子含有率の関係

図 5-6 に、ピーク時の主応力差と大粒子含有率の関係、図 5-7 に、残留軸ひずみにおける主応力差と大粒子含有率の関係、図 5-8 に、せん断帯傾斜角と大粒子含有率の関係、図 5-9 に、せん断帯の幅と大粒子含有率の関係を示す。

小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ を、二乗近似の方法で判定した。二乗近似の方法を以下に示す。

大粒子含有率 0%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_S$ と、大粒子含有率 100%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_L$ の差を α とする。 $\bar{\alpha}_S + \frac{\alpha}{10}$ 以上になる実験値から、 $\bar{\alpha}_L - \frac{\alpha}{10}$ 以下になる実験値に対して、最小二乗法で近似直線を求める。大粒子含有率 0%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_S$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^b\%$ とし、大粒子含有率 100%の実験値の平均 $\bar{\alpha}_L$ の水平線と近似直線が交わるときの大粒子含有率を $V_L^a\%$ とした。

図 5-6~図 5-9 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。

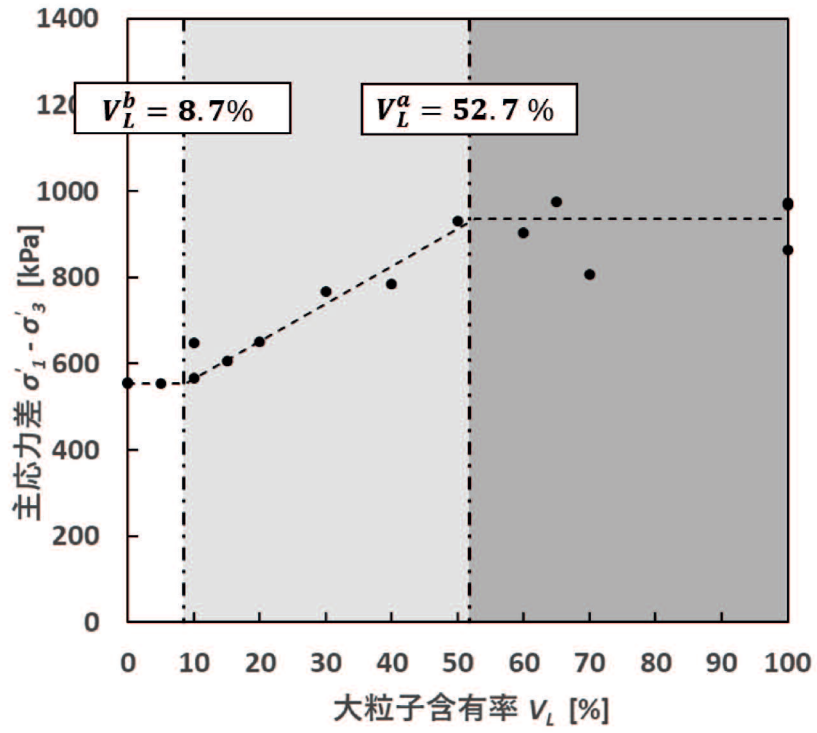


図 5-6 ピーク時の主応力差と大粒子含有率の関係

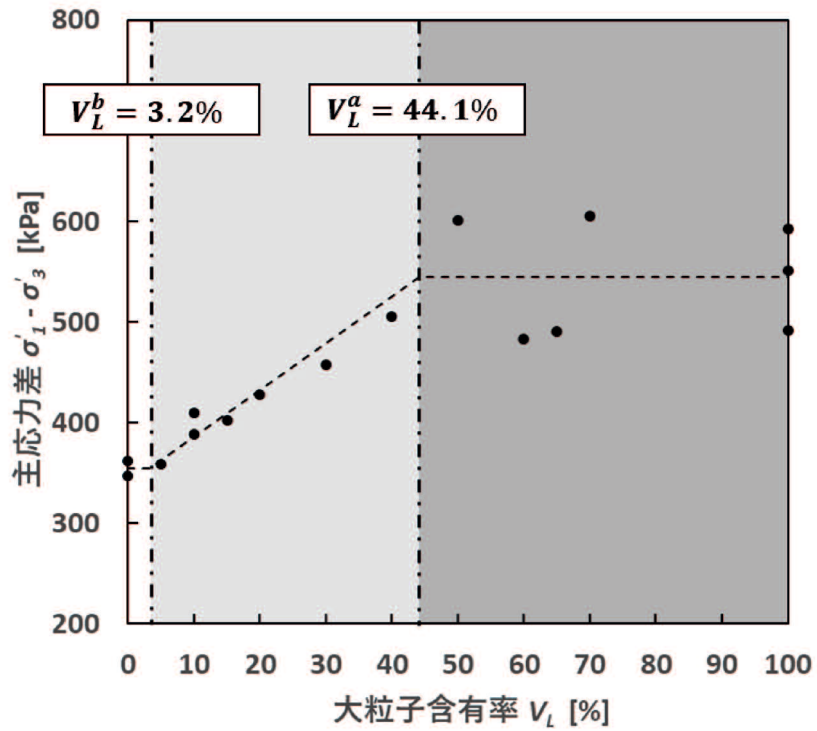


図 5-7 残留軸ひずみにおける主応力差と大粒子含有率の関係

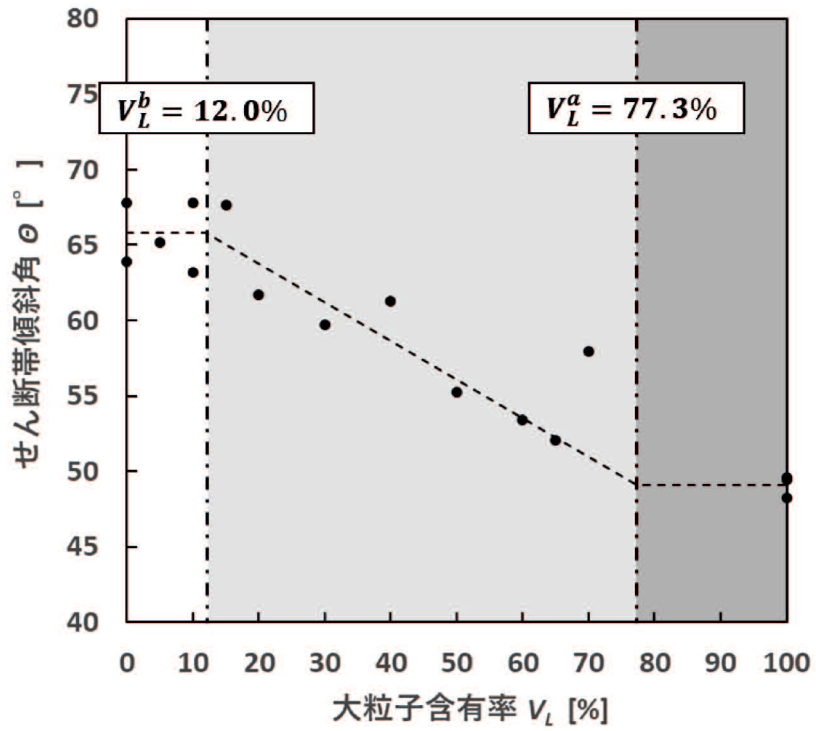


図 5-8 せん断帯傾斜角と大粒子含有率の関係

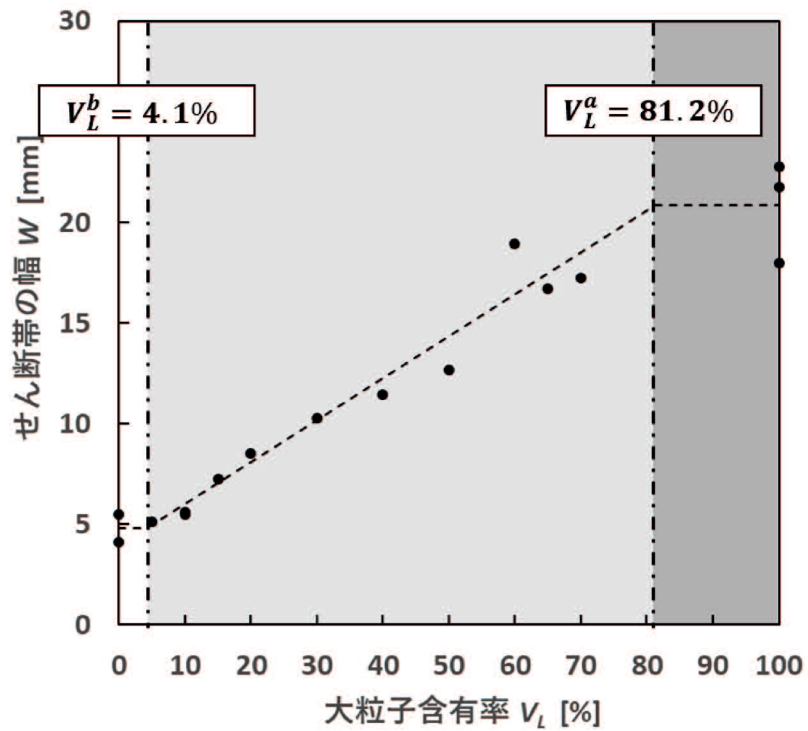


図 5-9 せん断帯の幅と大粒子含有率の関係

図 5-6 より、ピーク時の主応力差の実験結果は、大粒子含有率が約 8.7%で上昇し始め、約 52.7%の結果と同等になっていることから、8.7%~52.7%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 5-7 より、残留軸ひずみにおける主応力差の実験結果は、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 5-8 より、せん断帯傾斜角の実験結果は、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、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 5-9 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。

ピーク時の主応力差を指標とした中間骨格構造と、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は、一致しないことが明らかになった。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、残留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、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。微視的モデルは、初期の堆積構造を想定したものであるため、5.8 節では、ピーク時の主応力差の結果を評価する。

5.5 遠心支持力模型実験の試料および実験装置

5.5.1 試料

図 5-10 に各試料の粒度分布, 写真 5-3 にサンゴ砂(大粒子), 写真 5-4 に CH95 珪砂(小粒子), 表 5-2 に試料の物性値を示す. 粒径比を確保するために, 大粒子は, 载荷装置の载荷力と試験装置のサイズの制約の中で, 可能な限り大きいものを, 小粒子は, 砂に分類される最も小さいものを目標として, 選定した.

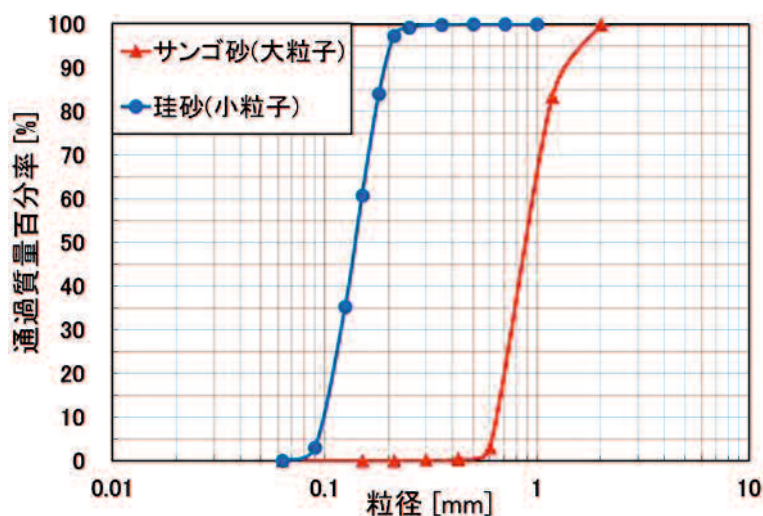


図 5-10 各試料の粒度分布



写真 5-3 サンゴ砂



写真 5-4 CH95 珪砂

表 5-2 各試料の物性値

物性値	Unit	サンゴ砂	珪砂
土粒子密度 ρ_s	g/cm^3	2.675	2.626
間隙比 e	-	1.408	0.972
乾燥密度 ρ_D	g/cm^3	1.111	1.344
平均粒径 D_{50}	mm	0.90	0.125

5.5.2 実験装置

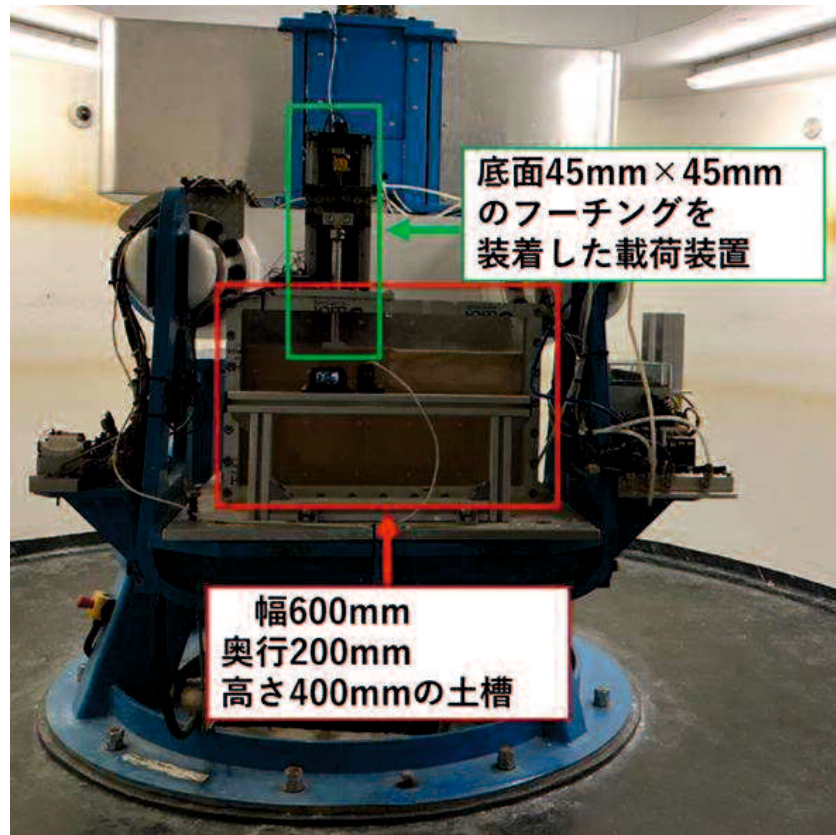


写真 5-5 土槽と載荷装置を装着した遠心模型装置

試験装置には、写真 5-5 に示すアーム長さ 2m の遠心模型装置、幅 600mm、奥行 200mm、高さ 400mm の土槽、45mm×45mm のフーチングを装着した載荷装置を用いた。

5.6 遠心支持力模型実験方法および手順

5.6.1 実験条件

本実験では、30G の遠心加速度をかける。このとき、平均粒径 0.900mm のサンゴ砂と平均粒径 0.125mm の CH95 珪砂は、遠心場ではスケール則(Geotechnical centrifuge technology, 1995)(Centrifuge Modelling for Civil Engineers, 2015)に従い、それぞれ平均粒径が 27.0mm と 3.75mm になる。遠心加速度は、粒径と試験装置の制約の中で、可能な限り大きいものを目標として決定している。

また、試料と実験時間を確保するため、図 5-11 に示すように、下部 200mm に小粒子(CH95 珪砂)単体試料の土台を設置し、試験層を左右に分けて、二種混合体試料を配置している。

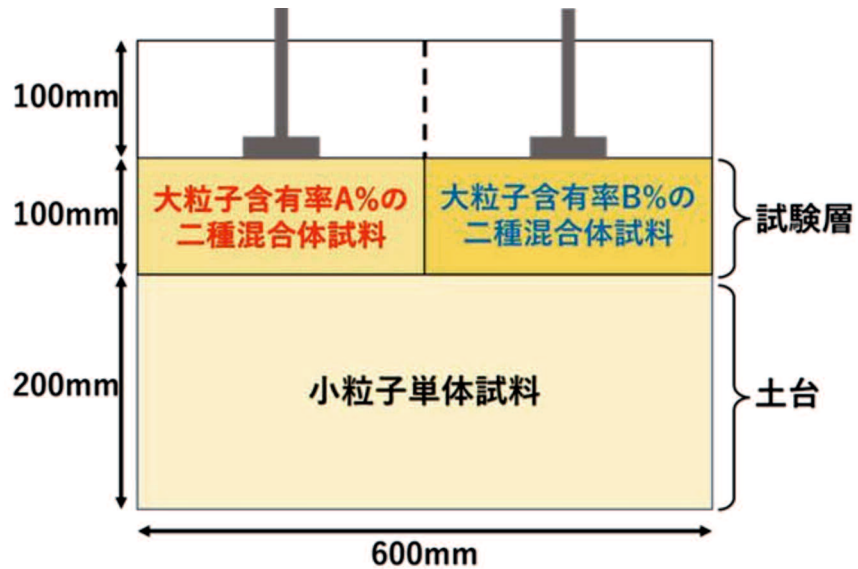


図 5-11 土槽内の試料の配置

5. 6. 2 実験手順

以下の手順で、遠心支持力模型実験を行った。

- 1) 土槽の下部 200mm に、小粒子試料を充填する。
- 2) 土槽の上部 100mm を、左右に分け、それぞれ異なる大粒子含有率の二種混合体を充填し、充填した試料の質量を測る。
- 3) 載荷装置を設置し、荷重と沈下量の測定を開始する。
- 4) 測定開始 30 秒後、50rpm(遠心加速度 5G)で回転開始。
- 5) 測定開始 1 分後、100rpm(遠心加速度 19G)に回転速度変更。
- 6) 測定開始 1 分 30 秒後、125rpm(遠心加速度 30G)に回転速度変更。
- 7) 測定開始 2 分後、0.5mm/min の速度で載荷開始。
- 8) 測定開始 32 分後、実験終了。

二種混合体試料の大粒子含有率を変更しながら、2)~8)の工程を繰り返し、実験を行った。70%を超える大粒子含有率では、大粒子と小粒子が分離して、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。

5.7 遠心支持力模型実験結果

5.7.1 沈下量と載荷応力の関係

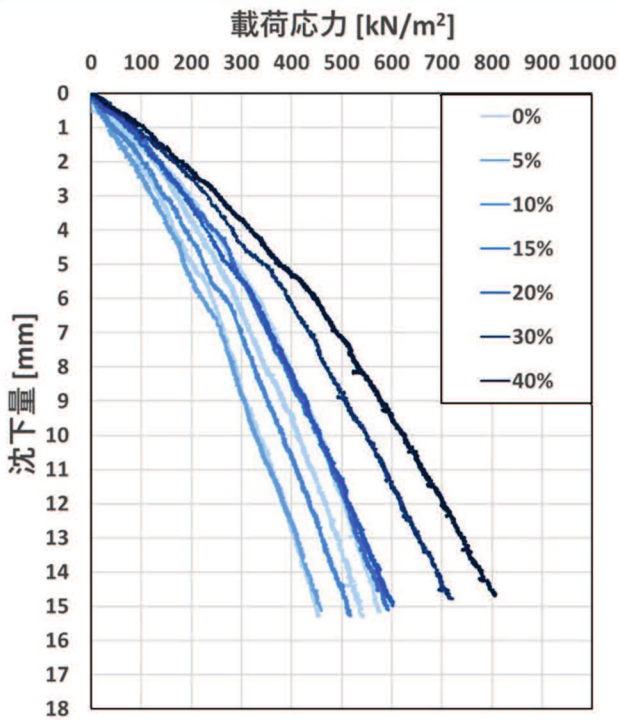


図 5-12 大粒子含有率 0~40%における
載荷応力と沈下量の関係

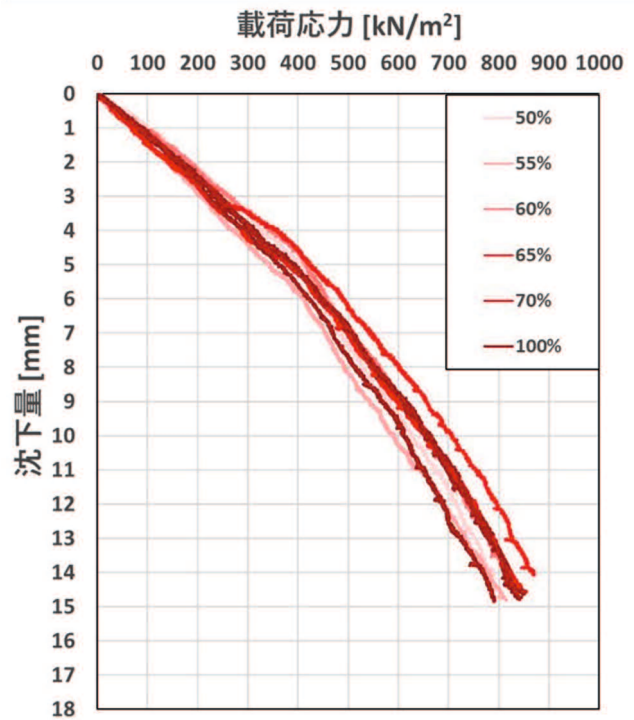


図 5-13 大粒子含有率 50~100%における
載荷応力と沈下量の関係

図 5-12 に、大粒子含有率 0~40%における載荷応力と沈下量の関係、図 5-13 に、大粒子含有率 50~100%における載荷応力と沈下量の関係を示す。

図 5-12 の大粒子含有率 0~40%の場合、ばらつきはあるものの、大粒子含有率 10%程度までは、0%(最も薄い寒色)と同じような載荷応力-沈下量の曲線を示し、15~20%以上になると、載荷応力の明らかな増加傾向がみられた。一方、図 5-13 の大粒子含有率 50~100%の場合、どの結果も大粒子含有率 100%(最も濃い暖色)と似た載荷応力-沈下量の曲線を示した。

また、本実験では、二種混合体試料を締固めずに、遠心加速度 30G のみで拘束圧を加えている。そのため載荷応力-沈下量の曲線は、明瞭な破壊点を示さずに徐々に沈下が進んでおり、局所せん断破壊が発生したと考えられる。

5.7.2 沈下量 13mm の載荷応力における中間骨格構造と大粒子含有率の関係

明瞭な破壊点が現れなかったため、沈下量 13mm (フーチング幅の 29%に相当)の載荷応力を指標とした。また、平面ひずみ圧縮試験と同様に、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b %，大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a %を、二乗近似の方法で判定した。

図 5-14 に、大粒子含有率と沈下量 13mm の載荷応力の関係を示す。図中の点線は沈下量 13mm の載荷応力の傾向線、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。

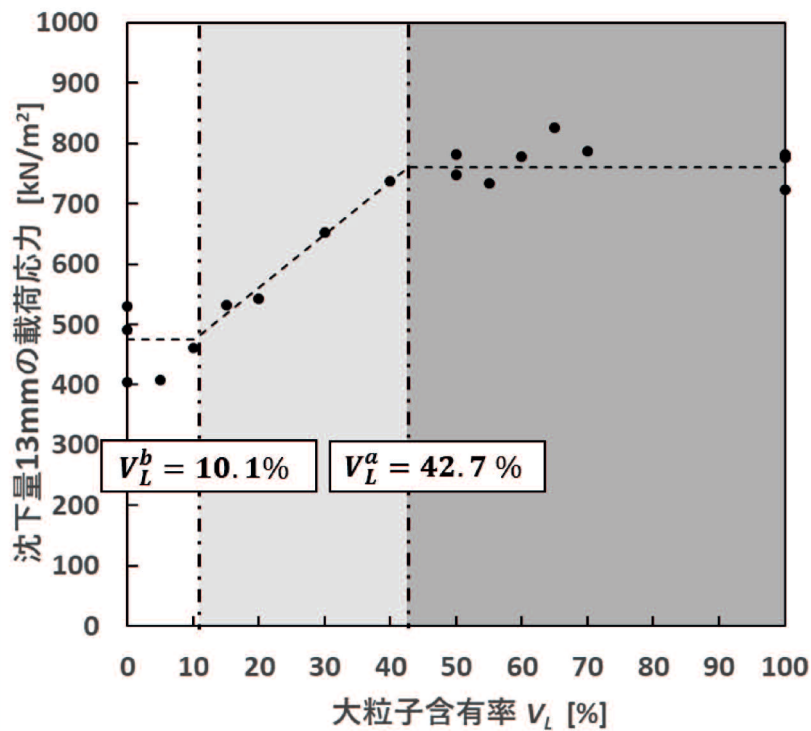


図 5-14 大粒子含有率と沈下量 13mm の載荷応力の関係

図 5-14 より、沈下量 13mm の載荷応力の実験結果は、大粒子含有率が約 10.1%で増加し始め、約 42.7%で 100%の結果と同等になっていることから、10.1%-42.7%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。

5.8 微視的モデルによる中間骨格構造の評価

5.4.2 と 5.7.2 で確認した中間骨格構造と、微視的モデルから算出した中間骨格構造を比較することで評価を行う。

$$V_L^b = \frac{100D_L^3(1 + e_S)}{(D_L + d)(D_L + d')^2(1 + e_L) + D_L^3e_S} \quad (2.1.19)$$

$$d = mD_S \quad (5.1)$$

$$d' = (-7.89e_S + 9.88)L \quad (3.4)$$

小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ の算出には、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験の大粒子試料は小さいため、球体大粒子型理論式(式(2.1.19))および限界大粒子距離の式(5.1)と式(3.4)を用いる。また、式(5.1)は第3章と同様に、 $m = 2$ としている。大粒子形状を球体と判断しているため、式(3.4)の大粒子の長軸長さ L は、大粒子の粒径 D_L と等しくなる。

$$V_L^a = \frac{100(1 + e_S)}{e_L + e_S + 1} \quad (1.3)$$

大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ の算出には、Lade et al.(1998)の理論式(1.3)を用いる。

図 8-15, 図 8-16 は、5.4.2 と 5.7.2 の図と同様に、実験で確認した限界大粒子含有率を一点鎖線で表し、それを基準に、小粒子骨格構造を白色、中間骨格構造を薄いグレー、大粒子骨格構造を濃いグレーで色分けしている。さらに、微視的モデルから算出した小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ を赤色の実線、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ を青色の実線で示している。

5.8.1 平面ひずみ状態における評価

表 5-3 平面ひずみ圧縮試験試料のパラメーター

宇部珪砂3号A (大粒子)		豊浦砂 (小粒子)	
平均粒径 D_L [mm]	間隙比 e_L [-]	平均粒径 D_S [mm]	間隙比 e_S [-]
2.32	0.836	0.220	0.653

表 5-3 に平面ひずみ圧縮試験試料のパラメーターを示す。表中の間隙比は、いずれも 30kPa の負圧がかかった圧密前の供試体の、自然乾燥状態における間隙比である。表 5-3 のパラメーターと理論式を用いて、限界大粒子含有率を算出したところ、平面ひずみ圧縮試験試料の二種混合体では、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 2.3\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 66.4\%$ となった。

図 5-15 に微視的モデルの限界大粒子含有率とピーク時の主応力差の関係を示す。

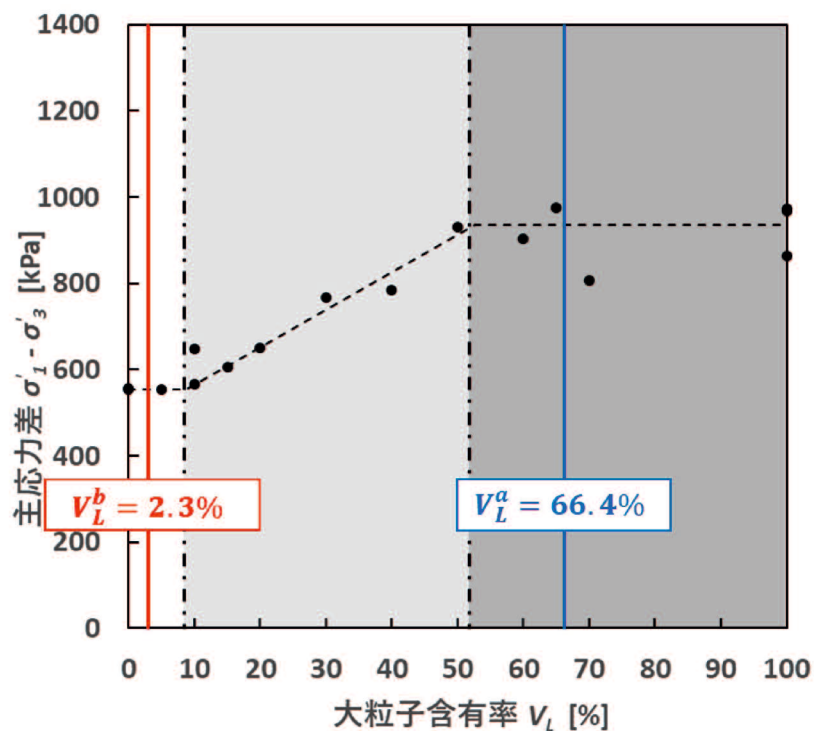


図 5-15 微視的モデルの限界大粒子含有率とピーク時の主応力差の関係

5.4.2 から、ピーク時の主応力差を指標とした実験の中間骨格構造は、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b が約 8.7%、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a が約 52.7% であった。実験と微視的モデルを比較すると、実験の方が、 V_L^b で 6.4% 大きく、 V_L^a で 13.7% 小さいことが明らかになった。

5.8.2 沈下量 13mm の荷重応力における評価

表 5-4 遠心支持力模型実験試料のパラメーター

サンゴ砂 (大粒子)		CH95 (小粒子)	
平均粒径 D_L [mm]	間隙比 e_L [-]	平均粒径 D_S [mm]	間隙比 e_S [-]
0.900	1.408	0.125	0.972

表 5-4 に遠心支持力模型実験試料のパラメーターを示す。表中の間隙比は、いずれも遠心力を掛ける前の、重力下の自然乾燥状態における間隙比である。表 5-4 のパラメーターと理論式を用いて、限界大粒子含有率を算出したところ、遠心支持力模型実験試料の二種混合体では、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 5.2\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 58.3\%$ となった。

図 5-16 に微視的モデルの限界大粒子含有率と沈下量 13mm の荷重応力の関係を示す。

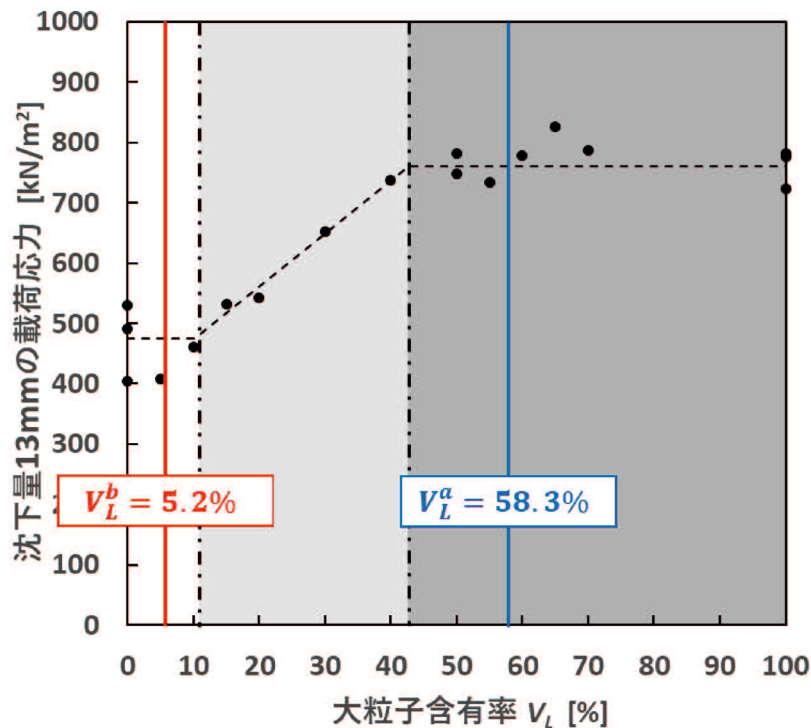


図 5-16 微視的モデルの限界大粒子含有率と沈下量 13mm の荷重応力の関係

5.7.2 から、沈下量 13mm の荷重応力を指標とした実験の中間骨格構造は、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b が約 10.1%、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a が約 42.7% であった。実験と微視的モデルを比較すると、実験の方が、 V_L^b で 5.1% 大きく、 V_L^a で 15.6% 小さいことが明らかになった。

5.8.3 拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーター

5.8.1 と 5.8.2 で、微視的モデルで算出した中間骨格構造と、拘束圧下の実験の中間骨格構造で、差が生じることが明らかになった。微視的モデルは、供試体作成時のパラメーターを用いて、計算を行っている。そのため、拘束圧がかかり、供試体作成時から間隙比が変化すると、結果に差が生じる可能性がある。

表 5-5 供試体作成時と圧密終了時における平面ひずみ圧縮試験試料の間隙比

状態	宇部珪砂3号A(大粒子)の間隙比 e_L	豊浦砂(小粒子)の間隙比 e_S
供試体作成時(負圧30kPa)	0.836	0.653
圧密終了時(拘束圧100kPa)	0.835	0.664

表 5-6 供試体作成時と載荷直前の遠心支持力模型実験試料の間隙比

状態	サンゴ砂(大粒子)の間隙比 e_L	CH95珪砂(小粒子)の間隙比 e_S
供試体作成時(遠心加速度1G)	1.385	0.940
載荷直前(遠心加速度30G)	1.382	0.936

表 5-5 に、供試体作成時と圧密終了時における平面ひずみ圧縮試験試料の間隙比、表 5-6 に供試体作成時と載荷直前の遠心支持力模型実験試料の間隙比を示す。表 5-5 と表 5-6 から、供試体作成時と拘束圧がかかった状態で、間隙比にほとんど変化がないことが分かる。また、粒子破碎による粒径の変化も確認できなかった。

$$d' = (-7.89e_S + 9.88)L \quad (3.4)$$

$$d = mD_S \quad (5.1)$$

ここで、限界大粒子距離 d および d' に着目する。第3章で提案した最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の推定式である式(3.4)は、拘束圧が非常に低い安息角の実験結果から導出した。そのため、式中の係数に、拘束圧の影響が考慮されていない。また、最大主応力方向の限界大粒子距離 d は、式(5.1)の m を Ueda et al. (2011)を参考に、2としているが、 m も拘束圧の影響が考慮されていない。

ゆえに、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターは、限界大粒子距離 d および d' であり、拘束圧を変更する実験や解析を行い、考察を深めていく必要がある。

5.9 要約

本章では、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターを明らかにするために、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験により、ピーク時の主応力差と沈下量 13mm の載荷応力を指標として、拘束圧下の中間骨格構造と限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルの計算結果と比較・考察した。

以下に、得られた知見をまとめる。

1. ピーク時の主応力差を指標にした中間骨格構造は、ピーク時の主応力差が増加傾向であり、範囲が大粒子含有率 8.7%~52.7%であった。

2. ピーク時の主応力差を指標とした中間骨格構造と、残留時の主応力差、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は、一致しないことが明らかになった。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、残留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、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。

3. 沈下量 13mm の載荷応力を指標にした中間骨格構造は、沈下量 13mm の載荷応力が増加傾向であり、範囲が大粒子含有率 10.1%~42.7%であった。

4. 微視的モデルの中間骨格構造は、平面ひずみ圧縮試験のパラメーターから、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 2.3\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 66.4\%$ 、遠心支持力模型実験のパラメーターから、 $V_L^b = 5.2\%$ 、 $V_L^a = 58.3\%$ と算出された。比較により、平面ひずみ試験では、実験の方が、 V_L^b で 6.4%大きく、 V_L^a で 13.7%小さいこと。遠心支持力模型実験では、実験の方が、 V_L^b で 5.1%大きく、 V_L^a で 15.6%小さいことが明らかになった。

5. 拘束圧がかかる前後で、間隙比の変化や粒子破碎による粒径の変化が確認できなかったため、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターは、限界大粒子距離 d および d' である。

参考文献

Gopal Madabhushi : Centrifuge Modelling for Civil Engineers, 2015.

Lade, P. V., Liggio, C. D. and Yamamuro, J. A. : Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, Geotechnical Testing Journal, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1998.

Shintaro Kajiyama, Yukio Nakata, Ryota Miyamoto, Masato Taue : Study on the Shear Band of Sand with Various Particle Characteristics Using PIV Analysis, IS-Glasgow, E3S Web of Conferences 92, 06005, 2019.

Taylor & Francis : Geotechnical centrifuge technology, 1995.

Ueda, T., Matsushima, T. and Yamada, Y. : Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, Granular Matter, Vol. 13, No. 6, pp. 731-742, 2011.

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.

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8章 その他の土の三軸試験，地盤材料試験の方法と解説―二分冊の2―， pp. 790-816, 2009.

第6章 結論

本研究では、粗粒土の攪乱試料を用いた、要素試験よりも簡易な評価に貢献するために、「粗粒土の大粒子の影響を受けない大粒子含有率と、小粒子の影響を受けない大粒子含有率で定義される中間骨格構造の微視的モデルによる評価」を目的とし、特に小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b に対して、理論的・実験的・解析的検討を実施し、より現実に即した微視的モデルによる二種混合体の中間骨格構造の評価を行うことで、最終的に拘束圧の影響を受けるパラメーターを明らかにした。

各章の知見をまとめて、結論とする。

第1章 序論

粗粒土の特徴と課題、それらを顕著にとらえることが出来る二種混合体、研究の主題となる中間骨格構造や境界となる限界大粒子含有率について概説した。二種混合体に対する既往のせん断強度と間隙比に関する研究、さらに Lade et al.と Ueda et al.が提案した限界大粒子含有率を評価する微視的モデルを示し、課題を明らかにした。最後に、本論文の目的と、章構成およびフローを示した。

第2章 大粒子配置の異方性と粒子形状を考慮した微視的モデルの構築

2章では、微視的モデルをより現実に近づけるために、骨格構造モデルに「大粒子配置の異方性」、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b の理論式に、「大粒子の異方性」と「大粒子形状」を考慮したパラメーターの導入を行った。

以下に得られた知見をまとめる。

1. 最大主応力方向の限界大粒子距離 d と最小主応力方向の限界大粒子距離 d' を導入することで、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルを提案した。

2. 最大主応力方向(z 軸方向)の限界大粒子距離 d と最小主応力方向(x 軸, y 軸方向)の限界大粒子距離 d' を導入し、大粒子配置の異方性を考慮した V_L^b の球体大粒子型理論式 $V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_s)}{(D_L+d)(D_L+d')^2(1+e_L)+D_L^2e_s}$ を提案した。

3. V_L^b の球体大粒子型理論式に、サンゴ礫を模した円柱大粒子を導入し、大粒子形状を考慮した V_L^b の円柱大粒子型理論式 $V_L^b = \frac{100D_L^2l(1+e_s)}{(D_L+d')(D_L+d)(l+d')(1+e_L)+D_L^2le_s}$ を提案した。

4. V_L^b の球体大粒子型理論式に、碎石(岩砕)を模した扁平楕円体大粒子を導入し、大粒子形状を考慮した

V_L^b の扁平楕円体大粒子型理論式
$$V_L^b = \frac{100ABC(1+e_s)}{(A+d')(B+d')(C+d)(1+e_L)+ABCe_s}$$
を提案した。

5. 実験における検討事項として、第3章で、安息角実験から d' の推定式の導出すること。第5章で、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験から、拘束圧下での限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルのものと比較することで、微視的モデルにおいて、拘束圧の影響を考慮すべきパラメーターを明らかにすることを示した。

6. 解析における検討事項として、第4章で、DEMを用いて安息角実験の再現解析を行い、「大粒子の座標データ」の分析から、骨格構造モデルの妥当性を示し、「接点力」「可視化した接点ベクトル」の分析から、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにすることを示した。

第3章 安息角実験による二種混合体の中間骨格構造に与える粒子特性の影響

3章では、様々な粒子特性を有する大粒子と小粒子を組み合わせた二種混合体に対して、安息角を実施し、中間骨格構造や限界大粒子含有率と粒子特性の関係を考察した。考察をもとに、 d' の推定式を提案し、最小主応力方向の限界大粒子距離 d' の推定式と理論式を用いて、安息角実験で得られた中間骨格構造の評価を行った。

以下に、得られた知見をまとめる。

1. 中間骨格構造における安息角は、大粒子単体試料の安息角にかかわらず、二種混合体の状態では増加傾向を示し、大粒子の形状がいびつであるほど、増加率が高くなる。また、大粒子が同一であると、増加率は等しくなり、小粒子の安息角が大きくなると、中間骨格構造における安息角も高くなる。

2. 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b は、粗度があると大粒子形状がいびつであるほど、小さくなる反比例の関係にあること。小粒子の間隙比が小さいほど、小さくなる反比例の関係にあることが明らかになった。

3. 粒度をもとにした「地盤材料の工学的分類」による粗粒土の力学挙動の分類と、実際に工学的性質の一つである力学的性質(安息角)の結果をもとにした粗粒土の分類を比較すると、少なからず差が生じた。このことから工学的分類には、粒度だけでなく、大粒子は粒子形状、小粒子は間隙比の影響を考慮する必要がある。

4. 最小主応力方向の限界大粒子距離 d' は、小粒子試料が同一であれば、どの大粒子でも、大粒子の長軸長さ L の n 倍の値をとった。 n は小粒子単体試料の間隙比 e_s の影響を受け、間隙比 e_s が増加すると、減少す

るといふ反比例の関係であった。

5. 小粒子単体試料の間隙比 e_s と d'/L の関係をもとに、推定式 $d' = (-7.89e_s + 9.88)L$ が得られた。推定式から算出した d' を用いると、概ね実際に実験で得られた V_L^b を算出できることが明らかになった。これにより、大粒子の粒度試験と粒子形状測定および、小粒子の密度試験の結果から、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b を推定できる可能性が示された。

第4章 個別要素法による二種混合体の微視的モデルにおける骨格構造モデルの妥当性

4章では、DEMを用いて、第3章の安息角実験の再現解析を実施し、実験で取得した、中間骨格構造における安息角の傾向や、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b に与える粒子特性の影響が、再現されるかを確認した。そのうえで、「最大主応力方向(z軸方向)と最小主応力方向(x軸, y軸方向)で、大粒子配置に異方性があり、 $d \leq d'$ の関係になる」という第2章の仮定の正当性を確認した。さらに、接点力、可視化した接点ベクトルの分析から、二種混合体内部の接点力の状態を明らかにした。

以下に、得られた知見をまとめる。

1. 安息角実験の再現解析では、大粒子含有率50%以下の中間骨格構造で、実験と同様に、大粒子形状がいびつであるほど、安息角の増加率が高くなること。さらに、 V_L^b が取得でき、粗度がある場合、大粒子形状がいびつであると V_L^b が小さくなることが明らかになったため、ある程度の再現性のある結果が得られたと考えられる。

2. 大粒子の座標データの分析により、鉛直方向の平均値大粒子間最小距離が、水平方向に比べて小さいことが確認できた。これにより、「最大主応力方向(z軸方向)の限界大粒子距離 d と、最小主応力方向(x軸, y軸方向)の限界大粒子距離 d' は、 $d \leq d'$ の関係となる」とした仮定の正当性が確認できたことから、大粒子配置の異方性を考慮した骨格構造モデルに妥当性があると判断できた。

3. 安息状態における接点力の平均値と大粒子含有率の関係の分析により、中間骨格構造において、大粒子と大粒子の接触による接点力および、大粒子と小粒子の接触による接点力が増加すること。小粒子と小粒子の接触による接点力は、大粒子含有率によらず、一定であること。それぞれの接点力の大小関係は、中間骨格構造において、小粒子と小粒子<大粒子と小粒子<大粒子と大粒子の関係になっていることが示された。これらのことから、二種混合体内部では、大粒子が接近している中間骨格構造において、小粒子のみでは生じない強い接点力が、小粒子に発生していることが明らかになった。

4. 可視化した強い接点ベクトルの分析から、中間骨格構造から、強い接点ベクトルが現れ始め、大粒子含有率の増加に伴って、鉛直または、砂山の頂点方向に、連なりながら発達していること。水平方向は、鉛直方向に比べて、強い接点ベクトルの連なりが少ないことが示された。これらにより、二種混合体内部

では、最大主応力方向(z軸方向)に、強い接点力が連なり、最小主応力方向(x軸、y軸方向)に、弱い接点力の空間が存在していることが明らかになった。

第5章 微視的モデルによる拘束圧下の中間骨格構造の評価

5章では、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターを明らかにするために、平面ひずみ圧縮試験と遠心支持力模型実験により、ピーク時の主応力差と沈下量 13mm の載荷応力を指標として、拘束圧下の中間骨格構造と限界大粒子含有率を取得し、微視的モデルの計算結果と比較・考察した。

以下に、得られた知見をまとめる。

1. ピーク時の主応力差を指標にした中間骨格構造は、ピーク時の主応力差が増加傾向であり、範囲が大粒子含有率 8.7%~52.7%であった。

2. ピーク時の主応力差を指標とした中間骨格構造と、残留時の主応力差、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は、一致しないことが明らかになった。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、残留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、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。

3. 沈下量 13mm の載荷応力を指標にした中間骨格構造は、沈下量 13mm の載荷応力が増加傾向であり、範囲が大粒子含有率 10.1%~42.7%であった。

4. 微視的モデルの中間骨格構造は、平面ひずみ圧縮試験のパラメーターから、小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b = 2.3\%$ 、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a = 66.4\%$ 、遠心支持力模型実験のパラメーターから、 $V_L^b = 5.2\%$ 、 $V_L^a = 58.3\%$ と算出された。比較により、平面ひずみ試験では、実験の方が、 V_L^b で 6.4%大きく、 V_L^a で 13.7%小さいこと。遠心支持力模型実験では、実験の方が、 V_L^b で 5.1%大きく、 V_L^a で 15.6%小さいことが明らかになった。

5. 拘束圧がかかる前後で、間隙比の変化や粒子破碎による粒径の変化が確認できなかったため、拘束圧の影響を考慮すべき微視的モデルのパラメーターは、限界大粒子距離 d および d' である。