

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	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)
氏名(Name)	田上 聖人
<p><b>【要旨】</b></p> <p>粗粒土には、「岩砕を含んだ現地発生土」や「サンゴ礫混じり土」のように礫分大粒子と砂分小粒子の二種類で構成される土(二種混合体)がある。二種混合体は「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」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」があり、双方のあいだの中間骨格構造では、大粒子含有率によって、大粒子の影響が出現する程度が変化する。そのため、これらの大粒子含有率を把握することが、非常に重要である。しかし、粒径の大きさから、通常の三軸圧縮試験などの要素試験や、不攪乱試料のサンプリングが難しい。攪乱試料と微視的モデルを用いて、中間骨格構造を評価する試みがなされているが、微視的モデルに、大粒子配置の異方性や粒子形状が考慮されておらず、現実に即さないという課題がある。</p> <p>そこで本研究では、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目的とし、特に小粒子骨格構造の限界大粒子含有率<math>V_L^b</math>に対して、理論的・実験的・解析的検討を行うことで、微視的モデルの中で、限界大粒子距離が重要なパラメーターであることを明らかにした。</p> <p>以下、本研究の概要を章別に示す。</p> <p><b>【第1章 序論】</b></p> <p>粗粒土の特徴と問題、それらを顕著に捉えられる二種混合体、研究の主題となる中間骨格構造や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.が提案した中間骨格構造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を示した。</p> <p><b>【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】</b></p> <p>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、「最大主応力方向の限界大粒子距離<math>d</math>」と「最小主応力方向の限界大粒子距離<math>d'</math>」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と球体大粒子型理論式を提案した。さらに、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。</p>	

**【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と, その境界となる限界大粒子含有率 $V_L^b, V_L^a$ %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, 「実際に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きい試料と小さい試料を組み合わせ, 二種混合体の安息角と間隙比を測定した. 測定した結果をもとに, 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, 小粒子のみでは生じない強い接点力が, 小粒子に発生すること. 最大主応力(鉛直)方向には, 強い接点力が連なり, 最小主応力(水平)方向には, 弱い接点力の空間が広がっていることが, 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】**

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したところ, 一致しないことが明らかになった.

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た. どちらの結果においても, 微視的モデルの計算結果と比べて,  $V_L^b$ は大きく,  $V_L^a$ は小さい値を示した. 平面ひずみ圧縮試験では, 供試体作成時と圧密終了後, 遠心支持力模型実験では, 供試体作成時と遠心载荷中で, 間隙比の変化が非常にわずかであり, 粒子破碎による粒径の変化も確認されなかった. このことから, 微視的モデルのパラメータの中で限界大粒子距離 $d$ および $d'$ が, 拘束圧の影響を考慮すべき重要なパラメータであることを示した.

**【第6章 結論】**

各章で得られた知見をまとめて結論とした.

<b>学 位 論 文 要 旨</b> (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	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)
氏 名 (Name)	TAUE Masato
<p>"Crushed gravel sand mixture" and "Coral gravel sand mixture" are coarse-grained soils in which the grain sizes of the gravel fraction and sand fraction differ from each other. The overall properties of such soils vary greatly depending on the gravel fraction content.</p> <p>In this study, a binary granular mixture consisting of large particles and small particles was used to clearly capture the effect of gravel fraction content. The binary granular mixture has "large particle content in which the influence of small particles dominates and the influence of large particles is absent" and "large particle content in which the influence of large particles dominates and the influence of small particles is absent". The former is called "limit large particle content of small particle skeleton structure" and the latter is called "limit large particle content of large particle skeleton structure". In the intermediate skeleton structure between the limit large particle contents, the degree of influence of large particles changes according to the large particle content. Therefore, it is very important to evaluate the limit large particle contents and intermediate skeleton structure. However, their evaluation is not easy due to the difficulty of performing triaxial compression tests and obtaining undisturbed samples because of the large particle size. As a solution to this problem, an attempt has been made to evaluate the intermediate skeleton structure using microscopic models of binary granular mixtures and disturbed samples. However, the microscopic model does not take into account the anisotropy of large particle arrangement and large particle shape.</p> <p>The objective of this study is to evaluate the intermediate skeleton structure of binary granular mixtures using a microscopic model that takes into account the anisotropy of large particle arrangement and the large particle shape. The following theoretical, experimental and analytical investigations were carried out.</p> <p><b>Chapter One : Introduction</b></p> <p>The characteristics and problems of coarse-grained soils, binary granular mixture that can capture the characteristics remarkably, and the intermediate skeleton structure and Limit large particle contents, which are the subjects of the study, were outlined. Previous studies of binary granular mixture and microscopic model were presented. Finally, the purpose of this study and the structure of the chapters were presented.</p> <p><b>Chapter Two : Microscopic model considering anisotropy of large particle arrangement and particle shape</b></p> <p>Parameters <math>d</math> and <math>d'</math> were introduced into the skeleton structure model and the spherical large</p>	

particle type theoretical equation to account for the anisotropy of large particle arrangement.  $d$  is the limit large particle distance in the direction of maximum principal stress and  $d'$  is the limit large particle distance in the direction of minimum principal stress. Here,  $d$  and  $d'$  are assumed to be  $d \leq d'$ . Cylinder large particle type and oblate ellipsoid type theoretical equations were proposed by introducing a large particle shape parameter into the spherical large particle type theoretical equation. Finally, checklists for experiments and analysis were explained.

### **Chapter Three : Effect of particle properties on intermediate skeleton structure in binary granular mixture based on angle of reposed experiment**

Angle of reposed experiment was conducted on binary granular mixtures of large and small particles with various particle properties. Based on the experimental results, the relationship between the intermediate skeleton structure and particle properties was discussed, an equation for estimating  $d'$  was proposed, and its applicability to the results angle of reposed experiment was evaluated.

### **Chapter Four : Validity of skeleton structure model in microscopic model of binary granular mixture based on DEM analysis**

A reproduction analysis of the angle of reposed experiment targeted in Chapter 3 was performed using DEM. The purpose of this analysis is twofold: first, to clarify the validity of the skeleton structure model proposed in Chapter 2 that takes into account the anisotropy of large particle arrangement, and second, to understand the state of contact forces inside the binary granular mixture. The anisotropy of large particle arrangement was confirmed by examining the coordinate data of large particles. This shows the validity of the skeleton structure model. From the consideration of contact forces and contact vectors, strong contact forces are generated on small particles, which are not generated on small particles alone. It was found that the strong contact forces are coupled in the direction of the maximum principal stress (vertical), and that the space of weak contact forces is extended in the direction of the minimum principal stress (horizontal).

### **Chapter Five : Evaluation of intermediate skeleton structure under confining pressure based on microscopic model**

The intermediate skeleton structure under confining pressure was determined based on the peak principal stress difference obtained from plane strain shear test and the loading stress obtained from centrifuge bearing capacity model test. These intermediate skeleton structures were compared with the results of the microscopic model calculations and discussed. From the discussion, it is shown that the limit large particle distance, a parameter of the microscopic model, is an important parameter that should be taken into account for the effect of the confining pressure.

### **Chapter six : Conclusion**

The findings in each chapter were summarized.



(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	田 上 聖 人
審 査 委 員	主 査： 中 田 幸 男
	副 査： 鈴 木 素 之
	副 査： 吉 武 勇
	副 査： 吉 本 憲 正
	副 査： 森 啓 年
論 文 題 目	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)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>二種混合体として、礫質砂や礫混り土のように礫分（大粒子）と砂分（小粒子）で構成されるものがある。この材料では、大粒子含有率によって、砂分と礫分の双方の特徴が材料挙動に現れる中間的な挙動が観察される。本研究は、この中間的な挙動をしめす構造を中間骨格構造とし、この構造状態を示す大粒子含有率を、微視的モデルを用いることで、定量的に評価しようとするものである。この微視的モデルは、大粒子形状およびその配置の異方性を取り入れたものである。このモデルに基づくと、実験的・解析的検討を行うことで、中間骨格構造の大粒子含有率を明らかにできるとともに、微視的モデルに含まれる限界大粒子距離を定量的に示すことができる。ここでの実験的検討では、極低圧条件となる安息角実験、一般的な圧力条件での平面ひずみ圧縮試験、遠心場での支持力模型実験を対象に議論している。また、解析的検討では、個別要素法を用いて安息角実験を再現している。</p> <p>以下、本研究の概要を章別に示す。</p> <p>第 1 章では、粗粒土の特徴と課題、それらを顕著に捉えられる二種混合体、研究の主題となる中間骨格構造や限界大粒子含有率について概説している。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、さらに既往の研究で提案されている中間骨格構造を評価する微視的モデルを示し、課題を明らかにしている。最後に、本論文の目的と章構成を示している。</p> <p>第 2 章では、既往の研究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している。異方性については、土粒子堆積時の「重力作用方向の限界大粒子距離」と「水平方向の限界大粒子距離」の 2 つのパラメーターを導入している。また、大粒子の形状としては、球体大粒子型、円柱大粒子型、扁平楕円体大粒子型の 3 種類を対象にモデルの理論式を提案している。</p>	



(様式 9 号)

第 3 章では、中間骨格構造での強度特性および、中間骨格構造を示す大粒子含有率について明らかにしている。実験には、様々な形状や粗度の大きい粒子試料と小粒子試料を組み合わせ用いて、二種混合体の安息角と間隙比を測定している。測定した結果をもとに、大粒子の粒子形状が中間骨格構造に与える影響を明確にしている。また、得られた小粒子骨格構造の大粒子含有率と微視的モデルにより、限界大粒子距離を推定している。

第 4 章は、第 3 章で実施した安息角実験を個別要素法で再現し、第 2 章で提案した二種混合体の微視的モデルに取り入れた仮定の妥当性を議論している。シミュレーション結果についても、中間骨格構造状態での安息角の変化傾向および、大粒子形状に依存する傾向を再現している。そのうえで、大粒子の異方的な配置状況を明示し、微視的構造モデルの妥当性を示している。また、粒子間力の分析から、大粒子周辺の小粒子のみでは生じない接点力の存在を確認し、中間骨格構造をマイクロメカニクスの可視化している。

第 5 章では、平面ひずみ圧縮強度および遠心場での極限支持力について、中間骨格構造での強度変化や、大粒子含有率について、明らかにしている。中間骨格構造の大粒子含有率の範囲は、微視的モデルで推定される値とは異なることを示している。このことから、中間骨格構造の限界大粒子距離は、拘束圧の影響を考慮すべきであることを示している。

第 6 章では、各章で得られた知見をまとめ、今後の展望を示している。

公聴会は、対面およびハイブリッドの併用開催とし、学内外から 40 名の参加があった。

公聴会における主な質問内容は、中間骨格構造が初期状態によるものか、それとも応力条件によって変動するものか、や、今回提案する微視的モデルが適用できる大粒子と小粒子の条件、ガラスビーズを混合した際の安息角の増加の原因、木片などの異種材料との混合材料への適用性、についてであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 2 編）

1) 田上聖人, 中田 幸男, 梶山慎太郎, 粗粒土の安息角および間隙比に与える礫分含有率の影響, 地盤と建設, 37, 1, 29-36, 2019.

2) 田上聖人, 中田 幸男, 梶山慎太郎, 微視的モデルによる二種混合体に対する小粒子骨格構造の限界大粒子含有率の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), 78, 1, 32-44, 2022.