

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20580267

研究課題名（和文） 変形性粒子を含む混合土の圧縮特性のモデル化に関する研究

研究課題名（英文） Study on Modeling of the Compressive Properties of Soil mixed with Deformable Particles

研究代表者

木全 卓（KIMATA TAKASHI）

大阪府立大学・生命環境科学研究科・講師

研究者番号：60254439

研究成果の概要（和文）：発泡プラスチックなどの変形性粒子を含む混合土の圧縮特性を、積層体の模型実験を行って粒状体の観点からモデル化を試みた。その結果、変形性粒子によって付加される圧縮成分は、1）変形性粒子自身の体積圧縮と、2）これに付随して生じる間隙体積変化、3）変形した粒子のさらなる相互移動による間隙体積変化、の3つに分類されることを明らかにした。そして、これらを理論的に算出するためのモデル式を提案した。

研究成果の概要（英文）：The compressive properties of soil mixed with deformable particles such as expanded plastic were examined and considered to make a model of the mechanical behavior from a particulate point of view by performing a series of rod-stack model tests. As a result, it was clarified that the volumetric compression added by deformable particles were classified into following three more components: 1) the volumetric compression of the deformable particles themselves, 2) the pore space reduction caused by the resultant deformation of the structural skeleton and 3) the pore space reduction caused by further relative movement of the deformed particles. And then, the numerical expression for theoretically estimating these components were proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学 ・ 農業土木学・農村計画学

キーワード：土質力学，変形性粒子，混合土，圧縮特性

1. 研究開始当初の背景

近年、混合土の有効利用に関する研究が数多く行われるようになってきているが、その中でも、軽量な地盤材料の開発や現場への適用性に関する研究成果が多く出されている。これらの研究では様々な材料を対象とした

混合土の力学特性が検討されており、実用化を見据えた試験施工が実施された事例や新工法として技術的に確立されたものもある。本研究代表者も、軽量地盤材料の有用性に加え、リサイクル材料の有効利用という観点も含めて、廃棄発泡プラスチック破砕片を軽量な地盤材料として利用するための研究を進

めてきた。その結果、この破砕片を用いた混合土は地盤材料としての変形性は大きくなるものの、内部摩擦角などの強度特性は土のみの場合と比べてそれほど低下せず、軽量な地盤材料として利用できる可能性があることを示してきた。

混合土としての力学的なメカニズムを解明し、これを理論的なモデルとして構築していくためには、土粒子の集合体である土塊を粒子レベルの観点から検討することが不可欠である。土の力学特性を粒状体力学の立場から解明しようとする研究はいくつかあり、例えば、個別要素法による土のせん断挙動のシミュレーションや解析などはその最たるものと言えよう。しかしながら、いずれの研究においても構成粒子は基本的に剛体であると仮定され、粒子自身の変形まで考慮した研究はほとんど行われていないのが現状である。これは、従来から体系化されている土質力学の理論が土塊を構成する粒子はほぼ剛体であるとの前提に基づいて成り立っているためであり、それ故に粒子自身の変形性を直接考慮した力学モデルがほとんど存在しないことも大きな要因の一つであると考えられる。混合対象となる材料には廃棄発泡プラスチックや廃タイヤゴムなど、土粒子と比べて剛性がかなり小さなものも少なくないことを考えると、土塊を構成する粒子自身の変形性も考慮してメカニズムを検討し、混合土としての力学的な諸特性を明らかにすることが不可欠である。そしてさらには、変形性粒子が及ぼす影響を考慮できる混合土全体に対する力学モデルを構築し、土質力学の新たな展開の可能性を示すことが重要になってくる。

2. 研究の目的

本研究では、骨格中に変形性を有する粒子を含む混合土について、その圧縮メカニズムをモデル実験やその画像解析などを行うことによって解明することを目的とする。そして、変形性粒子が混合土全体の変形特性に及ぼす影響を考慮できる力学モデルを構築し、剛性が小さい様々なリサイクル材料の地盤材料への有効利用に貢献すること、さらには、土質力学の新たな展開の可能性を示すことを目的としている。

そのため、まず、力学的な取り扱いが容易な円柱形材料を用いた積層体の一次元モデル圧縮試験を行い、混合土としての圧縮メカニズムの検討を行う。具体的には、アルミ棒とスチレン棒を用いて混合土を模した積層体モデルを作製し、一次元圧縮試験を行う。そして、圧縮状況をデジタルカメラでマクロ撮影し、画像解析により全体の体積変化量や変形性粒子自身の体積変化量、間隙部分の体積変

化量を個別に計測する。計測された結果は、それぞれの個別の成分が混合土全体の体積変化に及ぼす影響を検討しながら、変形性粒子に起因する圧縮成分をそのメカニズムによって定量的に分類する。その後、分類された各成分を、発生のメカニズムや幾何学的な特徴を考慮しながら数値モデルとして表現する。さらに、混合比や供試体の骨格構造と各圧縮成分との関係も含めて検討し、変形性粒子を含む場合の圧縮量を定量的に明らかにする。そして最終的には、変形性粒子を含む混合土の圧縮特性を、弾性係数などの変形性粒子自身の物性や間隙比などの骨格構造を表すパラメータを用いて、混合比との関係として定式化・モデル化することを目標とする。

なお、これらの目的は、単に混合土に対する力学的な理論のさらなる発展を目指すためだけのものではなく、廃棄発泡プラスチック破砕片や廃タイヤゴムチップなど、比較的大きな変形性を有する廃材を地盤材料として有効にリサイクルする際にも大いに貢献できるものである。

3. 研究の方法

2008年度には、混合土を模擬した積層体モデルのモデル実験を行い、圧縮特性に関わる基本的なデータを収集するとともに、変形性粒子に起因する圧縮成分を力学的な発現メカニズムに応じて分類し、これらを定量的に抽出する。

具体的には、まず、棒状試料積層体の一次元圧縮試験装置を製作する。これまでの研究で、実際の混合土を用いた検討では対象とする粒子が小さすぎて微視的な観察が難しく、さらに、三軸圧縮試験ではダイレイタンスによる体積変化成分が分離しづらい、などの課題が残されていた。よって、直径5mmの棒状試料で混合土を模擬する積層体モデルを作製し、これを一次的に圧縮することにより混合土の圧縮のメカニズムを微視的な観点から検討する。一次元圧縮はひずみ制御で行うが、全体の変形量や荷重の計測に加え、圧縮状況をデジタルカメラでマクロ撮影する。そして、得られた画像データを画像処理ソフトを用いて解析し、圧縮量をメカニズムに応じていくつかの成分に分類するとともに、これらを定量的に抽出する。最終的には、変形性粒子の混合によって付加される圧縮量をいくつかの成分に分類・確定し、それらが混合比などどのような関係があるのかを明らかにする。

2009年度は、前年度に引き続いて混合土を模擬した積層体モデルの一次元圧縮試験を行い、変形性粒子に起因する圧縮成分を、その発現メカニズムに応じて定量的に分

類・抽出し、それらのモデル化を試みる。その際、すべての圧縮成分が含まれるような実験では分類・抽出が難しくなるため、まずはダイレイタンスーのような粒子の移動（骨格の再配置）が生じない条件を対象とする。

具体的には、積層体模型の初期条件を圧縮によって粒子の相対的な移動が生じない正方・六角配置とし、実験を行う。そして、デジタル撮影した画像の解析から変形性粒子の混合によって付加される各圧縮成分を定量的に分離・抽出し、それらが混合比や初期間隙比などの違いによってどのような影響を受けるのかを比較・検討する。その一方で、変形性粒子を含む場合の一次元圧縮のメカニズムを微視的な観点から検討し、分類された各圧縮成分を幾何学的な関係を考慮して数学的なモデルとして表現することも試みる。最終的には、模型実験で得られた結果と幾何学的な関係性を対比させ、各圧縮成分のモデル化へと発展させる。

2010年度も引き続いて混合土を模擬した積層体模型の一次元圧縮試験を実施し、変形性粒子に起因する圧縮成分の定量的な評価を行うが、特に粒子の移動に起因する成分に着目して検討を進める。

具体的には、積層体模型の初期条件をランダムな骨格配置とした実験を行うが、粒子の相対的な移動には接触面における摩擦力も影響すると考えられるため、ヤスリでこすって表面を粗くした積層体要素を用いる。そして、画像解析によって変形性粒子の混合によって付加される各圧縮成分を定量的に分離・抽出し、それらのモデル化を進める。その際、前年度の研究で得られた結果（粒子の相対的な移動が生じない場合の数学的モデル）を参考にし、これと比較することにより、特に粒子の移動に起因する成分の抽出を試みる。最終的には、この成分に関する特性も明らかにすることにより、分類された圧縮成分すべてがそれぞれ個別に評価できるようにする。

4. 研究成果

本研究では、廃棄発泡プラスチックなどの変形性粒子を含む混合土を対象として、その圧縮メカニズムを微視的な粒状体の観点から定量的に評価し、これを表現できる力学モデルの構築を目指した。そのため、まず、研究を進めるための主要な設備である、棒状試料を用いた積層体模型の一次元圧縮試験装置を設計し、製作した。そしてこの装置を用い、土粒子と変形性粒子をそれぞれアルミ棒と発泡スチレン棒で模擬した混合土の積層体模型について、一次元圧縮の模型実験を行った。実験では、発泡スチレン棒の混合比や初期骨格構造の異なるものをいくつか設定

し、これらの違いが混合土の圧縮特性に及ぼす影響を比較することにより、変形性粒子によって付加される圧縮成分を検討することとした。また、各圧縮成分については、圧縮状況をデジタルカメラでマクロ撮影したものを画像解析によって分析し、定量的に分離・抽出・評価することとした。

2008年度の研究では、製作した模型実験装置を用いて一次元圧縮試験を行い、変形性粒子の混合によって付加される圧縮成分の分類を試みた。その結果、この圧縮成分は、a)変形性粒子自身の圧縮による体積変化と、b)これに起因して生じる間隙部分の体積変化に加え、c)変形した粒子のさらなる相互移動による間隙体積の変化、の3つに分類されることがわかった。そして、a)の成分については変形性粒子の混合割合に応じて現れ、b)の成分についてはさらに初期間隙比の大きさにも左右されることがわかった。よって次のステップとしては、a)とb)の成分に関する定量的な分析を進めるとともに、c)の成分の現れ方についても詳しく検討していくこととした。

2009年度の研究では、上記の a)、b)の成分をモデル化するため、粒子の相対的な移動がない正方・六角配置条件で一次元圧縮試験を行い、これらの成分を定量的に分離・抽出した。その一方で、この一次元圧縮の様子を幾何学的な観点から分析し、変形性粒子の変形量から各成分を算出する関係式を導いた。そして、実験結果をさらに分析して変形性粒子自身に対する応力-ひずみ関係を求め、上記の幾何学的なモデルに組み込んで一次元圧縮試験のシミュレーションを行った。その結果、この幾何学的なモデルによって a)、b)の成分についてはその挙動をうまく表現できることがわかった。よってさらに次のステップとして、一般的な混合土のように、粒子の移動があるランダムな配置条件で実験を行い、残る c)の成分についての検討も進めた結果、これについても定量的に分離・評価することが可能であることがわかった。なお、ここでの結果は次年度に開催された国際会議で発表し、同時に発行された査読付きの雑誌論文にも掲載された。

2010年度の研究では、上記の c)の成分のモデル化に向けて、ランダムな骨格配置条件で一次元圧縮試験を行い、a)とb)の成分に対するモデルの適用方法についても考慮しながら検討を進めた。そして、いくつかの初期間隙比で積層体を作製して各圧縮成分の挙動を検討した結果、全体の体積変化から a)とb)に相当する体積変化を差し引いた成分は、ほぼ圧縮応力に比例して発現することが明らかになった。この成分には通常のダイレイタンスーによる体積変化も含まれるため、これを差し引けば c)の成分が求められる。し

たがって、ダイレイタンスの評価方法が確立されれば、これまでの研究成果とあわせて、変形性粒子に起因して付加されるすべての圧縮成分が理論的に算出できることがわかった。

以上のように、本研究では、変形性粒子を含む混合土の圧縮特性を、そのメカニズムによって分類されたものを個別に評価する手法を具体的に提案した。これらを力学モデルとして体系的に完成させれば、様々な材料を用いた混合土の力学特性を理論的に評価できるようになる。今後も本研究で得られた成果をさらに発展させ、廃棄物のリサイクルなどにも貢献できる理論として確立していくことが大いに望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 木全 卓, 正木裕也, E P S破砕片混合土の圧縮特性に関する考察 - 積層体模型実験による圧縮成分の評価 -, ジオシンセティクス論文集, 査読有, Vol. 25, 2011, pp. 53-58
- ② T. Kimata, K. Shimada, Y. Masaki, Consideration of the compressibility of soil mixed with deformable particles - Classification of the compressive components by using rod-stack model tests -, Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro, 査読有, Vol. 1, 2010, pp. 113-116

[学会発表] (計 5 件)

- ① 木全 卓, 正木裕也, 工藤庸介, 変形性粒子を含む混合土の圧縮特性に関する研究 - 粒子の移動に起因する圧縮成分の分類 -, 農業農村工学会 (平成 22 年度大会講演会), 平成 22 年 9 月 2 日, 神戸大学 (神戸市)
- ② 木全 卓, 正木裕也, アルミ・発泡スチレン棒積層体実験による圧縮成分の考察, 地盤工学会 (第 45 回地盤工学研究発表会), 平成 22 年 8 月 20 日, 愛媛大学 (松山市)
- ③ 木全 卓, 正木裕也, 積層体模型を用いた混合体の一次元圧縮特性に関する考察 - 様々な要因における各ひずみ成分の定量的考察 -, 農業農村工学会 (第 66 回京都支部研究発表会), 平成 21 年 11 月 5 日, 富山県民会館 (富山市)

④ 木全 卓, 工藤庸介, 正木裕也, 変形性粒子を含む混合土の圧縮特性に関する研究 - 骨格構造の違いにより生じる体積ひずみ量の定量的考察 -, 農業農村工学会 (平成 21 年度大会講演会), 平成 21 年 8 月 6 日, 筑波大学 (つくば市)

⑤ 木全 卓, 正木裕也, 変形性粒子を含む混合土の圧縮特性に関する研究 - 積層体模型による一次元圧縮特性の定量的考察 -, 農業農村工学会 (第 65 回京都支部研究発表会), 平成 20 年 11 月 6 日, 福井市地域交流プラザ (福井市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木全 卓 (KIMATA TAKASHI)

大阪府立大学・生命環境科学研究科・講師
研究者番号: 60254439

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し