

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K07947

研究課題名(和文)変形性粒子を含む混合土の圧縮モデルの構築に関する研究

研究課題名(英文)Study on construction of compression model 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・准教授

研究者番号：60254439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：廃タイヤチップなどを有効にリサイクルするため、土に変形性のあるものを混合した際に問題となる圧縮量の増加をモデル化するための研究を行った。具体的には、ゴムとアルミのチップを用いた一次元圧縮の模型実験を行い、圧縮量を微視的な観点から幾何学的に算出する方法を検討した。その結果、最密に締め固まった状態においては、圧縮に関わる各成分をゴムチップの形状やゴムの物性値などを用いて算出する式を提案することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまでの地盤工学の理論ではほとんど扱われてこなかった、変形する粒子を含んだ混合土の圧縮特性の解明を目指しており、学術的にも非常に意義のあるものである。この研究成果は、例えば廃タイヤなどをチップ化して混合土としてリサイクルした場合にどれくらいの圧縮沈下が起こるのかを予測するのに不可欠な理論であり、循環型社会を目指すための方策の一助として社会的な意義も高いと考えている。

研究成果の概要(英文)：In order to effectively recycle waste tire chips, a study to model the increase in the compression amount, that becomes a problem when a deformable material is mixed with soil, was examined. Specifically, a model experiment of one-dimensional compression using rubber and aluminum chips was conducted, and a method of geometrically calculating the compression amount was examined from a microscopic viewpoint. As a result, it was possible to propose a formula for calculating each component related to compression by using the shape of the rubber chip and the physical property of the rubber etc. in the most compacted state.

研究分野：農業農村工学

キーワード：変形性粒子 混合土 圧縮特性 モデル化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

新たな軽量地盤材料の開発など、地盤工学の分野においては様々な材料を土と混合した地盤材料について、その力学特性の解明や現場への適用性を検討した研究が数多くなされている。これらの研究では幅広い観点から力学特性が検討され、実用化に至った技術もある。申請者も、軽量地盤材料の有用性に加え、リサイクル材の有効利用という観点から廃棄発泡プラスチック破砕片を軽量の地盤材料として有効に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強度特性についてはそれほど低下せず、軽量地盤材料として利用できる可能性を示した。

このような混合地盤材料を用いた構造物の設計や解析を行うためには、材料としての力学特性が理論的にモデル化されている必要がある。その際、粒子自身の変形も考慮しなければならないため土粒子レベルでの微視的な検討が不可欠となるが、構成粒子の変形性まで考慮した研究はほとんどなされていない。従って申請者は、混合土が一次元圧密される状況をX線CT解析を行うことにより分析し、変形性粒子が混合土全体の圧縮特性に及ぼす影響を微視的な観点から検討した。その結果、変形性粒子を含む混合土の圧縮は、土のみの場合の圧縮量に変形性粒子に起因する圧縮成分を付加する形で表現できることがわかった。その次のステップとして、これらの付加成分をモデル化するため、積層体模型を用いた一次元圧縮試験を行い、圧縮成分の定量的な評価を試みた。その結果、変形性粒子の混合によって付加される圧縮成分は、「a：変形性粒子自身の圧縮」と「b：それによって引き起こされる間隙体積の減少」、さらには「c：変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少」に分類でき、aとbの成分については幾何学的な関係から導かれるモデルにより表現できる可能性が示された。

2. 研究の目的

研究の最終的な目標は変形性粒子を含む混合土の圧縮量を予測できる力学モデルの構築であり、そのためには、変形した粒子が混合土全体の力学特性に及ぼす影響を解明する必要がある。これまでの研究で、二次元の積層体模型に対しては「a：変形性粒子自身の圧縮」や「b：それによって引き起こされる間隙体積の減少」の成分が概ね予測可能であることが示されている。よって本研究では、これを三次元状態へと拡張させるためのステップとして、チップ状試料を用いた混合体の模型実験を行い、微視的な観点から各圧縮成分を算出できるモデルを完成させることを目的とした。そのため、以下のような内容について検討した。

(1) 圧縮成分aとbの算出モデルの検討

二次元の積層体模型を対象に構築してきた各圧縮成分の算出モデルを三次元状態へと拡張させるため、試料を三次元的な移動が可能なチップ状のものに変えた混合体模型の一次元圧縮試験を行った。圧縮試験においては混合体全体を水で飽和させ、混合体全体の圧縮量に加えて間隙部分からの排水量も測定することにより、変形性粒子と間隙部分の圧縮量を個別に計測・評価した。そして、混合体としての圧縮特性を各圧縮成分の挙動を見ながら把握するとともに、微視的な観点から粒子の三次元的な幾何学形状も考慮して各圧縮成分を算出する方法について検討し、そのモデル化を試みた。

(2) 圧縮成分cの算出に関する検討

変形性粒子を含まない一般的な土に対しては、せん断時の土粒子の移動によって生じる土塊の体積変化はダイレイタンスーなどの概念で表現され、モデルとしての理論も確立されている。よって本研究では、粒子の変形によるさらなる移動で生じる体積変化の影響を微視的な観点から検討し、ダイレイタンスーの理論なども参考にしながらこの圧縮成分cの算出方法を検討することとした。そして最終的には、変形性粒子の混合によって付加される3つの圧縮成分について、それぞれ個別に算出できるモデルの構築を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ゴムチップとアルミチップを用いた混合体模型の一次元圧縮試験を行い、変形性粒子を含む混合土の基本的な圧縮特性を把握するとともに、圧縮量を幾何学的な関係を考慮して理論的に算出できるモデルの構築を目指した。具体的には、変形性粒子に起因して付加される圧縮量を発生メカニズムに応じて3つの成分(a：変形性粒子自身の圧縮、b：それによって引き起こされる間隙体積の減少、c：変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少)に分類し、それらを個別に計測して評価した。そのため、ゴムチップと間隙部分の体積変化をそれぞれ個別に計測できる実験装置を用い、圧縮試験を実施した。そして、混合体の圧縮状態を幾何学的に分析・把握し、ゴムの物性値を考慮して各圧縮成分についての算出モデルを検討した。

2016年度は、チップ状試料を用いた混合体模型の一次元圧縮試験を行って変形性粒子を含む混合体の基本的な圧縮特性を把握するとともに、試験の結果を数値解析においてもシミュレーションできるようなDEM解析手法の確立を目指した。一次元圧縮試験については、均一粒径・形状のゴムチップとアルミチップの混合体を供試体として用いた。そして、変形性粒子を含む混合土特有の圧縮成分であるaとbに着目するため、圧縮された際に粒子が荷重の載荷方向

にのみ移動するよう、最密状態の供試体を作製して一次元圧縮試験を行うことにより検討を進めた。一方、数値解析については、変形性粒子を含む混合土の挙動を表現できるDEM解析プログラムの開発を進めた。

2017年度も前年度に引き続いてチップ状試料を用いた混合体模型の一次元圧縮試験を行い、変形性粒子を含む混合土の基本的な圧縮特性を把握するとともに、圧縮量をより精度良く予測できるよう、各圧縮成分の算出方法の改善を試みた。また、DEM解析によるシミュレーションも進め、混合体の一次元圧縮挙動を再現することで個々の圧縮成分がどこまで評価できるかを検討した。一次元圧縮試験では均一粒径・形状のゴムチップとアルミのチップ混合体を供試体とし、前年度と同様に粒子の荷重荷方向以外への移動が生じないよう最密状態で試験を実施して検討を進めた。そして、これまでに得られている実験結果の妥当性を再確認するとともに、各条件において最も妥当と判断できる結果の選定を行った。その後、選定された実験結果を目標値として各圧縮成分の算出方法を検討したが、チップの形状である円柱体が様々なパターンで接触して圧縮される状況を幾何学的に考慮することにより計算式を導いた。一方、DEM解析によるシミュレーションについては、実験結果から推定したパラメータの設定で混合体の圧縮挙動がどの程度表現できるのかを検討した。

2018年度については、当初、変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少を表す圧縮成分cについての検討を始める予定であったが、チップの形状の違いが混合体の圧縮特性に及ぼす影響が無視できないことが明らかになったため、圧縮成分aとbについてさらに検討を深めることとした。具体的には、混合体模型の試料として円柱形状のチップではなく、当初の算出モデルで仮定していた球形のゴム球とアルミ球を用いた。そして、球状試料の混合体の一次元圧縮試験を行い、各圧縮成分を分析することにより混合体としての圧縮特性を改めて確認した。また、圧縮状況を幾何学的な観点から考察して各圧縮成分を算出するモデルを再検討し、実験結果との比較を行った。

なお、当初計画では2019年度に圧縮成分cに関する検討をさらに進展させ、混合体の圧縮モデルを完成へと導いていく予定であったが、2018年度までの研究で粒子形状の取り扱いが予想以上にモデル化に影響を及ぼすことが明らかになった。従って、粒子の形状や寸法効果などについての検討も加味しながら研究計画を大きく見直し、改めて基盤研究として応募(前年度応募)することとした。

4. 研究成果

本研究では、廃タイヤや廃棄発泡プラスチックなどの使用済み材料を地盤材料として有効にリサイクルするため、骨格中に変形性を有する粒子を含む混合土の圧縮メカニズムを解明し、これをモデル化してリサイクル地盤材料の有効利用に貢献することを目指している。モデル化にあたっては、変形性粒子に起因して付加される圧縮量を発生メカニズムに応じて3つの成分(a:変形性粒子自身の圧縮、b:それによって引き起こされる間隙体積の減少、c:変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少)に分類し、検討を進めている。これまでの研究で、発泡プラスチックのようなポアソン比がほぼゼロである材料については二次元状態でのモデル化がある程度できたため、それ以降はポアソン比が0.5に近いゴム系の材料を主な対象として研究を進めてきた。具体的には、ゴム棒とアルミ棒を用いた積層体模型の一次元圧縮試験を行ってその圧縮メカニズムを明らかにするとともに、ポアソン比などの影響も考慮した二次元の圧縮モデルを提案している。今回の研究では、これをさらに一般的な三次元状態にも適用できるモデルへと拡張していくことを主な目的とした。そのため、チップ状試料(ゴムとアルミ)の混合体を用いた一次元圧縮試験を実施し、粒子の三次元的な形状や動きなども考慮しながら圧縮メカニズムを微視的な観点から分析するとともに、変形性粒子に起因して付加される圧縮成分を個別にモデル化することを試みた。

2016年度の研究では、チップ状試料を用いた混合体模型の一次元圧縮試験を行って変形性粒子を含む混合体の基本的な圧縮特性を把握するとともに、試験の結果を数値解析においてもシミュレーションできるようなDEM解析手法の確立を目指した。一次元圧縮試験では均一粒径のゴムチップとアルミチップの混合体を供試体として用いた。そして、変形性粒子を含む混合土特有の圧縮成分(上述のaとb)に着目するため、粒子の移動が生じない最密状態での一次元圧縮試験を実施して検討を進めた。その結果、混合体の圧縮量は混合比とともに増加するが、偏った混合割合になると骨格を支配している粒子の影響が大きく現れるなど、変形性粒子に起因する特徴的な挙動もいくつか把握することができた。また、チップを球と仮定して圧縮状況を幾何学的に計算する方法も検討した結果、混合体の圧縮量がそれなりに予測できることも示され、モデル化の可能性も見えてきた。一方、数値解析については変形性粒子を含む混合土の挙動を表現できるDEM解析プログラムの開発を行った。変形性粒子を表す要素ユニットを考案・設定してプログラムに組み込み、混合土の基本的な挙動のシミュレーションを行った結果、混合比に応じて挙動が変化する傾向などをうまく表現できることが確認された。

2017年度の研究では、前年度に引き続いてチップ状試料を用いた混合体模型の一次元圧縮試験を行い、変形性粒子を含む混合土の圧縮特性を詳細に把握するとともに、圧縮量をより精度良く予測できるよう、算出方法の改善を試みた。また、DEM解析によるシミュレーションも進め、混合体の一次元圧縮挙動を再現することで個々の圧縮成分がどこまで評価できるかを検討した。一次元圧縮試験では、変形性粒子を含む混合土特有の圧縮成分 a、b についてさらに詳細に分析するため、前年度と同様に粒子の移動が生じない最密状態での試験を追加して検討を進めた。そして、これまでに得られている実験結果の妥当性を再確認するとともに、各条件において最も妥当と判断できる結果の選定を行った。その上で、それらの実験結果を目標値として各圧縮成分の算出方法を改めて検討した。具体的には、チップの形状である円柱体が種々のパターンで接触して圧縮される状況を幾何学的に計算することとしたが、このような方法で圧縮成分 a、b を概ね予測できることがわかった。一方、DEM解析によるシミュレーションについては、実験結果から推定したパラメータの設定で混合体の圧縮挙動がどの程度表現できるのかを検討した。その結果、まだ課題はあるが、混合比などの条件の違いをうまく傾向として表現できる可能性が見出された。

2018年度の研究では、チップの形状の違いが混合体の圧縮特性に及ぼす影響を明らかにする必要性から、当初予定していた圧縮成分 c についての検討へは移行せずに圧縮成分 a、b についての検討をさらに深めることとした。そのため、ゴムとアルミの混合体に用いる試料を当初の圧縮モデルで仮定した球形のものに変え、一次元圧縮試験を行った。そして、各圧縮成分を細かく分析することにより混合体としての圧縮特性を改めて確認するとともに、幾何学的な観点から各圧縮成分を算出するモデルについて再検討した。その結果、混合体としての圧縮特性については、均一な球形粒子の混合体を一定速度で圧縮しているにもかかわらず圧縮成分が断続的に増加することもあるなど、粒子の大きさに起因するスケール効果が現れる場合もあることが確認された。この問題を解決するためには粒子の寸法に対して十分に大きな混合体模型を用いて一次元圧縮試験を実施することが必要であると考えられ、今後検討すべき課題とする。一方、各圧縮成分を算出するモデルについては、粒子の形状が一致していることより実際の圧縮試験の結果をそれなりに再現できることが確認された。ただし、細かく見ると圧縮の初期段階における挙動がモデルと実際とはやや異なっており、この点についても今後の課題として検討するつもりである。

以上のように、本研究では、廃タイヤ等を有効にリサイクルするために変形性粒子を含む混合土の圧縮特性を解明し、これを理論的にモデル化することを試みた。実験では、ゴム自身は非圧縮性で体積がほとんど変化しないものの、ゴムの形状の変化が土塊の骨格を大きく変形させて大きな圧縮を生じることを定量的に明らかにした。そして、圧縮の要因を3つの付加成分に分類し、各成分を算出するためのモデル式を粒子の物性や圧縮時の幾何学的な変形関係を考慮しながら導出した。研究としてはまだ模型を対象としたモデル化のレベルであるが、最終的には実際の混合土に適用できるモデルの構築を目指している。将来的には、様々なリサイクル材料を用いた混合土の力学特性を理論的に評価する方法を確立し、廃棄物のリサイクルに貢献したいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Kimata, M. Yoshinaga, N. Kobayashi, Y. Tanaka	4. 巻 PP-D-05
2. 論文標題 Consideration of the compression property of soil mixed with deformable particles - One-dimensional compression behavior of rubber and aluminum chip mixtures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 11th International Conference on Geosynthetics	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木全 卓	4. 巻 65-9
2. 論文標題 リサイクル材料に起因する混合土の圧縮特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 22-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Kimata, Y. Nukami, M. Yoshinaga	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of the Modeling of the Compression Behaviour of Soil Mixed with Deformable Particles - Consideration of One-Dimensional Compression Testing of Rubber and Aluminum Chip Mixture	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. of 6th Asian Regional Conference on Geosynthetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木全 卓, 岡本彦蔵
2. 発表標題 アルミ・ゴムチップ混合体の一次元圧縮挙動のモデル化に関する幾何学的検討
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本彦蔵, 木全 卓, 工藤庸介
2. 発表標題 タイヤチップ混合土の圧縮挙動のモデル化に関する研究 - チップ状試料の体積変化量についての考察
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木全 卓, 阪田真世
2. 発表標題 アルミ・ゴムチップ混合体の一次元圧縮挙動のモデル化に関する検討
3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木全 卓, 阪田真世, 岡本彦蔵
2. 発表標題 ゴムチップ混合土の力学特性に関する実験的研究 - ゴムチップにより増加する圧縮成分についての考察 -
3. 学会等名 第74回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木全 卓, 好永みのり
2. 発表標題 アルミ・ゴムチップ混合体の一次元圧縮挙動に関する実験的検討
3. 学会等名 第51回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	小林 範之 (KOBAYASHI Noriyuki) (00314972)	愛媛大学・農学研究科・教授 (16301)	