

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06298

研究課題名（和文）変形性粒子を含む混合土の圧縮成分とそのモデル化に関する研究

研究課題名（英文）Study on compressive components of soil mixed with deformable particles and its modeling

研究代表者

木全 卓（Kimata, Takashi）

大阪公立大学・大学院農学研究科 ・准教授

研究者番号：60254439

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：廃タイヤチップなどの有効利用を念頭に、変形しやすいものを土に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、ゴム棒とアルミ棒を用いた積層体模型の圧縮試験を行い、圧縮量をメカニズムに応じて分類し、それらを予測する方法を検討した。その結果、ゴムの変形に起因する3つの圧縮成分をそれぞれ算出するモデル式が提案でき、積層体模型全体の圧縮挙動を概ね予測できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では変形しやすい粒子を含んだ混合土の圧縮特性の解明を目指している。従来の地盤工学ではあまり扱われてこなかった分野であり、学術的に意義のある研究である。この研究成果は、廃タイヤなどの使用済み材料をチップ化して混合土としてリサイクルする際に、どの程度の沈下や変形が起こるのかを予測するのに不可欠な理論となる。したがって、循環型社会の構築に役立つ研究の一つとして、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 effective use of waste tire chips, we have conducted a study to model the increase in the amount of compression that becomes a problem in case the deformable material is mixed with soil. Specifically, we carried out a series of compression tests of the rod-stack model using rubber and aluminum stick, and examined a method to classify the overall compression amount according to the mechanism and predict them individually. As a result, we proposed a method to calculate each of the three compression components caused by the deformation of the rubber, and successfully predicted the compression behavior of the overall rod-stack model.

研究分野：農業農村工学

キーワード：変形性粒子 混合土 圧縮成分 モデル化

## 1. 研究開始当初の背景

軟弱地盤における地盤沈下や擁壁にかかる土圧などを軽減するための対策として、軽量の地盤材料を利用した工法の開発が進められている。また、循環型社会を目指すための貢献策として、使用済みで廃棄されるものを地盤材料として有効利用する試みも行われている。このように、地盤工学の分野においては様々なものを土と混合した地盤材料について、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。申請者も、軽量地盤材料の有用性とリサイクル材料の有効利用という観点から、商品の梱包や容器などで使用済みになった廃棄発泡プラスチックを対象に、これを破碎してチップ化したもの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しないことや、軽量で断熱性や保水性の効果も付加できることなど、地盤材料として有効に利用できる可能性が示されている。

ただし、実際にこのような地盤材料を土構造物や基礎地盤に用いる場合、通常よりも大きくなる変形量をいかに評価するかが問題となる。そのため、変形量を含めた力学特性を解明し定量的に評価できるモデルが必要になるが、粒子の変形まで考慮できる力学モデルの研究はこれまであまりなされてこなかった。よって申請者は、変形性粒子を含む混合土の変形特性を解明するための研究をスタートさせた。具体的には、混合土が一次元圧縮される状況をX線CT解析により分析し、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結果、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。また、これらの付加成分のモデル化に向け、積層体模型を用いた一次元圧縮試験を行って圧縮成分の定量的に分析した結果、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、(b)それによって引き起こされる間隙体積の減少、そして(c)変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少、に分類できることがわかった。そのため、これ以降は、積層体やチップ状試料を用いた混合体模型の圧縮試験を行って圧縮成分を個別に分類・評価するとともに、変形性粒子の物性や模型骨格の幾何学的な配置関係を考慮してこれらをモデル化することを目指し、研究を進めている。

## 2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、変形性粒子を含む混合土の圧縮メカニズムを解明してこれを予測できる力学モデルを構築することである。そのためには圧縮に関わる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)を定量的に分析してそれぞれを理論的にモデル化する必要がある。これまでの研究で、圧縮成分の(a)と(b)に関しては、粒子間の相対的な移動が生じないような最密状態に作製した模型の圧縮試験を行うことで各成分の圧縮特性が把握できており、これらを予測するためのモデル式も概ね定まってきた状態にある。よって本研究では、これらの研究成果を引継ぎながら残る圧縮成分(c)の圧縮特性の把握とモデル式の提案を行い、混合土全体の圧縮特性を予測できるモデルの構築を目指した。具体的には以下のような内容について検討を進めることとした。

### (1) 二次元積層体状態における(c)の成分のモデル化

これまでは規則的な粒子配置で相対的な移動が生じない最密状態で実施してきた模型実験を、ランダムな配置構造で実施することにより(c)の成分の圧縮特性を定量的に把握する。ただし、(c)の成分を直接測定することは困難であると考えられるため、全体の圧縮量からこれ以外の成分を差し引くことで求めるようにしている。よって、すべての圧縮成分の測定精度を向上させ、正確に(c)の成分が評価できるように考慮する。そして、変形性粒子の物性や骨格の幾何学的な配置関係を考慮してこの成分をモデル化することを目指す。

### (2) 三次元状態へのモデルの拡張

二次元の積層体模型における圧縮成分のモデル化が完成した後は、モデルの三次元状態への拡張を試みる。その際、いきなり一般的な三次元状態に拡張することは難しいと考えられるため、まずはチップ状の試料を用いた一次元圧縮状態(供試体模型の内部ではチップ状試料に三次元的な移動が生じる)への拡張を検討する。その後で、地盤の状態として一般的な軸対称三軸圧縮状態へと検討を発展させ、変形性粒子を含む混合土の圧縮モデルの完成を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、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い、変形性粒子(積層体模型においてはゴム棒)を含む混合土の基本的な圧縮特性を把握するとともに、圧縮量を変形性粒子の物性や圧縮時の粒子の幾何学的な変形状態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依

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、積層体模型の圧縮状況を画像解析することによりそれらを個別に計測して評価した。そして、圧縮による各要素の変形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。また、将来的にはモデルを三次元状態へと拡張することを目指しているため、これまでの研究で実施されたチップ状試料を用いた実験結果の分析も並行して進め、モデル化の可能性を検討した。

2019年度は、ゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、積層体断面(棒要素の円形断面を粒子と見なす)の圧縮状況を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的にはまず、棒要素の相互の位置関係が乱れないような最密状態での一次元圧縮試験を実施し、(a)と(b)の成分を個別に計測した。そして、これらを幾何学的な観点から計算する方法を導き出し、計算値と実測値との比較を行った。なお、チップ状試料を用いた一次元圧縮挙動については、圧縮成分のモデル化に向けて前年度までの結果の取りまとめを行った。

2020年度は当初の予定を若干変更し、前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、前年度の課題であった試験精度の向上のため、载荷ロッドを高剛性のものに交換、積層体模型の幅が微調整できるように改造、などの改善策を施して一次元圧縮試験を実施した。そして、圧縮に関わる(c)の成分を算出する際に重要になる(a)と(b)の成分について、初期間隙率との関係を調べた。なお、前年度と同様にチップ状試料を用いた一次元圧縮試験結果の検討も継続し、モデル化への可能性を探った。

2021年度も当初の予定とは異なるが、前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、前年度の研究により上記の圧縮成分(a)と(b)についてはその挙動を概ね予測することが可能になったため、残る圧縮成分(c)について、これを抽出してその挙動を把握することを試みた。また、前年度と同様にチップ状試料の一次元圧縮試験結果の分析も継続し、粒子間の相対的な移動がない最密状態における圧縮成分のモデル化も検討した。

2022年度も当初予定とは異なり、ここまでの検討に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、ここまでの研究でモデル化に苦慮してきた(c)の成分に着目し、これを個別に抽出・評価できるようにするため、撮影画像からひずみの分布を測定することができるデジタル画像相関法を用いることとした。そして、積層体全体の圧縮量を算出するための各成分のモデル式の提案を目指した。なお、チップ状試料の一次元圧縮挙動についても、最密状態におけるモデル化の完成を目指した。

#### 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混合土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、規則的な粒子の配置構造で圧縮しても相互の位置関係に乱れが生じない最密状態についてはモデル化に向けての道筋がかなり見えてきており、圧縮成分(a)と(b)については計算するための方法がほぼ確立された状況である。したがって本研究では、最密構造における混合土全体の圧縮量を算出するモデルの完成を目指すとともに、粒子の移動が制限されないランダム構造についても残る圧縮成分(c)のモデル化を目指して検討を進めた。特に後者については、圧縮成分(c)を正確に分類・計測するために模型実験装置を改良してすべての圧縮成分を正確に評価し直すとともに、積層体模型内のひずみ分布を測定することができるデジタル画像相関法を新たに用いて圧縮成分(c)の挙動を分析・評価した。そして、積層体全体の圧縮量を算出するために、すべての圧縮成分をそれぞれモデル化することを試みた。

2019年度は、ゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、積層体断面(棒要素の円形断面を粒子と見なす)の圧縮状況を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的にはまず、棒要素の相互の位置関係が乱れないような最密状態での一次元圧縮試験を実施し、(a)と(b)の成分を個別に計測した。そして、これらを幾何学的な観点から計算する方法を導き出し、計算値と実測値との比較を行った。その結果、提案したモデル式でこれらの成分をうまく算出できていることが確認された。ただし、実際の土は圧縮により土粒子の位置関係が変化するため、(c)の成分として「粒子が側方(圧縮とは違う方向)に移動することで生じる圧縮量」についても検討する必要があるのではないかと

考えた。従って、ランダムな配置状態の積層体で一次元圧縮試験を行い、(a)と(b)の成分を間隙率の大きさに応じて差し引くことにより、(c)の成分を抽出・評価することを試みた。その結果、(c)の成分は値も小さく混合土の圧縮にあまり大きな影響を及ぼさないことや、増減の様子が(b)の成分と似通っていることなどがわかった。なお、前年度までに実施したチップ状試料の一次元圧縮試験による検討については、結果を取りまとめてジオシンセティックス論文集に投稿し、掲載された。

2020年度も前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、前年度の課題であった試験精度の向上のため、高剛性の載荷ロードとの交換や積層体模型の幅が微調整できるようにするなど装置を改良して一次元圧縮試験を実施した。そして、圧縮に関わる(c)の成分を算出する際に重要になる(a)と(b)の成分について、初期間隙率との関係を調べた。その結果、(a)の成分は初期間隙率によらず混合比に比例して生じること、(b)の成分は初期間隙率に比例してその発現割合が増加すること、などが明らかになった。これらの結果は混合体の圧縮挙動を特徴づける重要な特性であり、各圧縮成分をモデル化する際に考慮すべきポイントであると考えている。なお、既に得られているチップ状試料の一次元圧縮試験の結果については、混合比の影響なども考慮できるよう、引き続きモデルの検討を続けた。

2021年度も前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、前年度の研究により上記の圧縮成分(a)と(b)についてはその挙動を概ね予測することが可能になったため、残る圧縮成分(c)について、これを抽出してその挙動を把握することを試みた。その結果、(c)の成分は(a)の成分と同様にゴム棒の混合比に応じてその発生量が増加することが明らかになった。ただし、値としてはゴム棒の場合(混合比が最大の場合)でも全体積ひずみの10%に満たないこともわかった。また、混合比が0.33まで小さくなると(c)の成分の発生が極端に少なくなるが示されたことから、モデル化を考える際には混合比がある程度以下になるとゴム棒の影響が現れにくくなる(アルミ棒による骨格が全体の变形を支配する)ことに注意する必要があることも改めて確認された。なお、チップ状試料の一次元圧縮挙動については、最密構造におけるモデル化の成果を国際会議で発表すべく、第12回国際ジオシンセティックス会議にAbstractを提出した。

2022年度も従来に引き続いてゴム棒とアルミ棒を混合した積層体の一次元圧縮試験を行い、断面の圧縮状況(円形断面)を画像解析することにより混合体としての圧縮量を成分に分けて計測・評価することを試みた。具体的には、ここまでの研究でモデル化に苦慮してきた(c)の成分に着目し、これを個別に抽出・評価できるようにするため、撮影画像からひずみの分布を測定することができるデジタル画像相関法を新たに用いることとした。その結果、(c)の成分を直接抽出することが可能になり、従来の方法で得られている挙動と大きな違いはないものの、この成分は圧縮がある程度進行してから発生する傾向があることが改めて明らかになった。よって、圧縮成分(c)を算出するために、この成分が発生し始める圧縮応力の最小値を閾値としてその後の挙動を1次関数で近似することとした。これにより、すべての圧縮成分を算出するためのモデル式が出そろったため、最後に積層体全体の圧縮挙動の予測を試みた結果、概ねうまく再現できることがわかった。なお、2021年度に応募した国際会議のAbstractが受理されたのでFull Paperを作成して論文を提出した。査読によりいくつか修正事項があったが、最終的には受理されて論文集に掲載されることが確定した。

以上のように、本研究ではゴムチップ混合土の圧縮・変形特性を解明して理論的にモデル化するため、積層体模型やチップ状試料を用いた試験を実施して検討を進めた。その結果、粒子間の相対的な移動がない最密構造においては圧縮挙動を概ねモデル化することができ、粒子の動きが制限されないランダム構造については二次元の積層体状態における圧縮挙動までモデル化を進めることができた。当初予定していた三次元状態でのモデル化までは研究を進めることができなかったが、この点については今後の課題としたい。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。そして、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できればと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 木全 卓, 岡本彦蔵, 小林範之	4. 巻 34
2. 論文標題 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研究 - 最密供試体の圧縮量についての幾何学的検討 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 197 ~ 202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5030/jcigsjournal.34.197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Kimata, N. Kobayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation of one-dimensional compression behavior of rubber chips mixed soil: Calculation of volumetric compression amount in the densest particle arrangement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of 12th International 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6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, 中田 遼, 工藤庸介
2. 発表標題 タイヤチップ混合土の圧縮特性に関する基礎的研究 - 積層体模型におけるヘルツ接触と円柱配列を考慮したモデル化の検討 -
3. 学会等名 第70回農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木全 卓, 中田 遼
2. 発表標題 タイヤチップ混合土の圧縮特性に関する基礎的研究 - 粒子移動を伴う積層体模型での一次元圧縮試験 -
3. 学会等名 第78回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木全 卓, 岡本彦蔵, 谷口広樹
2. 発表標題 アルミ・ゴム棒積層体の一次元圧縮挙動の分析 - 変形した粒子の移動による圧縮成分について -
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木全 卓, 谷口広樹, 中田 遼
2. 発表標題 ゴムチップ混合土の圧縮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77回農業農村工学会京都支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木全 卓, 岡本彦蔵, 工藤庸介
2. 発表標題 弾性体混合土の圧縮挙動のモデル化に関する研究 - 球状試料の幾何学的モデルについての考察 -
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木全 卓, 中田 遼, 工藤庸介
2. 発表標題 タイヤチップ混合土の圧縮特性に関する基礎的研究 - ランダム構造における圧縮成分の計測と考察 -
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022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)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------