

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23580338

研究課題名(和文) リサイクル材料に起因する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 Recycling Material

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(系)・講師

研究者番号：60254439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：廃タイヤチップなどのリサイクル材料を含む混合土の圧縮メカニズムを明らかにし、変形性粒子の混合によって付加される体積圧縮量を3つの成分に分類してそれらをモデル化することを試みた。その結果、変形性粒子に起因する圧縮成分をモデル実験により定量的に分類・評価することができた。また、積層体のような二次元状態については各圧縮成分を算出するためのモデルが構築でき、混合体を実際に圧縮した際に生じる各圧縮成分をうまく算出できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：The compressive properties of soil mixed with recycling material such as scrap tire chips were examined, and considered to make a model of volumetric compression amount of the mixed soil caused by adding deformable particles while classifying it into three components. As a result, it was clarified that the volumetric compression added by deformable particles were classified into three components quantitatively by the model experiment. Furthermore, the modeling of these compression components were completed about the two-dimensional state such as rod-stack model, and it was confirmed that each compression components generated when the mixture containing deformable particle was actually compressed can be estimated well.

研究分野：農学

キーワード：リサイクル材料 混合土 圧縮特性 モデル化

## 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多く行われるようになってきているが、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。これらの研究においては様々な地盤材料の力学特性が検討され、実用化に至った技術もある。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から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を示した。

混合土としての力学的なメカニズムを説明し、これを理論的にモデル化するためには、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るが、いずれの研究においても構成粒子は剛体として扱われ、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。これは、既存の土質力学の理論では土粒子はほぼ剛体とみなされ、粒子自身の変形性は考慮されてい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、土粒子よりも剛性が低いものも少なくないため、構成粒子自身の変形性を考慮したメカニズムの解明やモデル化が重要となる。

よって本研究代表者は、粒子の変形性を考慮できるDEM解析プログラムを開発し、変形性粒子に起因する混合土全体の圧縮特性を検討した。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成分を付加する形で表現できることが示された。また、これをさらに力学モデルとして構築していくためには、混合土全体の圧縮量をメカニズムに応じて分類し、個別に評価する必要がある。よって、発泡スチレン棒とアルミ棒からなる積層体モデルを用いた一次元圧縮試験を行い、圧縮成分の定量的な分析も行った。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」、「b：それによって引き起こされる間隙体積の減少」と「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で概ね表現できることが示された。

## 2. 研究の目的

廃棄発泡プラスチックや廃タイヤなど、変形性を有する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には、混合土と

しての力学特性を把握しておく必要がある。しかしながら、従来の土質力学の理論では土塊を構成する粒子(すなわち土粒子)は剛体として扱われているため、これをそのまま適用することはできない。よって本研究では、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模型実験などの結果を解析することによって解明する。そして、変形性粒子が及ぼす影響を考慮できる力学モデルを構築し、リサイクル地盤材料の有効利用に貢献することを目的とする。

上述のように、本研究代表者はこれまでの研究で、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、それらは「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」と「c：変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少」に分類できることを示している。そして、発泡プラスチック棒とアルミ棒を混合した積層体モデルを用いた一次元圧縮試験の結果を分析し、このaとbの成分については幾何学的な関係を考慮して導かれるモデルで表現できる可能性があることを示している。よって本研究では、これまでの研究成果をさらに発展させ、変形性粒子を含む混合土の圧縮量を算出できる力学モデルの構築を目指す。その具体的な内容と目標は以下のようにまとめられる。

1) 上記cの成分(変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少)に関する検討：変形性粒子を含まない一般の土に対しては、土粒子の移動によって生じる体積変化はダイレイタンシーの考え方を適用することができる。よって本研究では、変形性粒子のみの移動に起因する成分を抽出し、cの成分を表すモデル式を導くことを目標にする。

2) 異なる物性を持つ変形性粒子に対する適用性の検討：考慮すべき材料物性のうち、剛性については既に提案した幾何学的モデルに組み込んでいるが、もう一つの重要な物性としてポアソン比が挙げられる。これまでの研究ではポアソン比がほぼゼロの発泡プラスチックを対象としてきたが、リサイクル材料には廃タイヤのゴムなどポアソン比が1に近いものもある。したがって、上記のa、bに対する幾何学的モデルにポアソン比に関わる項を加え、様々な物性をもつ材料に適用できるモデルへと発展させることを目標にする。

3) 三次元状態への拡張性の検討：これまでの研究では、積層体の実験やDEM解析などを行って圧縮モデルの基本となる二次元でのモデル化を進めてきたが、実際の混合土の圧縮特性は三次元状態で評価する必要がある。したがって、粒状体を用いた実験などを行って三次元特有の挙動を明らかにするとともに、これをモデル化する方策について検討することを目標にする。

### 3. 研究の方法

2011年度は、これまでの研究で用いてきた発泡プラスチックとはポアソン比などの物性値が大きく異なるゴムを対象に、積層体模型による一次元圧縮試験を行ってその基本的な圧縮特性を明らかにし、そのモデル化を検討する。その際、粒子の相対的な移動に起因する成分も含めると考慮すべき問題が複雑になるため、粒子の相対的な移動がない正方・六角配置構造に対象を絞って検討を進める。具体的には、まず、従来よりも簡易で精度良く制御・計測が行える積層体模型の圧縮試験装置を製作する。これは、従来の試験装置では鉛直載荷時の偏心誤差が出やすく、荷重や変位の計測精度が低下する恐れがあったためである。設計図はほぼできあがっているので、必要な材料や機材を発注し、加工・組み立ては生産技術センターに依頼する。そして、この装置を用いて直径15mm×長さ50mmのゴム棒とアルミ棒による積層体模型の一次元圧縮試験を行い、圧縮状況を撮影したデジタル画像の分析により圧縮量をメカニズムに応じて分類・評価するとともに、各圧縮成分を算出するモデルの構築を試みる。ここでの課題は、圧縮によるゴム棒の側方への膨張量をいかに評価するかであるため、積層体模型の圧縮試験方法だけでなく、デジタル画像の撮影方法や画像解析における各パラメータの設定方法にも注意を払いながら検討を進める必要がある。そして、この側方への膨張量をゴムのポアソン比を用いてどのようにモデル式に組み込んでいくかを考える。なお、本年度は、これまで行ってきた廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の衝撃吸収性に関する実験的検討も並行して継続し、リサイクル材混合土の力学特性に関する知見を蓄積する。

2012年度も前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒からなる積層体模型を用いた一次元圧縮試験を行い、圧縮状況を画像解析して圧縮量をメカニズムに応じて分類・評価するとともに、各圧縮成分を算出するモデル式のさらなる改良を試みる。その際、ゴム棒の側方への膨張量をどのような形で各成分に組み込むかを最優先に検討し、ゴムの物性値であるポアソン比をパラメータに加えたモデル式の提案を目指す。具体的には、対象とする骨格構造としては粒子の相対的な移動がない正方・六角配置構造に限定するものの、圧縮状況をより正確に分析して各成分をできる限り正確に分離・抽出する。また、モデルを構築していく際に、パラメータとしてゴム棒にかかる圧縮力と断面の変形量の関係が必要になるため、ゴム棒単体での圧縮試験も行い、その応力-ひずみ関係も求めておく。そして最終的には、粒子の相対的な移動がない場合について、「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」に相当する成分のモデル

式を提案する。なお、本年度もこれまでに引き続き、廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の衝撃吸収性に関する実験的検討も並行して実施する。具体的には、前年度までに検討してきた衝撃を加える側に対する衝撃軽減効果だけでなく、加えられた衝撃が混合土中を伝播する際に吸収・低減される効果についても検討する。そのため、水平に静置した供試体に対する衝撃の伝播試験を考案・実施し、載荷側と伝播側において計測される衝撃加速度を分析する。

2013年度は、これまでの2年間に引き続いてゴム棒とアルミ棒からなる積層体模型を用いた一次元圧縮試験を行って圧縮状況を画像解析して圧縮量をメカニズムに応じて分類・評価するとともに、各圧縮成分を算出するモデル式の検討を進めるが、特に本年度は、これまではその困難さのためモデル化を保留してきた粒子の移動に起因する成分についても検討の範囲を拡げ、個別の成分としての定式化の可能性を検討する。具体的には、まず、混合土の骨格構造として粒子の相対的な移動がない正方・六角配置構造について、各圧縮成分がより正確に評価できるようにモデルの算出式を再検討する。そして、ゴムのポアソン比と圧縮される円形断面の幾何学的な特徴を十分に考慮し、圧縮力を受けたゴムの変形による側方への体積膨張分をうまく考慮できるように改良する。その後、このモデルを粒子の相対的な移動がある一般的な状態にも適用できるものへと拡張するため、ランダムな配置構造での一次元圧縮試験を行い、各圧縮成分を個別に分離・抽出することを試みる。そして、粒子の相対的な移動に起因する圧縮成分について詳しく検討し、「c：変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少」に相当する成分をモデル化する方法について考察する。

最終の2014年度は、これまでの研究で導かれた二次元状態における混合土の圧縮モデルを三次元状態に適用できるモデルへと拡張することを念頭に検討を進めるとともに、研究のとりまとめを行う。そのため、積層体模型ではなくチップ状のゴムとアルミを用いた混合体の一次元圧縮試験を行い、各圧縮成分を理論的に分離・抽出するとともに、それらの特性を考察する。具体的には、直径と高さが3mmの微小な円柱状のゴムチップとアルミチップを用いた混合体を内径50mmの円筒内で一次元圧縮し、各粒子が三次元的に移動できる状態での圧縮特性を調べる。実験では、混合体の初期間隙比は混合比によらず同一に調整するとともに、混合体の間隙は水で飽和しておき、排水量を測定することにより各圧縮成分を個別に評価できるように考慮する。そして、得られた結果は二次元積層体による結果と圧縮成分ごとと比較し、二次元モデルの考え方が三次元にどの程度適用できるかを確認するとともに、三次元で特有に現れる挙動についても明らかに

してモデル化の方向を検討する。

#### 4. 研究成果

本研究では、廃棄発泡プラスチックや廃タイヤ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た。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ているため、今回はポアソン比が1に近いゴム系の材料を中心に研究を進めた。そのため、ゴム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、既に提案している二次元モデルを改良してポアソン比の影響が考慮できるようにした。さらに、これを一般的な三次元状態にも適用できるモデルへと拡張するため、チップ状試料の混合体を用いた一次元圧縮試験も行い、三次元モデルを構築していくための基礎的な知見を整理した。

2011年度の研究では、圧縮試験装置を改良して実験の制御・計測精度を高めるとともに、ゴム棒を用いた積層体模型実験を行って混合土としての圧縮メカニズムを明らかにしながら、モデル化における発泡プラスチックとの違いについて検討した。その結果、試験装置としては、ゴムのよう大きく変形はしてもあまり体積変化を生じない場合についても、かなり正確に計測できるようになった。一方、実験の結果からは、ゴムのようにそれ自身はほとんど体積が圧縮されない材料であっても、粒子の変形に起因する間隙部分の体積変化（体積減少）が非常に大きな影響を及ぼし、結果として混合土全体の圧縮量も大きく増加することが明らかになった。また、ゴム自身の応力-ひずみ関係と積層体の幾何学的な変形関係にポアソン比を考慮すれば、「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」が概ね妥当に評価できる可能性があることがわかった。なお、並行して進めた廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の衝撃吸収性に関する検討については、混合土の変形性と深い関係があることがわかったため、これらを取りまとめて環境地盤工学シンポジウムや国際会議などに投稿した。

2012年度の研究では、前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を用いた積層体模型実験を行うとともに、ゴム棒単体での圧縮試験も行い、ポアソン比を考慮して各圧縮成分を算出できるモデル式の導出を試みた。その結果、ゴム棒としての応力-ひずみ関係は別途求めておく必要があるが、上記のa, bの成分を算出するモデル式にポアソン比の影響を組み込むことができた。また、モデル式

による計算値と実験結果を比較したところ、両者は比較的良く一致しており、このモデルが任意のポアソン比を有する材料に対して適用可能であることが確認された。ここでの成果は、ジオシンセティックス論文集に投稿している。なお、並行して進めた廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の衝撃吸収性に関する検討については、破砕片が混合土中を伝播する衝撃を大きく低減させる効果も有することが新たに示された。

2013年度の研究でも前年度に引き続いてゴム棒とアルミ棒を用いた積層体模型実験を行うが、モデル式のさらなる改良を試みるとともに、ランダムな配置構造での実験も行つて粒子の移動に起因する成分についても検討を加えた。その結果、ゴム粒子自身の圧縮量を円の幾何学的な特徴を加味して算出するようにモデル式を改良することにより、圧縮を受けたゴムの側方膨張分をうまく考慮できるようになった。また、ゴム棒とアルミ棒の混合積層体の圧縮試験の結果から、アルミ棒だけの結果と初期間隙比を考慮して算出・調整した上記のa, bの成分を差し引くことにより、変形性粒子の移動に起因する圧縮成分である「c:変形した粒子のさらなる移動に伴う間隙体積の減少」がうまく分離・抽出できることが確認できた。これにより、上記のa, b, cの成分がそれぞれ個別に定式化できる可能性が示された。ここでの成果はジオシンセティックス論文集に投稿した。なお、並行して進めてきた廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の衝撃吸収性に関する検討であるが、これまでの結果を論文として取りまとめ、国際会議に投稿した。

2014年度の研究では、モデルを三次元状態へと拡張させるための基礎研究として、チップ状試料を用いた一次元圧縮試験を行って圧縮のメカニズムを明らかにした。そのため、間隙体積の変化などが個別に計測できる一次元圧縮試験装置を製作し、実験と結果の解析を行った。その結果、三次元においても二次元モデルと同様の考え方が適用できることがわかったが、混合比が小さいとアルミチップによる骨格がゴムチップの圧縮を抑制するなど、三次元状態特有の挙動にも注意が必要であることもわかった。ここでの成果もまた、ジオシンセティックス論文集に投稿した。

以上のように、本研究では変形性粒子を含む混合土は粒子自身の体積圧縮がほとんどなくても粒子骨格の変形によって大きな圧縮を生じることを実験により定量的に示すとともに、その要因を圧縮のメカニズムに応じて3つの付加成分に分類した。そしてそれらを二次元の積層体模型を用いた一次元圧縮試験で再現・評価した後、各成分を表すモデル式を材料の物性値や応力-ひずみ関係、幾何学的な特性も考慮しながら導出し、実際の挙動への適合性も確認した。これらを三次元状態にも適用できる力学モデルとして体

系的に完成させれば、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できるようになる。本研究では、その基礎としてチップ状試料を用いた圧縮メカニズムの解明までを行ったが、今後もさらに検討を進め、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 6 件)

木全 卓, 島田和久, ゴムチップ・アルミチップ混合体の一次元圧縮メカニズムに関する考察, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol.29, 2014, pp.27-32

T. Kimata, K. Sakaguchi, Y. Kawaguchi, Study of the impact absorbency of soil mixed with crushed EPS waste -Effect at the time of impact and after propagation-, Proc. of 10<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, 査読有, 2014, 106:1-8

木全 卓, 北口紗貴, 森 匠平, 弾性体材料混合土の圧縮特性に関する考察 - ゴム棒積層体模型実験による圧縮成分の評価 -, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol.28, 2013, pp.207-212

T. Kimata, K. Sakaguchi, Study on Impact Absorbency of Soil mixed with Crushed EPS Waste -Relation to the Deformation Characteristics of Soil, Proc. of 5<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Geosynthetics, 査読有, 2012, pp.443-449

木全 卓, 阪口皓亮, 川口雄太郎, 廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の緩衝効果に関する実験的考察, 第9回環境地盤工学シンポジウム論文集, 査読有, 2011, pp.79-82

木全 卓, 阪口皓亮, E P S 破砕片混合土の変形特性が衝撃吸収性に及ぼす影響に関する考察, ジオシンセティックス論文集, 査読有, Vol.26, 2011, pp.197-202

[学会発表](計 12 件)

木全 卓, 額見悠生, ゴムチップ混合土の圧縮特性に関する実験的研究 - ゴム・アルミチップ混合体の一次元圧縮特性 -, 農業農村工学会(第71回京都支部研究発表会), 2014年11月13日, ホテルグランヴェール岐山(岐阜県・岐阜市)

木全 卓, 工藤庸介, 森 匠平, 弾性体材料を含む混合土の圧縮特性に関する研究 - 積層体模型実験による圧縮成分のモデル化 -, 農業農村工学会(平成26年度大会講演会), 2014年8月27日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

木全 卓, 森 匠平, アルミ・ゴム棒積層体実験による混合土の一次元圧縮モデルの検討, 地盤工学会(第49回地盤工学研究発表会), 2014年7月16日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

木全 卓, 森 匠平, 弾性リサイクル材料混合土の圧縮特性に関する基礎的研究 - 側方への変形を考慮した圧縮成分のモデル化 -, 農業農村工学会(第70回京都支部研究発表会), 2013年11月13日, 京都テルサ(京都府・京都市)

木全 卓, 川口雄太郎, 工藤庸介, E P S 破砕片混合土の有効利用に関する研究 - 混合土中を伝播する衝撃の吸収性に関する考察 -, 農業農村工学会(平成25年度大会講演会), 2013年8月6日, 東京農業大学(東京都・世田谷区)

木全 卓, 川口雄太郎, 廃棄発泡プラスチック破砕片混合土の伝播衝撃吸収性に関する考察, 地盤工学会(第48回地盤工学研究発表会), 2013年7月23日, 富山県民会館(富山県・富山市)

木全 卓, 北口紗貴, 弾性リサイクル材料混合土の圧縮特性に関する基礎的研究 - 積層体模型を用いた圧縮成分のモデル化 -, 農業農村工学会(第69回京都支部研究発表会), 2012年11月13日, 新潟ユニゾンプラザ(新潟県・新潟市)

木全 卓, 阪口皓亮, 工藤庸介, E P S 破砕片混合土の有効利用に関する研究 - 混合土の変形性と衝撃吸収性に関する考察 -, 農業農村工学会(平成24年度大会講演会), 2012年9月19日, 北海道大学(北海道・札幌市)

木全 卓, 北口紗貴, アルミ・ゴム棒積層体実験による混合土の圧縮成分の考察, 地盤工学会(第47回地盤工学研究発表会), 2012年7月16日, 八戸工業大学(青森県・八戸市)

木全 卓, 阪口皓亮, 川口雄太郎, E P S 破砕片混合土の有効利用に関する研究 - 地盤の衝撃吸収効果についての考察, 農業農村工学会(第68回京都支部研究発表会), 2011年11月17日, 奈良県文化会館(奈良県・奈良市)

木全 卓, 阪口皓亮, 工藤庸介, E P S 破  
砕片混合土の有効利用に関する研究 -  
衝撃吸収性のメカニズムに関する考察 -,  
農業農村工学会(平成 23 年度大会講演会),  
2011 年 9 月 8 日, 九州大学(福岡県・福  
岡市)

木全 卓, 阪口皓亮, 川口雄太郎, 廃棄発  
泡プラスチック破砕片混合土の緩衝性  
に関する考察, 地盤工学会(第 46 回地盤工  
学研究発表会), 2011 年 7 月 7 日, 神戸国  
際会議場(兵庫県・神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕  
特になし

#### 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

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

無し

研究者番号: