

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：82627

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14034

研究課題名(和文)リバーエンジニアリングの地盤工学的利用～地盤プロトタイプの作製と力学評価～

研究課題名(英文)Application of reverse engineering in Geomechanics -duplicate specimen and its evaluation of mechanical behavior-

研究代表者

水谷 崇亮 (Mizutani, Takaaki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：70371763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：地盤を構成する粒子の形状や配列といった微視構造の影響を評価する手法として、X線CTスキャンにより得られた礫の三軸供試体の3次元画像を画像処理した後、3Dプリンターを用いて、微視構造の等しい供試体の復元を試み、その力学特性を調べた。本研究では、礫粒子からなる三軸供試体を対象として、供試体を復元し、それを用いた三軸圧縮試験および所定の試験ステップでのX線CTスキャンを実施した。三軸圧縮挙動の比較から、礫供試体と復元供試体には最大せん断応力等に定量的な違いがあるものの、復元供試体が粒状体としての典型的な挙動を示すことがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study aims at creating repeatable granular soil specimens by using X-ray tomography imaging of natural gravel specimens and 3D printing the specimens. We conducted triaxial compression tests of the original source gravel specimens and duplicate specimens with X-ray CT scanning at certain experimental steps before and during compression. Results of conventional triaxial compression testing of source and duplicate specimens were compared. While there are quantitative differences in behavior between source and duplicate specimens, the surrogate specimens are shown to have macro-scale mechanical behavior that may be considered typical of granular soils. The ability to generate identical surrogate granular specimens with the same particle arrangement holds promise to remove the influence on geotechnical laboratory testing outcomes due to the unavoidable structural variation in specimens of natural granular assemblages.

研究分野：地盤工学

キーワード：3Dプリンティング X線CTスキャン 粒状体 三軸圧縮挙動 画像解析

1. 研究開始当初の背景

地盤構造物の設計等で用いられる地盤の力学パラメータを知るために、一般的に室内要素試験(例えば、三軸圧縮試験、圧密試験、透水試験等)が実施されるが、圧縮試験等のような破壊試験を伴うために、複数の供試体が必要となる。この場合、使用する土試料、供試体作製方法(原位置サンプルの場合には、そのサンプリング方法)および供試体の間隙比が同じ供試体であれば、それらを等価な供試体として取り扱ってきた。しかし、このような巨視的に等価な供試体でも、それを構成する粒子の形状や配列がそれぞれ異なるため、微視的には異なる構造を持っている。その結果、巨視的には等価な供試体を用いて試験を実施しても、微視的な構造の違いに起因するばらつきが試験結果には常に内包されている。そして、そのばらつきが本来知りたい試験条件(例えば、拘束圧、異方性、飽和度等)の影響を不明瞭なものにしていると考えられるが、微視構造の影響を評価する方法は、現在までのところない。

2. 研究の目的

微視構造の影響を評価する手法として、本研究では、X線CTスキャンにより得られた礫の三軸供試体の3次元画像を画像処理した後、3Dプリンターを用いて、粒子の形状および配列の等しい供試体(以下、復元供試体という)の作製を試みた。その後、複数の復元供試体について三軸圧縮試験を実施し、力学特性を調べた。復元供試体と元の礫供試体の力学挙動との比較から、本手法による力学的な再現性について検証した。また、復元供試体を対象としたX線CT画像データについて粒子解析を行い、幾何学的な再現性を併せて検証した。

3. 研究の方法

(1) X線CTスキャナ

港湾空港技術研究所に設置されているX線CTスキャナ(ScanXmate-D200RSS900)を用いた(図1)。本スキャナは、礫供試体の粒子配列構造をスキャンするために用いられた。

三軸圧縮試験には、本スキャナ内で試験が実施可能な三軸試験装置を用いた。供試体寸法は、直径50mm、高さ100mmである。ロードセル、外部変位計により軸荷重、軸変位を測定した。飽和排水条件による試験では、ピュレットの水位変化を読み取り、供試体の体積変化量を測定した。

(2) 3Dプリンター

礫供試体のX線画像から、復元供試体を作製するために、紫外線硬化型樹脂を積層造形する3Dプリンター(Agilista-3100)を用いた(図2)。最大で297×210×200mm(横幅×

奥行×高さ)の造形が可能であり、メーカー仕様による造形分解能は、40×63.5×15μmである。造形では、2種類の紫外線硬化樹脂が使用される。1つは、造形対象となる箇所を造形し、もう1つは造形対象外の空隙を一時的に埋める役割を果たしている。後者の材料は、水溶性を持つことから、造形終了後の造形物を浸水させることによって、空隙を埋めていた水溶性材料が溶け出し、目的の対象物のみを得ることができる。

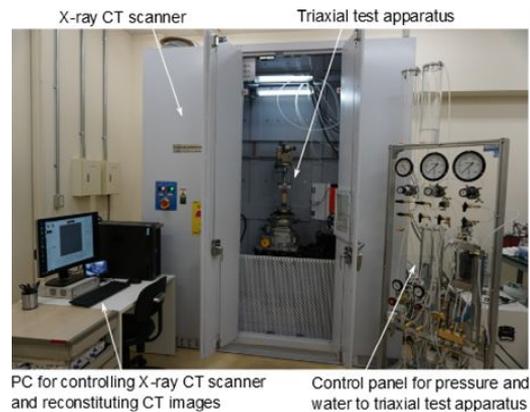


図1 X線CTスキャナ



図2 3Dプリンター

(3) 復元供試体の作製方法

礫供試体の作製

礫の三軸供試体を作製した。所定の質量の礫を3層に分けて、三軸モールド内に入れ、振動を加えて礫を締め固めた。その後、20kPaの拘束圧で供試体を自立させている。用いた礫は、4.76から9.5mmの粒径範囲を持つ粒径のそろった材料である。この粒径範囲の礫を用いたのは、X線CTスキャンおよび造形に関するそれぞれの分解能に対して、粒子形状を復元するのに十分大きい粒子を用いる必要があったためである。本研究の手法が、どの程度小さい粒子まで適用できるかは、今後の研究課題である。

三軸供試体を作製した後、試験装置をX線CTスキャナ内に移動した。その後、20kPaで

拘束された状態の三軸供試体をスキャンし、復元供試体の設計図となる3次元画像を取得した(図3)。画像のピクセル分解能は83.8 μm で、16bitの白黒濃淡で表されている。図3では、輝度値の高く白色に近いほど、密度が高い領域を示している。

画像処理および供試体の復元

礫供試体の画像(図3)を、画像解析ソフトウェア「ImageJ」を用いて画像処理した。画像処理の主な目的は、1)画像上で粒子部分と空隙部分を分け、2)各粒子形状を同定し、3)粒子形状をわずかに小さくすることである。

1)では、画像上で粒子部分と空隙部分を分けるために、二値化処理を行った。この処理では、閾値を上回る輝度値を持つピクセルの輝度値を255、下回るものを0に変更する(画像解析ソフトウェア上で16bitから8bitに変換される)。

2)では、二値化処理によって粒子部分として判別された領域に対して、粒子間接触点を削り、画像上で各粒子を切り離す作業を行った。これには、Watershed処理と呼ばれる画像処理手法を使った。この処理は、粒子間接触点と認識されたピクセルの輝度値を0(画像上で黒色になる)に変更する。

3)では、切り離された各粒子の輪郭に位置するピクセルの輝度値を0に変更し、粒子サイズを小さくする作業を行った。これにより、画像の分解能である83.8 μm だけ画像上で粒子が小さくなったことになる。

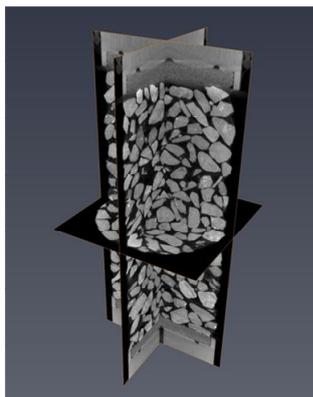
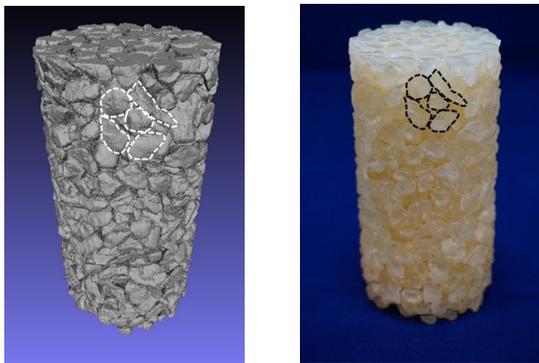


図3 礫供試体の3次元X線CT画像



a) 画像処理後3次元画像 b) 復元供試体

図4 供試体の復元

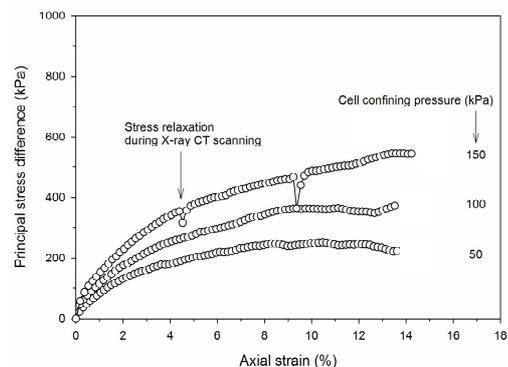
画像処理手法は、復元供試体の三軸圧縮特性に大きな影響を与える。本研究では、復元供試体が粒状体に最も近い挙動を示した画像処理手法である上記3つを採用している。

本研究では、2次元水平断面画像1枚1枚に対して、これら3つの画像処理を前述通りの順番で行い、処理された画像を積み重ねて、造形用の3次元画像を構成した。構成された3次元画像を造形用のファイルフォーマット(Standard Triangulated Language, STL)に変換した。図4は、画像処理された後の3次元画像とこれをもとに3Dプリントした復元供試体を示している。

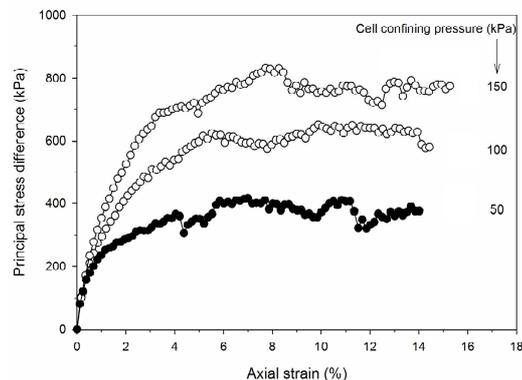
4. 研究成果

(1) 復元供試体の力学特性

復元供試体および礫供試体について、三軸圧縮試験を実施した。圧縮载荷は乾燥、排気条件および0.1%/minの载荷速度で行われた。有効拘束圧は50,100および150kPaである。図5は、復元供試体および礫供試体の応力ひずみ曲線を示している。復元供試体の結果から、有効拘束圧が高くなるにつれて、最大せん断応力が高くなっていることから、礫供試体と同様に拘束圧依存性をもつことがわかる。ただし、载荷初期の応力ひずみ曲線の立ち上がりや最大せん断応力に違いが見られ、復元供試体に比べて礫供試体の方が応力ひずみ曲線の立ち上がりが急で、最大せん断応力は高い。



a) 復元供試体



b) 礫供試体

図5 応力ひずみ曲線

図6は、最大せん断応力時における復元供試体および礫供試体の破壊包絡線を示している。礫供試体に比べて復元供試体において、破壊包絡線の傾きが小さいものの、復元供試体も摩擦材としてせん断応力に抵抗していることが明らかである。復元供試体のダイレタンシー特性を調べるために、圧密排水三軸圧縮試験を実施した。有効拘束圧50kPa、載荷速度0.1%/minで載荷を行った。図7は、復元供試体および礫供試体の応力ひずみ曲線および体積ひずみ量を示している。応力ひずみ関係および体積ひずみ量に違いが見られるものの、両供試体において収縮から膨張へ遷移するダイレタンシー特性は一致している。

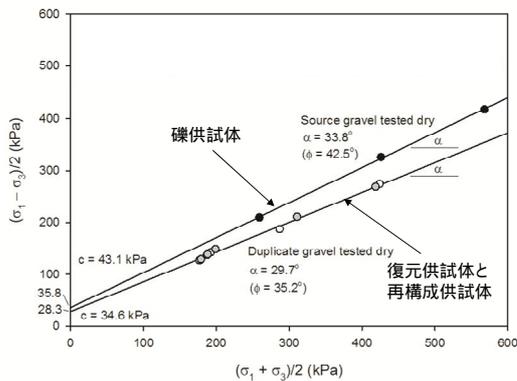
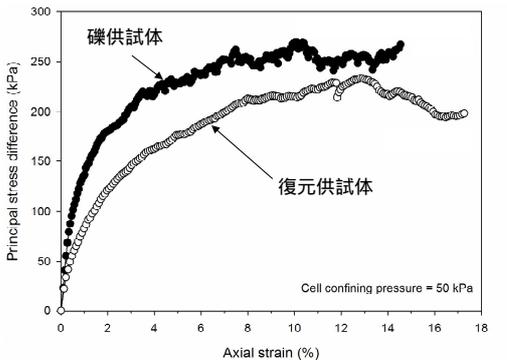
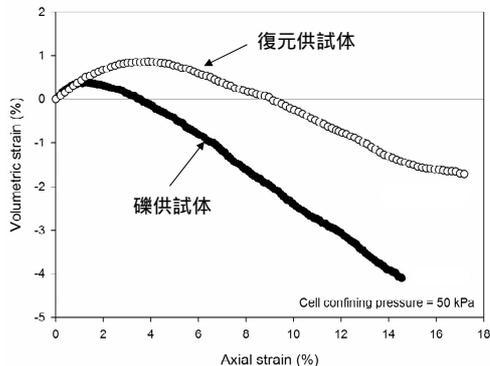


図6 破壊包絡線



a) 応力ひずみ曲線



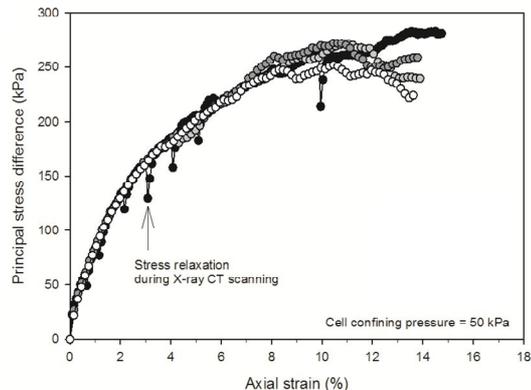
b) 体積ひずみ量

図7 圧密排水三軸圧縮試験の結果

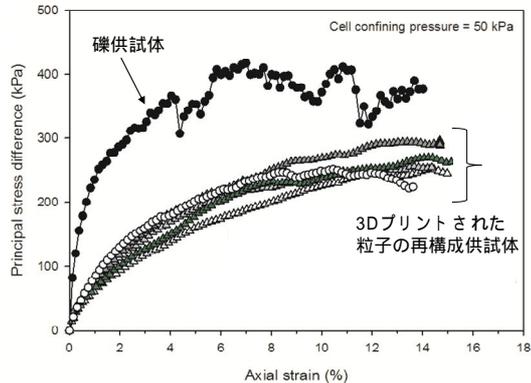
以上より、復元供試体が拘束圧依存性およびダイレタンシー特性を有していることから、復元供試体が礫供試体と同様に粒状体としてせん断に抵抗していると言える。

(2)力学的な再現性

復元供試体の力学的な再現性を調べるために、4つの復元供試体について、同条件(乾燥・排気条件、軸ひずみ0.1%/minの載荷速度)で三軸圧縮試験を実施した。また、比較のために、復元供試体の粒子配列を壊したのち、礫供試体の作製方法と同様の方法で再度粒子を堆積した4つの再構成供試体(以下、再構成供試体という)について、同条件で三軸圧縮試験を実施した。このとき、間隙比が復元供試体と等しくなるように再構成供試体を作製した。すなわち、4つの復元供試体では、間隙比および粒子配列が等しいのに対して、4つの再構成供試体は間隙比のみ等しく粒子配列が異なる。図8は、復元供試体および再構成供試体の応力ひずみ曲線を示している。図より、復元供試体では応力ひずみ曲線のばらつきが非常に小さいのに対して、再構成供試体では載荷の初期からばらつきが発生していることがわかる。両供試体の違いは、粒子配列のみであることから、図8に示された応力ひずみ曲線のばらつきの程度の違いは、粒子配列に起因するものと考えられる。



a) 復元供試体



b) 3D プリントされた粒子の再構成供試体

図8 複数の供試体の応力ひずみ曲線

(3)幾何学的な再現性

礫供試体に対する復元供試体の粒子の形状や配列の再現性を調べるために、三軸圧縮試験における載荷前に3つの復元供試体および礫供試体のX線CTスキャンを行った。図9は、両供試体の同じ高さでの水平断層画像を示している。礫供試体の各粒子の形状や配列が良く再現されていることがわかる。

礫供試体に対する復元供試体の幾何学的な再現性、すなわち粒子の形状や配列の再現性を調べるために、図9に示されるような同じ高さでの水平断層画像を解析し、粒子面積の分布を求めた。粒子面積の分布を求める画像解析では、画像上で各粒子をセグメント化（各粒子を識別）し、各粒子の面積を算出する。その後、各粒子の面積の分布を求めたものが図10である。さらに詳しい解析手順は、5. 主な発表論文等〔学会発表〕4. を参照されたい。図より、礫供試体と比べて、復元供試体では全体的に粒子面積が小さくなっているが、3つの復元供試体ではその粒子面積の分布が良く一致していることがわかる。ここで、礫供試体に比べて、復元供試体において粒子面積が小さいのは、(3)復元供試体の作製方法に示された画像処理において、各粒子を縮小する処理を行っているためである。

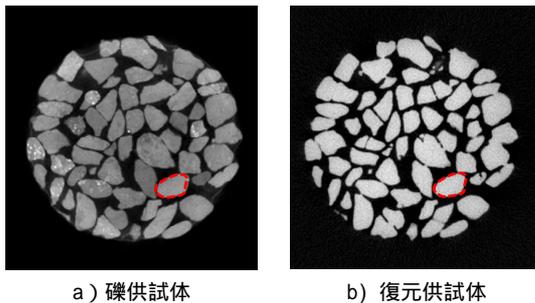


図9 同じ供試体高さでの水平断層画像

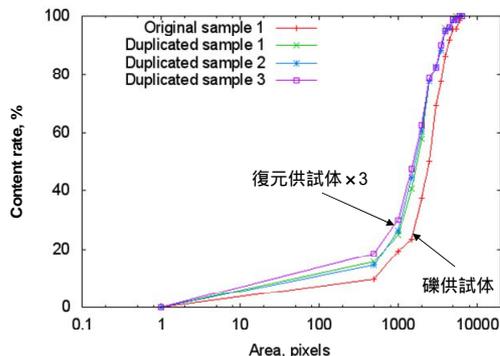


図10 画像解析で求めた粒子面積の分布

(4)まとめ

本研究では、粒子の形状や配列といった微視構造が地盤の巨視的な力学挙動に与える影響を評価する手法として、X線CT技術および3Dプリント技術を利用して礫供試体の復元を試みた。復元供試体を用いた各種力学試験によって、復元供試体が粒状体として特徴的な挙動、すなわち拘束圧依存性やダイラタンシー特性を示すことがわかった。また、同じ載荷条件で得られた複数の復元供試体の応力ひずみ関係の比較から、微視構造を復元することによって力学特性の再現性が高くなることがわかった。

今後、本研究で検討された手法で微視構造の等しい供試体を作製することによって、微視構造の違いに起因する力学試験結果のばらつきの定量評価や復元供試体を用いた地盤の力学特性の推定が可能となることが期待される。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

1. S. Matsumura, T. Kobayashi, T. Mizutani and R. J. Bathurst: Manufacture of bonded granular soil using X-ray CT scanning and 3D printing, Geotechnical Testing Journal, ASTM International (2017年採択決定済)。

〔学会発表〕(計6件)

1. A. Kondo, S. Matsumura, T. Mizutani and E. Kohama: Reproduction of discrete element model by 3D printing and its experimental validation on permeability issue, In Proceedings of Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales, Swiss, 2017.1.

2. 松村 聡, 近藤 明彦, 水谷 崇亮, 小濱 英司: 土粒子配列構造の復元と透水問題への適用, 第51回地盤工学研究発表会, pp. 341-342, 2016.9.

3. 近藤 明彦, 松村 聡, 水谷 崇亮, 小濱 英司: 土粒子配列構造の復元によるDEM-SMAC連成解析の実験的検証, 第51回地盤工学研究発表会, pp. 343-344, 2016.9.

4. S. Matsumura, T. Kobayashi and T. Mizutani: 3D printing of granular material and its application in soil mechanics. In Proceedings of Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Osaka, Japan, 2015.10.

5. 松村 聡, 水谷 崇亮: 地盤の微視的構造の復元と力学特性評価, 第50回地盤工学研究

発表会 , pp . 451-452 , 2015.9.

6 . S. Matsumura and T. Mizutani: 3D printing of soil structure for evaluation of mechanical behavior. In Proceedings of 14th International Congress for Stereology and Image Analysis, Liège, Belgium, FA02: 0-3, 2015.7 .

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称:地盤試料のスキャン方法,地盤試料の供試体の生産方法,地盤試料の土質試験方法及び地盤試料のスキャン装置

発明者:松村聡,水谷崇亮,小濱英司,近藤明彦,酒井運雄,王波,齊藤典生,鈴木修一,劉小軍

権利者:国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所,基礎地盤コンサルタンツ株式会社,つくばテクノロジー株式会社

種類:特許

番号:特願 2017-089168

出願年月日:2017.04.28

国内外の別:国内

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

1. 松村聡,水谷崇亮,篠永龍毅:マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いた地盤工工学への新たなアプローチ,港空研資料 No.1313,2015.12.

2. 松村聡:「港湾空港技術最前線(19)」港湾空港タイムス,第1485号,2016.02.15.

6. 研究組織

(1)研究代表者

水谷 崇亮 (MIZUTANI Takaaki)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 地盤研究領域 基礎工研究グループ グループ長

研究者番号:70371763

(2)研究分担者

松村 聡 (MATSUMURA Satoshi)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術

研究所・地盤研究領域・基礎工研究グループ・研究官

研究者番号:20748305

(3)連携研究者

(4)研究協力者

小林 孝彰 (KOBAYASHI Takaaki)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所・地盤研究領域・動土質研究グループ・研究官

近藤 明彦 (KONDO Akihiko)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所・地震防災研究領域・耐震構造研究グループ・研究官

小濱 英司 (KOHAMA Eiji)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所・地震防災研究領域・耐震構造研究グループ・グループ長

Richard J. Bathurst

Port and Airport Research Institute・Visiting Research Fellow. GeoEngineering Centre at Queen 's-RMC, Royal Military College of Canada・Civil Engineering Department・Professor .