

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18117

研究課題名(和文) X線CTによる破砕進行メカニズムの解明と破砕性地盤の工学的分類

研究課題名(英文) Clarification of particle crushing mechanism by X-ray CT scanning and classification of crushable soils

研究代表者

松村 聡 (Matsumura, Satoshi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：20748305

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、破砕性地盤の力学挙動に着目し、微視的な構成粒子レベルの破砕現象が巨視的な地盤変形にどのように寄与するのかを、X線CTスキャンにより得られる画像情報から解明することを目的としている。さらに、原位置の外力や自然環境条件下で引き起こされる多様な破砕形態に基づく新たな破砕性評価手法の確立と、多様な破砕性材料を工学的な観点から分類することを目標としている。

凍結融解作用や乾湿繰返しによる粒子破砕現象の観察と、それに伴う地盤の力学特性の変化を評価することを目的として、X線CTスキャナに設置した状態で、供試体の温度制御が可能な一面せん断試験装置を開発し、種々の試料について試験を実施した。

研究成果の概要(英文)：A variety of crushable soils deposits in Japan. Particles of the crushable soils result in crushing not only due to stresses of compression and shear but also by exposed to temperature change causing freeze-thaw and dry-wet-cycle. In this study, in order to observe the particle crushing due to temperature change, a temperature-controlled box shear test apparatus which can be used inside an X-ray CT scanner was developed. Throughout all the testing procedures, i.e., temperature control, compression and shear, the specimen can be scanned at different moments and the same position in the scanner. A set of images taken is available to observe individual crushing particles and also to quantify deformation behavior of specimens by image analysis. By using the apparatus for some crushable soils, the study showed how the soils caused particle crushing due to a temperature change with scanned images and a change of mechanical properties.

研究分野：地盤工学

キーワード：粒子破砕 温度履歴 X線CTスキャン 一面せん断

1. 研究開始当初の背景

日本には、未風化火山灰土、未固結な石灰岩質地盤や風化花崗岩の一種であるまさ土等、特殊土と称される構成粒子の脆弱な“破碎性土”が広範囲に堆積している。近年の地震、豪雨による自然災害において、破碎性土で形成された地盤の被害が顕在化していることを鑑みると、破碎性地盤を対象とした工学研究は今後さらに重要となる。

これまで破碎性土の力学特性を明らかにしようとした研究が数多く実施されてきたが、微視的な粒子の破碎現象がどのように発生し、それが地盤の巨視的な変形にどう寄与しているのか未だ良くわかっていない。既往研究では、破碎性土の力学特性を評価するために、破碎前後の粒度変化に着目するものが多いが、これによって破碎性を簡便な指標で評価できる一方、多様な土質、外力や環境条件の下では、その破碎性状と力学挙動との関連が異なることが考えられる。多様な地盤材料を対象として、多様な破碎要因で発生する粒子破碎現象を観察し、力学特性との関係を示すことができれば工学的に有用である。

2. 研究の目的

本研究は、破碎性地盤の力学挙動に注目し、微視的な構成粒子レベルの破碎現象が巨視的な地盤変形にどのように寄与するのかを、X線CTにより得られる画像情報から解明することを目的としている。さらに、原位置の外力および自然環境条件下で引き起こされる多様な破碎形態に基づく新たな破碎性評価手法を確立するとともに、複数の破碎性材料を工学的な観点から分類することを最終目標としている。ここで、本研究では、破碎要因となり得る自然環境条件として、凍結融解作用や乾湿繰返しを伴う温度環境条件、波浪のような繰返し外力に着目した。

本研究では、上記を達成するために、供試体の温度制御が可能で一面せん断試験装置を開発した。本装置は、試験中に様々な要因で発生する粒子破碎現象を可視化することを目的として、供試体への温度履歴の载荷、一次元圧縮および一面せん断载荷の一連の過程をX線CTスキャナ内で行うことができる。本研究では、試験装置の温度制御やX線CTスキャンによる撮影に関する性能試験を実施し、各イベントにおいて破碎現象を可視化できることを確認した。また、得られたX線CT画像をもとに、供試体の変形特性や破碎粒子を明らかにすることを目的として、供試体の変位場の計算する画像解析プログラムや、個々の粒子を特定し、各試験過程で変位した粒子を追跡する画像解析プログラムを作成した。

本研究では、本試験条件下で破碎性を示す岩ずり、鉄鋼スラグを用いた浚渫土人工石のほか、非破碎性の珪砂を用いて、各種試験を実施した。

3. 研究の方法

1) X線CT用温度可変型一面せん断試験装置の開発

図1および図2は、新たに開発した一面せん断試験装置の概略図およびせん断箱を示している。本試験装置をX線CTスキャナ内の回転テーブルに搭載して、任意の過程でX線CTスキャンが可能である。装置上部より空圧シリンダーあるいは電動モーターを介して任意の鉛直荷重・変位を与えることができ、定圧および定体積条件のいずれの条件でも一面せん断試験が可能である。せん断箱は、金属製と比べてX線が透過しやすいアクリル製で作製されており、供試体の寸法は直径60mm、高さ20mmである。せん断箱には、供試体に対する給排水のための通水経路および供試体の冷却・加熱のための不凍水循環経路がそれぞれ独立に設けられている。試験時に測定可能な項目は、せん断荷重・変位、鉛直荷重・変位および供試体上端面付近の温度である。

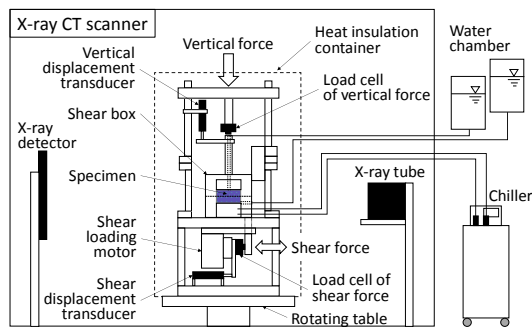


図1 X線CTスキャナに設置された一面せん断試験装置

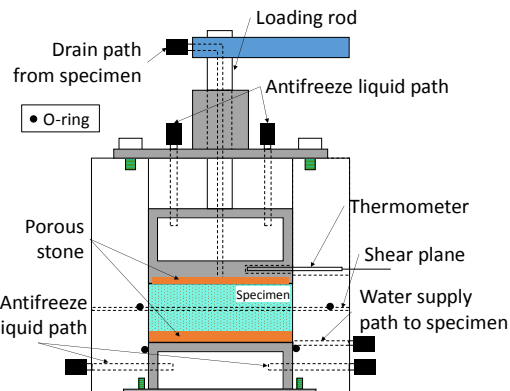


図2 せん断箱

2) 凍結融解地盤の一面せん断試験方法

X線CTスキャナ内に設置した一面せん断試験装置のせん断箱に供試体を作製する(図3左)。せん断箱下部と恒温循環槽を接続した

後、一面せん断試験装置を断熱箱で覆う（図3中）。その後、断熱箱内の温度を0から1°Cに冷却する。断熱箱内の温度が十分に一定となったことを確認して、恒温循環槽を介してマイナス30°Cの不凍液をせん断箱下部に循環させる。供試体が凍結した後、不凍液の循環を停止し、断熱箱を取り外し、室温（20°C）下で供試体を融解させる。融解後、鉛直载荷装置を設置し、鉛直方向の圧密と、圧密後にせん断载荷を実施する（図3右）。このとき、凍結融解の前後および所定のせん断変位毎にX線CTスキャンを実施する。



図3 凍結融解地盤の一面せん断試験

2) 3次元デジタル画像相関法による変位場の可視化

X線CT画像から、供試体の3次元変位場を計算する画像解析手法として、3次元デジタル画像相関法による画像解析プログラムを作成した。図4のように、デジタル画像相関法を2次元画像で説明すると、本手法は変位前に撮影された1枚の画像中のある注目領域が、変位後に撮影された画像中のどこに移動したかを探索するものである。この注目領域とは、画像中任意の位置でxピクセル×yピクセルで囲まれた領域（テンプレート）であり、変位前の注目領域の輝度パターンと最も良く似た輝度パターンの領域を変位後の画像中から探索する。X線CT画像は、図5に示されるように複数枚の2次元断層画像を積み重ねることによって、3次元画像を構成している。デジタル画像相関法を3次元に拡張する場合には、xピクセル×yピクセル×zピクセルの直方体を注目領域として、変位後の3次元画像から最も良く似た輝度パターンをもつ直方体領域を探索すれば良い。

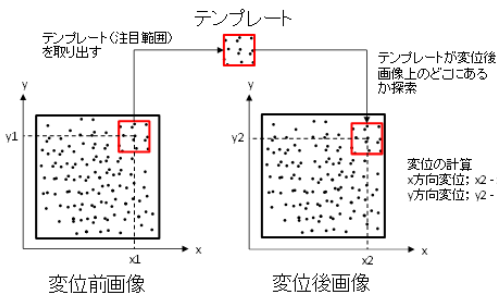


図4 2次元デジタル画像相関法のイメージ

CT image of original material

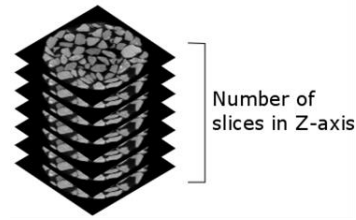


図5 3次元断層画像のイメージ

3) セグメント化された粒子の追跡

粒子追跡法は、供試体の変形前後に撮影されたX線CT画像中の個々の粒子を識別した後、変形前後の画像中で同一の粒子を探索し、供試体の変形によって発生した個々の粒子の変位量や回転量などを求めるものである。本解析は、個々の粒子を識別する「セグメント化」と変形前後で同一粒子を探索する「粒子追跡」の2つの処理が重要となる。

セグメント化では、図6左に示されるようにX線CT画像中で異なると考えられる2つの粒子を、粒子接触点で分割し、それぞれの粒子に番号を付す、いわゆるラベリングを行う（図6右）。このようにセグメント化を行うことによって、個々の粒子の座標や形状などのパラメータを算出することができる。図7は、礫の三軸供試体についてセグメント化、粒子追跡を行った例である。粒子追跡では、変形前後の2組のX線CT画像よりセグメント化された個々の粒子の座標および体積の値を使って、変形前後で近傍に存在し、体積が最も近い粒子を同一粒子とみなし、変形前後のそれぞれの座標から個々の粒子の変位量を求めることが可能である。

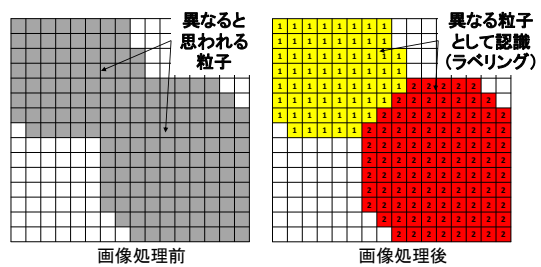


図6 粒子のセグメント化

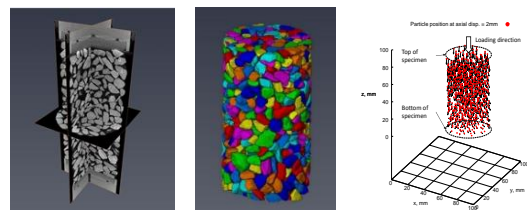


図7 (左) X線CT画像, (中) セグメント化, (右) 三軸圧縮での各粒子の変位ベクトル例

4. 研究成果

1) X線CT用温度可変型一面せん断試験装置の性能試験

本研究で作製した一面せん断試験装置を用いて、凍結融解試験およびそれに続く一面せん断試験を実施した。

図8は、試験に用いた相馬珪砂3号である。本試料は、本試験条件の下で非破碎性を示す。粒径は1.18mm~2.0mmの単一粒径で、土粒子密度2632kg/m³、最大乾燥密度1659kg/m³、最小乾燥密度1461kg/m³である。本試料を水中落下法により相対密度約23.5%の緩い地盤供試体を作製した。



図8 相馬珪砂3号

図9は、供試体作製後、凍結融解試験時のせん断箱下部の温度履歴を示している。断熱箱内を約1度に冷却した後、せん断箱下部にマイナス30度の不凍液を循環して、供試体を凍結させた。せん断箱上部の温度計がマイナス5度を示したところで、不凍液循環を停止し、供試体を融解させた。予備試験において、不凍液循環中に供試体を取り出し、供試体が凍結していることを確認した(図10)。

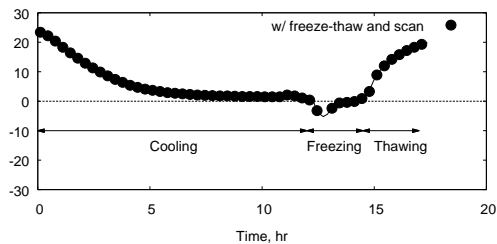
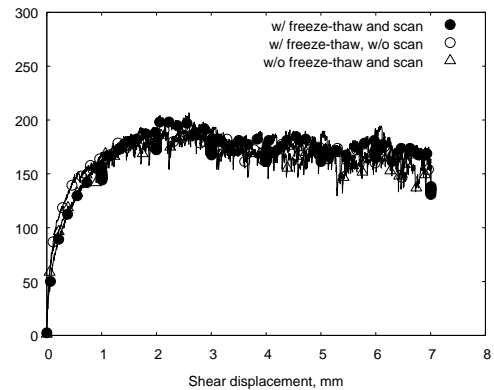


図9 凍結融解試験の温度履歴

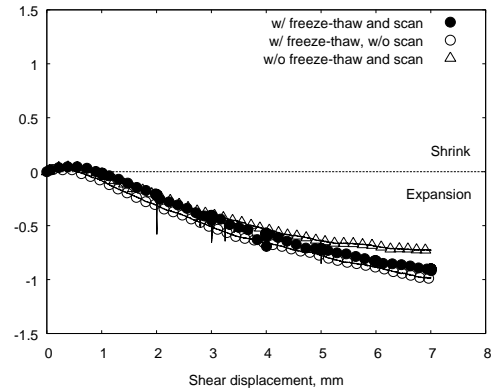


図10 凍結された供試体

図11は、一面せん断試験の結果を示している。図には、凍結融解作用を受けていない供試体の結果、凍結融解作用を受けたがX線CTスキャンを実施していない供試体の結果を併せて示した。図より、凍結融解履歴の有無によらず、せん断特性に大きな違いは見られず、本試料のように細粒分を含まないクリーンな砂質土では凍結融解の影響を受けないという既往の知見に一致する結果を得た。



a) せん断変位-せん断荷重の関係



b) せん断変位-鉛直変位の関係

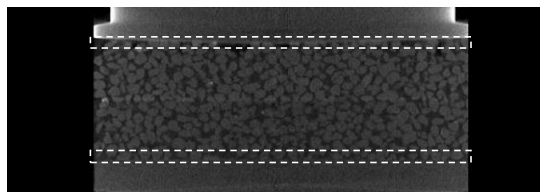
図11 一面せん断試験結果

図12は、せん断変位1mm毎に荷重を停止し、X線CTスキャンした画像のうち、せん断変位0mmおよび7mm時の供試体中央部の鉛直断面画像を示している。図より、各粒子の位置や形状が目視で確認できる程度に鮮明に可視化されていることがわかる。

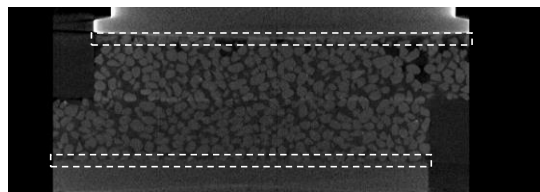
せん断中に発生した供試体の変位場を観察するために、せん断変位1mm毎に撮影されたせん断過程のX線CT画像を対象として、3次元デジタル画像相関法により各変位を計算した。図13は、供試体全体の3次元変位ベクトルと、供試体中央の鉛直断面の2次元変位ベクトルを抽出した結果を示している。本一面せん断試験では、せん断箱上部が固定され、下部にせん断方向の強制変位を与える荷重方法となっているため、せん断箱下部で最も大きなせん断変位が発生し、上部に向か

ってせん断変位がほぼ一様に小さくなる様子がわかる。

ここで計算された変位が適当な値を示していることを確認するために、図 14 では、せん断箱下部にあるポーラスストーンおよびせん断箱上部にあるトップキャップを注目領域（図 12 白点線を参照）として、本解析で計算されたせん断・鉛直変位と変位計の計測結果を比較した。ここで、せん断箱下部に取り付けられたポーラスストーン部分は、せん断箱下部で計測されるせん断変位と等しい変位量を、せん断箱上部に取り付けられたトップキャップは鉛直载荷ロッド（図 2, 参照）で計測される鉛直変位と等しい変位量を示すと考えられる。図より、解析による変位量がわずかに小さいものの、せん断過程のせん断方向と鉛直方向の変位量、またこれらの関係を本画像解析手法により算出できていることがわかる。

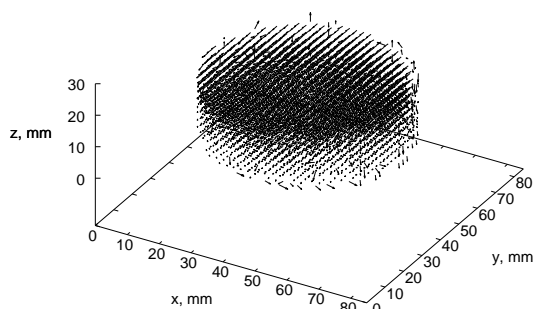


a) せん断変位 0mm

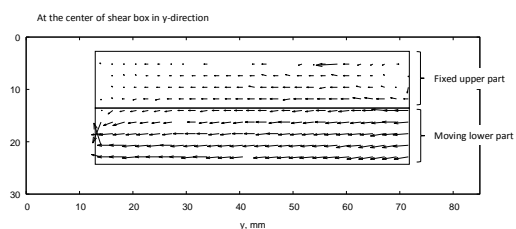


b) せん断変位 7mm

図 12 せん断時の X 線 CT 画像



a) 3次元表示



b) 2次元表示

図 13 画像解析による変位場の可視化

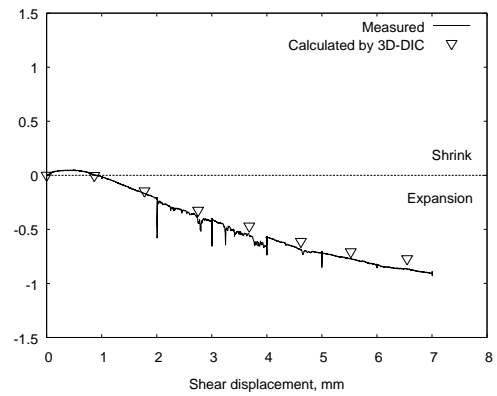


図 14 画像解析と計測による変位の比較

2) 各地盤材料における粒子破碎の観察

近年、浚渫土の減容化や製鋼過程で発生した副産物である鉄鋼スラグの有効利用を目的として、浚渫土と鉄鋼スラグ他を混合し、人工石材として沿岸域で利用することがある。この時、沿岸域という特殊な利用環境（波浪による繰返し荷重、乾湿繰返しなどの温度履歴）に加えて、港湾構造物の長期供用の必要性を鑑みると、多様な条件下での力学特性の変化を評価することが重要な課題である。

本研究では、鉄鋼スラグ水和固化体を用いた人工石材（以下、浚渫土人工石という）を破碎し、粒径 2mm~4.75mm に粒度調整した粒状材料（図 15）を用いて、所定の温度履歴（凍結融解履歴、乾湿繰返し）を与えた本試料について一面せん断試験および各過程での X 線 CT スキャンによる供試体内部の観察を行った。また、比較試料として、同粒径幅を持つ岩ずり（図 16）についても同様の試験を行った。以下には、一面せん断時に観察された粒子破碎現象の例を示す。

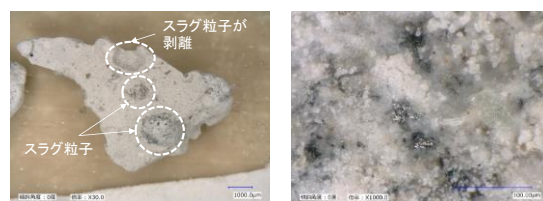


図 15 浚渫土人工石
(右側は拡大率 1000 倍の光学顕微鏡画像)

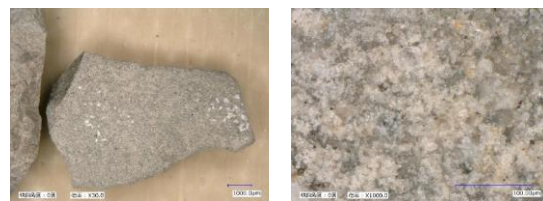
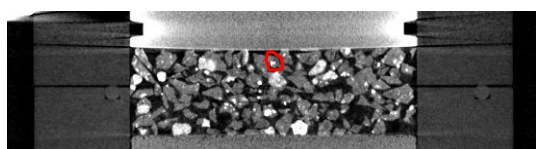
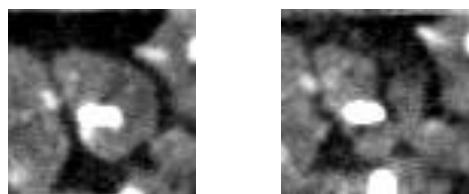


図 16 岩ずり
(右側は拡大率 1000 倍の光学顕微鏡画像)

図 17, 18 は、一面せん断試験の所定のせん断変位時に撮影した各試料の鉛直断層画像を示している。図には、本撮影により確認された破碎粒子を拡大表示したものを併せて示している。この時、浚渫土人工石は、主に高密度のスラグ粒子（画像中、白く表示される粒子）と低密度の浚渫土（スラグを覆う灰色部）が混合・固化されたものであるが、図より高密度で硬いスラグ部は破碎されず、スラグとその周囲を覆う浚渫土との界面付近で破碎が発生する。一方、粒子内で材料密度が比較的一様な岩ずりの場合には、破碎面が特定の位置に集中するような破碎形態ではなく、粒子内部で割裂するように破碎を引き起こしている。このように、同じ外力条件下であっても、地盤材料の違いによって破碎性状は異なるが、X線CTスキャンを利用することで、このような破碎性状の違いを観察することができる。

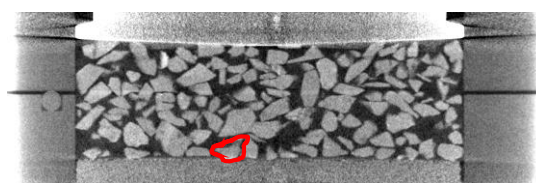


a) 鉛直断層画像
(供試体全体, せん断変位 0mm)

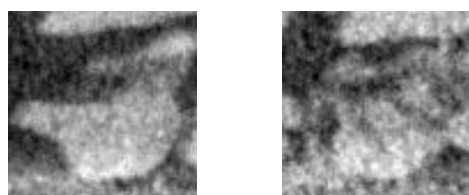


b) せん断変位 0mm c) せん断変位 3.5mm
(図 17a のハイライト粒子)

図 17 一面せん断時の浚渫土人工石の観察



a) 鉛直断層画像
(供試体全体, せん断変位 0mm)

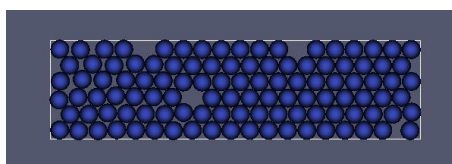


b) せん断変位 0mm c) せん断変位 5mm
(図 18a のハイライト粒子)

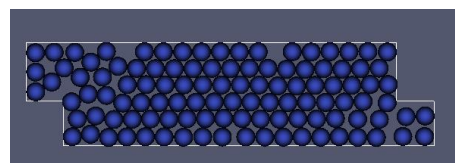
図 18 一面せん断時の岩ずりの観察

3) 破碎性状に基づく数値解析モデル

破碎性状の違いは、前述のような X 線 CT スキャンによる可視化情報と力学試験結果を関連付けることによって理解されるが、破碎性地盤の合理的な力学特性評価のためには、そのような破碎性状の違いをモデルとして組み込んだ数値解析の試みが必要と考えられる。そこで本研究では、前述までの一面せん断試験の再現解析手法として、個別要素解析コードを新たに作成した（図 19 はせん断変位 0 および 7mm 時）。個別要素法は、個々の粒子の挙動を解析する手法で、破碎前の一つの粒子を複数の小粒子の凝集体としてモデル化し、破碎強度を設定すれば、粒子の破碎現象の再現が可能である。これにより本研究で得られた X 線 CT スキャンによる観察結果に近い、よりイメージベースな破碎現象のモデル化が可能となると考えられ、引き続き数値解析手法の開発に取り組んでいる。



a) せん断変位 0mm



b) せん断変位 7mm

図 19 一面せん断シミュレーション

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

1. 栗田修平, 松村聡, 大塚悟: 圧縮・せん断過程における粒子破碎の可視化, 第 52 回地盤工学研究発表会, 論文番号 0209, pp. 415-416, 2017.
2. 松村聡, 塩原祐希, 水谷崇亮: X 線 CT スキャンのための温度制御型一面せん断試験機の開発 (その 1), 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018(in press).
3. 塩原祐希, 松村聡, 水谷崇亮: X 線 CT スキャンのための温度制御型一面せん断試験機の開発 (その 2), 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018(in press).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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