

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04349

研究課題名(和文) 一面せん断試験による砂の定常状態の評価

研究課題名(英文) Evaluation of steady-state of sands using shear box test

研究代表者

吉嶺 充俊 (Yoshimine, Mitsutoshi)

東京都立大学・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：80251338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：一面せん断試験では供試体の変形が著しく不均一なため、普通の方法ではひずみや密度変化は測定できない。本研究では一面せん断試験における非常に単純な供試体の密度分布を仮定することにより、定常状態における砂の密度とせん断強度の関係を求めるための手法を提案し、その妥当性を多様な砂に関する多くの一面せん断試験結果で検証した。X線CTスキャン試験や三軸せん断試験および単純せん断試験を平行して行い、提案手法と比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

定常状態における土の密度と有効応力の関係を正確に測定することは、液状化強度問題や土の変形特性予測で重要である。室内要素試験による砂の定常状態の評価には、供試体変形の均一性の観点から非排水三軸圧縮試験が一般的に用いられている。しかし、一面せん断試験の方が圧倒的に実験が簡易かつ短時間で経済的に行うことができるから、もし一面せん断試験で砂の定常状態を正確に測定することができれば大変に便利である。

研究成果の概要(英文)：It is ordinary assume that the shear box test is not suitable for measuring strain and density of sand because of the non-uniform deformation of the specimen. I assumed simple distribution of density in the sample at steady state, and using this assumption, I proposed a method for evaluating density-strength relationship at steady-state of sands. The validity of the method was confirmed from numerous shear box tests on various sands. X ray CT tests, triaxial tests as well as simple shear tests were done for the comparison purposes.

研究分野：地盤工学

キーワード：一面せん断試験 砂 定常状態

### 1. 研究開始当初の背景

土がせん断変形して変形が大きくなっていくと、ついには有効応力が一定となり変形が継続する状態に至る。この状態は定常状態あるいは限界状態と呼ばれ、定常状態での土の密度と有効応力状態の間にはその土に固有の1対1の相関がある。定常状態における土の密度と有効応力の関係は、砂質土の液化強度問題など、土の大変形・流動時の強度特性を捉える際に重要であるのみならず、幅広いひずみレベルでの土の変形特性を予測するための応力ひずみ関係のモデル化(限界状態モデル)でも主要なモデルパラメータとして使われるので、実験によって各種の土の定常状態における土の密度と有効応力の関係を正確に測定することは工学的な意義が非常に大きい。室内要素試験による砂の定常状態の評価には、供試体変形の均一性の観点から非排水三軸圧縮試験が一般的に用いられている。しかし、一面せん断試験の方が圧倒的に実験が簡易かつ短時間で経済的に行うことができるから、もし一面せん断試験で砂の定常状態を正確に測定することができれば大変に便利である。一面せん断試験の問題点は、供試体の変形がせん断面付近に集中してせん断帯を形成するため、実際にせん断変形してせん断抵抗を発揮しているせん断帯内の土の密度が直接測定できないことである。X線CTスキャンなどの特殊な方法を用いれば供試体の局所密度を測定することも可能であるが、それでは経済性・簡便性といった一面せん断試験の長所が完全に失われてしまうから、標準的な装置で問題を解決する方法を見つけ出す必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、特別な装置や実験技術を必要とせずに、一面せん断試験装置によって砂の定常状態を測定する信頼性のある方法を提案することである。とくに、特別な装置や実験技術を必要とせずに、通常の一般的な一面せん断試験装置だけによって、他の方法よりもはるかに経済的かつ簡便にこれを実現することに本研究の大きな有用性と独自性が存在する。直接的には砂の大変形下での定常状態評価を目的としているが、提案しようとする供試体変形局所化の評価方法は小変形下での応力ひずみ関係を一面せん断試験で把握する方法につなげることも目指す。

### 3. 研究の方法

本研究を計画するにあたり、若干の予備的な研究を実施した。その概要をまとめると以下のとおりである。試験供試体について次のような非常に単純な密度不均一状態を仮定する。全体の体積が  $V_a$  でその平均的な密度が  $\rho_a = m/V_a$  であるとき、変形は体積が  $V_b$  のせん断帯に集中していて、せん断帯の中の密度は  $V_b$  で均一であると仮定する。また、せん断帯以外の体積  $V_a - V_b$  の部分では密度が初期値  $\rho_c$  に等しく保たれていると仮定すると  $\rho_c = -(V_b/V_a)(\rho_a - \rho_c) + \rho_b$  という関係がある。砂質土のせん断帯の幅  $H_b$  は拘束圧や初期密度にあまりよらずに平均粒径の10~20倍程度と言われているのでせん断帯の体積  $V_b = A H_b$  も一定とみなす。すると実験から直接測定可能な  $V_a(\rho_a - \rho_c)$  と  $\rho_c$  の関係をプロットすれば、それは切片が  $\rho_b$ 、傾きが  $-1/V_b$  の直線となるはずであるから、直接は測定できないせん断帯の密度  $\rho_b$ 、体積  $V_b$  がわかることになる。図1は豊浦砂に関する上載圧  $\sigma = 200\text{kPa}$  の実験結果について定常状態における  $V_a(\rho_a - \rho_c)$  と  $\rho_c$  の関係をプロットしたものであるが、幅広い初期密度  $\rho_c$  条件で両者間にはほぼ直線関係があり、しかも供試体高さが3倍異なり体積  $V_a$  も3倍異なる条件でもおよそ同一の直線関係となることから、上記のような非常に単純な密度不均一状態の仮定であっても、ある程度に現実を反映していると考えられる。図1と同様のデータ整理を他の上載圧条件の試験についても行ってせん断帯の密度  $\rho_b$  を推定し、最終的に定常状態密度と拘束圧の相関を表す定常状態線をプロットしたものが図2である。

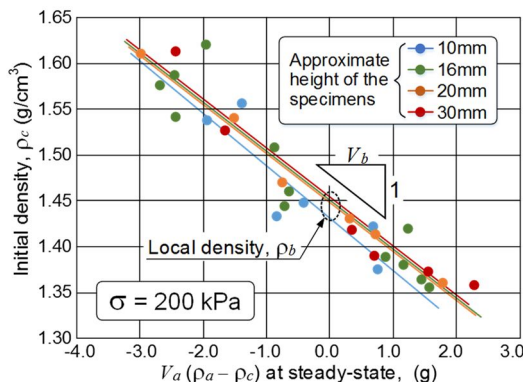


図1 初期密度  $\rho_c$  と  $V_a(\rho_a - \rho_c)$  の関係

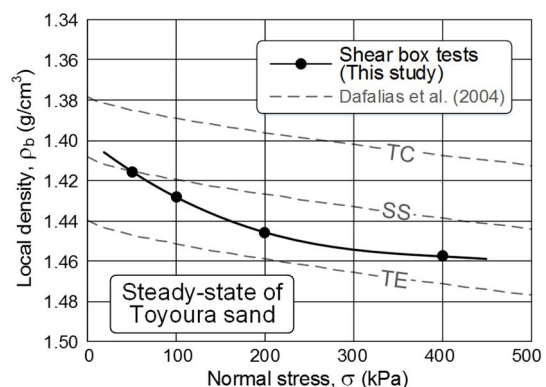


図2 定常状態における密度と拘束圧の関係

本研究では、上記の予備研究で考案した手法をベースとして、信頼性と実用性の高い定常状態の評価手法を提案していく。まず、前述のようにせん断帯の幅は試料の平均粒径と相関していることから、予備研究で考案したような手法が多様な粒度分布の試料について有効であるか検証する必要がある。そこで平均粒径が0.1mm~2mm程度の少なくとも3種類の珪砂について予備研究と同様に様々な初期密度、供試体高さ、拘束圧条件の組み合わせで一面せん断試験を行い、定常

状態密度評価の高度化と信頼性向上を図る。特に試料の粒度からせん断帯体積を推定できれば図 1 の直線の傾きがわかるので、より少ない実験回数でも精度よく定常状態密度を推定できるようになることが期待される。これとあわせて、せん断後の供試体断面を観察し、供試体の不均一な変形におよぼす試料の粒径、供試体の高さ、密度、拘束圧の影響が仮定したものと定性的に矛盾していないかを調べる。10 回程度の実験ケースについては X 線 CT スキャンによってせん断後の供試体密度分布を測定し、提案手法で求めた密度分布との整合性を検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 定体積一面せん断試験による砂の定常状態密度の推定 (主に 2018 年度)

一面せん断試験では供試体の変形が著しく不均一なため、普通の方法ではひずみや密度変化は測定できない。予備実験において定圧一面せん断試験で砂の定常状態を観察したところ、後述の図 7 のように同一の拘束圧に対して供試体の全体密度は大きな幅を持ち、定常状態に達しているせん断帯の局所的な密度の推定には特別な工夫(「3. 研究の方法」に記載)が必要であった。一方、定体積試験であれば全体密度は変化しないので、局所的密度変化も小さいと考えられる。そこで本研究では定体積一面せん断試験で砂の定常状態を観察してみた。実験には乾燥した豊浦砂、および豊浦砂に重量率 5% のマイカを混合した試料の 2 種類を用いた。マイカのふり分け試験による粒度は豊浦砂とほぼ同じである。供試体の水平断面は直径 60mm の円形であり、供試体の高さ  $H$  は約 20mm を基本とするが、 $H \sim 10\text{mm}$  および  $30\text{mm}$  の試験も行った。

図 3 および図 4 に豊浦砂の実験結果の代表例を示した。図 5 と図 6 に初期拘束圧や供試体高さを様々に設定して豊浦砂を定圧せん断したときの定常状態における密度と拘束圧の関係のプロットした。同じ試料と試験装置を用いた定圧試験で観察される定常状態密度は図 7 に示すように初期密度や供試体高さの影響を非常に大きく受けているのに対して、定体積試験では定常状態拘束圧に対応した密度が定圧試験に比べてはるかに狭い範囲に収束し、初期拘束圧や供試体高さの影響もほとんどないと言える。

豊浦砂にマイカを混合すると圧縮性が增加して定常状態線の傾斜が大きくなり、実験条件が及ぼす定常状態への影響が判別しやすくなると考えられる。そこでマイカ混じり豊浦砂の定体積試験を実施して観察された定常状態を図 8 にプロットした。各初期拘束圧ごとの定常状態線を引き、初期拘束圧と定常状態拘束圧が等しくなる状態を図 8 の印のように特定すれば、ここではダイレタンスが小さく、密度の局所変化も少ないと考えられるので、図 8 に示すようなせん断帯内部の密度に基づいた定常状態線を推定することができるだろう。

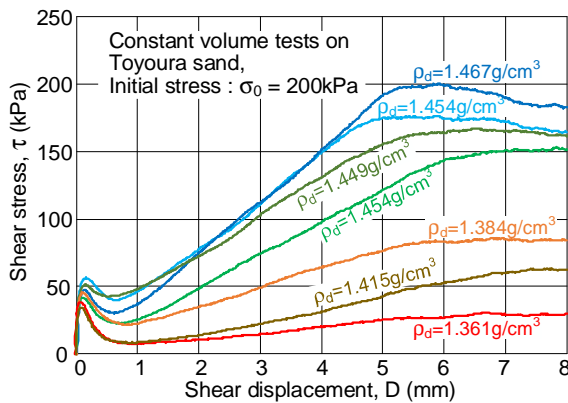


図 3 せん断応力-せん断変位関係の代表例

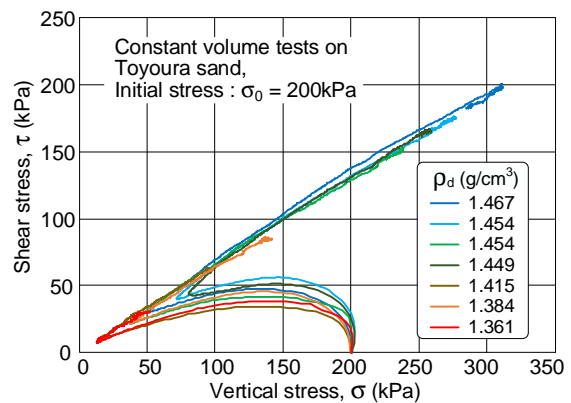


図 4 せん断応力-鉛直応力関係の代表例

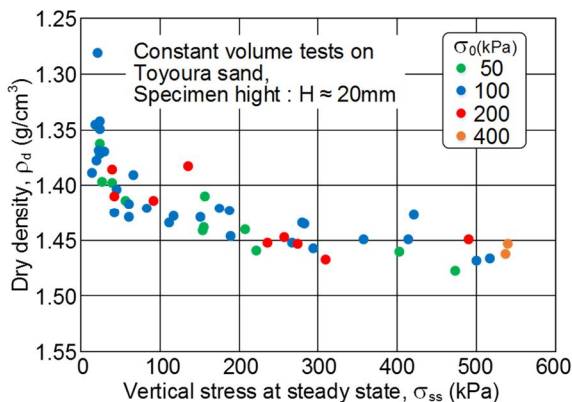


図 5 豊浦砂の定常状態 ( $\sigma_0=50\sim 400\text{kPa}$ )

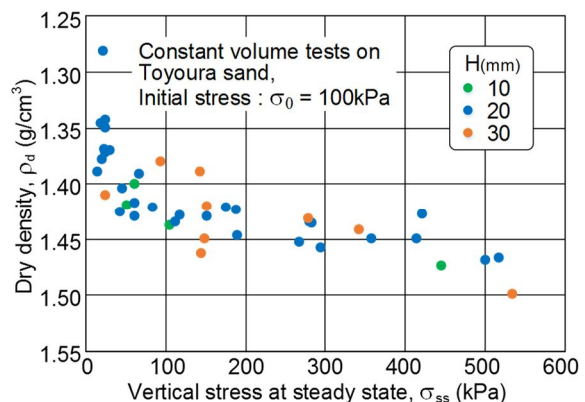


図 6 豊浦砂の定常状態 ( $H \sim 10\sim 30\text{mm}$ )

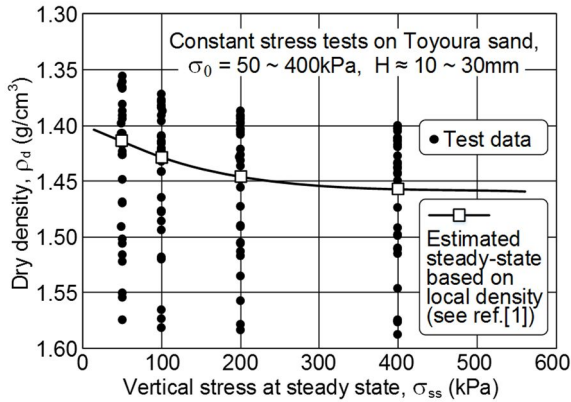


図7 定圧試験[1]での豊浦砂の定常状態

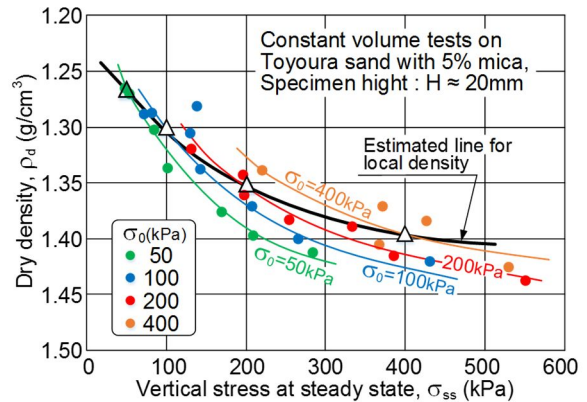


図8 マイカ混じり豊浦砂の定常状態

(2)定圧一面せん断試験によるマイカ混合砂の定常状態の評価（主に2019年度）  
 マイカ混じり砂を実験対象として定圧一面せん断試験を行った。詳細は省略するが、図1・2に示した豊浦砂の実験整理方法と同様に定常状態を合理的に評価することができた。

(3) 様々な粒径を持つ砂の定圧一面せん断試験におけるせん断帯の大きさや密度の推定  
 実験には粒径の異なる4種類の乾燥した飯豊珪砂(4号、5号、6号、7号)を用いた。垂直拘束圧条件は $\sigma = 200\text{kPa}$ とし、幅広い密度条件で定圧一面せん断試験を実施した。  
 実験結果を図9、10に示す。図10からは拘束圧 $\sigma$ が同一でも、供試体質量 $m$ を全体積 $V_a$ で除して求めた全体密度 $\rho_a$ の定常状態での値は大きくばらついてしまうことがわかる。

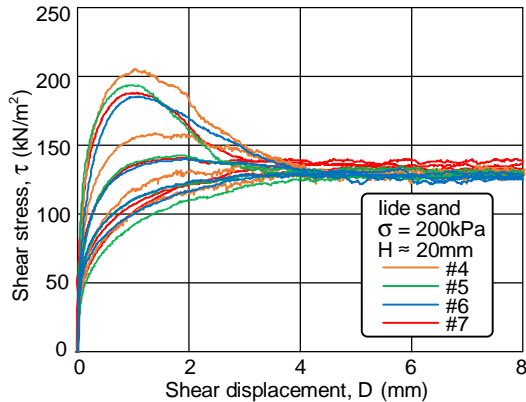


図9 せん断応力 $\tau$ と変位 $D$ の関係

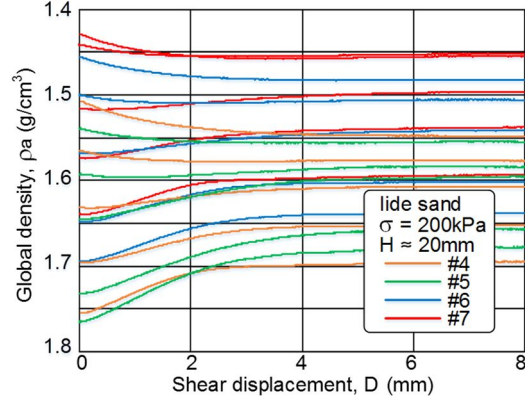


図10 供試体平均密度 $\rho_a$ と変位 $D$ の関係

図11は定常状態における $V_a(\rho_a - \rho_c)$ と $\rho_c$ の関係をプロットし2次曲線で近似したものである。この図から推定される各試料の定常状態密度は相対密度にして $D_r = -1 \sim 5\%$ である。  
 このようにして定常状態密度 $\rho_b$ が推定できれば、定常状態におけるせん断帯の体積 $V_b = V_a(\rho_a - \rho_c) / (\rho_b - \rho_c)$ を求めることができる。図12は、各試験の $V_b$ からせん断帯の平均厚さ $H_b = V_b / A$ を計算し、さらにそれを各試料の平均粒径で除した値 $H_b / D_{50}$ をプロットしたものである。

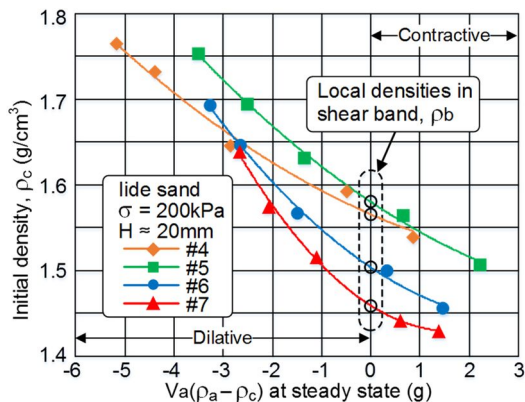


図11 定常状態におけるせん断帯密度 $\rho_b$ の推定

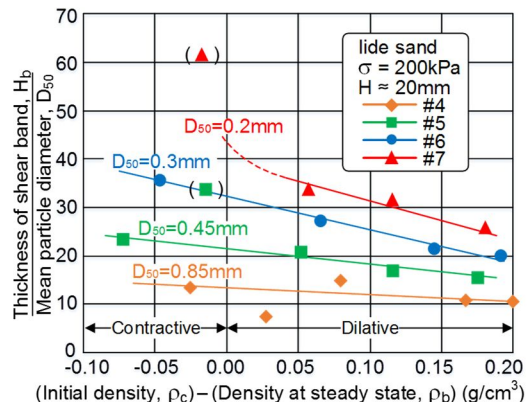


図12 せん断帯幅 $H_b$ の推定

上述の方法で求めた定常状態での平均的なせん断帯体積  $V_b$  やせん断帯幅  $H_b$  が定常状態に限らずせん断初期から一定であると大胆に仮定すれば、せん断過程のせん断帯密度  $\rho_b = (V_a/V_b)(\rho_a - \rho_c) + \rho_c$  の推移や、せん断変位  $D$  の時の局所ひずみ  $\gamma = D/H_b$  が求まる。図 13 はこのようにして図 9 に対応する応力-ひずみ曲線を描いたものである。また、図 14 は図 10 に対応するせん断帯内の密度  $\rho_b$  の推移をプロットしたものである。これらの図から、定常状態に至るためには 60% 程度のせん断ひずみを要していることが推定される。また、このようなデータ処理をすれば各試料ごとに定常状態密度がひとつに収束するのは当然ではあるが、図 10 に比べて図 14 のようなダイランシー特性は常識的な砂の挙動をよく表していると言えよう。

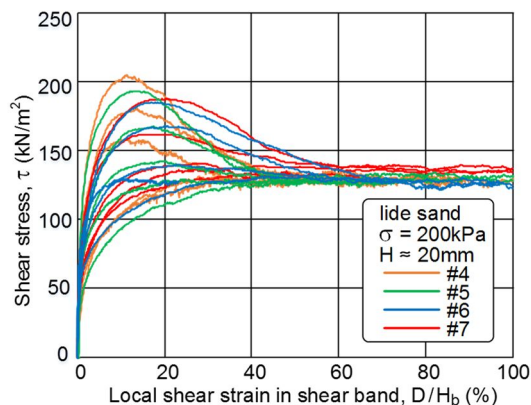


図 13 せん断応力  $\tau$  とせん断帯ひずみ  $D/H_b$

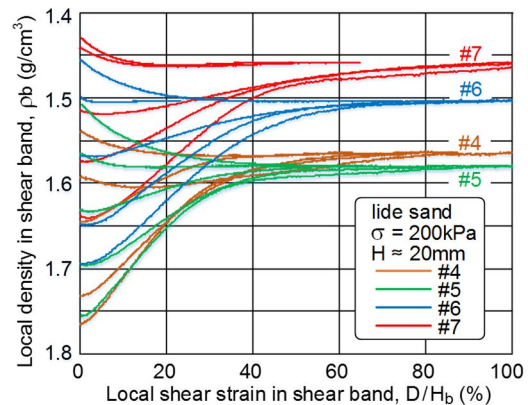


図 14 せん断帯密度  $\rho_b$  とせん断帯ひずみ  $D/H_b$

#### (4) X線CTスキャンによるせん断帯の観察 (主に2020年度)

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)が所有するX線CTスキャン装置を使用して一面せん断試験供試体のせん断帯の観察を行った。試料は飯豊珪砂4・5・6・7号とし、相対密度が約80%の密詰供試体に対してせん断前とせん断後(せん断変位8mm)にスキャンを行った。せん断箱は新たに作成したアクリル製のものである。

図15はX線CTスキャン断面画像の一例(飯豊珪砂7号、せん断後)である。グレースケール画像の輝度が高い部分は密度が高いことを表している。初期密度が大きな供試体なのでダイランシーは膨張的であり、輝度の低い部分(黒っぽい部分)がせん断帯を示していると考えられる。図15より、上下せん断箱の水平境界面付近にレンズ形に2枚のせん断帯が形成されていることが見て取れる。これとは別にせん断箱端部から引き側せん断箱内部に向かって水平面から約30°の角度で副次的なせん断帯が形成されている。

このようにX線CTスキャン断面画像の目視観察により定性的なせん断帯の把握は可能であるが、例えばせん断帯の体積や厚さを定量的に把握しようとするれば、単に密度(画素の輝度)だけでは適切に判定することはできず、領域の連続性などを加味した画像解析が必要であろう。また、副次的なせん断帯はせん断変位ともなって徐々に位置を変えながら発達しているとも考えられ、必ずしも定常状態には達していない可能性もあり、問題を複雑にしている。そのような理由で、X線CTスキャンデータの定量的な解析については本研究の期間後に持ち越されたと言わざるを得ない。

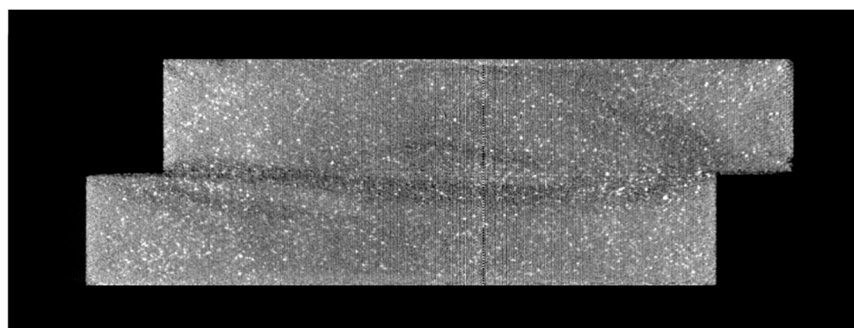


図 15 X線CTスキャン画像の一例

#### (5) 三軸圧縮試験・三軸伸張試験・単純せん断試験 (2018~2020年度)

一面せん断試験による定常状態評価を他の試験方法によるものと比較するために実施した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 横倉恵美・吉嶺充俊
2. 発表標題 定圧一面せん断試験によるマイカ混合砂の定常状態の評価
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高杉宥也・吉嶺充俊
2. 発表標題 粒径が異なる砂の一面せん断試験による定常状態評価
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鹿又善恵・富谷祐介・吉嶺充俊
2. 発表標題 単純せん断と三軸圧縮せん断における砂の定常状態の比較
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鹿又善恵・吉嶺充俊
2. 発表標題 三軸圧縮・伸張および単純せん断による砂の定常状態
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 吉嶺充俊・高杉宥也
2. 発表標題 様々な粒径を持つ砂の定圧一面せん断試験におけるせん断帯の大きさや密度の推定
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田優莉・山村彩恵・吉嶺充俊
2. 発表標題 粒度分布の異なる飯豊珪砂の非排水せん断特性
3. 学会等名 第15回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横倉恵美・吉嶺充俊
2. 発表標題 定圧一面せん断試験による圧縮性の大きな砂の定常状態の評価
3. 学会等名 第15回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 定体積一面せん断試験による砂の定常状態密度の推定
2. 発表標題 吉嶺充俊・高橋めぐみ
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富谷祐介・水野光揮・吉嶺充俊
2. 発表標題 単純せん断条件における豊浦砂の定常状態
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 横倉恵美・吉嶺充俊
2. 発表標題 定圧一面せん断試験による 定圧一面せん断試験による マイカ混 マイカ混 合砂の定常状態評価 砂の定常状態評価
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2019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

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