

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02230

研究課題名（和文）NINC型計測を導入した第4世代地盤材料変形試験システムの確立

研究課題名（英文）Development of 4G soil testing system with NI-NC measurement

研究代表者

西村 聡（Nishimura, Satoshi）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：70470127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は非貫入（NI）・非接触（NC）型計測に基づく新世代の地盤材料変形試験システムを構築し、研究・実務への適用性・有用性を、実験的・解析的研究により示すことを目的とし、上記システムの基本要素となる個々の技術の開発と改善を行うとともに、幅広い土質を対象にその適用性を検証した。例として、非貫入型のディスク型振動子の実装による微小ひずみ変形時の剛性計測の信頼性を確認するとともに、高度なステレオフォトグラメトリーと画像解析技術の融合により、市販の廉価なデジタルカメラによって0.001%オーダーの変位を三次元的・フルフィールドで安定的に計測することに成功し、これらの土質試験への実装を提案するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の土質変形試験は、動的応答解析に用いる微小ひずみ剛性、掘削等に伴う地盤変形予測に用いる中ひずみ域変形特性、そして崩壊予測や地盤沈下解析に用いる大ひずみ域変形特性の把握と目的をわけて実施されることが多いが、本研究での開発はこれらを一つのパッケージとして同一装置に統合できるものである。また、個々の技術モジュールに使われているハードウェアは極めて廉価である。これらは現行の土質試験の精度・利便性の向上に大きく寄与するとともに、低コストで導入できことから、特に発展途上国の土質試験室において技術の飛躍をもたらす潜在性をもった成果である。

研究成果の概要（英文）：This study developed a suite of new generation techniques involving non-intrusive, non-contacting sensors for measuring various levels of geomaterial deformation in laboratory testing. Among the proposed techniques are disc-shaped piezoelectric sensors for multi-directional shear wave velocity measurements, which can be installed to soil specimens without intrusion, and a new image analysis technique based on high-accuracy stereophotogrammetry and digital image correlation. By combining these, the deformation properties of geomaterials can be characterised from strain of 0.001% to virtually any large strain. To demonstrate the applicability and benefit of the new innovation, a wide range of geomaterials were tested with the proposed techniques in this study.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 室内土質試験 地盤材料 力学特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地盤材料の変形試験は、ごく微小な許容値に対する変形予測が必要な都市地盤工学から、大変形に対する性能設計が要求される防災地盤工学まで、一定以上の重要性を持つ建設プロジェクトで必ず適用される基幹技術である。地中での応力場を再現する‘Hydraulic triaxial cell’の概念は Bishop らによる開発を経て、三軸試験や中空ねじり試験などに適用され、静的変形試験から液状化変形試験まで多岐にわたる変形試験を可能にした。後にこれらの変形試験は高精度局所変位計とともに PC 制御・データ取得の導入により高度化・効率化され、現在に至る。申請者はこれらの技術的ブレイクスルーに基づく試験システムをそれぞれ第 2 世代（1960 年代～）・第 3 世代（1980 年代～）と呼ぶ。現在、例えば日本地盤工学会基準や、国内外の各種基準で前提としているのは第 2～3 世代試験システムである。しかし、第 3 世代の導入は非常に複雑・煩雑な計測ハードを要求するとともに、投資に対して得られる情報量も限られており、先進国の有力な研究機関・企業を超えて広がる傾向を見せていない。

一方で、土質試験の世界では、種々の新しい手法やアイデアの導入の試行が続いている。中でも本研究が着目するのは、この 10 年ほどで種々の萌芽的アイデアが提示されてきた非貫入 (NI) 型の geophysical 計測および非接触 (NC) 型の光学的計測手法であり、これらの原理に基づく (NINC 型と略す) 新技術の統合は地盤材料変形試験をシンプルに、かつ効率化・多情報化 (微小ひずみから大変形まで、供試体局所から全領域まで) するという背反的な便益を同時にもたらす第 4 世代変形試験システムの創造につながる可能性がある。また、用いるハードの簡素化・モジュール化が既に進んでいるため低コスト化が期待でき、世界の多くの実験室に第 2 世代から第 4 世代への直接の飛躍を促すことができる。しかしこの新システムの構築には、単なるハードの開発のみではなく、多様な地盤材料に対して、土質力学・材料力学的な有用性・妥当性の検証が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、非貫入 (NI)・非接触 (NC) 型計測に基づく新世代の地盤材料変形試験システムを構築し、研究・実務への適用性・有用性を、実験的・解析的研究により示すことを目的とした。また、上記システムの基本要素となる個々の技術の開発と改善を行うとともに、幅広い土質を対象にその適用性を検証した。従来の土質変形試験は、動的応答解析に用いる微小ひずみ剛性、掘削等に伴う地盤変形予測に用いる中ひずみ域変形特性、そして崩壊予測や地盤沈下解析に用いる大ひずみ域変形特性の把握と目的をわけて実施されることが多いが、これらを一つのパッケージとしての統合できる試験法として、供試体への貫入が不要な接触型ディスク振動素子による微小ひずみ剛性計測、ケーブル・止水等が不要な画像相関法・三次元ステレオフォトグラメトリーを用いた光学的な小～大ひずみ挙動計測法、および異方弾性理論に基づいた非排水载荷による排水 (有効応力) 剛性パラメタ値の同定手法といった、ハード・ソフトの開発と統合を試みる。具体的には、三軸試験装置を基本的に想定し、上記を実装してその有用性を多様な土質に対して示すことを 3 年の研究期間の目標とした。

3. 研究の方法

研究は以下の項目別に、対応する装置 (ハード)・手法 (ソフト) 開発およびこれらの有効な統合を通して、室内試験における土質変形に関する新しい知見を得るとともに、既往の試験法の問題点・限界点を新たに洗い出した。

(1) 異方弾性理論に基づいた非排水载荷による排水 (有効応力) 剛性パラメタ値の同定：多くの地盤材料はその物性に軸対称異方性を有することに着目し、そのような性質を仮定することで地盤材料の弾性的な微小ひずみ特性を限られたセンサーのみ有する三軸試験から導出する理論を導出した。また、その適用性を異なる塑性・透水性の細粒土に対して検証した。

(2) 画像相関法・三次元ステレオフォトグラメトリーを用いた光学的な小～大ひずみ挙動計測法：市販の一般的なコンパクトデジタルカメラを用いて三軸セル内の試料変形を撮影し、セル壁・セル水による光線屈折効果を補正したうえで、 $10^{-3}\%$ オーダーの変形を三次元的に計測する技術開発を検討した。具体的には、サブピクセル DIC (Digital Image Correlation) -PTV (Particle Tracking Velocimetry) のハイブリッド方式と光線追跡法を用いたステレオフォトグラメトリーを組み合わせた解析法を開発し、入念なキャリブレーションを行うとともに、粘土試料や砂試料の変形観測に対する適用性を実証した。

(3) ディスク振動素子による微小ひずみ剛性計測の適用拡張と弾性波伝播メカニズム解明：ディスク型振動素子は、既往のベンダーエレメントなどに比べて非貫入という運用上および波源特性上の利点があるが、試料によっては接触不良等の問題もあり、その適用性について検討するとともに、理想化された粒子配列を持つ粒状体試料を用いた基礎実験や個別要素法解析などを通

して、剛性異方性同定のための弾性波速度計測について留意点などを洗い出した。

4. 研究成果

(1) 異方弾性理論に基づいた非排水荷による排水（有効応力）剛性パラメタ値の同定^①：本研究が着目したのは、変形特性を求めるための室内試験において、軸ひずみは種々のセンサーにより1980年代より高精度な計測が可能となっているものの、側方ひずみの計測は多くの問題を残し、困難が残ったままということである。この問題に対処する全く新しい方法として、側方方向にセンサーを用いず、代替として非排水変形時の間隙水圧データを用いることで、異方弾性理論に基づいて側方剛性を導出する理論を確立した。これは、側方変位の計測は精度上・設置上の困難を呈するのに対し、間隙水圧は既往の装置で十分な精度で容易に計測できることに着目したものである。この流れは図1に示す通りで、具体的な式は文献①中に示してある。この際、装置のコンプライアンスや試料系の不完全飽和なども考慮したうえで正確に剛性を導出できるような配慮も含めてある。和泉粘土や、より塑性の低いカオリンを一次元圧密により再構成した試料に対し、例えば水平方向ヤング率 E'_h でいえば、本手法により求めた値は従来型の full-instrumentation 方式によるものと比べてそれぞれ2.4%、1.0%しか相違がなかった。弾性理論が適用できる微小ひずみ変形に対しては、側方変位センサーなしで従来型の非常に複雑な装置とほぼ等価な計測を行えることを示した。

(2) 画像相関法・三次元ステレオフォトグラメトリーを用いた光学的な小～大ひずみ挙動計測法^②：従前にも三次元ステレオフォトグラメトリーを用いた三軸試験中の試料変形計測は提案されていたが、比較的大変形（10⁻¹~10¹%）への適用を想定しており、上記(1)で扱う10⁻³%のオーダーの変形との間にはギャップがあり、これを埋めるために高精度な適用手法・演算アルゴリズムの開発を行い、三軸セルの外側からの画像撮影により10⁻³%から任意の大きさの変形まで連続的に計測できる手法として確立した。既往の研究にあるようなIDコード付きターゲットを必要とせず、供試体上に規則的に配置した点ターゲット（インクペン等で手描きするだけでよい）の画像を二値化およびグレースケール変換し、前者からターゲット移動の簡易推定、これに基づき後者からサブピクセルの高精度推定を逐次実施することで、精度を担保したまま高速解析することに成功した。XYZ三次元において、計測結果における直交方向の干渉は1%以下であり、各方向の変位計測正確性もほぼ100%として得られた。この手法を用いて粘土・砂試料に対して以下の検討を行った。

・粘土試料（端面摩擦の影響）：三軸試験において、供試体端面と接触する荷板の摩擦の影響は従前より指摘されているが、この影響を試料の変形モード観察を介して定量化した例はほと

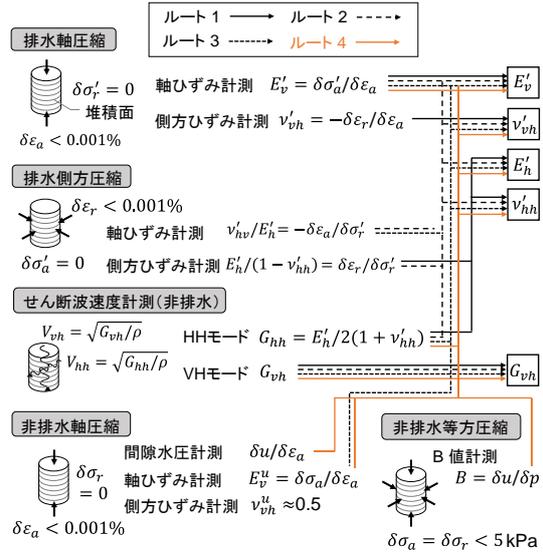


図1 側方変位計を用いない新しい異方剛性の導出法（ルート4）

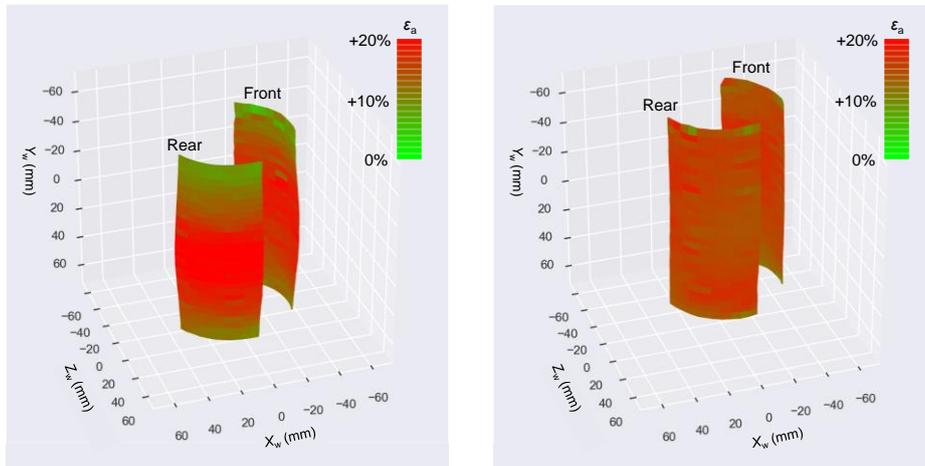


図2 開発した高精度三次元ステレオフォトグラメトリーによる粘土圧縮の可視化（圧縮を正とする軸ひずみ、左：端面潤滑処理なし、右：処理あり）

んどない。今回開発した変形計測手法の有用性を端的に示す例として、この問題を取り上げ、再構成粘土試料を用いて変形計測を実施した。ここでは結果の一例として端面潤滑処理の有無による非排水圧縮中の軸ひずみ変位分布を図2に示す。潤滑処理により、軸ひずみ分布は各段に均一化しており、均一なひずみ分布を前提とする現行の三軸試験結果処理（例えば地盤工学会基準など）を適用するためにはそのような処理が必須であることが示された。また、 $10^{-3}\%$ というひずみ計測精度により、割線剛性-ひずみ曲線は約 $5 \times 10^{-3}\%$ から描画することができた。これは多くの地盤変形解析において十分な精度であり、今日の一般的なコンパクトデジタルカメラのコストを勘案すれば、このようなデータが局所変位計なしで得られるメリットは非常に大きく、研究のみならず実務へのインパクトも期待できる。

・砂試料（細粒分流出過程）：火山灰質砂による造成地盤からの長期的な細粒分流出や、河川堤防からの細粒分流出による地盤構造物の脆弱化が懸念されており、三軸試験などの室内試験においても細粒分流出過程をせん断過程前に取り入れる事例が近年見られる。この際、試料内外で間隙水循環を行うため、従来のように排水量に基づく試料変形計測が難しい。また、細粒分流出が均一に発生する保証がないため、試料側面の数点のみを局所計測する手法にも限界がある。本研究で開発した画像解析システムはこのような問題を解決するのに最適であり、その有用性を示したものが図3である。ここでは直径50mm・高さ100mmの供試体の上端から下端に向けて間隙水圧勾配を発生させ、細粒分を下端から流出させており、この過程を終了した時点での半径方向ひずみ（圧縮为正）を示している。細粒分流出にも関わらず、全体としてやや不均質に膨張していることが可視化できた。また、この解析結果から体積変化等を正確に計算し、続くせん断試験の解釈に用いることができた。

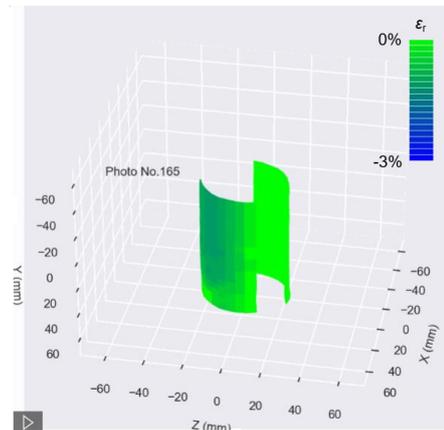


図3 火山灰質砂からの細粒分流出過程の可視化（圧縮を正とする半径方向ひずみ：下端から流出）

(3) ディスク振動素子による微小ひずみ剛性計測の適用拡張と弾性波伝播メカニズム解明^④：

・従来法とディスク振動素子による剛性計測の比較^③：局所変位計（LDT）によるひずみと応力関係に基づく微小ひずみ剛性（従来法）とディスク振動素子による微小ひずみ剛性（鉛直方向）の比較実験を行った結果（図4）、同等あるいは後者の方が若干大きくなる傾向が確認され、粒子形状が角張った材料ほど後者の剛性の方が大きくなる結果を得た。なお、中型三軸試験供試体（高さ150mm）と大型三軸試験供試体（高さ600mm）に対してディスク振動素子により計測した剛性は計測したところ、同等の剛性であることを確認した。

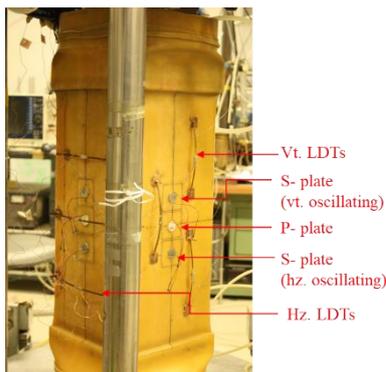


図4 ディスク振動素子および局所変位計を多数搭載した大型三軸試験装置^③

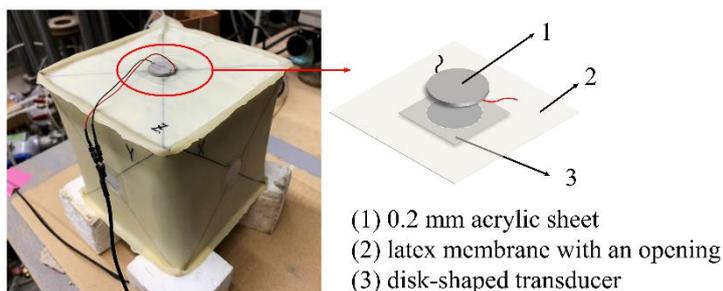


図5 立方体供試体とディスク振動素子^④

・剛性異方性同定のための多方向計測^④：立方体もしくは直方体形状の供試体端面にディスク振動素子を取り付けることで、水平（X,Y方向）および鉛直（Z）方向に伝播するせん断波速度の計測に成功した（図5）。シヤアモードのディスク振動素子を回転させて接着することで、せん断波の振動方向を制御することができ、例えば、同測線上におけるhh成分とhv成分の比較計測が可能である。なお、ディスク振動子は供試体作製後に両面テープを用いて容易に脱着可能なため、非貫入（NI）型のgeophysical計測の手段として今後の応用が期待される。

・弾性波伝播メカニズム解明に関する成果^④：気中落下後に鉛直方向に突き固めて作製した供試体を等方圧密した場合、hh成分のせん断波速度が最大となる傾向が確認された。これは既往研究の知見と整合する。粒子形状が球形に近いガラスビーズ供試体の剛性は等方に近い結果となり、逆に楕円形状の粒子で構成される供試体の場合には強い異方性が確認された。さらに、楕円形粒子の長軸方向を人工的に一方向に向けた場合、粒子の長軸方向に伝播するせん断波の速度が最も大きく、粒子長軸方向と直交する面を伝播・振動する場合のせん断波速度は最も小さいという結果を得た。このことにより、供試体を構成する粒子の配向性と剛性異方性には一定の相関があると考えられる。

これらの結果はいずれも、従来のベンダーエレメントなど貫入型の振動子による結果と整合しているながら、実装に各段の柔軟性がある。

以上(1)~(3)はいずれも個別としても、統合しても適用可能な技術モジュールであり、これらの成果により従前よりも柔軟・高精度・簡易・多情報な室内試験が実施可能となった。

<引用文献>

- ① Nishimura, S. and Magalona, F. (2020) An alternative method in triaxial tests to obtain cross-anisotropic elastic parameters. *Géotechnique Letters* 10 (3) 468-477. DOI: 10.1680/jgele.20.00031
- ② Nishimura, S. (2022) Characterisation of soil deformation over wide strain ranges in triaxial test with high-precision stereophotogrammetry. *Géotechnique*, Ahead of Print, DOI: 10.1680/jgeot.21.00067
- ③ Dutta, T.T., Otsubo, M., Kuwano, R. and Sato, T. (2020) Estimating multidirectional stiffness of soils using planar piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus. *Soils and Foundations* 60 (5) 1269-1286. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.002
- ④ Liu, J., Otsubo, M., Kawaguchi, Y. and Kuwano, R. (2022) Anisotropy in small-strain shear modulus of granular materials: Effects of particle properties and experimental conditions. *Soils and Foundations* 62 (1) 101105, DOI: 10.1016/j.sandf.2021.101105

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nishimura, S. and Magalona, F.	4. 巻 10
2. 論文標題 An alternative method in triaxial tests to obtain cross-anisotropic elastic parameters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 468-477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jgele.20.00031	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 -
1. 著者名 T.T. Dutta, M. Otsubo, R. Kuwano	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of shearing history on stress wave velocities of sands observed in triaxial compression tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 541, 548
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2021.02.002	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.T. Dutta, M. Otsubo, R. Kuwano, C. O'Sullivan	4. 巻 60
2. 論文標題 Evolution of shear wave velocity during triaxial compression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1357, 1370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2020.07.008	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 該当する
1. 著者名 T.T. Dutta, M. Otsubo, R. Kuwano, T. Sato	4. 巻 60
2. 論文標題 Estimating multidirectional stiffness of soils using planar piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1269, 1286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2020.08.002	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 Y. Li, M. Otsubo, R. Kuwano	4. 巻 72
2. 論文標題 An experimental study on the influence of particle shape on the mechanical behaviour of granular materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 391, 395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.72.391	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 大坪 正英, デュッタ トロイー タヌ, ガエム アリアン, リ ヤン, 桑野 玲子	4. 巻 72
2. 論文標題 ギャップグレード砂の動的応答に関する室内要素試験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 387, 390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.72.387	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 西村 聡	4. 巻 69
2. 論文標題 論説: 室内土質試験の新たなオプション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 8, 12
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 無
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 -

1. 著者名 桑野 玲子	4. 巻 69
2. 論文標題 総説: 土質試験の発展の経緯と今後の展開	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 3, 7
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 無
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 -

1. 著者名 Troyee Tanu Dutta, Masahide Otsubo, Reiko Kuwano, Catherine O'Sullivan	4. 巻 9
2. 論文標題 Stress wave velocity in soils: Apparent grain-size effect and optimum input frequencies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 340-347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgele.18.00219	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 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 西村 聡
2. 発表標題 室内土質試験における微小～大変形計測へのステレオフォトグラメトリーの適用性
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 聡
2. 発表標題 ステレオフォトグラメトリーを用いた三軸試験による微小変形計測：原理と精度評価
3. 学会等名 第61回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yang Li, Masahide Otsubo, Reiko Kuwano
2. 発表標題 Effects of particle shape and roughness on mechanical responses of granular materials in triaxial tests
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 大坪 正英, Arian Ghaeni, 桑野 玲子
2. 発表標題 ギャップグレード硅砂の弾性波応答特性に関する実験的研究
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 Junming Liu, 川口 勇一郎, 大坪 正英, 桑野 玲子
2. 発表標題 せん断波速度に現れる粒状体の異方性と粒子形状の関係
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 John Varie Orozco and Satoshi Nishimura
2. 発表標題 Simplified Evaluation of Deformation via image analysis in uniaxial compression test
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 Fernie Magalona and Satoshi Nishimura
2. 発表標題 Determining cross-anisotropic stiffness parameters of clay soil using pore water pressure behavior
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Nishimura, Reiko Kuwano and Masahide Otsubo
2. 発表標題 Small-strain characterisation; New tools and multi-dimensional perspective
3. 学会等名 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Troyee Tanu Dutta, Masahide Otsubo, Reiko Kuwano and Takeshi Sato
2. 発表標題 Development of vertical and horizontal disk transducers for wave velocity measurements in a large rectangular specimen
3. 学会等名 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Troyee Tanu Dutta and Masahide Otsubo
2. 発表標題 Assessment of elastic wave velocities through granular soils during monotonic loading
3. 学会等名 The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
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
研究 分担者	桑野 玲子 (Kuwano Reiko) (80312974)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	大坪 正英 (Otsubo Masahide) (80804103)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	

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