

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14725

研究課題名(和文) 応力発光現象の応用による地盤内部のリアルタイムな応力分布可視化技術の開発

研究課題名(英文) Development of real-time visualization of stress distribution in granular material based on the mechanoluminescence phenomenon

研究代表者

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・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：80755893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、応力発光現象に着目して地盤を構成する粒子の作用力状態を発光強度で表すことで、リアルタイムに地盤材料の応力場を可視化する新しい計測手法の開発を目的として実施した。応力発光粒子の作成にあたり、適切な応力発光材料の選定し、粒子への塗装方法を確立した。また、様々な軸ひずみ速度で載荷を行い、作用力増分と発光強度の校正を行った。粒状体への適用として、二軸載荷実験を行い、応力鎖の発生・消滅過程の可視化と、発光強度の換算値と載荷板での計測値が定量的に一致することを示した。粒状体の変形・破壊メカニズム検討への応用として、杭貫入時の地盤内の挙動における拘束圧と相対密度による影響を可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤災害の根底にある粒状体の変形・破壊挙動において、ミクロスケールでの粒子間接触力を定量評価することは、マクロな挙動を支配する粒子間の相互作用を解明する際に非常に有用である。既往の研究として、光弾性体を用いた研究やX線回折を用いた手法が挙げられるが、これらの手法は偏光器やシンクロトロンなど高価な設備に加え、粒子形状や材料の制限やトモグラフィに伴う計測間隔の制限がある。そのため、本研究では応力発光現象に着目することで、実際の粒子に塗装することで粒子形状や材料の制限がなく、市販のカメラで安価に粒子間接触力を連続的に観察可能な方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a new visualization and measurement method of load transmission in granular material based on the mechanoluminescence phenomenon. The mechanoluminescence phenomenon is that emit light in response to mechanical stimulation. Glass beads were coated with a mixture of mechanoluminescent paint and epoxy resin in order to visualize particle level force distribution. Load tests were conducted on single columns of coated glass particles to calibrate luminance and forces transmitted through the particles and particle contacts. The biaxial loading test were conducted to visualize the load transmission and stress chain in the analog granular material. Moreover, the sum of contact forces deduced from particle luminance is shown to be in agreement with applied boundary loads. The effect of confining pressure and relative density during pile penetration was visualized as an applications to investigate the mechanism of granular material.

研究分野：地盤工学

キーワード：粒状体 可視化 応力発光 粒子間接触力 応力鎖

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震や豪雨に起因する地盤災害の被害を未然に抑えて効率的な対策や管理を行うには、根底にあるメカニズムの解明が不可欠である。地盤災害のメカニズム解明の難しさは、地盤材料が離散的な粒子で構成される粒状体であり、粒子間における滑りや回転というミクロスケールの現象が、マクロな変形・破壊挙動に強い非線形性をもたらすことにある。さらに、水や空気といった粒子間の間隙流体による相互作用が加わることで、液状化現象や局所的な内部浸食による陥没などの特徴的な現象が発現することもメカニズム解明を難しくしている要因である。

複雑な粒状体のメカニズム解明のために、模型実験では画像解析やX線CTによる変位・ひずみによる検討、数値解析では地盤内部の応力を可視化できる利点を活かして、変形・破壊の起点となる応力分布の変化から検討されている。しかし、数値解析は与条件下の適用モデルの解としての側面から、実験によるフィードバックが不可欠だが、模型実験による応力の可視化は難しいのが現状である。既往の応力計測手法に、光弾性とX線回折法が挙げられるが、これらの手法は、偏光器やシンクロトロンなど高価な設備に加え、粒子形状や材料の制限やトモグラフィに伴う計測間隔の制限がある。

2. 研究の目的

本研究は、力学的な作用に応じて発光する応力発光現象に着目して、リアルタイムに地盤材料の応力場を可視化する新しい計測手法の開発を目的とした。応力発光現象は、材料によって可視光線を含む様々な波長の発光をするため一般的なカメラで安価に計測することが可能であり、その発光強度は連続的に変化するため動的な問題においてもリアルタイムな計測が可能である。また、エポキシ塗料等と混合して利用できるため、任意形状の粒子にも適用可能である。本手法の開発によって、地盤の変形・破壊メカニズムをミクロな粒子間接点力、メソスケールの応力鎖、マクロな応力分布の推移というマルチスケールな視点から検討して解明することを可能にする。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つの項目について研究を行った。

(1) 応力発光材料の選定と応力発光粒子の作成

様々な応力発光材料から本研究に適した材料を選定し、球形ガラスビーズへの塗装方法の検討と塗膜の評価を行う。

(2) 応力発光粒子のキャリブレーション

作成した応力発光粒子を対象に、様々な軸ひずみ速度で載荷を行い、観察された載荷時の発光強度の推移と比較することで、作用力増分と発光強度のキャリブレーションを行う。

(3) 粒状体への適用と検証

二次元断面の粒状体に載荷実験を行い、撮影した発光に対してキャリブレーション結果から個々の粒子における作用力を換算し、載荷した荷重と比較することで検証する。

(4) 粒状体の変形・破壊メカニズムの検討への応用

これまでに多くの検討がなされてきた杭貫入時の地盤内の挙動を対象に、応力発光粒子を用いて載荷時の拘束圧による影響と相対密度による影響を検討する。

4. 研究成果

(1) 応力発光材料の選定と応力発光粒子の作成

応力発光材料には、弾性領域の応力増分に比例した発光強度を示す材料のうち、産業技術総合研究所の徐らの開発したユーロピウムを発光中心としてドーブした欠陥制御型アルミン酸ストロンチウム ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$, SAOE) を用いた。この材料の特徴として、紫外線で励起を行い、載荷による発光によって波長 520nm を中心とした緑色の発光が肉眼で観察できる。

発光粒子の作成にあたっては、直径 3.0mm、密度 $2.5\text{g}/\text{mm}^3$ の球形ガラスビーズ表面に、粉末状の応力発光材料を二液性エポキシに混合した塗料を塗布することで作成した。図 1 には、SEM を用いた塗装前後の粒子の様子を示しており、粒子全体への塗装が確認できる。図 2 には、作成した発光粒子を X 線 CT 装置で撮影した粒子断面を示しており、ガラスビーズ(灰色)の表面に塗膜(白色)が均一な膜厚で塗装されている様子が確認できる。

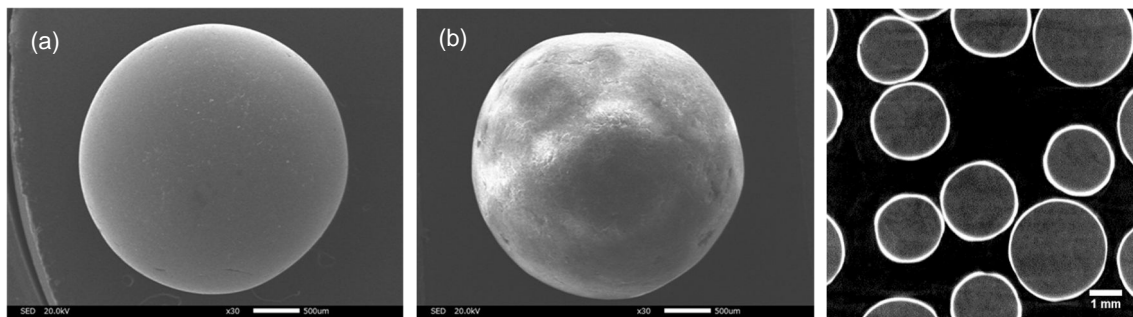


図 1 SEM による塗装前後のガラスビーズ: (a) 塗装前, (b) 塗装後 図 2 X 線 CT スキャンによる応力発光粒子の断面図

(2) 応力発光粒子のキャリブレーション

応力発光粒子のキャリブレーションは、作用力の増分と発光強度の関係を対象として载荷実験により検討した。载荷実験は、図3に示すアクリル製の一边3.3mmの正方形の孔を持つ角パイプに発光粒子3個を鉛直に並べて供試体とし、供試体上部から载荷板で鉛直下向きに载荷を行った。载荷板と供試体下部にはロードセルを設置して作用力を計測している。また、载荷時の発光が環境光の影響を受けないように、载荷実験は暗室の中で実施している。

キャリブレーションの手順としては、発光粒子をUVライト(CCS社製 LDL-205X12UV2-365)で60秒間励起させ、燐光が収まるまでの60秒間待機した後に、様々な载荷速度($0.0167\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ から $0.50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)で载荷した。発光挙動の撮影は、市販のカメラとレンズ(SONY 製 $\alpha 7\text{sII}$ と SEL50M28)を用いて、供試体から260mmの位置より動画撮影した。撮影条件は解像度 $1920\times 1080\text{pixels}$ 、撮影フレームレート 120fps、ISO感度 25600 に設定している。

図4にキャリブレーションにおける軸ひずみ速度 $5.21\% \text{ strain}\cdot\text{s}^{-1}$ (载荷速度 $0.50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) の载荷重の経時変化を示す。図5には、载荷中の応力発光粒子の様子を示しており、粒子全体の一様な発光とともに、粒子間の接触点で局所的なより明るい発光が確認できる。この発光強度の差をもとに、全体的な発光については平均発光強度、接触点の局所的な明るさにおいては、発光強度の飽和がみられたため正規化した発光強度の合計値を指標として検討を行った。図6に、それぞれの発光強度指標と作用力増分の経時変化を示している。これらには定量的に良い対応がみられており、発光強度指標と载荷重増分の関係から校正係数を得ている。なお、この校正係数は、軸ひずみ速度の増加に伴い単調増加することから、非線形最小二乗法により関係式を得ている。

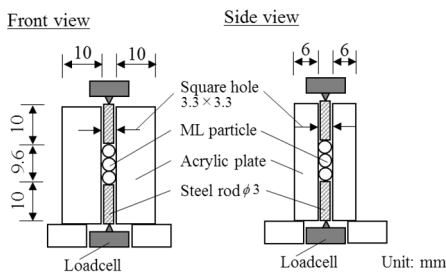


図3 キャリブレーション用载荷装置

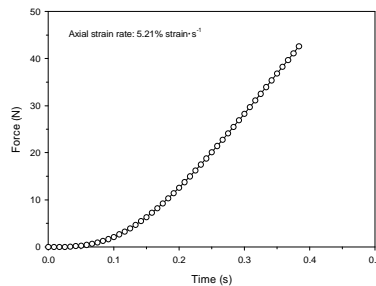


図4 载荷荷重の経時変化

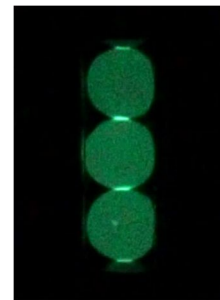


図5 载荷時の発光

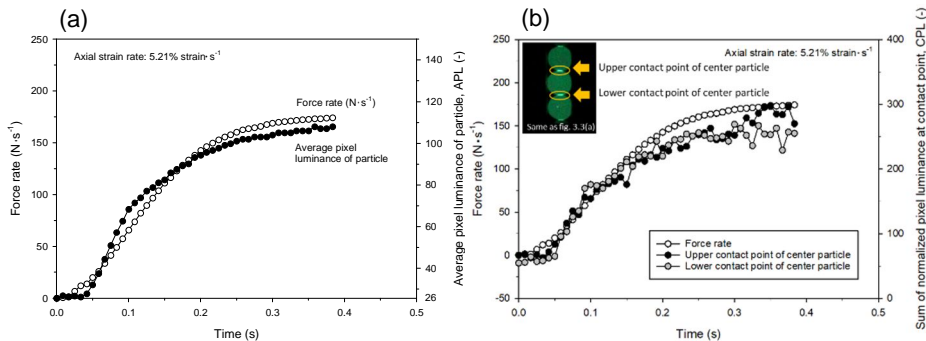


図6 作用力増分と応力発光の比較：(a) 粒子全体の一様な発光と作用力増分，
(b) 粒子間接触点の局所的な発光と作用力増分

(3) 粒状体への適用と検証

図7に示すアクリル製の幅30mm、高さ27.3mm、奥行3.3mmの箱に、発光粒子90個を各粒子が6つの接点を持つよう最密配置して供試体とし、载荷板を介して鉛直下方向へ载荷を行った。軸ひずみ速度は $1.83\% \text{ strain}\cdot\text{s}^{-1}$ (载荷速度 $0.50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) として、他の载荷条件や撮影条件はキャリブレーションと同様に、60秒間の励起、60秒間の待機時間の後で载荷を行っている。ここで、校正係数は材料の軸ひずみ速度に影響されるため、载荷速度は $0.50\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ で同じだが、軸ひずみ速度に応じた校正係数を用いている。

図8に载荷中の0.4秒と0.6秒経過時の供試体の発光の様子を示す。粒子の平均的な発光や接触点での発光強度は様ではなく、強く発光する粒子や接触点がつながっている様子が確認できる。これは、応力鎖と考えることができるため、応力発光粒子を用いて粒状体の挙動を再現できているといえる。また、粒子一つに着目すると、その粒子間接触力にばらつきが見られることから、粒子内部の応力分布も算出することが可能と考えられる。

発光から換算した力の検証について、载荷板で計測した荷重と载荷板に接触する粒子の平均発光強度を基に校正係数で換算して時間積分した作用力の比較を図9(a)に示す。図より、粒子全体の発光から換算した作用力と作用力の間には定量的な一致がみられる。また、図9(b)には、計測荷重と粒子接点の換算作用力の比較を示す。粒子接点は、図8の上方2行の粒子間の接点を抽出しており、粒子間接点の発光から換算した作用力と载荷重の間に定量的な一致がみられる。

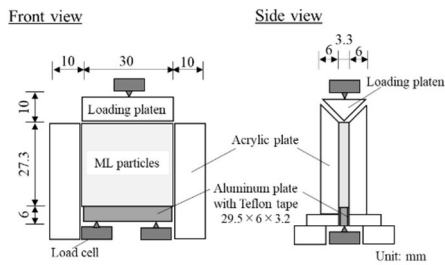


図7 二軸載荷装置

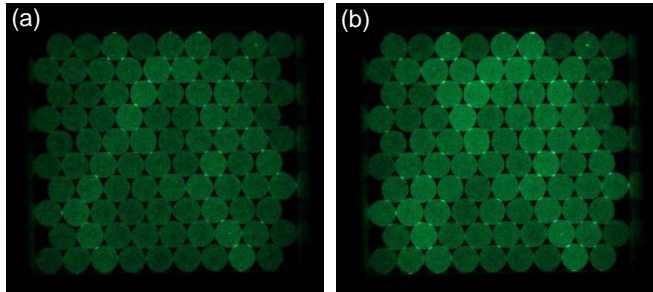


図8 二軸載荷実験時の発光の経時変化：
(a)10.4N (0.4 s) , (b)31.2 N(0.6 s)

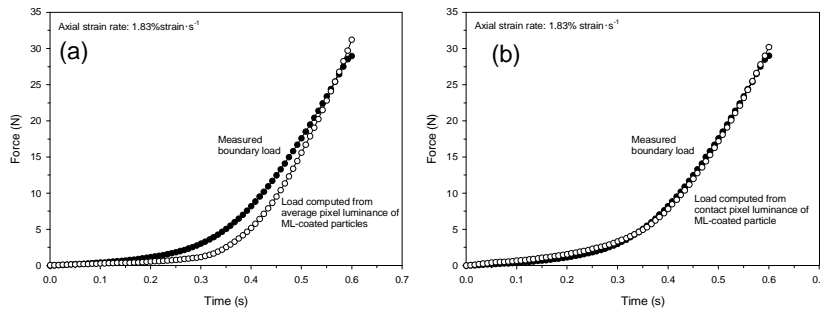


図9 検証結果:(a) 作用力測定値と粒子全体の発光から換算した作用力の合計値,
(b) 作用力測定値と粒子間接点の発光から換算した作用力の合計値

(4) 粒状体の変形・破壊メカニズム検討への応用

杭貫入時の変形・破壊挙動を対象として、図10に示す実験装置を用いて検討を行った。杭貫入実験は、幅200mm、高さ120mm、奥行100mmの領域に設置した発光粒子の供試体に対して、幅30mmの閉端杭模型を貫入させることで、載荷重と地盤内の発光の様子を観察した。杭模型は奥行99mm、高さ200mmのアクリル製の直方体で、側面にボールローラーによるガイドを設けることで垂直に貫入される。貫入時の荷重は、点接触の先端を持つロードセルを介して計測する。撮影条件はキャリブレーションと同様であり、載荷時の発光が環境光の影響を受けないよう暗室の中で実施している。実験手順は、発光粒子をUVライトで60秒間励起させ、発光が収まるまでの60秒間待機した後に、載荷速度20mm/sで載荷した。

本実験では、相対密度が90%と65%の2種類の地盤を対象としており、図11に貫入時の載荷重と貫入量の関係を示す。図より、貫入量の増加に従って貫入抵抗が増加し、相対密度の高い地盤ほど発揮される貫入抵抗が大きいたことが確認できる。図12には、貫入量75mmにおける相対密度65%と90%の供試体における発光の様子を示す。ここで載荷終了時の80mmではなく75mmとしたのは、載荷開始と終了時の3mm程度では貫入速度の低下が見られたためである。図より、発光が見られる範囲は杭模型下端部に集中しており、相対密度が高いケースで発光強度が高いことがわかる。

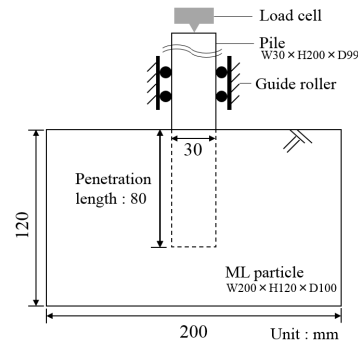


図10 杭貫入実験装置概略図

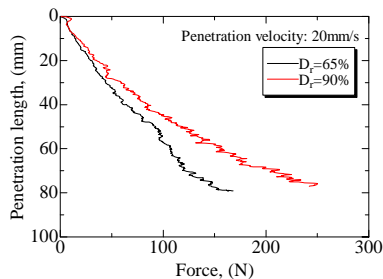


図11 載荷重と貫入量の関係

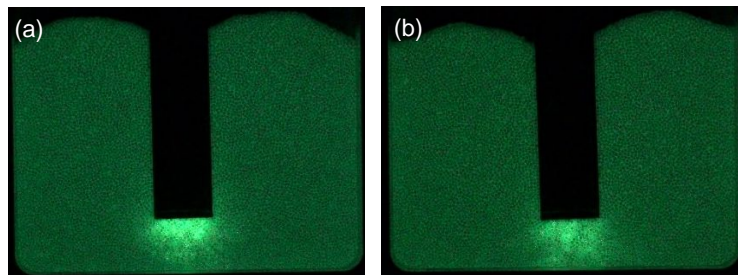


図12 75mm貫入時の発光の様子:(a)D_r=90%, (b) D_r=65%

定量的な比較のために、図13に杭模型下端から40mmまでの範囲における発光強度分布を示す。この発光強度は杭模型の幅30mm(200 pixels)における水平方向の値を平均した値としている。なお、貫入量75mmの分布について、杭下端から25mm以深の位置では土槽底面となるため発光強度は示していない。図より、発光強度分布の形状は杭下端から5mm程度の位置で最大値を取り、深さ方向に単調に減少している。また、発光強度の増加範囲は、およそ杭下端から30mm程度の領域といえる。貫入量ごとに比較すると、発光強度分布の形状は変わらず全体的に発光強

度が増加している。これは、貫入量の増加に伴い地盤中の拘束圧が増加するため、貫入抵抗が増加する傾向と一致している。相対密度の比較では、発光強度の増加範囲は深さ方向に30mmと同程度であるが、杭下端から15mmの範囲で発光強度に顕著な差がみられる。

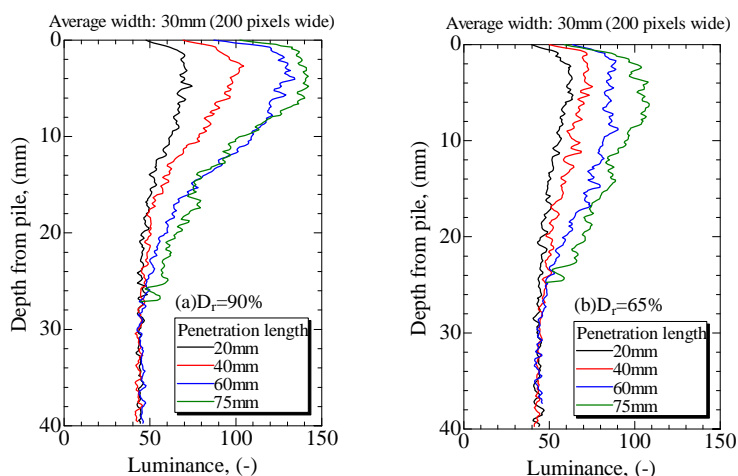


図 13 杭模型下端からの発光強度分布の比較：(a)相対密度 90%，(b)相対密度 65%

次に、観察された発光と载荷重の関係について検討を行う。まず、発光強度については、図 13 での検討をもとに図 14(a)に示す杭下端 15mm の範囲の平均発光強度を 0.1s 間隔で算出した。貫入抵抗は、平均発光強度を算出した時点と対応するロードセル計測値とし、その増分は 0.1s 間の载荷重の平均値における増分とした。図 14(b)にはこの载荷重と平均発光強度の関係を示しており、高い相関が確認できる。また、相対密度についても横軸の切片や増分について同程度の関係が確認できる。図 14(c)には载荷重増分と平均発光強度の関係を示している。発光強度の増加に従って载荷重増分が増加する傾向はみられるが、相関はみられない。ここで、载荷重の増分で検討したのは、発光粒子のキャリブレーションにおいて、発光強度と相関関係が確認されたのは作用力増分のためである。この理由として、本検討で計測した载荷重とその増分は、供試体の底面に作用する平均された値であり、発光として観察された供試体側面における作用力の増分との間に差があるためと考えられる。

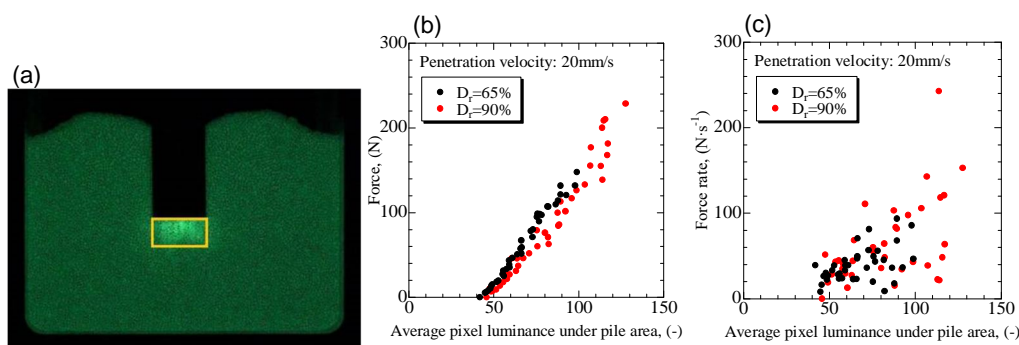


図 14 杭下端の平均発光強度と力学的作用関係：(a)平均発光強度算出領域，
(b)作用力 - 平均発光強度関係，(c)作用力増分 - 平均発光強度関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 A. Kondo, D. Takano, E. Kohama, R. J. Bathurst	4. 巻 21:50
2. 論文標題 Visualization and measurement of load transmission in granular assemblies using mechanoluminescent-coated particles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Granular Matter	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10035-019-0907-5	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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 近藤 明彦, 高野 大樹, 小濱 英司
2. 発表標題 応力発光粒子を用いた可視化画像の校正と閉端杭貫入抵抗の可視化
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 A. Kondo, D. Takano, E. Kohama
2. 発表標題 Visualization of load transmission during pile penetration in granular material by using elastico-mechanoluminescence particle
3. 学会等名 The VI International Conference on Particle-Based Methods (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 明彦, 高野 大樹, 小濱 英司
2. 発表標題 応力発光粒子を用いた閉端杭貫入時における先端抵抗の可視化
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 近藤明彦, 高野大樹, 小濱英司, Richard J. Bathurst
2. 発表標題 応力発光粒子を用いた粒状体の粒子間接触力分布の可視化
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 Akihiko Kondo, Daiki Takano, Eiji Kohama, Richard J. Bathurst
2. 発表標題 Visualization of load distribution through granular material using mechanoluminescent particles
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Mechanoluminescence and Novel Structural Health Diagnosis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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