

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14830

研究課題名（和文）ミクロスケールにおける有効応力伝達過程の可視化による地盤の不安定化機構の解明

研究課題名（英文）A study on instability mechanism of granular materials by visualizing effective stress transmission in micro scale

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・主任研究官

研究者番号：80755893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、粒子単位の作用力状態を発光強度で表す応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤によって有効応力の推移をミクロスケールな粒子単位で可視化することで、力を伝える粒子骨格構造のダイナミクスから地盤の不安定化を解明することを目的として実施した。本研究では、応力発光粒子と透明な地盤の作製、載荷実験による地盤内部の有効応力推移の可視化、有効応力の異なる不安定化させた地盤への載荷実験による発光挙動の観察を検討した。鉛直上向き浸透流により有効応力を低下させた不安定化した地盤へ載荷実験では、発光強度が地盤の変形抵抗の低下傾向と一致し、その過程を粒子単位の作用力の推移から検討できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤災害のメカニズム解明において、地盤内の応力状態を知ることが変形や破壊発生前の情報として重要である。特に、有効応力は、地震時の液状化や堤防の浸透破壊に代表される地盤の不安定化を記述する上で欠かせない概念である。しかし、従来の有効応力の計測では、連続体近似した全応力の算定値と間隙水圧計による水圧の計測値の差という要素レベルでの間接的な推定値しか得られず、ミクロな土粒子レベルの有効応力状態は観測できなかった。そのため、本研究では、応力発光現象と屈折率整合法を用いて、有効応力をミクロな粒子単位の作用力から可視化することで、マクロな変形・破壊に至る過程を検討できることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to elucidate ground instability from the dynamics of the load transmitting inter-particle structure by visualizing the load transmission of microscopic effective stress. In this study, mechanoluminescent-coated particles that emit light in response to mechanical stimulation and transparent particles based on the refractive index matching method were prepared. Pile model penetration tests were conducted in destabilized specimen by controlling effective stress conditions using upward seepage flow. The observed luminescence behavior corresponds to a decrease in penetration resistance with effective stress levels, which showing a stress field process from a microscopic load transmission to macroscopic deformation behavior.

研究分野：地盤工学

キーワード：粒状体 可視化 応力発光 有効応力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地盤災害のメカニズム解明において、地盤内の応力状態を知ることは変形や破壊発生前の情報として重要である。特に、有効応力は、地震時の液状化や堤防の浸透破壊に代表される地盤の不安定化を記述する上で欠かせない概念である。例えば、飽和砂地盤の液状化現象は、地震力による砂地盤の体積圧縮を粒子間の間隙水が妨げるため間隙水圧が上昇し、これに伴って有効応力が低下することで発生すると記述される。このメカニズムは、模型実験において地盤内に設置した間隙水圧計による計測値と計測位置の有効上載圧から一般的に検討されており、液状化強度試験の定量的な評価とモデル化をもとに有効応力解析が行われ、地震後の残留変形や構造物の被害といったマクロな評価まで広く用いられている。

しかし、従来の有効応力の計測では、連続体近似した全応力の算定値と間隙水圧計による水圧の計測値の差という要素レベルでの間接的な推定値しか得られず、ミクロな土粒子レベルの有効応力状態は観測できなかった。

2. 研究の目的

本研究では、粒子単位の作用力状態を発光強度で表す応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤によって地盤内部の有効応力の推移を粒子単位で可視化することで、力を伝える粒子骨格構造のダイナミクスから地盤の不安定化を解明することを目的とする。ここで、応力発光粒子とは、応力発光材料をエポキシ樹脂に混合した塗料を用いて観測対象の粒子表面に均一に塗装したもので、載荷時に観測される粒子全体と粒子接点の発光強度について校正が可能である。本手法により、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メカニズムの検討を可能にする。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3項目について研究を行った。

(1) 応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤の作製

既往文献を参考に屈折率整合法による透明な地盤の検討を行い、溶融石英粒子と流動パラフィンによる屈折率整合を選択した。この溶融石英粒子について、応力発光塗料の塗装方法を検討し、応力発光粒子を作製して模型地盤の作製方法を確立した。

(2) 載荷実験による地盤内部の有効応力推移の可視化

作製した応力発光粒子と屈折率整合法による透明な模型地盤を用いて、載荷実験を行うことで粒子単位の有効応力状態の可視化が行えることを示した。また、二次元断面を対象に載荷実験を行うことで、画像解析により内部のダイナミクスを検討できることを示した。

(3) 有効応力の異なる不安定化させた地盤への載荷実験による発光挙動の観察

応力発光粒子と屈折率整合法による透明な模型地盤に鉛直上向き浸透流を与えることで有効応力の異なる地盤を作製し、杭貫入による載荷実験を行うことで、不安定化した地盤における有効応力の推移を可視化してその挙動を検討した。

4. 研究成果

(1) 応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤の作成

地盤内部の有効応力の推移を粒子単位で可視化するにあたり、本研究は屈折率整合法による見えない地盤と応力発光粒子を組合せることで、地盤内部の任意断面の作用力を可視化する方法を検討した。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プ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。屈折率整合法は、透明な粒子の間隙を屈折率が同じ透明な液体で満たすことで、粒子表面での光の屈折を無くして見えなくする方法である。この地盤に不透明な応力発光粒子を配置して、その発光を観察することで地盤内部の作用力が観察可能となる。

本研究では、Ezzein and Bathurst (2011) を参考に、屈折率整合法による見えない地盤を溶融石英と流動パラフィンを用いて作製した。土粒子としての溶融石英粒子は、直径 2.5 mm ~ 3.0 mm、密度 2.2 g/cm³、球形状のものを用いて、間隙流体としての流動パラフィンには、応力発光材料の発光ピーク波長 520 nm 付近における溶融石英粒子の屈折率 1.461 と同程度になるよう調整したものをを用いた。応力発光粒子は、この溶融石英粒子の表面に、SAOE と二液性エポキシ樹脂を混合した塗料を高い均一性で塗布して作製した。

(2) 載荷実験による地盤内部の有効応力推移の可視化

応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤によって地盤内部の有効応力の推移を粒子単位で可視化できることの検証として、開端杭模型の貫入実験により検討を行った。

図 1 に実験概要を示す。供試体は、奥行方向に 2 分割して、撮影を行う前側に溶融石英粒子、

後側に熔融石英球表面に応力発光材料を塗布した応力発光粒子を用いて、その間隙を上述の流動パラフィンで満たすことで、模型地盤の奥行中央断面の発光挙動が観察できる。供試体は、いずれも相対密度 65 % で作製し、拘束圧として鉛玉を用いて 3.0 kPa を載荷した。

貫入実験は、外径 30 mm、肉厚 2 mm の開端杭模型を供試体に 10 mm/s で 100 mm 圧入させた。開端杭模型は、粒子と同じ熔融石英製とすることで熔融石英球と同様に屈折率を一致させ、貫入過程における開端杭内部の様子を観察可能である。また、模型内部には、同一の上載圧が作用するよう鉛玉を設置している。また、本実験は載荷時の発光が環境光の影響を受けないように、暗室の中で実施している。実験の手順は、応力発光粒子を UV ライトで 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、載荷速度 10 mm/s で載荷した。図 2 には、励起中の様子を示しており、供試体前面の熔融石英を透過して、観察対象である模型地盤の奥行き中央断面の応力発光粒子が励起されていることがわかる。発光挙動の撮影は、市販のカメラとレンズ（Blackmagic Design 社製 Pocket Cinema Camera 6K と Sigma 社製 18-35 mm F1.8 DC HSM）を用いて撮影した。撮影条件は解像度 6144×3456 pixels (RGB16bit)、撮影フレームレート 50fps、ISO 感度 6400 に設定した。図 3 に貫入時の荷重と貫入量の関係を示しており、貫入量の増加に伴って貫入抵抗の増加が確認できる。

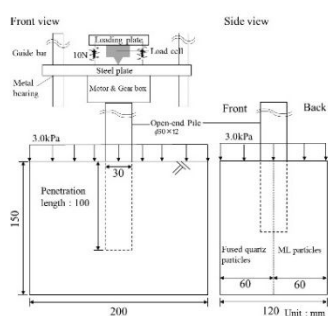


図 1 実験概略図

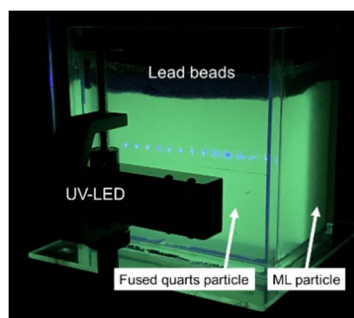


図 2 励起時の発光の様子

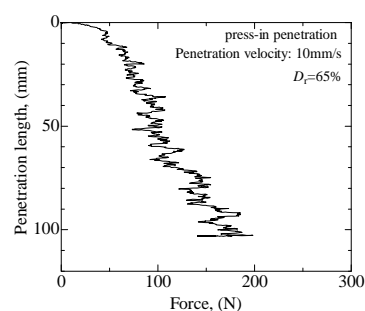


図 3 荷重-貫入量関係

図 4 に開端杭模型貫入量 0 mm、50 mm、100 mm における地盤内の発光の様子として、発光ピーク波長と対応する緑色の輝度値分布を示している。図中の破線は、開端杭模型の位置を示しており、杭模型内部上方の輝度が低い領域は、上載圧載荷のため設置した鉛玉である。図より、粒子の発光は杭先端に集中しており、杭の肉厚部周辺でより明るい光が確認できる。載荷された発光粒子は、粒子全体の均一な発光と接触点で輝度値の高い発光がみられることから、図中の輝度が高い点は発光粒子間もしくは発光粒子と熔融石英粒子との接点における発光であると考えられる。また、図 5 に示す観察断面の平均発光強度と貫入量の関係においては、平均発光強度と荷重は同傾向にあるため、発光分布から局所的な荷重の分布を評価できると考えられる。図 6 には、開端杭模型先端付近の拡大図を示しており、開端杭肉厚部の強い発光だけでなく、杭内部においても全体的な発光と粒子間接点の強い発光（矢印）が確認できる。よって、本検討において間隙流体で満たされた飽和地盤における粒子単位の作用力の推移が可視化できることが示された。

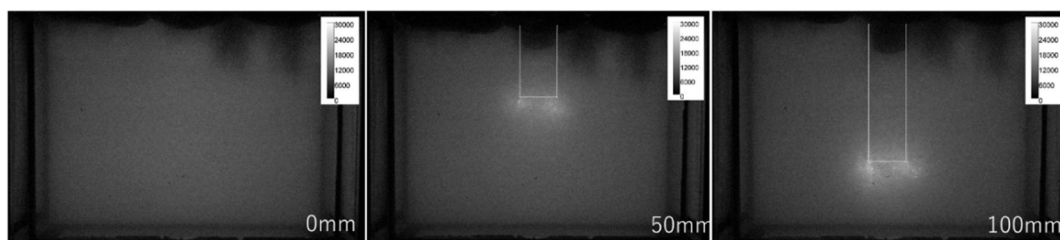


図 4 開端杭模型貫入時の地盤内の発光の様子

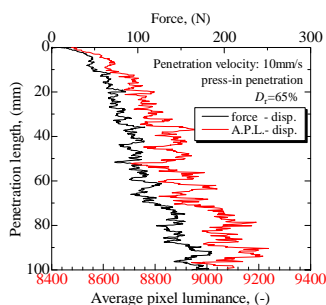


図 5 平均発光強度 - 貫入量関係

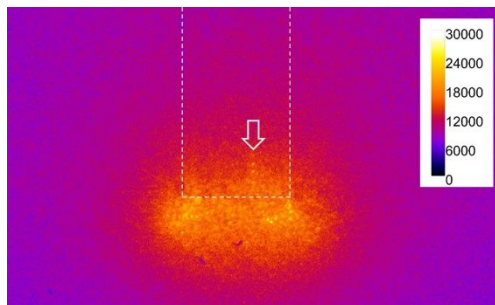


図 6 開端杭模型内部の発光の様子

また、応力発光粒子を用いた地盤内部のダイナミクスの検討として、二次元断面を対象に閉端杭模型の貫入実験により検討を行った。

図7に実験概要を示す。応力発光粒子は、直径0.85-1.0mm、密度2.5g/mm³の球形ガラスビーズ表面に、SAOEを二液性エポキシに混合した塗料を塗布して作成した。供試体は、幅200mm、高さ120mm、奥行100mmの領域に相対密度90%で作成し、幅30mmの閉端杭模型を貫入させることで、杭の先端抵抗と地盤中の発光の様子を観察した。実験手順は同様に、応力発光粒子をUVライトで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、荷重速度10mm/sで荷重した。撮影は、供試体の前面から応力発光挙動を市販のカメラとレンズ（SONY製α7sII、SEL35F14Z）を用いて撮影し、供試体背面から別途同一のカメラを用いて白色環境光の下で撮影することで粒子の変位を撮影した。撮影条件は解像度3840×2160pixels（RGB8bit）、撮影フレームレート30fps、前面はISO感度6400、背面はISO640に設定している。なお、荷重実験で得られる応力発光の緑色の発光強度はカメラのダイナミックレンジを上回って飽和してしまう部分が多く、青色の発光強度を対象とした。図8に貫入時の荷重と貫入量の関係を示しており、荷重初期にピーク強度を示した後、貫入量の増加に伴って貫入抵抗が増減しながら増加傾向を示すことが確認できる。

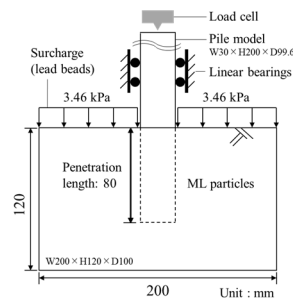


図7 実験概略図

図9には、貫入量75mm付近における発光の様子と、最大せん断ひずみ分布を示している。図より、閉端杭の隅角部から円弧状に発光がみられ、最大せん断ひずみ分布と比較してせん断面の形成過程を観察することができた。よって、本検討により、応力発光粒子を用いることで、地盤の大変形に至る過程を粒子単位の力を伝える粒子骨格構造のダイナミクスから検討できることが示された。

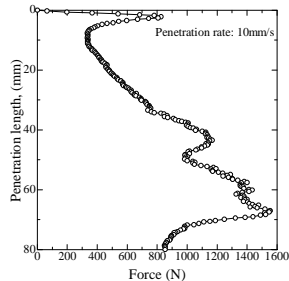


図8 荷重-貫入量関係

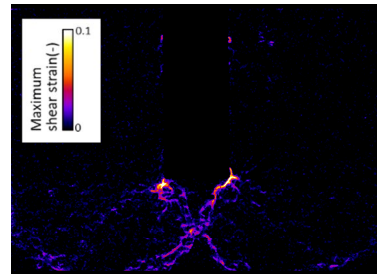
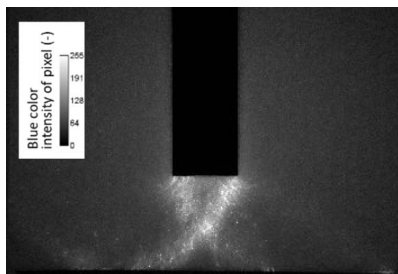


図9 貫入時の発光の様子(左)と最大せん断ひずみ分布(右)

(3)有効応力の異なる不安定化させた地盤への荷重実験による発光挙動の観察

本項目では、当初加振実験を想定したが、動的に有効応力が変化する荷重条件で検討を行う前段階として、準静的な荷重条件で有効応力が異なる地盤における発光挙動をもとに、地盤内部の有効応力の推移を検討した。

図10に実験概要を示す。供試体は、前項同様に奥行方向に2分割して、相対密度65%で前側に熔融石英粒子、後側に応力発光粒子で作製し、その間隙を上述の流動パラフィンで満たしている。供試体の土槽底面には、パンチングメタルとワイヤメッシュを設置しており、供試体には所定の水頭差で設置したオイルタンクから鉛直上向きに浸透力が作用する構造となっている。本検討では、限界動水勾配に対する動水勾配比で、 $i/i_{cr}=0.0, 0.5, 0.9$ の条件として、外径30mmの閉端杭模型を供試体に10mm/sで100mm圧入させた際の発光挙動を観察した。実験手順も前項同様であり、発光粒子をUVライトで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、荷重速度10mm/sで荷重した。図11に貫入時の荷重と貫入量の関係を示しており、貫入量の増加に伴って貫入抵抗は増加し、限界動水勾配に対する動水勾配が大きくなるほど貫入抵抗が低下することが確認できる。観察条件としては、応力場の観察としての発光挙動の観察とともに、変位場の観察を行うために供試体に波長860nmの赤外線照射して、発光挙動の観察用カメラと供試体の間に波長700nm以上の光を反射するミラーを設置することで、応力場の観察カメラには影響を与えずに反射光を同期撮影している。図12に撮影画像例を示す。応力発光は、微弱であるため、個々の粒子輪郭までは判別が難しいが、赤外線照明により可能となっている。

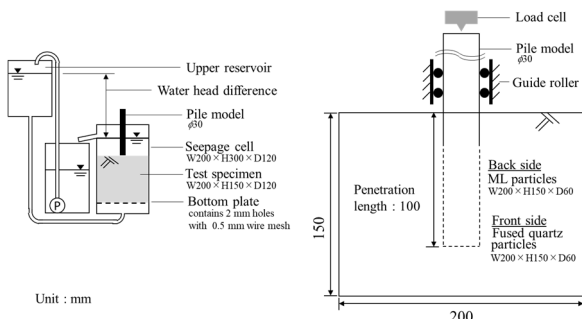


図10 有効応力の異なる地盤への荷重実験概要

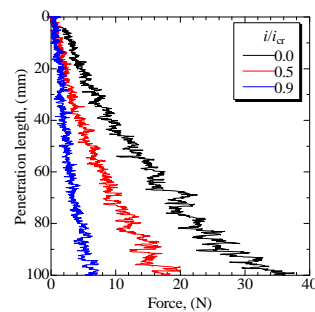


図11 荷重-貫入量関係

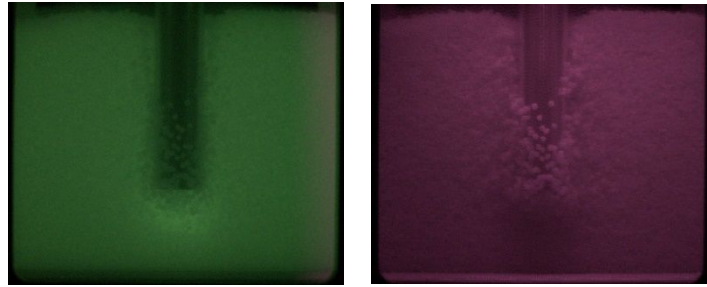


図 1.2 応力場と変位場の観察 左：応力発光強度分布，右：赤外線照明による輝度分布

図 1.3 に，限界動水勾配比 $i/i_{cr}=0.0, 0.5, 0.9$ における貫入量 100 mm 時点の応力発光強度分布を示す．発光は，いずれも模型杭下部に集中しており，限界動水勾配比が高いほど発光強度が低下することが確認できる．図 1.4 に貫入量 100mm における杭模型下端から 50mm までの範囲の発光強度分布を示す．この発光強度は，杭模型の幅 30mm における水平方向の値を平均した値としている．図より，発光強度分布の形状は杭下端から 10-20 mm 程度の位置で最大値を取り，ピーク以深では単調に減少する．ただし，本検討では，杭下端付近に供試体背後に設置した発光粒子が回り込んでいたため，その量による影響が含まれていると考えられる．

以上より，限界動水勾配比の高い有効応力の低い地盤ほど発光強度が低下していることから，粒子単位の作用力状態を発光強度で表す応力発光粒子と屈折率整合法による透明な地盤によって地盤内部の有効応力の推移を可視化することができたと考えられる．

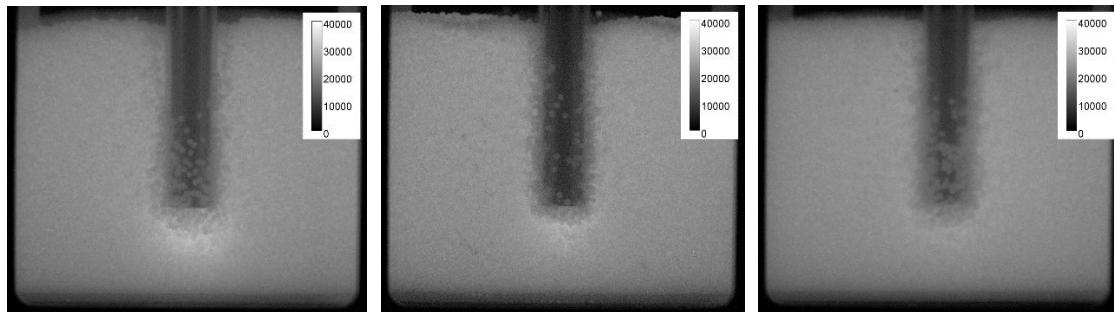


図 1.3 貫入量 100 mm における応力発光強度分布，左： $i/i_{cr}=0.0$ ，中央： $i/i_{cr}=0.5$ ，右： $i/i_{cr}=0.9$

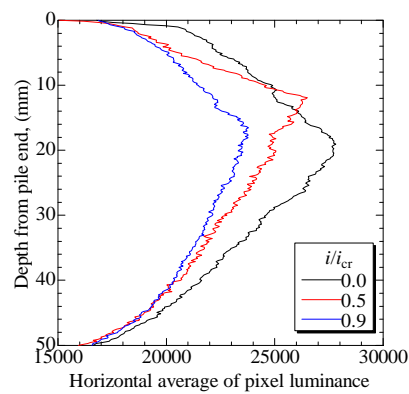


図 1.4 貫入量 100 mm における杭模型下端以深の平均応力発光強度分布
(平均幅：杭模型直径 30mm)

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 Akihiko Kondo, Daiki Takano, Eiji Kohama, Richard J. Bathurst	4. 巻 -
2. 論文標題 Visualization of localized deformation and load transmission during pile penetration using mechanoluminescent-coated particles and digital image correlation (in printing)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	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） なし	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤明彦, 高野大樹, 小濱英司
2. 発表標題 応力発光現象と屈折率整合法を応用した開端杭圧入時における地盤内の貫入抵抗の可視化
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021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		
カナダ	royal military college of canada		