

液状化に至る応力鎖消滅過程の可視化による構造物不安定化機構の解明

Visualization of instability process of structures based on disappearance of stress chain due to liquefaction

(国研) 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 近藤明彦

(研究計画ないし研究手法の概略)

【研究背景・目的】

地盤の液状化現象は、構造物を支える地盤を不安定化させ甚大な被害を発生させる現象であり、その再現モデルや被害推定の精度を向上させるために、現象のより詳細な理解は必要不可欠である。既往の研究により、液状化は、地盤が地震動によるせん断時に体積圧縮しようとして、過剰間隙水圧が有効拘束圧まで上昇して有効応力が0になることで発生すると記述されている。しかし、この現状の理解は、間隙水圧や有効応力が一様な要素として仮定した条件下におけるものであり、ミクロな土粒子レベルの有効応力状態から液状化がどのように発展してマクロな構造物の安定性に影響するかは未解明である。

本研究では、図-1 に示す粒子単位の作用力状態を発光強度で表す応力発光粒子を用いて有効応力の推移を粒子単位で可視化に挑戦することで、液状化による構造物の不安定化機構の解明を目的としている。ここで、応力発光粒子は、弾性領域の力学的作用で発光する *Elasticoluminescence* に分類される応力発光材料のうち、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ピングした欠陥制御型アルミン酸ストロンチウム¹⁾を用いて、二液性エポキシと混合した塗料を直径 2.5~3.0mm の熔融石英粒子表面に塗装して作成²⁾している。この応力発光粒子は荷重増分と発光輝度値の関係から校正係数を求めることで、発光から荷重への換算が可能である。

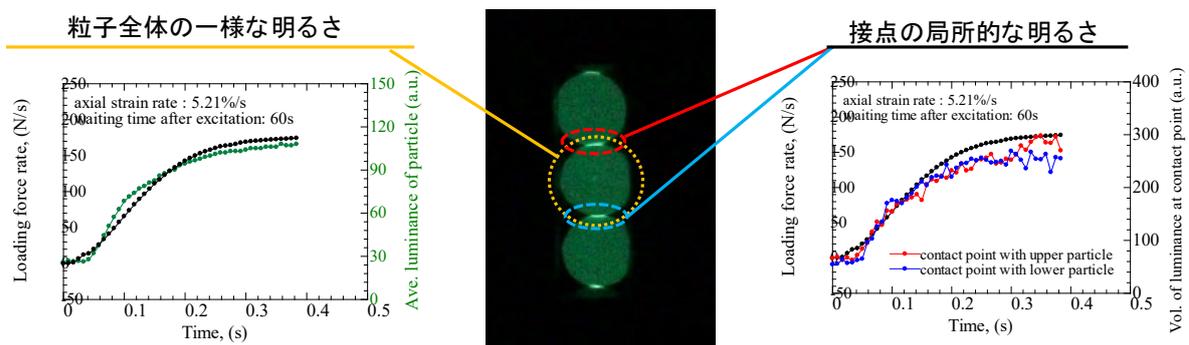


図-1 粒子全体の発光と接点の局所的な発光に関するキャリブレーション

【実験方法】

1. 有効応力の異なる地盤への载荷実験による発光挙動の観察

図-2 に示す载荷実験で、応力発光粒子を用いて粒子単位の有効応力の可視化方法について検討を行う。本実験では、有効応力の異なる供試体として、鉛直上向きの浸透力を調節して有効応力の低下度合いを変化させた供試体を作成し、载荷時の発光挙動を比較することで検討を行った。

実験条件としては、動水勾配の無いものと、限界動水勾配に対して 0.5 となる動水勾配の浸透流を与えた供試体を対象とした。なお、応力発光材料は水と反応して発光強度が低下するため、間隙流体には流動パラフィンを用いている。

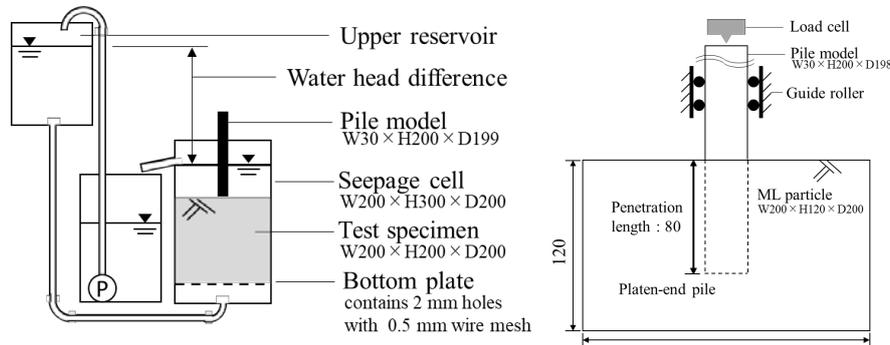


図-2 有効応力の異なる地盤への载荷実験概略図（左：全体図，右：土槽拡大図）

2. 加振実験における液状化の進展に応じた構造物の不安定化過程の観察

図-3 に示す模型振動台実験で、入力地震動に対する地盤内のミクロな応力発光挙動の推移と矢板形状の構造物模型の応答を検討することで構造物の不安定化機構の検討に挑戦する。本実験では、図-3 (b) に示すような有効応力減少によって地盤のせん断抵抗力の局所的な低下が発光強度の低下として可視化され、構造物の転倒や沈下などの挙動が観察されると想定した。実験条件としては、乾燥状態と飽和状態の供試体に同様の振動を与え、撮影画像を解析することで、構造物を支える粒子間の力の繋がりと応力鎖の発生・消滅といったダイナミクスを検討した。

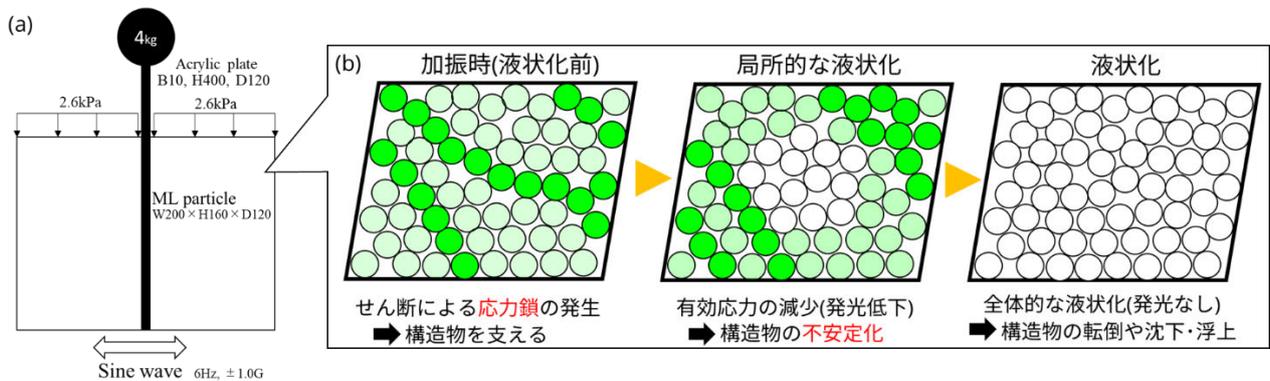


図-3 応力発光粒子を用いた液状化による構造物の不安定化に関する模型振動実験の概要
(a)振動台実験条件(b)予想する液状化進展と構造物の不安定化過程

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 有効応力の異なる地盤への载荷実験による発光挙動の観察

図-4 に貫入体（幅 30mm）を供試体に 10mm/s で貫入させた際の荷重と貫入量の関係を示す。限界動水勾配に対する動水勾配 i/i_{cr} が 0.0 と 0.5 の供試体では、いずれも貫入量の増加に伴って貫入抵抗が増加しており、 i/i_{cr} が 0.5 の有効応力を低下させた条件では、貫入抵抗が 60%程度に低くなっている。貫入時の様子として、貫入量 20 mm 毎に貫入体幅で平均した貫入体直下の平均発光強度分布を図-5 に、図-6 には撮影画像(4k, 30fps, 8bit, ISO6400)を示す。図より、発光は貫入体直下に集中しており、所々に輝度の高い発光が確認できる。これは、発光粒子間もしくは発光粒子と壁面間における発光であることから、粒子間の接触

力も可視化できており、強い発光が線上に連なる応力鎖も確認できる。また、これらの発光強度は、いずれの貫入量でも有効応力を低下させた地盤で低下していることから粒子単位の有効応力の可視化が可能であると考えられる。

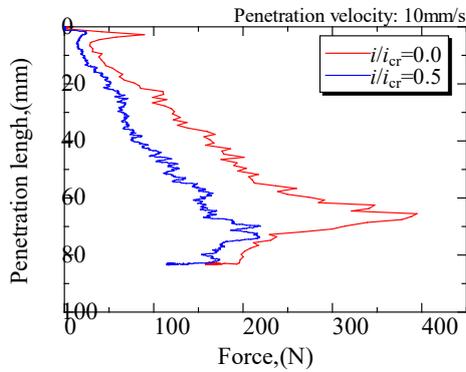


図-4 荷重-圧入量関係

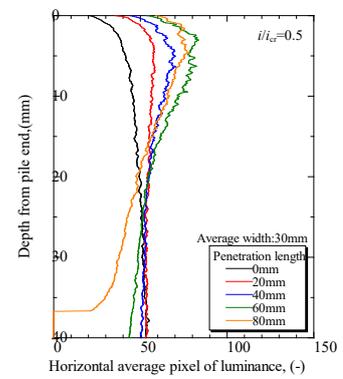
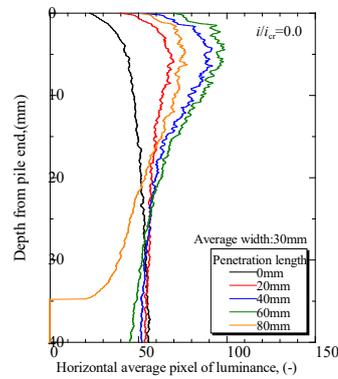
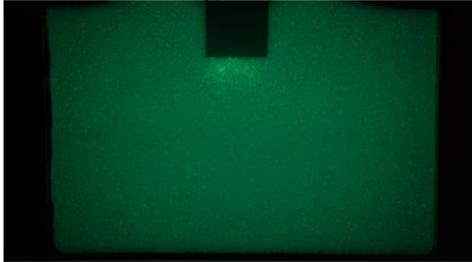
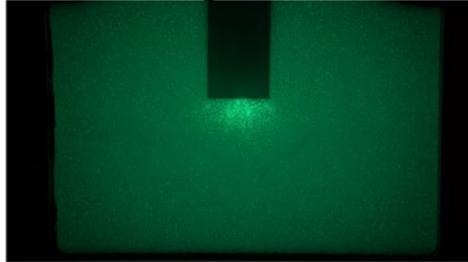


図-5 貫入量 20mm 毎の平均発光強度分布

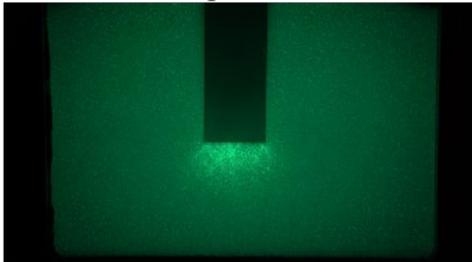
Penetration length: 20mm



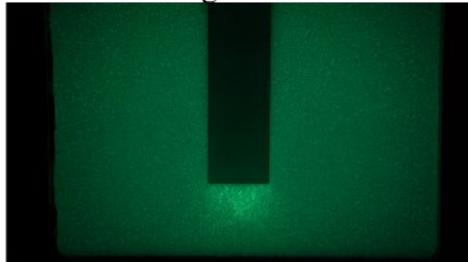
Penetration length: 40mm



Penetration length: 60mm



Penetration length: 80mm

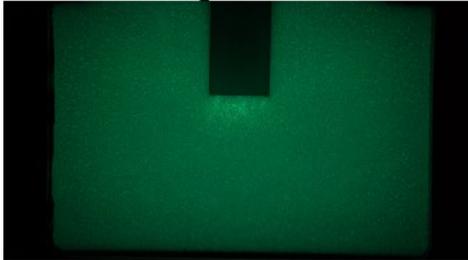


(a) $i/i_{cr}=0.0$

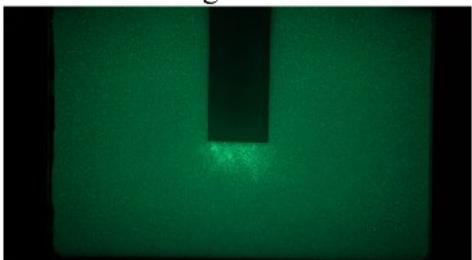
Penetration length: 20mm



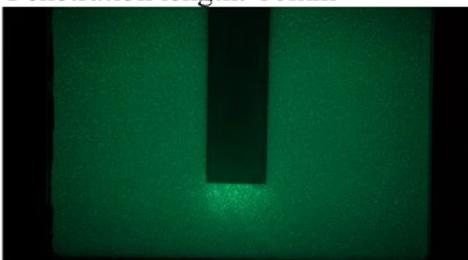
Penetration length: 40mm



Penetration length: 60mm



Penetration length: 80mm



(b) $i/i_{cr}=0.5$

図-6 有効応力の異なる地盤への載荷実験における貫入量 20mm 毎の発光挙動

2. 加振実験における液状化の進展に応じた構造物の不安定化過程の観察

入力地震動として振幅 1G のサイン波を 10 波入力した際の応力発光粒子の発光挙動（撮影条件：2.8k, 120fps, 16bit, ISO10000）として、図-7(a)に乾燥状態，図-7(b)に飽和状態の供試体の 1～4 波における緑色の発光強度のスナップショットを示す。加振条件は、飽和状態の供試体が液状化に至る条件で設定した。なお、いずれの図においても、図-6 と比較して発光強度が低く、判別しにくい状態となっている。これは、応力発光が蛍光材料のため発光が微弱であり、加振波に対して十分な撮影枚数を確保するために撮影速度を増加させた結果、画像 1 枚あたり発光強度が低下したためである。これに伴い、ISO 感度も増加させているが、更に感度を上昇させた場合、発光挙動が感度上昇によるノイズと比較して判別が難しくなるため、試行錯誤により本撮影条件としている。

図より、乾燥状態では、矢板模型の供試体右側上端と左側下端付近に若干明るい領域が観察され、飽和状態では、下端付近に若干明るい領域が確認できるが 1 波目以降は発光強度がさらに低下している。この挙動については、図-8(a) に示す矢板模型下端の領域における平

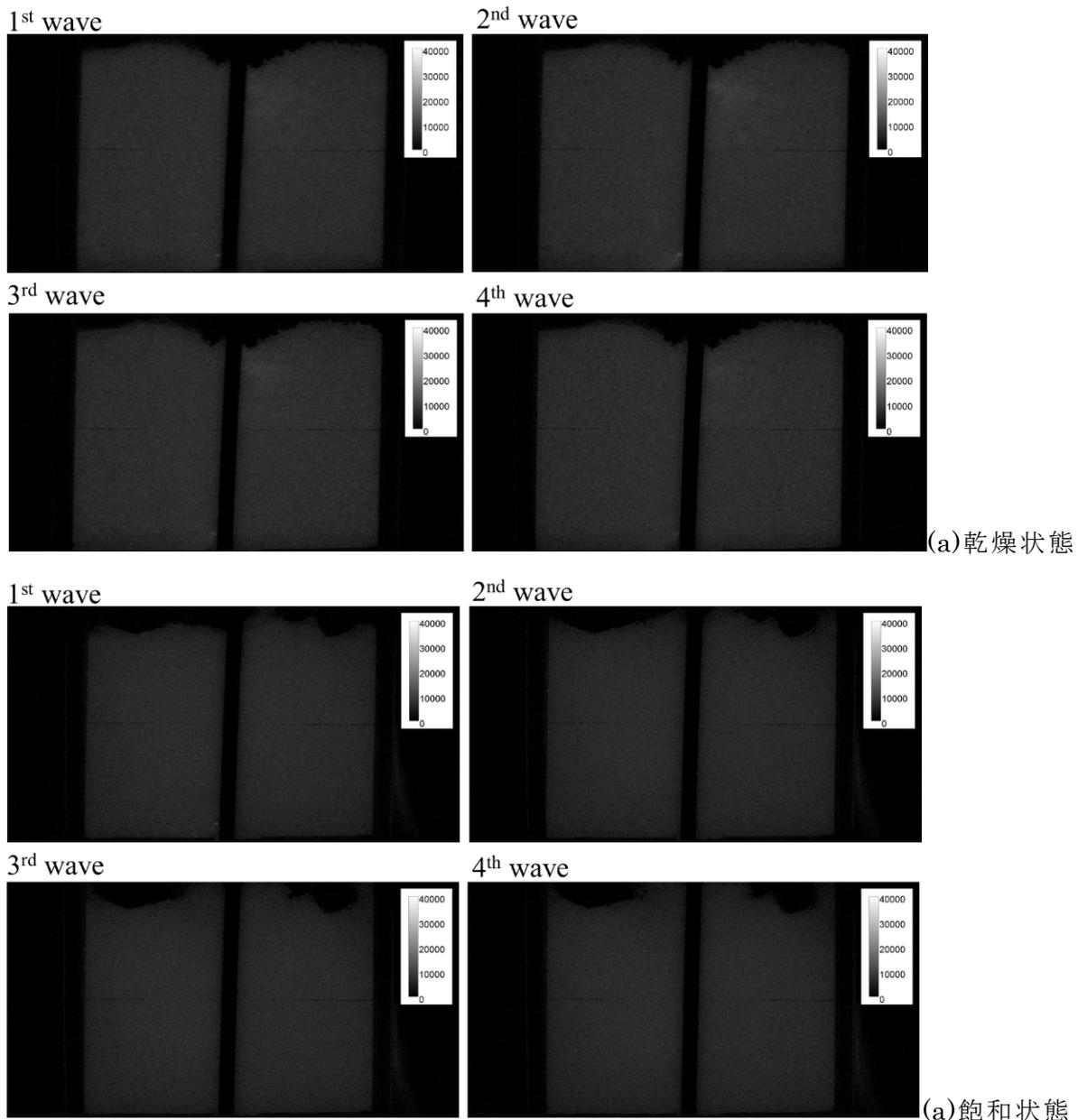


図-7 加振実験における矢板模型周辺の応力発光挙動

均発光強度を算出し，図-8(b) にその推移を示す．図より，間隙流体の有無によって加振前の平均発光強度に若干の差はみられるが，その初期値に対する変化に着目して，経過時間 0.2 秒からの加振について検討する．乾燥状態では，平均発光強度の振幅に変動がみられるが，1 波あたりの平均はある程度一定であるのに対して，飽和状態では 1 波目のみ高い発光強度を示し，2 波目以降は低下して一定程度の小さい振幅となる傾向が確認できる．

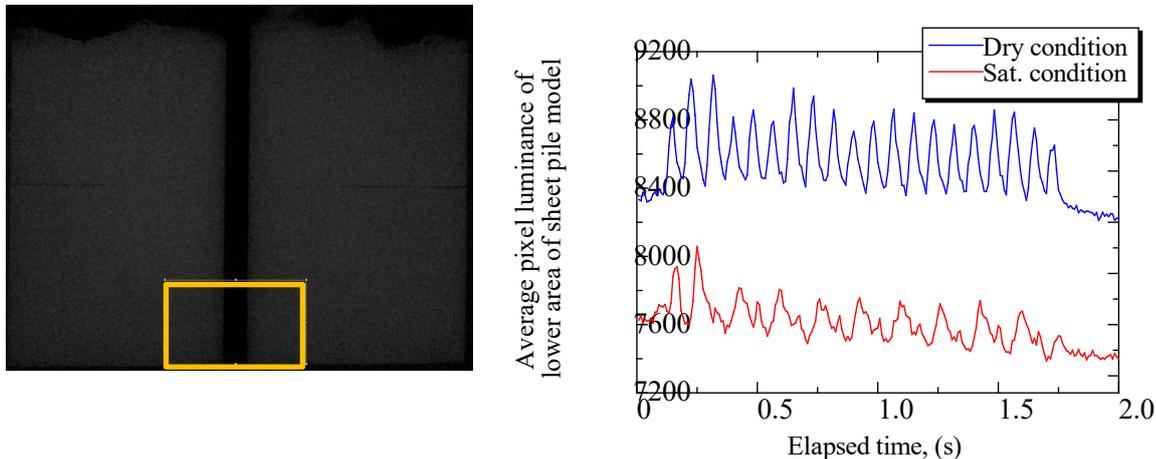


図-7 加振実験における矢板模型下端周辺の発光挙動
(左：平均発光強度算出領域，右：平均発光強度の推移)

以上より，応力発光粒子を用いることで，有効応力の異なる地盤への载荷実験による発光挙動の観察から有効応力の推移を粒子単位で可視化できることを示した．加振実験における発光挙動の観察から，構造物周辺の発光挙動に着目することで発光強度が低下しており，有効応力が低下していることを示した．ただし，加振実験においては，撮影速度の増加による輝度低下により，粒子単位の発光挙動の推移の観察は難しく，今後の課題として高感度かつ高速度の撮影が必要とであることも明らかとなった．

(参 考 文 献)

- 1) Xu, C. N., Zheng, X. G., Akiyama, M., Nonaka, K., Watanabe, T., Dynamic visualization of stress distribution by mechanoluminescence image. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 2, pp. 179–181, 2000.
- 2) Kondo, A., Takano, D., Kohama, E. and Bathurst R. J. Visualization and measurement of load transmission in granular assemblies using mechanoluminescent-coated particles. *Granular Matter* 21, 50, <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0907-5>, 2019.

(発 表 論 文)

特になし