

基礎の支持力実験を対象とした DEM による大変形解析

早稲田大学 学生会員 ○今田 耕太郎 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

1. はじめに

近年の地震や降雨を起因とした大規模な斜面崩壊や土石流が社会基盤に及ぼす影響は甚大である。これら地盤の大変形問題に対し、定量的に評価するための予測技術の確立が重要である。そこで、地盤の崩壊現象を評価する技術として数値解析手法による地盤の大変形挙動予測が期待されている。本研究では、数値解析手法の一つである個別要素法（以下、DEM）を採用し、模型実験を対象とした地盤の大変形挙動について検討している。本稿では、アルミ棒積層体地盤を用いた基礎の支持力実験¹⁾を対象として DEM によるシミュレーションを実施し、実験結果と比較することで大変形領域における DEM の適用性について検討した。実験・解析双方の荷重沈下関係、崩壊地盤内部の鉛直変位およびせん断ひずみを算出することで基礎の支持力実験における地盤の崩壊現象について考察するとともに、低拘束圧下における地盤崩壊後の粒状体運動の特性について考察した。

2. 実験装置および実験方法¹⁾

実験装置は、高さ 60(mm)、幅 80(mm)、奥行き 50(mm)の真鍮製の剛体基礎および、高さ 200(mm)、幅 523(mm)の寸法で敷き詰められているアルミ棒積層体から構成される。基礎部はハンドルにより鉛直変位が制御可能である。アルミ棒の寸法は、長さ 50(mm)の円形断面であり、直径 1.6(mm)と 3.0(mm)の2種類をそれぞれ質量比 2:1 の割合で混合している。図 1 に実験実施前の装置の状況を示す。地盤の地中変位およびせん断ひずみの算出にあたり、本研究では、Particle Image Velocimetry(以下、PIV)解析²⁾により地盤の変形解析を行っている。PIV 解析を行うに当たり、地盤の変形性状を精度良く追跡するためにアルミ棒の断面を 3 色のペン（赤、青、黒）により着色し、色相がランダムになるよう攪拌することで視認性を向上させている。

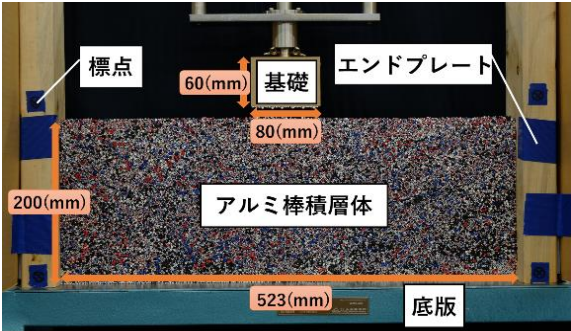


図 1 支持力実験装置（初期配置）

地盤作成後、基礎を地盤上部から 1(mm/min)の速度で載荷し、最大変位 25(mm)まで押し込む。載荷時は支圧力を測定するとともに、鉛直変位 0.5(mm)間隔で変形状況をデジタルカメラにより撮影する。取得した画像データを利用し、PIV 解析を実施、読み取った座標から形状関数を用いることで地盤内部の鉛直変位およびせん断ひずみを算出する。

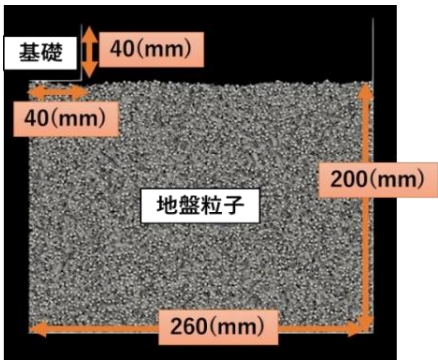


図 2 DEM 解析の地盤モデル

3. DEM の解析条件および解析手順

解析モデルを図 2、解析における諸条件を表 1 に示した。法線ばね定数は、二円柱および円柱と板の接触理論³⁾より、材料物性値から理論値を算出した。これを踏まえ、解析時間との兼ね合いも考慮して決定した。せん断ばね定数は、法線ばね定数に対する通減率 0.25 を採用した。粘性減衰定数は、一自由度系の臨界減衰定数である 1.0 を採用した。ローカルダンピングは、試し計算を行うことで発散性なるべく小さくなるような値を採用した。粒子間摩擦角は、既往の研究⁴⁾にて一面せん断試験を実施し、内部摩擦角が 23.5° と得られていることから 25°（摩擦係数 $\mu=0.47$ ）とした。解析モデルは対称性を考慮し、基礎中央から 260(mm)幅をとった半断面での領域を設定した。設定した領域に対して、空中落下法により粒子を充填することで地盤を作成した。地盤作成後、基礎を地盤上部から速さ 1(mm/s)で載荷し、25mm まで変位させて解析終了とする。基礎の支圧力については、基礎の底部に接触している粒子の接触力を平均化し、変位ごとに記録する。解析終了後、あらかじめ地盤内部に設定した標点粒子を追跡し、形状関数を用いて地盤内部の鉛直変位およびせん断ひずみを算出する。

表 1 数値解析における諸条件

項目	単位	値
積分時間間隔 Δt	(s)	0.000001
粒子密度 d	(g/cm ³)	2.7
法線ばね係数（粒子間） k_n	N/m	100000000
せん断ばね係数（粒子間） k_s	N/m	25000000
法線ばね係数（粒子壁間） k'_n	N/m	200000000
せん断ばね係数（粒子壁間） k'_s	N/m	5000000
粘性減衰定数 h	-	1.0
ローカルダンピング α	-	0.10
摩擦係数 μ	-	0.47

4. 結果の比較

実験結果と解析結果における荷重沈下関係、地盤内部の鉛直変位分布（25 mm変位）および最大せん断ひずみ分布を図 3～5 にそれぞれ示す。

・荷重沈下関係 実験・DEM 解析ともに支圧力の増減を繰り返しながら増加するという傾向にあることを確認した。本研究は、1G 場における低拘束圧条件であるため、基礎周辺地盤が離散的に崩壊する。したがって、極限支持力は大きく発現しなかったものと考えられる。荷重増減の原因としては、アルミ棒に対して基礎が十分に大きくないことが原因となり、基礎底部から地表部へ粒子が移動する際、粒子が受け持つ荷重が大きいためである。また、解析結果においては、基礎底部の接触判定により支圧力を算出していることから増減へと影響していると考えられる。

・鉛直変位分布 図4より、基礎の沈下とともに、基礎直下の地盤は押し込まれ、基礎周辺の粒子が端部から外側に押し上げられることが確認できる。実験・解析ともに同様の色彩分布となっている。一方で、解析結果の方が基礎直下の沈下する範囲が大きいことを確認している。これについては、初期の粒子配置が異なることおよび地盤密度の相違によるものと考えられる。実験結果と比較するとゆる詰めであり、基礎直下の地盤が押し込まれる際に地表面へは移動せずに、隙間へと粒子が入るために鉛直下方向の変位が大きい。

・最大せん断ひずみ分布 図5より実験・解析結果の崩壊推移がよく一致している。沈下の初期に地表部にて、基礎端部で発生したせん断は初期崩壊領域を形成し、その後も基礎載荷を進めると、新たな崩壊領域を形成する。基礎載荷実験においては、この繰り返しにより地盤の崩壊領域を徐々に拡大していく。また、せん断ひずみの分布が基礎周辺から地表面にかけて広く分布していることから、低拘束圧条件であるため、地盤が各部で離散的に崩壊する様子が確認できる。一方で、最終的な崩壊領域に着目すると解析結果の方が地盤深く、かつ外縁方向にも広く及んでいる。前述のとおり、解析結果における初期の粒子配置がゆる詰めであることが影響し、実験結果よりも広い範囲でひずみが生じたと考える。

5. まとめ

本研究では、アルミ棒積層体地盤を用いた基礎の支持力実験とDEMによる解析の比較を行った。双方において、低拘束圧下における地盤の離散的な崩壊現象を確認した。また、基礎載荷による地盤の大変形領域における崩壊現象を考察し、DEMの適用性を検討することができた。解析上においては、粒子配置が支持力および変形現象へと及ぼす影響が大きいことが確認できた。今後の課題としては、地盤密度に着目し、解析上の粒子配置をより密にすることを検討している。また、解析物性値にて、転がり摩擦の導入および値の再検討を行うことで、より精度の高い再現解析を目指す。

<謝辞>本研究にあたり、日本工営株式会社のソッキアン博士より画像解析ソフトを提供していただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 船橋知希, 赤木寛一, 桐山貴俊: PIVを用いたアルミ棒積層体地盤における基礎の支持力実験に関する大変形解析, 第15回地盤工学会関東支部発表会, p.p.119~120, 2018
- 2) 上野勝利, スレンソッキアン: 隣接基礎による砂地盤の変形と支持力, 土木学会応用力学論文集, Vol7, pp. 65-74, 2004.
- 3) Warren C. Young, Richard G. Budynas: Roark's Formulas for Stress and Strain (Seventh Editoin), McGraw-Hill.p.703, 2002
- 4) 藤井幹生, 三浦丈典, 中筋智之, 赤木寛一, 桐山貴俊: 大変形領域に着目した擁壁背後地盤の変形挙動, 第12回地盤工学会関東支部発表会, pp.98~99, 2015.

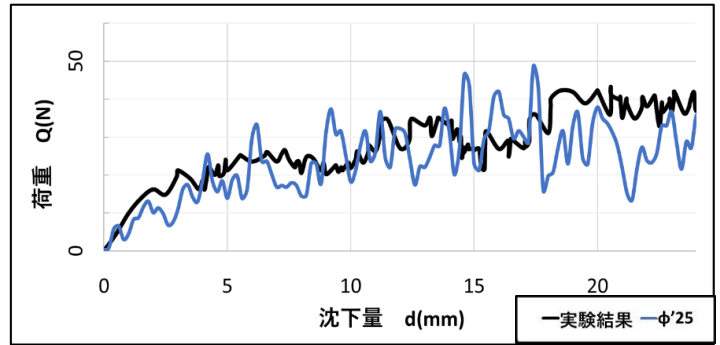
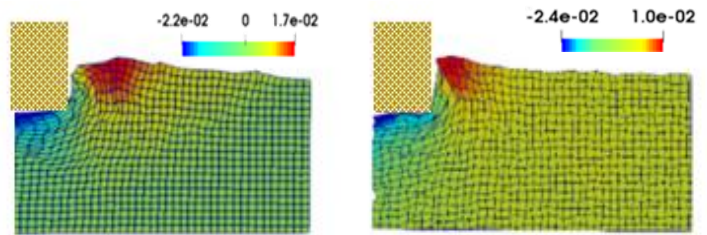


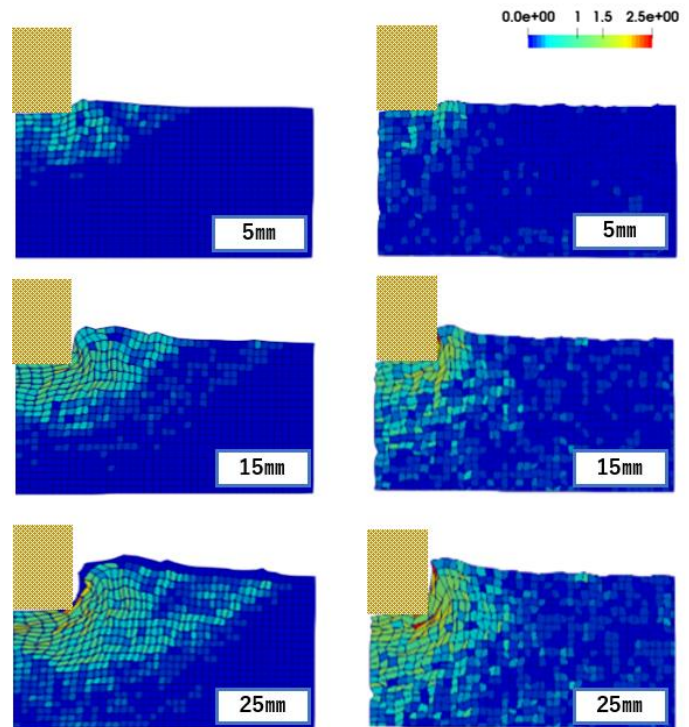
図3 荷重沈下関係



(a) 実験結果

(b) DEM 解析結果

図4 地盤内部の鉛直変位分布 (25mm 変位)



(a) 実験結果

(b) DEM 解析結果

図5 地盤内部の最大せん断ひずみ分布