

個別要素法を用いた基礎載荷地盤における粒子の大変形挙動解析

基礎地盤 粒状体 個別要素法 早稲田大学 学生会員 ○船橋 知希 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
早稲田大学 学生会員 江崎 晃一 早稲田大学 学生会員 佐藤 慶太

1. はじめに

基礎地盤の支持力問題に関する研究は古くから行われている。従来、基礎地盤は剛塑性的であるという前提のもと研究が行われたが、実際の基礎地盤の崩壊は進行性であり、剛塑性的な仮定と相容れない点が多い。実際の基礎地盤における崩壊推移を解明することが必要であり、近年では数値解析手法による検討が行われている。本研究では、大変形領域の変形解析手法として個別要素法（以下、DEM）を採用し、特に「低拘束圧」という条件下における粒子の挙動に注目している。アルミ棒積層体地盤を用いた基礎の支持力実験を行い、同時にこの実験を対象とした DEM による再現解析を行う。実験・解析の結果を比較し、DEM の適用性について検討するとともに、基礎載荷地盤における崩壊推移および支持力機構について考察する。

2. 実験装置および実験方法

基礎載荷実験装置は、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ている。基礎部はハンドルにより鉛直変位が制御可能である。アルミ棒は、長さ 50(mm)、直径 1.6(mm)、3.0(mm)の 2 種類の円形断面のものをそれぞれ質量比 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。

本研究では、Particle Image Velocimetry（以下、PIV）¹⁾を用いた画像変形解析を行っている。PIV では時間的に連続した 2 画像間の輝度分布を比較して解析を行う。PIV 解析において地盤の変形を精度よく追跡するためにアルミ棒断面を三色に着色している。

地盤作成後、基礎を 1(mm/min)の速度で最大変位 25(mm)まで鉛直変位させる。載荷時、支圧力を測定するとともに、基礎の鉛直変位 0.5(mm)ごとに地盤状況を装置前方から撮影する。撮影した画像データを用いて PIV 解析を行い、地盤内部の変位および形状関数に基づいた最大せん断ひずみを算出する。

3. 解析条件および解析手順

表 1 に解析における諸条件について示す。法線ばね定数は、二円柱および板の接触理論²⁾に基づいて、材料物性値より算出し、解析時間および時間刻み幅との関係を考慮して決定する。せん断ばね定数は、法線ばね定数に対する逓減率 0.25 として決定する。粘性減衰定数は、基礎載荷実験のような準静的な問題において粒子の衝突などによるエネルギーの発散は少ないと仮定し、可能な限り計算を安定させるために一自由度系の臨界減衰係数 1.0 と決定する。ローカルダンピング減衰定数は、計算の安定化のために用いられることが多いことから、計算が発散しないできるだけ小さな値である 0.10 と決定する。粒子間摩擦角は、既往の研究³⁾における一面せん断試験の結果より、 23.5° と求まっているため、 25° （摩擦係数 0.47）と決定する。

DEM 解析では計算負荷および対称性を考慮し、縦 200mm、横 260mm のモデルを用いる。図 2 に解析モデルを示す。解析モデルの中に、粒子を空中落下法を用いて充填させ、地盤を作成する。地盤作成後、幅 40mm の載荷板を実験と同様に鉛直下向きに 1mm/sec の一定速度で鉛直変位 25(mm)まで載荷する。支持力については、壁と粒子に作用する法線方向の力および壁の角と粒子に作用する接触方向の力の鉛直成分を足し合わせるにより算出する。また、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、地盤内部の鉛直変位および有限要素の形状関数よりせん断ひずみを算出する。

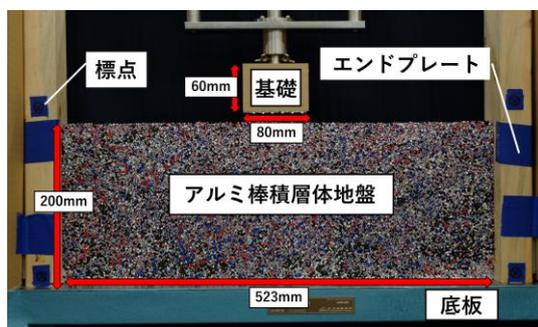


図 1 支持力実験装置（変形前）

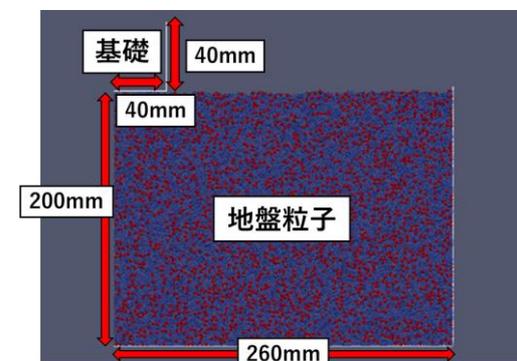


図 2 解析モデル

表 1 数値解析における諸条件

項目	単位	値
時間刻み幅 Δt	s	0.000001
粒子密度	g/cm^3	2.7
法線ばね定数（粒子間）	N/m	100000000
せん断ばね定数（粒子間）	N/m	25000000
法線ばね定数（粒子壁間）	N/m	200000000
せん断ばね定数（粒子壁間）	N/m	50000000
粘性減衰定数	-	1.0
ローカルダンピング	-	0.10
摩擦係数	-	0.47

Large deformation analysis of bearing capacity experiment of foundation by using Discrete Element Method	Tomoki, Funahashi Waseda University Hirokazu, Akagi Waseda University Koichi, Esaki Waseda University Keita, Sato Waseda University
--	--

4. 実験結果および解析結果

実験およびDEM解析における荷重沈下曲線を図3に示す。いずれの荷重も、荷重が進むにつれて増減を繰り返しながら増加する傾向にあることが確認できる。実験においては、基礎幅に対してアルミ棒の粒径が大きいアルミ棒が基礎底部から地表面へと移動する際に荷重が減少する。一方、解析においては、基礎底部の接触判定方法の影響により荷重が増減している。また、本研究は1G場における低拘束圧条件であり基礎周辺地盤は離散的に崩壊するため、極限支持力は発現しなかったと考えられる。

実験およびDEM解析における地盤内部の鉛直変位分布図を図4に示す。図4より、実験結果および解析結果ともに、基礎の沈下に伴い、基礎直下の地盤が押し込まれ、基礎端部周辺の粒子が外側へと押しあげられる様子が確認できる。しかし、実験結果と比較し解析結果では、地表部の押しあげられる分布が小さく、基礎直下の押し込まれる分布が大きい。解析における初期の地盤が実験におけるものと比べるとゆるい詰めであり、基礎の沈下に伴い地盤が押し込まれると粒子は地表面へ押しあげられず、基礎直下部の隙間へ入り込むことが原因である。

実験およびDEM解析における地盤内部の最大せん断ひずみ分布図を図5に示す。実験結果では、初期に基礎端部に局所的なひずみが観測され、その後すべり線を伴い大きく変形し、更に基礎の荷重を進めることで新たなすべり線の発現が観測された。一方、解析結果では、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おり、明瞭なすべり線は観測されない。低拘束圧条件下において地盤が離散的に崩壊している様子が観測された。

以上の結果より、実験および解析の崩壊推移について考察する。実験解析ともに基礎荷重初期段階に基礎端部で発生したせん断は初期崩壊領域を形成し、基礎荷重の進行につれ新たな崩壊領域を形成する。実験においては、すべり線を連続的に生じることで領域を拡大しつつ崩壊する。すべり領域全体にわたってせん断ひずみ分布が観測されることから、すべり領域全体で粒子が離散的に崩壊していることがわかる。特に、本実験は低拘束圧条件であるため、地表部付近の粒子は移動しやすく、粒状体地盤の離散的な挙動が顕著である。一方、解析においては、粒子の離散性が卓越し、すべり線を伴わず地盤全体が各部で崩壊する。最終的な崩壊領域に着目すると、実験結果に比べ地盤深く、かつ外縁方向に広く及んでいる。解析上の回転抵抗に関する物性値を与えておらず、回転により安定している粒子が存在することで、せん断力が伝達しにくくなると思われる。

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において、大変形領域におけるPIVを用いた画像解析結果と個別要素法を用いた再現解析結果の比較を行った。研究成果は以下の通りである。

- 1) 低拘束圧条件下において、地盤の離散的な崩壊傾向が確認された。
- 2) 実験結果、解析結果ともに、荷重沈下曲線における荷重の推移および地盤の崩壊推移は概ね一致した。しかし、鉛直変位分布における分布の大小、最大せん断ひずみ分布におけるすべり線の有無といった点では一致しなかった。また、解析上の粒子配置が支持力および変形状況へと影響を及ぼすことが確認された。
- 3) 大変形領域における個別要素法の適用可能性について、更なる物性値の調整が必要である。

・今後の課題

解析における粒子の初期充填状態を密詰めにするにより再現性の高い解析の検討を行う。

<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。記して敬意を表します。

6. 参考文献

- 1) 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, pp65-74, 2004.
- 2) Warren C. Young, Richard G. Budynas: Roark's Formulas for Stress and Strain (Seventh Edition), McGraw-Hill. P703,2002
- 3) 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, pp98-99, 2015.

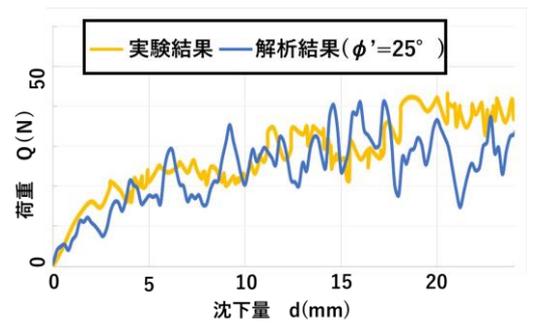


図3 荷重沈下関係

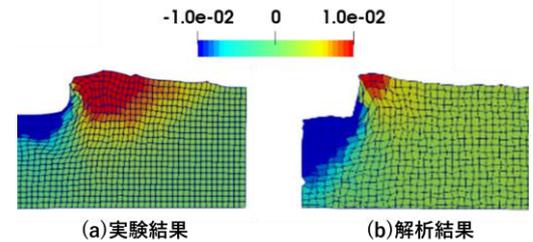


図4 鉛直変位分布図(25mm沈下)

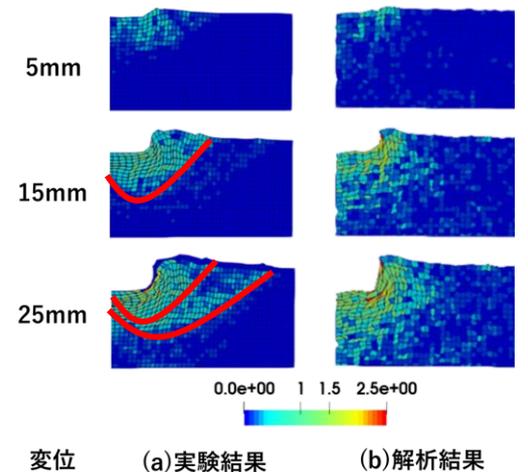


図5 最大せん断ひずみ分布図