

## 杭鉛直貫入時の粒状体地盤挙動の観察および DEM シミュレーション

早稲田大学 学生会員 ○石井 翔梧

早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

清水建設（株）技術研究所 正会員 桐山 貴俊

## 1. はじめに

杭の貫入施工は、周辺地盤の密度・応力の増加、大変形を引き起こす。地盤変状は、近接構造物に影響を及ぼすため、周辺地盤の変形挙動を予測する必要がある。近年大変形にも対応可能な数値解析手法が研究者の関心を集めている。本研究では大変形問題を得意とする数値解析手法の一つ、個別要素法（以下、DEM）を用いて、杭鉛直貫入時の粒状体地盤の変形挙動について調べている。本稿では模型地盤を用いた杭の鉛直貫入実験と DEM による再現解析を実施した。実験・再現解析の結果比較を行い、DEM の適用性を検討した。また再現解析を用いて、杭の貫入に伴う周辺地盤の変形挙動についても考察した。

## 2. 実験装置および実験方法

杭の鉛直貫入実験装置は、模型地盤（アルミ棒積層体）と杭模型で構成される（図1）。模型地盤は、直径 1.6(mm)、3.0(mm)のアルミ棒をそれぞれ質量比 2:1 の割合で混合し作成した。実験の再現性確保のため模型地盤は 20(mm)層ごとに密度管理（目標密度  $21.6(kN/m^3)$ ）を行い、計 16 層積み上げた。杭模型はステンレス製であり、軸部と楔部で構成される。軸部の高さは 130(mm)、楔部の高さは 7.14(mm)、幅 10(mm)、奥行き 50(mm)、先端角度は  $70^\circ$ である。

模型地盤の変形挙動は、Particle Image Velocimetry（以下、PIV）を用いて解析した。PIV では時間的に連続する 2 画像間の輝度分布の変化を比較して平均変位ベクトルを算出する。PIV の精度向上のため、アルミ棒断面を 3 色（青、赤、黒）でランダムに着色した。同様の理由から地盤の背後に黒色カーテン、上部にはアクリル板を設置した。

模型地盤作成後、杭模型を装置上部より吊り下げ、楔部が地盤に埋まるように設置した。ここで荷重計を 0 セットし、実験開始とする。手動ハンドルで杭模型を 90.0(mm)まで貫入させる。一定の変位ごとに、荷重値を読み取る。同時に装置前方から模型地盤をデジタルカメラで撮影し、PIV による画像解析に用いた。

## 3. DEM による再現解析の解析条件および解析手順

再現解析に用いる解析モデルを図 2、入力パラメータを表 1 に示す。地盤モデルを構成する粒子数は 51632 個であり、模型地盤の寸法と目標密度から算出した。地盤モデルは空中落下法で作成した。杭モデルは、実験で用いた杭模型を剛体と仮定し、剛線要素で表現した。杭モデルは実験同様、楔部が地盤に埋まった状態を初期状態とし、地盤上部から鉛直下向きに載荷速度  $5.0(mm/s)$ で  $90.0(mm)$ まで貫入させた。実験では実験開始直前に荷重計を 0 セットしている。そのため再現解析において接荷重は、杭にかかる鉛直方向合力から初期鉛直方向合力を引いた値とした。

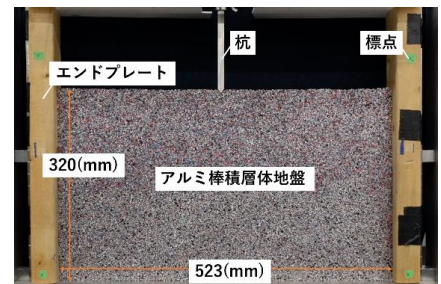


図1 杭の鉛直貫入実験装置

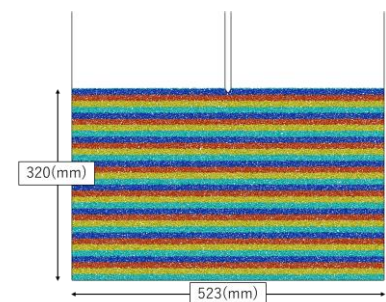


図2 再現解析モデル

表1 再現解析入力パラメータ

パラメータ	単位	値
時間刻み幅	(s)	0.000002
粒子密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.7
法線ばね定数 (粒子-粒子)	(N/m)	$5.00 \times 10^6$
せん断ばね定数 (粒子-粒子)	(N/m)	$1.25 \times 10^6$
法線ばね定数 (粒子-壁・杭)	(N/m)	$1.00 \times 10^7$
せん断ばね定数 (粒子-壁・杭)	(N/m)	$2.50 \times 10^6$
摩擦角 (粒子-粒子)	°	25
摩擦角 (粒子-壁・杭)	°	25
ローカルダンピング	-	0.0
粘性減衰比	-	0.3

キーワード DEM, アルミ棒, 大変形

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室 早稲田大学赤木研究室 TEL03-5286-3405

#### 4. 実験と再現解析の比較

図3, 4に実験および再現解析によって得られた荷重変位関係, 最大せん断ひずみ分布(累積)を示す. 最大せん断ひずみ分布(累積)は画像解析ソフトの表示方法に合わせて初期座標に着色したコンター表示としている.

##### a) 荷重変位関係

図3より, DEMによる再現解析は実験による荷重変位関係の範囲にほとんど収まっており, また荷重値が振動しながら増加していくことを再現出来ている. 実験・再現解析双方の荷重値振動の原因としては, アルミ棒の乗り上げ・もぐりこみ, 杭幅とアルミ棒の直径に近いこと, が考えられる. また荷重値の振動は再現解析の方が実験に比べ, 大きいことを確認出来る. DEMでは粒子が常に振動しており, 要素間の接触・非接触が実験に比べ, 頻繁に起きるためと考えられる. 実験では同一の条件による3caseを行っているが, caseごとにばらつきが出ている. これは模型地盤をcaseごとに作成するため, 積層状態が異なることが原因だと考えている.

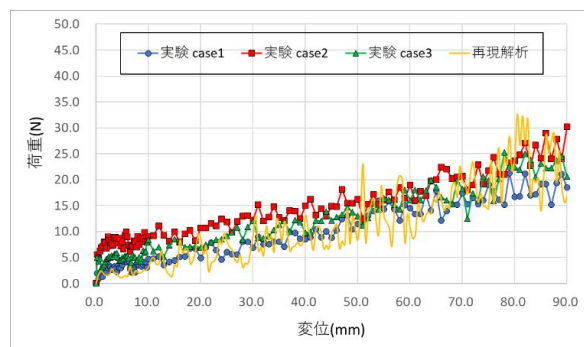


図3 荷重変位関係

##### b) 最大せん断ひずみ分布(累積)

図4より, DEMによる再現解析は, 実験で得られた最大せん断ひずみの, 地表面で最も広く, 大きい値を示し, 深くなるにつれて杭近傍に集中する特徴を再現出来ている. 一方, 再現解析の方が実験に比べ, 変形が広範囲に及んでいる. 原因としては, DEMによるモデル化, 粒子の初期配置の違い, 入力パラメータによるものと推測される.

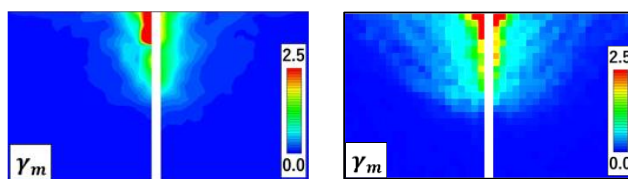


図4 最大せん断ひずみ分布(累積) 変位 90(mm)

#### 5. 杭貫入に伴う地盤のせん断帯内部における粒子挙動

図5, 6に再現解析によって得られた, 最大せん断ひずみ速度分布と角速度分布を示す. なおこの図では変位40.0(mm)と81.0(mm)における座標に着色し, コンター表示している. これより両者の分布領域は酷似しており, これはせん断帯内部では粒子の回転運動が外部に比べて活発であることを意味する. また既往の研究<sup>2)</sup>でも同等の結果が得られている. そのため粒状体内部のせん断帯発達には粒子の回転運動が寄与していると考えられる.

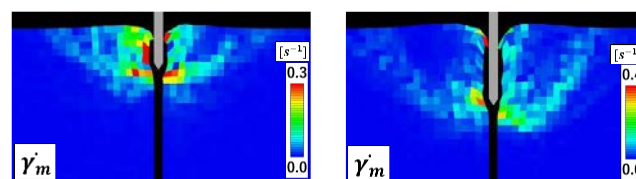


図5 最大せん断ひずみ速度分布  
左: 変位 40(mm) 右: 変位 81(mm)

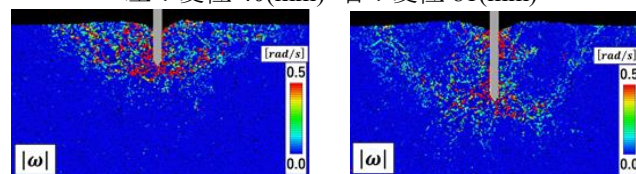


図6 角速度分布  
左: 変位 40(mm) 右: 変位 81(mm)

#### 6. まとめ

本研究では, アルミ棒積層体を用いた杭の鉛直貫入実験とDEMによる再現解析を行い, DEMの適用性, 杭貫入に伴う周辺地盤の変形挙動について考察した. 今後の課題としては, 再現解析をより実験に近い条件で出来るように計算プログラムの改良, 入力パラメータの詳細な検討を行いたい.

<謝辞>本研究にあたり, 日本工営株式会社ソッキアン博士より画像解析ソフトを提供して頂きました. 記して謝意を表します.

#### 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, pp. 65-74, 2004
- 2) 榊原辰雄, 加藤正司, 吉村優治, 澁谷啓, “砂のような粒状材料のせん断挙動およびせん断層に与える粒子形状の影響,” 土木学会論文集 C Vol. 64 No.3, pp. 456-472, 2008.