

## 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

DEM アルミ棒 大変形

早稲田大学 正会員 ○石井 翔梧

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

清水建設(株) 技術研究所 国際会員 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が得意な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・再現解析の結果の比較を行い、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手順

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）。模型地盤の寸法は深さ320(mm)、幅523(mm)である。模型地盤材料は直径1.6(mm)、3.0(mm)のアルミ棒をそれぞれ質量比2:1の割合で混合したものである。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。本実験では杭貫入に伴う主働楔が形成されないと考え、主働楔も含めて作成した。

模型地盤の変形挙動は、Particle Image Velocimetry（以下、PIV）<sup>1)</sup>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。なおこのとき地盤に杭の自重を預けないようにした。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た。取得画像データを用いて、PIVによる画像解析を行った。

### 3. DEMによる再現解析および解析手順

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荷重速度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。

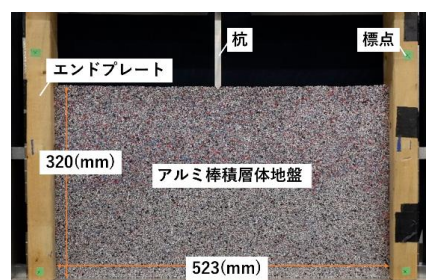


図1 杭の鉛直貫入実験装置

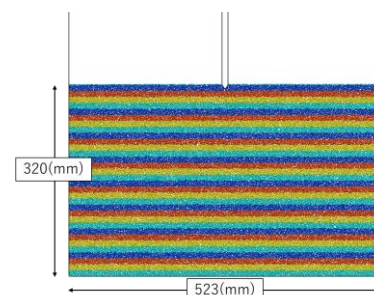


図2 再現解析モデル

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

Observation and DEM simulation of granular soil behavior during vertical pile penetration

Shogo, Ishii Waseda University  
Hirokazu, Akagi Waseda University  
Takatoshi Kiriya Shimizu Institute of Technology

#### 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が近いこと, 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 ごとに作成しているため, 積層状態が異なることが原因だと考えている.

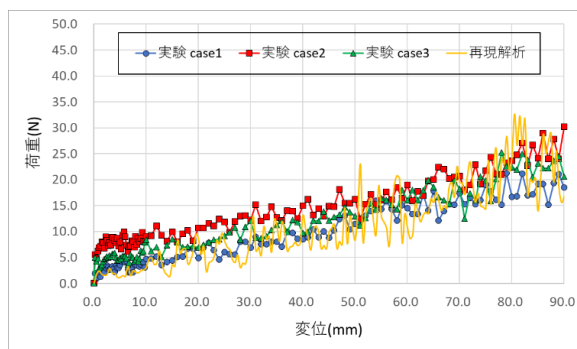


図 3 荷重変位関係

##### 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.

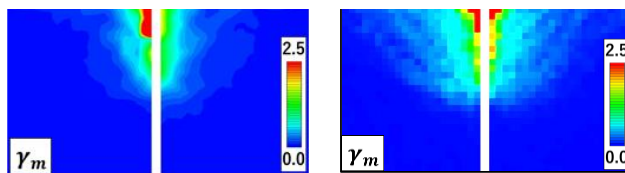


図 4 最大せん断ひずみ分布 (累積) 変位 90(mm)

#### 5. 杭貫入に伴う地盤のせん断帯内部の粒子挙動

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. 両者の分布領域は酷似していることが分かる. 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>でも同等の結果が示されている. そのため粒状体におけるせん断帯の発達には粒子の回転運動が寄与していると考えられる.

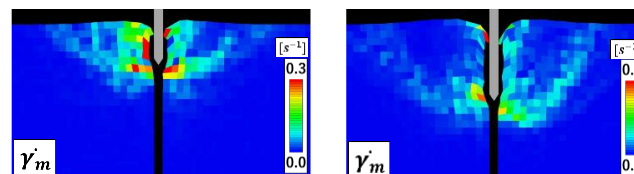


図 5 最大せん断ひずみ速度分布  
左: 変位 40(mm) 右: 変位 81(mm)

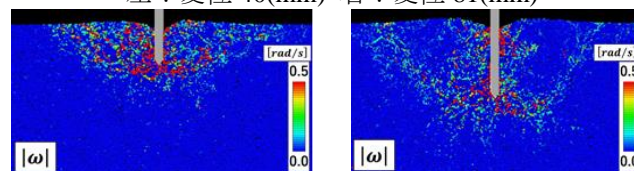


図 6 角速度分布  
左: 変位 40(mm) 右: 変位 81(mm)

#### 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) 榑原辰雄, 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.