

拡底杭の引抜き時に着目した個別要素法による地盤変形挙動の解析

早稲田大学 学生会員 ○大竹 浩太 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 早稲田大学 学生会員 石井 翔梧

1. 目的

ロッキング現象により杭が上向きに変位する際、杭の極限引抜き抵抗時には周辺地盤の大変形が生じると推測される。本稿ではこのような杭の極限引抜き状態および地盤の大変形を考慮可能な数値計算手法について調査している。筆者らは、アルミ棒積層体地盤において拡底杭引抜きモデル実験を実施し、引抜き荷重の計測と地盤の変位を観察した。また、個別要素法(DEM)により上記実験の再現解析を実施し、数値計算手法の妥当性を確認するとともに、実験で得られない地盤内の応力状態を出力し、拡底杭引抜き時の地盤の抵抗メカニズムについて観察した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、図1に示す寸法のスチレンス製の拡底角 15° の拡底杭モデル、高さ 200mm ・幅 523mm の寸法で敷き詰められた模擬地盤(アルミ棒積層体)、杭頭の荷重および鉛直変位を計測できる引抜き装置から構成される。アルミ棒は長さ 50mm の円形断面であり、直径 1.6mm と 3.0mm の2種類が質量比 $2:1$ で混合されている。場所打ち杭を想定し、杭周と地盤の密着性を確保するため杭周にアルミ棒を貼り付けた。作成する地盤の間隙比は目標値 0.228 になるように密度管理した。図2に引抜き前の実験装置の様子を示す。引抜き過程において、杭頭荷重および鉛直変位を計測するとともに、側方からデジタルカメラで地盤を撮影した。引抜きは 12mm まで実施したが 0.5mm 程度引き抜いた時点で極限荷重に達したため本稿では引抜き量 2mm までの結果について述べる。撮影した画像を用いてParticle Image Velocimetry(PIV)による画像解析を実施し地盤の変位分布を算出した。

3. DEMによる解析条件および解析手順

DEMによる2次元解析モデルを図3に示す。解析時間短縮のため左右の対称性を考慮して半断面での解析とした。粒子はすべて円形で上記実験のアルミ棒の寸法と同様である。実験を再現するため杭周に粒子を配置し杭と同速で変位する条件を付与した。地盤作成では、粒子を空中落下させた後、載荷板により圧縮し地表面を均した。作成した解析地盤の間隙比は 0.207 である。引抜き荷重は周面に配置した粒子に作用する鉛直力を合算して算出した。引抜き速度は 1.0mm/s であり、引抜き量 2.0mm で解析を終了した。解析に用いたパラメータを表1に示す。各ばね定数、時間刻み幅はHertzの接触理論を適用した理論値と解析時間を考慮し決定した。粒子間摩擦角は既往の研究¹⁾から 16° とした。粘性減衰比、ローカルダンピング、転がり摩擦の係数は衝突、回転の減衰のために用いられるが、試し解析を実施し解析が安定した際の値を用いた。

4. 実験結果と解析結果の比較

図4に実験と解析で得られた荷重-変位関係を示す。解析では杭の軸部と拡底部の引抜き荷重を分けて算出できるため、合計(赤線)と拡底部のみ(青線)、それぞれについて示している。実験は条件が同一でも実験間でばらつきが見られる。図4のDEM解析結果から引抜き荷重の大半(本解析では約 90%)は拡底部により発揮されていることがわかる。図5に実験で得られた地盤の水平・鉛直変位分布を、図6に解析で得られた地盤の水平・鉛直変位分布を示す。なお、図5~7のコンター図はいずれも引抜き量 2mm 時の結果である。図5および図6から、水平方向については地表面付近で、鉛直方向については杭底面から斜め上方向に向かう台形型の分布で、それぞれ粒子が変位している。また、荷重-変位関係のピーク値、水平・鉛直変位分布ともに実験結果と解析結果は概ね一致している。一方で、解析では引抜き初期の荷重の増加が速い。図7に解析で得られた接触力網と平均直応力分布を示す。接触力網は2粒子間の法線方向の接触力を大きさに基づいて色付けしたものである²⁾。平均直応力は粒子単位で定めることができ、粒子内に均一な応力が作用していると仮定したものである²⁾。接触力網と平均直応力の分布は概ね一致していることがわかる。また、接触力網・平均直応力ともに拡底部付近での値が大きいことから、荷重-変位関係で得られた拡底部が引抜き荷重に大きく寄与する、という結果とも合致する。

5. まとめ

本研究では、拡底杭の引抜きを対象としたアルミ棒積層体地盤を用いたモデル実験とDEMによる実験の再現解析を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- ① 拡底杭の引抜きを対象として、荷重-変位関係と地盤変位の結果から、DEMにより実験を概ね再現できた。
- ② DEMにより、接触力網や平均直応力などアルミ棒の実験で観測が困難な地盤内部の物理量を得ることができた。
- ③ 荷重-変位関係および接触力網・平均直応力分布の結果から、引抜き荷重の大半は拡底部で発揮されていた。

キーワード 拡底杭, アルミ棒, 大変形, PIV, 個別要素法

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院 赤木研究室 TEL: 03-5286-3405 E-mail: shakou-take@toki.waseda.jp

【謝辞】日本工営(株)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) 松岡元, 齋木清志: 2次元粒状体(丸棒)の粒子間摩擦角(ϕ_μ)の一測定法, 第27回土質工学研究発表会, 2分冊の1, pp. 579-580, 1992.
- 2) O'Sullivan, C. (原著), 鈴木輝一(日本語訳): 粒子個別要素法, 森北出版, 2014.
- 3) 大竹浩太, 赤木寛一, 桐山貴俊: 拡底杭引抜き時における低拘束圧地盤の変形挙動—PIVによる杭周辺地盤の画像解析—, 第55回地盤工学研究発表会, 2020.

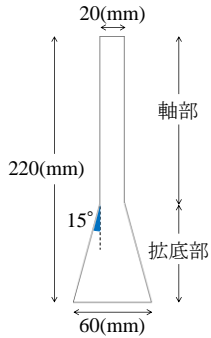


図1 拡底杭模式図

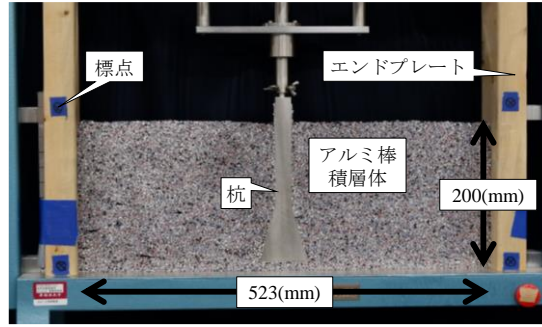


図2 実験装置(引抜き前)

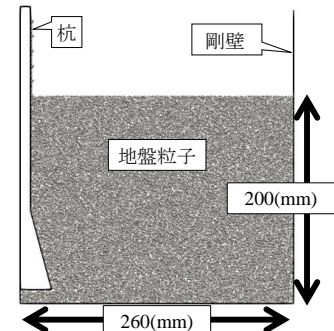


図3 解析モデル(引抜き前)

表1 解析で用いたパラメータ

パラメータ	記号	単位	値
引抜き速度	v_{up}	mm/s	1.00
粒子密度	ρ	g/cm ³	2.7
粒子間法線ばね定数	$k_{n,bb}$	N/m	4.00×10^6
粒子間せん断ばね定数	$k_{s,bb}$	N/m	1.00×10^6
壁-粒子間法線ばね定数	$k_{n,bw}$	N/m	8.00×10^6
壁-粒子間せん断ばね定数	$k_{s,bw}$	N/m	2.00×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_{bb}	°	16
壁-粒子間摩擦角	ϕ_{bw}	°	16
転がり摩擦の係数	b	-	0.01
ローカルダンピング	α	-	0.1
粘性減衰比	β	-	0.1
時間刻み幅	Δt	s	2.00×10^{-6}
解析時間	T	s	2.00

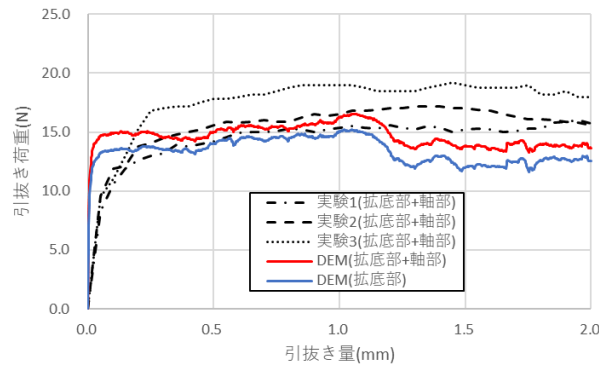


図4 荷重-変位関係(実験・解析)

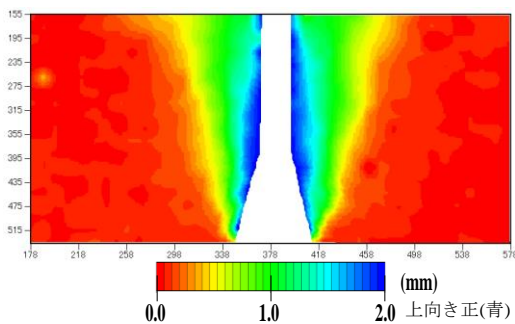
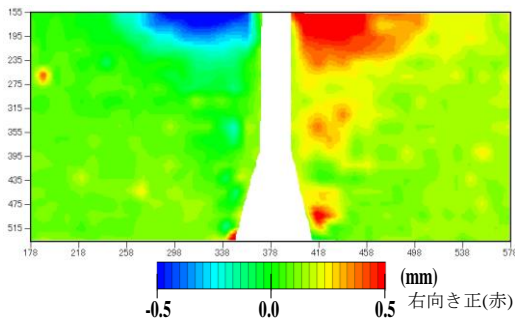


図5 実験で得られた地盤変位分布
上: 水平変位 下: 鉛直変位

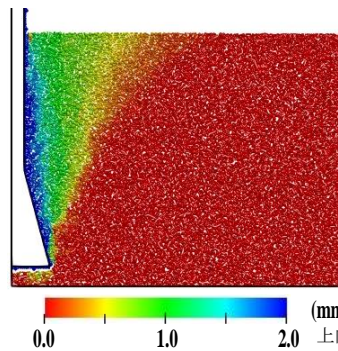
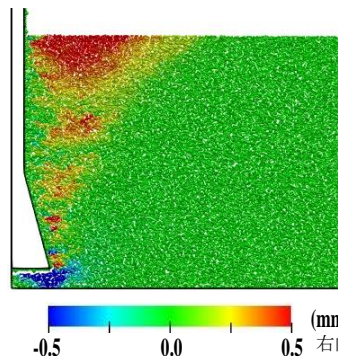


図6 解析で得られた地盤変位分布
上: 水平変位 下: 鉛直変位

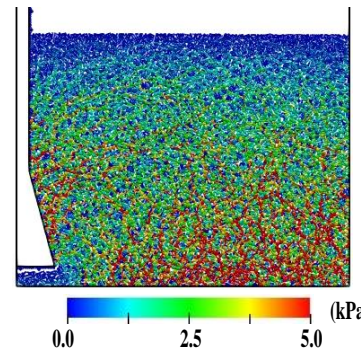
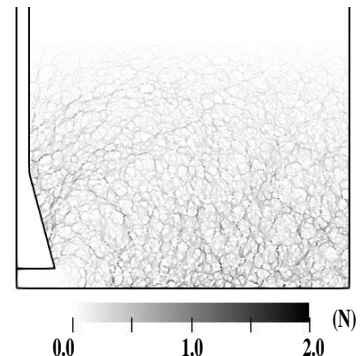


図7 解析で得られた接触力網・平均直応力分布
上: 接触力網 下: 平均直応力