

複合杭周辺地盤の変形解析に対する個別要素法の適用性

九州大学工学部 学生会員○村上 敏幸

九州大学大学院 フェロー会員 善 功企

九州大学大学院 正会員 陳 光斉

九州大学大学院 正会員 平松 浩三

1. 背景および目的

鋼管杭の支持力向上策として鋼管杭の外周面にセメントミルクを注入し、地盤を固化する工法（以下、複合杭）が開発されている。しかし、現場では施工状況が変わり易いこともあり、その設計・施工は過去の事例や経験により行われているのが現状である。これまで、模型実験が行われ、杭の支持力特性および破壊メカニズムの解明がなされてきた¹⁾。そこで本研究では杭の支持力発生機構を評価する手法として個別要素法を用いて、支持力および粒子個々の挙動に着目し、模型実験との比較検討を行い支持力発生機構問題における DEM の適用性の評価を行った。

2. 実験方法および解析方法

2.1 アルミ丸棒積層地盤を用いた模型実験

本研究では、アルミ丸棒積層地盤を用いた模型実験とそれをできる限り忠実にモデル化した個別要素法（以下、DEM）による数値解析を行い、両結果を比較して DEM の適正を評価した。実験に用いたアルミ丸棒積層地盤は、長さ 50mm で直径が 3.0mm と 1.6mm のアルミ丸棒を重量比で 3:2 の割合で混合したものである。アルミ丸棒積層地盤の間隙比は約 $e=0.33$ であった。模型実験は図-1 に示す実験装置および模型杭を用いて行い、貫入方法はひずみ制御方式とし、毎分 2mm 以下の速度で沈下量が 20mm を超えるまで貫入させた。実験では、杭上部にロードセルを設置し、押込み時の貫入抵抗を測定した。また、実験中はデジタルビデオカメラを用いて撮影を行い、模型地盤の変形状態や粒子の移動状況を測定した。実験ケースを表-1 に示す。

2.2 DEM による数値解析

解析に用いたモデルは、アルミ丸棒積層地盤を用いた模型実験をできる限り忠実にモデル化した。モデル地盤は幅 30cm、高さ 50cm の 2 次元モデル地盤を空中落下法で生成した。解析に必要な材料定数は、粒子間の法線方向および接線方向バネ定数 (k_n 、 k_s)、粒子～境界壁および杭間の法線方向および接線方向バネ定数 (k_n' 、 k_s')、粒子間摩擦角 (ϕ_μ)、粒子～境界壁および杭間摩擦角 (ϕ_μ')、粒子の質量密度 (ρ) である。表-2 に解析に用いた材料定数を示す。ここで、粒子間摩擦角 (ϕ_μ) は、アルミ丸棒積層地盤を用いた模型実験と同様の条件にするため、アルミ丸棒の粒子間摩擦角 $\phi_\mu=16^\circ$ ²⁾ を使用し、また、粒子～境界壁および杭間摩擦角 (ϕ_μ') は境界面においてもアルミ棒積層地盤が横方向に続いているとし粒子間摩擦角 ϕ_μ と同じ $\phi_\mu'=16^\circ$ を使用した。粒子の質量密度 (ρ) もアルミ丸棒の質量密度である $\rho=2690\text{kg/m}^3$ を採用した。

解析ケースについては実験と同様、表-1 に示す 4 ケースについて行った。

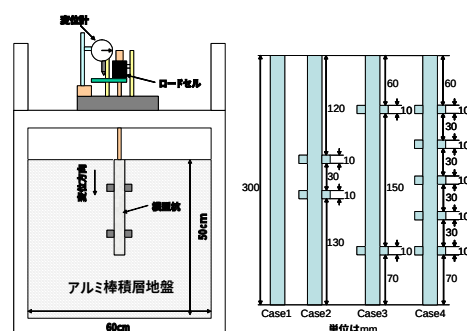


図-1 実験装置および模型杭の概略図

表-1 実験および解析ケース一覧表

手法	杭形状	間隙比	沈下量	No
模型実験	Case1	$e=0.33$	2.0cm	D-1
	Case2			D-2
	Case3			D-3
	Case4			D-4
数値解析	Case1	$e=0.33$	2.0cm	A-1
	Case2			A-2
	Case3			A-3
	Case4			A-4

表-2 DEM 解析で用いた材料定数

	値
k_n, k_s	$1.0 \times 10^8 (\text{N/m})$
k_n', k_s'	$1.0 \times 10^8 (\text{N/m})$
ϕ_μ	16°
ϕ_μ'	16°
ρ	2690kg/m^3

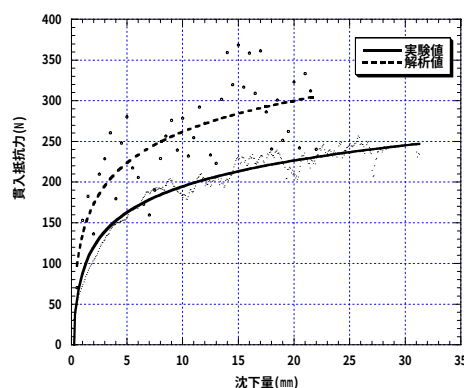


図-2 Case1 の場合の貫入抵抗力の比較

3. 実験結果と解析結果の比較

同一条件下 Case1 での 20mm 貫入までの数値解析および模型実験による貫入抵抗力を図-2 に示す。図-2 に示すように、解析値のほうが若干大きな値となっているが、傾向として同じような結果が得られた。しかしながら、解析では結果のばらつきが多いため、更なる検討が必要だと思われる。

図-3 に Case2 と Case1 の支持力増分を解析値と実験値とで比較したものを示す。解析値のほうがばらつきが大きいが両者とも同様な傾向を示していることが分かる。また、実験結果および、解析結果ともに Case2~4 の杭の方が Case1 よりも大きな貫入抵抗となった。これより、突起がある場合においても DEM の適用が妥当であることが言える。

次に、Case1 における粒子の移動ベクトル図（実験および解析）を図-4 に示す。図-4 に示すように、移動ベクトル図を比較すると、粒子の移動は杭先端直下の粒子が下方に移動しているだけで、側面はほとんど変化していない。全体的に見ても粒子の移動方向はほぼ等しいことがわかる。また、ひずみ分布図を描いてみると、解析結果と実験結果では両者とも同じような位置に圧縮領域が存在していた。

さらに、相対的な移動状況を比較するため、Case1 における 20mm 貫入後の粒子の移動量比較図を図-5,6 に示す。図-5,6 における水平位置は杭の半分の位置を 0 としており、杭先端直下の左右対称な位置の粒子に着目している。図-5,6 に示すように、粒子の移動量については模型実験のほうが若干多めに出ているが、移動位置、量ともに両結果が良く一致していることが分かる。また、他の 3 ケースについても同様の結果を得ることができた。

以上の結果より、DEM による数値モデル地盤によって実際の粒状体モデル地盤の挙動を定量的に表現することができると言える。

4. おわりに

本研究では、アルミ丸棒積層地盤を用いた模型実験とそれをできる限り忠実にモデル化した DEM 解析による数値解析を行い、両結果を比較して DEM の適正を評価し、DEM によるモデル地盤によって実際の粒状体モデル地盤の挙動を定量的に表現できることを示した。これにより、杭貫入時の地盤内の破壊メカニズムおよび支持力特性について検討を行うに当たり DEM の適用は妥当であると言える。今後は DEM を用いて、複合杭の最適形状および施行可能な杭の実現に向けて研究を進めていく所存である。

<参考文献>

- 1)原健一郎ら：複数の突起を有する杭の周面抵抗に関する理論的考察、土木学会西部支部研究発表会講演概要集第 1 分冊、pp.A-264-265、2004.
- 2)松岡元、斎木清志：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、pp579~580、1992.

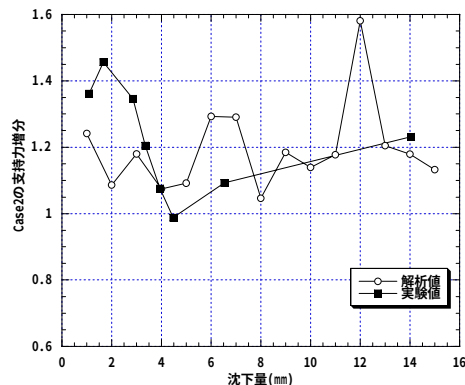
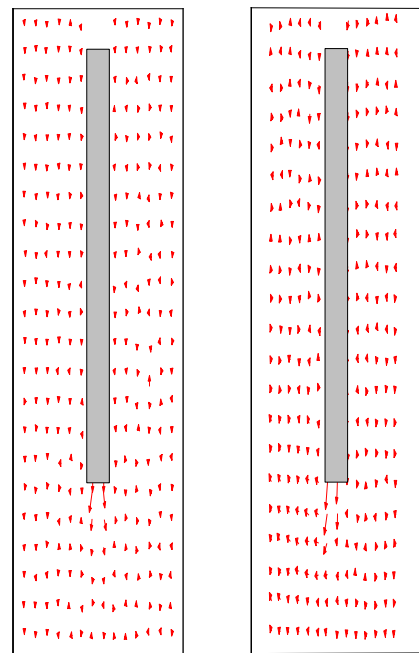


図-3 Case1 と Case2 の支持力比較



解析結果 (No, A-1) 実験結果 (No, D-1)

図-4 移動ベクトル図

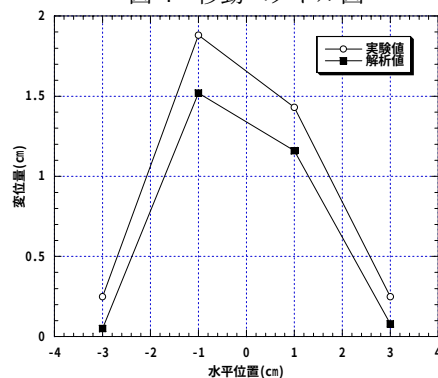


図-5 杭先端直下 2cm の粒子の移動量

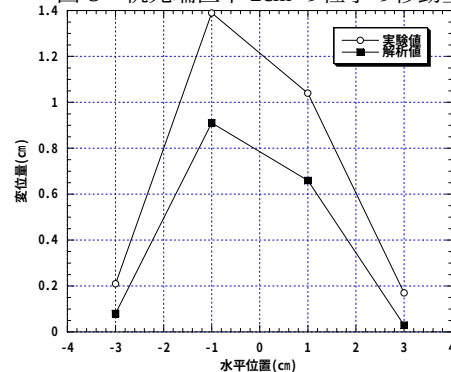


図-6 杭先端直下 4cm の粒子の移動量