

砂質土地盤における実物大単杭水平載荷試験の三次元解析

(株)明窓社 正会員 ○鈴木 明憲*1 小堤 治 京都大学 正会員 井合 進
 元港湾空港技術研究所 正会員 奈良 俊介 (財)沿岸技術研究センター 正会員 横山 伸幸

1. はじめに

杭基礎構造物の杭と地盤の相互作用は基本的に三次元的な現象であり、それを正しく表現するには三次元解析を行う必要がある。一方、近年二次元動的有効応力解析プログラム FLIP で用いられている構成則¹⁾が三次元に拡張され²⁾、それに基づいて三次元解析プログラム FLIP3D が開発された。FLIP3D では、Mohr-Coulomb の破壊基準をはじめ、種々の破壊基準を表現することができる。本検討では、杭と地盤の三次元的相互作用の状況下での FLIP3D を用いた現象の再現可能性の検証を目的として、実物大単杭水平載荷実験³⁾を対象として、三次元解析を行った。以下に検討内容について示す。

2. 検討方法

参照した実物大実験³⁾は砂質土地盤における杭長 12m の RC 杭(直径 0.8m)に対する杭頭固定条件下での水平載荷実験である。解析に用いた解析地盤定数を表 1 に、RC 杭の物性値を表 2、非線形特性を図 1 に示す。

表 1 解析地盤定数⁴⁾

土層	下限深度 (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	基準拘束圧 σ_{ma} (kPa)	初期せん断剛性 G_{ma} (kPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 C (kPa)	減衰定数 \ln_{max}
細砂 1	4.5	19.3	130	25.46	33300	39.5	0.0	0.24
細砂 2	10.5		180	52.58	63800			
細砂 3	25		190	83.58	71100			

表 2 RC 杭の物性値³⁾

材料特性	単位体積重量	ρ	1/m ³	2.45
ポアソン比	ν			0.2
ヤング率	E	kN/mm ²		25
せん断断面係数	G	kN/mm ²		10.4
断面特性	直径	d	m	0.8
	断面積	A	m ²	0.25135
	断面二次極モーメント	I	m ⁴	0.0201

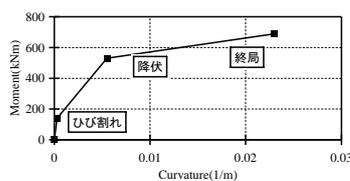


図 1 RC 杭非線形特性³⁾

解析に用いた解析メッシュを図 2(地盤部分水平断面)、図 3(鉛直断面)、図 4(杭)に示す。

ここで、解析モデルは対称形状であることから、メモリと計算時間の節約のため、1/2 対称モデルとした。解析領域は、載荷方向(x 方向)は、載荷による地盤変位の影響が側方境界に影響が及ばないと考えられる、杭長の 6 倍の 72m、載荷直角方向(y 方向)は杭径の 10 倍の 8.0m、鉛直方向(z 方

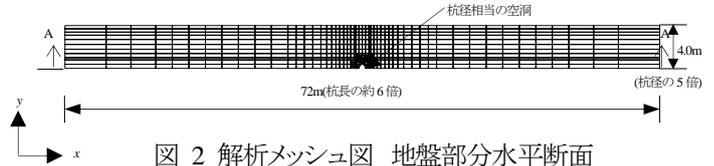


図 2 解析メッシュ図 地盤部分水平断面

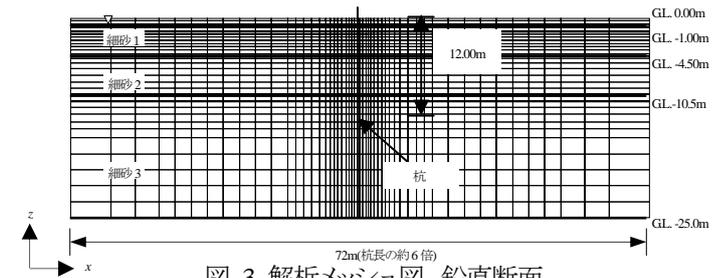


図 3 解析メッシュ図 鉛直断面

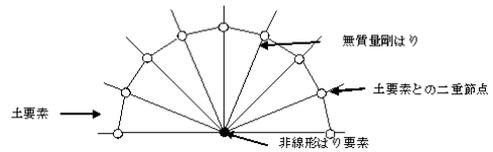


図 4 杭のモデル化

向)は杭長の約 2 倍の 25m とした。杭は図 1 に示す非線形性を考慮した三次元非線形はり要素、土は多重せん断メカニズムに基づく有効応力モデル²⁾を実装した三次元ブリック要素によりモデル化した。破壊基準には Mohr-Coulomb の破壊基準を使用した。杭の形状を忠実に再現するために杭に接触する土節点と、杭中心に配置した三次元非線形はり要素の節点を無質量剛はりで連結した(図 4)。無質量剛はりと地盤との接触点では、両者の水平変位は等しいという拘束を課した。解析は静的な条件で、実験と同様に杭頭部節点の回転自由度を拘束した上で杭頭部に水平方向に強制変位を加えることで行った。

3. 解析結果

FLIP3D によって得られた荷重-変位関係を図 5 に示す。ここで荷重は載荷点における反力を表す。

FLIP3D の解析結果は実験結果に比べ、同じ変位において荷重を大きめに評価する結果となっている。図 6 には杭頭変位 60mm における水平方向応力分布を示す。解析では地表面近くの杭背後地盤(主働側)の載荷方向直応力はほ

キーワード：杭 砂質土地盤 三次元 有限要素解析 水平載荷試験

*1 連絡先 : 〒170-0014 東京都豊島区池袋サン池袋 I 408 E-mail : suzuki@meisosha.co.jp

ば0となっている。また図にはしていないが、杭の横方向地盤(載荷方向に対して直角方向)のせん断応力も杭と土の間の滑り強度以内に収まった。一方、杭前面地盤(受働側)の載荷方向直応力は最大で450kPa程度となっている。実験では杭前面に載荷方向に伸びるクラックが観察された³⁾が、これは杭が押されて変形する際に、杭前面にある土を押し分けるために生じたと考えられている。今回のモデル化では杭と土は水平面内では互いに滑ることを許していないことにより、杭前面の土の拘束圧が高まったため、大きな軸差せん断応力を負担でき、載荷方向直応力が実際よりも大きく生じて杭の変位に抵抗したものと考えられる。

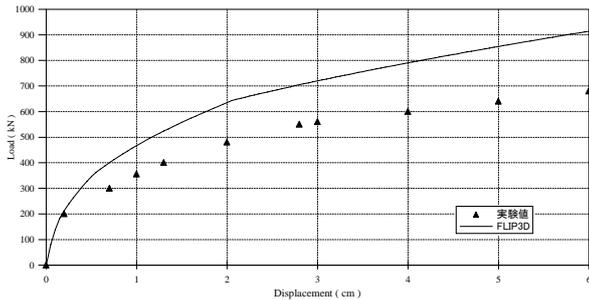


図5 荷重-変位曲線

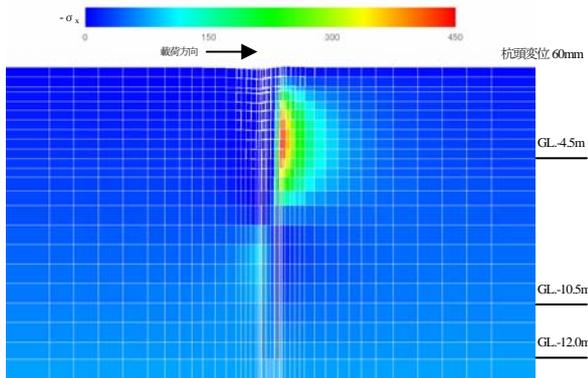


図6 水平方向応力分布図(単位:kPa,A-A断面)

図7、図8にそれぞれ杭頭変位35mmにおけるRC杭の変位分布、およびP=560kNにおけるRC杭の曲げモーメント分布を示す。地中の変位分布は実験結果をよく再現している。杭の地中部分の曲げモーメント分布は実験結果と比較して極大になる位置が下方であり、極大値も小さい。これは前述の通り解析では地表面付近の地盤反力が大きい結果であると考えられる。

図9に杭頭水平変位が35mmのときの地表面載荷方向の変位分布図を示す。ここで、表示の値は杭頭変位で各節点の水平変位を正規化している。FLIP3Dによる水平変位の解析値は実験値とよく整合している。

4. まとめ

本検討では、砂質土地盤における実物大単杭水平載荷試験結果をFLIP3Dによって杭頭の荷重-変位関係を概ね説明することができた。地中の曲げモーメント等の精度を上

げるためには土と杭の滑り挙動を適切にモデル化することが必要と考えられた。今後はモデル化の方法を検証しながら解析を行っていく予定である。

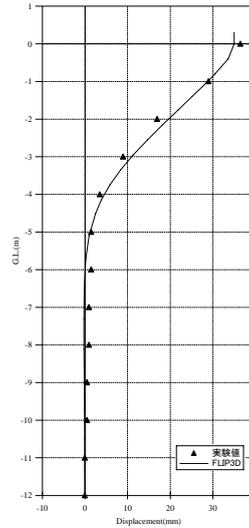


図7 RC杭変位分布

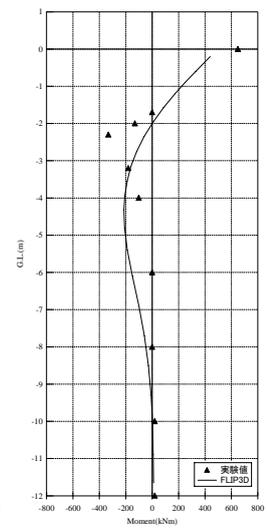
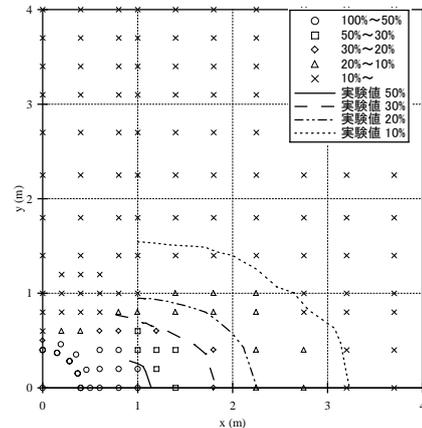


図8 曲げモーメント分布



載荷方向 →

図9 地表面載荷方向変位分布図

謝辞

本検討は、FLIPの改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立されたFLIP研究会(事務局:(財)沿岸技術研究センター)の活動の一環として行われた。ここに関係者に謝意を表します。

参考文献

1. Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain space plasticity model for cyclic mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
2. Iai, Ozutsumi : Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, Int. J. Numer. Anal. Meth.Geomech. No. 29, pp.417-442, 2005.
3. 佐藤・大矢・松島 : 杭頭回転固定条件による実物大単杭の大変形水平載荷実験, 土木学会論文集 No.714/IV-56, pp.95-109, 2002.
4. 川中・安藤・溜・井合・田河 : 土の構成則に関連する相互作用ばねを用いた単杭の水平載荷実験の2次元有限要素解析—その1、砂質地盤—, 第58回土木学会年次学術講演会, 2003.