

杭基礎の静的挙動に関する3次元有限要素解析検討

東亜建設工業 正会員 ○斎藤 崇嗣 正会員 田代 聡一  
 パシフィックコンサルタンツ 正会員 鈴木 章浩  
 京都大学 正会員 井合 進  
 沿岸技術研究センター 芥川 博昭

1.はじめに 杭基礎構造物において杭の地盤変位による影響を有限要素解析により評価する場合、杭と地盤の相互作用を適切に考慮したモデル化が重要となる。本検討では、既往の実大杭の杭頭及び地中水平載荷試験<sup>1)</sup>を対象に、3次元有効応力解析プログラム FLIP3D<sup>2)3)</sup>を用いて杭の静的挙動について再現性を検討した。また、既往の研究において提案された、2次元有限要素 (FLIP2D) における杭-地盤相互作用バネモデル<sup>4)</sup>との整合性について検討した。

2.検討方法 解析対象の静的載荷試験を図1に示す。試験杭1,2は、それぞれ杭頭載荷杭、地中載荷杭である。載荷は中央の反力杭を介して行われ、正負交番の3サイクル毎に荷重を増加させている(表4)。ただし本検討では、試験における繰り返し載荷の影響が小さいことから、1/4サイクルの単調載荷とし、載荷重は100kNと200kNの2ケースを検討の対象とした(図2)。杭諸元及び地盤構造は、それぞれ表2,3に示す通りである。以上の載荷試験における条件に対し、FLIP3Dを用いて解析モデルの設定及び静的解析を行い、杭の変位及び曲げモーメントについて試験の再現性を検討する。また、FLIP2Dを用いて解析地盤の奥行幅による影響を調べ、FLIP3Dとの対比により、杭-地盤相互作用バネモデルの妥当性を検討する。

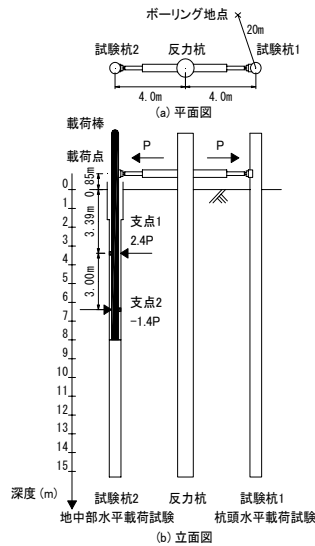


表2 杭諸元

	直径φ(cm)	肉厚t(cm)
反力杭(直杭)	90.00	1.60
試験杭1(直杭)	60.96	0.95
試験杭2(抜頭杭)	上部: 90.00	1.60
	下部: 60.96	0.95

表3 地盤構造

深度(m)	層厚(m)	土質名	コンシステンシー	N値
1	1.6	細砂	中位	15
2	2.1	細砂	中位	14
3	1.1	細砂	中位	13
4	1.1	粘土質細砂	非常に緩い	2
5	0.8	粘土質シルト	非常に軟らかい	1
6	0.9	細砂	緩い	8
7	0.8	細砂	中位	28
8	1.4	細砂	中位	20
9	1.1	砂質シルト	中位	5
10	4.4	細砂	詰まっている	41
11				56
12				45
13				47
14				
15				

表4 試験での載荷方法

試験杭	杭頭水平載荷 試験杭1(直杭)	地中水平載荷 試験杭2(抜頭杭)
載荷荷重 P	100kN-100kN 3サイクル 200kN-200kN 4サイクル 300kN-300kN 3サイクル 400kN-400kN 3サイクル	50kN-50kN 3サイクル 100kN-100kN 3サイクル 200kN-200kN 3サイクル 300kN-300kN 3サイクル 400kN-400kN 3サイクル 450kN-450kN 3サイクル

3.5サイクル:3サイクルの後、片側のみ載荷を終了

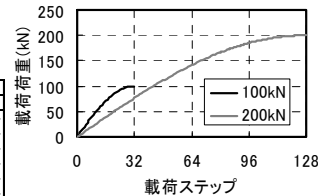


図2 解析での載荷荷重 P

3.解析モデル 解析領域は載荷による地盤変位の影響を考慮し、水平面における載荷方向(X方向)に50m、載荷直角方向(Y方向、地盤の奥行幅)に10m、鉛直方向(Z方向)には地盤構造に基づき15.3mとした(図3)。地盤は3次元のマルチスプリング要素でモデル化し、杭は図5に示すように、鋼管杭の断面性能を有する3次元梁要素と、鋼管杭の剛性の1000倍を有する剛梁要素とを組み合わせてモデル化した。なお、剛梁と地盤が接する節点は独立した2重節点とし、自重解析時及び静的載荷時は、水平XY方向には剛結(摩擦抵抗=無限大)、鉛直Z方向には独立(摩擦抵抗=ゼロ)とした。

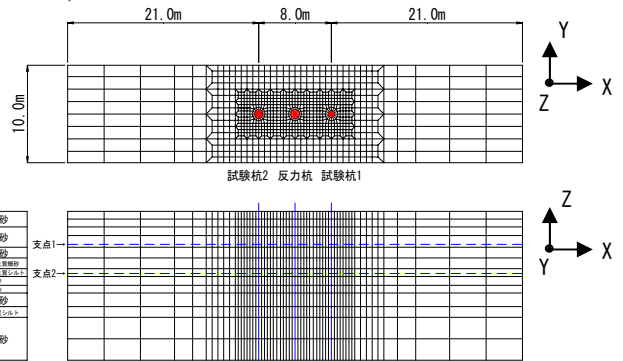


図3 解析モデル(全体)

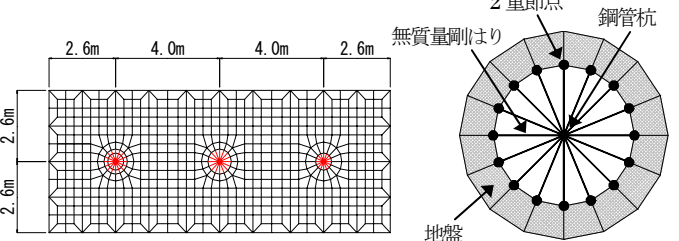


図4 解析モデル(杭周辺部)

図5 杭のモデル化

地盤の解析パラメータは、表3の地盤N値を用いて、FLIPにおける標準的な設定方法(簡易設定法)<sup>5)</sup>に基づき設定した(表5)。鋼管杭は、表2の杭諸元より設定した(表6)。

表5 地盤の解析パラメータ

土層名	飽和単位体積重量 γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	水中単位体積重量 γ' (kN/m <sup>3</sup> )	N値	Dr	ポアソン比 ν	基準初期せん断剛性 G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	基準体積弾性係数 K <sub>0</sub> σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	基準平均有効拘束圧 σ' <sub>vm</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	変形特性			
									閉鎖率 m	せん断抵抗角 φ <sub>s</sub> (°)	せん断強度 C (kN/m <sup>2</sup> )	最大深さ β <sub>max</sub>
砂層①	18.0	-	15	76%	0.33	132100	344400	98.0	0.45	42	0	0.24
砂層②	20.0	10.0	14	69%		114800	299300	98.0	0.45	41	0	0.24
砂層③	20.0	10.0	13	64%		103300	269400	98.0	0.45	41	0	0.24
粘土質細砂	16.0	6.0	2	-		25900	67600	48.1	0.55	0	76	0.20
粘土質シルト	16.0	6.0	1	-		16300	42600	52.4	0.55	0	48	0.20
砂層④	20.0	10.0	8	48%		70600	184000	98.0	0.45	40	0	0.24
砂層⑤	20.0	10.0	28	85%		154000	401700	98.0	0.45	43	0	0.24
砂層⑥	20.0	10.0	20	71%		119300	311200	98.0	0.45	41	0	0.24
砂質シルト	16.0	6.0	5	-		47700	124500	79.9	0.55	0	140	0.20
砂層⑦	20.0	10.0	50	100%		201200	524800	98.0	0.45	44	0	0.24

表6 鋼管杭の解析パラメータ

土層名	断面積 A (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント R <sub>ix</sub> (m <sup>4</sup> )	断面2次モーメント R <sub>iy</sub> (m <sup>4</sup> )	せん断剛性 G (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν
反力杭	0.0444	0.0087	0.0043	0.0043	
試験杭1	0.0179	0.0016	0.0008	0.0008	
試験杭2上部	0.0444	0.0087	0.0043	0.0043	7.9E+07
試験杭2下部	0.0179	0.0016	0.0008	0.0008	0.3

キーワード 有限要素解析, 杭基礎, 杭-地盤相互作用

連絡先 〒102-8451 東京都千代田区四番町5 土木事業本部設計部 TEL:03-3262-5105 FAX:03-3239-2793

FLIP2Dにおけるモデル化では、杭-地盤相互作用バネ要素を用い、地盤の奥行幅を2,3,5,10,20mの5ケースとした。

**4.解析結果** FLIP3Dで得られた鋼管杭の水平変位と曲げモーメントについて、試験値と比較した結果を図6~9に示す。載荷荷重100kN時の解析では、試験杭1の変位と試験杭2の曲げモーメントは試験値と概ね整合するが、試験杭1の曲げモーメントと試験杭2の変位を見ると、試験値に比べ小さく、過小評価される可能性がある。一方、載荷荷重200kN時の解析では、試験杭1,2のいずれも、変位及び曲げモーメントは、試験値と概ね整合する。このことから、地盤変位がある程度発生する荷重条件下においては、FLIP3Dにより杭基礎の静的挙動を再現可能であるといえる。

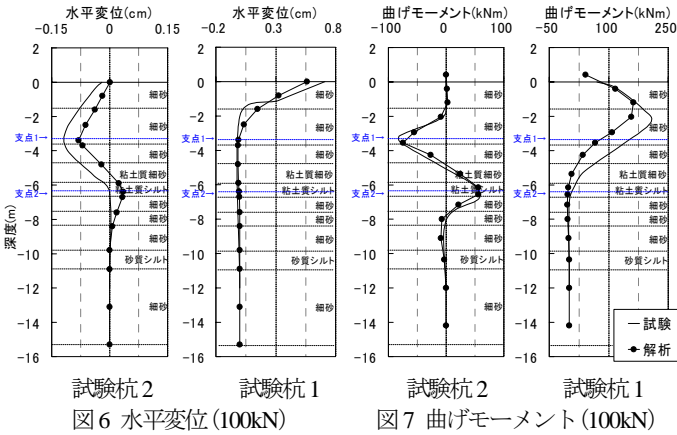


図6 水平変位(100kN)

図7 曲げモーメント(100kN)

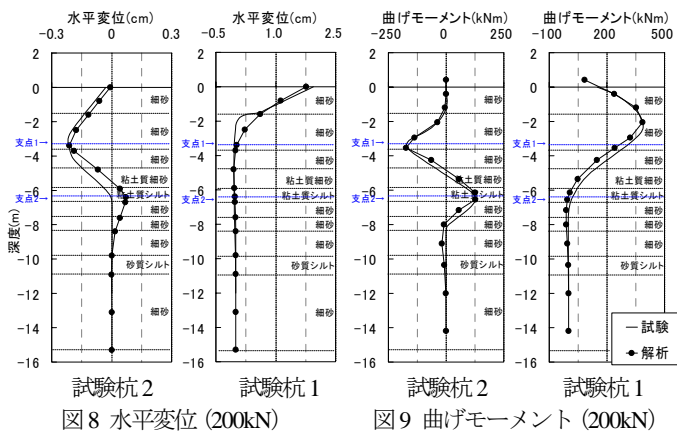


図8 水平変位(200kN)

図9 曲げモーメント(200kN)

静的載荷時の地表面の変形図を図10に示す。杭周辺の地盤変位に及ぼす影響範囲は載荷荷重の大きさによって異なることが確認でき、P=200kN時で約2m、杭径Dの約3倍である。

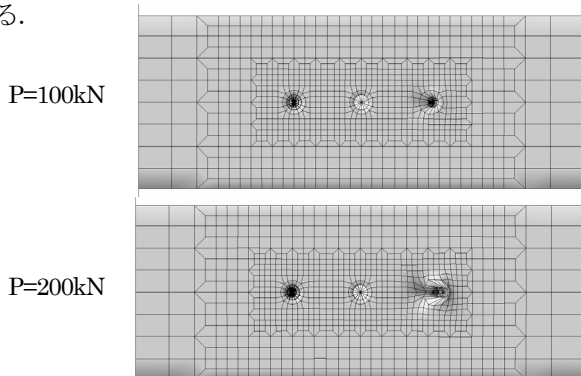


図10 地表面の変形図(変形倍率50倍)

次にFLIP2Dにおける地盤の奥行幅による影響について、2次元の解析で得られた鋼管杭の水平変位及び曲げモーメントをFLIP3Dの結果と比較して図11~14に示す。図より、奥行幅Wが5m(杭径Dの約8倍)以上で変位及び曲げモーメントとも収束しているのがわかる。また、奥行幅5m以上における変位及び曲げモーメントは3次元解析結果と整合することも確認できる。

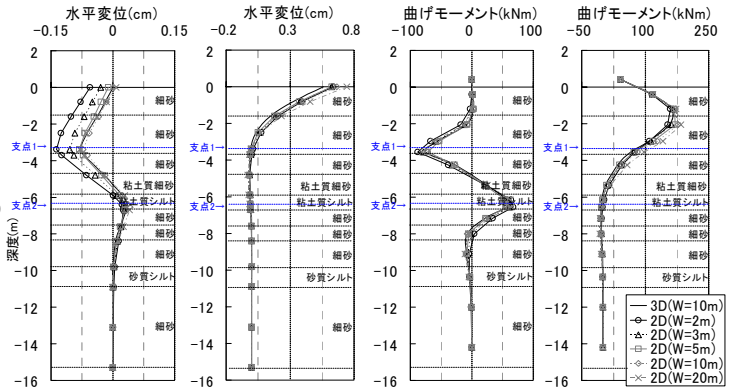


図11 水平変位(100kN)

図12 曲げモーメント(100kN)

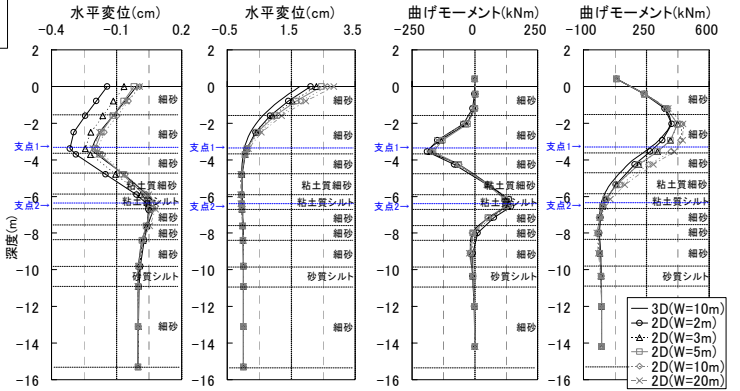


図13 水平変位(200kN)

図14 曲げモーメント(200kN)

**5.まとめ** 本検討では、実大杭の杭頭及び地中水平載荷試験の結果を、載荷荷重200kNに対してFLIP3Dにより再現可能であることを確認した。また、単杭を対象とした2次元の杭-地盤相互作用モデルを用いる場合の地盤の奥行幅は8D以上が妥当であることを、3次元解析との整合により確認した。今後は、載荷荷重を300kN及び400kNに増やした場合についてFLIP3Dの適用性、及びFLIP2Dにおける杭-地盤相互作用バネモデルの適用性について検討する予定である。

**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実施されたものである。特に東電設計の溜幸生氏には貴重な助言を頂いた。ここに関係者の方々に謝意を表します。

~参考文献~

- 1) 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐伯英一郎 実大杭の杭頭および地中水平載荷試験に基づく地盤反力変位関係 日本建築学会構造系論文集 第562号, pp53-58, 2002.12
- 2) Iai, Matsunaga, Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 3) Iai S, Ozusumi O. Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials. Int.J.Numer.Anal.Meth.Geomech. 2005;29:417-442
- 4) 第2期 FLIP 研究会高度利用技術の研究 杭基礎のモデル化方法の検討 平成15年成果報告書, 平成16年6月7日
- 5) 森田平一, 井合進, Hanlong Liu・一井康二・佐藤幸博 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技術資料, No.869, 1997.7