

【杭軸方向挙動WG】

目 次

【杭軸方向挙動 WG】

1. はじめに	1
兵頭 順一 (東電設計)	
2. 杭の先端支持力を対象とした三次元解析	3
2-1 三次元解析モデルの作成	5
増田 幸一 (明窓社)	
小堤 治 (明窓社)	
2-2 三次元解析による検討－単杭－	7
兵頭 順一 (東電設計)	
藤井 紀之 (応用地質)	
2-3 三次元解析による検討－相対密度 60%－	9
宮下 健一郎 (パシフィックコンサルタンツ)	
兼原 直範 (ニュージェック)	
曾根 照人 (ニュージェック)	
2-4 三次元解析による検討－相対密度 75%－	11
藤井 紀之 (応用地質)	
塩崎 禎郎 (JFE スチール)	
2-5 三次元解析による検討－相対密度 90%－	13
宇野 州彦 (五洋建設)	
兵頭 順一 (東電設計)	
3. 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (杭の本数や周面抵抗条件を変化させた解析)	15
3-1 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 1)	
－ 4 本杭と無限本数杭の杭頭荷重－鉛直変位の関係－	17
溜 幸生 (東電設計)	
3-2 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 2)－解析結果の分析と考察－	19
藤原 覚太 (新日鐵住金)	
森安 俊介 (新日鐵住金)	
溜 幸生 (東電設計)	
3-3 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 3)	
－ 杭の周面抵抗を考慮した解析による群杭効率の計算－	21
溜 幸生 (東電設計)	
3-4 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 4)	
－ 二次元解析と三次元解析による群杭効率の検討－	23
溜 幸生 (東電設計)	

4. 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案・・・・・・・・・・・・・・・・	25
4-1 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案・・・・・・・・・・・・・・・・	27
小堤 治 (明窓社)	
塩崎 禎郎 (JFE スチール)	
兵頭 順一 (東電設計)	
4-2 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素を用いた事例解析(その1).....	37
兵頭 順一 (東電設計)	
塩崎 禎郎 (JFE スチール)	
小堤 治 (明窓社)	
4-3 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素を用いた事例解析(その2).....	39
塩崎 禎郎 (JFE スチール)	
小堤 治 (明窓社)	
兵頭 順一 (東電設計)	
5. 平成 23 年度～平成 25 年度の成果のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・	41
5-1 二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化手法・・・・・・・・	43
兵頭 順一 (東電設計)	
森安 俊介 (新日鐵住金)	
宮下 健一朗 (パシフィックコンサルタンツ)	
宇野 州彦 (五洋建設)	
小堤 治 (明窓社)	
一井 康二 (広島大学大学院)	
5-2 二次元有効応力解析における杭の先端支持力のモデル化手法・・・・・・・・	53
兵頭 順一 (杭軸方向挙動 WG 幹事, 東電設計)	
6. 杭軸方向挙動WGの外部発表成果(2015年8月現在)・・・・・・・・・・・・・・・・	68

1 はじめに

東電設計株式会社 ○兵頭順一

1 はじめに

(1) 目的

杭軸方向挙動 WG は、杭と地盤の相互作用において、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデル化（杭の周面摩擦力や先端支持力のモデル化）の提案を目的として設置されたものである。

(2) 検討項目

- 実験の計画（初年度）と実験の実施，再現解析（2年度）
- 2次元モデル化と3次元解析との対比
- 控え杭式岸壁等の事例解析

(3) 検討期間

3年（平成23年7月～平成26年7月）

2 検討計画（案）

(1) 検討の全体工程

平成23年度（1年度）は、基礎的検討を行った。特に杭の周面摩擦力のモデル化に関しては、改良型ジョイント要素の提案を行った。

平成24年度（2年度）は、京都大学防災研究所で行われた杭の遠心力模型実験を対象とした事例解析を行うことで、FLIPによる三次元解析の妥当性を検証した。また、杭の周面摩擦力のモデル化に関しては、改良型ジョイント要素と杭-地盤相互作用ばね要素の統合を行い、「新」杭-地盤相互作用ばね要素を構築し、FLIPver7.1.9-6-2_4（2013/9/11 リリース版）に実装した。

平成25年度（3年度）は、FLIPによる三次元解析結果を参考として、杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案を行った。

(2) プログラムのバージョンと地盤要素

プログラムのバージョンはFLIP Ver7.1.9以降とする。また、考慮する地盤要素はマルチスプリング要素とする。なお、杭-地盤相互作用ばね要素の現状を表-1に示す。

表-1 杭-地盤相互作用ばね要素の現状

	マルチスプリング要素	カクテルグラスモデル要素
FLIP2D	マルチスプリング要素対応の杭-地盤相互作用ばね要素の検証は行っている。	カクテルグラスモデル要素対応の杭-地盤相互作用ばね要素の微調整が必要である。
FLIP3D	マルチスプリングモデル要素の検証は行っているが、杭-地盤相互作用ばね要素は存在しない。	カクテルグラスモデル要素は搭載したが、杭-地盤相互作用ばね要素は存在しない。

3 検討内容

(1) 文献調査

以下の三項目に着目し、文献調査を行い、事例解析の対象となる実験を選定する。

- ①各設計指針における周面摩擦力と先端支持力の算定の整理
- ②杭の押し込み試験（押し込み時の周面摩擦力，先端支持力）
- ③杭の引抜き試験（引抜き時の周面摩擦力）

(2) 杭周辺部（周面摩擦力，先端支持力）のモデル化の検討

杭周辺部（周面摩擦，先端支持）のモデル化の方法を検討する。FLIPにおける杭周辺部のモデル化の例を図-1，表-2に示す。方法Aは既往の事例¹⁾²⁾による方法である。本WGでは方法B²⁾を基本として検討を行うこととする。

(3) 杭の原位置試験の解析

文献調査で選定したモデルのうち、代表的なモデルについて事例解析を実施し、モデル化の適用性の検討を行った。

表-2 杭周辺部のモデル化（方法B）の方法

	方向	モデル化の方法
杭周面のモデル化	杭の軸直角方向	杭-地盤相互作用ばね要素でモデル化する。
	杭の軸方向	杭-地盤相互作用ばね要素でモデル化する。例：摩擦角15度（鉄と土の間の場合）
杭先端のモデル化		非線形ばね要素でモデル化する。

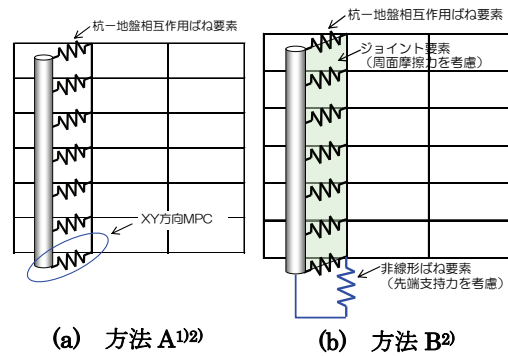


図-1 杭周辺部のモデル化の例

2年度は京都大学防災研究所で行われた杭の遠心力模型実験を対象として解析を行った。

(4) 3年度の実施体制及び開催記録, メンバー構成

3年度の実施体制及び開催記録, メンバー構成を表-3～表-5 に示す。

表-3 実施体制

	内容 (1年度)	内容 (2, 3年度)	担当会社 (五十音順, 敬称略)
①杭の先端支持力担当 (杭の押込み試験)	文献調査 二次元・三次元解析	—	JFE スチール ニュージェック
	—	京都大学防災研究所の遠心力 模型実験等の三次元解析	全社
②杭の周面摩擦力担当 (杭の押込み・引抜き試験)	文献調査 二次元解析 (改良型ジョイント要素の提案)	二次元解析 (改良型ジョイント要素の適 用性の確認)	五洋建設 パシフィックコンサルタンツ 新日鐵住金
③実験計画担当	計画立案 二次元解析	京都大学防災研究所の遠心力 模型実験の分析	ニュージェック 新日鐵住金
④諸検討担当	適宜実施 (メッシュの細かさの影響等)	—	明窓社 東電設計

表-4 杭軸方向挙動 WG の開催記録

No	年度	開催日	会場	内容
1	2年度 (H24)	2012/10/12	京都大学東京オフィス	第1回WG会合開催
2		2012/12/13	京都大学東京オフィス	第2回WG会合開催
3		2013/2/28	京都大学東京オフィス	第3回WG会合開催
4		2013/4/11	京都大学東京オフィス	第4回WG会合開催
5		2013/5/16	京都大学東京オフィス	第5回WG会合開催
6		2013/7/4	京都大学東京オフィス	第6回WG会合開催
7		2013/8/30	京都大学宇治おおばくプラザ きはだホール	FLIPコンソーシアム総会で活動内容を報告

No	年度	開催日	会場	内容
1	3年度 (H25)	2013/10/30	京都大学東京オフィス	第1回WG会合開催
2		2013/12/19	京都大学東京オフィス	第2回WG会合開催
3		2014/2/12	京都大学東京オフィス	第3回WG会合開催
4		2014/4/23	京都大学東京オフィス	第4回WG会合開催
5		2014/5/27	京都大学東京オフィス	第5回WG会合開催
6		2014/7/3	京都大学東京オフィス	第6回WG会合開催
7		2014/8/29	京都大学東京オフィス	FLIPコンソーシアム総会で活動内容を報告

表-5 杭軸方向挙動 WG のメンバー構成

No.	氏名	会社名	担当	報告書 執筆担当		
				1年度	2年度	3年度
1	幹事 兵頭 順一	東電設計(株)	【幹事】 全体方針 予備解析, 杭の先端支持力, 全体とりまとめ	1,2-1,5	1,3-3,5,6	1,2-2, 2,5,4-6
2	中山 裕章	新日鐵住金(株)	杭の周面摩擦力, 実験計画	4-1	2-2,4-1	—
3	森安 俊介	新日鐵住金(株)	杭の周面摩擦力, 実験計画	4-1	2-2,4-1,6	3-2,5-1
4	藤原 寛太	新日鐵住金(株)	杭の周面摩擦力, 実験計画	—	2-2,4-1	3-2
5	宇野 州彦	五洋建設(株)	杭の周面摩擦力, 先端支持力	4-3	3-4,6	2-5,5-1
6	曾根 照人	(株)ニュージェック	杭の先端支持力, 杭の遠心力模型実験	3-1	2-1,3-2	2-3
7	塩崎 禎郎	J F E スチール(株)	杭の先端支持力	3-2	3-2	2-4,4
8	宇佐美 俊輔	J F E スチール(株)	杭の先端支持力	3-2	3-2	—
9	宮下 健一郎	パシフィックコンサルタンツ(株)	杭の周面摩擦力, 先端支持力	4-2	3-4	2-3,5-1
10	小堤 治	(株)明窓社	全般	2-2,2-3	3-1,3-4,4-2,6	2-1,4,5-1
11	上野 大介	(株)明窓社	予備解析	2-2,2-3	3-1,3-2,3-4	—
12	増田 幸一	(株)明窓社	杭の先端支持力	—	—	2-1
13	栗原 直範	(株)ニュージェック	杭の先端支持力, 杭の遠心力模型実験	3-1	2-1,3-2	2-3
14	藤井 紀之	応用地質(株)	杭の先端支持力	—	—	2-2,2-4
15	事務局 溜 幸生	東電設計(株)	WG事務局, 杭の先端支持力	—	—	3
特別顧問	井合 進	京都大学	全体方針			
特別顧問	一井 康二	広島大学大学院	全体方針			
特別会員	小濱 英司	(独)港湾空港技術研究所	全体方針			
特別会員	上田 恭平	(公財)鉄道総合技術研究所	全体方針			
特別会員	大矢 陽介	(独)港湾空港技術研究所	全体方針			

4 1,2 年度の成果の対外発表

(1) 予備解析 (3編)

小堤治, 上野大介, 兵頭順一, 飛田哲男: 杭の先端支持力に関する解析的検討, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1293-1294, 2013.
 上野大介, 小堤治, 兵頭順一, 一井康二: 杭の周面摩擦力に関する解析的検討, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1295-1296, 2013.
 兵頭順一, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における矢板式係船岸の控え杭のモデル化に関する検討, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1635-1636, 2013.

(2) 杭の先端支持力 (6編)

曾根照人, 栗原直範, 飛田哲男: 杭の先端支持力に関する検討-二次元解析による検討-, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1289-1290, 2013.
 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 一井康二: 杭の先端支持力に関する検討-三次元解析による検討-, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1291-1292, 2013.
 曾根照人, 栗原直範, 飛田哲男: 杭の遠心力模型実験, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1191-1192, 2014.
 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 曾根照人, 栗原直範, 上野大介, 一井康二: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーションケース1 (2層の乾燥地盤) -, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1193-1194, 2014.
 兵頭順一, 小堤治, 一井康二: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーションケース2 (2層の飽和地盤) -, 第49回地盤工学研究発表会, pp.1195-1196, 2014.
 宇野州彦, 宮下健一郎, 上野大介, 飛田哲男: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーションケース3 (2層の乾燥地盤) -, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1197-1198, 2014.

(3) 杭の周面摩擦力 (4編)

森安俊介, 中山裕章, 小堤治, 飛田哲男: 施工影響を考慮可能な杭の周面摩擦モデルの一提案, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1235-1236, 2013.
 宮下健一郎, 一井康二: 杭の押込試験の事例解析, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1285-1286, 2013.
 宇野州彦, 宮下健一郎, 飛田哲男: 杭の引抜き試験の事例解析, pp.1287-1288, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.
 兵頭順一, 森安俊介, 宮下健一郎, 宇野州彦, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討, 土木学会第33回地震工学研究発表会, 2013.

5 参考文献

- (財)沿岸技術研究センター: 港湾構造物設計事例集 (平成19年改訂版), 2007
- (財)沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務~マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果~FLIP研究会の14年間の研究成果, 2011, <http://www.flip.or.jp/history.html>

2. 杭の先端支持力を対象とした三次元解析

2-1 三次元解析モデルの作成

有限要素法 先端支持力 杭

株式会社明窓社 ○増田 幸一
株式会社明窓社 小堤 治

1 はじめに

一般社団法人 FLIP コンソーシアムが設置した、杭軸方向挙動 WG で行っている各種検討の一環として、遠心力場における単杭の押し込み実験¹⁾のケース 2 を対象とした三次元解析モデルを作成した。解析モデルは、1G 場換算したものとし、三次元メッシュジェネレータ FLIPMESH を用いて 1/4 対称モデルとして作成した。実験は、単杭のみを対象として行われたが、解析では、この他に、2.5D および 5D 間隔の正方形に配置された 4 本の杭のモデルも対象とした。単杭のモデルでは対称中心に 1/4 円の断面を持つ杭を置いた。2.5D と 5D のモデルでは、対称中心から、水平二方向に、杭径のそれぞれ 1.25 倍(0.6m)および 2.5 倍(1.2m)離れた位置に杭の中心を置いた。これらの解析モデルを用いて、群杭効果、杭から壁面までの距離の影響、杭節点の水平二方向の並進自由度の単点拘束の有無の影響などを検討した。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver.1.5.0.beta を用いている²⁾³⁾。

2 三次元メッシュおよび解析モデルの作成

三次元メッシュの作成手順は、まず基になる二次元平面メッシュを作成し(図-1)、これを、FLIPMESH を用いて鉛直方向に積み重ねて三次元メッシュを作成した。図-1 には二次元平面メッシュを示す。このうち、上段の 9m×3m のメッシュは、実験土槽の水平面の 1/4 のサイズに相当する。5D の検討では、9m×3m のメッシュでは、杭が土槽の壁面に近づきすぎて解析結果がその影響を受けたことから、解析領域を広げた 9m×9m のメッシュを主に使用した。一方、2.5D の場合は、壁面の影響が小さかったことから、解析に要する時間を考慮して、単杭や 5D との横並びの比較以外では、9m×3m のメッシュを主に使用した。

図-2 に水平方向 9m×9m の三次元メッシュを示す。図の手前側面および左側側面が対称面である。また、赤丸が杭上端の位置である。図に水色および緑色で示した、解析モデル下面から+2.88m までの支持層は豊浦砂 (Dr90%)、黄色で示した+2.88m から+9.0m までの表層は豊浦砂 (Dr60%) である。杭は緑色の層の下端にあたる+2.40m まで、支持層に 1D (0.48m) 根入れた。杭と土層との間の摩擦は 0 として、杭下端の支持力のみに着目した。そのほかの解析条件は文献 4)に従った。まず、水中重量密度を与えて土層の初期自重解析を行った。その後、完全排水条件下で、杭上端節点に、鉛直下方に 0.0001m/step で 0.25m になるまで強制変位を与えて、杭を押し込んだ。この時の鉛直変位量～押し込み力(強制変位に対する反力)の関係を調べた。

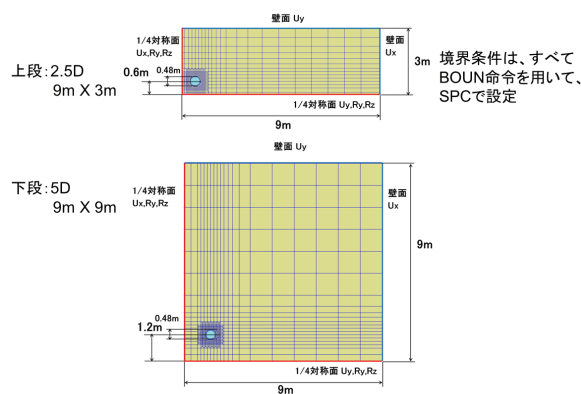


図-1 二次元平面メッシュ

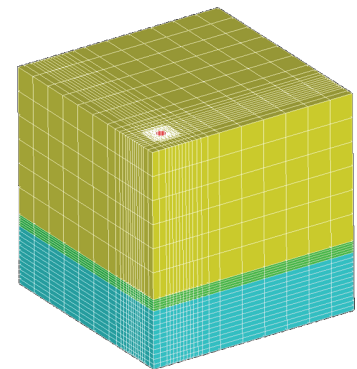


図-2 三次元メッシュ(5D)

3 解析結果

3.1 幅 18m 奥行 6m モデルと幅 18m 奥行 18m モデルの比較

図-3 に、杭間隔が 2.5D と 5D の場合の、奥行 6m と 18m の比較図を示す。杭間隔 2.5D、5D とともに、奥行 6m の方が 18m に比べ、同じ押し込み量に対する押し込み力が大きくなり、壁までの距離の影響が表れている。ただ、押し込み量が 0.13m (”ガタン現象”直前)で比較すると、5D の方が奥行き幅の違いによる押し込み力の違いが顕著である。これは、5D の方が壁までの距離が近く、杭の押し込みに伴い、杭～壁の間の下部地盤の拘束圧が上昇して、有効応力が上がり、地盤の剛性・強度が増加したためと考えられる。

3.2 単杭と群杭の比較

図-4 に単杭と杭間隔 2.5D と 5D の群杭の解析結果を示す。これらの解析は、いずれも、9m×9m のメッシュを用いて行った。同図によれば、単杭に比べ群杭の押し込み力が大きくなっているものの、概ね、応答の傾向に大きな差は無く、群杭効果は顕著には見られない。ただ、群杭の場合に押し込み力が大きくなるメカニズムは、上述の壁までの距離が短

い場合のメカニズムと共通していると考えられる。図-5 に押し込み量 0.1D (0.048m) の時の単杭、2.5D および 5D の杭中心を含む鉛直断面での鉛直有効応力 σ_z' の分布を示す。2.5D モデルでは、杭間中心方向(断面図の左側方向)へ応力場が広がっている様子がみられる。

3.3 杭節点の水平変位拘束の影響

図-6 に単杭、2.5D、5D で、杭節点水平変位自由度の単点拘束の有無による応答の違いを示す。これらの解析は、いずれも、9m×9m のメッシュを用いて行った。いずれのケースとも、杭節点水平変位自由度の単点拘束の有無による顕著な応答の違いは見られない。なお、拘束があった方が”ガタン現象”の発生は遅れる傾向にある。図-7 に杭上端の周方向の軸力分布を示す。単点拘束無しの場合、他の杭からの影響と思われる周方向の角度依存性が表れている。(225°方向が4本杭の中心方向)

4 まとめ

単杭および4本杭に関する FLIP 3D を用いた三次元解析で得られた結果に対して、杭から壁面までの距離、単杭と群杭の比較、杭節点の水平変位拘束の影響について考察した。

その結果、杭から壁面までの距離については、2.5D より 5D の方が奥行き幅の違いによる押し込み力の違いが顕著であることが明らかになった。これは、5D の方が壁までの距離が近く、杭の押し込みに伴い、杭～壁の間の下部地盤の拘束圧が上昇して、有効応力が上がり、地盤の剛性・強度が増加したためと考えられる。単杭と群杭の比較では、単杭に比べ群杭の押し込み力が大きくなっているものの、概ね、応答の傾向に大きな差は無く、群杭効果は顕著には見ることが明らかになった。群杭の場合に押し込み力が大きくなるメカニズムは、上述の壁までの距離が短い場合のメカニズムと共通していると考えられる。杭節点の水平変位拘束の影響では、杭節点水平変位自由度の単点拘束の有無による顕著な応答の違いは見られない。なお、拘束があった方が”ガタン現象”の発生は遅れる傾向にあることが明らかになった。

謝辞: 本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献: 1) 曽根他: 杭の遠心力模型実験, 49 回地盤工学研究発表会, 2014. 2) Iai, Matsunaga, Kameoka: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 3) Iai: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993. 4) 兵頭他: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション ケース 2 (2 層の飽和地盤) -, 49 回地盤工学研究発表会, 2014

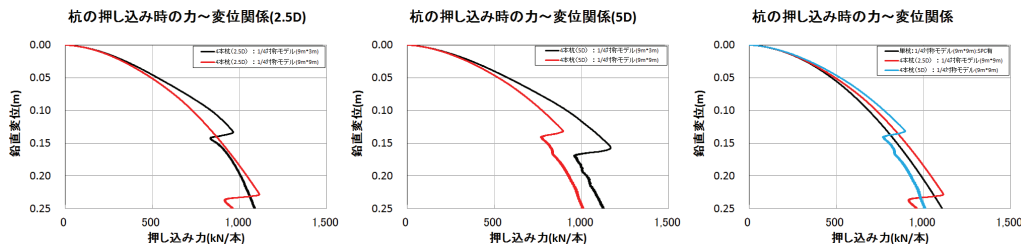


図-3 奥行き 6m と 18m の押し込み力～押し込み量関係比較図 (黒線: 奥行 6m、赤線: 奥行 18m)

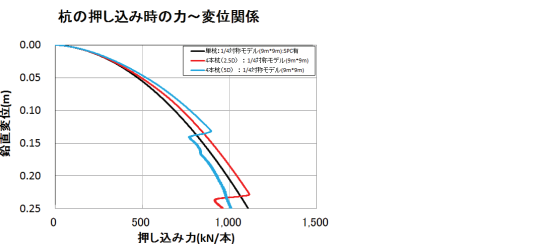


図-4 単杭と群杭の力～変位関係比較図 (黒線: 単杭、赤線: 2.5D、水色: 5D)

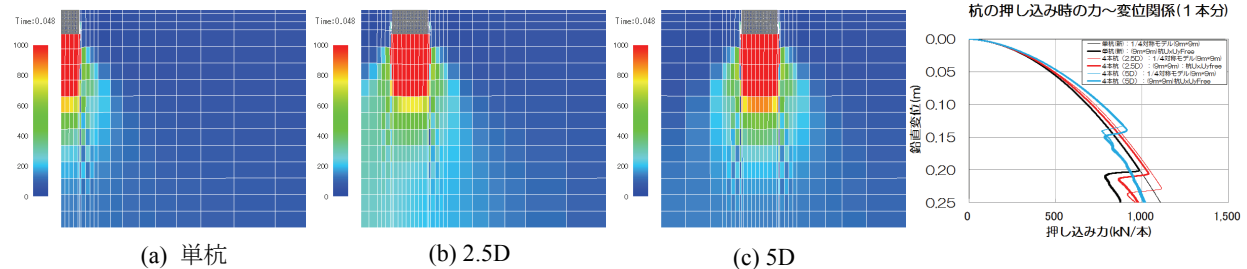


図-5 押し込み量 0.1D の時の σ_z' 分布図(単位:kPa) (最大値: 1000kPa)

図の左端が対称面、下端が解析モデル底面である。杭を灰色で示す。
2.5D SPC_Ux,Uy 無 2.5D SPC_Ux,Uy 有

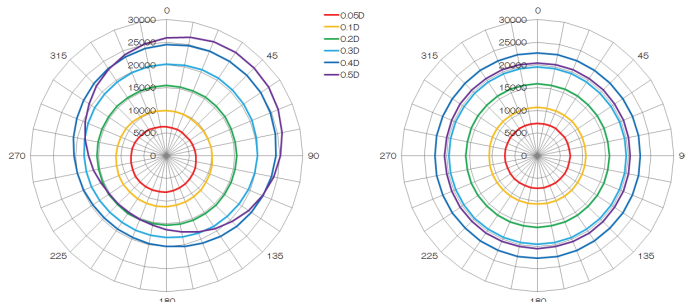


図-7 杭上端での押し込み力の周方向分布図(2.5D) 左: 単点拘束無し、右: 単点拘束あり

図-6 杭節点水平方向自由度の拘束の有無による応答の比較 (黒線: 単杭、赤線: 2.5D、水色: 5D) (細線: 単点拘束あり、太線: 無)

2-2 三次元解析による検討—単杭—

杭基礎 先端支持力 三次元解析

東電設計株式会社 ○兵頭順一
応用地質株式会社 藤井紀之

1 はじめに

一般社団法人 FLIP コンソーシアムでは、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデルを提案するために、杭軸方向挙動 WG を設置し、各種検討を行っている。本検討では、相対密度をパラメータとした単杭の三次元解析を実施し、二次元解析による杭の先端支持力のモデル化の予備検討を行った。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver1.5.0 を用いた¹²⁾。

2 解析条件

解析用地盤物性値は等価 N 値（相対密度から Meyerhof の式で変換）に基づき、簡易設定法（改訂版）³⁾から設定した（表-1, 2）。解析は支持層の相対密度 Dr をパラメータとした。相対密度 Dr は 60%, 75%, 90% の三種類とした。なお、杭への押し込み力は杭頭に強制変位を与えることにより模擬した。

三次元解析は完全排水条件で行い、三次元解析モデルは 1/4 モデルとした（図-1）。各土層は上層（厚さ 6.12m）と下層（厚さ 2.88m）の二層から構成されている。地盤は Mohr-Coulomb の破壊基準を満たす三次元マルチスプリング要素を用いてモデル化した。杭は板曲げ要素（XY 方向は固定）でモデル化し、杭と地盤間にはジョイント要素を設け、杭下端と地盤の Z 方向の変位は同一とした。境界条件($X, Y \neq 0$)は側方鉛直ローラー、底面を固定境界、対称面上($Y=0$)は Y 方向変位、X 方向回転、Z 方向回転を固定、対称面上($X=0$)は X 方向変位、Y 方向回転、Z 方向回転を固定とした。なお、本検討は杭の先端支持力に着目するため、ジョイント要素の摩擦力をゼロとした。

3 解析結果

(1)杭の先端支持力

本検討における杭の先端支持力は、「杭先端直径の 10%相当の杭先端沈下量が生じた時の荷重」と定義した。三次元解析による杭の荷重変位関係を図-2、杭の先端支持力の比較を図-3 に、変形図及び有効鉛直応力 σ'_z 、最大せん断ひずみ γ_{max} の分布を図-4、図-5 に示す。図-2、図-3 より、相対密度 Dr が大きくなるほど、杭の先端支持力は大きくなる結果となった。相対密度 90%の支持力を 1.0 とした場合の比率は、相対密度 60%で 0.67 (60/90=0.67)、相対密度 75%で 0.85(75/90=0.83)となり、杭の先端支持力は相対密度の大きさにほぼ比例していることがわかる。図-4、図-5 より、杭先端の鉛直応力分布は圧力球根のような形状を示しており、相対密度が大きいほど、圧力球根が大きくなっている。

参考として 4 本杭（相対密度 $Dr=90\%$ 、杭間隔 2.5D、D：杭径）による 1 本あたりの杭の先端支持力は、単杭（相対密度 $Dr=90\%$ ）の支持力とほぼ同等（8%程度の差）となった。Vesic⁴⁵⁾は、極限先端支持力に関する群杭効率、杭間隔には無関係にほぼ 1.0 であり、極限先端支持力に関する群杭効果は存在しないと報告している。今回の結果（相対密度 $Dr=90\%$ ）は、単杭と 4 本杭でほぼ同等の結果となり、Vesic の報告とほぼ同様の結果となった。なお、杭先端位置における単杭と 4 本杭の平均有効拘束圧の比較を図-6 に示す。4 本杭の平均有効拘束圧は、隣接する杭による干渉の影響により、単杭より大きい部分が生じていることがわかる。

(2)杭の先端支持力の関数形

Hirayama⁶⁾は、杭の先端地盤ばねに式(1)に示す双曲線関係を提案している。

$$q = \frac{z_e}{a_e + b_e z_e} \quad \text{ここに、} a_e = \frac{z_{ref,e}}{q_{ult}} = \frac{0.25D_e}{q_{ult}}, \quad b_e = \frac{1}{q_{ult}} \quad (1)$$

本検討では、Hirayama⁶⁾による双曲線関係を用いて、単杭の荷重変位関係の近似を行った。なお、双曲線関係の近似は、杭の第 2 限界荷重 $q_{0.1}$ （杭先端直径の 10%の杭先端沈下量が生じた時の荷重）を基準として行った。

図-2 より、Hirayama⁶⁾による双曲線関係は、三次元解析による杭の荷重変位関係を概ね再現することができた。

4 まとめ

三次元解析による杭の先端支持力は、相対密度 Dr に比例して大きくなった。なお、極限先端支持力の群杭効率は概ね 1.0 となり、Vesic⁴⁵⁾による既往の知見と整合する結果となった。

また、Hirayama による双曲線関係は、三次元解析による杭の荷重変位関係を概ね再現しており、杭先端の地盤ばね特性は双曲線関係で妥当であることが示唆された。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

Three-dimensional analysis on centrifugal model test - Single pile -

Junichi Hyodo (Tokyo electric power service co.ltd), Noriyuki Fujii (Oyo corporation)

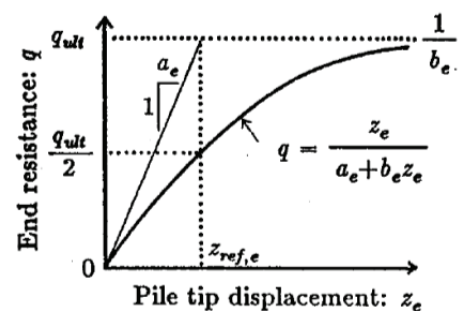


図-7 杭先端における抵抗と変位の関係⁶⁾

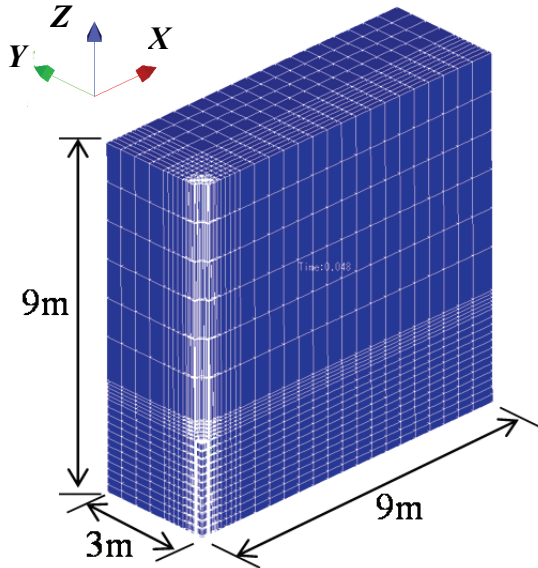


図-1 解析モデル (三次元解析)

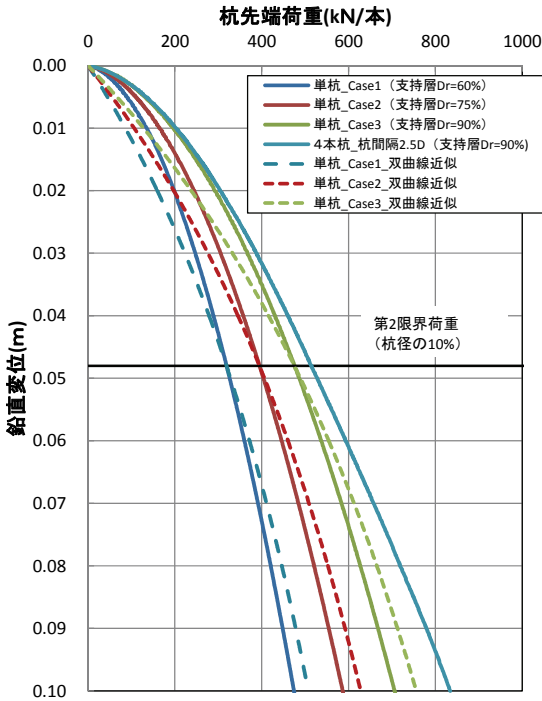


図-2 三次元解析結果 (杭の荷重変位関係)

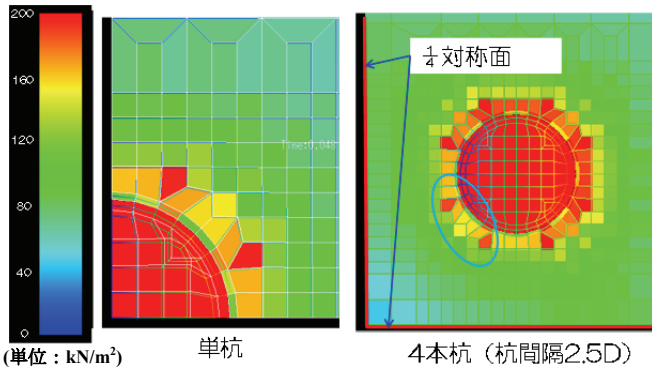


図-6 三次元解析結果 (杭先端付近の平均有効拘束圧)

表-1 解析用地盤物性値

土層名	物理特性		動的変形特性								
	質量密度 ρ (t/m ³)	間隙率 n	せん断弾性係数 G_{so} (kPa)	体積弾性係数 K_{so} (kPa)	基準化拘束圧 (kPa)	拘束圧依存の係数 $mG_{so}K_{so}$	ポアソン比 ν	粘着力 C (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)	履歴減衰上限値 h_{max}	水の体積弾性係数 K_{wa} (kPa)
上層 (Dr=60%)	1.93	0.430	8.969E+04	2.339E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	39.86	0.240	2.20E+06
下層 (Dr=60%)	1.99	0.390	8.969E+04	2.339E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	39.86	0.240	2.20E+06
下層 (Dr=75%)	1.99	0.390	1.191E+05	3.107E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	40.95	0.240	2.20E+06
下層 (Dr=90%)	1.99	0.390	1.511E+05	3.940E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	42.05	0.240	2.20E+06

表-2 杭の物性値

部材	杭径 D (m)	肉厚 t (m)	奥行き幅 (m)	変形係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (kPa)	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)	備考
真鍮杭	0.48	0.03	6.0	1.050E+09	0.35	3.889E+08	4.50E-02	1.14E-03	杭1本あたり
							7.51E-03	1.89E-04	奥行き1mあたり

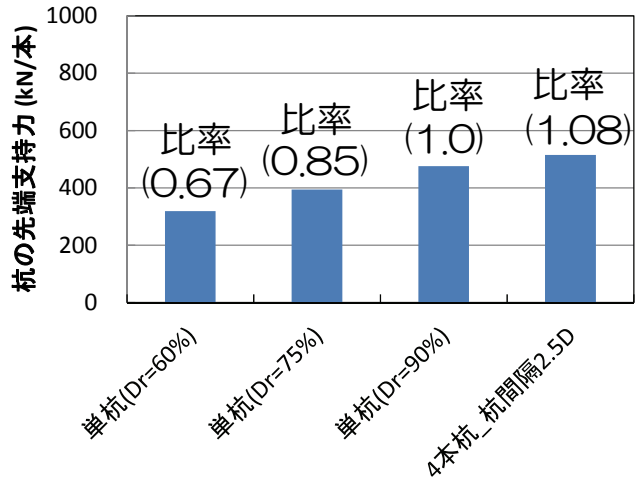


図-3 三次元解析結果 (杭の先端支持力)

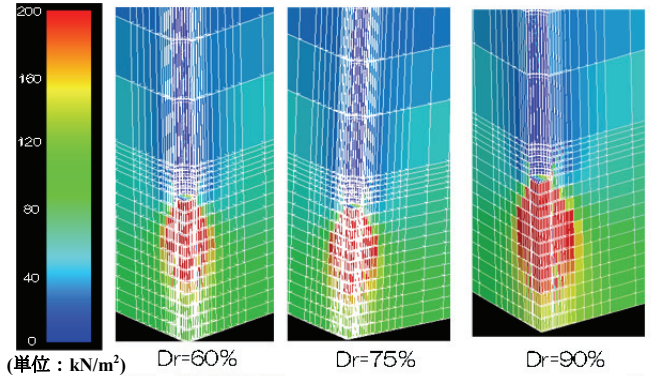


図-4 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と有効鉛直応力 σ'_z)

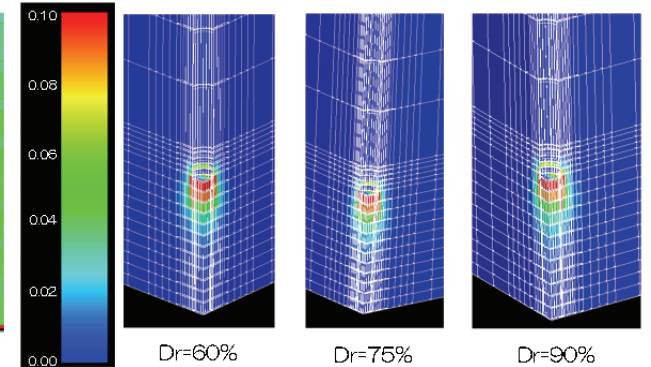


図-5 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と最大せん断ひずみ γ_{max})

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, S: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993. 3) (財)沿岸技術研究センター: 港湾構造物設計事例集 (平成 19 年改訂版), 平成 19 年 3 月. 4) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説, 1985. 5) Vesic, A.S.: Experimenta with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222, 1969. 6) HIDEKI HIRAYAMA : LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FUNCTIONS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.

2-3 三次元解析による検討—相対密度 60%—

杭基礎 先端支持力 三次元解析

パシフィックコンサルタンツ株式会社 ○宮下健一郎
株式会社ニュージェック 栗原直範 曾根照人

1 はじめに

一般社団法人 FLIP コンソーシアムでは、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデルを提案するために、杭軸方向挙動 WG を設置し、各種検討を行っている。本検討では、相対密度をパラメータとした杭間隔 2.5D 及び 5D の三次元解析を実施し、二次元解析による杭の先端支持力のモデル化の予備検討を行った。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver1.4.0 を用いている¹⁾²⁾。

2 解析条件

解析用地盤物性値は等価 N 値 (相対密度から Meyerhof の式で変換) に基づき、簡易設定法 (改訂版)³⁾ から設定した (表-1, 2)。解析は支持層の相対密度 Dr を 60% とするケースに着目した。なお、杭への押し込み力は杭頭に強制変位を与えることにより模擬している。

三次元解析は排水条件で行い、三次元解析モデルは 1/4 モデルとした (図-1)。各土層は Mohr-Coulomb の破壊基準を満たす三次元マルチスプリング要素を用いてモデル化している。杭は板曲げ要素 (XY 方向は固定) でモデル化し、杭と地盤間にはジョイント要素を設け、杭下端と地盤の Z 方向の変位は同一としている。境界条件 ($X, Y \neq 0$) は側方鉛直ローラー、底面を固定境界、対称面上 ($Y=0$) は Y 方向変位, X 方向回転, Z 方向回転を固定, 対称面上 ($X=0$) は X 方向変位, Y 方向回転, Z 方向回転を固定, なお、本検討は杭の先端支持力に着目するため、ジョイント要素の摩擦力はゼロとしている。

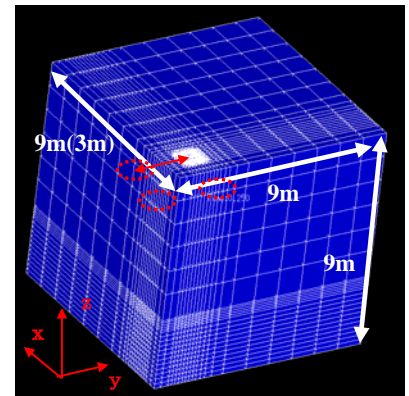


図-1 解析モデル (三次元解析)

表-1 解析用地盤物性値

土層名	物理特性		動的変形特性									
	質量密度 ρ (t/m ³)	間隙率 n	せん断弾性係数 G_{max} (kPa)	体積弾性係数 K_{ms} (kPa)	基準化拘束圧 σ'_{vm} (kPa)	拘束圧依存の係数 m, G_{ms}	ポアソン比 ν	粘着力 C (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg.)	履歴減衰上限値 h_{max} (kPa)	水の体積弾性係数 K_{ms} (kPa)	
上層 ($Dr=60\%$)	1.93	0.430	8.969E+04	2.339E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	39.86	0.240	2.20E+06	
下層 ($Dr=60\%$)	1.99	0.390	8.969E+04	2.339E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	39.86	0.240	2.20E+06	

表-2 杭の物性値

部材	杭径 D (m)	肉厚 t (m)	奥行き幅 (m)	変形係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (kPa)	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)	備考
真鍮杭	0.48	0.03	6.0	1.050E+09	0.35	3.889E+08	4.50E-02	1.14E-03	杭1本あたり
							7.51E-03	1.89E-04	奥行き1mあたり

4 解析結果

(1) 杭の先端支持力

本検討における杭の先端支持力は、「杭先端直径の 10% 相当の杭先端沈下量が生じた時の荷重」と定義した。三次元解析による杭の荷重変位関係を図-2, 杭の先端支持力の比較を図-3 に、平均応力 σ_m , 鉛直応力 σ_z , 最大せん断ひずみ γ_{max} の分布を図-4, 図-5, 及び図-6 に示す。なお、応力分布等は隣接杭の影響を分かりやすく表現するため、1/4 モデルの結果を鏡写により貼り付けたものを記載している。

図-2, 図-3 の結果に着目すると、杭ピッチによらず概ね先端支持力を同等の値を示すことが確認された。この結果から杭ピッチの違いにより先端支持力は大きく変わらないことが分かる。したがって、先端支持力のみに着目した場合は、群杭効果は殆ど無いと言える。Vesic⁴⁾⁵⁾ は、極限先端支持力に関して、杭間隔には無関係に群杭効率はほぼ 1.0 であり、群杭効果は存在しないと報告しており、Vesic の報告とほぼ同様の結果となった。

次に、図-4, 図-5, 図-6 の結果に着目すると、杭先端の鉛直応力分布は圧力球根のような形状を示しており、杭ピッチが短いほど隣接杭の押し込みの影響を受けていることが確認される。2.5D の σ_m が他のケースに比べて大きな結果となっているが、これは 2.5D は x 方向の解析領域が狭く、境界条件の影響を受けているためと考えられる。このように杭先端部では拘束圧の違いが見られたが、本ケースでは先端支持力に大きな違いは見られなかった。

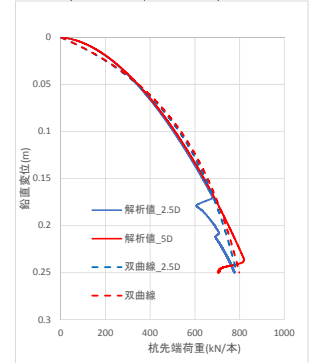
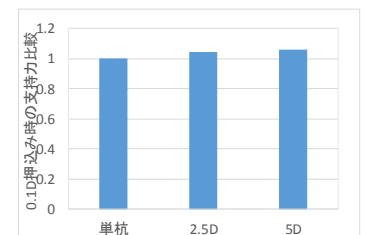


図-2 三次元解析結果 (杭の荷重変位関係)



ケース	単杭	2.5D	5D
0.1D押し込み時の押し込み力(kN)	319	333	338
単杭に対する比率	1	1.04	1.06

Three-dimensional analysis on centrifugal model test

Kenichiro Miyasita (PacificConsultants), Naonori Kuwabara and Akito Sone (NEWJEC.Inc)

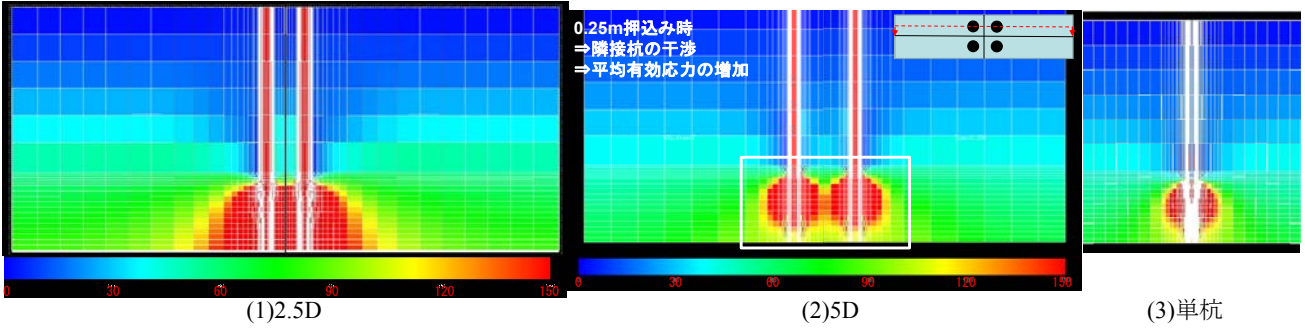


図-4 三次元解析結果（平均応力 σ_m ） 0.25m押込み時

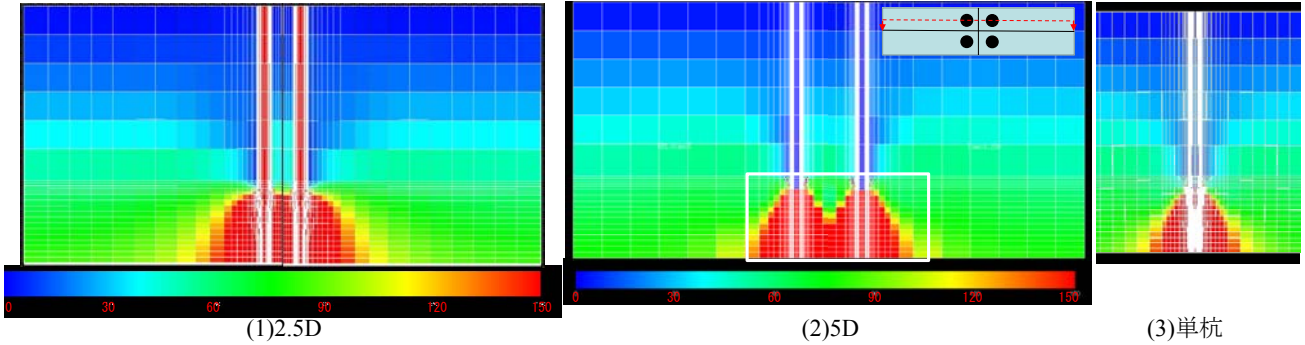


図-5 三次元解析結果（鉛直応力 σ_z ） 0.25m押込み時

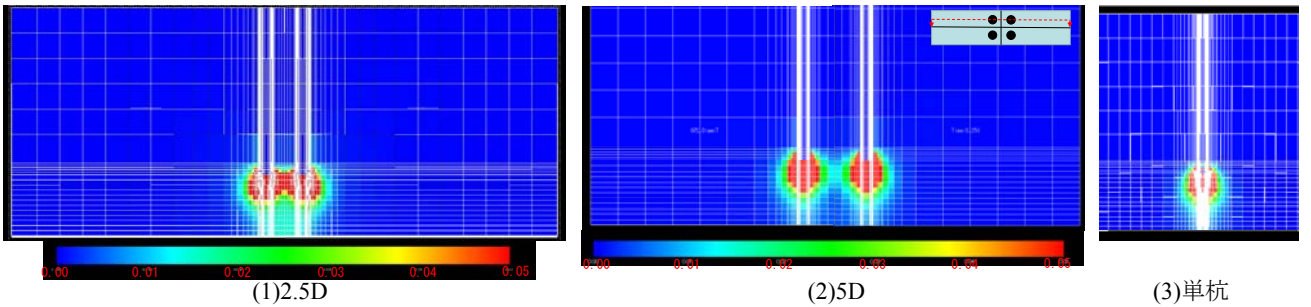


図-6 三次元解析結果（最大せん断ひずみ γ_{max} ） 0.25m押込み時

(2)杭の先端支持力の関数系

Hirayama⁶⁾は、杭の先端地盤ばねに式(1)に示す双曲線関係を提案している。

$$q = \frac{z_e}{a_e + b_e z_e} \quad \text{ここに、} \quad a_e = \frac{z_{ref,e}}{q_{ult}} = \frac{0.25D_e}{q_{ult}}, \quad b_e = \frac{1}{q_{ult}} \quad (1)$$

本検討では、Hirayama⁶⁾による双曲線関係を用いて、単杭の荷重変位関係の近似を行った。なお、双曲線関係の近似は、杭の第2限界荷重（杭先端直径の10%の杭先端沈下量が生じた時の荷重） $q_{0.1}$ を基準として行った。

図-2より、Hirayama⁶⁾による双曲線関係は、三次元解析による杭の荷重変位関係を概ね再現することができた。

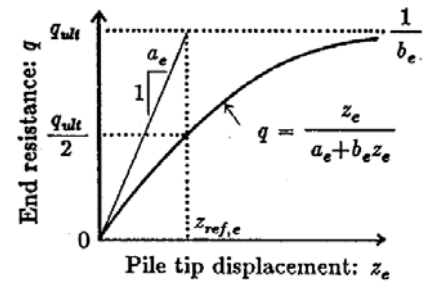


図-7 杭先端における抵抗と変位の関係⁶⁾

5 まとめ

三次元解析による杭の先端支持力は、杭ピッチによらず概ね同等の値となり、群杭効果は確認されなかった。また、Hirayamaによる双曲線関係は、三次元解析による杭の荷重変位関係を概ね再現しており、杭先端の地盤ばね特性は双曲線関係で妥当であることが示唆された。

謝辞：本検討はFLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

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, S : Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993 3) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成19年改訂版）4)土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，1985, 5)Vesic, A.S.: Experimenta with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222,1969 6)Hirayama : LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FUNCTIONS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.

2-4 三次元解析による検討—相対密度 75%—

杭基礎 先端支持力 三次元解析

応用地質株式会社 藤井 紀之
JFE スチール株式会社 塩崎 禎郎

1 はじめに

一般社団法人 FLIP コンソーシアムでは、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデルを提案するために、杭軸方向挙動 WG を設置し、各種検討を行っている。本検討では、杭間隔をパラメータとした群杭の三次元解析を実施し、二次元解析による杭の先端支持力のモデル化の予備検討を行った。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver1.4.0 を用いた¹⁾²⁾。

2 解析ケース

解析ケースは、「ケース 1：杭間隔 2.5D」、「ケース 2：杭間隔 5.0D」の 2 ケースとした。D は杭径(=0.48m)である。

3 解析条件

(1)解析用地盤物性値

地盤物性値は、等価 N 値(相対密度から Meyerhof の式で変換)に基づき、簡易設定法(改訂版)³⁾を用いて設定した。なお、本検討では、支持層の相対密度を 75%として実施した。設定した解析用地盤物性値は 2-2 と同様である。

(2)その他条件

三次元解析条件は以下のとおりである。

- ①解析モデル：図-1 及び図-2 に示すとおり 1/4 モデルとした。
- ②土要素のモデル化：Mohr-Coulomb の破壊基準を満たす三次元マルチスプリング要素とした。
- ③杭のモデル化：板曲げ要素(XY 方向は固定)でモデル化した。杭と地盤間にはジョイント要素を設け、杭下端と地盤の Z 方向の変位は同一とした。なお、杭の先端支持力に着目するため、ジョイント要素の摩擦力はゼロとした。
- ④排水条件：排水条件とした。
- ⑤境界条件：側方鉛直ローラー、底面を固定境界、対称面上($Y=0$)は Y 方向変位、X 方向回転、Z 方向回転を固定、対称面上($X=0$)は X 方向変位、Y 方向回転、Z 方向回転を固定とした。
- ⑥外力条件：杭への押込み力は杭頭に強制変位を与えることにより模擬した。

4 解析結果

(1)杭の先端支持力

本検討における杭の先端支持力は、「杭先端直径の 10%相当の杭先端沈下量が生じた時の荷重」と定義した。杭間隔 2.5D と 5.0D の荷重～変位関係を図-3 及び図-4 に示す。図-3 に示すとおり、0.1m 貫入までの範囲では両者の分布はほぼ同じ傾向を示す結果となり、杭先端支持力もほぼ同値となった。ここで、2-2 及び 2-3 の報告でも紹介があったとおり、既往の研究³⁾⁴⁾によると極限先端支持力は杭間隔に依存せず、群杭効果は存在しないことが報告されている(群杭効率はほぼ 1.0)。本解析の杭間隔 2.5D、5.0D 及び 2-2 の報告の単杭($Dr=75%$)における極限先端支持力を図-5 に示したが、いずれのケースにおいても極限先端支持力はほぼ同値となり、既往研究成果と整合する結果となった。このため、3 次元解析による結果は妥当であると判断できる。なお、参考までに基盤の相対密度を $Dr=90%$ とした結果を併記したが、 $Dr=75%$ と比較して先端支持力が大きくなっており、この結果からも三次元解析の妥当性が確認できたといえる。

一方、図-4 に示すとおり、2.5D モデルのケースでは 0.13m 程度貫入時に先端荷重が急激に減少しており、5.0D モデルのケースではそれよりも遅れて 0.21m 程度貫入時に同様な傾向が見られた。ここで、両者の鉛直応力 σ_v 、最大せん断ひずみ γ_{max} の分布を図-6 及び図-7 に示す。図-6 に示すとおり、両者の杭先端の鉛直応力分布は同様の傾向となった。一方、図-7 に示すとおり、最大せん断ひずみ分布は 5D と比較して 2.5D のほうが大きくなる結果となった。図-8 に平均有効応力の分布を示したが、同図をみると、5D と比較して 2.5D は境界付近まで杭の影響が及んでおり、その結果、2.5D のほうが平均応力も大きくなっていることが分かる。このため、2.5D モデルでは隣接する杭の影響が及ぶため、その影響で図-4 のような先端荷重の減少傾向に相違が生じたものと考えられる。

(2)杭の先端支持力の関数形

図-4 に示すとおり、2-2 及び 2-3 の報告と同様に Hirayama⁵⁾による双曲線関係(杭先端直径の 10%の沈下量が生じた時の荷重を基準として近似)を用いることで、概ね三次元解析による杭の荷重変位関係を再現することができた。

5 まとめ

三次元解析による杭の先端支持力は、杭間隔によらず概ね同じ値を示し、既往研究成果と整合する結果となった。このため、二次元解析による杭の先端支持力のモデル化に対する予備検討としての妥当性は確認できた。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

Three-dimensional analysis on centrifugal model test- 75percent Relative Density -

N. Fujii (Oyo corporation), Y. Shiozaki(JFE-Steel corporation)

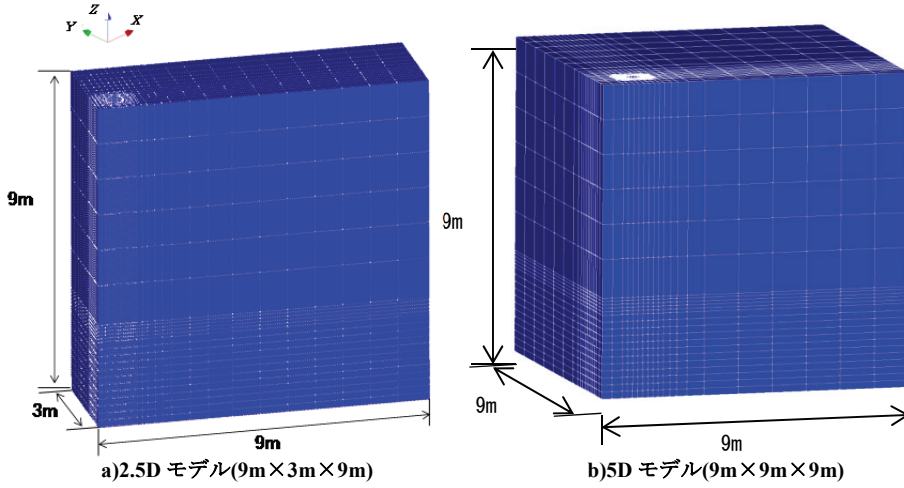


図-1 三次元解析モデル(全体図)

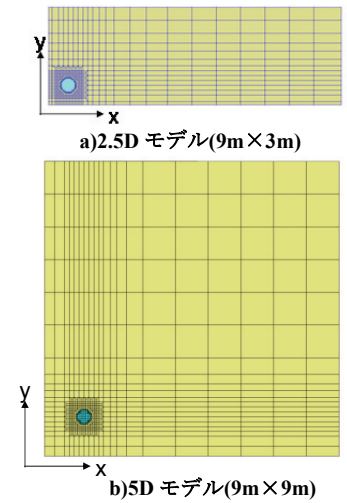


図-2 三次元解析モデル(平面図)

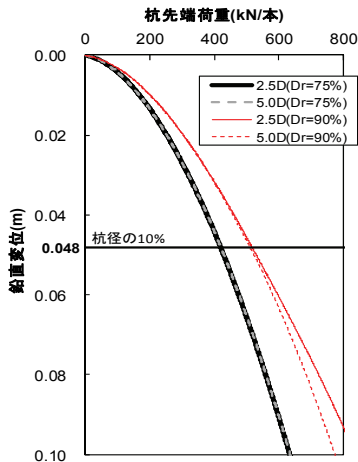


図-3 杭の荷重変位関係

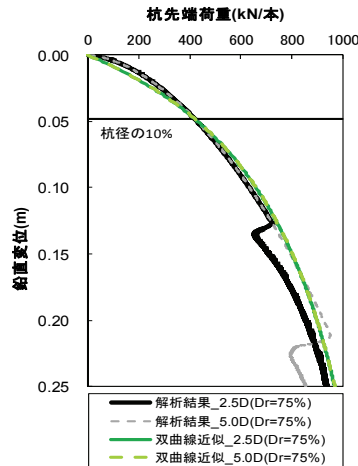


図-4 杭の荷重変位関係(0.25mまで貫入)

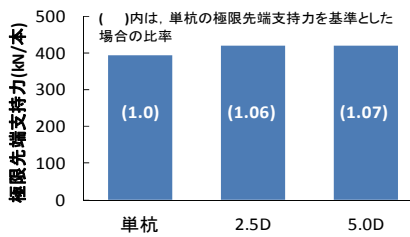


図-5 杭の極限先端支持力の比較

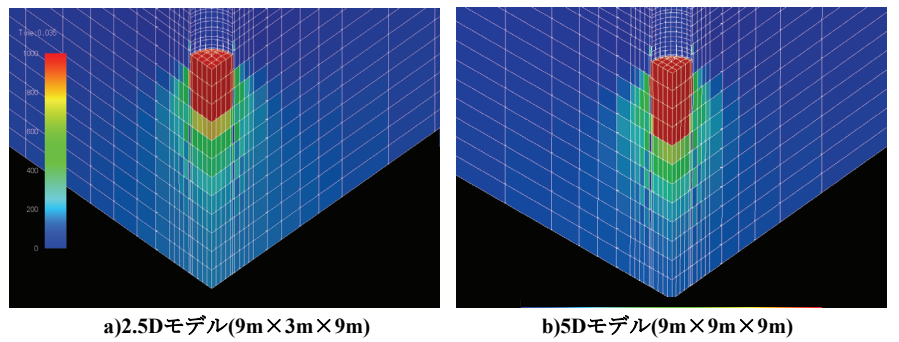


図-6 三次元解析結果(5cm貫入時(杭径の10%相当)の杭先端部の鉛直応力 σ_z)

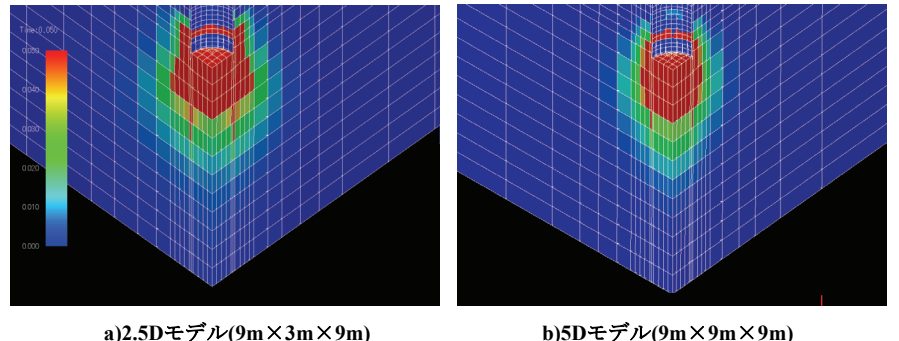


図-7 三次元解析結果(5cm貫入時(杭径の10%相当)の杭先端部の最大せん断ひずみ γ_{max})

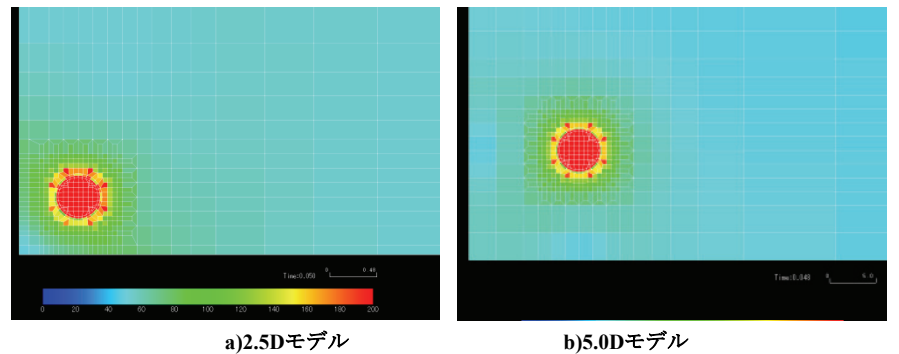


図-8 杭先端の平均有効拘束圧(5cm貫入時(杭径の10%相当))

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, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993. 3) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説, 1985. 4) Vesic, A.S.: Experimenta with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222, 1969. 5) Hirayama: LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FUNCTIONS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.

2-5 三次元解析による検討 ー相対密度 90%ー

杭基礎 先端支持力 三次元解析

五洋建設株式会社 ○宇野 州彦
東電設計株式会社 兵頭 順一

1 はじめに

杭軸方向挙動 WG では、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデルを提案するために、各種検討を行っている。本検討では、表層の相対密度 $D_r=60\%$ 、下層の相対密度 $D_r=90\%$ の地盤を対象に、単杭と 4 本杭（杭間隔 2.5D および 5D）における三次元解析を実施し、それぞれのケースにおける杭の挙動について検討した。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver1.4.0¹⁾²⁾を用いている。

2 解析条件

解析用地盤物性値は等価 N 値（相対密度から Meyerhof の式で変換）に基づき、簡易設定法（改訂版）³⁾から設定した（表-1, 表-2）。また、杭への押し込み力は杭頭に強制変位を与えることにより模擬している。

三次元解析は排水条件で行い、モデルは全て 1/4 モデルとした（図-1, 図-2）。ただし 4 本杭(5D)については、図-2 のように境界条件の影響を考慮して平面方向 9m×9m の地盤領域としている。各土層は Mohr-Coulomb の破壊基準を満たす三次元マルチスプリング要素を用いてモデル化している。杭は板曲げ要素（XY 方向は固定）でモデル化し、杭と地盤間にはジョイント要素を設け、杭下端と地盤の Z 方向の変位は同一としている。境界条件(X,Y≠0)は側方鉛直ローラー、底面を固定境界、対称面上(Y=0)は Y 方向変位、X 方向回転、Z 方向回転を固定、対称面上(X=0)は X 方向変位、Y 方向回転、Z 方向回転を固定、なお、本検討は杭の先端支持力に着目するため、ジョイント要素の摩擦力はゼロとしている。

3 解析結果

本検討における杭の先端支持力は、「杭先端直径の 10%相当の杭先端沈下量が生じた時の荷重」と定義した。三次元解析による杭の荷重変位関係を図-3、杭の先端支持力と群杭効率の比較を表-3 に、変形図及び鉛直応力 σ_z 、最大せん断ひずみ γ_{max} の分布を図-4、図-5 に示す。図-3、表-3 より、4 本杭(2.5D)、4 本杭(5D)、単杭の順に先端支持力が大きいことがわかる。ここで Vesic⁴⁾は、極限先端支持力に関しては、杭間隔には無関係に群杭効率はほぼ 1.0 であり、群杭効果は存在しないと報告している。今回の結果を比較すると、単杭の先端支持力を 1.0 とした場合の群杭効率は、表-3 より 4 本杭(2.5D)の場合 1.08、4 本杭(5D)の場合 1.07 となり、Vesic の報告とほぼ同様の結果となった。

図-4、図-5 より、杭先端の鉛直応力分布は応力球根のような形状を示しており、単杭と 4 本杭(5D)の結果は比較的近い傾向を示している。一方、4 本杭(2.5D)に関しては、杭間隔が狭いことから互いの応力球根の範囲が近づき、高い応力領域が広く分布していることが分かる。また、杭先端位置における単杭と 4 本杭の平均有効拘束圧の比較を図-6 に示す。単杭と比較して、4 本杭(2.5D)に関しては、対称面側はほぼ同程度であるものの、その反対側では単杭よりやや大きくなっている。4 本杭(5D)に関しては、全体的に単杭よりもやや大きな値となっており、4 本杭(2.5D)と同様に対称面側とその反対側で拘束圧の差が生じている。

4 まとめ

三次元解析による杭の先端支持力は、4 本杭(2.5D)、4 本杭(5D)、単杭の順に大きいことが分かったが、群杭効率を見ると全てほぼ 1 に近い値であり、既往の文献と一致していることが示された。また、4 本杭(2.5D)に関しては、杭間隔が狭いことから互いの応力球根の範囲が近づき、高い応力領域が広く分布していることが示された。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

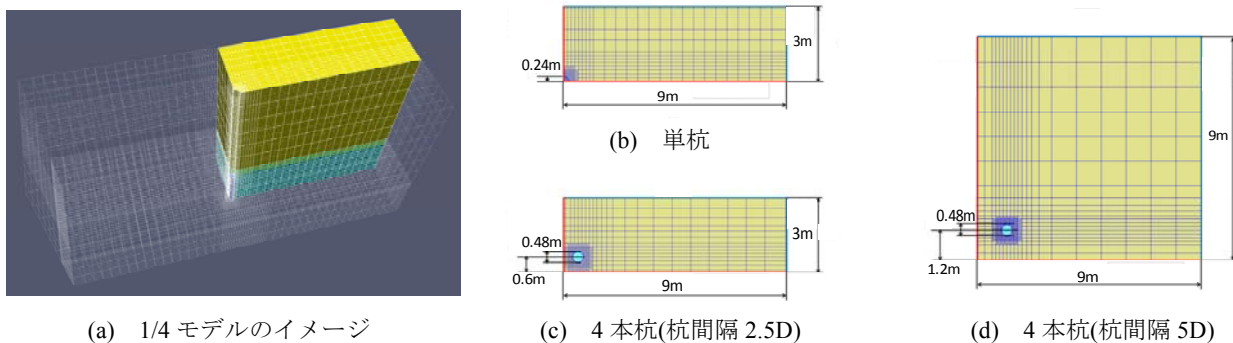


図-1 解析モデル

Three-dimensional analysis on centrifugal model test ーrelative density 90%ー

Kunihiko Uno (Penta-Ocean Construction Co., Ltd.), Junichi Hyodo (Tokyo Electric Power Service Co., Ltd.)

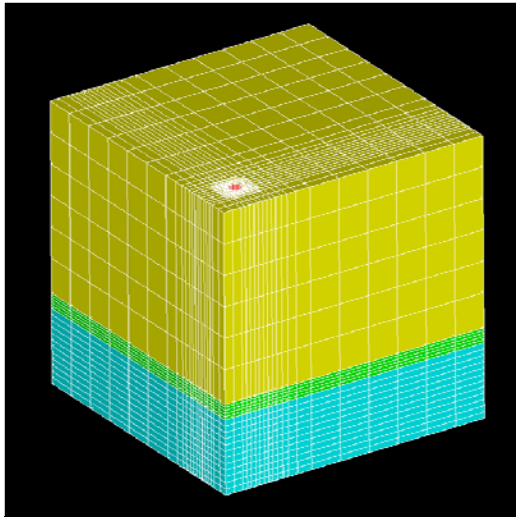


図-2 解析モデル全体図 (杭間隔5D)

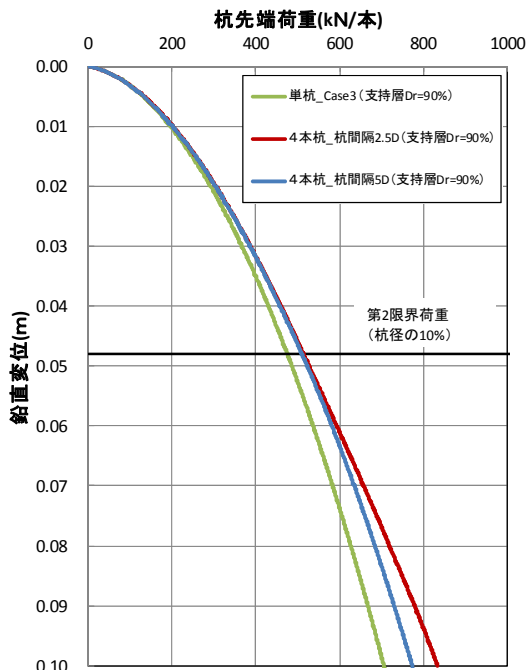


図-3 三次元解析結果 (杭の荷重変位関係)

表-1 解析用地盤物性値

土層名	物理特性		動的変形特性								
	質量密度 ρ (t/m ³)	間隙率 n	せん断弾性係数 G_{na} (kPa)	体積弾性係数 K_{na} (kPa)	基礎拘束圧 (kPa)	拘束圧依存係数 mG, mK	ポアソン比 ν	粘着力 C (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)	履歴減衰上限値 h_{max}	水の体積弾性係数 K_{wa} (kPa)
上層(Dr=60%)	1.93	0.430	8.969E+04	2.339E+05	98	0.5	0.33	0	39.86	0.24	2.20E+06
下層(Dr=90%)	1.99	0.390	1.511E+05	3.940E+05	98	0.5	0.33	0	42.05	0.24	2.20E+06

表-2 杭の物性値

部材	杭径 D (m)	肉厚 t (m)	奥行き幅 (m)	変形係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (kPa)	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)	備考
真鍮杭	0.48	0.03	6.0	1.050E+09	0.35	3.889E+08	4.50E-02 7.51E-03	1.14E-03 1.89E-04	杭1本あたり 奥行き1mあたり

表-3 杭の先端支持力と群杭効率

	単杭	4本杭	
		2.5D	5D
杭の先端支持力(kN/本)	476	515	510
群杭効率	1.0	1.08	1.07

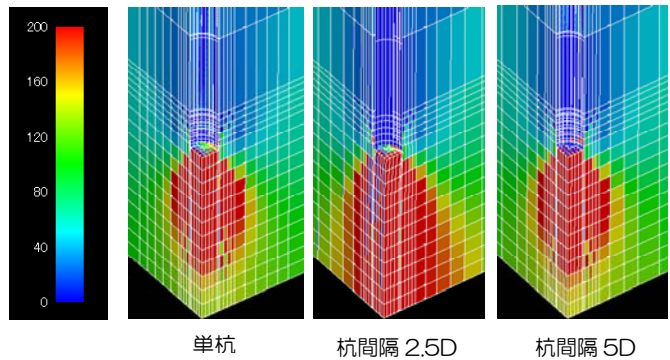


図-4 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と鉛直応力 σ_z)

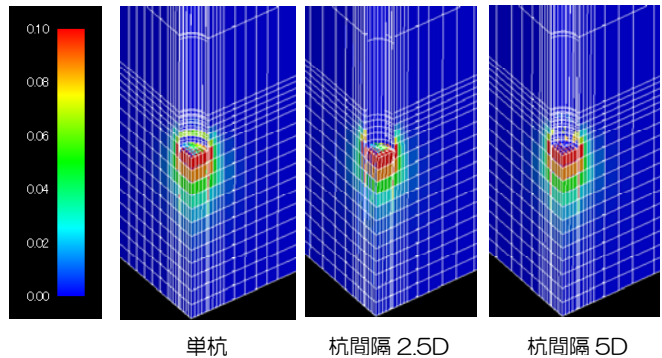


図-5 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と最大せん断ひずみ γ_{max})

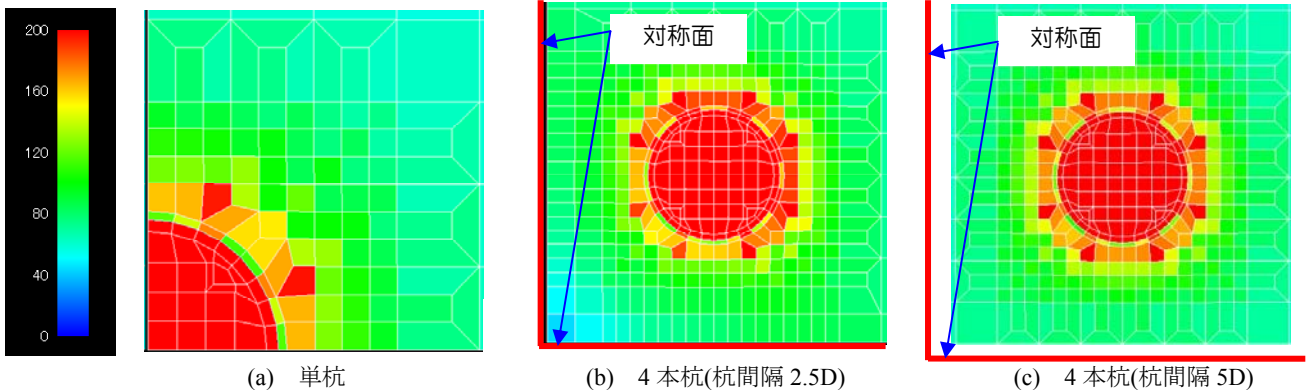


図-6 三次元解析結果 (杭先端付近の平均有効拘束圧) (単位: kPa)

参考文献: 1) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 2) Iai,S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993. 3) 一般社団法人 FLIP コンソーシアム:平成 24 年度成果報告書 4) Vesic,A.S.: Experimental results from Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222, 1969.

3. 杭の先端支持力を対象とした三次元解析 (杭の本数や周面抵抗条件を変化させた解析)

3-1 杭の先端支持力に着目した三次元解析（その 1）

－ 4 本杭と無限本数杭の杭頭荷重－鉛直変位の関係 －

群杭 先端支持力 三次元解析

東電設計(株) ○溜 幸生

1.はじめに

杭は、実際の基礎においては、複数の本数で形成される群杭として用いられることが多い。群杭では地盤中の応力が各杭から伝達されたものが重なり合うので、その支持力の機構は単杭と異なった面があり、群杭の各杭の抵抗はその配置上の位置によって異なるとされている¹⁾。群杭に見られる現象は一般に群杭効果と呼ばれているが、群杭効果は地盤条件、杭の大きさ、長さ、本数、相互距離等に影響することが知られている¹⁾。これらの影響は古くから実験的に多くの検討がなされ一定の知見が得られている^{たとえ²⁾}が、数値解析等による詳細なメカニズムの解明は、計算機が発達した近年になりようやく行われるようになった。本検討は、砂地盤における杭の先端支持力に着目して、杭の本数を変化させた場合の群杭効果を数値解析的に求めることを目的として行うものである。本報告では、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP³⁾の 3 次元版である FLIP3D⁴⁾を用いて、杭間隔が同様の条件で本数が異なる群杭の杭頭荷重と変位の関係について検討した。以下、検討方法および結果について示す。

2.検討方法

群杭の解析モデルは、FLIP コンソーシアムが京都大学防災研究所にて実施した遠心場（40g）の単杭の載荷実験（FLIP コンソーシアム平成 24 年度成果報告書）の杭と地盤を参考に作成した。実験で用いた固定土槽の大きさは長さ 450mm、奥行き 150mm、深さ 300mm であり、40g の遠心加速度を考慮して実物換算すると、長さ 18m、奥行き 6m、深さ 12m である。実験で用いられた杭は直径 12mm、厚さ 0.8mm の真鍮製の中空杭であり、実物換算で直径 0.48m、厚さ 32mm である。地盤は豊浦砂で作成されており、杭先端の支持層は相対密度 90%（実物換算：厚さ 2.88m）、杭の周囲に位置する表層は相対密度 60%（実物換算：厚さ 6.12m）である。杭は支持層に杭の直径が根入れされている。

群杭の配置は、4 本杭で杭中心間隔が直径 D の 2.5 倍（以下、2.5D）、無限本数杭で杭間隔が 2.5D の 2 種類を考慮した。4 本杭のモデルと無限本数杭のモデルにおける水平断面のメッシュを図-1 に示す。作成した複数杭の 3 次元モデルを図-2 に、比較のために作成した単杭の解析モデルを図-3 に示す。これらのモデルで杭は 3 次元の板曲げ要素を用いて周方向に 16 分割した円筒形状でモデル化した。杭のモデルの先端は開端であるがその底面においては杭の下端に接する土要素の節点が、杭底面の土要素の節点と同様の鉛直変位となる多点拘束条件を課すことにより、杭底面が閉塞している状態を再現した。4 本杭のモデルでは図-1 に示す領域の 1/4 を、無限本数の杭は 1.2m×1.2m の正方形の領域を取り出すことにより 3 次元にモデル化した。各対称面においては面に垂直な方向の地盤変位を拘束し、底面においては鉛直方向の地盤変位を固定する境界条件を考慮した。各解析モデルの節点数と要素数を図中に併記している。杭と地盤の物性は、この遠心実験を対象に別途実施された解析検討⁵⁾の物性と同等のものを用いた。

解析は、3 次元動的有効応力解析プログラム(FLIP3D ver.1.5.0.beta)⁴⁾を用いて実施した。初期自重解析により地盤内の応力を再現させた後で、完全排水条件で杭頭に強制変位 ($\Delta U_z=0.1\text{mm}$) を 0.25m 程度まで与えることで行った。杭先端支持力に着目することから、杭底面を除く杭表面と周囲の土の摩擦はゼロとした。解析結果の杭頭荷重は、杭上端の板曲げ要素の鉛直応力に断面積を考慮して算定した。

3.検討結果

解析結果として、各モデルの杭頭荷重（杭 1 本当り）と鉛直変位の関係を図-4 に示す。ここでモデルから取り出した数値は杭頭荷重であるが、杭側面で摩擦をゼロとしているため、杭頭荷重は実質的に杭先端荷重となる。図には単杭の遠心載荷実験で得られた先端支持力と杭頭荷重の関係を併記している。単杭モデルの解析結果と実験結果を比べると、杭の鉛直変位が直径の 1/20 程度である 25mm までは両者はほぼ一致しているが、50mm 時点以降では解析結果は実験結果の 7～8 割程度となっている。次に、単杭と 4 本杭(2.5D)を比べると、後者の方が 1 割程度大きくなっている。4 本杭は単杭に比べて複数の杭が接近しているため、杭先端下部の拘束圧が単杭に比べて大きくなり、その結果地盤の剛性が大きくなって先端支持力が大きくなったことが考えられる。無限本数杭の結果においては、杭頭変位が 50mm 以下においては単杭や 4 本杭に比べて杭頭荷重が大きい、それ以降は荷重が伸びていない。載荷の初期においては平面的に無限に広がる杭により杭先端下部の地盤が拘束されて剛性が大きくなるが、ある時点で土要素の応力が強度に漸近し、多重せん断ばねモデルにおいてほぼ一定の応力のもとでひずみが伸びる状態になったものと考えられる。

尚、計算時間は 64bit の計算機(CPU:2.93GHz,メモリ:16GB)を使用して、単杭のモデルで 33 時間、4 本杭のモデル(1/4

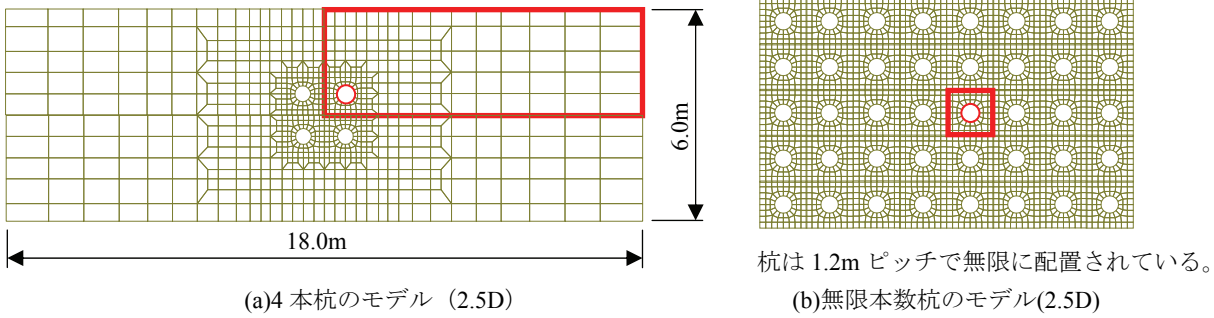


図-1 水平断面のメッシュ分割 (□部分をモデルに考慮)

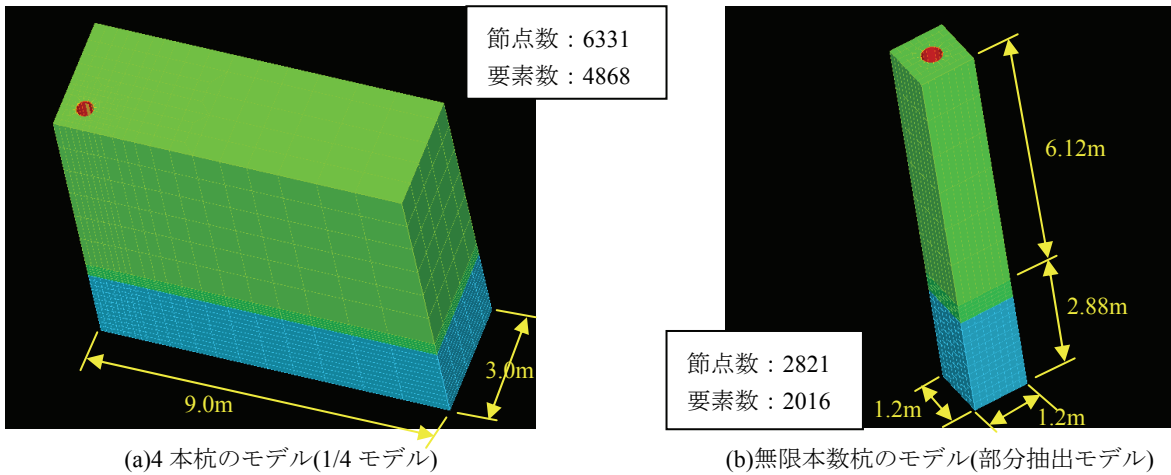


図-2 複数杭の3次元モデル

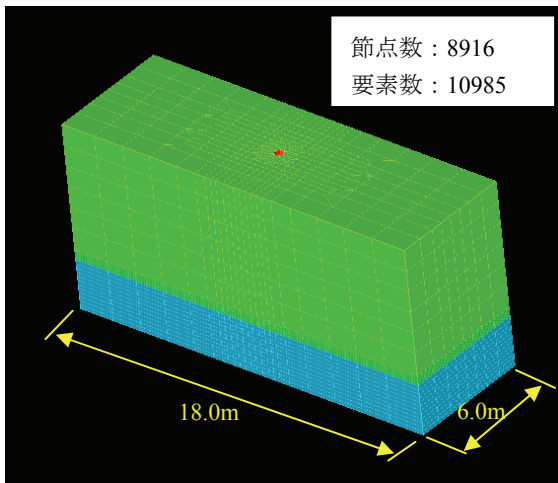


図-3 単杭のモデル

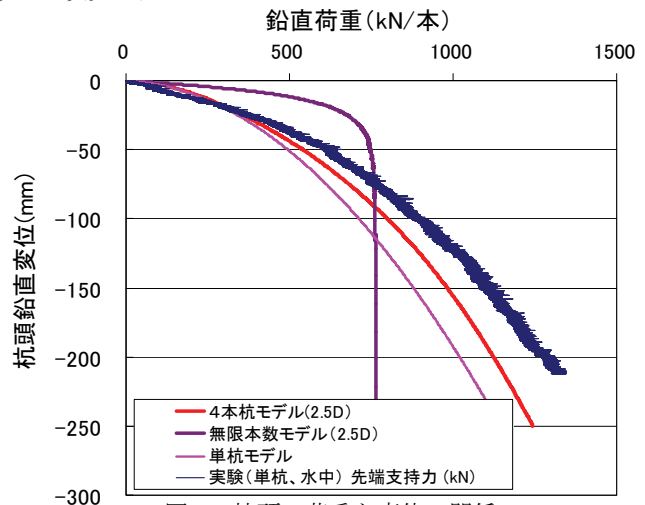


図-4 杭頭の荷重と変位の関係

モデル)で8時間、無限本数杭のモデル(部分抽出)で4.4時間であった。

4.まとめ

FLIP3D を用いて4本杭(2.5D)と無限本数杭(2.5D)ならびに単杭の杭頭荷重と変位の関係を得た。単杭の解析による荷重は参照した遠心載荷実験の荷重と2~3割の違いで整合した。これより、FLIP3D による数値解析では、実験で作成されたようなモデル地盤においてはその先端支持力特性を再現しうることが示唆された。群杭では、4本杭(2.5D)と単杭の違いは1割程度であったが、無限本数杭(2.5D)は杭頭荷重と鉛直変位の関係において異なる傾向を示した。

謝辞：本報告は、一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。

参考文献：1) 土質工学会(地盤工学会)：鋼グイ、一鋼グイ研究委員会報告一、土質基礎工学ライブラリー6、1978。2) 杭基礎の設計法とその解説、1985。3)Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。4) Iai, S. : Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993。5)兵頭順一・小堤治・一井康二：三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーションーその2(2層の飽和地盤)ー、第49回地盤工学研究発表会 pp.1195-1196, 2014。

3-2 杭の先端支持力に着目した三次元解析（その 2）－ 解析結果の分析と考察 －

杭基礎 群杭 3次元解析

新日鐵住金株式会社 ○藤原 覚太
 新日鐵住金株式会社 森安 俊介
 東電設計株式会社 溜 幸生

1. はじめに

「3-1. 杭の先端支持力に着目した三次元解析(その 1)」で実施した群杭の鉛直载荷に関する 3 次元解析結果に関して、分析と考察をおこなった。

2. 分析項目の抽出

「3-1. 杭の先端支持力に着目した三次元解析（その 1）」により得られた杭1本あたりの鉛直方向の荷重変位関係を図-1に示す。ここでは、この結果に関して、次の 2 点に着目して分析と考察を行う。

1 点目は、図-1の②4本杭（杭間2.5D）の支持力が、①単杭の支持力を上回っている点である。杭頭鉛直変位-250mmにおける群杭効率はおよそ1.1程度となっており、この理由を杭先端近傍の地盤応力状態から考察する。なお、ここで群杭効率とは、群杭における杭1本当たりの支持力を単杭1本当たりの支持力で除した値を示す。
 2 点目は、図-1の③無限本数杭（杭間2.5D）の荷重変位特性についてである。荷重約700kN（杭頭鉛直変位約-40mm）までは、その他のケースより支持力や初期剛性が大きい、その後支持力は上限に達し、一定となった状態で変位が進行する結果となった。その他のケースと荷重変位の特性が異なっており、その原因を考察する。

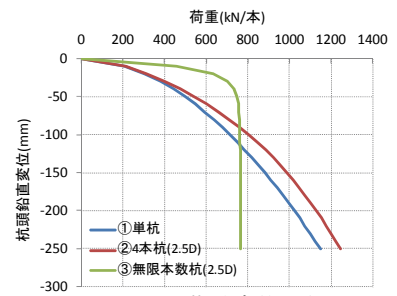


図-1 荷重変位関係

3. 分析と考察

図-2に杭頭変位が-20mm,-250mmのときにおける、平均有効応力(σ'_{mo})およびせん断ひずみのコンター図を示す。文中および図-2中の「杭下端周辺」とは杭下端から深度方向に上下約1Dの領域を示し、「杭下端以深」とは「杭下端周辺」よりも深い領域を示す。

(1) 4本杭（杭間2.5D）の群杭効果について

杭頭変位が-20mm,-250mmのいずれにおいても、杭4本が強制的に変位を受けることで、単杭に比べ杭下端周辺地盤に作用する平均有効応力が大きくなっていることが確認できる。金田ら¹⁾は、鉛直杭载荷時の地盤変形解析において、杭間隔が2.5D程度と広くない場合、互いの杭の応力球根の範囲が重なり、高応力領域がそれぞれの杭下端で水平方向に「一体化」することで、あたかも杭下端にラフトがあるような状態となるため、支持力が増加するとしている。図-2の有効応力コンターにおいても、②4本杭の場合は互いの杭の応力球根の範囲が近づき、①単杭より杭先端部の高応力領域が大きいことが確認でき、このため4本杭とすることで支持力が増加したものと考えられる。

(2) 無限本数杭（杭間2.5D）の荷重変位特性について

i) 支持力増加時

図-2③無限本数杭の変位-20mmにおける平均有効応力コンターが示すように、支持力が上限に達する前においては、無限に配置された杭が一斉に強制変位を受けることで、4本杭で見られたような応力の一体化が顕著に進行し、杭下端以深において平均有効応力が大きく増加している。このことが初期剛性の増加に寄与したものと考えられる。

ii) 支持力一定後（上限到達後）

図-2の変位-250mmのせん断ひずみコンターが示すように、②4本杭においては杭下端周辺から杭下端以深にかけて幅広くせん断ひずみが発生しているのに対して、③無限本数杭の場合、杭下端以深の地盤ではせん断ひずみがほとんど発生しておらず、一方で杭下端周辺において局所的に大きなせん断ひずみが発生している。これは、平均有効応力コンターが示すように、杭下端以深の地盤が全域にわたって②4本杭に比べてはるかに高い応力状態となったことでせん断変形が進まず、その状態でさらに強制変位を受けることで、杭下端周辺の地盤にせん断変形が集中したためと考えられる。これにより杭下端周辺の地盤一帯が降伏し、変位が進行しても抵抗力は増加しない状態になったと推察される。

4. まとめ

群杭に関する3次元解析で得られた結果に対して、①群杭効果、②無限本数杭における荷重変位特性に関して分析と考察をおこなった。その結果、①群杭効果については、本解析条件下では、互いの杭の先端部に形成される応力球根が重なり、高応力領域が拡大するため、群杭の方が単杭より支持力が大きいことが明らかになった。②無限本数杭においては、杭下以深の地盤全体の有効応力が高まり初期剛性が高くなるが、一方で、杭下端周辺一帯の地盤が降伏に至るため、抵抗力が増加せず、支持力が上限に達することが示された。群杭に関する3次元解析を実施する場合、上記のような挙動についても留意する必要があると考えられる。

参考文献：

- 1) 金田一広・後藤茂・青山翔吾・東畑郁生：群杭模型実験における鉛直杭載荷時の地盤変形解析，第58回地盤工学シンポジウム，2013

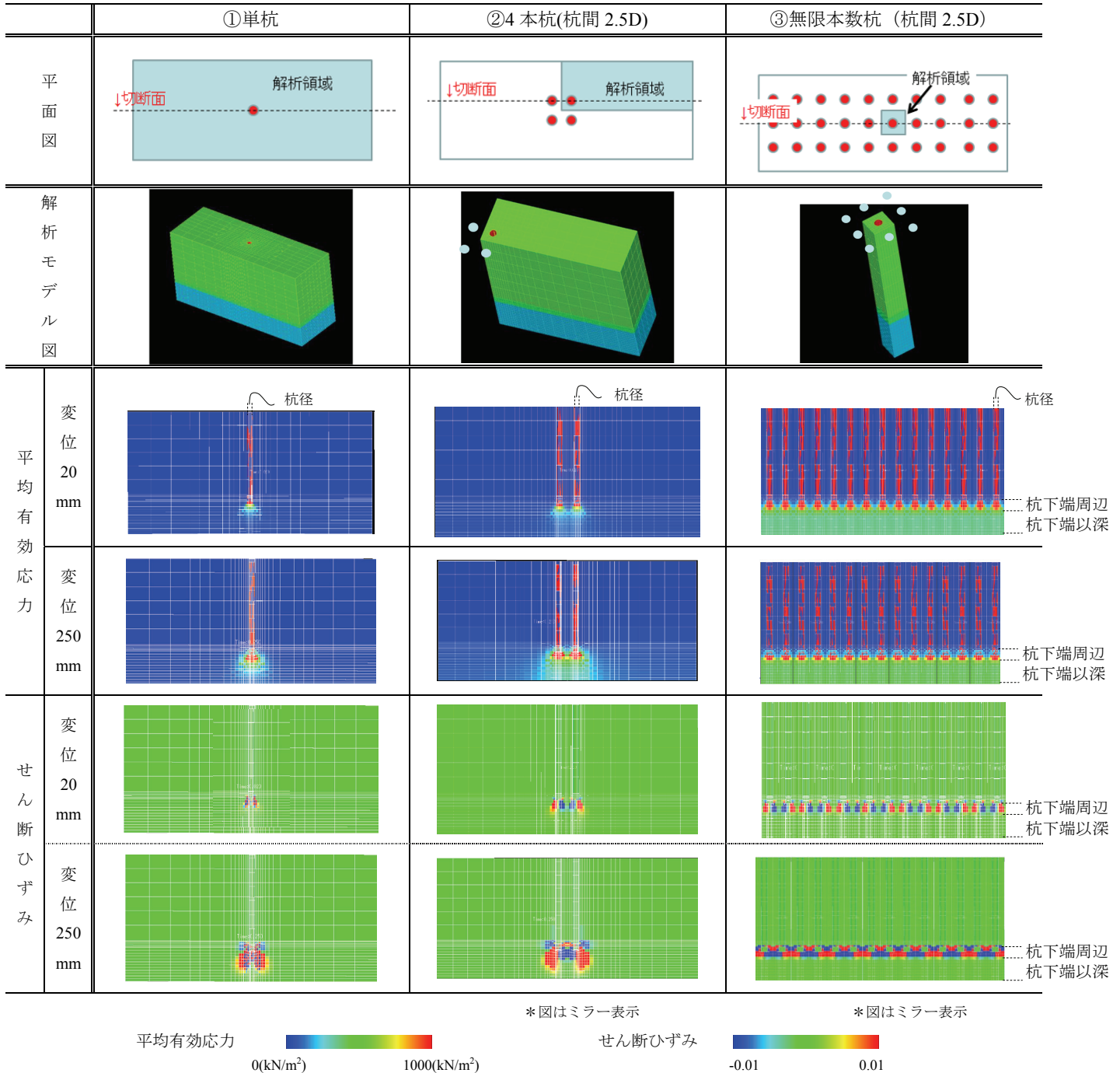


図-2 平均有効応力とせん断ひずみコンター

3-3 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 3)

一 杭の周面抵抗を考慮した解析による群杭効率の計算 一

杭 周面抵抗 三次元解析

東電設計(株) ○溜 幸生

1.はじめに

杭は、通常、複数で形成される群杭として用いられることが多い。群杭に見られる現象は一般に群杭効果と呼ばれているが、群杭効果は地盤条件、杭の大きさ、長さ、本数、相互距離等に影響することが知られている¹⁾。群杭の実験的研究は過去に多く行われており、砂地盤を対象とした最も近年の実験的研究²⁾では、杭の中心間隔（杭径で無次元化）と群杭効率の関係が杭頭荷重、先端支持力、周面抵抗に分けて整理されている³⁾。杭の実験的検討は、一般に多大な費用を要することから、異なる地盤条件を対象として実施することは経済的に困難が伴う場合が多い。一方、近年行われるようになった数値解析は、地盤条件や形状を比較的容易に考慮できるので、妥当な解析手法であれば、特定の地盤条件を対象とした検討が可能となり、便利である。本検討は、数値解析の杭の支持力問題への適用性を確認することを目的として、砂地盤における杭を対象に、群杭効率を解析的に求めることを試みるものである。解析手法は、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP⁴⁾の 3 次元版である FLIP3D⁵⁾を用いた。以下、検討方法および結果について示す。

2.検討方法

群杭効率は、群杭の支持力を単杭の支持力の合計（単杭の支持力×杭本数）で除したものと表される。群杭効率が与えられれば、単杭の支持力より群杭の支持力を求めることができる。本検討では、解析モデルとして、単杭のモデル、4 本杭で杭中心間隔が杭径 D の 2.5 倍のモデル（以下、4 本杭 2.5D のモデル）を作成して群杭効率の計算を試みた。解析モデルは、既往の遠心場（40g）の単杭載荷実験⁶⁾の杭と地盤の仕様を参考に作成した。実験で用いた固定土槽の大きさは 40g の遠心加速度の実物換算で長さ 18m、奥行き 6m、深さ 12m である。実験で用いられた杭は真鍮製の中空杭であり、実物換算で直径 0.48m、厚さ 32mm である。地盤は豊浦砂で作成されており、杭先端の支持層は相対密度 90%（実物換算：厚さ 2.88m）、杭の周囲に位置する表層は相対密度 60%（実物換算：厚さ 6.12m）である。杭は支持層に杭の直径が根入れされている。

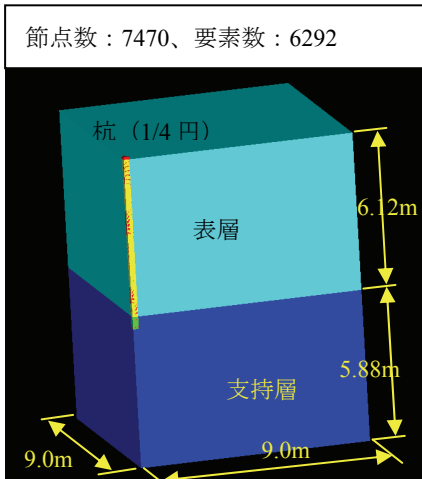
解析モデルの地盤は、底面や側面の境界の影響を少なくするため、実験の地盤より大きくした。平面的には一辺の長さが 18m の正方形形状とし、支持層を 5.88m とした。表層の厚さは実験と同様の 6.12m とした。4 本杭と単杭の形状はいずれも面対称であることから 3 次元モデルは対称面で切り取った 1/4 モデルとした。それぞれの 3 次元モデルを図-1 に示す。各解析モデルの節点数と要素数を図中に併記している。モデルにおいて杭は 3 次元の立体要素を用いて形状をモデルに考慮した。杭の先端は実験と同様閉塞とした。各対称面においては面に垂直な方向の地盤変位を拘束し、底面においては鉛直方向の地盤変位を固定する境界条件を考慮した。地盤の物性は、この遠心実験を対象に別途実施された解析検討⁵⁾の物性と同等のものを用いた。杭は、実験杭相当の剛性（ヤング係数 $E=1.05 \times 10^9 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ ）を有するものとした。

解析は、3 次元動的有効応力解析プログラム(FLIP3D ver.1.5.0.beta)⁵⁾を用いて実施した。初期自重解析により杭の部分にも地盤があると水平成層の応力を再現させた後で、杭の部分の地盤を杭材料に置き換えて、完全排水条件で杭頭に強制変位 ($\Delta U_z=0.1\text{mm}$) を 0.25m 程度まで与えた。杭表面と周囲の土は周面抵抗を考慮するため節点共有とした。解析結果の杭頭荷重は杭を構成する立体要素から着目する箇所鉛直方向の垂直応力を取り出し、要素の水平断面の面積を乗じて足し合わせたものとした。比較のため、表層において杭軸方向の摩擦がない条件でも解析した。

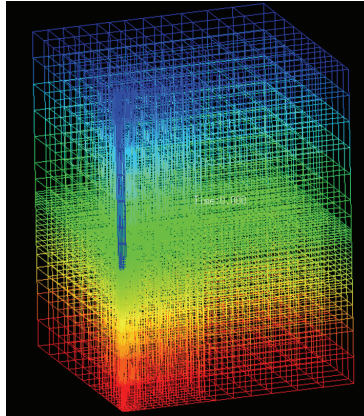
3.検討結果

解析結果として、周面抵抗を考慮した各モデルの 100mm 押し込み時の平均有効応力の分布を図-2 に示す。4 本杭モデルの杭先端下部の平均有効応力は単杭のものに比べて広い範囲で大きく、地盤の剛性が広い範囲にわたって大きくなるのが推察される。表層の杭周辺においては平均有効応力が小さくなっており周面抵抗による影響によるものと考えられる。次に、荷重と杭頭鉛直変位の関係を図-3 に示す。(a)図には杭頭荷重と変位の関係を示すが、4 本杭のモデルの荷重は変位が 50mm 時点において単杭の荷重の 1.1 倍（＝群杭効率）となった。これは平均有効応力の違いに起因するものと考えられる。図中には参考までに単杭の実験結果を示しているが解析結果と 2 割程度の違いである。さらに、杭の周面抵抗を 2 つの方法により求めた。それらは、①周面抵抗を考慮しない解析により杭頭荷重（＝先端支持抵抗）を求め、これと周面抵抗を考慮した杭頭荷重との差を周面抵抗とする、②周面抵抗を考慮した解析により杭頭荷重と杭先端荷重を杭要素の応力から求め、これらの差を周面抵抗とする。後者の方が直接的な方法である。これらの 2 方法で求めた周面抵抗と鉛直変位の関係を図-3(b)に示す。①の方法による群杭効率は 1.9 となったが、②の方法では 1.2 となった。

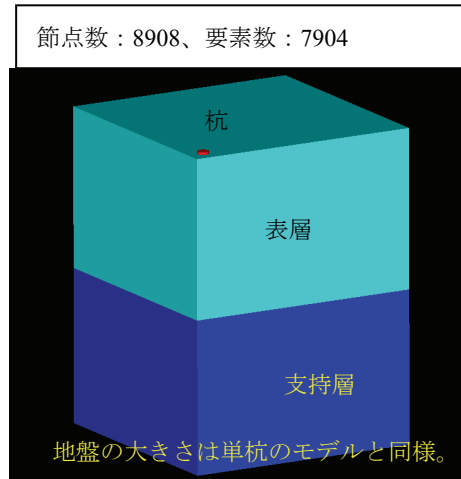
3 dimensional non-linear static analysis (FLIP3D) on the group TAMARI, Yukio, TEPSCO
effect of piles in vertical direction considering the friction on
pile surface.



(a)単杭モデルの形状

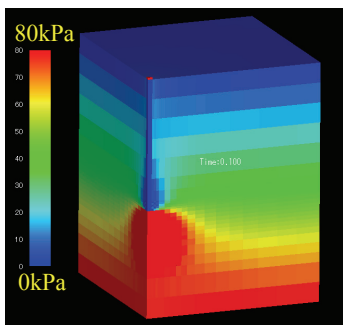


(b)単杭モデルのメッシュ

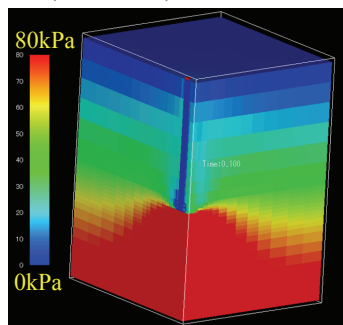


(c)4本杭(2.5D)モデルの形状

図-1 3次元モデル(1/4モデル)

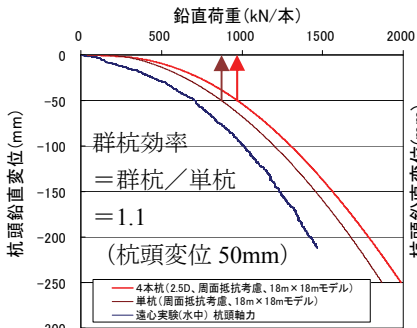


(a)単杭モデル

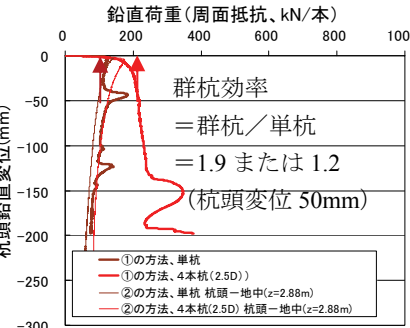


(b)4本杭(2.5D)モデル

図-2 解析による平均有効応力の分布 (100mm押し込み時)



(a)杭頭荷重



(b)周面抵抗

図-3 杭頭荷重と変位の関係

● : 杭頭荷重 ●○ : 先端支持力
 ●○ : 周面抵抗 (○は②の方法による)

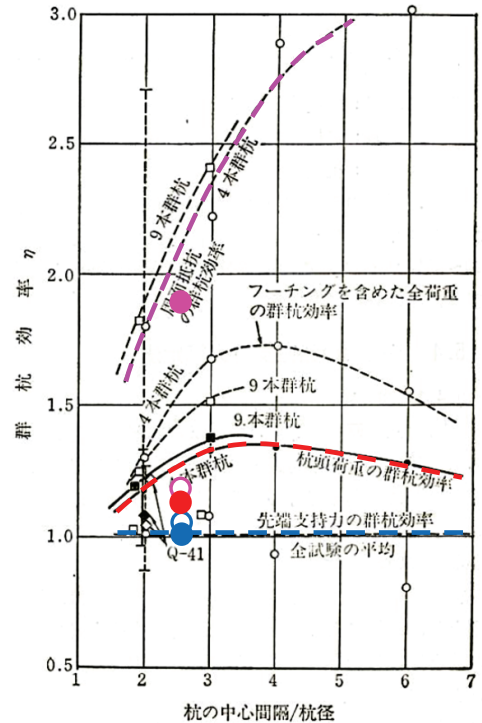


図-4 解析による群杭効率³⁾に加筆

これらの群杭効率を既往のチャート³⁾にプロットしたものを図-4に示す。周面抵抗に関する群杭効率が小さくなったのは、周面抵抗を考慮しない解析では先端支持抵抗が両者同様となるのに対し(図-4●印)、周面抵抗を考慮する解析では4本杭の先端支持抵抗は単杭より大きくなるため(図-4○印)、4本杭の周面抵抗が小さくなったことによる(図-3(b)②の方法)。解析では、単杭と4本杭の初期における応力状態は水平成層であり同様であるが、実際の地盤においては杭本数が多いほど杭側面における地盤の応力は水平成層とは異なることが考えられる。解析は理想的な状態であることから単杭と4本杭で周面抵抗に違いが現れにくかったことが考えられる。

4.まとめ FLIP3Dを用いて4本杭(2.5D)と単杭の解析により杭頭荷重と変位の関係を得、これをもとに群杭効率を計算した。周面抵抗の群杭効率は既往の知見より小さい傾向を示したが、杭頭荷重に関しては既往の知見と整合する結果となった。謝辞：本報告は、一般社団法人FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。

参考文献：1) 土質工学会(地盤工学会)：鋼グイ、—鋼グイ研究委員会報告—、土質基礎工学ライブラリー6、1978. 2) Vesic, A.S. : Experiments with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222, 1969. 3)杭基礎の設計法とその解説、1985. 4)Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 5) Iai, S. : Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993. 6)兵頭順一・小堤治・一井康二：三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーションその2(2層の飽和地盤) —,第49回地盤工学研究発表会, pp.1195-1196, 2014.

3-4 杭の先端支持力に着目した三次元解析（その 4） ー 二次元解析と三次元解析による群杭効率の検討 ー

群杭効率 先端支持力 解析

東電設計(株) ○溜 幸生

1.はじめに

群杭に見られる現象は一般に群杭効果と呼ばれているが、群杭効果は地盤条件、杭の大きさ、長さ、本数、相互距離等に影響することが知られている¹⁾²⁾。本検討は、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP³⁾の一連の検討において開発された杭先端の非線形ばねを考慮した 2 次元解析、および、FLIP3D⁴⁾を用いた 3 次元解析により、杭間隔が同様に奥行き方向に連続する杭を対象に、群杭効率について検討した。以下、検討方法および結果について示す。

2.検討方法

本検討における杭の配置は、遠心実験⁵⁾の地盤の幅(18m)および土層の構成で杭中心間隔が杭の直径 $D(=0.48\text{m})$ の 2.5 倍 ($=1.2\text{m}$ 、以下、 $2.5D$)で、1 列で奥行き方向に無限に連続している杭、および、杭間隔が $2.5D$ の格子状で無限に配置されている杭の 2 種類を考慮した。それぞれの 3 次元解析モデルを図-1 に示す。解析モデルには杭が 1 本しかモデル化されていないが、モデルの境界を対称面で設定することにより(a)図のモデルにおいては 1 列で無限に連続する杭を、(b)図のものにおいては格子状に無限に連続する杭を表現している。杭は板曲げ要素によりモデル化した。

次に、それぞれのモデルを 2 次元でモデル化したものを図-2 に示す。2 次元モデルでは、地盤を厚さ $2.5D(=1.2\text{m})$ の非線形平面要素で、杭を 1 本あたりの断面特性を有する線形はり要素としてモデル化した。杭の先端と対応する位置の地盤の節点間には、単杭の先端荷重と鉛直変位の関係を模擬しうる非線形ばね要素を取り付けた。(a)図は 1 列で奥行き方向に $2.5D$ の間隔で連続している杭を、(b)図は水平および奥行き方向に $2.5D$ の間隔で連続している杭をモデル化している。また、それぞれのモデルの杭先端において(c)図に示すように同じ高さで地盤要素の杭幅 ($=0.48\text{m}$) の節点間は鉛直方向変位が同様となるように多点拘束した。群杭効率を求める際には単杭の杭先端荷重と鉛直変位の関係が必要となるが、これを求めるための単杭の解析モデルを図-3 に示す。

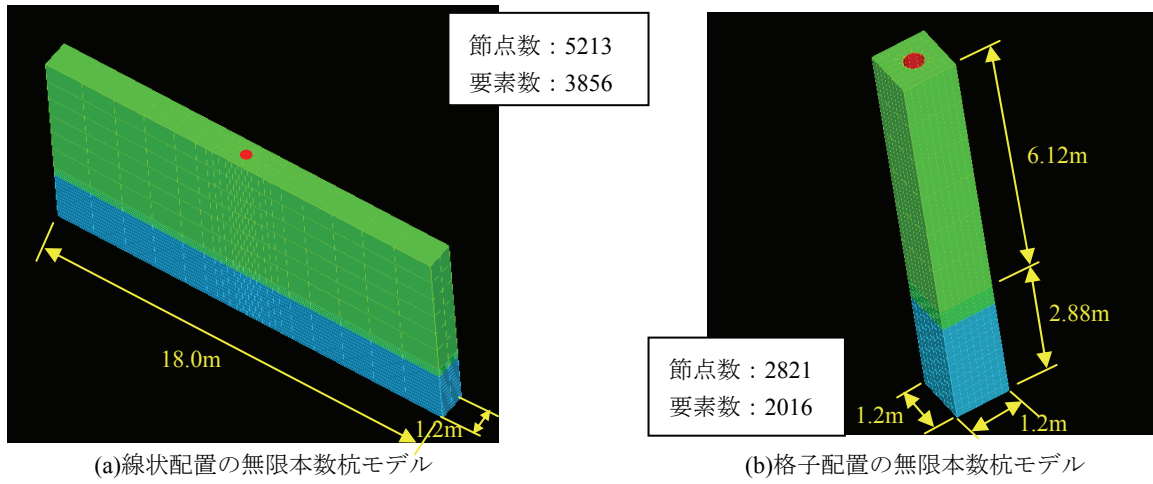
杭と地盤の物性は、この遠心実験を対象に別途実施された解析検討⁵⁾の物性と同等のものを用いた。3 次元解析は、FLIP3D ver.1.5.0.beta⁴⁾を用い、2 次元解析は今回開発した FLIP ver.7.1.9-6-2_5 を用いて実施した。初期自重解析により地盤内の応力を再現させた後で、完全排水条件で杭頭に強制変位 ($\Delta U_z=0.1\text{mm}$ (3 次元解析)、 $\Delta U_z=0.01\text{mm}$ (2 次元解析)) を 0.25m 程度まで与えることで行った。杭先端支持力に着目することから、いずれの解析においても杭表面と周囲の土の摩擦はゼロとした。

3.検討結果

解析結果として、各モデルの杭頭荷重(杭 1 本当たり)と鉛直変位の関係を図-4 に示す。また、杭径の $1/10$ の鉛直変位 (48mm)における荷重を抽出して求めた群杭効率をまとめて表-1 に示す。表には荷重値を併記している。杭が 1 列で無限に連続する場合の群杭効率は 3 次元解析において 0.84 、2 次元解析において 0.90 であり、両者は同程度である。格子状に無限に連続する場合は 3 次元解析において 1.54 であるのに対し、2 次元解析において 0.96 であり、2 次元解析では 3 次元解析の 6 割程度となった。2 次元解析で群杭効率が小さくなった理由として、奥行き方向に同様の形状であることや奥行き方向の直応力の増加による平均拘束圧の増加が地盤の剛性に考慮されないこと等が考えられた。

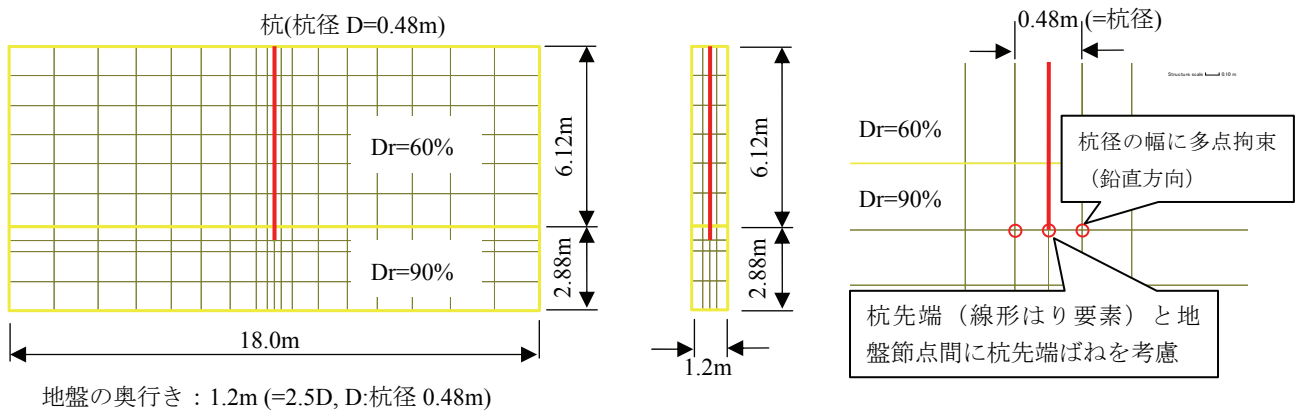
4.まとめ

杭の中心間隔が比較的小さい $2.5D$ (D :杭径) である杭配置を対象に群杭効率の検討を行った。2 次元解析による荷重と変位の関係はいずれの場合も単杭と同程度となった。3 次元解析と 2 次元解析の群杭効率を比較すると、杭が 1 列の場合は 2 次元解析と 3 次元解析は同程度になるが、杭が $2.5D$ で格子状に配置される場合は 2 次元解析による群杭効率は 3 次元解析より小さく算定されることが示唆された。杭間隔が小さい問題では、2 次元解析の杭先端のモデル化にあたっては、杭先端において杭幅の地盤節点に鉛直方向の多点拘束を課すことや、モデル化された杭の載荷解析を行って、杭先端あるいは杭頭における荷重と変位の関係を確認するなど、細心の注意を要するといえる。謝辞：本報告は、一般社団法人 FLIP コンソーシアムの研究活動の一環として実施したものである。参考文献：1) 土質工学会(地盤工学会)：鋼グイ、—鋼グイ研究委員会報告—、土質基礎工学ライブラリー6、1978。2)杭基礎の設計法とその解説、1985。3)Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *SOILS AND FOUNDATIONS*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。4) Iai, S. : Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993。5)兵頭順一・小堤治・一井康二：三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション —その 2 (2 層の飽和地盤) —、第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1195-1196, 2014。



(a)線状配置の無限本数杭モデル (b)格子配置の無限本数杭モデル

図-1 奥行き方向に杭が連続する杭の3次元モデル、杭中心間隔 2.5D、D：杭径)



(a)線状配置の無限本数杭モデル (b)格子配置の無限本数杭モデル (c)杭先端の詳細

図-2 2次元解析モデル（杭先端に非線形ばね要素を考慮）

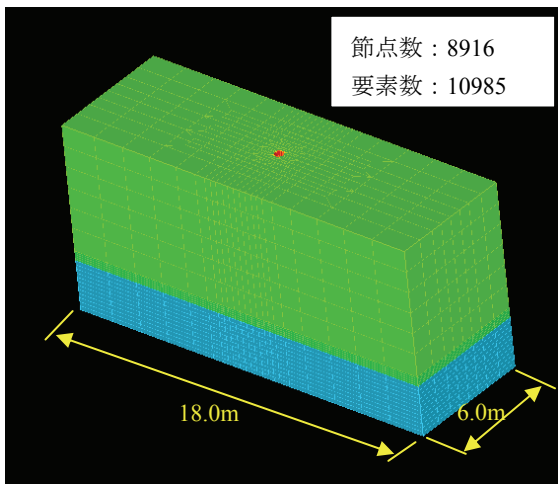


図-3 単杭のモデル

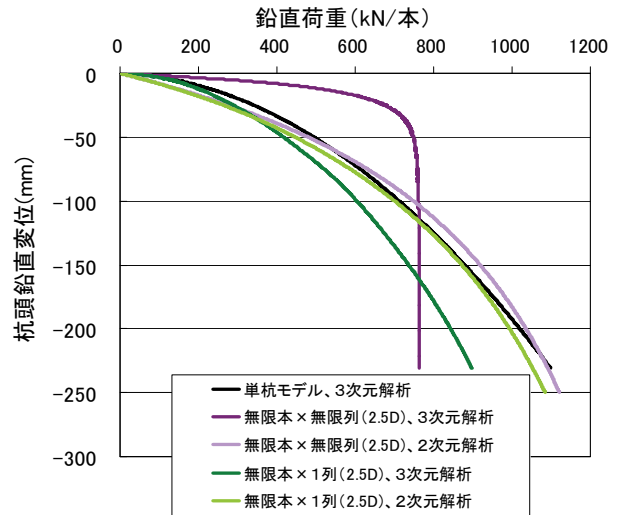


図-4 杭頭の荷重と変位の関係（完全排水条件）

表-1 解析による群杭効率のまとめ

	解析による群杭効率		実験による群杭効率 3次元モデル	備考
	3次元解析	2次元解析		
単杭	— (484kN/本)	—	—	本検討
2本×2列(2.5D)	1.04~1.09	—	1.0	
2本×2列(5D)	1.06	—	1.0	
無限本×1列 (2.5D)	0.84 (408kN/本)	0.90 (434kN/本)	—	本検討
無限本×無限列 (2.5D)	1.54 (747kN/本)	0.96 (466kN/本)	—	本検討

4. 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案

4-1 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案

杭, 先端支持力, 平面ひずみ状態

小堤 治 (明窓社)
 塩崎 禎郎 (JFE スチール)
 兵頭 順一 (東電設計)

1. 概要

2次元有限要素法を用いて地盤および支持杭等を含む構造を取り扱う場合の杭下端での先端支持力の表現方法に関する検討を行い、双曲線型の特性を有する非線形ばね要素を導入することが妥当であるとの結論に達した。また、この方針に従って、2次元動的有効応力解析プログラム FLIP¹⁾ にこのばね要素を導入し、テスト解析を行い、その有効性を確認した。

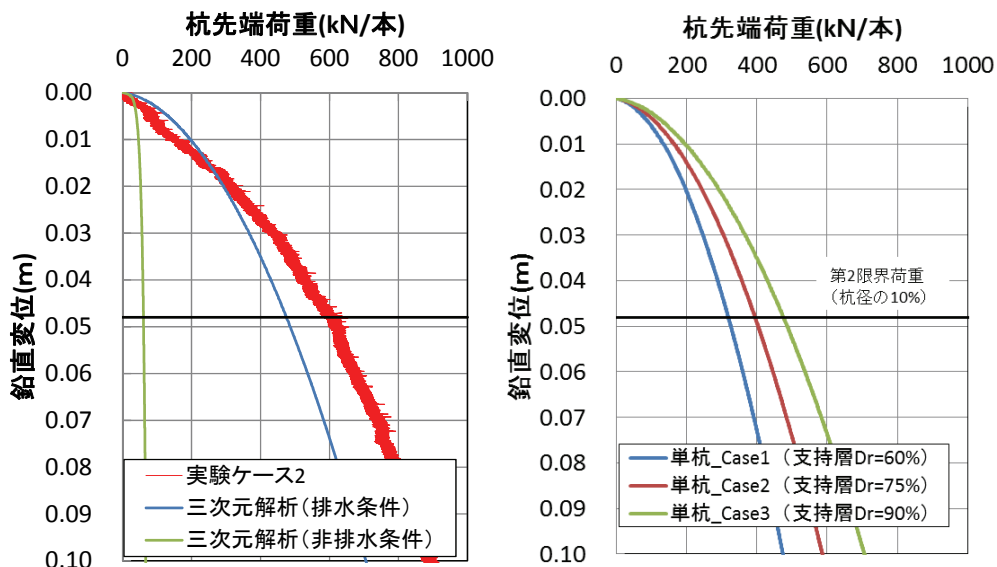
2. 従来の先端支持力の表現方法

2次元有限要素法による従来の解析事例では、杭下端節点と支持地盤の節点間を、圧縮剛性が非常に大きく、引張を負担しない杭軸方向のばねで結ぶか、あるいは、ばねの代わりに、杭下端節点と地盤節点の杭軸方向の変位を同じとする多点拘束(MPC)で結合して、杭下端先端支持力は有限要素法に基づく地盤要素が自然に発揮する支持力とすることが多かった。この方法では、先端支持力は、地盤要素のメッシュサイズ、非排水条件下の間隙水の考慮の有無、地盤奥行き方向幅等によって、大きく影響されることが判明した²⁾。

3. 遠心場における杭の押し込み実験と三次元実験解析

京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて、遠心場における杭の押し込み実験が実施された³⁾。実験は 40g 場で行われたが、1g 場換算では、実験は固定土槽(高さ 12m、幅 18m、奥行き 6m)に真鍮製の中空の杭(直径 0.48m : 閉端杭)を静的に押し込むものである。実験は 3 ケース行われたが、ここでは、厚さ 2.88m の基盤層(Dr=90%の豊浦砂)の上に、厚さ 6.12m の表層(Dr=60%の豊浦砂)を有する地盤(水中)に対して、杭が基盤層に 1D(0.48m)埋め込まれた「ケース 2」を検討対象として取り上げる。図-1 には、実験ケース 2 の杭先端荷重-鉛直変位関係を赤線で示す³⁾。

一方、FLIP プログラムの三次元版 FLIP3D⁴⁾(Ver1.4.0)によりこの実験ケースに対する実験解析が行われた⁵⁾。杭と周辺地盤の間の摩擦は 0 の条件で、すなわち杭先端支持力に着目した解析を行った。解析結果である杭先端荷重-鉛直変位関係を図-1 に青線と緑線で示す。青線は完全排水条件下で、緑線は非排水条件下で得られた結果である。実験は、杭を静的に押し込むものであり、この場合は、青線の完全排水条件が対応するものと思われる。図-1 の実験結果と完全排水条件下の解析結果は、概ね整合している。従って、三次元解析により、杭先端荷重-鉛直変位関係は、概ね再現可能であるとの認識を持つに至った。



※実験結果には周面摩擦の影響を含まない。

図-1 遠心場における杭の押し込み
 実験結果と三次元実験解析結果⁵⁾

図-2 支持層の相対密度を変化させた
 三次元実験解析結果

Submission of the non-linear spring which models bearing behavior at the lower end of piles OZUTSUMI, Osamu Meisoshia Corporation, SHIOZAKI, Yoshio JFE Steel Corporation, HYODO, Junichi Tokyo Electric Power Services

三次元解析では、さらに、支持層の豊浦砂の相対密度を $Dr=75\%$ および $Dr=60\%$ とした場合の解析を行った。解析結果を図-2 に示す。以後、図-2 に示す解析結果を二次元解析で再現する方法を検討する。なお、実験も解析も単杭を対象としたものである。別の三次元解析による検討で、群杭の場合は、単杭より多少、同じ押し込み量に対して、杭先端荷重が大きくなるものの、それほど顕著な差が無いことが分かっている。従って、ここでは、群杭に対する解析結果は参照しないものとする。

4. 杭先端抵抗～杭先端変位関係の双曲線近似

Hirayama⁶⁾によれば、杭先端抵抗 q ～杭先端変位 z_e の関係は、次式あるいは図-3 で示される双曲線型の式で表すことが出来る。

$$q = \frac{z_e}{a_e + b_e z_e} \quad (\text{kPa}) \quad \text{ここに、} a_e, b_e \text{ は次式で与えられる。}$$

$$a_e = \frac{z_{\text{ref},e}}{q_{\text{ult}}} = \frac{0.25D_e}{q_{\text{ult}}} \quad (\text{m/kPa}), \quad b_e = \frac{1}{q_{\text{ult}}} \quad (1/\text{kPa})$$

基準変位 $z_{\text{ref},e} = 0.25D_e$ (m) は砂質土に対するもので、Hirayama による。 D_e は杭の直径である。また、 q_{ult} は杭先端抵抗の極限值である。さらに、双曲線の形を決めるには、例えば、 $z_e = 0.1D_e$ (m) の時の杭先端抵抗 $q_{0.1}$ (kPa) が必要である。実際に、支持層の相対密度別に、三次元解析結果に基づいて、双曲線の形を決めるのに必要なパラメータを算定すると、表-1 に示すようになる。

表-1 の a_e と b_e を用いて、杭先端抵抗(kPa)～杭先端変位(m)関係図を描いた。また、杭先端抵抗に杭の断面積を乗じて得た、杭先端支持力(kN/本)～杭先端変位(m)の図も描いた。これらを図-4 と図-5 に示す。

$z_e=0.05D_e$ (m)の時の杭先端抵抗 $q_{0.05}$ (kPa)の値に基づいた杭先端抵抗－杭先端変位関係を図-6 に示す。この図によれば、双曲線近似の精度は、 $z_e=0.1D_e$ (m)の時の杭先端抵抗 $q_{0.1}$ (kPa)を用いた方がよさそうである。

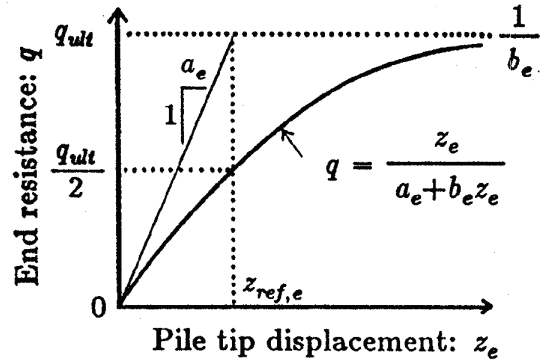


図-3 双曲線型応力～変位関係⁶⁾

表-1 三次元解析結果(図-2)に基づく双曲線のパラメータ

杭の直径	De= 0.48 (m)			
杭の断面積	A= 0.181 (m ² /本)			閉端杭
ケース名	Case1	Case2	Case3	
支持層相対密度	Dr=60%	Dr=75%	Dr=90%	単位
$q_{0.1}$ =	1763	2183	2628	(kPa)
a_e =	1.947E-05	1.572E-05	1.306E-05	(m/kPa)
b_e =	1.622E-04	1.310E-04	1.088E-04	(1/kPa)
q_{ult} =	6164	7631	9188	(kPa)
$A * q_{\text{ult}}$ =	1115	1381	1663	(kN/本)

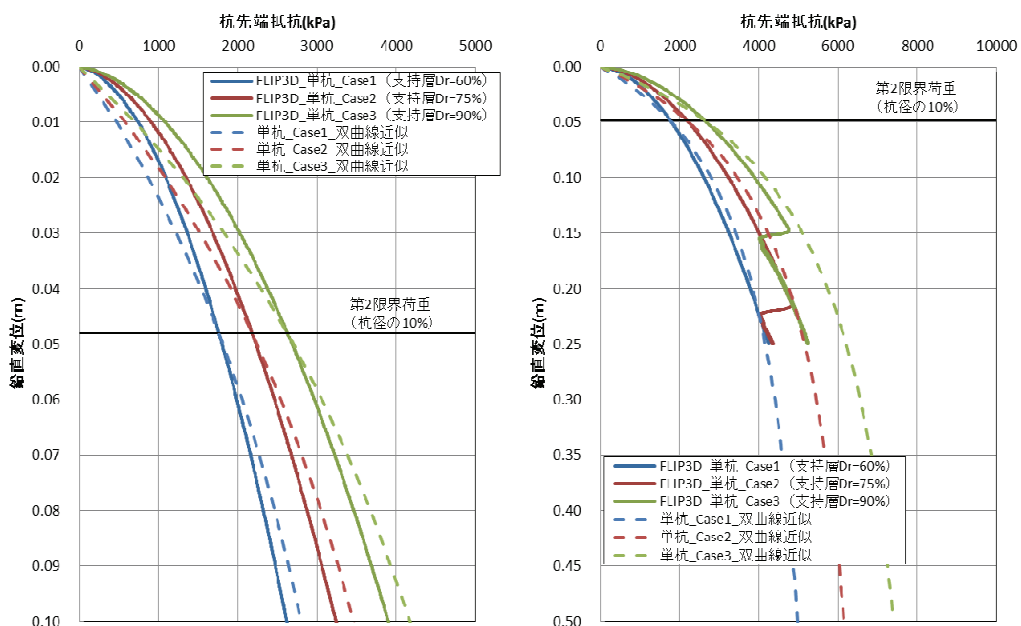


図-4 三次元解析結果とその双曲線近似: 杭先端抵抗－杭先端変位関係

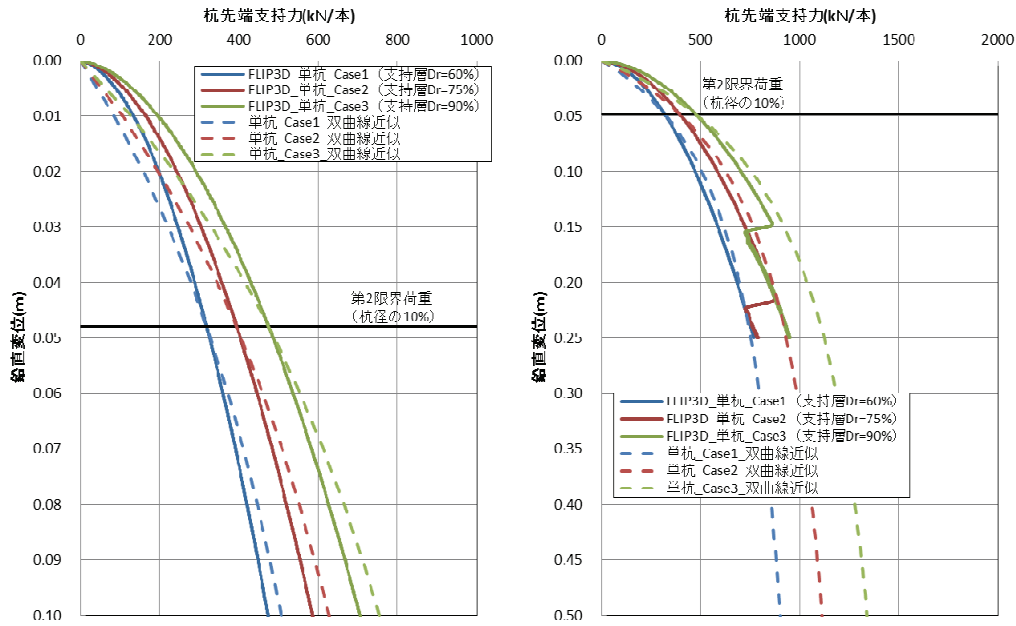


図-5 三次元解析結果とその双曲線近似: 杭先端支持力－杭先端変位関係

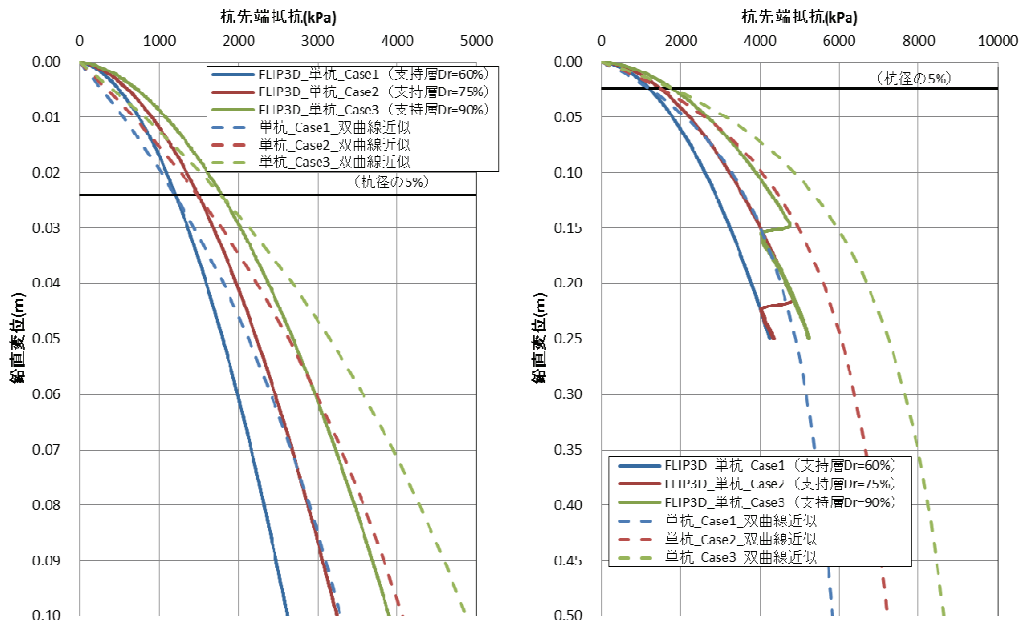


図-6 三次元解析結果とその双曲線近似: 杭先端抵抗－杭先端変位関係 ($q_{0.05}$ (kPa)参照)

以上の結果から、Hirayama による双曲線を骨格曲線とする杭下端ばねを開発するのが適当であると考えられる。除荷勾配は初期勾配と同じと仮定し、また、引き抜き力には抵抗しないものとする。このばねのパラメータは、杭径 D_e (m)、 $q_{0.1}$ (kPa)($0.1D_e$ 押し込み時の杭先端抵抗)、 $Z_{ref,c}=(0.25D_e)$ および、ばね力等に乗ずる係数 PFACT である。なお、Hirayama の定式化は、杭先端抵抗(kPa)を用いているが、これを、閉端杭を前提に杭先端支持力(kN/本)に置き換えても、同様の定式化が可能で、プログラムは、それに基づいて機能追加する。入力は $q_{0.1}$ (kPa)に代わり、 $Q_{0.1}$ (kN/本)($0.1D_e$ 押し込み時の杭先端抵抗力)とする。ばね力としては、基本的には、杭 1 本分の力が生じるものとし、種々の調整(解析奥行き方向幅、群杭効果等)は PFACT により行う。

5. 双曲線型の杭下端ばねの導入

杭下端ばねは、既存の FLIP の「非線形ばね要素」の中に、新機能として追加する。Hirayama による杭先端抵抗(kPa 等)と杭先端変位の双曲線型の関係を、杭先端と地盤間に配置する杭軸方向ばねの抵抗力(kN/本等)～変位差関係に置き換える。地盤が軟らかいと、ばねの地盤側節点も動くので、厳密には、Hirayama が提案する抵抗力が発揮されない場合もあるので、注意が必要である。このばねは圧縮側の関係を取り扱うので、変位差や基準変位(差)および抵抗力は全て負

値で指定する。変位差が引っ張りになった場合には、ばねの抵抗力は 0 になる。除荷の際は初期勾配で戻るが、抵抗力が正(引っ張り)になることはない。

入力パラメータは、前述の通り、杭径 $D_e(m)$ 、 $Q_{0.1}(kN/本等)(0.1D_e$ 圧縮時のばねの抵抗力)、 $Z_{ref,c}(=0.25D_e)$ および、ばね力等に乗ずる係数 PFACT である。なお、実際の入力パラメータは、杭径 $D_e(m)$ 、 $Q_{0.1}$ 等(負値)の値、対応するばねの変位差(-0.1 等、 D_e に乗ずる係数を指定)、基準変位を求めるための D_e に乗ずる係数(-0.25 等、 D_e に乗ずる係数を指定)および PFACT である。負符号は、ばねが圧縮されている状態を表すためである。

杭下端ばねの地盤側節点変位を拘束した場合の、同ばねの挙動の例を図-7 に示す。

次に、遠心場における杭の押し込み実験³⁾のケース 2 (水中)に対応した実験解析を、杭下端ばね要素を用いて実施した。解析モデルを図-8 に示す。地盤の堅さはメッシュサイズの影響も受けるので、ここでは、通常解析で使用する可能性のある 1m 程度のメッシュサイズとした。解析モデルの奥行き方向幅は実験に使用した土層の奥行き方向幅 6m を主に採用した。また、

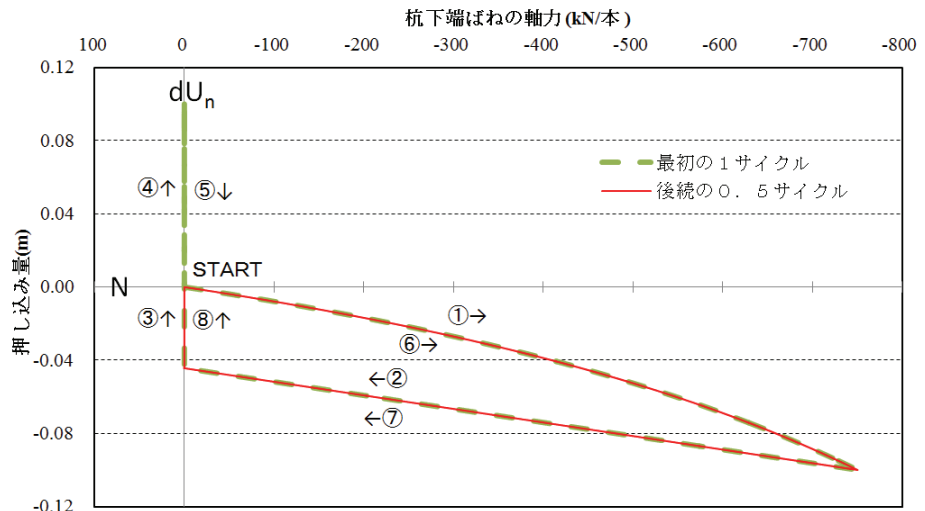


図-7 双曲線型杭下端ばねの挙動の例

間隙水は完全排水条件としたが、一部では非排水条件の結果も示す。杭頭に強制変位を与えて徐々に押し込み、その時の杭頭での反力を求めて、両者の関係を描いた。これらの図を、図-9-図-12 に示す。これら各図の「双曲線近似」の線は、対応する三次元解析結果に基づいて求めたパラメータ a_e と b_e を用いて描いたもので、いわば、ターゲットである。図-9 は、杭先端ばねの地盤側節点の自由度を単点拘束した場合と地盤節点に接続した場合を比較したものである。両者は一致し、ターゲットにも一致している。まず、前者の結果がターゲットに一致したのは、杭下端ばねが正しく実装されていることを示す。また、後者がターゲット等に一致したのは、地盤の奥行き方向幅が 6m と大きく、かつメッシュサイズも 1m と比較的大きめで、地盤要素が十分に固いためであると思われる。図-10 は、基盤層の相対密度を $Dr90\%$ と $Dr60\%$ とした場合の比較で、この場合も、それぞれのターゲットに一致している。図-11 は、地盤の奥行き方向幅を変化させて見たもので、奥行き方向幅が 6m の場合は、地盤は十分に固く、ターゲットに一致しているが、1m の場合は、地盤要素が柔らかくなり、所定の支持力が発揮されない。さらに、図-12 は、これと同じことを非排水条件下で試した結果である。非排水条件の場合は、杭が地盤を押すことにより地盤の有効拘束圧が増加するのではなく、主に、応力の増分は間隙水が負担するので、完全排水条件の場合に比べて、地盤の剛性等は上がらない。従って、杭下端ばねの地盤側節点は、沈みやすく、そのために、地盤幅の低下に伴い、所定の杭下端の支持力を発揮することが出来なくなっている。いわば、杭下端ばねと地盤要素は直列ばねを形成し、杭下端の支持力は、地盤要素の剛性等の影響も受けることになるので、このばねの使用に当たっては、地盤要素の方の条件も考慮に入れる必要がある。

6. まとめ

遠心場における杭の押し込み実験結果を、FLIP3D を用いた三次元の実験解析により概ね表現可能であることを確認した。次に、Hirayama の提案する杭先端抵抗-杭先端変位の双曲線型のモデルで、三次元解析結果をよく近似できることを見いだした。この双曲線型モデルの特性を有する、杭先端と地盤の間に入れる杭先端ばねを、2次元有効応力解析プログラム FLIP に導入した。このばねを用いた試解析を行ったところ、地盤が十分に固い場合は、三次元解析結果をよく再現した。

謝辞：本検討はFLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献：1) Iai et al.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 2) 小堤他: 杭の先端支持力に関する解析的検討, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013. 3) 曾根他: 杭の遠心力模型実験, 49 回地盤工学研究発表会, 2014. 4) Iai S., Ozutsumi O.: Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 29, pp.417-442. 5) 兵頭他: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション-ケース 2 (2 層の飽和地盤) - 49 回地盤工学研究発表会, 2014. 6) Hirayama, H.: LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FUNCTIONS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, 55-64. 1990.

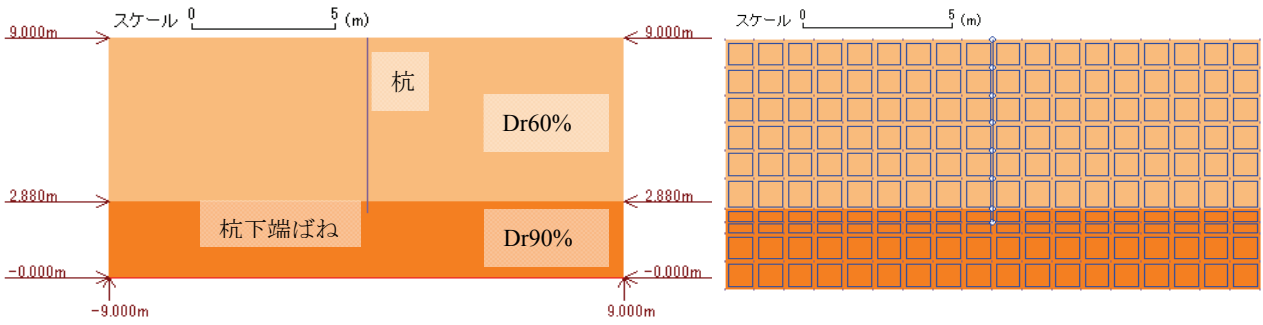


図-8 杭下端ばね挙動確認用解析モデル 遠心場における杭の押し込み実験³⁾のケース2(水中)に対応
 ※杭下端に杭下端ばねを置いて杭と地盤を結合した。杭頭を強制変位で押し込み、その反力を調べた。
 摩擦は考慮していない。地盤の奥行き方向幅は標準で6mとした。

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

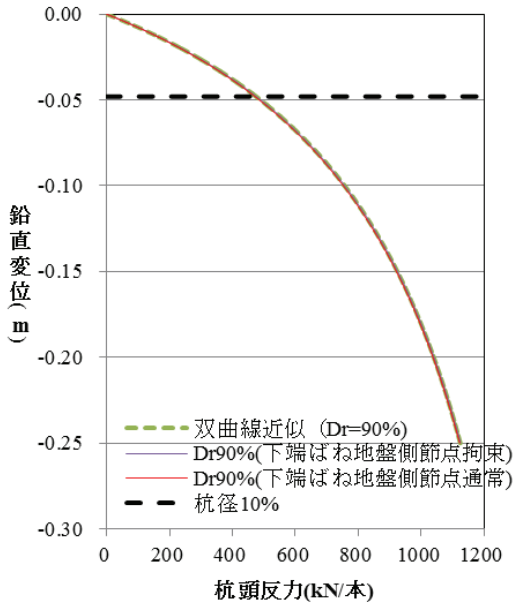


図-9 杭下端ばねの地盤側節点を拘束した場合と地盤側節点につなげた場合の比較

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

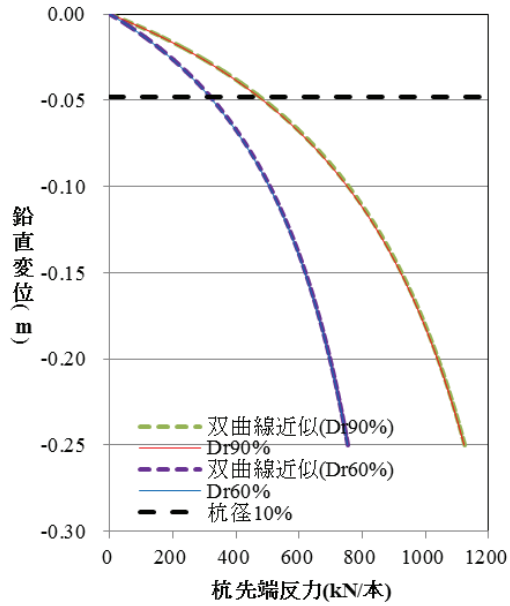


図-10 基盤層の Dr が 90%と 60%の場合の比較

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

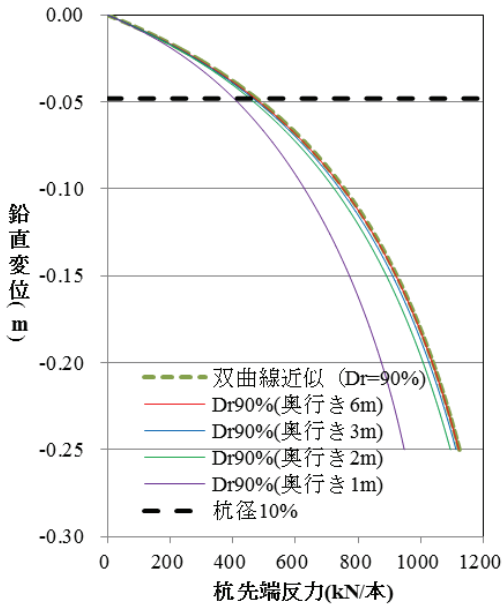


図-11 解析モデルの奥行き方向幅を変えた場合の比較 (完全排水条件の場合)

杭頭沈下量～杭頭反力(非排水)

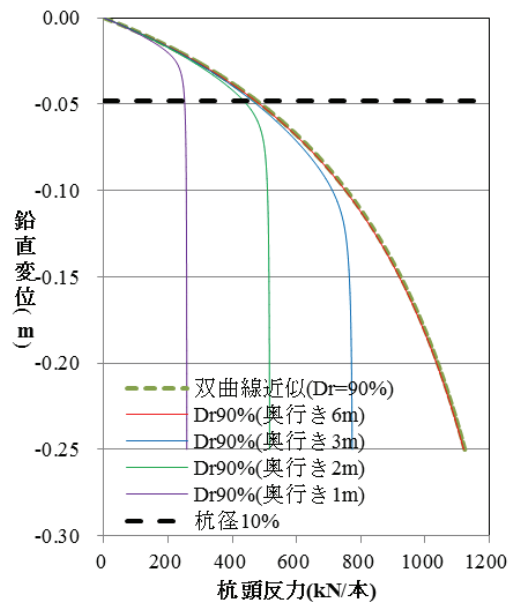


図-12 解析モデルの奥行き方向幅を変えた場合の比較 (非排水条件の場合)

付録：杭下端ばね追加後の非線形はり要素の入力形式

I E L = 1 7 非線形ばね要素 (FLIP Ver. 7.1.9-6-2_5 で機能追加)

10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
F10.0	I5	I5	I5	I5	I5	I5	I5			I5	F10.0	F10.0
DIR	IHN	NPN	IHS	NPS	IHM	NPM	IUST	KILL	NEXT	IRYL	ALPHAE	BETAE

(1 枚目)

5	10	20
I5	5X	F10.0
INITLZ		PFACT

(2 枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
RKN(1)	RKN(2)	RKN(3)	RKN(4)	RKN(5)	RKN(6)	RKN(7)

(IHN>0の時の1枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
FPN(1)	FPN(2)	FPN(3)	FPN(4)	FPN(5)	FPN(6)	FPN(7)

(IHN>0の時の2枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
RKS(1)	RKS(2)	RKS(3)	RKS(4)	RKS(5)	RKS(6)	RKS(7)

(IHS>0の時の1枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
FPS(1)	FPS(2)	FPS(3)	FPS(4)	FPS(5)	FPS(6)	FPS(7)

(IHS>0の時の2枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
RKM(1)	RKM(2)	RKM(3)	RKM(4)	RKM(5)	RKM(6)	RKM(7)

(IHM>0の時の1枚目)

10	20	30	40	50	60	70
F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
FPM(1)	FPM(2)	FPM(3)	FPM(4)	FPM(5)	FPM(6)	FPM(7)

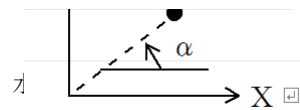
(IHM>0の時の2枚目)

軸方向
IHN=0
の時、
不要

せん断
IHS=0
の時、
不要

回転
IHM=0
の時、
不要

カラム(1 枚目)
1 ~ 10 DIR



るばね軸の角度 α (度) $-180 < \alpha \leq 180$

11 ~ 15 IHN

軸方向ばねの種類
= 0 ばねの存在無し
= 1 ユーザ定義
= 2 パイリニア
= 3 トリリニア
= 4 杭先端ばね用双曲線モデル^{注4)}(Ver.7.1.9-6-2_5 以降)

16 ~ 20 NPN

軸方向ばね剛性変化点の数(≤ 7). IHN=1(ユーザ定義)の時のみ有効.

21 ~ 25 IHS

せん断ばねの種類(= 0 ~ 3, IHNと同様, IHS=4は不可)

26 ~ 30 NPS

せん断ばね剛性変化点の数(≤ 7). IHS=1(ユーザ定義)の時のみ有効.

31 ~ 35 IHM

回転ばねの種類(= 0 ~ 3, IHNと同様, IHM=4は不可)

36 ~ 40 NPM

回転ばね剛性変化点の数(≤ 7). IHM=1(ユーザ定義)の時のみ有効.

41 ~ 45 IUST

要素力算定の際に参照する基準変位の選択^{注1)}

IUST=0 のとき, IUST=1 に自動設定される(デフォルト).

IUST=i のとき, 基準変位は UST(i) を参照する.

4 6 ~ 5 0	K I L L	要素処理選択 ^{注2)} = 0 要素処理を行う(デフォルト). = 1 要素処理を行わない.
5 1 ~ 5 5	N E X T	第2枚目のカードの存在スイッチ(Ver.7.1.3以降) = 0 : 第2枚目のカードは無い. = 1 : 第2枚目のカードがある.
5 6 ~ 6 0	I R Y L	レーレー減衰パラメータ α , β の選択 = 0 : MTRX 命令指定のレーレー減衰を用いる(デフォルト). = 1 : 本入力カードの ALPHA ϵ , BETA ϵ で指定する.
6 1 ~ 7 0	A L P H A ϵ	要素別レーレー減衰パラメータ α (IRYL=1の時, 有効).
7 1 ~ 8 0	B E T A ϵ	要素別レーレー減衰パラメータ β (IRYL=1の時, 有効).

カラム(2枚目)

1 ~ 5	I N I T L Z	初期化スイッチ(Ver.7.1.3以降). INITSW(INIT 命令)の値に拘わらず, 状態変数を初期化する(INITSW=1を除く). 鋼材の強制変位解析機能用.
1 1 ~ 2 0	P F A C T	算定されたばね力に乗ずる係数 ^{注3)} PFACT=0.0 のとき, PFACT=1.0 に自動設定される.

以下の2枚は IHN \neq 0の時必要.

カラム(IHN>1の時の1枚目)

1 ~ 7 0	R K N(i)	IHN = 1の時, 軸方向変位差 du_1, \dots, du_{NPN} IHN = 2の時, RKN(1): 初期接線剛性 K_0 RKN(2): 接線剛性 K_1 IHN = 3の時, RKN(1): 初期接線剛性 K_0 RKN(2): 接線剛性 K_1 RKN(3): 接線剛性 K_2 IHN = 4の時, RKN(1): 軸力指定変位差(負値) ^{注4)} De の係数. RKN(2): 基準変位(差)(負値) ^{注4)} De の係数. RKN(3): 杭径De(正値) ^{注4)} デフォルト値: RKN(1) = -0. 1 0 RKN(2) = -0. 2 5 RKN(3) = 1. 0
---------	----------	--

カラム(IHN>1の時の2枚目)

1 ~ 7 0	F P N(i)	IHN = 1の時, 剛性変化点の軸方向力 P_1, \dots, P_{NPN} IHN = 2の時, FPN(1): 剛性変化点の軸方向力 P_1 IHN = 3の時, FPN(1): 剛性変化点の軸方向力 P_1 FPN(2): 剛性変化点の軸方向力 P_2 IHN = 4の時, FPN(1): 軸力指定変位差での軸方向力(負値) ^{注4)}
---------	----------	--

以下の2枚は IHS \neq 0の時必要.

カラム(IHS>1の時の1枚目)

1 ~ 7 0	R K S(i)	IHS = 1の時, せん断変位差 du_1, \dots, du_{NPS} IHS = 2の時, RKS(1): 初期接線剛性 K_0 RKS(2): 接線剛性 K_1 IHS = 3の時, RKS(1): 初期接線剛性 K_0 RKS(2): 接線剛性 K_1 RKS(3): 接線剛性 K_2
---------	----------	---

カラム(IHS>1の時の2枚目)

1 ~ 7 0	F P S(i)	IHS = 1の時, 剛性変化点のせん断力 P_1, \dots, P_{NPS} IHS = 2の時, FPS(1): 剛性変化点のせん断力 P_1 IHS = 3の時, FPS(1): 剛性変化点のせん断力 P_1 FPS(2): 剛性変化点のせん断力 P_2
---------	----------	---

以下の2枚は IHM \neq 0の時必要.

カラム(IHM>1の時の1枚目)

1 ~ 7 0	R K M(i)	IHM = 1の時, 回転変位差 du_1, \dots, du_{NPM} IHM = 2の時, RKM(1): 初期接線剛性 K_0 RKM(2): 接線剛性 K_1 IHM = 3の時, RKM(1): 初期接線剛性 K_0 RKM(2): 接線剛性 K_1 RKM(3): 接線剛性 K_2
---------	----------	--

カラム(IHS>1の時の2枚目)

1 ~ 7 0	F P M(i)	IHM = 1の時, 剛性変化点の回転モーメント P_1, \dots, P_{NPM} IHM = 2の時, FPM(1): 剛性変化点の回転モーメント P_1
---------	----------	--

I HM=3 の時, FPM(1) : 剛性変化点の回転モーメント P_1
 FPM(2) : 剛性変化点の回転モーメント P_2

注1) IUST は要素力算定等の際に参照する基準変位 UST(i)の番号 i を示す.

通常, 自重解析の第 i 段階目で初めて当材料を考慮する場合, IUST=i とする.
 なお, この IUST 値は一連の解析(自重解析および動解析の各段階)で統一する.ただし, 当材料が無効(KILL=1)の場合, IUST は参照されないこの制限は受けない.

特別な例として, 自重解析が第 n 段階で終了した後動解析を行う場合, 当材料を動解析のみに適用する場合(自重解析で KILL=1, 動解析で KILL=0)は, IUST=n+1 とする.

※IUST の値は $1 \leq IUST \leq NHP$ (FEAP 命令参照)の範囲でなくてはならない.

※IUST=i により参照される基準変位 UST(i) は INITSW(INIT 命令参照)により定義される.

注2)要素の存在を無視する場合は KILL=1 とする. この場合, 要素処理は行われない.

ここでいう要素処理とは, 要素接線剛性の作成, 要素力の算定, 出力のための変位差及びばね力の算定などの処理を示す.

注3)運動方程式の組み立てに際しては, 非線形ばね要素の接線剛性行列・要素力ベクトルなどは, PFACT 倍されたものが用いられる. また, 非線形ばね要素が出力するばね力は, 本来の値を PFACT 倍したものである.

注4)Hideki Hirayama(1990)による杭先端抵抗(kPa 等)と杭先端変位の双曲線型の関係を, 杭先端と地盤間に配置する杭軸方向ばねの抵抗(kN/本等)～変位差関係に置き換えたものが使用できる. 地盤が軟らかいと, ばねの地盤側節点も動くので, 厳密には, Hirayama が提案する抵抗力が発揮されない場合もあるので, 注意が必要である. このばねは圧縮側の関係を取り扱うので, 変位差や基準変位(差)および抵抗力は全て負値で指定する. 変位差が引っ張りになった場合には, ばねの抵抗力は 0 になる. 除荷の際は初期勾配で戻すが, 抵抗力が正(引っ張り)になることはない. 双曲線モデルの基準変位(差)は, Hirayama によれば, $0.25De$ であるので, RKN(2)のデフォルト値は, その係数である-0.25(圧縮なので)とした. また, 双曲線型の関係を決定するために, 軸力指定変位差(負値)と当該変位差における軸方向力(負値: kN/本等)を与える必要がある. 軸力指定変位差は De に乗ずる係数として与える. デフォルト値は-0.1 とした.

★5.FLIP 7.1.3 版以降では, 初期化スイッチ(INITLZ)の指定が可能になったが, FLIPGENでは, これに対応していない.

★6.FLIP 7.1.9-6-2_5 版以降では, 杭先端ばねの使用が可能になったが, FLIPGENでは, これに対応していない.

非線形ばねの構成則

$$N = K_n \cdot du_n$$

$$S = K_s \cdot du_s$$

$$M = K_\theta \cdot d\theta$$

ここに,

N : 軸力

S : せん断力

M : 回転モーメント

K_n : 軸方向ばね定数

K_s : せん断ばね定数

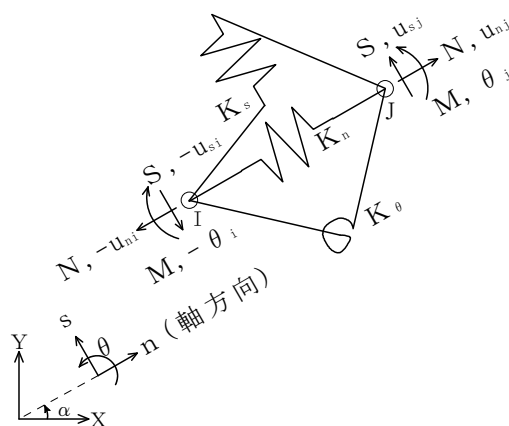
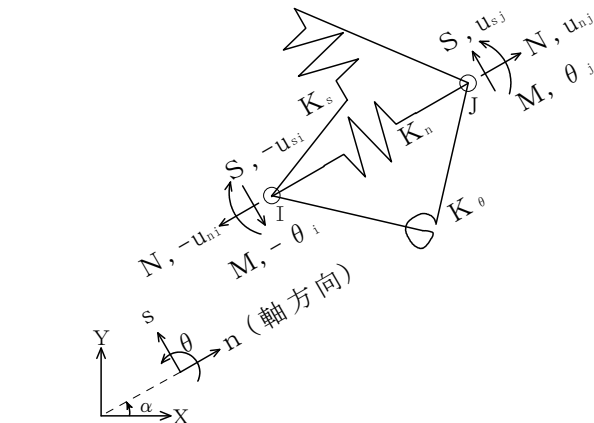
K_θ : 回転剛性

du_n : 軸方向変位差($u_{nj} - u_{ni}$)

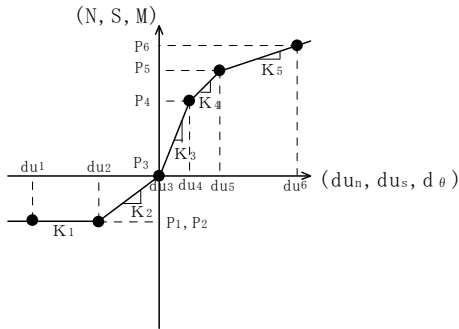
du_s : せん断変位差($u_{sj} - u_{si}$)

$d\theta$: 回転角差($\theta_j - \theta_i$)

ただし, K_n, K_s, K_θ は非線形性を示す.



① ユーザ定義



入力データ

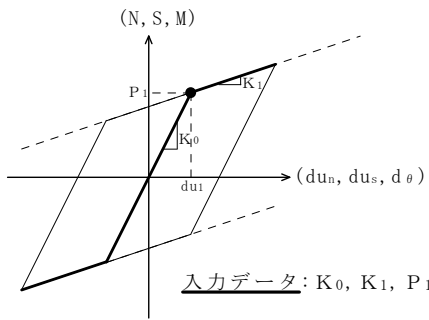
P_i : 第i点の力 (i=1~n)

du_i : 第i点の変位差 (i=1~n)

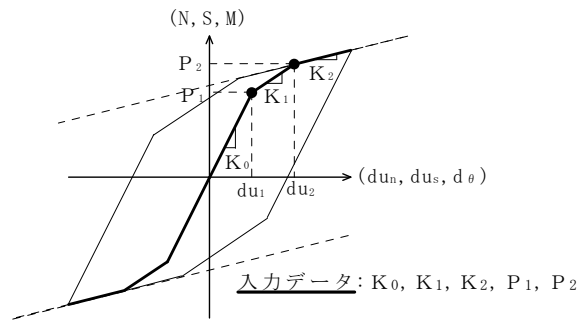
接線剛性 K_i の計算

$$K_i = (P_{i+1} - P_i) / (du_{i+1} - du_i)$$

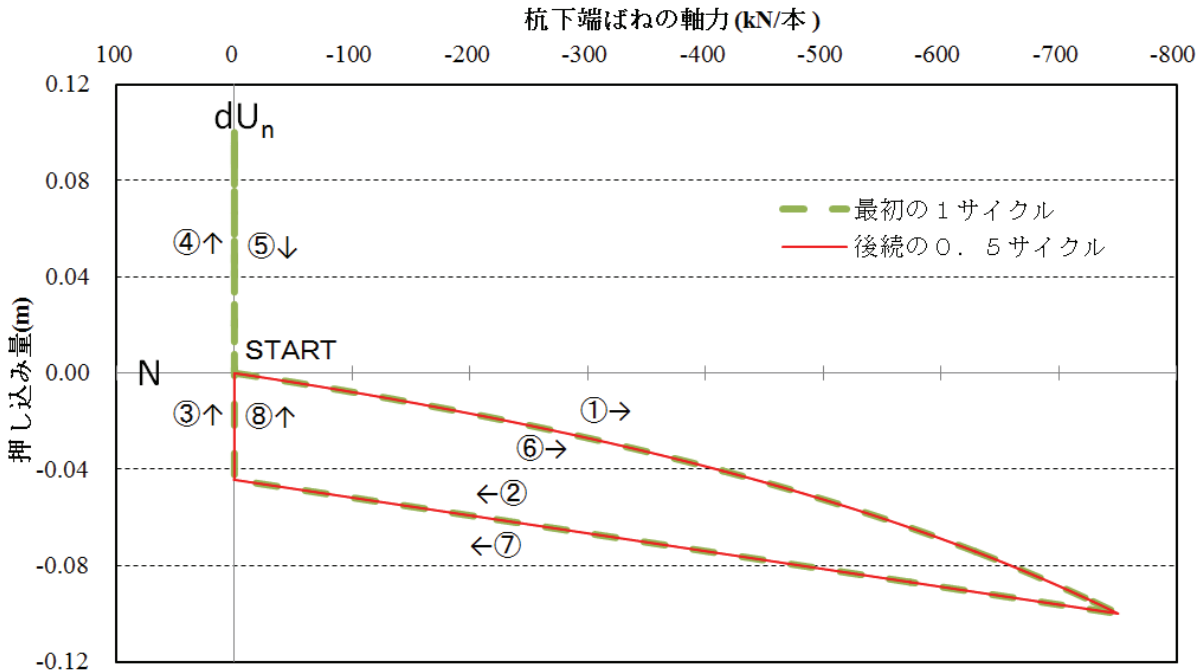
② バイリニアモデル



③ トリリニアモデル



④ 杭先端ばね用双曲線モデル (Hirayamaモデル)



4-2 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素を用いた事例解析（その1）

有効応力解析 杭 液状化

 東電設計株式会社 ○兵頭順一
 JFE スチール株式会社 塩崎禎郎
 株式会社明窓社 小堤 治

1 はじめに

港湾構造物の設計では、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP¹⁾を用いた有効応力解析が実務的に行われるようになってきた²⁾。一般社団法人 FLIP コンソーシアムでは、杭の軸方向の挙動を適切に表現するモデルを提案するために、杭軸方向挙動 WG を設置し、各種検討を行っている。平成 23～24 年度の検討で杭の周面摩擦力に関しては、杭の周面摩擦力を表現できる機能を FLIP (Ver7.1.9-6-2_4) の杭-地盤相互作用ばね要素³⁾に実装した。

本検討では、水平方向における杭と地盤の相互作用を杭-地盤相互作用ばね要素でモデル化し、杭先端の杭と地盤は XY 方向 MPC とする方法（以下、「方法 A」という。）と、水平・鉛直方向の杭と地盤の相互作用を杭-地盤相互作用ばね要素に、先端支持力を非線形ばね要素でモデル化する方法（以下、「方法 B」という。）を用いて、杭先端支持力に着目した感度解析を行った。なお、解析には FLIP Ver7.1.9_4 および FLIP Ver7.1.9_5test を用いた。

2 対象事例

本検討では、1993 年釧路沖地震において被災した漁港埠頭南側岸壁（設計震度 0.2）の事例⁴⁾⁵⁾を用いている。漁港埠頭は、前面は Z 型鋼矢板、控え杭は鋼管杭による組杭式の岸壁である（図-1）。鋼矢板は、背後地盤の液状化に起因して水深-3～-4m 地点で折損している（図-2）。なお、矢板の折損した位置は、電気防食の陽極の設置に対応している⁶⁾。

3 解析条件

各土層は FLIP のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方、底面を粘性境界とした。また、解析用地盤物性値は等価 N 値に基づき、簡易設定法（改訂版）²⁾から設定した。前面矢板および控え杭は非線形ばね要素で、タイロッドは、圧縮には抵抗しない非線形ばね要素でモデル化した。解析ケースを表-1 に示す。控え杭と地盤の相互作用のモデル化は、方法 A（Case-A）と方法 B（Case-B～E）（図-3）の 2 通りの方法を用いた。なお、方法 B に用いる杭の周面摩擦力の摩擦角 ϕ_j は 15 度、摩擦角 ϕ_j の調整係数 J_β を 1.0 と 2.0 の 2 通りとした。杭先端は FLIP Ver7.1.9_5test で実装した非線形ばね要素を設け、ばねの上限値は N 値から算定した。解析モデルの奥行き方向幅は控え杭の設置間隔である 1.6m とした。なお、解析に用いる Rayleigh 減衰定数 β は、地震応答解析結果（非液状化状態）より水平応答変位量が収束するときの値とし、 $\beta = 0.0005$ とした。FLIP の構成則は tmp7 法、非線形反復法は改良型を用いている。入力地震動は釧路沖地震時の波形のうち、主要動部分の 17.5～46 秒の 28.5 秒間を用いた（図-4）。

4 解析結果

加振終了時の変形図を図-5 に、変形量の比較を図-6 に示す。前面矢板の変位は方法による顕著な違いは見られなかった。また、控え杭の杭頭変位は「方法 A（Case-A）<方法 B（Case-B～E）」となった。特に、方法 B の前面矢板の変位は、周面摩擦角が大きいほど（Case-C と Case-D）、小さくなる傾向であった。方法 B の控え杭の変形は方法 A より小さくなる。この要因は、控え杭先端における杭と地盤の接続条件（方法 A は XY 方向 MPC、方法 B は非線形ばね要素を設けている）の違いによるものと推定される。

最大断面力図を図-7 に示す。前面矢板の断面力は、方法 A と方法 B ではほぼ同程度である。方法 B による控え杭（引抜き杭）の軸力分布は周面摩擦の影響により、杭頭から杭先端へ向けて小さくなる。控え杭の軸力は押し込み杭、引抜き杭ともに「方法 A > 方法 B」となり、方法 B による全塑性モーメントは方法 A より大きくなる。

杭先端の非線形ばね要素の変位と力の関係を図-8 に示す。Case-C の軸方向力は他のケースより小さく、非線形ばね要素の地盤側節点が動いていることが想定される。そこで、非線形ばね要素の地盤側節点のうち、杭径の 3 倍の範囲を Y 方向 MPC 拘束した場合（Case-E）と杭径の 6 倍の範囲を Y 方向 MPC 拘束（Case-F）とした場合の算定を行った。Case-E と Case-F の軸方向力は Case-C より大きくなり、杭による作用力がばねに十分伝達されていると考えられる。

5 まとめ

杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の適用性に関して、1993 年釧路沖地震で被災した漁港埠頭南側岸壁を対象とした検討を実施した。前面矢板の挙動は方法 A と方法 B で顕著な違いは見られなかった。方法 B に関して、杭先端の非線形ばね要素が適切に挙動することを確認した。今後は、方法の違いによる特徴を詳細に分析する予定である。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。本検討を進めるにあたり、JFE スチール(株)の塩崎氏より解析データを提供して頂きました。関係者の方々に謝意を表します。

An effective stress analysis on sheet pile quay walls

Junichi Hyodo (Tokyo electric power service), Y. Shiozaki (JFE steel), Osamu Ozutsumi (Meisosh)

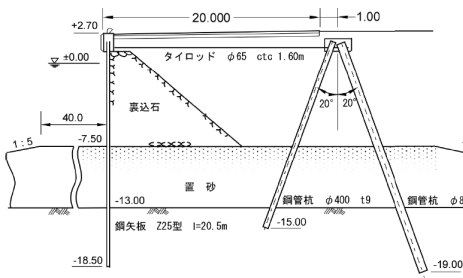


図-1 漁業埠頭南側岸壁断面図⁴⁾⁵⁾

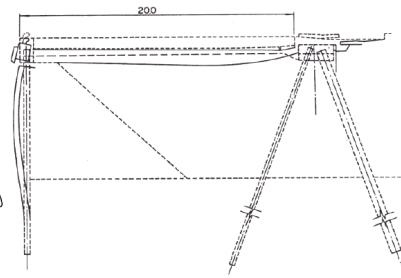


図-2 被災状況図⁴⁾⁵⁾

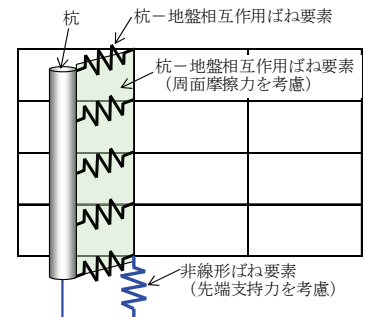


図-3 控え杭周辺のモデル化(方法B)

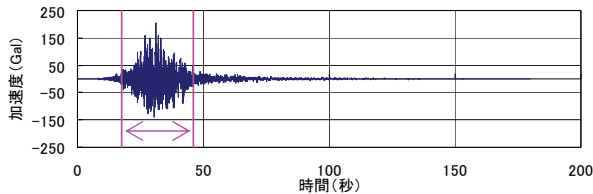


図-4 入力地震動

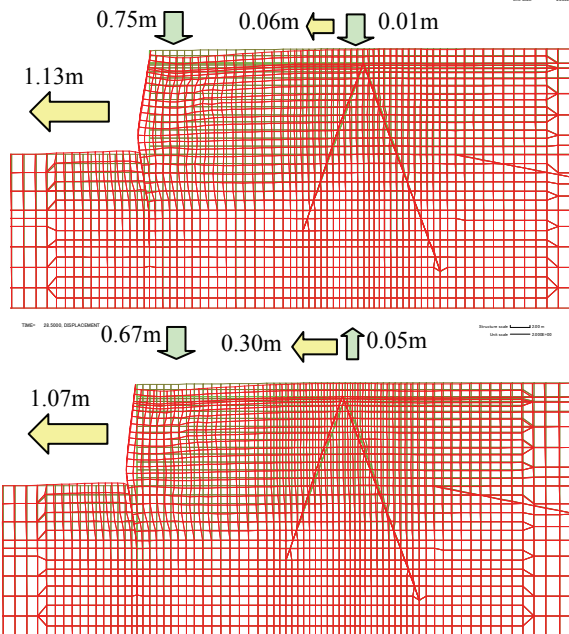


図-5 残留変形図 (上段: Case-A, 下段: Case-E)

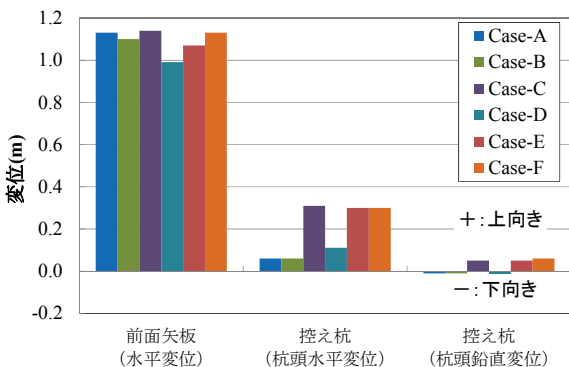


図-6 残留変位の比較

表-1 解析ケース

	押込み杭・引抜き杭	
	杭の先端支持力	杭の周面摩擦力
Case-A	杭の節点と同一の座標の地盤節点を結合	なし
Case-B	杭の節点と同一の座標の地盤節点を結合	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi=15^\circ, J_\beta=1.0$
Case-C	非線形ばね要素	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi=15^\circ, J_\beta=1.0$
Case-D	非線形ばね要素	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi=15^\circ, J_\beta=2.0$
Case-E	非線形ばね要素 (押込み杭先端の地盤節点のうち、杭径の3倍の範囲をY方向同一変位とする)	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi=15^\circ, J_\beta=1.0$
Case-F	非線形ばね要素 (押込み杭先端の地盤節点のうち、杭径の6倍の範囲をY方向同一変位とする)	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi=15^\circ, J_\beta=1.0$

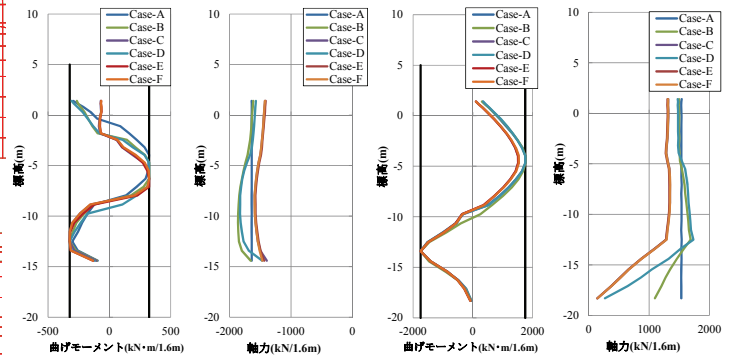


図-7 控え杭の最大断面力図

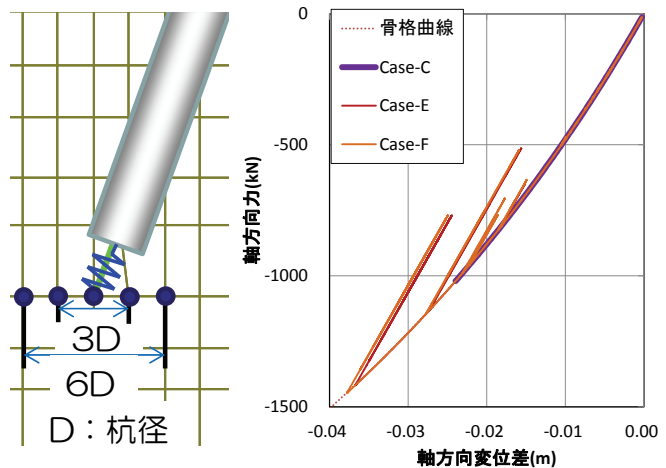


図-8 杭先端の非線形ばね要素の応答

参考文献：1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 2) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集 (平成19年改訂版) 3) 兵頭順一, 森安俊介, 宮下健一朗, 宇野州彦, 小堤治, 一井康二：二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討, 土木学会第33回地震工学研究発表会, 2013, 4) 上田茂, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 松永康男, 藤本健幸, 菊池喜昭, 宮井真一郎, 関口信一郎, 藤本義則：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技術研究所資料, No.766. 1993 5) 塩崎禎郎, 菅野高弘, 小濱英司：矢板式係船岸の耐震性に関する実験および解析, 土木学会海洋開発論文集, 第20巻, 2004年6月, pp131-136 6) 福手勤, 阿部正美, 長谷川博行, 松田史朗：水中溶接された鋼矢板構造物の破断メカニズムと破断モードの改善に関する材料学的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.36, No.4, 1997

4-3 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素を用いた事例解析（その2）

杭基礎 先端支持力 非線形ばね

JFE スチール (株) 塩崎 禎郎
 明窓社 小堤 治
 東電設計 (株) 兵頭 順一

1 はじめに

杭先端支持力の荷重～変位関係を模擬するために開発された非線形ばね要素（以降、双曲線ばねと表記）の適用性について、図-1 に示す高砂第2埠頭（控え組杭式鋼管矢板岸壁：60cm 程度の残留変形が生じていた地点）を対象として検討を行った。

2 検討モデル概要

本検討で用いたモデルは、(独) 港湾空港技術研究所と(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会の共同研究「東日本大震災における鋼材系港湾施設の被災原因究明」で作成したものである¹⁾。解析で用いた地層区分を図-2 に示す。解析地盤定数は、設計時および地震後の土質調査（PS 検層を含む）結果を用いて表-1 のとおり設定した。液状化に関するパラメータは、建築基礎設計指針に基づき設定した液状化抵抗を再現できるように要素シミュレーションで決定した。解析の諸条件を表-2 に示す。入力地震動は 2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定結果として(独) 港湾空港技術研究所から公開されたデータ（工学的地盤の 2E 波）を用いた²⁾。なお、解析は FLIP³⁾Ver719-6-2_Stest を用いた。

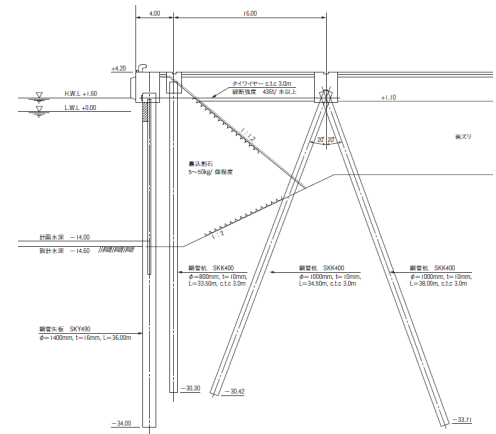


図-1 高砂第2埠頭の面図

3 控え組杭の軸方向挙動のモデル化の違いの影響検討

控え組杭の軸方向挙動のモデル化に関して表-3 に示す組み合わせを対象に検討を実施した。Case-A, B は本ワーキング以前から用いられてきた方法で、Case-C～G は、杭先端支持力の特徴を模擬するために今回新たに実装した双曲線ばねを適用したケースである。Case-F, G は、杭下端をフリーとした状態で押込・引抜解析を実施して、杭の支持力の設計値に整合する摩擦角を設定したケースである。押込杭に比べて引抜杭の摩擦角が小さいのは、堅固な Tf 層まで根入れされているためである。

鋼管矢板の残留変形形状を図-3 に、控え組杭頂部・下端の残留変形を図-4 に示す。周面摩擦を考慮せず杭下端を地盤と MPC 拘束した Case-A では、天端の変形量が 0.62m となったが、Case-B～G では 1.2～1.3m となって大きく結果が異なった。これは、図-4 の引抜杭下端の変形から明らかのように、Case-B～G では引抜きが発生しているためである。Case-A と Case-B は、押込杭の圧縮力を地盤に剛に伝えるという意味では、ほぼ同等のモデル化であるが、引抜きが発生する Case-B では、Case-A に比べて杭下端の変位が小さくなっている。双曲線ばねを用いた Case-C～G の控え組杭下端の変形量は、概ね Case-A と Case-B の中間的な値を示した。また、Case-F, G は周面摩擦の摩擦角を大きく設定しているが、摩擦力が上限に達して変形が進行する状態になってしまい、Case-C, E と明瞭な差は生じなかった。

Case-C～G は、鋼管矢板と控え組杭の変形に関して大きな差が生じなかったが、控え組杭の断面力図（図-5 参照）を見ると、設定の違いで押込杭に生じる最大軸力に差が生じている。したがって、杭が塑性化するタイミングが異なる可能性があり、地震動のレベルによっては変形に関しても差が生じるものと考えられる。

Case-C の押込杭先端の双曲線ばねの荷重～沈下の履歴を、平山式⁴⁾による値と併せて図-6 に示す。Case-C の骨格曲線は、平山式に一致しており地盤側の節点の変位する影響は小さかった。

4 まとめ

先端支持力の荷重～変位関係を模擬するために開発された双曲線ばねの適用性に関して高砂第2埠頭を対象として検討を実施した。杭先端のモデル化の違いによって、軸力の作用状況が異なり、岸壁の残留変形に影響を与える可能性があることを確認した。なお、鋼管矢板の変形（傾き）に関する被災との整合度合いは、引抜きが生じる Case-B～G が近い結果となった。Ac2 層以深の受働抵抗や、控え組杭の先端抵抗・摩擦抵抗の見直しが必要と思われる。

謝辞: 本検討は FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。高砂第2埠頭の検討に関しては、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所からデータを提供いただき、著者等が独自に検討したものです。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献: 1) 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会：東日本大震災 2 次報告書（地震、津波を受けた基礎構造物の分析）、2012 年 12 月 2) 港湾空港技術研究所地震動研究チーム：2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定、http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2011/jr_4052_rev2.html、2011 年 6 月 3) Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 4) Hirayama : Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer function, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.

Y. Shiozaki,(JFE-Steel), O.Ozutumi(meisosha), J.Hyodo(Tokyo electric power service co.ltd)

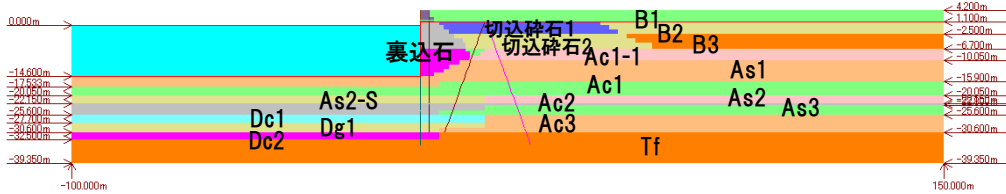


図-2 FLIP 解析で用いた第2埠頭の地層区分

表-1 主な解析地盤定数

層名称	等価N値 N _{es}	F _c %	σ _{ma} kPa	G _{ma} kPa	K _{ma} kPa	φ _i deg.	C kPa	φ _p deg.	液状化パラメータ					β _l (間隙率)	h _{max}	
									SI	WI	PI	P2	CI			
海側																
B1	8.8	10.0	98.0	7.82E+04	2.04E+05	39.4		28	0.005	4.1	0.5	1.00	2.02	0.45	0.24	
B2, B3	8.8	10.0	98.0	7.82E+04	2.04E+05	39.4		28	0.005	6.7	0.5	0.94	2.8	0.45	0.24	
切込砕石1			98.0	3.22E+04	8.39E+04	39.3								0.45	0.24	
切込砕石2			98.0	7.79E+04	2.03E+05	38.5								0.45	0.24	
Ac1-1			98.0	4.91E+04	1.28E+05	30.0								0.55	0.20	
As1	5.3	21.5	98.0	7.42E+04	1.94E+05	38.4		28	0.005	5.4	0.5	1	2.37	0.45	0.24	
Ac1			98.0	3.11E+04	8.11E+04	30.0								0.55	0.20	
As2	4.1	13.4	98.0	1.17E+05	3.05E+05	38.1		28	0.005	4.1	0.5	1.03	2.05	0.45	0.24	
Ac2			98.0	1.02E+05	2.66E+05	30.0								0.55	0.20	
As3	2.5	15.0	98.0	1.12E+05	2.91E+05	37.7		28	0.005	3.4	0.5	1.05	2	0.45	0.24	
Ac3			98.0	1.00E+05	2.61E+05		124							0.55	0.20	
Tf			98.0	3.75E+05	9.79E+05	44.5								0.45	0.24	
陸側																
As2-S	27.3	13.4	98.0	1.61E+05	4.20E+05	42.4		28	0.005	22.67	0.5	0.546	10.06	0.45	0.24	
Dc1			98.0	4.91E+04	1.28E+05		144							0.55	0.20	
Dg1			98.0	1.55E+05	4.04E+05	42.2		28	0.005	13.58	0.5	0.676	7.406	0.45	0.24	
Dc2			98.0	4.02E+04	1.05E+05		133							0.55	0.20	

表-2 解析条件

砂の力学モデル	<ul style="list-style-type: none"> マルチスプリング要素を利用 変相線を越えた応力空間におけるせん断仕事の負のダイレイタンションへの寄与の扱いは tmp7 法
運動方程式の解法	<ul style="list-style-type: none"> 改良型非線形反復計算法 レーン減衰は背後地盤の1次固有周期に対して1%の減衰を与える設定 (β=0.002)
鋼管杭, 鋼矢板	<ul style="list-style-type: none"> バイリニアモデル (腐食量は現地計測に基づく, 2次勾配ゼロ, 軸力考慮にて全塑性モーメントを低減) レーン減衰は背後地盤の1次固有周期に対して1%の減衰を与える設定 (β=0.002) 折れ曲がり点は鋼材強度の平均的値とする 鋼管矢板 SKY490 の降伏応力は特性値×1.2 倍 鋼管杭 SKK400 の降伏応力は特性値×1.26 倍
タイ材	<ul style="list-style-type: none"> 非線形ばね要素でモデル化 (引張のみ伝える) ヤング率は現地計測値, 降伏強度は特性値×1.5 倍
築堤解析	<ul style="list-style-type: none"> 第1段階: -6.7m 以深の原地盤の自重解析 第2段階: +4.2m までの自重解析 (タイ取付点を固定扱い) 第3段階: タイ取付点の反力開放, 岸壁前面の掘削解析, 残留水圧載荷 第4段階: 動的解析

表-3 解析ケース

ケース	押し込み杭		引き抜き杭	
	先端	周面摩擦	先端	周面摩擦
Case-A	MPC-xy	なし	MPC-xy	なし
Case-B	圧縮のみに効く非線形ばね*	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°	圧縮のみに効く非線形ばね*	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°
Case-C	双曲線ばね q _{ult} =設計値**	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°	なし	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°
Case-E	双曲線ばね q ₀ =設計値**	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°	なし	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=15°
Case-F	双曲線ばね q _{ult} =設計値**	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=30.8° (摩擦を設計値に)	なし	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=13.5° (摩擦を設計値に)
Case-G	双曲線ばね q ₀ =設計値**	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=30.8° (摩擦を設計値に)	なし	K _s =10 ⁶ (kPa) φ=13.5° (摩擦を設計値に)

* 圧縮時の傾きは10⁷kPa ※※ 5580kN/本

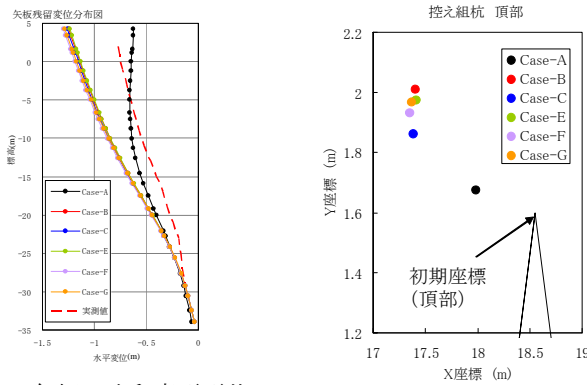


図-3 矢板の残留変形形状

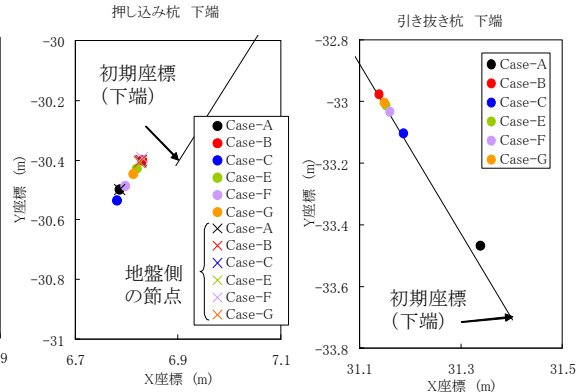


図-5 控え組杭の残留変形

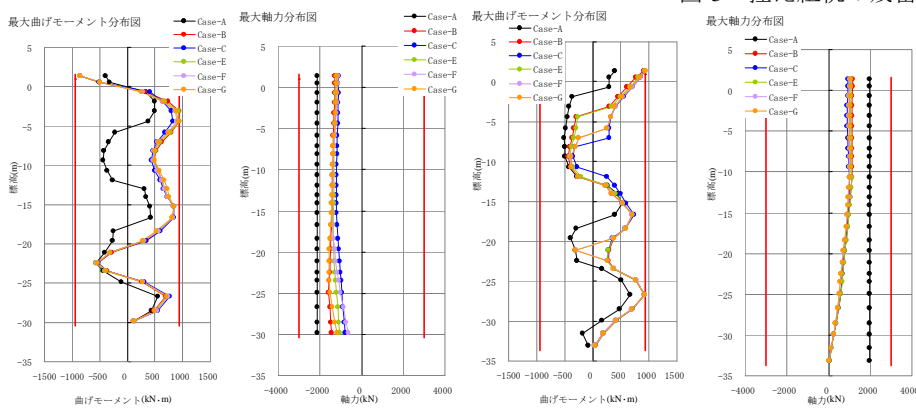


図-5 組杭の断面力 (最大値)

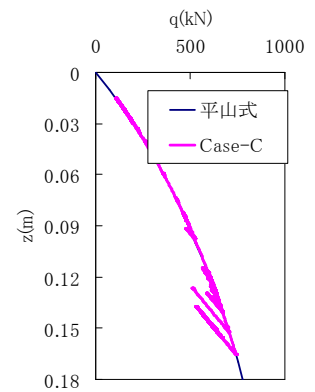


図-6 双曲線ばねの履歴

5. 平成 23 年度～平成 25 年度の成果のまとめ

※本報告書は外部発表用に作成・整理中で最終版ではありません。

5-1 二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化手法

兵頭 順一¹・森安 俊介²・宮下 健一朗³
宇野 州彦⁴・小堤 治⁵・一井 康二⁶

¹正会員 東電設計株式会社

²正会員 新日鐵住金株式会社

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社

⁴正会員 五洋建設株式会社

⁵正会員 株式会社明窓社

⁶正会員 広島大学大学院

本論文では二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化の提案を行う。杭の周面摩擦力は地盤の液状化や施工影響による地盤物性の変化の影響を受けるため、これらを考慮したジョイント要素によるモデル化を考えた。そして、液状化地盤における杭の引抜き試験や非液状化地盤における杭の押し込み試験・引抜き試験のシミュレーションを行い、提案手法の妥当性を確認した。

Key Words : *effective stress analysis, pile ,shaft friction*

1. はじめに

港湾構造物の設計では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や棧橋を対象に有効応力解析による耐震性能照査が実務的に行われるようになってきた¹⁾。矢板式係船岸や棧橋においては、控え工や本体構造において杭が用いられているが、それらの杭を対象として、杭と地盤の相互作用を考慮した動的解析が行われている。

例えば、港湾構造物の設計でよく用いられる液状化による構造物被害予測プログラム FLIP²⁾ (以下、「FLIP」という。)では杭と地盤の相互作用を考慮することのできる杭-地盤相互作用ばね要素³⁾を実装しており、この要素を用いることで地盤の液状化状態における動的相互作用を表現している。しかし、この杭-地盤相互作用ばね要素は杭の軸直角方向の挙動を対象としており、杭の周面摩擦力の影響が無視できない構造の場合には適切な挙動を評価することができない。具体的な構造としては矢板式係船岸の控え組杭(斜杭)や控え杭の根入れが基盤まで届かないなどの場合、控え杭の応力状態等が課題となる。

一方、既往の研究では杭の周面摩擦力に着目した知見が得られている。富永ら⁴⁾は砂と粘土の多層系地盤を対

象として、周面摩擦測定機を用いて杭の周面摩擦力の測定を行い、提案する測定方法により精度良く周面摩擦力を測定できることを報告している。

田村ら⁵⁾は杭の押し込み試験を対象とした杭の遠心力模型実験を実施して、杭の周面摩擦力が表面粗さによって異なることを示している。

伊藤ら⁶⁾は同一地盤における打撃工法の引抜き抵抗力は埋込み工法の約2倍であるとしており、杭の周面摩擦力が施工の影響を受けることを報告している。また、White et al.⁷⁾は砂質土の場合、杭の打設過程において杭の近傍で粒子破碎や体積変化が生じ、地盤状態が打設前後で異なることを報告している。これらの施工影響を設計計算において適切に評価することは現時点では難しいが、何らかの方法で施工影響を評価できた場合に、適切に数値解析に導入する方法はいずれ必要となる可能性がある。

また、西谷ら⁸⁾は過剰間隙水圧の存在下で杭の引抜き試験を行っている。杭の引抜き抵抗力は過剰間隙水圧比の上昇と反比例関係にあり、摩擦係数は過剰間隙水圧比にかかわらずほぼ一定である、と報告している。地震時の構造物の変形や応力状態を考慮するためには、過剰間隙水圧の影響を適切に考慮する方法が必要である。



図-1 杭と地盤の相互作用のモデル化¹⁾

2. 本研究で提案する杭のモデル化

(1) 杭と地盤の相互作用のモデル化

既往の有効応力解析²⁾では、図-1(a)に示すように杭の軸直角方向を杭-地盤相互作用ばね要素⁴⁾でモデル化し、杭の軸方向を杭先端と地盤の節点において水平及び鉛直方向の変位を同一とする方法（以下、「方法A」という。）が多い。杭-地盤相互作用ばね要素は、杭と地盤の同一平面内の相対変位に基づく反力のみを与えるばねであるので、杭軸方向に押し込みや引抜きに応じて発生する杭の周面摩擦力は考慮していない。したがって、支持地盤に根入れされている杭の先端支持力が支配的となる構造物であれば問題ないが、杭先端の地盤に変位が発生し、引抜きや押し込みの影響が卓越する構造物では実現象を適切に評価できない。

そこで、本論文では、杭の周面摩擦力のモデル化に着目するため、方法Aに杭の周面摩擦力（ジョイント要素）の機能を加えた方法（以下、「方法B」という。）を対象とする。方法Bのモデルの概要図を図-1(b)に示す。つまり、本研究では、有効応力解析としてFLIPを用い、杭の周面摩擦力のモデル化（方法B）に関して、非液化地盤や液化地盤における杭の周面摩擦力の評価に対するジョイント要素の適用性について検討を行った。

なお、将来的には、先端支持力についても非線形ばね要素等による適切なモデル化を行い、方法Cに示すようなモデル化が最適ではないかと考えているが、下端のモデル化は本論文の対象とはしていない。

(2) 杭の周面摩擦力のモデル化の定式化

剥離やすべりを表現するジョイント要素にはいくつかの定式化があり得るが、例えばせん断強度（滑り強度）を(1)式で定式化することができる。このときの、ジョイント要素の応力ひずみ関係の例を図-2に示す。この定式化は、例えばケーソン岸壁背面のモデル化などに用いられている¹⁾。

$$\tau_f = c + \sigma'_n \tan \phi_j \quad (1)$$

ここで、 τ_f : せん断強度、 c : 粘着力、 σ'_n : 近傍地盤における垂直方向の有効拘束圧、 ϕ_j : 摩擦角

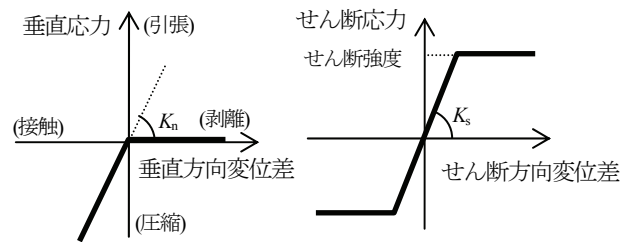


図-2 ジョイント要素の応力ひずみ関係²⁾

杭の周面摩擦力は、この定式化に基づくジョイント要素のせん断強度が周辺地盤の拘束圧に依存するという特性を利用してモデル化する。ジョイント要素のせん断方向初期剛性 K_s は十分に大きな値（例えば 1.0×10^6 kN/m²/m）とし、ジョイント要素の接触・剥離という滑り方向と直交する方向の挙動は、何の作用もしないように設定しておく。また、杭の周面摩擦力を二次元平面ひずみ状態でモデル化するため、杭の単位深さあたりの接触面積は杭の周長（width= πD ）とし、原則として杭間隔の奥行き方向幅を持つ地盤モデルと1本分の剛性を持つ杭のモデルを用意する。奥行き方向1m当たりの解析を行う場合は、地盤幅は1m、杭の剛性は1mあたりにし、杭と地盤の接触長も単位幅当たり（width= $\pi D/B$ ）とする。

杭の周面摩擦力は施工の影響も大きく受けるが、施工による影響は、模型実験⁸⁾や現場計測¹⁰⁾で得られているように、地盤物性値の変化領域は杭の近傍に限られている。そこで、本論文では(1)式に調整係数 J_a 及び J_b を導入して(2)式に示すジョイント要素を用いることとする。以下、本提案のモデルを改良型ジョイント要素と呼ぶ。調整係数は杭の施工影響を考慮するものであり、 J_a は粘着力 c の増減作用、 J_b は施工による周辺地盤の σ'_n の増減や ϕ_j の変化を表している。

$$\tau_f = J_a c + J_b \sigma'_n \tan \phi_j \quad (2)$$

ここで、 τ_f : せん断強度、 c : 粘着力、 J_a : c に乗ずる調整係数、 σ'_n : 垂直方向の拘束圧、 ϕ_j : 摩擦角、 J_b : σ'_n 及び ϕ_j に乗ずる調整係数

本研究で提案した杭の周面摩擦力に対する改良型ジョイント要素の適用性を検討するために、まず、改良型ジョイント要素の挙動をパラメトリックスタディで検証したうえで、以下のケースの事例解析を行い、提案手法の適用性を確認した。

- ① 非液状化地盤における杭の押し込み試験
- ② 非液状化地盤における杭の引抜き試験
- ③ 液状化地盤における杭の引抜き試験

3. 杭の周面摩擦力のモデル化の挙動確認

(1) 解析条件

検討モデル¹⁾を図-3に示す。杭-地盤間に改良型ジョイント要素を設定し、周面摩擦力のみが作用するように杭先端は自由端とする。解析ケースを表-1に示す。地盤種別は砂質土と粘性土の2種類を取扱い、粘性土については、MPC拘束（杭の節点と同一座標の地盤節点を結合）も解析する。なお、地盤物性値は表-2に、改良型ジョイント要素の物性値は表-3に示す通りである。

解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は5mとしている。

(2) 解析結果

a) 砂質土における改良型ジョイント要素の挙動

調整係数 J_β と周面摩擦力の関係を図-4に示す。 J_β が大きいくほど周面摩擦力は大きくなり、 $J_\beta=5$ で発散している。

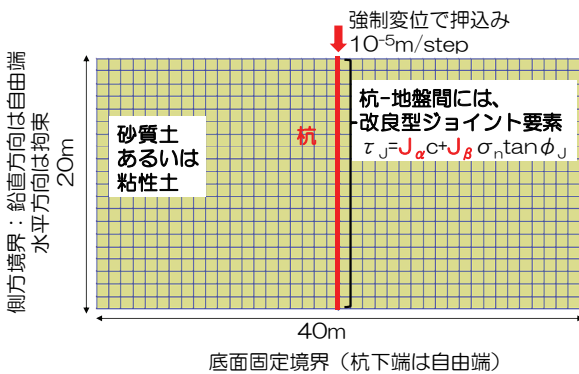


図-3 検討モデル

表-1 解析ケース

ケース	地盤種別	ジョイント要素の調整係数	
		J_α	J_β
1	砂質土	0	1
2		0	2
3		0	3
4		0	4
5		0	5
6	粘性土	1	0
7		2	0
8		5	0
9		10	0
10		MPC拘束(杭の節点と同一座標の地盤節点を結合)	

表-2 解析用物性値

	質量密度 ρ (t/m^3)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	基準平均有効応力 σ_{ma}' (kN/m^2)	拘束圧依存係数 m_G, m_K	内部摩擦角 ϕ °	粘着力 c (kN/m^2)
砂質土	2.09	54620	142400	48.75	0.5	36.7	0
粘性土	1.60	34000	88670	1.00	0.0	0	100

表-3 改良型ジョイント要素の物性値

	杭径 D m	垂直方向接線剛性 K_n ($kN/m^2/m$)	滑り方向接線剛性 K_s ($kN/m^2/m$)	粘着力 c_j (kN/m^2)	摩擦角 ϕ_j	奥行き方向幅 m
砂質土	1	0	1.0E+06	0	15	3.1416
粘性土	1	0	1.0E+06	100	0	3.1416

このとき、杭に隣接する表層の地盤要素が破綻している。この要素のせん断応力とせん断ひずみの関係は図-5に示すように、 $J_\beta=5$ で破綻を生じている。ここで、地盤のせん断破壊が生じる前に、周面摩擦力が上限に達する条件は(3)式で表され、単位高さ当たりの力に換算すると(4)式のように展開されて最終的に(5)式が得られる。(5)式を満たす調整係数が、改良型ジョイント要素の適用範囲である。(5)式に本検討のパラメータを代入すると $J_\beta < 4.4$ となり、 $J_\beta=5$ は範囲外なので破綻を生じたと考えられる。なお図-5に示すように、 $J_\beta=3.4$ でひずみ軟化のような挙動がみられる。この原因は特定できていないが、杭と地盤間の滑りに伴う地盤要素のせん断変形や圧縮の緩和や、地盤応力の再配分によって、有効拘束圧が低下し、せん断剛性やせん断応力も減少した可能性が推定される。

$$\tau_f < \tau_{xy} \quad (3)$$

$$J_\beta \sigma_n' \tan \phi_j \times \pi D < \sigma_n' \tan \phi \times B \quad (4)$$

$$J_\beta < \frac{\tan \phi}{\tan \phi_j} \times \frac{B}{\pi D} \quad (5)$$

ここで、 τ_{xy} :地盤のせん断応力、 ϕ :地盤の内部摩擦角、 D :杭の直径、 B :地盤の奥行き方向幅、 ϕ_j :ジョイント要素の摩擦角

b) 粘性土における改良型ジョイント要素の挙動

図-6に示すように、 J_α が大きいくほど周面摩擦力は大きくなるが、砂質土と異なり発散することなく、 $J_\alpha=10$ では杭径の20%に相当する0.2mの変位量でも周面摩擦力は上限に達しなかった。図-7(a)に示すように $J_\alpha=10$ における杭の軸力は、杭頭から杭先端方向に減少している。また、図-7(b)に示す $J_\alpha=10$ における杭と地盤間のせん断応力は、粘着力に $J_\alpha=10$ を乗じた杭-地盤間のせん断強

杭軸方向挙動 WG

度 1000kN/m^2 を上回ることはなく、改良型ジョイント要素のプログラムは正しく機能していることが確認される。なお、地盤底面のせん断応力が大きくなる要因は、地盤底面の固定条件の影響と考えられる。

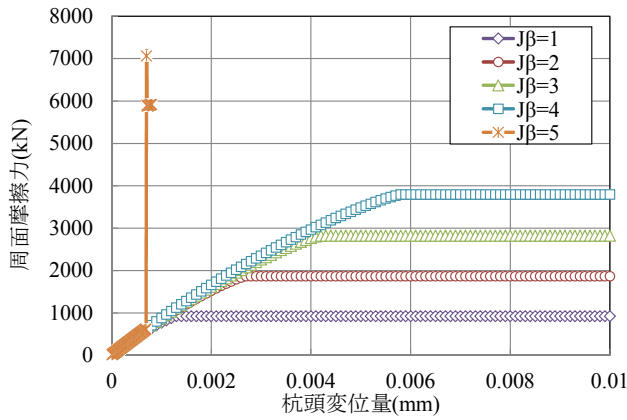


図4 砂質土の調整係数と周面摩擦力の関係

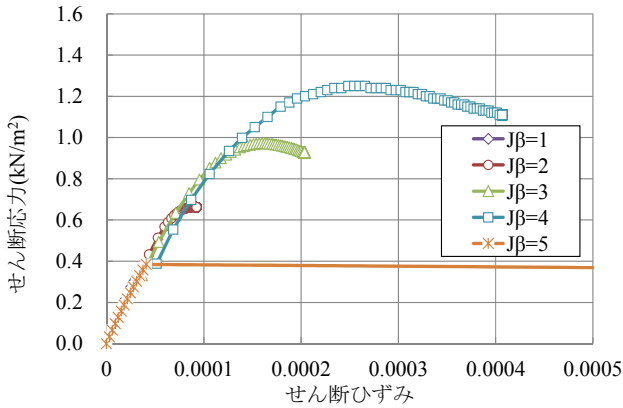


図5 杭に隣接する表層地盤のせん断応力-ひずみ関係

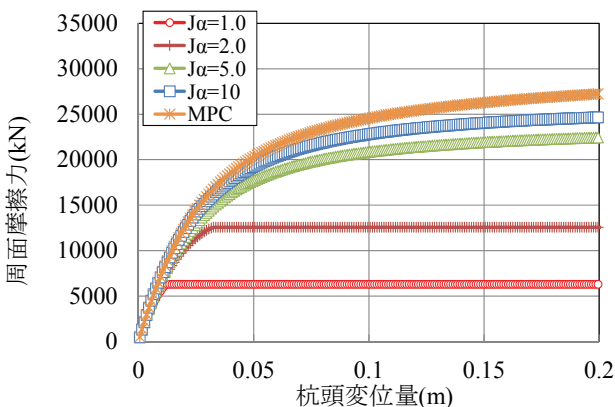


図6 粘性土の調整係数と周面摩擦力の関係

3. 事例解析による検証その1 - 非液化化地盤における杭の押し込み試験 -

(1) 解析条件

非液化化地盤における杭の押し込み試験⁹⁾を対象として、

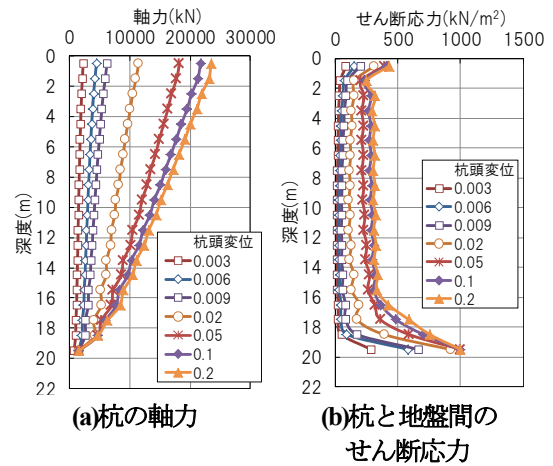


図7 杭の応答分布図 ($J_\alpha=10$)

ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を行った。

対象実験の土質条件及び载荷試験杭の仕様や最大周面摩擦力度の予測値と実測値の比較を図-8に示す。

地層構成は①埋立砂から⑦洪積砂までの7層に分けられる。試験杭は外径 $\phi=609.6\text{mm}$ 、肉厚 $t=11\text{mm}$ 、全長 $L=36\text{m}$ の鋼管杭であり、地盤上部の突出長が 1.3m で杭先端は洪積砂層⑦に達している。

载荷試験は6本の反力杭にわたした梁と杭頭の間には300t油圧ジャッキ4台を設置し、「クイの鉛直载荷試験基準・解説(土質工学会編)」¹²⁾の多サイクルA载荷法によって実施されている。なお、载荷試験は杭打設から23日後に行った。

地盤はFLIPのマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法(改訂版)¹⁾から設定した。解析用物性値を表4~表6に示す。改良型ジョイント要素の物性値のうち、ケース1~3は砂・粘土の種別に関係なく、粘着力 $c_j=0\text{kN/m}^2$ 、摩擦角 ϕ_j を 15° 、調整係数 J_β を $1.0, 1.2, 1.5$ とした。また、ケース4, 5は、⑤下部沖積粘土、⑥洪積粘土、⑦洪積砂に着目し、粘着力 c_j を個別に設定したケースである。

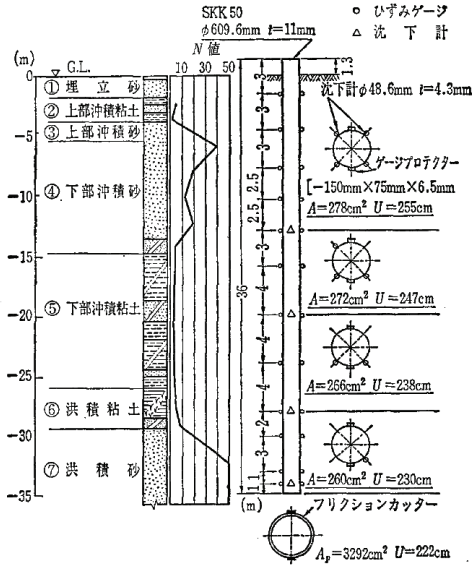
解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は 1m としている。また、解析は杭の周面摩擦力に着目しているため、杭先端は自由端としている。

(2) 解析結果

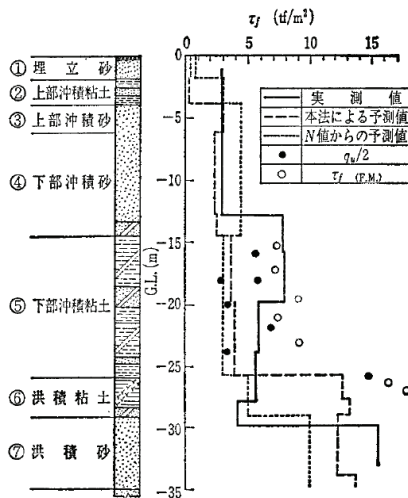
杭の周面摩擦力度の比較を図-9に示す。ケース1~ケース3に関して、ジョイント要素の調整係数 J_β の値が大きくなるほど、杭の周面摩擦力の値が大きくなっていることが分かる。調整係数 J_β が 1.0 の場合(ケース1)、解析における杭の周面摩擦力は実測値より小さくなった。表層の砂層(①埋立砂、③上部沖積砂、④下部沖積砂)に着目すると、調整係数 J_β が 1.2 の場合(ケース2)、

一般社団法人 FLIP コンソーシアム 平成 25 年度成果報告書
 杭の周面摩擦力は実測値とほぼ同等であるが、調整係数 J_β が 1.5 の場合（ケース 3），解析における杭の周面摩擦力は実測値と合わない結果となった。

表層の砂層（①埋立砂，③上部沖積砂，④下部沖積砂）に関して，調整係数 J_β が 1.5 はやや大きすぎるといえる。



(a) 土質条件及び载荷試験杭の仕様⁵⁾



(b) 最大周面摩擦力度の予測値と実測値の比較⁵⁾

図-8 再現対象事例⁵⁾

表-4 解析用物性値

	質量密度 ρ (t/m^3)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	基準平均有効応力 σ_{ma} (kN/m^2)	拘束圧依存係数 m_G, m_k	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 c (kN/m^2)
埋立砂	1.8	66298	172894	98	0.5	39.3	0.0
上部沖積粘性土	1.5	6375	16625	30.8	0.5	30.0	0.0
上部沖積砂	2.0	140988	367674	98	0.5	42.1	0.0
下部沖積砂	2.0	119778	312364	98	0.5	41.3	0.0
下部沖積粘性土	1.7	14772	38523	143.4	0.5	30.0	0.0
洪積粘土	1.7	49980	130340	182.8	0.5	0.0	147.0
洪積砂	2.0	122354	319080	98	0.5	41.4	0.0

表-5 改良型ジョイント要素の解析用物性値(1)

	垂直方向 接線剛性 K_n ($kN/m^2/m$)	滑り方向 接線剛性 K_s ($kN/m^2/m$)	粘着力 c_j (kN/m^2)	摩擦角 ϕ_j ($^\circ$)	奥行き 方向幅 width (m)
自重解析	0	0	表-6		3.1416
押し込み解析	0	1.00E+06	表-6		3.1416

表-6 改良型ジョイント要素の解析用物性値(2)

ケース	①埋立砂～④下部沖積砂			⑤下部沖積粘土 ⑥洪積粘土			⑦洪積砂		
	J_a	c_j (kN/m^2)	J_β ϕ_j ($^\circ$)	J_a	c_j (kN/m^2)	J_β ϕ_j ($^\circ$)	J_a	c_j (kN/m^2)	J_β ϕ_j ($^\circ$)
1	0.0	0.0	1.0 15.0	0.0	0.0	1.0 15.0	0.0	0.0	1.0 15.0
2	0.0	0.0	1.2 15.0	0.0	0.0	1.2 15.0	0.0	0.0	1.2 15.0
3	0.0	0.0	1.5 15.0	0.0	0.0	1.5 15.0	0.0	0.0	1.5 15.0
4	0.0	0.0	1.2 15.0	1.0	60.0	0.0 0.0	0.0	0.0	1.2 15.0
5	0.0	0.0	1.2 15.0	1.0	60.0	0.0 0.0	1.0	150.0	0.0 0.0

一方，粘土層における杭の周面摩擦力は実測値より小さい傾向となった。また，洪積砂で極端に周面摩擦力が大きくなるという分布形状は再現できていない。粘土層を砂層と同様に設定するという簡略化には無理があるといえる。

ケース 4, 5 では，⑤下部沖積粘土や⑥洪積粘土の粘着力 c_j を $60kN/m^2$ とすることで，粘土の周面摩擦力は $60kN/m^2$ となり，ケース 1～3 と比較して杭の周面摩擦力は全体的な傾向が実測値に近付いた。また，ケース 5 は，粘土に加えて，⑦洪積砂の粘着力 c_j を $150kN/m^2$ とすることで，解析による杭の周面摩擦力は実測値とほぼ同程度となった。つまり，砂・粘土のそれぞれに適切な摩擦角 ϕ_j や粘着力 c_j を個別に設定することで，杭の周面摩擦力の深度分布を解析で概ね再現することができたといえる。ただし，⑤下部沖積粘土では，同一地層内で杭の周面摩擦力の実測値が変化している。このような場合の再現は難しいが，物性区分を細分化することで，このような実測値の細かい深度分布も精度良く表現できるようになると考えている。

図-10 に杭の荷重と変位の関係を示す。調整係数 J_β が 1.0, 1.2 の場合，解析による最大荷重は実測値より小さくなった。調整係数 J_β が 1.5 の場合，解析による最大荷重は実測値とほぼ同程度であるが，最大荷重に達する変位は実測値に比べてかなり大きく，鉛直抵抗を小さめに評価している。しかし，現地試験では杭先端の支持力の影響も生じるため，杭全体の加重—変位関係に違いが生じたものと考えられる。

4. 事例解析による検証その 2—非液状化地盤における杭の引抜き試験—

(1) 解析条件

非液状化地盤における杭の引抜き試験¹³⁾を対象として，改良型ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦力の検討を

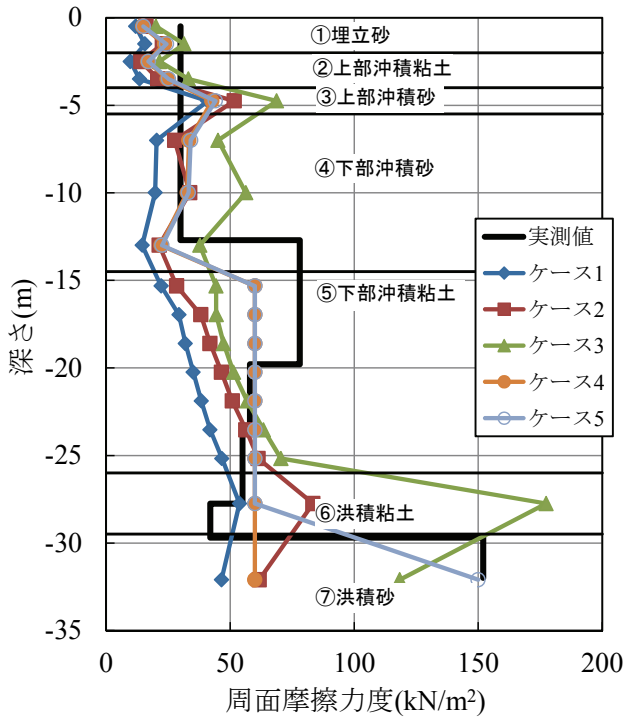


図-9 杭の周面摩擦力の比較

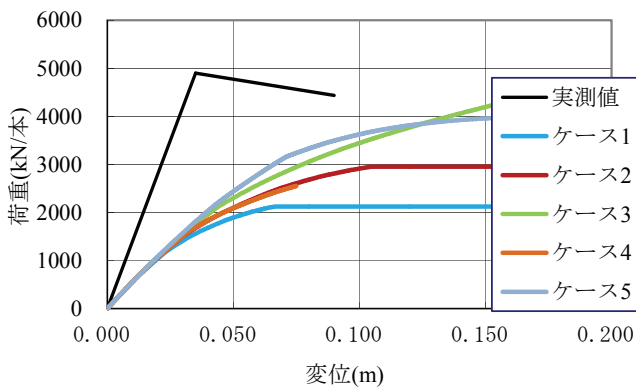


図-10 杭の荷重-変位関係

行う。対象実験の土質柱状図を図-11に示す。なお、杭に関しては、直径 508mm、肉厚 9mm、杭長 12m の鋼管打込み杭としてモデル化した。

地盤は FLIP のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。なお、杭先端は自由端とする。また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法 (改訂版)¹⁾ から設定した。解析は排水条件で実施し、地盤の奥行き方向幅は 0.508m としている。

解析用物性値を表-7~表-9に示す。改良型ジョイント要素の物性値は、砂・粘土の種別に関係なく、粘着力 $c_j = 0 \text{ kN/m}^2$ 、摩擦角 ϕ_j を 15° 、調整係数 J_β を 1.0, 1.5, 3.0 とした。なお、改良型ジョイント要素の粘着力 c_j はゼロなので、調整係数 J_α の値は影響しない。

表-7 解析用物性値

	質量密度 ρ (t/m^3)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	基準平均有効応力 σ_{ma} (kPa)	拘束圧依存係数 m_G, m_K	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 c (kN/m^2)
ローム	1.41	44276	115466	4.20	0.5	0.0	40.0
粘性土1	1.61	29719	77502	15.38	0.5	0.0	25.0
砂質土1	2.02	134899	351794	98.00	0.5	42.0	0.0
粘性土2	1.61	48624	126803	53.40	0.5	0.0	25.0
砂質土2	2.02	129288	337163	98.00	0.5	41.0	0.0
粘性土3	1.61	56875	148321	82.73	0.5	0.0	25.0
砂質土3	2.02	174173	454215	98.00	0.5	43.0	0.0

表-8 改良型ジョイント要素の物性値(1)

	垂直方向接線剛性 K_n ($\text{kN/m}^2/\text{m}$)	滑り方向接線剛性 K_s ($\text{kN/m}^2/\text{m}$)	粘着力 c_j (kN/m^2)	摩擦角 ϕ_j ($^\circ$)	奥行き方向幅 width (m)
自重解析	0	0	表-9		3.1416
引抜き解析	0	1.00E+06	表-9		3.1416

表-9 改良型ジョイント要素の物性値(2)

ケース	J_α	c_j (kN/m^2)	J_β	ϕ_j ($^\circ$)
1	0.0	0.0	1.0	15.0
2	0.0	0.0	1.5	15.0
3	0.0	0.0	3.0	15.0

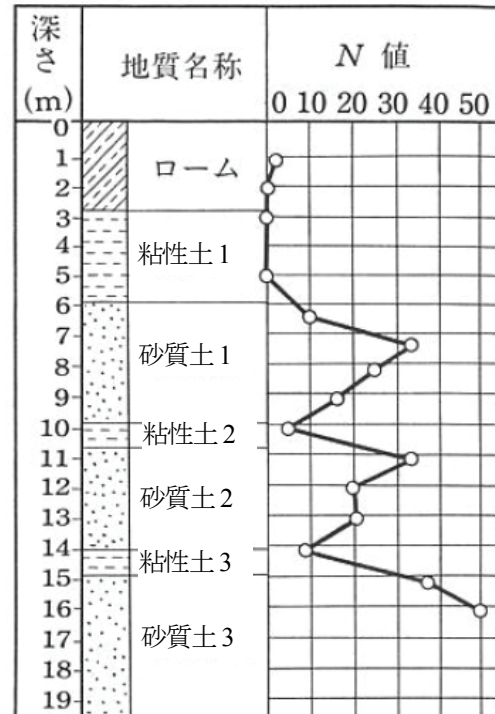


図-11 地質柱状図¹²⁾に加筆

(2) 解析結果

杭の周面摩擦力度の比較を図-12に示す。改良型ジョイント要素の調整係数 J_β の値が大きくなるほど、杭の周

一般社団法人 FLIP コンソーシアム 平成 25 年度成果報告書
 面摩擦力の値が大きくなっていることが分かる。調整係数 J_{β} を 3.0 とする場合、杭の周面摩擦力の深度分布は実測値に近い傾向を示した。この解析結果より、杭の引き抜き挙動時においても、提案モデルは周面摩擦力の深度分布を良好に再現可能であるといえる。

図-13に杭の荷重と変位の関係を示す。実測値が得られていないので、解析と実測値の比較は行えないが、調整係数 J_{β} が大きくなるほど杭の荷重も大きくなっていることがわかる。

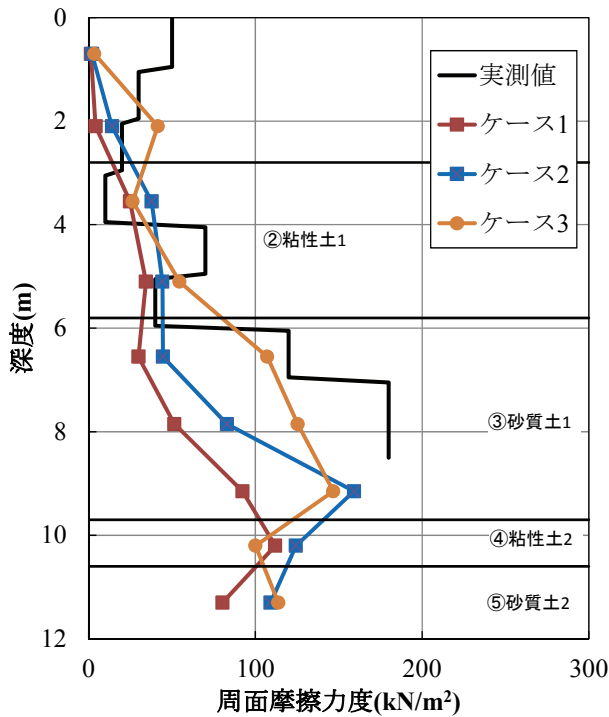


図-12 杭の周面摩擦力の比較

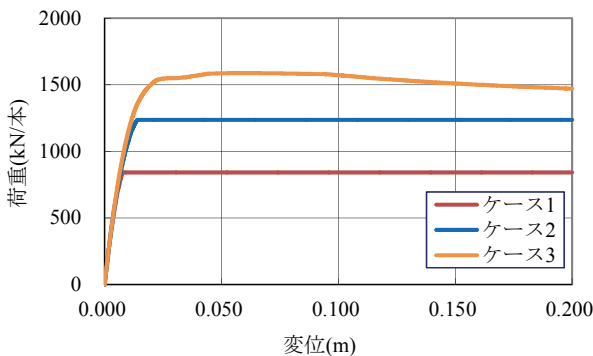


図-13 杭の荷重-変位関係

5. 事例解析による検証その3 - 液状化地盤における杭の引き抜き試験 -

(1) 解析条件

西谷ら⁹⁾が行った過剰間隙水圧の存在下における杭の引き抜き試験を対象として、改良型ジョイント要素を用いた再現解析を行う。ただし、調整係数は J_{β} を 1.0 の固定値とした。なお、改良型ジョイント要素の粘着力 c_j は

ゼロなので、調整係数 J_{α} の値は影響しない。実験概要を図-14に、実験結果を図-15、図-16に示す。地盤はFLIPのマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。なお、杭先端は自由端とする。また、解析用地盤物性値は N 値に基づき、簡易設定法(改訂版)¹⁾から設定した。解析用物性値を表-10、表-11に示す。解析モデルの奥行き方向幅は土槽幅の 0.688m とした。解析は、等方圧密後に過剰間隙水圧を上昇させた後に、杭頭に引抜き力を載荷した。

(2) 解析結果

引抜き量と引抜き抵抗力の関係を図-17に、過剰間隙水圧比と引抜き抵抗力の関係を図-18に示す。図-17より、過剰間隙水圧比が大きくなるほど、解析による杭の引抜き抵抗力と引抜き量の関係は、実験と同様に剛塑性的挙動を示すことがわかる。また、図-18より過剰間隙水圧比と引抜き抵抗力比の関係は、実験と同様に過剰間隙水圧の上昇に伴い引抜き抵抗力比が直線的に低減する関係となる。

表-10 解析用物性値

	質量密度 ρ (t/m^3)	初期せん断剛性 G_{ma} (kN/m^2)	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m^2)	基準平均有効応力 σ_{ma} (kPa)	拘束圧依存係数 m_G, m_K	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c (kN/m^2)
飽和砂地盤	2.00	102400	266900	98.00	0.5	40.3	0.0

表-11 改良型ジョイント要素の解析用物性値

	垂直方向接線剛性 K_n ($kN/m^2/m$)	滑り方向接線剛性 K_s ($kN/m^2/m$)	粘着力 c_j (kN/m^2)	摩擦角 ϕ_j (°)	奥行き方向幅 $width$ (m)
引抜き解析	0	1.00E+06	0	24.7	0.457

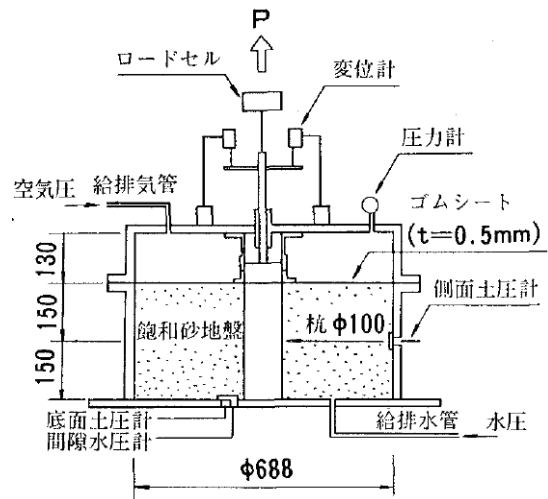


図-14 実験概要⁹⁾

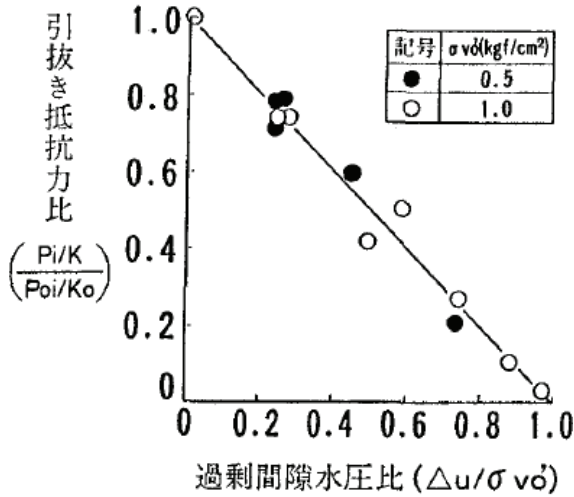


図-15 過剰間隙水圧比と引抜き抵抗力比の関係⁹⁾

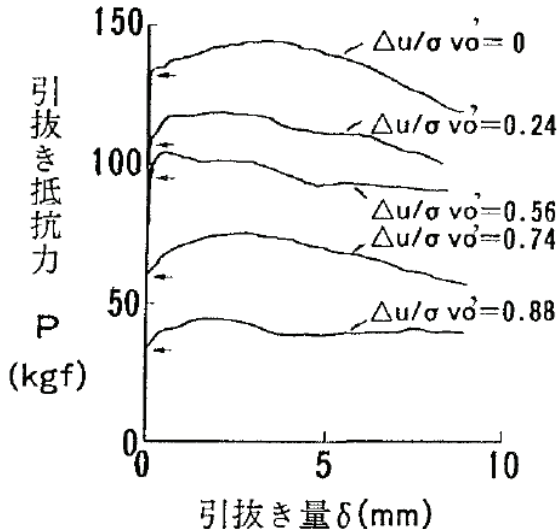


図-16 引抜き量と引抜き抵抗力の関係⁹⁾

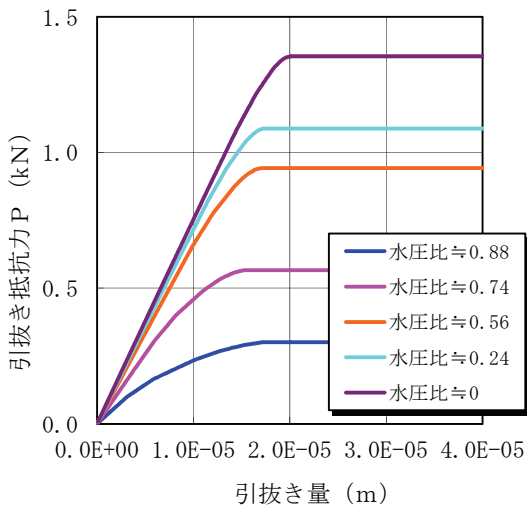


図-17 引抜き量と引抜き抵抗力の関係

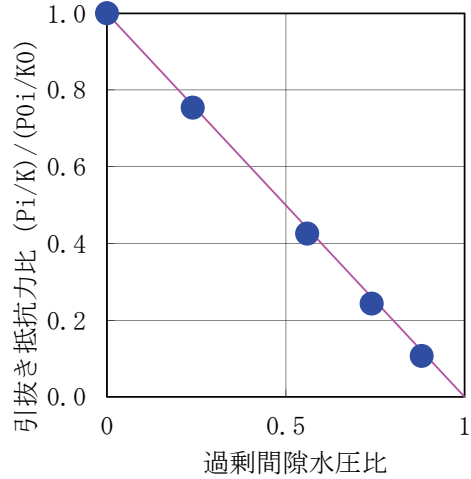


図-18 過剰間隙水圧比と引抜き抵抗力比の関係

4. 提案モデルの妥当性

本検討では、杭と地盤の相互作用のうち、改良型ジョイント要素を用いた杭の周面摩擦のモデル化の提案を行った。

改良型ジョイント要素の調整係数の適用範囲は、砂質土の場合、式(7)となる。

$$J_\beta < \frac{\tan \phi}{\tan \phi_j} \times \frac{B}{\pi D} \quad (7)$$

ここで、 ϕ ：地盤の内部摩擦角、 ϕ_j ：ジョイント要素の摩擦角、 D ：杭の直径、 B ：地盤の奥行き方向幅である。適用範囲を超えるような条件では、解析結果の妥当性が担保できないため、実際の地盤の挙動について慎重な考察をしたうえで、さらなる適切なモデル化の工夫が必要となる。一方で、粘性土の場合、改良型ジョイント要素の調整係数 J_α の適用範囲は明確ではない。粘性土の周面摩擦力の設計値は、打撃工法で粘着力の 1.0 倍、埋込み杭で 0.8 倍となっていることから、 $J_\alpha=1.0$ 程度が目安であると考えられる。

また、①非液状化地盤（実地盤）における杭の押し込み試験と杭の引抜き試験、②液状化地盤（模型地盤）における杭の引抜き試験について、提案モデルを用いた事例解析を行った。非液状化地盤（実地盤）の試験の再現解析では、押し込みと引き抜きのいずれのケースにおいても、適切な調整係数を適用することで、周面摩擦力の深度分布について、実測値を概ね再現することができた。ただし、押し込み試験の杭の荷重変位関係においては、最大荷重に達する変位は実測値に比べてかなり大きく、鉛直抵抗を小さめに評価する結果となった。この部分については、杭の先端支持力のモデル化も含めて、今後の精度向上が必要である。

液状化地盤（模型地盤）の試験結果の再現解析においては、提案方法によって地盤の有効応力の低下に応じて

杭の周面摩擦力が低下するという現象を適切に再現できた。

以上の結果を踏まえて、現在の知見で妥当と考えられる杭周辺部のモデル化の方法を表-12 に示す。なお、実際の解析においては斜杭などの条件にも適用可能な汎用的なモデルが必要であり、杭の軸直角方向及び軸方向のモデル化を一体とする新しい要素（杭-地盤相互作用ばね要素に、改良型ジョイント要素相当の摩擦を表す非線形ばねを組み込む要素）を開発する必要がある（現在、FLIP では開発中）。また、杭先端のモデル化についても検討が必要である（FLIP では別途検討中）。

表-12 杭と地盤の相互作用のモデル化の方法

	方向	モデル化の方法
杭周面のモデル化	杭の軸直角方向	杭-地盤相互作用ばね要素でモデル化
	杭の軸方向	ジョイント要素のせん断強度が周辺地盤の拘束圧に依存する特性を用いてモデル化する ・摩擦角 15 度（鋼材と土の間の場合の例） ・杭-地盤間のジョイント要素の接触長=杭の周長(πD)/奥行き方向の杭のピッチ(B) ・ジョイント要素の接触・剥離という滑り方向と直交する方向の挙動は考慮しない。
杭先端のモデル化		非線形ばね要素でモデル化（検討中）（押込み力のみ抵抗する）

5. まとめ

本研究では、杭と地盤の相互作用のうち、杭の周面摩擦のモデル化の提案を行った。得られた結論を下記に示す。

(1) 周辺地盤の拘束圧に依存するせん断強度に、施工影響による強度変化を考慮することができる二次元平面ひずみ解析用の改良型ジョイント要素を提案した。また、提案モデルの適用可能範囲を、パラメトリック解析により検討し、周辺地盤の強度に応じて、施工影響の考慮には限界値が存在することを示した。

(2) 提案モデルを用いて、非液状化地盤（実地盤）の押し込み試験と引き抜き試験の周面摩擦力の深度分布を概ね再現することができた。

(3) 提案モデルを用いて、液状化地盤（模型地盤）の杭の引き抜き試験結果の再現解析を行い、地盤の有効応力の低下に応じて杭の周面摩擦力が低下するという現象を適切に再現できた。

(4) 以上の解析結果をもとに、現時点で最も妥当と思われる杭の周面摩擦のモデル化の方針を示した。

謝辞：本検討は FLIP の改良・機能拡張と高度な利用技術に関する研究開発の推進を目的に設立された一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施され

たものである。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年改訂版）
- 2) (財)沿岸技術研究センター，第四期 FLIP 研究会 14 年間のまとめ WG：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務～マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果～FLIP 研究会の 14 年間の研究成果【理論編】【事例編】，平成 23 年 8 月 3 日
- 3) Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) 小堤治，溜幸生，岡由剛，一井康二，井合進，梅木康之：2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1899-1900, 2003.
- 5) 富永眞生，木村保，塩田啓介，深谷建雄：周面摩擦測定試験による杭の挙動予測，土と基礎，pp.43-48, 1987.
- 6) 田村修次，樋口康仁，足立圭佑，林康裕，山崎雅弘：遠心模型実験における残置杭が新規杭の鉛直支持力に及ぼす影響—新規杭の表面が滑らかなケースと粗いケースの比較—，日本建築学会構造系論文集，Vol.74, No.645, pp.2039-2044, 2009.
- 7) 伊藤圭典：打込み・埋込み・場所打ち杭の引抜き抵抗力比較測定，第 23 回土質工学シンポジウム論文集，pp.1-8, 1978.
- 8) D. J. White, M. D. Bolton : Observing friction fatigue on a jacked pile, Centrifuge and Constitutive Modeling, pp.347-354, 2002.
- 9) 西谷道暢，喜田浩，飯田毅：過剰間隙水圧下での杭の鉛直引き抜き抵抗力，土木学会第 46 回年次学術講演会，pp.230-231, 1991.
- 10) 武居幸次郎，松本樹典：打設前後の鋼管杭近傍地盤の CPT 調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.587-588, 1997.
- 11) 森安俊介，中山裕章，小堤治，飛田哲男：施工影響を考慮可能な杭の周面摩擦モデルの一提案，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.1235-1236, 2013.
- 12) 社団法人土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・解説
- 13) 社団法人土質工学会：土質工学会基準 杭の引抜き試験方法・同解説，pp.81-88, 1992.

5-2 二次元有効応力解析における 杭の先端支持力のモデル化手法

兵頭 順一（杭軸方向挙動WG幹事）¹

本論文では二次元有効応力解析に適用するための杭の先端支持力のモデル化方法の提案を行った。まず、遠心力場における杭の押込み試験を実施して現象を把握したうえで、その三次元解析による再現を行った。そして、三次元解析の妥当性を検証した上で、三次元解析による杭の先端支持力の荷重変位関係を求め、その荷重変位関係を再現できる非線形ばね要素を二次元解析に適用することとした。このとき、非線形ばね要素の特性としてはHirayama(1990)が提案する双曲線関係を用いた。最後に、提案した非線形ばね要素を用いた実験の再現解析と被災事例の解析を行い、提案手法の妥当性を確認した。

Key Words : *effective stress analysis, end bearing capacity of pile*

1. はじめに

港湾構造物の設計実務では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や栈橋を対象に有効応力解析による耐震性能照査が行われるようになってきた¹⁾。矢板式係船岸や栈橋においては、控え工や本体構造において杭が用いられているが、それらの杭を対象として、杭と地盤の相互作用を考慮した動的解析が行われている。例えば、港湾構造物の設計でよく用いられる液状化による構造物被害予測プログラム FLIP²⁾（以下、「FLIP」という。）では杭と地盤の相互作用を考慮することのできる杭-地盤相互作用ばね要素³⁾を実装しており、この要素を用いることで地盤の液状化状態における動的相互作用を表現している。一方、杭の先端支持力については、杭先端の節点と地盤の節点を同一の変位となるようにモデル化することが多い。しかし、この方法では、地盤要素のメッシュサイズ、非排水条件下の間隙水の考慮の有無、地盤奥行き方向幅等によって、杭の先端支持力を適切に評価することができない場合がある⁴⁾。このため、矢板式係船岸の控え組杭（斜杭）や控え杭の先端支持力の適切なモデル化が設計実務における解析上の課題として残されている。既往の研究として、杭の先端支持力に関する知見が、

下記のように得られている。

安福ら⁵⁾は、砂地盤中の杭の極限先端支持力として空洞拡張理論による杭の先端抵抗力を提案している。そして、杭の極限支持力を空洞拡張理論で求め、杭の荷重-沈下関係は Hirayama⁶⁾の提案する双曲線関係を用いた方法を提案し、既往の原位置載荷試験による検証により、提案方法の精度は比較的良好であったと報告している。

Hirayama⁶⁾は砂地盤中の杭の先端支持力や周面摩擦力の荷重-変位関係に基準ひずみを調整した双曲線関係を用いることを提案している。提案式を用いて原位置載荷試験のシミュレーションを行った結果、提案式は原位置載荷試験の荷重-変位関係を精度良く再現できたと報告している。

脇田⁷⁾は、過去に実施された多くの載荷試験データを用いて、杭の荷重-沈下関係の曲線近似を行い、杭の沈下特性を表す最適な曲線式を求めている。具体的には、曲線式のパラメータと杭種及び仕様との関係を重回帰分析により解析し、杭種・仕様に対して一義的に定まる沈下特性の推定式をまとめている。さらに、杭の第1限界荷重以下の領域では、双曲線分布の適合性が高いと報告している。

また、杭の先端支持力の群杭効果については、次のような知見が得られている。

建築基礎構造設計指針¹⁰⁾では、群杭効率 η を杭頭における鉛直支持力によって定義しており、周面摩擦力の影響を含んでいる。そして、砂質土の場合、杭の鉛直支持力の群杭効率は 1.0 を上回るとしている。また、Vesic¹¹⁾¹²⁾は、極限先端支持力（周面摩擦は考慮していない）に関する群杭効果はないと報告している。また、先端支持力と周面摩擦力を合わせた杭頭支持力に関する群杭効果は、杭間隔が 3~4 倍で最大値を示し、その値は 1.3 となると報告している。

青山ら¹³⁾¹⁴⁾は、砂地盤における群杭（閉端杭）を用いた実験を行っている。実験によれば、群杭における杭先端の地盤鉛直変形は、単杭による地盤鉛直変形の重ね合わせによる分布とほぼ同程度であり、群杭特有の相互作用の影響は小さいと報告している。

以上より、砂地盤における杭の先端支持力は、周面摩擦を考慮しなければ、群杭特有の相互作用の影響は少ない。また、摩擦を考慮した場合は、群杭効率は 1.0 を上回り、例えば、1.3 程度の値が報告されている。これらを鑑みて、本研究では、砂質土地盤を対象に、主に単杭の杭の先端支持力（摩擦を考慮しない）に着目する。

なお、粘性土地盤の杭の鉛直支持力（周面摩擦力を含む）の群杭効率は、1 より小さくなると言われている¹⁰⁾。また、段野¹⁵⁾らは、粘性土地盤における実杭先端部をモデル化した単杭模型ならびに杭間隔の 1.5 倍と 5.0 倍の 6 本群杭模型に対して、遠心力模型実験及び土-水連成 FEM による数値解析を行い、杭の鉛直支持力や沈下量の群杭効果を検証している。その結果、短期的な支持力に注目すると、過剰間隙水圧により上載荷重を支持するため、杭間隔の 5.0 倍で群杭効果は発現しない。しかし、長期的には過剰間隙水圧の消散により沈下が進行するため、杭 1 本あたりの支持力が同じでも、群杭では単杭より大きな沈下が生じると報告している。

2. 本研究で提案する杭のモデル化

既往の有効応力解析²⁾では、図-1(a)に示すように杭の軸直角方向の地盤反力を杭-地盤相互作用ばね要素⁴⁾でモデル化し、杭の軸方向の地盤反力は、杭先端と地盤の節点の水平及び鉛直方向の変位を同一とする（杭先端を地盤に結合する）方法（以下、「方法A」という。）がよく用いられる。しかし、このモデル化では必ずしも適切な杭軸方向の地盤反力が得られない場合がある。

そこで、本論文では、杭軸方向の地盤反力のモデル化に着目し、方法Aに杭の先端支持力（非線形ばね要素）及び周面摩擦力の機能を加えた方法（以下、「方法B」という。）を検討対象とした。方法Bのモデルの概要図を図-1(b)に示す。なお、杭の周面摩擦力のモデル化に関

しては、既報告¹⁶⁾において、杭-地盤相互作用ばね要素に杭の周面摩擦力の機能を導入した方法の適用性を確認している。そこで、本研究では、方法Bのうち、杭の先端支持力のモデル化に関して、以下の手順で検討を行った。

- ① 杭の遠心力模型実験（杭の押し込み試験）による実現象の把握
- ② 杭の遠心力模型実験の三次元解析による再現
- ③ 二次元解析に適用可能な、杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案
- ④ 本研究で提案する非線形ばね要素を用いた事例解析による適用性検証

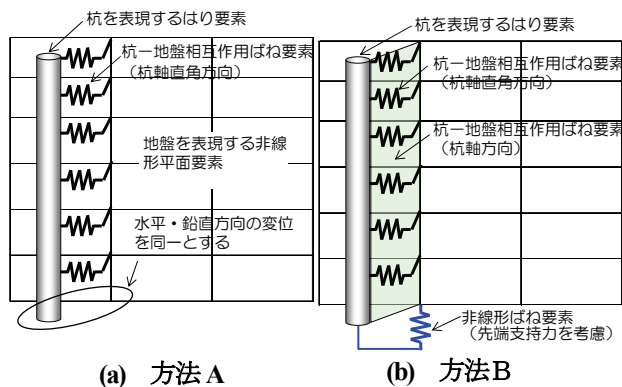


図-1 杭と地盤の相互作用のモデル化¹²⁾

3. 杭の遠心力模型実験

(1) 実験概要

実験¹⁷⁾は京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて 40g 場で、図-2 に示す真鍮製中空杭（直径 12mm、厚さ 0.8mm）を砂層に押し込む実験を行った。なお、真鍮製中空杭の先端は閉塞されており、図-2 に示す 4 つの位置に 4 枚づつひずみゲージを取り付けている。実験には豊浦標準砂を用い、支持層を相対密度 90% また 60% に、表層を相対密度 60% に設定した。実験ケースを表-1 に示す。固定土槽の大きさは長さ 450mm、奥行き 150mm、深さ 300mm である。支持層の地盤を空中落下または水中落下で作成した後、杭は支持層に 1.0D（直径：12mm）根入れし、表層の地盤を空中落下または水中落下で作成することにより設置した。実験モデル、センサー配置を図-3 に示す。

鉛直载荷試験は、真鍮製中空杭を、固定土槽に設置した電気式アクチュエーターで 0.02mm/s の速度で 12mm(1.0D)程度貫入した時点で終了とした。杭頭変位及び杭頭荷重は、鉛直载荷装置に取り付けたレーザー変位計及びロードセルで測定した。

(2) 実験結果

杭先端から 15mm の位置（d 地点）のひずみデータよ

一般社団法人 FLIP コンソーシアム 平成 25 年度成果報告書
 表-2 に示す真鍮製中空杭の諸元を用いて算定した軸力を杭先端荷重とした。周面摩擦力は、杭先端荷重とロードセルで計測した杭頭荷重の差から算定した。そのため、本検討における杭先端荷重は、先端支持力（支持層の周面摩擦力含む）と表層地盤下端から 3mm の周面摩擦力の和に相当し、周面摩擦力は杭頭から杭先端より 15mm 上方までのものである。なお、本検討では、杭先端から 15mm の間の摩擦力を先端支持力に含めて取り扱うことにした。

以降の変位、荷重は実物スケールの値を示す。

各ケースで得られた周面摩擦力と杭頭変位の関係を図-4 に示す。ケース 2 の結果はひずみゲージの値がばらついているため、周面摩擦力がばらついている。しかし周面摩擦力は、杭頭変位が小さいところで、急激に大きくなり、その後は杭頭変位とともに徐々に大きくなっている。また、杭の周面摩擦力は有効拘束圧が大きい気中（ケース 1）の方が大きくなると考えられたが、気中（ケース 1）と水中（ケース 2）で周面摩擦力はほとんど変わらない結果が得られた。

各ケースで得られた杭先端荷重と杭頭変位の関係を図-5 に示す。全てのケースで杭頭変位が大きくなるにつれて杭先端荷重は大きくなっている。相対密度(D_r)と杭先端の有効拘束圧を考慮すると杭先端荷重の大きさは下記の順序となることが予想された。

ケース 1（気中, 支持層の $D_r=90\%$ ） > ケース 2（水中, 支持層の $D_r=90\%$ ） > ケース 3（水中, 支持層の $D_r=60\%$ ）

しかし、実験結果ではケース 1 とケース 2 が逆転し、ケース 2 で得られる杭先端荷重が最も大きくなった。ケース 2 は、水中落下とコテでの押し固めた結果、相対密度が 90% 以上になっていたため、杭先端荷重が大きくなったと考えられる。

各ケースで得られた杭先端荷重の負担率と杭頭変位の関係を図-6 に示す。ここに、杭先端荷重の負担率は式(1) で定義する値である。ケース 1 とケース 2（ともに支持層の相対密度が 90%）は同じ傾向を示し、負担率 90% 程度に漸近する結果となった。これは、田村ら¹⁸⁾が実施した単杭の結果(気中)とほぼ同等の結果である。

一方、ケース 3（支持層の相対密度が表層を同じ 60%）は、負担率 80% 程度に漸近する。

杭先端荷重の負担率=(杭先端荷重)/(周面摩擦力+杭先端荷重)×100 (1)

(3) まとめ

杭の軸方向の挙動を適切に表現できる解析モデル(杭の周面摩擦や杭先端の支持構造のモデル)の作成の一助とするために、杭の鉛直方向載荷実験を行った。杭先端

荷重の負担率（ケース 1, 気中）は、田村ら¹⁸⁾が実施した単杭の結果(気中)とほぼ同等の結果が得られた。杭先端荷重の負担率は、支持層と表層の相対密度の組合せにより異なる傾向を示すが、気中と水中ではほぼ同じ傾向を示すことがわかった。

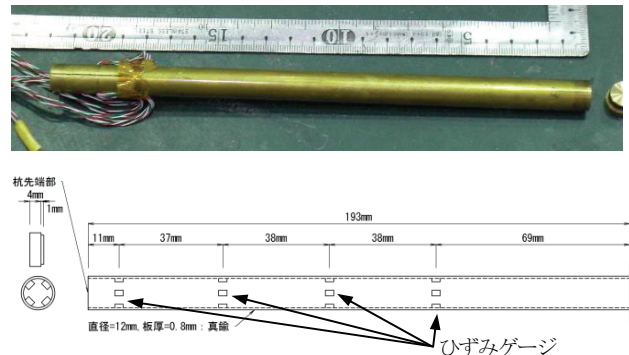
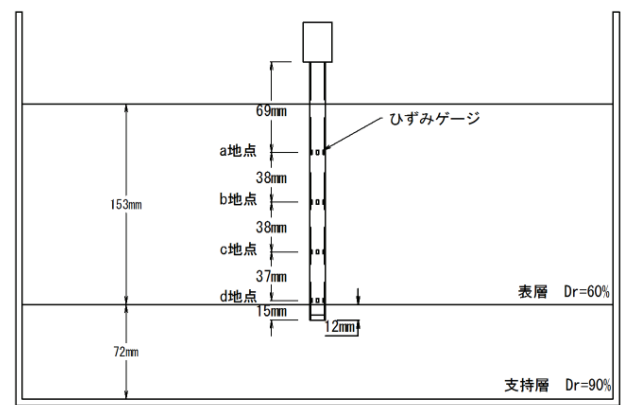
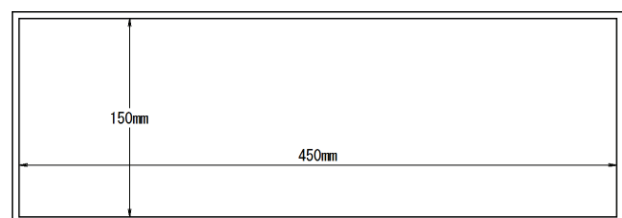


図-2 真鍮製中空杭



(a) 断面図



(b) 平面図

図-3 実験モデル及びセンサー配置

表-1 実験ケース

ケース	気中or水中	土層(相対密度)	
		表層	支持層
ケース1	気中	60%	90%
ケース2	水中	60%	90%
ケース3	水中	60%	60%

表-2 真鍮製中空杭の諸元

ヤング係数 E (kN/m ²)	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	断面積 A (mm ²)	EA (kN)
1.050E+09	12.0	0.8	28.15	2.956E+04

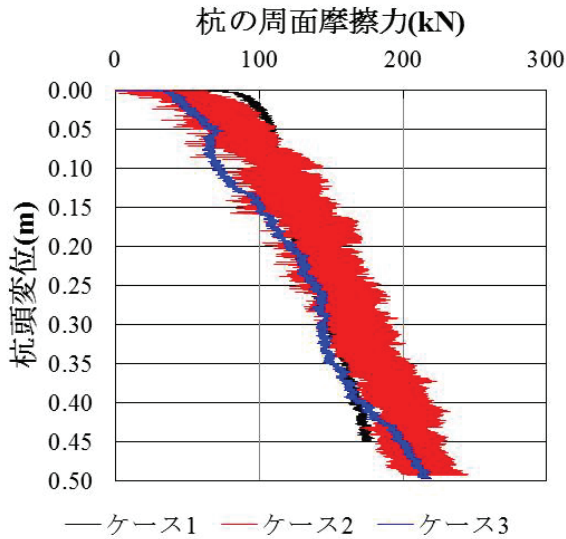


図4 杭頭変位と周面摩擦力

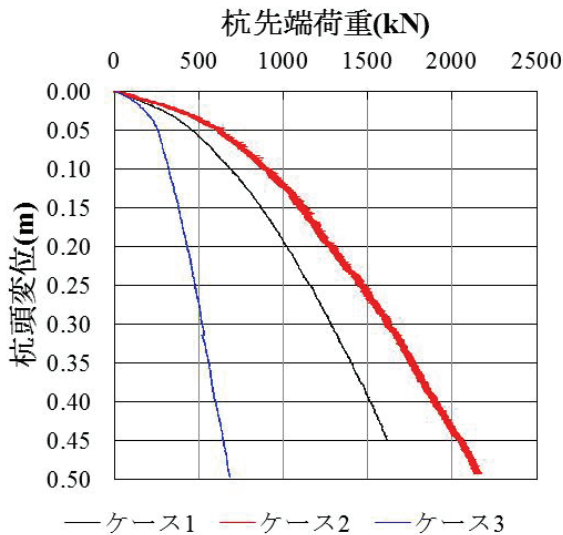


図5 杭頭変位と先端荷重

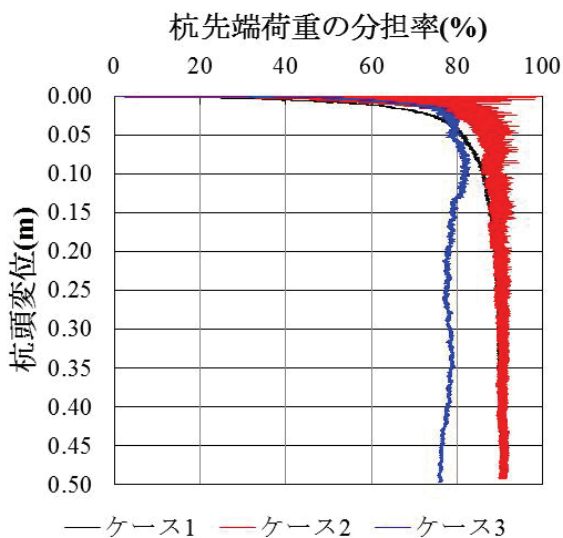


図6 杭頭変位と杭先端荷重の分担率

4. 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション

(1) 解析条件

本検討では、杭の遠心力模型実験を対象とした三次元再現解析を実施した。なお、三次元解析は FLIP 3D Ver1.4.0を用いた³⁾¹⁹⁾。

(2) 対象事例

本検討では、曾根らが行った遠心力模型実験¹⁷⁾を対象とした。実験は固定土槽（高さ 12m, 幅 18m, 奥行き 6m (実物換算)）に真鍮製の中空の杭（直径 0.48m (実物換算)）を押込む実験である。地盤材料は豊浦標準砂を用いた。本検討では、飽和地盤中の杭の先端支持力に着目するため、相対密度 60%と 90%の二層の飽和地盤のケース 2 対象とした。

(3) 解析条件

解析用地盤物性値は等価 N 値（相対密度から Meyerhof の式で変換）に基づき、簡易設定法（改訂版）¹²⁾から設定した（表-3）。また、杭の物性値を表4に示す。杭への押込み力は杭頭に強制変位を与えることにより模擬した。

三次元解析は、実験結果の再現を目的として実施した。解析は完全排水条件（以下、「排水条件」という。）と非排水条件の両者で行った。解析範囲は 1/4 モデルとした（図-7）。なお、座標系は鉛直方向 z 軸、水平方向 x 軸、 y 軸とした。各土層は Mohr-Coulomb の破壊基準を満たす三次元マルチスプリング要素を用いてモデル化した。杭は板曲げ要素（ x 方向および y 方向変位は固定）でモデル化し、杭と地盤間にはジョイント要素を設け、杭先端全節点と杭の底面に接する位置にある地盤全節点の z 方向変位はすべて同一とした。境界条件は側方（ xz 平面、 yz 平面）を鉛直ローラー、底面は固定境界、対称面上（ $y=0$ ）は y 方向変位、 x 軸回り、 z 軸回りの回転変位を固定、対称面上（ $x=0$ ）は x 方向変位、 y 軸回り、 z 軸回りの回転変位を固定とした。なお、本検討は杭の先端支持力に着目するため、ジョイント要素の摩擦力はゼロとした。

表-3 解析用地盤物性値

土層名	物理特性		動的変形特性							
	質量密度 ρ (t/m^3)	間隙率 n	せん断弾性係数 G_{na} (kPa)	体積弾性係数 K_{na} (kPa)	基準化拘束圧 (kPa)	拘束圧依存の係数 m, k, n, K	ポアソン比 ν	粘着力 C (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg.)	履歴減衰上限值 h_{max}
上層 ($D_r=60\%$)	1.93	0.430	8.969E+04	2.339E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	39.86	0.240
下層 ($D_r=90\%$)	1.99	0.390	1.511E+05	3.940E+05	98.0	0.5	0.330	0.0	42.05	0.240

表-4 杭の物性値

部材	杭径 D (m)	肉厚 t (m)	奥行き幅 (m)	変形係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (kPa)	断面積 A (m^2)	断面二次モーメント I (m^4)	備考
真鍮杭	0.48	0.03	6.0	1.050E+09	0.35	3.889E+08	4.50E-02 7.51E-03	1.14E-03 1.89E-04	杭1本あたり 奥行き1mあたり

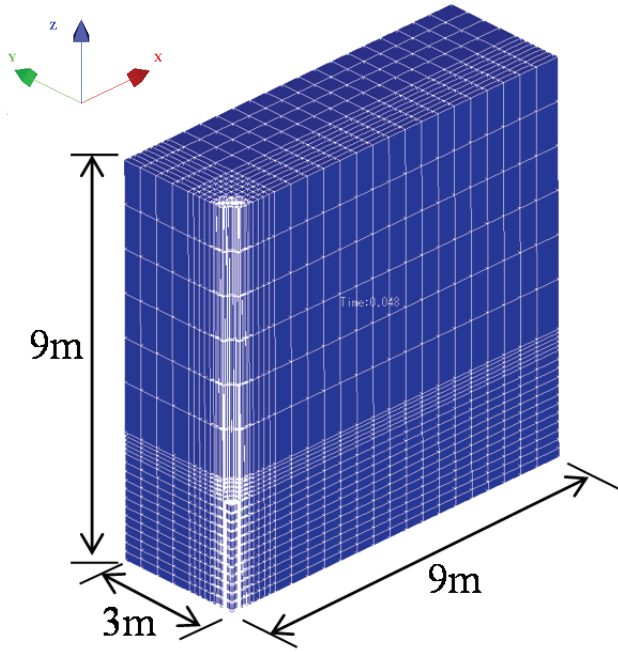
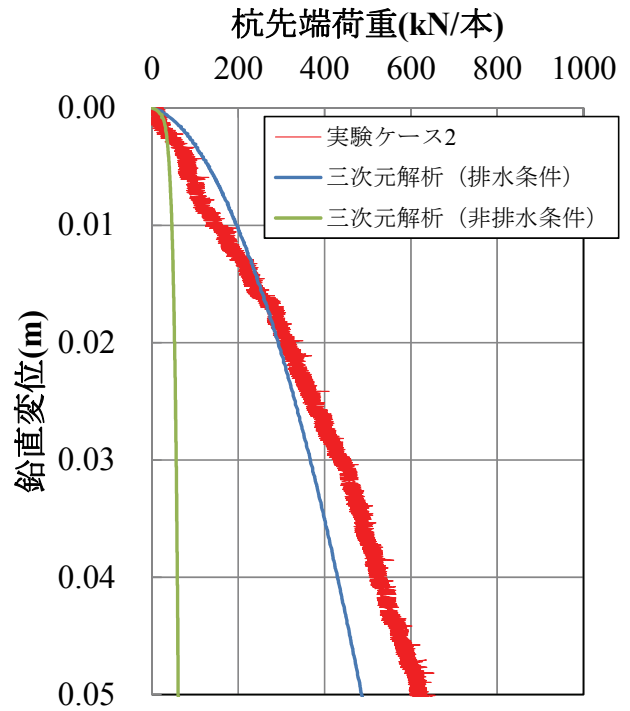


図-7 解析モデル (三次元解析)



※実験結果, 解析結果には周面摩擦の影響を含まない.

図-8 三次元解析結果 (荷重-変位関係)

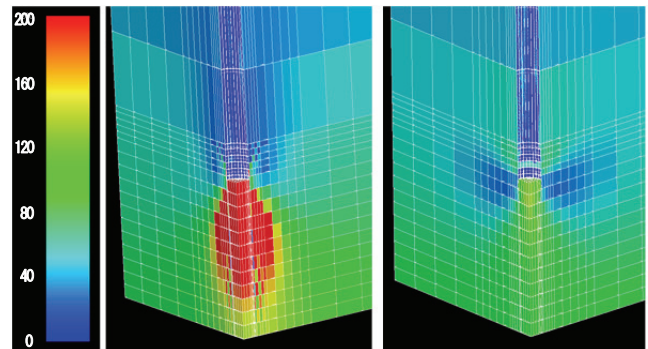
(4) 解析結果

三次元解析は排水条件と非排水条件による二種類の比較を行った。杭の荷重変位関係を図-8 に示す。解析における支持力 (杭径の 10% の変位時の荷重) は「排水条件 > 非排水条件」となり、解析 (排水条件) による支持力は実験による支持力とほぼ同等の結果となった。解析 (排水条件) の場合、杭の押し込み力による杭先端地盤の有効拘束圧が大きくなるため、地盤の強度が大きくなる。しかし、解析 (非排水条件) の場合、杭の押し込み力を杭先端の地盤要素と間隙水要素の両方で負担するため、有効応力があまり増大せず、地盤の強度が排水条件より小さくなったと考えられる。杭の鉛直載荷試験は載荷速度や透水性の影響を受けると考えられるが、本検討における解析は排水条件で行うことが適切であったと考えられる。

杭先端地盤の変形図 (杭径の 10% の変位時)、有効鉛直応力 σ'_z と最大せん断ひずみ γ_{max} を図-9、10 に示す。杭先端地盤の鉛直応力やせん断ひずみの集中する領域は、圧力球根の形状を示している。このケースでは、圧力球根状に応力やひずみが集中する範囲は深さ方向や奥行き方向に杭径 D の 2~3 倍程度である。

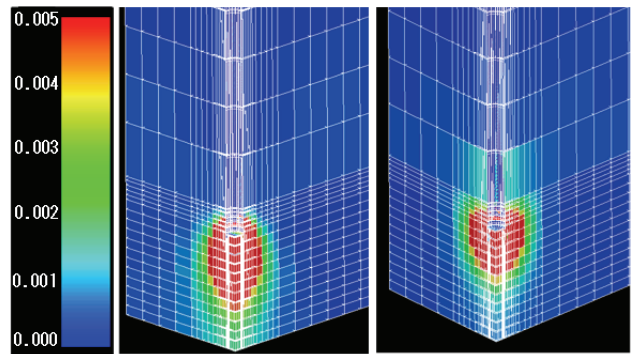
(5) まとめ

杭の遠心力模型実験 (杭の押し込み試験) を対象に三次元解析を行い、排水条件の解析では杭の先端支持力の荷重変位関係を概ね再現することができた。



(単位: kN/m²) (a) 排水条件 (b) 非排水条件

図-9 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と有効鉛直応力 σ'_z)



(a) 排水条件 (b) 非排水条件

図-10 三次元解析結果 (変形図(杭径の10%)と最大せん断ひずみ γ_{max})

5. 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の提案

(1) 非線形ばね要素の提案

杭の先端支持力を模擬するため、Hirayama⁸⁾の提案する杭先端抵抗 q ～杭先端変位 z_e の関係をを用いた非線形ばね要素を提案する。Hirayama⁸⁾の提案する杭先端抵抗 q ～杭先端変位 z_e の関係は、式(2)、図-11に示す双曲線型の式で表すことが出来る。

$$q = \frac{z_e}{a_e + b_e z_e} \quad (2)$$

ここに、 $a_e = \frac{z_{ref,e}}{q_{ult}} = \frac{0.25D_e}{q_{ult}}$, $b_e = \frac{1}{q_{ult}}$

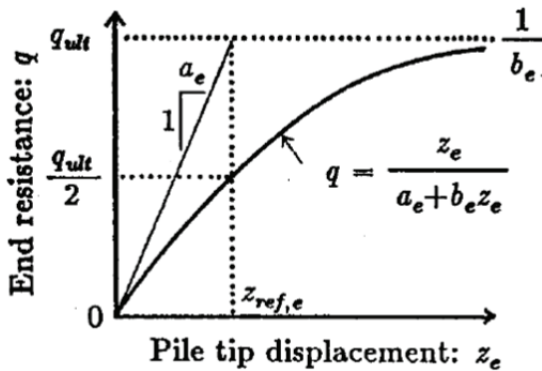


図-11 杭先端における抵抗と変位の関係⁸⁾

基準変位 $z_{ref,e}=0.25D_e$ (m)は、砂質土に対するものである。 D_e は杭の直径である。また、 q_{ult} は杭先端抵抗の極限值である。さらに、双曲線の形を決めるには、例えば、 $z_e=0.1D_e$ (m)の時の杭先端抵抗 q_{01} (kN/m²)が必要である。実際に、支持層の相対密度別に、4章で妥当性を検証した三次元解析結果に基づいて、双曲線の形を決めるのに必要なパラメータを算定すると、表-5に示すようになる。なお、相対密度60%と75%の結果は、3章杭の遠心力模型実験のケース2と同じ条件で、支持層の相対密度のみ変更した三次元解析の結果である。

表-5の a_e と b_e を用いて、杭先端抵抗(kPa)～杭先端変位

表-5 三次元解析結果に基づく双曲線のパラメータ

杭の直径	De=	0.48(m)		
杭の断面積	A=	0.181(m ² /本)		
ケース名	Case1	Case2	Case3	
支持層相対密度	60%	75%	90%	単位
q_{01}	1763	2183	2628	(kPa)
a_e	1.947E-05	1.572E-05	1.306E-05	(m/kPa)
b_e	1.622E-04	1.310E-04	1.088E-04	(1/kPa)
q_{ult}	6164	7631	9188	(kPa)
$A*q_{ult}$	1115	1381	1663	(kN/本)

(m)関係図を算定した(図-12)。

$z_e=0.05D_e$ (m)の時の杭先端抵抗 q_{005} (kPa)の値に基づいた杭先端抵抗～杭先端変位関係を図-13に示す。この図によれば、双曲線近似の精度は、 $z_e=0.1D_e$ (m)の時の杭先端抵抗 q_{01} (kPa)を用いた方が良く考えられる。

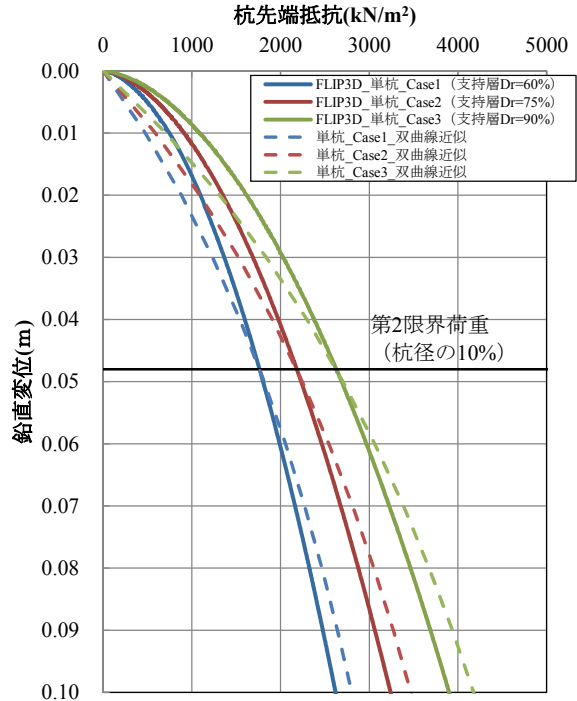


図-12 杭先端抵抗～杭先端変位関係 ($z_e=0.1D_e$)

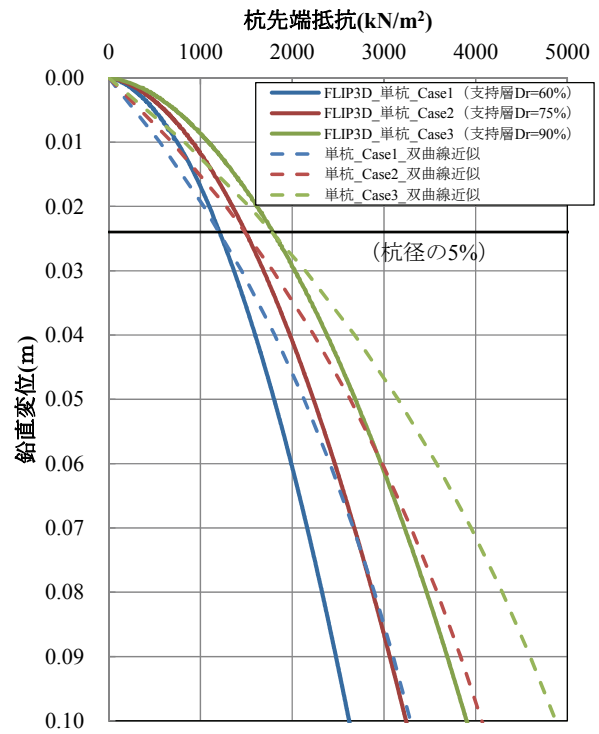


図-13 杭先端抵抗～杭先端変位関係 ($z_e=0.05D_e$)

以上の結果から、Hirayama による双曲線は、杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の骨格曲線に用いることができると考えられるこのばねのパラメータは、杭径 $D_d(m)$ 、 $q_{01}(kPa)(0.1D_d)$ 押し込み時の杭先端抵抗)、 $Z_{ref}(=0.25D_d)$ および、ばね力等に乗ずる係数 PFACT である。なお、Hirayama の定式化は、杭先端抵抗(kPa)を用いているが、閉端杭を前提に杭先端支持力(kN/本)に置き換えても、同様の定式化が可能である。

(2) 双曲線型の非線形ばね要素の導入

杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素は、Hirayama による杭先端抵抗(kPa)と杭先端変位の双曲線型の関係を、杭先端と地盤間に配置する杭軸方向ばねの抵抗力(kN/本)～変位差の関係として適用するものである。ただし、地盤が軟らかいと、非線形ばねの地盤側節点も動きやすく、杭と地盤間の変位差が発生しないことによって、Hirayama が提案する抵抗力が正しく発揮されない場合もあるので、注意が必要である。また、非線形ばねの履歴挙動に関して、除荷勾配は初期勾配と同じと仮定し、引き抜き力には抵抗しないものとする。つまり、変位差が引っ張り側になった場合には、ばねの抵抗力は 0 になるように設定しており、除荷の際は初期勾配で戻すが、抵抗力が正(引張)になることはない。

杭先端の非線形ばねの地盤側節点変位を拘束した場合の、同ばねの挙動の例を図-14 に示す。

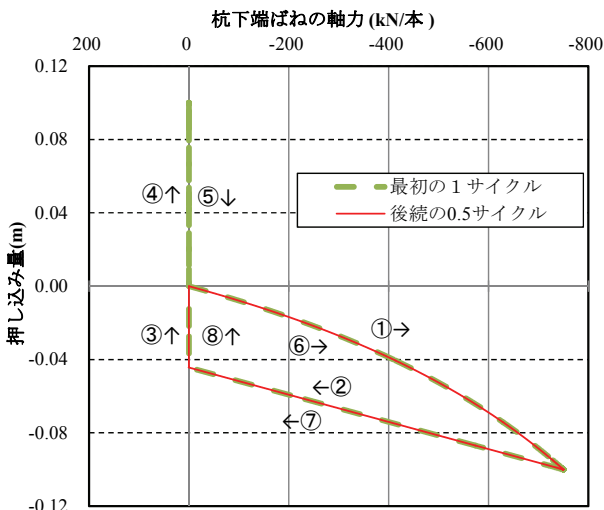


図-14 双曲線型杭先端非線形ばねの挙動の例

(3) 杭の鉛直載荷試験を対象とした試解析

次に、遠心力模型実験における杭の鉛直載荷試験¹⁷⁾のケース 2(水中)に対応した試解析を、杭先端の非線形ばね要素を用いて実施した。解析モデルを図-15 に示す。解析モデルの杭先端には非線形ばね要素を設けて、杭と地盤を結合し、杭頭を強制変位で押し込んだ。なお、杭の周面摩擦力は考慮していない。

地盤の剛性はメッシュサイズの影響も受けるので、本検討では、通常の解析で使用される可能性のある 1m 程度のメッシュサイズとした。解析モデルの奥行き方向幅は実験に使用した土層の奥行き方向幅 6m を主に採用した。また、間隙水は完全排水条件としたが、一部では非排水条件の結果も示す。杭頭に強制変位を与えて徐々に押し込み、その時の杭頭での反力を求めて、両者の関係を描いた。これらの図を、図-16～図-17 に示す。これら各図の「双曲線近似」の線は、対応する三次元解析結果に基づいて求めたパラメータ a_e と b_e を用いて描いたもので、いわば、ターゲットである。図-16 は、杭先端の非線形ばねの地盤側節点の自由度を単点拘束した場合と地盤節点に接続した場合を比較したものである。両者の荷重変位関係は一致し、双曲線近似にも一致した。まず、前者の結果が双曲線近似に一致したのは、杭先端の非線形ばねが正しく実装されていることを示す。また、後者が双曲線近似等に一致したのは、地盤の奥行き方向幅が 6m と大きく、かつメッシュサイズも 1m と比較的大きめで、地盤要素が十分に固いためであると思われる。図-17 は、基盤層の相対密度を 90% と 60% の比較で、解析は、それぞれの双曲線近似と一致した。図-18 は、地盤の奥行き方向幅を変化させて見たもので、奥行き方向幅が 6m の場合は、地盤は十分に固く、双曲線近似に一致したが、奥行き方向幅が 1m の場合は、地盤要素が柔らかくなり、所定の支持力に達しなかった。さらに、図-19 は、非排水条件下で杭の鉛直載荷を行った結果である。非排水条件の場合、杭が地盤を押し出すことにより地盤の有効拘束圧が増加するのではなくて、主に、応力の増分は間隙水が負担するので、完全排水条件の場合に比べて、地盤の剛性等は大きくならない。したがって、杭先端の非線形ばねの地盤側節点は、沈みやすくなり、解析では地盤幅の低下に伴い、所定の杭の先端支持力を発揮することが出来なくなっている。

すなわち、杭先端の非線形ばねと地盤要素は、いわば直列ばねを形成し、杭先端の支持力は、地盤要素の剛性等の影響も受けることになる。したがって、本提案の非線形ばねの使用に当たっては、地盤要素の方の挙動も考慮に入れる必要がある。

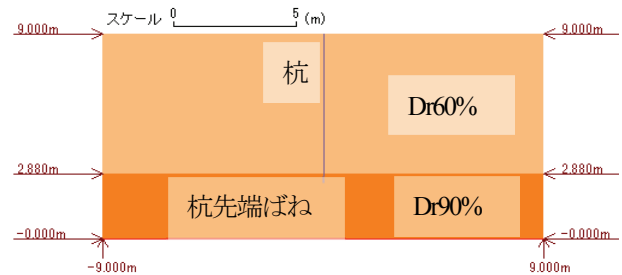


図-15 杭先端の非線形ばね挙動確認用解析モデル

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

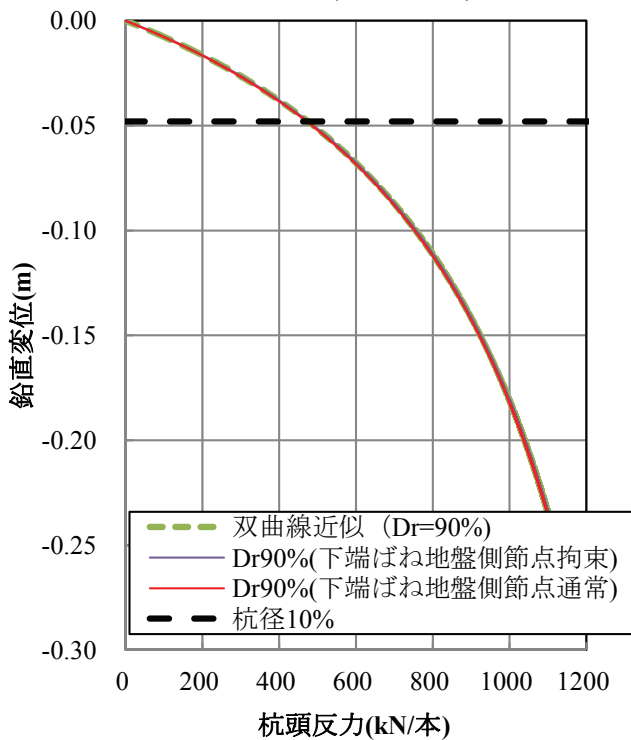


図-16 杭先端の非線形ばねの地盤側節点を拘束した場合と地盤側節点につなげた場合の比較

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

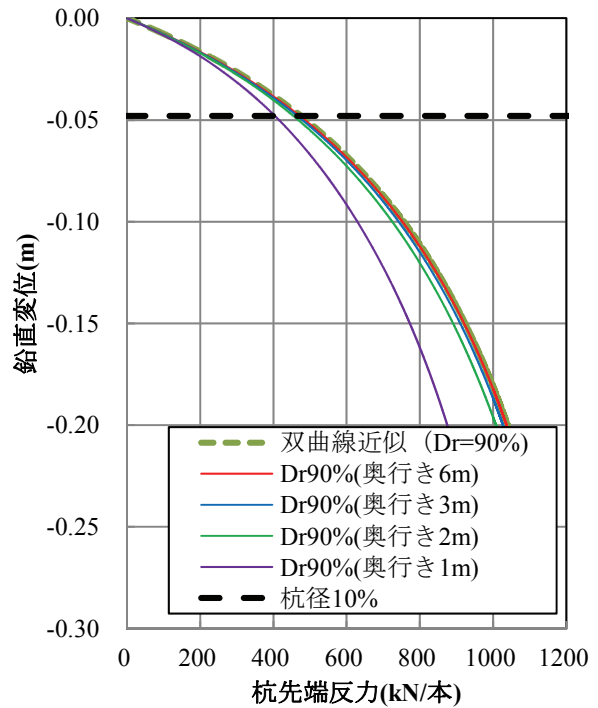


図-18 解析モデルの奥行き方向幅を変えた場合の比較 (完全排水条件の場合)

杭頭沈下量～杭頭反力(完全排水)

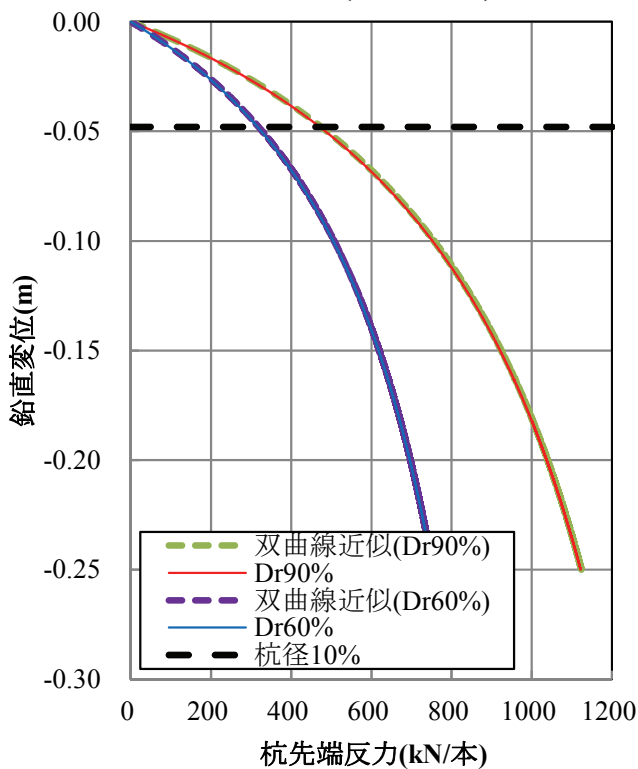


図-17 基盤層のDrが90%と60%の場合の比較

杭頭沈下量～杭頭反力(非排水)

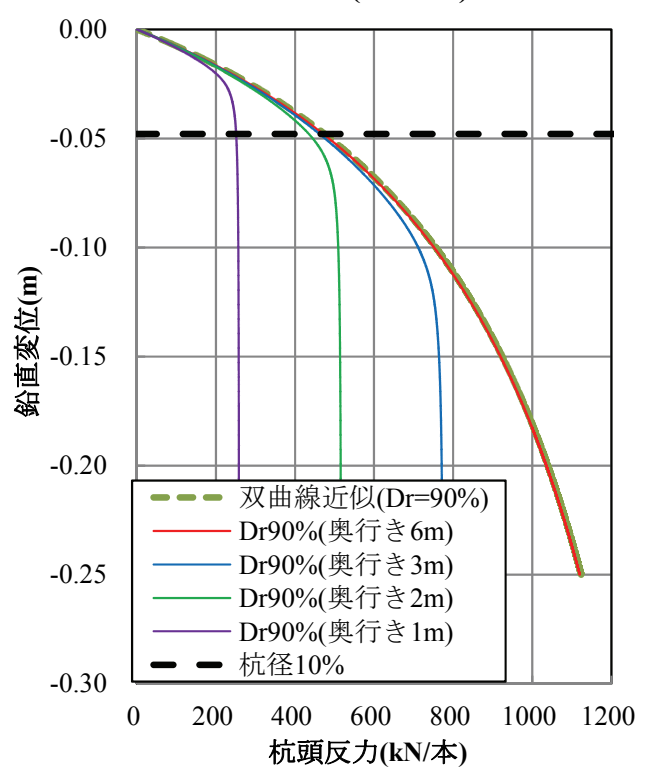


図-19 解析モデルの奥行き方向幅を変えた場合の比較 (非排水条件の場合)

6. 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の事例解析 (その1)

(1) 対象事例

本検討では、1993年釧路沖地震において被災した漁港埠頭南側岸壁（設計震度 0.2）の事例²⁰⁾²¹⁾を用いている。漁港埠頭は、前面は Z 型鋼矢板、控え杭は鋼管杭による組杭式の岸壁である（図-20）。鋼矢板は、背後地盤の液状化に起因して水深-3~4m 地点で折損している（図-21）。なお、矢板の折損した位置は、電気防食の陽極の設置に対応している²²⁾。

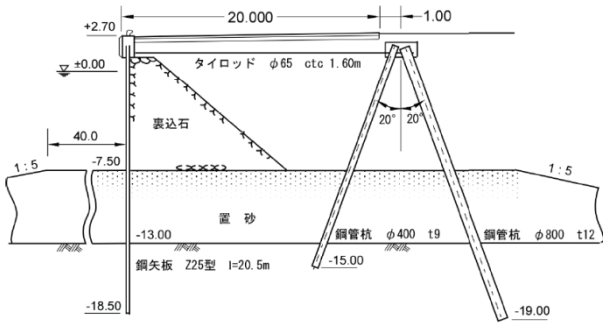


図-20 漁業埠頭南側岸壁断面図²⁰⁾²¹⁾

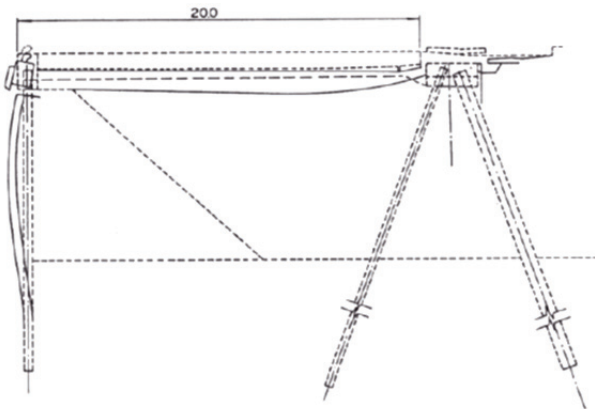


図-21 被災状況図²⁰⁾

(2) 解析条件

各土層はFLIPのマルチスプリング要素を用いてモデル化し、境界条件は側方、底面を粘性境界とした。また、解析用地盤物性値は等価N値に基づき、簡易設定法（改訂版）²⁾から設定した。前面矢板および控え杭は非線形ばね要素で、タイロッドは、圧縮には抵抗しない非線形ばね要素でモデル化した。解析ケースを表-6に示す。控え杭と地盤の相互作用のモデル化は、方法A（Case-A）と方法B（Case-B~E）（図-1）の2通りの方法を用いた。なお、方法Bに用いる杭の周面摩擦力の摩擦角 ϕ_f は15度、摩擦角 ϕ_f の調整係数 J_β を1.0と2.0の2通りとした。杭先端はFLIP Ver7.1.9-6-2_5testで実装した非線形ばね要素を設け、ばねの上限値はN値から算定した。解析モデルの奥行き方向幅は控え杭の設置間隔である1.6mとした。なお、解析に用いるRayleigh減衰定数 β は、地震応答解析結果

（非液状化状態）より水平応答変位量が収束するときの値とし、 $\beta = 0.0005$ とした。FLIPの構成則はtmp7法、非線形反復法は改良型を用いている。入力地震動は釧路沖地震時の波形のうち、主要動部分の17.5~46秒の28.5秒間を用いた（図-22）。

表-6 解析ケース

	押込み杭・引抜き杭	
	杭の先端支持力	杭の周面摩擦力
Case-A	杭の節点と同一の座標の地盤節点を結合	なし
Case-B	杭の節点と同一の座標の地盤節点を結合	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi_f = 15^\circ, J_\beta = 1.0$
Case-C	非線形ばね要素	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi_f = 15^\circ, J_\beta = 1.0$
Case-D	非線形ばね要素	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi_f = 15^\circ, J_\beta = 2.0$
Case-E	非線形ばね要素 (押込み杭先端の地盤節点のうち、杭径の3倍の範囲をY方向同一変位とする)	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi_f = 15^\circ, J_\beta = 1.0$
Case-F	非線形ばね要素 (押込み杭先端の地盤節点のうち、杭径の6倍の範囲をY方向同一変位とする)	杭-地盤相互作用ばね要素 $\phi_f = 15^\circ, J_\beta = 1.0$

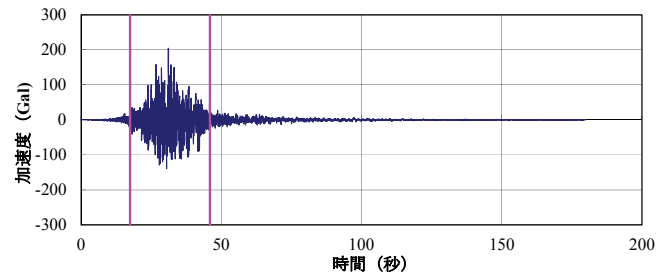


図-22 入力地震動

(3) 解析結果

加振終了時の変形図を図-23に、変形量の比較を図-24に示す。前面矢板の変位は方法による顕著な違いは見られなかった。また、控え杭の杭頭変位は「方法A（Case-A）<方法B（Case-B~E）」となった。特に、方法Bの前面矢板の変位は、周面摩擦角が大きいほど（Case-CとCase-D）、小さくなる傾向であった。方法Bの控え杭の変形は方法Aより大きくなる。この要因は、控え杭先端における杭と地盤の接続条件（方法AはXY方向を同一の変位とした方法、方法Bは非線形ばね要素を設けている）の違いによるものと推定される。実際の現象との整合性の優劣の比較は、被災事例の計測データの精度の問題のため難しい点があるものの、従来法（方法A）では変形が小さく評価されており、杭先端支持力の適切なモデル化が必要となる場合があることが示唆されたといえる。

最大断面力図を図-25、図-26に示す。前面矢板の断面力は、方法Aと方法Bでほぼ同程度である。方法Bによる控え杭（引抜き杭）の軸力分布は周面摩擦の影響により、杭頭から杭先端へ向けて小さくなる。控え杭の軸力は押込み杭、引抜き杭ともに「方法A>方法B」とな

杭軸方向挙動 WG

り、方法 B による全塑性モーメントは方法 A より大きくなる。

杭先端の非線形ばね要素の変位と力の関係を図-27に示す。Case-Cの軸方向力は他のケースより小さく、非線形ばね要素の地盤側節点が動いていることが想定される。そこで、非線形ばね要素の地盤側節点のうち、杭径の3倍の範囲をY方向MPC拘束した場合（Case-E）と杭径の6倍の範囲をY方向MPC拘束（Case-F）とした場合の算定を行った。Case-EとCase-Fの軸方向力はCase-Cより大きくなり、杭による作用力がばねに十分伝達されていると考えられる。

また、非線形ばね要素の挙動を確認するために、杭先端の非線形ばね要素の杭側節点（図-27）に非排水条件で集中荷重を静的に載荷し、押し込み杭先端の地盤の挙動を確認した。杭の軸方向変位差と軸方向力の関係を図-28に示す。

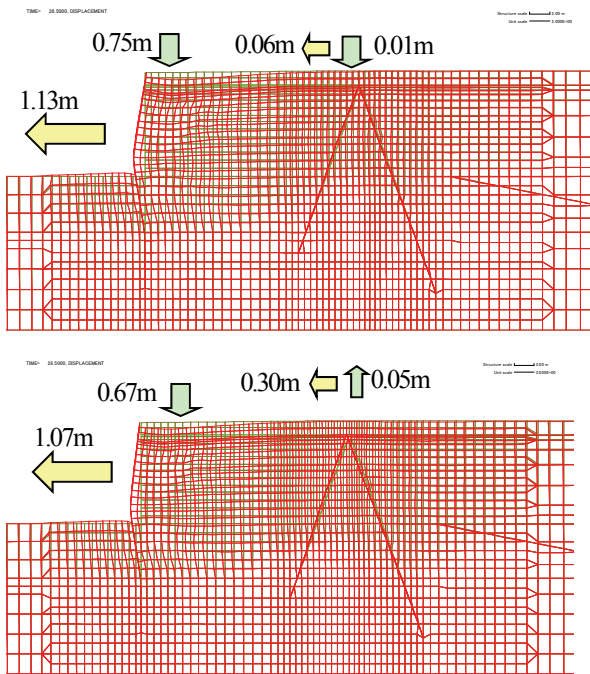


図-23 残留変形図（上段：Case-A,下段：Case-E）

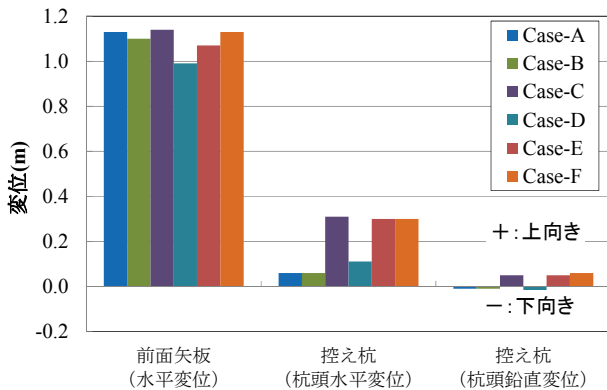


図-24 残留変位の比較

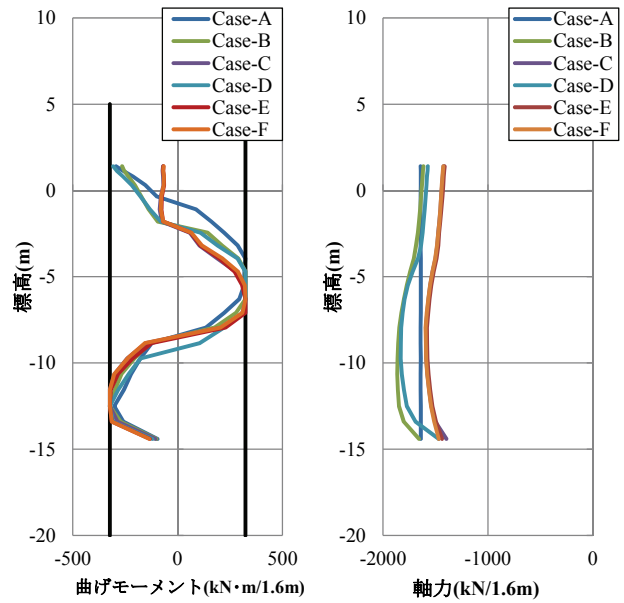


図-25 控え杭（押し込み杭）の最大断面力図

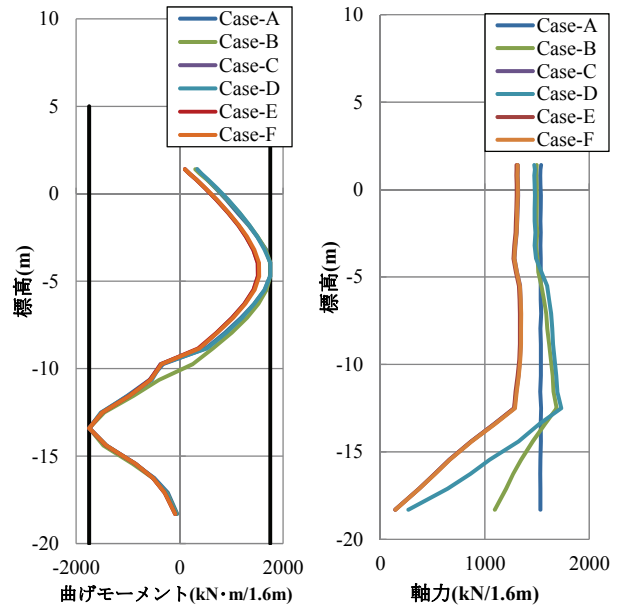


図-26 控え杭（引抜き杭）の最大断面力図

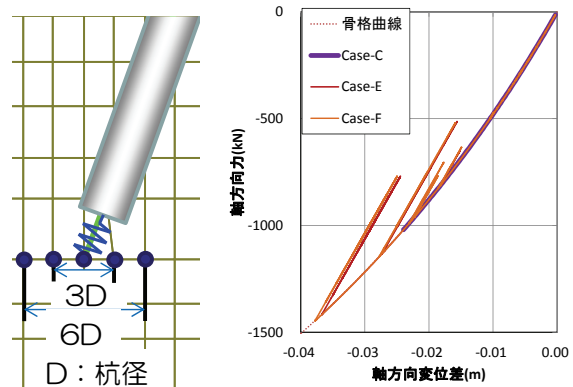


図-27 杭先端の非線形ばね要素の応答

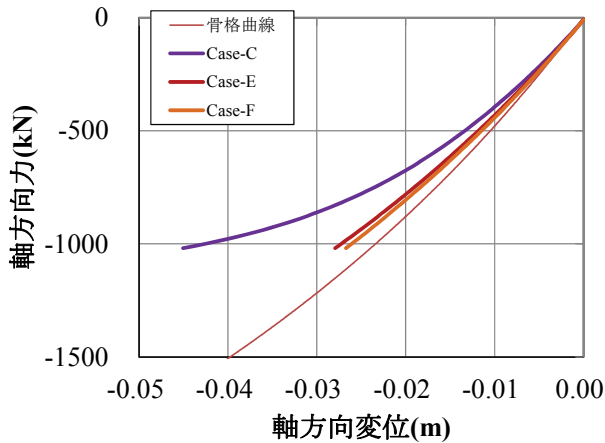


図-28 非線形ばね要素の杭側節点における軸方向変位と軸方向力の関係

(4) まとめ

杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の適用性に関して、1993 年釧路沖地震で被災した漁港埠頭南側岸壁を対象とした検討を実施した。前面矢板の挙動は方法 A と方法 B で顕著な違いは見られなかった。しかし、控え工の挙動には方法による違いがみられ、従来法（方法 A）では変形が小さく評価されるため、杭先端支持力の適切なモデル化が必要となる場合があることが示唆された。今後は、方法の違いによる特徴を詳細に分析する予定である。

7. 杭の先端支持力を模擬する非線形ばね要素の事例解析（その 2）

(1) 対象事例

杭先端支持力の荷重～変位関係を模擬するために開発された非線形ばね要素（以降、双曲線ばねと表記）の適用性について、図-29に示す高砂第2埠頭（控え組杭式鋼管矢板岸壁：60cm程度の残留変形が生じていた地点）を対象として検討を行った。

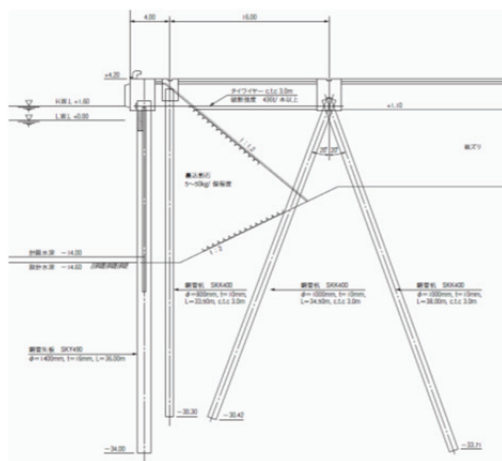


図-29 高砂第2埠頭²³⁾

(2) 解析条件

本検討で用いたモデルは、（独）港湾空港技術研究所と（一社）鋼管杭・鋼矢板技術協会の共同研究「東日本大震災における鋼材系港湾施設の被災原因究明」で作成したものである²³⁾。解析で用いた地層区分を図-30に示す。解析地盤定数は、設計時および地震後の土質調査（PS 検層を含む）結果を用いて表-7のとおり設定した。液化化に関するパラメータは、建築基礎設計指針に基づき設定した液化化抵抗を再現できるように要素シミュレーションで決定した。解析の諸条件を表-8に示す。入力地震動は2011年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定結果として（独）港湾空港技術研究所から公開されたデータ（工学的基盤の2E波）を用いた²⁴⁾。なお、解析はFLIP³⁾Ver719-6-2_5testを用いた。

(3) 解析結果

控え組杭の軸方向挙動のモデル化に関して表-9に示す組み合わせを対象に検討を実施した。Case-A, B は本ワーキング以前から用いられてきた方法で、Case-C～G は、杭先端支持力の特性を模擬するために今回新たに実装した双曲線ばねを適用したケースである。Case-F, G は、杭先端をフリーとした状態で押込・引抜解析を実施して、杭の支持力の設計値に整合する摩擦角を設定したケースである。押込杭に比べて引抜杭の摩擦角が小さいのは、堅固な Tf 層まで根入れされているためである。

鋼管矢板の残留変形形状を図-31に、控え組杭頂部・下端の残留変形を図-32に示す。周面摩擦を考慮せず杭先端を地盤と MPC 拘束した Case-A では、天端の変形量が 0.62m となったが、Case-B～G では 1.2～1.3m となって大きく結果が異なった。これは、図-32の引抜杭先端の変形から明らかなように、Case-B～G では引抜きが発生しているためである。Case-A と Case-B は、押込杭の圧縮力を地盤に剛に伝えるという意味では、ほぼ同等のモデル化であるが、引抜きが発生する Case-B では、Case-A に比べて押し込み杭の杭先端の変位が小さくなっている。双曲線ばねを用いた Case-C～G の控え組杭先端の変形量は、概ね Case-A と Case-B の中間的な値を示した。また、Case-F, G は周面摩擦の摩擦角を大きく設定しているが、摩擦力が上限に達して変形が進行する状態になってしまい、Case-C, E と明瞭な差は生じなかった。

Case-C～G は、鋼管矢板と控え組杭の変形に関して大きな差が生じなかったが、控え組杭の断面力図（図-33参照）を見ると、設定の違いで押し込み杭に生じる最大軸力に差が生じている。したがって、杭が塑性化するタイミングが異なる可能性があり、地震動のレベルによっては変形に関しても差が生じるものと考えられる。

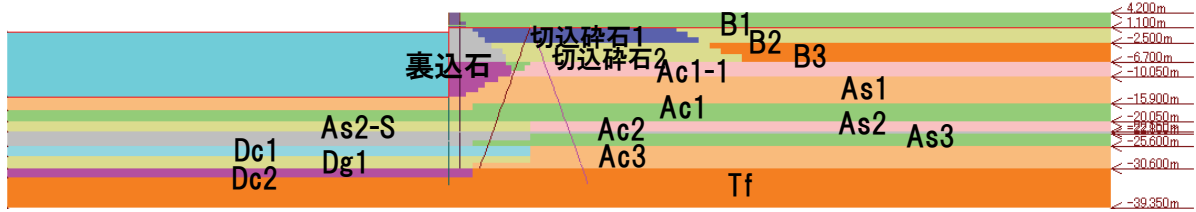


図-30 FLIP解析で用いた第2埠頭の地層区分²⁾

表-7 主な解析地盤定数

層名称	等価N値 N ₆₅	Fc %	σ_{ms}' kPa	G _{ms} kPa	K _{ms} kPa	ϕ_f deg.	C kPa	液状化パラメタ						η (間隙率)	h _{max}
								ϕ_p deg.	SI	WI	PI	P2	CI		
陸側															
B1	8.8	10.0	98.0	7.82E+04	2.04E+05	39.4		28	0.005	4.1	0.5	1.00	2.02	0.45	0.24
B2,B3	8.8	10.0	98.0	7.82E+04	2.04E+05	39.4		28	0.005	6.7	0.5	0.94	2.8	0.45	0.24
切込砕石1			98.0	3.22E+04	8.39E+04	39.3								0.45	0.24
切込砕石2			98.0	7.79E+04	2.03E+05	38.5								0.45	0.24
Ac1-1			98.0	4.91E+04	1.28E+05	30.0								0.55	0.20
As1	5.3	21.5	98.0	7.42E+04	1.94E+05	38.4		28	0.005	5.4	0.5	1	2.37	0.45	0.24
Ac1			98.0	3.11E+04	8.11E+04	30.0								0.55	0.20
As2	4.1	13.4	98.0	1.17E+05	3.05E+05	38.1		28	0.005	4.1	0.5	1.03	2.05	0.45	0.24
Ac2			98.0	1.02E+05	2.66E+05	30.0								0.55	0.20
As3	2.5	15.0	98.0	1.12E+05	2.91E+05	37.7		28	0.005	3.4	0.5	1.05	2	0.45	0.24
Ac3			98.0	1.00E+05	2.61E+05		124							0.55	0.20
Tf			98.0	3.75E+05	9.79E+05	44.5								0.45	0.24
海側															
As2-S	27.3	13.4	98.0	1.61E+05	4.20E+05	42.4		28	0.005	22.67	0.5	0.546	10.06	0.45	0.24
Dc1			98.0	4.91E+04	1.28E+05		144							0.55	0.20
Dg1			98.0	1.55E+05	4.04E+05	42.2		28	0.005	13.58	0.5	0.676	7.406	0.45	0.24
Dc2			98.0	4.02E+04	1.05E+05		133							0.55	0.20

表-8 解析条件

砂の力学モデル	<ul style="list-style-type: none"> マルチスプリング要素を利用 変相線を越えた応力空間におけるせん断仕事の負のダイレイタンシーへの寄与の扱いはtmp7法
運動方程式の解法	<ul style="list-style-type: none"> 改良型非線形反復計算法 レーレー減衰は背後地盤の1次固有周期に対して1%の減衰を与える設定 ($\beta=0.002$)
鋼管杭, 鋼矢板	<ul style="list-style-type: none"> バイリニアモデル (腐食量は現地計測に基づく, 2次勾配ゼロ, 軸力考慮にて全塑性モーメントを低減) 折れ曲がり点は鋼材強度の平均的な値とする 鋼管矢板 SKY490 の降伏応力は特性値×1.2倍 鋼管杭 SKK400 の降伏応力は特性値×1.26倍
タイ材	<ul style="list-style-type: none"> 非線形ばね要素でモデル化 (引張のみ伝える) ヤング率は現地計測値, 降伏強度は特性値×1.5倍
築堤解析	<ul style="list-style-type: none"> 第1段階: +6.7m以深の原地盤の自重解析 第2段階: +4.2mまでの自重解析 (タイ取付点を固定扱い) 第3段階: タイ取付点の反力開放, 岸壁前面の掘削解析, 残留水圧載荷 第4段階: 動的解析

表-9 解析ケース

	押込杭		引抜き杭	
	先端	周面摩擦	先端	周面摩擦
Case-A	MPC-xy	なし	MPC-xy	なし
Case-B	圧縮のみに効く非線形ばね*	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$	圧縮のみに効く非線形ばね*	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$
Case-C	双曲線ばね q _{ult} =設計値**	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$	なし	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$
Case-E	双曲線ばね q _{0.1} =設計値**	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$	なし	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=15^\circ$
Case-F	双曲線ばね q _{ult} =設計値**	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=30.8^\circ$ (摩擦を設計値に)	なし	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=13.5^\circ$ (摩擦を設計値に)
Case-G	双曲線ばね q _{0.1} =設計値**	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=30.8^\circ$ (摩擦を設計値に)	なし	Ks=10 ⁶ (kPa) $\phi=13.5^\circ$ (摩擦を設計値に)

* 圧縮時の傾きは10⁷kPa ** 5580kN/本

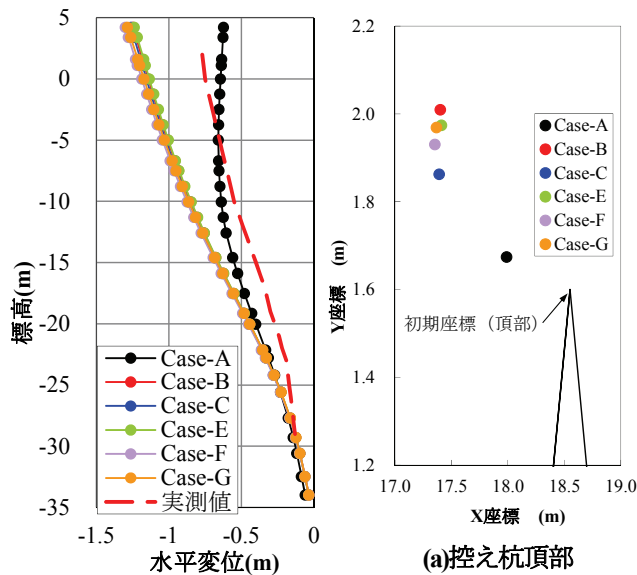


図-31 矢板の残留変位分布

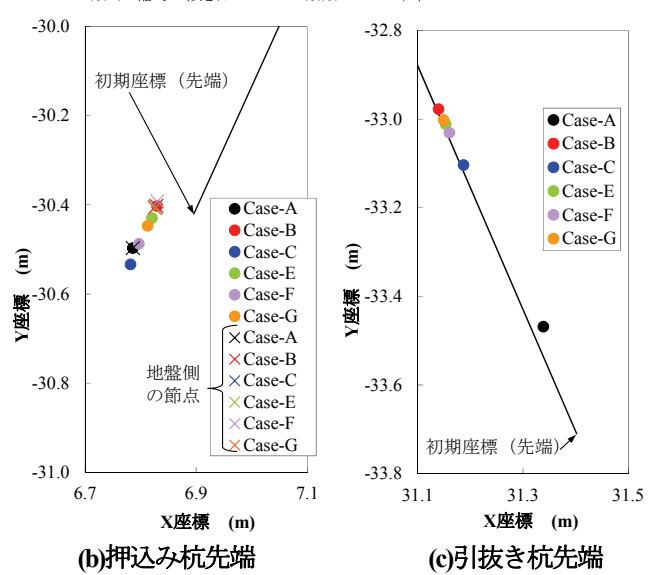
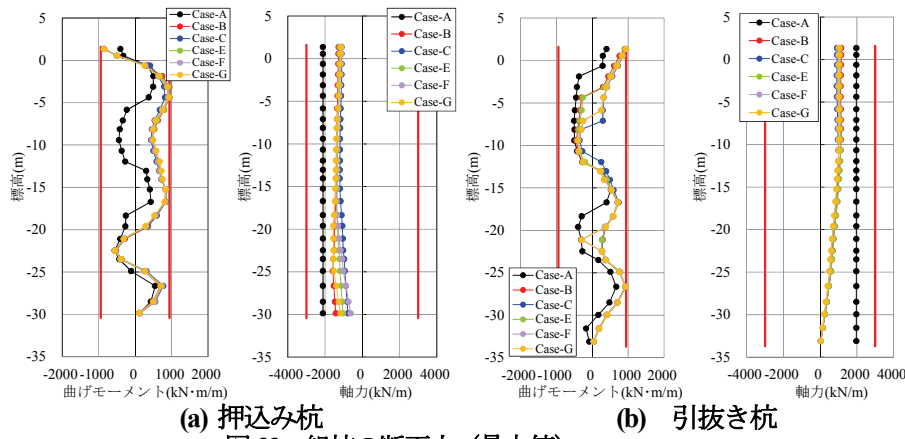


図-32 控え組杭の残留変形



(a) 押し込み杭
図-33 組杭の断面力（最大値）

(b) 引抜き杭

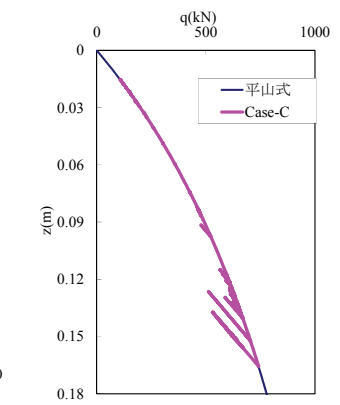


図-34 非線形ばね要素の応答

Case-Cの押し込み杭先端の双曲線ばねの荷重～沈下の履歴を、平山式⁹⁾による値と併せて図-34に示す。Case-Cの骨格曲線は、平山式に一致しており地盤側の節点の変位する影響は小さかった。

(4) まとめ

先端支持力の荷重～変位関係を模擬するために開発された双曲線ばねの適用性に関して高砂第2埠頭を対象として検討を実施した。杭先端のモデル化の違いによって、軸力の作用状況が異なり、岸壁の残留変形に影響を与える可能性があることを確認した。なお、変形に関する被災との整合度合いは、引抜きが生じないCase-Aがもっとも近い結果となった。したがって、設計で考えている以上に引抜きに関する摩擦力が強く働く可能性など、他の要因の検証が必要である。

8. 杭の先端支持力の群杭効果

本年度の検討では、三次元解析を用いて、杭の先端支持力の群杭効果の確認を行った。三次元解析による評価は2種類の解析（解析1、解析2）を行った。

解析1は、報告書2章で実施した三次元解析である。解析2は、報告書3章で実施した三次元解析及び二次元解析である。解析1では、杭の中心間隔を2.5D、5.0D（D：杭径）、支持層の相対密度を60%、75%、90%とするケースを実施した。解析2では、杭の中心間隔が比較的小さい2.5D（D：杭径）を対象にして、極端な杭配置（無限本×1列、無限本×無限列）を対象に群杭効率の検討を行った。

杭の極限先端支持力は、「杭先端直径の10%相当の杭先端沈下量が生じた時の荷重」と定義した。また、杭の群杭効率は、「群杭の支持力を単杭の支持力の合計（単杭の支持力×杭の本数）で除したもの」と定義した。各解析モデルの結果を表-10、表-11、図-35に示す。

解析1による杭の先端支持力の群杭効率は、支持層の相対密度や杭の中心間隔の影響を受けず、1.04～1.08とな

表-10 杭の極限先端支持力と群杭効率η（解析1）

支持層のDr (%)	杭の極限先端支持力と群杭効果η		
	1本杭	4本杭	
		杭間隔2.5D	杭間隔5D
60	319kN	333kN/本 η=1.04	338kN/本 η=1.06
75	395kN	419kN/本 η=1.06	420kN/本 η=1.06
90	476kN	515kN/本 η=1.08	510kN/本 η=1.07

表-11 杭の極限先端支持力と群杭効率η（解析2）

	解析による群杭効率	
	三次元解析	二次元解析
単杭	484kN/本	—
無限本×1列 (2.5D)	408kN/本 η=0.84	434kN/本 η=0.90
無限本×無限列 (2.5D)	747kN/本 η=1.54	466kN/本 η=0.96

った。

解析2（三次元解析）による杭の先端支持力の群杭効率は、「無限本×1列」の場合0.84、「無限本×無限列」の場合1.54となった。また、二次元解析の群杭効率は、「無限本×1列」の場合0.90、「無限本×無限列」の場合0.96となった。二次元解析による群杭効率は三次元解析より小さく、杭軸方向の変位の観点において二次元解析は三次元解析より安全側になることが示唆された。杭間隔が小さい問題では、二次元解析の杭先端のモデル化にあたって、杭先端において杭幅の地盤節点に鉛直方向の多点拘束を課すことや、モデル化された杭の載荷解析を行って、杭先端あるいは杭頭における荷重と変位の関係を確認するなど、細心の注意を要するといえる。

Vesic⁴⁵⁾は、極限先端支持力に関する群杭効率は、杭間隔には無関係にほぼ1.0であり、極限先端支持力に関す

杭軸方向挙動 WG

る群杭効果は存在しないと報告している。今回の三次元解析による群杭効率は、杭配置が「無限本×無限列」以外、Vesic の報告とほぼ同様の結果となった。

線形ばね要素を反映したFLIPのバージョンアップも準備中である。

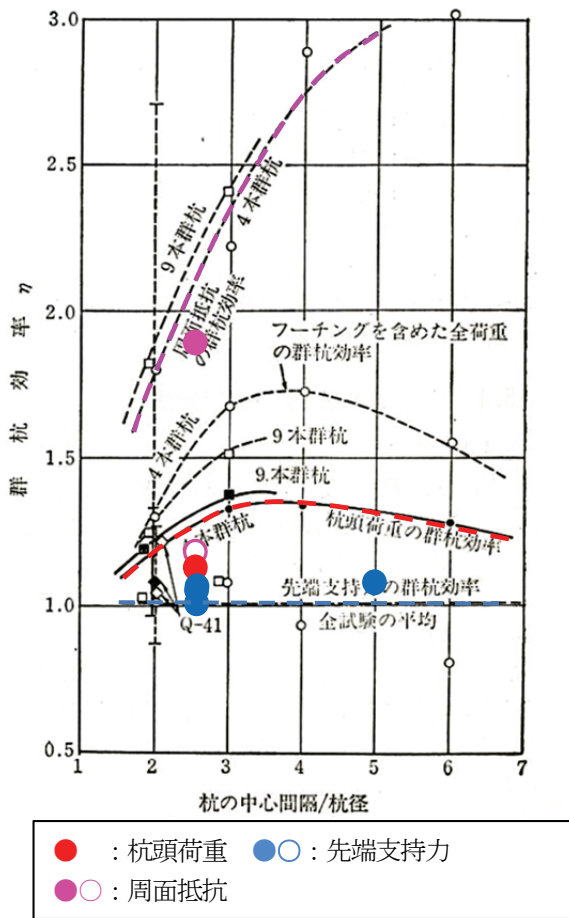


図-35 解析による群杭効率¹¹⁾¹²⁾に加筆

9. まとめ

本検討では、杭の遠心力模型実験を対象に三次元解析を行い、三次元解析は実験による杭先端地盤の荷重変位関係を適切にシミュレーションできることを示した。

また、三次元解析によれば、杭の先端地盤の荷重変位関係は、Hirayama⁸⁾の提案する双曲線関係で模擬することが示された。

以上の検討結果をもとに、Hirayama⁸⁾の提案する双曲線関係を用いた非線形ばね要素による杭の先端支持力のモデル化を提案し、杭の遠心力模型実験の再現解析と釧路港漁港埠頭南側岸壁の事例解析を行った。提案手法は実験結果をよく再現し、事例解析においても被災事例によく適合する結果となった。

以上の結果を踏まえて、現在の知見で妥当と考えられる杭周辺部のモデル化の方法を表-12に示す。なお、FLIPver7.1.9-6-2_4 (2012/9/6リリース) では、施工影響を考慮できる拡張ジョイント要素は、杭-地盤相互作用ばね要素に組み込まれている。また、本研究で提案した非

表-12 杭と地盤の相互作用のモデル化の方法

	方向	モデル化の方法
杭周囲のモデル化	杭の軸直角方向	杭と地盤の相対変位に応じた反力を与える杭-地盤相互作用ばね要素
	杭の軸方向	施工影響を考慮できる拡張ジョイント要素
杭先端のモデル化		非線形ばね要素でモデル化 (押し込み力のみ抵抗する)

謝辞: 本検討はFLIPの改良・機能拡張と高度な利用技術に関する研究開発の推進を目的に設立された一般社団法人FLIPコンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。高砂第2埠頭の検討に関しては、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所からデータを提供いただき、著者等が独自に検討したものです。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成 19 年改訂版），2007.
- 2) (財)沿岸技術研究センター，第四期 FLIP 研究会 14 年間のまとめ WG：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務～マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果～FLIP 研究会の 14 年間の研究成果【理論編】【事例編】，2011.
- 3) Iai, Matsunaga, Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) 小堤治，溜幸生，岡由剛，一井康二，井合進，梅木康之：2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1899-1900, 2003.
- 5) 小堤治，上野大介，兵頭順一，飛田哲男：杭の先端支持力に関する解析的検討，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.1293-1294, 2013.
- 6) 安福規之，落合英俊，大野司郎：圧縮性を考慮した杭先端支持力の実用的評価式とその適用，土と基礎，49-3，2001.
- 7) 安福規之，落合英俊，大野司郎：原位置調査結果を活用した杭の鉛直支持力の地盤工学的推定法とその適用，p163-168，第 45 回地盤工学シンポジウム，2000.
- 8) HIDEKI HIRAYAMA: LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FUNCTIONS, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp55-64, 1990.
- 9) 脇田英治：杭の標準沈下特性に関する研究，土木学会論文集 No.603/III-44, pp45-52, 1998.
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 11) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，1985.
- 12) Vesic A.S. : Experiments with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM

- 13) 青山翔吾, Luki Danardi, 後藤茂, 東畑郁生: 群杭支持地盤に生じる地盤変形についての PIV 解析, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013.
- 14) 青山翔吾, Luki Danardi, 劉邦安, 後藤茂, 東畑郁生: 可視化実験にける杭体沈下に伴う群杭の地盤変形形態の変移, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- 15) 段野孝一郎, 磯部公一, 木村亮: 杭基礎の先端支持力および沈下量に対する群杭効果の考察, 地盤工学ジャーナル Vol.3, No.1, pp78-83
- 16) 兵頭順一, 森安俊介, 宮下健一朗, 宇野州彦, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討, 土木学会第 33 回地震工学研究発表会, 2013.
- 17) 曾根照人, 栗原直範, 飛田哲男: 杭の遠心力モデル実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1191-1192, 2014.
- 18) 田村修次ほか, 遠心載荷実験における残置杭が新規杭の鉛直支持力に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 645 号, 2009.
- 19) Iai, S : Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 20) 上田茂, 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 松永康男, 藤本健幸, 菊池喜昭, 宮井真一郎, 関口信一郎, 藤本義則: 1993 年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技術研究所資料, No.766, 1993.
- 21) 塩崎禎郎, 菅野高弘, 小濱英司: 矢板式係船岸の耐震性に関する実験および解析, 土木学会海洋開発論文集, 第 20 巻, pp131-136, 2004.
- 22) 福手勤, 阿部正美, 長谷川博行, 松田史朗: 水中溶接された鋼矢板構造物の破断メカニズムと破断モードの改善に関する材料学的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.36, No.4, 1997.
- 23) 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会: 東日本大震災 2 次報告書 (地震、津波を受けた基礎構造物の分析), 2012.
- 24) 港湾空港技術研究所地震動研究チーム: 2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定, http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn/research_jpn_2011/jr_4052_rev2.html, 2011.

6. 杭軸方向挙動 WG の外部発表成果 (2015 年 8 月現在)

平成 23 年度～平成 25 年度に設置された“杭軸方向挙動 WG”の検討成果のうち、2015 年 8 月現在における外部発表成果を以下に示す。

- 1) 兵頭順一, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における矢板式係船岸の控え杭のモデル化に関する検討, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1635-1636, 2013.
- 2) 曾根照人, 桑原直範, 飛田哲男: 杭の先端支持力に関する検討-二次元解析による検討-, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1289-1290, 2013.
- 3) 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 一井康二: 杭の先端支持力に関する検討-三次元解析による検討-, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1291-1292, 2013.
- 4) 森安俊介, 中山裕章, 小堤治, 飛田哲男: 施工影響を考慮可能な杭の周面摩擦モデルの一提案, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1235-1236, 2013.
- 5) 宮下健一朗, 一井康二: 杭の押込試験の事例解析, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1285-1286, 2013.
- 6) 宇野州彦, 宮下健一朗, 飛田哲男: 杭の引抜き試験の事例解析, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1287-1288, 2013.
- 7) 小堤治, 上野大介, 兵頭順一, 飛田哲男: 杭の先端支持力に関する解析的検討, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1293-1294, 2013.
- 8) 上野大介, 小堤治, 兵頭順一, 一井康二: 杭の周面摩擦力に関する解析的検討, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), pp.1295-1296, 2013.
- 9) 兵頭順一, 森安俊介, 宮下健一朗, 宇野州彦, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討, 土木学会第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.33, 2-442, 2013.
- 10) 曾根照人, 桑原直範, 飛田哲男: 杭の遠心力模型実験, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), pp.1191-1192, 2014.
- 11) 塩崎禎郎, 宇佐美俊輔, 曾根照人, 桑原直範, 上野大介, 一井康二: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション-ケース 1 (2 層の乾燥地盤)-, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), pp.1193-1194, 2014.
- 12) 兵頭順一, 小堤治, 一井康二: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション-ケース 2 (2 層の飽和地盤)-, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), pp.1195-1196, 2014.
- 13) 宇野州彦, 宮下健一朗, 上野大介, 飛田哲男: 三次元解析による杭の遠心力模型実験のシミュレーション-ケース 3 (2 層の乾燥地盤)-, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), pp.1197-1198, 2014.
- 14) 兵頭順一, 塩崎禎郎, 曾根照人, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における杭の先端支持力のモデル化手法, 土木学会第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.34, 633_1-14, 2014.
- 15) 兵頭順一, 藤井紀之, 小堤治, 飛田哲男: 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 1) -単杭-, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1297-1298, 2015.
- 16) 桑原直範, 宮下健一朗, 曾根照人, 増田幸一, 飛田哲男: 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 2) -相対密度 60%-, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1299-1300, 2015.
- 17) 藤井紀之, 塩崎禎郎, 小堤治, 飛田哲男: 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 3) -相対密度 75%-, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1301-1302, 2015.
- 18) 宇野州彦, 兵頭順一, 増田幸一, 飛田哲男: 杭の先端支持力に着目した三次元解析 (その 4) -相対密度 90%-, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1303-1304, 2015.
- 19) 塩崎禎郎, 兵頭順一, 小堤治, 飛田哲男: 控え工の先端支持力のモデル化の違いが矢板式岸壁の地震応答解析結果に与える影響について, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1523-1524, 2015.
- 20) 溜幸生, 藤原覚太, 森安俊介, 飛田哲男: 杭の先端支持力に着目した三次元解析-4 本杭と無限本数杭の杭頭荷重-鉛直変位の関係-, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), pp.1415-1416, 2015.
- 21) 兵頭順一, 塩崎禎郎, 曾根照人, 小堤治, 一井康二: 二次元有効応力解析における杭の先端支持力のモデル化手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.71(2014), No.4, [特]地震工学論文集, Vol.34, 2015. (2015.2 掲載決定)