

模型杭の杭頭水平静加力試験と3次元有限要素法によるシミュレーション

石崎定幸・長島一郎・高木政美・真島正人

Keywords : 3D finite element method, Soil, Pile, Nonlinear interaction, Lateral loading test on pile, P-y curves

3次元有限要素法, 地盤, 杭, 非線形相互作用, 杭頭水平静加力試験, p-y関係

1. はじめに

杭の性能評価を行う場合, 大変形までの地盤と杭の非線形相互作用を適切に評価する必要がある。現行の設計において, 主要なパラメータとなる地盤反力係数は, N 値との関係式から簡便に評価されることが多い。しかし, この関係式は, 杭頭水平加力から求めた荷重-変位関係に, 一様弾性地盤を仮定した理論式を当てはめて求めたものであり, 地震時の建屋慣性力や地盤強制変形による杭近傍地盤の非線形性を適切に評価しているとは限らない。

筆者らは, より精度の高い地盤と杭の相互作用評価を目的として, 杭近傍地盤の局所的非線形性を考慮した3次元 FEM 解析に関する研究を行っている^{1,2)}。本論文では, 模型杭による杭頭水平静加力実験を実施し, 杭の変位や応力だけではなく, 地盤反力-変位関係についても詳細な検討を行う。また, 低拘束圧下の地盤と杭近傍地盤の局所的非線形性をモデル化した3次元 FEM 解析を実施し, その精度を検証する。

2. 杭頭水平静加力実験

2.1 実験概要

2.1.1 実験装置

図-1 に実験装置の概要を示す。幅 2.4m, 深さ 2.1m, 奥行き 0.8m の固定土槽を使用し, 杭頭部のフーチングに取付けたスクリージャッキにより正負繰返し水平載荷を行った。水平加力は, 図-2 に示す通り, 変位制御により7サイクル行った。計測項目は, 載荷荷重, フーチングの水平・上下変位, 杭のひずみである。

2.1.2 模型杭

模型杭には, 固定土槽の大きさを考慮して, 想定した鋼管杭(直径 0.6m, 肉厚 15mm, 長さ 30m)に対する縮

尺が 1/15 となるアルミニウム管(直径 40mm, 肉厚 1mm, 長さ 2m, 断面2次モーメント $2.33 \times 10^4 \text{mm}^4$, ヤング率 $6.86 \times 10^4 \text{N/mm}^2$)を用いた。杭頭は RC 製フーチングに根入れして固定とし, 杭下端はピン接合とした。杭頭固定条件を満足するように2本杭として配置した。また, 杭直径 B , 杭間距離 D (45cm) の比を D/B 10 になるよう十分距離をおいて設置し, 隣接杭の影響が無視できるようにした。

2.1.3 模型地盤

地盤材料として5号ケイ砂を用いた。空中落下法により地盤の相対密度が50%になるように作成した。

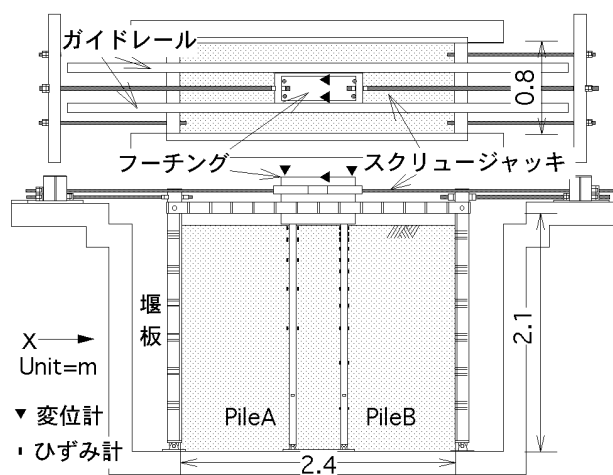


図-1 試験体・水平加力装置

Experimental model and horizontal loading device

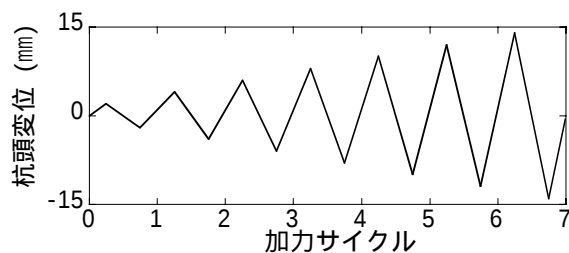


図-2 水平加力サイクル

Loading cycle

2.2 実験結果

2.2.1 実験データの処理方法

杭のひずみデータをもとに、せん断力、地盤反力、たわみ角、変位を文献3)の方法で算出した。その処理方法は、以下に示す通りである。

せん断力は、ひずみデータより求めた曲げモーメントの深度分布において、隣接する3測点のデータを通る2次曲線を求め、その中心点の微分係数で評価した。同様に、せん断力データを基に地盤反力を評価した。

たわみ角も同様に、隣接する3測点の曲率分布を2次曲線で表し、杭先端のたわみ角を0と仮定して、杭頭方向に順次積分して求めた。

杭の変形は、載荷点の変位からフーチングの回転角を考慮して杭頭変形を求め、杭先端方向にたわみ角を積分して求めた。

ただし、PileAのひずみゲージ設置間隔はPileBに比べて広く、その変形や応力の評価に誤差が含まれる可能性があるため、後述するシミュレーションとの比較ではPileBの結果を主として用いた。

2.2.2 杭の変形と応力

図-3にフーチングの載荷荷重-変位関係を示す。骨格曲線は、初期の段階から剛性低下するものの、水平変位3mm以上からほぼ直線状にある。履歴曲線は、円みを帯びた平行四辺形である。

図-4, 5に載荷荷重+1250N時の杭の変形、曲げモーメント、せん断力、地盤反力の深度分布を示す。載荷方向前側に位置するPileBの曲げモーメント、せん断力、地盤反力がPileAに比べて大きいことがわかる。そこで図-6に、両杭の杭頭せん断力-杭頭変位関係を示す。ここで、杭頭変位とは、フーチング下面の高さにおける杭の変位を表し、載荷点の変位からフーチングの回転による変位を差し引いて求めている。図より、載荷方向前側の杭(第1象限のPileB及び第3象限のPileA)に対して、より大きなせん断力が生じ、更に繰り返し回数の増加とともに、その骨格曲線も大きくなる傾向が見られる。一方、載荷方向後側の杭(第1象限のPileA及び第3象限のPileB)の杭頭せん断力-変形関係には、繰り返し載荷の影響は明瞭には見られない。

2.2.3 地盤反力

図-7に、PileBの深度25, 125, 200, 300mmにおける地盤反力-変位関係を示す。地盤反力と変位の関係は、深くなるに従い、割線剛性・履歴面積が大きくなり、その形状は平行四辺形に近くなる。

注1 杭頭変位は図-3の載荷点の変位からフーチングの回転による変位を差し引いて求めている。

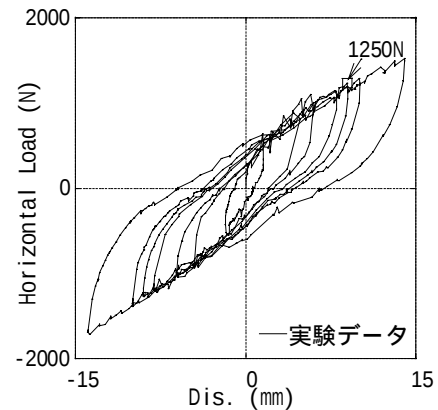


図-3 載荷荷重-変位
Relationship between horizontal load and pile cap displacement

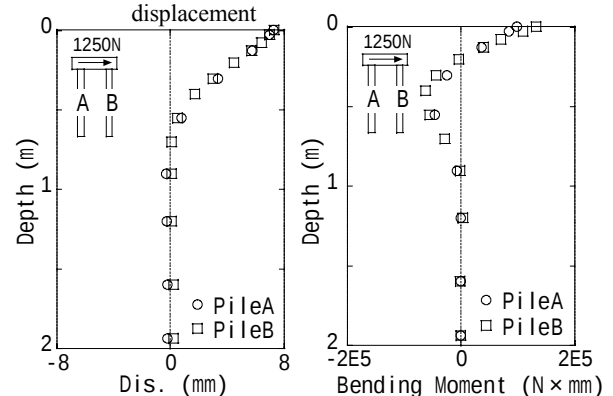


図-4 載荷荷重 1250N 時の杭の変位・曲げモーメント
Distribution of pile displacement and bending moment

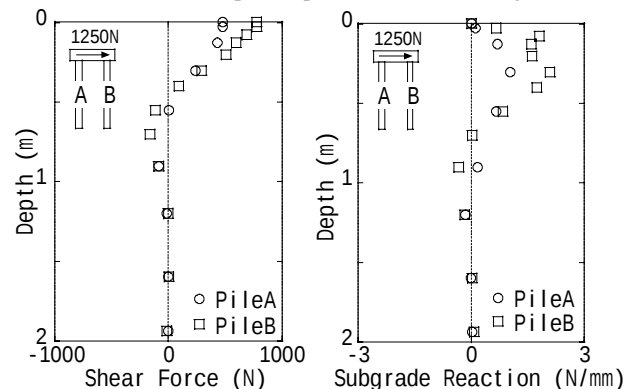


図-5 載荷荷重 1250N 時の杭のせん断力・地盤反力
Distribution of pile shear force and soil reaction

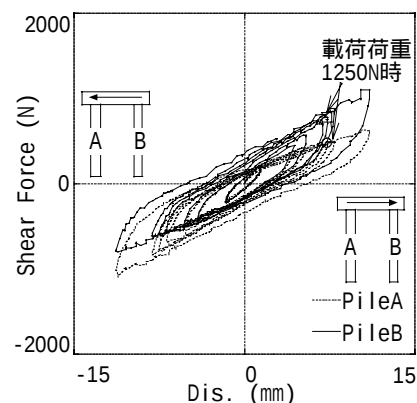


図-6 杭頭せん断力-杭頭変位^{注1)}
Relationship between pile shear force and pile head displacement

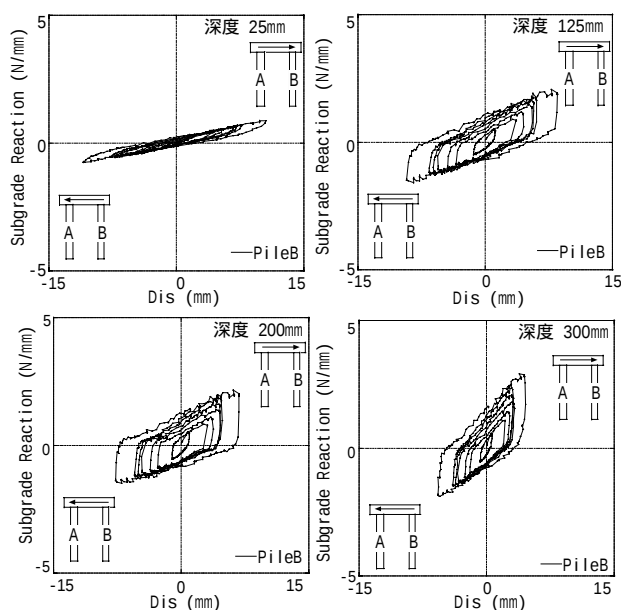


図-7 PileBの地中部に生じた地盤反力-変位関係
Relationship between soil reaction and pile displacement

PileB が載荷方向の前側と後側に位置する各々の場合について、載荷サイクル除荷点における地盤反力と変位から求めた地盤反力係数を図-8 に示す。第1, 2 サイクルにおける地盤反力係数は、載荷方向によらずほぼ同じ値を示す。しかし、第3サイクル以降、載荷方向前側に位置するときの地盤反力係数が一旦上昇した後低下しているのに対し、後側に位置するときのそれは、変形量の増加とともに低下する傾向が見られる。この傾向は、深い地盤ほど明確である。

2.2.4 杭近傍地盤のゆるみ

実験では、隣接杭の影響が無視できるよう十分距離を置いて2本の杭を設置した。しかし、繰返し載荷により、載荷方向前側の杭により大きな地盤反力が生じ、せん断力・曲げモーメントが大きくなった。この理由は、地盤模型作成時の杭近傍地盤のゆるみ（砂の空隙）が、繰返し載荷の影響により締固められた結果と考えられる。一方、載荷方向後側に対応する杭間地盤については、このような傾向はあまり顕著には見られなかった。今回の模型実験では、あらかじめ杭およびフーチングを設置し、その後砂を敷き詰めているため、特に杭間地盤や杭周辺地盤の密度を適切に管理することは困難である。尚、現位置における杭頭載荷試験では、このような繰返し載荷の影響は報告されていない（例えば4,5）。

尚、初期のサイクルでは、杭近傍地盤のゆるみの影響により現実の載荷杭とは異なると考えられるので、締固め効果が発揮されて以降の実験結果を主に対象として、以下の3次元FEM解析を実施する。

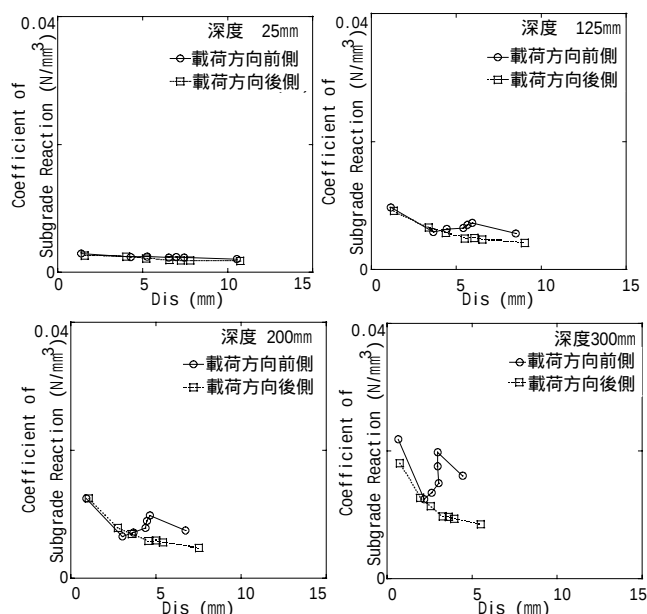


図-8 PileBの地中部における地盤反力係数-変位関係
Relationship between coefficient of soil reaction and pile displacement

3. 3次元FEM解析によるシミュレーション

低拘束圧地盤や杭近傍地盤の局所的非線形性を考慮した3次元FEM解析により実験結果のシミュレーションを行い、その精度の検証を行うとともに、杭周辺地盤の非線形性について検討を行う。

3.1 解析手法

本解析の特徴と工夫した点は以下の通りである。

- せん断応力だけでなく、垂直応力による地盤の非線形性を考慮した構成則を用いる。
- 杭周辺部のメッシュを放射状に、表層地盤のメッシュを細かく分割する。
- 表層の低拘束圧下における地盤については、拘束圧の1/2乗に比例させて、初期剛性および基準ひずみを変化させる。
- 載荷方向後側の地盤が杭に引張り力を与えないように、地盤と杭の節点を共有させない。

3.1.1 地盤の構成則

本モデルは、1次元解析におけるせん断応力とせん断ひずみ間の構成則を、3次元の偏差応力と偏差ひずみの2次不変量の関係に拡張するものである⁶⁾。本解析手法は、近年、地盤の大ひずみ領域における挙動の評価や構造物との非線形相相互作用解析に適用され、その有効性が検証されつつある^{7,8,9)}。本論文では、構成則として修正R-Oモデル¹⁰⁾を採用し、偏差応力および偏差ひずみの2次不変量が(1)式に示す関係を満足するようにせん

断剛性 G を変化させた.

$$J'_2 = \frac{J_2}{2G_0} \left(1 + \alpha \left| \frac{J_2}{S_u} \right|^\beta \right) \quad (1)$$

ただし, J_2 : 偏差ひずみの 2 次不変量
 J_2 : 偏差応力の 2 次不変量
 G_0 : 初期せん断弾性係数
 S_u : 最大せん断耐力
 α, β : 非線形特性を規定する
 パラメータ

3.1.2 解析モデル

図-9 に解析モデルを示す。杭近傍地盤の局所的非線形性が評価できるように、杭周辺部の地盤は放射状に細かくメッシュ分割した。また、杭頭水平加力試験では、表層部の地盤特性が実験結果に及ぼす影響が大きいため、表層地盤についてもメッシュ分割を細かくした。総節点数は 25676、要素数は 11436 である。

杭の体積を考慮するため，3次元梁要素と剛体要素により，杭をモデル化した¹⁾．フーチングとして，2本の杭頭部分を充分剛性の高い梁要素で連結し，右端部を水平一方向に単調加力した．

杭周辺部の地盤と杭の節点については、載荷方向のみに力が加わるよう、載荷方向前側のみ共有させた(図-9 杭近傍部分)。地盤モデルの周辺部および底面の境界条件は固定とした。

3.1.3 地盤の解析定数

表-1 に地盤の解析定数を示す。地盤の解析定数は、

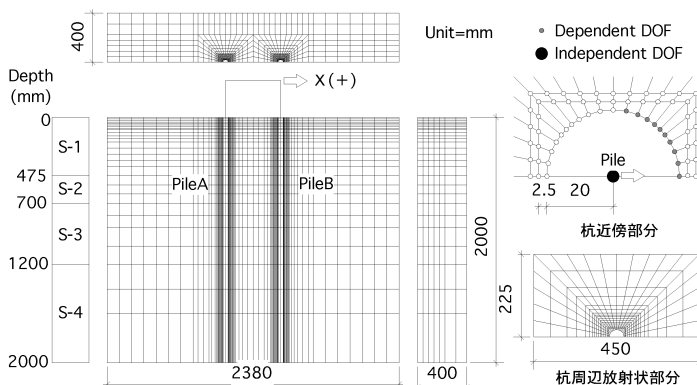


図-9 解析モデル
Analysis model

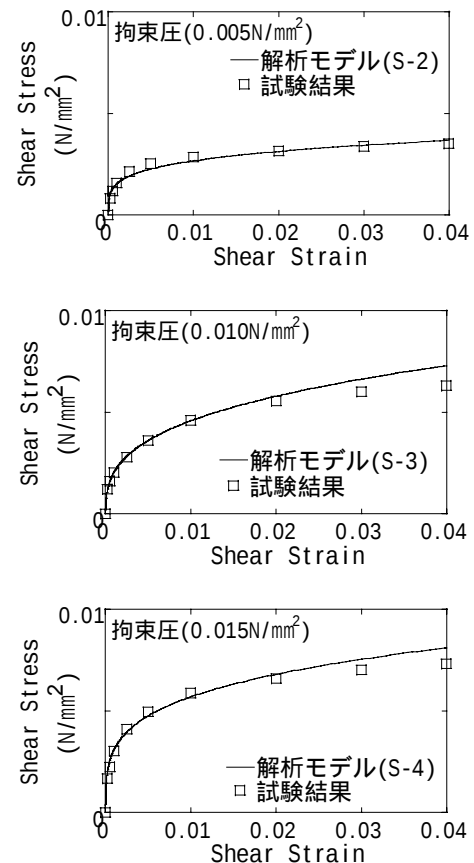


図-10 中空ねじりせん断試験結果と解析モデルの比較
Comparison of torsional shear test and analysis model

表-1 地盤の解析定数
Soil parameters

地盤モデル	h(mm)	σ_m (N/mm ²)	G0(N/mm ²)	γ_r	α	β	Su
S-1	0 ~ 475	0.0 ~ 5.0E-3	$16 \times (\sigma_m/5.0E-3)^{0.5}$	$1.0E-4 \times (\sigma_m/5.0E-3)^{0.5}$	10.42	3.38	$G_0 \times \gamma_r$
S-2	475 ~ 700	5.0E-3 ~ 7.5E-3	16	1.0E-4	10.42	3.38	0.0016
S-3	700 ~ 1200	7.5E-3 ~ 1.25E-2	16	1.0E-4	4.06	2.02	0.0016
S-4	1200 ~ 2000	1.25E-2 ~ 1.92E-2	30	1.0E-4	7.79	2.96	0.003

単位体積重量=1.6E-5N/mm³, h: 深さ, σ_m : 拘束圧, $\gamma_r (=S_u/G_0)$: 基準ひずみ

3.2 解析結果

3.2.1 杭の変形と応力

図-11 に載荷荷重-変位関係を、解析結果と実験結果で比較して示す。同一変位における載荷荷重は、解析結果が実験結果に比べて大きく、全体として解析結果の方が地盤剛性を過大評価している。

図-12 に杭頭せん断力と杭頭変位の関係を、解析結果と実験結果で比較して示す。解析結果において、PileAとBの違いはほとんどない。同一変位における杭頭せん断力は、載荷方向前側の杭に対しては解析結果と実験結果で良い対応を示すが、後側の杭については解析結果が大きな値を示している。図-11 において、解析結果が地盤剛性を過大評価したのはこのためである。2.2 の実験結果で考察した通り、載荷方向前側の地盤は繰返し載荷により締固められており、解析結果は締固められた地盤側に対する結果と良い対応を示している。

図-13, 14 に載荷荷重+1500N 時の杭変形、曲げモーメント、せん断力、地盤反力の深度分布を示す。ただし、実験結果については、繰返し載荷により締固まった載荷方向前側杭の杭頭せん断力が、解析結果と対応する約

750N となる、載荷荷重+1250N 時の値を示す。載荷荷重+1250N 時の値を示す。解析結果は、載荷方向前側のPileBの実験結果と良い対応を示している。

3.2.2 地盤反力

図-15 に、PileBの深度25,125,200,300mmにおける地盤反力-変位関係を、解析結果と実験結果で比較して示す。図より、深度200,300mmにおける解析結果は、載荷方向前側に杭が位置するときの、繰返し載荷により締め固められた実験結果と比較的良好な対応を示す。一方、深度25,125mmにおける解析結果は、載荷方向前側の実験結果と比較して、同一変位における地盤反力を過小評価している。

地盤反力と変位から地盤反力係数を評価した結果を図-16 に示す。図中には、PileBの各載荷サイクル除荷点における地盤反力と変位から、地盤反力係数を評価した実験結果を合わせて示す。変位が2mm以下の小さな範囲では、地盤反力係数の解析結果は実験結果に比べて大きな傾向を示す。しかし、変位が大きくなると繰返し載荷の影響により増加する載荷方向前側の実験結果と比較的良好な対応を示す。

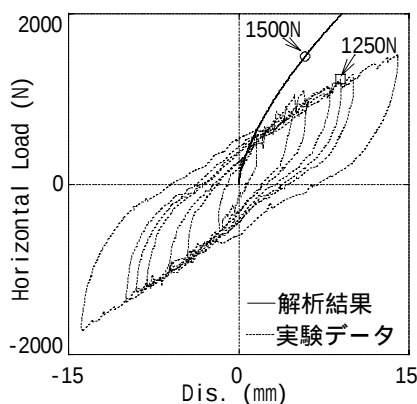


図-11 載荷荷重-変位関係
Relationship between Horizontal load and pile cap displacement

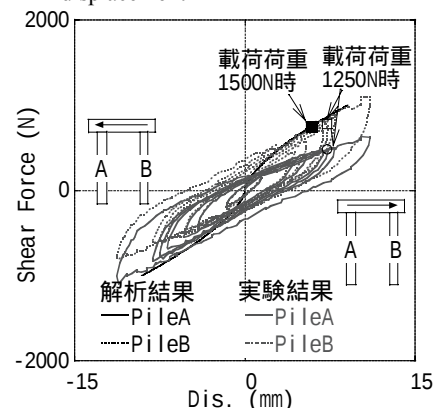


図-12 杭頭せん断力-杭頭変位関係
Relationship between pile shear force and pile top displacement

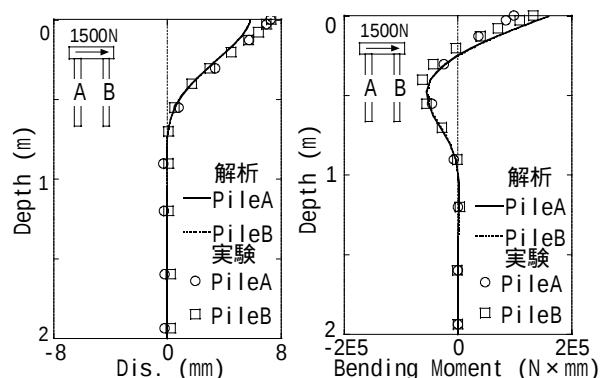


図-13 載荷荷重 1500N 時の杭の変形・曲げモーメント
Distribution of pile displacement and bending moment

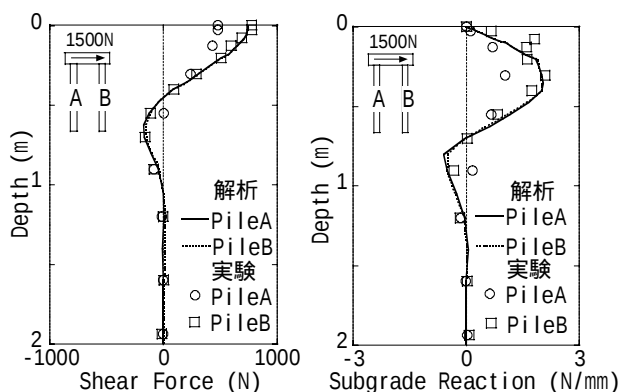


図-14 載荷荷重 1500N 時の杭のせん断力・地盤反力
Distribution of pile shear force and soil reaction

模型杭の杭頭水平静加力試験と3次元有限要素法によるシミュレーション

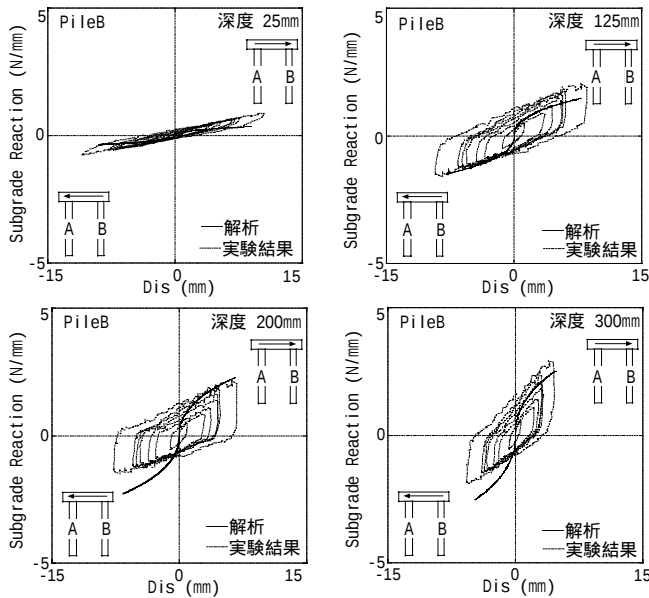


図-15 PileB 地中部に生じた地盤反力-変位関係
Relationship between soil reaction and pile displacement

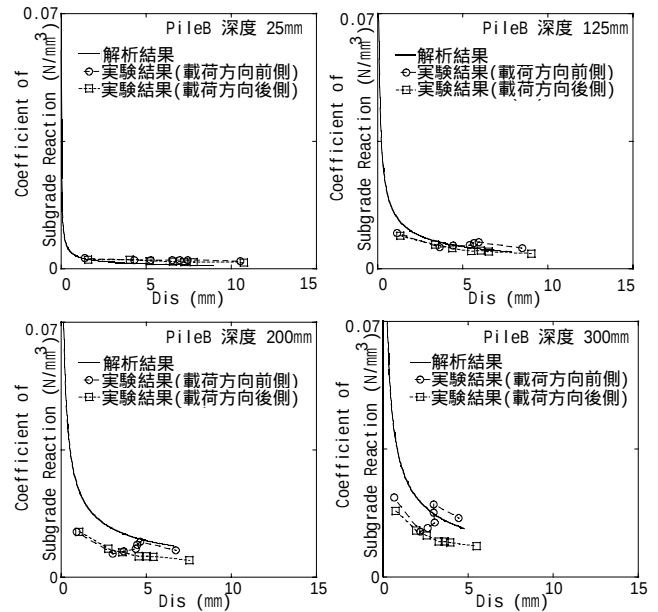


図-16 PileB 地中部における地盤反力係数-変位関係
Relationship between coefficient of soil reaction and pile displacement

3.4 地盤反力係数の深度分布と変位依存性

解析結果の深度毎の地盤反力係数に対して、(2)式の回帰式を用いて重回帰分析を行った結果を表-2に示す。分析には、変位量1mm以上のデータを使用した。

$$Kh = Kh_0 \times \delta^{-a} \quad (2)$$

ただし、 Kh : 地盤反力係数
 Kh_0 : 基準地盤反力係数(回帰係数)
 a : 回帰係数
 δ : 1cmで無次元化した変位

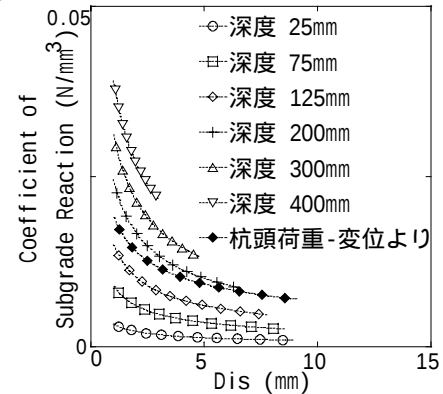


図-17 PileB 地中部における地盤反力係数-変位関係
Relationship between coefficient of soil reaction and pile displacement at each depth

図-17に解析結果における各深度の地盤反力係数と変位の関係を回帰結果(点線)と合わせて示す。また、図-18に回帰分析より得られた基準地盤反力係数の深度分布を示す。

表-2と図-17, 18から、地盤反力係数および基準地盤反力係数は深さ(拘束圧)に比例して大きくなる一方、変位依存性は地盤の拘束圧に依らずほぼ変位の-0.55乗に比例して低下する傾向がある。

参考として、一様弾性地盤を仮定して、解析結果の杭頭せん断力-変位関係に杭頭固定条件のChangの式¹³⁾から逆算して評価した地盤反力係数と変位の関係を図-17に合わせて示す。また、深度毎の地盤反力係数に対する分析と同様に、(2)式を用いて重回帰分析を行った結果を表-2に示す。解析結果に一様地盤を仮定して逆算した結果では、地盤反力係数は変位の-0.46乗に比例して低下しており、深度毎の地盤反力係数の回帰結果と若干異なる傾向が見られた。

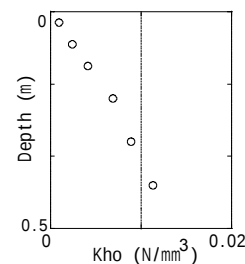


図-18 回帰分析より得られた基準地盤反力係数
Standard coefficient of soil reaction by revolution

表-2 解析における地盤反力係数の回帰結果
Results of revolution

	回帰対象	$Kh_0 (N/mm^3)$	a
解析結果	深さ 25mmにおける Kh	0.00093	0.555
	深さ 75mmにおける Kh	0.00244	0.569
	深さ 125mmにおける Kh	0.00413	0.565
	深さ 200mmにおける Kh	0.00689	0.553
	深さ 300mmにおける Kh	0.00887	0.550
	深さ 400mmにおける Kh	0.01129	0.542
	杭頭荷重-変位関係より求めた Kh	0.00674	0.456

4. 結論

本論文では、模型杭による杭頭水平静加力実験とその3次元 FEM 解析を行い、解析精度の検証を行うとともに、杭周辺地盤の非線形性について詳細な検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) 実験では、隣接杭の影響が無視できるよう十分距離を置いて2本の杭を設置した。しかし、杭の応力と地盤反力は、載荷方向前側の杭が、後側の杭よりも大きくなる傾向があり、載荷の繰返しにつれてその傾向は顕著に見られた。これは、地盤模型作成時の杭近傍地盤のゆるみが、繰返し載荷により締固められた結果と考えられる。一方、載荷方向後側に対応する杭間地盤については、繰返し載荷により締固められる傾向はあまり見られなかった。

(2) 3次元 FEM 解析では、低拘束圧下における地盤および杭周辺地盤の局所的な非線形性を適切に評価することにより、載荷方向前側の杭、すなわち締固められた地盤側に対する実験結果と良い対応を示した。

(3) 杭近傍地盤の局所的な非線形性および表層地盤の非線形性を適切に考慮すると、3次元 FEM 解析により実験結果を精度良くシミュレーションできることがわかった。ただし、荷重の増加につれて杭近傍の地盤要素に局所的に数%を超える大きなひずみが生じた。本解析では、中空ねじり試験結果の4%程度のひずみレベルの範囲でフィッティングした解析モデルが、大ひずみ域まで使用できると仮定して解析を行ったが、このような局所的に大きなひずみが生じる現象を、合理的に取り扱う方法については更に検討する必要があると考えている。

尚、本論文では杭頭水平静加力時の杭近傍地盤の非線形性を詳細に検討したが、実際の地震時には地盤強制変形による杭近傍地盤の非線形性も評価する必要がある。杭頭載荷の状態と地盤変位が作用する場合では、地盤-杭の相互作用のメカニズムは異なると考えられるため^例 (例えば 14)、今後は更に地盤強制変形による杭近傍地盤の非線形性について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Nagashima, I.: Static Pile Head Impedance using 3D Nonlinear FEM Analysis, The 2nd UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, B-2, 2001.3
- 2) 石崎定幸, 長島一郎, 高木政美: 3次元有限要素法による地盤と杭の非線形相互作用評価 その1 杭頭静加力試験のシミュレーション, 日本建築学会学術講演梗概集 構造 pp.557-558, 2002.8
- 3) 富永晃司, 山本春行: 杭頭自由および固定の単杭が終局状

- 態に至るまでの水平挙動性状に関する理論と実験, 構造工学論文集, Vol.37B, pp.1~10, 1991.3
- 4) 青砥一浩, 富樫勝男, 尾形隆永, 佐藤立: 鋼管群杭の大変形水平載荷試験とその数値シミュレーション, 第46回地盤工学シンポジウム, 平成13年度論文集, pp.229~234, 2001.11
- 5) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀雄: 終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, 土木学会論文集 No.596/ -43, pp.249~260, 1998.6
- 6) Shawky A. A., Nonlinear static and dynamic analysis for underground reinforced concrete. 東京大学博士論文, 1994.
- 7) 志田智之, 福嶋研一, 立石章, 桑野二郎, 橋本聡: さまざまな応力経路により繰返し荷重を受ける砂の非線形挙動, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.166~167, 1999.9
- 8) 福嶋研一, 岡本晋, 坂下克之, 立石章, 志田智之: 大きなひずみレベルでの動的相互作用問題に適用可能な地盤非線形モデルの提案, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.449~452, 1999.7
- 9) 福嶋研一, 立石章, 志波由紀夫: 垂直ひずみによる剛性低下を考慮した構造物-地盤相互作用解析に用いる地盤非線形履歴モデルの検討, 土木学会第52回年次学術講演会梗概集, I-B, pp.746-747, 1997.9
- 10) 大崎順彦, 原昭夫, 清田芳治: 地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp.1057~1060, 1978
- 11) 国生剛治: 低拘束圧下の砂の動的物性と模型振動実験に適用される相似則, 第15回地震工学研究発表会, pp.265~268, 1979.7
- 12) 加藤祐之, 龍岡文夫他: 砂の低拘束圧繰返しねじりせん断変形特性, 第25回土質工学研究発表会, pp.769~772, 1990.6
- 13) Chang, Y.L.: Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by Feagin, Trans. ASCE, pp.272~278, 1937
- 14) 室野剛隆, 畠中仁, 棚村史郎, 片上典久: 地盤変位を考慮した杭の静的試験と杭の p-y 関係に関する検討, 土木学会・地震工学委員会/杭基礎の耐震設計に関するシンポジウム, 2002.9