

鋼管杭の繰返し水平載荷試験のシミュレーション解析

鋼管杭, 水平載荷試験, 変形解析

金沢大学 学生会員 深江亮士 国際会員 松本樹典  
寒地土木研究所 国際会員 富澤幸一  
ジャパンパイル 正会員 小嶋英治 正会員 熊谷裕道

1. はじめに

2008 年 11 月に一般国道 36 号の道路橋の基礎鋼管杭工事において, 基礎鋼管杭の動的水平載荷試験<sup>1)</sup>と静的繰返し水平載荷試験が実施された。後者の試験の主目的は, 試験杭の水平変位 $u$ が杭径 $D$ の 1%となったときの水平地盤反力係数 $k_h$ を求め, 橋台の設計 $k_h$ を確認することであった。さらに, 今後の設計用資料として,  $u = 0.04D$ 時の $k_h$ を求めることを目的とした。

本稿では, 有限差分解析 (FLAC3D) によって静的繰返し水平載荷試験のシミュレーション解析を行い, 繰返し載荷が杭の挙動に及ぼす影響も検討した。

2. 静的繰返し水平載荷試験の概要

図 1 は, 試験地盤の土質柱状図と  $N$  値の深度分布である。試験地盤は火山灰が主体的である。試験現場では, 地盤を深さ 7m まで掘削し, そこを試験地盤表面とした。 $N$  値は, ほぼ深さとともに増加している。

試験杭は, 中掘り工法 (セメントミルク噴出攪拌方式による先端処理) で施工された開端鋼管杭 (表 1) である。杭先端は, 試験地盤表面から 22.05 m の深さである (突出長さ 0.95 m)。杭の 10 断面において, ひずみゲージを載荷方向の対称位置の外周面に貼付け, 軸ひずみを測定した。軸ひずみから曲げモーメントを求めた。ひずみゲージの保護のため, 載荷方向の対称位置の外周面の軸方向に沿って溝型鋼を溶接した (杭頭から 0.85 から 11.2 m の区間)。

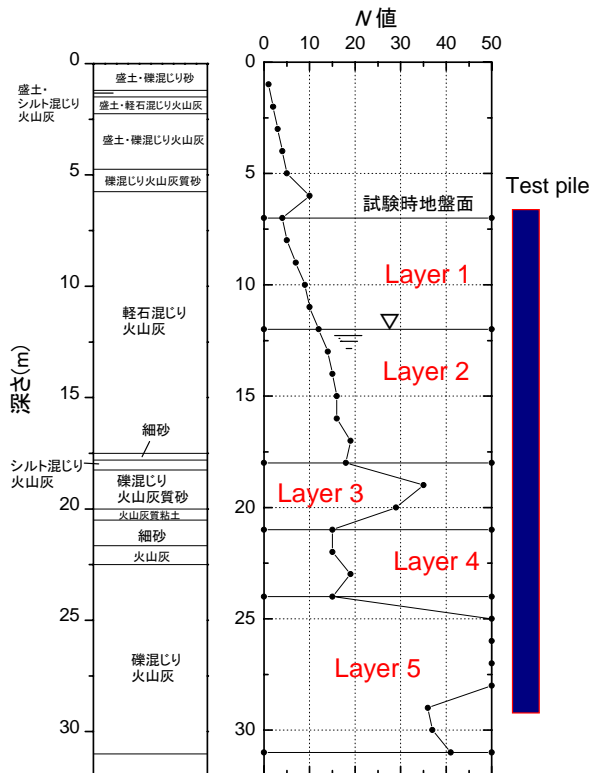


図 1 試験地盤の土質柱状図と  $N$  値の分布

表 1 試験杭の諸元

	Upper section	Lower section
Length (m)	5.0	18.0
Outer diameter (mm)	600	600
Wall thickness (mm)	11	9
Young's modulus (kPa)	$2.06 \times 10^8$	
Poisson's ratio	0.3	
Density ( $t/m^3$ )	7.8	

杭の水平載荷試験は, 4 サイクルの片振り載荷 (各サイクルのピーク水平荷重は 152, 254, 323, 437 kN) とした。なお, 載荷点は, 試験地盤表面から 0.3 m の高さの位置である。

3. 静的水平載荷試験の解析

解析には, 有限差分解析プログラムFLAC3D<sup>2)</sup>を用いた。図 2 は, 鋼管杭と地盤のモデルである。地盤側面の水平変位, 地盤底面の鉛直変位および対称面の  $y$  方向変位を固定した。鋼管杭の内・外周面および先端にはインターフェース要素を配置した。鋼管杭は中掘り工法で施工されたが, 施工後に土砂を鋼管杭内部に投入した。そのため, 杭内部にも地盤要素を設置した。

杭のモデル化に際して, 保護材 (溝型鋼) を直接にはモデル化していない。ただし, 保護材を含めた載荷方向の曲げ剛性  $EI$  と一致するように, 各杭区間のヤング率として表 2 に示す等価ヤング率  $E_{eq}$  の値を用いた。地盤は, モール・クーロンの弾・完全塑性モデルとした。今回の解析では, 粘着力  $c' = 0$  と仮定し, せん断剛性  $G$  については, 参考文献 1) を参照し, 表 3 に示す値を仮定した。

解析手順としては, まず自重解析を行い, それを初期状態とし, その後荷重制御による水平載荷解析を行った。

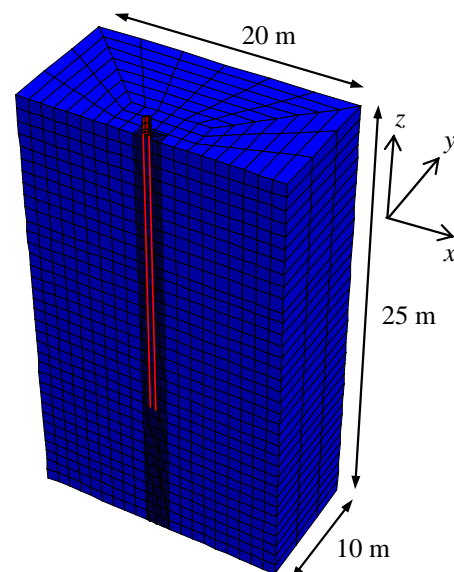


図 2 鋼管杭と地盤のモデル化

Simulation analysis of static cyclic horizontal load test of a steel pipe pile

Ryoji Fukae, Kanazawa University  
Tatsunori Matsumoto, Kanazawa University  
Koichi Tomisawa, Civil Eng. Research Inst. for Cold Region  
Eiji Kojima and Hiromichi Kumagai, JAPANPILE Corp.

表2 解析における試験杭のパラメータ

Sec. no.	Dist. from pile top (m)	$I$ (m <sup>4</sup> )	$E_{eq}$ (kPa)
1	0 to 0.85	$0.883 \times 10^{-3}$	$2.06 \times 10^8$
2	0.85 to 5.00	$1.144 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^8$
3	5.00 to 11.20	$0.993 \times 10^{-3}$	$2.80 \times 10^8$
4	11.20 to 23.00	$0.730 \times 10^{-3}$	$2.06 \times 10^8$

表3 地盤パラメータ

Layer no.	Ave. $N$	Depth from G. L. (m)	$G$ (MPa)	Total density, $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )
1		0.0 to 5.2	10.0	1.4
2		5.2 to 10.4	15.0	1.4
3		10.4 to 13.4	21.2	1.5
4		13.4 to 16.7	16.1	1.5
5		16.7 to 30.0	44.0	1.9

図3は、 $\phi' = 30, 35, 40$  deg. とした場合の単調水平載荷解析結果（荷重点における水平荷重－水平変位関係）を繰返し載荷試験結果と比較したものである。 $\phi'$  が大きくなるにつれて、解析結果は実測結果に近づいてはいるが、 $\phi' = 40$  deg. の場合でも、解析結果は水平変位を過大評価している。これは、今回の解析では粘着力  $c'$  を0と仮定していることに起因しているものと考えられる。

試験地盤面位置の杭変位が6 mmにおける逆算 $k_h$ は、40997 kN/m<sup>3</sup>であり、設計値 $k_h = 26381$  kN/m<sup>3</sup>を上回った。

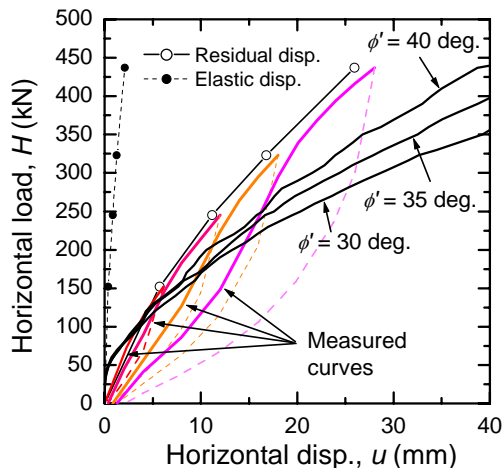


図3 土の内部摩擦角 $\phi'$ を変化させた単調載荷解析結果と実測結果の比較

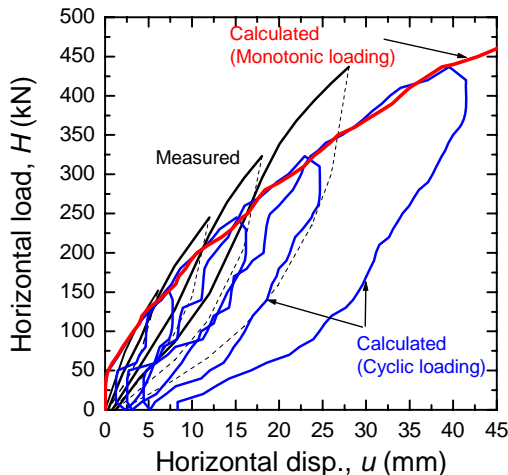


図4  $\phi' = 40$  deg. と設定した単調載荷解析および繰返し載荷解析結果、および実測結果

図4は、 $\phi' = 40$  deg. とした繰返し載荷解析結果である。繰返し載荷による水平荷重－水平変位曲線の包連線は、ほぼ単調載荷解析結果に一致した。興味深いことは、載荷初期における水平杭頭剛性（荷重増分／変位増分）が初期載荷におけるそれに比べて低下することである。この原因は、杭と地盤の間のギャップ発生にあるといえる。図5は、水平荷重  $H = 323$  kN 載荷時（3 サイクル目のピーク荷重時）および完全除荷 ( $H = 0$ ) 時における杭、および杭外周に隣接する地盤の水平変位分布の解析を示したものである。 $H = 323$  kN 載荷時には、杭背面 (left) のみにギャップが生じている。完全除荷時には杭前面 (right) と杭背面 (left) にギャップが生じている。このギャップの発生によって、再載荷初期の水平杭頭剛性が低下する結果となり得る。

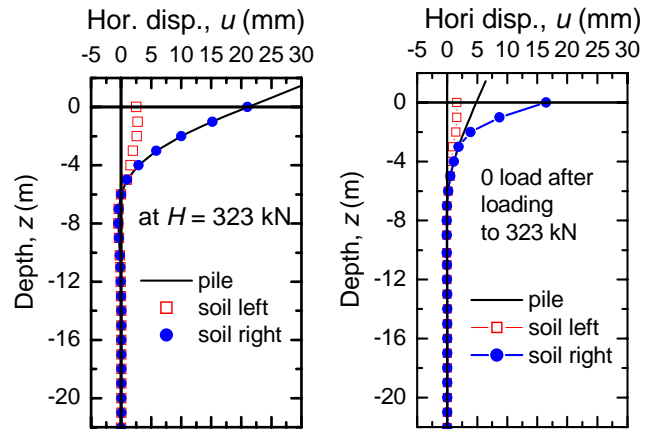


図5 繰返し載荷解析による杭と地盤の水平変位

図6は、繰返し解析による杭の曲げモーメントの計算結果と実測結果である。解析の方が、深いところまで曲げモーメントが発生している。これも、地盤の強度定数の設定 ( $c' = 0$  を仮定) によるものであろう。

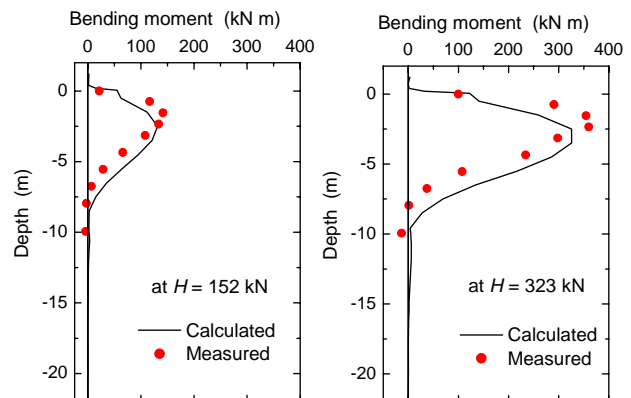


図6 繰返し載荷解析による杭の曲げモーメントと実測結果

#### 4. おわりに

今後、地盤の強度定数を実験によって決定し、さらに解析的検討を進める予定である。両振り載荷の影響、また繰返し水平載荷が杭の鉛直挙動に及ぼす影響についても検討する予定である。

#### 参考文献

- 熊谷裕道, 小嶋英治, 富澤幸一, 松本樹典 (2009): 鋼管杭の動的水平載荷試験法 (その4－実杭の試験検証その3), 第44回地盤工学研究発表会 (投稿済).
- Itasca (2002): *FLAC3D Optional features*, Itasca Consulting Group, USA.