

土の構成則に関連する相互ばねを用いた単杭の水平載荷実験の2次元有限要素解析

—その2 粘性土地盤—

セントラルコンサルタント 正会員 〇吉川 茂樹 海洋河川技術研究所 曲 傳軍

東電設計 正会員 溜 幸生 京都大学防災研究所 正会員 井合 進

沿岸開発技術研究センター 正会員 梅木 康之

1. はじめに

著者らは、2次元解析において杭と地盤の相互作用をよりの確に解析表現するため、地盤の応力－歪状態に連動する非線形の相互作用ばね¹⁾を提案した。その適用性を明らかにするため、粘性土地盤における現地杭の水平載荷実験²⁾を対象にFEM有効応力解析プログラムFLIP³⁾を使用し、この相互作用ばねを用いた再現解析を行った。

2. 検討方法

検討モデルとして、杭から十分に離れた位置（杭径の5倍）にマルチスプリング要素でモデル化した地盤面を設定し、非線形はり要素でモデル化した杭と地盤を、対応する節点どおし杭－地盤相互作用ばねで結合した。粘性土のせん断強度は、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ_f の両者で表現した。粘性土のせん断強度 τ_f は、次式(1)で与えられる。

$$\tau_f = c \cdot \cos \phi_f + \sigma'_m \cdot \sin \phi_f \cdots (1)式$$

この粘性土のせん断剛性の拘束圧依存性を次式(2)で与えた。ここに、 σ'_{ma} :平均有効拘束圧、 $G_{ma}:\sigma'_{ma}$ における初期せん断弾性係数、 σ'_m :任意の有効拘束圧、 $G_m:\sigma'_m$ における初期せん断弾性係数を表す。式中のパラメタ m_G の値は0.5とした。

$$\frac{G_m}{G_{ma}} = \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right)^{m_G} \cdots (2)式$$

なお、粘性土は完全排水条件での解析とし、間隙水の体積剛性は発揮されない。また、ダイレイタンシーの影響は考慮していない。

再現対象は、場所打ちRC製の単杭（φ800）の水平載荷試験²⁾であり、表－1に示す長杭、短杭の3ケースについて変位制御で静的解析を行った。杭体の曲げモーメント－曲率関係⁴⁾及び解析メッシュは砂質地盤の解析と同様のものである。使用した地盤の土質条件は表－2であり、粘性土の c 、 ϕ は3軸圧縮CU試験から、初期せん断弾性係数はPS検層のせん断波速度からの設定値である。

3. 検討結果

荷重変位関係：杭頭の荷重と水平変位の関係を図－1に示す。折れ線で示した解析結果と実験値とは、長杭、短杭、いずれのケースにおいても良くあっている。

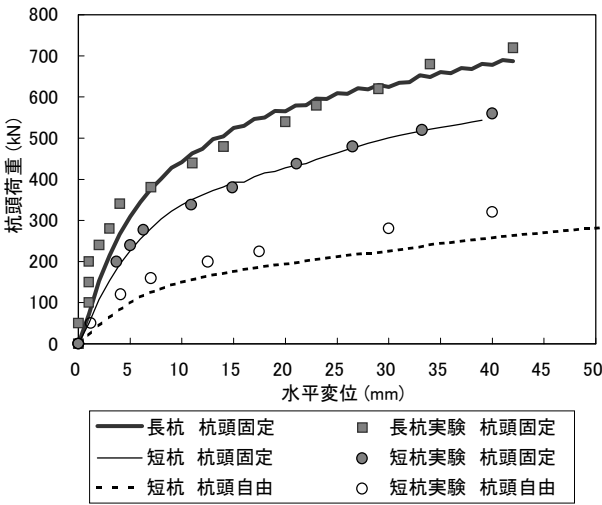
杭の曲げモーメント分布：杭の鉄筋降伏点近くの断面力を取り出し、実験結果と解析値とを比較したものが図－2である。同図に示すように、それぞれの再現性は良い。

表－1 検討条件と杭の諸元²⁾

実験条件		杭 径	杭根入れ長	βL
長 杭	杭頭固定	φ 800mm RC場所打ち杭 D22×16、かぶり15cm	12m	2.53
短 杭	杭頭固定		5m	1.05
	杭頭自由			

表－2 粘性土地盤の土質条件

土質区分	下限深度 (m)	N値	単位体積質量 ρ (t/m^3)	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断弾性係数 G_{ma} (kPa)	体積弾性係数 k_{ma} (kPa)	平均有効拘束圧 σ_{ma} (kPa)	拘束圧依存係数 m_G	内部摩擦角 ϕ_f (deg)	粘着力 C (kPa)	履歴減衰上限値 h_{max}
盛 土	-1.0	3～6	1.816	90	14,700	38,340	6.7	0.5	21	30	0.24
	-2.0						16.4				
シルト	-9.5	3～9	1.765	90	14,300	37,290	40.4	0.5	21	21	0.24
	-13.9			170	51,000	133,000	73.9				
固結シルト	-25.0	50以上	1.888	290	158,780	414,100	122.5	0.5	34	160	0.24



図－1 杭頭荷重－水平変位の関係

杭の変位分布： 長杭の変位については、図-3に示すように全杭長にわたり実験の結果をよく再現している。短杭の場合は、実験杭の下端が杭頭固定、自由ともに載荷方向に変位したのに対し、解析結果ではいずれも逆方向への変位傾向を示している。

計算地盤反力： 相互作用ばね要素から出力した地盤反力度の深度分布を、再現解析の最大値に近い35mm変位時について図-4に示す。図には、地表面塑性化の影響を考慮した極限地盤反力度⁵⁾の深度分布⁶⁾を合わせて示している。図示したように、杭の特性長($1/\beta = 4.1$ m)近くまでは地盤反力度の増加が顕著であり、またその最大値は、塑性化を考えた極限地盤反力の深い領域(G L・1m以深)に対する地盤反力度をほぼ上限値とする分布である。

また、図-4には解析計算の理論上の最大ばね反力度⁶⁾も示しているが、再現計算された地盤反力度の最大値はこの理論値の約半分でもあった。この理由として、地盤反力に寄与するのは主に杭の前面地盤であり、解析上、引っぱり破壊したとみなされる背面側の地盤反力の寄与分がなかったことによると考察される。

先に述べた塑性化を考えた深い領域の極限地盤反力は、半無限粘性地盤における杭幅Dの

浅い基礎の支持力式を水平方向に適用したものであり、したがって杭前面の地盤反力、つまり前面地盤のみの支持力が、ばね反力理論値の約半分の値に一致することとも符合する。これらのことより、今回使用した相互作用ばねは、地盤反力の値とともに、杭と地盤の相互作用をうまく再現しているといえる。

4. まとめ

粘性土の解析上の取り扱いや、短杭の解析については今後究明の余地があるものの、今回提案の「杭-地盤相互作用ばね」を使用した2次元FEM解析モデルによって、杭体の挙動、断面力、地盤反力などを調和的に再現解析できることが確認できた。

謝 辞：

本論文は、FLIPの改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立されたFLIP研究会（事務局：(財)沿岸開発技術研究センター）の活動の一環として検討したものである。また、東京電力(株)技術開発研究所から貴重なデータを提供していただいた。ここに、その謝意を表す。なお、末尾ながら当論文の執筆に当たり、指導ならびに助言をいただいた(株)日本科学技術研修所の小堤氏に感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 小堤ら：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，2003.7（投稿中）
- 2) 佐藤ら：実物大単杭の水平載荷実験における杭と砂質土地盤および粘性土地盤の挙動，土木学会論文集 No. 715/III-60, pp357-367, 2002.9
- 3) Iai, et al. : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 32, No. 2, pp1-15, 1992.6
- 4) 川中ら：土の構成則に関連する相互ばねを用いた単杭の水平載荷実験の2次元有限要素解析—その1 砂質地盤—，土木学会第58回年次学術講演会，2003.9（投稿中）
- 5) 佐藤ら：杭頭回転固定条件による実物大単杭の大変形水平載荷実験，土木学会論文集 No. 714/VI-56, pp95-109, 2002.9
- 6) 小竹ら：土の構成則に関連する相互ばねを用いた単杭の水平載荷実験の2次元有限要素解析—その3 地表面の影響—，土木学会第58回年次学術講演会，2003.9（投稿中）

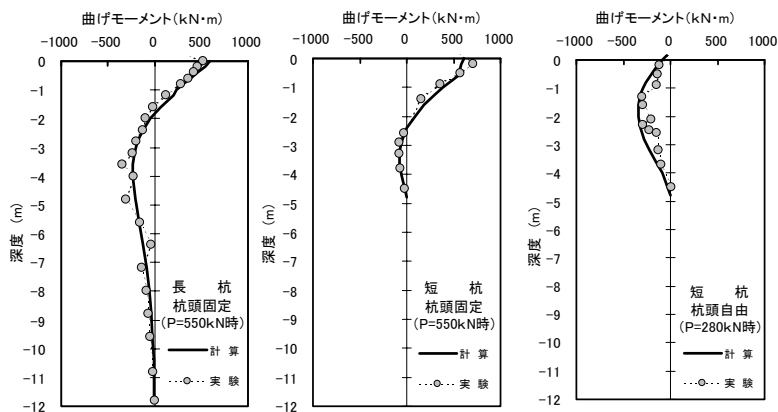


図-2 曲げモーメント計算値と実験値

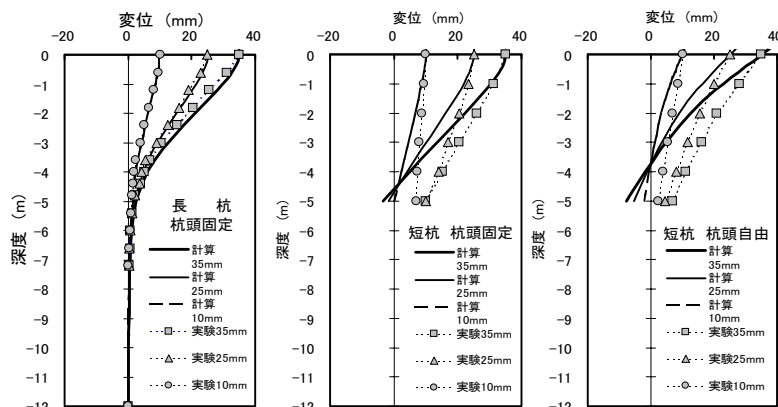


図-3 杭の計算変位と実験値

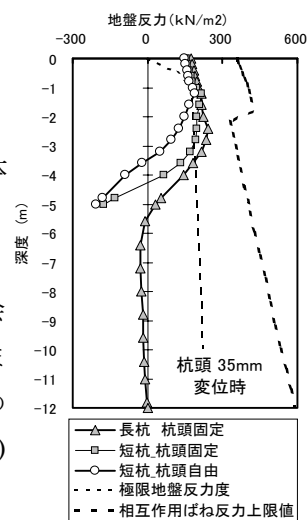


図-4 地盤反力度