

## 土の構成則に関連する相互作用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 -

東洋建設 正会員 ○小竹 望

東電設計 正会員 溜 幸生

日本科学技術研修所 正会員 小堤 治

京都大学 正会員 井合 進

沿岸開発技術研究センター 田河 祥一

## 1. はじめに

著者らは有限要素法に基づく2次元有効応力解析プログラムFLIP<sup>1)</sup>において、土の構成則に連動する杭-地盤相互作用ばね<sup>2)</sup>を提案した。その適用性を確認するため、実物大単杭の水平載荷実験<sup>3)</sup>を対象として静的解析を行った。前報<sup>4),5)</sup>では、杭-地盤相互作用ばねを用いた2次元有限要素解析により、砂質地盤および粘性土地盤でそれぞれ実施された載荷実験がよく再現できることを示した。本報では、単杭の静的な挙動における地表面の影響について考察を加える。

## 2. 極限地盤反力

水平力を受ける杭に作用する極限地盤反力を評価する方法として、)地表面付近では杭前面の楔状のすべり土塊が押し上げられる受働破壊を、)地盤深部では杭に直交する面内における水平方向の支持力破壊を仮定することが既往の研究(例えば、岸田ら<sup>6)</sup>)で提案されている。上記の仮定による深度 $z$ における極限地盤反力度をそれぞれ $P_{y1}(z)$ 、 $P_{y2}(z)$ とすると、極限地盤反力度は $P_y(z)=\min[P_{y1}(z), P_{y2}(z)]$ で与えられ、地表面から $P_{y1}(z)=P_{y2}(z)$ となる限界深さ $z_r$ までの範囲に対して地表面の影響を考慮することになる。前報に示した載荷実験の地盤条件に関して、岸田ら<sup>6)</sup>の方法に準じて算定した $P_y(z)$ と $z_r$ を図-1に示す。一様な砂質地盤( $c=0, \phi=40^\circ$ )と粘性土地盤( $c=20\text{kPa}, \phi=0$ )に対して、限界深さはそれぞれ $z_r=5.8\text{m}$ 、 $1.0\text{m}$ となる。一方、杭-地盤相互作用ばねの上限値 破綻荷重  $F_{\max}(\text{kN})$ は、 $F_{\max}=L \cdot D \cdot \alpha \cdot \tau_{m0}$ から得られる<sup>2)</sup>。ここで、 $L(\text{m})$ はばね支保長、 $D(\text{m})$ は杭径、 $\alpha$ は $\tau_{m0}$ で正規化した破綻荷重、 $\tau_{m0}(\text{kN/m}^2)$ は土の初期せん断強度である。前報の解析条件に関するばね上限値、すなわち極限地盤反力度 $q_{\max}=F_{\max}/(L \cdot D)=\alpha \cdot \tau_{m0}(\text{kN/m}^2)$ を図-1に示す。ここで、 $\alpha$ は2次元水平断面内の杭-地盤系の解析から得られるため、 $q_{\max}$ は地盤深部の $P_{y2}$ に対応している。杭の主要な変位が生じるGL-5.0m程度までの範囲に関して、砂質地盤の $q_{\max}$ は $P_{y2}$ の1/5~1/6であり、 $P_{y1}$ よりも小さい。粘性土地盤の $q_{\max}$ は、粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ の両者を有するせん断強度<sup>5)</sup>を定義しているため、 $P_{y2}$ の3程度大きい値になる。地表面の影響は、相互作用ばねが発揮するばね力 $F(\text{kN})$ に低減係数を乗じて考慮する。

## 3. 地盤反力度～相対変位関係

砂質地盤での長杭に対する水平載荷試験の有限要素解析結果のうち低減係数を考慮しないケース<sup>4)</sup>について、杭頭変位 $u=10, 25, 35, 60\text{mm}$ の各段階における地盤反力度 $q$ の深度分布を図-2に示す。載荷が進むに従って、地表面付近から地盤深部へ地盤反力度が上限に達していく状況が判る。図-3に地盤反力度 $q$ と相対変位 $u_{ij}$ の関係を表わす典型的な深度について示す。表層の粘性土層(GL-0.8m)は、 $u_{ij}>40\text{mm}$ でほぼピーク状態となる。GL-1.0m以深の砂質土層では、 $u_{ij}=2\sim4\text{mm}$ で地盤反力 $q$ がピークを示す。その後、GL-1.6mでは残留状態となるが、GL-2.4mではピーク

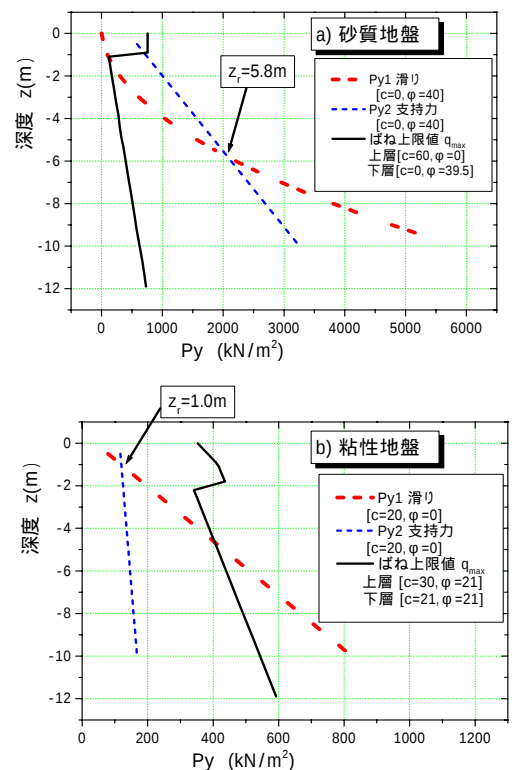


図-1 極限地盤反力度

ク値を維持している。杭変位の小さい GL-5.0m では、初期の弾性域にある。

#### 4．地盤挙動との関連

図-4 に杭頭変位  $u=60\text{mm}$  における杭と地盤の変形図を示す。杭前面地盤では上向きの鉛直変位が GL-4.0 以浅で生じており、杭背面地盤では引張域が生じている。また、図-2 に示す様に、 $\tau_{m0}$  を用いて算定した  $q_{\max}$  に対し、表層付近では解析で発揮される  $q_{\max}$  が小さくなっている。これは、図-4 に示される杭背面地盤の引張破壊による  $q_{\max}$  の減少と考えられる。ただし、本解析では杭間隔  $10D$  の杭—地盤モデルを設定しており、この変形図は杭中心から  $5D$  離れた断面での地盤変形に対応しているため、杭を含む断面の実測値とは直接比較できない。上記の通り、地盤モデルの変形・ひずみは杭を含む断面と定性的傾向が類似しており、前報で再現された単杭の挙動が実験結果と良好に一致することから、本解析で用いた相互作用ばねが杭近傍の土の応力～ひずみ関係とうまく連動してばね力  $F$  を評価していると考えられる。

#### 5．低減係数の効果

地表面の影響を考慮するため導入した地盤反力の低減係数の効果を検討した。ここでは、載荷実験が実施された砂質地盤の表層部の粘性土層（厚  $1\text{m}$ ）を、その下層の砂質土層と同様な物性に置換え、仮想の様な砂質地盤に対してパラメータスタディを行った。限界深さ  $z_r=3.2, 4.0, 5.6\text{m}$ 、低減係数  $=0.7, 0.9, 1.0$  に対して、長杭の載荷実験の有限要素解析で得られた杭頭の荷重～変位関係を図-5 に示す。上記の低減係数の範囲に対して、初期剛性への影響は小さく、降伏後の杭頭荷重の差も  $20\%$  以下の比較的小さい範囲になった。また、実験結果と比較すると、表層の粘性土層が杭の水平抵抗力に寄与する割合が大きいことが認められた。この観点からも、特に表層の土の物性値に関する適切な評価が杭-地盤系の解析において重要であると言える。  
謝辞：本検討は、FLIP の改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立された FLIP 研究会（事務局：（財）沿岸開発技術研究センター）の活動の一環として実施されたものである。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。ここに謝意を表します。

参考文献：1) Iai et al.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990. 2) 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)。3) 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, pp.357-367, 2002.9. 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) 吉川ら：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2 粘性土地盤、土木学会第58回年次学術講演会、2003.9(投稿中)。6) 岸田・中井：地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗、日本建築学会論文集、第281号, pp.41-53, 1979.7.

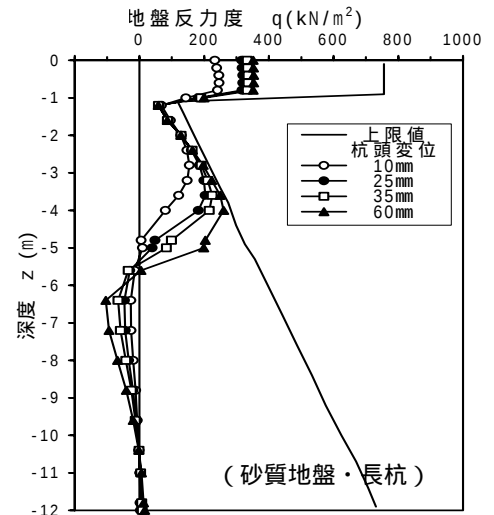


図-2 杭に作用する地盤反力分布

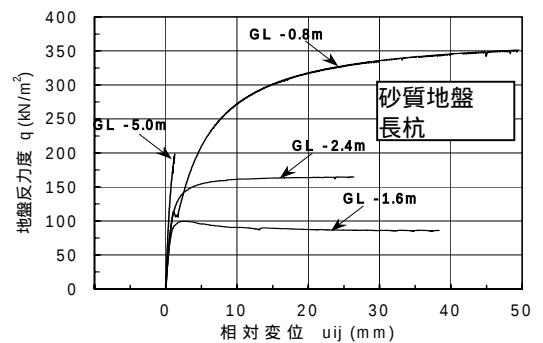


図-3 地盤反力度～相対変位関係

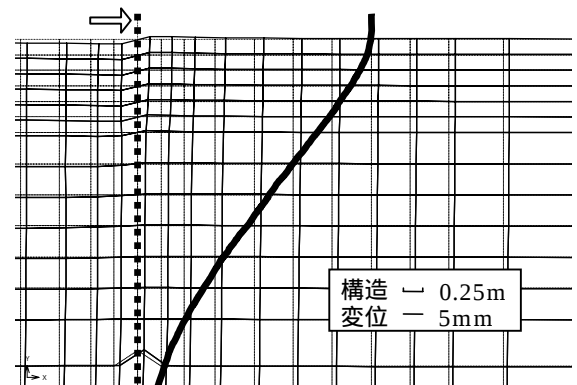


図-4 杭と地盤の変形図（砂質地盤・長杭）

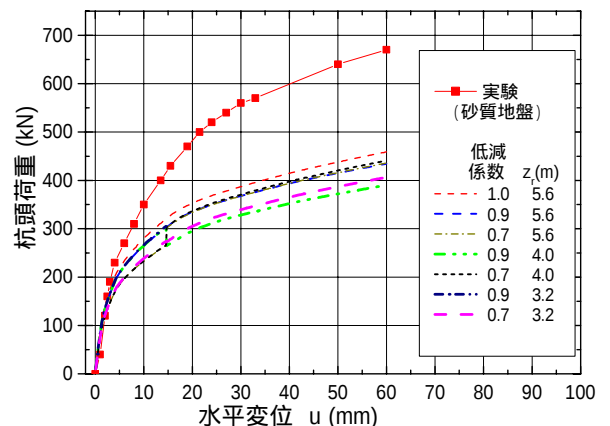


図-5 低減係数の効果（砂質地盤・長杭）