

武蔵工業大学 学生員 ○金丸裕秀 橋本 理

武蔵工業大学 正会員 末政直晃 片田敏行

東急建設(株) 正会員 中村和之

1. はじめに

地盤の側方流動等の影響により杭と地盤の相対変位が大きくなると、杭―地盤系の挙動は極めて複雑なものとなる。すなわち、地盤反力は強い非線形性を示すようになり、杭周りには隙間が生じる¹⁾。地盤反力の非線形性や隙間の影響をバリエーションもしくはトリニウムにより表現する算定法が提案されているが、パラメータの決定方法が経験的なものであることが多く、十分に検討されているとは言い難い。そこで本研究では、杭に水平変位が生じたときの杭周辺地盤の変形に円筒の押し抜け解²⁾を適用し、粘土地盤における地盤反力―変位関係の定式化を試みた。杭周りに生じる隙間の影響を考慮に入れるため、杭の前面と背面を分けて考えた。また、模型粘土地盤中に埋設した杭を変位させる水平載荷実験を行い、解析モデルの適用性について検討した。

2. 円筒の押し抜け解を用いた地盤反力―変位関係

図-1に解析モデルを示す。杭と周辺地盤の挙動は局所的には3次元的になるが³⁾、全体としての挙動を平面ひずみ状態としてモデル化した。また、粘土地盤における短期挙動問題を対象としたので非排水条件とした。

杭に水平変位が生じると、その周辺地盤には初期に弾性変形が生じるものの、変位が大きくなるにつれて杭周りに塑性の挙動を示す領域が発生する。そこで、弾性領域と塑性領域に分けて検討した。それぞれの解析方法について以下に述べていくことにする。

(1)弾性領域

半径方向に r 座標をとり、半径方向の変位を ξ とすると半径方向及び円周方向のひずみは次のようになる。

$$\text{半径方向} \quad \varepsilon_r = -\frac{d\xi}{dr} \quad (\text{圧縮側を正}) \quad (1)$$

$$\text{円周方向} \quad \varepsilon_\theta = -\frac{\xi}{r} \quad (2)$$

また、弾性的な応力―ひずみ関係は

$$E \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\nu^2 & -\nu-\nu^2 \\ -\nu-\nu^2 & 1-\nu^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

となることから、半径方向の応力と変位の関係は次のように表すことができる。

$$\sigma_r = \frac{2G}{r} \xi \quad (4)$$

ここで G はせん断弾性係数で、 $E/2(1+\nu)$ で表される。

(2)塑性領域

地盤内における初期応力状態は、 $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{\theta 0}$ である。

ここで、トレスカの降伏条件を適用すると

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = 2c_u \quad (5)$$

のときに降伏が生じる。応力増加の過程では弾性解析を適用し、 $\Delta\sigma_r = -\Delta\sigma_\theta$ とおいた。したがって、降伏が生じるのは、(6)式で表されるときである

$$\sigma_r = \sigma_{\theta 0} + c_u, \quad \sigma_\theta = \sigma_{\theta 0} - c_u \quad (6)$$

降伏がはじめに生じるのは、杭周りの地盤である。その後、さらに杭を水平変位させると、塑性的挙動を示す土の領域は半径方向外側へ拡大していく。ここで、半径方向のつり合い式をたてると

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2c_u}{r} = 0 \quad (7)$$

で与えられる。ここで、杭表面上の任意点 A および弾塑性境界上に位置する点 E (図-2) の2点について考えると、点 E における半径方向応力は $\sigma_{\theta 0} + c_u$ で与えられることからこのときの地盤反力 ψ_e は(7)式より

$$\psi_e = \sigma_{\theta 0} + c_u + 2c_u \ln \left[\frac{r_{ee}}{R_e} \right] \quad (8)$$

となる。ここで、A'E'間領域における体積がAE間領域の体積と等しいことと、またE点で降伏が生じるときに

$$-\frac{1}{2Lr} = \ln \left[\frac{r_{e0}}{r_{ee}} \right] \quad (9)$$

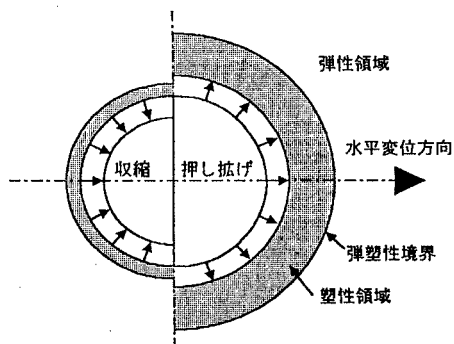


図-1 解析モデル

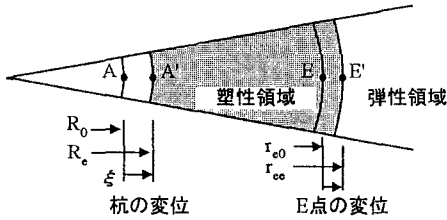


図-2 塑性解析

(9)式が成り立つことを考慮すると、(8)式は以下のように書き直すことができる。

$$p_e = \sigma_{h0} + c_u \left\{ 1 + \ln \left[\frac{\{R_0 / (R_0 + \xi)\}^2 - 1}{\exp(-1/I_r) - 1} \right] \right\} \quad (10)$$

ここで、 I_r は剛性指数であり、 G/c_u で表される。

一方、杭の背面側は、杭の前面側と同様に式を誘導できる。しかし、周辺地盤は降伏した時の地盤内におけるつりあいは、式(7)における c_u の負号が変わり、次のように表すことができる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2c_u}{r} = 0 \quad (11)$$

また、(10)式を導く際に円周方向ひずみが $1/I_r$ となること、ならびに $R_e = R_0 - \xi$ であることを考慮すれば、以下の式を得る。

$$p_e = \sigma_{h0} - c_u \left\{ 1 + \ln \left[\frac{\{R_0 / (R_0 - \xi)\}^2 - 1}{\exp(1/I_r) - 1} \right] \right\} \quad (12)$$

(3)地盤反力

地盤反力は上記した方法により杭前面それぞれの土圧を算定した後、杭前面土圧(式(10))から杭背面土圧(式(12))を減じたものから求めることができる。

3. 模型実験概要

図-3に実験システムを示す。地盤試料にはカオリン粘土にベントナイトを重量で5%配合したものを用い、 1.0 kgf/cm^2 の圧力で圧密を行った。圧密終了後、地盤内に杭を埋め込み、地盤の両端には、地盤の変形を拘束しないためのウレタンパを設置した。載荷実験は、地盤に拘束圧 1.0 kgf/cm^2 を作用させた状態下において、杭を載荷速度 0.013 cm/s で変位させ、杭の前面に作用する土圧、ポットセルに作用する荷重および杭の変位量を測定した。

4. 実験結果との比較

図-4は、縦軸に地盤反力 P を非排水せん断強度 c_u で除したものを、横軸に杭の変位 D_h を杭幅 d で除したものでとりまとめたものである。実験結果において、 D_h/d が 0.45 以降で曲線がとぎれている。これは杭の背面側において作用していたサクシジョンによる引張力

が、杭と地盤の間の隙間発生によって、サクシジョンがなくなったためである。 D_h/d が 0.17 程度までは実験結果に比べ解析結果の方がやや小さく表れている。それ

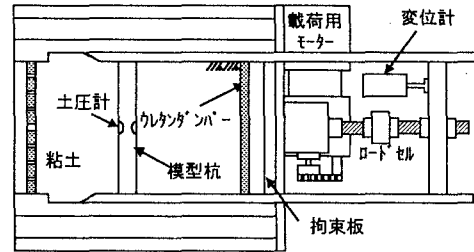


図-3 実験システム

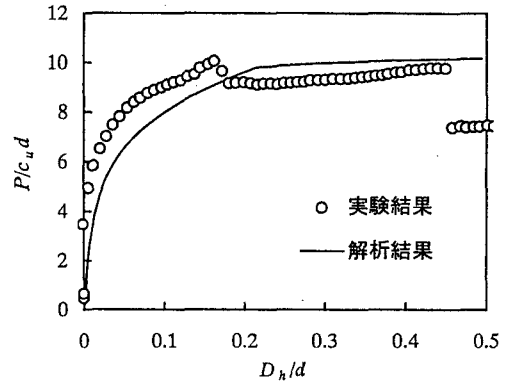


図-4 実験結果との比較

以降の変位では解析結果の方が大きい値をとるが良く一致している。全体的に見れば、解析結果は微小変形時から大変形時までうまく表現できる。しかしながら、解析において杭の背面におけるサクシジョンの消滅について表現できなかった。

5. まとめ

本稿では、杭周辺地盤の変形に円筒押し抜け解を適用し、粘土地盤における地盤反力-変位関係を定式化した。実験値との比較を行った結果、本解析手法は微小変形時から大変形時までの杭の挙動をうまく表現できることが分かった。しかしながら、サクシジョンの消滅についてや他の粘土地盤についても、今後さらに検討を続けていく予定である。

【参考文献】

- 1)長瀬他(1995): 水平力を受けるスラブ付き杭支持建物の破壊性状,第30回地盤工学研究発表会.
- 2)G.T.Houlsby(1988): Analysis of the cone pressuremeter test in clay,Geotechnique.
- 3)Broms,B.B.(1964): Lateral resistance of piles in cohesive soils, ASCE.