

Ⅲ - B19

杭周りの地盤の変形を考慮した地盤反力-変位関係の定式化

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

杭と地盤の相対変位が大きくなると、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⁾。この地盤反力の非線形性や隙間の影響をバリエーションなどにより表現する算定法が提案されているが、十分に検討されているとは言い難い。Baligh¹⁾は、杭が貫入されときの周辺地盤の挙動を完全流体の挙動に置き換え、そのひずみ分布を調べている。この方法は Strain Path Method と呼ばれている。そこで本研究でも、杭周りをすり抜ける杭周辺地盤を完全流体と仮定し、その流速から地盤の変位分布を求めて地盤反力-変位関係の定式化を試みる。

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. 地盤反力-変位関係の定式化

(1) 解析の考え方

一様流中の円柱周りの流れの複素速度ポテンシャル $W(z)$ は、完全流体の一様流に二重湧出しを重ねた流れの場合(図-1)を考えることにより次式で表される²⁾。

$$W(z) = U_0 z + U_0 \frac{R_0^2}{z} \quad (1)$$

ここで、 U_0 は一様流の流速、 R_0 は円柱の半径であり、 z は複素数である。

任意点における x, y 軸方向の速度成分は、以下のよう表すことができる。

$$U_x = U_0 \left\{ 1 - \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \cos 2\theta \right\} \quad U_y = -U_0 \left\{ \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \sin 2\theta \right\} \quad (2)$$

x, y 軸方向の変位速度はそれぞれ次のようになる。

$$U_x' = U_0 - U_x \quad U_y' = U_y \quad (3)$$

地盤内の任意点の速度ベクトルの作用方向 θ を求めると

$$\tan \theta = \frac{|U_y'|}{|U_x'|} = \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \tan 2\theta \quad (4)$$

となり、 θ が十分に微小であるとき、合速度の作用方向は、杭中心点から $r/2$ の位置を中心とする半径方向を表している。そこで本解析では図-2 に示すような円筒座標をとり、地盤内の応力状態を調べた。

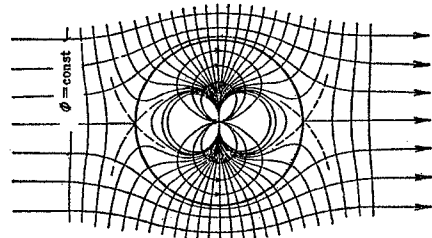


図-1 一様流中の円柱周りの流れ²⁾

(2) 単調載荷時における杭前面土圧

a) 弾性領域

半径方向に r 座標、円周方向に θ 座標をとると、荷重作用軸上の任意点における各方向のひずみ α, ε は、式(3)を r で微分し、時間 t で積分することにより求めることができる。すなわち

$$\alpha = 2 \ln \left(\frac{r}{R_0} \right), \quad \varepsilon = -2 \ln \left(\frac{r}{R_0} \right) \quad (5)$$

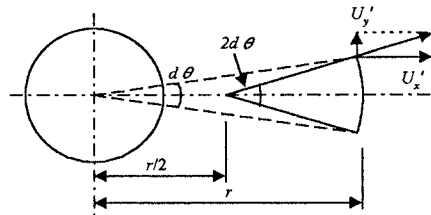


図-2 SPM で用いる円筒座標
また、半径方向のつりあい式をたてると

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (6)$$

が得られる。そして、弾性領域における土圧-変位関係は次式となる。

$$p_e = \sigma_{ho} + 4G \ln \left(\frac{R_0 + \xi}{R_0} \right) \quad (7)$$

b) 塑性領域

式(6)にトレスカの降伏条件を適用すると

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{4c_u}{r} = 0 \quad (8)$$

となり、杭に作用している土圧 p_e と変位 ξ の関係は次式となる。

$$p_e = \sigma_{ho} + C_u \left[1 + \frac{4}{3} \ln \left[\frac{1 - \left\{ R_o / (R_o + \xi) \right\}^3}{1 - \exp(-3/4lr)} \right] \right] \quad (9)$$

(3) 単調載荷時における杭背面土圧

(8)式の C_u の符号が逆になることを考慮して杭の前面側と同様に杭の背面側を導くと次式となる。

$$p_e = \sigma_{ho} - C_u - \frac{4}{3} C_u \ln \left[\frac{\left\{ R_o / (R_o - \xi) \right\}^3 - 1}{\exp(3/4lr) - 1} \right] \quad (10)$$

以上、簡略にまとめたが詳しくは参考文献4)に記している。

(4) 地盤反力の補正

実際の杭で最も大きな水平応力を受ける部分は杭前面側の頂上部である。この頂上部の杭前面土圧から求められる応力に杭径を乗じて求められる地盤反力は、実際に杭に作用している地盤反力よりも大きな値をとるものと考えられる。実際の杭には地盤反力だけではなく、①杭背面側に生じる隙間に伴う付着圧力や、②杭と地盤の間に生じる摩擦なども作用している。①については、Swain³⁾が地中深くのアンカーの周辺地盤の付着圧力の値として、非排水条件下では約100kPaが妥当であるとしている。

②の問題については、Randolph⁴⁾が極限解析法により、粘性土中の円形単杭が水平載荷されるときに極限地盤反力は杭表面が滑らかな場合は $P_{ult} = 9.14 C_u d$ 、表面が粗い場合は $P_{ult} = 11.94 C_u d$ と報告している。そこで、本研究では解析から得られた値に次のような補正を加えることにした。すなわち

$$P = \beta (\psi_f - \psi_{sk}) d \quad (11)$$

$$\text{ただし、} \quad \beta = \frac{9.14 C_u \sim 11.94 C_u}{\psi_{ult} + \psi_{suc}}$$

(ψ_f は杭前面土圧、 ψ_{sk} は杭背面土圧、 ψ_{ult} は円筒の極限土圧、 ψ_{suc} は付着圧力)

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、1.0kgf/cm²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1.0kgf/cm²を作用させた状態で、杭を載荷速度0.013cm/sで変位させ、杭の前背面に作用する土圧、ロード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

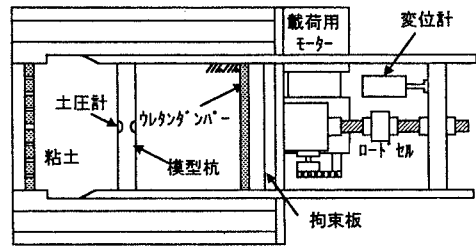


図-3 実験システム

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。

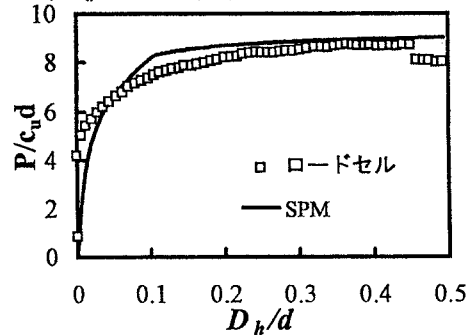


図-4 実験結果との比較

これは杭の背面側において作用していた負圧圧力が、杭と地盤の間の隙間発生によって、なくなったためである。 D_h/d が0.04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。それ以降の変位では解析結果の方が大きい値をとるが極限地盤反力はほぼ一致している。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ている。

5. まとめ

杭周辺の地盤の挙動を完全流体とした Strain Path Methodを用いて地盤反力-変位関係の定式化を行った。その結果、本手法が微小変位から大変位領域まで良く一致することが分かった。

参考文献

- 1) Baigh, M.M.: Strain path method, ASCE, Vol.111, No.9, 1985.
- 2) 日野隆雄: 流体力学 朝倉書店出版 1992
- 3) Swain, A.: Model ground anchors in clay, PhD Thesis, University of Cambridge, 1976.
- 4) 橋本理: 杭の水平耐力に関する基礎的研究 武蔵工業大学修士論文 1996
- 5) Randolph, M.F. and Houlsby, G. T.: The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil, *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.613-623, 1984.