

杭の押し広げによる地盤内応力変化と応力残留特性を考慮した周面摩擦力改善効果の評価

九州大学大学院 学 坂本 俊彦 藤原 落合 英俊  
正 安福 規之

**1.はじめに** これまでの研究で、杭周辺地盤の地盤内応力を増加させることにより周面摩擦力改善効果が得られることが分かっている<sup>1)</sup>。そのため杭周辺地盤に生じる地盤内応力変化を精度よく評価することは、周面摩擦力改善効果を考える上で大変重要である。本研究では、これらの地盤内応力変化と周面摩擦力改善効果を模型载荷試験装置を用いて測定し、空洞膨張理論による評価を行った。また周面摩擦力を適切に評価するには応力残留特性を考慮することが重要であることを示す。

**2.周面摩擦力改善効果の考え方**

砂地盤における周面摩擦力算定式は一般に式(1)で与えられる。

$$f_s = \sigma_h \tan \delta = \sigma_{h0} \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 $f_s$ :周面摩擦力、 $\sigma_h$ :杭側面に作用する初期水平応力、

$\delta$ :杭と地盤との摩擦角(相対的に粗い場合  $\delta = \phi$   $\phi$ :内部摩擦角)

杭の押し広げにより生じた杭周辺地盤の水平応力増加に着目した周面摩擦力算定式は式(2)で与えられる。

$$f_s = (\sigma_{h0} + \Delta\sigma_h) \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\sigma_h$ :杭の押し広げによって生じた地盤内水平応力変化

式(2)中の $\Delta\sigma_h$ を十分に発揮できる新たな基礎形式を提案することができれば、有効な杭の周面摩擦力改善効果が期待できる。実験では杭径を増加させることにより、 $\Delta\sigma_h$ を再現しており、今後これを杭の押し広げによる地盤内応力変化と呼ぶ。

**3.実験概要** 図-1は、今回の実験で使用した杭径可変・2次元载荷試験装置の概略図である。土槽は横幅970mm、高さ900mm、奥行95mmで、内部の亚克力板を外部から鋼材で補強している。土槽内部の亚克力板表面には壁面との摩擦を避けるために、グリースを塗りメンブレンを貼ることにより土槽内の応力状態を一定に保っている。図-2は、今回の実験で使用した模型杭の概略図である。模型杭は断面95mm×700mmのスチール製板にスチール製丸棒(図-2)が固定されたもの2枚とスチール製丸棒(図-2)を取り付けた中心軸棒から成り立っている。杭周辺地盤が締固められる過程を表現するために、模型杭は杭内部のスチール製丸棒(図-2)が噛み合うことで機械的に杭を側方に押し広げる構造となっている。実験は、杭を土槽に設置後、上載圧 $\sigma_v = 50\text{kPa}$ を加え、押し広げ量  $dr/r_0 = 0 \sim 0.10$  に相当する変位を杭に与えてそのときの地盤内水平応力を測定した。その後、载荷試験を行うことにより、杭の周面摩擦力を測定した。実験に用いた試料は豊浦砂であり、すべての実験で相対密度  $D_r = 75\%$ とした。ここで、 $dr$ は杭を側方に押し広げたときの変位量、 $r_0 (= 35\text{mm})$ は杭の初期半径、 $dr$ を  $r_0$ で正規化した値  $dr/r_0$ を押し広げ量と定義している。

**4.実験結果および空洞膨張理論による評価** 本研究では、Carterら<sup>2)</sup>によるキーワード 杭, 周面摩擦, 空洞膨張理論

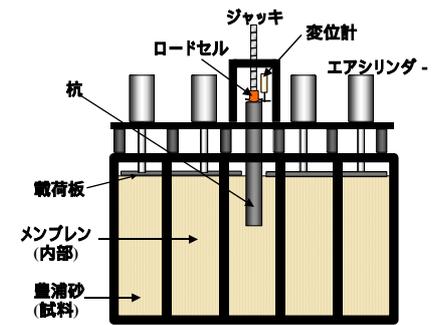


図-1 杭径可変・2次元载荷試験装置

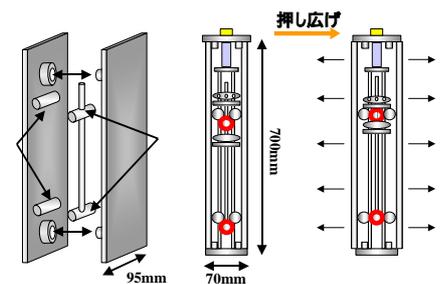


図-2 模型杭

表-1 各種パラメータ

初期水平応力 $\sigma_{h0}$	25(kPa)
初期杭半径 $r_0$	35(mm)
押し広げ量 $dr/r_0$	0, ..., 0.10
摩擦角 $\phi$	30°
ダイラタンシー角 $\psi$	5°
粘着力 $c$	0
せん断弾性係数 $G$	300(kgf/cm <sup>2</sup> )

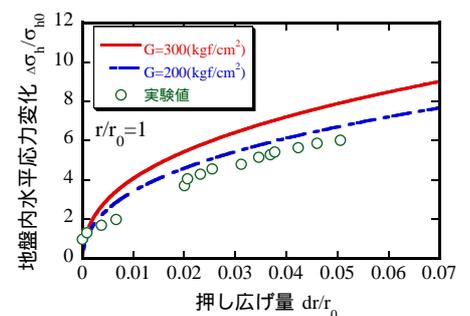


図-3 地盤内水平応力変化

空洞膨張理論を適用し、杭の押し広げ効果による地盤内応力変化の評価を行った。同理論では地盤を Mohr-Coulomb 弾・完全塑性体と仮定し、円柱空洞が膨張したときの周辺地盤の水平応力変化を閉じた解として求めることができる。以下、模型実験と理論値との比較を行っていく。理論値を求めらるにあたって用いたパラメータを表-1 に示す。

(1)杭に作用する地盤内水平応力変化 図-3 は、杭に押し広げ量  $dr/r_0=0 \sim 0.10$  に相当する変位を与えたとき、杭側面に作用する水平応力変化の様子を示している。実験値・理論値ともに押し広げ初期に大きな応力変化を示しており、その後、極限值に収束していく傾向にある。

(2)周面摩擦力改善効果における空洞膨張理論の適用 図-4 は、理論値と実験値の周面摩擦力改善効果を比較したものである。周面摩擦力改善効果とは、押し広げ後に杭を貫入させたときの周面摩擦力  $f_s$  を、押し広げないで ( $dr/r_0=0$ ) 杭を貫入させたときの周面摩擦力  $f_{s0}$  で正規化した値である。縦軸は理論値であり、周面摩擦力算定に式(2)を用い、 $\Delta\sigma_h$  に空洞膨張理論で求めた値を直接代入して求めた。横軸は実験値であり、その値は図-1 に示す杭頭と杭先端に取り付けたロードセルを介して求めている。杭側面に作用する水平応力変化  $\Delta\sigma_h$  を直接、式(2)の中に代入すると、実験値の改善効果が  $f_s/f_{s0}=2$  程度であるのに対し、理論値は  $f_s/f_{s0}=6 \sim 10$  と過大に評価してしまう。

この理由として、図-5 に示すように杭側面から少し離れると水平応力が大きく減少しているため、杭貫入過程において地盤内のせん断領域での土粒子の再配列等により、杭側面に作用する応力の緩和が起こることが考えられる。そのため、杭の押し広げによる周面摩擦力改善効果を評価するには、杭側面に作用する地盤内応力変化に応力緩和に関する項を考慮する必要があると判断される。図-6 は杭を押し広げ後、すぐに貫入試験を行い測定した周面摩擦力改善効果と杭を押し広げ後、24 時間放置した後、貫入試験を行い測定した周面摩擦力改善効果との比較である。24 時間経過すると地盤内応力は 25% 程度に収束する<sup>1)</sup>が、周面摩擦力改善効果に大きな違いは見られない。つまり、杭貫入過程と 24 時間放置した後の残留応力特性には関連性が示唆され、杭貫入過程で応力残留率を 25% であるとすると、式(2)は、

$$f_s = (\sigma_h + \alpha \Delta\sigma_h) \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ : 応力残留率(ここでは、25%)

と書くことができる。式(3)を用いて、理論値と実験値の周面摩擦力改善効果を比較したものが図-7 である。実験値と理論値との比較は良好であり、応力残留率を取り入れることにより、結果として杭の押し広げによる周面摩擦力改善効果をうまく評価できることが分かった。

**5.まとめ** 本研究の結論は以下ようになる。1)杭の押し広げによって生じた地盤内応力変化による周面摩擦力改善効果の評価において、直接、地盤内応力変化を(1)に代入すると過大に評価してしまう。2)その要因の一つとして、杭貫入過程において地盤内のせん断領域内での土粒子の再配列等により、杭側面に作用する応力の緩和が起こることが考えられる。3)応力残留率の考えを取り入れることにより、周面摩擦力改善効果をうまく評価することができる。今後の課題として、応力残留率の合理的な考え方の提案が必要である。

【参考文献】1)金川ら：杭の押し広げによる周面摩擦力改善効果，第 37 回地盤工学研究会発表会講演集，pp.1431-1432，2002，  
2)Carter et al. : Cavity Expansion in cohesive frictional soils, *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.349-358, 1986

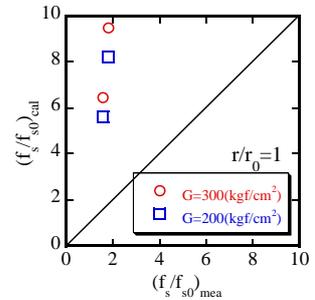


図-4 周面摩擦力改善効果

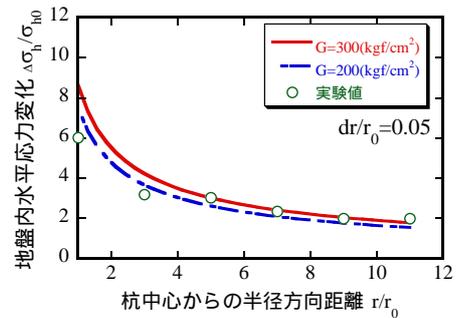


図-5 半径方向距離-水平応力変化

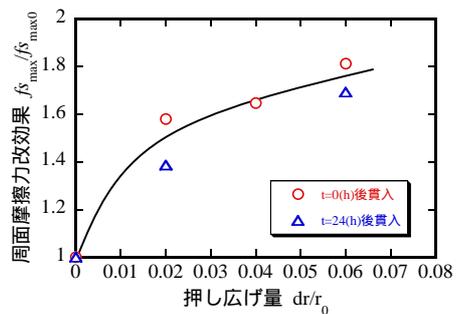


図-6 t=0,24(h)における周面摩擦力改善効果

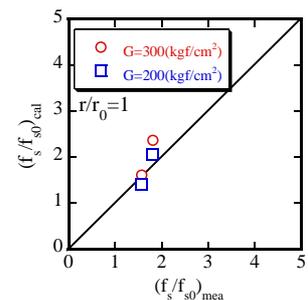


図-7 応力緩和を考慮した周面摩擦力改善効果