

ソイルセメント複合杭による支持力の改善

九州大学大学院 学○澤田 繁治 F 落合 英俊
九州大学大学院 正 安福 規之 正 大野 司郎

1. はじめに

破碎性地盤では、粒子破碎に伴う体積圧縮等の要因により杭の支持力が十分得られないことが懸念される。このため支持力発現特性の把握と有効な支持力の改善法、合理的な支持力評価法の確立が求められている。著者らは、そのような地盤での周面摩擦力の発現特性について、次式に示す評価式で検討を行い、杭表面滑りと杭近傍の地盤内滑りの摩擦抵抗角 δ' に関する報告（すべり面に作用する垂直応力 σ_n' 一定の条件）を行ってきた¹⁾。

$$f_s = \sigma_n' \tan \delta' \quad \dots (1)$$

本研究では、表面粗度が十分に大きく周面摩擦力の改善が期待できるソイルセメント複合杭に着目し、そのモデル化および室内載荷試験を行った。ここでは、載荷試験概要および結果を報告し、支持力の改善効果について考察する。

2. ソイルセメント複合杭の特徴を考慮した模型実験

ソイルセメント複合杭工法は、杭孔掘削時に原地盤にセメントミルクを注入攪拌混合し、同時に圧入した鋼管とソイルセメントを一体固化させて杭とする工法である。この工法によれば、①杭表面は大小の凹凸が目視で確認できるほど十分に粗く、砂と杭材の摩擦抵抗角が大きくなること、また②施工時の地盤の応力開放が少ないことの²⁾ために支持力を改善が期待できる。そこで、この種の複合杭の式(1)に基づく評価法や改善効果を明らかにするためには、①摩擦特性の考え方を確立するためのすべり面の発生状況の観察、②周面摩擦力発現特性の把握、③杭載荷に伴う垂直応力の評価が重要となる。

以上の検討項目を考慮すると、模型ソイルセメント複合杭の場合、地盤中における杭表面の形成を忠実に再現することが重要であることから、以下の手順で複合杭の作成を行った。①円筒状の OHP シートを境とした縦坑（直径 7cm）が中心に形成されるように、円柱形のモールド内に締固めにより模型地盤（含水比 15~20%）を作成する。②規定量のセメントペースト（水セメント比 1.0）を縦坑内に注入し、コンクリートとの一体化を考慮して表面加工が施された鋼管を縦坑中心に挿入する。③OHP シートを取り外し、模型地盤の水分を補いながら、3 日程度地盤中で養生を行う。また、LDT を用いて杭に作用する軸力を測定するため、鋼管内は中空とした。また、固化体中の骨材はせん断強度に影響を及ぼさないと考え、セメントペーストをソイルセメントに代用した。

図-1 に模型杭載荷試験装置の模式図を示す。模型ソイルセメント複合杭は、杭径 $D=7\text{cm}$ で上記の方法で予め作成する。模型地盤は、直径 30.5cm、高さ 40cm の円筒型で側方を厚さ 1mm のメンブレンで拘束しており、杭先端部は、アクリル盤と鉄製モールドより中空とした。杭と地盤の接触長 $H=20\text{cm}$ とし、地盤内応力は、空気圧を介して鉛直応力と水平応力を独立に制御することにより与えた。模型地盤の作成には空気乾燥した試料を使用し、ランマーを用いた締固めにより相対密度を調整した。用いた試料は、破碎性に富む Quiou 砂 ($G_s=2.697, e_{\max}=1.303, e_{\min}=0.786, \phi_{cv}'=39^\circ$) である。詳細については文献 1) を参照されたい。模型杭への載荷は変位制御方式（貫入速度 0.18mm/min ）で、試験中、模型杭の摩擦抵抗荷重、鉛直変位および LDT により杭に作用する軸力を測定した。

3. 実験結果および考察

図-2 は、載荷試験から得られた摩擦抵抗荷重を周面積で除した周面摩擦力と沈下量の関係を示している。杭の沈下とともに周面摩擦力が増大し、最大周面摩擦力を示した後徐々に軟化し、一定の周面摩擦力に残留する傾向にある。図-3 は、最大周面摩擦力を $f_{s(p)}$ 、残留周面摩擦力（沈

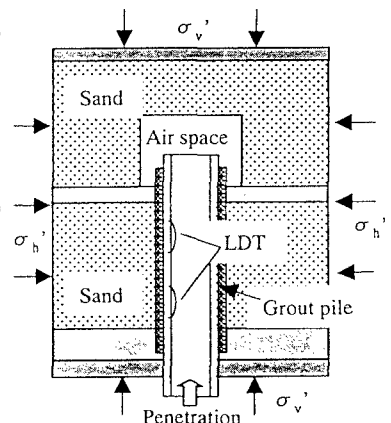


図-1 模型杭載荷試験装置の模式図

下量 $S=10\text{mm}$) を $f_{s(p)}$ と定義し、地盤内水平応力 σ_h' で整理したものである。 $f_{s(p)}$ は、 σ_h' の増加とともに線形的に増加し、その近似直線は、限界状態時の砂の内部摩擦角 ϕ_{cv}' を用いて、 $f_s = \sigma_h' \tan \phi_{cv}'$ で与えられる直線とほぼ等しくなることがわかる。また、このときの杭近傍における地盤内の様子を写真-1 に示した (25mm 沈下時)。杭体作成時に多少の凹凸が形成されたとしても杭表面ごく近傍で滑りが生じており、杭と地盤の摩擦抵抗は、杭表面近傍で発揮される土-土間の摩擦抵抗として評価するのが妥当であろうと思われる。一方、 $f_{s(p)}$ は σ_h' に対し非線形関係にあり、 σ_h' が大きくなると残留周面摩擦力に漸近するようになる。

図-4 は、滑らかな杭と今回のソイルセメント複合杭の残留周面摩擦力 $f_{s(p)}$ について実験値、および(1)式による算定値を比較したものである。なお、(1)式を用いた算定において、摩擦抵抗角は滑らかな杭の場合 $\delta'=18^\circ$ 、複合杭の場合 $\delta'=\phi_{cv}'=39^\circ$ を用い、すべり面に作用する垂直応力は地盤内水平応力と等しいと仮定している。複合杭の実験値は、いずれの水平応力においても滑らかな杭に比べ 2.5 倍程度大きく、グラウティングにより支持力は大幅に改善されていることがわかる。また、 ϕ_{cv}' を用いた算定値との対応は良好である。

先に言及したように、(1)式を用いた支持力評価では、砂と杭材の摩擦抵抗角とすべり面に作用する垂直応力の合理的な評価が必要である。今回、すべり面の発生状況の観察結果に基づいて、ソイルセメント複合杭の周面摩擦力を算定するための摩擦抵抗角として、砂の強度定数を用いることが有効であることを示した。ソイルセメント複合杭を打設する場合、破砕性地盤では体積圧縮等の体積変化を生じることが予想されることから、このような条件下での垂直応力の合理的な評価法の検討が今後の課題である。

4. まとめ

模型ソイルセメント複合杭を用いて載荷試験を行い、支持力の改善について検討した。得られた結果をまとめると以下となる。

- (1) すべり面発生状況の観察より、杭表面ごく近傍で滑りが生じ、支持力は杭表面近傍の地盤の摩擦抵抗力によって発揮されることを示した。そのため、ソイルセメント複合杭の摩擦抵抗角の評価には、砂の強度定数を用いることが有効である。
- (2) 滑らかな杭と地盤との間の摩擦抵抗角はグラウティングにより増大し、作用する鉛直応力が一定の場合、支持力は大きく改善される。

[参考文献] 1) 澤田ら：砂地盤における杭の周面摩擦力に関する地盤力学的考察，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集 pp.4-5 2) 大槻ら：同時埋設成鋼管杭施工時の周辺地盤の挙動，第 33 回地盤工学会発表会講演集 pp1391-1392 3) 賀来ら：大変形時における破砕性砂のせん断強度特性，平成 11 年度土木学会西部支部研究発表会概要集 投稿中

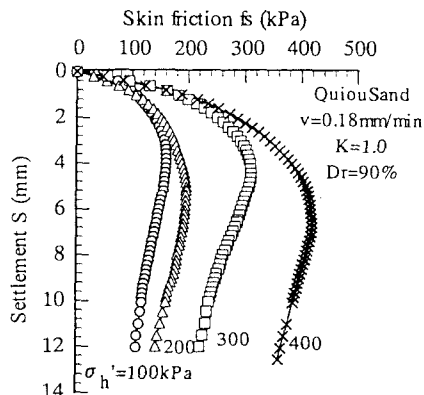


図-2 周面摩擦力と沈下量の関係

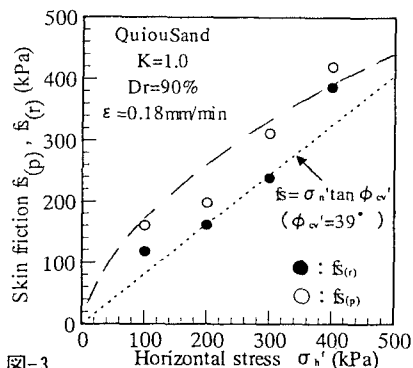


図-3 最大、残留周面摩擦力と水平応力の関係

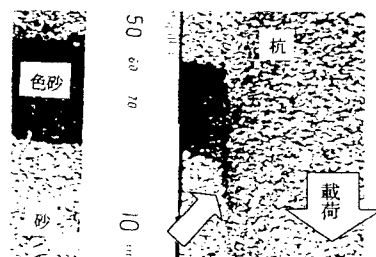


写真-1 杭近傍の地盤内の様子

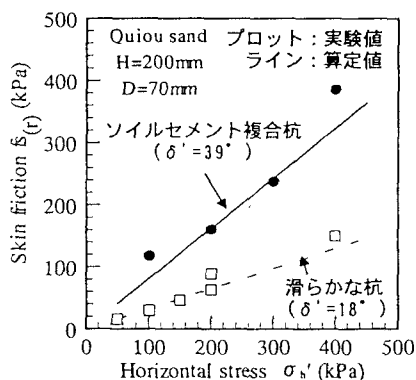


図-4 摩擦係数の改善効果