

杭の周面摩擦力の発現特性に関する考察

九州大学大学院 正 大野 司郎 F 落合 英俊
正 安福 規之

1. はじめに

杭の周面摩擦力はクーロンの摩擦則に従って発揮され、砂と杭の間の摩擦係数 ($\tan \delta'$) と杭表面に働く水平応力 (σ_h') の積によって算定されている。

$$\text{周面摩擦力 } f_s = \sigma_h' \cdot \tan \delta' \quad \cdots (1)$$

ここに、 δ' は摩擦抵抗角である。

著者らは、破碎性地盤における杭の周面摩擦力の発現メカニズムを把握するため、室内模型実験を実施し 1) 破碎性の大小に関係なくクーロン則が適用可能であること、2) そのときの摩擦抵抗角は概ね 10 度以上で粒子破碎の影響がほとんどないことを明らかにしてきた¹⁾。一方、地盤力学に基づく摩擦力の発現形態には、i) 材料間のすべり摩擦、ii) 材料間付近の地盤内すべり破壊という二つのケースがあり、それぞれ異なる破壊基準をもつことが明らかとなっている²⁾。本研究は、任意の地盤内応力を付与できる模型杭載荷装置を用いて、周面摩擦力に及ぼす応力状態の影響を把握するとともに、二つの摩擦挙動の概念を用いて周面摩擦力の発現メカニズムを考察するものである。

2. 模型杭載荷試験概要と周面摩擦力の発現特性

模型杭載荷装置の主な特徴は、杭径 3cm の表面がなめらかな平坦杭(真鍮製: 表面粗度 $R_{\max}=20\mu\text{m}$) を二重構造にして周面摩擦力和先端支持力を独立に測定できること、空気圧を介して地盤内の応力条件にみあう鉛直応力 σ_v' 、水平応力 σ_h' を任意に設定できるものである。詳細は参考文献 3) を参照されたい。試料は、気乾状態の豊浦砂 ($G_s=2.640$, $e_{\max}=0.986$, $e_{\min}=0.607$, $\phi_{cv}=31^\circ$)、Quiou 砂 ($G_s=2.697$, $e_{\max}=1.303$, $e_{\min}=0.786$, $\phi_{cv}=39^\circ$) を用いた。豊浦砂は堅固なシリカ系の砂であり、Quiou 砂は破碎性に富む砂である。模型地盤は気乾状態の試料を使用し、空中落下法により密な地盤(相対密度 80%)を作製した。また、模型杭の載荷はひずみ制御方式で行った。また、実験は、静止土圧係数 K ($=\sigma_h'/\sigma_v'$) が $0.25 \leq K \leq 4$ の一定の圧力を与えて実施された。

図 1 は典型的な周面摩擦力 f_s と正規化沈下量 S/D (S : 沈下量, D : 杭径) の関係である。周面摩擦力 f_s の挙動は、両試料ともある微小な沈下レベルで明確な最大周面摩擦力 $f_{s(p)}$ を持ち、その後残留状態ともいえる周面摩擦力 $f_{s(r)}$ をもつことがわかる。このような実験結果を残留状態の周面摩擦力 $f_{s(r)}$ に着目し、地盤内初期水平応力 σ_h' で整理したものが図 2 (a), (b) である。両試料とも $K \leq 2.0$ の範囲では $f_{s(r)}$ は σ_h' の増加とともに線形的に増加しており、その傾きは内部摩擦角の大きい Quiou 砂の方が大きいことがわかる。ところが、Quiou 砂

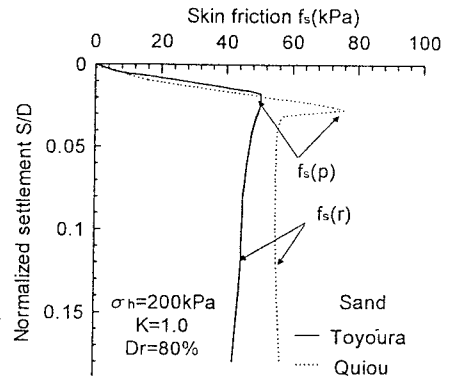
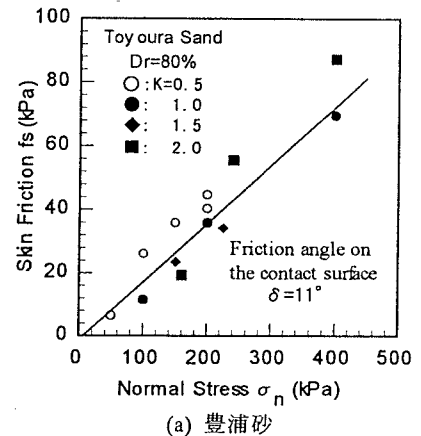
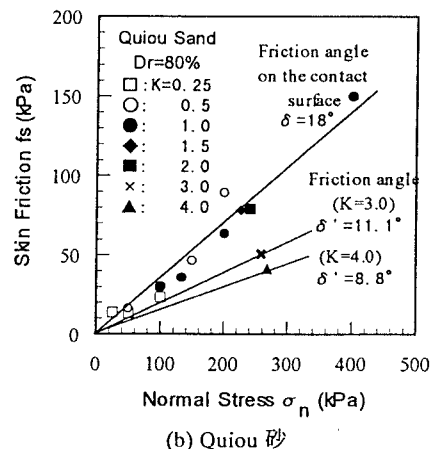


図-1 杭の典型的な周面摩擦力～沈下曲線



(a) 豊浦砂



(b) Quiou 砂

図-2 周面摩擦力和水平応力の関係

の $K \geq 3.0$ において周面摩擦力は線形関係から外れ、低下していることがわかる。摩擦力の発現形態を念頭において、この理由を考察する。

3. 周面摩擦の発現形態

図3は、支持力の発現形態について示した模式図である。右側には杭近傍の土要素の挙動の応力パスを、左側には杭周面の摩擦挙動を水平応力に対して描いている。土要素は与えられた初期応力によって土内部にせん断力が生じており、初期応力状態の K 値が大きいほど限界状態線に近いものとなる。そして、杭の貫入に伴って平均有効応力・偏差応力ともに増加し、応力パスは右上に軌跡を描くことになる。一方、周面摩擦力は杭の設置時を摩擦力 = 0 とすると、水平応力一定の条件のとき、杭の貫入に応じて周面摩擦力が発揮され、真上に上昇するような軌跡を描く。そして、破壊基準に至ったときすべり破壊が生じるのである。このとき、破壊基準は杭表面のすべり破壊と杭近傍の土のすべり破壊の二つがある。前者<図3実線>は、初期応力状態が等方応力に近く、杭の貫入によってせん断力が増加しても杭周辺の土要素は破壊に至らず、”土-杭間の摩擦抵抗角”の破壊基準 δ' で杭表面のすべり破壊が生じる。後者<図3破線>は、初期応力状態が限界状態に近い、杭の貫入によるせん断力の増加で杭近傍の土要素が破壊に達する。その結果として、周面摩擦力は土-杭間ですべり破壊を生じるものではなく、杭近傍の土-土間で地盤内のすべり破壊が生じる。そのため、水平応力との関係で周面摩擦力を表したときには、見かけの摩擦抵抗角 α の形で測定されるものとなる。ここで、図3左上に示したように、杭の貫入に伴う土要素のせん断挙動を単純せん断モードと仮定すると、みかけの摩擦抵抗角は次式で表わすことができる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{fs}{\sigma_h} \right) = \sqrt{\left(\frac{1+\kappa}{1-\kappa} \frac{1}{K} - 1 \right)} \cdot \kappa \quad \cdots (2)$$

ここに、 κ は材料定数(= $\sin \phi_v$)である。なお、式(2)の詳細な導出過程は、参考文献1)を参照されたい。

式(2)のパラメータである応力比 K と見かけの摩擦抵抗角 α の関係を示したものが図4である。応力比が大きくなると土が持っている内部摩擦角に応じて見かけの摩擦抵抗角が低下することがわかる。この α と土-杭間の摩擦抵抗角 δ' の低いものが周面摩擦力の破壊基準となる。図中のプロットおよび一点鎖線は今回実験より得られた Quiou 砂の破壊基準である。応力比の増加に伴い δ' が18度から減少していることがうかがえる。

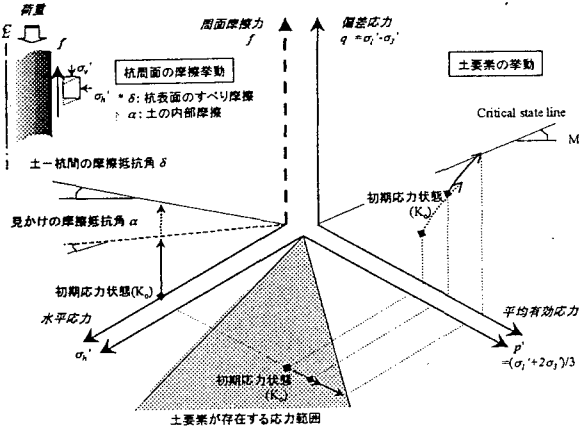


図-3 周面摩擦力の発現機構

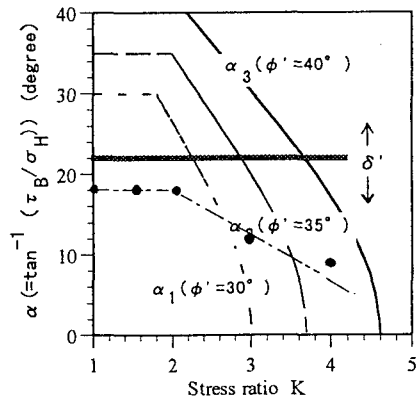


図-4 見かけの摩擦抵抗角と応力比の関係

4. おわりに

本研究では、2種類の砂を対象に模型杭の載荷実験を行い、地盤の初期応力状態が杭の周面摩擦力に及ぼす影響と摩擦力の発現メカニズムについて検討した。杭の周面摩擦力は破碎性の有無に関係なくクーロンの摩擦則が適用できるが、杭と地盤間の摩擦特性に注意する必要があることがわかった。

参考文献 1) S.Ohno, H.Ochiai, N.Yasufuku, T.Shimizu and S.Sawada (1998) Geotechnical Considerations of Skin Friction of Piles in Sands, Proceedings of 13th Southeast Asian Geotechnical conference, Southeast Asian Geotechnical Society, pp.539-544. 2) 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖, 大野司郎, 三倉義教 (1997) 粘土-鋼材間の摩擦特性試験の過圧密粘土への適用, 九州大学工学集報, Vol.70, No.2, pp159-166. 3) 安福規之, 田中邦博, 村田秀一, 兵動正幸 (1994) 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集, No.505, III-29, pp.191-200.