

第Ⅲ部門

杭施工条件に起因する杭-地盤の境界面のせん断特性の実験的検討

撰南大学 学生員 ○森川 哲至
 撰南大学 非会員 中津 颯人
 撰南大学 非会員 溝渕 悠斗
 撰南大学 正会員 寺本 俊太郎

1. 研究背景：土木構造物の設計においては、限界状態設計への移行に伴い、変形照査等の厳密性が求められる現状である。例えば、道路橋示方書における杭設計の沈下量算定では、6種に大別された施工法ごとの係数を用いるが、図1のように杭周面の状況が明らかに異なる場合でも、同一として扱われる。これは、施工法ごとの杭-地盤間のせん断特性の違いが、定量評価されていないためである。

そこで本研究では、杭-地盤の境界面を模擬した要素実験として、図2のように2つの素材間に対する一面せん断要素実験を実施し、杭周面の状態の違いが、そのせん断特性に及ぼす影響を定量評価する。

2. 一面せん断要素実験の概要：本実験では、地盤材料として湿潤豊浦標準砂、杭材料として鉄 (SS400) とモルタル (W/C=30%) を用い、表1のケース表に従って定圧一面せん断試験を実施する。土は締固め度 $D_c = 100\%$ 、 85% (加重時 $D_r = 114\%$ 、 64%) の2通りとして、土の密度 (密, 中密) による影響を確認する。鉄は粗度 $R_z = 9.7\ \mu\text{m}$ 、 $19.3\ \mu\text{m}$ 、モルタルはRC既成杭の粗度として $R_z = 15.9\ \mu\text{m}$ で実施し、杭の材質および表面粗さの影響を確認する。また、垂直応力 σ は、 $100\ \text{kPa}$ 、 $200\ \text{kPa}$ 、 $300\ \text{kPa}$ の3通りとする。それらの結果より、各境界面におけるせん断特性を、粘着力 c 、摩擦角 ϕ_a 、変位に対するせん断剛性率 K_s の3つの物性値によって表現する。

3. 実験結果：各ケースに対して、3通りの垂直応力で2回ずつ (=計6回) 実施し、Case-2.1は、 $100\ \text{kPa}$ と $300\ \text{kPa}$ を1回ずつ実施した。

(1) 各ケースのせん断挙動： $\sigma = 100, 300\ \text{kPa}$ における $\delta-\tau$ 曲線を図3に、 $\delta-\Delta H$ 曲線を図4に示す。

まず土単体の Case-1 について、 $D_c = 100\%$ 時はせん断応力 τ のピークが顕著に表れ、正のダイレイタンスー特性を示している。 $D_c = 85\%$ 時は、 τ は緩やかに増加し、負のダイレイタンスーを示している。これらは密な土、中密な土の一般的なせん断挙動である。

つぎに、杭材の Case-2.1, Case-2.2, Case-2.3 について見ると、締固め度 D_c による影響 (色抜きと白抜き) は、せん断応力 τ には微小であった (図3)。また、Case-1 とは異なり、すべてのケースで負のダイレイタンスー特性を示し、 D_c が低い方がより強く現れた (図4)。

垂直応力 σ は増加すると τ が増加する (図3)。また、土粒子の圧縮方向の運動が促進され、体積圧縮量 (図4) も増加した。

図4から、粗度 R_z が小さいほど体積圧縮量が増えるが、これは、土粒子の噛み合わせが小さく、 τ も小さい (図3) ため、鉛直の膨張方向に働く力も小さくなるためであると考えられる。

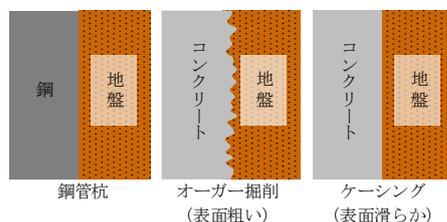


図1 杭施工法による境界面の違い

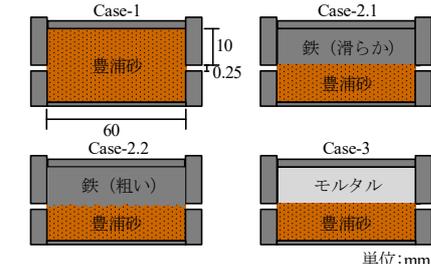


図2 各ケースのイメージ図

表1 一面せん断要素実験ケース

| Case | 上せん断箱 | | 下せん断箱 | |
|----------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|
| | 土 | $D_c = 100, 85\%$ | 土 | $D_c = 100, 85\%$ |
| Case-1 | 鉄 (滑らか) | $R_z = 9.7\ \mu\text{m}$ | 鉄 (滑らか) | $R_z = 9.7\ \mu\text{m}$ |
| Case-2.1 | 鉄 (滑らか) | $R_z = 9.7\ \mu\text{m}$ | 鉄 (滑らか) | $R_z = 9.7\ \mu\text{m}$ |
| Case-2.2 | 鉄 (粗い) | $R_z = 19.3\ \mu\text{m}$ | 鉄 (粗い) | $R_z = 19.3\ \mu\text{m}$ |
| Case-3 | モルタル | $R_z = 15.9\ \mu\text{m}$ | モルタル | $R_z = 15.9\ \mu\text{m}$ |

$D_c = 100\%$ ● Case-1, ■ Case-2.1, ◆ Case-2.2, ▲ Case-3
 $D_c = 85\%$ ○ Case-1, □ Case-2.1, ◇ Case-2.2, △ Case-3

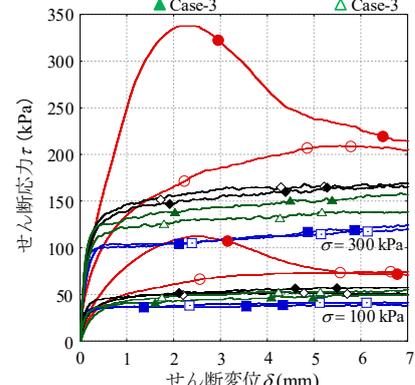


図3 せん断応力 τ とせん断変位 δ の関係

Tetsushi MORIKAWA, Hayato NAKATSU, Yuto MIZOBUCHI and Shuntaro TERAMOTO

moremmm1687@gmail.com

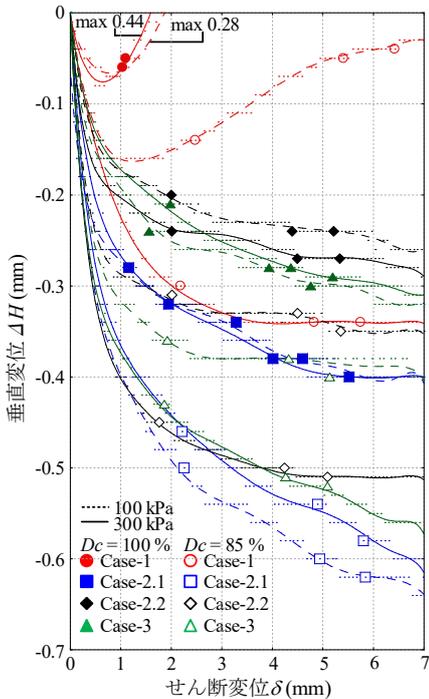


図 4 垂直変位 ΔH とせん断変位 δ の関係

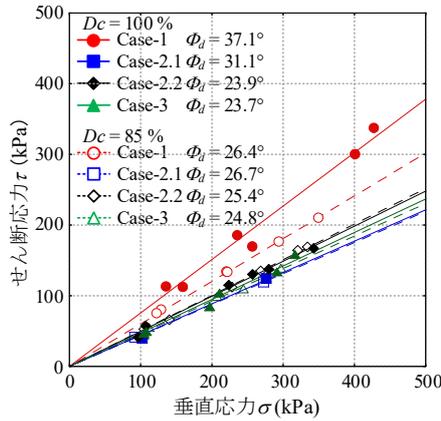


図 5 せん断応力 τ と垂直応力 σ の関係

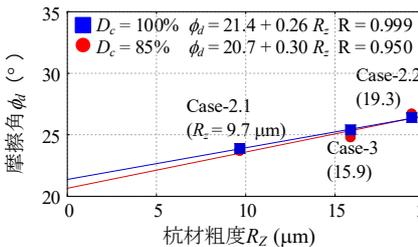


図 6 摩擦角 ϕ_d と杭材粗度 R_z

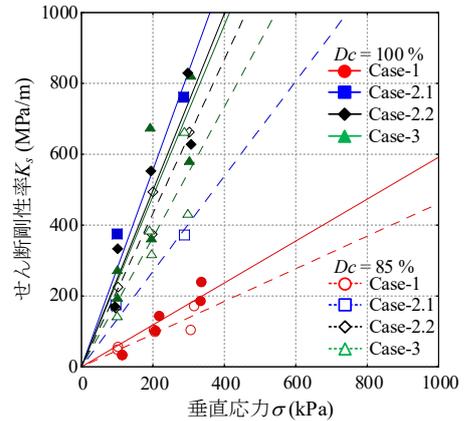


図 7 せん断剛性率 K_s と垂直応力 σ の関係

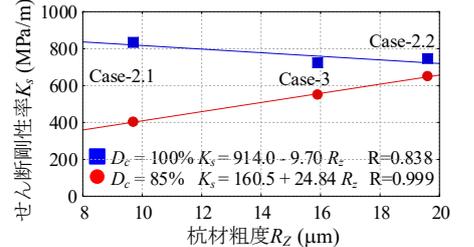


図 8 せん断剛性率 K_s と杭材粗度 R_z の関係

また、降伏挙動の比較では、杭の材質によらず降伏挙動は類似しており、杭材のケースでは $\delta = 0.5\%$ 付近で降伏し、 τ が漸増するのに対し、土単体のケースでは、1%以上で緩やかに降伏した(図3)。このように、杭材のケースの降伏変位が小さいのは、土単体の場合は上下面双方で変形するが、対して杭材は実質剛であり、片面だけでしか変形できないからだと考えられる。

(2) 強度定数 (c, ϕ_d) : 一般的にせん断強さは c と ϕ_d で決まるが、今回は豊浦砂を用いたため $c = 0$ とし、 σ - τ 曲線(図5)の傾きを意味する、摩擦角 ϕ_d について議論する。 D_c の違いについて比較すると、土単体のケースでは D_c が増加すると ϕ_d も大きく増加するが、杭材のケースではわずかな増加しか見られない。また、土単体のケースよりも ϕ_d が小さく、粗度の低下に従って低下する。これは、前述の通り土単体の場合と杭材を用いた場合でダイレイタンス特性が異なるためである。

ここで、図6に摩擦角 ϕ_d と鋼材粗度 R_z の関係を示す。 ϕ_d は R_z に対して比例関係を示しており、既往の研究¹⁾と一致している。また、モルタルおよび鉄のそれぞれを用いた結果が同一線上に存在しており、これは杭の材質によらず、表面粗度の違いのみで摩擦機構を評価できる可能性を示唆している。

(3) 変位に対するせん断剛性率 K_s : ここでは、 δ - τ 曲線の初期勾配から得られる変形特性の、せん断剛性率 K_s ($\equiv \tau/\delta$) について議論する。まず、 K_s は垂直応力 σ に対して比例関係にあるとわかった(図7)。また、土単体の K_s が低いのは、(1)で述べたように上下面双方で変形が発生するからだと考えられる。

図8に $\sigma = 300$ kPa 時の K_s と R_z の関係を示す。中密な土では、杭材の粗度が大きくなるほど K_s は増加したが、密な場合は粗度の影響が微小であった。これは、800 MPa/m 付近に K_s の上限が存在する可能性を示唆しているため、今後せん断面の粒子運動の可視化を試みる。また、このことを除けば、図6と同様に、杭の材質によらず粗度の違いのみで摩擦機構を評価できる可能性を示唆している。

4. 結論と今後の課題 : 本研究で得られた知見を示す。 δ - τ 関係から、 R_z が大きくなるほど τ も増加した。また、杭の材質によらず降伏挙動は類似していた。 δ - ΔH 関係から、 D_c が大きく、 σ が大きく、 R_z が小さいほど、土供試体は圧縮の挙動を示す。 ϕ_d と R_z の関係および K_s と R_z の関係から、杭の材質を考慮せずとも、表面粗度の違いのみで摩擦機構を評価できる可能性が示唆された。

今後の課題として、他の土や杭材のケースを実施する。本実験で得られたせん断特性をジョイント要素に適用し、FEM 解析手法の改良を試みる。また、実大解析を行い、新たな杭沈下量算定方法を開発する。

参考文献 1) 新城ら : 砂と鋼材との摩擦特性に及ぼす粒径と粗度の関係, 地盤工学会, 第39回地盤工学研究発表会, 2004-7