

第Ⅲ部門

土の粒径と杭材粗度が杭-地盤の境界面のせん断特性に及ぼす影響の実験的検討

摂南大学 学生員 ○森川 哲至
 摂南大学 非会員 竹中 奎人
 摂南大学 非会員 T.Chinbayar
 摂南大学 正会員 寺本 俊太郎

1. 研究背景：地震多発国の日本では、ハード面の防災対策として、基礎構造の強靱化が重要である。このため、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、変形照査等の厳密化が進められている。しかし、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のように杭周囲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、図2のように杭および地盤の2つの素材間に対する一面せん断要素実験を実施し、杭周囲の状態の違いが、そのせん断特性に及ぼす影響を把握する。

2. 一面せん断要素実験の概要：本実験では、地盤材料として乾燥豊浦標準砂とカオリン（ASP-200）、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した。本実験に用いる土は、間隙水や粒径の影響を確認するため、乾燥豊浦砂とカオリンとした。また、豊浦砂は相対密度 $D_r = 75\%, 25\%$ の2通りを用いた。これにより、土の密度（密、緩）による影響も確認した。鉄は、表面の最大粗度 $R_z = 9.7, 19.3 \mu\text{m}$ の2通りを用いた。これにより、杭材表面粗さの影響を確認し、モルタルとは素材の違いによる影響を確認した。その結果より、各境界面におけるせん断特性を、境界面のせん断強さ $s = \sigma \tan(\phi_d) + c$ の強度定数（粘着力 c 、摩擦角 ϕ_d ）と、面のせん断剛性率 K_s （ $\equiv \tau/\delta$ ）により評価した。

3. 実験結果

(1) せん断応力履歴：図3に垂直応力 $\sigma = 200 \text{ kPa}$ における $\delta - \tau$ 関係を示す。まず、土単体のケースを見ると、Case S-S ではせん断応力 τ のピークが顕著に現れるが、Case C-C では明確なピークが現れず、降伏後も τ が漸増した。これらは、密な砂や正規圧密粘土における一般的な挙動である。一方で、杭材のケースを見ると、全てのケースがせん断変位 $\delta = 0.4 \text{ mm}$ 付近で降伏し、その後 τ は一定の値を示した。

(2) ダイレイタンス特性：図4に $\delta - \Delta H$ 関係を示す。まず、Case S-S 以外は、全て負のダイレイタンスを示した。また、杭材のケースでは、最大粗度 R_z が小さく粒径が小さいほど体積圧縮量が増加する傾向であった。これは、土粒子の噛み合わせが小さく、 τ が小さくなるため、鉛直の膨張方向に働く力も小さくなるからであると考えられる。

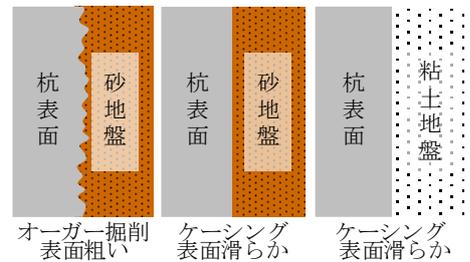


図1 杭施工条件による境界面の違い

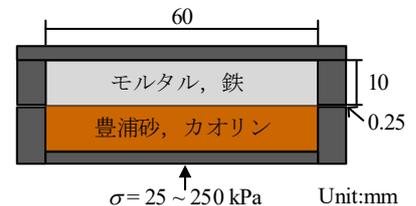


図2 一面せん断要素実験の概要

表1 一面せん断要素実験ケース

	上せん断箱	下せん断箱
Case S-S	豊浦砂 (密, 緩) $\rho_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$ $D_r = 75\%, 25\%$ $D_{50} = 184 \mu\text{m}$	豊浦砂 $D_r = 75\%, 25\%$
Case S-I滑	鉄 (滑らか) $R_z = 9.7 \mu\text{m}$	豊浦砂 $D_r = 75\%, 25\%$
Case S-I粗	鉄 (粗い) $R_z = 19.3 \mu\text{m}$	豊浦砂 $D_r = 75\%, 25\%$
Case S-M	モルタル $R_z = 15.9 \mu\text{m}$	豊浦砂 $D_r = 75\%, 25\%$
Case C-C	カオリン $D_{50} = 1.7 \mu\text{m}$ $\rho_s = 2.56 \text{ g/cm}^3$	カオリン
Case C-I滑	鉄 (滑らか) $R_z = 9.7 \mu\text{m}$	カオリン
Case C-I粗	鉄 (粗い) $R_z = 19.3 \mu\text{m}$	カオリン
Case C-M	モルタル $R_z = 15.9 \mu\text{m}$	カオリン

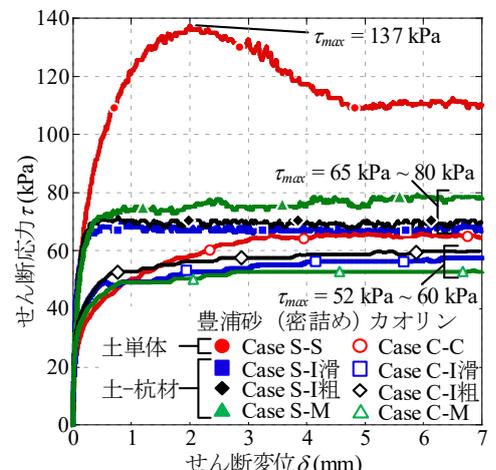


図3 せん断応力 τ とせん断変位 δ の関係

Tetsushi MORIKAWA, Keito TAKENAKA, Chinbayar TUMENBAYAR and Shuntaro TERAMOTO

moremmm1687@gmail.com

(3) 強度定数 (c, ϕ_d): ここでは, σ - τ 関係 (図 5) の切片を意味する粘着力 c , つづいて傾きを意味する摩擦角 ϕ_d について議論する. カオリンのケースの c については, 単体の Case C-C は 7.6 kPa に対し, 杭材のケースはその半分程度である. これは, 片側が粘性を持たない杭材であるため, 境界の粘着力が弱くなったと考えられる. なお, 豊浦砂のケースでは, 乾燥状態であるため $c = 0$ kPa と仮定した. つづいて, 豊浦砂のケースの ϕ_d については, 杭材のケースの ϕ_d は砂単体の ϕ_d の 60~70% 程度であった. 一方で, カオリンの場合, 対杭材の ϕ_d は単体の ϕ_d の 80~90% と, 豊浦砂のケースに比べその差は小さかった.

(4) 摩擦角と杭材粗度の関係: 図 6 に $R_z - \phi_d$ 関係を示す. 豊浦砂のケースでは, ϕ_d と R_z は比例関係にあったが, カオリンのケースでは, その関係は見られなかった. これは, 既往の研究¹⁾と同様に, 相対粗度 R_z/D_{50} が 0.4 以上の場合, 杭材の凹凸に土粒子が入り込み, 土単体に近いせん断面になるため, 土の ϕ_d によってせん断特性が評価されるからである.

つぎに, 砂-杭材のケースでは, 各ケースが同一線上に存在していた. このことは, R_z/D_{50} が 0.4 以下のならば, 杭の材質よらず, 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.

(5) 面のせん断剛性率 K_s : 面のせん断剛性率 K_s を, せん断初期の変形特性として, τ/δ と定義し, 図 7 に σ - K_s 関係を示す. 垂直応力 σ と K_s は比例関係にあるとわかった. また, 土単体のケースを見ると, Case C-C の K_s は, Case S-S の K_s より大きかった. これは, カオリンに存在する粘着力成分が, せん断初期から抵抗力を発揮するためである. 一方で, 杭材のケースを見ると, カオリンのケースは, 砂のケースより剛性が低かった. これは, 前述の相対粗度の影響で, 杭材の性質が現れにくいからである.

(6) せん断剛性率 K_s と杭材粗度 R_z の関係: 図 8 に $\sigma = 200$ kPa における R_z - K_s 関係を示す. まず, モルタルのケースは鉄材のケースより K_s が低い. これは, 鉄材の弾性係数は 205 GPa であるのに対し, モルタルは 32 GPa と, 剛性が低いからと考える. つぎに, 豊浦砂密詰めと, カオリンのケースを見ると, R_z と K_s の関係は微小であった. 前者は既往の研究²⁾と同様であり, 剛性率が高くなると, R_z の影響が表れにくい可能性が示唆される. 一方で, カオリンは, 前述のとおり, 相対粗度が大きいからである.

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, 土および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, R_z が小さく, 粒径が小さいほど, 土供試体は圧縮の挙動を示した. R_z と ϕ_d の関係から, 相対粗度 R_z/D_{50} が 0.4 以下ならば, 杭の材質を考慮せずとも, 杭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, 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 解析を行う. また, 粗度の異なるモルタルのケースを実施すると同時に, せん断面の粒子運動の可視化を試みる.

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. 2) 森川ら: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, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集 III-19, 2020.

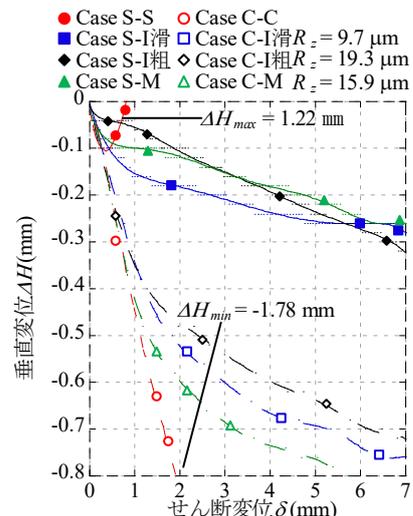


図4 垂直変位 ΔH とせん断変位 δ の関係

- Case S-S $\phi_d = 32.8^\circ$ $c = 0$ kPa
- Case S-I滑 $\phi_d = 18.8^\circ$ $c = 0$ kPa $R_z/D_{50} = 0.05$
- ◆ Case S-I粗 $\phi_d = 19.2^\circ$ $c = 0$ kPa $R_z/D_{50} = 0.10$
- ▲ Case S-M $\phi_d = 21.9^\circ$ $c = 0$ kPa $R_z/D_{50} = 0.09$
- Case C-C $\phi_d = 18.1^\circ$ $c = 7.6$ kPa
- ◊ Case C-I滑 $\phi_d = 16.2^\circ$ $c = 2.7$ kPa $R_z/D_{50} = 5.71$
- ◇ Case C-I粗 $\phi_d = 16.1^\circ$ $c = 4.1$ kPa $R_z/D_{50} = 11.35$
- △ Case C-M $\phi_d = 14.6^\circ$ $c = 5.7$ kPa $R_z/D_{50} = 9.35$

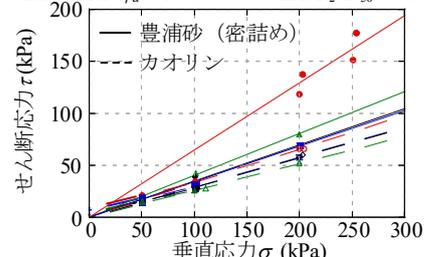


図5 せん断応力 τ と垂直応力 σ の関係

- 豊浦砂 (密詰め) $\phi_d = 15.7 + 0.34 R_z$ $R = 0.955$
- 豊浦砂 (緩詰め) $\phi_d = 14.5 + 0.36 R_z$ $R = 0.999$
- ◆ カオリン $\phi_d = 16.2 - 0.04 R_z$ $R = 0.199$

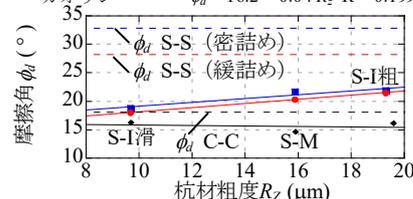


図6 摩擦角 ϕ_d と杭材粗度 R_z の関係

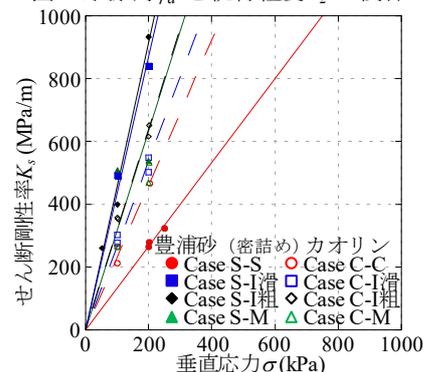


図7 せん断剛性率 K_s と垂直応力 σ の関係

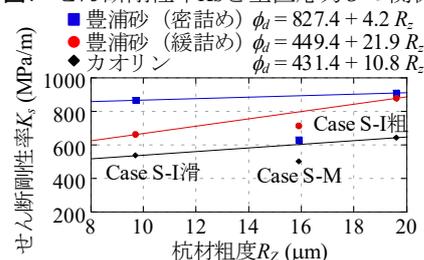


図8 せん断剛性率 K_s と杭材粗度 R_z の関係