

## 杭施工条件に起因する杭-地盤の境界面のせん断特性の解析的検討

撰南大学 学生員 ○森川 哲至  
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、上記の問題の解決を目指し、杭-地盤の境界面を模擬した一面せん断要素実験をこれまでに実施した<sup>1)</sup>。本稿では、杭-地盤の境界面のせん断特性を適切に表現可能な解析手法の開発を目指し、要素実験に対する3次元弾塑性有限要素解析を実施した。

2. 数値解析条件：本解析には、3次元弾塑性 FEM コード「DBLEAVES<sup>2)</sup>」を用いた。図2に、再現対象とする要素実験の概要およびFEMメッシュを、表1に、解析ケースおよび入力パラメータを示す。湿潤豊浦標準砂単体の Case1、鋼管杭と地盤の境界を模擬した Case2.1 および粗度  $R_z$  の異なる Case2.2、既製杭と地盤の境界を模擬した Case3 の計4ケースの再現解析を実施した。豊浦砂 ( $D_c = 100\%$ ) は、subloading  $t_{ij}$  model<sup>3)</sup>、ジョイント要素は弾完全塑性型とし、入力パラメータは、各ケースの実験結果および既往の研究<sup>3)</sup>を参照した。

載荷手順は、実験機構に従い、はじめに供試体底部から垂直応力  $\sigma = 300$  kPa を荷重載荷する。つづいてせん断過程では、上箱背面に対して、0.007 mm/step で7 mm まで変位載荷する。

## 3. 解析結果：

(1) せん断応力履歴：図3に、 $\sigma = 300$  kPa における  $\delta$ - $\tau$  曲線を示す。まず土単体の Case-1 について、実験値はせん断応力  $\tau$  のピークが顕著に表れ、正のダイレイタンシー特性を示している。これに対して解析値はなだらかに  $\tau$  が増加し続けている。

つぎに、杭材のケースとなる Case-2.1, Case-2.2, Case-3 の  $\tau$  の大きさについて比較すると、粗度の増加に従って大きくなるという実験の傾向を、数値解析は再現できている。降伏挙動については、土単体とは異なり、明確なピークが現れないバイリニア形状となっており、実験のせん断挙動の違いを表せている。しかし、実験値は  $\delta = 0.5\%$  付近での降伏に対し、解析値は  $\delta = 3\%$  付近で降伏しており、弾性領域におけるせん断剛性を数値解析は過小評価している。特に Case-1 における差が大きかったことから、後述となる土のダイレイタンシー特性を適切に表現できていないためであると考えられる。

キーワード 杭基礎 杭の周面摩擦力 有限要素法 一面せん断試験

連絡先 〒572-0074 大阪府寝屋川市池田中町 17-8 撰南大学理工学部都市環境工学科 TEL 072-839-9126

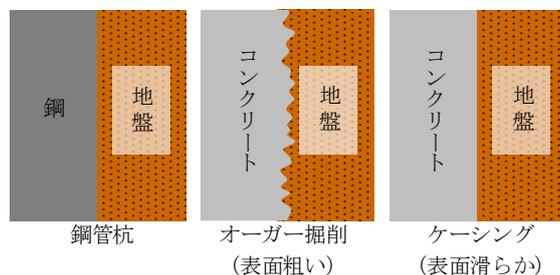


図1 杭施工法による境界面の違い

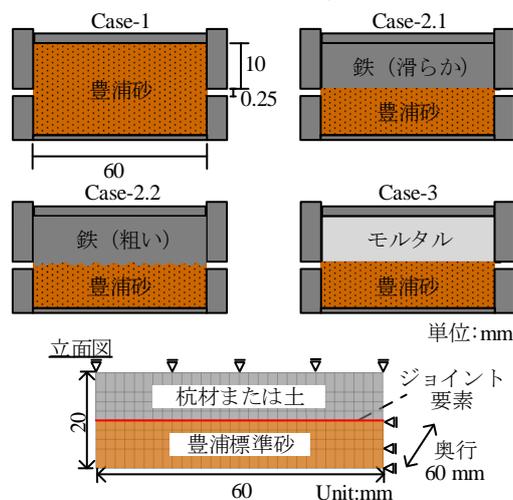


図2 実験概要およびFEMメッシュ

表1 解析ケースおよび入力パラメータ

	上箱	下箱	ジョイント
Case-1	土 下箱に同じ	土	$K_s = 178$ MPa/m $\phi_u = 37.1^\circ, c = 0$
Case-2.1	鉄 (滑) $R_z = 9.7 \mu\text{m}$ $E = 205$ GPa $\nu = 0.30$	subloading $t_{ij}$ model $e_0 = 0.54$ $R_f = 3.2$ $\nu = 0.33$ $\lambda = 0.07$	$K_s = 833$ MPa/m $\phi_u = 23.9^\circ$ $c = 0$
Case-2.2	鉄 (粗) $R_z = 19.3 \mu\text{m}$ $E = 205$ GPa $\nu = 0.30$	$\kappa = 0.0045$	$K_s = 746$ MPa/m $\phi_u = 26.4^\circ$ $c = 0$
Case-3	モルタル $R_z = 15.9 \mu\text{m}$ $E = 36$ GPa $\nu = 0.24$	$a = 60$ $\beta = 2$	$K_s = 724$ MPa/m $\phi_u = 25.4^\circ$ $c = 0$

(2) **ダイレイタンシー特性**：図4に、各ケースのせん断変位—垂直変位履歴を示す。Case-1（土単体）をみると、初期はせん断圧縮となるが、徐々にせん断膨張へと転じる挙動となっており、密な砂の一般的な挙動を表している。また、数値解析は実験よりも圧縮量が大きく、膨張に転じる変位も大きい。これは、実験ではせん断箱壁面の摩擦によるダイレイタンシーに抵抗する力が働くが、数値解析では完全に滑らかとして表現しているためと予想される。今後は、壁面の摩擦を考慮した手法を用いる必要がある。

つぎに、Case-2.1, 2.2, 3（杭材のケース）をみると、実験では滑らかなほどせん断圧縮が強く現れる傾向にあったが、数値解析では、ほとんど差がみられなかった。また、圧縮量は、数値解析の方が実験よりも小さい結果となった。これは、ケース間の違いを主にジョイント要素の物性値の違いで表現しているが、用いたジョイント要素自体にはダイレイタンシーの影響を表現することができないためである。そのため、今後は地盤側のダイレイタンシーパラメータを用いて、表現を試みていく。

(3) **内部地盤応力分布**：図5に、0.1 mm 変位時における、土のせん断応力 ( $\tau_{zx}$ ) 分布を示す。Case-1 では、上下両方のせん断箱内部の変形が許されるため、片側が相対的に剛な他のケースと比較して、同変位に対するせん断応力が小さくなる。そのため、図3のせん断応力履歴においても、勾配(初期剛性)が小さく、ピークも遅くに現れているといえる。

**4. 結論と今後の課題**：本研究で得られた知見を示す。実験における、杭材によるせん断応力履歴の違いについては、数値解析によって定性的に表現することができた。しかし、ダイレイタンシー挙動については、十分に違いを表現することができていない。今後の課題として、今回問題となったダイレイタンシー挙動を精度よく表せる方法を考案し、つづいて実大解析を行い、新たな杭沈下量算定方法の提案を目指す。

**参考文献** 1) 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, 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2020. 2) Ye, B. et al.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction- consolidation of sand, *S & F*, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007. 3) Nakai et al.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *S & F*, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.

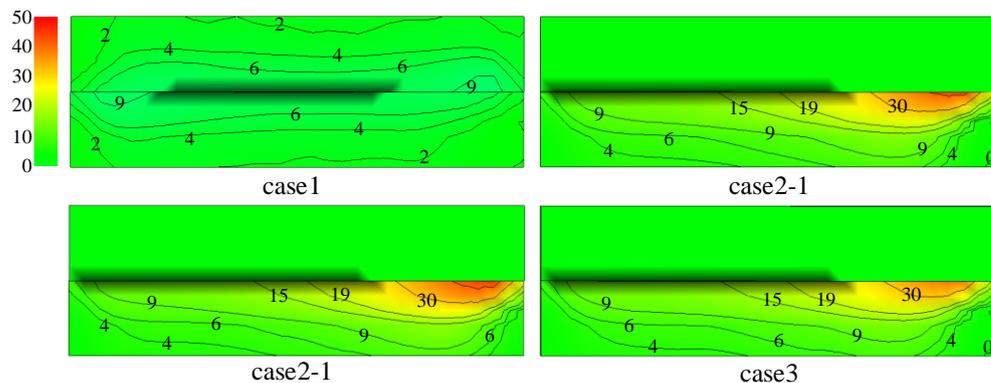


図5 土の $\tau_{zx}$ 分布 (0.1 mm変位時)

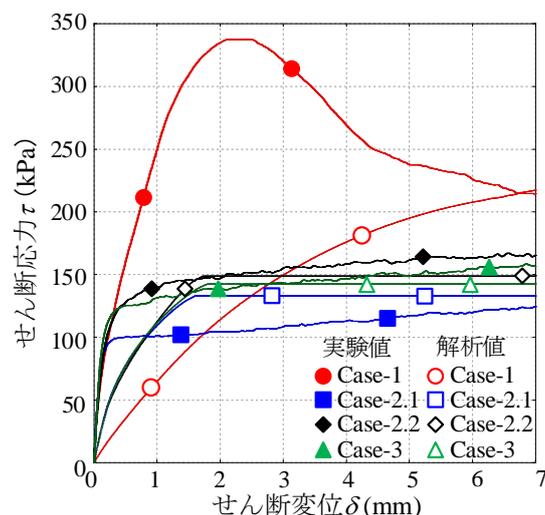


図3 せん断応力 $\tau$ とせん断変位 $\delta$ の関係

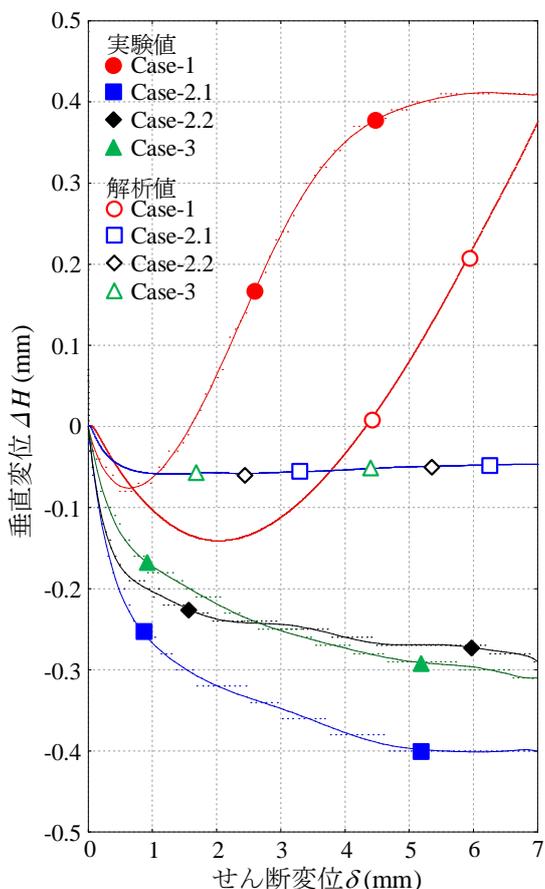


図4 垂直変位 $\Delta H$ とせん断変位 $\delta$ の関係