

## 支持層厚の異なる地盤に支持された開端杭先端周辺地盤の変形挙動の定量化

京都大学大学院 学生会員 ○末澤理希

京都大学大学院 正会員 木戸隆之祐

京都大学大学院 正会員 澤村康生

京都大学大学院 フェロー会員 木村 亮

## 1. はじめに

開端杭において、杭先端以深の支持層厚が小さい薄層に杭が支持された場合、支持層下部の軟弱層が杭の鉛直支持力に影響を及ぼす。

本研究では、層厚の異なる支持層を含む模型地盤を作製し、等方拘束圧条件下で開端模型杭の押し込み試験と X 線 CT 撮影を行った。さらに、画像相関法<sup>1)</sup>により、模型杭押し込みに伴う地盤内部の変位場とひずみ場を定量化し、有効層厚の差異が開端杭の鉛直支持力に及ぼす影響を検討した。末澤ら<sup>2)</sup>では、CT 画像の解像度が低く撮影領域も小さいことが原因で、開端杭内部や杭先端以深の地盤変形を十分に評価できなかった。そこで本稿では、解像度を高く設定し、撮影領域も大きくして再実施した実験の結果を示す。

## 2. 実験概要

実験方法は末澤ら<sup>2)</sup>の通りで、外径  $D = 10$  mm、肉厚 1 mm のアクリル模型杭を用いて図 1 に示す模型地盤を作製する。その後、100 kPa の等方圧力条件下、押し込み速度 0.5 mm/min での杭の押し込み試験と CT 撮影を並行して実施する。

## 3. 押し込み試験結果

図 2 に押し込み試験により得られた荷重-変位関係を示す。初期状態において杭先端に僅かに土粒子が入り込むため、載荷初期にはばらつきが見られるものの、ほぼ全実験ケースに共通して、支持力は押し込みとともにその増分が大きくなり、その後ケースごとに概ね同じ値を示す。Case-1 と Case-2, Case-3 の結果を比較すると、発揮される支持力は前報と異なり、Case-1 と Case-2 で等しく、Case-3 で小さい。すなわち、開端杭の場合でも閉端杭<sup>3)</sup>と同様、有効層厚が杭径の 3 倍以上あれば十分な支持力を発揮すると言える。図 2 より、荷重-変位関係は 3 段階に分けることができる。それらは、(I)管内部に土が侵入するため載荷荷重が増加しない段階、(II)杭先端から下方への影響範囲が支持層に到達して反力を得ることで、管内部が完全閉塞に近づく段階、(III)杭先端から下方への影響範囲の大部分が支持層内に及び、有効層厚による影響が表れる段階の 3 つである。これを基に、CT 撮影を載荷前、解析の初期点から 2 mm 間隔で 5 点、押し込み変位 30 mm の計 7 点で行った。図 3 に各撮影点における管内部土の正味高さ  $h$  の推移を示す。ここで、正味高さ  $h$  とは、CT 撮影時の管内部土高さ  $H$  から、初期状態における高さ  $h_0$  を差し引いたものである。図 3 より、押し込み量  $1.7D$  以降で杭の押し込み量に対する地盤の管内部への貫入量が小さくなるのがわかる。したがって、杭が支持層に到

達する直前において、その先端が完全閉塞に近い状態になっていると考えられる。さらに押し込み量  $1.7D$  以降、有効層厚による貫入量の違いが表れ始めるのがわかる。これより、図 2 の荷重-変位関係において、領域(II)から領域(III)に移行するタイミングは、管内部にある程度土が貫入しその支持メカニズムが開端杭のそれに近づくにつれて、杭先端から広がる影響範囲が支持層にまで及び、地盤から十分

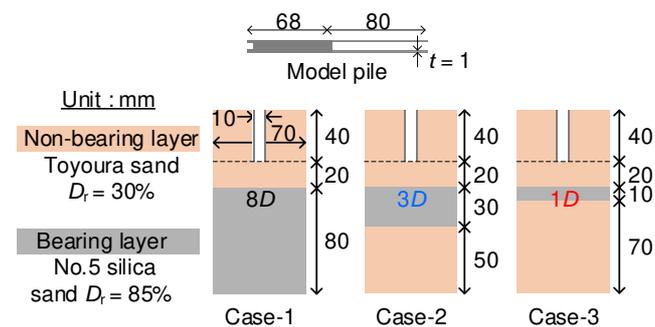


図 1 模型地盤の概要図

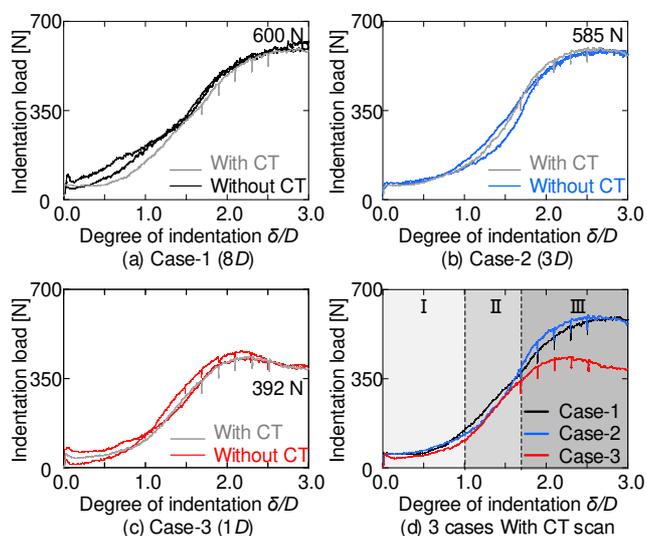
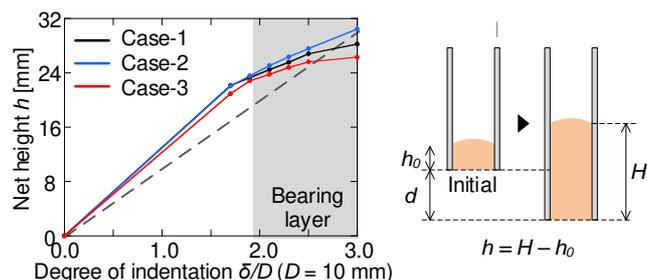


図 2 荷重-変位関係

図 3 CT 撮影点における管内部土の正味高さ  $h$ キーワード： $\mu$ X 線 CT, 画像解析, 開端杭, 薄層

連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-587 TEL 075-383-3193 FAX 075-383-3193

な支持力が得られる時点だと推察される。このように、管内部への地盤の侵入量は支持力と大きく関係しており、得られる反力の違いが管内部土の正味高さの差として表れると考えられる。

#### 4. 画像相関法による変位場・ひずみ場の定量化

上記の撮影点で得られた画像を用いて、模型杭を  $0.2D$  押し込む間に地盤内で生じる変位とせん断ひずみを算出した。

図4に変位ベクトルとせん断ひずみの分布図を示す。

図4(a)の変位ベクトル分布図について、いずれのケースも管内部および杭底面直下に大きな変位が確認できる。特に杭底面以深では、土粒子の移動領域が下方へ球根状に広がっている。一方、管内部の下方への変位量は、いずれの押し込み段階でも Case-3 でより大きくなっている。また、杭底面直下での下方への変位量に関しても、Case-3 でより大きく、その変位領域は側方への広がりが小さい。このような Case-3 の結果は、末澤ら<sup>2)</sup>でも確認されている。一方、支持層から下部軟弱層までより広範囲に可視化した本研究では、Case-2 において、小さな変位が支持層内の広い範囲で発生していることを新たに確認した。したがって、有効層厚が杭径の3倍ある場合は、下部軟弱層の影響をわずかに受けつつも、支持層全体で荷重を分担して完全支持と同等の支持力を発揮すると考えられる。これらは、閉端杭の結果<sup>3)</sup>と類似しており、閉端部の杭内周面付近においてわずかな土粒子の出入りが見られるものの、閉塞状態に至った後は閉端杭の場合とほぼ同様の挙動を示すことが分かる。

図4(b)のせん断ひずみ分布図について、全押し込み段階において杭周面および先端部で大きなせん断ひずみが生じ、先端の実質部から下方へ膨張領域が広がる傾向はどのケースも同様である。まず、押し込み量  $1.7D \sim 1.9D$  間では、全ケース、特に Case-2 において、杭先端の内空部分に水平方向のせん断変形が生じる。これは閉端部の閉塞時に見られる現象だと考えられ、本実験条件でも、杭先端が支持層に到達した時点である程度閉塞に至っていると言える。しかし、押し込みを続けると水平方向のせん断ひずみが消失する。これは杭が支持層に到達後、大きな抵抗力を得ることで管内部への地盤の侵入が再開したためである。すなわち、閉端杭の先端は押し込みと共に完全閉塞とそうでない状態を交互に繰り返すことで支持力を発揮すると考えられる。つぎに、押し込み量  $2.3D \sim 2.5D$  間では、杭先端の実質部から斜め下方向にかけてくさび状にせん断ひずみが発生して連結している。杭先端においてせん断ひずみが明らかに大きいのは、これは全ケースで押し込み量の増加とともに先端実質部の円状のひずみ領域が大きくなっているため、変形がより顕著になっていると考えられる。

上記のせん断ひずみ分布を図2の荷重-変位関係と照査すると、せん断ひずみの発達が顕著に見られた Case-3 において、押し込み量  $2.3D$  で載荷荷重がピークを迎えた後に減少していることがわかる。したがって、杭先端縁から発生したせん断ひずみが連結し、すべり面となることをもって支持力が収束したと判断できる可能性がある。しかし、Case-2

においてはひずみの発達が不明瞭である。これは変位ベクトルの結果からも明らかのように支持層全体で変形が小さな変形が生じているからである。

#### 5. 結論

閉端杭の押し込み時には管内部および杭底面直下の地盤が変位し、特に杭底面以深における変位領域は球根状に広がる。ここで、有効層厚が杭径の3倍の場合、杭の押し込みが影響を及ぼす範囲はほぼ支持層内に限られるため、完全支持の場合と類似した支持力を示す。これにより、有効層厚が杭径の3倍以上あれば十分な支持層とみなせる。一方、有効層厚が杭径と同じ場合、杭の押し込みによる地盤の変形は支持層下部の軟弱層に及ぶため支持力は低下する。これは閉端杭と同様の傾向であった。

#### 参考文献

- 1) Higo et al.: Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression using microfocus X-ray CT with digital image correlation, *Soils & Foundations*, 53 (2), pp.181-198, 2013.
- 2) 末澤ら: 異なる支持層厚の地盤に支持された閉端杭先端地盤の変位場とひずみ場の定量化, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, III 382, 2020.
- 3) 末澤ら: 杭の鉛直支持力特性と地盤の変形挙動に対する支持層厚の影響, 土木学会論文集C (地圏工学), 76(4), pp.429-440, 2020.

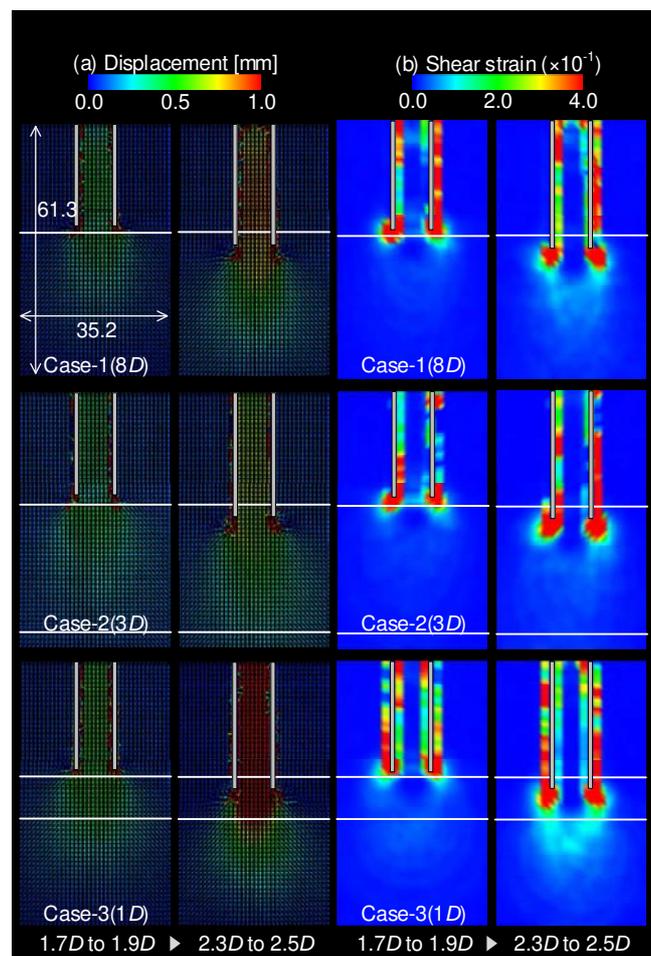


図4 DIC画像解析結果(a)変位ベクトル, (b)せん断ひずみ分布図