

京大大学院 学生会員 ○末澤 理希  
 京大大学院 学生会員 木戸 隆之祐  
 京大大学院 正会員 澤村 康生  
 京大大学院 正会員 木村 亮

1. はじめに

支持杭とは、固い支持層まで杭の先端を到達させて支持する杭である。ここで、杭先端以深の支持層厚（有効層厚）が小さい場合、支持層下部の軟弱層が杭の鉛直支持力に影響を及ぼすと考えられる。過去の研究では、このような杭を対象に、現場や室内における鉛直載荷試験および数値解析が実施され、有効層厚、地盤の  $N$  値が杭の鉛直支持力や沈下特性に与える影響を検討している（例えば 1）。しかし、薄層に支持された杭の鉛直載荷時における、支持層内部の微視構造変化を調べる研究は殆どない。

そこで本研究では、有効層厚の異なる三種類の供試体を用いて、杭の押し込み試験と CT 撮影を行った。また、杭の先端地盤における密度変化とせん断ひずみ場を画像解析で定量化し、有効層厚がそれらへ及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

本研究では、等方圧力条件下で模型杭の押し込みが可能な試験装置を X 線マイクロ CT のワークテーブル上に設置することで、押し込み試験と CT 撮影を平行して行う。図 1 に実験装置の概要図、図 2 に三種類の供試体の概要図を示す。模型杭の直径は 10 mm、供試体は直径 70 mm、高さ 140 mm であり、支持層は珪砂 5 号、非支持層は豊浦砂でそれぞれ相対密度 85%、30%を目標に気中落下により作製した。100 kPa の等方圧力条件とし、押し込み速度 0.5 mm/min で各ケース三回押し込み試験を行い、再現性を確認した。CT 撮影の際は、押し込みを一時中断し、撮影後は同じ押し込み速度で再開した。

3. 実験結果

1) 押し込み試験の荷重-変位関係

図 3 に得られた荷重-変位関係および荷重増分-変位関係（灰色線）を示す。図中の緑線は CT 撮影時の荷重-変位関係である。全ケースで共通して、荷重（支持力）は一定の押し込み後収束することが分かる。また、

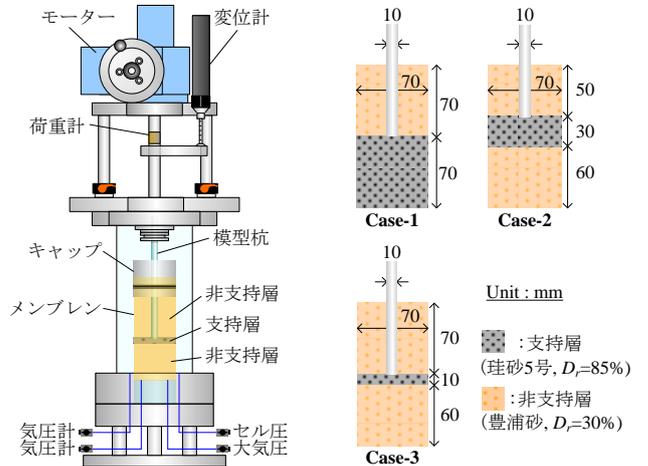


図1 実験装置の概要図

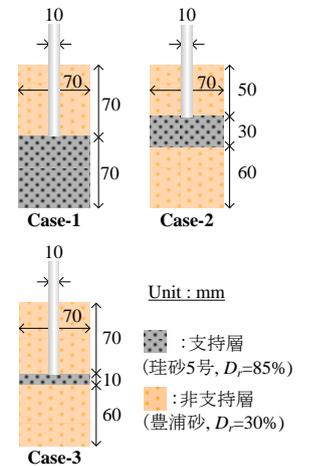


図2 供試体の概要図

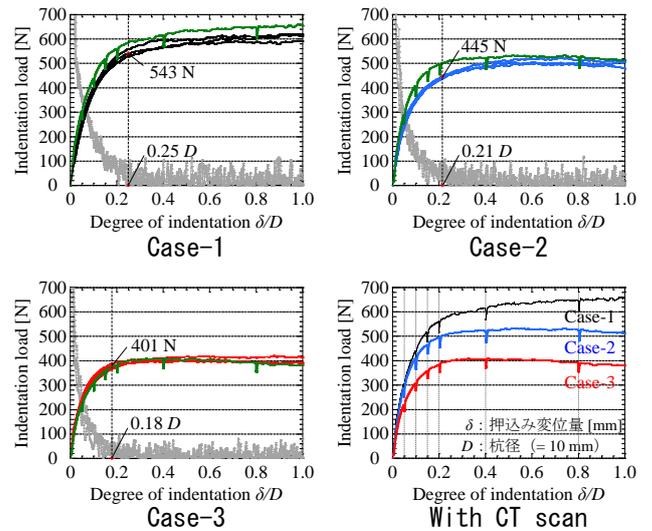


図3 荷重-変位関係

支持層の有効層厚が大きいほど、収束時の押し込み変位量と支持力が大きいことが分かる。本研究では、得られた荷重-変位関係の結果を基に、初期から収束点近傍までを押し込み変位 0.05  $D$  間隔で 5 点、収束後 0.20  $D$  間隔で 2 点の計 7 点を撮影点とし、CT 撮影を行った。

2) 間隙率マッピング

前述の実験ケースで取得した CT 画像に対して、Higo et al. (2015)<sup>2)</sup>の手法を用いて地盤内の疎密を表す Porosity map を作製した。図 4 に各実験ケースにおける

Porosity map を示す。本来、相対密度が低い非支持層を全体的に密と評価している。これは土粒子と空隙の閾値を適切に設定することや、高解像度の画像を取得することで改善できると考えるが、今回の議論では支持層の密度変化に着目する。図4より、杭の押込みに伴い、全ケースで共通して杭底面直下に高密度領域およびその周囲に低密度領域が発現している。Case-1, Case-2と比較してCase-3では高密度領域が小さいため、支持力の大きさと杭底面に発現する高密度領域の大きさには関連性があると考えられる。Case-1, Case-2で杭底面に発現する高密度領域の形状や大きさに明確な差異は見られない。そこで、押込み変位 $0.80D$ での杭底面直下での間隙率について、図5に示す領域でヒストグラムを作製し、図6に示す結果を得た。Case-1では初期の支持層に比べ小さな間隙率を示す箇所が多い。つまり、両ケースで類似した高密度領域が形成されていても、Case-1の杭底面はより密な状態なのである。したがって、Case-1とCase-2における支持力の差は、杭底面に発現する高密度領域の密度の違いに起因すると考えられる。

### 3) 押込み時に生じるせん断ひずみ

取得したCT画像に画像相関法<sup>3)</sup>を適用し、模型杭押し込み時に地盤内に生じるせん断ひずみを算出した。図7に得られた結果を示す。全ケース共通して、初期状態から $0.05D$ 押し込み時のみ、杭底面両端からいくつかのせん断ひずみ領域が対称的に発達している。これより、模型杭押し込み初期の荷重が大きく増加する段階でせん断ひずみが局所的に発生し、その後はその領域に沿って土粒子が移動すると思われる。また、Case-3でのみ、杭底面両端から発達したせん断ひずみ領域がくさび型を呈さず主に鉛直下方への発達しており、パンチング破壊の発生を示す結果と考えられる。

## 4. 結論

模型杭の押し込み試験により、支持層の有効層厚が小さいほど、荷重が収束する変位およびその時の支持力が小さいことが分かった。画像解析により地盤内の密度変化を定量化した結果、有効層厚が小さいと、杭底面直下のくさび型の高密度領域は明瞭でなく、高密度になりにくいことが分かった。さらに、せん断ひずみを算出した結果、有効層厚が杭径と等しい場合、模型杭の押し込みにより鉛直方向へのせん断変形が卓越することを明らかにした。

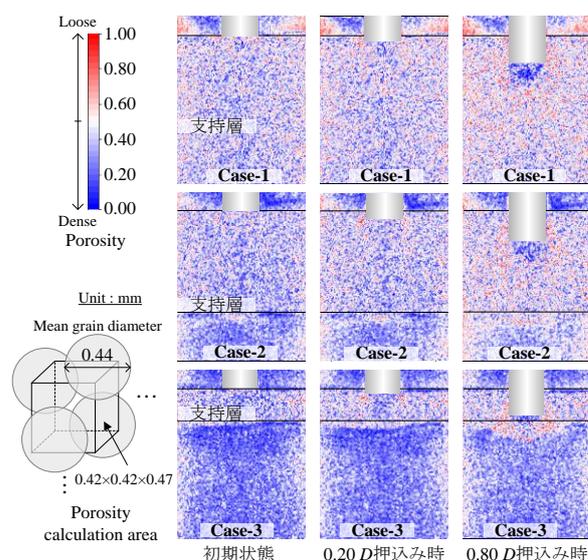


図4 Porosity map

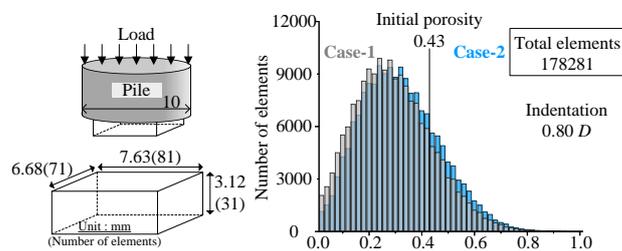


図5 解析領域

図6 間隙率ヒストグラム

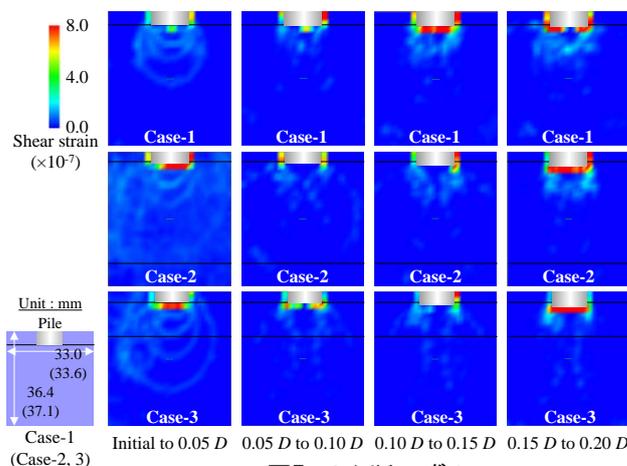


図7 せん断ひずみ

## 参考文献

- 1) 松井 保, 中林正司, 前川義男, 松井謙二: 薄層における場所打ち杭の鉛直支持力特性とその設計法, 橋梁と基礎, (28), pp.33-38, 1990
- 2) Higo et al.: Local water-retention behavior of sand during and wetting process observed by micro x-ray tomography with trinarisation, JGS special publication, 2 (16), pp.635-638, 2015.
- 3) 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.