

押込み時における杭先端地盤の密度変化と支持層厚の関係 —X線マイクロCTと間隙率マッピングを適用して—

Relationship Between Density Changes in Pile Tip Ground and Bearing Layer Thicknesses Under Loading: Applications of an X-ray Micro Tomography and a Porosity Mapping Analysis

末澤理希・木戸隆之祐・澤村康生・木村 亮

Riki SUEZAWA, Ryunosuke KIDO, Yasuo SAWAMURA and Makoto KIMURA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

Pile loading tests for thin-bearing layer with different thickness were carried out, during which progressive deformation of soils around the tip of pile were visualized using an x-ray micro tomography. Local changes in porosity in the bearing layer were also quantified by a porosity mapping analysis. The influence of a thickness of the thin-bearing layer on the density changes of bearing layer and its linkage for the bearing capacity was discussed.

キーワード: 薄層, 支持杭, X線マイクロCT, 間隙率マッピング

Keywords: thin layer, bearing pile, x-ray micro tomography, porosity mapping

1. はじめに

支持杭は、杭先端径に対して十分な厚さと、高い強度を持つ地盤（支持層）に杭先端を根入れし、周面摩擦力と先端支持力によって軟弱地盤上の構造物を支える基礎工法である。支持杭の許容鉛直支持力に関しては、過去の載荷試験データに基づいた経験的な推定式や、Meyerhof (1951)およびVesic (1963)らが提案する支持力メカニズムを仮定して求めた極限支持力に対して安全率を確保するように設計されている。実際に大谷ら (2006) は、単層の均一地盤を対象に杭の鉛直載荷実験とX線CT撮影を実施し、上記の支持力メカニズムの妥当性を確認している。しかしながら、実際の地盤の地層構成は複雑であり、例えば支持層の上下に軟弱地盤が存在するような互層構造である場合、支持層周辺の軟弱地盤が支持力メカニズムへ与える影響を把握することが重要である。

互層構造の地盤の中でも、支持層厚が杭先端径に対して薄い支持層（薄層）に支持された杭については、杭先端から支持層下端までの距離（有効層厚）が支持力へ影響を与えることが明らかにされている（例えば松井ら, 1990; 鈴木ら, 2016; 堀井ら, 2015）。一方、薄層に支持された杭の押込み時に、支持地盤や軟弱地盤でどのような変形・破壊が生じるかを3次元的に調べ、支持力の変化と関連付けた議論を行った事例はない。

そこで本研究では、有効層厚を変えた薄層の模型地盤を作製して模型杭の押込み実験を行うとともに、杭先端地盤内の変形挙動をX線マイクロCTにより可視化する。さらに、CT画像解析を実施し、特に支持層内における密度分布と押込みに伴う刻々の変化を定量化する。これらの結果に基づき、有効層厚が地盤内の変形挙動および支持層内の密度変化に与える影響を明らかにし、それらと支持力との関係について議論する。

2. 薄層に支持された杭の押込み試験

2.1 試験装置

Fig. 1に、本研究で用いた試験装置の概略図を示す。本装置は、一般的な三軸試験と同様の三軸応力条件下において、補強土壁に用いられる補強材の引抜き試験を行うためにSawamura et al. (2018)が開発した装置を、杭の押込み試験が可能になるよう改良したものである。模型杭の押込み変位量と荷重の測定に加え、X線CTにより模型地盤内部を観察可能な機構を有する。空気圧により拘束圧を作用させつつX線が透過できるよう、内径120 mm、耐圧2 Mpaの無色透明アクリル製セルを使用している。ロードセルは株式会社東京測器研究所製のTCLN-2KNA（定格容量2 kN、分解能0.5 kN）、変位計は株式会社東京測器研究所製のCDP-50（容量50 mm）を用いている。ロードセルと模型杭とを結合させるために、長さ100 mm、直径 20mm、ヤング率 1.93×10^5 MPaのステンレス棒を軸として用いている。ステンレス棒とロードセルはネジで固定可能であり、モーターを稼働させることで0.1 mm/min～1.0 mm/minの速度で上下方向へ移動させることができる。ステンレス棒の先端は凸形状となっており、模型杭上端に設けた窪みにはまるようになっている。これらが一体となって下方へ移動し、地盤が押込まれる際の荷重を計測する。また、この軸に金属板を取り付け変位計と接触させることで、鉛直変位を測定する。

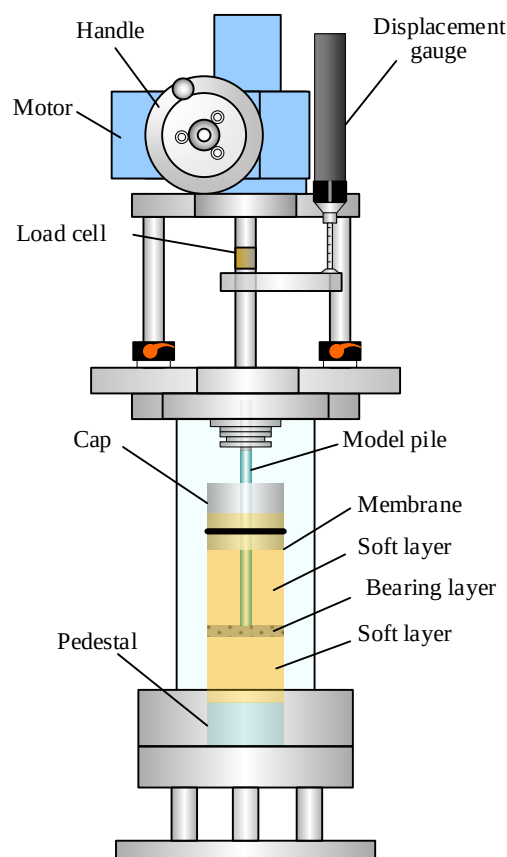


Fig. 1 Schematic diagram of pile loading test

2.2 地盤材料

薄層の模型地盤を作製する場合、支持層と非支持層の2種類をどのようにモデル化するかが重要となる。本研究では杭先端地盤の変形挙動を可視化することを目的とし、粒径が比較的大きく均一な豊浦砂、あるいは珪砂5号を非支持層の地盤材料として用いることとした。豊浦砂と珪砂5号の粒径加積曲線をFig. 2に、物理特性をTable 1に示す。

非支持層として用いる地盤材料を決定するため、珪砂5号と豊浦砂を用いて単一砂の模型地盤（ $D_r=30\%$ を目標）を作製し、拘束圧100 kPa、押込み速度0.5 mm/minで杭の押込み試験を行った。Fig. 3に荷重-変位関係を示す。押込み初期の立ち上がり、最大押込み量ともに珪砂5号の場合で大きいことが確認できる。そこで本研究では、支持層に珪砂5号、非支持層に豊浦砂を用いて薄層を有する模型地盤を作製することとした。

2.3 実験ケース

本実験では、杭先端から支持層下端までの距離（以下、有効層厚）が異なる3種類の模型地盤を作製した。

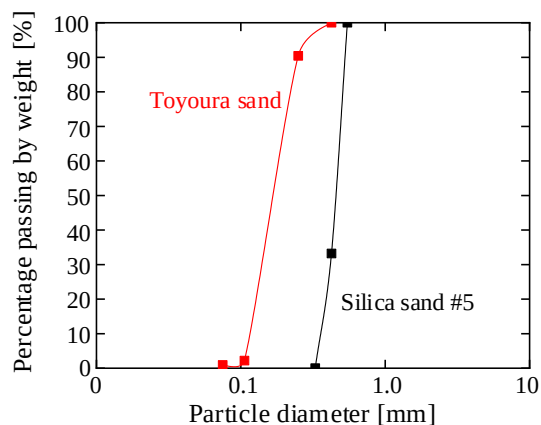


Fig. 2 Grain size distributions

Table 1 Physical properties of sands

Sample	Toyouura sand	Silica sand
Soil density [g/cm ³]	2.640	2.640
Mean particle diameter [mm]	0.200	0.438
Maximum void ratio	0.975	1.040
Minimum void ratio	0.585	0.705

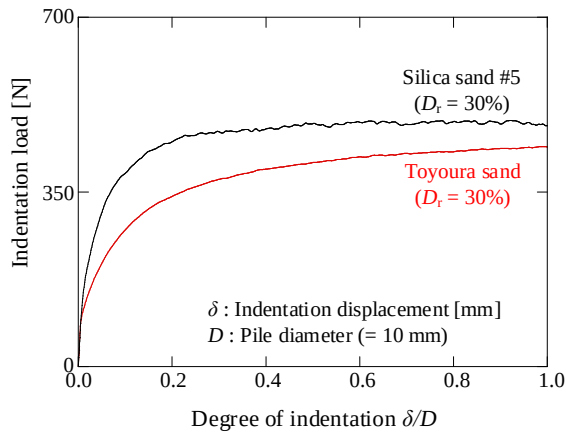


Fig. 3 Load-displacement relationships of pile loading test for sands with D_r of 30%

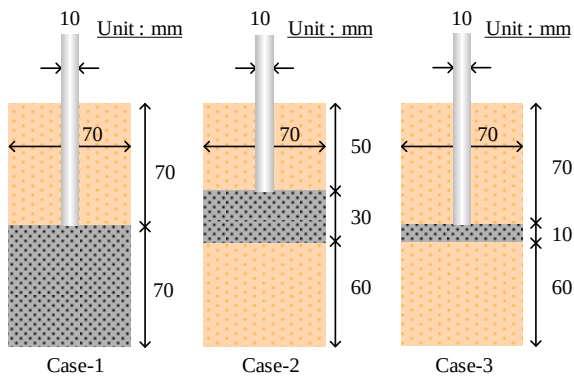


Fig. 4 Specimen conditions

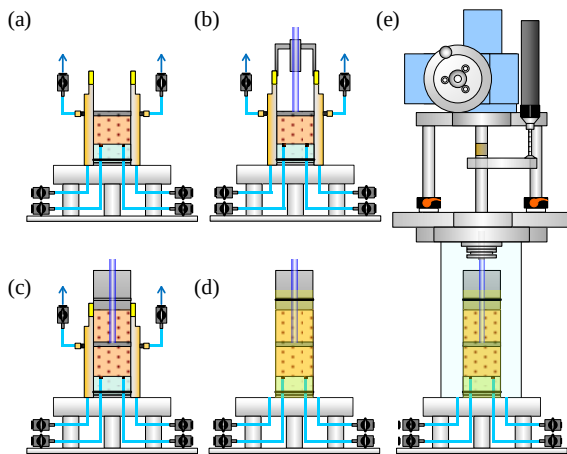


Fig. 5 Procedure of specimen preparation

Fig. 4に作製した模型地盤の概要を示す。Case-1は有効層厚が杭径の7倍、つまり杭先端以深がすべて支持層である模型地盤、Case-2は有効層厚が杭径の3倍の模型地盤、そしてCase-3は有効層厚が杭径と同じ模型地盤である。支持層は珪砂5号で相対密度85%、非支持層は豊浦砂で相対密度30%を目標に作製した。

なお、珪砂5号と豊浦砂は、両方とも気乾状態のものを用了。これら3ケースの模型地盤に対して、杭径10 mm、長さ160 mmの亚克力製ストレート模型杭を用いて実験を行った。下部非支持層厚の違いが杭の支持力に影響を及ぼす恐れがあるため、本研究では下部非支持層厚の違いが支持力に与える影響を等しくするために、Case-2とCase-3における下部支持層の層厚は60 mmで揃えることとした。

2.4 模型地盤の作製方法

Fig. 5に供試体作製方法の概要図を示す。手順は以下の通りである。

- 1) 装置下部の試料ペダスタルにメンブレンを装着してモールドを取り付けた後、モールド側面に-40 kPaの負圧をかけることでメンブレンをモールドに密着させる。
- 2) 下部の非支持層として豊浦砂を、支持層として珪砂5号をそれぞれ所定の高さから気中落下させモールド内に砂を充填する (Fig. 5(a))。各層の表面は、乱さないよう平らに整地する。
- 3) モールド上面に治具を取り付け、模型杭が支持層表面に垂直になるよう設置する (Fig. 5(b))。その後、豊浦砂を気中落下させて上部の非支持層を作製する。
- 4) 供試体内の気密性を高めるためのメンブレンシート (厚さ0.3 mm) を3枚設置し、模型杭を鉛直に押込むための固定キャップを装着する。 (Fig. 5(c))
- 5) 固定キャップにOリングを装着し、モールドにかけていた-40 kPaの負圧を供試体下部から供試体に作用させ、供試体を自立させてモールドを取り外す (Fig. 5(d))。
- 6) モーター、変位計、ロードセル、および亚克力製セルから成る装置上部を、模型地盤を底盤に固定する (Fig. 5(e))。その後、モーターのハンドルを回し、模型とロードセルとをつなぐ金属軸の位置を模型杭の位置まで下げて調整を行い、軸の凹凸を模型杭と合わせる。
- 7) 所定の箇所をネジで固定し、セル内を密閉状態にする。ペダスタル下部から供試体に作用させている負圧を取り除くとともに、空気圧により40 kPaの拘束圧を作用させる。このとき、ペダスタル下部よりセル圧、および供試体圧を測定し、その差 (以下、有効拘束圧) を算定しながら、有効拘束圧が100 kPaとなるように調節する。この際、供試体上部に設置したメンブレンシートによって供試体内の気密性が向上し、空気圧が外へ漏れ出していないことは確認済である。

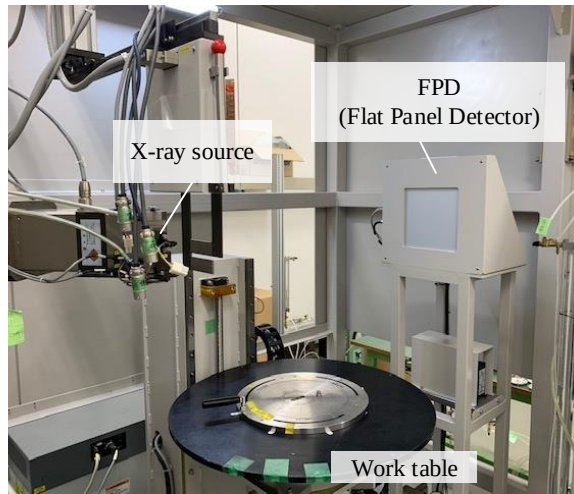


Fig. 6 KYOTO-GEOμXCT

2.5 試験方法と測定項目

杭の押込み試験は変位制御で行い、押込み速度は0.5 mm/minとした。試験中の測定項目は、杭の押込み荷重、押込み変位量、セル圧、供試体内圧であり、それぞれ1秒ごとに計測した。押込み変位量が杭径と同じ10 mmになるまで、押込みを実施した。

3. X線マイクロCT撮影と画像解析

3.1 X線マイクロCT装置とCT画像

本研究で用いたX線マイクロCT装置は、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻所有のKYOTO-GEOμXCT (TOSCANER-32250μhdk, 東芝ITコントロールシステム製)である(木戸ら, 2017)。概観をFig. 6に示す。最大管電圧は225 kV, 最大管電流は888 μAであり、被検体の大きさに応じて最適な消費エネルギーを設定する。X線マイクロCTは焦点寸法が最小4 μmと非常に小さいため幾何学的不鮮鋭が少なく、被検体をX線焦点に接近させることによって最小5 mmの高空間分解能が得られる。撮影中にワークテーブルが360度回転する際、様々な角度からX線投影画像を取得し、画像演算によって断面画像を再構成する。こうして得られる鉛直方向に連続した断面画像を重ね合わせることで、3次元のCT画像を取得する。

CT画像は、X線減衰係数の空間分布に基づき再構成される。X線減衰係数は物質密度やX線エネルギーによって決まり、CT値として変換される。CT値は、物質密度と線形関係にあることが確認されており(Desrues et al., 1996), CT画像の構成要素であるvoxel (ボクセル) に16ビットスケールで格納される。本研究で取得するCT断面画像は、1024²個のvoxelで構成される。

Voltage [kV]	150
Current [μA]	300
Diameter [mm]	49.2 (48.3 for Case-1)
Height [mm]	47.3 (46.2 for Case-1)
Voxel size [μm ³]	48.1 ² ×53.0 (47.2 ² ×52.0 for Case-1)

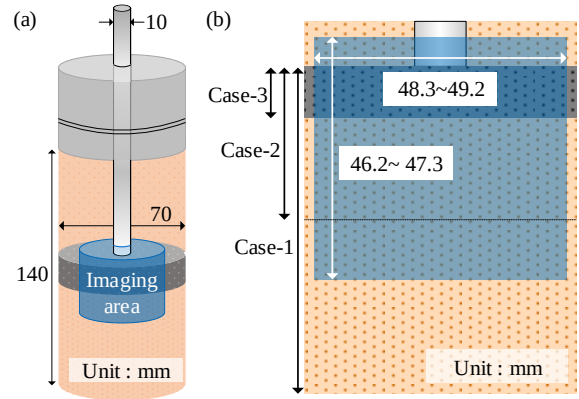


Fig. 7 Scan conditions: (a) 3D volume and (b) vertical cross section

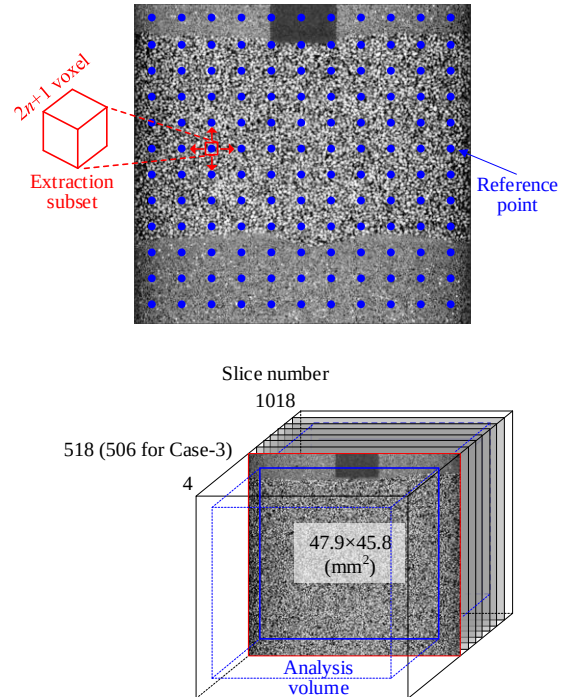


Fig. 8 Schematic diagram of porosity mapping and analysis volume

3.2 CT撮影条件

CT撮影条件をTable 2に、撮影領域をFig. 7に示す。まず、押込む前の初期状態の撮影を行う。

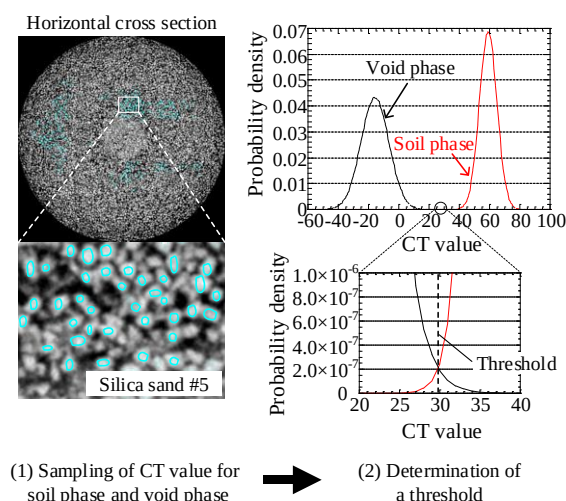


Fig. 9 Determination of a threshold between soil phase and void phase

撮影終了後、押込みを開始し、0.5 mm 押込んだところで押込みを中断し、CT撮影を開始する。この際、撮影のために50分程度荷重を中断する。このような押込みとCT撮影を、押込み変位量1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 4.0 mm, 8.0 mmの合計7点で繰り返し実施した。なお、これら7点のCT撮影点は、押込み試験において荷重が収束する押込み量を基準に決定した。

3.3 間隙率マッピング

Fig. 8に間隙率マッピングの概念図および解析領域を示す。間隙率マッピングとは、3次元CTボリュームの水平・鉛直・高さ方向に任意のvoxel間隔で検索点を設け、その点上で一辺 $2n+1$ voxelで構成される格子状の領域を連続的に抽出し、各々の抽出領域内の土粒子相・空気相のvoxel数から局所的な間隙率を算出する画像分析法である(Higo et al., 2015)。本研究で取得したCT画像は土粒子相、空隙相、模型杭相のいずれかに対応するCT値を示す。そのため、間隙率の算出には、土粒子相と空隙相を識別する閾値を決定する必要がある。そこで、3次元画像解析ソフトVGStudioMax3.2 (Volume Graphics GmbH)を用いて、土粒子相と空隙相に対応するCT値分布を調べた。

Fig. 9に閾値決定の流れを示す。均一な物質のCT値は正規分布に従うため、土粒子相および空隙相のCT値の分布は正規分布と仮定する。これに従い、CT画像内の土粒子相と空隙相のvoxelをそれぞれサンプリングし、得られたCT値分布の平均 μ と偏差 σ を算出した。それに基づき、土粒子相と空隙相それぞれの正規分布に従うCT値ヒストグラムを作成し、それらが交わるCT値を閾値として採用することとした。

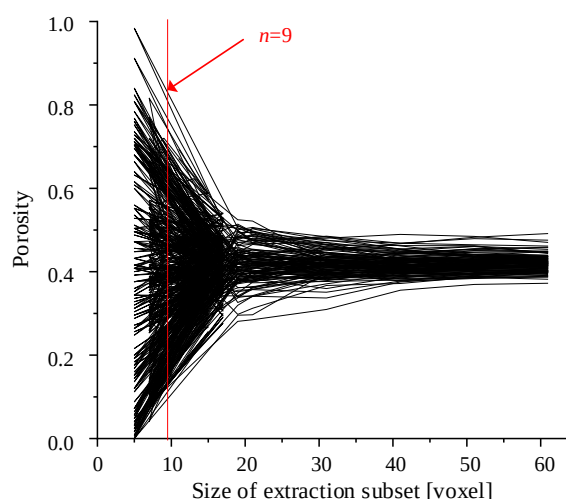


Fig. 10 Relationship between local porosity and size of extraction subset

上記の処理は、3ケース全てに対して実施し、Case-1では27.5、Case-2とCase-3では29.5を閾値とし、それらの値以上のCT値は土粒子相とした。なお、模型杭に対応するCT値は、解析領域から除外する処理を行い、結果に反映されないようにした。

3.4 感度分析

マッピングで算出する局所値のとり得る範囲は抽出領域の大きさに依存するため、局所値の分布を評価する代表体積要素の決定が重要となる。そこで本研究では、抽出領域の大きさを決定する最適なパラメータ n を選定するための感度分析を行った。パラメータ n を2-10まで連続的に、および15-30まで5ずつ変化させ、同じ位置、数の検索点において間隙率を定量化し、局所値がとり得る範囲および収束性をそれぞれ確認した。感度分析には、Case-1の初期状態の画像を用いた。

得られた感度分析の結果をFig. 10に示す。 n が2の場合、最大値と最小値との間に極端な差がありばらつきが大きい。これは抽出領域の大きさ(5 voxel)が珪砂5号の D_{50} よりも小さいためであり、解析のパラメータには適さない。一方、 n が8以上になると局所値がある範囲に収束し、最大値と最小値の幅も狭くなる。つまり、定量化結果に差が見られないため、解析のパラメータには適さない。そのため本研究では、局所値が適度に分散する $n=4$ (抽出領域の大きさは9 voxel)に決定した。なお、 n が4あるいは7の場合でマッピングを行っており、前者は全体的に間隙率が低い、後者は間隙率が高い結果に偏っていることを確認している。

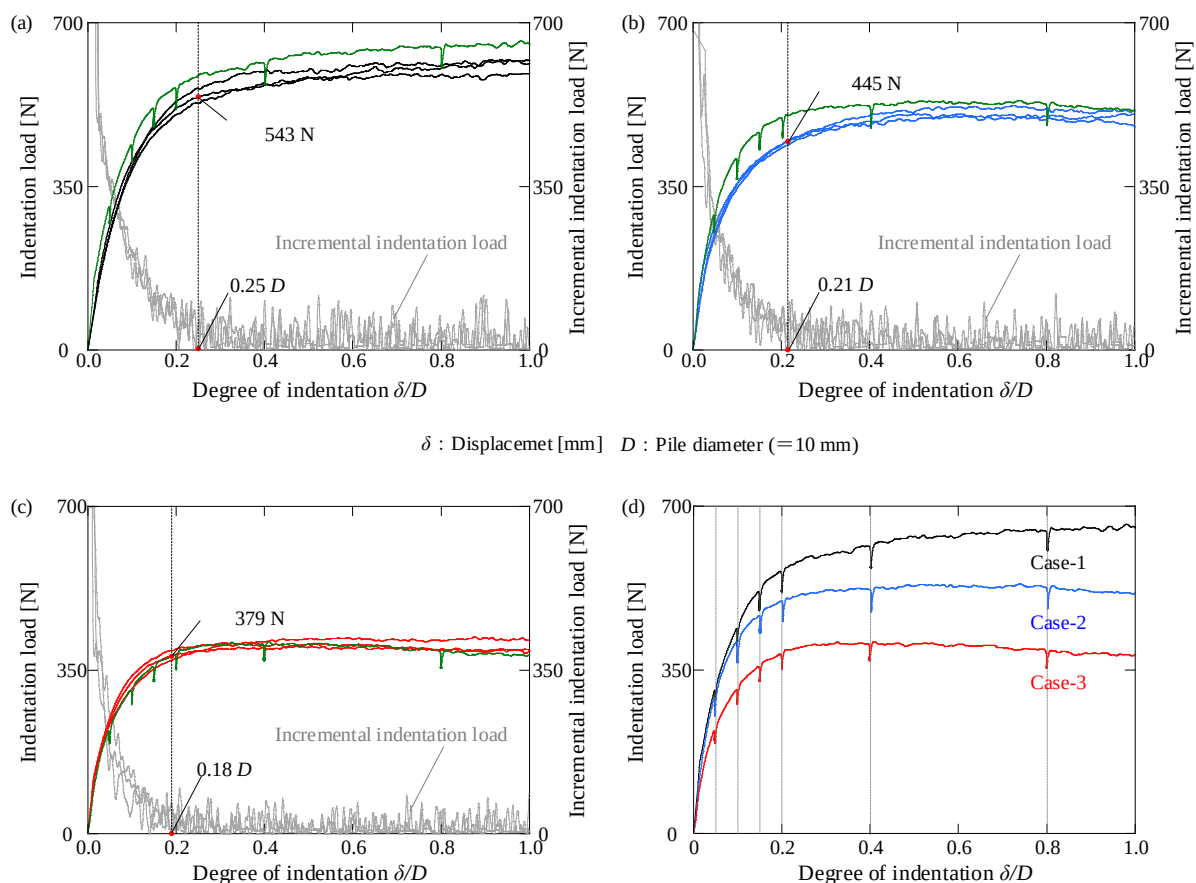


Fig. 11 Load-displacement relationships: (a) Case-1, (b) Case-2, (c) Case-3 and (d) comparison of load-displacement relationships for Case-1, Case-2 and Case-3

4. 結果

4.1 荷重-変位関係

Fig. 11に荷重-変位関係および荷重増分-変位関係を示す。図中に示す荷重増分とは、1秒毎に計測した荷重の差をとったものである。本研究では、X線CT撮影と押し込み試験を平行して実施する前に、3ケースの供試体に対してCT撮影を行わずに連続的に押し込み（以後、連続押し込みと呼称）を行い、荷重-変位関係の照査とその再現性の確認を行った。段階的にCT撮影を行った押し込み試験（以後、段階押し込みと呼称）の結果も同時に示している。Fig. 11より、いずれのケースも、3回の連続押し込み試験で得られた荷重-変位関係は押し込み初期から概ね一致しており、高い再現性が確認できる。また、連続押し込みと段階押し込みで得られた荷重-変位関係も良好な調和が見られる。したがって、CT撮影による一時的な押し込み中止による応力緩和が押し込み荷重へ与える影響は小さいと言える。

Fig. 11より、杭径を D とすると、いずれのケースも押し込み変位量 $0.05 D$ に達するまでは線形的に荷重が増加している。一方、荷重増分が0になる押し込み変位

量は、Case-1（支持層が杭径の7倍の厚さの供試体）、Case-2（支持層が杭径の3倍の厚さの供試体）、Case-3（支持層が杭径と同じ厚さの供試体）の順に小さくなっている。また、その時点での荷重、およびピーク荷重についても同様の順に小さくなっている。このように有効層厚が大きいほど大きな支持力が得られる傾向は、松井ら（1990）や鈴木ら（2016）の結果と合致する。そのため、豊浦砂と珪砂5号を用いて作製した供試体は、有効層厚が支持力に与える影響を調べる点で適切と言える。しかしながら、有効層厚が杭径の3倍である場合、完全支持杭と同等の支持力が発揮されることが報告されており、本研究の結果はこの点で異なる結果が得られている。これは、本研究では下部の非支持層の影響を揃えるため、Case-2のみ、杭の根入れ長さがCase-1に比べて短くなった分、周面摩擦力が小さくなったためと考えられる。この点については今後、杭の根入れを揃えた実験を行い検証する予定である。また、押し込み変位量 $0.1 D$ における支持力は最大押し込み荷重の65%（Case-1）、70%（Case-2）、および81%（Case-3）となり、杭径の10%で最大押し込み荷重の90%の支持力が得られるという岡原ら（1990）の知見とは合致し

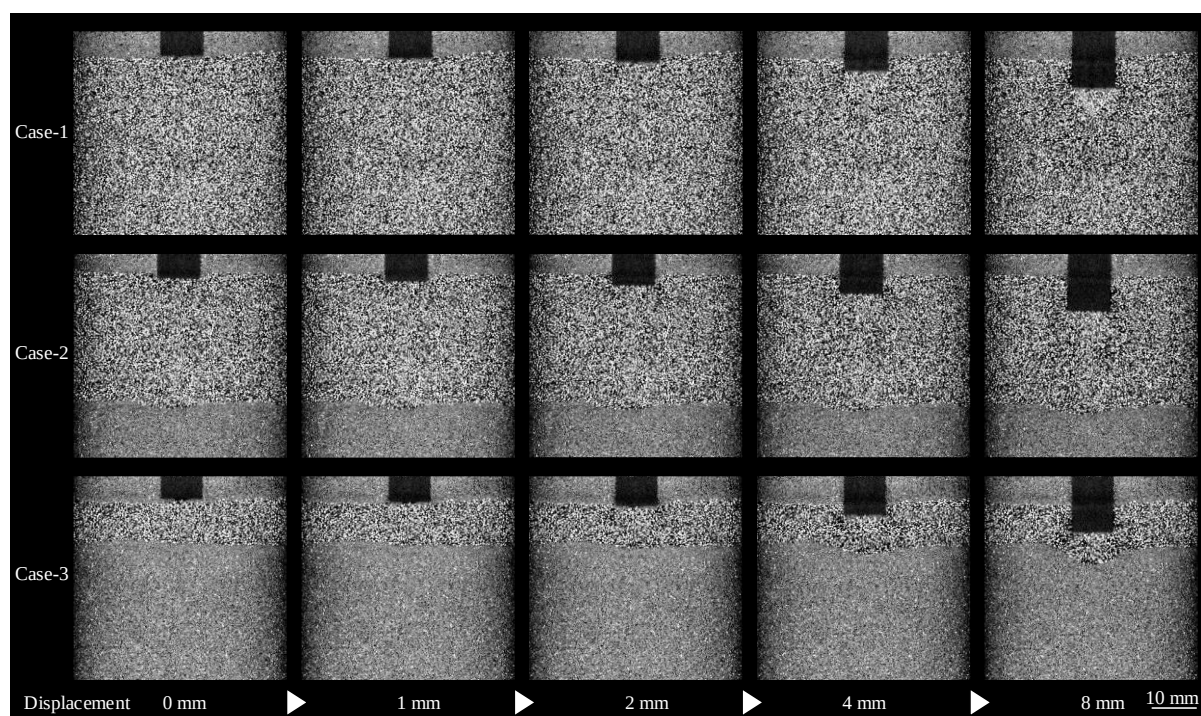


Fig. 12 Vertical cross section of CT images

ない結果となった。この原因として、模型の杭径と土粒子の粒径との関係が考えられる。本研究における支持層として用いた珪砂5号の平均粒径は0.438 mmである。これに対して模型杭径は10 mmであり、これは珪砂5号の平均粒径の22.8倍に相当する。実物大の杭径は模型の杭径と比較して極めて大きいため、十分な支持力が得られなかった可能性がある。

4.2 X線CT画像

Fig. 12に、各押込み段階で得られたCT画像を示す。図中には、Fig. 7で示す3次元ボリュームのうち、中央の鉛直断面を代表して示している。なお、CT画像では、白い部分が高密度領域、黒い部分が低密度領域を表す。

まずCase-1では、0.2 D 押込み時まではCT画像に大きな変化は見られないが、0.4 D 押込み時に杭底面直下に白く示される高密度領域が発生している。Fig. 11と併せて考えると、杭底面直下における高密度領域が形成される段階で、押込み荷重が増加していることがわかる。押込み変位量が0.8 D になると、高密度領域が杭底面を底辺とするくさび型に発達していることが確認でき、その周囲には黒く示される低密度領域が発現していることが確認できる。この傾向は、大谷ら（2006）の結果と合致する。

つぎにCase-2のCT画像より、支持層底面と下部非支持層の上面との境界において形状変化がほとんどないことがわかる。つまり、本ケースにおいて杭の

押込みが供試体内の密度変化や変形に影響を与える範囲は、支持層内部のみであると考えられる。Case-1と同様に、杭の押込みに伴い杭底面における高密度領域が発達しくさびを形成する傾向、およびその周囲に低密度領域が発生する傾向が認められる。

さいごにCase-3のCT画像を見ると、杭の押込みに伴い、下部の非支持層上面が明らかに下方へ変位していることがわかる。したがって、本ケースでは杭の押込みが地盤の密度変化や変形に影響を与える範囲は、支持層のみならず下部非支持層にも及ぶのである。Case-1とCase-2と同様に、押込み変位量0.4 D では杭底面直下に高密度領域が生じているものの、その領域は他ケースに比べると狭く、不明瞭である。この原因は、0.4 D から0.8 D 押込み時の間に下部非支持層の土粒子が下方へ大きく変位することが原因だと考えられる。杭の周囲および底面両端から斜め下方向に低密度領域が発達する傾向については、他ケースと同様であるが、下部の非支持層における明瞭な密度変化は、本研究で実施したCT撮影の解像度では十分確認できなかった。

4.3 間隙率の分布の変化

局所的な間隙率は、3次元CTボリュームの水平・鉛直・高さ方向に1 voxel間隔で、合計508²×440 voxel分設置した検索点で計算した。各ケースのPorosity mapをFig. 13に示す。特にCase-3において、非支持層に対応する領域が全体的に濃い青色（間隙率が低く

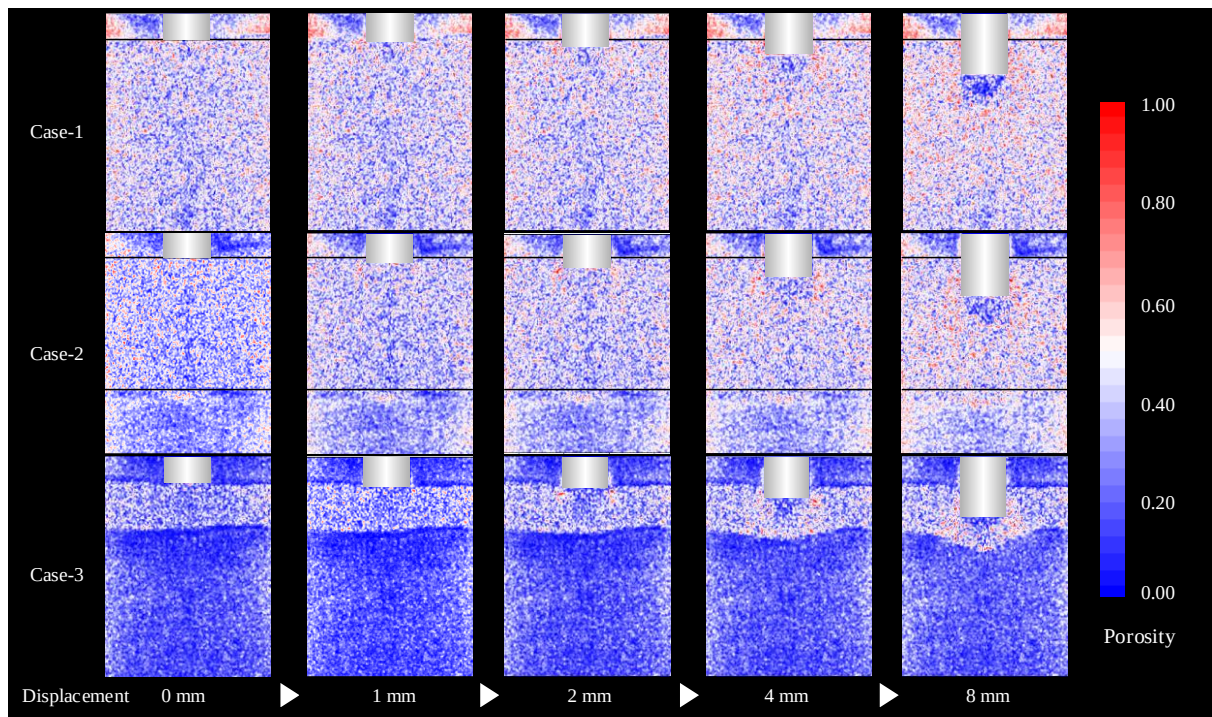


Fig. 13 Vertical cross section of porosity maps

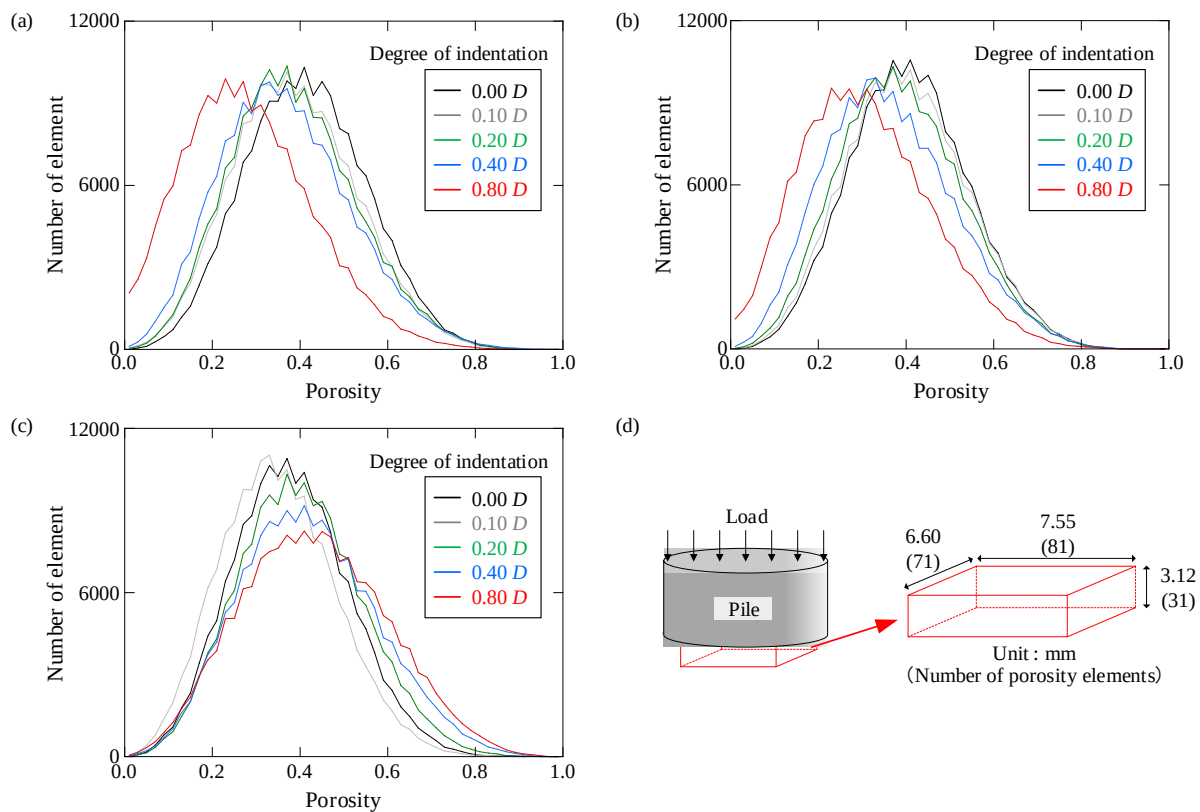


Fig. 14 Histograms of local porosity in bearing layer under tip of pile: (a) Case-1, (b) Case-2, (c) Case-3 and (d) Volume for making histogram of local porosity

密な領域) となっており、実験条件に矛盾する結果となっている。この原因として、以下の2つが考えら

れる。1つ目は、土粒子と空隙の閾値が支持層と非支持層で異なることである。今回の画像解析には、サ

ンプリングが容易であった支持層の珪砂5号と空隙に対する閾値を用いたため、非支持層領域の間隙率が正確に計算されていない可能性が高い。2つ目は、本研究のCT撮影時の解像度が低いことである。今回の解像度では豊浦砂を4 voxel程度でしか表現できない。この場合、複数の土粒子を一体として捉える可能性が高いため、間隙率が実際よりも低く評価されたと考えられる。これらの点は今後の研究課題と考えており、本研究では特に杭直下の高密度領域に着目して結果の考察を行う。

Fig. 13より、杭の押込みに伴い、杭底面直下に高密度領域が見られることは明らかである。一方で、初期状態と押込み変位量0.20 D時を比較すると、その相違点は杭底面両端からわずかに発達している低密度領域のみであり、断面の情報からは明らかな差は判別できない。そこで、各押込み段階に対し、杭底面直下のある領域におけるマッピング結果を抽出し、間隙率のヒストグラムを作製した。マッピング結果の抽出領域と間隙率のヒストグラムをFig. 14に示す。解析領域は71×81×31個の要素から成り、それぞれ異なる間隙率を示す。図の縦軸は、任意の間隙率を示す要素の数を表す。それを踏まえると、Case-1とCase-2は、杭の押込み量が増えるにつれて要素数がピークを示す間隙率が小さくなっている。つまり、支持層内が圧縮し高密度化していることを意味し、その傾向は両ケースではほぼ同じである。一方、Case-3は、押込み量が増加するほど要素数がピークを示す間隙率は大きく変化せず、ピーク数が徐々に減少し、間隙率0.5以上の要素数の増加が認められる。これは、支持層内が殆ど高密度化せず、杭先端周辺における低密度化が支配的であることを意味する。したがって、少なくとも杭径の3倍の有効層厚がなければ、薄層内の密度増加は期待できない。

4.4 支持層内の密度変化と支持力の関係

杭の押込みに伴い、周面摩擦力が作用すると同時に、杭底面直下の地盤が圧縮され、高密度領域が形成される。しかしながら、有効層厚が杭径と同じ場合、杭の押込みに伴って杭底面直下には高密度領域が発達しにくく、有効層厚が杭径の3倍あるいは十分な厚さがある場合に比べてその領域は小さく、扁平なものとなる。これは支持層下部の非支持層が軟弱なため大きく下方へ変位し、支持力の影響範囲が支持層を超え、非支持層に及ぶためである。その結果、より小さな押込み変位量で降伏し、発揮される支持力も低くなるのである。

有効層厚が杭径の3倍ある場合、完全支持杭と同等の支持力が得られる、という傾向は本研究では確認されなかった。一方、X線CTと間隙率マッピングを

適用した結果、有効層厚が杭径の3倍あるケースでは下部の非支持層にまで密度変化や変形が及ばず、杭底面直下の支持層において密度が刻々と増加する傾向と密度の大きさは、完全支持杭のそれらと概ね一致することを明らかにした。したがって、杭の押込み時において、有効層厚が杭径の3倍あれば、支持層内の密度変化の傾向は、完全支持杭と同等である。

5. 結論

本研究では、支持層の層厚が杭の支持力に与える影響を調べるため、支持層厚の異なる3種類の供試体を作製し、等方圧力下において杭の押込み試験を実施した。さらに、押込み試験中にX線マイクロCTで供試体内部を可視化するとともに、取得したCT画像を用いて間隙率マッピングを実施し、杭の押込みに伴う地盤内部の密度変化を定量化した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 押込み初期に荷重が線形的に増加する傾向は、有効層厚に依らない。一方、荷重増加が収束する押込み変位量、および荷重の大きさは、有効層厚が小さいほど小さくなる。これは、支持層下部の非支持層が軟弱なため大きく下方へ変位し、支持力の影響範囲が支持層を超え、非支持層に及ぶためである。
- 2) 杭の押込みに伴い杭底面直下に高密度の領域が発達し、その高密度領域を取り囲むように低密度の領域が発達する傾向は、有効層厚に依らない。しかしながら、有効層厚が杭径と同じ場合、高密度領域は不明瞭かつその発生範囲は小さい。有効層厚が杭径の3倍ある場合、支持層内の密度変化の傾向は、完全支持杭のそれと同等である。

参考文献

- 大谷 順・弘中淳市・椋木俊文・平井貴雄（2006）：鉛直荷重下における杭先端地盤の3次元支持力特性，土木学会論文集C，第62巻，2号，pp. 311-319。
- 岡原美知夫・中谷昌一・田口敬二・松井謙二（1990）：軸方向押込み力に対する杭の支持特性に関する研究，土木学会論文集，418号，pp. 257-266。
- 木戸隆之祐・肥後陽介・高村福志（2017）：三軸圧縮下の不飽和砂の進行的なせん断帯発達過程における間隙水の微視的特性，土木学会論文集C（地圏工学），第73巻，2号，pp. 233-247。
- 鈴木直子・西山高士・渡辺和博・佐原 守（2016）：中間層支持杭の鉛直支持性能に関する研究，大林組技術研究所報，80号，pp. 1-6。

- 堀井良浩・長尾俊昌・山崎雅弘・小椋仁志 (2015) : 層状地盤に支持される杭先端の鉛直支持性能その4 : 既往実験結果に基づく追加検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 20228号, pp. 455-456.
- 松井 保・中林正司・前川義男・松井謙二 (1990) : 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号, pp. 33-38.
- Desrues, J., Vhambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F. (1996): Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Géotechnique*, Vol. 46, No. 3, pp. 529-546.
- Higo, Y., Morishita, R., Kido, R., Khaddour, G. and Salager, S. (2015): Local water-retention behavior of sand during and wetting process observed by micro x-ray tomography with trinarisation, *JGS special publication*, Vol. 2, No. 16, pp. 635-638.
- Meyerhof, G.G. (1951): The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, *Géotechnique*, Vol. 2, No. 4, pp. 301-332.
- Sawamura, Y., Kimura, K., Kido, R. and Kimura, M. (2018): MicroX-ray visualization of pullout behavior of reinforcement material under triaxial confining stress conditions, *IS-Atlanta2018, Pores-X-ray CT*, Atlanta, USA.
- Vesic, A.B. (1963): Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand, *Highway Research Record*, No. 39, pp. 112-153.
- (論文受理日 : 2019年6月17日)