

X 線 CT を用いた水平荷重下における杭周辺地盤挙動の 3 次元可視化

3-D visualization of soil behavior due to laterally loaded pile using X-ray CT

高野 大樹*・ファン ダン ホア **・大谷 順***

Daiki Takano, Khoa Dang Pham, and Jun Otani

* 学生会員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程・日本学術振興会特別研究員 DC1
(〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目)

** Ph. D. Lecturer, National University of Civil Engineering, Hanoi, Vietnam

***正会員 Ph. D. 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目)

The purpose of this research is to develop a technique of image processing analysis for simulating three dimensional (3-D) movements of soil due to lateral pile loading using an industrial X-ray CT scanner. A series of lateral pile loading tests were conducted with a soil box and an automatic loading system. A large number of markers (plastic spheres) were setup as grids in the soil at three depths under the ground surface. After lateral loading was applied, CT scanning was conducted on the soil box. From all the CT images obtained containing images of cross sections of the markers, locations of all the markers after loading were determined. Thus, a simulation of 3-D movements of the markers in the soil was conducted. Therefore the soil behavior due to lateral pile loading was observed in three dimensions. In addition, by connecting the centers of the markers at the stages before and after loading, the 3-D movements of the markers were obtained as vectors of the movement. Finally, quantitative discussion was performed on 3-D behavior of soil due to lateral pile loading.

Key Words: visualization, displacement, model test, laterally loaded pile, X-ray CT, image and processing analysis

1. 序論

今日存在する海洋構造物、湾岸施設、橋梁および水門など大部分の構造物は杭基礎によって支持されているといっても過言ではなく、加えて施工される上部構造物の多様化とその立地条件の複雑化に伴い、杭基礎の需要は現在も増加の一途をたどっている。また近年多発する大地震により、上部構造に対し基礎となる部分、特に杭基礎における水平支持力の算定の見直しが急務とされ、今日まで様々な研究が行われてきている¹⁾。しかしながらこれまでの研究では、杭周辺地盤の挙動を 3 次元的に把握するには至っておらず、水平荷重を受ける杭周辺地盤の挙動を非破壊状態で考察した例は少ない。また、地盤挙動の定量的評価については、これまで 2 次元下の模型実験により側面での土の移動を画像解析した例²⁾、アルミ棒積層体模型を用いてアルミ棒の動きを追跡した例³⁾、および 3 次元 DEM を用いた数値解析を実施することで要素の移動を追跡した例⁴⁾ などがある。しかしこれらは 2 次元の挙動であったり、3 次元ではあるが実際の土ではなく数値シミュレーションとしての結果である。

これに対し、医療診断技術として用いられてきた X 線 CT スキャナは、今日工学の分野においても非破壊試験の 1 つ

として広く用いられている。地盤工学の分野においても、Otani ら^{5), 6)} は地盤内部挙動の可視化、及び物性の定量的評価において X 線 CT スキャナが大変有効であることを示している。

本論文は、産業用 X 線 CT スキャナ装置と、すでに著者らが開発している X 線 CT 専用水平載荷模型実験装置⁷⁾ を併用した実験システムを用いて、水平載荷時における杭基礎周辺地盤の 3 次元可視化を試みる。ここでは、杭頭での荷重増加に伴う地盤内挙動を解明する目的で、多量のマーカーを地盤内に設置し、その移動を CT 画像を用いて追跡することで、地盤の挙動を非破壊かつ 3 次元的に把握する。

2. X 線 CT 用水平載荷模型実験装置⁷⁾

Photo 1 に X 線 CT 用水平載荷模型実験装置の写真を示す。実験装置は、アクリル製の土槽、載荷モーター部、荷重伝達部およびコントロール部より構成されている。水平載荷は、杭頭の変位量をコントロールして行われる。Photo 2 は X 線 CT スキャナ装置上に設置された模型土槽を示している。CT 撮影中は、X 線の透過能力を考慮して、撮影領域内にコード類が入らないように、コントロール部と載荷モーター部を切り離して CT 撮影台に設置する。なお、

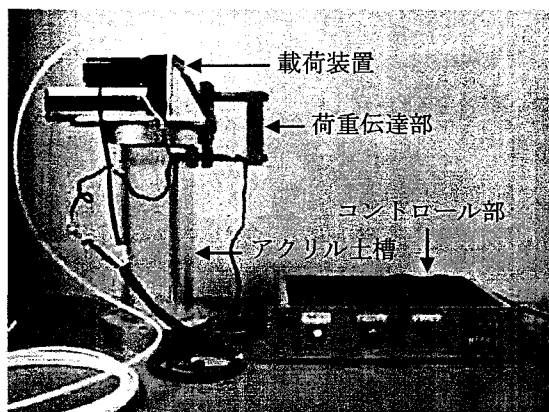


Photo 1. X線CT用水平載荷模型実験装置

本研究で用いたX線CTスキナーの詳細については参考文献8)を参照されたい。

3. 杭基礎周辺地盤の破壊現象⁷⁾

著者らはこれまでに前述の実験装置を用いて、水平荷重を受ける杭周辺地盤の3次元的な破壊現象の解明を目的に模型実験を行っている。ここでは、その結果の概略を紹介する。載荷試験は、杭頭に定速で変位を与えることにより実施し、杭頭変位量が(a)5mm, (b)7mm, (c)9mm, (d)11mm, (e)13mm および(f)15mm に達した時点でCTスキャンを行い、2次元断面画像また、2次元断面画像を重ね合わせて再構築した3次元画像を作成した。Figure 1はCT画像から密度低下領域の境界面つまり、崩壊領域の境界面のみを画像解析により抽出した画像である。変位量が増加するにしたがって、載荷方向および鉛直方向にもすべり面が広がりを見せており、その形状は円錐を逆さにした形に近い形状となった。このように、各変位量におけるすべり面の発達過程については著者らがこれまでに行った研究により明らかになった。しかし、すべり面より内側の崩壊領域内の土の挙動については未だ明らかになっていない。そこで、本研究では3次元画像データであるX線CT画像を用いた画像解析結果を基に、水平荷重を受ける杭周辺地盤の動きを解明する。

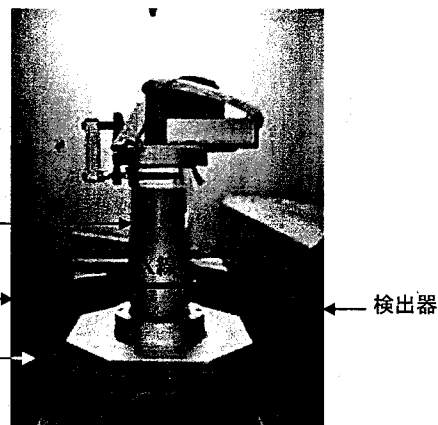


Photo 2. CT撮影状況

4. 実験概要

4.1 土試料および模型杭の物性

模型地盤は、豊浦乾燥砂(50%粒径 $243\mu\text{m}$)を多重ふるい($425\mu\text{m}$ メッシュ+ 2mm メッシュ $\times 3$ を 40mm 間隔で設置)を用いて、土槽天端から高さ 40mm の空中落下法により相対密度85%、乾燥密度 1.57t/m^3 となるように作成した。豊浦乾燥砂の物理特性をTable 1に示す。また、模型杭の物性をTable 2に示す。材質については、X線の透過能力を考慮してアルミ材とした。また、土の挙動を観察するために模型地盤内に球状のマーカー(直径 2mm 、材質アルミニウム)を規則的に設置した。

4.2 実験手順

実験では、地表面から 22mm 、 46mm および 70mm の3層に規則的に配置したマーカー(一層135個)を設置した。Figure 2にマーカーの設置位置を示す。さらにFigure 3は設置したマーカーの層を土槽縦断面で示している。

実験は以下の手順で実施した。

- (1) 模型杭を模型土槽に挿入し、杭下端を土槽底面に固定する。
- (2) 多重ふるいを用いた空中落下法により豊浦砂を 260mm (地表面より 70mm)の高さまでセットする。
- (3) マーカーを設置するためのガイドを地盤面上にセットする。続いて、ガイドに空けられた穴にマーカーを

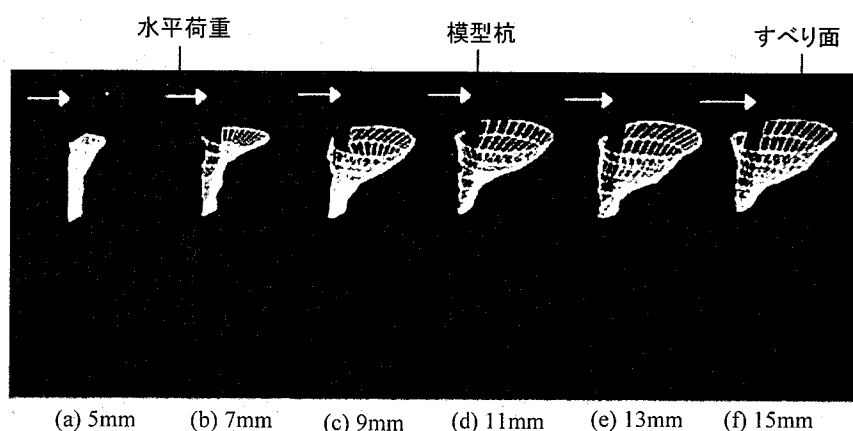


Figure 1. 水平載荷による崩壊領域の特徴抽出画像

Table 1. 豊浦乾燥砂の物理特性

最大乾燥密度	ρ_{dmax}	(t/m^3)	1.66
最小乾燥密度	ρ_{dmin}	(t/m^3)	1.34
乾燥密度	ρ_d	(t/m^3)	1.57
相対密度	Dr	(%)	85

Table 2. 模型杭の特性

長さ	(mm)	350
根入れ長さ	(mm)	330
断面形状(長方形)	(mm)	20x2
材質		アルミニウム

ひとつずつ挿入する。Photo 3 にマーカの設置状況、Photo 4 に初期状態のマーカ位置を示す。

- (4) (2), (3)と同じ手順を繰り返し、マーカ群を地表面から46mm, 22mmの地盤内水平面にセットする。マーカ設置後は高さ330mmまで模型地盤を作成する。尚、3層に分けて設置されたマーカ群を、地表面側からLevel 1, Level 2, Level 3と定義する。
- (5) 模型土槽をCT撮影台に取り付け、模型地盤の初期状態

態をCT撮影する。X線の照射厚は、すべての実験を通して1mmとした。

- (6) 荷重装置と結合したコントロール部により荷重速度及び変位量を決定して模型杭に荷重する。荷重速度は0.05mm/secとした。
- (7) 杭頭変位が5mm, 10mm, 15mmに達した時点で地表面から70mmの範囲を1mm間隔でCT撮影する。
- (8) CT撮影で得られた水平断面画像において、各マーカの位置を2次元あるいは3次的に追跡することで、杭基礎周辺地盤の挙動を求める。
- (9) (8)においては、マーカの中心を求めることで、その位置を確定する。

5. 実験結果と考察

5.1 X線CT画像

Figure 4 は異なる8つの深さでのCT断面画像を初期状態

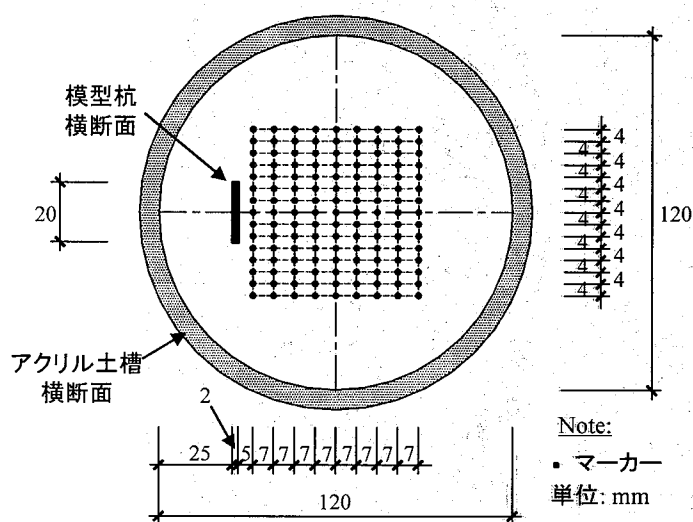


Figure 2. マーカの配置

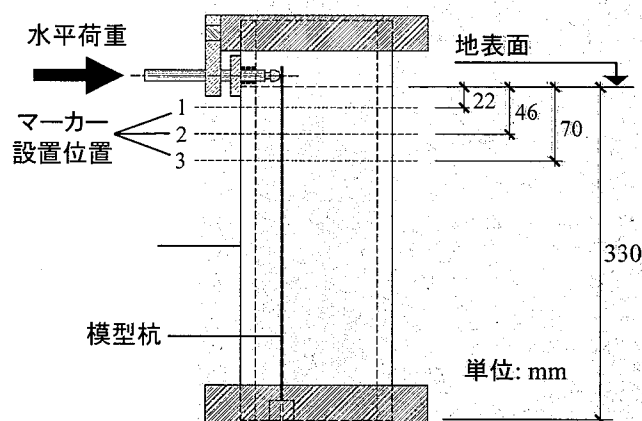


Figure 3. 土槽縦断面からのマーカ初期位置

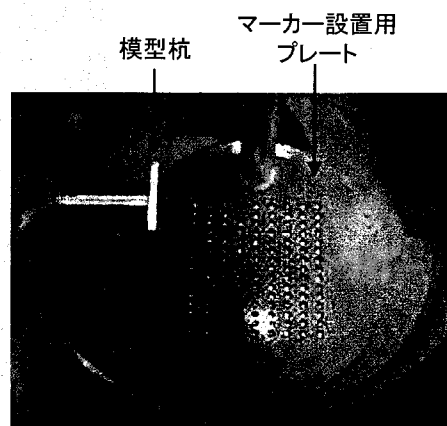


Photo 3. マーカ設置状況

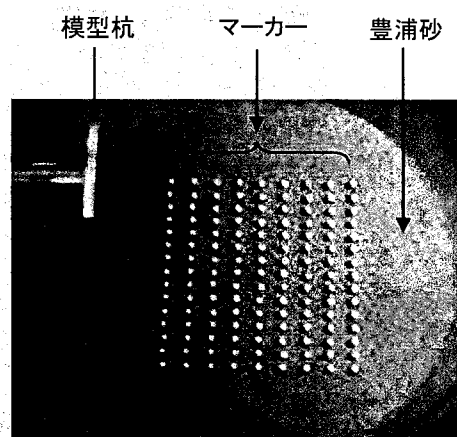


Photo 4. マーカの初期位置

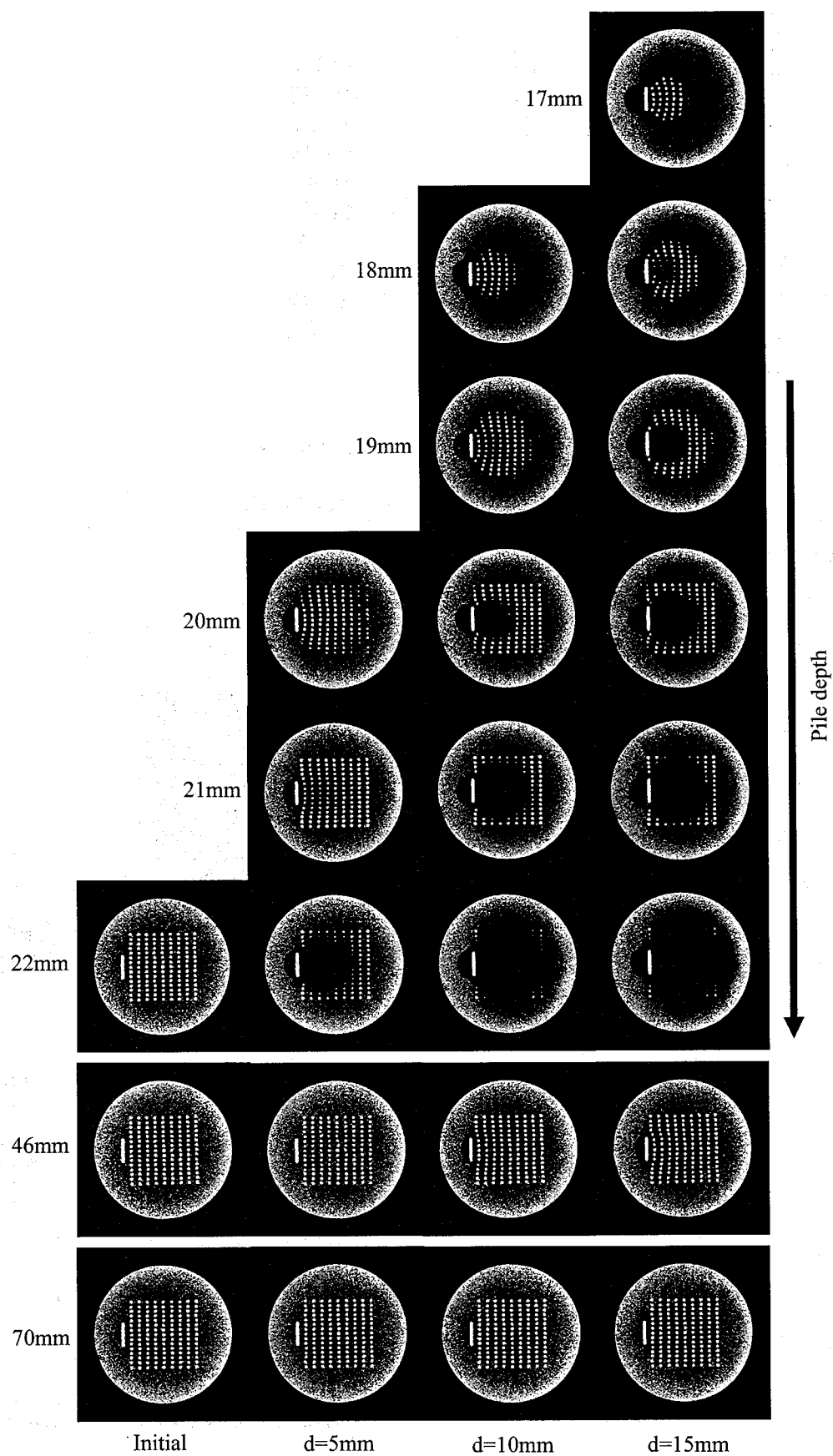


Figure 4. 各杭頭変位量($d=0, 5, 10, 15$ mm)におけるCT断面画像

と、各杭頭変位量について示している。CT スキャンにより得られる CT 画像は、CT 値と呼ばれる材料の X 線吸収特性で定式化された値の空間分布によるデジタル画像であり、CT 値の高い領域（高密度領域）は白色、また CT 値の低い領域（低密度領域）は黒色で、256 階調の白黒濃淡レベルにより表示される。また、各変位量での画像を見ると、Level 1 のマーカーは水平方向に移動するだけではなく、鉛直方向にも移動していることがわかる。本論文では、密度の低下が著しい、つまりひずみの局所化が顕著な領域をすべり面とした。模型地盤の密度変化に着目すると、与える杭頭変位量が増加するに従い、模型杭に対して載荷方向に黒色の密度低下領域つまり、すべり面が広がっていることが確認できる。ここでマーカーの動きに再び着目すると、すべり面で囲まれた崩壊領域内のマーカーのみが移動していることがわかる。

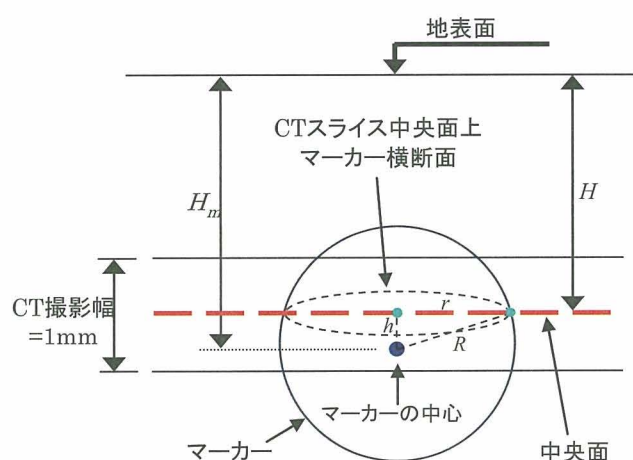


Figure 5. マーカーの拡大図

5.2 画像解析手法に基づく地盤挙動の3次元可視化

(1) 画像解析手法

マーカーの動きを3次元的に可視化するためには、変位後のマーカーの重心位置が必要となる。つまり、初期状態から水平方向及び鉛直方向へのマーカーの変位量を求めることができれば、移動後のマーカー中心座標を求めることができる。水平方向のマーカー中心座標の変位量は、初期状態の画像と各変位量でのCT画像を比較することにより容易に求めることができる。この座標に地表面からの深さを与えると、マーカーの3次元的な位置が計算できたことになる。マーカー中心座標の地表面からの深度を求める手法として、今回は以下に挙げる方法を用いた。

Figure 5はある1つのマーカーに着目した拡大図である。このマーカーを含む範囲をCT撮影すると、1つの断面画像が得られる。今回使用したCT装置で得られる断面画像は、画素数 512×512、1 voxel のサイズは 0.293mm×0.293mm×1mm（X線照射厚）である。ここで注意しておきたいのは以下の点である。

- (1) CT 断面撮影に用いた X 線の照射厚は 1mm である。
- (2) CT 画像におけるマーカーの断面は X 線が照射された範囲(今回の実験では 1mm に設定)の中心部の断面と仮定する。

Figure 5 より、CT 画像より測定されるマーカーの半径は r となる。また、マーカーの直径は 2mm なので、 $R=2$ となり、マーカー断面画像の中心とマーカー中心との距離 h は以下の式により与えられる。

$$h = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (1)$$

さらに、マーカーの中心の地表面からの深度 H_m は以下の式で与えられる。

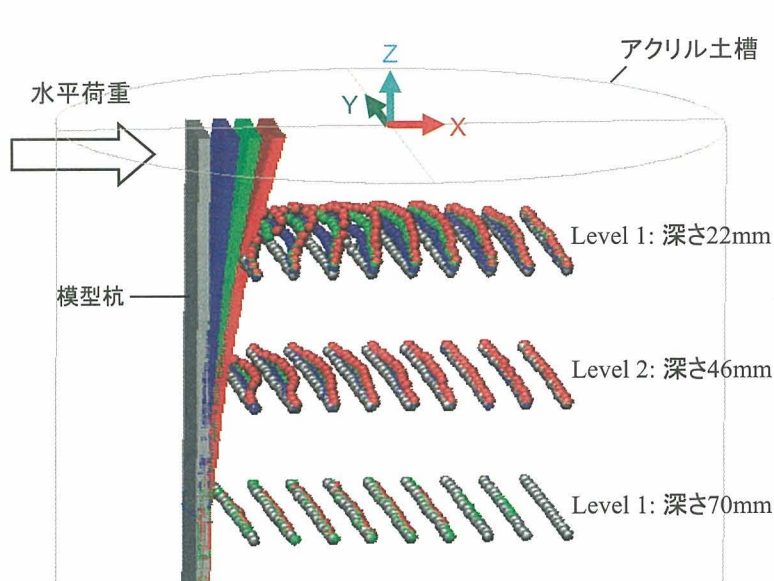


Figure 6. 初期状態と各杭頭変位量でのマーカーおよび模型杭の3次元画像

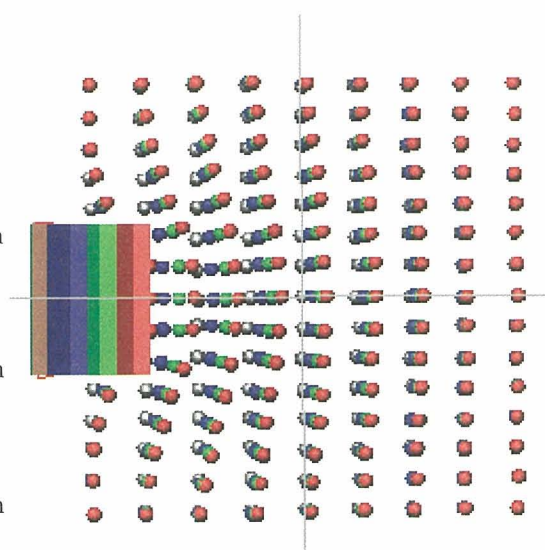


Figure 7. Level 1 におけるマーカーの俯瞰図

$$H_m = H \pm h \quad (2)$$

ここで、 H は撮影断面の地表面からの深度である。この撮影断面の深度 H は、CT 撮影位置により決定される。

以上より得られた移動後のマーカの座標を用い、画像を作成することによりマーカの 3 次元的な挙動が把握可能となる。

(2) 地盤挙動の三次元的な検討

Figure 6 は上述の解析手法を用いて得られた初期状態と 3 つの杭頭変位量でのマーカ及び模型杭を同時に示した 3 次元画像である。また Figures 7, 8 および 9 は Level 1, 2 および 3 のマーカについて、それぞれ上面から見た画像

である。これらの図から、Level 1（地表面からの深度 22mm）におけるマーカは全体的に地表面方向に移動していることがわかる。また、模型杭に近い部分でのマーカは、斜め上方に移動している。これは、杭頭に水平方向の変位が生じるにしたい、杭前方崩壊領域内の地盤が上方に押し上げられるためと考えられる。また、模型杭より遠くにあるマーカほど、上方に移動する傾向にあり、その移動量も小さくなっていく。また、模型杭の中心かつ X 方向に位置するマーカが最も水平荷重の影響を受け大きく変位している。Level 2(地表面からの深度 46mm)におけるマーカは、5mm, 10mm の杭頭変位量では水平方向に移動している。これは、杭の変位により加わる水平荷重に比べ、土被り圧が大きかったためと考えられる。しかし、

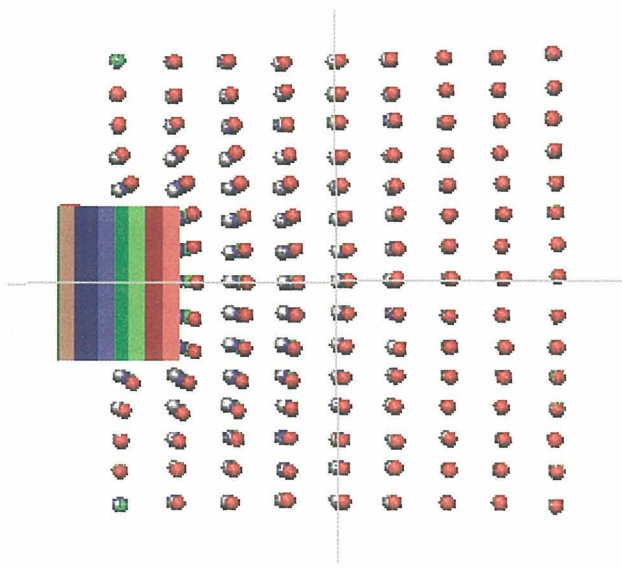


Figure 8. Level 2 におけるマーカの俯瞰図

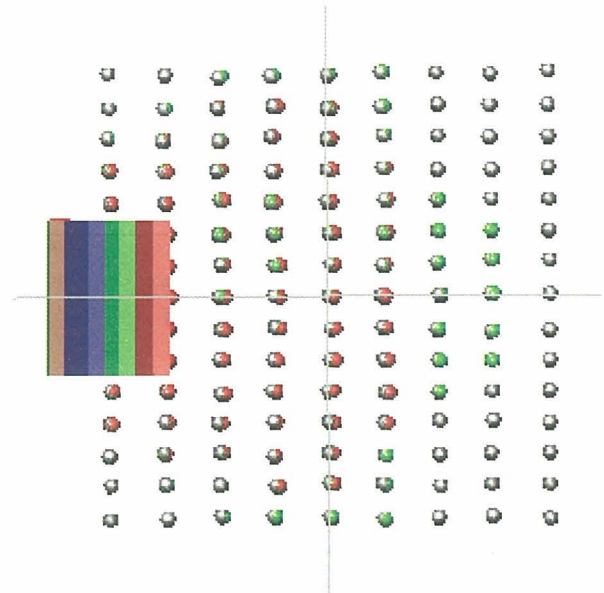


Figure 9. Level 3 におけるマーカの俯瞰図

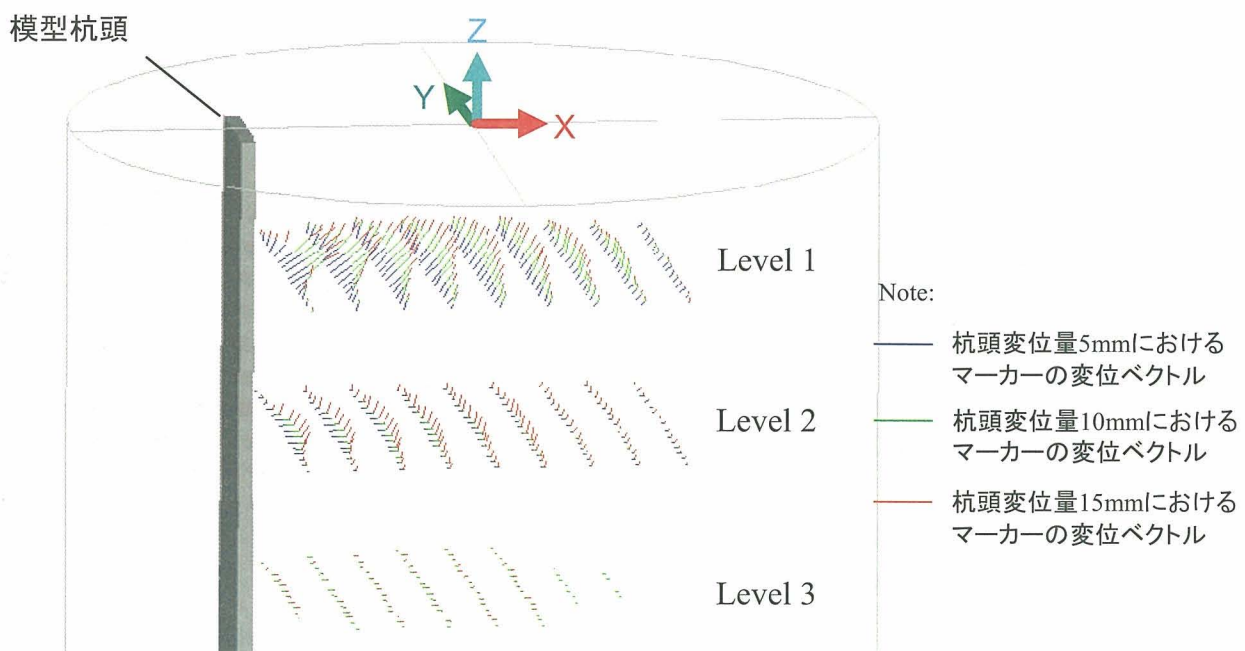


Figure 10. 各杭頭変位量での 3 次元マーカ変位ベクトル

杭頭変位が 15mm になるとマーカ－は上方に移動している。Level 3(地表面から 70mm)におけるマーカ－は、5mm の杭頭変位量では土被り圧がより大きくなるためほとんど移動していない。10mm, 15mm の杭頭変位量では水平方向のみに移動していることがわかる。

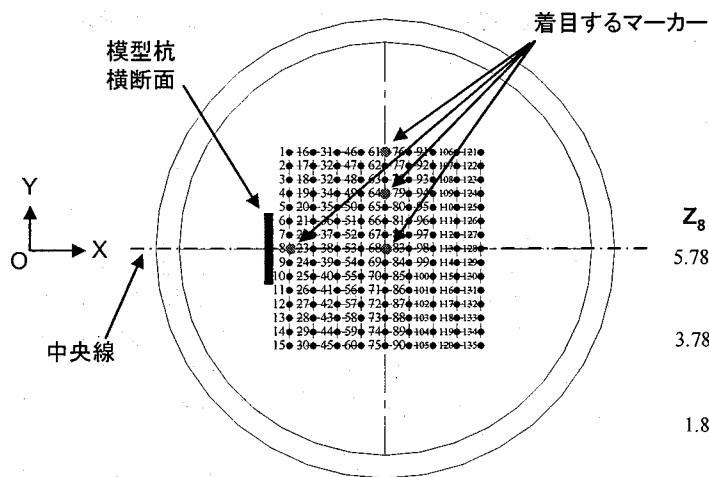


Figure 11. Level 1 のマーカ－位置及び番号

初期状態から各杭頭変位量におけるマーカ－の中心を直線で結ぶと、マーカ－の変位ベクトルが描かれる。3つの各杭頭変位量でのマーカ－3次元変位ベクトルを Figure 10 に示す。この図より、水平荷重が作用する杭基礎周辺地盤の 3 次元挙動が定性的かつ定量的に把握可能となる。

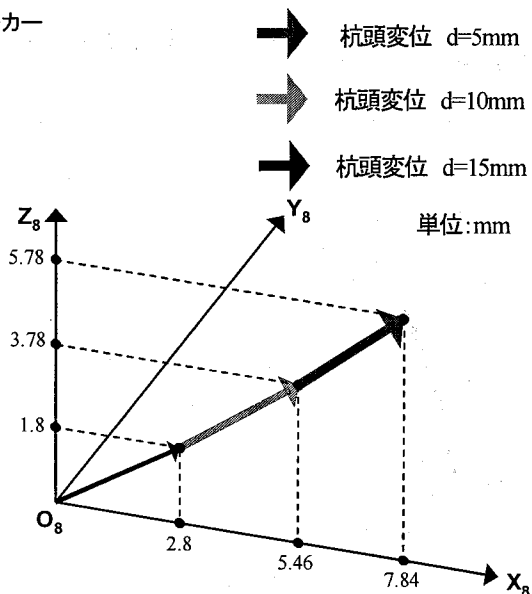


Figure 13. 杭頭変位に伴うマーカ－8の軌跡

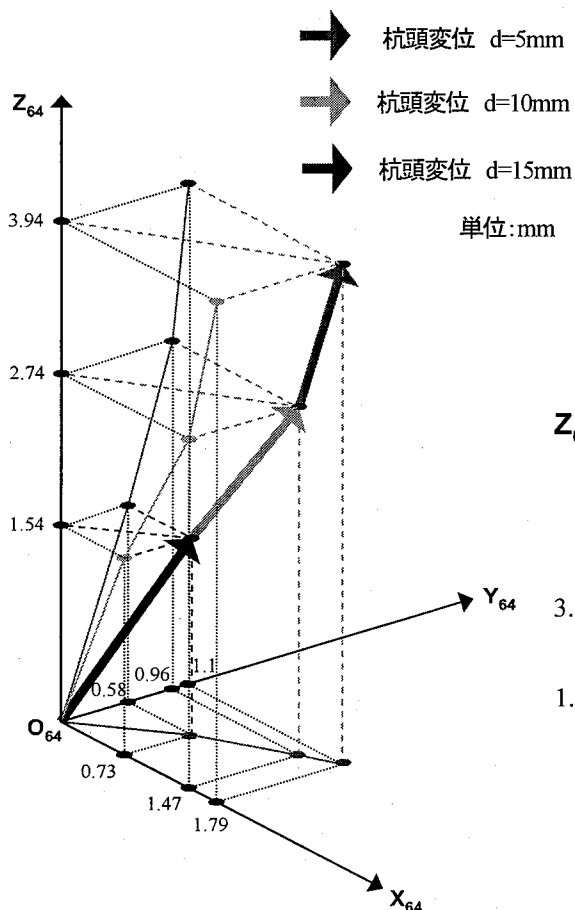


Figure 12. 杭頭変位に伴うマーカ－64の軌跡

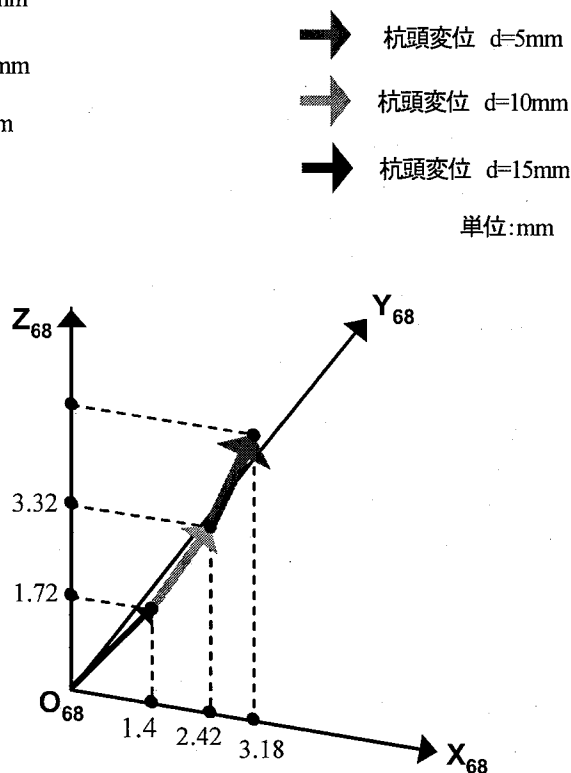


Figure 14. 杭頭変位に伴うマーカ－68の軌跡

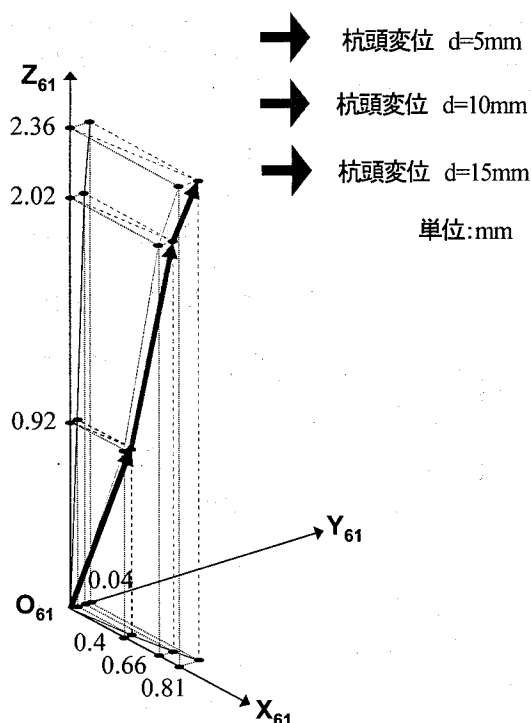


Figure 15. 杭頭変位に伴うマーカ-61の軌跡

5.3 マーカ-個々の動き

より詳細な現象を解明するために、ここではいくつかのマーカ-を抽出し、荷重に伴うそれらの軌跡について考察する。Figure 11はLevel 1のマーカ-位置を番号により示したものである。ここではその挙動が顕著である最も地表に近いLevel 1の挙動を対象とした。その中でもここで対象とするマーカ-は図中の矢印で示しているように、杭中心軸上に2点(8と68)と、点68の直線上で杭中心軸に直角方向(水平方向)の2点(61と64)を対象とした。Figure 12は、マーカ-64について3杭頭変位量に伴う軌跡をベクトルで示したものである。ここでは、マーカ-の初期座標を原点とした座標系 $O_{64}X_{64}Y_{64}Z_{64}$ を用いて表している。この座標系は、Figure 10中に示されている全体の座標系OXYZに対応している。この図より、杭頭の水平変位量が増加するに従い、マーカ-64の移動方向は上方かつY方向であり、鉛直上向きかつ水平方向に変位していることがわかる。Figure 13は杭頭荷重の増加に伴うマーカ-8の軌跡を示すベクトル図である。マーカ-8は模型杭に最も近い中心線上に位置する。この図より、マーカ-8は杭中心軸上を $X_8O_8Z_8$ 面上を斜め上方に向かって比較的線形に移動している。Figure 14は、マーカ-8と同様杭中心軸上で8よりやや離れた位置であるマーカ-68の挙動を示している。また最後にマーカ-68と64の直線上で杭より離れた位置であるマーカ-61の挙動をFigure 15に示している。マーカ-68はマーカ-8の挙動に類似しているが、

絶対量は小さく挙動も非線形的に上方に移動している。一方マーカ-61は、杭から離れていることもありその移動量は小さいが、マーカ-64、68に比べ、より上方方向に向かって変位している。

これらの結果より、その精度については今後も検討が必要であると考えるが、実施した画像解析手法は水平載荷による杭基礎周辺地盤の挙動をより詳細かつ定量的に評価可能であるといえる。

6 結論

本論文では、水平載荷模型実験装置とX線CTスキャナを併用した実験システムを用いて、水平荷重が作用する杭基礎周辺地盤の挙動解明を行った。ここでは地盤の挙動を把握する目的で、直径2mmのマーカ-群を土中に設置し、これらマーカ-の軌跡をCT画像中で追跡することで、地盤挙動の可視化を試みた。

マーカ-の大きさや数についての検討は今後も必要であると考えるが、非破壊かつ3次元挙動が把握可能なX線CT結果を用いることの有効性については確認できたと考える。今後はマーカ-追跡精度の確認と、その挙動に基づく土の応力-ひずみ関係の同定について実施する所存である。

参考文献

- 1) 岸田英明, 中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文報告集, 第281号, 41-55, 1979.
- 2) 谷和夫, 龍岡文夫, 山口順: 砂地盤上の帯基礎の模型支持力実験(第2報), 第21回土質工学研究発表会, 1165-1168, 1986.
- 3) Yamamoto, K. and Otani, J. Microscopic observation on progressive failure on reinforced foundations, *Soils and Foundations*, 41(1): 25-37, 2001.
- 4) 山本雄介, 岸野佑次, 石井建樹, 京谷孝史: 粒状体のせん断流動における遷移現象の解析, 応用力学論文集, 8, 583-590, 2005.
- 5) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, 40(2): 111-118, 2000.
- 6) Otani, J. and Obara, Y. *X-ray CT for Geomaterials*, BALKEMA, 2003.
- 7) Otani, J., Pham, K. D. and Sano, J. Investigation of failure patterns in sand due to laterally loaded pile using X-ray CT, *Soils and Foundations*, 46(4), 2006. (印刷中)
- 8) 椋木俊文: 地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士学位論文, 2001.

(2006年4月13日 受付)