

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1177 JUNE 2008

開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察

| | |
|----|----|
| 菊池 | 喜昭 |
| 佐藤 | 宇紘 |
| 森川 | 嘉之 |

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. はじめに | 4 |
| 2. 既往の研究 | 4 |
| 3. 先端閉塞現象の把握 | 4 |
| 3.1 地盤密度と閉塞現象の関係 | 4 |
| 3.2 杭下端以下の地盤の変形 | 7 |
| 4. 杭の閉塞現象と杭周辺地盤挙動関係 | 9 |
| 4.1 粒子の移動追跡による地盤変形挙動の解析 | 9 |
| 4.2 PIVを用いた地盤変形解析 | 16 |
| 5. 杭の閉塞メカニズムに関する考察 | 20 |
| 6. 結論 | 21 |
| 7. おわりに | 21 |
| 参考文献 | 21 |

Observation of the Plugging Phenomenon in a Vertically Loaded Open-ended pile

Yoshiaki KIKUCHI*

Takahiro SATO**

Yoshiyuki MORIKAWA***

Synopsis

The mechanism of the plugging phenomenon at the tip of vertically loaded open-ended piles was elucidated in this study by using a micro-focus X-ray CT scanner. A series of model tests were conducted on a static penetration test. The model piles used in this study were an open-ended pile and a close-ended pile. The behavior of the surrounding ground at the pile tip is discussed based on observation of the movement of iron particles extracted from visualized X-ray CT data. In addition, the movement of sand particles was extracted using PIV method. The CT images of the experimental results showed that the condition of wedge formation below the open-ended pile was clearly different from that below the close-ended pile. Although the penetration resistance of the open-ended pile and close-ended pile was similar, the movement of soil inside the open-ended pile was not stopped but restricted, as shown by intermittent increases and decreases in penetration resistance during pile penetrating. Finally, a plugging mechanism was discussed by analyzing the distribution of the alteration of soil volume and shear strain in X-ray CT images.

Key Words: open-ended pile, vertical loading test, plugging phenomenon, X-ray CT scanner, PIV

* Head, Foundations Division, Geotechnical & Structural Engineering Department

** Former trainee of Foundations Division, Geotechnical & Structural Engineering Department, TOA Corporation.

*** Senior Researcher, Geotechnical & Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察

菊池 喜昭*
佐藤 宇紘**
森川 嘉之***

要 旨

港湾施設の基礎工に用いられる杭は鋼杭が多数を占めており、港湾施設の大型化に伴って使用される杭の大径化、長尺化が顕著となっている。

鋼杭のような先端が開放型の杭形状であっても、杭径が小さい場合には杭の打設に伴い管内土の詰りが生じ、閉端杭と同様の先端支持力を発揮するとされている。しかし、大径化することによって、鋼杭の支持力は閉端杭の支持力よりも小さくなるといわれている。しかしこの点についての定量的評価は不十分である。

閉端杭の閉塞を議論するには、杭先端周辺の地盤の変形挙動の観察が必要である。そこで、この現象の観察を目的として、小型模型土槽内で模型杭の静的貫入実験を実施し、マイクロフォーカス型 X 線 CT スキャナ装置を用いて杭先端付近の地盤の挙動を観察した。具体的には、模型杭を貫入して、地盤内のターゲットの移動を連続的に計測して可視化し、地盤内挙動を観察した。

この結果をもとに、杭の閉塞現象発現のメカニズムについて考察した

キーワード：開端杭，鉛直載荷実験，先端閉塞現象，X 線 CT スキャナ，PIV

* 地盤・構造部基礎工研究室室長

** 地盤・構造部基礎工研究室研修生(東亜建設工業株式会社)

*** 地盤・構造部主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

1. はじめに

これまで、港湾施設の基礎工には鋼杭が多用されてきており、近年、用いられる杭の大径化、長尺化が顕著となっている。これは、施設の大径化、設計地震力の増大に伴い大支持力の杭が必要となったこととそれに呼応して杭の打設技術が向上したことが理由として挙げられる。

杭の大径化によって特に問題となるのは杭先端支持力の推定精度に大きな影響を与える閉塞杭の先端閉塞現象の評価である。一般的に杭の閉塞現象とは、鋼杭やH鋼杭などのように先端が開端形状の杭において、杭の打設に伴って杭内部に貫入した土が詰りを生じて、閉塞形状の杭と同様の先端抵抗力を發揮する現象をさしている。

従来、技術上の基準では、杭径が60 cm以下の場合には、杭の閉塞が完全に生じ、鋼管杭であっても閉塞杭と同じだけの杭先端抵抗力が期待できると考えられている。杭径が60 cmを超えるような大径杭については、杭内部の土が完全に閉塞するとは考えられないが、その定量的評価が難しいため、これまでのところ、不完全閉塞の程度や期待できる先端抵抗力の大きさについては明確な数値が示されていない。

定量的評価を促すためには、大径杭の軸方向抵抗力の実測データを集積して、統計的に閉塞時の閉塞杭の先端抵抗力の処理を行うことが必要であると考えられる。同時に、杭の閉塞メカニズムを明確にして、閉塞による杭の先端抵抗を算定する理論的根拠を示すことも必要であると考えられる。

そこで、ここでは、閉塞杭の閉塞に関する研究の手始めとして、杭貫入時の杭先端付近の地盤の動きを観察することにした。すなわち、非破壊で物質の密度構造を観察できる装置であるX線CTスキャナ装置内で杭の貫入試験を行うことによって、杭貫入過程における杭周辺の模型地盤の変形を観察した。

2. 既往の研究

閉塞杭の閉塞については従来より多くの研究がなされている。例えば、岸田ら(1973)は閉塞杭内に詰った乾燥砂の挙動について実験的に検討している。彼らは、分解可能な2つ割り鋼管内に乾燥砂を均質に詰めて鋼管下端部から剛な盤で押込んだ実験を行い、実験後に鋼管から内部の砂を取り出して砂の圧縮量を測定している。その結果、杭先端1Dの範囲において砂は圧壊しており杭先端からの距離が伸びるほど段階的に砂の圧縮量が減少していることを示した。また、別途計測した管内摩擦力分布形

と砂の圧縮量分布がほぼ一致することを報告している。

水谷ら(2003)は閉塞杭と開端杭を乾燥砂地盤に貫入させ、閉塞杭の先端閉塞状況を調査した。彼らは、閉塞杭と開端杭の2種類の模型杭の貫入抵抗を比較して閉塞杭の閉塞の程度を確認した。また、閉塞杭管内土の地表面沈下量と杭貫入抵抗との関係を示し、閉塞杭閉塞後の杭の挙動について報告した。さらに、閉塞杭の閉塞状況の確認手法としてコーン貫入試験を利用することの可能性について検討した。杭貫入前後の模型地盤のコーン貫入抵抗の変化を検討した結果、杭が閉塞した場合には、杭内部で実施するコーン試験の貫入抵抗が著しく上昇することから、コーン貫入試験を用いて、杭の閉塞の発達度を評価する方法を提案した。

これら通常の室内模型実験では基本的に貫入過程の地盤の変形挙動を計測することは非常に困難である。Otani et al.(2003)、Otani(2004)は模型杭先端部の地盤の変形挙動について工業用X線CTスキャナを用いて検討した。先端形状を変えた模型杭を砂地盤に鉛直貫入し、CT画像から得られる模型杭先端地盤の密度変化を観察した。その結果、閉塞杭先端部にはくさび状の高密度領域が存在することや周囲に低密度領域が存在することなどの知見を得た。さらに、密度変化の観察結果から破壊パターン等についての考察が行われている。ただし、連続的な地盤変形挙動についての観察や閉塞杭の問題に関する検討は十分とは言えない。

3. 先端閉塞現象の把握

3.1 地盤密度と閉塞現象の関係

まず、模型地盤の相対密度を変えて杭の静的貫入実験を行った。ここでは、地盤の相対密度が異なることによって、杭の貫入抵抗力と杭内部の土の閉塞の発現状況がどのように変わるかを観察した。

(1) 実験に用いた材料と実験方法

実験に用いた土槽はアクリル製の円筒で、内径 ϕ 85 mm、深さ160mmである。側面の肉厚は、15 mmである。実験に用いた模型杭はステンレス製管(外径 $D=16$ mm、板厚 $t=0.3$ mm、長さ80 mm、 $D/t=53$)である。模型地盤には豊浦砂($D_{50}=0.2$ mm、 $U_c=1.6$)を気乾状態で用いた。

この実験では、非常に高密度の地盤と低密度の地盤を作製することを目的としていたため、砂をスプーンで土槽に入れ、必要に応じて振動を加えることによって地盤の密度を調整した。この際の密度管理は、地盤高さと同量とによって行った。作製した地盤の厚さは150 mmである。

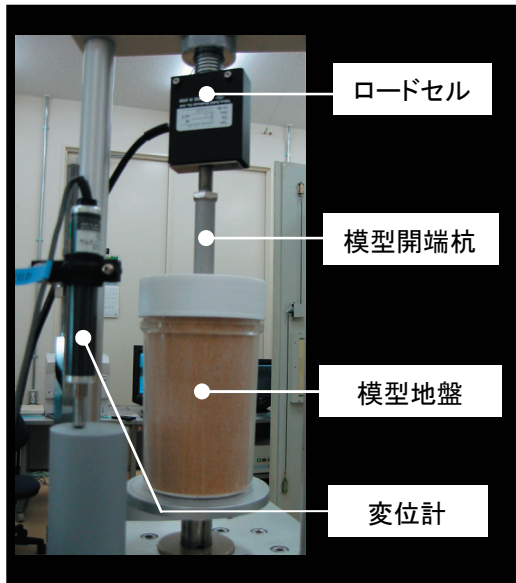


写真-1 実験状況 (簡易模型実験)

ここでは、3つの相対密度の地盤を作製して実験を行った。ここで、相対密度5%の地盤での実験をCase 1、相対密度70%の地盤での実験をCase 2、相対密度98%の地盤での実験をCase 3と呼ぶ。

作製した地盤に静的に模型杭を挿入した。模型杭の貫入速度は1 mm/minとした。模型杭の貫入には一軸圧縮試験装置を用い、杭頭荷重と杭頭変位量を計測した。杭の最大貫入量は60 mmとした。杭貫入実験時の状況を写真-1に示す。

初期地盤及び杭を地盤に30 mm、60 mm貫入させた時にX線CTスキャナによって模型地盤の撮影を行った。なお、CT撮影時は土槽を載荷装置からはずしてCTスキャナ装置内へ移動させるため、杭頭荷重を完全に除荷した。

(2)実験結果

図-1に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。いずれの実験結果においても貫入量20 mmまでは、貫入抵抗はほとんど発現していない。しかし、貫入量20 mmを超えると貫入抵抗が増大し始めた。貫入抵抗が増大し始めると相対密度の違いによって貫入抵抗の増加の仕方に違いが生じ、模型地盤の相対密度が高いほど貫入抵抗が大きくなった。

図-2に杭中心縦断面のCT画像を示す。画像中の白色の部分が杭体であり、灰色部が砂地盤、黒色部は空気である。いずれの画像においても、画像上端が模型地盤の表面となっている。相対密度が5%の地盤における実験(Case 1)では、杭貫入量30 mm時点で管内土表面が原地盤より沈下する現象が見られており、60 mm貫入した時点では、初期位置から大きく沈下する現象が見られた。相対密度が70%の地盤における実験(Case 2)では、杭貫入量30 mm時

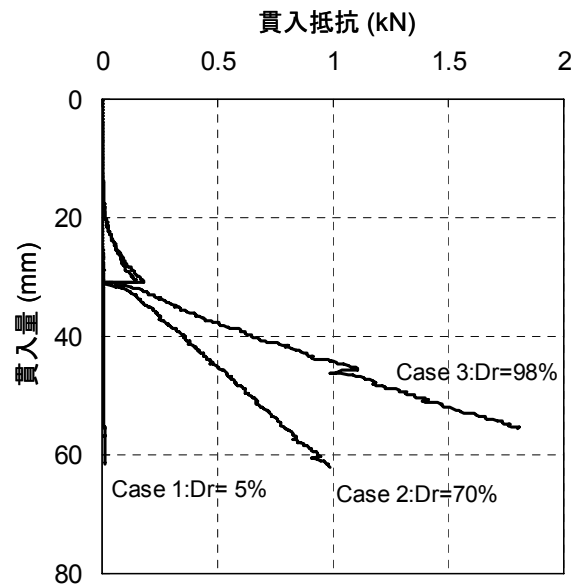


図-1 杭の貫入量と貫入抵抗の関係

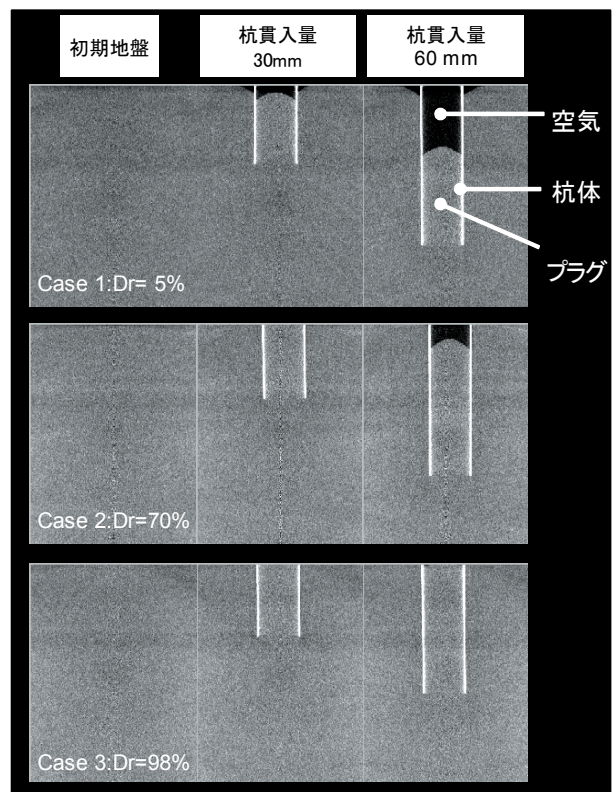


図-2 杭中心鉛直断面の CT 画像

点では管内土表面が沈下する現象は見られないが、60 mm貫入した時点では、わずかに沈下する現象が見られた。相対密度が98%の地盤における実験(Case 3)では、杭貫入

量が60 mmに達するまで杭内部の地盤面が沈下する現象は見られなかった。

(3)考察

はじめにでも述べたように、一般的に杭の閉塞現象とは、先端が開端形状の杭において、杭の打設に伴って杭内部に貫入した土が詰りを生じて、閉端形状の杭と同様に先端抵抗力を發揮する現象をさしている。しかし、この定義ではあまりにもあいまいである。つまり、「土が詰まりを生じること」が閉塞なのか、「閉端杭と同様の先端抵抗力を示すこと」が閉塞なのかかわからない。

建築基礎構造設計指針(日本建築学会, 2001)では、閉塞効率 η を式(1)で示している(図-3)。

$$\eta = \frac{R_p + R_{fl}}{R_{PC}} \quad (1)$$

ここで、 R_p ：開端杭の先端肉厚部の極限支持力、 R_{fl} ：開端杭の内部に詰まった土による最大周面摩擦力、 R_{PC} ：閉端杭の極限先端支持力である。

この式で考える閉塞効率は「閉端杭と同様の先端抵抗力を示すこと」の考えの上に立っており、十分に閉塞していれば、 $\eta=1$ となり、「閉端杭と等しい先端抵抗力」が發揮される。 $\eta<1$ のときは、十分には閉塞していないことになる。 $\eta>1$ は基本的に生じない。なぜなら、 R_{fl} は $R_{PC}-R_p$ の反力として生じるものであるからである。

なお、式(1)に関する記号の説明からすると、それぞれの杭の極限支持力の比較から閉塞効率が定義されている。この定義を今回の実験条件に合うように拡張すると、式(1)の記号の説明は次のようにすることができる。

R_p ：ある深度まで貫入させたときの開端杭の先端肉厚

部の軸方向抵抗力、 R_{fl} ：ある深度まで貫入させたときの開端杭の内部に詰まった土による周面摩擦力、 R_{PC} ：ある深度まで貫入させたときの閉端杭の軸方向抵抗力。

この定義によって η を求めるには、必ず閉端杭の先端抵抗力を知ることが必要となる。ところで、今回の実験のように、地表面から杭を貫入させた場合には、特に緩詰めや密詰めの場合、杭の貫入に伴って、地盤が圧縮したり、膨張したりする可能性がある。開端杭の場合には、杭の内部に土が入り込む余地があるが、閉端杭の場合には、杭の内部には土が入り込むことはなく、余分な土は杭の外側に逃げることも考えられるが、いずれにしても体積変化の状態が異なることが予想されるため、 R_{PC} を求めている地盤の条件と R_p+R_{fl} を求めている地盤の条件が異なっている可能性が高い。このような違いは、特に、ここで採用したCase 1のような非常にゆるい状態の地盤ではその差が顕著となる可能性が高い。このため、初期地盤を同じ条件にして閉端杭と開端杭の貫入抵抗を求めても、より適切な意味での閉塞効率は決められないと思われる。

このように、閉塞を抵抗力の観点から定義するのは難しい場合が多い。ところで、 $\eta>1$ は基本的に生じないと述べたが、仮に $\eta>1$ になりそうになったときには、実際には、杭内部に詰まった土が移動せず、杭の下の地盤が破壊されるようになることが考えられる。このように、杭内部の土の移動を考えることによって閉塞の程度を議論することができる。この場合には、杭内部の土が移動しないので、杭内部の土の表面が杭とともに下がることが観察される。この現象を観察するのは力を測定するのに比べて簡単である。

そこで、ここでは、杭の閉塞現象とは、杭内部に貫入した土が栓となって、さらに杭を貫入したときに杭内部に土が貫入しにくくなる現象のことをさすことにする。つまり、簡単に観察できる現象として、杭を地盤に貫入させるにつれて、杭内部の地盤面が低下していく現象を持って、杭の閉塞現象という。

たとえば、Case 1では、貫入量30 mmになる前に杭内部の地表面の低下が生じており、このことは、杭内部の土が杭の貫入とともに少しずつ下がったことを意味している。このことが杭の閉塞が生じている証拠であると考えている。このように考えると、Case 2では、貫入量が60 mmに達する前に閉塞が生じたものと考えられる。しかし、Case 3では、貫入量60 mmに至るまで杭の閉塞は生じなかったと考えられる。

一方、貫入抵抗についてみると、Case 1の貫入抵抗は最後まで極めて小さく、一方、Case 3では貫入量20 mmを超

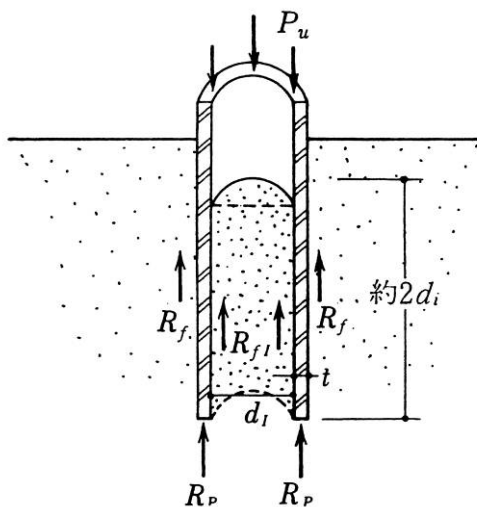


図-3 閉塞効率の概念(日本建築学会, 2001)

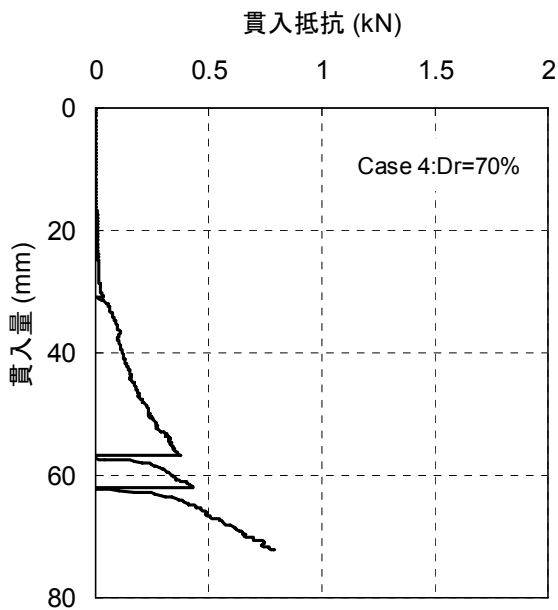


図-4 貫入抵抗-貫入量関係

えたところから、貫入抵抗が増加し始め、貫入量が30 mmを超えてからは、貫入量に対してほぼ直線的に貫入抵抗が増加している。このような貫入抵抗の変化だけを見ると、Case 1では閉塞が生じないために貫入抵抗が増大せず、Case 3では貫入量20~30 mmあたりで閉塞が起り始め貫入量30 mm以上では完全な閉塞が生じて大きな抵抗が生じたものと思いがちである。しかし、そのように考えることは間違っている。つまり、Case 1の貫入抵抗が小さいのは杭下端以下の地盤の抵抗が小さいことによるものであって、杭内部に貫入した土が栓を作らなかったために抵抗が小さかったとするものではない。一方、Case 3では、杭下端以下の地盤の抵抗が大きいため、杭内部に貫入した土が栓とならない状態で大きな貫入抵抗を示したものであると考えられる。

以上のように、杭内へ地盤が侵入するか、杭に閉塞が生じるかは杭下端面の地盤反力と杭内部の土の周面摩擦力及び自重との釣合いによって相対的に決まるものである。

3.2 杭下端以下の地盤の変形

Case 1から3の実験結果をもとに、簡便な実験を行って杭内部の地盤面が下がる現象を観察することによって杭の閉塞現象を紹介した。この結果では、密な地盤では閉塞が起りにくく、地盤がゆるく堆積しているほうが閉塞が起りやすいことが示された。ただし、あまりゆるい地盤で閉塞の実験を行うと、杭の貫入抵抗の計測が困難になる。このように、杭の貫入抵抗と杭内部の地盤の

閉塞を同時に観察するためには、地盤密度を適切に選択することが必要である。そこで、ここではやや密な地盤で杭の貫入試験を行い、杭の閉塞が生じる条件で杭周辺の地盤にどのような変形が生じるかについて把握することにした。ここでは、地盤材料とは密度の異なる材料をターゲットとして模型地盤内に層状に配置し、ターゲットの移動を計測することにより地盤の変形挙動を観察した。

(1) 実験に用いた材料と実験方法

土槽、模型杭、砂は、Case 1~3と同じものを用いた。地盤作製方法もCase 1~3と同じである。ただし、地盤密度は $Dr=70\%$ とした。杭の貫入装置、杭の貫入方法についてもCase 1~3と同じである。ただし、杭の最大貫入量は70 mmとした。CT撮影は初期地盤及び貫入量30 mm, 55 mm, 60 mm, 70 mmで実施した。この実験をここではCase 4と呼ぶ。

ターゲットには砂よりも材料密度の高い砂鉄を用いた。この砂鉄はもともと豊浦砂に含まれているものである。ここでは、磁石によって豊浦砂から集めた。このため、用いた砂鉄の粒径は豊浦砂とほぼ同じ粒径のものである。この実験では、初期地盤作製時に地表面から30 mm, 60 mmの位置に層状配置した。

(2) 実験結果と考察

図-4に杭の貫入抵抗と貫入量の関係を示す。

図-5に杭中心縦断面のCT画像を示す。各CT画像の上端は地表面である。各CT画像の地盤中に見える水平な2本の白線が砂鉄によるターゲットである。ここでは、このターゲットで分割された地表面から深さ30 mmまでを上層地盤、深さ30 mmから60 mmを下層地盤と称する。なお、図-5には、上下2段にCT画像を示しているが、上段と下段は画像としては同じものである。下段の画像については、層厚の変化がわかるように矢印を入れているところが違いである。図-5を見ると、杭の貫入量30 mmまでは、杭内部の地盤面が下がる様子は観察されず、また、上層地盤も下層地盤も目立った変化が見られない。しかし、杭を55 mmまで貫入させると杭内部の地盤面が下がり、杭内部の下層地盤の層厚が小さくなっていること、60 mmの深さに設置したターゲットの砂鉄が下向きにわずかにたわんでいることが観察される。ただし、杭を60 mmまで貫入させたときに、杭先端は60 mmのところに設置した砂鉄に当たっていることから、60 mmの砂鉄のターゲットは全体としては、沈下していなかった。さらに70 mmまで杭を貫入させると、杭内部には60 mmより下の地盤が侵入した。このとき、杭内部に侵入した60 mmの砂鉄は杭外部に比べて深い位置に変位しており、杭とともにある程度の沈下を

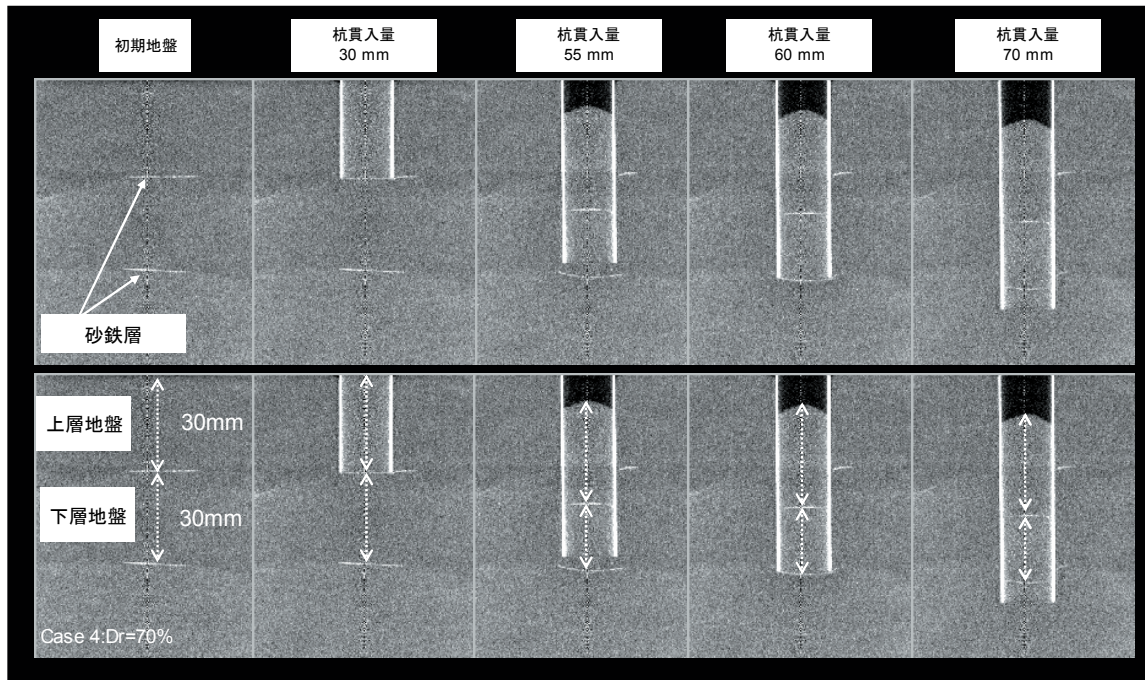


図-5 杭中心部分の鉛直断面 CT 画像(Case 4)

生じていた。

この実験では、いつ閉塞が生じたかは定かではない。しかし、貫入量が55 mmに至るまでに閉塞が生じている。杭の閉塞が生じていない、貫入量30 mmまでの間に貫入した上層地盤では杭内部でほとんど圧縮が生じていないのに対し、その後に杭内部に侵入した下層地盤では貫入量60 mmまでの間に大きな圧縮(層厚の低下)が見られた。

そこで、上層地盤と下層地盤の層厚の変化と貫入量の関係に着目して実験データを整理した。図-6にその結果を示す。ここでは、軸ひずみは、杭の各貫入深さにおける杭中心での層厚の初期層厚からの変化量を初期層厚で除して求めたものである。図-6によると、貫入量30mmまでは上下層地盤とも鉛直方向の圧縮は微小である。貫入量55mmまでに上層地盤は多少膨張傾向にあるものの、下層地盤は大きく圧縮されている。その後70mmまで貫入しても、杭内に侵入した後の砂地盤の層厚はほとんど変化していない。

以上の結果によると、杭の閉塞が生じなければ、杭内部に侵入する土の層厚は侵入前後で変化がないが、杭の閉塞が生じる場合には杭内部に侵入する土の層厚が侵入前に比べて薄くなるのが観察された。この層厚の変化は、土が杭に侵入する前か、杭に侵入した直後に生じ、その地盤が杭の内部の上方に移動してからはもはや層厚の変化を生じないことがわかる。なお、ターゲットは層状に配置されているため、この実験では、地盤の側方変位量を計測することができない。このため、図-6に示す軸

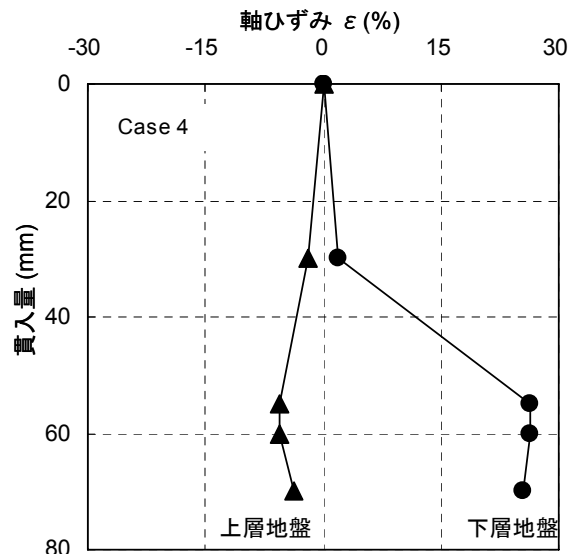


図-6 貫入量-地盤鉛直方向ひずみ

方向圧縮量がそのまま体積の変化を示すものであるかどうかは定かではない。

以上、ここでは、地盤材料と密度の異なるターゲットを地盤中に予め配置することで地盤の変形や移動を観察した。地盤内ターゲットの移動観察の結果から、杭が閉塞すると、杭先端付近の地盤の層厚が薄くなって杭内に侵入することがわかった。このようにして侵入した地盤が杭の上部に移動してもその層厚はもはや変化しないこともわかった。

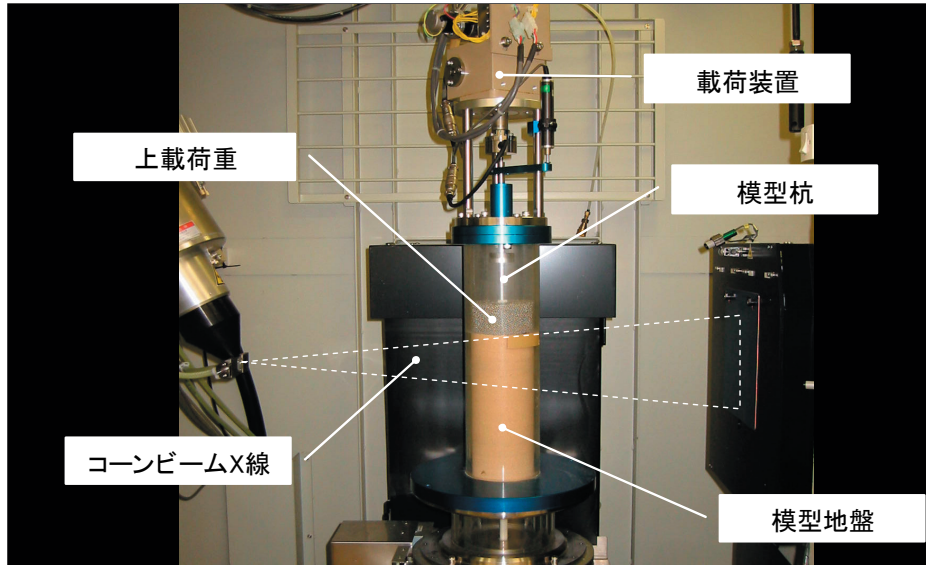


写真-2 実験状況

4. 杭の閉塞現象と杭周辺地盤挙動関係

ここではこれまでの検討結果を参考に、より詳細な地盤内挙動の可視化実験を行った。この実験では、より細かいピッチで杭の貫入に伴う周辺地盤の変形を観察できるようにX線CTスキャナ装置内で模型杭の鉛直貫入実験が可能な専用装置を作製した。また、地盤内に配置するターゲットについても工夫を凝らした。さらには、解析手法を検討し、より詳細な地盤の変形が把握できるようにした。

4.1 粒子の移動追跡による地盤変形挙動の解析

(1) 実験に用いた材料と実験方法

実験に用いた土槽はアクリル製の円筒形で、内径φ100 mm、高さ440 mmである。土槽の材質、内径はCTスキャナ装置のX線照射能力と土槽サイズによる地盤の拘束が実験結果に及ぼす影響を考慮して決定したものである。また、土槽を移動させないでCT撮影ができるように、CT装置内で载荷をしながらCT撮影できるような土槽とした。つまり、土槽に上蓋を設置し、その上にジャッキ、ロードセル、変位計を配置した(写真-2)。

模型杭は直径D=15 mmのアルミニウム製とし、開端杭(肉厚t=1 mm、D/t=15)と閉端杭(中実)の2種類を用いた。この実験では、3.1で用いた杭よりも杭の肉厚を大きくとっている。これは、より杭の閉塞が生じやすくなる条件で実験を行うためである。杭の長さは140 mmであり、载荷の途中で30 mmの長さのロッドを繰返し継ぎ足すことによって、杭を地盤に深く貫入できるようになっている。

模型地盤には豊浦砂を気乾状態で用いた。杭貫入によ

る周辺地盤の挙動を可視化するため、鉄粒ターゲット(φ0.3 mm)を用いた。

なお、杭径に対する土槽内径比(ここでは、容器の内径B/杭の外形D=6.7)や砂の粒子径と杭径の比(ここでは、 $D/D_{50}=75$)は実験結果に影響を及ぼすことが考えられる。ここでは、X線CTスキャナ装置の能力(これは土槽の最大径を決める要因となる)と実験に使いやすい砂の粒径(気乾状態であまりに細かい砂を用いると粘着力の影響が出るおそれがあり、模型の最小断面を決める要因となる)の関係から、実験結果になるべく土槽側面の影響が出ないように決定したものである。

地盤は乾燥した豊浦砂を空中落下法にて目標相対密度Drを65%として、層厚H=270 mmとなるように作製した。この際、ターゲットとする鉄粒を5%混ぜた豊浦砂を地盤作製完了時に表面から75 mmから48 mmの範囲で、約6 mm間隔で、一層あたり概ね3 mmの厚さとなるように5層作製した。また、杭貫入に伴う周辺地盤の変形挙動は上载荷重の影響を受けるため、特に、周辺地盤が地表面方向へ移動するのを抑える目的でステンレス球(φ2 mm)を模型地盤表面に設置した。これによる上載圧は2.5kPaとなるようにした。なお、杭体側面にはステンレス球が触れないように治具を設置した。

杭は地表面より一定速度(1 mm/min)の変位制御で貫入させ、最大貫入量は81 mmとした。その間、杭の貫入量と貫入抵抗は連続的に測定した。また、貫入量42 mmから貫入量3 mmごとに一時的に貫入を停止して、杭頭荷重が安定してからCT撮影を行った。なお、貫入量約30 mmごとに载荷ピストンの継ぎ足しを行っており、そのたびに杭頭荷重を一旦除荷している。

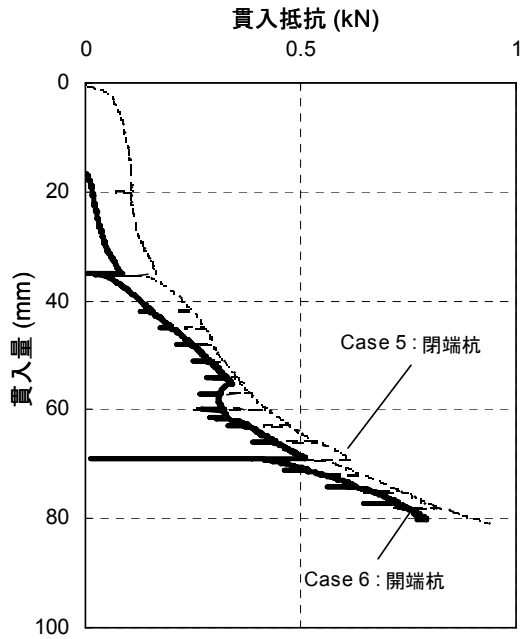


図-7 杭の貫入量と貫入抵抗の関係

なお、ここでは、閉端(中実)杭の実験結果をCase 5、開端杭の実験結果をCase 6と称する。

(2)実験結果

図-7に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。図-7を見ると開端杭の場合、貫入の初期から貫入抵抗を發揮し始め、

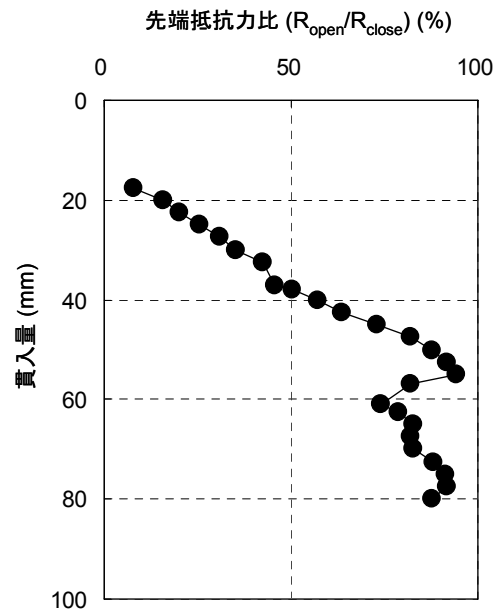


図-8 杭の貫入量と貫入抵抗比の関係

貫入量が40 mm程度を過ぎると貫入抵抗が著しく大きくなる傾向にあることがわかる。

開端杭の場合には、貫入量18 mmまではほとんど貫入抵抗がなく、その後貫入抵抗が増大する。貫入量40 mmを超えてからは貫入抵抗の増大傾向が顕著で、貫入量55 mm程

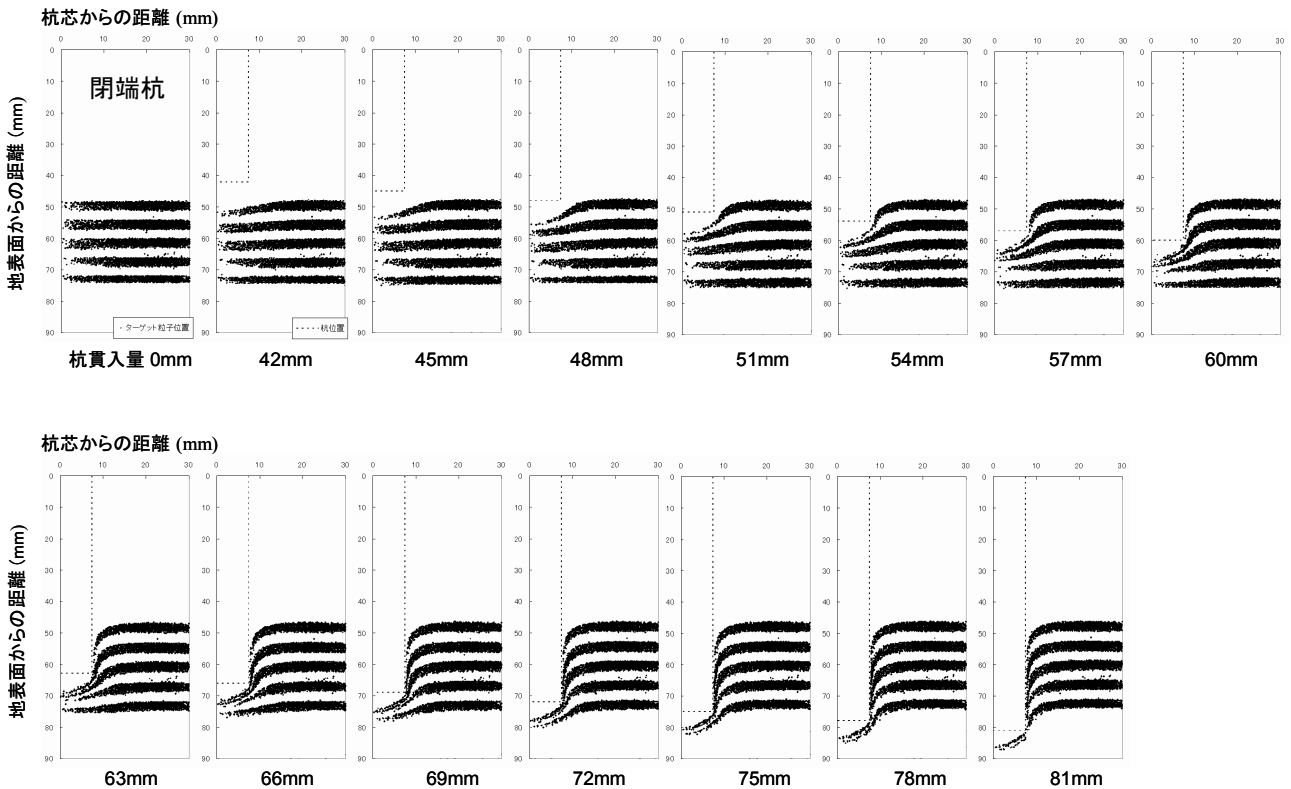


図-9 杭の貫入に伴うターゲットの移動(閉端杭)

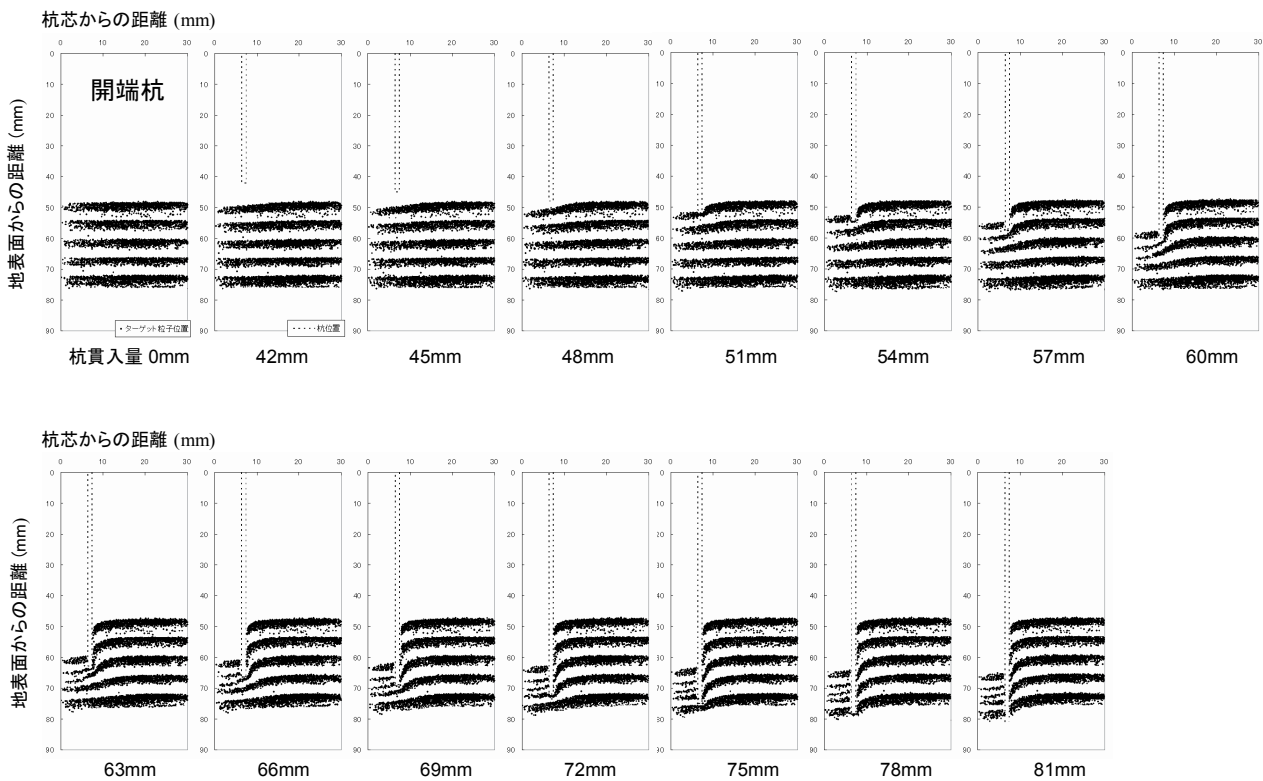


図-10 杭の貫入に伴うターゲットの移動(開端杭)

度では、貫入抵抗が開端杭とほぼ一致する状況となった。その後、貫入量62mm程度まで貫入抵抗が一時低下し、貫入量75mm付近で再び開端杭と貫入抵抗がほぼ一致した。

開端杭の場合に図-7の開端杭の貫入抵抗力は、貫入量が57mmを超えると抵抗が急増する傾向にある。これには容器径が小さいことが原因である可能性がある。実際、本実験を実施する前に予備実験を実施し、杭の貫入量と土中に発生するすべり線の関係を調べた。開端杭で杭径15mmの場合、杭の貫入量が60mmを超えるとすべり線が土槽の縁に達するようすが観察されている。一方で、多少のばらつきは見られたものの、杭径を5mm、10mm、15mm、20mmと変えて貫入実験をした場合の単位面積当たりの貫入抵抗は、貫入量が60mmを超えても杭径の影響を示さなかった。さらに開端杭を80mmまで貫入させた場合の排土量が14.1cm³であるのに対して、開端杭では管内土の表面の沈下が25mm程度沈下していたことを考慮すると、排土量は5.7cm³であったことになる。このような特性の違いは、すべり線の発達にも影響を持っていると思われるが、開端杭と閉端杭とで80mm貫入時の抵抗と貫入抵抗増加率に大きく隔たりがないなど、すべり線の発達が杭の貫入抵抗に影響を及ぼしていない結果となっている。このように、今回の結果は容器の大きさが小さいことによって貫入抵抗が増大したとは考えられない結果と

なっている。以上のことから、今回の実験結果には土槽の内径が小さいことによる影響はあまりなかったものと考えられる。

この実験条件において、土圧係数が0.5程度であるとすると閉端杭の杭軸の周面抵抗が全抵抗に及ぼす影響はきわめて小さく、貫入量20mmで、0.001kN程度、貫入量80mmで0.007kN程度である。このようなことから、測定された貫入抵抗がすべて先端抵抗によるものであるとしても誤差はほとんどない。そこで、同じ深度での開端杭と閉端杭の貫入抵抗の比(R_{open}/R_{close})を求めた。その結果を図-8に示す。

図-8の横軸(R_{open}/R_{close})は先端閉塞効率を表すものと見てよい。貫入抵抗の比は貫入量40mm程度で50%に達し、その後も徐々に増えて貫入量50mm程度で90%を超える。その後貫入抵抗比は一度下がるが、再び90%を超える抵抗比となることがわかる。なお、貫入量55~70mmにかけて生じた開端杭の顕著な貫入抵抗力の減少と再増加は、すでに水谷ら(2003)の実験でも観察されており、開端杭が完全閉塞に近い状態に達したときに現れる特徴的な現象である。これは、開端杭では、閉塞は一度生じたらそのまま続くのではなく、閉塞の発現と減退が繰返し発生することを物語っている。

図-9と図-10に杭を貫入させた時のターゲットの移動状

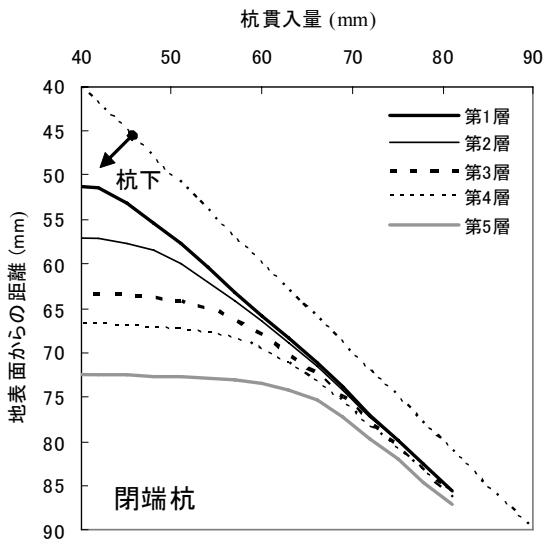


図-11 杭芯中心部分のターゲットの杭貫入に伴う移動(閉端杭)

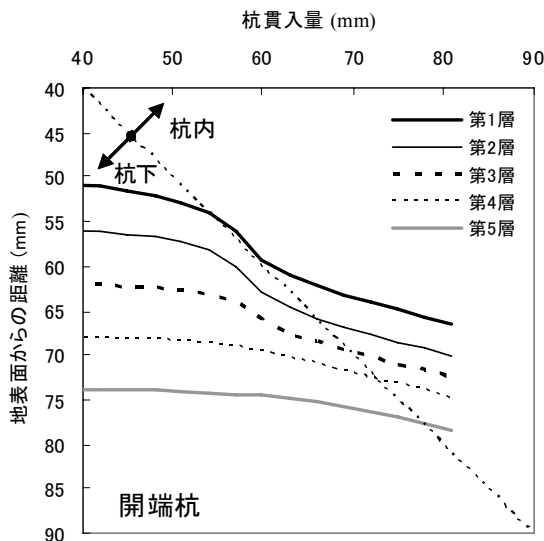


図-12 杭芯中心部分のターゲットの杭貫入に伴う移動(開端杭)

況を示す。これらの図は、CTイメージを2値化したものを、杭芯を軸にして360度重ね合わせたものである。それぞれの図において、貫入量0 mm(初期)と42から81 mmまで、貫入量3 mmごとのターゲットの状態を示している。

図-9は閉端杭のケースの結果である。この図からわかるターゲットの移動の特徴は次のとおりである。①杭芯下端部には、最上層のターゲットよりも上にあった土が残っており、ターゲットの位置の土は、杭下端には到達しない。②杭の下に残るターゲットは下向きに湾曲する。③杭下端が

ターゲット位置に到達した時に、杭の端部において強くせん断を受ける。④杭の外側3mm程度の範囲では、杭の貫入によって下方に引き込まれる。⑤杭の外側では、わずかであるがターゲットが上方方向に移動する。

図-10は開端杭のケースの結果である。この場合には次のような特徴がある。①ターゲットは杭の中にほぼ水平を保った状態で侵入する。②ターゲットの上下方向の間隔は、杭の内部に侵入するまでに短くなり、侵入後はほぼ一定である。③杭の外側のターゲットの連れ込み沈下量は閉端杭の場合よりも小さい。

(3) 考察

図-11に、閉端杭のケースについて杭芯部の下方中心部に位置するターゲットの沈下量と杭貫入量の関係について示す。ここでは、ターゲット層を上から下に第1層から第5層と名づけて示してある。図中には、5本の線が引かれており、それぞれ第1層から第5層のターゲットの移動状態を表している。この図には、杭先端の移動状態を点線で引いている。ここで、点線を境に、下側は、杭先端より下側にあることを意味しており、上側は杭先端より上側にあることを意味している。ここでは、杭より下を、杭下として示している。また、点線と各点の鉛直距離が杭先端との鉛直距離となっている。したがって、各層の測定線と点線の鉛直距離が、各層と杭との距離となっている。この結果によるいずれの層も杭先端との距離が5mmとなる線に漸近していることが分かる。

図-12は開端杭について杭芯部の下方中心部に位置するターゲットの杭貫入に伴う鉛直変位挙動を整理したものである。開端杭では、杭下端部に位置するターゲット層の湾曲はほとんど見られなかったため、杭芯部も杭内周辺部もほぼ同じ鉛直変位状態にあった。ターゲット層5層の意味は図-11と同じである。第1層の沈下量についてみると、地表面から54mmのところ、杭先端の高さと一致しており、その後しばらく、杭先端部付近にとどまり、地表面から60mmにいたるところで、杭の内部に移動していったことを示している。同様に、第2層では66mm、第3層では68mm、第4層では71mm、第5層では77mmで杭先端と同じ高さに達している。またすべての線の傾向を眺めると、第1層から第3層までは、第1層が杭の先端部の高さと同じところから6mmくらいの杭貫入の間、曲線の傾きが大きくなっていることが分かる。しかしこの区間の各層の沈下量は深くなるほど小さくなっていることが分かる。その後、杭の貫入が続いても各層間の距離にはあまり差が出ずに沈下が続いている。ただし、杭貫入量54mm～60mmのところを境に、杭先端がそれより浅い時よりも深い時のほうが、各層の下がる速度は大きくなっている。以上のことから、杭貫

入量54mm~60mmの区間で杭の閉塞が生じたと思われる。また、一度閉塞が生じた後で、閉塞は消滅しているようであることも分かる。ただし、一度杭の閉塞が生じてからは、全体として、地盤が杭内に侵入しにくくなる傾向にあることがわかる。なお、杭の閉塞が生じている間の杭下端以下の地盤の挙動を見ると、杭下12mm位までは杭とほぼ一体となって沈下しているがそれよりさらに下の部分では、閉塞の影響を受けにくい状態となっていたようである。

ところで、第1層が杭に伴って沈下した区間の始まりは、**図-7**や**図-8**において示されているように、開端杭の抵抗が開端杭の抵抗に最も近づいた点であり、第1層が杭に伴って沈下している部分は一度貫入抵抗が小さくなった部分である。貫入抵抗と地盤の変形挙動の関係についてはさらに検討を要する点があると考えられるものの、地盤の変形と貫入抵抗の両面から杭の閉塞現象が確認できた。

以上は、ターゲットを層としてみた場合の鉛直変位に関する検討であるが、仔細に個々のターゲットの移動を見るとターゲット自身の移動の様子が観察できる。

図-13に杭を81 mm貫入した後に撮影したCT画像を示す。画像は杭中心を通る鉛直断面画像である。この図では、図の左側に閉端杭の左側の断面を示し、図の右側に開端杭の右側の断面を示した。図中の縦方向に延びる灰色の領域が杭体である。画像中の白色の点は地盤に混合した鉄粒ターゲットである。この図には、杭が42 mmから81 mmまで貫入する間のいくつかのターゲットについて杭に対する相対的位置の変化を追跡した軌跡を線分で示している。

ターゲットの軌跡を元に地盤挙動を模式化したものを**図-14**に示す。横軸は、ターゲットの杭中心からの水平距離を杭径で除して正規化したものであり、縦軸は、ターゲットの杭先端との深度の差を杭径で正規化して示したものである。この図は、杭の位置を固定して、杭とターゲットの相対距離の変化を軌跡として描いたものである。そのため、すべてのターゲットは、下方から上方に向けて移動したものと描かれている。なお、ターゲットの初期位置は杭が42 mm貫入したときを基本としており、杭が3 mm貫入するごとのそれぞれのターゲット位置をプロットしてその間を線分でつないでいる。つまり、プロット間の距離が短い時は、杭の移動に対するターゲットの移動が相対的に少なかったことを示している。

ターゲットが杭の外側に移動したと判断できるものについては、黒い点と線で示しており、杭の直径の内側にあるものを灰色で示している。途中のプロットがなく、線分のみで示されている閉端杭、開端杭それぞれ1本の線は杭が42 mm貫入した際に杭の下端より1.25D(杭下端よ

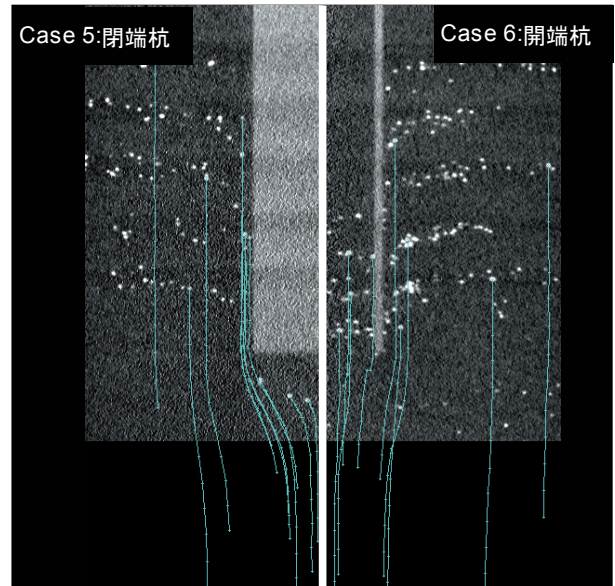


図-13 杭周辺の鉄粒の移動状況のCT画像

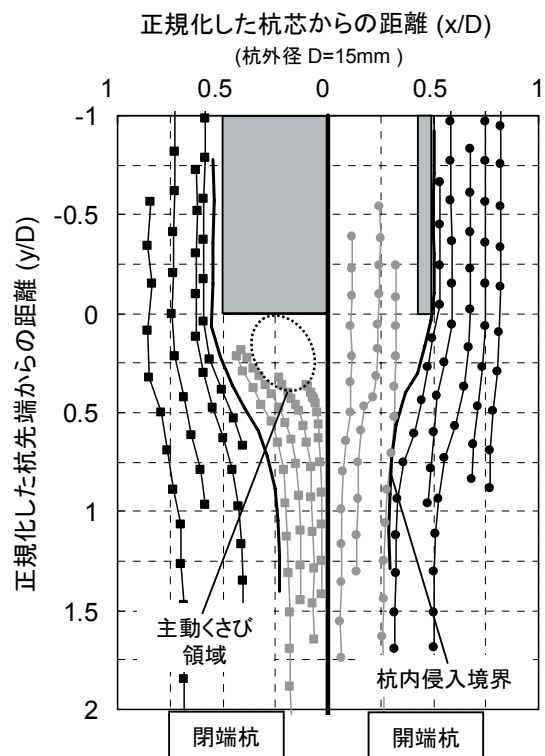


図-14 杭先端での地盤挙動模式図

り19 mm下方)に位置したターゲットのうち、杭先端部外端にぎりぎり移動した軌跡を示している。これらの線は、周辺地盤の杭内部(閉端杭の場合は杭下部)への侵入境界の一例となっている。これは、開端杭であっても杭中心線からの離れが杭の半径より小さい領域(杭の下方で杭の外径より内側の領域)にある土が杭が貫入することによっ

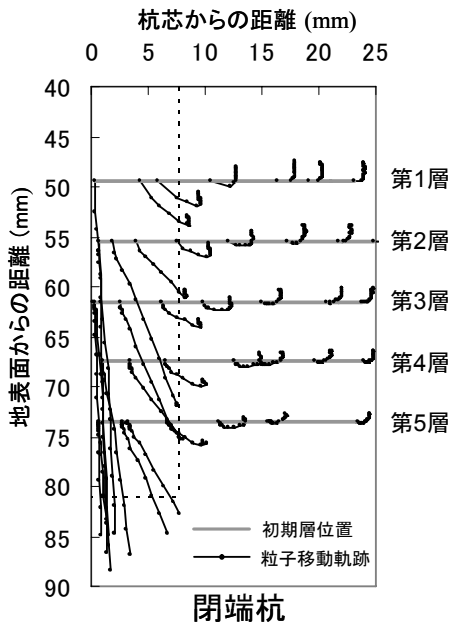


図-15 ターゲットの代表的な移動(閉端杭)

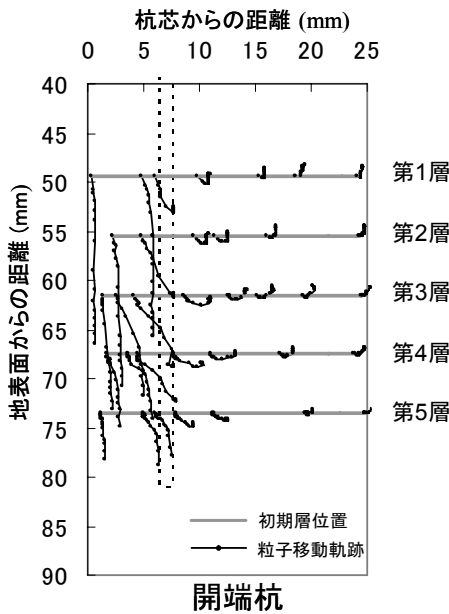


図-16 ターゲットの代表的な移動(開端杭)

て杭の外側に移動することを意味している。

この例にとどまらず、いずれのターゲットも、単純に鉛直方向に移動しているわけではなく、ほとんどのターゲットが水平方向にも移動していることがわかる。

また、閉端杭直下にはターゲットの侵入がない領域が存在し、その領域の周囲でターゲットの杭に対する相対移動量が著しく低下する現象が観察された。この領域は

閉端杭の貫入過程で発達した主働くさび領域であると考えられる。

開端杭でも杭下および杭内でターゲット移動量が低下する領域が存在するが、閉端杭のように完全な主働くさび領域は維持されない。これらの領域にある地盤は杭径の外にある地盤に比べて相対的にゆっくりと移動し、杭内に侵入した。これらの観察結果から、開端杭は完全な閉塞をしていないと考えられる。にもかかわらず、閉端杭と同等の軸方向抵抗力を発揮した。

図-15と図-16に各層の代表的なターゲットの軌跡を示した。図-15は閉端杭の結果であり、図-16は開端杭の結果である。それぞれの軌跡は、杭貫入量0mmから81mmまでの間のものである。

図-15を見ると、杭中心に近いところにあるターゲットはほとんど鉛直方向に変位し、水平方向には変位していない。一方、杭の半径より内側にあるターゲットでも杭の端に近いところにあるターゲットの場合には、鉛直方向の変位とともに水平方向にも変位し、杭中心に比較的近いところにあるターゲットでも杭の外側に出て行く傾向にあることがわかる。また、杭の貫入する領域より外側にあったターゲットは、杭の貫入とともに外側に移動する傾向にあり、最終的には、上方向に移動する傾向にあった。

なお、図-9において杭近傍の連れ込み沈下のように見えたターゲットは、実際には杭の貫入領域にあったターゲットが杭の貫入とともに下方に移動させられた後で杭の外側に出たものであることが分かる。

図-16の開端杭の結果では挙動が多少複雑である。杭が貫入する領域内の土の多くは、鉛直方向の変位が卓越しており、最終的には杭の内部に侵入することになることが示されている。しかし、第2層と第3層では杭の中心軸にかなり近いところにあったターゲットでも杭の外側に移動する挙動を示したものがあつた。図-12の結果からは、第2層、3層付近を中心に、層厚が著しく小さくなる結果が得られていたが、この理由は、土が杭外に移動したことによるものであつたようである。杭の外側にあつたターゲットについては、閉端杭の場合と同様に、杭から離れていく挙動を示したり、上方向へ移動する傾向にあつたりする。これらのターゲットは閉端杭の場合と比べるとそもそも移動量が少ない傾向にある。これは、開端杭の場合には閉端杭の場合に比べて排土量が少なくなることと関係しているものと思われる。

図-17と図-18に杭の内側にあたるターゲットの移動の様子を示した。これらの図では、第1層、第3層、第5層の杭中心下のターゲットと杭外縁部のターゲットの移動を図化している。

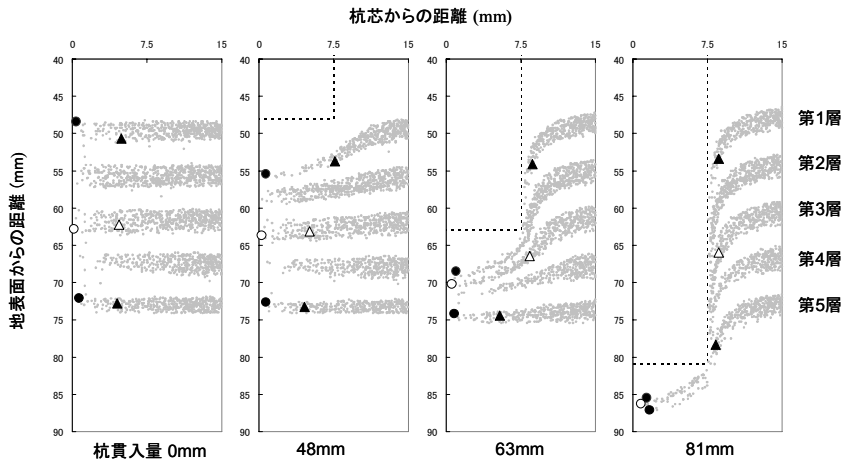


図-17 杭の内側に位置するターゲットの代表的な点の移動の様子(閉端杭)

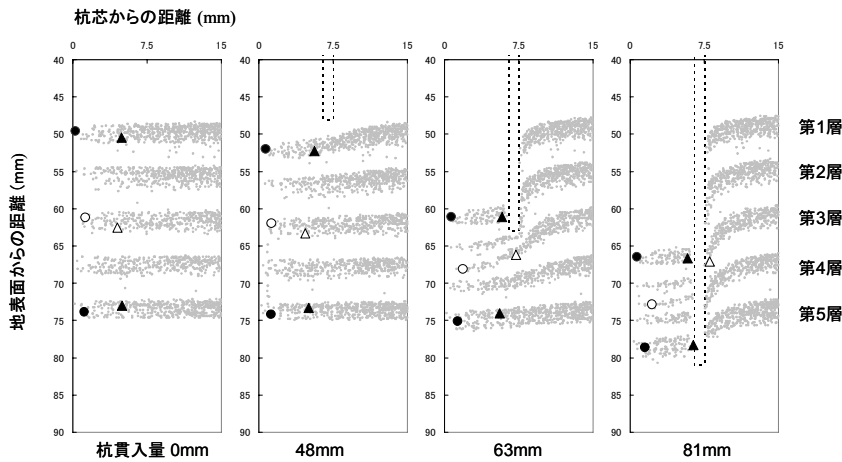


図-18 杭の内側に位置するターゲットの代表的な点の移動の様子(開端杭)

図-17は閉端杭の結果である。杭中心下のターゲットは、杭軸から側方への移動はほとんど示さず、ターゲットの間隔が狭められ、最後にはいずれのターゲットもほぼ同じ位置に集まっている。外縁部のターゲットは、杭先端が到達する前に側方外側に移動する。その後、杭の側面に沿った位置にとどまる。ターゲットの間隔は多少開く傾向にある。

図-18は開端杭の結果である。開端杭では、杭の貫入量48mmまでは目立った変化はない。その後、貫入量63mmまでの間で、各層のターゲットの間隔が狭まるとともに、第3層の杭外縁部のターゲットだけが外側に大きく移動しているのが観察される。ここでは示したターゲットの数が少ないので、第3層の外縁部のターゲットだけが動いているのが観察されているが、実際には、このターゲットの周

辺のターゲットがすべて外側に移動したものと考えられる。杭の貫入量81mmに達しても杭外縁部のターゲットで杭外側に移動したのは第3層のターゲットだけであり、その他のターゲットは側方への移動はわずかであったことが分かる。

図-19ではより多くのターゲットについて、杭が81mm貫入するまでにそれぞれのターゲットが杭の外側に移動するか、杭の内側もしくは杭断面下にとどまるかを調べた結果を示した。なお、ここでは、ターゲットのプロット位置は初期位置であり、外側に移動したかどうかはプロットの記号を変えることで表している。閉端杭では、どの層においても、杭中心軸直下のターゲットだけが杭の下にとどまっており、その部分の体積を計算すると元の体積の2%程度である。一方、開端杭については、層ごとに様子が異

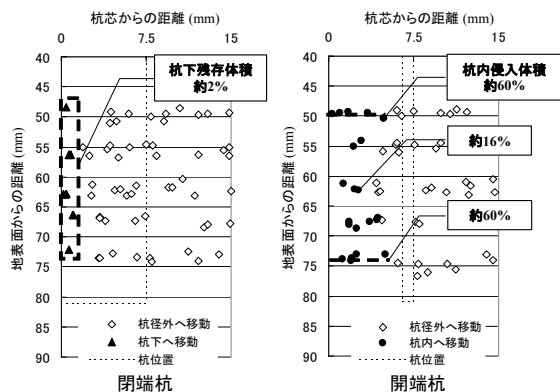


図-19 杭下,もしくは杭内側に残ったターゲットの初期位置

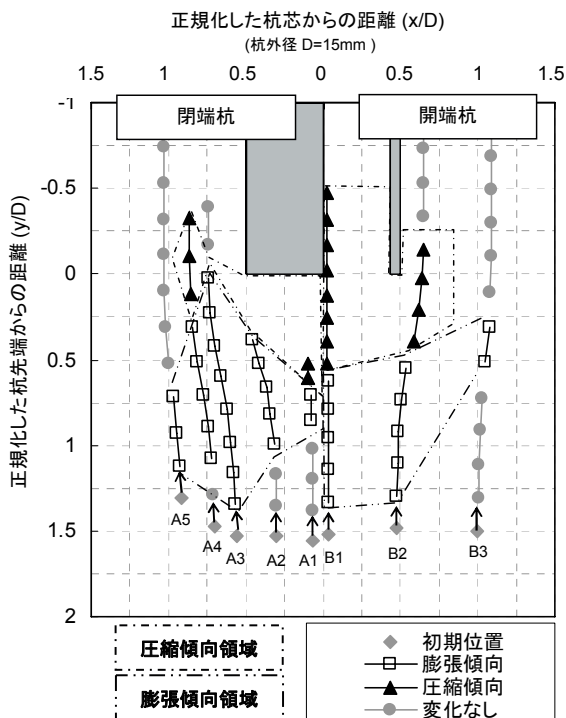


図-20 第5層付近の層の杭貫入に伴う体積変化傾向

なり,第2層と第3層では,杭の外側に移動するターゲットが多く,その他の層では,杭中心から5mm離れたあたり付近を境界として,その外側に位置するターゲットが杭の外側に移動した.全体として,各層の約60%から16%が杭の内側に移動していたことになる.

次に,杭周辺地盤の体積変化傾向について検討した.杭貫入量が42mm地点での任意の粒子ターゲット4点を格子点に選択し,杭貫入量3mmごとの各格子点変位量から格子内地盤の体積圧縮(膨張)量と格子の重心座標について調べた.なお,体積量は粒子ターゲット4点で囲まれる格子平面が杭中心軸に対して軸対称3次元的に存在する

と仮定し,2次元の面積を3次元の体積に拡張して概算した.

この検討では杭貫入量が42mmのときを調査の始点とした.この時,杭下端から約1.5D下にある各格子の体積変化傾向について検討した.検討の対象とした格子重心の始点を図-20中にA1~A5,B1~B3として示す.閉端杭はA1~A5の5格子,開端杭はB1~B3の3格子について貫入過程における体積を算出し,格子重心座標と格子の体積圧縮(膨張)傾向の分布を図-20に模式的に表した.つまり,地表面から65mm程度のところにあった地盤は,杭の貫入につれて,杭下端から1.5Dから0.5Dに達するまでは,杭下端の下方に位置する地盤は膨張傾向にあるものの,杭下端からの距離が0.5D以下に近づくと同様に圧縮傾向になることが分かった.以上の傾向は開端杭と閉端杭で類似であるが,仔細に見ると,開端杭と閉端杭で圧縮傾向となる領域,膨張傾向となる領域の広がり程度は異なっている.すなわち,杭中心直下(A1とB1付近)の膨張傾向領域の分布が異なり,開端杭が広い領域を持つ結果となった.

以上の観察結果から次のことが分かった.1)開端杭であっても,杭下方の土が杭の外側に移動することがある.2)杭の外側に移動するかどうかと杭の閉塞状況とは関連性がある.3)第5層のターゲットの移動状況から,十分に杭先端から離れている部分の土の体積変化傾向を把握できた.

この実験では,開端杭の支持力は貫入量54mm付近で閉端杭の貫入抵抗にほぼ一致したが,これらの観察結果によると開端杭と閉端杭では周辺地盤の変形挙動には大きく差があることがわかる.

4.2 PIV を用いた地盤変形解析

4.1では,鉄粒を地盤内に分散して配置することにより,地盤の変形を観察することを試みたが,いくつかの点で問題があった.ひとつは,粒子の追跡が比較的困難であったことである.また,粒子の配置できる範囲にも限界があるため,やむを得ず十分な観察ができない範囲が生じた.そこで,杭先端付近の地盤挙動をより詳細に検討するために粒子画像流速計測法(PIV)にて計測し,地盤の変形を検討した.

なお,前節では閉塞効果が発揮された後の杭先端地盤での地盤挙動に着目したが,この実験では閉塞効果が発揮されるまでの地盤挙動に着目した.すなわち,杭をあらかじめ地盤中に貫入しておき,杭内部に土をつめ,これを初期状態として,その後杭の貫入につれて均質な初期地盤がどのように変形するかを観察した.

(1)実験条件と実験方法

実験に用いた土槽は4.1と同じものである.地盤材料に

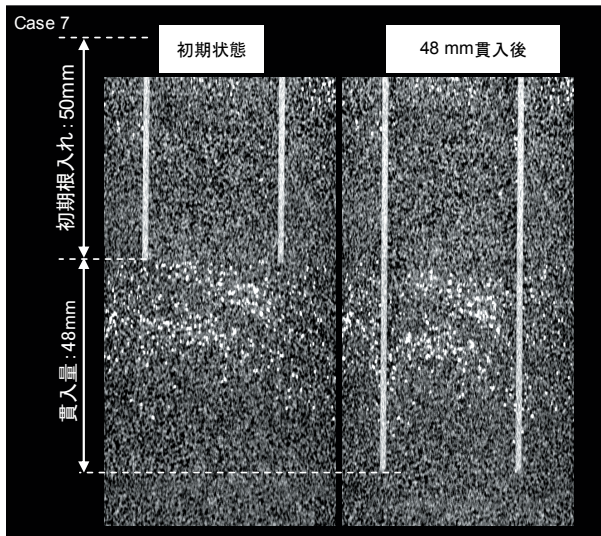


図-21 貫入実験前後のCT画像(相馬硅砂4号)

は、相馬硅砂4号($D_{50}=0.7$ mm, $U_c=1.6$)を用いた。これは、X線CT装置による撮影画像に対してPIVの手法を用いるためには、粒径の大きな地盤材料を用いる必要があったためである。杭内の土の挙動が少しでも詳しくわかるように、杭径の大きな模型杭を用いた。具体的には、直径 $D=32$ mm(肉厚 $t=1.5$ mm, $D/t=21.3$)、長さ140 mmのアルミニウム製の杭を用いた。

本実験では、まず、厚さ220 mmの乾燥砂地盤(目標相対密度65%)を空中落下法によって作製し、土槽の中心部分に杭を設置して、さらに50 mm地盤を作製した。地盤作製後、杭内部に杭の外側地盤と同じ層厚となるように、杭内に乾燥砂を投入した。杭の外側地盤には、4.1と同様に、鉄球を上載荷重2.5kPaとなるように設置した。

杭貫入は一定速度(1mm/min)の変位制御で行い、最大貫入量は杭設置深さから48 mm(地盤深さ98mm)とした。なお、貫入量約36 mmで载荷ピストンの継ぎ足しを行っており、その際には杭頭荷重を一旦除荷している。CT撮影は3mmごとに貫入を停止した後、杭頭荷重が安定してから行った。

図-21に杭貫入実験前後のX線CT画像を示す。この図からわかるように、豊浦砂の場合と異なり、砂粒子が判別できている。なお、杭体は画像中に白色で示される。

(2)実験結果

図-22に杭の貫入量と貫入抵抗の関係を示す。この図における杭の貫入量の原点は、杭の初期設置深度である深度50 mmである。この実験では、あらかじめ杭を根入れさせておいたこと、また杭内に土を詰めておいたことから、貫入の初期から貫入抵抗が生じている。しかし、その後の貫入抵抗の変化をみると、貫入量が36mmまでは貫入抵

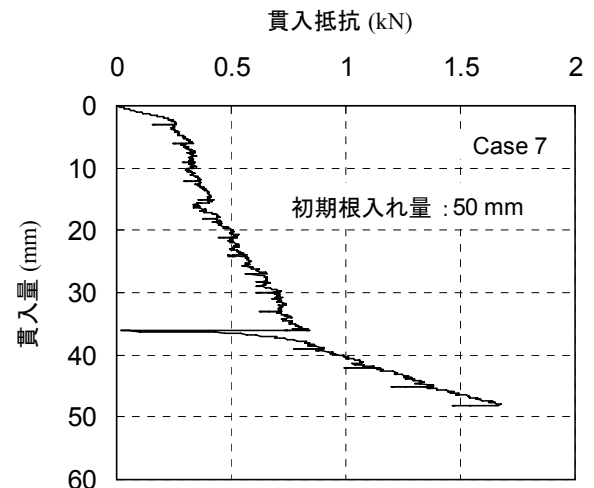


図-22 貫入抵抗-貫入量関係(初期根入れ50mm)

抗の増大の仕方がそれ以降よりもやや小さい傾向にあった。

図-23にはCT画像を元に市販のPIVソフトを用いて解析した地盤内の変位ベクトルを示す。各図の上を示した数字は、図示した変位ベクトルを求めた区間の杭の貫入量である。図中には、PIVの解析結果による一定変位量以上(杭貫入量に対して10%以上)の変位ベクトルをカラーで示した。なお、この図では、ベクトルの大きさが小さく、ベクトルの向きが分かりにくいので、各領域のベクトルの主要方向を示す矢印を図中に示した。

以下に貫入抵抗力と変位ベクトルの関係について説明する。

a) 0～3mm貫入時

本実験条件では貫入初期から抵抗力が発揮された。0～3mm貫入時の画像中のベクトルからは杭内及び杭下地盤が一体的に挙動したことが見受けられる。この区間では、杭下地盤に球根状に鉛直下向きの変位場が存在していることが確認された。これは初期に杭の根入れを与え杭内に土を詰めたことによる、内周面抵抗の発現によるものであることが考えられる。ここでは、摩擦抵抗が杭下の地盤反力を上回り、閉塞現象が生じていたと考えられる。

b) 3～33mm貫入時

貫入量がわずかに増えるとすぐに抵抗力の増加速度は減少した。3mm～33mm貫入までその傾向がみられる。画像からは杭内土と杭下地盤が一体挙動をしていないことから、この区間では杭の閉塞は生じていなかったものと思われる。

9～12mm貫入時には杭内では土の移動が観察され、杭より下部の地盤では移動が観察されていない。また、杭

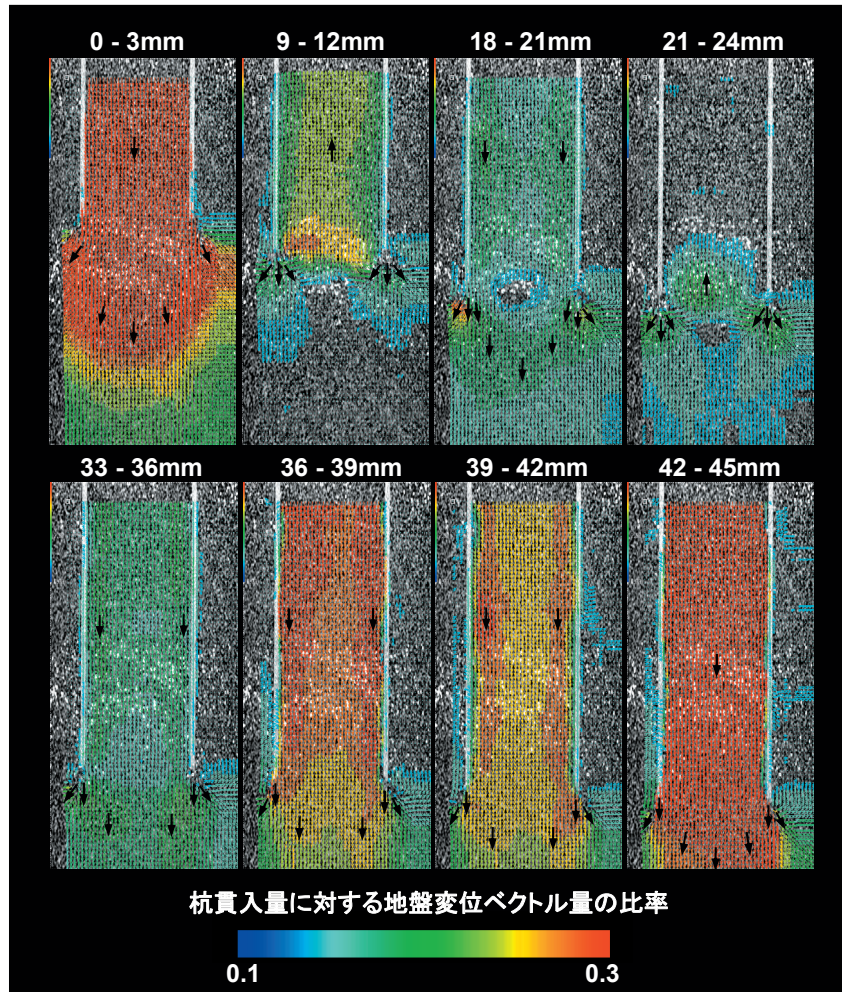


図-23 貫入過程における地盤内ベクトル分布の変化 (PIV 計測)

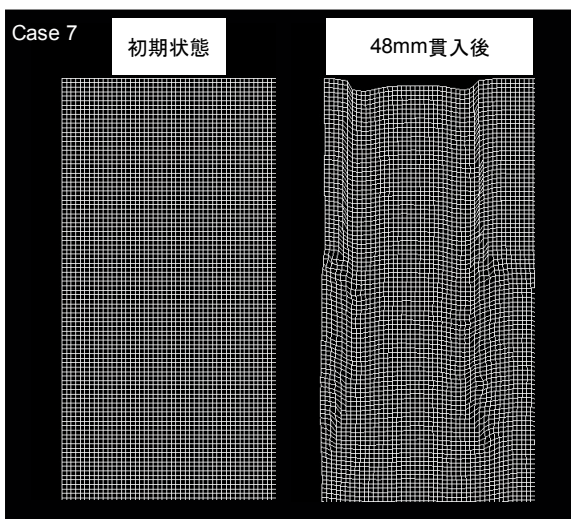


図-24 変形前後の地盤メッシュ

内部の土は鉛直上向きに移動していた。

18～21mm貫入時には杭内土および杭より下の土が広い範囲で鉛直下向きに変位していた。これは、全体とし

て杭内に土が入りにくい状況が起きていたことを意味するものであるが、杭の貫入量に対する移動量が小さく、閉塞は不完全であったと思われる。

21～24mm貫入時には杭内部の土に移動が見られず、杭より下の土が移動していた。特に杭先端付近の土は上方向に移動しており、杭の先端の実質部付近の土は下向きに変位していた。

杭の閉塞が起こるまではこれら9～12mm, 18～21mm, 21～24mmの画像で見たような地盤変形を繰り返している可能性が高い。

c) 33～45mm貫入時

貫入抵抗力の増加速度は33mm貫入以降に上昇した。33～45mm貫入時の画像では杭内土や杭下の土が杭の貫入に伴って移動する傾向にあることがわかる。ただし、その変化は周期的であるようであり、例えば、36～39mmの貫入量の際には、地盤の移動量が大きいですが、引き続き39～42mmでは相対的に土の移動量が少なくなっている。

ただし、これらの区間で特に顕著に見られる傾向とし

て、杭の内周面付近の移動量が杭中心部の移動量よりも大きいことがあげられる。これはすなわち、杭内周面摩擦の影響で、杭内周面付近の土が杭に対して移動しにくい状況にあることを意味している。

42～45mm貫入時には、杭内部、杭下とも一体的に下方向に移動しているように見え、あたかも閉塞が生じたかのようなのであるが、実際には、杭体の変位量に対しては最大で30%程度の変位量あり、この実験では、十分な閉塞状況が生じるまでの観察はできていない。

次にこのベクトル分布を用いて地盤の連続的な変形解析を行った。変形前後の地盤メッシュを図-24に示す。この地盤変形データを用いて、せん断ひずみ分布及び間隙比の変化量分布を解析した。

図-25にせん断ひずみ分布を示す。杭の貫入初期には杭実質部先端にせん断領域が発生する。杭の貫入が12mm,21mmと進んでくると杭実質部先端付近のひずみ集中部分が杭先端で連結するようになる。更に貫入が進んで杭の貫入量30mm,39mm,45mmあたりでは杭内部の杭体壁近傍にせん断ひずみが集中する。杭外周面近傍においてもせん断ひずみの集中する領域があり、ひずみの絶対値では外周面のほうが大きい。

図-26に同様にして求めた間隙比の変化率を示した。杭の貫入が3mm程度の時にすでに杭実質部周辺に膨張領域が発達する。貫入が進むに従い、膨張領域は杭内に侵入している。これらは、実質部の貫入によって地盤がせん断膨張した領域であると考えられる。更に30mm,39mmと貫入が進んでも杭内周面部、杭外周面部には膨張領域が

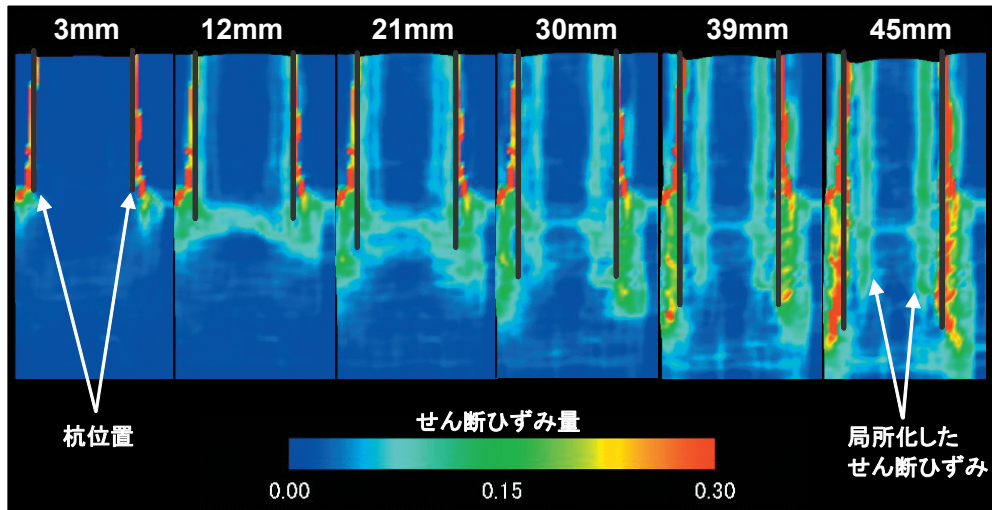


図-25 PIV に基づく変形解析により求めたせん断ひずみ分布

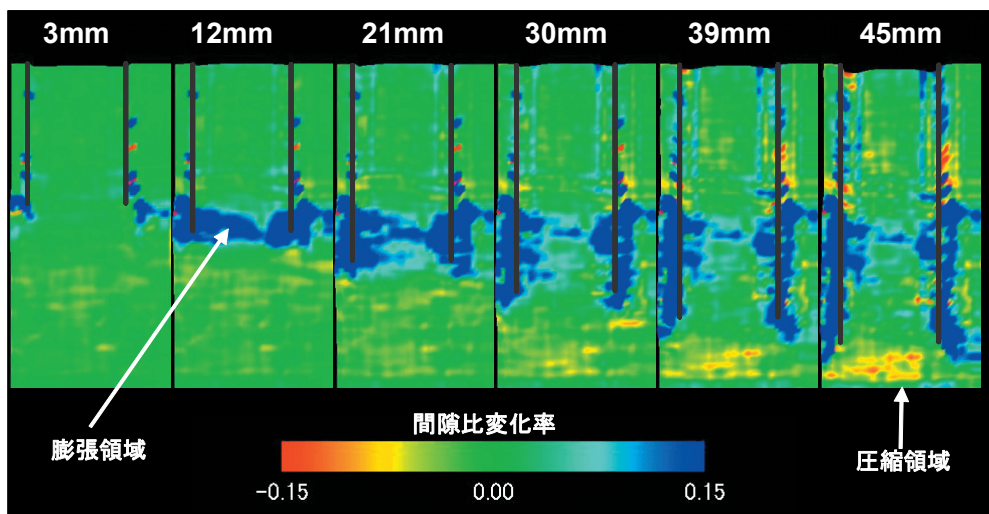


図-26 PIV に基づく変形解析により求めた間隙比の変化率分布

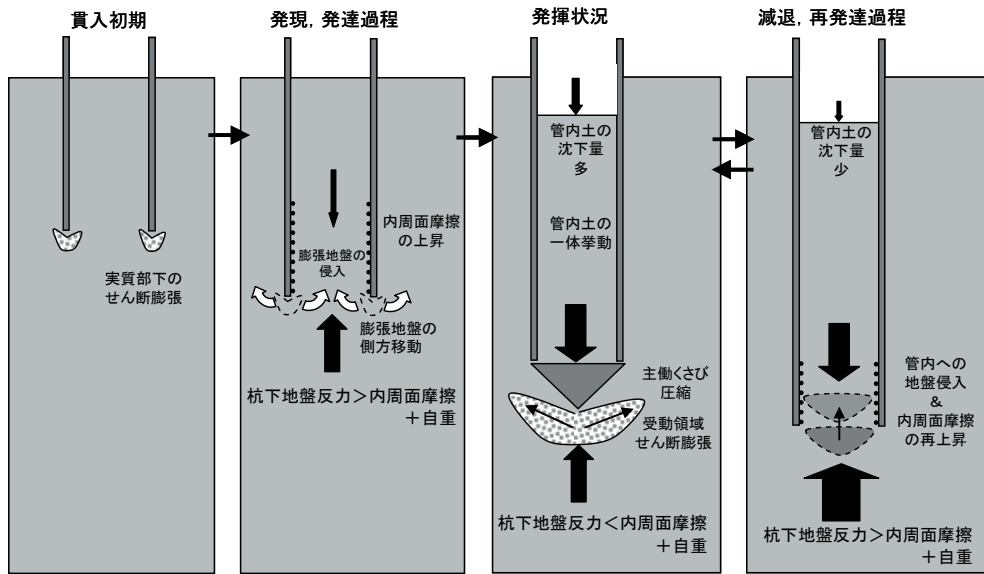


図-27 先端閉塞発現メカニズムの推察

存在する。また、45mm貫入時には杭先端部分に圧縮領域がはっきり現れ、これが主働くさび領域にあたると考えられる。

進むに従って膨張領域が杭内に侵入し壁面部には膨張領域が残る。閉塞傾向が強まってくると、杭先端部分に圧縮領域が現れる。

以上の現象の観察から予想される閉塞発現メカニズムの概略を図-27に示す。

5. 杭の閉塞メカニズムに関する考察

本研究では、杭の閉塞メカニズムの基本的な現象を把握するために、開端杭の先端部付近での実現象の観察を目的とした静的模型杭貫入実験を実施した。

これまでの知見は以下のようなものであった。

1) 開端杭の閉塞現象は杭下端面の地盤反力と杭内土の周面摩擦力及び自重との釣合いによって相対的に決まるものである。

2) 閉塞効果発揮後の開端杭は閉塞の発現と減退が貫入過程で繰返し生じる。

3) 閉端杭の杭下地盤および閉塞発現後の開端杭の杭下地盤は貫入に伴い杭外側へ排除される方向に側方移動する。

4) 開端杭には杭下および杭内側で杭との相対速度が低下する領域は存在するが、閉端杭のように完全な主働くさび領域は維持されず、地盤は断続的に杭内に侵入する。

5) 閉塞発現後の開端杭先端付近及び閉端杭先端には圧縮傾向にある領域が存在しており、その周囲には膨張傾向領域が分布する。

6) 開端杭の杭内壁面部近傍にせん断が集中する領域が存在する。

7) あらかじめ根入れされた開端杭では杭貫入初期には杭実質部周辺にせん断膨張領域が発達した。杭の貫入が

杭の貫入初期には、実質部の先端抵抗が杭の貫入抵抗として発揮される。その後貫入が進むにつれて、杭先端部の抵抗が増加するとともに、内周面抵抗も増大する。この間、内周面抵抗は断続的に増加する。内周面摩擦力が増加すると、ついには杭下地盤の杭内への侵入を阻害し、閉塞現象が発現する。この後、杭下地盤反力を内周面摩擦力が完全に上回ると完全閉塞状態となるが、完全閉塞が生じなくても地盤の侵入を阻害するため、杭内土の上面が沈下する。閉塞現象が発達すると杭直下地盤の圧縮変形が生じ、主働くさびに似た領域を形成する。主働くさび領域と杭下の深い地盤に囲まれた受働領域はせん断変形を受けて体積膨張と側方移動を生じる。更に杭の貫入が進むと杭より下の地盤の地盤反力が上昇し、閉塞状態は維持されなくなり、それまで主働くさび領域であった地盤が杭内に侵入する。杭内に押込まれた土は杭内壁部分で強いせん断を受ける。またその長さが増すことにより、内周面摩擦力が上昇する。そして先端抵抗力がさらに上昇すると考えられる。

このように地盤の侵入が繰り返されることによって先端支持力が上昇していくと考えられる。

6. 結論

本研究では杭貫入時の杭先端付近の地盤の挙動をX線CT装置により観察し、杭の閉塞メカニズムについて検討した。ここで行われた実験は、CT装置内での杭の貫入実験によって杭周辺地盤の変形挙動の観察が可能であるかという点と、どのような解析が可能であるかという点に重点を置いたものであるため、杭径と土槽径の関係に伴う境界条件の影響の評価、杭径と杭の肉厚の比率に伴う杭の閉塞のしやすさの違いの評価等については必ずしも十分なものではない。しかしながら、杭の閉塞メカニズムと地盤変形の関係について定性的な傾向は把握できたものと考えている。

貫入試験に伴う地盤変形の可視化については試行錯誤を繰り返しながら以下のレベルまで到達することができた。

地盤材料と密度の異なるターゲットを地盤中に予め配置することで地盤の変形や移動を観察できること、また、識別可能なサイズの粒子ターゲットを地盤に散在させると地盤各位置の独立した挙動を追跡できることが分かった。このような手法では、検討できる内容に限界があるため、PIVの手法を用いた。PIVの手法を駆使することによって、地盤の変形挙動の把握ができることが確認された。PIVの手法を利用するには、粒径の大きい地盤材料を用いることが必要となり、実験の境界条件上の制約を受けることになる。この点は課題として残された。

以上のような手法で杭の閉塞について検討し、杭の閉塞過程における地盤の変形メカニズムについて考察した。その結果、ある程度のレベルで開端杭の閉塞現象と力学的な傾向とを関連付けて議論できた。

7. おわりに

本稿では閉塞現象の発現メカニズムを把握することを主目的に、小型模型実験を実施して地盤の変形挙動の観察を行った結果について述べた。

今回の報告では検討できていないが、CTデータは本来的に3次元のデータであるので、3次元的地盤の変形挙動の検討がぜひとも必要である。現在、3次元の変位ベクトル計測と変形解析法の開発に取り組んでおり、3次元的地盤挙動が問題となる実験対象への応用を目指している。

今回の地盤の変形挙動は、杭の閉塞現象解明に向けての基礎的な情報である。今後、今回開発した地盤の可視化技術を利用して基礎的な情報収集を継続し、閉塞効果に影響を及ぼすパラメータについても別途検討していく。

なお、先端閉塞効果全般を議論するには力学的な検討が必要不可欠である。それには、大型模型実験や現地試験等での力学的アプローチからの検討をする必要がある。

最後に、長野高専からの夏季実習生である木賀田賢太君には模型実験の補助として協力して頂きました。また、動土質研究室の金田一広氏には地盤変形解析を行うにあたって多くのことをご教授頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

(2008年3月10日受付)

参考文献

- 岸田英明, 原悟視(1973): 開端杭内部に詰った乾燥砂の挙動, 第8回土質工学研究発表会講演集, pp.487-490.
- 日本建築学会(2001): 建築基礎構造設計指針, pp.206-207.
- 水谷崇亮(2003): コーン貫入試験による開端杭の先端閉塞状況の評価手法に関する実験, 港湾空港技術研究所資料, No.1053., 18p.
- Otani, J. Hironaka, J. and Mukunoki, T. (2003): Visualization of failure patterns under vertically loaded pile foundation using X-ray CT method. Proc. of 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Singapore, August 2003, Vol.1, pp. 973-976.
- Otani, J. (2004), State of the art report on geotechnical X-ray CT research at Kumamoto University, X-ray CT for Geomaterials Soils, Concrete, Rocks, pp.43-77.

港湾空港技術研究所資料 No.1177

2008. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大成社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。