

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1391**      December 2021

開端ストレート・テーパークの支持力特性に関する大型模型実験

中村 圭太, 元水 佑介, 松村 聡, 水谷 崇亮, 大下 英治, 新谷 聡,  
坂本 易隆, 末政 直晃

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

# 目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 実験方法	4
2.1 実験概要	4
2.2 模型地盤・模型杭	4
2.3 実験ケース	5
2.3.1 実験ケース概要	5
2.3.2 ケース STR01・TPR01	7
2.3.3 ケース STR02・TPR02	7
2.3.4 ケース STR03・TPR03	8
2.3.5 ケース STR04・TPR04	9
3. 実験結果	9
3.1 杭の貫入実験	9
3.1.1 貫入時における杭内部の砂の吸引有無による違い	9
3.1.2 ストレート杭, テーパー杭の比較	10
3.1.3 貫入時の土圧変化	11
3.1.4 杭のひずみ・軸力分布	13
3.2 杭の荷重試験	20
3.2.1 杭内部の砂吸引に伴う支持力の変化	20
3.2.2 荷重試験時の土圧変化	20
3.2.3 杭のひずみ・軸力分布	20
4. おわりに	20
参考文献	21
謝辞	21

# Large-scale Model Test for the Bearing Capacity of Open-ended Straight and Tapered Piles

**Keita NAKAMURA\***  
**Yusuke MOTOMIZU\*\***  
**Satoshi MATSUMURA\*\*\***  
**Takaaki MIZUTANI\*\*\*\***  
**Eiji OSHITA\*\***  
**Satoshi SHINGAI\*\***  
**Yasutaka SAKAMOTO\*\***  
**Naoaki SUEMASA\*\*\*\*\***

## Synopsis

It is well known that the bearing capacity of open-ended piles with a constant pile diameter used in port and harbor facilities depends on the so-called "soil plug". On the other hand, in tapered piles which gradually decrease in diameter toward the tip of the pile, the soil plug is not likely to be occurred due to their shape, but their bearing capacity is comparable to that of straight piles. In this study, the difference in bearing capacity between straight piles and tapered piles was verified by conducting a large scale model test. In the experiments, a series of tests from the pile penetration process to the loading test were conducted on straight and tapered piles, and the load-displacement relationship of the piles, the data of strain gauges and earth pressure gauges attached to the piles were summarized. In addition, in order to verify the effect of the soil plug on bearing capacity, an experiment was conducted to remove the plugging by vacuuming sand inside the pile during the pile penetration process. As a result of the experiment, it was found that the tapered pile was hardly affected by the soil plug, and could keep the bearing capacity even under adverse conditions where the bearing capacity of the straight pile was significantly reduced.

**Key Words** : large-scale model test, open-ended pile, soil plug, tapered pile, bearing capacity

---

- \* Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
- \*\* Rinkai Nissan Construction Co.,Ltd.
- \*\*\* Senior Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
- \*\*\*\* Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
- \*\*\*\*\* Professor, Department of Urban and Civil Engineering, Tokyo City University  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan Port and Airport Research Institute  
Phone: +81-46-844-5057 Fax: +81-46-844-0618 e-mail: nakamura-ke@p.mpat.go.jp

# 開端ストレート・テーパー杭の支持力特性に関する大型模型実験

中村 圭太\*・元水 佑介\*\*・松村 聡\*\*\*・水谷 崇亮\*\*\*\*  
大下 英治\*\*・新谷 聡\*\*・坂本 易隆\*\*・末政 直晃\*\*\*\*\*

## 要 旨

港湾の施設の基礎に用いられる開端杭はこれまで杭径が一定のストレート杭がよく利用されてきたが、その鉛直支持力は先端閉塞現象の発現に大きく依存することが知られている。一方、杭径が先端に向けて徐々に小さくなるテーパー杭は、その形状から先端閉塞が生じにくい、ストレート杭と比べても遜色ない支持力が得られることが近年の実験結果よりわかってきた。そこで本研究では、このようなストレート杭とテーパー杭の支持力特性の違いについて、大型模型実験を実施して検証した。実験では、杭の貫入過程から載荷試験までの一連の実験をストレート杭およびテーパー杭について行うとともに、杭の荷重-変位関係、杭体に貼り付けたひずみゲージ、土圧計等で計測されたデータについて整理した。また、より直接的に先端閉塞が及ぼす支持力への影響を検証することを目的として、杭貫入過程において杭内部の砂を吸引し、強制的に閉塞を解消させる実験を行った。実験の結果、テーパー杭は先端閉塞の影響をほとんど受けないため、ストレート杭で先端閉塞が生じにくい条件下では、テーパー杭が有利になる可能性があることがわかった。

キーワード：大型模型実験，開端杭，先端閉塞現象，テーパー杭，鉛直支持力

- 
- \* 地盤研究領域 基礎工研究グループ 研究官
  - \*\* りんかい日産建設（株）
  - \*\*\* 地盤研究領域 基礎工研究グループ 主任研究官
  - \*\*\*\* 地盤研究領域 基礎工研究グループ グループ長
  - \*\*\*\*\* 東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科 教授
- 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail：nakamura-ke@p.mpat.go.jp

表-1 相馬硅砂 4 号の物性値

項目	値
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.64
最大間隙比	0.970
最大間隙比	0.634
平均粒径 $D_{50}$ (mm)	0.77

## 1. はじめに

港湾の施設の基礎には、鋼管杭（開端杭）が多く用いられ、近年関心が高まっている洋上風力発電施設の建設においても、その多くに開端杭が採用されている。開端杭は、施工時の貫入抵抗が比較的小さく抑えられる一方で、十分な根入れがあれば先端閉塞現象により高い軸方向押込み抵抗力（以下、支持力という）も期待できる。先端閉塞現象<sup>1, 2)</sup>は、杭を貫入していくに従って先端が詰まり、開端杭であっても閉端杭と同等の支持力を発揮する現象であり、これまでも盛んに研究がなされてきた。例えば、菊池ら<sup>3)</sup>は、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。また、数値解析では DEM (Discrete element method) を用いた検証<sup>4)</sup>も行われている。それら多くの研究成果の蓄積もあり、その実態がわかってきてはいるものの、先端閉塞現象が、いつ、どのように生じるかの判断は難しい。そのため、実務での支持力推定は施工実績に頼るほかなく、これまで経験のない地盤、あるいは杭の諸元に対しては、過小・過大評価になることも少なくない。このように、ストレート杭は、先端閉塞が生じることで閉端杭のような大きな支持力を発揮できるものの、地盤条件や杭の諸元によっては、想定どおりの支持力を得られない懸念がある。

一方、杭径が先端に向けて徐々に小さくなるテーパー杭は、その形状から杭内部に侵入した土は応力が解放される傾向にあるため、ストレート杭と比べても先端閉塞が極めて生じにくい構造である。先端閉塞が生じにくいとストレート杭に比べて支持力が劣るように思えるが、テーパー杭の場合は、地盤を押し広げる効果が大きく発揮されることで、ストレート杭と比べても遜色ない支持力が得られることが近年の実験結果よりわかってきた<sup>5, 6, 7)</sup>。

そこで本研究では、このようなストレート杭とテーパー杭の支持力特性の違いについて、大型模型実験を実施して検証した。用いた土槽の寸法は幅 6000 mm、奥行き 3000 mm、深さ 3000 mm である。杭の支持力を議論する上では、杭と地盤との間に働く摩擦力が重要となることから地盤の大きな拘束圧が必要となる。本実験の規模で実施すれば、必要な拘束圧が十分得られることが過去の実験等により確認されている<sup>7)</sup>。実験では、杭の貫入過程から載荷試験までの一連の実験をストレート杭およびテーパー杭について行うとともに、杭の荷重-変位関係、杭体に貼り付けたひずみゲージ、土圧計等で得られたデータについて整理した。また、より直接的に先端閉塞が及ぼす支持力への影響を検証することを目的として、杭貫入過程において杭内部の砂を吸引し、強制的に閉塞を解消させる実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

本実験では、杭の支持力に及ぼす閉塞効果と杭の形状の影響を調べることを目的として、杭の貫入過程から鉛直載荷試

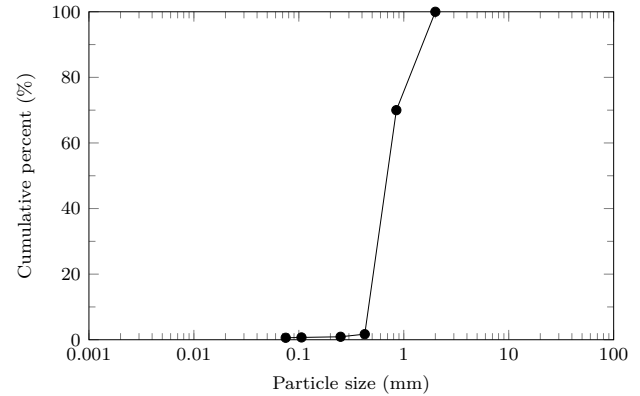


図-1 相馬硅砂 4 号の粒径加積曲線

験までの一連の実験をストレート杭およびテーパー杭についてそれぞれ行なった。模型地盤は、大型の土槽（幅 6000 mm、奥行き 3000 mm、深さ 3000 mm）内に空中落下法を用いて乾燥砂質地盤を作製した。その後、模型杭を準静的に地盤内に貫入し、所定の貫入量となったところで鉛直載荷試験を行った。なお、後述するように、本稿で紹介する実験は 6 ケース (STR01-03, TPR01-03) 実施後に、改善ケースとして 2 ケース (STR04, TPR04) を実施している。そのため、前者と後者で模型地盤を 2 度作製しており、実施した模型地盤が異なるため注意が必要である。

### 2.2 模型地盤・模型杭

実験には、港湾空港技術研究所所有の大型土槽（幅 6000 mm、奥行き 3000 mm、深さ 3000 mm）を用いた。地盤材料は相馬硅砂 4 号（物性値および粒径加積曲線はそれぞれ表-1、図-1）の乾燥砂で、相対密度 60%，地盤深さ 3000 mm を目標として空中落下法により地盤を作製した。地盤の相対密度は、500 mm 毎に地盤高さを計測することで管理し、出来上がりの相対密度はそれらの平均値をもって算出した。実験ケース STR01-03, TPR01-03 における地盤の地盤作製完了後の模型地盤の深さは 2757 mm、平均相対密度は 70.1%，実験ケース STR04, TPR04 における地盤の地盤作製完了後の模型地盤の深さは 2750 mm、平均相対密度は 57.7% であった。

模型杭は、鋼材 SS490 (表-2) を用いて作製した。図-2 に杭の寸法の定義、表-3 に実験で用いたストレート杭およびテーパー杭の寸法を示す。肉厚が 2 mm のケースのストレート杭とテーパー杭を写真-1 に示す。写真のように模型杭には溶接部があるが、支持力には影響しないように滑らかに加工を施

表-2 模型杭に用いた鋼材 SS490 の諸元

項目	値
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	7.85
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	205,000
ポアソン比	0.3

表-3 杭の寸法

項目	ストレート杭	テーパ杭
$D_1$ (mm)	150	150
$D_2$ (mm)	150	100
$t$ (mm)	2,2,3,5*	2,2,3,5*
$L$ (mm)	3000	3000
$l$ (mm)	0	715

\* ケース 01,02,03,04 の順



写真-1 肉厚 2mm のストレート杭とテーパ杭

している。

## 2.3 実験ケース

### 2.3.1 実験ケース概要

本実験では、杭の地盤への貫入実験～鉛直載荷試験までの一連の実験を 1 ケースとして、ストレート杭、テーパ杭それぞれ 4 ケースずつの全 8 ケースを紹介する。それぞれの実験ケースの概略は以下となる。

- (STR01,TPR01)：貫入実験～鉛直載荷試験までを実施し

た標準ケース

- (STR02,TPR02)：杭貫入実験中に杭内側に侵入した砂を吸引したケース
- (STR03,TPR03)：地盤内、および杭に作用する土圧を計測したケース
- (STR04,TPR04)：STR03, TPR03 の改善ケース

STR01, TPR01 のケースは、他の実験ケースとの比較対象とした標準ケースであるが、鉛直載荷試験終了後は杭内側に侵入した砂を吸引し、再度鉛直載荷試験を実施することで、杭の先端閉塞現象が支持力に及ぼす影響について検証を行った。STR02, TPR02 のケースは、貫入中に杭の先端閉塞を強制的に壊すことで、先端閉塞現象がストレート杭、テーパ杭の支持力に及ぼす影響を検証することを目的としている。STR03, TPR03 のケースは、ストレート杭・テーパ杭の支持力発揮メカニズムの検証を目的として地盤内、及び杭に土圧計を取り付けている。そのため、杭の肉厚は STR01, TPR01 に比べて大きい(表-3)。しかし、杭に貼付した土圧計は上手く計測することができず、貼付方法を改善した実験ケース (STR04, TPR04) を追加で実施することとした。この際、STR04, TPR04 は他の実験との兼ね合いから別の模型地盤を用いていることに注意が必要である。これらの全実験ケースは、表-4 に示し、土槽内における模型杭の配置(試験を実施した位置)は図-3 のとおりである。次節より、それぞれの実験ケースの詳細について述べる。

### 2.3.2 ケース STR01・TPR01

STR01, TPR01 は基本となる標準ケースで、杭を準静的に 1900 mm 貫入させた後、鉛直載荷試験を実施した。貫入・鉛直載荷装置は最大載荷容量 100 kN、最大載荷ストローク 500 mm、載荷速度 2 mm/min～25 mm/min で、変位制御の試験を実施することができる(写真-2)。貫入実験では、貫入速度は 25 mm/min で一定とした。また、装置のストロークの制限から一度に 1900 mm を貫入することができないため、400 mm、700 mm、1100 mm、1500 mm 貫入時に一度除荷をして、貫入装置の盛り換えを行っている。鉛直載荷試験では、貫入速度を 2 mm/min として、杭の貫入量が 60 mm まで載荷を行った。

鉛直載荷試験終了後は杭内側に侵入した砂を吸引し、再度鉛直載荷試験を実施することで、杭の先端閉塞現象が支持力に及ぼす影響について検証を行った。吸引は地表面から可能な限りゆっくりと行い、杭の先端から  $1D_1$  の高さまでの砂を吸引した。

以下に、杭の貫入・鉛直載荷時の杭頭治具、杭体に貼付したひずみゲージについて述べるが、これらは、STR02～STR04, TPR02～TPR04 についても同様である。

貫入・鉛直載荷時の杭頭治具の概略図を図-4 に示す。図に示すように、杭頭変位は 90 度毎に 4 点で計測した。4 点の変位データを確認したところほとんどばらつきが無かったため、杭の偏心はないものとし、データ整理の際は 4 点の平均値を用いた。杭頭荷重は定格容量 100 kN の引張圧縮両用型ロー

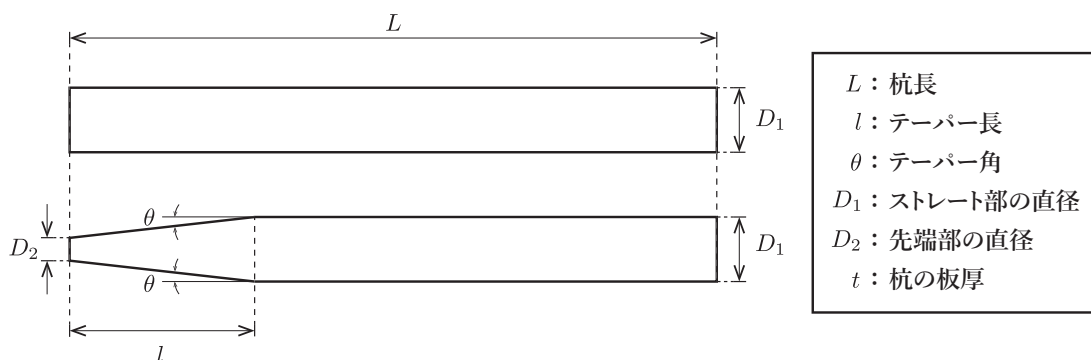


図-2 杭の寸法の定義（上：ストレート杭，下：テーパ杭）

表-4 実験ケース

ケース	貫入量 mm	鉛直载荷試験	砂の吸引	備考
STR01,TPR01	1,900	貫入後と砂吸引後	一度目の载荷試験後	標準ケース
STR02,TPR02	1,500	貫入後	貫入実験中	
STR03,TPR03	1,500	貫入後	吸引なし	土圧計測の不具合あり
STR04,TPR04	1,900	貫入後	吸引なし	STR03,TPR03 の改善ケース



写真-2 貫入・鉛直载荷装置（上から見た様子）

ドセルを用いて計測した。また、杭内側の地表面変位もワイヤ変位計（定格容量 2000 mm）を用いて、杭頭からの相対距離として計測した。実際の杭貫入時と杭頭の様子をそれぞれ写真-3、写真-4 に示す。

ひずみゲージは、図-5 に示すように、杭体の外側表面に A 列、B 列の 2 列、それぞれ深さ方向に①～⑭の計 28 枚を貼付した。ひずみゲージは、取り付けの際の小さなずれなどにより計測値に誤差が生じる可能性がある。そこで、図-6 に示すように杭を軸圧縮し、想定したひずみの値が得られているか、キャリブレーションを実施した。キャリブレーションでは、杭の軸方向ひずみ  $\epsilon$  は、与えた軸力（図-6 のロードセルより計測）を  $F$ 、杭の断面積を  $A$ 、ヤング係数を  $E$  とした場合、次式により求められる。

$$\epsilon = \frac{F}{EA} \quad (1)$$

テーパ杭は単純な軸圧縮力を加えた場合でも、その形状からストレート杭では生じない曲げが生じる可能性があるが、その影響は小さいため<sup>7)</sup> 本研究では無視する。なお、実験後

のデータ整理では、杭体のひずみ A 列、B 列においてほとんど差が認められなかったため、各深度でのひずみは、A 列側と B 列側の平均値を用いることとした。

### 2.3.3 ケース STR02・TPR02

STR02, TPR02 のケースは、杭貫入実験中に杭内側に侵入した砂を吸引したケースである。杭の先端閉塞を強制的に壊すことで、先端閉塞現象がストレート杭、テーパ杭の支持力に及ぼす影響を検証することを目的としている。先端閉塞を生じさせないためには、(1) 杭径を大きくすることや、(2) 杭内壁を滑りやすくする等、他の方法も考えられるが、模型実験の規模で確実に閉塞を生じさせないようにするために、本研究では杭内側の砂を吸引する方法をとった。

STR02, TPR02 の貫入実験は、STR01, TPR01 と同じ貫入装置（写真-2）、および杭頭治具（図-4）を用いて、貫入速度 25 mm/min で 1500 mm 貫入した。STR01, TPR01 に比べて貫入量が小さいのは、载荷装置の不具合でそれ以上貫入が実施できなかったためである。STR01, TPR01 のケース

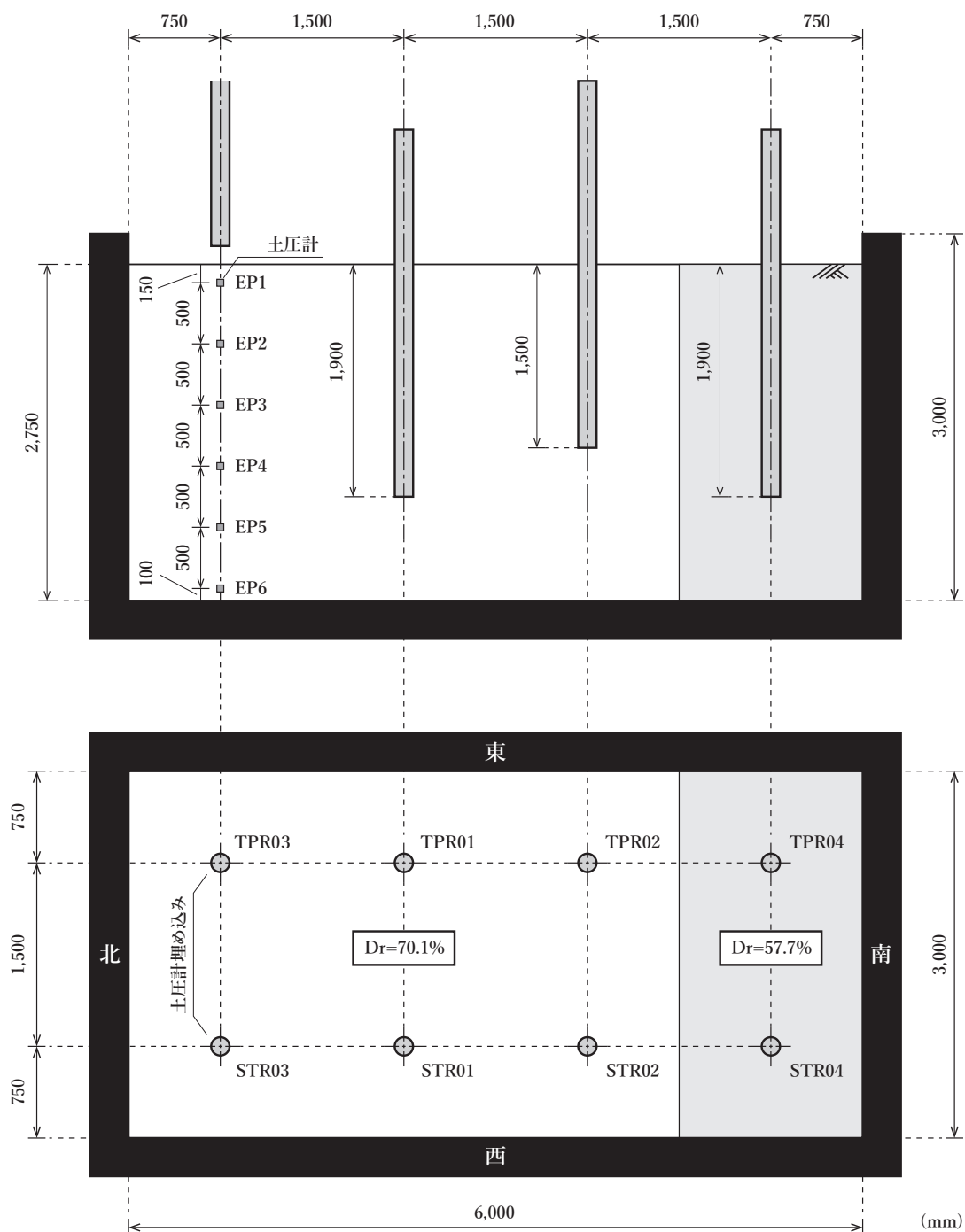


図-3 模型土槽内の杭と土圧計の配置（ケース 01-03 とケース 04 は実際は別の模型地盤であることに注意）

と同様に、装置のストロークの制限から、400 mm、700 mm、1100 mm 貫入時に貫入装置の盛り換えを行っている。杭内側に侵入した砂の吸引は装置の盛り換え時に実施した。吸引は地表面から可能な限りゆっくりと行い、杭の先端から  $1D_1$  の高さまでの砂を吸引した。

鉛直載荷試験は、STR01、TPR01 と同様に、貫入速度を 2 mm/min とし、杭の貫入量が 60 mm まで載荷を行った。

杭頭治具、杭に貼付したひずみゲージは、STR01、TPR01 と同様である（図-4、図-5）。

#### 2.3.4 ケース STR03・TPR03

STR03、TPR03 のケースは、ストレート杭・テーパ杭の支持力発揮メカニズムを検証することを目的として、地盤内、および杭の外側・内側に土圧計を取り付けた。貫入実験は、STR01、TPR01 と同じ貫入装置（写真-2）を用いて、貫入速度 25 mm/min で 1500 mm 貫入した。STR01、TPR01 に比べて貫入量が小さいのは、本実験ケースが土圧計を杭に埋め込むために杭の肉厚を大きくしていることが理由である（表-3）。肉厚が大きくなることにより、想定以上の支持力が発揮され、貫



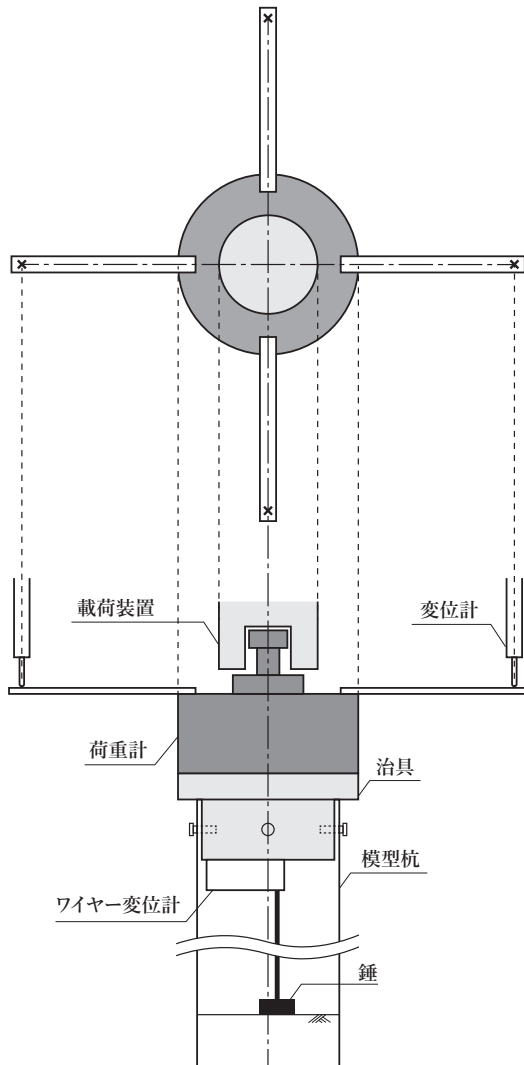


図-4 貫入・鉛直载荷時の杭頭治具の概略図

入装置の最大载荷容量 (100 kN) を超える懸念があったため、貫入量は 1500 mm とした。また、STR01、TPR01 のケースと同様に、装置のストロークの制限から 400 mm、700 mm、1100 mm 貫入時に貫入装置の盛り換えを行っている。

鉛直载荷試験は、STR01、TPR01 と同様に、貫入速度を 2 mm/min として、杭の貫入量が 60 mm まで载荷を行った。

杭頭治具、杭に貼付したひずみゲージは、STR01、TPR01 と同様である。杭に貼付した土圧計の位置を図-7 に示す。図に示すように、土圧計は C 列 (杭外側、共和電業 PS-70KC M2)、D 列 (杭内側、共和電業 PS-20KC M2) の 2 列、それぞれ深さ方向に①～⑤の計 10 枚を貼付した。ひずみゲージを貼り付けた A 列、B 列 (図-5) とは、90 度ずれた位置となっている。土圧計の貼付方法は、図-8 に示すように、杭に孔開けと座削り加工を施し接着させたが、実験終了後に杭を確認したところ土圧計が杭から外れてしまっている等の不具合があった。そこで後述する STR04、TPR04 では、土圧計を機械的に固定する方法をとった。

地盤内に埋め込んだ土圧計は、図-3 に示すように杭の中心軸上に計 6 つ配置した。これらの土圧計は地盤内に固定して



写真-3 貫入の様子



写真-4 杭頭の様子

いないため、杭の貫入とともに移動する可能性がある。そこで、実験終了後に地盤を掘り起こし、土圧計の位置を確認することとした。

### 2.3.5 ケース STR04・TPR04

前述したように、ケース STR03、TPR03 で杭に貼付した土圧計は、杭への固定が不十分で、実験終了後に杭を確認したところ土圧計が杭から外れてしまっている等の不具合があった。そこで STR04、TPR04 では、土圧計の貼付方法を改善した実験ケースとして実施した。写真-5 に示すように、本ケースでは杭にネジ穴を設け、土圧計を杭に機械的に固定する方法をとった。ネジ穴を設けるために、杭の肉厚は 5 mm となっ

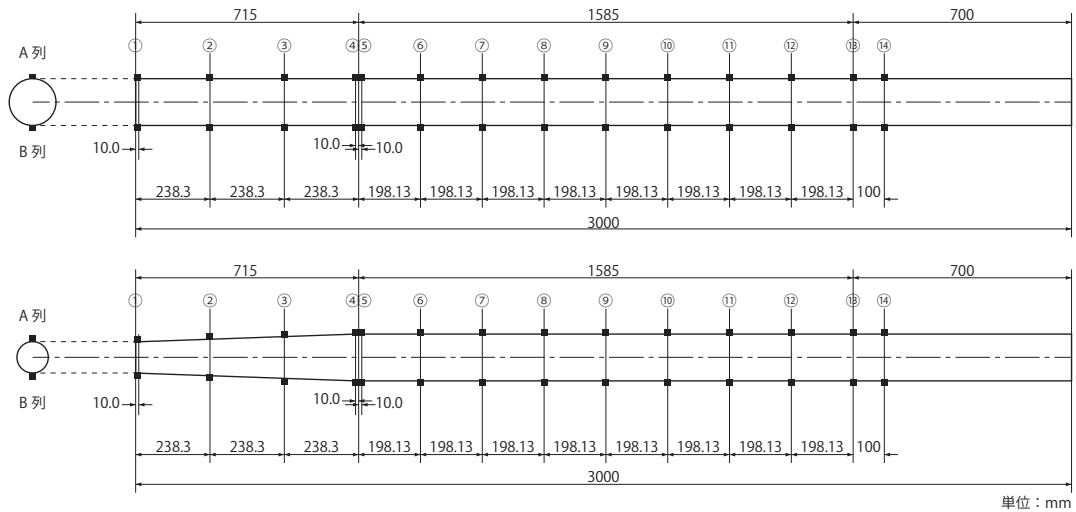


図-5 STR01~04, TPR01~04 のひずみゲージ貼り付け位置

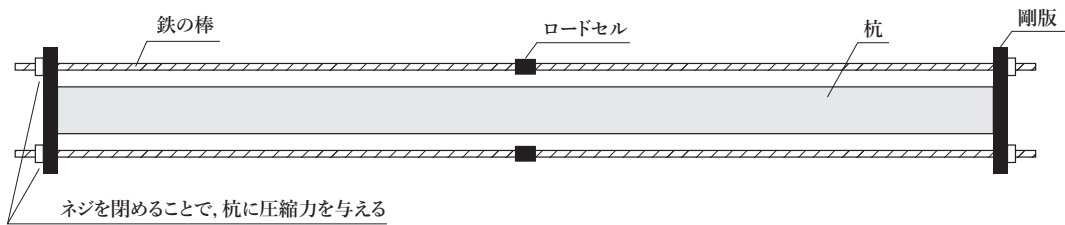


図-6 STR01~04, TPR01~04 のひずみゲージ検定方法概略図

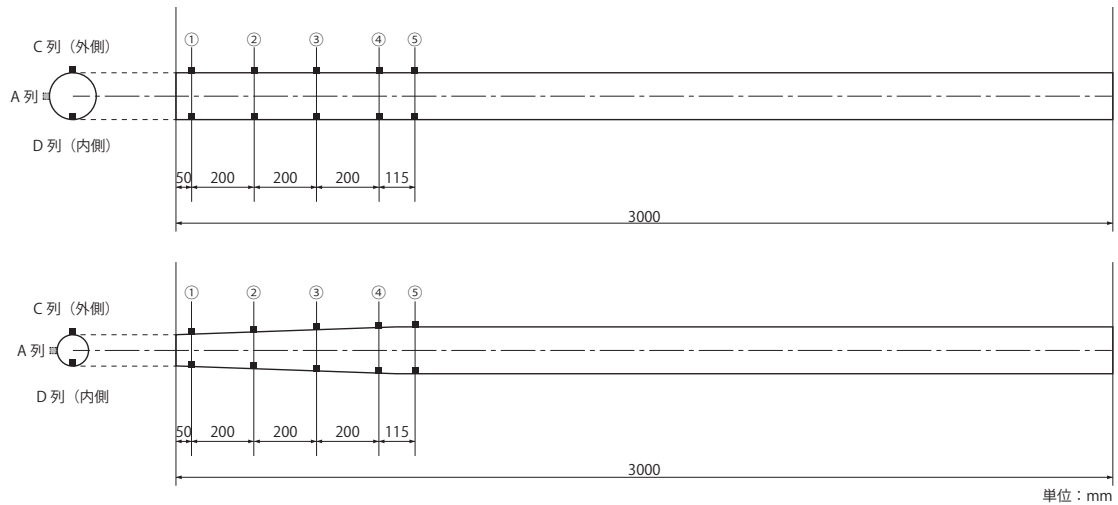


図-7 土圧計貼り付け位置

ている (表-3)。

なお、STR04, TPR04 は他の実験との兼ね合いから別の模型地盤を用いていることに注意が必要である。また、STR03, TPR03 で実施していた地盤内の土圧計測についても本ケースでは行っていない。

貫入実験は、STR01, TPR01 と同じ貫入装置 (写真-2) を用いて、貫入速度 25 mm/min で 1900 mm 貫入した。また、STR01, TPR01 のケースと同様に、装置のストロークの制限から一度に 1900 mm を貫入することができないため、

400 mm, 700 mm, 1100 mm, 1500 mm 貫入時に一度除荷をして、貫入装置の盛り換えを行っている。

鉛直載荷試験は、STR01, TPR01 と同様に、貫入速度を 2 mm/min とし、杭の貫入量が 60 mm まで載荷を行った。

杭頭治具、杭に貼付したひずみゲージは、STR01, TPR01 と同様である。また、杭に貼付した土圧計の位置については、STR03, TPR03 のケースと同様である (図-7)。

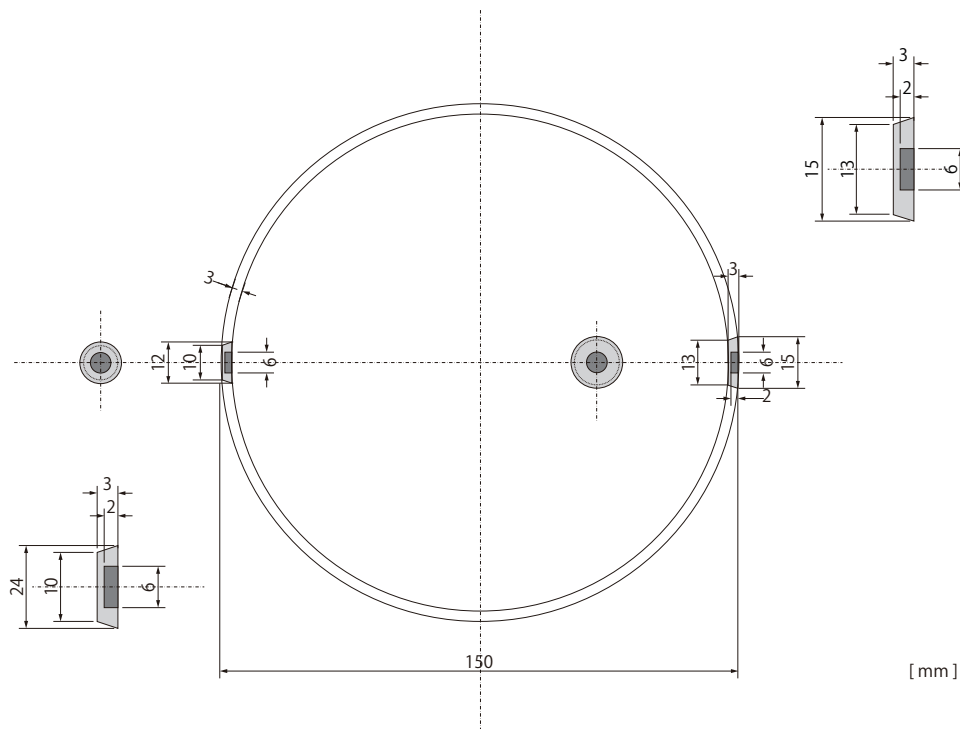


図-8 ケース STR03, TPR03 の土圧計貼り付け方法の概略図

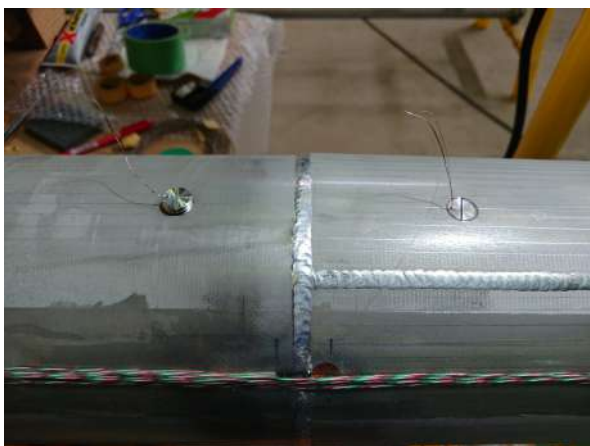


写真-5 ケース STR04, TPR04 のネジ穴による土圧計の固定の様子

### 3. 実験結果

#### 3.1 杭の貫入実験

##### 3.1.1 貫入時における杭内部の砂の吸引有無による違い

図-9 に貫入実験での STR01-03 の杭頭変位-杭頭荷重、杭頭変位-杭内地盤変位関係の比較を示す。このうち、STR02 のみ貫入中に砂を吸引しており、STR01 と STR03 は杭の板厚以外の違いはない (STR01 は 2mm, STR03 は 3mm)。そのため、STR03 は STR01 と同程度、もしくは板厚の影響から少し大きな支持力が発揮されることが予想されるが、図に示すように STR03 は支持力が小さくなる結果となった。原

因としては、地盤作製の不均一さも考えられるが、地盤内に埋め込んだ土圧計により先端閉塞が阻害された可能性も考えられる。図-9 の下に示した杭内部の地盤面の変位を見ると、STR03 は STR01 と比べて変化が小さく、先端閉塞の程度が小さいことが推察できる。STR02 は、载荷試験装置の盛り換え時 (変位が 400, 700, 1100, 1500 mm 時) に杭内側の砂を杭先端から 1D の位置まで吸引しており、杭内部の地盤高さが減少している。ストレート杭では、杭内側の砂の吸引により支持力が低下していることから、先端閉塞の支持力へ及ぼす影響が大きいことが推察される。

図-10 に TPR01-TPR03 の貫入実験で得られた杭頭変位-杭頭荷重、杭頭変位-杭内地盤変位関係を示す。テーパ杭においても、TPR02 のみ杭貫入中に杭内部の砂を吸引している。図より、テーパ杭はストレート杭とは異なり、砂を吸引しても支持力がほとんど下がらないことがわかる。これは、テーパ杭はそもそも先端閉塞が生じにくい構造であり、支持力は杭内部ではなく、杭周辺地盤への押し広げ効果によって発揮されることを示している。このことから、ストレート杭が閉塞しにくいような条件下ではテーパ杭が有利になる可能性がある。

##### 3.1.2 ストレート杭、テーパ杭の比較

図-11 に、貫入実験時の STR01 と TPR01 の杭頭変位-杭頭荷重、杭頭変位-杭内地盤変位関係の比較を示す。両者ともおよそ同程度の支持力が発揮されているが、貫入量が 900 mm を超えたあたりでテーパ杭がストレート杭の支持力を上回った結果となった。ストレート杭は 1100 mm 付近から杭内側の地盤が大きく下がり、先端閉塞が発達していることが

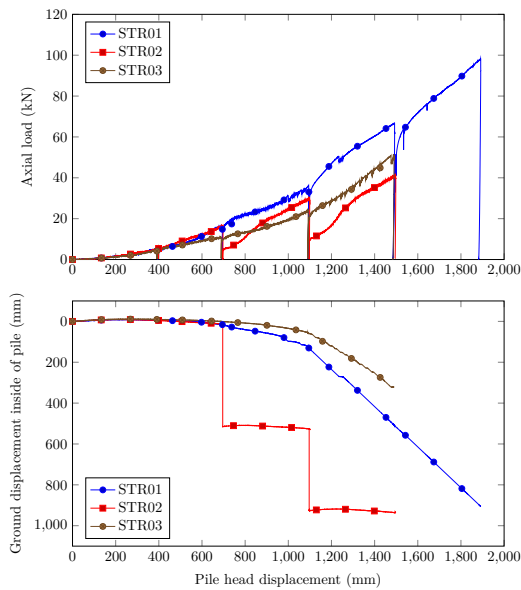


図-9 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: STR01-03 の比較

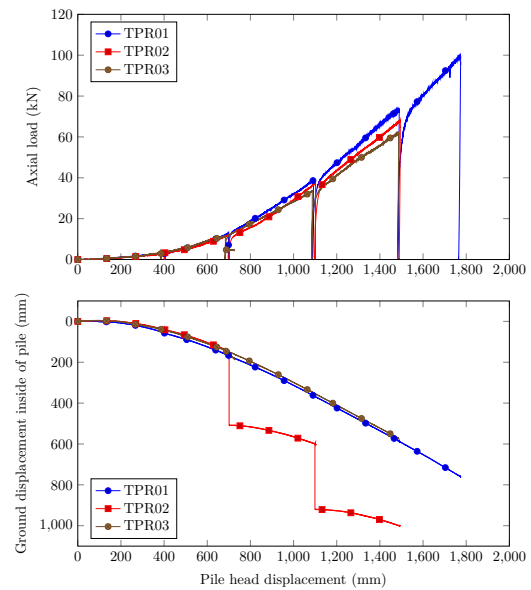


図-10 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: TPR01-03 の比較

推察される。一方、テーパ杭も杭内側の地盤は下がっているが、ストレート杭とは異なり一概に先端閉塞の影響とは言えない。その理由は、テーパ杭はそもそも杭の先端径  $D_2$  (図-2) がストレート杭に比べて小さく、杭先端が詰まっているかに関わらず、杭内部に侵入する土の量が少ないためである。このことから、ストレート杭とテーパ杭において、両者の杭内部の地盤変位をもって同列に先端閉塞を論じることはできないことに注意が必要である。

なお、過去に実施した実験<sup>7)</sup>では、テーパ杭よりもストレート杭の方が大きな支持力を発揮した結果も得ている。今回の実験では、地盤の密度が高かったため、地盤の密度がテーパ杭に有利に働いた可能性も考えられるが、両者の支持力発揮メカニズムについては、より詳細な検討が必要である。なお、テーパ杭がストレート杭よりも貫入量が小さいのは、載荷容量の制約により途中で貫入を打ち止めたためである。

図-12に、貫入実験時のSTR02とTPR02の比較(杭内部の砂を吸引したケース)を示す。杭内部の砂を吸引していないケース(図-11)では、両者の支持力に大きな差は見られなかったが、砂を吸引することでストレート杭は著しく支持力が低下する様子が確認できる。特に、貫入量700mm以下では、ストレート杭はテーパ杭より支持力が大きい、その後杭内部の砂を吸引したことで、テーパ杭より支持力が小さくなっている。この支持力の低下は、吸引後に最も大きく影響が現れ、その後貫入するに従って急速に支持力が回復する様子が見られる。これは、砂の吸引により破壊された先端閉塞が、その後の貫入により再度発現傾向に向かうことが要因であると考えられる。

図-13に、貫入実験時のSTR03とTPR03の比較を示す。ケース03は、ケース01に対して杭の板厚が2mmから3mmになっていること以外は条件が変わらないため、ケース01と同様な傾向が見られると考えられる。しかし、図を見るとス

トレート杭に比べてテーパ杭の方が明らかに支持力が高いことが確認できる。これは、3.1.1でも述べたように、ストレート杭が地盤の不均一性もしくは、地盤内に埋め込んである土圧計の影響により閉塞効果が顕著でなかったことが原因と考えられる。

図-14に、貫入実験時のSTR04とTPR04の比較を示す。ケース01-03と比べて支持力が小さいのは、模型地盤の相対密度が小さいことが理由と考えられる。STR04では支持力が貫入量1300mm以降でほぼ一定で推移しているが、TPR04では線形に支持力が増加している。ただし、地盤の不均一性による実験誤差ということも考えられるため、この支持力増大傾向がテーパ杭の形状による効果であるかは、今後より詳細な検討が必要である。

### 3.1.3 貫入時の土圧変化

STR03, TPR03のケースでは、貫入中の地盤内、及び杭に作用する土圧を計測している。しかし、後述するように、これらのケースでは土圧をうまく計測することができなかったことから、さらに肉厚が大きいSTR04, TPR04のケースも別の模型地盤で実施した。本節では、これらの計測結果をもとにストレート杭とテーパ杭の支持力発揮メカニズムについて考察を行う。

#### (1) STR03, TPR03

図-15に、STR03の結果を示す。図の上から3, 4, 5番目の図が、それぞれ、地盤内の土圧計、杭外側に貼り付けた土圧計、杭内側に貼り付けた土圧計である。地盤内の土圧計の図(上から3番目)にある破線は、土圧計の初期位置を示している。後述するように、土圧計は杭の貫入とともに動き、その量は無視できないほど大きかったことから、考察の際は注意が必要である。地盤内の土圧計(図-15の上から3番目の

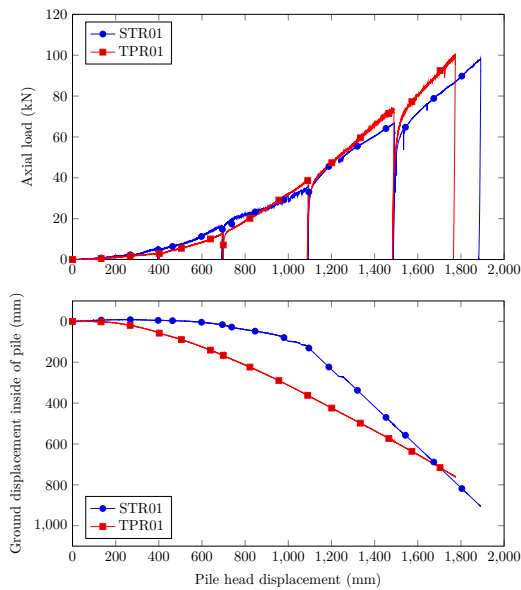


図-11 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: STR01-TPR01 の比較

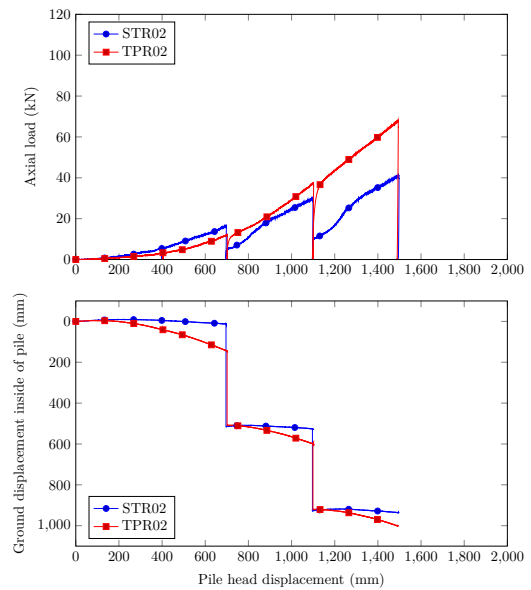


図-12 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: STR02-TPR02 の比較

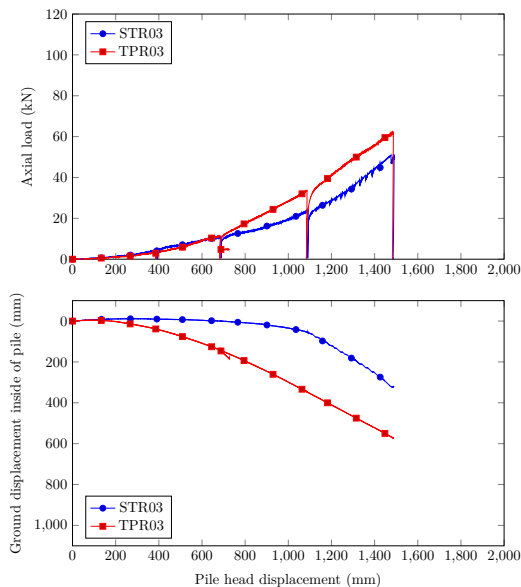


図-13 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: STR03-TPR03 の比較

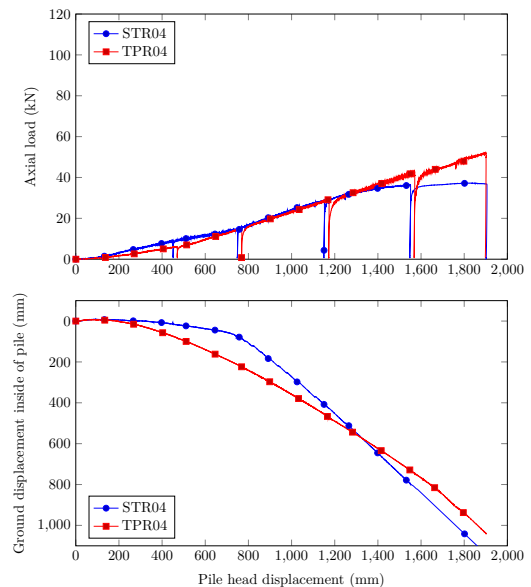


図-14 貫入実験時の杭頭変位-杭頭荷重, 杭頭変位-杭内地盤変位関係: STR04-TPR04 の比較

図)を見ると, 杭先端付近が土圧計に近づくにつれて徐々に土圧が上昇し, 杭先端がある深さを超えると土圧が減少する. 完全閉塞していない限り, 杭に対して砂は相対的に杭内に侵入するように動いていると考えられるため, 土圧が最も高くなるのは杭の先端付近で, 杭内にある程度侵入するとその土圧は解放傾向に向かうことがわかる. 土圧計 EP2 では値が上昇後, 減少する様子が見られ, 杭の閉塞現象に伴う土圧の増加は部分的であることがわかる. また, 土圧計 EP3 (深さ 1150 mm) については, 杭が完全閉塞に近い状態に達していることで大きな値を示したと推察される. 杭の内外に貼付した土圧計は, 実験終了後に杭を確認したところ, 杭から外れ

てしまっている土圧計もあった. また, それらの土圧計の計測値は変動が極めて大きかったため, 移動平均を用いて平滑化処理を行ったが (図-15 の上から 4, 5 番目の図), いずれの土圧計においても特徴的な変化は見られなかった.

図-16 に, TPR03 の結果を示す. ストレート杭と同様に, 地盤内の土圧計の値 (図-16 の上から 3 番目) は増加後に減少する傾向が見られるが, ストレート杭とは異なり, 土圧計 EP3 についても増加後, すぐに減少することがわかる. このことから, ストレート杭は杭先端付近は大きな圧縮力が働いているのに対して, テーパー杭はその形状から圧縮領域が発達しにくいと考えられる.



また、杭に貼り付けた土圧計（図-16の上から4,5番目）については、ストレート杭と同様に移動平均を用いて平滑化した。杭外側のC3の土圧計で大きな値を示している点以外は特に特徴的な変化は見られなかった。このC3の土圧計における大きな値は、テーパ杭の押し広げ効果によるもの可能性もあるが、土圧計の固定が不十分であったことから断定はできない。

なお、あらかじめ地盤内に設置しておいた土圧計（図-3参照）は、杭の貫入に従い徐々に下方へと移動するため、実験終了後に地盤を掘り起こして位置を確認した（図-17, 図-18）。図からわかるように、土圧計の移動量はかなり大きく、上部2つ以外の土圧計に関してはそもそも貫入時に杭の内部に侵入せずに、杭周辺付近へと移動してしまっていた。これらのことから、杭内部の地盤の土圧を事前に土圧計を地盤に埋め込むことによって計測するのは難しく、STR04, TPR04のケースでは計測しないこととした。

## (2) STR04, TPR04

STR03, TPR03のケースでは、杭に取り付けた土圧計の固定が不十分で、うまく計測できず、また外れてしまう土圧計もあった。そこで、より確実に杭に土圧計を埋め込んだSTR04, TPR04のケースを別途実施した。用いた土圧計は、定格容量7MPaの土圧計（共和電業 PS-70KC M2）である。本ケースは、ケース01-03とは模型地盤が異なり、相対密度57.7%の地盤である（図-3）。また、表-3に示すように杭の肉厚も5mmである。なお、改善したSTR04, TPR04のケースにおいても、土圧計の値の変動は大きかったため、移動平均を用いて平滑化している。

図-19に、STR04の貫入実験結果を示す。図は、上から順に、杭頭変位-杭頭荷重、杭頭変位-杭内地盤変位、杭頭変位-杭外側の土圧、杭頭変位-杭内側の土圧を示す。STR01-03と比べて支持力が小さいのは、用いた模型地盤の相対密度がSTR01-03の70.1%より小さい57.7%であることが理由と考えられる。杭に埋め込んだ土圧計の値を見ると、外側に比べて内側において大きく土圧が生じていることがわかる。特に、先端から $1D_1$ 以内のD1の土圧計を見ると、杭の先端閉塞に伴い大きな土圧が生じている。それ以外の先端から $1D_1$ を超える土圧計（D2-D5）については、土圧の値は比較的小さいことから、杭の先端閉塞は1-2D程度の範囲に収まっていることがわかる。

図-20に、TPR04での貫入実験結果を示す。STR04と比べるとやや支持力は大きい結果となり、STR04では支持力が貫入量1300mm以降でほぼ一定で推移していたが、TPR04では杭頭変位に対しておよそ線形に支持力が増加し続けている。ただし、地盤の不均一性による実験誤差ということも考えられるため、この支持力増大傾向がテーパ杭の形状による効果であるかは、今後より詳細な検討が必要である。杭に貼り付けた土圧計を見ると、外側のC1, C2と内側のD1は定格容量7MPaを上回る大きな値を示している。C1は載荷初期から大きな値を示していることを考えると、テーパ杭の押し広げ効果は早い段階から発揮されると考えられる。

図-21にTPR04で計測された土圧計の値を拡大したものを示す。まず外側の土圧計については、C1, C2が定格容量を上回ってしまったため、他の土圧計に注目すると、C3, C4, C5の順に地盤に杭が貫入するのに従って値が上昇していることがわかる。また、内側の土圧計については、定格容量を上回ったD1以外の土圧計に着目すれば、いずれの土圧計もストレート杭に比べて値が小さく、杭内側に侵入した土は応力が解放される傾向にあることがわかる。

## 3.1.4 杭のひずみ・軸力分布

貫入中の杭のひずみ・軸力分布を図-22-図-29に示す。ひずみおよび軸力は引張方向を正としている。図の $d$  (mm)は杭頭変位、 $f$  (kN)はその時の杭頭荷重である。全てのケースにおいて、軸圧縮力は杭頭から杭先端にかけて徐々に減少しており、周面抵抗力が働いていることがわかる。なお、ここでの周面抵抗力は、ストレート杭の場合は杭と地盤の周面摩擦力であるが、テーパ杭の場合は摩擦力だけでなく、テーパ部分が鉛直方向に地盤を押し込む（地盤を押し広げる）抵抗力も含まれていることに注意が必要である。テーパ杭は、テーパ部（図中の破線以下）において特に大きな周面抵抗力が発揮されている。STR02のケース（図-23）では、ひずみが引張り側に働くような不自然な挙動が見られ、TPR04（図-29）のケースでは不自然にひずみの値が変動しているが、これらの原因については本実験ではわからなかった。

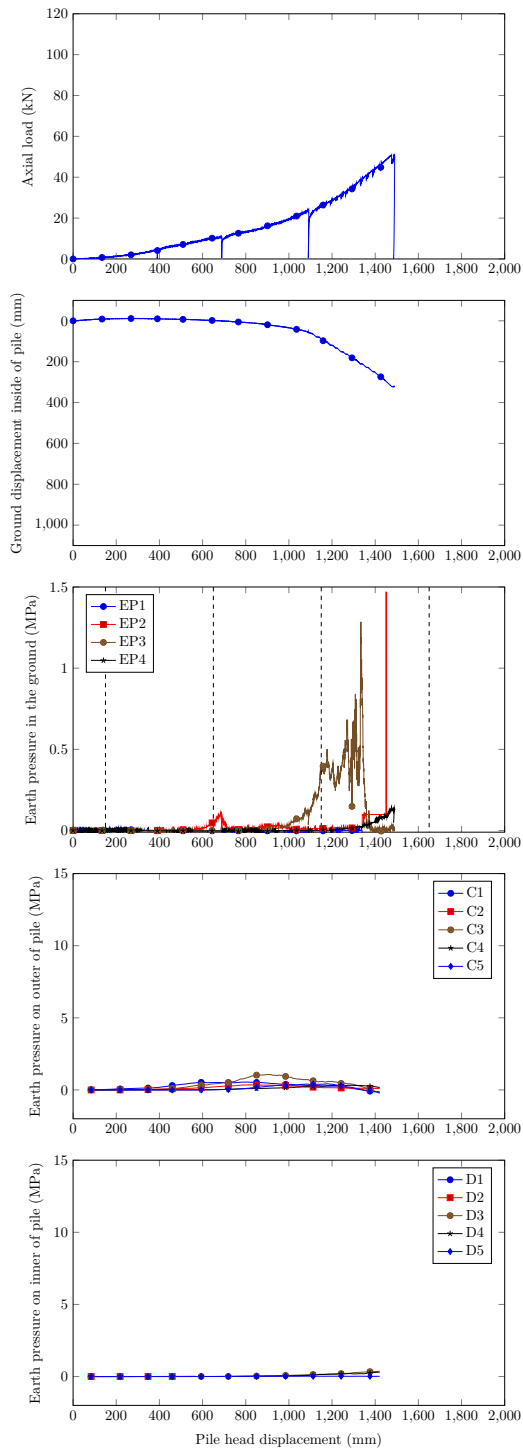


図-15 貫入実験：STR 03

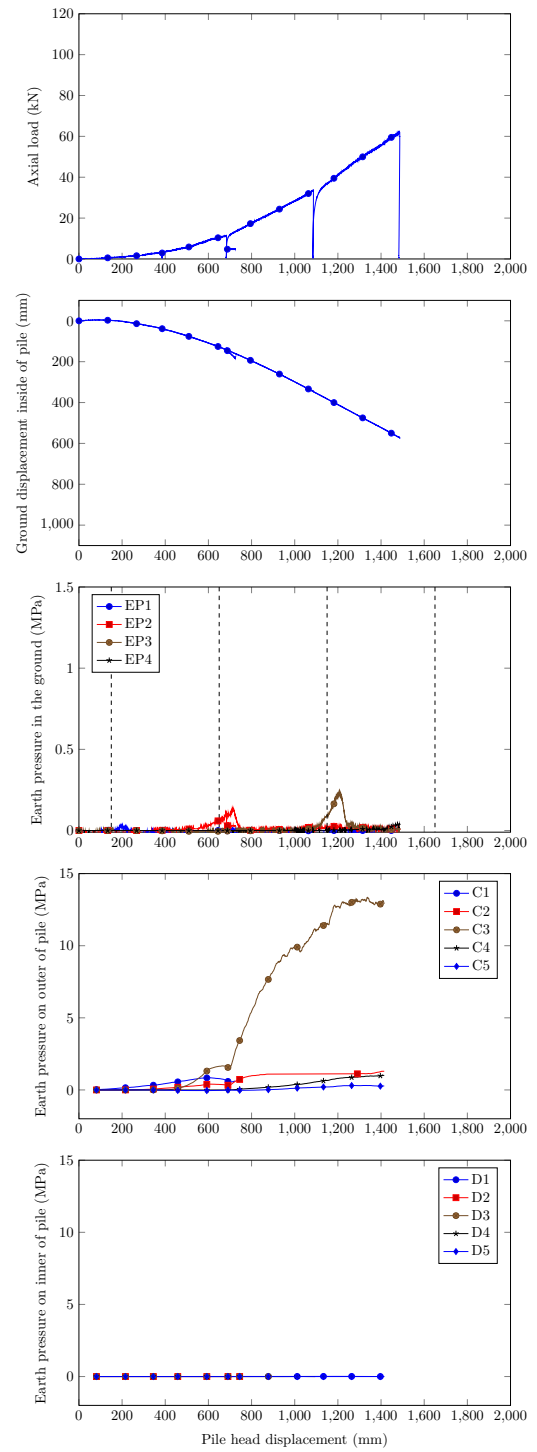


図-16 貫入実験：TPR 03

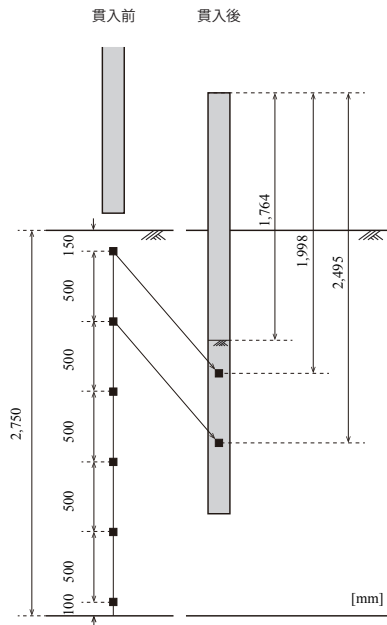


図-17 STR03 の実験終了後の土圧計位置

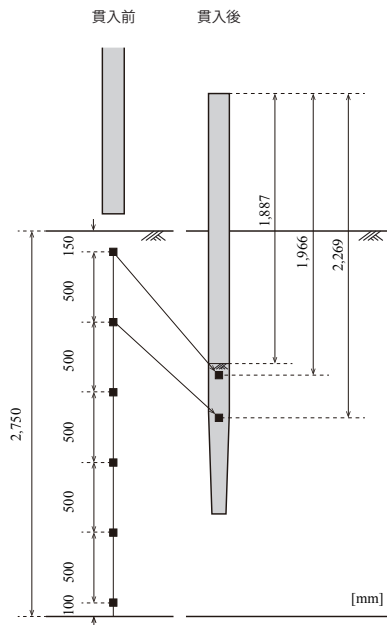


図-18 TPR03 の実験終了後の土圧計位置



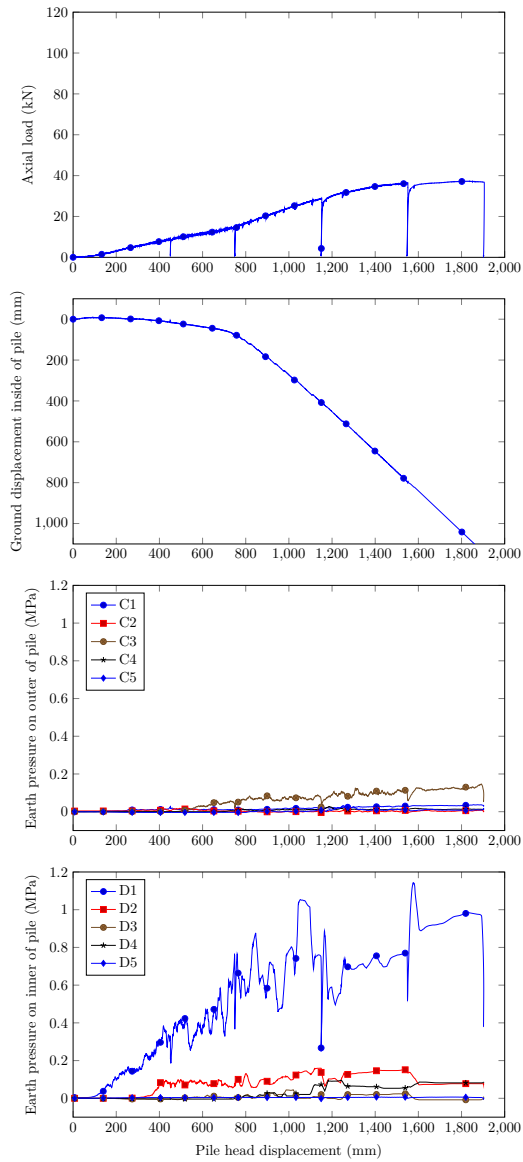


図-19 貫入実験：STR04

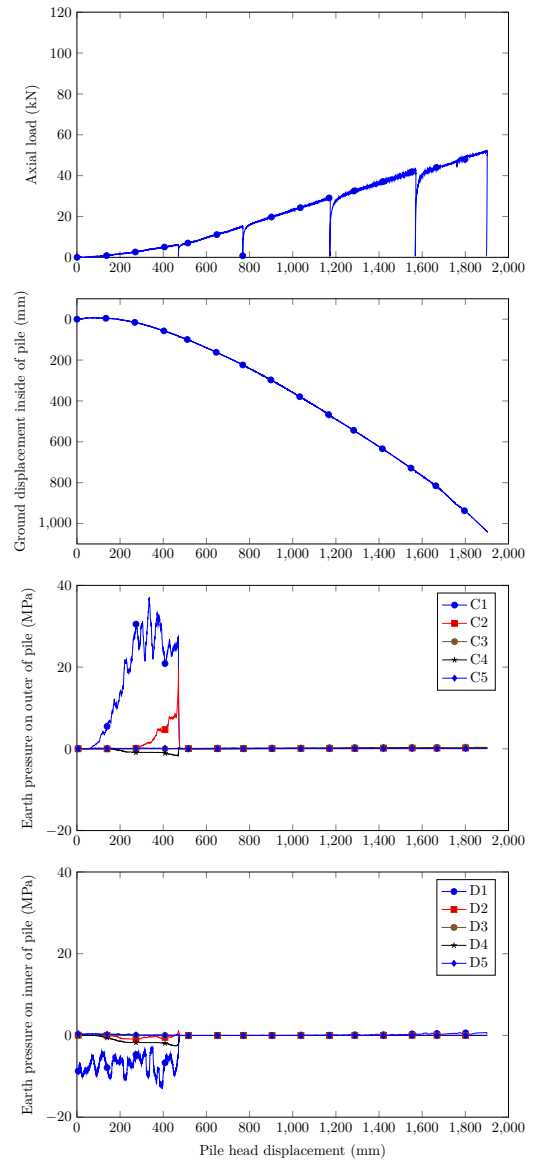


図-20 貫入実験：TPR04

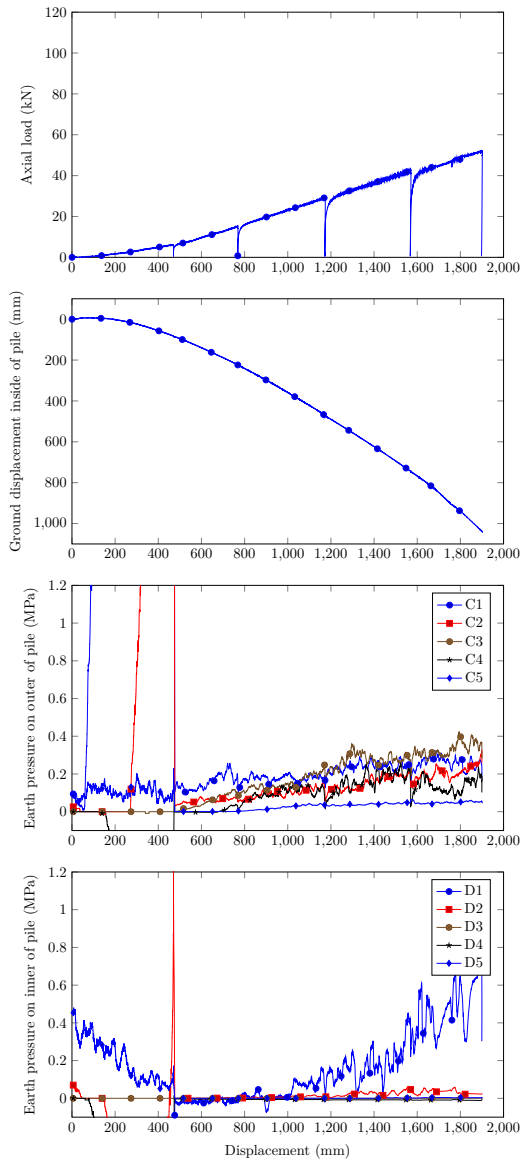


図-21 貫入実験：TPR04（土圧分布拡大）

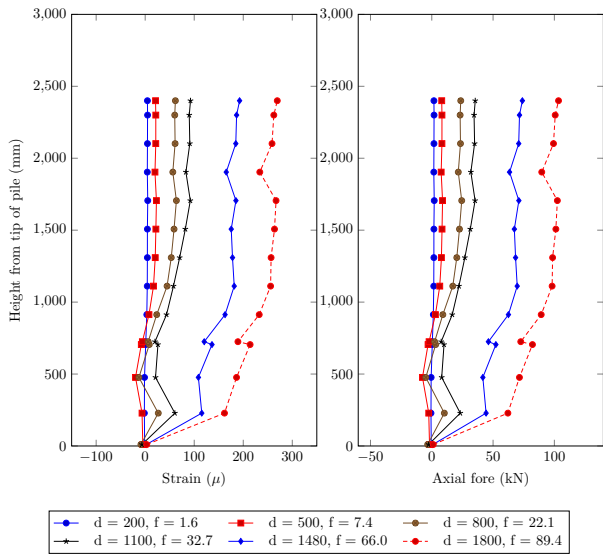


図-22 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (STR 01)

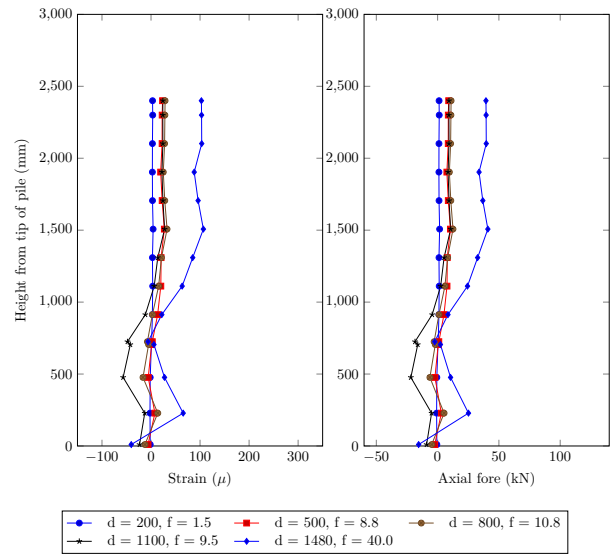


図-23 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (STR 02)

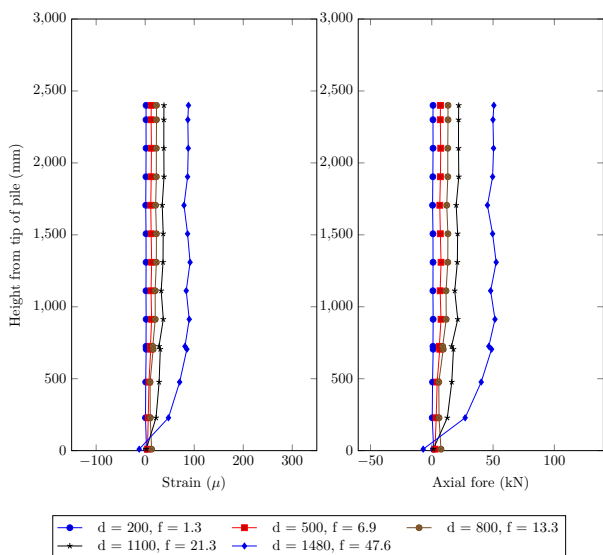


図-24 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (STR 03)

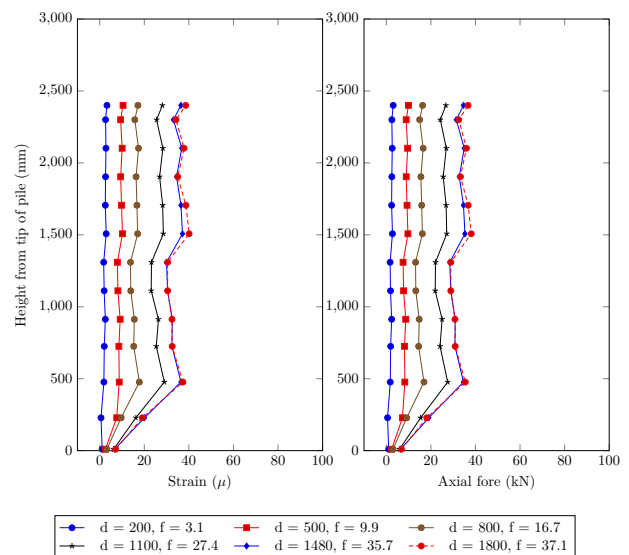


図-25 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (STR 04)

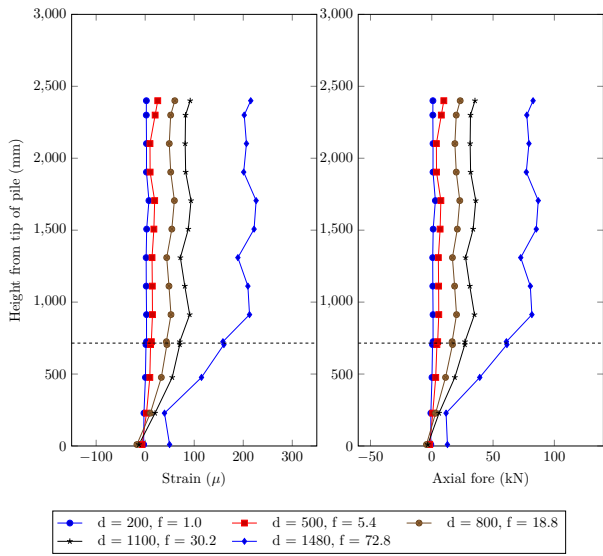


図-26 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 01)

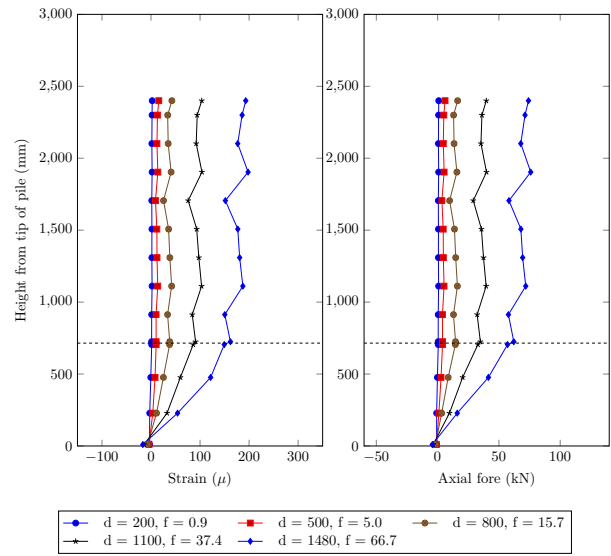


図-27 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 02)

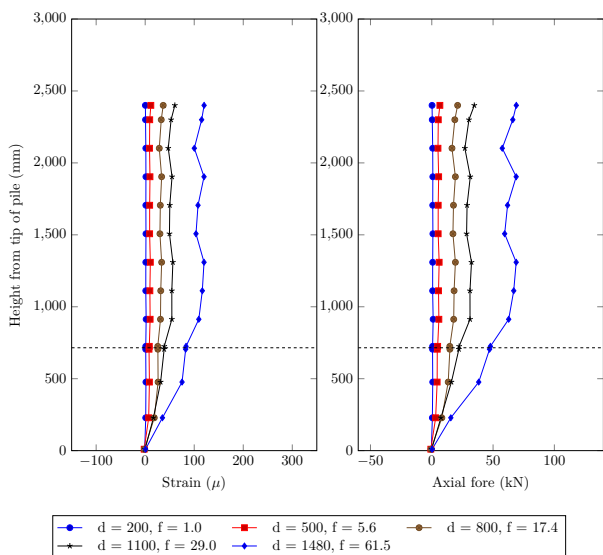


図-28 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 03)

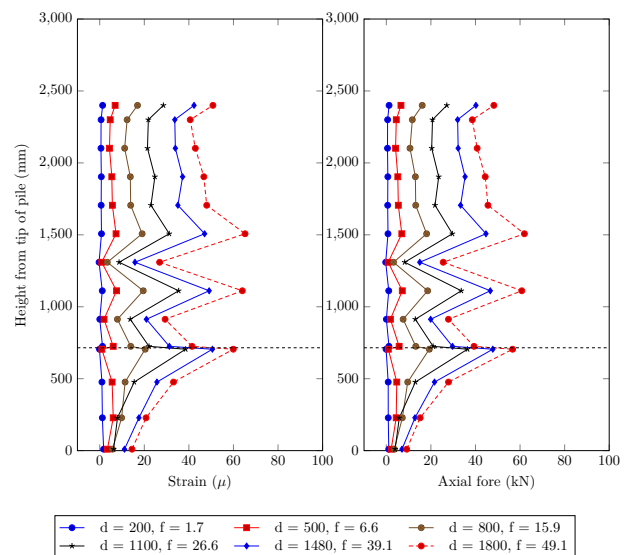


図-29 貫入試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 04)

## 3.2 杭の載荷試験

### 3.2.1 杭内部の砂吸引に伴う支持力の変化

図-30 で、STR01 の砂吸引前後の支持力を比較する。本ケースでは、1900 mm 程度貫入後に載荷試験を実施し、さらにその後砂を吸引し、再度載荷試験を行っている。図から分かるように、砂の吸引後は支持力が大きく低下している。一方、テーパ杭（図-31）では、2 割程度の支持力低下は見られるものの、ストレート杭のような顕著な支持力低下は見られない。杭内の地表面の変位に着目すると、ストレート杭、テーパ杭ともに地盤面が上昇しており、先端閉塞が確実に解消されていることがわかる。このことから、ストレート杭は杭の先端閉塞に支持力が大きく依存する一方で、テーパ杭は杭内部に侵入した砂は支持力にほとんど寄与していないことがわかる。また、吸引前の TPR01 の杭内地盤変位を見ると、杭頭変位とおおよそ同じ分だけ地盤面が低下しており、STR01 と比べても地盤面の低下が顕著である。テーパ杭の場合、杭先端から侵入する砂の体積が小さいため、地盤面は必然的に低下する傾向にあるが、それ以上に地盤面が低下していることから、テーパ杭においても先端閉塞が生じている可能性がある。

図-32 と図-33 に、杭の貫入中に杭内部の砂を吸引したケース（STR/TPR 02）と吸引しないケース（STR/TPR 03）の比較を示す。図より、ストレート杭は杭内部の砂を吸引したケースで支持力が著しく低下しているが、テーパ杭ではそのような低下は見られない。杭内部の砂を吸引すると強制的に杭先端の閉塞が解消されるため、杭内周面の摩擦抵抗力はもはや期待できない。そのような状況下であっても、ほとんど支持力が低下しないということから、テーパ杭は押し広げ効果に伴う外周面の抵抗で支持力を発揮していることがわかる。

### 3.2.2 載荷試験時の土圧変化

STR03, TPR03 のケースでは、貫入中の地盤内の土圧変化と杭に作用する土圧を計測している。しかし、繰り返しになるが、これらのケースでは土圧計の杭への固定が不十分であり、土圧計を正しく計測することができなかった（図-34, 図-35）。

図-36 および図-37 に、STR03 と TPR03 を改善したケース STR04 と TPR04 の載荷試験結果を示す。特にテーパ杭のケースで変動値が大きい結果となっているが、テーパ杭の外側の土圧計はストレート杭と比べて大きな値を示していることから、テーパ杭は閉塞ではなく周辺地盤を押し広げることで支持力を発揮していることがわかる。また、杭内側の土圧計については、先端の D1 の土圧計がストレート杭だけでなく、テーパ杭においても大きな値を示している。これは、図-31 において、杭頭変位と同程度杭内地盤が低下していることから、先端閉塞が生じている可能性があるという考察と一致する結果といえる。

### 3.2.3 杭のひずみ・軸力分布

図-38-47 にひずみ・軸力分布を示す。図の  $d$  (mm) は杭頭変位、 $f$  (kN) はその時の杭頭荷重である。全てのケースにおいて、軸圧縮力は杭頭から杭先端にかけて徐々に減少している。特にテーパ杭では、テーパ部（杭下端から 715 mm の高さまで）はストレート部に比べて顕著な軸力低下が見られることから、その形状により押し広げ効果が発揮されていることが推察される。STR02 のケース（図-40）では、ひずみが引張り側に働くような不自然な挙動が見られる。STR02 は砂を吸引しているケースであるため、吸引による何らかの影響が働いている可能性もあるが、その点については更なる検証が必要である。これらの傾向は、貫入時においても同様に見られた（3.1.4）。

## 4. おわりに

本研究では、ストレート杭とテーパ杭の支持力特性の違いについて、大型模型実験を実施して検証した。実験では、杭の貫入過程から載荷試験までの一連の実験をストレート杭およびテーパ杭について行うとともに、杭の荷重-変位関係、杭体に貼り付けたひずみゲージ、土圧計等で計測されたデータについて整理した。また、より直接的に先端閉塞が及ぼす支持力への影響を検証することを目的として、杭貫入過程において杭内部の砂を吸引し、強制的に閉塞を解消させる実験を行った。実験の結果、ストレート杭は杭の先端閉塞に支持力が大きく依存する一方、テーパ杭はテーパ部の押し広げ効果により支持力が発揮されるという、既往の研究成果に一致する結果が得られた。さらに、テーパ杭は貫入中に杭内部に侵入した砂を吸引しても、支持力にほとんど影響を与えないという結果が得られたことから、ストレート杭が先端閉塞が生じないような条件下では、テーパ杭の方が支持力を効率的に得られる可能性がある。また、不確定要素である杭の先端閉塞を支持力推定の際に除外できる可能性が示唆されたことから、本研究は今後の支持力推定法の確立に大きく役立つものと考えられる。

(2021 年 11 月 5 日受付)

## 参考文献

- 1) Samuel G Paikowsky, Robert V Whitman, and Mohsen M Baligh. A new look at the phenomenon of offshore pile plugging. *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 8, No. 3, pp. 213–230, 1989.
- 2) Antony De Nicola and MF Randolph. The plugging behaviour of driven and jacked piles in sand. *Geotechnique*, Vol. 47, No. 4, pp. 841–856, 1997.
- 3) 菊池喜昭, 佐藤宇紘, 森川嘉之. 開端杭貫入時の杭先端周辺地盤の変形挙動の観察. 港湾空港技術研究所資料, No. 1177, 2008.
- 4) Lichen Li, Wenbing Wu, M Hesham El Naggar, Guox-

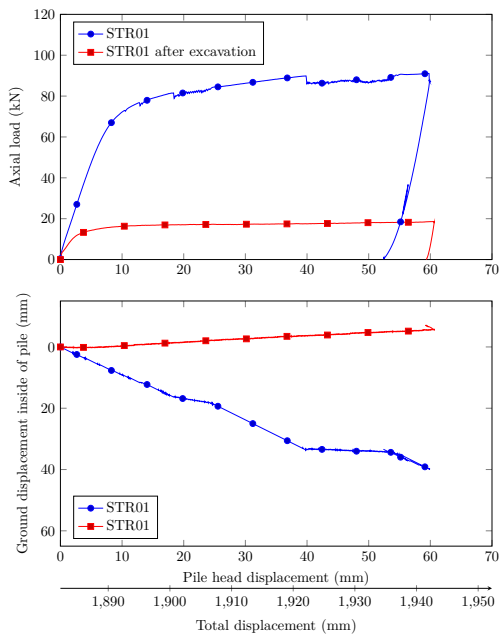


図-30 鉛直載荷実験時の杭頭変位-杭頭荷重，杭頭変位-杭内地盤変位関係：STR01 の砂吸引前後の比較

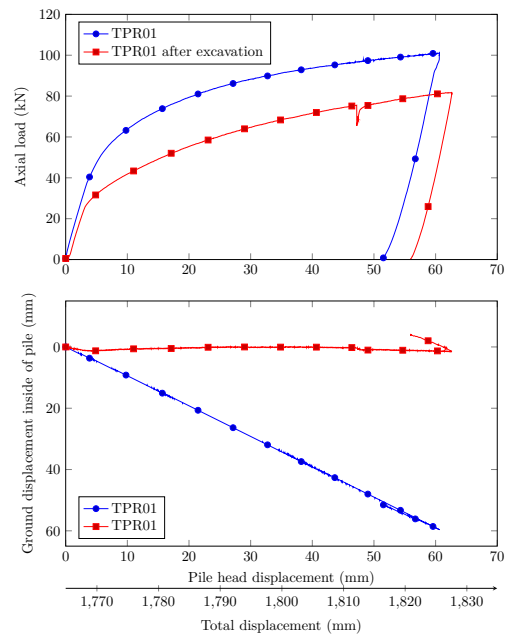


図-31 鉛直載荷実験時の杭頭変位-杭頭荷重，杭頭変位-杭内地盤変位関係：TPR01 の砂吸引前後の比較

iong Mei, and Rongzhu Liang. Dem analysis of the sand plug behavior during the installation process of open-ended pile. *Computers and Geotechnics*, Vol. 109, pp. 23–33, 2019.

- 5) 佐々木隆光, 末政直晃, 橋爪秀夫中村和之. テーパー杭の支持力特性に関する研究. 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002.
- 6) 佐々木隆光, 末政直晃, 橋爪秀夫中村和之. テーパー杭の鉛直支持力に関する研究. 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003.
- 7) 中村圭太, 元水佑介, 松村聡, 水谷崇亮, 新谷聡, 大下英治, 末政直晃. 開端杭の引抜き抵抗に及ぼす施工過程と杭形状の影響に関する模型実験. 港湾空港技術研究所資料, No. 1364, 2019.

## 謝辞

本研究では，東京都市大学の伊藤和也先生，田中剛先生，株式会社シーズエンジニアリングの西村真二氏から貴重な御助言を頂きました。また，株式会社ジオデザインには実験に協力して頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

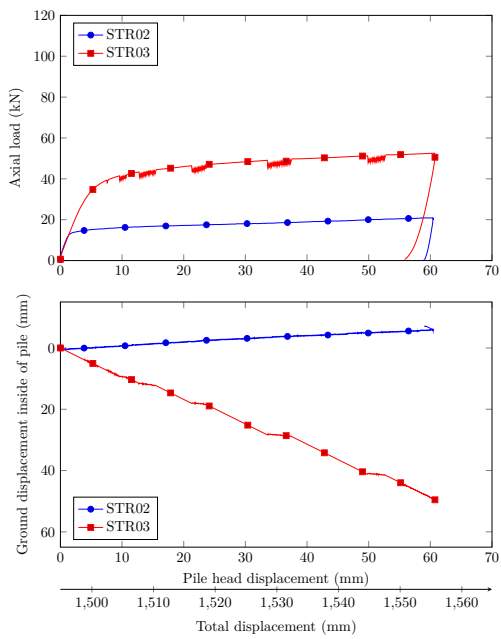


図-32 鉛直載荷実験時の杭頭変位-杭頭荷重，杭頭変位-杭内地盤変位関係：STR02-03 の比較

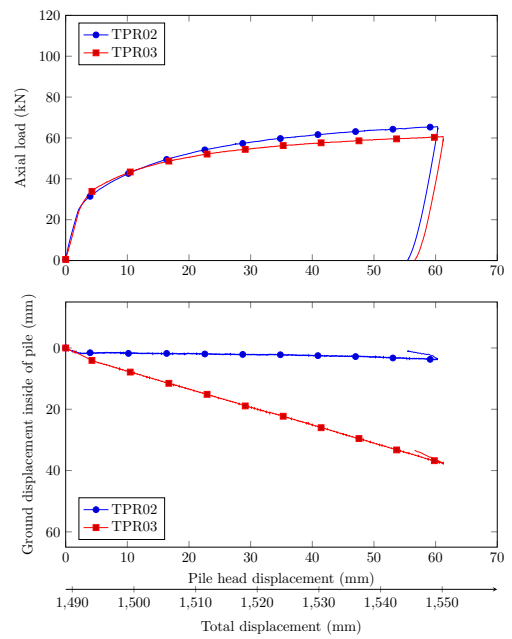


図-33 鉛直載荷実験時の杭頭変位-杭頭荷重，杭頭変位-杭内地盤変位関係：TPR02-03 の比較

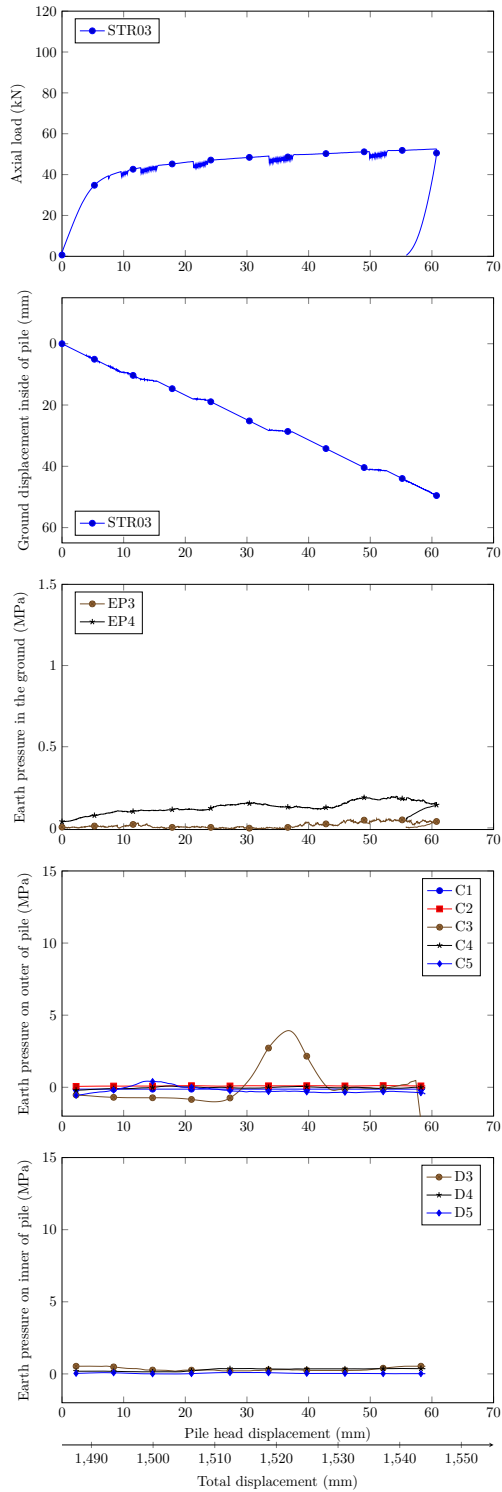


图-34 鉛直載荷試験：STR03

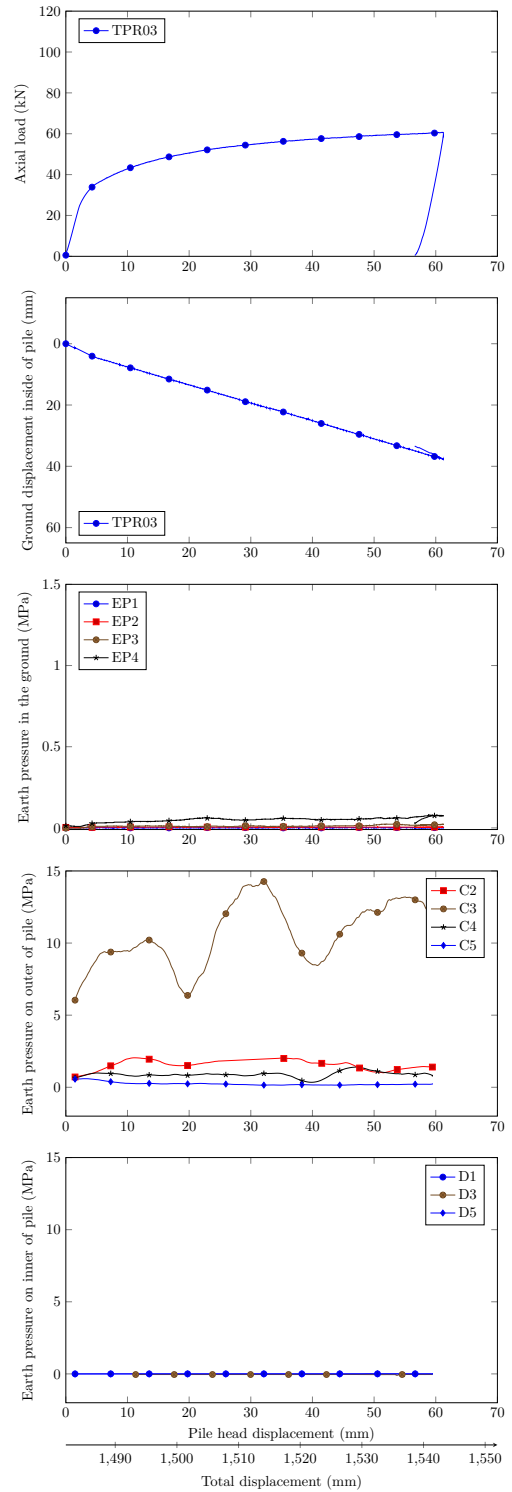


图-35 鉛直載荷試験：TPR03



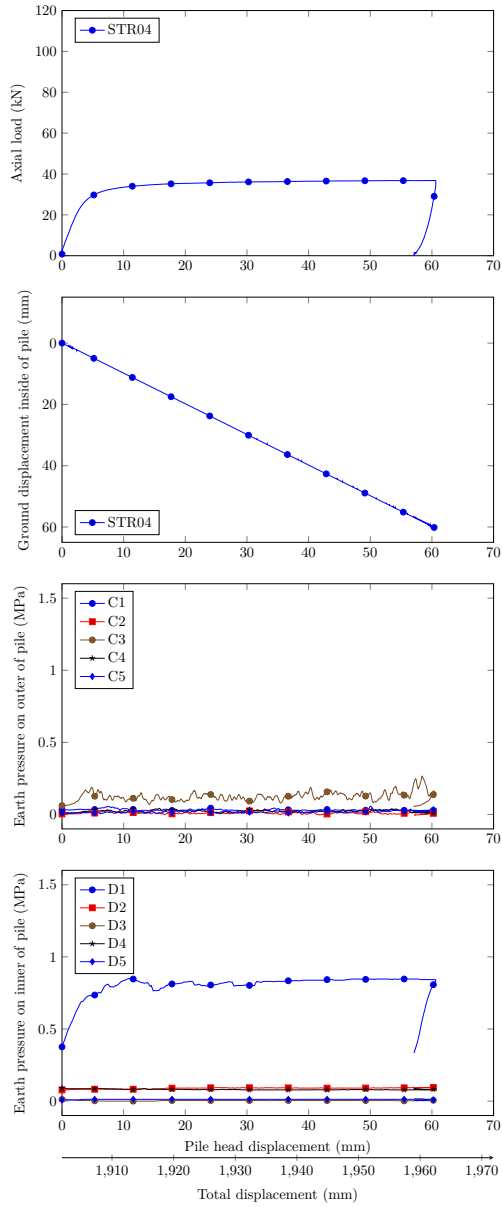


図-36 鉛直載荷試験：STR04

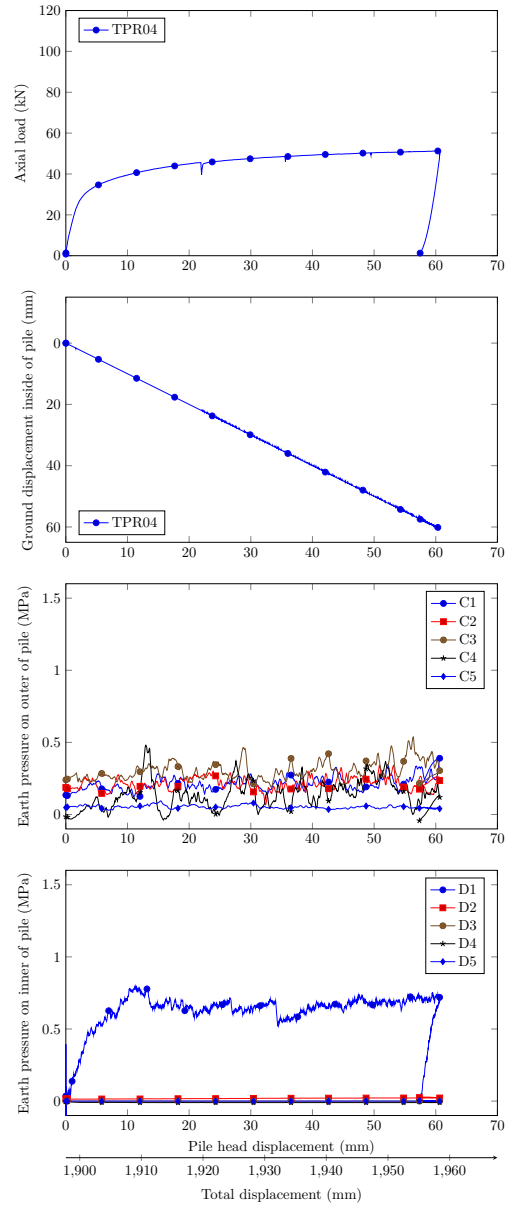


図-37 鉛直載荷試験：TPR04

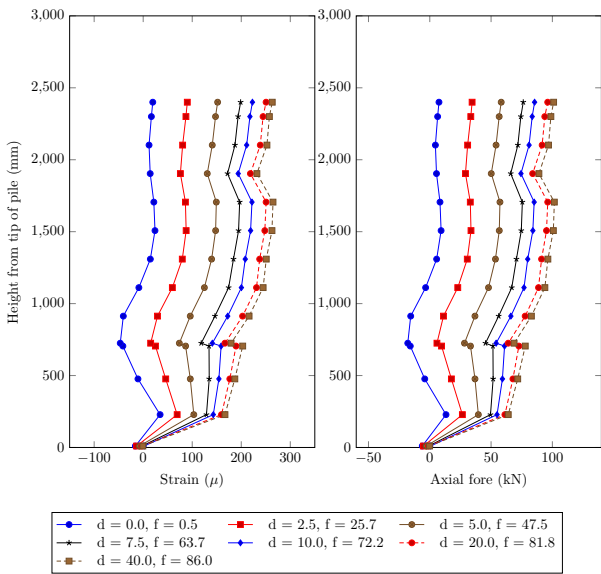


図-38 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (STR 01)

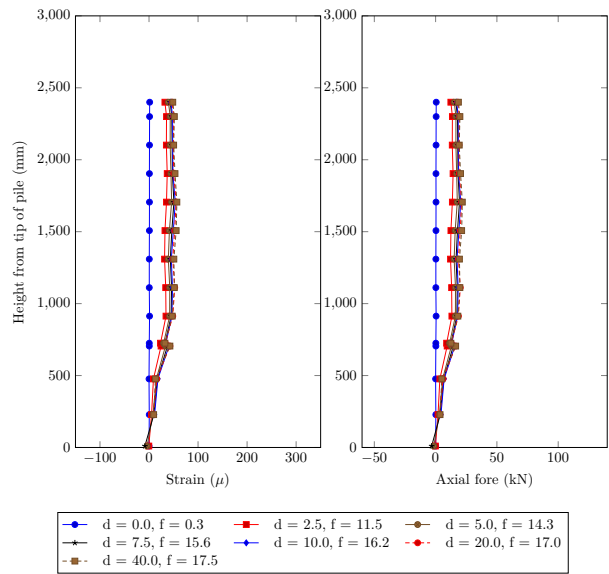


図-39 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (STR 01 砂吸引後)

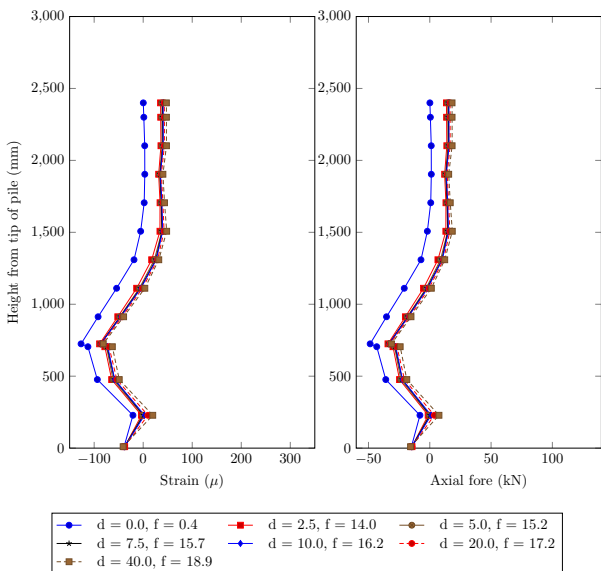


図-40 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (STR 02)

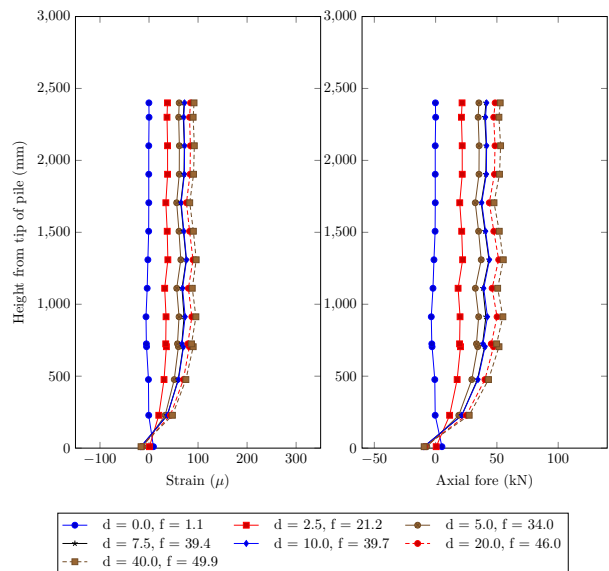


図-41 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (STR 03)

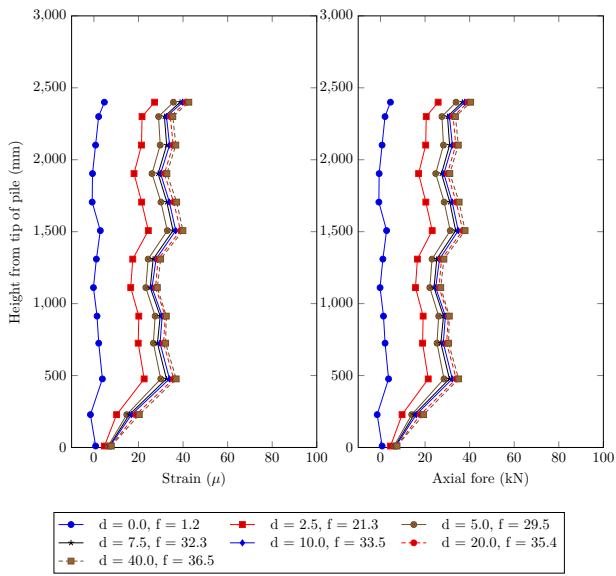


図-42 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (STR 04)

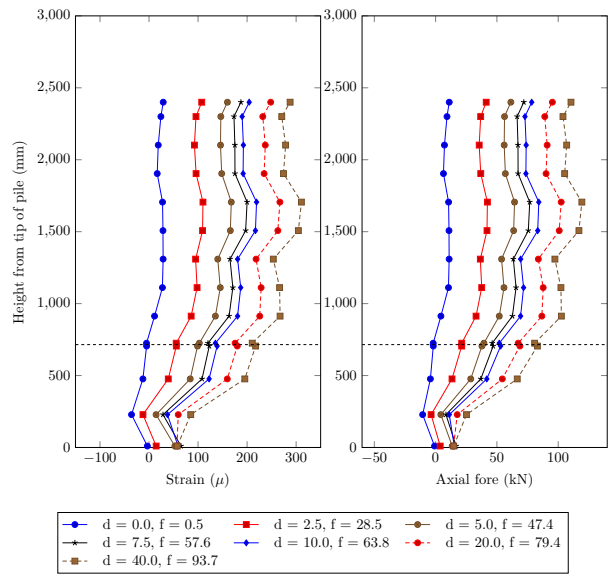


図-43 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 01)

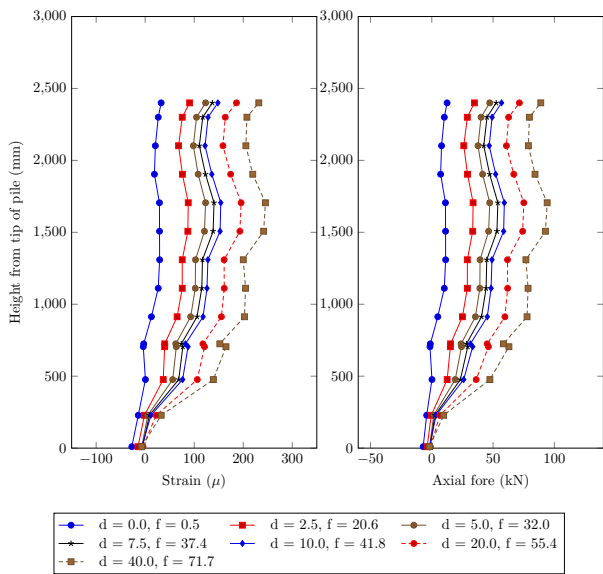


図-44 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 01 砂吸引後)

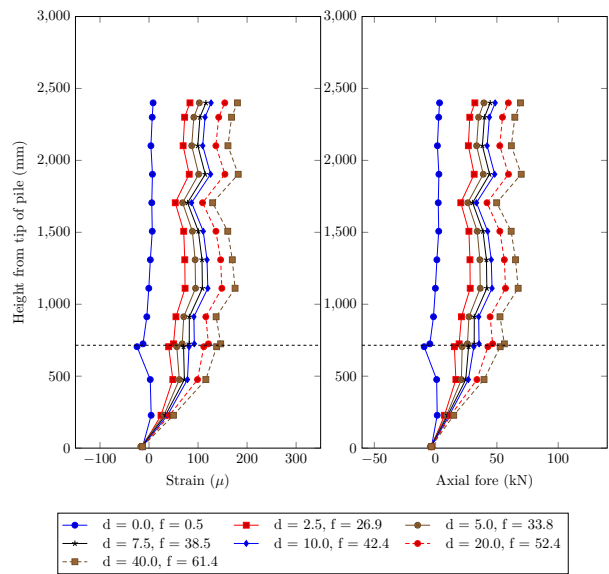


図-45 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 02)

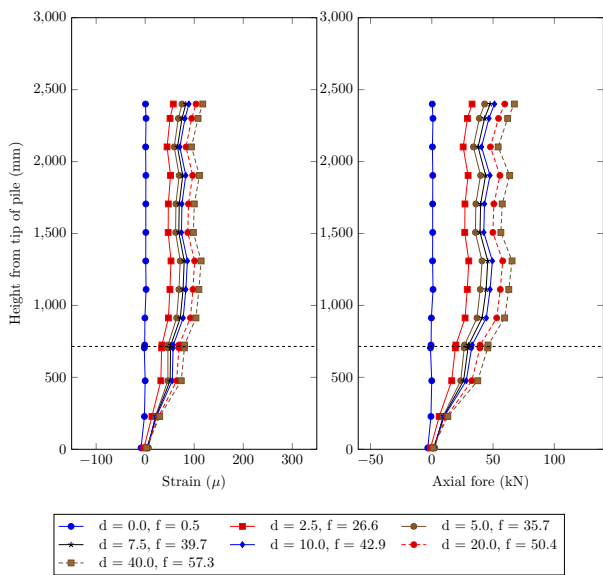


図-46 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 03)

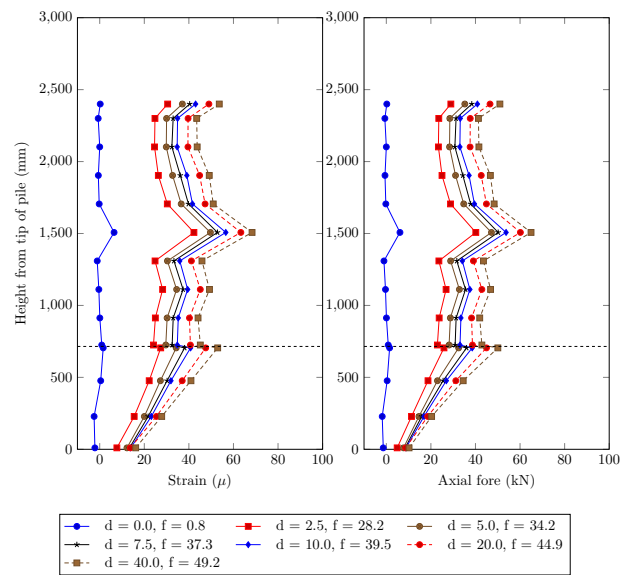


図-47 荷重試験：ひずみ・軸力分布 (TPR 04)

港湾空港技術研究所資料 No.1391

2021. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 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/>

Copyright © (2021) by MPAT

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

この資料は、海上・港湾・航空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、複写は海上・港湾・航空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。