

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1364 November 2019

開端杭の引抜き抵抗力に及ぼす施工過程と杭形状の影響に関する模型実験

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

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. まえがき	4
2. 実験概要	4
2.1 実験施設および模型杭	4
2.2 模型地盤条件および実験ケース	6
2.3 杭の貫入実験条件	9
2.3 載荷試験条件	11
3. 実験結果および考察	14
3.1 静的押込みによる杭の貫入実験	14
3.2 衝撃打込みによる杭の貫入実験	19
3.3 押込み試験	19
3.4 引抜き試験	27
3.5 水平載荷試験	34
4. まとめ	35
5. おわりに	36
参考文献	36
謝辞	36
付録	37

Model test for effect of installation process and shape of piles on pullout resistance of open-ended piles

Keita Nakamura*
Yusuke Motomizu***
Satoshi Matsumura*
Takaaki Mizutani**
Satoshi Shingai***
Eiji Oshita***
Naoaki Suemasa****

Synopsis

For open-ended pile foundations of port and harbor facilities, the design depending on the pullout resistance of piles does not tend to be adopted as rapid failure of structures is concerned. In order to construct and improve facilities more efficiently, proper evaluation of the pullout capacity is necessary. Although model tests are widely accepted to investigate the characteristics of piles in the ground, there are few such experiments focused on the pullout behavior for now. Therefore, in this research, model tests for pullout of piles are conducted by using a large soil tank (width of 6m; length of 3m; depth of 3m) and open-ended piles with diameter of 150mm and length of 3000mm.

In the experiments, we focus on the effect of installation process (penetration process into the ground) and shape of piles on pullout resistance. As the characteristics of pullout resistance would be changed by the deformation of the ground during the installation process, we prepare two kinds of piles that (1) do not disturb surrounding ground by placing in advance before setup of the ground and (2) penetrate into the ground for the installation process. For piles of (2), there are further two kinds of way such that static and dynamic penetration. For shape of piles, in addition to straight piles which are normally used in practice, tapered piles of which diameter decreases toward the tip are prepared. To investigate the difference of bearing capacity between these two shapes of piles, the static axial compressive load test and the lateral load test are also performed.

According to the results of these model tests, the pullout resistance is different depending on whether penetration process is performed or not. For example, the pullout resistance of the pile with penetration process is larger than that without penetration process. For the difference in characteristics of shapes of piles, the plugged effect is observed for the straight pile but not for the tapered pile.

Key Words: Pullout resistance, bearing capacity, tapered pile, penetration test, loading test,
model test

* Researcher, Foundation Group, Geotechnical Engineering Department

** Head, Foundation Group, Geotechnical Engineering Department

*** Rinkai Nissan Construction Co.,Ltd.

**** Department of Urban and Civil Engineering, Tokyo City University

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

Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail: nakamura-ke@p.mpat.go.jp

開端杭の引抜き抵抗力に及ぼす施工過程と杭形状の影響に関する 模型実験

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****

要 旨

これまで、港湾施設の杭基礎について、技術基準には引抜き抵抗の設計法や安全率等が記述されているものの、構造物の急激な破壊が懸念されることから、引抜き抵抗をあまり期待しない設計をしてきた。実験により杭の引抜き抵抗特性を調べる際は模型実験が有効であるが、大掛かりな実験となることから、杭の引抜き抵抗力に着目した実験データは少ないのが現状である。そこで本研究では、幅 6m、奥行き 3m、深さ 3m の大型土槽と、杭径 150mm、杭長 3000mm の杭を用いて杭の引抜き模型実験を行った。

実験では、杭の引抜き抵抗力に及ぼす施工過程（地盤への貫入過程）と杭の形状の影響に着目した。施工過程では、杭の貫入時の地盤の乱れに起因して杭の引抜き抵抗特性が変化することから、(1) 地盤作製前に事前に建込むことで周辺地盤を乱さない杭と (2) 実際に杭を地盤に施工する杭の 2 種類を用意し、(2) についてはさらに静的押込みと衝撃打込みの 2 つの貫入方法で実験を行なった。また、杭の形状については通常用いられるストレート杭に加えて、杭先端付近が細いテーパ形状の杭を用意した。両杭の支持力特性の違いを検証するために、引抜き試験のほか、押込み試験と水平載荷試験についても実施した。

実験の結果、杭の引抜き抵抗力はその施工過程の有無で大きく異なり、地盤作製前に建込みを行なった杭は、実際に地盤に貫入した杭に比べて引抜き抵抗力が過小評価されることがわかった。ストレート、テーパ杭の挙動については、特にその貫入過程において違いが見られた。従来多くの検討がなされてきたように、ストレート杭では杭の先端が詰まる先端閉塞現象の発現と破壊が交互に生じる様子が観測されたが、テーパ杭についてはそのような挙動は見られなかった。そこで、先端閉塞が全く生じず、杭内に侵入した土が圧縮も膨張もしないという仮定のもと、テーパ杭の杭内地盤高さに関する解析を行ったところ、解析結果は実験結果によく一致し、テーパ杭は先端閉塞現象が生じにくいことがわかった。

キーワード：引抜き抵抗力、支持力、テーパ杭、施工実験、載荷試験、大型模型実験

* 地盤研究領域 基礎工研究グループ研究官
** 地盤研究領域 基礎工研究グループ長
*** りんかい日産建設（株）
**** 東京都市大学 工学部 都市工学科

1. まえがき

これまで、港湾施設の杭基礎について、技術基準には引抜き抵抗の設計法や安全率等が記述されているものの、構造物の急激な破壊が懸念されることから、引抜き抵抗をあまり期待しない設計をしてきた。しかし、効率的な施設整備・改良のためには、杭の引抜き抵抗を期待する設計が必要となる。その他、近年注目されている着底式の洋上風力発電施設では、杭の支持力評価によって引抜き抵抗が不足するケースが多く見受けられる一方、施設の撤去を容易に行うためには引抜き抵抗が小さいほど有利であるなど、杭の引抜き挙動が問題となることが多い。

杭の模型実験を実施する際は、実験結果が地盤の拘束圧の影響を大きく受けることから、大型の土槽もしくは遠心場による模型実験によって十分な地盤の拘束応力が発揮される必要がある。しかし、遠心場で杭の施工過程を模擬することは技術的に困難な点が多いことや、大型の土槽を用いた場合は極めて大規模な実験となることから、杭の施工過程とその後の杭の引抜き抵抗特性に着目した実験データは少ない。

伊藤・井元（2014）は、杭径約50mmの小口径鋼管杭を用いて先端形状の違いが及ぼす引抜き抵抗特性を調べた。実験では、テーパーをつけた先端の尖った閉端杭、コーン付単管、単管の3種類を用いており、押込み試験と引抜き試験の両者において、閉端杭＞コーン付単管＞単管の順に大きな抵抗力を示した。また、コーン付単管はコーンの先が潰れていたことから、締め固め効果により極めて大きな拘束圧がかかることが報告されている。テーパー型の杭において先端が破損する例は、Bergen（2010）なども報告している。このようなテーパー杭の支持力に関する実験は、佐々木ら（2002, 2003）や佐藤ら（2010）も確認しており、Manandhar and Yasufuku（2013）やHironobu et al.（2015）は鉛直支持力の推定法について検討を行っている。

杭の支持力特性は、地盤条件だけでなく、その施工過程を考慮して評価されるのが望ましい。一般的に、杭施工過程、すなわち杭の貫入過程に伴い、地盤の力学特性は変化するため、その後の支持力特性にも大きな影響を与える。しかし、現状では先端閉塞などの研究（例えば、Paik et al., 2003; 菊池ら, 2008; Han et al., 2019）は多くなされており、その重要性が認識はされているものの、不明瞭な点が多いことから設計の際は地盤を処女地盤として扱う他ない。

そこで本研究では、幅6m、奥行き3m、深さ3mの大型土槽を用いて、杭径150mm、杭長3000mmの杭の引抜き抵抗力を杭の地盤への施工過程も含めて実験的に検討した。

杭の施工過程では、（1）地盤作製前に事前に建込むことで周辺地盤を乱さない杭と（2）実際に杭を地盤に施工する杭の2種類を用意し、（2）についてはさらに静的押込みと衝撃打込みの2つの貫入方法で実験を行なった。

また、杭の形状に着目し、通常用いられるストレート杭に加えて、杭先端付近が細いテーパー型の杭についても同様の実験を行い、両者を比較した。杭の形状による支持力特性の違いの検証として、引抜き試験のほか、押込み試験と水平載荷試験についても実施した。

2. 実験概要

本実験では、杭の引抜き抵抗力に及ぼす施工過程（地盤への貫入過程）と杭の形状の影響を調べることを目的として、杭の貫入過程から引抜き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なった。また、ストレートとテーパー杭の支持力特性の違いを検証するために、引抜き試験のほか、押込み試験と水平載荷試験についても実施した。杭の支持力特性は、各実験で得られた杭頭の変位および荷重、杭体に配置したひずみゲージにより評価した。

2.1 実験施設および模型杭

実験には、港湾空港技術研究所所有の大型土槽（幅6m、長さ3m、深さ3m）を用いた。模型杭は、鋼材SS490を用いて作製した（材料定数は表-1）。図-1に杭の寸法の定義、表-2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。表中の l_1 および l_2 については2.2節で述べる。本実験では、テーパー部の長さ l_3 、ストレート部の直径 D_1 、杭先端部の直径 D_2 をもって、テーパーの度合いを表現するものとし、テーパー角 θ は次式より算出した。

$$\theta = \arctan\left(\frac{D_1 - D_2}{2l_3}\right) \quad (1)$$

図-2には、ひずみゲージの貼付け位置を示している。図にあるように、一部は杭の内周面にもひずみゲージを貼り付けている。これらのひずみゲージの校正は、模型杭を真空中で軸圧縮することにより行った。

杭の軸方向ひずみ ε は、与えた軸力を 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。

$$\varepsilon = \frac{F}{EA} \quad (2)$$

テーパー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ことから、テーパー杭における式(2)の適用性は、有限要素法を用いて確認した。有限要素解析では、杭を線形

弾性体（材料定数は表-1）と仮定し、図-3に示すように軸対称問題の2次元断面として解いている。

一例として、杭頭に鉛直下向きに $F = 15$ kNを与えた場合の有限要素解析結果を図-4に示す。図には、有限要素解析により得られた杭の内側と外側の要素における軸ひずみとそれらの平均値をプロットしている。解析ではストレートとテーパの境界、および杭下端において、曲げが生じることにより局所的に大きなひずみが生じているが、その平均はおおよそ式(2)による結果と一致している。以上より、本実験では式(2)を用いてひずみゲージの校正係数を算出する方法を採用した。キャリブレーションの際に得られたひずみの生値を ε_{cal} とすれば、 $\varepsilon/\varepsilon_{cal}$ がひずみゲージの校正係数である。データ整理の際には、各ひずみゲージにそれぞれ校正係数を乗じた値を用いている。なお、気中での軸圧縮によるキャリブレーションの結果、杭先端に配置したひずみゲージについては、弾性的な線形の挙動が確認できなかったため、実験データ整理の際には除いている。

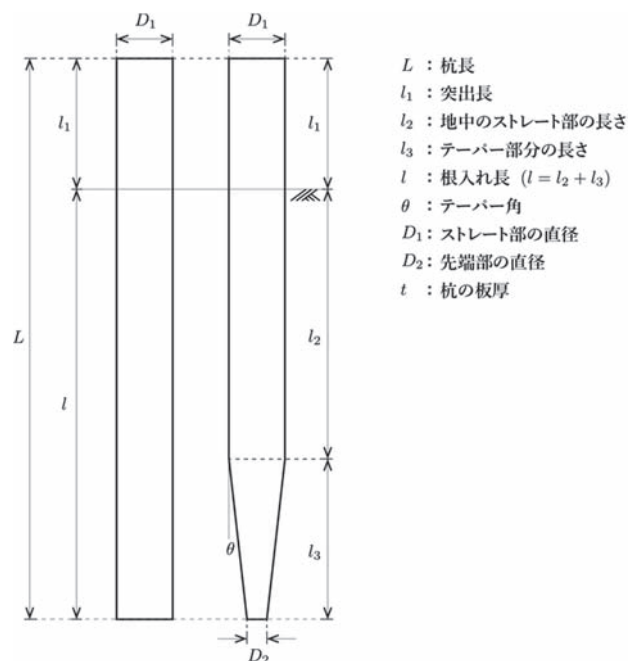


図-1 杭の寸法の定義

表-1 模型杭に用いた鋼材SS490の諸元

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

表-2 押込み・引抜き・水平載荷試験時のストレート、テーパ杭の寸法（値の括弧は押込み試験時）

項目	ストレート	テーパ
D_1 (mm)	150	150
D_2 (mm)	150	100
t (mm)	2	2
L (mm)	3,000	3,000
l_1 (mm)	700 (1,000)	700 (1,000)
l_2 (mm)	2,300 (2,000)	1,585 (1,285)
l_3 (mm)	0	715
θ (°)	0	2

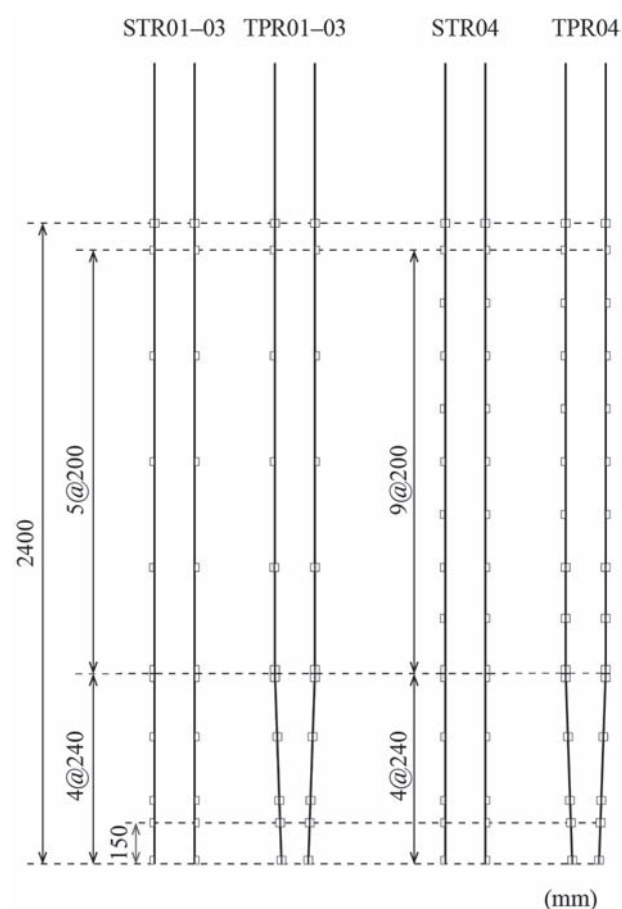


図-2 ひずみゲージ位置

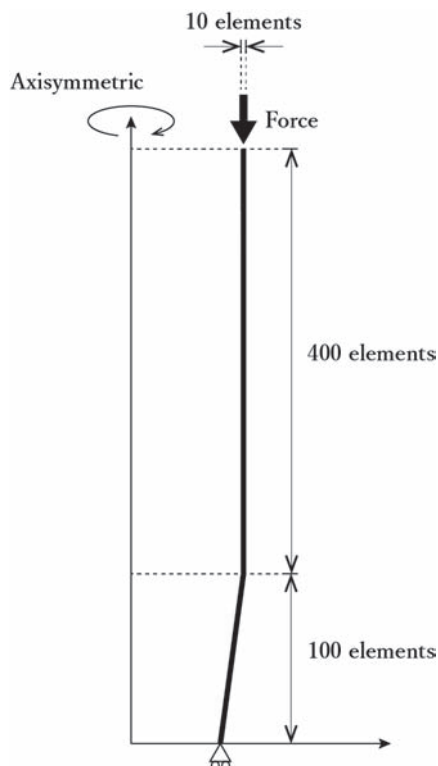


図-3 有限要素法用いた軸対称問題

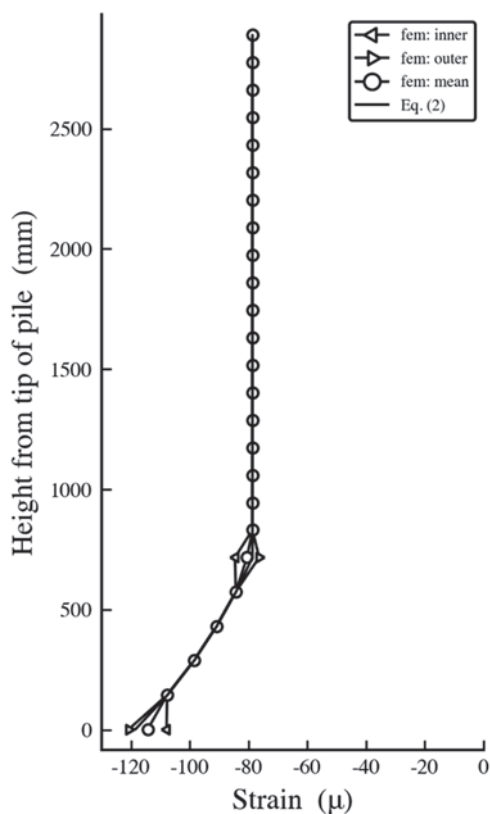


図-4 テーパー杭の軸圧縮問題のひずみ分布

表-3 相馬硅砂4号の物性値

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

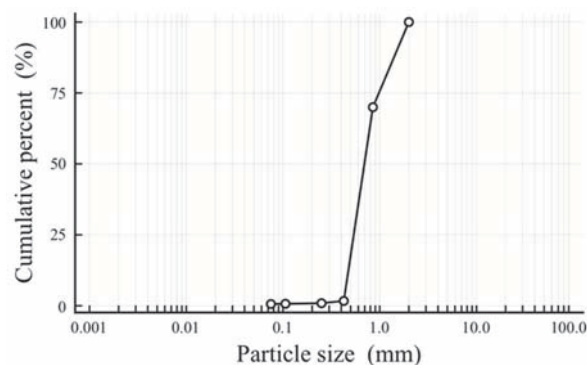


図-5 相馬硅砂4号の粒径加積曲線

2.2 模型地盤条件および実験ケース

地盤試料は相馬硅砂4号（物性値および粒径加積曲線はそれぞれ表-3，図-5）で，相対密度60%を目標として空中落下法により深さ2,800mmの地盤を作製した．地盤作製完了後の模型地盤全体の平均相対密度は，57.82%であった．

表-4に示すように，実験ケースは杭の形状，貫入方法，載荷試験の種類から，計8ケースとしている．実験の主な手順は，(1) 杭の貫入実験，(2) 押込み試験，(3) 引抜き試験または水平載荷試験となっており，各ケース一本ずつ (1) ～ (3) の一連の実験および試験を実施した．

STR01，TPR01は地盤作製前に杭を建込む（杭先端深さは2,300mm）ことで，周辺地盤を乱していない杭とした．これは，他の静的押込みや衝撃打込みによる貫入実験ケースと引抜き抵抗特性を比較することを目的としている．

表-4の(2') 貫入深さの調節は，貫入実験を行うケースにおいて，引抜きまたは水平載荷試験時の杭の貫入深さを2,300mmで揃えるためである．この際の貫入方法は，押込み試験がその後の試験に与える影響を少なくするために，(1) で行なった杭の貫入実験と同様の方法としている．

事前建込み杭 (STR01，TPR02)，静的押込み杭 (STR02，TPR02)，衝撃打込み杭 (STR03，TPR03) の3種類は，杭の地盤への貫入方法が及ぼす引抜き抵抗特性の違いを調べることを目的としている．

ストレート杭とテーパー杭の支持力特性の違いを検証するために，引抜き試験に加えて，押込み試験，水平載荷試験も実施した．押込み試験は杭の載荷方向が貫入実験

時と同じであることから、その後の引抜き試験、水平載荷試験への影響が小さいと考え、別途試験ケースを設けるのではなく、杭の貫入実験後（2,000mm貫入後）に行うこととした。水平載荷試験については、別途ケース04を用意した。

以上のそれぞれの杭の土槽内での配置は、図-6のようになる。なお、図-6における杭の貫入深さは、(3) 引抜き試験または水平載荷試験の直前の状態を示している。また、参考として写真-1に地盤作製後の土槽を示す。

表-4 実験ケースおよび実験フロー（STR:ストレート，TPR:テーパー）

	(1)貫入実験	(2)押込み試験 (2')貫入深さ調整	(3)引抜き/水平载荷試験
模式図	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> 载荷速度 10mm/min 载荷速度 2mm/min </div>		
STR01 TPR01	なし	なし	引抜き試験
STR02 TPR02	静的押込み貫入	あり	引抜き試験
STR03 TPR03	打撃打込み貫入	あり	引抜き試験
STR04 TPR04	静的押込み貫入	あり	水平载荷試験

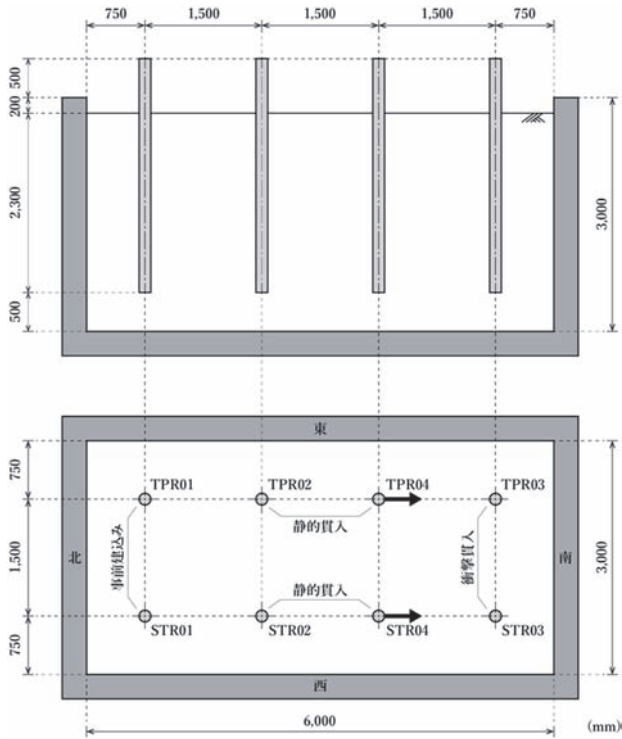


図-6 模型土槽および杭の配置 (矢印は水平載荷方向)

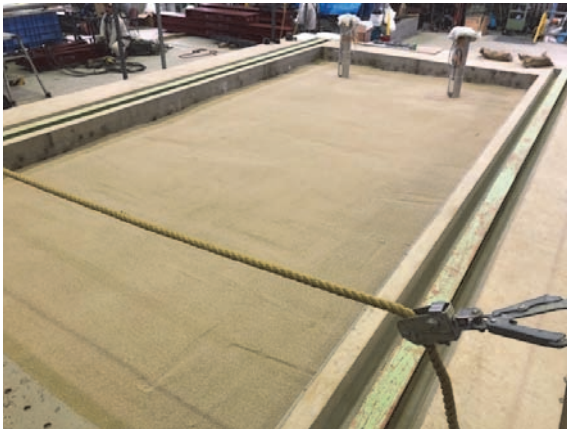


写真-1 地盤作製後の土槽

2.3 杭の貫入実験条件

杭の施工過程では、杭の貫入時の地盤の乱れに起因して杭の引抜き抵抗特性が変化することから、(1) 地盤作製前に事前に建込むことで周辺地盤を乱さない杭と (2) 実際に杭を地盤に施工する杭の2種類を用意し、(2) についてはさらに静的押込みと衝撃打込みの2つの貫入方法で実験を行なった。

(1) 事前建込み

建込み杭は、深さ500mmの地盤を作製後に杭を土槽内

に設置し (写真-2)、その後砂を再度投入し周辺地盤を作製した (写真-3)。なお、杭内は周辺地盤と同様に相対密度60%で砂を充填した。本実験ケースでは、周辺地盤を乱さず処女地盤と同等の条件で杭を配置できるため、他の実際に地盤に杭を貫入する方法と引抜き抵抗特性を比較する際に有用である。

(2) 静的押込みによる貫入

静的押込みによる杭の地盤への貫入は、貫入速度10mm/minの変位制御で行った (写真-4)。載荷装置はスクリージャッキを用いており、そのストローク等の制約から、400mm, 300mm, 400mm, 400mm, 400mm, 100mmの順で計2000mmを段階的に貫入しており、各ストローク間で一度除荷し、再度貫入する手順を取っている。計測は、杭頭鉛直変位4箇所 (90度ごと、定格容量2000mmのワイヤー変位計)、杭頭荷重 (定格容量100kNの引張圧縮両用型ロードセル)、杭内地盤変位 (定格容量2000mmのワイヤー変位計)、杭体のひずみについて行なっている (図-7)。荷重計と載荷装置は剛結せず、単純に鉛直下向きに載荷させた。杭頭変位は杭の半径方向に260mmの位置で行っており、データ整理の際は4点の変位の平均値を用いている。

(3) 衝撃打込みによる貫入

100kgの重錘を杭頭からの高さ100mmで自由落下させることで衝撃を与え、計2000mm貫入した (写真-5)。計測は、重錘落下後に、杭頭鉛直変位4箇所 (90度ごと、定格容量2000mmのワイヤー変位計)、杭内地盤変位 (先端に錘をつけた水糸の長さを測定)、杭体のひずみについて行なっている (図-8)。ここで杭内地盤変位については、衝撃によりワイヤー変位計を用いた杭内地盤変位の測定 (例えば図-7) が困難であるため水糸を代用し、衝撃载荷毎に計測した。杭頭変位は杭の半径方向に450mmの位置で行っており、データ整理の際は4点の変位の平均値を用いている。



写真-2 杭の建込み (STR01, TPR01)



写真-4 静的押込みによる杭の貫入の様子



写真-3 地盤材料の再投入

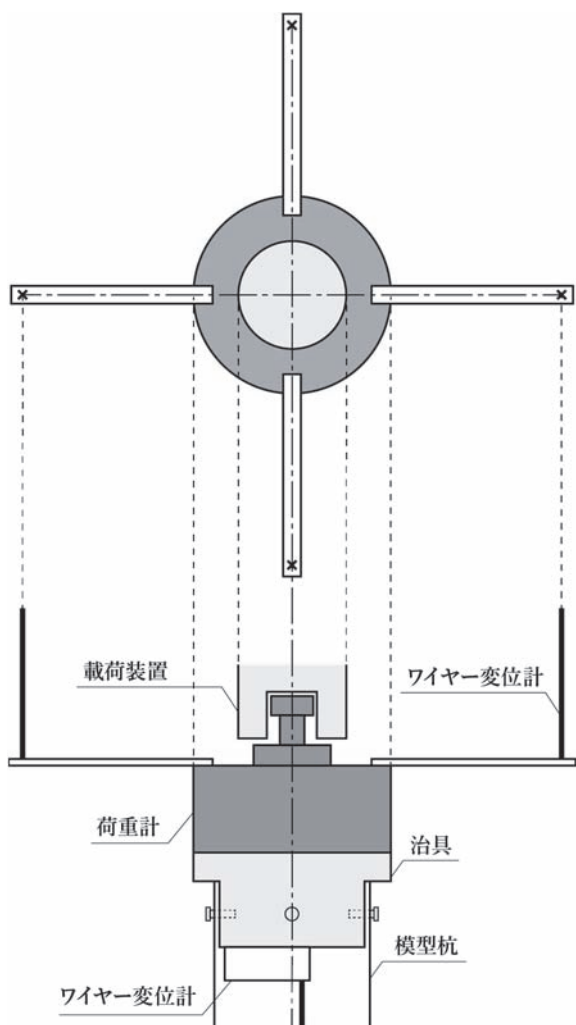


図-7 静的押込みによる杭貫入時の治具の概略図

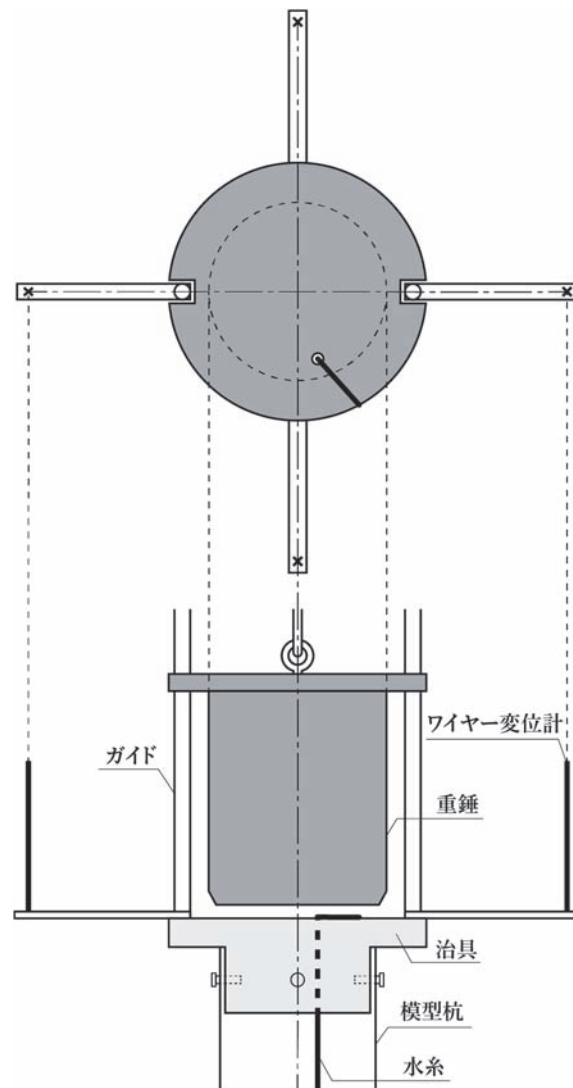


図-8 衝撃打込みによる杭貫入時の治具の概略図

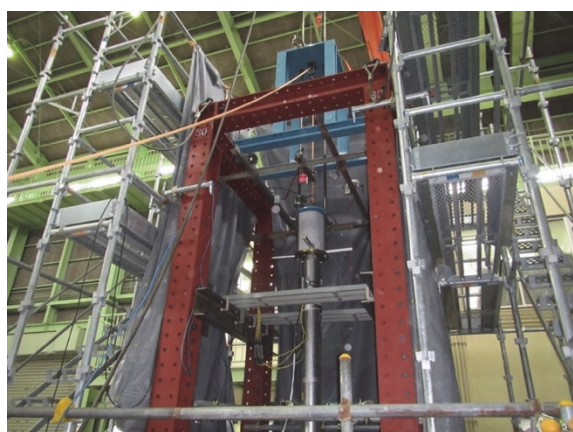


写真-5 衝撃打込みによる杭の貫入の様子

2.4 载荷試験条件

杭の载荷試験は、(1) 押込み試験、(2) 引抜き試験、(3) 水平载荷試験の3種類である。

(1) 押込み試験

载荷は载荷速度 2mm/min の変位制御で、静的押込みによる貫入時と同様のスクリージャッキを用いて行った(写真-6)。計測は、杭頭鉛直変位4箇所(90度ごと、定格容量 100mm の変位計)、杭頭荷重(定格容量 100kN の引張圧縮両用型ロードセル)、杭内地盤変位(定格容量 2000mm のワイヤー変位計)、杭体のひずみについて行なっている(図-9)。静的押込みによる杭貫入時と同様に、荷重計と载荷装置は剛結せず、単純に鉛直下向きに载荷させた。杭頭変位は杭の半径方向に 260mm の位置で行なっており、データ整理の際は4点の変位の平均値を用いている。

(2) 引抜き試験

引抜き速度2mm/minの変位制御で、静的押込みによる杭の貫入実験および押込み試験と同様のスクリージャッキを用いて行なった(写真-7)。計測は、杭頭鉛直変位4箇所(90度ごと、定格容量100mmの変位計)、杭頭荷重(定格容量20kNの引張圧縮両用型ロードセル)、杭内地盤変位(定格容量2000mmのワイヤー変位計)、杭体のひずみについて行なった(図-10)。杭頭変位は杭の半径方向に260mmの位置で行なっており、データ整理の際は4点の変位の平均値を用いている。

(3) 水平載荷試験

杭頭から鉛直下方向に100mmの位置を載荷位置とし、載荷速度2mm/minの変位制御で行う(写真-8)。実験では、スクリージャッキを水平方向に設置することで水平荷重を与えた。計測は、杭頭水平変位2箇所(載荷位置から上下150mm、定格容量100mmの変位計)、杭頭水平荷重(定格容量20kNの引張圧縮両用型ロードセル)、杭体のひずみについて行なった(図-11)。杭頭水平変位は、データ整理の際は平均値を用いている。

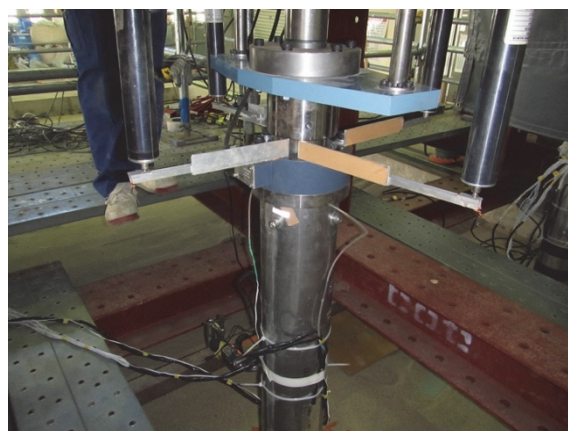


写真-6 押込み試験時の様子

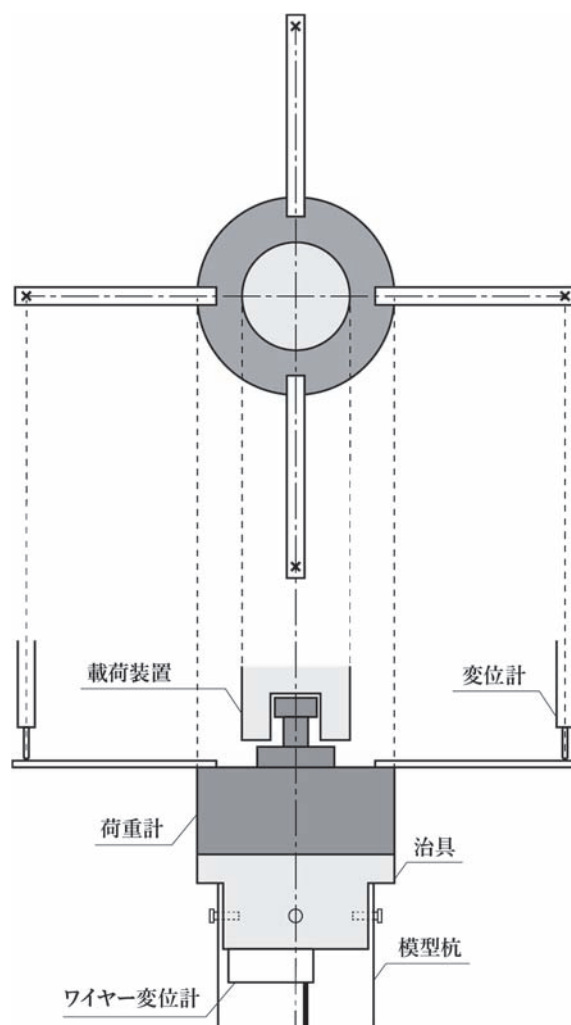


図-9 押込み試験時の治具の概略図

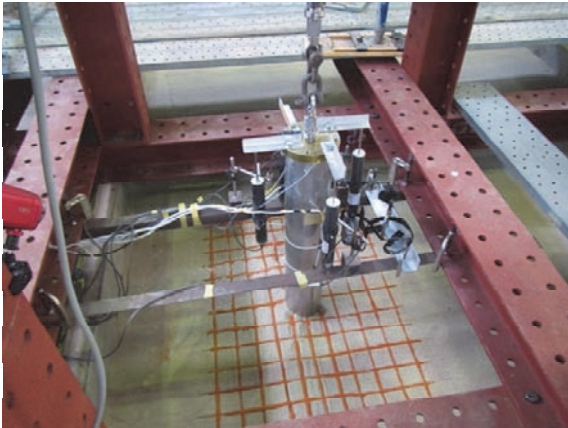


写真-7 引抜き試験時の様子

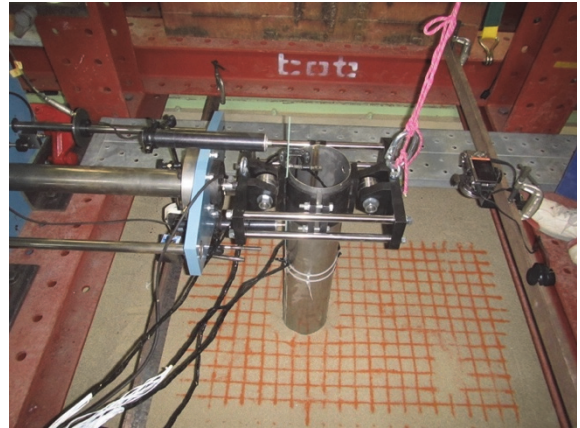


写真-8 水平載荷試験時の様子

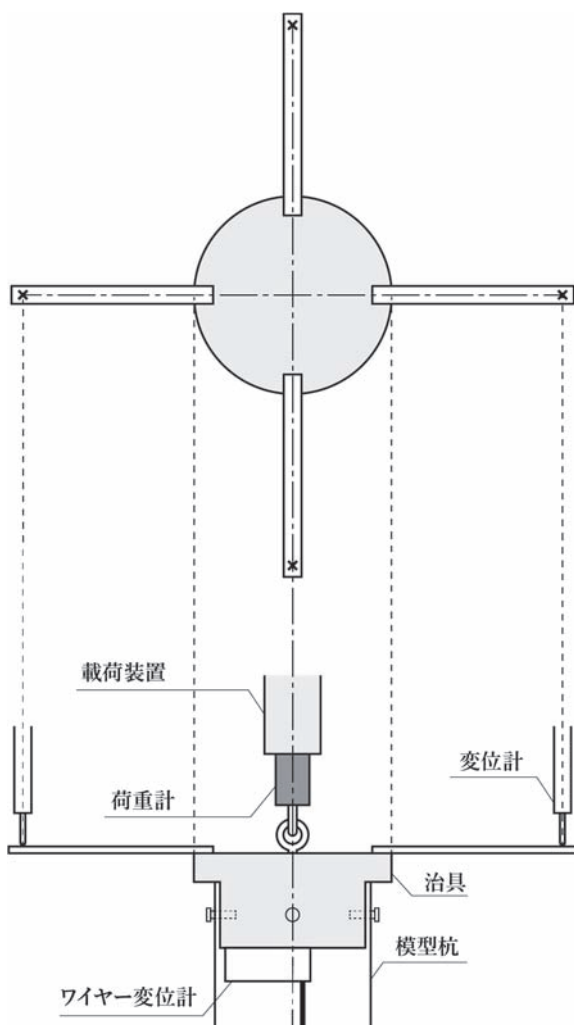


図-10 引抜き試験時の治具の概略図

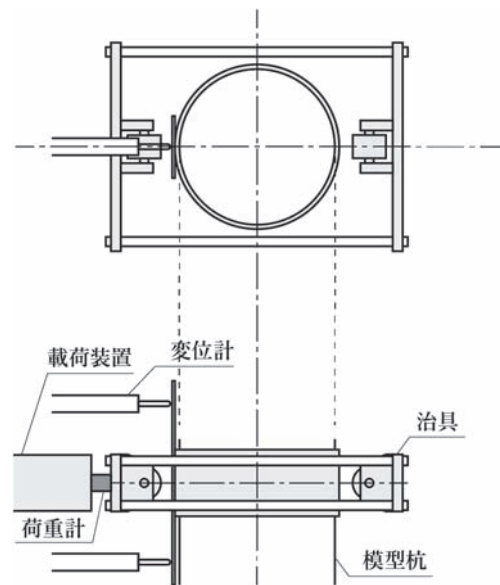


図-11 水平載荷試験時の治具の概略図

3. 実験結果および考察

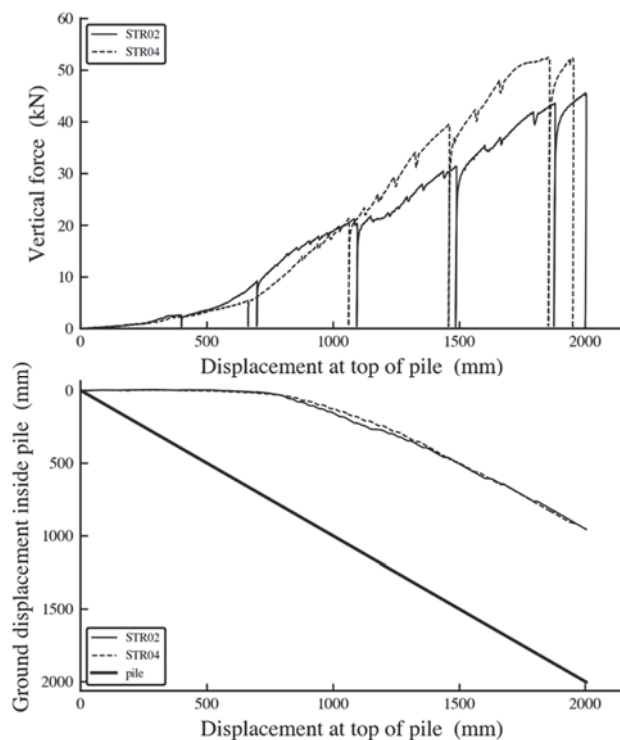
3.1 静的押込みによる杭の貫入実験

本節では、静的押込みによる杭の貫入実験結果を示す。杭頭の4箇所の変位は、データ整理の際は平均値を用いている。ひずみゲージについては、気中で杭頭から吊り下げている状態でゼロセットを行い、鉛直方向に同じ位置にあるひずみゲージについては、その平均値を用いることとした。気中で杭を吊り下げている際も杭の自重によりひずみは発生するが、最大でも1~2 μ 程度のごく微小なひずみであるため、データ整理の際は無視している。

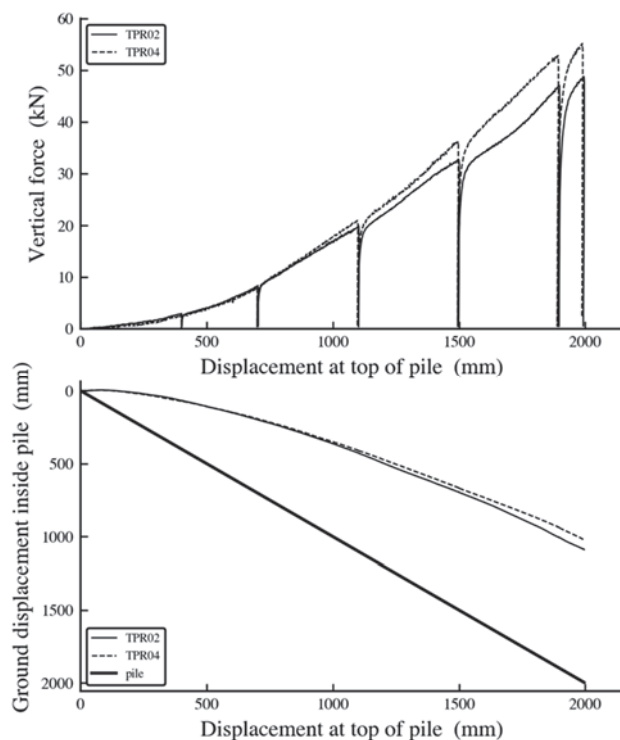
(1) 実験の再現性

静的押込みによる杭の貫入実験の再現性確認のため、図-12にSTR02-STR04, TPR02-TPR04の杭頭の変位-荷重関係と杭頭変位-杭内地盤変位を示す。荷重が除荷されているのは、载荷装置を盛り替える際に一度除荷しているためである(2.3節参照)。杭内地盤変位は初期地盤高さからの変位であり、変化量が正の場合は杭内の地盤が下がっていることを示す。図中のpileは杭頭変位を示しており、杭が変位した量と同じ分だけ杭内地盤も変位した場合は、両者は同じ傾きとなり完全に杭先端が閉塞していることを示す(図-13)。

図-12の荷重-変位関係を見ると、最大荷重にしておよそ10%程度の違いが生じていることがわかる。しかし、STR02-STR04, TPR02-TPR04ともにケース02に比べケース04の方が大きな荷重となっていることから、地盤密度のバラツキが原因である可能性が高い。実際、模型地盤(図-6)は東西方向に段階的に作製しているため(付録A参照)、その影響が大きいと推察される。



(a) STR02-STR04



(b) TPR02-TPR04

図-12 静的押込みによる杭の貫入実験の再現性

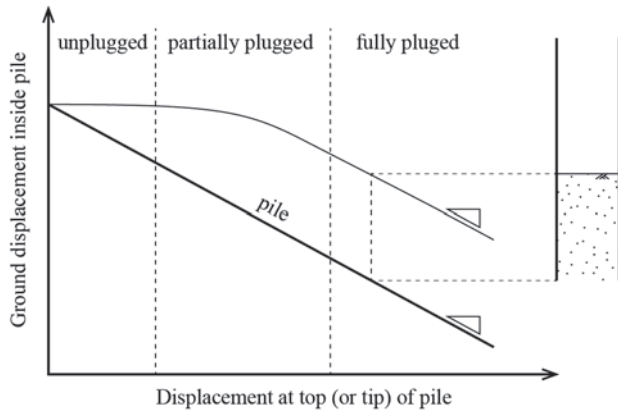


図-13 杭頭変位-杭内地盤変位関係のグラフの見方

(2) ストレートとテーパの違い

STR02-TPR02とSTR04-TPR04の比較を図-14に示す。図より、最大荷重あるいは定量的な観点では両者に大きな違いは見られないが、ストレート杭は細かく荷重が変動している。荷重が低下しているときは、杭内地盤変位がほぼ横ばいとなっていることから、杭内の先端閉塞が破壊したことが原因であると推察される。一方、テーパ杭ではこのような現象は見られず、滑らかな変位-荷重結果が得られている。テーパ杭は先端が最も細く、杭頭に向かってしなやかに杭内の断面積が徐々に増加する形状である。そのため、杭内に侵入した地盤にかかる拘束が緩められる傾向にあり、結果として先端閉塞が生じにくいと考えられる。

(3) 杭の先端閉塞現象

杭の先端閉塞現象についてさらに詳しく考察する。杭の先端の鉛直下向き変位を h とすると、先端閉塞が全く生じない場合テーパ杭の内部に侵入する土の体積は次式となる。

$$V_{in}(h) = \frac{\pi D_2^2}{4} h \quad (2)$$

一方、杭の先端からの高さを H とすると、杭先端から高さ H までのテーパ杭の体積は以下のように表される。

$$V(H) = \begin{cases} \int_0^H \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_1 - D_2}{l_3} z + D_2 \right)^2 dz, & H \leq l_3 \\ V(l_3) + \frac{\pi D_1^2}{4} (H - l_3), & H > l_3 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、杭内に侵入した土が圧縮も膨張もせず、先端閉塞しないと仮定すると、 $V_{in} = V$ より、杭の鉛直変位 h に対する杭先端からの高さ H が得られる（図-15）。計算では、 H に関する陽な形式での解が煩雑となることから、非線形

方程式

$$R(H; h) = V(H) - V_{in}(h) = 0 \quad (4)$$

を用いて、各 h に対する変位 H についてNewton法により求めている。なお、収束条件は、 $|R| < \text{TOL}$ で $\text{TOL} = 10^{-8}$ とした。また、ストレート杭（ $D_2 = D_1$ ）の場合は式(3)より $V(H)$ は

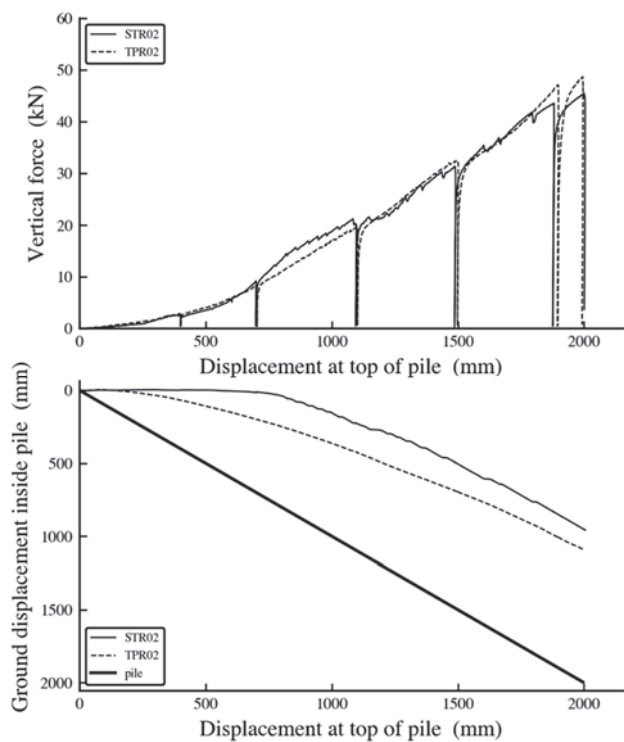
$$V(H) = \frac{\pi D_1^2}{4} H \quad (5)$$

となる。この場合、 $V_{in} = V$ より $H = h$ が得られるため、杭内の地盤は全く変位しないことになり、杭内に侵入した土が圧縮も膨張もせず、先端閉塞しないという仮定に一致する。

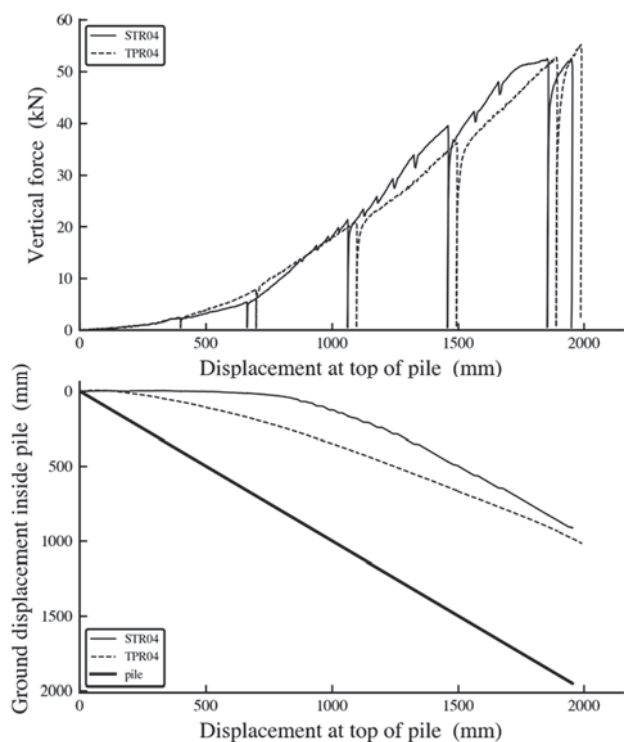
解析結果と実験結果との比較は図-16に示す。図より、解析結果は実験結果におおむねよく一致している。杭先端変位が1000mmを越えると、解析結果は実験結果に比べて杭内地盤変位が小さくなっており、徐々に先端閉塞現象が現れ始めていることがわかる。

(4) 杭のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

図-17に杭のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布を示す。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、周面摩擦力が働いていることがわかる。一方で、ストレート杭に比べてテーパ杭は、テーパ部（杭下端より715mmまで）において大きな周面抵抗力度が発揮されていることから、テーパ部にはより大きな拘束圧が働いていることがわかる。これは、後述する押込み試験においても同様の傾向が見られる（3.2節参照）。

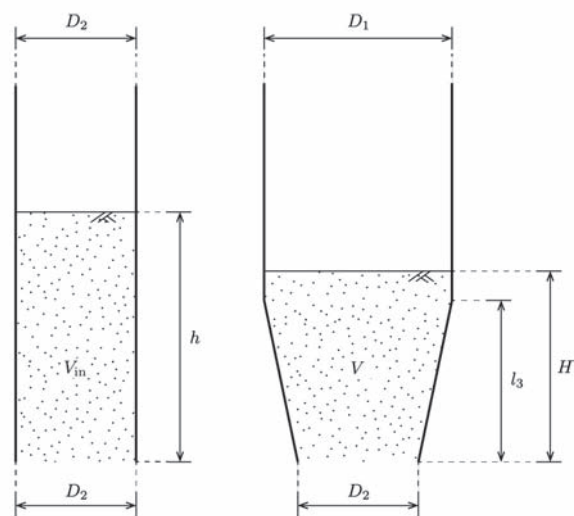


(a) STR02-TPR02



(b) STR04-TPR04

図-14 静的押込みによる杭の貫入実験のストレート杭とテーパー杭の比較



杭内に侵入する地盤の高さ 実際の杭内の地盤の高さ

図-15 テーパー杭内に侵入する地盤の高さ h と実際の杭内の地盤の高さ H の模式図

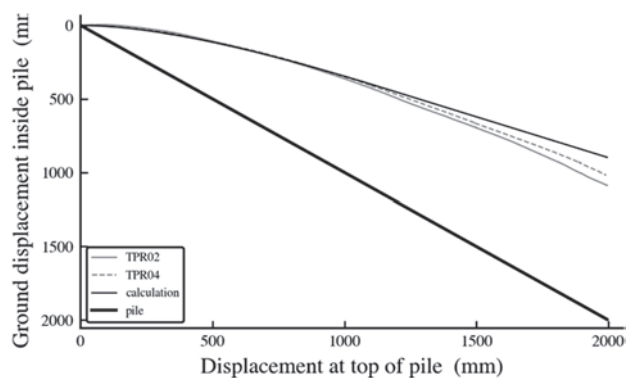
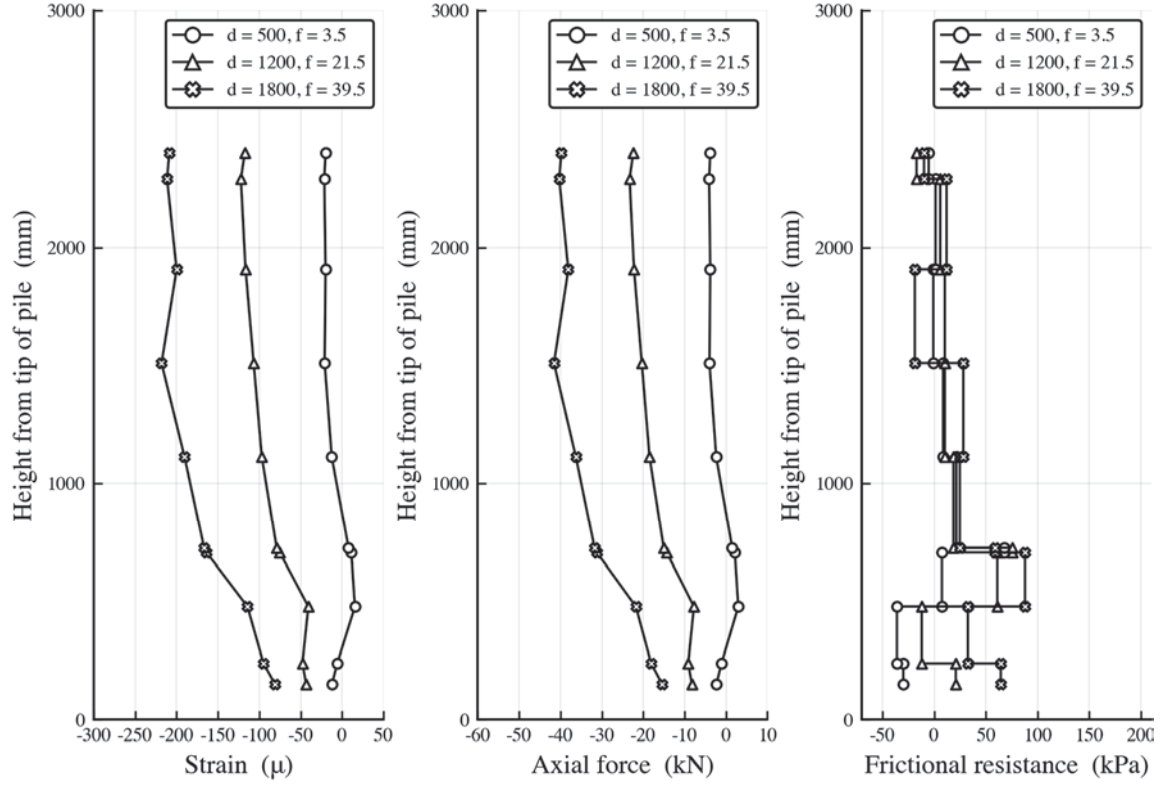
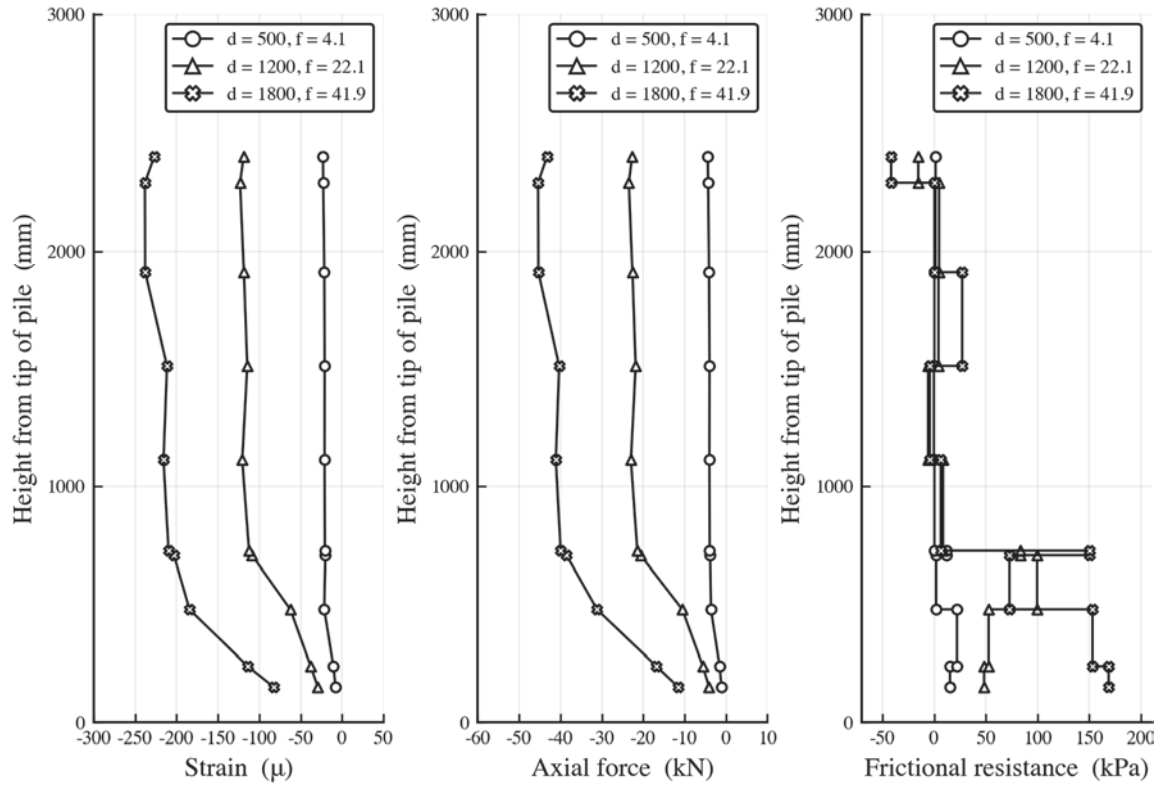


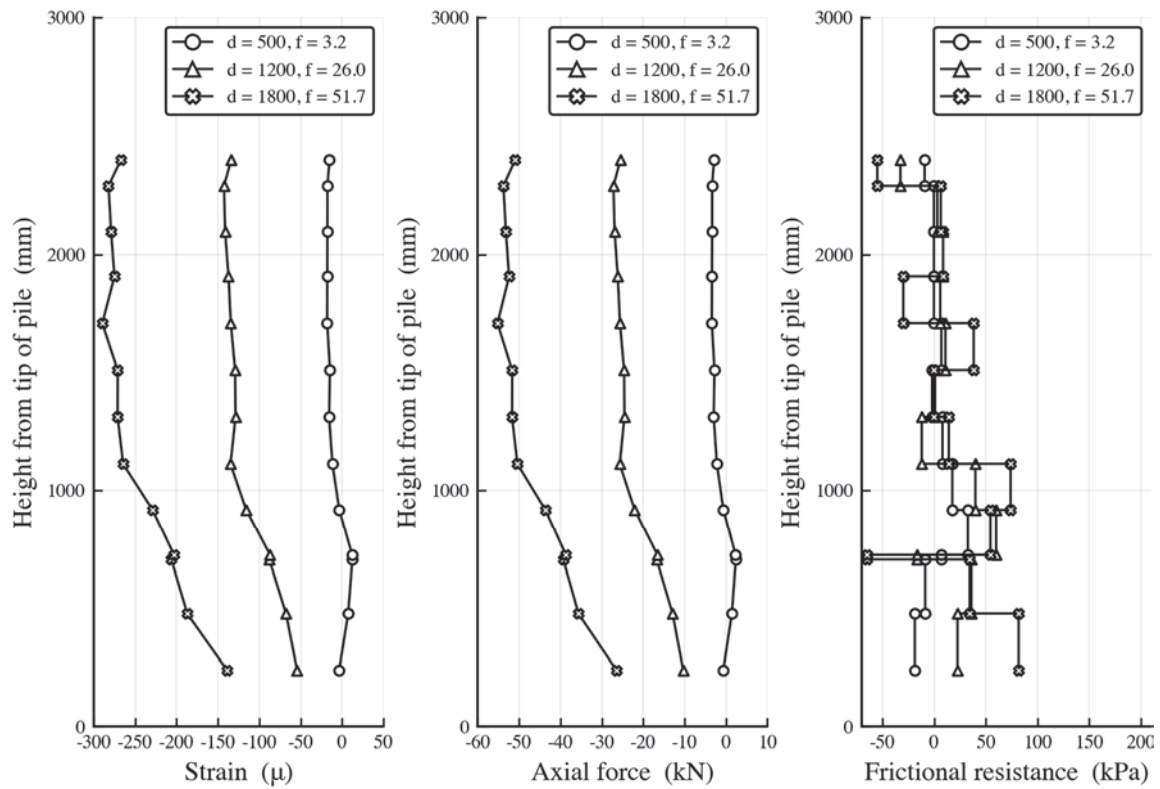
図-16 静的押込み貫入実験時のテーパー杭の杭内地盤変位の解析と実験結果の比較



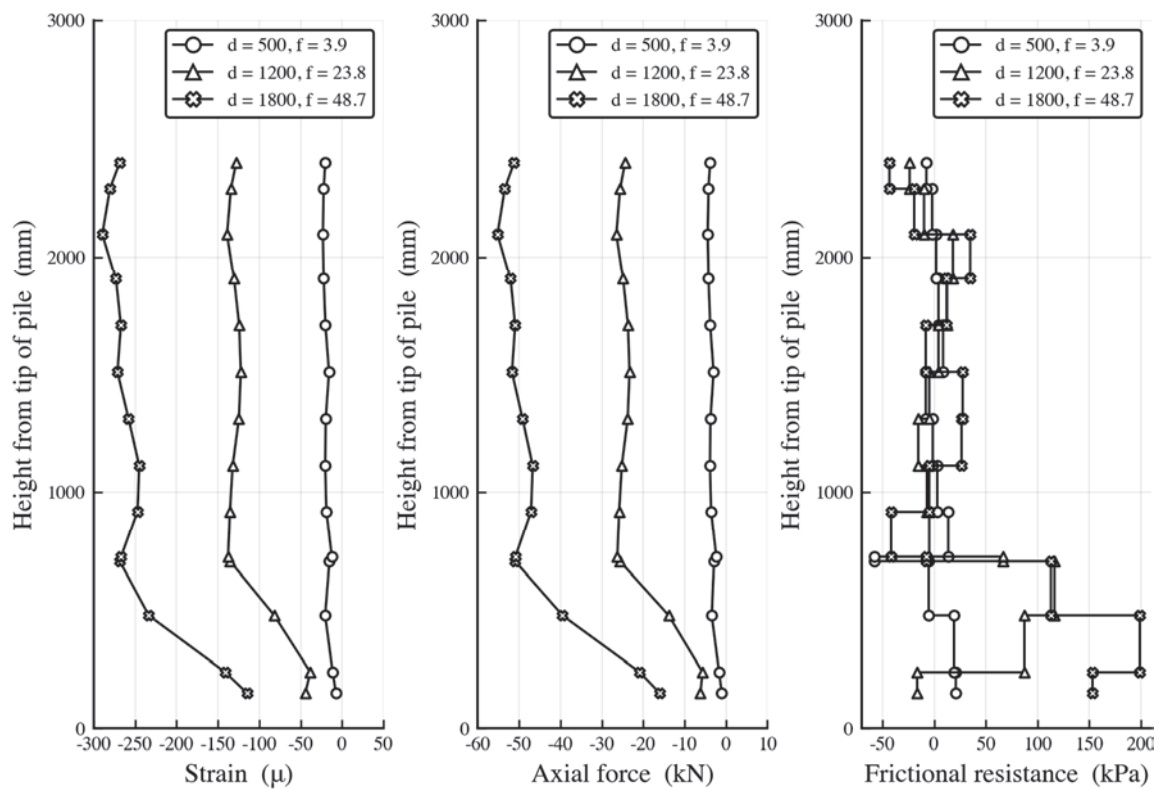
(a) STR02



(b) TPR02



(c) STR04



(d) TPR04

図-17 静的押込みによる杭の施工実験のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

3.2 衝撃打込みによる杭の貫入実験

(1) ストレート杭とテーパ杭の違い

図-18に衝撃打込みによる杭の施工の実験結果を示す。図の上段は杭頭の変位-载荷回数関係で、下段は杭頭変位-杭内地盤変位である。図より、貫入量が大きくなるにつれ貫入に必要な衝撃载荷回数が多くなっており、徐々に支持力が増加していることがわかる。杭内地盤変位については、静的押込みによる杭の貫入時（図-12）と比べると、ストレート杭はやや変位が小さく、テーパ杭はほぼ同様の変位を示している。

(2) 杭の先端閉塞現象

図-19に式(2)-(3)を用いた杭内地盤高さの解析結果と実験結果の比較を示す。図より、先端閉塞が全くせず、杭内に侵入した土が圧縮も膨張もしないという仮定のもとで行った計算と実験結果がよく一致していることから、杭の先端閉塞はあまり生じていないことが推察される。

しかしながら、後述する貫入実験後の押込み試験（節3.3）においては、杭の先端がほぼ閉塞している結果を示している。押込み試験は载荷速度が2mm/minであり、貫入実験時と比べてゆっくりと载荷しているため、杭から地盤への摩擦力がより伝わりやすく、結果として杭内の地盤変位と杭頭変位がほぼ同じ値となったと考えられる。

(3) 静的押込みによる杭の貫入との比較

図-20にそれぞれストレート杭とテーパ杭について、静的押込みと衝撃打込み時の杭内地盤変位の比較を示す。図-20(a)より、ストレート杭は衝撃打込みの方が静的押込みによる貫入に比べて、杭の先端が閉塞しにくい結果となった。テーパ杭も衝撃打込みの方がやや杭内地盤変位が小さく、先端閉塞が生じにくいことがわかる。

3.3 押込み試験

本節では、静的押込みによる杭の貫入実験結果を示す。杭頭の4箇所の変位は、データ整理の際は平均値を用いている。ひずみゲージについては、押込み試験直前でゼロセットを行い、鉛直方向に同じ位置にあるひずみゲージについては、その平均値を用いることとした。押込み試験直前までの杭の残留ひずみ分布は図-21に示す。

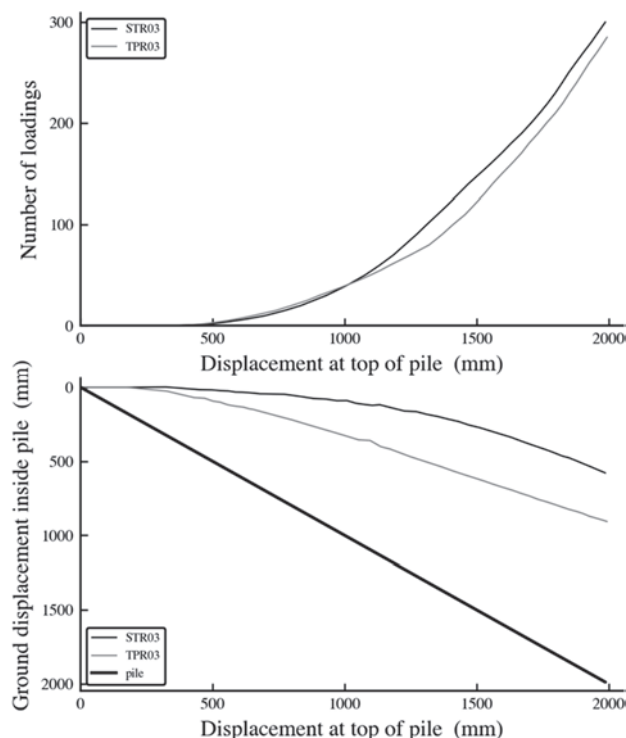


図-18 衝撃打込みによる杭の貫入実験のストレート杭とテーパ杭の比較

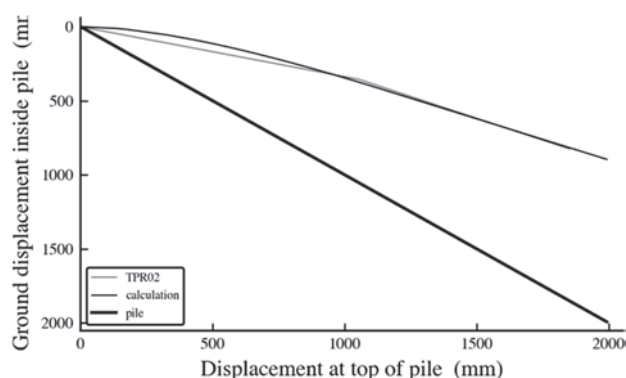
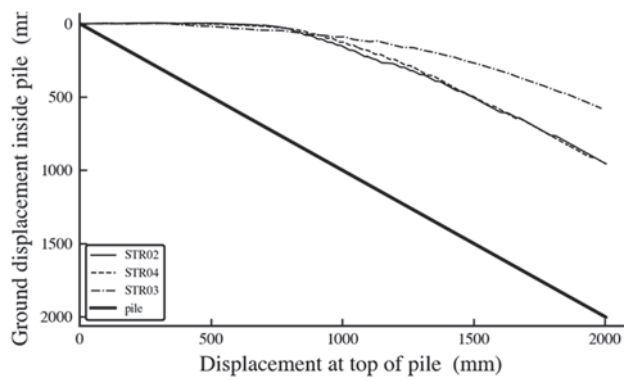
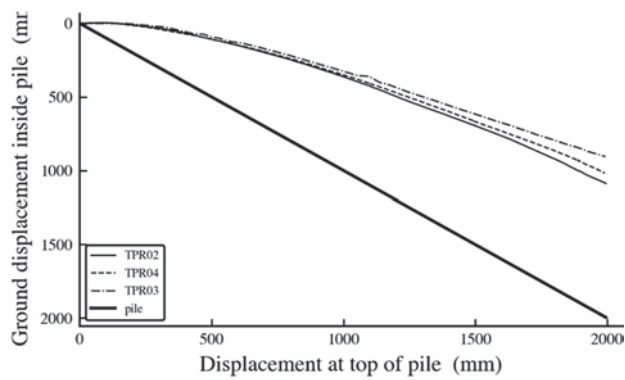


図-19 衝撃打込み貫入実験時のテーパ杭の杭内地盤変位の解析と実験結果の比較



(a) ストレート杭



(b) テーパー杭

図-20 静的押込みと衝撃打込みによる杭貫入時の杭内地盤変位の比較

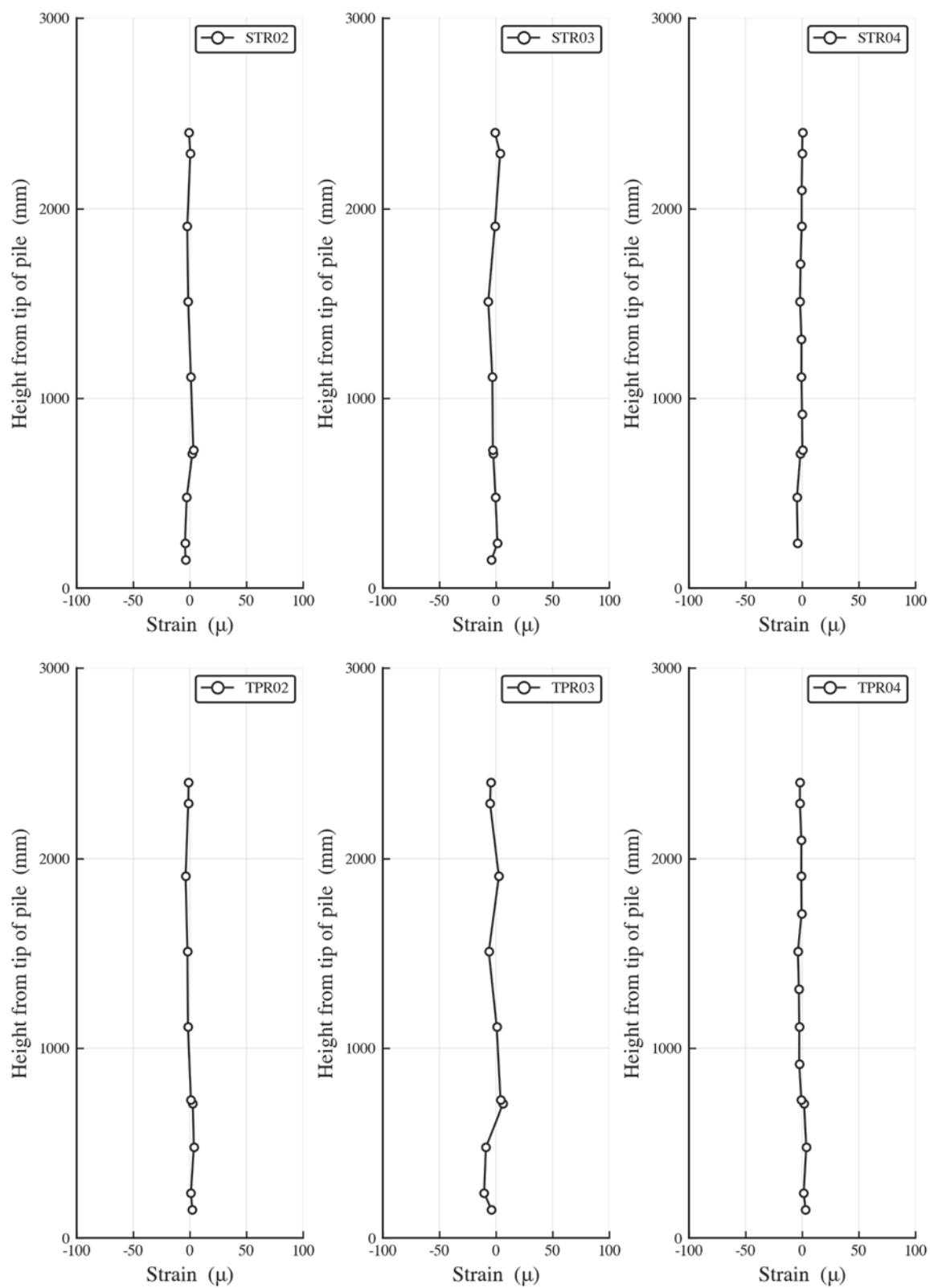


図-21 押し込み試験直前までの杭の残留ひずみ分布

(1) 実験の再現性および施工過程による違い

図-22に再現性と施工過程による違いの確認のため、STR02-STR03-STR04, TPR02-TPR03-TPR04の杭頭の変位-荷重関係と杭頭変位-杭内地盤変位を示す。図の変位-荷重関係より、STR02とSTR04, およびTPR02とTPR04は、それぞれ同じ条件のもとでの载荷実験であるが、ケース02に比べケース04の方が高い支持力を発揮している。これは、静的押込みによる施工実験と同様の傾向である(3.1節参照)。

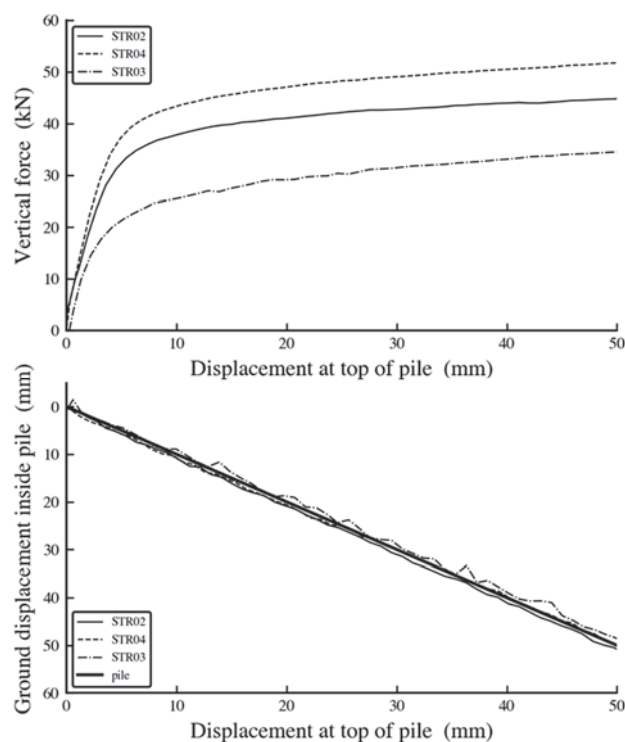
静的押込み(02, 04)と衝撃打込み(03)による杭を比較すると、静的押込みによって施工した杭の方が、支持力が高い結果となっている。3.2節で衝撃打込みによる貫入の方が杭の先端閉塞が生じにくかったことを考えると、排土量が減ったことで、拘束圧が小さくなり、結果として支持力があまり上がらなかったと推察される。

杭頭変位-杭内地盤変位関係を見ると、両者はほぼ同じ値を示していることから、ほぼ完全に先端が閉塞していると考えられる。TPR03は杭の貫入終了時は閉塞していないような挙動を示していたが(図-19)、杭への载荷方法が違うこと、貫入深さ調整(表-4)でさらに杭を貫入していること、押込み試験は载荷速度が2mm/minと低速であることなどが要因として考えられる。

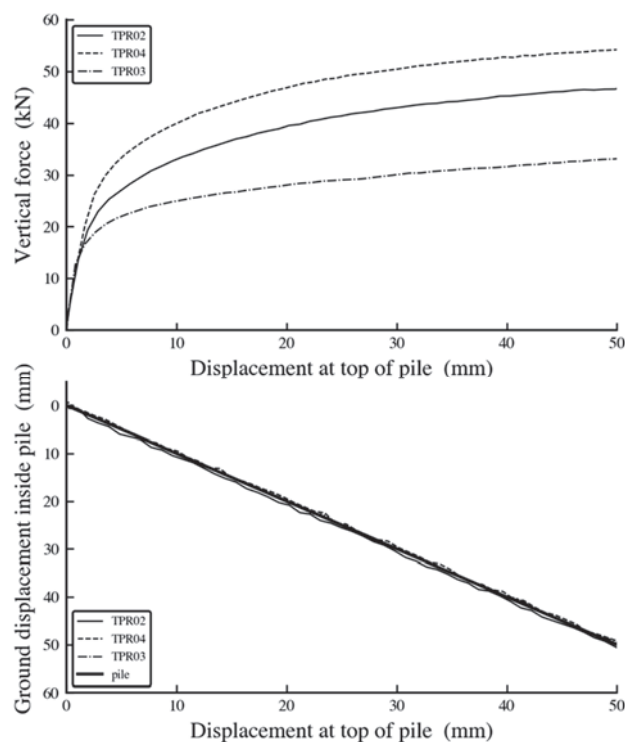
(2) ストレート杭とテーパ杭の比較

図-23にストレート杭とテーパ杭の比較を示す。図より、最終的にはテーパ杭の支持力が高いものの、通常設計で用いられる $0.1D_1 (= 15\text{mm})$ の変位においては、ストレート杭の方がやや高い支持力となっている。一方、衝撃打込みにより施工した杭(STR03, TPR03)は反対の傾向を示しており、立ち上がりはテーパ杭の方が高い支持力を発揮しているが、 $0.1D_1$ に達した頃にはストレート杭の方が支持力大きい。

以上のように、本実験では载荷初期段階においては両者に多少の差は生じるものの、その差は顕著なものではなく、鉛直支持力はほぼ同等の結果となった。



(a) STR02-STR03-STR04



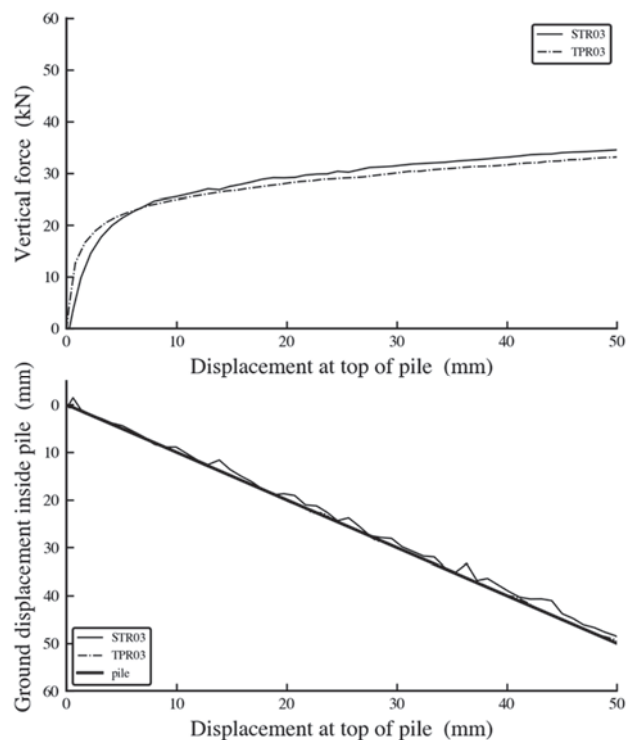
(b) TPR02-TPR03-TPR04

図-22 押込み試験の再現性の確認と施工過程による違い

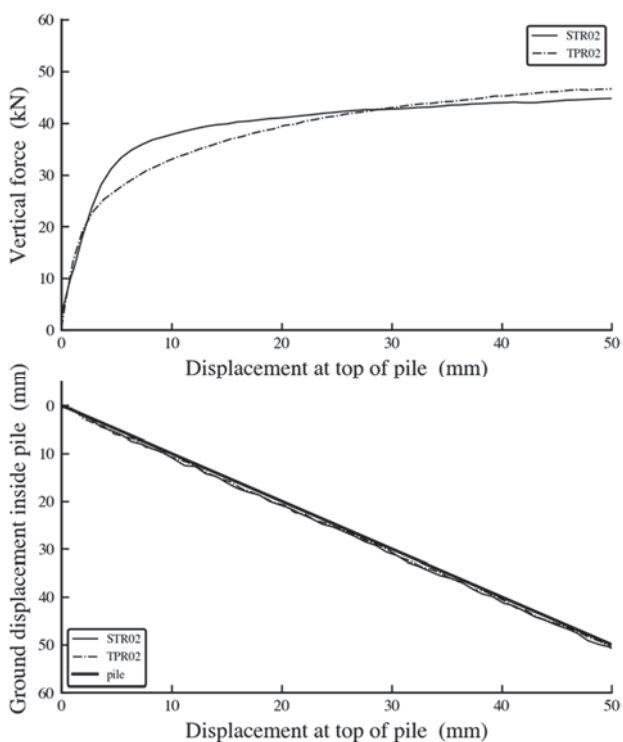
(3) 杭のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

図-24にひずみ・軸力・周面抵抗力度分布を示す。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おり、通常観測される杭の軸力分布と同様の傾向となっている。特にテーパ杭では、テーパ部（杭下端から715mm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、その形状によりテーパ部に大きな拘束圧が働いていることが推察される。本傾向は、静的押込みによる施工実験においても同様に見られた（3.1節参照）。

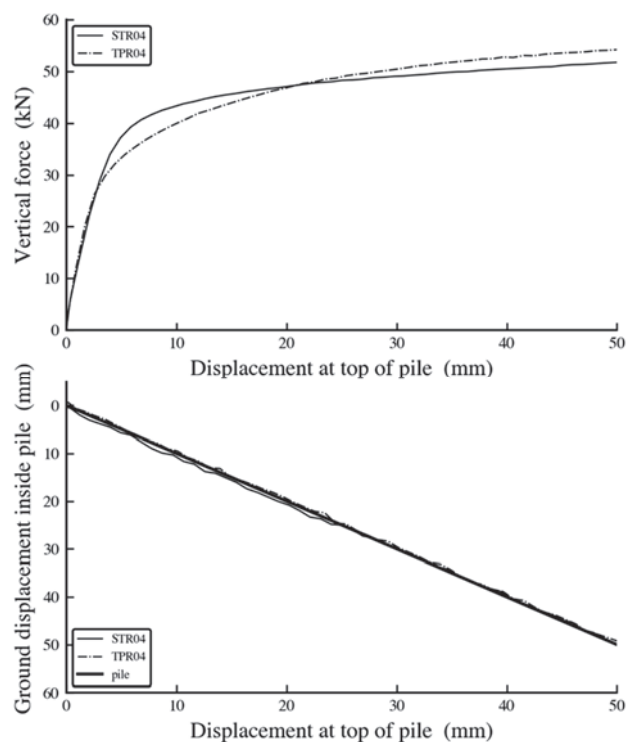
静的押込みによる貫入（ケース02, 04）と衝撃打込みによる貫入（ケース03）を比較すると、ストレート杭、テーパ杭ともに衝撃打込みの方が、周面摩擦力が働きにくいことがわかる。これは、上述したように、衝撃打込みによる貫入の方が杭の先端閉塞が生じにくく（節3.2）、排土量が減ったことで周辺地盤の拘束圧が上がらなかったことが理由と考えられる。特に、TPR02を見るとテーパ部の周面摩擦力に加えて、先端支持力もほとんど発揮されておらず、打設方法の違いが大きく生じる結果となった。



(b) STR03-TPR03

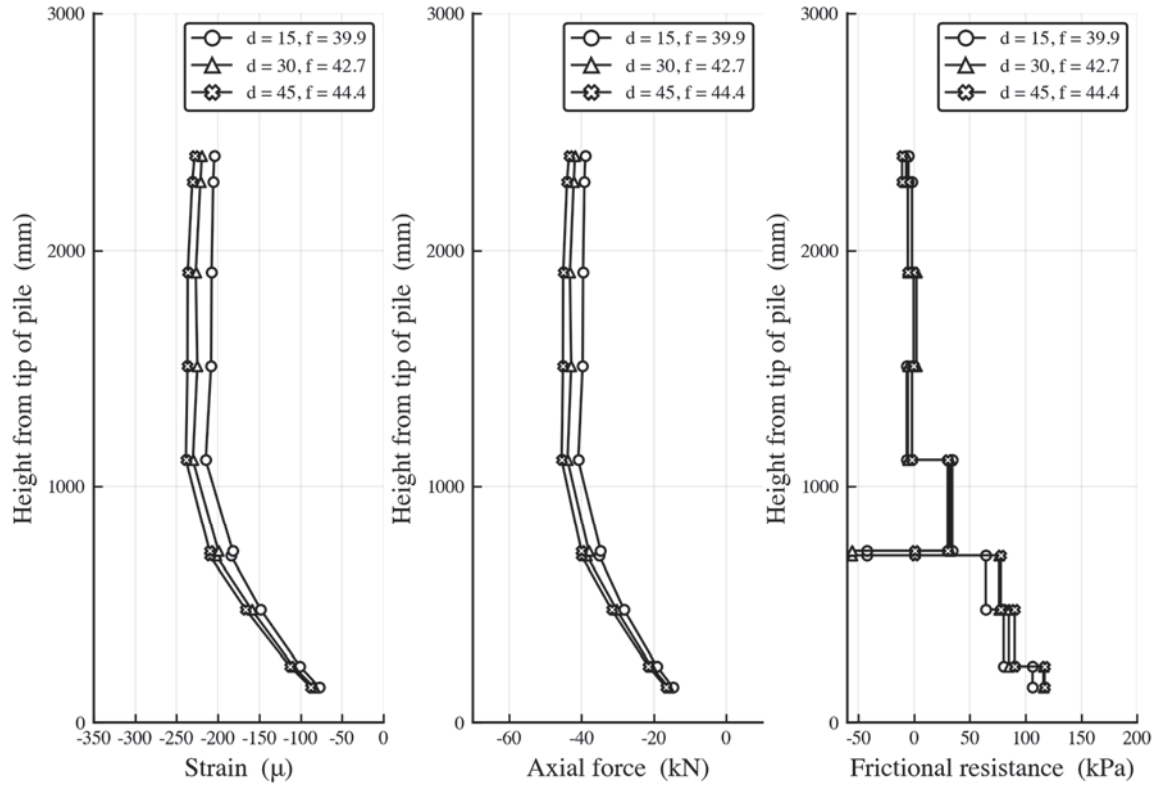


(a) STR02-TPR02

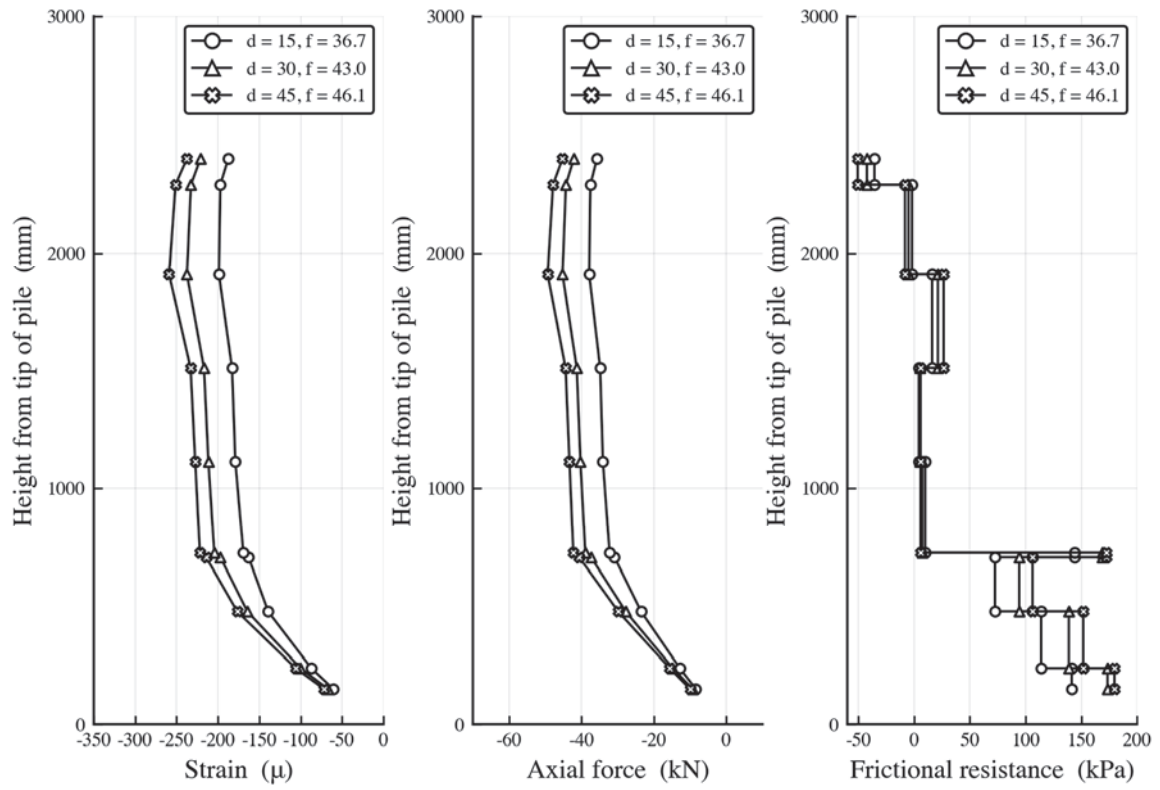


(c) STR04-TPR04

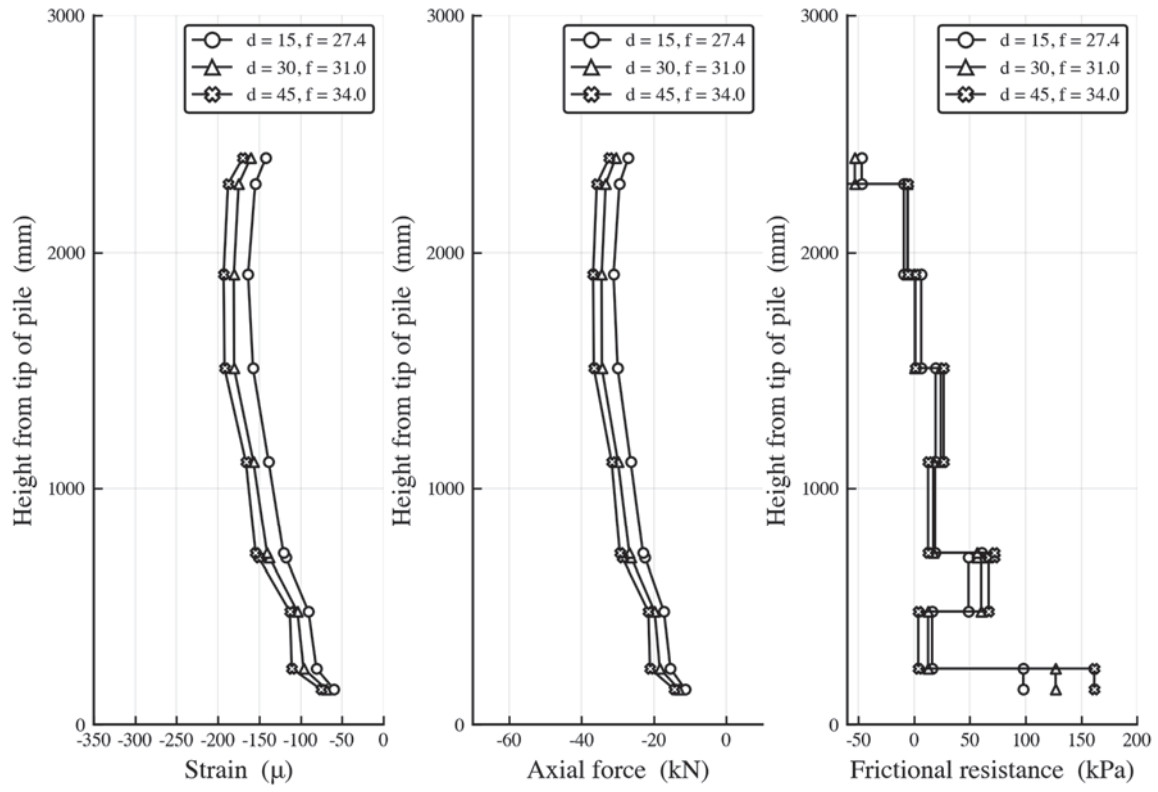
図-23 押込み試験のストレート杭とテーパ杭の比較



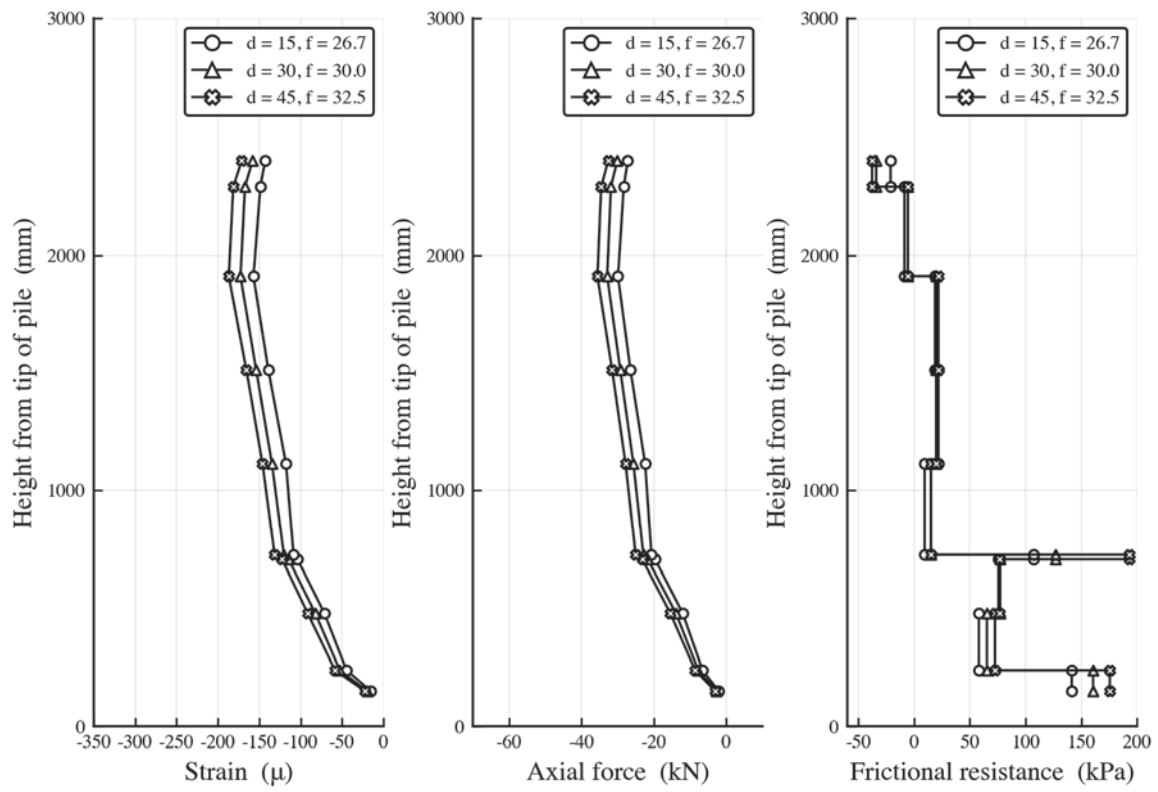
(a) STR02



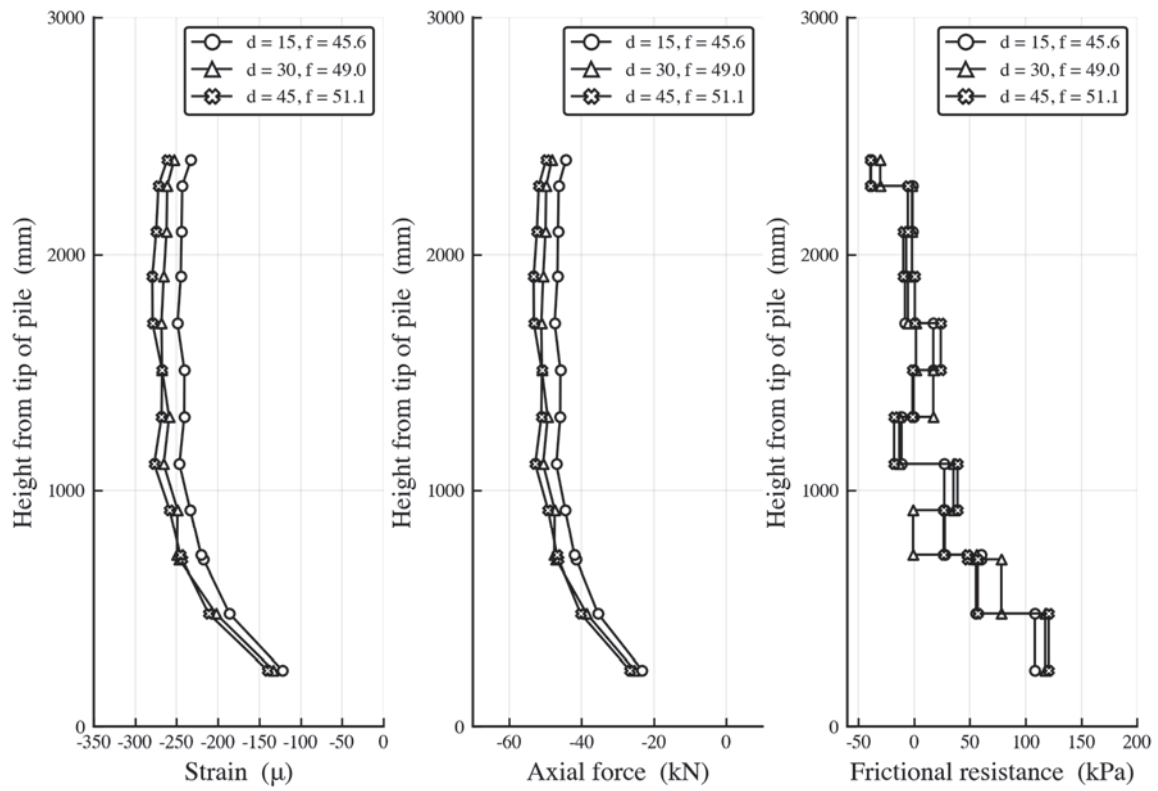
(b) TPR02



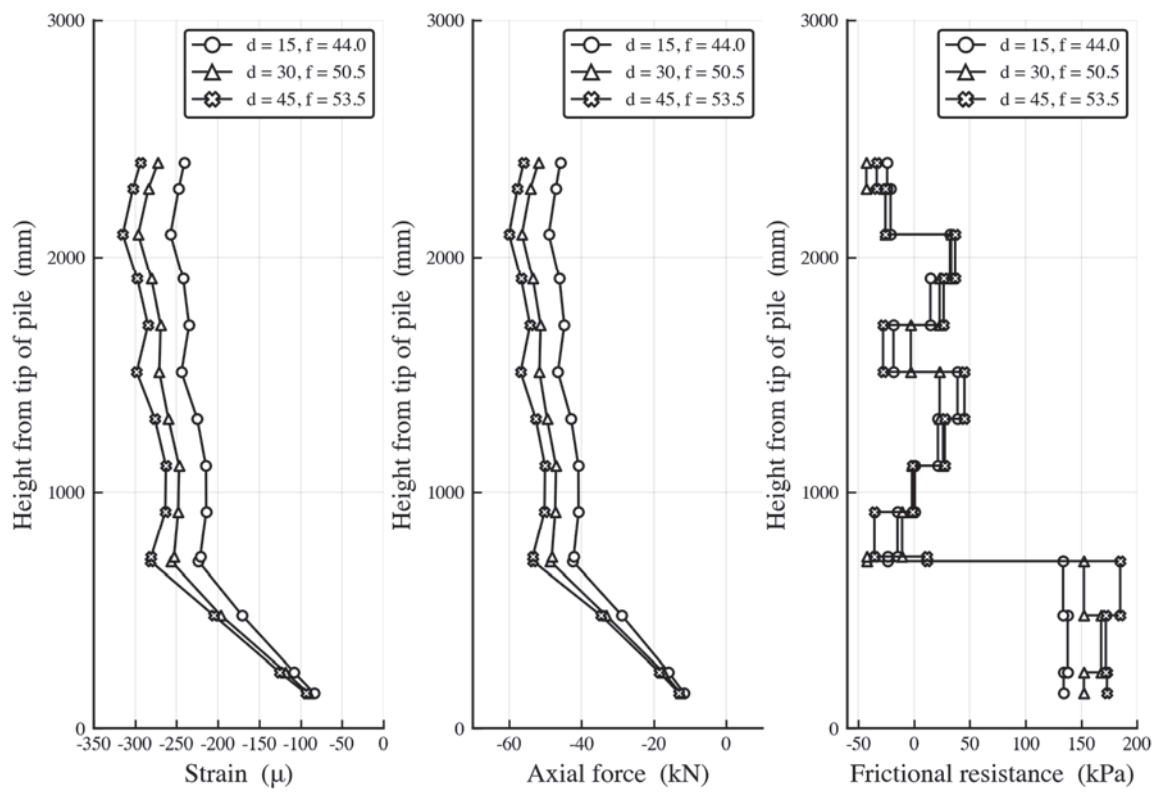
(c) STR03



(d) TPR03



(e) STR04



(f) TPR04

図-24 押込み試験のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

3.4 引抜き試験

本節では、引抜き試験の結果を示す。杭頭の4箇所の変位は、押込み試験と同様にデータ整理の際は平均値を用いている。ひずみゲージについては、引抜き試験直前でゼロセットを行い、鉛直方向に同じ位置にあるひずみゲージについては、その平均値を用いることとした。実験開始時から引抜き試験直前まで（表4のフロー（1）～（2'）まで）に生じた杭の残留ひずみ分布を図-25に示す。

（1）施工過程による違い

図-26に引抜き試験の施工過程による違いを示す。図の上段は杭頭の変位-荷重関係で、下段は杭頭変位-杭内地盤変位である。ケース01は施工過程のない事前に建込みを行った杭であるが、荷重値が小さく、ピーク後は急激に抵抗力が低下することがわかる。一方、他の施工過程を模擬した杭（ケース02, 03）は比較的高い引抜き抵抗力を有し、ケース01ほどの明確なピークも現れない。このことから、杭の施工に伴い周辺地盤は密実化し、地盤の拘束圧が高まることで、大きな引抜き抵抗力を発揮したと考えられる。

（2）ストレート杭とテーパ杭の比較

図-27にストレート杭とテーパ杭の比較を示す。ケース02, 03を見ると、ストレート杭に比べてテーパ杭はピークが現れやすい傾向にある。これは、引抜き時にテーパ杭の形状は周辺地盤をより緩めやすく、拘束圧が急激に小さくなりやすいことが要因として考えられる。具体的には、杭頭変位が鉛直上向きに h の場合、地盤内に生じる隙間の体積はストレート杭、テーパ杭ともに $\pi D_1^2 h / 4$ となるが、ストレート杭は杭先端にのみ隙間が生じるのに対して、テーパ杭はテーパ部全面において隙間が生じる（図-28）。

そのほかには、TPR03がSTR03に比べてかなり小さな引抜き抵抗力となっている。押込み試験ではこのような差が見られないため、これがテーパの形状特有のものなのか、地盤のばらつきによるものなのかは、今後追加の実験等で検証が必要である。

杭頭変位-杭内地盤変位の関係を見ると、引抜き抵抗力が顕著に増加しているときは、杭内の地盤も杭とほぼ同程度変位していることがわかる。このことから、引抜き初期段階においては、杭内の地盤は杭と同様に持ち上げられている可能性が考えられる。また、どのケースにおいてもストレート杭に比べてテーパ杭は、その形状から杭内の地盤は杭とともに持ち上げられる傾向にある。

（3）杭のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

図-29に引抜き試験におけるひずみ分布を示す。STR01, TPR01では、杭の軸引張力が杭頭から杭先端にかけて徐々に減少しており、杭全体に対して鉛直下向き方向の周面摩擦力が働いている。一方、STR02, TPR02は単調に軸引張力が減少せず、杭途中より先端に向けて増加傾向にある。このような結果になった要因としては、試験直前までに生じた杭の残留ひずみ（図-25）が、杭の引抜き時に解放されたことが考えられる。

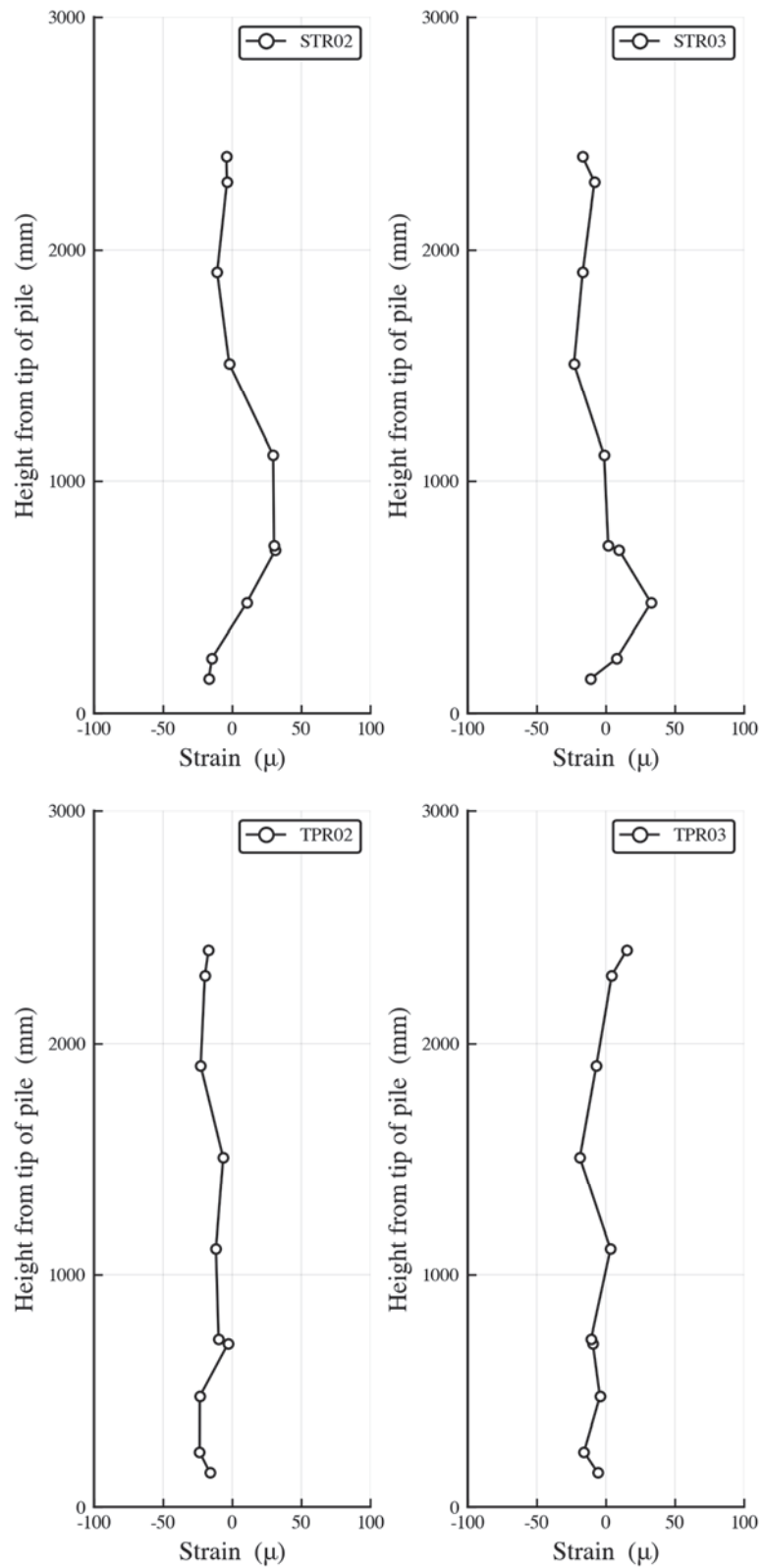
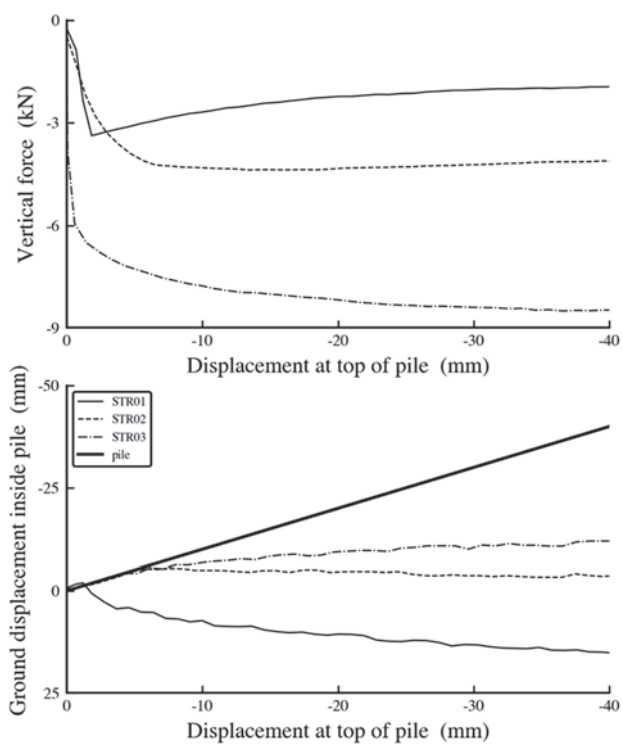
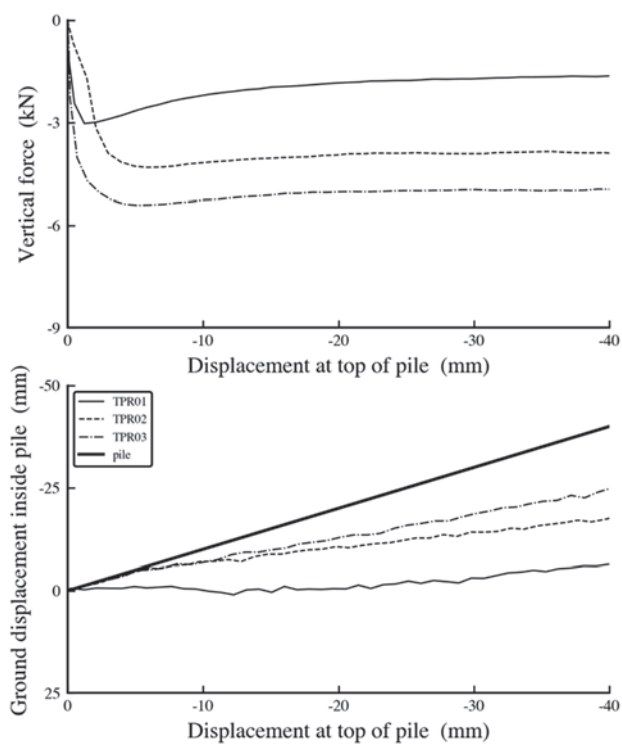


図-25 引抜き試験直前までの杭の残留ひずみ分布

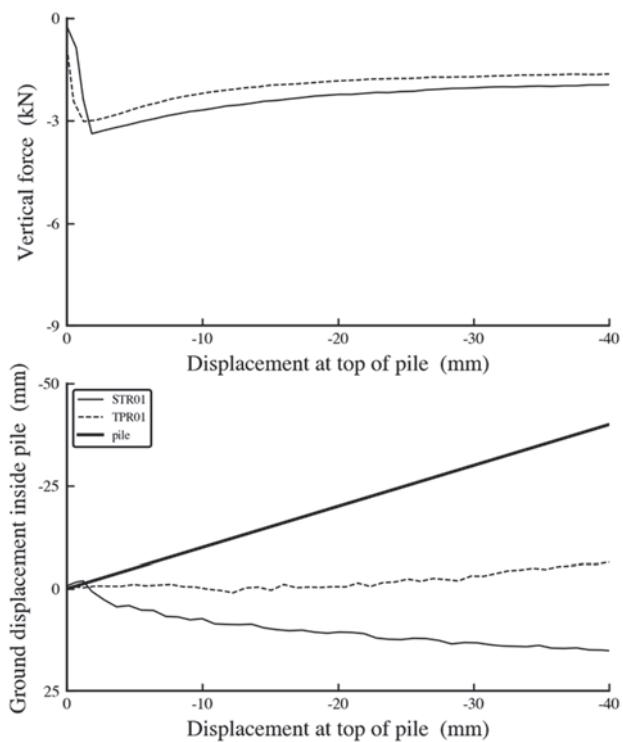


(a) STR01-STR02-STR03

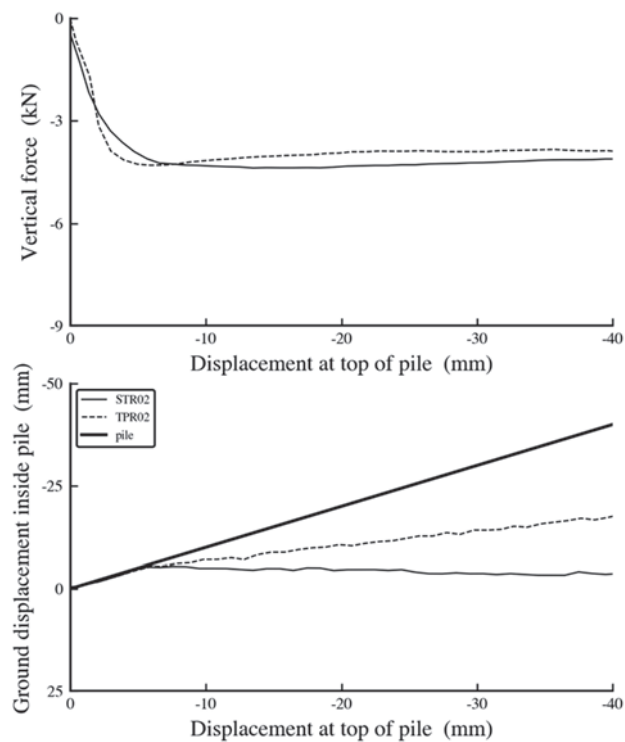


(b) TPR01-TPR02-TPR03

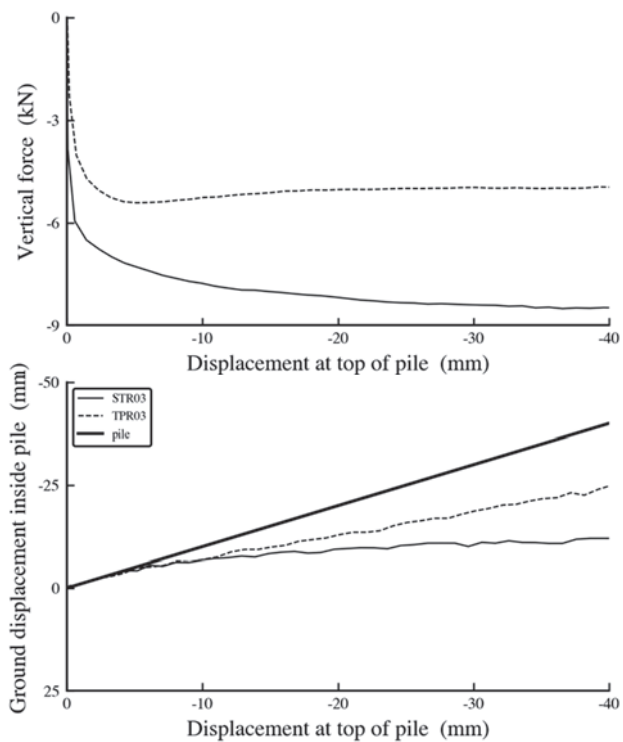
図-26 杭の引抜き試験の施工過程による違い（上：杭頭変位-杭頭荷重，下：杭頭変位-杭内地盤変位）



(a) STR01-TPR01



(b) STR02-TPR02



(c) STR03-TPR03

図-27 引抜き試験のストレート杭とテーパ杭の比較

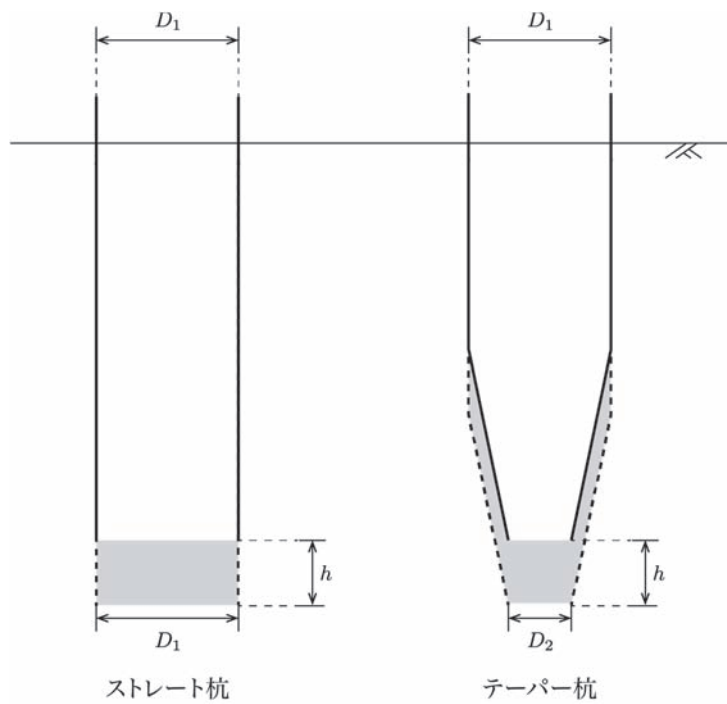
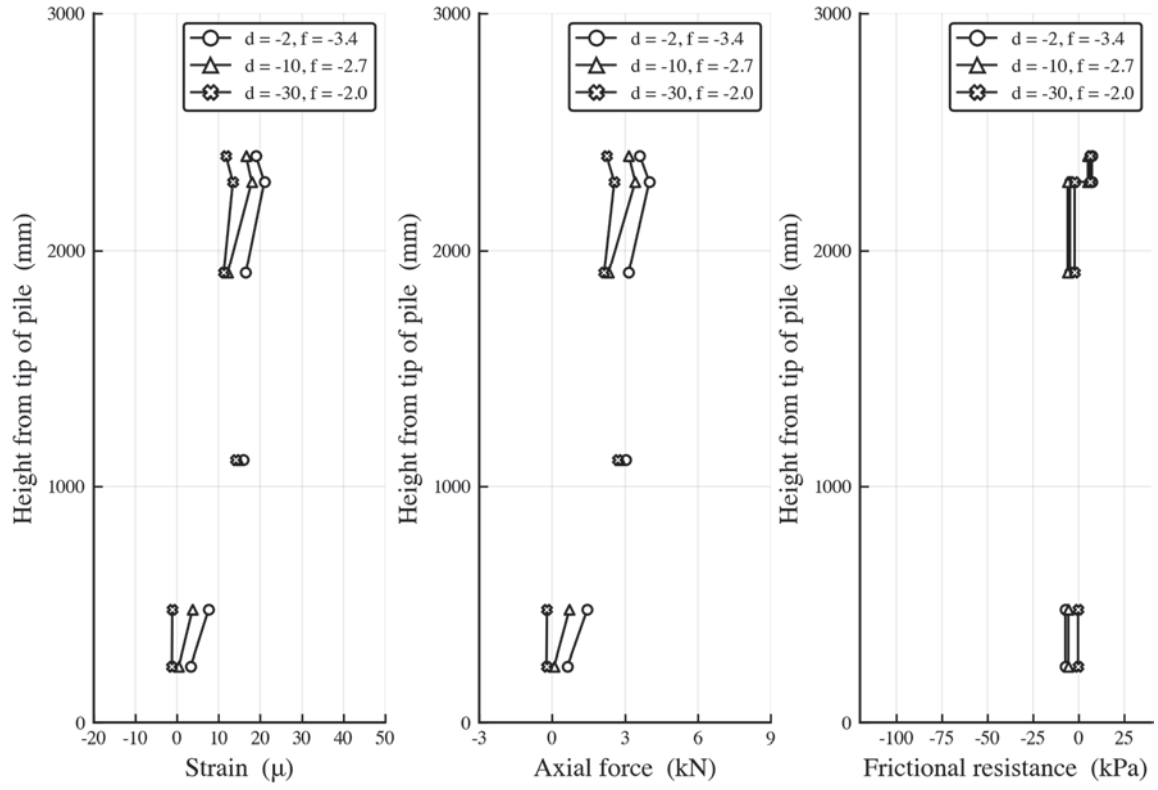
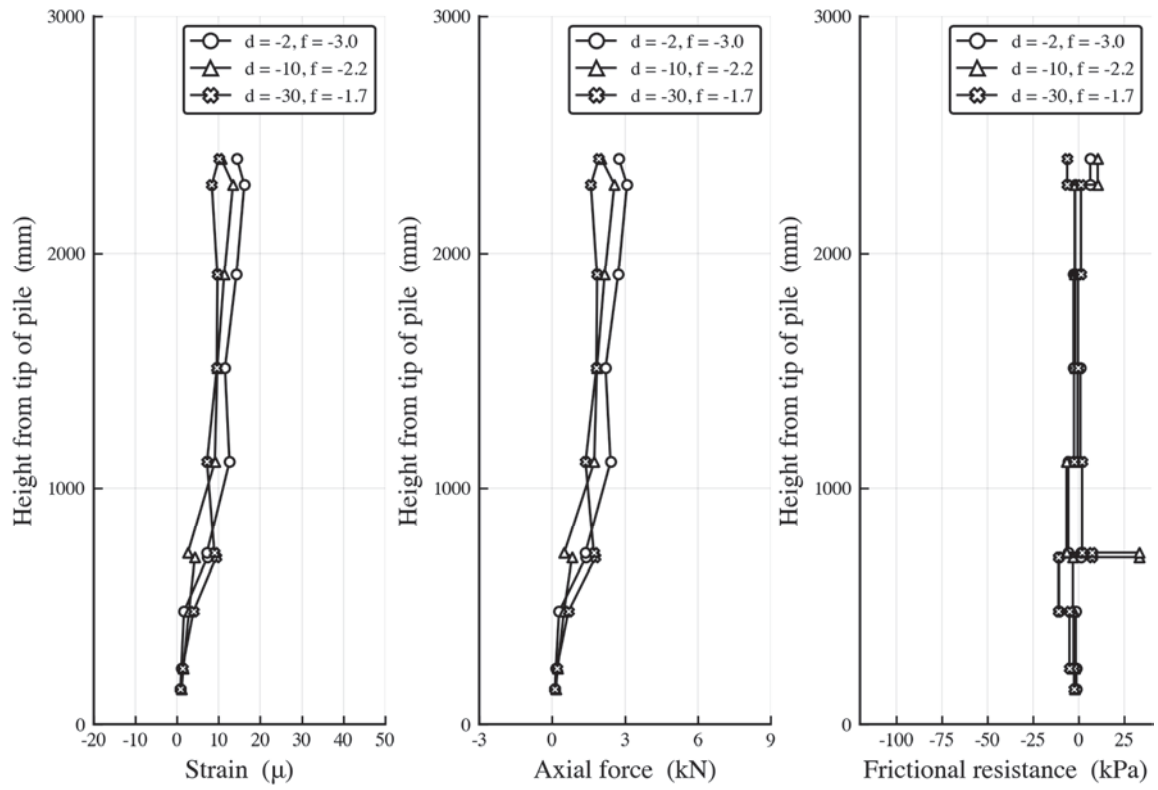


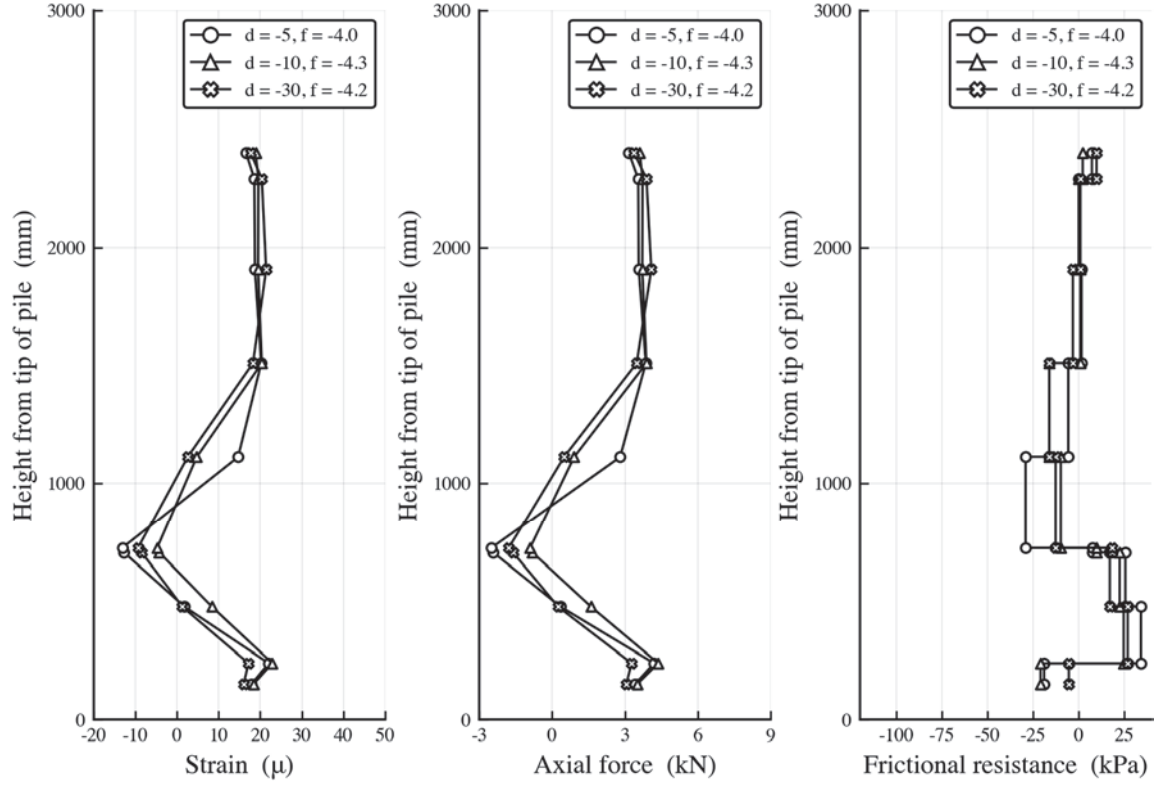
図-28 ストレート杭およびテーパード杭を引抜く際に生じる杭と地盤との隙間の概略図



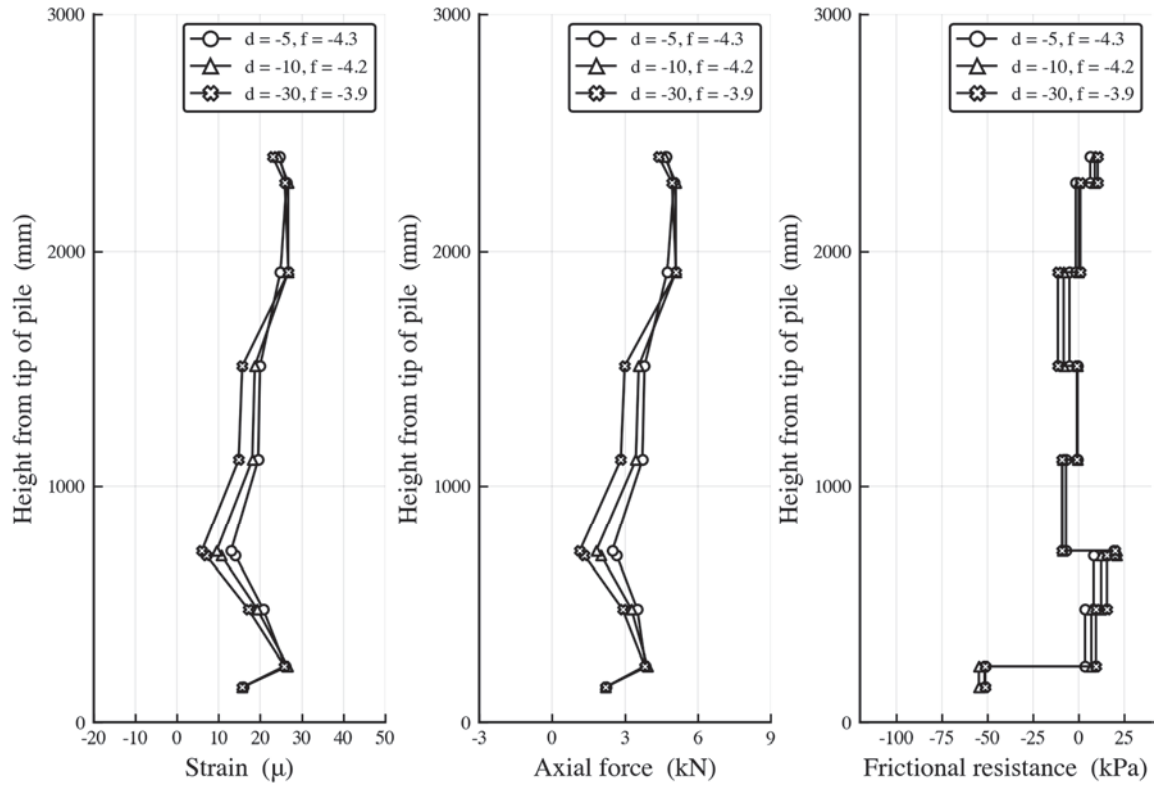
(a) STR01



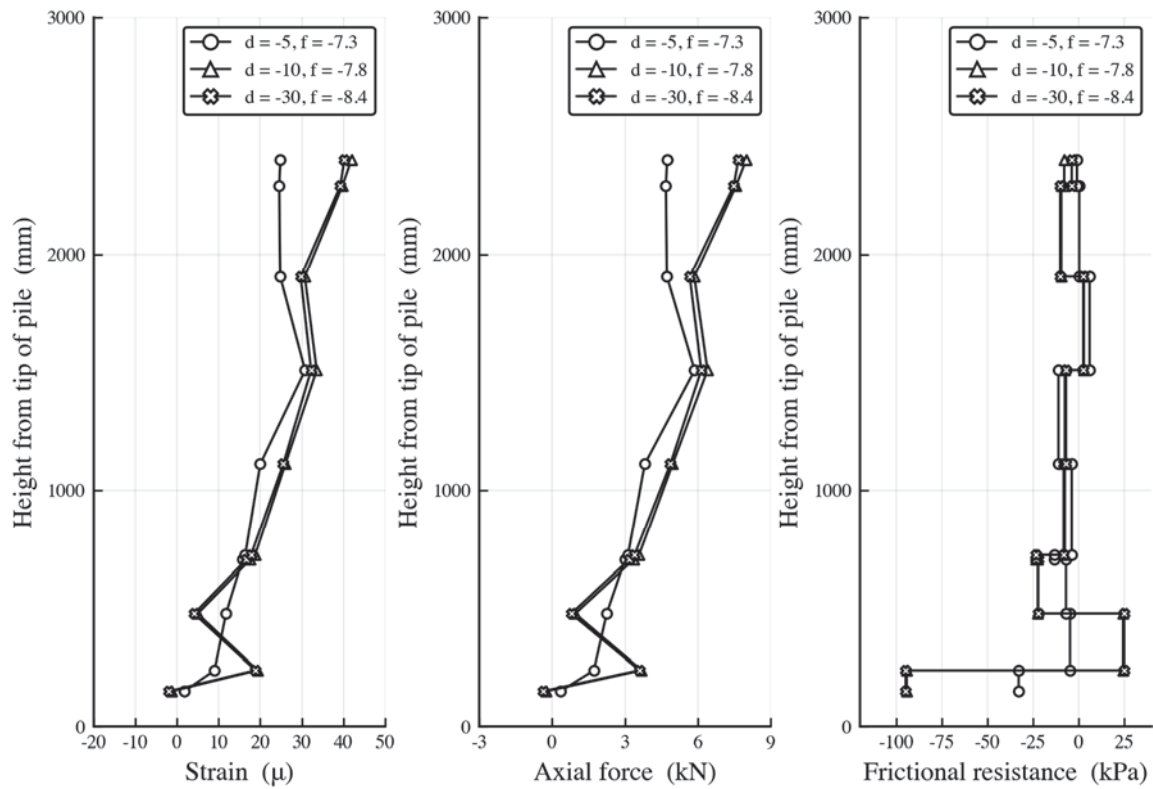
(b) TPR01



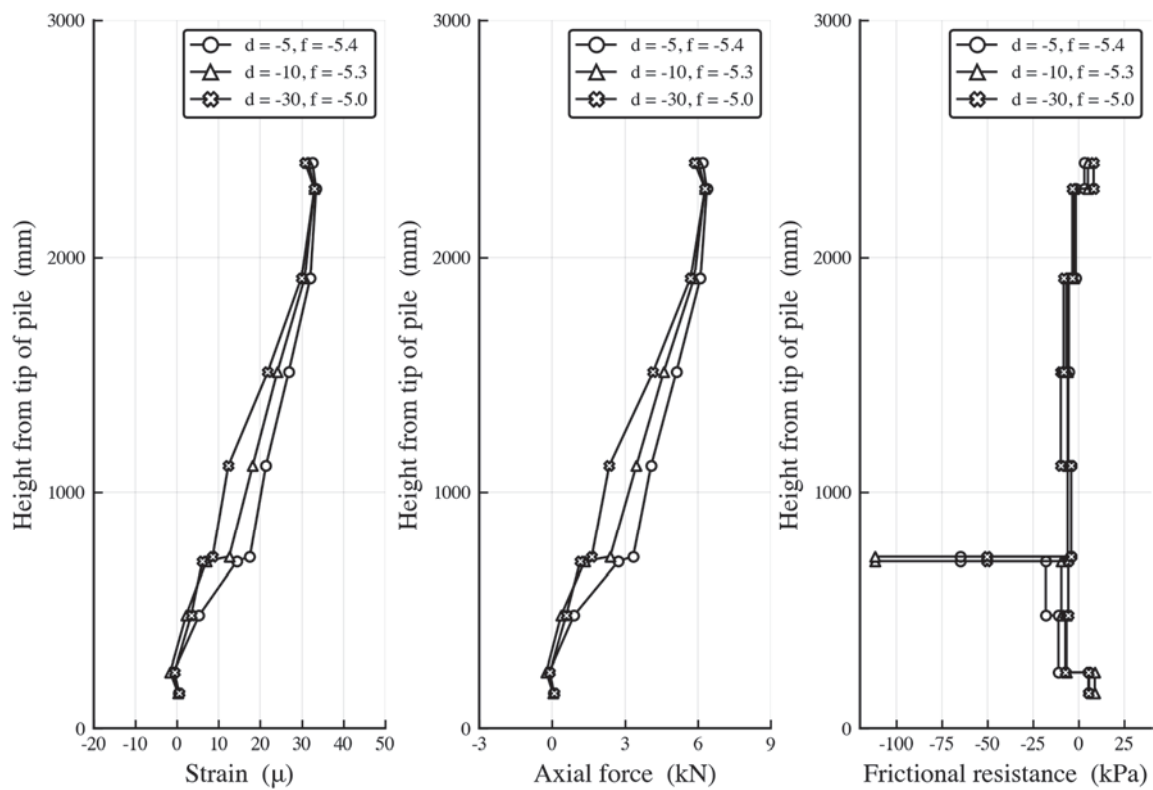
(c) STR02



(d) TPR02



(e) STR03



(f) TPR03

図-29 引抜き試験のひずみ・軸力・周面抵抗力度分布

3.4 水平載荷試験

図-30に水平載荷試験の杭頭水平変位-杭頭水平荷重関係を示す。図より、テーパ杭の方がやや大きな水平抵抗を示しているが、実験誤差等を考慮すればその水平抵抗特性はほぼ同等と言える。ひずみ分布は図-31に示す。ひずみ分布を算出する際は、これまでのように杭先端からの位置が同じひずみゲージ全ての平均を取るのではなく、杭の両側のひずみについてそれぞれ分けて平均を取っている。ひずみ分布を見ると、載荷方向側のひずみはその逆側に対して大きな値を示しており自然な結果と言える。本実験条件では、ストレート杭とテーパ杭のひずみ分布に顕著な差は見られなかった。

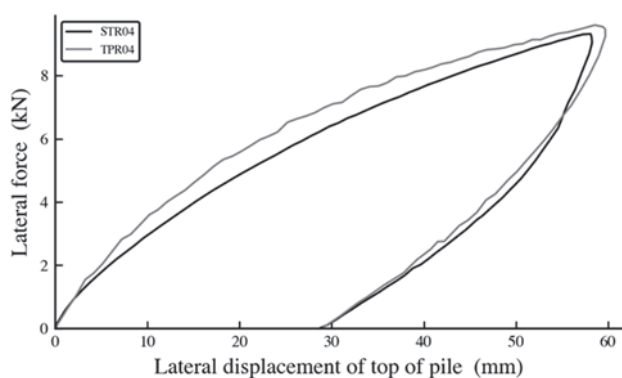


図-30 水平載荷試験（杭頭水平変位-杭頭水平荷重）

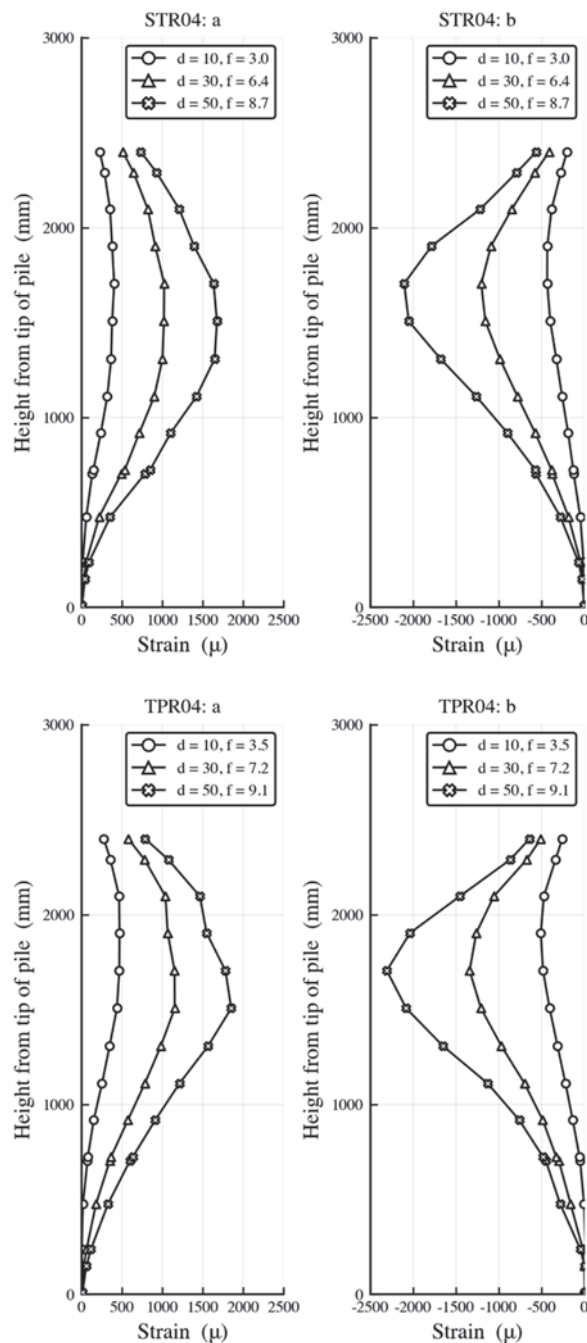


図-31 水平載荷試験におけるひずみ分布（a：載荷方向の逆側，b：載荷方向側）

4. まとめ

実験の結果、杭の引抜き抵抗はその施工過程の有無で大きく異なり、杭の施工過程を模擬しない場合は、引抜き抵抗が大きく過小評価されることがわかった。また、杭の施工過程を模擬しない杭では、ピークを越えると急激に引抜き抵抗が小さくなる一方、施工過程を模擬した杭では明確なピークが生じにくく、ねばり強い引抜き

抵抗力を有することが確認された。このことから、杭の引抜き抵抗を評価する際には、その施工過程を正しく評価する必要がある。

ストレート、テーパ杭の挙動については、特にその施工過程において違いが見られた。ストレート杭では、従来多くの検討がなされてきたように、ストレート杭では杭の先端が詰まる先端閉塞現象の発現と破壊が交互に生じる様子が観測されたが、テーパ杭についてはそのような傾向は見られなかった。そこで、先端閉塞が全く生じず、杭内に侵入した土が圧縮も膨張もしないという仮定のもと、テーパ杭の杭内地盤高さに関する解析を行ったところ、解析結果は実験結果によく一致しており、テーパ杭はその形状から先端閉塞現象が生じにくいことがわかった。

押込み試験、水平載荷試験においては、ストレート、テーパ杭について明確な差は確認できなかったものの、STR03とTPR03については、押込み試験ではほぼ同等の支持力を有する一方、引抜き試験では、テーパ杭の方がかなり小さな引抜き抵抗となった。これがテーパの形状特有のものなのか、地盤のばらつきによるものなのかは、今後追加の実験等で検証が必要である。

5. おわりに

本実験で得られた結果は、模型地盤の相対密度が60%の場合の一例であり、ストレート杭、およびテーパ杭の支持力特性や、先端閉塞現象を一般論として説明づけるものではない。しかしながら、模型実験の中では比較的大口径の杭を使用していることから、杭の支持力評価における基礎資料として活用できるほか、今後さらなる追加の実験を進め、本実験結果と比較・検証することで、杭の形状や施工過程がその後の支持力特性に及ぼす影響を解明する上で有用なデータとなると考えられる。

(2019年8月9日受付)

参考文献

- 伊藤淳志, 井元悠気 (2014): 打込みによる先端閉塞単管杭の引抜き抵抗, 日本建築学会技術報告集, 20(44), pp.85–88.
- 菊池喜昭, 佐藤宇紘, 森川嘉之 (2008): 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.
- 佐々木隆光, 末政直晃, 橋爪秀夫, 中村和之 (2002): 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.
- 佐々木隆光, 末政直晃, 橋爪秀夫, 中村和之 (2003): 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.
- 佐藤隆, 塩沢伸明, 安達俊夫 (2010): テーパー杭を用いた小規模建築物基礎の鉛直載荷試験, 日本建築学会技術報告集, 16(33), pp.493–498.
- Bergan, J., Øren Holo, S., and Nordal, S. (2010): Collapse of thin-walled model piles during hard driving, in: Benz, Nordal (Eds.), Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2010), Trondheim, Norway, pp.607–612.
- Han, F., Ganju, E., Prezzi, M., Salgado, R., and Zaheer, M. (2019): Axial resistance of open-ended pipe pile driven in gravelly sand, Géotechnique, pp.1–15.
- Manandhar, S., and Yasufuku, N. (2013): Vertical bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory, Soils and Foundations, 53(6), pp.853–867.
- Matsumiya, H., Ishihama, Y., and Taenaka, S. (2015): A study on the bearing capacity of steel pipe piles with tapered tips, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 1(6), pp.47–52.
- Paik, K., Salgado, R., Lee, J., and Kim, B. (2003): Behavior of open-and closed-ended piles driven into sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(4), pp.296–306.

謝辞

本研究の成果の取りまとめにあたっては、東京都市大学の伊藤和也先生、田中剛先生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。

付録

A. 地盤作製の様子



(a) 地盤作製初期



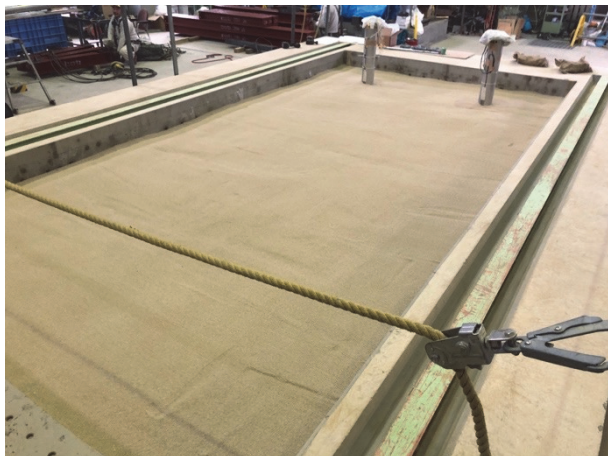
(b) 東西方向に段階的に作製



(c) 杭の建込み (STR01, TPR01)



(d) 地盤材料の再投入



(e) 地盤作製完了

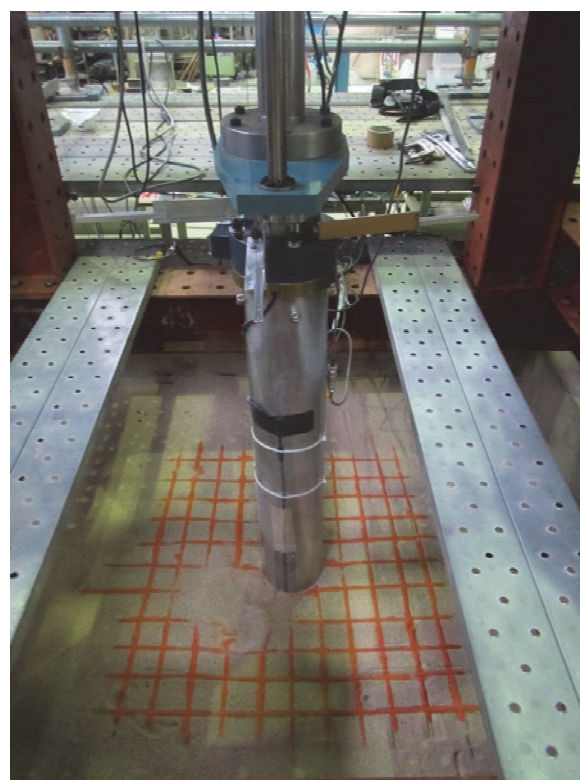


(f) 架台の設置

B. 静的押込みによる杭の施工の様子

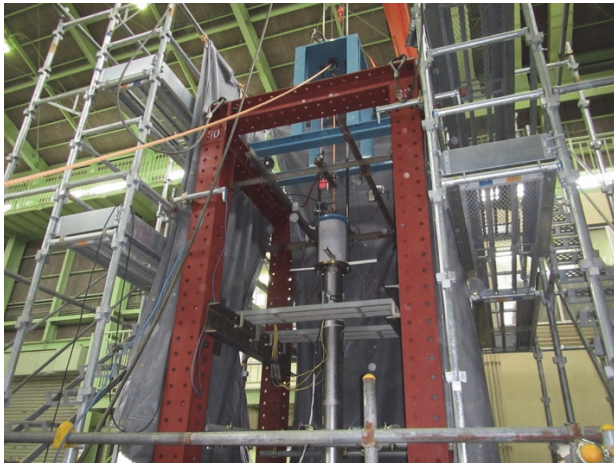


(a) 全体の様子

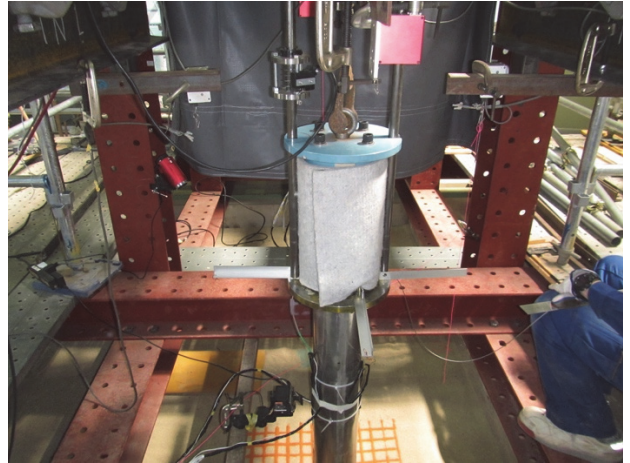


(b) 杭頭の様子

C. 衝撃打込みによる杭の施工の様子

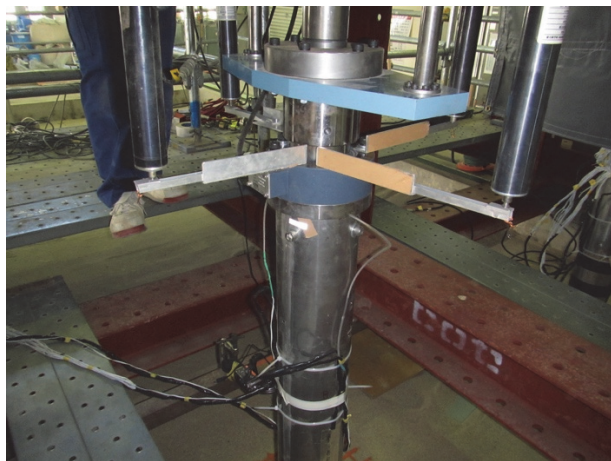


(a) 全体の様子



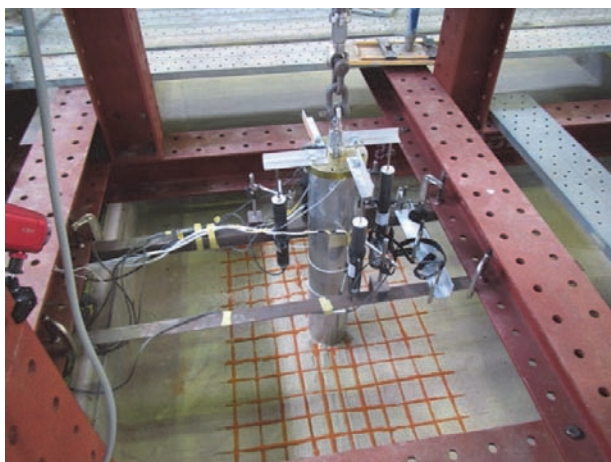
(b) 杭頭の様子

D. 押込み試験の様子



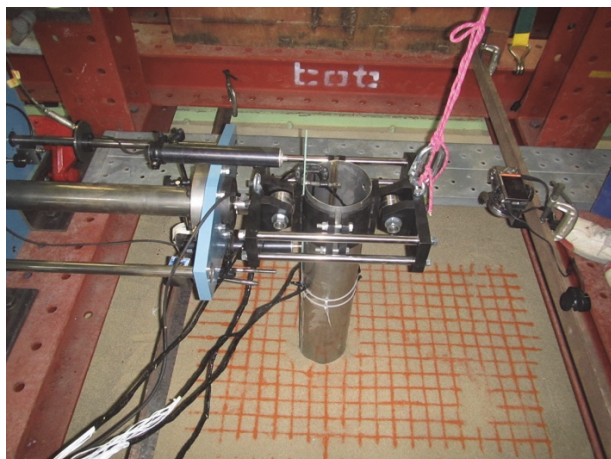
(a) 杭頭の様子

E. 引抜き試験の様子



(a) 杭頭の様子

F. 水平載荷試験の様子



(a) 杭頭の様子

港湾空港技術研究所資料 No.1364

2019. 11

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/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) 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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています