

先端プレロード場所打ち杭の 先端支持機構の基礎研究



池本 宏文*



谷口 美佐**



高崎 秀明*

先端プレロード場所打ち杭のプレロード圧の大きさが先端支持力向上におよぼす影響について、模型載荷試験により検証した。その結果、プレロード圧が高いものほど、支持力が大きくなる傾向があり、両者には線形関係があることが確認された。また、プレロード圧を作用させたケースの荷重-沈下量関係は、プレロード圧無しの履歴曲線上を辿るのではなく、プレロード圧無しの曲線よりも同じ沈下量において大きな荷重を示す挙動となることが分かった。さらに、プレロード圧を作用させることによって、杭先端部における地盤の乱れの大小に関わらず、地盤の乱れは改善されることが確認された。

●キーワード：場所打ち杭、プレロード、先端支持力、模型載荷試験

1. はじめに

先端プレロード場所打ち杭¹⁾は、杭先端に取り付けた注入バッグにセメントミルクを加圧注入・圧力保持することにより、杭先端の地盤にプレロード（応力履歴）を与え、掘削における地盤の応力解放の改善、杭底に堆積したスライムを除去し、先端支持力を向上させる工法である。しかしながら、プレロード圧の大きさや圧力保持時間の長さは、経験的に定められたものであり、その値がどのように支持力向上に影響をおよぼしているのか不明確な部分がある。本研究では、プレロード圧の大きさが支持力向上におよぼす影響について、杭の鉛直載荷試験を模擬した模型載荷試験²⁾により、検証した内容について報告する。

2. 先端支持力向上のメカニズム

図1は、従来の場所打ち杭と先端プレロード場所打ち杭の杭先端における荷重-沈下量関係のイメージを示したものである。先端プレロード場所打ち杭の支持力向上メカニズムは、応力履歴を与えることにより、極限支持力に至るまでの荷重沈下の経路を変えることで、支持力向上につながるものである。なお、場所打ち杭においては、杭先端部の沈下量が杭径の4倍において極限支持力とみなしてよいとの研究成果⁴⁾も

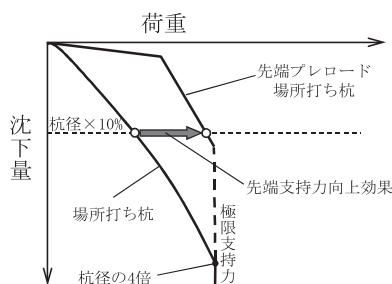


図1 杭先端の荷重-沈下関係 文献3)を参考に作図

あり、杭の鉛直載荷試験の結果をもとに先端支持力を評価するのは、極限支持力に達する沈下量よりも小さい範囲となる。

3. 模型載荷試験

3.1 模型土槽および計測機器

模型土槽は図2に示すようなφ600mm×H610mmの大きさのものを使用した。土槽の上方には模型杭を載荷するためのエアシリンダを1台、および地盤内の応力状態を想定して上載圧を載荷するためのエアシリンダが2台取り付けられており、上載圧は半円形状の載荷板を介して地表面に載荷するようにした。模型杭はφ50mmとし、杭先端部での載荷試験を想定するため、模型地盤への根入れは50mmとした。杭への載荷荷重、変位を計測するために模型杭の上にロードセルおよび変位計を設置した。また、地表面の挙動を確認するために載荷盤にも変位計を設置した。

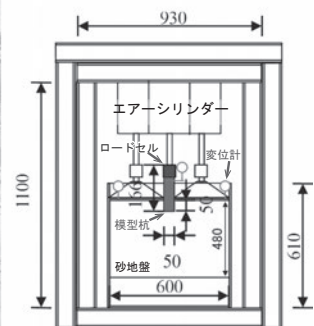


図2 模型土槽

3.2 プレロード装置

模型杭は、プレロード圧を作用させないケースにおいてはφ50mmのアルミ製杭を使用した。一方、プレロード圧を作用させるケースは、図3のように実際のプレロードバックを模擬し

た膨張ゴムを取付けた。また、プレロードホースを模擬して、注入および排出のチューブを設置し、このチューブを介してモルタルミルクを注入、排出する仕組みとし、注入圧はレギュレータを介して圧力計で制御した。

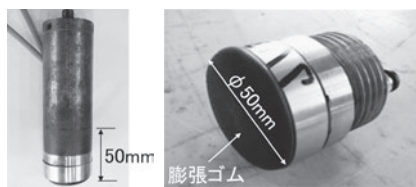


図3 模型杭

3.3 模型地盤の作製

地盤材料は、豊浦標準砂の粒度分布に近い珪砂6号を乾燥状態で用いた。模型地盤の作製方法は1層当たり50mmとして、所定の重量の珪砂を投入し、相対密度90%となるよう突き固めた。模型杭は、杭先端の高さまで地盤を作製した後に設置し、その後、所定の高さまで突き固め、模型地盤を作製した。また、各層においてベーンせん断試験を行い、地盤の均一性を確認した。地盤の乾燥密度は $1.59\text{g}/\text{cm}^3$ 、地盤表面のベーンせん断強さは $\tau=2.4\text{kN}/\text{m}^2$ であった。

3.4 試験ケースおよび試験方法

3.4.1 試験ケース

試験は、地表面に作用させる上載圧は 100kPa 一定とし、プレロード圧の大きさや杭先端部の地盤の乱れの違いの影響を検証するため、表1に示す6ケースを行った。なお、地盤の乱れを再現したCASE6は、掘削に伴う応力解放だけではなく、掘削ビットにより地盤が攪乱された状態を模擬した。

3.4.2 試験方法

試験は模型地盤を作製した後に、図4に示すようなステップにより実施した。

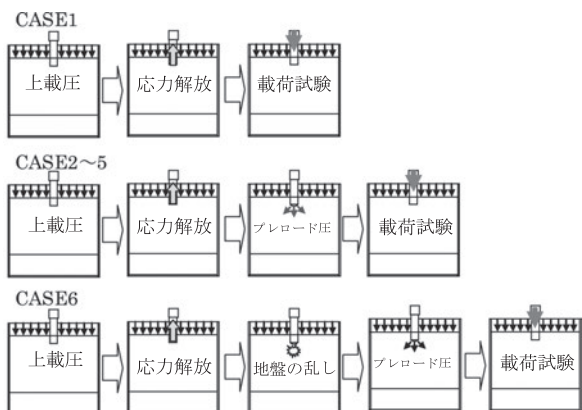


図4 試験ステップ

(1) 上載圧荷

エアースリンダにより 100kPa の圧力が地盤表面に作用するように半円形の荷重盤を介して加圧する。加圧後は沈下が終了するまで放置する。

(2) 応力解放

実際の場所打ち杭における杭先端部の地盤内の応力解放を模擬するため、上載圧の作用後に模型杭を引き上げ、応力を解放させる。その後、模型杭を元の位置まで戻す。なお、地盤の乱れを模擬したCASE6では、土のベーンせん断試験機を用いて、杭先端部の地盤を深さ 10mm 程度、ベーンせん断力の最大値となるように乱す。

(3) プレロード圧作用手順

プレロード圧の作用は、セメントミルクを注入して、表1に示す圧力で10分間圧力保持を行う。その後、注入をやめ、24時間放置する。なお、セメントミルクは材齢1日で一軸圧縮強さが $5,000\text{kN}/\text{m}^2$ 以上となる配合とした。

(4) 杭の荷重試験

プレロード圧の作用開始から24時間後に杭の荷重試験を行う。試験は荷重制御方式とし、段階式繰返し荷重で行った。1段階の荷重は推定最大荷重の $1/10$ とし、過去の荷重試験から最大荷重は 6kN となることから、1段階の荷重は 0.6kN とした。段階式繰返し荷重は5回、荷重保持時間は1荷重段階当たり15分とし、除荷および再荷重は5分とした。

表1 試験ケース

CASE	プレロード圧 (MPa)	圧力保持時間 (min)	その他
1	0	0	
2	0.5	10	
3	0.7	10	
4	1.0	10	
5	1.5	10	
6	1.5	10	先端部攪乱 10mm

4. 試験結果

4.1 プレロード圧作用時の経時変化

図5は、CASE2~5のプレロード圧作用中におけるロードセルの値の経時変化を示したものである。図中にはプレロード圧に杭の断面積をかけあわせた値(杭先端荷重)を()書きで示している。10分間のプレロード作用中は、杭先端荷重よりもロードセルの値が小さくなる傾向となった。また、プレロード圧作用後は、ロードセルの値は徐々に低下しており、これは地盤のクリープによる変形およびセメントミルクの硬化作用の影響によるものと考えられる。プレロード開始から24時間後には、セメントミルクは硬化しているが、ロードセルの値はゼロにはならず、杭先端から残留の上向きの力が働いている。実際にプレロード圧を作用した杭においても同様の現象が生じているも

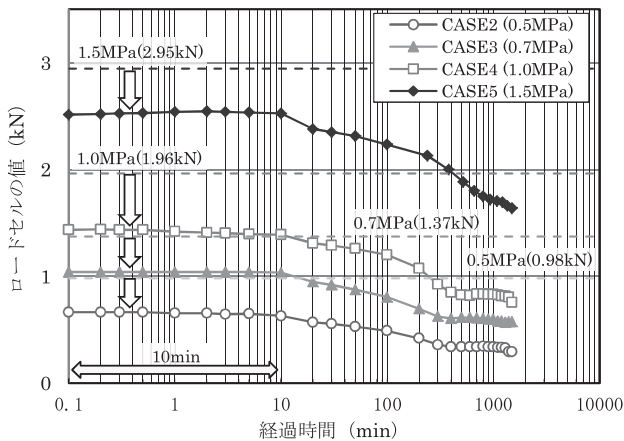


図5 プレロード圧作用時の経時変化

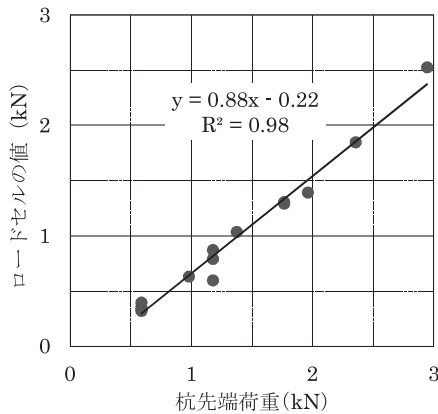


図6 杭先端荷重とロードセルの値の関係

のと考えられ、上向きの力に対しては杭の周面摩擦により抵抗しているものと推測される。

図6は、プレロード圧作用中の杭先端荷重とロードセル値の関係をまとめたものである。両者には線形関係があるものの、1対1の関係にはなっていない。これは、杭先端部の地盤が剛なものではなく弾塑性の材料であること、および杭模型の根入れ50mmの範囲における周面摩擦力の影響によるものではないかと考えられる。杭先端部の地盤の影響と周面摩擦力の分担については、今後、検証が必要である。

4.2 模型載荷試験の結果

図7は、CASE1~5の荷重-沈下量関係を示したものである。除荷時に荷重がゼロではないのは、杭先端部における残留の上向きの力を初期値としたためである。除荷時の傾きは各ケース、各荷重段階において同様の傾向を示している。また、載荷時はプレロード圧が高いものほど、同じ沈下量において荷重が大きくなっている。

図8は、図7の除荷・再載荷時の曲線を除き、沈下量が0~10mmの初期段階の結果を示したものである。場所打ち杭の支持力は、杭径の10%の変位における荷重の値であるため、模型杭径の10%となる沈下量5mmにおいて荷重を比

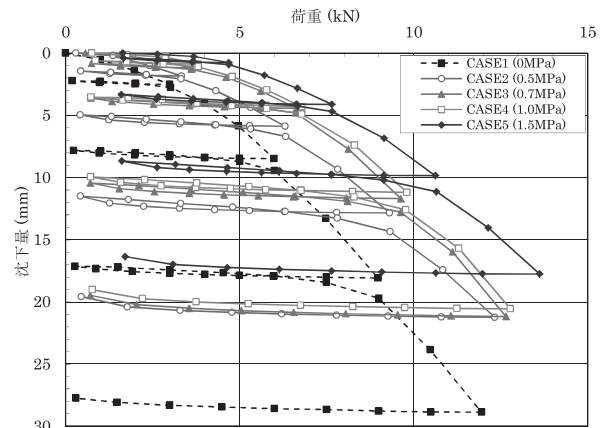


図7 荷重-沈下量関係 (CASE1~5)

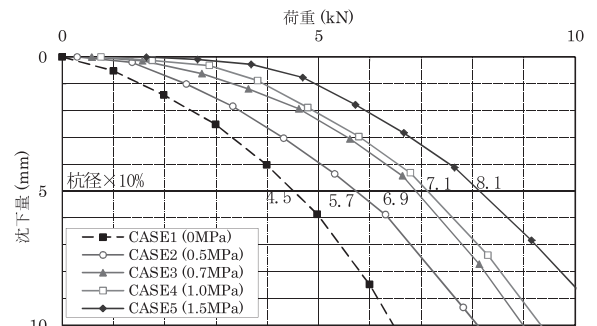


図8 荷重-沈下関係 (支持力比較)

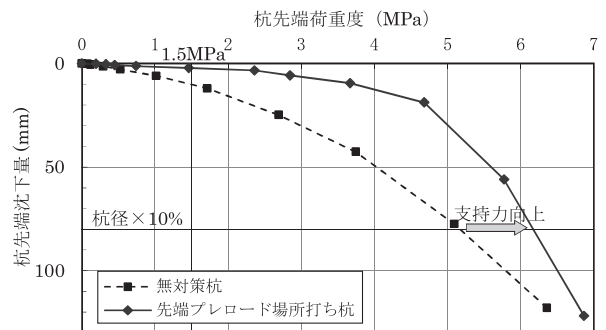


図9 実杭の鉛直載荷試験結果 (砂地盤)

較すると、プレロード圧無しが4.5kNに対して、プレロード圧1.5MPaでは8.1kNとなっており、支持力が約1.8倍向上している。また、沈下量1mmに対する鉛直地盤反力係数を比較すると、プレロード圧無しは776MN/m³、プレロード圧1.5MPaは2511kN/m³となり、プレロード圧が高いものほど、大きくなる傾向にある。

図9は、過去に実施された実杭における鉛直載荷試験結果¹⁾(φ800mm、砂地盤、プレロード圧1.5MPa)を示したものである。図8、9を比較すると荷重-沈下量関係の傾向はよく類似しており、今回の実験は実際の載荷試験を再現できているといえる。

図10は、プレロード圧を作用させたケースとプレロード圧無しのケースにおける支持力の比率を示したものである。プレロード圧が高いものほど、支持力が大きくなっており、両者は比例

関係があることが分かる。

図11は、図7の除荷・再載荷時の曲線を除き、プレロード圧を作用させたケースの曲線をプレロード圧無しの曲線と杭先端荷重で交差するように平行移動させたものである。これは、プレロード圧の作用は鉛直載荷試験における荷重と同じ効果があるものと考えて整理したものであるが、プレロード圧を作用させたものはプレロード圧無しの履歴曲線上を辿るのではなく、プレロード圧無しの曲線よりも同じ沈下量において大きな荷重を示す挙動となった。また、それはプレロード圧の高いものほど、荷重が大きくなる傾向となった。これは、プレロード圧の作用が、鉛直載荷試験における荷重とは異なるものであり、プレロード圧によって、地盤の状態が変化したことを示している。文献5)の実験では、砂の圧密の時間効果として、圧密時間の長さにより地盤の強度は変わらないが、変形係数は圧密時間の長いものほど大きくなる結果が得られており、今回の試験においてもプレロード圧によって地盤の変形係数が上昇したのではないかと推測される。この挙動については、今後、検証が必要である。

図12は、杭先端部を攪乱の有無について比較したものである。各々の曲線はほぼ一致しており、プレロード圧を作用させることにより、乱れの程度の大小の関わらず、同程度まで地盤の乱れが改善されていた。

5. おわりに

模型載荷試験により、得られたことを以下に示す。

- ・模型載荷試験と実杭の鉛直載荷試験の荷重-沈下量関係は類似しており、模型試験は実際の載荷試験を再現できた。
- ・プレロード圧が高いものほど、支持力が大きくなり両者には線形関係がある。
- ・鉛直地盤反力係数は、プレロード圧が高いものほど大きくなる傾向にある。
- ・プレロード圧を作用させたケースの荷重-沈下量関係は、プレロード圧無しの履歴曲線上を辿るのではなく、プレロード圧無しの曲線よりも同じ沈下量において大きな荷重を示す挙動となる。
- ・杭先端部の乱れの大小に関わらず、プレロード圧の作用により、地盤の乱れが改善される。

今回は、模型地盤が正規圧密状態の試験であったが、実杭の地盤は過圧密状態であるため、今後は過圧密状態を模擬した試験を行う予定である。また、プレロード圧の保持時間の長さの影響等についても検証していく。

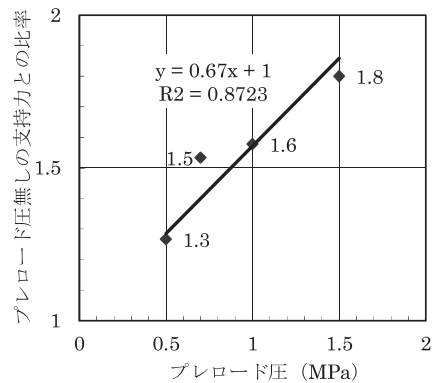


図10 プレロード圧無しの支持力との比率

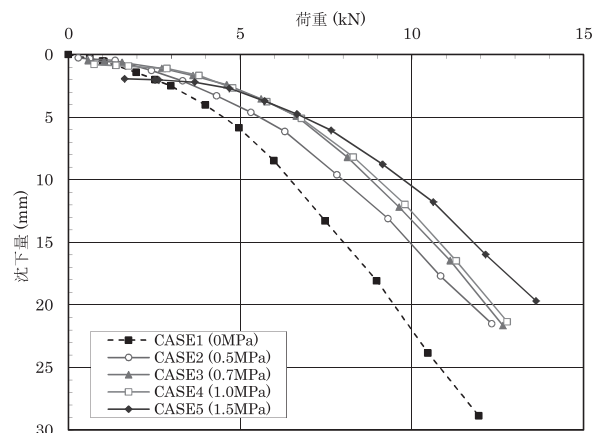


図11 荷重-沈下量関係 (杭先端荷重補正)

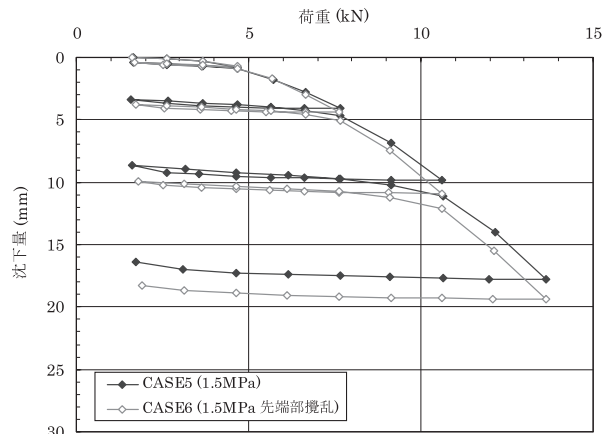


図12 荷重-沈下量関係 (杭先端部攪乱10mm)

参考文献

- 1) 先端プレロード場所打ち杭設計施工マニュアル、東日本旅客鉄道株式会社、2004.12
- 2) 谷口、渡邊、三上、矢島：先端プレロード場所打ち杭の先端支持力発現に関する模型載荷試験、第48回地盤工学研究発表会、pp.1313-1314、2013.7
- 3) 村田、奥村、館山：新しい場所打ち杭の開発、鉄道総研報告、pp.26-32、1989.7
- 4) 岸田、高野、吉沢：砂地盤のNon-displacement pile (埋込み杭・場所打ちコンクリート杭) 先端部の荷重-沈下関係に杭径が与える影響、日本建築学会論文報告集、第284、pp.17-27、1979.10
- 5) Daramola, O.: Effect of consolidation age on stiffness of sand, Geotechnique, Vol.30, No.2, pp.313-316, 1980