

根固め部の下方長さと強度がストレート杭の支持力特性に与える影響

－埋込み杭の拡大根固め部に関する模型実験 その2－

EFFECT OF TIP LENGTH AND STRENGTH OF ENLARGED GROUTED BASE
ON BEARING CAPACITY OF STRAIGHT PILE

－ Model tests on enlarged grouted base of bored precast pile Part 2－

石川一真*, 伊藤淳志**, 小椋仁志***

Kazuma ISHIKAWA, Atsushi ITO and Hitoshi OGURA

Vertical loading tests were performed on the bearing capacity of straight pile with enlarged grouted base using pressurized sand tank for studying the effects of the tip length and the strength of enlarged grouted base. The main conclusions are as follows. 1) When the tip length was zero, “bond failure” occurred in the early stage of loading regardless of the strength, and the pile head load reduced abruptly. 2) When the tip length was 0.83 times the pile diameter and the strength was 15 N/mm², “punching failure” finally occurred, but the same bearing capacity was obtained as in the case when the tip length was 1.3 times the pile diameter. 3) When the tip length was 1.3 times the pile diameter, and the strength was 15 N/mm², no “punching failure” occurred, and the pile head load continued to increase until the completion of loading.

Keywords : Bored precast pile, Straight pile, Model test, Enlarged grouted base, Vertical load test, Failure process

埋込み杭, ストレート杭, 模型実験, 拡大根固め部, 鉛直載荷試験, 破壊過程

1. 序

筆者らは、既製コンクリート杭の拡大根固め工法において、4つの要素—①杭本体の形状、②根固め部の強度、③根固め部の下方長さ（杭本体先端から根固め部先端までの距離）、④根固め部の直径—が杭の支持力特性に与える影響を調べることを目的とする模型実験を行った。

一連の実験のうち、杭本体を節杭とした場合に根固め部の強度と下方長さが支持力特性に与える影響について前報¹⁾で検討した。その結果、1) 根固め強度が 10 N/mm²であれば、下方長さが無くても極限支持力を評価する沈下量（節部径の 10 %）までは、強度が 15 N/mm²以上のケースと同等の支持力が得られること、2) 根固め強度が 15 N/mm²であれば、下方長さの有無は荷重-沈下量曲線にほとんど影響を及ぼさないこと、3) 根固め部が破壊しても支持力が大きく減少することはないことなどがわかった。

一方、拡大根固め工法には杭本体をストレート杭とするものも多くあり、いくつかの模型実験が行われている。倉知ら²⁾³⁾は根固め部の下方長さを杭径の 1, 2, 3, 3.5 倍に変化させて模型実験を、また木谷ら⁴⁾は根固め部の下方長さと直径をパラメータとして模型実験を

行っている。しかし、根固め部の強度の影響については検討されていない。

本研究では、ストレート杭を用いて、根固め部の下方長さを杭径の 0, 0.83, 1.3 倍に変化させ、加えて根固め部の強度も変化させて模型実験を行った。本報では、これらの実験結果を述べるとともに既往の研究との比較を行い、杭本体をストレート杭とした場合に根固め部の下方長さと強度が支持力特性に与える影響について検討する。また、前報¹⁾で報告した節杭の実験結果と比較することにより、杭本体の形状が支持力特性に与える影響についても検討する。

2. 実験概要

2. 1 実験装置

本研究に用いた実験装置や実験手順の詳細は、前報¹⁾に示してあるので参照されたい。杭先端付近の地盤の応力状態を再現するために加圧土槽（内径 584 mm、高さ 700 mm、厚さ 15 mm の鋼管）を用い、その内壁面には地盤との摩擦低減策を施した。地盤には気乾状態の淀川砂を用い、空中落下法により土槽内に堆積させた。そして、地盤上の加圧板に設置した 4 台の連動油圧ジャッキを用いて、600

本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集(2008～2011年)¹⁾²⁾³⁾⁴⁾に発表した。

* 関西大学大学院
ジャパンパイル(株) 修士(理学)

** 関西大学環境都市工学部建築学科 准教授・博士(工学)

*** ジャパンパイル(株) 工博

Graduate School of Science and Engineering, Kansai University
JAPAN PILE Corporation, M. Sci.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Environmental and Urban Engineering,
Kansai University, Dr. Eng.
JAPAN PILE Corporation, Dr. Eng.

kN/m^2 の上載圧を地盤に与えた。なお上載圧 600 kN/m^2 は、実物の地盤（湿潤単位体積重量 17 kN/m^3 、水中単位体積重量 7 kN/m^3 、地下水位 GL-10 m）において深さ約 70 m における上載圧に相当する。

杭の設置位置は土槽の中心軸上とし、杭本体の先端位置が土槽上面より 200 mm となるようにした。杭の荷重方法はスクリージャッキによる連続荷重であり、測定沈下量が 17 mm になった時点で荷重を終了した。杭頭荷重 P_o はロードセルで測定し、杭の沈下量は変位計で測定した。

2. 2 模型杭と根固め部

模型杭と根固め部の断面を図 1 に示す。模型杭には、原型として $\phi 600 \text{ mm}$ のストレート杭を想定し、縮尺を 1/20 とした $\phi 30 \text{ mm}$ (杭径 D) の鋼製ストレート杭を用いた。また 3.3 節で述べるように、ひずみゲージを貼付した杭も用いた。

根固め部の径 De は 64 mm であり、杭本体先端から上方への長さは 100 mm である。根固め部の下方への長さ L と強度は、次節に示すように変化させた。根固め部はモルタルとし、前報¹⁾と同様の作製方法および養生方法とした。

2. 3 実験の種類

実験の種類は、表 1 に示す 5 種類である。パラメータは、根固め部の下方長さ、根固め部の強度（以下それぞれ、下方長さ L 、根固め強度と表記）である。前報¹⁾で報告した節杭の場合は下方長さ L を 2 種類 ($L=0, 25 \text{ mm}$) としていたが、ストレート杭の場合は下方長さ L が支持力特性上重要になると予想されたため、これを 3 種類 ($L=0, 25, 40 \text{ mm}$) に増やした。

下方長さ ($L=0, 25, 40 \text{ mm}$) と杭径 ($D=30 \text{ mm}$) との比 (L/D) は、0, 0.83, 1.3 となる。また、根固め部の径 ($De=64 \text{ mm}$) は原型では 1280 mm に相当する。この径は、杭周部の掘削径 650 mm (杭径+50 mm) に対して 2.0 倍である。

2. 4 根固めモルタルの強度

表 2 に、根固めモルタルの一軸圧縮試験と割裂試験の結果（それぞれ 3 供試体の平均値）を示す。これより、おおむね所定の強度（表 1 に示す根固め強度）の根固め部を作製できたことがわかる。なお、平均する前の 3 供試体の一軸圧縮強度はその平均値に対して $\pm 5 \%$ の範囲内に、同じく引張強度は $\pm 16 \%$ の範囲内におさまっていた。

2. 5 地盤の相対密度

表 2 には、砂の質量と土槽容積から求めた相対密度も示した。5 ケースの実験の加圧後相対密度 Drc は 92.6~98.3 % の範囲内におさまっており、密な地盤を再現性よく作製できたことがわかる。

3. ストレート杭における下方長さの影響

本章では、下方長さ L を変えて行った実験について、その結果を示し考察を加える。ここでは、根固め強度を 15 N/mm^2 とした 3 ケースをとりあげる。

3. 1 荷重-沈下量曲線

図 2 は、3 ケースの荷重-沈下量曲線を比較したものである。この図より、以下のことが指摘できる。

- ① S-64-0-15 は、沈下量 $S=1 \text{ mm}$ で杭頭荷重 P_o が急激に減少し、その後は緩やかに増加する。S-64-25-15 は、 $S=5 \text{ mm}$ から P_o が減少し、 $S=6.5 \text{ mm}$ 以降はほぼ一定である。S-64-40-15 は、載荷終了まで P_o が増加し続ける。

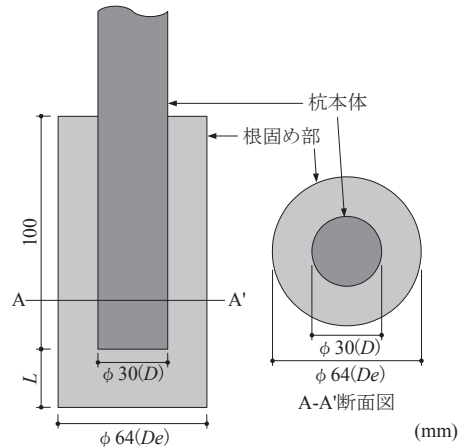


図 1 模型杭断面図

表 1 実験種類

実験No.	下方長さL (mm)	根固め強度 (N/mm^2)
S-64-0-5	0	5
S-64-25-5	25	5
S-64-0-15	0	15
S-64-25-15	25	15
S-64-40-15	40	15

表 2 モルタル強度と地盤の相対密度

実験No.	モルタル強度		地盤の相対密度	
	一軸圧縮 強度 F_c (N/mm^2)	引張強度 F_t (N/mm^2)	加圧前 相対密度 Dri (%)	加圧後 相対密度 Drc (%)
S-64-0-5	4.4	0.6	87.3	92.6
S-64-25-5	4.9	0.7	92.9	97.7
S-64-0-15	14.2	1.7	93.5	97.8
S-64-25-15	13.7	1.7	88.7	93.8
S-64-40-15	13.0	1.3	94.0	98.3

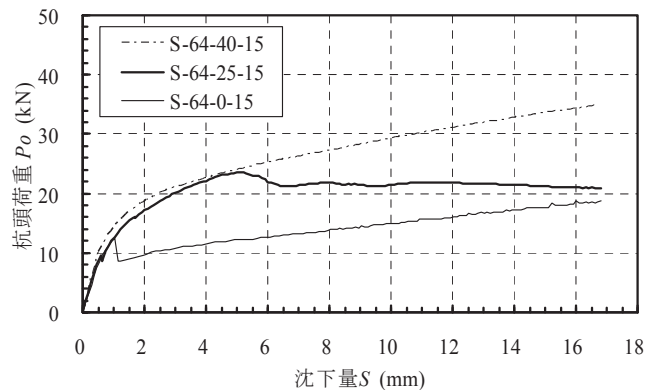


図 2 荷重-沈下量曲線（杭形状=ストレート杭， $L=0, 25, 40 \text{ mm}$ ，根固め強度= 15 N/mm^2 ）

- ② S-64-25-15 と S-64-40-15 の荷重-沈下量曲線は、極限支持力を評価する沈下量である $S=3 \text{ mm}$ ($=0.1 D$) までは、ほぼ同じである。このことから、根固め強度が 15 N/mm^2 の場合、実用とする範囲 ($S \leq 0.1 D$) では、下方長さ L と杭径 D の比 (L/D) が 0.83 のケースと 1.3 のケースの支持力は同等であると判断される。

3. 2 根固め部の破壊形状

載荷終了後に根固め部を地盤から注意深く掘り出し、破壊形状を観察した。そのスケッチ（立体図と縦断面図）を図3に示す。縦断面図において、破線は載荷前の根固め部の形状を表している。それぞれのケースの破壊状況は次のようであった。

・ S-64-0-15 ($L/D=0$)

杭本体周面と根固め部との間がすべり、根固め部先端から杭本体が突き出していた。杭本体の突出量は 14 mm であり、根固め部にクラックはなかった。この破壊形状を『杭本体周面と根固め部との付着切れ破壊』（以下、略して「付着切れ破壊」）と呼ぶことにする。ただし、観察終了後に根固め部を杭本体から外すのは容易ではなく、手で引き抜くことはできなかった。このことから、杭本体周面と根固め部との付着が切れた後も、両者の間の摩擦力が大きいことがわかる。

・ S-64-25-15 ($L/D=0.83$)

根固め部先端から杭下方の根固め部が突き出していた。この破壊形状を『杭先端によるパンチング破壊』（以下、略して「パンチング破壊」）と呼ぶことにする。縦断面図の突出部（A,B）のうち、中心部 A は載荷前の長さ（25 mm）のままであるが、外周部 B は 25 mm より短くなっていた。根固め部の先端は、突出部（A,B）と突出部の周囲の根固め部 C とによって同心円の階段状になっており、A と C との差からなる突出量は 12 mm であった。

さらに、C の底面には放射状クラックが発達し、側面には縦クラックが発達していた。これは B が圧縮されて水平方向へ変形したことによって、C が内側から押し広げられたためと考えられる。この破壊は円周方向の引張力によるため、『圧縮破壊に伴う割裂破壊』と呼ぶことにする。

また、杭本体の側方の根固め部 D は、杭本体周面との間ですべりが生じており、「付着切れ破壊」していた。

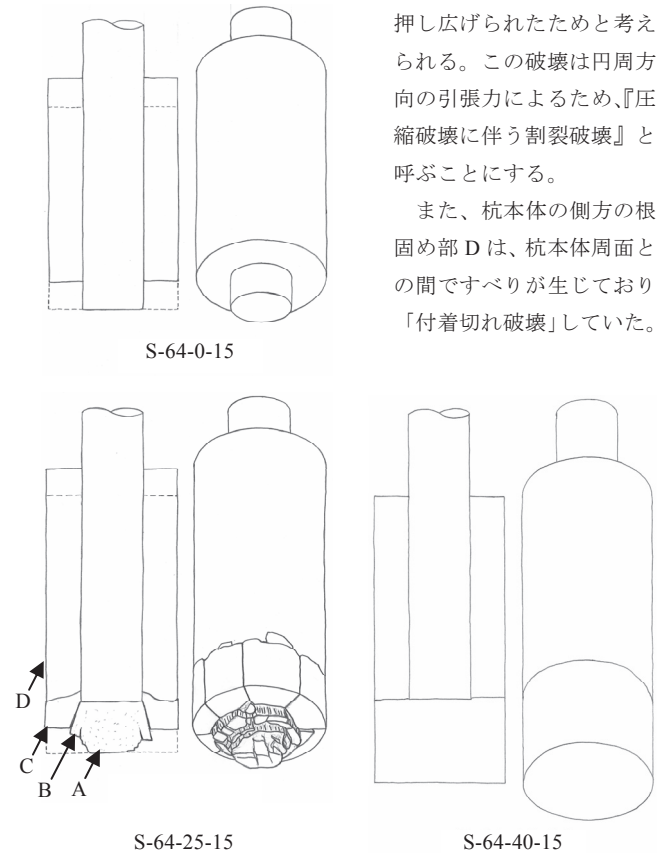


図3 根固め部の破壊形状（杭形状=ストレート杭、 $L=0,25,40$ mm、根固め強度=15 N/mm²）

・ S-64-40-15 ($L/D=1.3$)

杭本体先端で根固め部に水平クラックが発生していたが、これ以外のクラックはなかった。また、水平クラックより上の根固め部と杭本体周面とのずれもなかった。これらより、①水平クラックより下の根固め部が地盤から受けた周面抵抗力と先端抵抗力は、杭本体先端が負担していたこと、②水平クラックより上の根固め部が地盤から受けた周面抵抗力は、杭本体と根固め部との付着力より小さかったことがわかる。ここでは、この破壊形状を『水平クラック破壊』と呼ぶことにする。

以上の状況を簡単にまとめると、 $L/D=0$ の時は「付着切れ破壊」、 $L/D=0.83$ の時は「パンチング破壊」、 $L/D=1.3$ の時は「水平クラック破壊」である。

このように、下方長さ L によって根固め部の破壊形状が異なることは、既往の研究でも報告されている。倉知ら²⁾³⁾によると、 $L/D=1$ の時は「パンチング破壊」、 $L/D=2, 3, 3.5$ の時は「割裂破壊（杭本体直下の根固め部にくさびが形成され、くさびの周囲が縦に割れる破壊形状）」である。また木谷ら⁴⁾によると、 $L/D=0$ の時は「付着切れ破壊」、 $L/D=0.7, 0.9$ の時は「パンチング破壊」、 $L/D=1.75$ の時は「水平クラック破壊」が起こっている。これらの研究および本研究で得られた結果を図4および図5に示し、各研究の実験条件を表3に示す。

根固め部の破壊形状は、 L/D の他に杭径と根固め径の比 (De/D)、根固め強度、根固め部の材料、地盤状況の影響を受けると考えられるが、図4および表3に示した実験範囲においては、 L/D が 0 から 3.5 へ大きくなるにつれて、「付着切れ破壊」から「パンチング破壊」へ、そして「水平クラック破壊」へ、さらに「割裂破壊」へ変化することがわかる。

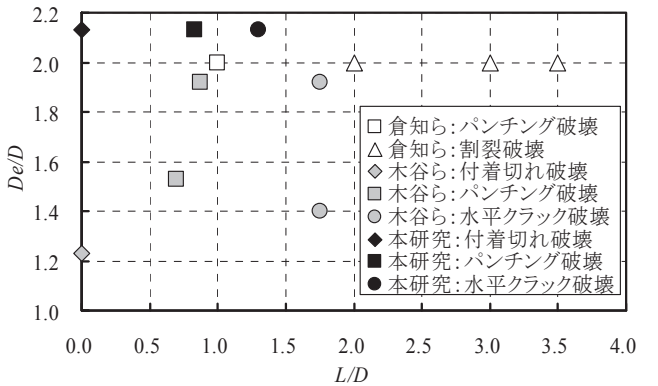


図4 根固め部の形状と破壊形状との関係

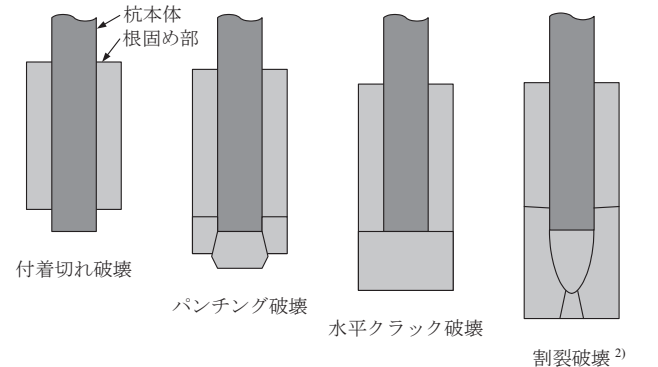


図5 破壊形状の模式図

表 3 各研究の実験条件

	地盤			根固め部	
	作成方法	上載圧 (kN/m ²)	N値	材料	一軸圧縮 強度 (N/mm ²)
倉知ら ²³⁾	空中落下	196	不明	石膏	15.4
木谷ら ⁴⁾	締め固め	300	20程度	モルタル	平均20.7
本研究	空中落下	600	45程度	モルタル	13.0～14.2

3. 3 根固め部の破壊過程の推定

S-64-0-15 と S-64-25-15 の実験には、図 6(a),(b) に示すひずみゲージを付けた模型杭を使用した。この杭は、杭本体先端の荷重と杭本体周面の荷重とを分離して測定するために、内部に芯棒を通し、ひずみゲージを貼付してある。なお、杭先端付近に設けた隙間 (2 mm) にはブチルゴム系コーティング剤を充填した。

ひずみゲージの値から杭本体の先端抵抗力 P_p を算定した。なお、この軸力算定の際には、杭本体の鋼材のヤング係数を 20.5×10^4 N/mm² とした。

また、杭本体周面と根固め部との付着力 P_f' を下式で算定した (図 6 参照)。

$$P_f' = P_o - P_p - P_f$$

記号 P_o : ロードセルで計測した杭頭荷重

P_p : 杭本体の先端抵抗力

P_f : 根固め部上端以浅の摩擦抵抗力

ここで P_f は、予備試験として行った、根固め部を付けずに载荷したストレート杭の結果から求めた値である。また、 P_f' は「付着切れ破壊」が起こった後は、杭本体周面と根固め部との摩擦力となる。

以上の方法で求めた P_p 、 P_f' 、 P_o 、 P_f を、沈下量 S との関係で示したものが図 7(a),(b) である。図 7(a) は S-64-0-15 の結果、図 7(b) は S-64-25-15 の結果である。これらと図 3 の破壊形状より次のことが指摘できる。

・ S-64-0-15 ($L/D=0$)

$S=0 \sim 1$ mm においては、根固め部が地盤から受けた抵抗力 P_e (図 6(a) に示す、根固め部の先端抵抗力 P_{ep} と周面抵抗力 P_{ef} の合計) が、付着力 P_f' として杭本体に伝わり、 P_o のほとんどを占めていた。

$S=1$ mm において P_f' が急減しており、 P_e が付着力 P_f' の限界に達したために「付着切れ破壊」が起こったと考えられる。しかし、 $S=1$ mm 以降における P_f' は約 5 kN であり、「付着切れ破壊」後も、 P_e の一部が摩擦力 P_f' として杭本体に伝わっていたことがわかる。また、「付着切れ破壊」と同時に P_p が急増し、载荷終了まで増加し続けた。このため、 $S=1$ mm 以降の P_o は増加した。

・ S-64-25-15 ($L/D=0.83$)

$S=0 \sim 0.6$ mm においては、根固め部が地盤から受けた抵抗力 P_e (図 6(b) に示す、根固め部の先端抵抗力 P_{elp} と周面抵抗力 P_{elf} の合計) が、付着力 P_f' として杭本体に伝わり、 P_o のほぼ全てを占めていた。

$S=0.6$ mm において P_f' が急減しており、S-64-0-15 と同様に「付着切れ破壊」が起こったと考えられる。「付着切れ破壊」後の P_p は、 $S=5$ mm まで急増し、 $S=5 \sim 6.5$ mm の間は減少した。これより、 $S=5$ mm までは、杭本体より下方の根固め部が地盤から受けた抵抗力 (P_{elp} と P_{elf}) が P_p として杭本体先端に伝わっていたが、 $S=5$ mm

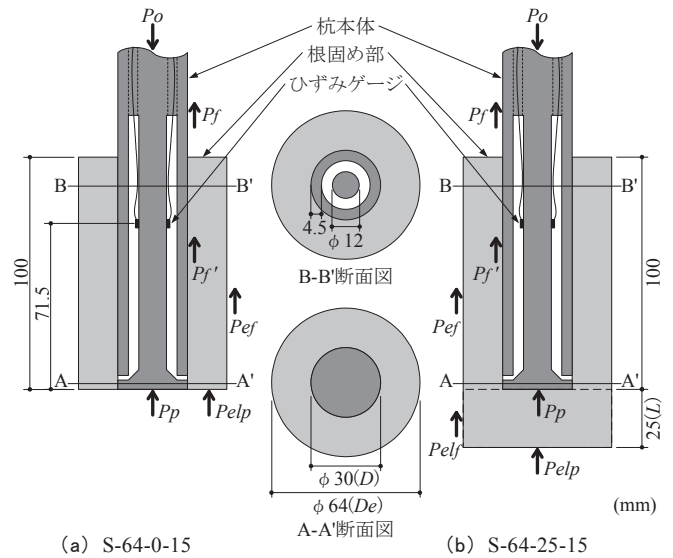


図 6 ひずみゲージ付き模型杭の断面図

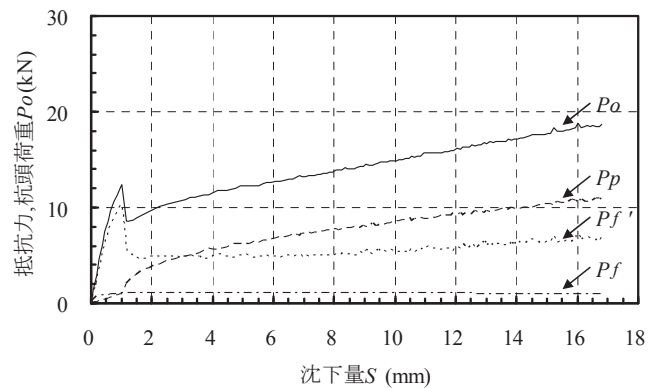


図 7(a) 抵抗力・杭頭荷重-沈下量曲線 (S-64-0-15)

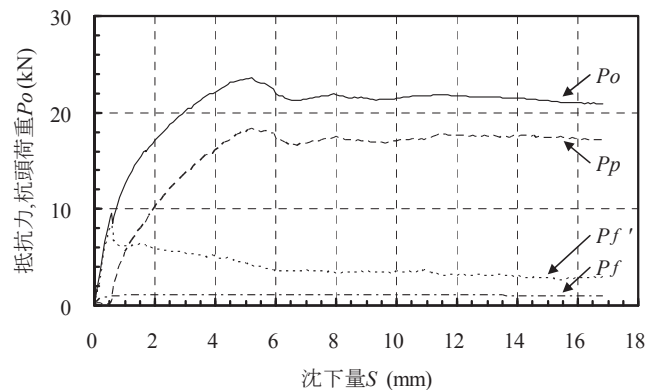


図 7(b) 抵抗力・杭頭荷重-沈下量曲線 (S-64-25-15)

で「パンチング破壊」が始まり、杭本体先端に伝わる力が P_{elp} の一部 (図 3 の A, B の先端抵抗力) だけになったと考えられる。なお、 P_{elp} の一部 (図 3 の C の先端抵抗力) と P_{elf} は図 3 の D に伝わるが、D と杭本体周面とはすでに「付着切れ破壊」しており、摩擦力 P_f' 以上の力は杭本体へ伝わらない。また、「パンチング破壊」後の P_p は载荷終了までほぼ一定であり、このために $S=6.5$ mm 以降の P_o も一定であった。

3. 4 まとめ

以上をまとめると、次のようになる。

- ① 下方長さ L を 0 mm とした S-64-0-15 ($L/D=0$) は、 $S=1$ mm で杭頭荷重 P_o が急激に減少した。これは「付着切れ破壊」を起こしたためと考えられる。また、 $L=25$ mm とした S-64-25-15 ($L/D=0.83$) は、 $S=5$ mm から P_o が減少した。これは「パンチング破壊」を起こしたためと考えられる。しかし、 $L=40$ mm とした S-64-40-15 ($L/D=1.3$) は、杭本体先端より下方の根固め部にはクラックがなく、載荷終了まで P_o が増加し続けた。
- ② $L=25$ mm (S-64-25-15) の場合は、実用とする範囲 ($S \leq 0.1D$) では $L=40$ mm (S-64-40-15) のケースと同等の支持力が得られた。
- ③ 既往の研究との比較により、 L/D が 0 から 3.5 へ大きくなるにつれて、根固め部の破壊形状は「付着切れ破壊」から「パンチング破壊」へ、そして「水平クラック破壊」へ、さらに「割裂破壊」へ変化することがわかった。
- ④ S-64-0-15 では、根固め部が地盤から受けた抵抗力 P_e ($=P_{ep}+P_{ef}$) は、載荷初期は杭本体周面と根固め部との付着力 P_f' として杭本体へ伝達され、「付着切れ破壊」後は P_e の一部が摩擦力 P_f' として伝達されたと考えられる。
- ⑤ S-64-25-15 では、「パンチング破壊」以前は、杭本体より下方の根固め部が地盤から受けた抵抗力 (P_{elp} と P_{elf}) が杭本体先端へ伝達されていたが、「パンチング破壊」後は P_{elp} の一部だけが伝達されるようになったと考えられる。

4. ストレート杭における根固め強度の影響

本章では、根固め強度を変えて行った実験について、その結果を示し考察を加える。ここでは、下方長さ L を 0 および 25 mm とした 4 ケースを取りあげる。

4. 1 荷重-沈下量曲線

図 8 は、4 ケースの荷重-沈下量曲線を比較したものである。この図より、以下のことが指摘できる。

- ① 下方長さ L を 0 mm とした S-64-0-15 と S-64-0-5 の荷重-沈下量曲線を比べると、S-64-0-15 は沈下量 $S=1$ mm で杭頭荷重 P_o が急減し、S-64-0-5 は減少幅が小さいものの $S=0.5$ mm で P_o が急減する。 P_o 急減後の両曲線はほぼ同じであり、緩やかに P_o が増加する。
- ② $L=25$ mm とした S-64-25-15 と S-64-25-5 の荷重-沈下量曲線を比べると。S-64-25-15 は $S=5$ mm から P_o が減少し、 $S=6.5$ mm 以降はほぼ一定になる。一方、根固め強度の小さい S-64-25-5 は $S=1$ mm 付近から曲線の勾配が緩くなり、 $S=2$ mm 以降は P_o がほぼ一定になる。

4. 2 根固め部の破壊形状

根固め強度が 5 N/mm^2 のケースのスケッチを図 9 に示す（根固め強度が 15 N/mm^2 のケースは図 3 を参照）。それぞれのケースの破壊状況は以下のようであった。

・ S-64-0-5

根固め部先端から杭本体が突き出しており、S-64-0-15 と同様に「付着切れ破壊」をしていた。なお、杭本体の突出量は 15 mm であった。

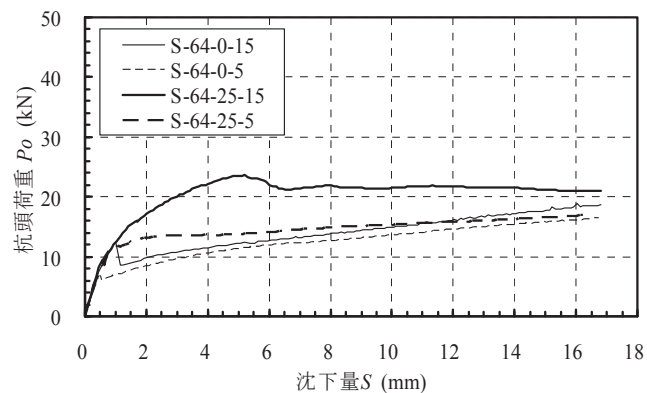


図 8 荷重-沈下量曲線（杭形状=ストレート杭， $L=0, 25$ mm，根固め強度=5, 15 N/mm^2 ）

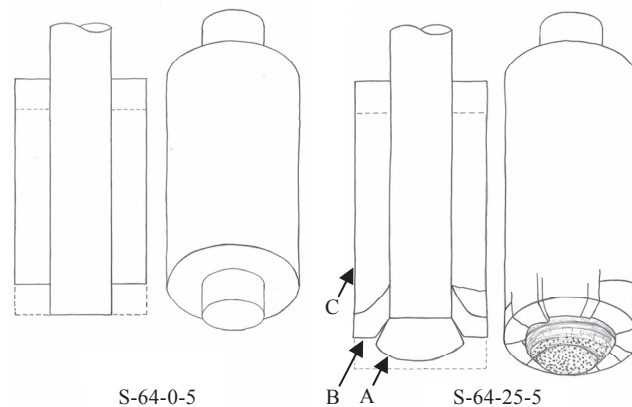


図 9 根固め部の破壊形状（杭形状=ストレート杭， $L=0, 25$ mm，根固め強度=5 N/mm^2 ）

・ S-64-25-5

根固め部先端から杭下方の根固め部が突き出しており、S-64-25-15 と同様に「パンチング破壊」をしていたと言える。ただし、縦断面図から分かるように、突出部 A の先端は曲面形状になっていた。また、杭本体先端から突出部先端までの長さは 21 mm であり、載荷前の長さ (25 mm) から 4 mm 圧縮されていた。これを『突出部の圧縮破壊』と呼ぶことにする。なお、突出部 A の周囲の根固め部 B と A との差は 12 mm であった。

さらに、B の底面には放射状クラックが発達し、側面には縦クラックが発達していた。これは A が圧縮されて水平方向へ変形したことによって、B が内側から押し広げられたためと考えられる。よって S-64-25-15 と同様に、「圧縮破壊に伴う割裂破壊」をしていたと言える。また、杭本体の側方の根固め部 C は「付着切れ破壊」をしていた。

4. 3 まとめ

以上と前章での考察とをまとめると、次のようになる。

- ① 下方長さ $L=0$ mm の 2 ケース (S-64-0-15, S-64-0-5) はともに「付着切れ破壊」を起こしており、杭頭荷重 P_o が急減した時 (S-64-0-15 : $S=1$ mm, S-64-0-5 : $S=0.5$ mm) に破壊が起きたと考えられる。また、根固め強度が大きいと、 P_o 急減直前の P_o も大きい。ただし、 P_o 急減後の P_o はほとんど同じである。
- ② $L=25$ mm の 2 ケースの主な破壊形状は、S-64-25-15 は「パンチ

ング破壊」、S-64-25-5 は「パンチング破壊」と「突出部の圧縮破壊」である。それぞれの荷重-沈下量曲線は、 $S=5\text{ mm}$ と $S=1\text{ mm}$ で曲線の勾配に変化が表れており、「パンチング破壊」が起きたと考えられる。両ケースの $S=6.5\text{ mm}$ 以降の杭頭荷重 P_o には、約 $7\sim 4\text{ kN}$ の差がある。これは、S-64-25-5 の「突出部の圧縮破壊」の影響であると考えられる。

- ③ 極限支持力を評価する沈下量 $S=3\text{ mm}$ ($=0.1 D$) における P_o を比較すると、S-64-25-15 は約 20 kN であるが、S-64-25-5 は約 14 kN 、S-64-0-15 と S-64-0-5 は約 10 kN である。S-64-25-15 以外の 3 ケースは、 $S=3\text{ mm}$ 以前において杭頭荷重 P_o に影響を及ぼす重大な破壊 ($L=0\text{ mm}$ のケースでは「付着切れ破壊」、 $L=25\text{ mm}$ のケースでは「パンチング破壊」) が根固め部に生じたために、 $S=3\text{ mm}$ における P_o が小さくなったと考えられる。

5. 杭本体の形状の影響

本章では、これまで述べてきたストレート杭の実験結果と前報¹⁾で報告した節杭の実験結果とを比較し、杭本体の形状（以下、杭形状と表記）の影響について述べる。なお、節杭の直径は $\phi 40\sim 30\text{ mm}$ （節部径 - 軸部径）であり、根固め部内に節を 2 段（上節と下節）設けてある。以下において、実験 No. の先頭が N のものは節杭の実験を表している。

5. 1 荷重-沈下量曲線の比較

下方長さ L を 0 mm とし、杭形状をストレート杭および節杭に、根固め強度を 5 および 15 N/mm^2 にした 4 ケース (S-64-0-5, S-64-0-15, N-64-0-5, N-64-0-15) の荷重-沈下量曲線を図 10(a) に示す。この図より以下のことが指摘できる。

- ① ストレート杭を用いた場合、2 ケースとも $S\leq 1\text{ mm}$ で杭頭荷重 P_o が急減する。
- ② 節杭を用いた場合、N-64-0-5 は $S=1\text{ mm}$ 付近から荷重-沈下量曲線の勾配が緩くなるが、2 ケースとも P_o は載荷終了まで増加し続ける。
- 次に、 $L=25\text{ mm}$ とし、杭形状をストレート杭および節杭に、根固め強度を 5 および 15 N/mm^2 にした 4 ケース (S-64-25-5, S-64-25-15, N-64-25-5, N-64-25-15) の荷重-沈下量曲線を図 10(b) に示す。この図より以下のことが指摘できる。
- ③ ストレート杭を用いた場合、S-64-25-15 は $S=5\text{ mm}$ から P_o が減少し、S-64-25-5 は $S=1\text{ mm}$ 付近から曲線の勾配が緩くなる。
- ④ 節杭を用いた場合、N-64-25-5 は $S=8\text{ mm}$ 付近から曲線の勾配が緩くなるが、2 ケースとも載荷終了まで P_o が大きく減少することはない。

さらに、前節までの破壊時期の推定結果と図 10(a) (b) から、以下のことが指摘できる。

- ⑤ ストレート杭において、根固め部の破壊が起こったと推定される沈下量 (S-64-0-15 : $S=1\text{ mm}$, S-64-0-5 : $S=0.5\text{ mm}$, S-64-25-15 : $S=5\text{ mm}$, S-64-25-5 : $S=1\text{ mm}$) より浅い範囲の荷重-沈下量曲線は、いずれの根固め強度であっても、節杭の曲線とほとんど同じである。これより、根固め部が破壊する以前であれば、杭本体の形状および根固め強度は荷重-沈下量曲線に影響をおよぼさないと考えられる。

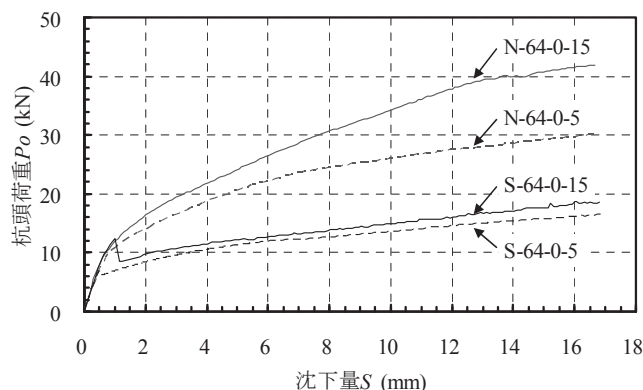


図 10(a) 荷重-沈下量曲線（杭形状=ストレート杭,節杭,
 $L=0\text{ mm}$, 根固め強度=5,15 N/mm^2)

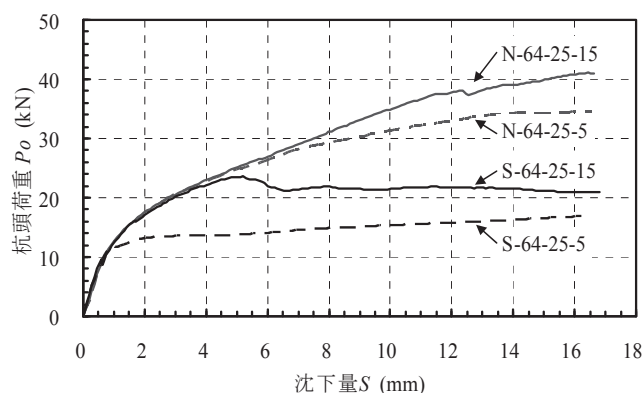


図 10(b) 荷重-沈下量曲線（杭形状=ストレート杭,節杭,
 $L=25\text{ mm}$, 根固め強度=5,15 N/mm^2)

表 4 破壊形状の比較

		根固め強度 (N/mm^2)	
		5	15
$L=0\text{ mm}$	ストレート杭	付着切れ破壊 S-64-0-5	付着切れ破壊 S-64-0-15
	節杭	全体的な圧縮破壊 N-64-0-5	割裂破壊 パンチング破壊(下節) N-64-0-15
$L=25\text{ mm}$	ストレート杭	パンチング破壊(杭先端) 突出部の圧縮破壊 S-64-25-5	パンチング破壊(杭先端) S-64-25-15
	節杭	全体的な圧縮破壊 パンチング破壊(杭先端) N-64-25-5	割裂破壊 パンチング破壊(杭先端) N-64-25-15

5. 2 根固め部の破壊形状の比較

前節で述べた 8 ケースについて、根固め部の主な破壊形状をまとめて表 4 に示す。同表には実験 No. も記入した。この表から、以下のことが指摘できる。

- ① $L=0\text{ mm}$ とした場合、ストレート杭は根固め強度に関わらず「付着切れ破壊」を起こした。一方、節杭の場合は根固め強度が 15 N/mm^2 の時は「割裂破壊」と「下節によるパンチング破壊」を起こし、根固め強度が 5 N/mm^2 の時は「全体的な圧縮破壊」を起こした。杭形状による破壊形状の差異は、杭本体と根固め部との荷重伝達方法がストレート杭の場合は両者の間の付着力および摩擦力であるのに対し、節杭の場合は節の下面が根固め部から受け

る抵抗力であるために生じたと考えられる。

- ② $L=25\text{ mm}$ とした場合、杭形状や根固め強度にかかわらず、全ケースで「杭先端によるパンチング破壊」が起こった。杭本体と根固め部との荷重伝達方法は、どちらの杭形状も前項①の他に、杭本体先端が根固め部から受ける抵抗力があると考えられる。

5. 3 まとめ

以上をまとめると、次のようになる。

- ① 根固め部が破壊する以前であれば、杭本体の形状および根固め強度は荷重-沈下量曲線に影響をおよぼさないと考えられる。
- ② 節杭を用いた場合は、根固め部が破壊しても支持力が大きく減少することはない。しかしストレート杭の場合は、根固め部の破壊によって支持力が急減したり、増加しなくなったりする。これは、杭本体周面と根固め部との荷重伝達方法が、ストレート杭の場合は両者の間の付着力および摩擦力であるが、節杭の場合は節の下面が根固め部から受ける抵抗力であるためと考えられる。
- ③ その結果、下方長さの有無、根固め強度の大小に関わらず、最終的な支持力はストレート杭より節杭の方が大きくなった。

6. 結語

ストレート杭を用いた拡大根固め工法において、根固め部の下方長さや強度が杭の支持力特性に与える影響を調べることを目的として、地盤内応力を再現できる加圧土槽を用いて模型載荷実験を行い、以下に示す結果を得た。

- ① 下方長さが無い場合は、根固め強度に関わらず「付着切れ破壊」が起こり、載荷初期において杭頭荷重が急減した。
- ② 下方長さが杭径の 0.83 倍で根固め強度が 5 N/mm^2 のケースは、「パンチング破壊」と「突出部の圧縮破壊」が起こり、載荷初期に杭頭荷重が増加しなくなった。しかし、下方長さが杭径の 0.83 倍で根固め強度が 15 N/mm^2 のケースは、最終的には「パンチング破壊」が起こったが、極限支持力を評価する沈下量（杭径の 10 %）までは、下方長さが杭径の 1.3 倍のケースと同等の支持力が得られた。
- ③ 下方長さが杭径の 1.3 倍で根固め強度が 15 N/mm^2 のケースの破壊形状は「水平クラック破壊」であり、載荷終了まで杭頭荷重が

増加し続けた。

また、ストレート杭の実験結果と前報¹⁾で報告した節杭の実験結果とを比較することにより、杭本体の形状が支持力特性に与える影響についても検討し、以下に示す結果を得た。

- ④ 根固め部が破壊する以前であれば、杭本体の形状および根固め強度は荷重-沈下量曲線に影響をおよぼさないと考えられる。しかし、ストレート杭と節杭とでは杭本体周面と根固め部との荷重伝達方法が異なると考えられ、このために最終的な支持力はストレート杭より節杭の方が大きくなった。

最後に、本研究を行うにあたり、貴重なご助言を頂いた岡山理科大学教授山崎雅弘氏と、多大なご協力を頂いた関西大学卒業研究生の諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 石川一真, 伊藤淳志, 小椋仁志, 永井 雅: 根固め部の強度と下方長さが節杭の支持力特性に与える影響 —埋込み杭の拡大根固め部に関する模型実験— その 1—, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.670, pp.2107-2113, 2011.12
- 2) 倉知禎直, 日下部治, 上野勝利, 加倉井正昭, 横山幸満: 根固め杭の先端支持力に及ぼす形状の影響, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.1559-1562, 1992.6
- 3) 上野勝利, 倉知禎直, 大井 明, 横山幸満: 根固め杭の根固め先端部の破壊に及ぼす形状の影響, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.1731-1734, 1993.6
- 4) 木谷好伸, 加藤洋一, 田中和夫, 桑原文夫: 埋込み杭の拡大根固め球根の鉛直支持性能に関する模型実験, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.137-143, 2007.5

注

- 注1) 永井 雅, 中野恵太, 石川一真, 伊藤淳志, 小椋仁志, 山崎雅弘: 節杭を用いたプレボーリング拡大根固め工法の根固め部に関する模型実験 (その 1) ~ (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.591-596, 2008.9
- 注2) 永井 雅, 石川一真, 伊藤淳志, 小椋仁志: 注 1) と同名 (その 4), (その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.423-426, 2009.8
- 注3) 永井 雅, 石川一真, 伊藤淳志, 小椋仁志: 注 1) と同名 (その 6), (その 7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.595-598, 2010.9
- 注4) 永井 雅, 石川一真, 伊藤淳志, 小椋仁志: 注 1) と同名 (その 8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.353-354, 2011.8

(2011年12月 6 日原稿受理, 2012年 3 月16日採用決定)