

## 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 -

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

- Model tests on enlarged grouted base of bored precast pile Part 1 -

石川一真\*, 伊藤淳志\*\*, 小椋仁志\*\*\*, 永井 雅\*\*\*\*

*Kazuma ISHIKAWA, Atsushi ITO, Hitoshi OGURA  
and Masaru NAGAI*

Vertical loading tests were performed on the enlarged grouted base of nodular pile using pressurized sand tank for studying the effects of strength of enlarged grouted base and the length between the pile tip and tip of enlarged grouted base on the pile bearing capacity. The main conclusions based on the studies are as follows. 1) When the tip length was zero and the strength of enlarged grouted base was greater than 10 N/mm<sup>2</sup>, the bearing capacity was equivalent to the case when the strength was 20 N/mm<sup>2</sup> until the settlement reached 10% of the pile diameter. 2) When the strength of the enlarged grouted base was 15 N/mm<sup>2</sup>, there was no effect of the tip length on the load-settlement curve. 3) For all cases, even when the enlarged grouted base failed, the bearing capacity continued to increase.

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

埋込み杭, 節杭, 模型実験, 拡大根固め部, 鉛直載荷試験, 破壊過程

## 1. 序

既製コンクリート杭の埋込み杭工法のひとつに、杭先端の根固め部を杭周部より大きく掘削したプレボーリング拡大根固め工法がある。最近では建設コストを抑える必要から、埋込み杭工法にも一柱一杭方式が可能になる支持力を要請されるようになった結果、従来よりも大きく拡大した根固め部を築造する工法が開発されるようになった。開発に際しては、鉛直支持力は数多く行われる現場での載荷試験によって確認されている<sup>1)</sup>。しかし、根固め部の強度が先端支持力に及ぼす影響や、極限支持力時の根固め部の破壊形状などについては、まだ不明な点が残されているのが現状である。

拡大根固め工法の根固め部に関する既往の研究には、加圧土槽を用いた倉知ら<sup>2)3)</sup>や木谷ら<sup>4)5)</sup>の模型実験がある。倉知らは模型ストレート杭と石膏で作った根固め部とを用いた載荷実験によって、木谷らは模型杭の形状(ストレート杭、節杭)と根固め部の大きさをパラメータとする載荷実験によって、根固め部の支持力特性について検討している。しかし、根固め部の強度が支持力特性に与える

影響や、節杭を用いた場合の下方長さ(杭本体先端から根固め部先端までの距離)の影響などについては、十分に検証されているとは言いがたい。

そこで本研究では、既製コンクリート杭の拡大根固め工法において、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、④根固め部の直径の4つの要素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。本論文では、一連の模型実験のうち、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を図1に示す。応力の相似則を満たすため、根固め部(杭先端部)の地盤内応力を再現できる加圧土槽を用いている。加圧土槽の大きさは岸田ら<sup>6)7)8)</sup>の研究を参考にして土槽底面や側面が実験結果に与える影響を無視できるものとし、内径

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)<sup>1)~4)</sup>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

\*\*\*\* 関西大学大学院 修士(工学)

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.

Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, M. Eng.



## 2. 5 計測装置

4台の連動油圧ジャッキのうち、対角線上に位置する2台にロードセルを取り付け、上載荷重を管理した。杭頭荷重  $P_0$  はスクリージャッキと載荷ロッドの間に取り付けたロードセルで測定し、杭と加圧板の沈下量は変位計で測定した。なお、杭と載荷ロッドは載荷荷重によって縮む。このため、杭とロッドの軸方向の圧縮剛性と載荷荷重から縮み量  $\Delta S$  を求め、測定した杭の沈下量から  $\Delta S$  を減じて補正したものを沈下量  $S$  とした。

## 2. 6 実験の種類

実験の種類は、表3に示す8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、載荷を終了する沈下量（以下それぞれ、下方長さ  $L$ 、根固め強度、終了沈下量と表記）である。

終了沈下量を 17 mm 未満にしたケースを設けたのは、沈下に伴って根固め部の破壊がどのように進行したかを調べるためである。また、N-64-0-15(3)ではひずみゲージ付き模型杭を使用し、沈下に伴って杭の各部分が負担する荷重がどのように変化したかを調べた。

下方長さ  $L$  が 25 mm の場合、節部径  $D_n=40$  mm との比 ( $L/D_n$ ) は 0.63 となる。なお、根固め部の径  $D_e=64$  mm は原型では 1280 mm に相当する。この径は、杭周部の掘削径 850 mm（節部径+50 mm）に対して 1.5 倍である。

## 2. 7 根固めモルタルの強度

根固め部の作製の際に採取した供試体（直径 50 mm、高さ 100 mm）は、載荷実験まで根固め部と同一養生としてあり、これを用いて強度試験を行った。表4に、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に近い根固め部を作製できたことがわかる。また、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  $\pm 7\%$  の範囲内に、同様に引張強度は  $\pm 16\%$  の範囲内におさまっており、ばらつきは小さかった。なお、モルタルのヤング係数  $E_m$  は  $5.2\sim 13.9 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> であった。

## 2. 8 地盤の相対密度

表4には、実験終了後に計測した砂の質量と土槽容積とから算出した相対密度も示した。加圧前相対密度  $D_{ri}$  が土槽容積（杭と根固め部の体積は除く）から求めた相対密度であるのに対し、加圧後相対密度  $D_{rc}$  は加圧板の沈下量も考慮に入れた土槽容積から求めた相対密度である。8ケースの実験の  $D_{rc}$  は 94.1~98.5% とばらつきの小さい範囲におさまっており、密な地盤を再現性よく作製できたことがわかる。なお、 $D_{rc}$  および上載圧と地盤の  $N$  値との関係式<sup>11)</sup>から推定した  $N$  値は 45 程度であり、地盤のヤング率  $E_s$  を  $E_s=1.4 N$  (MN/m<sup>2</sup>)<sup>12)</sup>で推定すると、 $E_s$  は 60 MN/m<sup>2</sup> 程度となる。地盤のヤング率  $E_s$  は根固めモルタルのヤング係数  $E_m$  に比べて十分に小さいことがわかる。

## 3. 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 mm とし、かつ終了沈下量 17 mm まで載荷した4ケースについてとりあげる。なお、沈下量 17 mm 未満で載荷を終了した2ケースについては5章で述べる。

表3 実験種類

実験No.	下方長さ $L$ (mm)	根固め強度 (N/mm <sup>2</sup> )	終了沈下量 (mm)
N-64-0-5	0	5	17
N-64-0-10	0	10	17
N-64-0-15(1)	0	15	4
N-64-0-15(2)	0	15	9
N-64-0-15(3)	0	15	17
N-64-0-20	0	20	17
N-64-25-5	25	5	17
N-64-25-15	25	15	17

表4 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 <sup>2</sup> )	引張強度 $F_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	加圧前 相対密度 $D_{ri}$ (%)	加圧後 相対密度 $D_{rc}$ (%)
N-64-0-5	4.3	0.5	91.4	96.1
N-64-0-10	8.1	1.0	91.5	96.6
N-64-0-15(1)	13.1	1.7	89.7	95.2
N-64-0-15(2)	14.5	1.8	88.9	94.1
N-64-0-15(3)	13.1	1.6	94.1	98.5
N-64-0-20	19.1	1.9	92.7	96.9
N-64-25-5	5.2	0.7	89.2	94.6
N-64-25-15	13.7	1.4	89.7	94.8

## 3. 1 荷重-沈下量曲線

図3は4ケースの荷重-沈下量曲線を比べたものである。この図より、以下のことが指摘できる。

- N-64-0-20 と N-64-0-15(3)はほぼ同じ荷重-沈下量曲線になっており、 $S=14$  mm 付近から曲線の勾配が緩くなっている。一方、N-64-0-10 は  $S=8$  mm 付近から、N-64-0-5 は  $S=1$  mm 付近から、曲線の勾配が緩くなり、N-64-0-20 および N-64-0-15(3)の曲線から離れ始める。したがって、根固め強度が 5 N/mm<sup>2</sup> の場合は  $S=1$  mm で、10 N/mm<sup>2</sup> の場合は  $S=8$  mm で、15 N/mm<sup>2</sup> 以上の場合は  $S=14$  mm で、それぞれ根固め強度による影響が現れることがわかる。
- 極限支持力を評価する沈下量である  $S=4$  mm ( $=0.1 D_n$ ) までは、根固め強度が 10 N/mm<sup>2</sup> 以上の3ケースの荷重-沈下量曲線はほぼ同じである。このことから、根固め強度が 10 N/mm<sup>2</sup> であれば、実用とする範囲 ( $S \leq 0.1 D_n$ ) では強度が 15 N/mm<sup>2</sup> 以上のケースと同等の支持力が得られるものと判断される。

## 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4に示す。縦断面図において、黒で塗り潰した部分は空洞を示し、破線は載荷前の根固め部の形状を示す。それぞれのケースの破壊状況は以下のようであった。

### ・N-64-0-15(3)

上側の節（以下、上節と表記）より下方の根固め部に縦クラックが発達し、根固め部先端の杭本体を中心とする放射状クラックにつながっていた。これは、節の下面がテーパ状になっているために、載荷によって根固め部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、ここでは『割裂破壊』と

呼ぶことにする。また、下側の節（以下、下節と表記）直下の根固め部の一部は、円筒状に押し抜かれていた。この破壊形状は『下節によるパンチング破壊』と呼ぶことにする。さらに、下節直下の一部と、上節直下の根固め部は圧縮されて縮んでいた。これは『局部的な圧縮破壊』と呼ぶことにする。

・ N-64-0-20

N-64-0-15(3)と同様の「割裂破壊」と「下節によるパンチング破壊」とが起っていた。ただし、上節直下の全周には、節の外周から節下の軸部へ向けてせん断面が形成されていた。これを『上節によるせん断破壊』と呼ぶことにする。

・ N-64-0-5

上下の節付近の根固め部側面が膨れており、上節付近では菱形に斜めクラックが発達し、また下節付近では縦クラックが発生していた。この根固め部側面の膨らみは、根固め強度が不足しているために、節によって根固め部が側方へ押し出されたことと、圧縮破壊

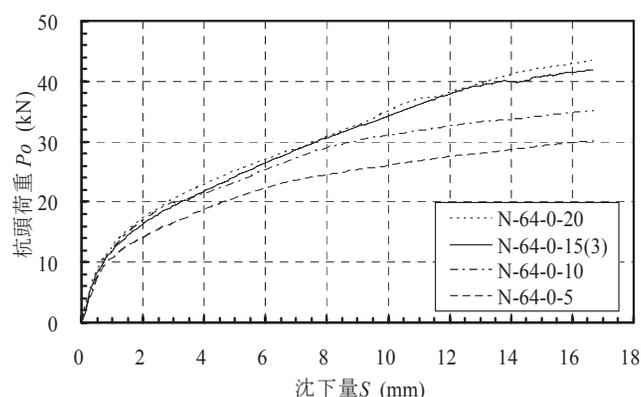


図3 荷重-沈下量曲線 ( $L=0$  mm, 根固め強度=5,10,15,20  $N/mm^2$ )

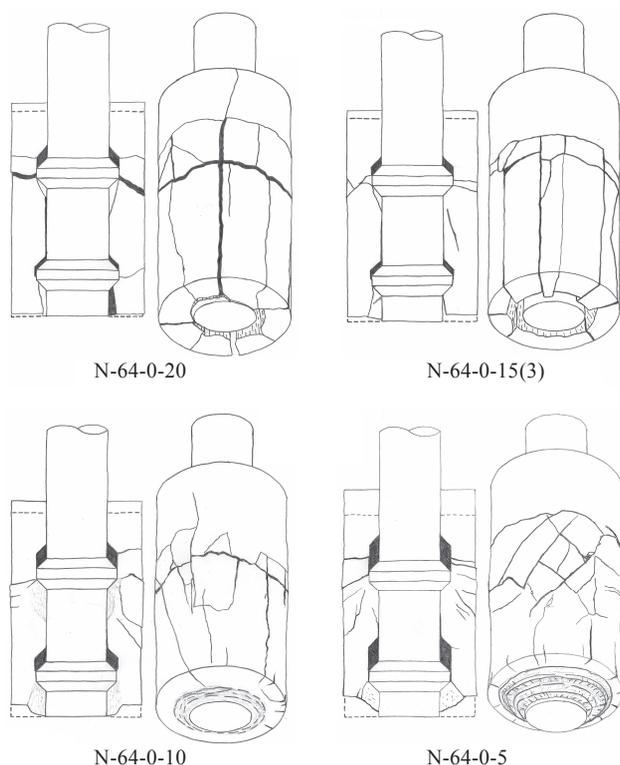


図4 根固め部の破壊形状 ( $L=0$  mm, 根固め強度=5,10,15,20  $N/mm^2$ )

されてポアソン効果により変形したことによると考えられる。また、根固め部先端は下節によって押されて突出していた。これも、根固め強度が不足しているために先端の形状を保てなかったことを示している。これらより、この破壊形状を『全体的な圧縮破壊』と呼ぶことにする。

・ N-64-0-10

上節付近の根固め部側面が膨れ、根固め部先端は下節によって押されて突出していた。また、上節より下方の根固め部に縦クラックが発生していた。これらから、「全体的な圧縮破壊」と「割裂破壊」の両方の破壊をしていると言える。

全てのケースにおいて、節の上側には空洞ができていた。N-64-0-5では特に大きな空洞となっており、強度が小さいほど空洞が大きい傾向があった。また、いずれのケースも、上節より上の根固め部はほとんど壊れることなく上方へずれ上がっていた。

3. 3 まとめ

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- ① 根固め強度が  $15 N/mm^2$  以上の2ケース (N-64-0-20, N-64-0-15(3)) は、破壊形状、荷重-沈下量曲線とも類似している。これらの破壊形状は「割裂破壊」が支配的であり、荷重-沈下量曲線には  $S=14$  mm で根固め強度の影響が現れる。
- ② 根固め強度が  $10 N/mm^2$  以下の2ケース (N-64-0-10, N-64-0-5) の破壊形状は、N-64-0-10では「全体的な圧縮破壊」と「割裂破壊」の両方、N-64-0-5では「全体的な圧縮破壊」になっている。これらの荷重-沈下量曲線には、それぞれ  $S=8$  mm、1 mm で根固め強度の影響が現れる。
- ③ 全てのケースにおいて、根固め部が破壊しても支持力は載荷終了まで増加し続ける。
- ④ 根固め強度が  $10 N/mm^2$  (N-64-0-10) の場合でも、荷重-沈下量曲線に根固め強度の影響が現れる沈下量は  $S=8$  mm であり、実用とする範囲 ( $S \leq 0.1 Dn$ ) では強度が  $15 N/mm^2$  以上のケースと同等の支持力が得られる。

4. 下方長さの影響

本章では、下方長さ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、根固め強度が5および  $15 N/mm^2$  で、かつ終了沈下量が 17 mm の4ケースについてとりあげる。

4. 1 荷重-沈下量曲線

図5は上記4ケースの荷重-沈下量曲線を比べたものである。この図より、以下のことが指摘できる。

- ① N-64-25-15 と N-64-0-15(3)の荷重-沈下量曲線を比べると、N-64-25-15は  $S=12.5$  mm で杭頭荷重が一時的に減少するが、全体的にはほぼ同じ荷重-沈下量曲線になっている。したがって、根固め強度が  $15 N/mm^2$  あれば、下方長さ  $L$  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がわかる。この結果は、著者の一人が行ったFEMによる研究結果<sup>13)</sup>と同じ傾向を示している。
- ② 根固め強度が小さいN-64-25-5は  $S=8$  mm 付近から、N-64-0-5は  $S=1$  mm 付近から、荷重-沈下量曲線の勾配が緩くなり、N-64-25-15およびN-64-0-15(3)の曲線から離れ始める。
- ③ N-64-25-5とN-64-25-15の荷重-沈下量曲線は、極限支持力を評価する  $S=4$  mm ( $=0.1 Dn$ ) までは、ほぼ同じである。このこと

から、下方長さ  $L$  が杭径（節部径  $Dn$ ）の 0.63 倍あれば、根固め強度が  $5 \text{ N/mm}^2$  であっても、実用とする範囲（ $S \leq 0.1 Dn$ ）では強度が  $15 \text{ N/mm}^2$  のケースと同等の支持力が得られるものと判断される。

#### 4. 2 根固め部の破壊形状

前節でとりあげたケースのうち、下方長さ  $L$  が  $25 \text{ mm}$  のケースのスケッチを図 6 に示す。（ $L=0 \text{ mm}$  のケースは図 4 を参照。）それぞれのケースの破壊状況は以下のものであった。

##### ・ N-64-25-15

根固め部先端から杭下方の根固め部が突き出していた。縦断面図からわかるように、突出部は杭先端から根固め部先端に向けてやや細くなった中心部 A と、根固め部先端に向けて広がった外周部 B によって形成されており、根固め部先端は同心円の階段状になっていた。これらの境界には、せん断面が形成されていた。この破壊形状を『杭先端によるパンチング破壊』と呼ぶことにする。

また、上節より下方の根固め部には縦クラックが発達し、根固め部先端の突出部を中心とする放射状クラックにつながっていた。さらに、杭本体先端および上下の節直下の根固め部は圧縮されて縮んでいた。これらより、「割裂破壊」と「局所的な圧縮破壊」も起こっていたと言える。

##### ・ N-64-25-5

図 4 の N-64-0-5 と同様に、上節付近の根固め部側面が膨れており、菱形に斜めクラックが発達していた。そして、根固め部先端から杭下方の根固め部が付き出しており、その先端は圧縮されてなだらかになっていた。これらより、「全体的な圧縮破壊」と「杭先端によるパンチング破壊」とが起っていたと言える。

また、上節と下節をつなぐように、円筒状のせん断面が形成されていた。これを『上節によるパンチング破壊』と呼ぶことにする。さらに、下節直下の根固め部は、節の外周から杭先端へ向けてパンチング破壊されており、その周囲の根固め部には縦クラックが発達していた。これらより、「下節によるパンチング破壊」とそれに伴う「割裂破壊」も起こっていたと言え、複合的な破壊形状になっている。

N-64-25-15 と N-64-25-5、どちらのケースにも節の上側には空洞ができていた。N-64-25-5 では、上節の上側には図 4 の N-64-0-5 と同程度の大きな空洞があったが、下節の空洞は N-64-0-5 の半分程度だった。これは、N-64-25-5 において「上節によるパンチング破壊」が起きたことが原因と考えられる。

#### 4. 3 まとめ

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- ① 根固め強度が  $15 \text{ N/mm}^2$  の 2 ケース（N-64-25-15, N-64-0-15(3)）の荷重-沈下量曲線は、ほぼ同じである。よって、根固め強度が  $15 \text{ N/mm}^2$  あれば、下方長さ  $L$  の有無は荷重-沈下量曲線にほとんど影響を及ぼさない。
- ② 上記 2 ケースの破壊形状は、共に「割裂破壊」が支配的であるが、N-64-0-15(3)には「下節によるパンチング破壊」が、N-64-25-15 には「杭先端によるパンチング破壊」が見られる。N-64-25-15 の荷重-沈下量曲線において、 $S=12.5 \text{ mm}$  で杭頭荷重が一時的に減少するのは、「杭先端によるパンチング破壊」の影響と思われる。
- ③ 根固め強度が  $5 \text{ N/mm}^2$  の 2 ケース（N-64-25-5, N-64-0-5）の破壊

形状は、N-64-25-5 では「全体的な圧縮破壊」と「杭先端によるパンチング破壊」が、N-64-0-5 では「全体的な圧縮破壊」が主になっている。これらの荷重-沈下量曲線には、N-64-0-5 では  $S=1 \text{ mm}$  で根固め強度の影響が現れるが、N-64-25-5 ではその沈下量が  $8 \text{ mm}$  になっている。この差は下方長さ  $L$  によるものと思われる。

- ④ 全てのケースにおいて、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。
- ⑤ 下方長さ  $L$  が  $25 \text{ mm}$  の場合の、根固め強度の影響として N-64-25-5 と N-64-25-15 とを比べると、前者では「全体的な圧縮破壊」が、後者では「割裂破壊」が起きている。N-64-25-5 の荷重-沈下量曲線には、 $S=8 \text{ mm}$  付近から根固め強度の影響が現れるが、実用とする範囲（ $S \leq 0.1 Dn$ ）では N-64-25-15 と同等の支持力が得られる。

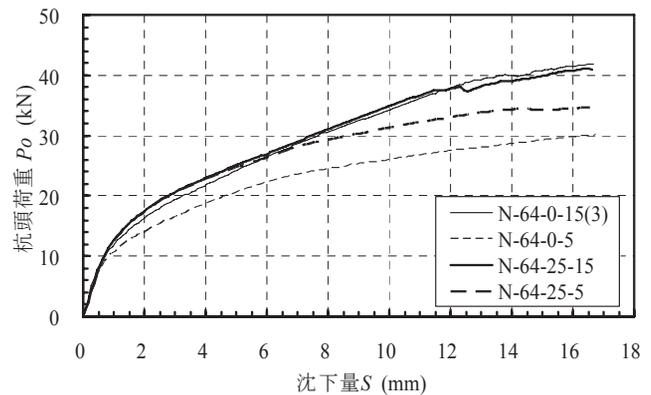


図 5 荷重-沈下量曲線（ $L=0, 25 \text{ mm}$ 、根固め強度= $5, 15 \text{ N/mm}^2$ ）

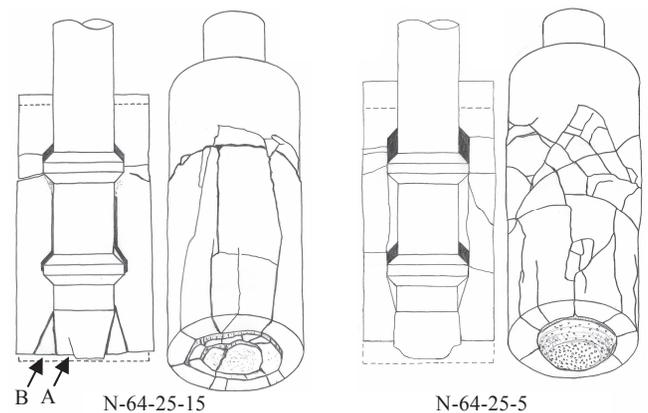


図 6 根固め部の破壊形状（ $L=25 \text{ mm}$ 、根固め強度= $5, 15 \text{ N/mm}^2$ ）

#### 5. 根固め部の破壊過程

下方長さ  $L$  が  $0 \text{ mm}$  で根固め強度が  $15 \text{ N/mm}^2$  のケース（N-64-0-15）について、破壊過程を推定する。

##### 5. 1 根固め部の破壊の進行

図 7 に N-64-0-15(1),(2)および(3)の荷重-沈下量曲線を示す。これらは、おおむね似通った荷重-沈下量曲線である。

図 8 に N-64-0-15(1)および(2)の根固め部の破壊形状を示す。これらと図 4 の N-64-0-15(3)とから、根固め部の破壊は以下のように進んだことになる。

##### ・ N-64-0-15(1)

$S=4 \text{ mm}$  までに、根固め部先端に放射状クラックが発生し、「割

「裂破壊」が始まっていた。クラックの幅は0.05~0.4 mmであり、根固め部側面のクラックは上方ほど細くなっていた。

・N-64-0-15(2)

$S=9$  mm までに、下節下方の根固め部が円筒状に押し抜かれており、「下節によるパンチング破壊」が起きていた。また、上下の節直下では「局所的な圧縮破壊」が始まっていた。

・N-64-0-15(3)

$S=17$  mm では、「割裂破壊」と「局所的な圧縮破壊」とがさらに進行し、節上部の空洞が大きくなっていた。

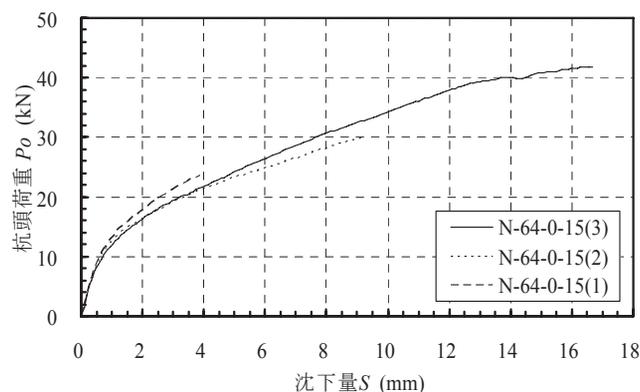


図7 荷重-沈下量曲線 ( $L=0$  mm, 根固め強度=15 N/mm<sup>2</sup>)

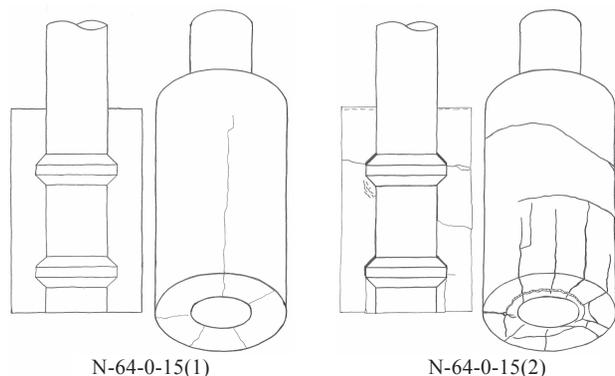


図8 根固め部の破壊形状 (終了沈下量=4.9 mm)

## 5.2 杭の区間抵抗力

前述したように、N-65-0-15(3)の実験にはひずみゲージ付き模型杭を使用しているため、ひずみ値より杭の各部が受ける抵抗力を算定する。図9に示すように、断面①は芯棒にひずみゲージを貼付しており、そのひずみ値から杭先端が地盤から受ける抵抗力を算定した。以下、これを先端抵抗力  $P_p$  と表記する。断面②と③は円筒部にひずみゲージを貼付しており、断面が平面を保持するものと仮定して根固め部の剛性をも考慮した軸力を算定した。これら軸力算定の際には、杭本体のヤング係数は  $20.5 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>、根固め部のヤング係数  $E_m$  は  $11.4 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> とした。断面②の軸力は下節を含む区間が受ける抵抗力を現しているため、以下これを下節抵抗力  $P_{nle}$  と表記する。また、断面③の軸力と断面②の軸力との差分は上節を含む区間が受ける抵抗力を現しているため、以下これを上節抵抗力  $P_{nue}$  と表記する。

このようにして求めた抵抗力を、図10に沈下量  $S$  との関係で示

す。同図にはロードセルで計測した杭頭荷重  $P_o$  も示した。さらに、予備試験として行ったストレート杭 (杭径 30 mm, 根固め部なし, ひずみゲージの貼付位置は図9に示す節杭と同じ) の載荷試験によって求めた断面③以浅の摩擦抵抗力  $P_f$  を併記した。ここで、抵抗力の合計 ( $P_{nue}+P_{nle}+P_p+P_f$ ) と  $P_o$  との関係を見ると、 $S=3.5$  mm まではおおむね似通った曲線となっているが、 $S=3.5$  mm 以降は抵抗力の合計が  $P_o$  を上回り、載荷に伴ってこれらの差は大きくなっていく。

そこで、杭の円筒部 (断面②と③) について、根固め部の剛性を考慮しない上・下節抵抗力 ( $P_{nu}$ ,  $P_{nl}$ ) を求めた。これらを用いた抵抗力の合計 ( $P_{nu}+P_{nl}+P_p+P_f$ ) を図にプロットしてみると、 $S=3.5$  mm までは  $P_o$  との差は大きい、 $S=3.5$  mm 以降はその差が小さくなっていく。そして、 $S=11$  mm 以降になると抵抗力の合計と  $P_o$  の挙動は非常に似通ったものになる。

以上より、 $S=0 \sim 3.5$  mm では杭本体と根固め部が一体となっていたが、 $S=3.5$  mm において円筒部の平面保持仮定が完全には成り立たなくなったものと考えられる。これは、前節で述べた  $S < 4$  mm で「割裂破壊」が始まっていたことと一致する。そして、 $S=3.5 \sim 11$  mm では根固め部の剛性の影響が残っていたが、 $S=11$  mm 以降ではその影響が全くなくなったものと推測できる。

なお、 $S=11$  mm 以降において抵抗力の合計 ( $P_{nu}+P_{nl}+P_p+P_f$ ) と  $P_o$  とに約 3 kN の差が見られる。これには、抵抗力 ( $P_{nu}$ ,  $P_{nl}$ ) が節の支圧によって発生しているために、ひずみゲージの貼付位置である杭円筒断面における応力が等分布になっていないことによる影響があると思われる。

ここで、杭の区間抵抗力と杭頭荷重  $P_o$  の推移を図10より読み取ると、以下のことがわかる。載荷開始直後から下節抵抗力  $P_{nle}$  が増加し、 $S=3.5$  mm 以後は上節抵抗力  $P_{nue}$  も増加する。その後、 $P_{nle}$  は  $S=5$  mm 程度で頭打ちになる。さらに、 $P_{nue}$  が  $S=14$  mm すぎで減少に転じるのと前後して、杭頭荷重  $P_o$  -沈下量曲線の勾配が緩くなる。一方、先端抵抗力  $P_p$  は沈下量に関わらずほぼ一定の割合で増加している。

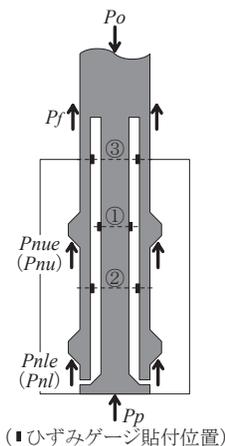


図9 区間抵抗力

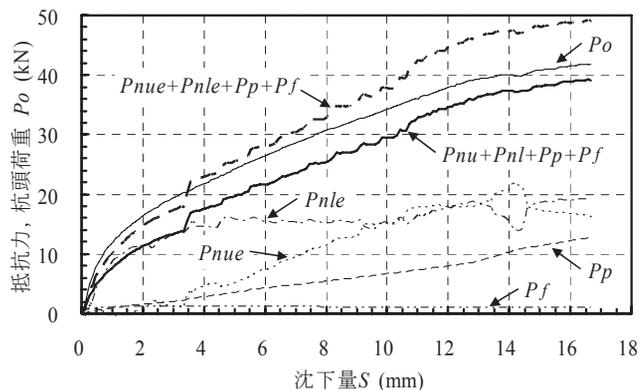


図10 抵抗力-沈下量曲線 (N-64-0-15(3))

### 5. 3 破壊過程の推定

以上より、根固め部の破壊は次の経過を辿ったものと判断される。

- i) 載荷開始直後には下節抵抗力  $Pnle$  が増加する。
- ii)  $S=3.5\text{ mm}$  において、杭本体と根固め部が部分的に分離する。これは、根固め部の「割裂破壊」が始まったことに起因すると考えられる。この後は、上節抵抗力  $Pnue$  が増加する。
- iii)  $S=5\text{ mm}$  以降は下節抵抗力  $Pnle$  がおおむね一定になる。これは、「下節によるパンチング破壊」が起ったことによると推測される。なお、この破壊が起こっても、せん断面の外側の根固め部が地盤から受ける抵抗力は上節が負担するため、杭頭荷重  $Po$  は増加し続ける。
- iv)  $S=11\text{ mm}$  において、杭本体と根固め部の付着が切れる。しかし、節による支圧抵抗が働くので、杭頭荷重  $Po$  は増加し続ける。
- v)  $S=15\text{ mm}$  付近で上節抵抗力  $Pnue$  が減少に転じる。これは、上節直下の根固め部が「局所的な圧縮破壊」を起こしたことによるものと推測される。この破壊が起こると、地盤からの抵抗力が杭に伝わらなくなり、杭頭荷重  $Po$  -沈下量曲線の勾配が緩くなる。ただし、 $Pp$  は増加しているため、 $Po$  は減少に転じることなく増加し続ける。

### 6. 結語

節杭を用いた拡大根固め工法において、根固め部の強度と形状（杭本体先端から根固め部先端までの距離＝下方長さ）と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 下方長さが無くても根固め強度が  $10\text{ N/mm}^2$  であれば、極限支持力を評価する沈下量（節部径の 10%）までは、強度が  $15\text{ N/mm}^2$  以上のケースと同等の支持力が得られた。
- ② 根固め強度が  $15\text{ N/mm}^2$  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かった。
- ③ 全てのケースにおいて、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。
- ④ 下方長さが杭径（節部径）の 0.63 倍ある場合は、根固め強度が  $5\text{ N/mm}^2$  であれば、極限支持力を評価する沈下量（節部径の 10%）までは、強度が  $15\text{ N/mm}^2$  のケースと同等の支持力が得られた。
- ⑤ 根固め部の破壊形状は根固め強度によって異なっていた。強度が  $15\text{ N/mm}^2$  以上の場合は割裂破壊が、 $10\text{ N/mm}^2$  以下の場合は圧縮破壊が主であった。
- ⑥ 根固め部に発生するクラックの観察などから、下方長さが無く、根固め強度が  $15\text{ N/mm}^2$  の場合の根固め部の破壊過程を検討した。その結果、i) 根固め部が「割裂破壊」と「下側の節によるパンチング破壊」をしても、杭頭荷重は増加し続けること、ii) 上側の節による「局所的な圧縮破壊」が起こると、杭頭荷重-沈下量曲線の勾配が緩くなることがわかった。

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。なお、本研究の一部は「平成 22 年度関西大学大学院理工学研究科高度化推進研究費」によって行った。

### 参考文献

- 1) 小椋仁志, 小松吾郎, 真鍋雅夫, 大島 章, 千種信之, 細田 豊, 須見光二, 三村哲弘: 既製杭のプレボーリング拡大根固め工法の拡大掘削径と鉛直支持力, GBRC, Vol.32, No.1, pp.10-21, 2007.1
- 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
- 5) 木谷好伸, 加藤洋一, 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 (その 2 節部を有する杭体の場合), 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.624, pp.267-273, 2008.2
- 6) 岸田英明, 高野昭信: 砂地盤中の埋込み杭先端部の接地圧分布 (その 1. 加圧砂地盤タンクの製作および接地圧分布形の実験結果), 日本建築学会論文報告集, No.260, pp.21-33, 1977.10
- 7) 岸田英明, 高野昭信, 吉沢孝夫: 砂地盤中の Non-displacement pile (埋込み杭・場所打ちコンクリート杭) 先端部の荷重-沈下量関係に杭径が与える影響, 日本建築学会論文報告集, No.284, pp.17-27, 1979.10
- 8) 高野昭信, 岸田英明: 砂地盤中の Non-displacement pile 先端部地盤の破壊機構, 日本建築学会論文報告集, No.285, pp.51-62, 1979.11
- 9) 土岐祥介, 三浦清一, 浅見秀樹: 多重フルイ落下法による砂供試体作成について, 第 14 回土質工学研究発表会, pp.193-196, 1979.6
- 10) 小椋仁志, 山肩邦男, 岸田英明: 模型実験による節付き円筒杭の支持力特性の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.374, pp.87-97, 1987.4
- 11) 石川一真, 永井 雅, 伊藤淳志, 小椋仁志: 加圧土槽を用いた砂地盤における標準貫入試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.417-418, 2011.8
- 12) 日本建築学会編: 建築基礎構造設計指針, p.146, 2001.10
- 13) 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での杭先端の設置位置 (根固め部の破壊を考慮した FEM による検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.509-510, 2006.9

### 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5月10日原稿受理, 2011年8月31日採用決定)