模型実験による節付き場所打ちコンクリート杭の周面支持力機構に関する検討

MECHANISM OF SHAFT RESISTANCE OF NODULAR CAST-IN-PLACE
CONCRETE PILES BASED ON MODEL TESTS

伊藤 淳志*, 八尾 眞太郎**, 桒井 健***

Atsushi ITO, Shintaro YAO and Takeshi MASUI

For the development of nodular cast-in-place concrete pile, the vertical loading tests of model nodular piles were carried out in loose wet sand ground. The tests were carried out for the piles with four kinds of distances between nodes and three kinds of taper angles of nodal base. The load-settlement relations and the ultimate bearing capacities were examined. The results of the tests indicate that the nodular pile with large distance between nodes can develop the bearing resistance at the nodal base, while that with small distance induces shear along cylinder with the same diameter of node. These characteristics of bearing mechanism are same as those in dense dry sand ground.

Keywords : Nodular pile, Model test, Sand ground, Load test, Skin resistance, Point resistance

節付き杭, 模型実験, 砂地盤, 載荷試験, 周面抵抗, 先端抵抗

1. 序

筆者らは、場所打ちコンクリート杭の軸部に節を設けて周面支持力の増大を図ると同時に、排土量とコンクリート量を削減する環境にも配慮した節付き場所打ちコンクリート杭の開発を目的として、一連の模型鉛直載荷実験を実施してきた。場所打ちコンクリート杭の場合は、節の設置間隔を地盤状況に合わせて比較的自由に設定できることから、本研究では特に節間隔の違いによる支持力機構に着目した検討を行っている。これらの実験のうち、高密度（相対密度87%）の乾燥砂地盤での結果については、既に文献¹⁾において報告した。その結果は、同じ根入れ長さの場合、節の数が多い（節の間隔が小さい）ほど周面支持力が大きいとは限らず、極限支持力は逆に節の数が少ないほど大きくなっていった。これは、既往の同様の研究^{2~6)}でも報告されているように、節間隔がある程度大きい場合は、節部底面の支圧抵抗が十分に発揮されるのに対して、節間隔が小さくなると、節の外径に沿う円筒状に地盤がせん断されるためと考えられた。

本報では、地盤の密度の違いによる支持力特性の違いを検討するため、比較的低密度（相対密度35%）の湿潤砂地盤で行った模型実験の結果を報告する。本実験では、既報の高密度地盤の場合よりも節間隔の種類を追加しており、また節部底面のテーパ角度を変えた実験によりその支持力への影響についても検討を行っている。さらに、節部の支持力機構を考慮した計算値と実験値との比較検討を

行い、最適な（周面支持力が最大となる）節の設置間隔について考察している。

なお、本論文の一部については、既に文献^{7~9)}において中間発表済みであることをお断りしておく。

2. 実験の概要

載荷実験に使用した実験装置を図1に示す。土槽は、内径φ1480mm、高さ1800mmの円筒形の鋼製容器であって、二重底の上板には、送排水用にφ16mmの孔が106mmピッチで開けられている。また、二重底の周囲には送排水口が8箇所（内4箇所は排水専用）設けてあり、圧力水を送水して土槽内の砂をボイリングさせた状態で模型杭を建て込んだ後、3時間自然排水して締め固めることによって、毎回ほぼ均質な湿潤砂地盤を作製することができる。なお、模型杭はボイリング時には治具を介してスクリージャッキのロッドに固定しておき、排水開始と同時に治具を取り外して自立させる。砂は粒径75μm~1.2mmに調整した淀川産の川砂であり、土質試験および地盤調査の結果として得られた諸元を表1に示した。また、事前に実験地盤を3回作製し、それぞれ8箇所の平面位置で実施したポータブルコーン貫入試験の結果を図2に示しておく。ポータブルコーンは単管式であるが、湿潤地盤であって孔壁の崩壊が認められなかったことから、ロッドの周面摩擦はほとんどないと思われる。

模型杭の姿図を図3に示した。節付き杭は、軸部が外径40mm、肉

* 関西大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 関西大学工学部建築学科 教授・工博

*** 関西大学工学部建築学科 専任講師・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kansai University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kansai University, Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kansai University, Dr. Eng.

図1 実験装置 (単位: mm)

図2 コーン貫入抵抗

表1 実験地盤の諸元

土粒子の密度 ρ_s	2.66 g/cm ³
平均粒径 D_{50}	0.56 mm
均等係数 U_c	1.97
単位体積重量 γ	0.0145 N/cm ³
相対密度 D_r	35 %
間隙比 e	0.891
含水比 w	4.80 %

厚3mm、長さ800mmのアルミニウム製パイプ（先端閉塞）で、外径60mmのアルミニウム製節部リングを図4のように取り付けてある。なお、実験開始前に測定した杭表面の粗さは $R_{max} \approx 4.3 \mu m$ （基準長さ0.8mm）であった。軸部パイプの内面には、図3に示す位置に軸方向力測定のためのひずみゲージを1断面当たり2枚ずつ貼り付けてある。今回の実験では、節部上下面のテーパ角度として、図4のごとく軸線に対して90度（テーパなし）、60度および30度の3種類を採用した。なお、図3の節付き杭は、テーパ角度60度の場合を描いてある。節の取り付け間隔は図3に示す4種類であって、軸部パイプのみの $\phi 40$ ストレート杭および節部径と同じ $\phi 60$ ストレート杭（肉厚3mm）を加えて、表2に示した計14種類の載荷実験を実施した。ただし、節数4個の節付き杭は、節部リングの軸部パイプへの取り付け位置の都合上、節間隔が不規則となっている。なお、根入れ長さは全て600mmとした。

載荷は荷重制御による急速1サイクル方式とした。荷重階は等増

図3 杭姿図 (単位: mm)

図4 節部詳細図 (単位: mm)

表2 実験種類

実験 No.	節 数 (個)	節間隔 (mm)	テーパ角度 (度)
1	3	240	90
2			60
3			30
4	4	180 (120)	90
5			60
6			30
7	5	120	90
8			60
9			30
10	9	60	90
11			60
12			30
13	φ 40mm ストレート		
14	φ 60mm ストレート		

分荷重による8荷重階以上となるよう想定し、スクリージャッキにより杭頭沈下量が40mm以上となるまで載荷した。荷重保持時間は増荷時5分、減荷時2分とし、1荷重階当たりの荷重増減時間は増荷時30秒、減荷時15秒とした。載荷荷重は容量2kNのロードセルで確認し、杭頭沈下量は土槽天端に渡したアングルを基準梁として、2個の変位計（容量100mm）により測定した。

3. 実験の結果

全14種類の載荷実験の増荷時における杭頭荷重 P_0 ・杭頭沈下量 S_0 関係を図5に示した。凡例は表2で示した節数およびテーパ角度で表現してある。同図より、 $S_0 = 40$ mm時において、節付き杭は $\phi 40$ ストレート杭の1.8～2.7倍の支持力となっていることが分かる。また、節付き杭は $P_0 = 400$ Nあたりまでは節数にかかわらずほぼ同等の支持力となっているが、その後節数によって差が現れ、節数9個、5個、3個の順に曲線が垂れ下がってくる。そして、最大

図5 杭頭荷重 P_0 —杭頭沈下量 S_0 関係

荷重時の支持力は、節数4個>3個>5個>9個と、節数が比較的少ない（節間隔が大きい）場合に大きい。なお、節数が同じ場合、テーパ角度の違いによる支持力の差は比較的小さい。藪内ら¹⁰⁾は、三軸加圧地盤での実験において、沈下の初期では節部底面が傾斜している方が傾斜のない場合よりも支持力が大きい、沈下とともに支持力が逆転することを報告している。しかし本実験では、節数によって支持力の大小関係は異なっており、顕著な傾向は認められない。そこで以下では、テーパ角度が90度の場合の実験結果を中心に報告する。

杭に貼付したひずみゲージの測定値より軸方向力を算出した。例として、テーパ角度90度の場合で、節数3個および9個の節付き杭の軸方向力 R 分布を図6に示した。ただし、ひずみの測定値が不良の位置の値は除いてある。ここで軸方向力の値は、測定不良を生じたものを除いた全実験について、図7に示したごとく載荷荷重 P と最上段（地表面より40mm上方）のひずみゲージの測定値 ε_0 （2枚の平均値）との関係を最小自乗近似して関係直線を求め、地中部のひずみゲージについてもこの関係が成り立つものとして算出した。

図6において、節数9個の場合は多少の乱れはあるものの、全てのひずみゲージ間に節があるため、 R の分布が比較的滑らかである。ただし、最終荷重階付近での最下段の節の上下の R の差が大きくなっている。節数3個の場合は、節のある区間での R の差が大きく現れていることが明確に認められ、節部での支持力が発揮されていることが分かる。これに対して、節のない区間での抵抗はかなり小さいと言える。

節付き杭については、軸部先端および最下段の節の抵抗を合わせたものを先端抵抗 R_0 として、下から2番目のひずみゲージ位置の軸方向力を R_1 とする。ストレート杭については、最下段のひずみゲージ位置の軸方向力を R_0 とする。テーパ角度90度の節付き杭およびストレート杭について R_0 と S_0 との関係を描いたのが図8である。同図において、 $\phi 60$ ストレート杭は載荷の初期において先端地盤の緩みと思われる曲線形状となっているが、それを除けば、節付き杭および $\phi 60$ ストレート杭の曲線は比較的近似しており、節付

(a) 3個, 90度

(b) 9個, 90度

図6 軸方向力 R 分布 図7 杭頭荷重 P_0 —杭頭ひずみ ε_0 関係

き杭の最下段の節の支持力は先端支持力として評価してよいようである。また、これらの杭の先端面積は $\phi 40$ ストレート杭の2.25倍であるが、支持力は2倍弱となっている。

P_0 より R_0 を差し引いた値を周面抵抗 R_1 として、 R_1 と S_0 との関係を描いたのが図9である。 $\phi 40$ および $\phi 60$ ストレート杭は沈下量が数mmで R_1 が降伏しており、その降伏値は軸部周面積の比率（1:1.5）とほぼ対応している。一方節付き杭は、比較的大きな周面抵抗となっているが、 S_0 が5mm程度までは節数の違いによる顕著な差は見られない。しかし、その後は文献^{5, 6)}で報告されている傾向と同様に、節数9個の場合は $S_0=10\sim 15$ mmで、次いで節数5個

図8 先端抵抗 R_p - 杭頭沈下量 S_0 関係 図9 周面抵抗 R_r - 杭頭沈下量 S_0 関係

(a) 3個, 90度

(b) 4個, 90度

(c) 5個, 90度

(d) 9個, 90度

図10 節部抵抗 R_s - 杭頭沈下量 S_0 関係

の場合は $S_0 = 15 \sim 20 \text{ mm}$ で降伏し、以後 R_r は減少している。これらに対して、節数3個および4個の場合は S_0 が 40 mm 以上に達しても R_r は増加する傾向を示している。以上の図8および図9より、図5における節付き杭の $P_0 - S_0$ 曲線の傾向は、周面抵抗の特性に起因していると考えることができる。

図6の軸方向力分布より、節付き杭の各節の上下のひずみゲージによる軸方向力差を節部抵抗 R_s とし、 S_0 との関係を図10に示した。凡例の丸数字は図3に示した節番号に対応している。同図には軸部先端の抵抗（最下段のひずみゲージ位置の軸方向力）も併記したが、実験毎のばらつきがある。

これは、最下段のひずみゲージ位置が杭先端に比較的近く、杭のひずみ測定値の乱れが生じたものと思われる。したがって、各図の最下段の節の抵抗についてもある程度のばらつきがあるものと考えられる。しかし大局的にながめると、節数3個の場合の各節部抵抗および節数4個の場合の①を除く節部抵抗は、 S_0 とともに増大しており、概ね深い位置の方が大きくなっている。これに対して、節数5個および9個の場合は、最下段の節を除いて R_s は比較的小さく、 $S_0 = 10 \sim 20 \text{ mm}$ あたりで一旦ピークが現れた後減少する傾向が認められる。これらの性状が前出の図9の周面抵抗の特性に寄与しているものと推察される。

4. 周面支持力機構

前節で述べた実験結果は、文献¹⁾で報告した密な乾燥砂地盤における模型実験の結果と絶対値は異なるものの、概ね同じ傾向となっていることから、節付き杭の支持力特性は地盤の密度にあまり影響されないことが確認された。同文献で論述した節部の抵抗機構を再度述べると次のごとくである。すなわち、図11(a)のように節間隔がある程度大きい場合は、軸部先端および最下段の節と同様に、節部底面の支圧抵抗が十分に発揮され、下部地盤がせん断破壊するまで耐え得る。本実験では節数3個および4個の場合の節間隔に対応する。しかし、節数5個および9個のように節間隔が小さくなると、図11(b)のように節の外径に沿う円筒状に地盤のせん断がおこり、そのせん断力を節部底面の支圧抵抗および軸部の摩擦抵抗として支持するものと考えられる。

そこで、文献¹⁾と同様に2種類の抵抗を考慮した計算を行い、実験値との比較を行った。図12(a)～(d)において、計算値(支圧抵抗)は図2のコーン貫入抵抗 q_c に節部底面積(テーパのある場合は水平投影面積)を掛けた値に節周面の摩擦抵抗を加えて、各節の底面深さにプロットしたものである。ただし、最下段の節は除いてある。ここで、節周面の摩擦抵抗は、図9における $\phi 40$ ストレート杭の R_f の最大値より、摩擦応力が深さに1次比例するものと仮定して算出した。また計算値(円筒滑り)は、図11(b)に波線で示したごとく節外径で節の底面からその下段の節の上面までの円筒面でのせん断抵抗を、せん断応力が $K\gamma Z \tan \phi$ ($K=3.5$: Rankineの

受動土圧係数、 $\gamma=0.0145\text{N/cm}^3$: 地盤の単位体積重量、 Z : 深さ、 $\phi=34^\circ$: 三軸圧縮試験による内部摩擦角)として求め、節周面の摩擦抵抗を加えた値から軸部の摩擦抵抗を差し引いて、各節の底面深さにプロットしたものである。なお、実験地盤は4.8%の含水比であり、三軸圧縮試験において僅かに粘着力が現れたが、測定誤差の範囲とも考えられたためここでは無視した。また、軸部の摩擦抵抗としては、節直下のひずみゲージから下段の節直上のひずみゲージの間について、上述の節周面の摩擦抵抗と同様にして算出した。図12の実験値は、図10で示した各曲線における R_n の最大値を、全てのテーパ角度の場合についてプロットしてある。ただし、節数4個でテーパ角度30度についてはひずみゲージの測定不良のため除外してある。

図12において、(c)節数5個および(d)節数9個の場合は、計算値(円筒滑り)が計算値(支圧抵抗)よりも小さいこと、実験値はあ

図11 支持力機構概念図

図12 節部抵抗 R_n の比較

る程度のばらつきがあるが、計算値（円筒滑り）に近似していること、(a) 節数3個では計算値（支圧抵抗）の方が計算値（円筒滑り）よりも小さく、実験値は前者に近似していることなどが分かる。(b) 節数4個の場合は両計算値が接近しており、実験値のばらつきも大きいので計算値との対応は不明確であるが、最上段の節については節数5個の場合の節間隔と同じであって、計算値（円筒滑り）にほぼ一致していることが特徴的である。これらの結果は、上述した節部の支持力機構の説明を裏付けるものである。

以上より、節付き杭の極限支持力が最大となる節の設置間隔は、前述の2種類の支持力機構を想定した最下段の節より上部の全周面抵抗の計算値のうち、小さい方の値が最大となる場合と考えることができる。本実験の場合で示せば図13のごとくである。同図の計算値は、図12と同様の方法で算出した最下段の節より上部の全周面抵抗であり、節の突出幅 a に対する節の内法間隔 h の比 h/a との関係（図11参照）で描いてある。また同図には、各実験における周面抵抗 R_t の最大値をプロットした。なお、節数4個の杭は節間隔が不規則であるが大きい方の h を採用してある。同図において、両計算値の折線は $h/a = 18$ 付近で交差しており、 $h/a < 18$ では円筒滑りの方が小さく、 $h/a > 18$ では支圧抵抗の方が小さい。実験値はある程度のばらつきがあるが、節のテーパ角度の違いによる差は比較的小さく、両計算値の小さい方の値に対応しているものと考えられる。したがって、今回実験を行った節数4個（ $h/a = 16$ ）が両支持力機構の境界付近にあって、図13の傾向から分かるように最大の支持力になったものと推察される。

5. 結語

以上、節付き場所打ちコンクリート杭の開発を目的として実施した低密度の湿潤砂地盤における模型鉛直載荷実験の概要および結果について報告し、節間隔の違いによる周面支持力に関する検討を行った。結論として以下のことが指摘できる。

① 節付き杭は、軸部径と同じストレート杭および節部径と同じストレート杭よりも支持力は大きい。節数および沈下量によって支持力の大小関係は異なり、最大荷重時では節数が比較的小さい（節間隔が大きい）場合に支持力は大きくなった。ただし、節数が同じ場合、節部底面のテーパ角度の違いによる支持力の差は比較的小

さく、顕著な傾向は認められなかった。

② 節付き杭の軸部先端の抵抗と最下段の節の抵抗とを合わせた支持力は、節数の違いによる差はほとんど認められず、また節部径と同じストレート杭の先端抵抗とほぼ一致する。

③ 前記の先端部の抵抗を除いた節付き杭の周面抵抗は、荷重の初期では節数の違いによる顕著な差は見られないが、荷重が増大すると節数が多い（節間隔が小さい）杭から順に周面抵抗が極限に達して沈下量が增大する。この周面抵抗の特性が、①で述べた杭頭支持力の大小関係に現れている。

④ 以上の実験結果は、既報の密な乾燥砂地盤での実験結果と絶対値は異なるものの、概ね同じ傾向となっていることから、節付き杭の支持力特性は地盤の密度にあまり影響されないことが分かった。

⑤ 節付き杭は、節間隔がある程度大きい場合は、節部底面の支圧抵抗が十分に発揮されるのに対して、節間隔が小さい場合は、節の外径に沿う円筒状に地盤がせん断されるものと考えられた。また、これらの支持力機構を考慮した各節の抵抗の計算値と実験値との比較から、今回の実験での節数3個の場合は支圧抵抗による支持力状態であり、節数5個および9個の場合は円筒状のせん断抵抗による支持力状態、節数4個は両者の境界付近であると推察された。

⑥ 節付き杭の最適な形状（支持力が最大となる節間隔）は、前記の2種類の支持力機構を想定した周面抵抗を算定し、それらの小さい方の値が最大となる節間隔を設定すればよいことを提案した。

最後に、本研究を行うに当たり多大のご協力をいただいた関西大学卒業研究生の諸氏に謝意を表する。

なお、本研究は中小企業総合事業団が募集した「平成14年度課題対応新技術研究開発事業」に採択されたプロジェクト「リブ付場所打ちコンクリート杭に関する研究開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 伊藤淳志, 八尾眞太郎, 榊井 健: 節付き場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力特性に関する模型実験, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp. 321~325, 2002. 3
- 2) 石堂 稔: 砂地盤における節杭の支持力, 九州産業大学工学部研究報告, 第6号, pp. 40~50, 1969. 5
- 3) Mohan, D., Murthy, V.N.S. and Jain, G.S.: Design and Construction of Multi-Under-Reamed Piles, Proc. of 7th ICSMFE, Vol.2, pp.183-186, 1969
- 4) 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
- 5) 藪内貞男, 平山英喜, 山下啓明, 上紺屋好行: 杭先端抵抗と比較した節杭の節部抵抗, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1775~1778, 1993. 6
- 6) Yabuuchi, S.: Bearing mechanisms of multi-node piles, Proc. 4th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Vol.1, pp.504-507, 1994
- 7) 八尾眞太郎, 伊藤淳志, 伊藤 仁: 砂地盤における異形杭の鉛直荷重-沈下性状に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 551~552, 2000. 9
- 8) 伊藤淳志, 八尾眞太郎, 榊井 健, 伊藤 仁: 異形場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力特性, 第36回地盤工学研究発表会, pp. 1583~1584, 2001. 6
- 9) 伊藤淳志, 八尾眞太郎, 榊井 健: 節付き杭の節間隔に関する模型載荷実験, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 1411~1412, 2002. 7
- 10) 藪内貞男, 平山英喜, 山下啓明, 染川常二: 節杭の節部形状の影響に関するモデル実験, 第27回土質工学研究発表会, pp. 1506~1506, 1992. 6

(2003年5月10日原稿受理, 2003年9月25日採用決定)

図13 周面抵抗 R_t - h/a 関係