

(株)武智工務所 ○小椋仁志

関西大学工学部 山肩邦男

(株)武智工務所 大杉富美一 上紺屋好行

1. 序 節杭(節付円筒コンクリート杭)の支持力について、筆者らはこれまで支持力算定式の提案<sup>1)</sup>や、模型実験による検討<sup>2)~4)</sup>を行ってきた。今回それらの検討結果と比べるために、大型土槽を用いて実大の節杭と円筒杭(節のない円筒コンクリート杭)を比較した押し込み実験を行なったのでその結果を報告する。

2. 実験概要 (1)試験杭 実験に用いた杭は図1(a)に示すように、節杭(本体径300mm、節部径440mm、節部間隔1m)と、外径が300および450mmの円筒杭(以下それぞれφ300杭、φ450杭と呼ぶ)の3種類である。いずれも長さが4mの遠心力成型によるRC杭であり、図に示す位置にひずみ計を設置している。遠心供試体によるコンクリートの強度・ヤング率・ポアソン比はそれぞれ630kgf/cm<sup>2</sup>、4.0×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>、0.22となっている。

(2)実験地盤 実験槽は図1(a)および(b)のように長さ6m、幅4m、深さ約5mの地盤を作製できるものである。地盤は湿潤状態の砂を詰めたもので、使用した砂の粒径加積曲線と諸元を図2と表1に示す。図2には、節杭を押し込む時に杭周に充填した砂利についても併記している。この砂を厚さ約30cmごとにパイプランマー(自重83kgf、打撃ストローク3~6cm、振動数600~700rpm)で締め固めて実験地盤とした。表2に地盤の諸元を、図3に杭を押し込んだあとで測定した地盤内5ヶ所のN値の分布図を示す。N値は杭から離れた所では4~6、杭の近傍では6~7となっている。

(3)押し込み方法 図1に示す位置にφ300杭、φ450杭、節杭の順に油圧ジャッキ(ストローク20cm)によって、貫入速度制御方式で地表から試験杭を静的に押し込んだ。貫入速度は、杭先端が約3.4mの深さになるまでは毎分約10~30mm、それ以深では毎分1~4mmとした。

前者を「貫入過程」、後者を載荷試験に準じた「載荷過程」と呼ぶ。また、貫入量が約10cmもしくは約20cmになるごとに除荷を行なった。(4)測定項目 杭頭荷重はロードセル(容量200tf)によって測定した。また、杭頭貫入量は、貫入過程では巻込み型変位計(容量2,000mm)を、載荷過程では摺動型変位計(容量100mm)を用いて測った。さらに、杭の軸力を求めるために杭体のひずみ値を測定した。これらの測定は貫入過程では1~2分ごとに、載荷過程では1分ごとに行なった。なお、杭を貫入する前と掘り出した後に、杭体の圧縮試験を行なって、軸力とひずみ値の関係を求めた。

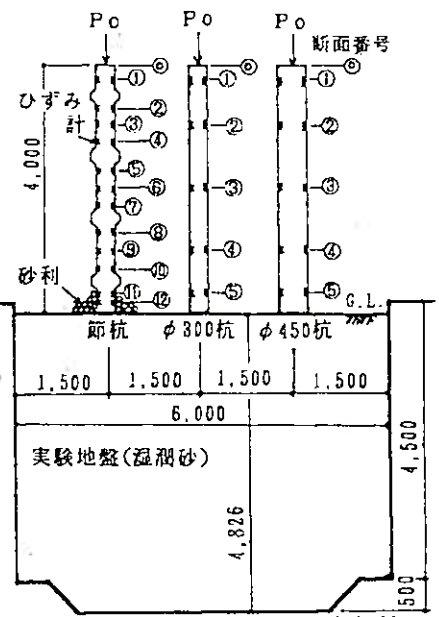


図1(a). 実験槽(断面)、試験杭

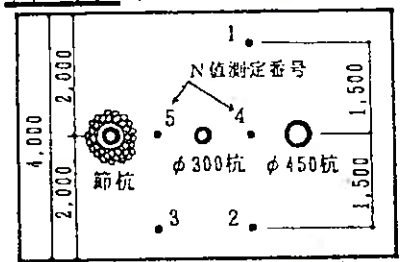


図1(b). 実験槽(平面)

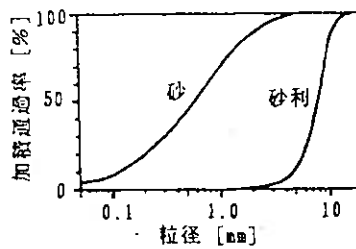


図2. 粒径加積曲線

表1. 砂の諸元

産地	早川(山梨)
均等係数 $U_c$	7.3
最大密度 $\rho_{max}$	1.903g/cm <sup>3</sup>
最小密度 $\rho_{min}$	1.253g/cm <sup>3</sup>
土粒子の比重 $G_s$	2.69
内部摩擦角 $\phi$	32°

表2. 地盤の諸元

砂の体積	112.8m <sup>3</sup>
砂の重量	191.2tf
単位体積重量 $\gamma$	1.69gf/cm <sup>3</sup>
平均含水比	6.5%
相対密度 $D_r$	62.3%
地下水位	GL-4.5m

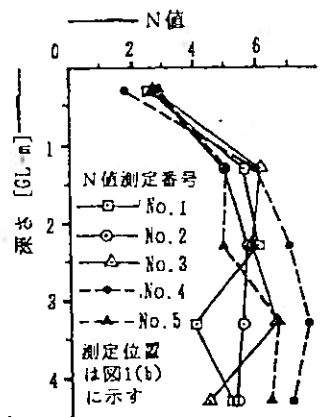


図3. N値の分布

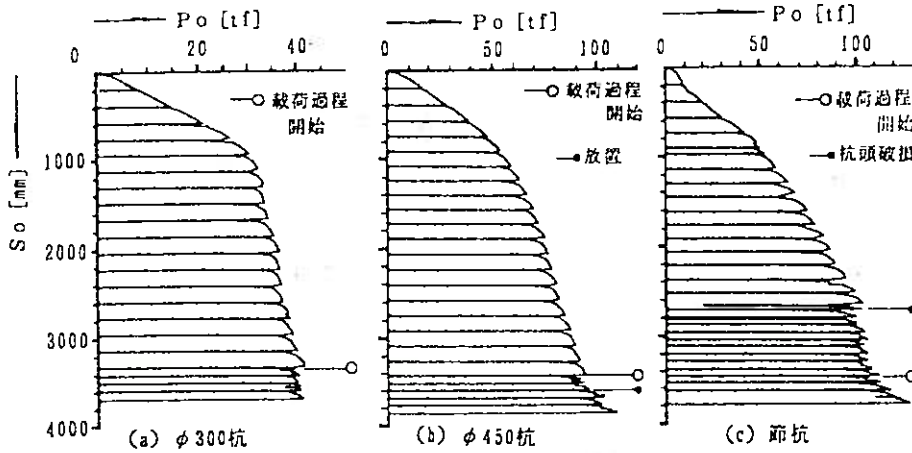


図4 貫入過程における杭頭荷重 $P_o$ ～貫入量 $S_o$ 関係図

3. 実験結果 (1)  $P_o$ ～ $S_o$ 関係 貫入に要した荷重の最大値は、 $\phi 300$ 杭では41.3tf、 $\phi 450$ 杭では109.1tf、節杭では127.3tfとなった。図4(a)～(c)は、

杭頭荷重 $P_o$ と杭頭貫入量 $S_o$ の関係を示したものである。各サイクルの履歴荷重での $P_o$ ～ $S_o$ 関係はほぼ平行になっていることが分かる。なお、 $\phi 450$ 杭では載荷過程の第2サイクルと第3サイクルの間には12日間の放置期間がある。また節杭は、貫入過程の途中で杭頭の一部が破損したため約1/3のひずみ計が損傷を受けた。

(2) 掘り出し後の杭の状況 実験終了後に杭を注意深く掘り出して観察した。円筒杭の場合、杭表面とのせん断のため粒子破碎をしたとみられる砂が3～4mmの層となって杭体表面の1/3～1/2に固結していた。この層がどの時点で形成されたかは分からないが、貫入中に生じたとすればせん断面は地盤と杭体表面との間から、地盤とこの固結した層との間に移行していたものと考えられる。次に、図5は節杭の周囲の状況を描いたものであるが、以下のような傾向がみられた。

①地表から2番目の節部までの間に充填されている砂利の層の外径は節部径より大きくなっているがその密度はゆるい。これに対してそれより下側では節部とほぼ同じ径であるが固く詰まっている。②杭体表面には砂利の動きによるものと思われる鉛直方向の傷が生じている。特に節部の下面では著しい。③節部の直下では、その下方よりも砂利層の径が少し大きくなっている。④砂利層の外側には厚さ1～2cmの砂利と砂の混った層が形成されている。⑤最下端の節部より下側の部分にも砂と砂利の混ったものがこびりついている。以上の①～⑤に示したことと模型実験の結果<sup>2)～4)</sup>などから判断すると、節杭の周囲は貫入時には次のような状態になると考えられる。

i) まず砂利は節部によって生じた穴に充填される。 ii) 充填された砂利は上方の節部に押されて圧縮されるため杭の本体部との間ですべりを生じ、その結果杭体表面に傷ができる。 iii) 節部の下面で圧縮された砂利は外側に押し出されるように動く。すなわち、節部下面は杭先端面と似たような作用をする。 iv) 貫入量が大きくなると、砂利は杭体と一体になって動くようになり、砂利層の外側の面がせん断面となる。その結果砂と砂利の混った層が形成され、この層のせん断抵抗が節杭の摩擦抵抗として作用することになる。なお、節杭の場合摩擦抵抗という用語は適切でないと考えられるので、以後は「周面抵抗」と呼ぶこととする。 v) 最下端の節部から下側の部分は先端面と一体になって抵抗する。

#### 4. 考察1 (貫入過程における円筒杭の検討)

(1) 軸力分布  $\phi 300$ 杭の貫入過程における軸力分布図を図6に示す。杭が地盤に貫入するのに伴って、ほぼ一樣な摩擦力が作用していくことが分かる。

(2) 先端抵抗 図7は各サイクルの最大荷重時における杭の先端抵抗を荷重で表した $q$ と、貫入量を杭径で除

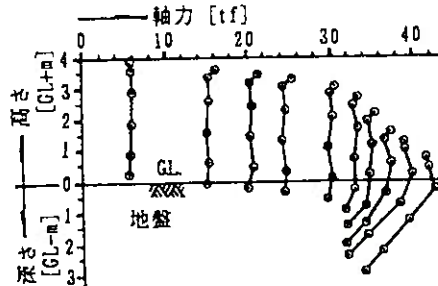


図6  $\phi 300$ 杭の軸力分布

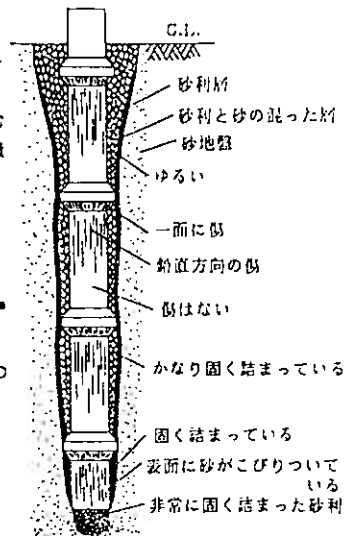


図5 節杭の周囲の状況

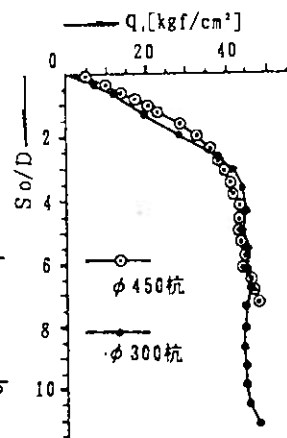


図7 貫入過程における先端抵抗

した  $S_o/D$  の関係である。この  $q$  は貫入量に相当する根入れ深さに設置された杭先端の極限支持力に近いものを示していると考えられる。この図から、 $\phi 300$  杭と  $\phi 450$  杭ともに、先端抵抗が増大するのは  $S_o/D$  がほぼ 3 までであることが分かる。したがって、杭の先端支持力は根入れ深さが杭径の約 3 倍の深さまでの場合は上載圧の影響が大きいが、それより深くなると影響は小さくなると推察される。また、 $\phi 300$  杭と  $\phi 450$  杭の先端抵抗の値はほぼ等しく、杭径の影響は小さいことが分かる。

(3) 摩擦抵抗 杭頭荷重と先端抵抗の差を、地盤中に貫入した部分の杭の表面積で除した摩擦抵抗  $f$  と貫入量  $S_o$  の関係を図 8 に示す。また、この図には側圧係数  $K$  をパラメータとした時の  $f$  と  $S_o$  の関係も併記した。これは、 $K$  を単純化して深さ方向に一定と仮定し、 $f$  を杭長に沿った三角形分布と考えた式  $f = 0.5K \gamma \tan \delta \cdot S_o$  によって求めたものである。ここに砂の単位体積重量  $\gamma = 1.69 \text{ gf/cm}^3$ 、砂と杭体表面との摩擦係数  $\delta = 31^\circ$  とした。  $\delta$  の値は杭体表面と粗さのほぼ等しいモルタルと、実験に使った砂と平均粒径のほぼ等しい淀川産の砂による改良型一面せん断試験機を用いた摩擦試験によって得られた値である。図 8 から

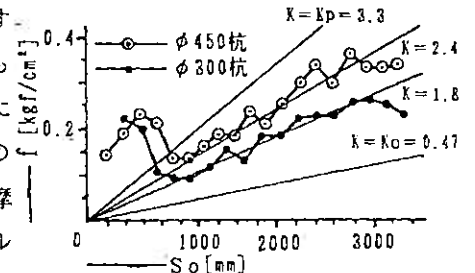


図 8. 貫入過程における摩擦抵抗

$f$  の値は  $\phi 450$  杭の方が  $\phi 300$  杭よりも大きくなっているが、定性的には両杭はよく似た傾向を示していることが分かる。すなわち、 $S_o$  が 700mm 程度まで  $f$  は大きく、対応する側圧係数は受働土圧係数  $K_p = 3.3$  ( $\phi = 32^\circ$ ) よりも大きな値になる。その後は減少するが、 $S_o = 1000$ mm から再び増大している。 $S_o = 1000 \sim 3000$ mm の間の摩擦抵抗は  $S_o$  にほぼ比例しており、対応する側圧係数は  $\phi 300$  杭では  $K = 1.8$ 、 $\phi 450$  杭では  $K = 2.4$  を示している。

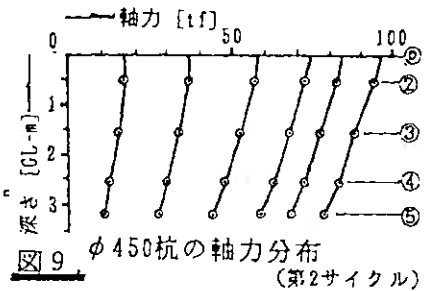


図 9.  $\phi 450$  杭の軸力分布 (第 2 サイクル)

5. 考察 2 (載荷過程における節杭と円筒杭の比較) (1) 軸力分布

載荷過程における  $\phi 450$  杭と節杭の軸力分布図を図 9 と図 10 に示す。 $\phi 450$  杭の場合、 $\phi 300$  杭 (図 6) と同様、摩擦抵抗は深さ方向にほぼ一様に分布していることが分かる。節杭の周面抵抗は上部において多少の変化が見られるが、大局的にはほぼ一様な分布と言えよう。節杭の 100 以上の周面抵抗は、 $\phi 450$  杭の摩擦抵抗よりはるかに大きいことが分かる。

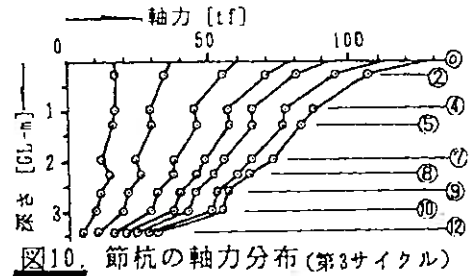


図 10. 節杭の軸力分布 (第 3 サイクル)

(2) 荷重～沈下量関係 図 11(a)～(c) は、それぞれ  $\phi 300$

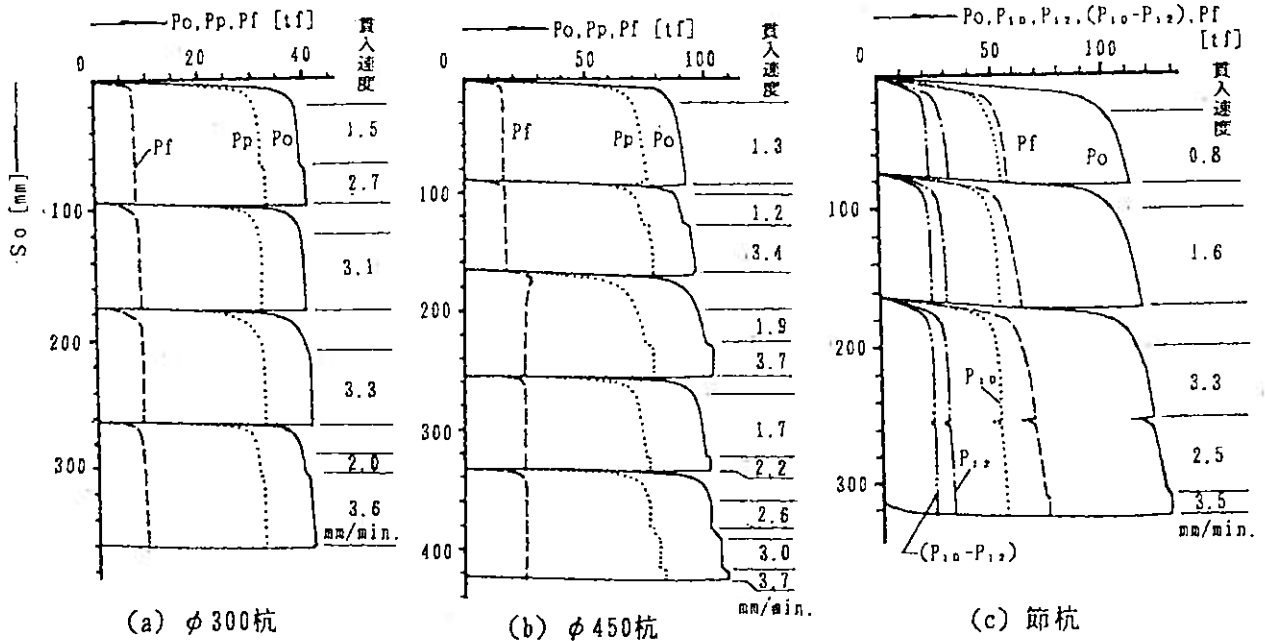


図 11. 載荷過程における荷重～沈下量関係図

杭、φ450杭、節杭の杭頭荷重 $P_0$ ～杭頭沈下量 $S_0$ 関係図である。 $S_0$ としては荷重過程開始時からの杭頭の貫入量を用いている。またこの図には $P_0$ と $S_0$ の関係のほか、先端抵抗 $P_p$ および摩擦抵抗 $P_f$ と $S_0$ との関係も描いている。節杭の場合は先端抵抗として次の3種類を考える。まず先端面の抵抗として②の断面の軸力 $P_{12}$ を、次に最下端節部の抵抗として節部をはさむ上下の軸力差( $P_{10}-P_{12}$ )を、そして両者を一体として考えた先端部の抵抗として③の断面の軸力 $P_{10}$ を採用する。また周面抵抗 $P_f$ は( $P_0-P_{10}$ )とする。図11中には、抵抗の増大が落ち着いた状態での貫入速度を併記している。一般に貫入速度が速くなると抵抗は増大するが、この図においても速度が増すと抵抗はすぐに増大している。そして貫入速度によって変化するのは先端抵抗のみであり、摩擦抵抗は影響を受けていないことが分かる。次に、各サイクルの摩擦抵抗 $P_f$ ～ $S_0$ 関係において、 $P_f$ に通常の摩擦試験で見られるようなピークは生じていないが、φ450杭の第3サイクルにおいては明瞭なピークが見られ残留摩擦力も増大しているのは、第2サイクルと第3サイクルの間に12日間の放置期間を置いたためと考えられる。

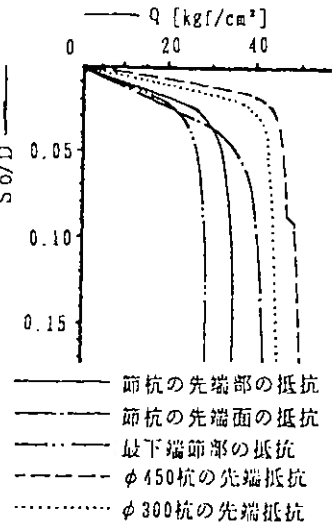


図12. 先端抵抗の比較図

(3) 節杭の先端抵抗の検討 図12は先端抵抗 $q$ ～ $S_0/D$ 関係の比較図である。φ300杭と節杭は最終サイクルのものを、φ450杭は放置する前のサイクルのものを採用している。この図から、節杭の抵抗は3種類とも円筒杭よりも小さいことが分かる。表3は $S_0/D$ が0.05、0.1、0.15の時のそれぞれの $q$ の値と、円筒杭の平均値に対する比を示したものである。節杭の先端部の抵抗は円筒杭の0.72～0.74倍になっている。この表には比較のため、模型実験による値<sup>2)4)</sup>と、筆者らが多くの荷重試験結果から作成し、文献<sup>1)</sup>と文献<sup>2)5)</sup>で提案した節杭と円筒杭の支持力算定式のうち先端抵抗の係数の値も示している。いずれも比は、0.7程度であり、本実験による値はこれらとほぼ一致していることが分かる。

表3. 先端抵抗の値 (kgf/cm²)

	$S_0/D$	値 比	円筒杭			節杭 <sup>2)</sup>		
			φ300杭	φ450杭	平均	先端部	先端面	節部
本実験	0.05	41.8 (0.96)	45.3 (1.04)	43.6 (1)	31.6 (0.72)	35.6 (0.82)	26.9 (0.60)	
	0.10	43.0 (0.94)	48.1 (1.05)	45.6 (1)	33.6 (0.74)	39.3 (0.86)	27.6 (0.61)	
	0.15	43.7 (0.94)	49.1 (1.06)	46.4 (1)	34.1 (0.73)	40.6 (0.88)	27.8 (0.60)	
模型実験 <sup>2)4)</sup>		比	-	-	(1)	(0.75)	(0.87)	(0.66)
支持力算定式 <sup>1)5)</sup>	打込杭	係数	-	-	32 (1)	21 (0.66)	-	-
	埋込杭	係数	-	-	21 (1)	15 (0.71)	-	-

\* 節杭先端部の抵抗  $q = P_{10}/A_0$   $A_0 = D^2 \pi / 4$   $D$ : 節部径  
 節杭先端面の抵抗  $q = P_{12}/A_p$   $A_p = D^2 \pi / 4$   $D$ : 本体径  
 最下端節部の抵抗  $q = (P_{10}-P_{12})/A_n$   $A_n = A_0 - A_p$   $D$ : 節部径

(4) 節杭の周面抵抗の検討 図13は摩擦抵抗 $f$  (節杭では周面抵抗)と沈下量 $S_0$ の関係の比較図である。節杭の周面抵抗は、図11(c)の $P_f$ を、節部径を持つ円筒面の表面積で除したものである。この図から節杭の周面抵抗は円筒杭の摩擦抵抗よりかなり大きいこと、貫入量が増大すると円筒杭の摩擦抵抗はほぼ一定になるのに対し節杭の周面抵抗は漸増していることなどが分かる。これらは前述のごとく、せん断面の直径が節部径よりも大きくなっているためや、節杭の周面抵抗には節部下面に先端抵抗に似た抵抗要素が入っているためと考えられる。表4には $S_0$ が20、50、80mmの時の $f$ の値を示したが、節杭の周面抵抗は円筒杭の摩擦抵抗の4.0～4.4倍になっていることが分かる。また、表4には模型実験で得られた値<sup>2)5)</sup>と、支持力算定式のうち砂質土の摩擦抵抗の係数を文献<sup>1)5)</sup>のデータから計算した値も示したが、いずれも比は2.5程度となっている。本実験の結果は、これらの値よりもさらに大きく、節杭は大きな周面抵抗を持っていることが確認できる。

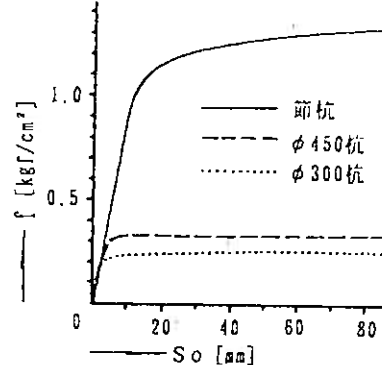


図13. 周面・摩擦抵抗の比較図

表4. 周面・摩擦抵抗の値 (kgf/cm²)

	$S_0$	値 比	円筒杭			節杭
			φ300杭	φ450杭	平均	
本実験	20mm	0.25 (0.86)	0.33 (1.14)	0.29 (1)	1.15 (4.00)	
	50mm	0.26 (0.88)	0.33 (1.12)	0.30 (1)	1.29 (4.37)	
	80mm	0.26 (0.87)	0.34 (1.13)	0.30 (1)	1.32 (4.40)	
模型実験 <sup>2)5)</sup>		比	-	-	(1)	(2.5)
支持力算定式 <sup>1)5)</sup>		係数	-	-	0.22 (1)	0.80 (2.7)

6. 結論 本報告では、実大の節杭と円筒杭との押し込み比較実験の結果を示し、これらの実験結果について検討した。模型実験と比べて節杭に関するより信頼度の高い支持力特性が検討できたものと考えられる。

参考文献 1)山府、大杉、平尾「節杭の鉛直支持力」第17回土質工学研究発表会、昭57.6 2)小原、山府、金井、岸田「模型実験による節付き円筒杭の周面抵抗特性の検討」第18回土質工学研究発表会、昭58.6 3)4)小原、金井、山府、岸田「節付き円筒杭の支持力特性に関する模型実験(その1)(その2)」建築学会大会号、昭58.9 5)6)山府、水井、高水、大杉「くいの静力学的支持力公式に関する提案(第1報)(第2報)」建築学会大会号、昭48.10