

模型実験による節付き円筒杭の支持力特性の検討

正会員 小 椋 仁 志*
正会員 山 肩 邦 男**
正会員 岸 田 英 明***

1. 序

節杭は杭体に数個のつば状の突起物を持つ杭であり、約 60 年前から、主に中小規模の建築物に対して摩擦杭として用いられてきた。断面形状や材質には何回かの改良が加えられて、現在は円筒形（遠心力成型）でプレストレスを導入した高強度コンクリート製のものが主流になっている。この杭を打設する時には、突起物（以下、「節部」と呼ぶ）によって生じる地盤と杭本体部とのすき間に砂利を充填する。これによって杭周の摩擦抵抗を大きくして支持力の増大を図っているが、そのメカニズムは石堂^{1),2)}によって検討されている程度であり、まだよく分かっていないのが現状である。

筆者らは、この節杭の支持力機構を調べるために、一連の実験を行ってきた。本論文では、杭周の地盤の動きを観察できるような実験槽を用いて、節杭と円筒杭との比較を試みた模型実験について報告する。ここに、「節杭」とは節付き円筒杭を示し、「円筒杭」とは節のない通常の円筒形の杭を示している。

2. 実験概要

(1) 実験計画

本実験を計画するに当たって、次のような方針を採用した。①三軸加圧実験土槽を用いる。②地盤は均一な乾燥砂地盤とする。③軸対称条件を満たすよう、模型杭を設置する。④模型杭の先端抵抗、摩擦抵抗および節部の抵抗を分離するため、杭体各部分の軸力を精度よく測定する。⑤模型杭周地盤の動きを観察する。

以上の条件を満たすため、模型杭は鋼管を用いて製作し、その内側にひずみ計をてん付する。また、実験土槽として X 線照射装置を持ち、外部から上載圧と側圧を与えることのできる円形タンクを用いることとした。なお、模型地盤をあらかじめ製作してから模型杭を打設するのは、載荷試験時における地盤の動きの観察が難しいため、先に実験槽に模型杭を設置しておいてからその周囲に砂

を投入する計画とした。

(2) 実験装置

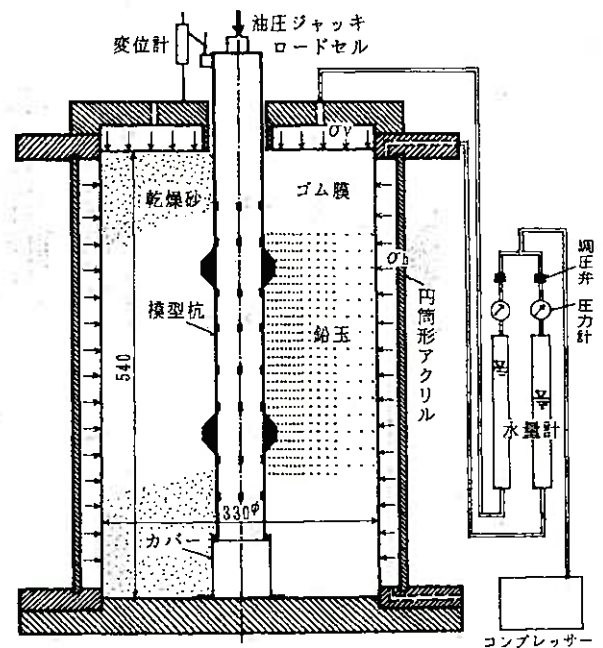
実験に使用した装置の概要は、次のとおりである。

(a) 実験槽

実験槽として使用したタンクは、岸田・高野らが杭の先端抵抗の研究に用いたもの^{3),4)}であり、図—1 に示すように直径 33 cm、高さ 54 cm の円柱形の模型地盤を作製することができる。地盤に加えられる上載圧 σ_v と側圧 σ_h は、コンプレッサーからの空気圧を水量計によって水圧に変換し、ゴム膜を介して作用させるものである。このように、外部から拘束圧を与える方式であるため、特定の深さに対応した応力状態にすることができる。なお、実験槽に拘束圧を与えた時の地盤内の応力分布や底面の影響などについては文献^{5),3)}で詳しく検討されており、この実験槽（加圧砂地盤タンク）の有効性が確認されている。

(b) 模型杭

本実験で用いた模型杭は、内面にひずみ計をてん付する時の寸法上の制約から本体部外径 60 mm、節部外径 88 mm、内径は本体部・節部とも 54 mm とし、厚肉の



図—1 実験槽の概要

本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和 58 年、北陸)に発表している。

* 関西大学 大学院生・工修(株)武智工務所

** 関西大学 教授・工博

*** 東京工業大学 教授・工博

(昭和 61 年 9 月 30 日原稿受理)

鋼管 (STKM 13A) から製作した。外径は、種々の節杭のうち現在最も一般的なものに対して、1/5 の寸法になっている。

次に、節杭の抵抗要素を、図-2 に示すごとく最下端の節部を境として先端抵抗と周面抵抗とに分けて考えた。前者を調べることを目的とした模型杭を「先端型」と呼ぶ。また、後者を調べることを目的としたものを「周面型」と呼び、2つの節部を含む杭長さの範囲を実験の対象とした。図-3(a)~(e) に実験に使用した5種類の模型杭を示したが、(a) および (b) はそれぞれ先端型と周面型の節杭である。

また、節杭と比較するための円筒杭も、先端型と周面型に分ける。(c) は先端型円筒杭で節杭の本体部と同径のものである。(d) および (e) は周面型円筒杭であって、この杭の載荷試験は Coyle et al.⁶⁾ や岸田・宮本ら⁷⁾ の砂と鋼材間の摩擦試験と同様である。砂と鋼材間の摩擦抵抗には鋼材の表面粗さが重要な影響要因となる^{8),9)} ので、杭体の表面粗さが異なる2種類の杭を製作し、それぞれ(粗) および(滑)とした。なお、先端型円筒杭と周面型円筒杭(粗)は同じ模型杭体のものであって、治具が異なっている。

(c) 杭の設置方法

周面型の模型杭の場合、あらかじめ杭下端部との間でスライドするカバーを実験槽底面に取り付け、杭体を底面から7 cm 浮かした状態で保持した後、地盤を作製した。一方、先端型の模型杭の場合は、実験槽底面から25 cm の位置になるまで地盤を作製してから杭を設置し

た。いずれの場合も、実験槽の中心軸上に杭が設置されるよう細心の注意を払った。

(d) X線撮影装置

杭の貫入に伴う地盤の動きを観察するため、あらかじめ標点を地盤中に埋めておき、これをX線によって撮影するという方式を採用した。X線発生器は東芝 EX-250-5A型であって、電源電圧200 V、管電圧245 kVpの状態を使用する。フィルムは四ツ切大のフジ工業用フィルム (ASA 150) を2枚並べた。発生器とフィルムの距離は90 cm、一回の照射時間は25分間である。地盤中に埋める標点には直径約2.5 mmの鉛玉を用い、砂を約1 cm 詰めるごとに杭の中心軸を通る片側の水平線上に原則として5 mm 間隔に配置した。一回の実験に要する鉛玉の数は400~500個である。配置位置と範囲を図-1

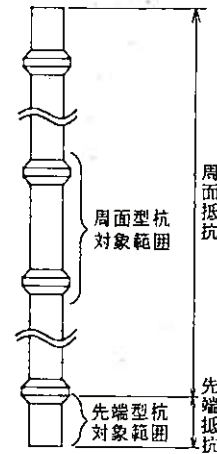


図-2 節杭の抵抗要素

表-1 砂の諸元

産地・名称	鹿島砂5号
最大粒径 D_{max}	2.0mm
平均粒径 D_{50}	0.40mm
有効径 D_{10}	0.16mm
均等係数 U_c	2.8
細粒分含有率	0.7%
土粒子の比重 G_s	2.64
最大密度 ρ_{max}	1.744g/cm ³
最小密度 ρ_{min}	1.441g/cm ³
内部摩擦角 ϕ	42.1° *

*) 一面せん断試験による値

名称		(a) 周面型節杭	(b) 先端型節杭	(c) 先端型円筒杭	(d) 周面型円筒杭(粗)	(e) 周面型円筒杭(滑)
杭径 [mm]		60(本体部) 88(節部)	60(本体部) 88(節部)	60	60	60
表面粗さ R_{max} [μm]	基礎長さ $L=2.5mm$	18.6	15.1	38.0	38.0	3.26
	基礎長さ $L=0.4mm$	14.6	13.2	35.0	35.0	0.85
模型杭の姿図 鉛玉の配置範囲 ひずみ計の位置						
拘束条件	上載圧 σ_v [kgf/cm ²] 側圧係数 K					
◎ X線撮影あり ● X線撮影なし	0.64	1	◎ 85.7	◎ 86.0	● 89.1	—
		3	◎ 86.0	◎ 89.1	● 88.8	—
数字 地盤の初期相対密度 [%]	1.28	1	◎ 85.1	◎ 90.5	● 86.5	◎ 86.3
		3	◎ 84.8	◎ 83.3	● 87.7	● 86.0
		1	◎ 83.9	◎ 86.3	● 88.3	—

図-3 模型杭の種類

と図-3に示す。

(e) 実験地盤

本実験に用いた砂は乾燥状態(含水比 $w=0.4\%$)の鹿島珪砂(5号)であり、その諸元を表-1に示す。この砂を実験槽に詰めるため、文献^{10),11)}を参考にして節部の直下にも直接砂を落下させることができる砂まき装置(ホースの先に多重フレイを取り付けたもの)を製作し、実験槽内が均一な密度になるよう注意して砂地盤を作製した。この地盤の初期相対密度は図-3に示すように80~90%であり、かなり密な地盤といえる。

(f) 貫入方法

地盤に所定の上載圧と側圧を与えた状態で約2時間放置し、地盤の体積変化が終息するのを待った。その後、油圧ジャッキによって杭頭に載荷し、杭を貫入した。載荷方式は貫入速度制御方式とし、毎分1mm以下の速度で貫入量が60mmを超えるまで貫入したが、途中X線の照射時には中断した。ただし、貫入速度については、周面型は先端型より遅くし、また周面型・先端型とも貫入抵抗のピーク値が記録されたあとはそれ以前よりも速くするなどの操作を施している。一般に貫入抵抗は貫入速度によって変化するが、文献¹²⁾などから判断すると、実験結果に与える影響は小さいと考えられる。

(g) 測定項目

上載圧や側圧は、圧力計を見ながら一定になるよう調節した。また、この時の地盤の体積変化量は、水量計で水の出入りを測定することによって求めた。杭頭荷重と杭頭貫入量はそれぞれロードセルと変位計を用いて測定した。軸力は杭体内面にてん付したひずみ計(ゲージ長さ5mmの防水型箔ゲージ、位置は図-3に示す)によって求めた。また先端型の杭の場合は、先端抵抗だけを分離して測定できるように、内管式のロードセルを取り付けた。

以上の荷重、貫入量および軸力等はスイッチボックス(東京測器 ASW-324B)と静ひずみ測定器(東京測器 TDS-256 DC)によって測定した。これらの測定は1分ごとに行うが、測定中にも杭の貫入は続けた。一回の測定に要する時間は3~4秒(0.1秒/点)であるので、貫入を続けていたことの結果に与える影響は無視できると考えられる。測定したデータは、静ひずみ測定器に接続したパーソナルコンピューター(YHP 85F)に取り込んで、データの表示や記録を行った。

X線撮影は原則として貫入量が0, 3, 6, 9, 15, 21, 30, 40, 50および60mmの時にを行った。撮影されたフィルムは実験終了後に現像し、ショウカステン上で鉛玉の位置関係を確認したあとデジタルタイザ(YHP 9874A)で座標値に変換した。この値は接続したパーソナルコンピューターに記録した。

なお、実験終了後に砂を実験槽から出す際には地盤の

状況を観察し、最後に砂の重量を測って地盤全体の密度を求めた。

(h) 実験種類

行った実験は、図-3に示すように5種類の模型杭と6種類の地盤の拘束条件を組み合わせた24種類である。このうちX線撮影を行ったのは14とおりである。なお拘束条件のうち上載圧 $\sigma_0=0.64, 1.28, 1.92 \text{ kgf/cm}^2$ は、それぞれ地表面下4, 6, 8mの深さの土被り圧(単位体積重量 $\gamma=1.6 \text{ gf/cm}^3$)を想定したものであり、また側圧係数 $K=0.5, 1, 3$ はそれぞれ静止土圧、等方圧密および受働土圧の状態(いずれも内部摩擦角 $\phi=30^\circ$)を想定したものである。

3. 実験結果

この章では、実験によって得られた貫入抵抗と貫入量の関係や地盤の移動状況などを報告し、定性的な傾向について考察する。なお、地盤の体積変化量の測定結果については、紙面の都合上省略する。

(1) 先端型円筒杭

図-4に軸力分布図の一例を示した。大局的にみて、周面摩擦力は杭全長にわたってほぼ一様に分布しているが、上部よりも下部の方が多少大きくなっていることが分かる。また、図-5には、杭頭荷重 P_0 、先端抵抗 P_p および摩擦抵抗 $P_f (=P_0 - P_p)$ と杭頭貫入量 S_0 との関係の一例を示した。

図-6(a)は杭の周辺地盤の移動状況をベクトルで示したものであり、図-6(b)はせん断ひずみ γ_{rz} の分布を描いたものである。地盤のひずみ量は、鉛玉の位置を節点とする三角形要素に地盤を分割し、測定された各ステップでの鉛玉の変位増分から軸対称有限要素法の変位-ひずみマトリックスを用いてひずみ増分を計算し、これを累計することによって求めた。これらのうち、せん断ひずみのみを分離して示したものが図-6(b)である。図-6(c)は図-6(a)の地盤の移動状況を模式的に示したものである。

これらの図において、以下のようなことが特筆される。
①杭先端付近の地盤の移動状況やひずみ分布は、同じ土槽を用いた高野・岸田らの実験³⁾と同様の傾向を示した。本実験の場合、実験³⁾に比べて杭径が約1.8倍になっ

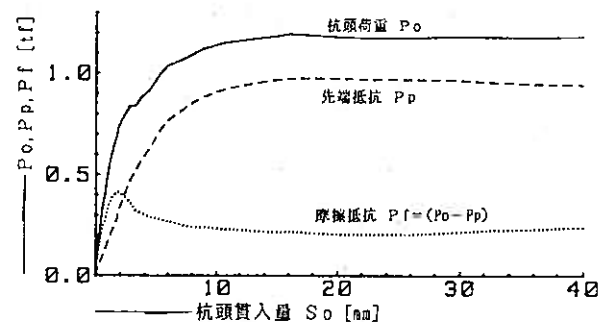


図-5 先端型円筒杭 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2, K=0.5$)

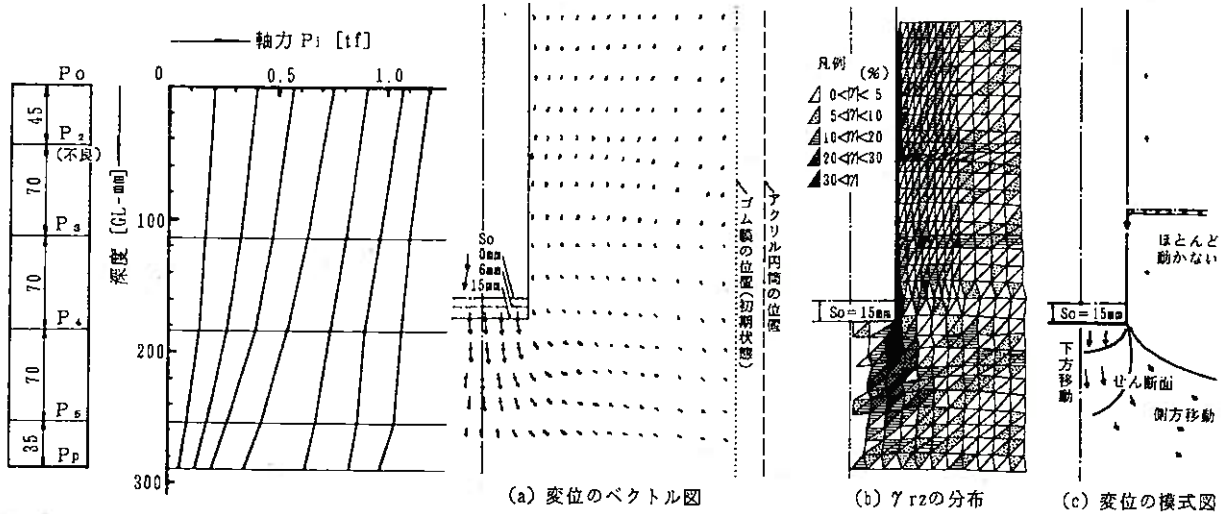


図-4 軸力分布 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$) 図-6 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=15 \text{ mm}$)

ているが、定性的には杭径の影響は見られない。②杭の周面付近の地盤は、杭が貫入してもほとんど動いていない。すなわち、杭体表面とそれに接する砂面の間ですべりが生じており、 P_f の抵抗要素はこの間の摩擦抵抗であることが分かる。

(2) 周面型円筒杭

図-7には、周面型円筒杭の $P_0 \sim S_0$ 関係の一例を示した。先端抵抗は生じない機構になっているので、 P_0

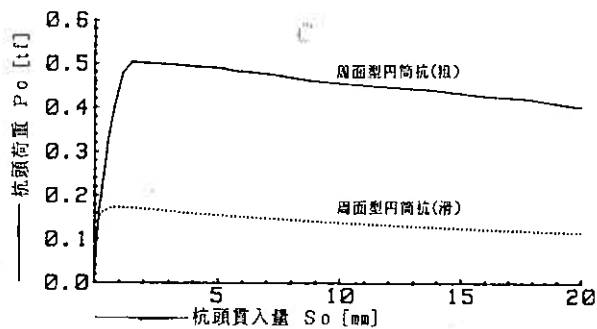


図-7 周面型円筒杭 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$)

がそのまま摩擦抵抗 P_f とみなされる。 $P_0 \sim S_0$ 関係は、先端型円筒杭の $P_f \sim S_0$ 関係と同様、最大値に達した後漸減する形を示している。また、図は省略するが地盤の移動状況やせん断ひずみ分布なども先端型円筒杭の周面部とはほぼ同様であり、杭周地盤はほとんど動いていない。

(3) 先端型節杭

図-8は、杭軸力分布の測定結果の一例である。同図から、①貫入量が小さい範囲 (0.3 mm 以下) では、杭長全体にほぼ様な摩擦抵抗が生じていること、②貫入量が大きくなると節部の影響が顕著になり、先端抵抗 P_0 、節部による抵抗 ($P_3 - P_4$) および節部と先端面との摩擦抵抗 ($P_4 - P_5$) の3者に分けられるようになること、などが分かる。これらの各部抵抗と S_0 の関係を示したのが図-9である。また、図-10(a)には杭周辺地盤の変位のベクトル図を、同図 (b) にはせん断ひずみ γ_{rz} 分布を、同図 (c) に変位の模式図をそれぞれ示した。

図-9、図-10 および同様の他種類の実験結果から、以下のことが指摘できる。①図-9において、先端抵抗

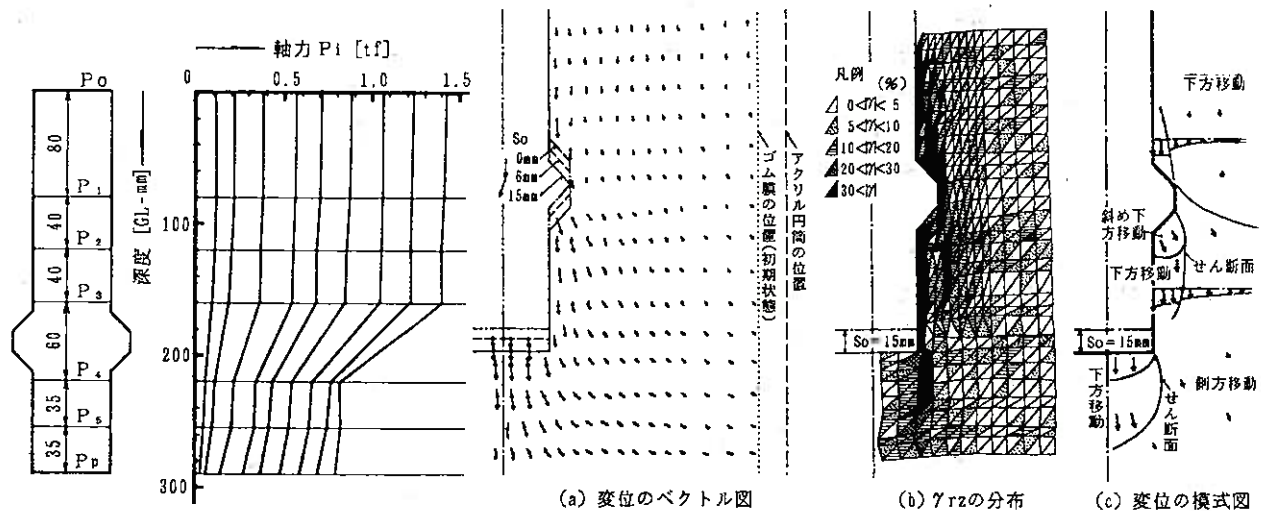


図-8 軸力分布 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$) 図-10 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=15 \text{ mm}$)

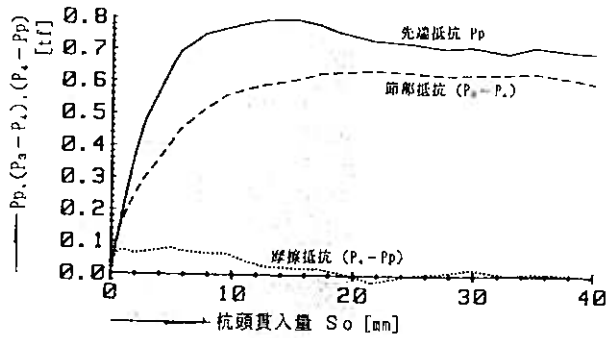


図-9 先端型節杭 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$)

と節部抵抗はともに先端型円筒杭の先端抵抗と定性的によく似た貫入量-抵抗関係を示している。②図-10より、節部の下面と先端面の下方には、先端型円筒杭の場合と同様にせん断面の発生がみられ、この面の内側の土は杭とともに下方に動いていること、節部下面直下の地盤は斜め下方に押し出されるように動いていることが分かる。③せん断面より外側の地盤には側方への移動がみられる。この傾向は側圧が小さいほど顕著である。側方移動の範囲は、円筒杭の場合よりも広い。④せん断面は節部下部のものと同先端面下部のものがつながって、一体的な抵抗を示すようになる。⑤円筒杭の場合と比較して、節部より上方の地盤の下方移動が目立つ。⑥摩擦抵抗 (P_3-P_6) は、貫入量 S_0 が小さいうちは増大し、 $S_0=1\sim 2 \text{ mm}$ においてピークに達する。その後、漸減してほとんど消失してしまう。

(4) 周面型節杭

図-11 に、周面型節杭の軸力分布の一例を示した。貫入量が小さい範囲では杭の全長にわたってほぼ一様な摩擦抵抗が生じているが、その後本体部と地盤の間の摩擦抵抗は消失し、2つの節部による抵抗が大きくなること分かる。図-12 は、上側の節部抵抗 (P_2-P_3)、本体部の摩擦抵抗 (P_3-P_6) および両者の和として定義される周面抵抗 (P_2-P_6) と S_0 の関係である。 (P_2-P_3) $\sim S_0$, (P_2-P_6) $\sim S_0$ 関係の2曲線はほとんど等しく、 $S_0=15 \text{ mm}$ 付近において最大値に達した後減少している。なお、下側の節部については実験槽底面との間の圧縮抵抗の影響が入っていることが判明したため、節部抵抗として採用しなかった。

次に、貫入開始から $S_0=6 \text{ mm}$ までについて、地盤の変位のベクトル図を図-13(a) に、せん断ひずみ γ_{rz} 分布を同図 (b) に、鉛直方向のひずみ ϵ_z 分布の模式図を同図 (c) に、そして変位の模式図を同図 (d) に示した。また、図-14(a)~(d) は $S_0=15 \text{ mm}$ での、

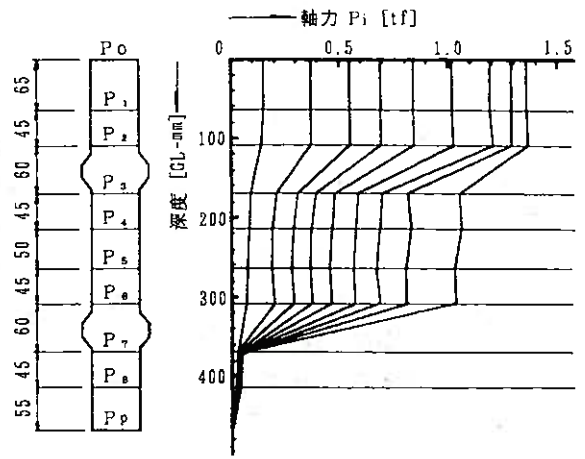


図-11 軸力分布 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$)

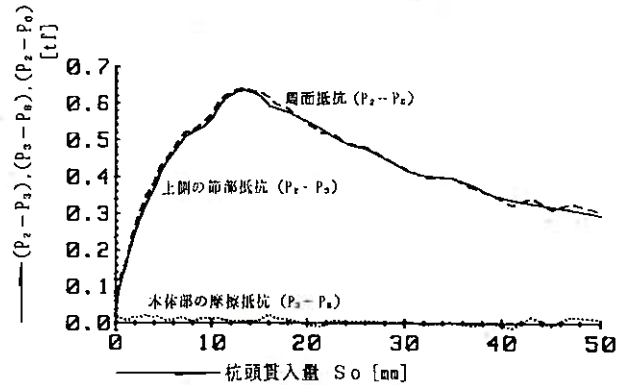


図-12 周面型節杭 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$)

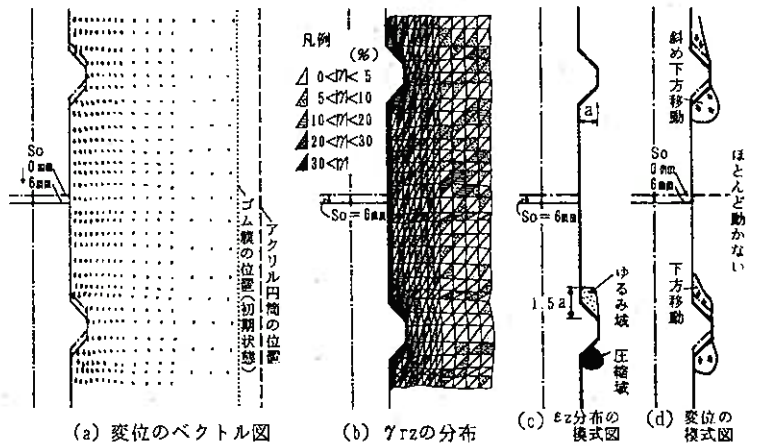


図-13 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=6 \text{ mm}$)

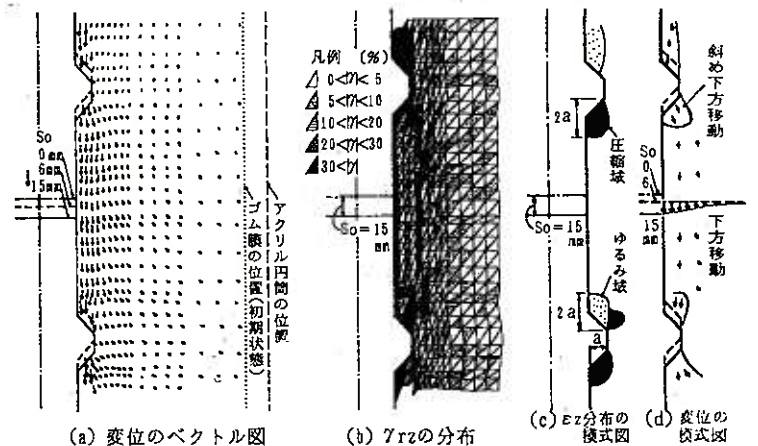


図-14 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_0=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=15 \text{ mm}$)

図-15(a)~(d) は $S_0=30$ mm での、図-16(a)~(d) は $S_0=50$ mm でのものである。ただし、変位のベクトル図および変位の模式図はそれぞれ前段階からの増分が示されている。これらの図から以下のことが分かる。①変位のベクトル図において、節部上部の土は鉛直下方への動きを、下部の土は先端型節杭と同様、斜め下方への動きを示している。変位の程度は測定段階が進むにつれて顕著である。②また、本体部周辺の地盤の動きは、図-13の段階では杭の貫入量と比べて非常に小さく、摩擦抵抗の発生が考えられる。しかし、図-14および図-15では下方への動きが増えて、杭の貫入量に対する割合が増大し、摩擦抵抗は減少する傾向がうかがわれる。ただし、図-12から分かるように本体部の摩擦抵抗の絶対量は少ない。③図-15の本体部周辺では、節部径より外側の地盤はほとんど動かず、節部径より多少大きな径の円筒形せん断面が形成されていたことが分かる。そのため、節部下面の抵抗はこの円筒形地盤のせん断で規制されることが考えられる。図-12における節部抵抗の増加域は、節部下部の土の斜め下方への動きに対する地盤の抵抗（以下、これを「節部の支持作用」と呼ぶ）が主であり、円筒形せん断面の形成で上限値に達すると解釈できよう。④図-16になると③で述べたせん断面の内側に節部径とほぼ等しい径を持つ別のせん断面が形成されている。節部抵抗が漸減しているのは、支持作用が徐々に小さくなることに加えて、せん断面の径が変化するためと考えられる。⑤ ε_z 分布の模式図によると、節部の上方 $1.5a \sim 2.5a$ (a : 節部の突出長さ) の範囲はゆるみ、下方 $2a$ の範囲は圧縮されていることが分かる。石堂は突出部（節部）の上方に平衡アーチ域を、下方に圧縮塑性域を考え、それぞれの鉛直方向の範囲を内部摩擦角 ϕ の関数として与えた²⁾。 $\phi=40^\circ$ とした試算では、それぞれ $0.9a$ および $3a$ となり、本実験の結果は前者において大きく、後者において小さくなっている。また、石堂は両域の範囲の合計が突出部の間隔より大きい時は筒状すべりが生じ、抵抗は筒状地盤の摩擦抵抗と等しくなるのに対し、小さい時は突出部の支持作用が発揮されるとしている。しかし、本実験では、貫入量が小さいうちは節部の支持作用は発揮されているが、貫入量が大きくなると両域の合計 ($3.9a$) が節部の間隔 ($13a$) より小さいにもかかわらず円筒形のせん断面が形成されている。

4. 節杭の先端支持力の検討
本章では3章で述べた各種の抵抗のうち先端抵抗に関

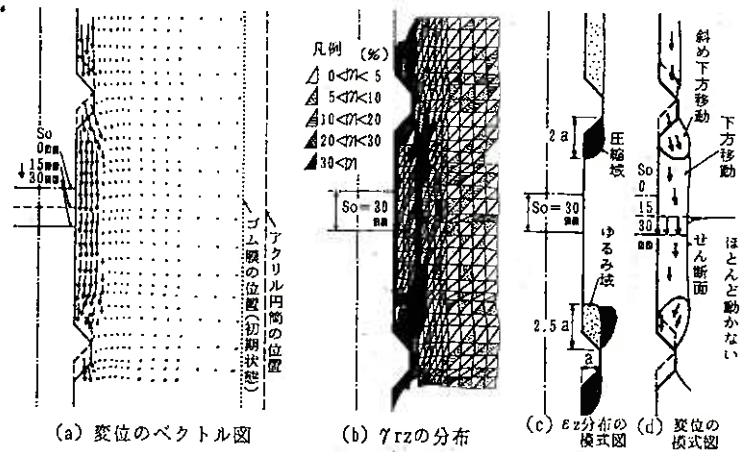


図-15 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=30 \text{ mm}$)

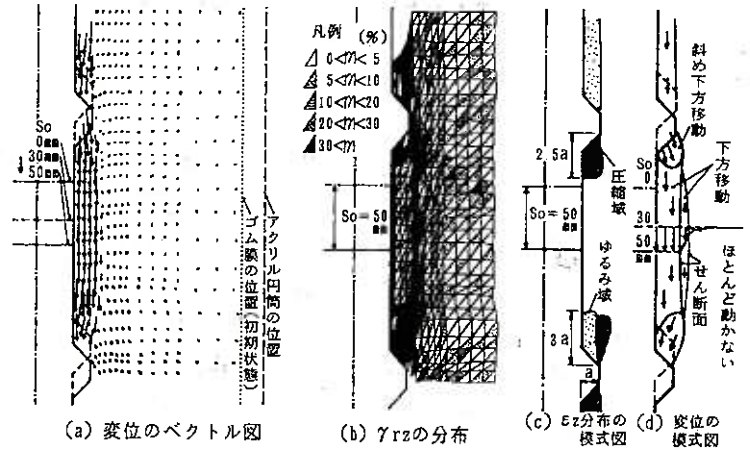
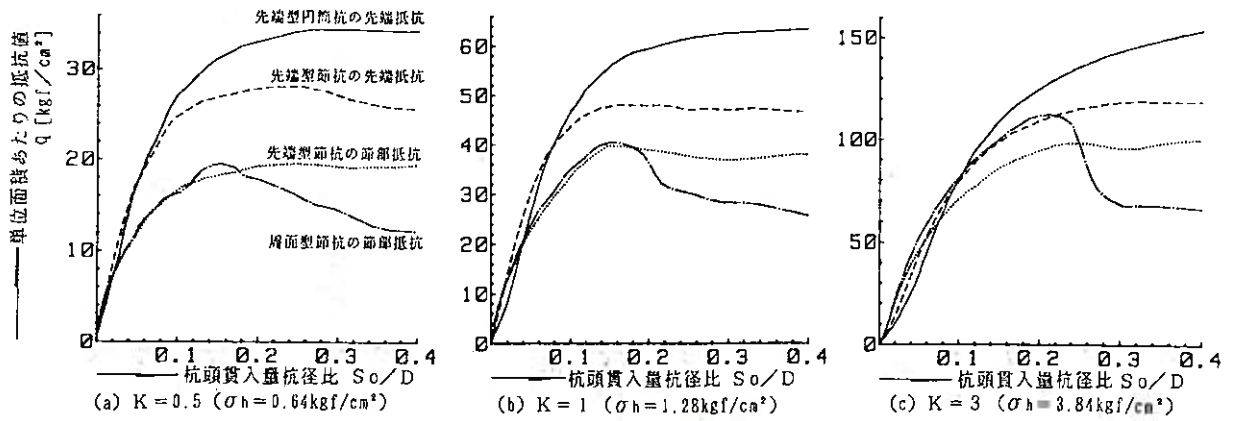


図-16 杭周辺地盤の移動状況 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$, $S_0=50 \text{ mm}$)

連したものについて検討する。ここで対象とするのは次のとおりである。

- (i) 先端型円筒杭の先端抵抗: P_p
- (ii) 先端型節杭の節部抵抗: $(P_3 - P_1)$
- (iii) 先端型節杭の先端抵抗: P_p
- (iv) 周面型節杭の上側節部抵抗: $(P_2 - P_3)$

図-17(a)~(c) は (i)~(iv) の単位面積当たりの抵抗値 q と杭頭貫入量杭径比 S_0/D の関係 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$ の場合) である。ただし、(ii) および (iv) の場合、 q は節部抵抗を節部のみの水平投影面積（ドーナツ状）で除したものであり、 D は節部径を採用してある。同図から、以下のことが分かる。① S_0/D が小さい範囲 ($S_0/D < 0.03 \sim 0.08$) では、大局的にみて q の値はほぼ近似しているとみてよからう。多少のバラツキは、地盤作製時における砂の密度の相違、荷重初期の荷重面のなじみ具合等によるものと考えられる。② S_0/D がさらに大きくなると q の値に差が生じ始める。周面型節杭を除くと、 $S_0/D > 0.1$ では先端型円筒杭の先端抵抗 > 先端型節杭の先端抵抗 > 先端型節杭の節部抵抗の順に大きい。3者の地盤の移動状況やすべり線の発生状況には、3章(3)で述べたように顕著な差は見られず、これらの定量的な相違の原因は今後の検討に待つべきで



図—17 節部抵抗および先端抵抗の比較図 ($\sigma_v = 1.28$ kgf/cm²)

あろう。③周面型節杭の節部抵抗の $q \sim S_0/D$ 曲線は、 $K=3$ の場合を除いて、 $S_0/D < 0.2$ の範囲では先端型節杭のそれにはほぼ一致した曲線となった。

次に、周面型節杭の節部抵抗を除く3者の q に関して、 $S_0/D = 0.2$ の時の抵抗値 q_1 を用いて考察する。ここに $S_0/D = 0.2$ とは岸田・高野の提案する第一極限支持力¹³⁾ (杭の先端地盤が全面的に塑性化する時の支持力) を与える沈下量である。図—18に、各抵抗の q_1 値と平均拘束圧 $\sigma_m (= (1+2K)\sigma_v/3)$ の関係を示した。 q_1 値は σ_m にはほぼ比例していることが分かる。そこで、山口の提案した無限土中の球状空洞の押抜け理論^{14), 15)} を用いて支持力を検討する。この理論による支持力 q_u を岸田・高野は第一極限支持力に相当するとしている。砂質土中の杭の場合、 q_u は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} q_u &= \sigma_m \frac{3(1+\sin\phi)}{3-\sin\phi} I_u^{\frac{4\sin\phi}{3(1+\sin\phi)}} \\ I_u &= \frac{3-\sin\phi}{3\sigma_m \sin\phi} \times \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

上式中の ϕ は地盤の内部摩擦角、 E は地盤の弾性係数、 ν は地盤のポアソン比を表す。鹿島珪砂 (5号) の E 、 ϕ および ν の値を決めるに当たっては文献¹⁶⁾ の方法を準用する。

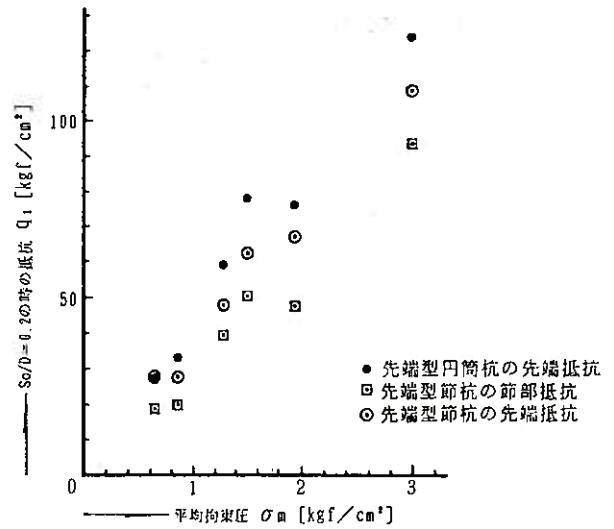
$$\left. \begin{aligned} \phi &= 28.4 + 0.14 D_r \quad (D_r: \text{相対密度 } \%) \dots\dots (2) \\ E &= a(\sigma_h/\sigma_0)^b \\ a &= 1320 - 28.7 D_r + 0.24 D_r^2 \\ b &= 1/(3.21 - 0.0517 D_r + 0.000434 D_r^2) \end{aligned} \right\} (3)$$

σ_0 : 単位応力度

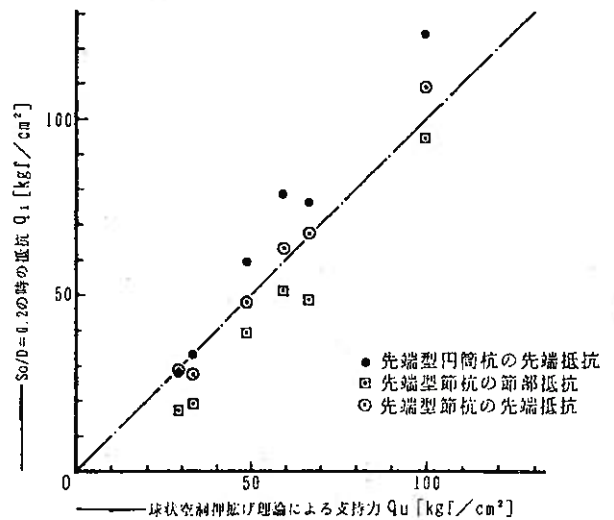
上式に $D_r = 85\%$ を入れると、 $\phi = 40.3^\circ$ および、 $E = 614.5 \times (\sigma_h/\sigma_0)^{1.86}$ を得る。また、 $\nu = 0.3$ とする。これらの値を用いて求めた q_u 値と実験で得られた q_1 値の関係を描いたのが図—19である。大局的には両者はほぼ近似しており、それぞれ平均すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{先端型円筒杭の先端抵抗} \quad q_1 &= 1.15 q_u \\ \text{先端型節杭の先端抵抗} \quad q_1 &= 1.00 q_u \\ \text{先端型節杭の節部抵抗} \quad q_1 &= 0.76 q_u \end{aligned} \right\}$$

なお、節杭の先端面と直上の節部は一体的に抵抗してい



図—18 $\sigma_m \sim q_1$ 関係図



図—19 $q_u \sim q_1$ 関係図

ると見ることもできるので、これらを一体としたものを節杭先端部と名付ける。節杭先端部の節部断面積当たりの支持力度 q_1 は、上記の値より $0.87 q_u$ となる。また、円筒杭の先端抵抗に対する節杭の先端面の抵抗、節部の抵抗および先端部の抵抗はそれぞれ 87% 、 66% 、 75% となる。

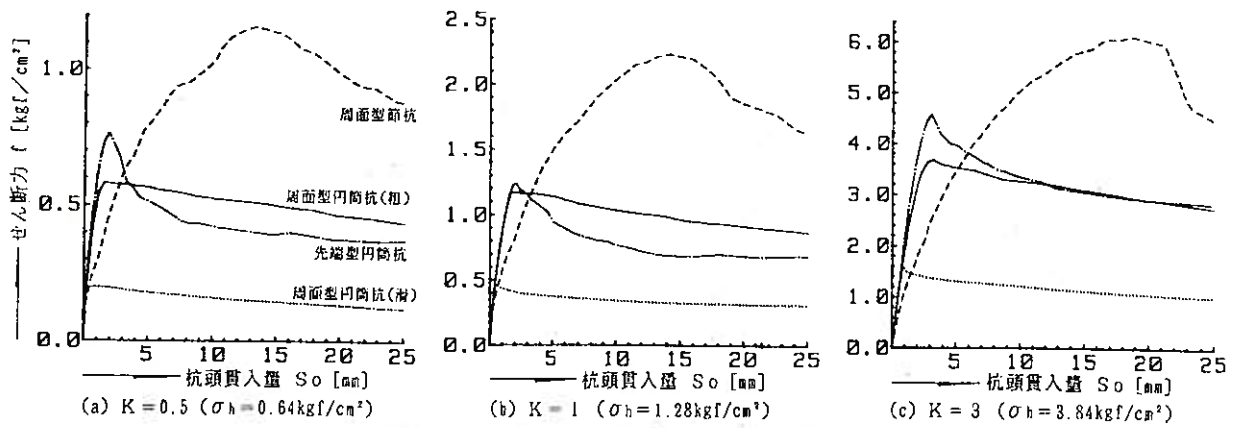


図-20 せん断力の比較図 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$)

5. 節杭の周面抵抗の検討

本章では、3章で述べた各種の抵抗のうち、下記の摩擦抵抗や周面抵抗に関連したものを比較することによって、節杭の周面抵抗の算定法を検討する。

- (i) 周面型円筒杭(粗)の摩擦抵抗： P_0
- (ii) 周面型円筒杭(滑)の摩擦抵抗： P_0
- (iii) 先端型円筒杭の摩擦抵抗： $(P_0 - P_p)$
- (iv) 周面型節杭の周面抵抗： $(P_2 - P_0)$

図-20(a)~(c)に、 $\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$ の場合のせん断力 f と貫入量 S_0 の関係を示した。ただし、(i)~(iii)の f は摩擦抵抗を杭体表面積で、(iv)の f は $(P_2 - P_0)$ を節部の径を持つ円筒面の表面積で、それぞれ除して求めた。同図から次のことが分かる。①すべての $f-S_0$ 関係において f は明瞭なピーク値 f_{max} を持つ。 f_{max} は周面型節杭 > 先端型円筒杭 > 周面型円筒杭(粗) > 周面型円筒杭(滑)の摩擦抵抗の順に大きい。②先端型円筒杭の f_{max} は同じ杭体を用いた周面型円筒杭(粗)よりも大きい。図-21に、図-20(a)の場合の先端型円筒杭の④断面を境にした上部と下部の $f-S_0$ 関係を描いた。上部の f_{max} は周面型円筒杭(粗)とほぼ等しいのに対し、下部の f_{max} ははるかに大きい。これは、杭先端面の抵抗によって、先端付近の杭周表面に作用する側圧が大きくなっているためと考えられる。③周面型円筒杭(粗)と(滑)を比べると、前者は後者の2~3倍の値になっている。④周面型節杭の場合、初期剛性は円筒杭に比べて小さい。これは節部下部の砂の圧縮変形の影響によるものである。⑤周面型節杭の f_{max} は円筒杭に比べてはるかに大きい。これは、3章(4)で述べたように、円筒形すべり面の径が f の計算に用いた径(節部径)よりも大きいことや、節部の支持作用が加わるためと考えられる。

以下、 f_{max} について定量的検討を進める。 f_{max} と σ_h の関係を描いたのが図-22である。 f_{max} はおおむね σ_h に比例していることが分かる。摩擦係数 μ は、 f_{max} とせん断面に作用する垂直圧 σ_r の関係直線のこう配として定義される。しかし、FEMによる解析では σ_r の値

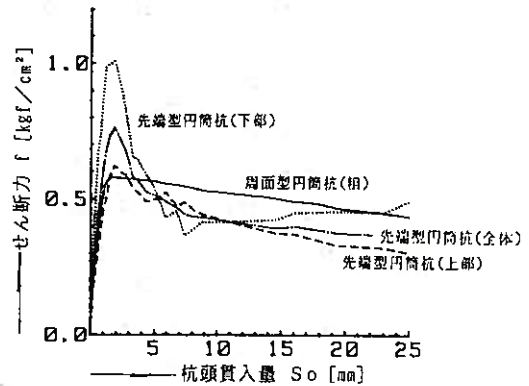


図-21 円筒杭のせん断力の比較 ($\sigma_v=1.28 \text{ kgf/cm}^2$, $K=0.5$)

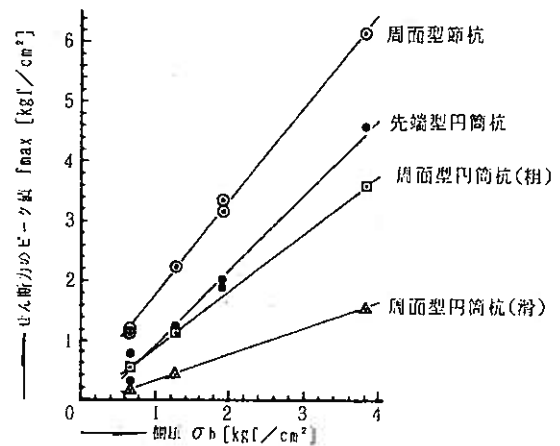


図-22 $\sigma_h \sim f_{max}$ 関係図

は実験槽に加えた側圧 σ_h より8~9%大きくなる¹⁷⁾ことや、杭の貫入に伴って変化する¹⁷⁾ことも報告されている。また前述のごとく杭先端面の影響も受けるため、真の σ_r の値を求めることは難しい。したがって、本論においては σ_r の代わりに σ_h を用いることとして、図-22の直線のこう配を近似摩擦係数 μ' と定義すると、この値は次のようになる。

周面型円筒杭(粗)	$\mu' = 0.95$
周面型円筒杭(滑)	$\mu' = 0.43$
先端型円筒杭	$\mu' = 1.25$
周面型節杭	$\mu' = 1.55$

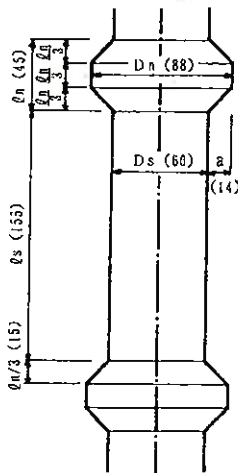
上記のうち、周面型節杭の周面抵抗について考える。まず、せん断面を節部の径に等しい円筒面とし、この面に作用する垂直圧を σ_r とするとせん断抵抗 P_s は次式で表される。記号は図—23 を参照されたい。

$$P_s = \sigma_r \cdot \left[\tan \phi \cdot \left(l_s + \frac{2}{3} l_n \right) + \tan \delta \cdot \frac{1}{3} l_n \right] D_n \cdot \pi \quad \dots\dots\dots (4)$$

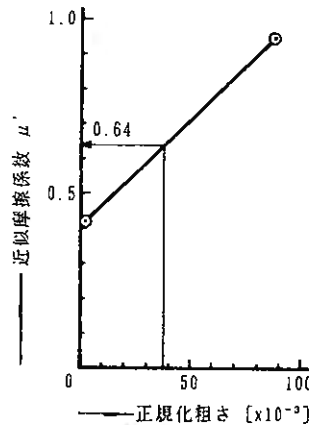
また、節部と等しい径を持つ円筒杭の摩擦抵抗 P'_s は次式となる。

$$P'_s = \sigma_r \cdot \tan \delta \cdot (l_s + l_n) \cdot D_n \cdot \pi \quad \dots\dots\dots (5)$$

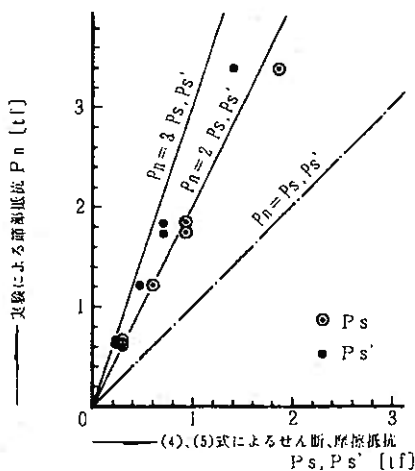
地盤の内部摩擦角 ϕ としては、一面せん断試験による値 $\phi = 42.1^\circ$ を採用する。これは図—15 においてせん断面の状況が一面せん断試験に似ているためである。次に、周面型節杭の節部の表面粗さに相当する摩擦角 δ は上杉らの提案する正規化粗さ（表面粗さを測定する時の基準長さとして砂の平均粒径 D_{50} を採用して求めた表面粗さ R_{max} を、 D_{50} で除したもの¹⁸⁾）を用いて求める。図—24 は正規化粗さを横軸に、近似摩擦係数 μ' を縦軸にして描いたものであり、周面型円筒杭の値をプロットし



()内は模型杭の寸法 1単位mm
図—23 節杭各部の記号、寸法



図—24 正規化粗さ—近似摩擦係数関係図



図—25 $P_n \sim P_s, P'_s$ 相関図

ている。上杉らは正規化粗さと摩擦係数には直線関係が成立するとしているので、この図から、周面型節杭の表面粗さに相当する近似摩擦係数を内挿すると $\mu' = 0.64$ となる。これから δ の値は $\delta = 34^\circ$ と計算される。(4), (5) 式中の σ_r も $\sigma_r = \sigma_h$ とおいて P_s および P'_s の値を求める。図—25 はこれらの値と、実験で得られた周面型節杭の周面抵抗のピーク値 P_n との相関図である。この図から P_n と P_s, P'_s の関係は

$$P_n = 2.0 P_s$$

$$P_n = 2.5 P'_s$$

となり、節杭の周面は、節部径の円筒面における地盤のせん断抵抗の約2倍、節部の径の円筒杭の約2.5倍の抵抗を持つことが分かる。これは、節杭周面の実際のせん断面は節部径よりも多少大きい径の円筒面になっていること、節部の支持作用のためせん断面に作用する垂直圧は図—26のごとく節部の近傍では本体部の周囲よりも大きな値になっていることなどのためと推定される。

周面抵抗を理論化するため、 D_n を直径とする円筒面に働く垂直圧の分布を、図—27のように簡略化して考える。同図における σ_r' によるせん断抵抗 P_h は、

$$P_h = \sigma_r' \cdot \tan \phi \cdot l_p \cdot D_n \cdot \pi \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって、周面抵抗 P_v は次式のようになる。

$$P_v = P_s + P_h \quad \dots\dots\dots (7)$$

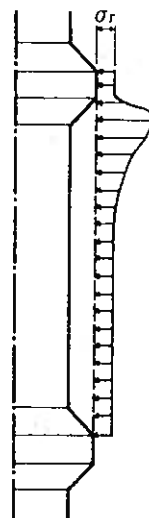
また、節部の下面に作用する抵抗圧の合力の垂直分力 p_v と水平分力 p_h を、図—28のように下面の中央の円周上に分布する線荷重と考える。

p_v は鉛直方向の力のつり合いから

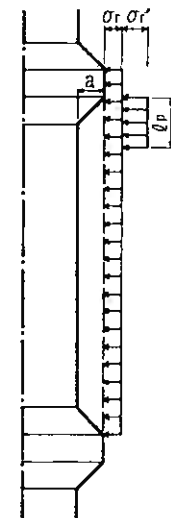
$$p_v = \frac{2 P_v}{(D_n + D_s) \cdot \pi} \quad \dots\dots\dots (8)$$

p_h は σ_r' の反力となるから

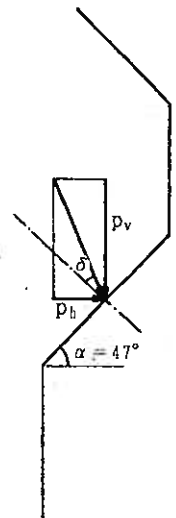
$$p_h = \sigma_r' \cdot \frac{1}{3} l_n \quad \dots\dots\dots (9)$$



図—26 垂直圧分布図



図—27 垂直圧分布の模式図



図—28 節部下面の力のつり合い

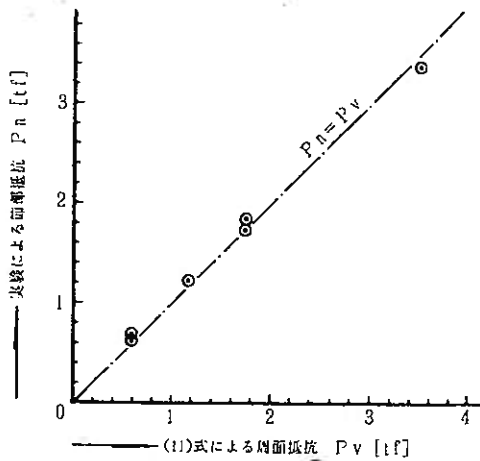


図-29 $P_n \sim P_v$ 相関図

となる。 δ と節の傾き α によって、 p_v と p_h の関係式としては、

$$p_h = p_v \cdot \tan(\alpha - \delta) \dots\dots\dots(10)$$

が成り立つ。以上の(6)~(10)式から次式が得られる。

$$P_v = \sigma_r \cdot \frac{\left\{ \tan \phi \cdot \left(l_s + \frac{2}{3} l_n \right) + \tan \delta \cdot \frac{1}{3} l_n \right\} D_n \cdot \pi}{1 - \tan \phi \cdot \tan(\alpha - \delta) \cdot \frac{2 D_n}{D_s + D_n} \cdot \frac{3 l_p}{l_n}} \dots\dots\dots(11)$$

この式によって求めた P_v の値と実験で得られた P_n 値との相関図を描くと、図-29のようになる。 l_p には節部下面の圧縮域の範囲である 2α (図-15)を採用した。両者はよく近似した値になっていることが分かる。

以上の検討から、今回の実験で得られた節杭の周面抵抗は(11)式で表すことができると考えられる。

6. 結 語

以上、本論文では模型実験によって節杭の支持力特性の検討を行ったが、この結果として、以下のことが分かった。

① 節杭の先端面の抵抗は、山口の球状空洞の押抜け理論によって計算した値とよく近似している。また、最下端の節部は杭先端と同様の作用をし、その抵抗は山口の理論値の75%程度であった。

② 先端面の抵抗と最下端の節部の抵抗を一体と見た先端部の抵抗は、山口の理論値の87%程度、円筒杭の先端抵抗の75%程度であった。

③ 節杭の周面抵抗は、節部の下面の抵抗によって説明づけられる。すなわち、貫入量が小さい間は、節部下面の支持作用が見られるが、貫入量が大きくなると、杭周地盤に節部径より少し大きな直径を持つ円筒形せん断面が生じ、そのせん断抵抗が節部下面の抵抗の上限値となる。この値は、杭の根入れによる垂直圧に対する円筒形せん断面のせん断抵抗に、節部の支持作用によって付加される垂直圧に対するせん断抵抗が加わったものであった。

④ 節杭の周面抵抗は、節部と同じ径を持つ円筒杭の摩擦抵抗の約2.5倍、節部と同じ径の円筒面での地盤のせん断抵抗の約2倍であった。

謝 辞

本実験の実施に当たっては、東京工業大学の上杉守道助手を始め岸田研究室の方々から、実験槽の使い方やX線の取扱い方について親切なご指導を頂いた。ここに、厚く感謝の意を表します。また、本実験は筆者の一人(小椋)が東京工業大学の受託研究員として在籍していた時に行ったものであり、この機会を与えて頂いた(株)武智工務所蔵内貞男社長に感謝致します。

参考文献

- 1) 石堂 稔：砂中の節杭の極限支持力について、第4回土質工学研究発表会、pp.235~238、昭和44年6月
- 2) 石堂 稔：砂中の杭の鉛直支持力に関する基礎的研究、九州大学学位論文、pp.185~226、昭和49年11月
- 3) 岸田英明、高野昭信、吉沢孝夫：砂地盤中の Non-displacement Pile (埋め込み杭・場所打ちコンクリート杭)先端部の荷重-沈下量関係に抗径が与える影響、日本建築学会論文報告集、第284号、pp.17~27、昭和54年10月
- 4) 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、第285号、pp.51~62、昭和54年11月
- 5) 岸田英明、高野昭信：砂地盤中の埋め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、第260号、pp.21~33、昭和52年10月
- 6) Coyle, H.M. and Sulaiman, I.H.: SKIN FRICTION FOR STEEL PILES IN SAND, ASCE, Vol.93, No. SM6, pp.261~278, 1967
- 7) 宮本準一、小林一重、岸田英明：高側圧による摩擦係数の変化、第10回土質工学研究発表会、pp.487~490、昭和50年6月
- 8) YOSHIMI, Y. and KISHIDA, T.: Friction between Sand and Metal Surface, Proc. 10th ICSMFE, Vol.1, pp.831~834, 1981.6
- 9) 上杉守道、岸田英明、小西達也、矢島淳二：粒子破碎を伴う砂と鋼材間の摩擦、第19回土質工学研究発表会、pp.383~384、昭和59年6月
- 10) Beganousky, W.A. and Marcuson, W.F.: Uniform Placement of Sand, ASCE, Vol.102, No. GT3, pp.229~233, 1976
- 11) 土岐祥介、三浦清一、稲 直美：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、昭和54年6月
- 12) BCP委員会：砂層に支持されるくい/support力に関する実験的研究、pp.171~175、1969年7月
- 13) 岸田英明、高野昭信：砂地盤中の埋め込み杭先端部の接地圧分布(その2.接地圧分布と埋め込み杭の先端支持力の関係)、日本建築学会論文報告集、第261号、pp.25~40、昭和52年11月
- 14) 山口柏樹：無限土中における空洞押抜けの弾塑性解析と

- 応用, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.15, pp.1~11, 1973年12月
- 15) 山口柏樹: 弾塑性解析におけるクイの先端支持力式とその適用性, 土と基礎, Vol.23, No.7, pp.7~11, 1975年7月
- 16) 高野昭信: 砂地盤に設置された NONDISPLACEMENT PILE の先端支持力, 東京工業大学学位論文, pp.167~173, 昭和56年3月
- 17) 山崎邦男, 小椋仁志, 金井重夫: 節付き円筒杭の周面抵抗に関する一実験結果 (円筒杭の摩擦抵抗との対比), 第17回土質工学研究発表会, pp.2105~2108, 昭和57年6月
- 18) 矢島淳二, 上杉守道, 岸田英明, 林 繁樹: 砂-鋼材間の摩擦抵抗に正規化粗さが及ぼす影響 (その2), 第21回土質工学研究発表会, pp.287~288, 昭和61年6月

SYNOPSIS

UDC : 624.155

STUDY ON BEARING CAPACITY OF NODULAR CYLINDER PILE BY SCALED MODEL TEST

by HITOSHI OGURA, Graduate Student of Kansai University, Takechi Engineering Co., Ltd., Dr. KUNIO YAMAGATA, Prof. of Kansai University and Dr. HIDEAKI KISHIDA, Prof. of Tokyo Institute of Technology, Members of A. I. J.

This paper describes results of scaled model test for bearing capacity of nodular cylinder pile as compared to non-nodular cylinder pile. Model piles on the scale of one-fifth are tested for penetration in sand pressured by the vertical and horizontal stresses. The movement of sand around the pile is observed by X-ray photograph.

The test results are summarized as follows.

- (1) The lowest nodule part of a pile works in the same way as the pile tip. Other nodule parts also work similarly to the pile tip in small settlement. But in large settlement, a cylindrical slip surface with diameter larger than the nodule is formed around the pile.
- (2) The point bearing capacity of a nodular pile is 75 percent of the capacity of a non-nodular pile.
- (3) The shaft capacity of a nodular pile is about 2.5 times as much as that of a non-nodular pile. The shaft capacity of a nodular pile is about twice as much as shear resistance of cylindrical slip surface.