

遠心模型による摩擦杭の貫入実験

(株)武智工務所 正会員 小原仁志 ○同 上相屋好行
関西大学工学部 正会員 山岡邦男
大阪市立大学工学部 正会員 高田直俊

1. 序 杭を地盤中に貫入した時の杭周地盤の挙動を観察する試みは数多く行われてきた。しかし、重力場の縮尺模型実験では応力の相似条件を満たすことができず、周囲から加圧した模型地盤を用いた実験では深度方向に連続的に増加する地中応力が再現されない。筆者の一人は、かつて遠心装置を用いて実物と等価な地中応力を再現した模型地盤で杭の貫入実験を行い、杭の先端部の地盤変形が浅い基礎の場合と異なることを確かめた。¹⁾

そこで、今回、杭の貫入時の杭周地盤の変形を調べることを目的として、遠心模型実験を行った。本報告は、この実験について述べるものである。

2. 実験概要 「均一な砂地盤中にφ450mmの摩擦杭を3.5m貫入する」場合を想定し、以下に示すような実験を行った。

(1) 実験装置 大阪市立大学に設置されている公称回転半径256cmの遠心装置を用いる。²⁾ 模型の縮尺を1/30とし、30gの遠心加速度場で実験を行う。

(2) 模型地盤 実験土槽は図1に示すように、軸対称条件を満足しかつ地盤の挙動を観察するために、直径30cmの半円形で前面は厚さ10mmの強化ガラスとなっている。この中に深さが約21.5cmとなるように砂地盤を作成する。模型地盤は、乾燥状態(含水比 $w=0.1\%$)もしくは湿潤状態($w=5.2\%$)の豊浦標準砂を詰めたものである。試料の諸元を表1に示す。地盤の密度は相対密度 $Dr=60\%, 80\%, 95\%$ の3通りとする。乾燥砂の場合は多重フルイ(3層)付きサンドレイナーによって、湿潤砂の場合はタンピングによって地盤を作成する。強化ガラスには地盤との摩擦を小さくするため厚さ約0.8mmの寒天膜を塗布してある。この寒天膜には標点(直径2mm、+印を印刷)を、5mm間隔に130~380個添付している。

(3) 模型杭 図2に示すごとく、鋼材を外径15mmの半円形に加工したものである。表面粗さ R_{max} は基準長さを0.8mmとした時は $8.0\mu m$ 、砂の平均粒径に近い $0.16mm$ とした時は $4.5\mu m$ である。軸力の測定を行うために模型杭の内面には深さ5mmの半円形の溝を設け、ひずみゲージ(ゲージ長さ1mm)を4断面に貼付し、ポリエステル樹脂を充填した。ひずみゲージは断面形状の制約から1断面に1点しか貼付できず、測定値にある程度の誤差が含まれることは避けられない。

(4) 貫入方法 図1のように、模型杭の頭部に取り付けたスクリージャッキによって静的に貫入する。貫入時に、杭体が前面ガラスから離れないようにゴム製のローラーで模型杭の背面を押さえておく。貫入速度は毎分8mmとし、杭先端が深さ120mmに達するまで、1サイクルで貫入する。

(5) 測定項目 杭頭荷重はロードセルを、貫入量は巻き込み型変位計を用いて測る。これらと杭体のひずみの計測は15秒ごとに行う。また、貫入量5mmごとに写真撮影を行う。

(6) 実験の種類 乾燥状態の地盤では $Dr=60\%, 80\%, 95\%$ の3通りについて、湿潤状態の地盤では $Dr=80\%$ について実験を行うこととする。

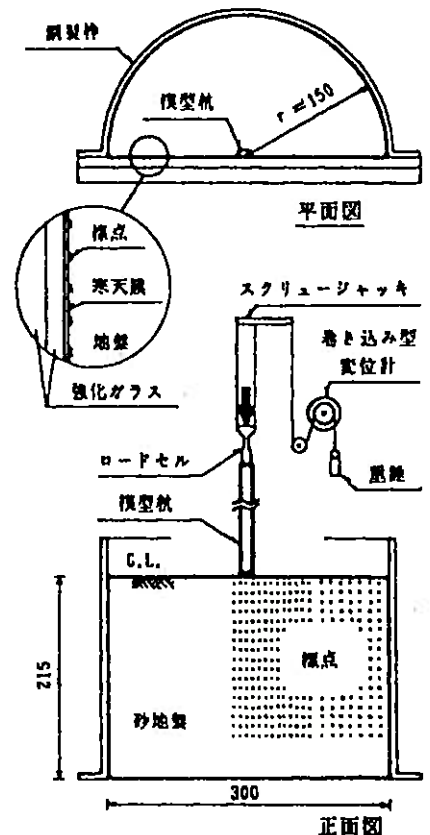


図1 実験土槽 (単位 mm)

表1. 砂の諸元

平均粒径 D_{50}	0.16 mm
均等係数 U_c	0.13 mm
土粒子の比重	2.65
最大密度 ρ_{max}	1.636 g/cm ³
最小密度 ρ_{min}	1.338 g/cm ³

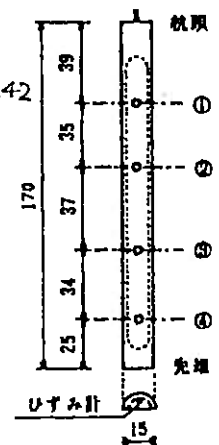


図2 模型杭

Centrifugal Model Test on Jacked Pile ; Y.Kamikonya, H.Ogura (Takechi Engineering Co., Ltd.).

K.Yamagata (Kansai University) and N.Takada (Osaka City University)

3. 実験結果 地盤に所定の加速度を与えた時、1~2mmの地表面の沈下が見られた。また、湿潤砂の実験終了後の含水比は上部では3.3%、中央部では4.1%、下部では6.3%となっていた。

(1) 抗頭荷重 R_o ~貫入量 S_o 関係 図3に実験で得られた R_o ~ S_o 関係を示す。どの地盤状態においても R_o の増加率は杭の貫入が進むにつれて大きくなり、 R_o ~ S_o 関係は下に凸な形状になっている。 R_o は、貫入量に相当する根入れ深さに設置された杭の極限支持力を示すものであり、杭径の8倍程度の根入れ深さでは極限支持力はその影響を大きく受けることが分かる。本実験と同様に地表面から杭を貫入した実験のうち、筆者らの実大杭を用いた実験²⁾においては上に凸な曲線であり、帯刀らの浸透圧を利用した模型実験³⁾では下に凸な曲線となっている。極限支持力に影響する根入れ深さの値は、既往の研究でも杭径の3倍から20倍まで広い範囲の値が提案されており、地盤の状態や実験条件によって大きく影響されるのであろう。次に、乾燥地盤においては地盤の密度が大きいほど貫入抵抗の値は大きくなっている。図4は20mmごとの貫入時での R_o と乾燥密度 ρ との関係である。 ρ が増大するとほぼ直線的に R_o は大きくなること、その勾配は貫入量が大きくなるほど増大することなどが分かる。また、図3において同じ密度($Dr=80\%$)で含水比が異なる場合を比べると、湿潤砂での R_o は乾燥砂での値の約2.2倍にも達している。この差は、地盤が湿っているための毛管圧によるみかけの粘着力や、地盤の作成法の違いなどによるものと考えられる。

(2) 軸力分布 図5は $Dr=80\%$ の乾燥地盤での軸力分布図であるが、杭が地盤中に貫入するに伴って摩擦抵抗が杭に作用する様子が分かる。また、貫入量が大きくなると、杭の下部の方に大きな摩擦抵抗が作用する傾向が見られる。ただし、前述のように軸力値には誤差が含まれることは機構上避けられないが、地表面より上方の軸力値から見ると $\pm 3 \text{ kgf}$ 程度のバラツキが生じていることが分かる。

(3) R_o 、先端抵抗 R_p 、摩擦抵抗 R_f と S_o の関係 図6は、 $Dr=80\%$ の乾燥地盤での実験における R_o 、 R_p 、 R_f ~ S_o 関係である。ただし、 R_p は先端に最も近い断面④の軸力値であり、 R_f は $(R_o - R_p)$ として求めたものである。 R_p と R_f の割合はほぼ2対1となっていることが分かる。

4. 抗周地盤の挙動 写真1は実験中に撮影した写真の例で、これをX-Y座標読み取り装置にかけて各標点の座標値を求める。ここでは、 $Dr=80\%$ の乾燥地盤での実験結果について述べる。

(1) 変位ベクトル 図7(a)~(d)に、杭の貫入に伴う標点の変位をベクトルで表す。(a)は S_o が31.0mm、(b)は60.3mm、(c)は90.4mm、(d)は118.6mmの時の標点の変位を示す。これらの図から次のことが分かる。① S_o が118.6mm(原型に換算して3.5m)の時に地盤が0.5mm(同15mm)以上水平方向に移動する範囲は、杭の中心から杭径の約5.5倍までである。これはKeriselやMeyerhofの提案した影響範囲に比べると少し大きくなっている。② S_o が90mmの時に地盤が0.5mm以上鉛直方向に移動するのは杭先端から杭径の約5倍までの範囲となっている。

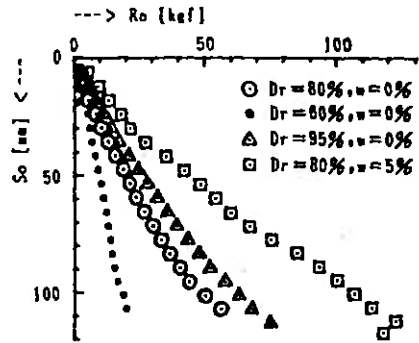


図3 R_o ~ S_o 関係図

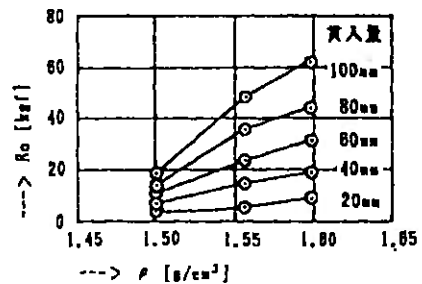


図4 R_o ~ ρ 関係図

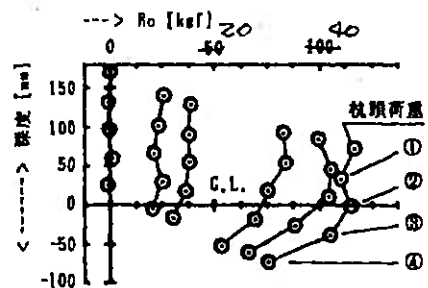


図5 軸力分布図

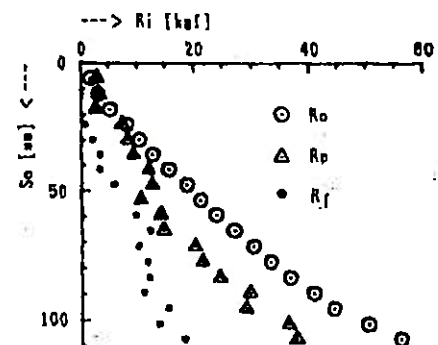


図6 R_o, R_p, R_f ~ S_o 関係図

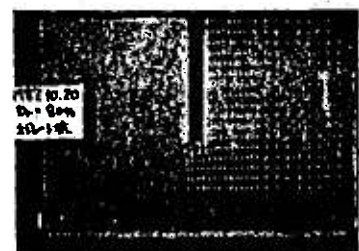


写真1 貫入後の地盤の状況

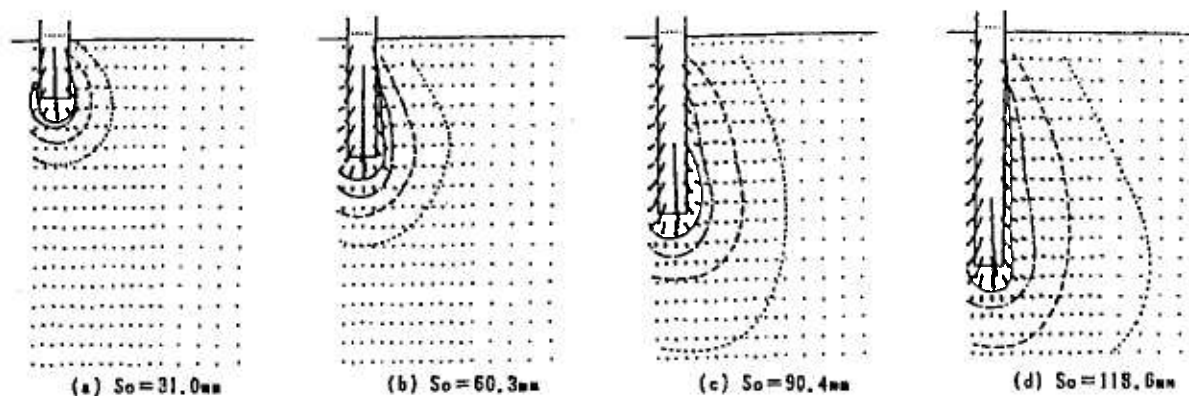


図7 変位ベクトル図(累計)

図7,図8の凡例

——変位3mm以上の領域 - - - -変位1mm以上の領域
 - - - -変位2mm以上の領域 ·····変位0.5mm以上の領域

③地盤の移動量が3mm以上生じる範囲は、 S_o が40mmを超えると、その後いくら貫入が進んでもほとんど変化しない。同様に移動量が2~3mmの範囲は S_o が約60mmで、移動量が1~2mmとなる範囲は S_o が約90mmの時までに決まる傾向がある。図8(a)~(c)は杭が約30mm貫入

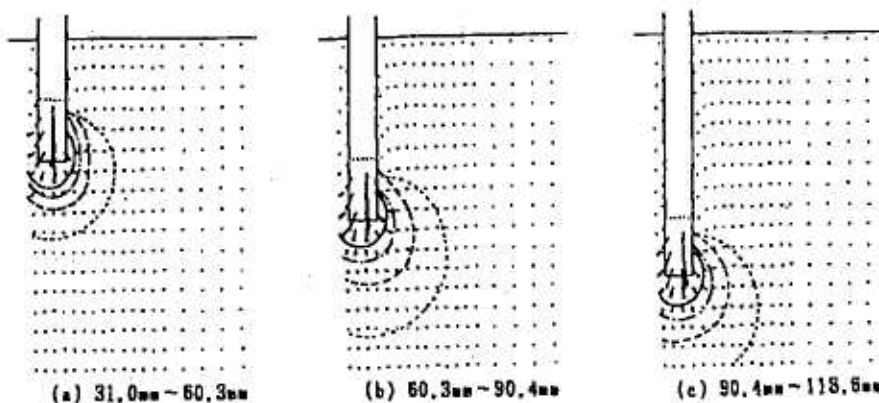


図8 変位ベクトル図(増分)

を示す。(a)は S_o が31.0mmから60.3mm、(b)は60.3mmから90.4mm、(c)は90.4mmから118.6mmまで増えた場合の図である。図から、①各段階での貫入前の杭先端部から上方の地盤はほとんど移動していないこと、②杭先端より下方の地盤は著しく移動しており、0.5mm以上移動している範囲は水平方向には杭の中心から杭径の約3倍、鉛直方向には杭先端から約4倍までであること、③杭の先端部分で中心軸上付近の地盤は下方にのみ移動し、貫入量が大きくなっても杭周部には回らないこと、④これに対し杭の先端部でも杭の端部に近い地盤は斜め下方に移動し、そのまま杭周部にとどまること、⑤杭先端部の斜め下方にある地盤はほぼ水平に移動することなどが分かる。

(2) 水平および鉛直方向の移動量 図9(a)~(c)は、ある標点に注目し、その標点と杭先端との鉛直方向の相対的な距離(標点より杭先端が上方にある時は正、下方になった時は負)を縦軸に、その標点の水平変位を横軸として表したものである。同様に図10(a)~(c)は鉛直変位を示したものである。それぞれ、(a)は杭中心から水平方向に5mm、(b)は10mm、(c)は15mm離れた位置に設置した各標点について描いたものである。これらの図から、次のことが分かる。

①杭の貫入によって地盤が移動し始めるのは、水平方向には杭先端部が杭径の約2倍、鉛直方向には杭径の3倍程度まで近づいた時である。杭が貫入してくると杭周の地盤は、まず鉛直方向に移動しはじめ、その後水平方向に押し広げられるものと考えら

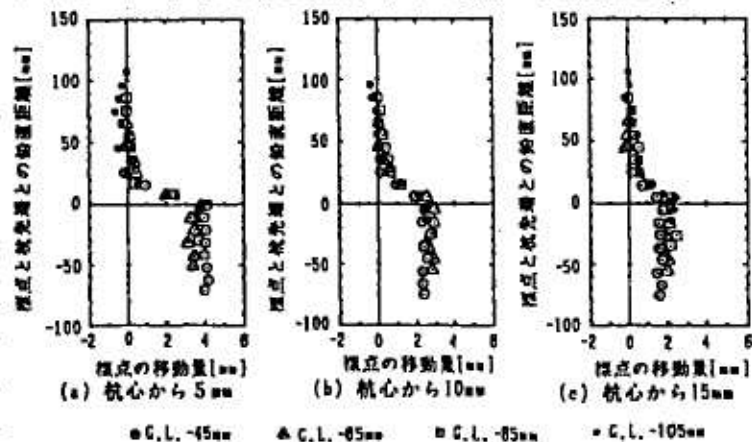


図9 地盤の水平変位

れる。②地盤の水平変位の増分は、杭先端と最も近くなる時もしくはその直前で最も大きくなって、杭先端が標点よりも下方に位置するようになるとあまり変化しない。③鉛直変位の増分は杭先端が杭径の約2~3倍まで近づいた時、すなわち移動し始めた時に最も大きくその後あまり変化しない。ただし、(a)は杭先端直下に設置された標点の場合であり、杭先端が最も近づいた時に鉛直変位の増分は最大になる。④杭中心から離れるほど地盤の移動は鉛直方向よりも水平方向に卓越してくる。

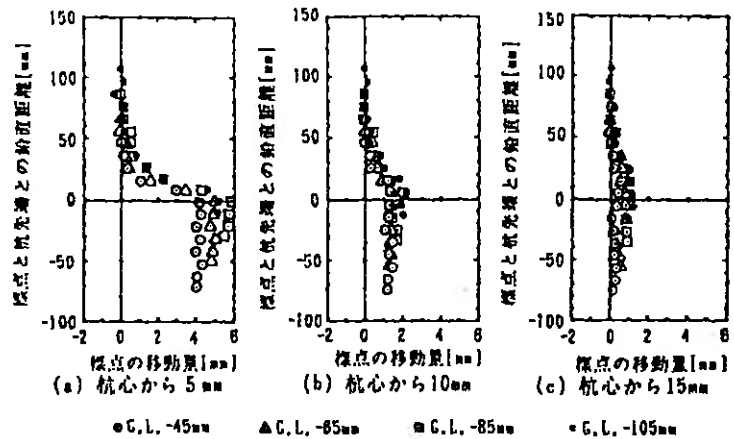
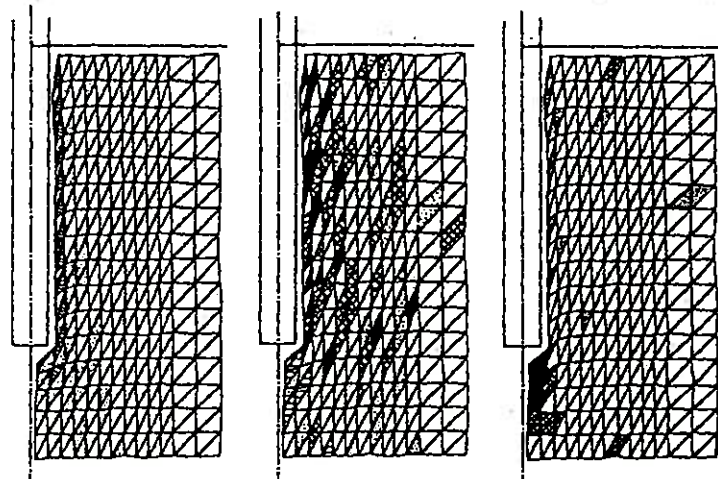


図10 地盤の鉛直変位

4. 地盤のひずみ分布 地盤のひずみは、標点の位置を節点とする三角形要素に地盤を分割し、標点の変位から軸対称FEMの変位-ひずみマトリックスを用いて計算できる。ここでは、杭の10mm貫入ごとの変位増分からひずみ増分を求め、これを累計した値を示す。

(1) せん断ひずみ γ_{rz} 図11はSoが118.6mmのときの γ_{rz} の分布を描いたものである。杭の下方と側方に大きなせん断ひずみが見られる。図は省略するが、貫入量が小さいうちは、杭の先端部分に杭中心から水平方向に杭径の1



~1.5倍の範囲では γ_{rz} が大きくなっており、貫入が進むとこの範囲は広がり杭先端部分では、鉛直方向に杭径の約2倍、水平方向には

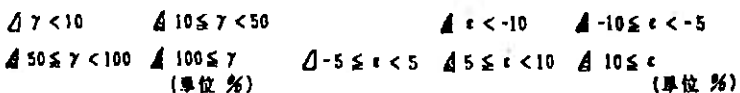


図11 γ_{rz} 分布図 図12 ϵ_r 分布図 図13 ϵ_z 分布図

約1.7倍の範囲となる。しかし、Soが60mmを超えると、その範囲は広がらなくなり図11の状態となる。また、杭先端部の周面上の点から鉛直軸となす角が20~50度の間ではせん断ひずみが広い範囲で生じていることが分かる。

(2) 水平方向のひずみ ϵ_r 、鉛直方向のひずみ ϵ_z So=118.6mmの時の ϵ_r と ϵ_z の分布図を図12と図13に示す。

ϵ_r 分布から、杭の側面では杭の中心から杭径の約2倍の範囲の地盤は10%以上圧縮されており、約4倍の範囲では5%以上圧縮されていることが分かる。反対に、杭の先端部付近では ϵ_r が正の値(膨張)となっているが、これは杭先端の直下の地盤は下方に移動し、その周囲では斜め下方に移動するためであろう。これらの傾向はSoが小さい時でも同様である。 ϵ_z 分布では杭先端下方においてのみ圧縮域が見られるが、この範囲は γ_{rz} 分布と同じ様に杭先端より杭径の2倍程度である。なお、ひずみの他に地盤の密度の変化量も計算したが、わずかの読み取り誤差が計算値に大きく影響するため信頼できるような値は得られなかった。

5. 結語 以上、本報告では、遠心装置による模型摩擦杭の貫入実験について述べた。この実験では、実際の地盤と同じ応力条件下で杭周地盤の挙動を詳しく観察することができた。

謝辞 本実験に際し、遠心装置の使用法などについて、多大なご指導とご協力を頂いた大阪市立大学工学部の望月秋利助教授、東田淳助手、大学院生の大島昭彦氏、藤田哲治氏を始め土質工学研究室の方々へ感謝致します。

参考文献 1) M. MIKASA, K. TAKADA: SIGNIFICANCE OF CENTRIFUGAL MODEL TEST IN SOIL MECHANICS, 8th ICSMFE, Vol. 1, 1973
 2) 寺師、藤井「遠心模型実験 4. 遠心模型実験装置の基本システムと計測システム」土と基礎、Vol. 36, No. 1, 1988. 1.
 3) 小椋、山岸、大杉、上柳「実大の節杭と円筒杭との押し込み比較実験結果」第21回土質工学研究発表会、昭和61年6月
 4) 堀刀、島崎、高野、岸田「浸透圧を利用した杭載荷実験」第12回土質工学研究発表会、昭和52年6月