

(株)武智工務所 正会員 ○ 稲 国芳
東京工業大学 正会員 岸田 英明

概要 本報告は模型杭内に設置された小型間隙水圧計により、杭表面における間隙水圧変化を観察したものである。杭の貫入、地盤の再圧密を経て、載荷試験まで間隙水圧の長期モニターを行った。載荷試験は押込み試験及び引抜き試験の基本的なもの他に、繰返し試験も含んでいる。正規化された間隙水圧の大きさは、既往の実大杭から得られた値、解析結果と比較されている。また繰返し試験における間隙水圧の変化を、杭頂荷重もしくは変位との関係で論じている。

【1】はじめに

杭はその一生を通じて常に一定の荷重を支えていなければならないというわけではない。陸上構造物の杭は、地震、風などによるいわゆる短期荷重の作用を受けるし、海洋構造物の杭ではさらに波浪力も大きな短期外力要因として考慮されなければならない。近年その合理性が再評価されている摩擦杭は、各研究機関において調査、研究が鋭意進められ、長期的な挙動は明らかにされつつある(土質工学会：1987)。今後摩擦杭が積極的に採用されるためには、上記の短期荷重時の挙動が明確にされる必要がある。

本報告は東京工業大学、岸田研究室で行われている粘性土地盤の摩擦杭の挙動解明のための一連の実験結果の一部である。大学という研究機関の性格上、実験は通常室内での模型実験に限られる。模型実験による模型杭のいろいろな挙動が、実大杭で得られる挙動とかけ離れていては正しい模型実験とは言えない。すなわち、模型実験で得られた値にScale effectsが無いことの確認が必要である。さらに、短期荷重時の挙動解明のためには、非排水条件が満足されなければならない。境界値問題である模型実験において、この条件の確認は地盤中の間隙水圧の観測によってのみ行い得る。本報告は以下の2点についての考察を主な内容とする。

- ①正規化された間隙水圧の大きさを実大杭で得られた値、解析結果と比較する。
- ②実験中、間隙水圧の変化を正確にとらえ、極端な部分排水状態に至らぬことを確認する。

【2】実験概要

(1) 模型地盤 実験に用いた試料は豊浦標準砂を加えた川崎粘土である。十分攪拌、脱気したこの試料を実験土槽(図-1)に静かに投入し、圧密圧力 0.30 kgf/cm^2 で圧密した。圧密圧力は土槽上部のドーナツ状のゴム膜を介して、空気圧で加えるようになっている。土槽上部中央には杭挿入用の穴があり、土槽の底には砂を敷きつめ排水層としている。空気圧は地盤の圧密時から実験過程を通じ、常に一定に保たれている。模型地盤の物理的・力学的性質を表-1に示す。

(2) 模型杭 模型杭は $\phi 22$ のアルミ製である。杭表面は砕いた豊浦標準砂を薄く張り付け、十分粗くしてある。杭内部には小型間隙水圧計($\phi 5.8, l=11.4$)が設置されており、ポラストンを介して杭表面の間隙水圧変化をとらえることができる。

(3) 実験の種類・方法 実験の種類を表-2に示す。間隙水圧測定に際し、杭内部及び小型間隙水圧計に残存する気泡が無いように細心の注意を払った。杭の各部品はきれいに洗浄した後、煮沸脱気を行い、水圧計部分は脱気水で

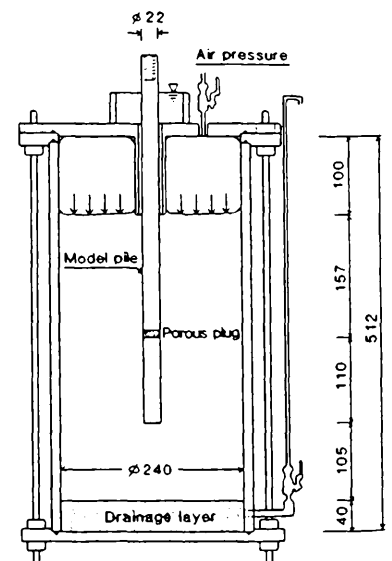


図-1 実験土槽

Experimental study on a single friction pile in clay including pore pressure measurements;
Kuniyoshi Ina (TAKACHI Engineering Co., Ltd.), Hideaki Kishida (Tokyo Institute of Technology)

満たした水槽に浸し、数時間真空ポンプで脱気を行った。さらに各製品の組み立ては実験土槽の上に設けた水槽の脱気水の中で行い、受感部が空気によれることの無いよう、杭の建て込みを行った。地盤の圧密時に開かれていた土槽下部排水バルブは各々の実験中閉じられ、極力非排水状態が保たれるようにした。

【3】実験結果及び考察

(1) 貫入試験 図-2は貫入試験時の過剰間隙水圧 (Δu) の発生から消散までを示したものである。貫入はACモーターを用い、速度は30mm/minである。杭が所定の深さまで貫入した時点ですぐに土槽下部排水バルブは開かれ、以後過剰間隙水圧消散過程は連続してモニターされた。横軸は経過時間であり、過剰間隙水圧は有効上載圧 (σ_v') と非排水強度 (S_u) でそれぞれ正規化してある。

Esrig et al. (1979)は円筒空洞押し広げ理論により、杭打設時に伴う最大過剰間隙水圧を解析的に求めている。またRandolph et al. (1979) は、円筒空洞押し

広げ理論にCam-Clay modelを導入し、同様に解析解を示している。これらの解析解はいずれも $\Delta u \cong 5 S_u$ を示しており、幾つかの仮定が含まれているものの、これらの解析結果と本実験結果の対応はきわめて良い。Meyerhof (1976) は多くの実大杭のデータ解析より、発生する過剰間隙水圧の大きさは非排水強度の5~7倍であることを述べている。一方、Baligh & Levadoux (1980) の有効上載圧で正規化された実大杭のデータによると、杭表面での過剰間隙水圧は $2\sigma_v'$ 前後である。本実験結果 ($1.7\sigma_v'$) は若干小さめであるが、圧密圧力が実験土槽内面の周面摩擦で幾分低下しているであろうことを考えると、実大杭とも良い一致を示している。

(2) 押込み試験・引抜き試験 図-3は押込み試験時の荷重と過剰間隙水圧を示したものである。荷重はピーク以後低下し、いわゆるヒズミ軟化を示している。間隙水圧は多少アップダウンが見られるものの、貫入にしたがって上昇している。同図に示した斜線は、Meyerhof (1976) の実大杭のデータ解析結果を表す。Meyerhofは、押込み試験における極限荷重時の過剰間隙水圧の大きさはたかだか $(0.2-0.5) S_u$ であり、鉛直有効応力にくらべ実質上過剰間隙水圧は無視することができ、排水条件下のせん断強さで支持力のおおよその推定が可能であることを述べ、Burland (1973) 等の有効応力解析法を支持している。ここでは $(0.2-0.5) S_u$ を有効上載圧に変換して載せてある。杭の静的載荷試験における過剰間隙水圧の解析例がない現状で比較対象は少ないものの、ピーク荷重を示すまでの過剰間隙水圧の大きさは、上記貫入試験の場合と同様、実大杭と良好な対応を示している。

図-4は引抜き試験時の荷重と過剰間隙水圧である。押込み試験と対照的に、過剰間隙水圧は負の値を示している。

表-1 模型地盤の性質

土粒子比重	G_s	2.68
液性限界	w_L (%)	64.9
塑性限界	w_p (%)	28.9
塑性指数	I_p	36.0
非排水強度	S_u (kgf/cm ²)	0.09-0.10
鋭敏比	S_c	3.7

表-2 実験の種類

実験の種類	Events
貫入試験	Pile Installation
間隙水圧モニター	Pile Set-up
押込み試験	Pile Loading
引抜き試験	"
一方向繰返し試験	"
二方向繰返し試験	"

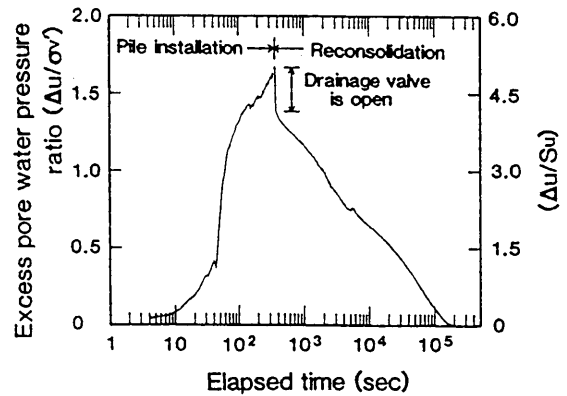


図-2 過剰間隙水圧の経時変化 (貫入試験)

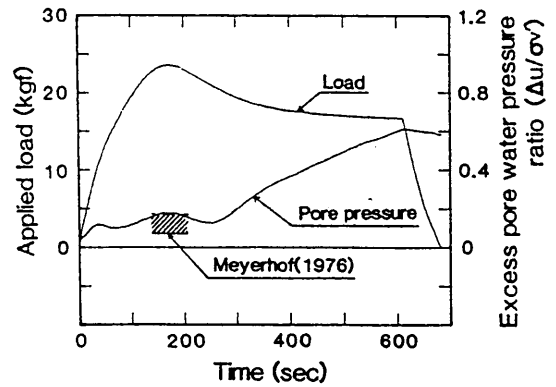


図-3 荷重と過剰間隙水圧の変化 (押込み試験)

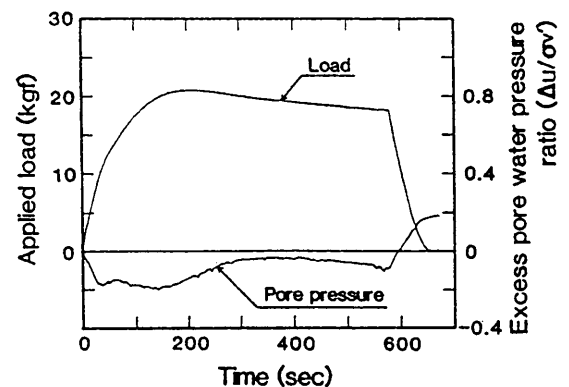


図-4 荷重と過剰間隙水圧の変化 (引抜き試験)

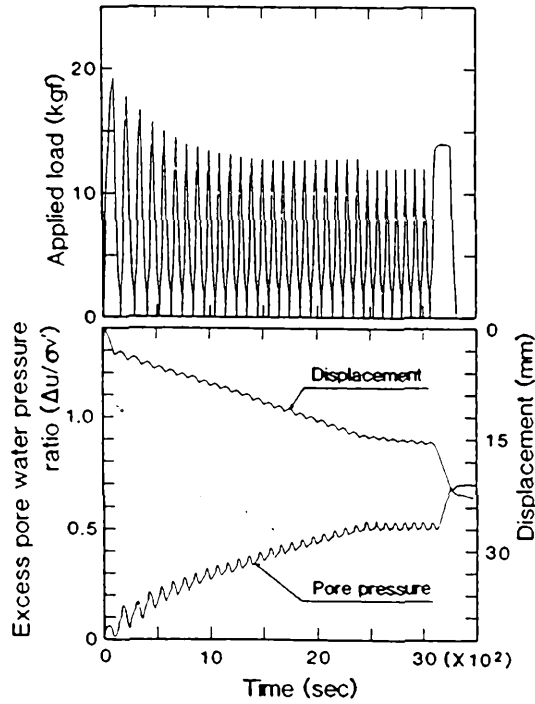


図-5 荷重, 変位, 過剰間隙水圧の時刻歴 (一方向繰返し試験)

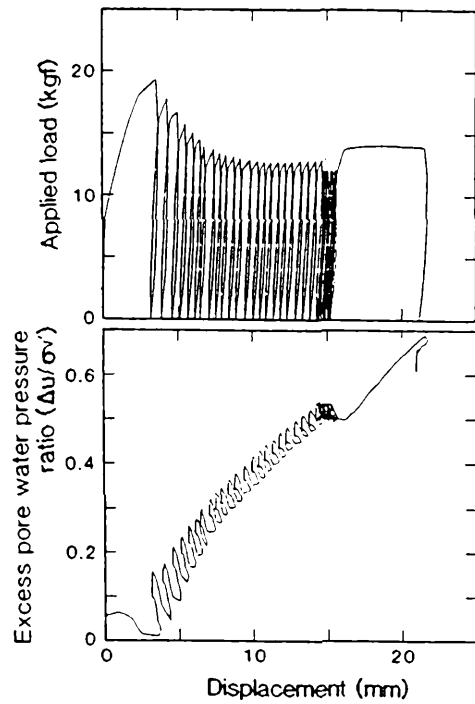


図-6 荷重, 過剰間隙水圧と変位の関係 (一方向繰返し試験)

この負の過剰間隙水圧が本質的なものであるのかどうかは、いまのところ不明である。数少ない引抜き試験時の間隙水圧測定例 (Puech:1980) では、負の過剰間隙水圧が測定されてはいる。本模型杭では杭下端より5D上で間隙水圧の測定を行っているため、引抜きに伴って発生する杭先端のサクションが影響しているのではないかと考えられる。これは杭の荷重を0に戻した時の過剰間隙水圧の正への復帰より推定されるものであるが、いずれにしろ先端の影響の無い状態での試験が必要であるのかも知れない。

(3) 一方向繰返し試験 (荷重制御方式) 図-5に荷重, 過剰間隙水圧の時刻歴を示す。荷重の大きさは各サイクルで一定ではないが、間隙水圧は繰返し回数と共にしだいに上昇していき、間隙水圧の蓄積が見られる。間隙水圧の振幅と荷重振幅は対応しているのが見受けられる。図-6は荷重, 過剰間隙水圧と変位の関係である。繰返しの後半部分は荷重振幅を小さくしたため、変位の進行の割合も小さくなっている。これに対応して間隙水圧の蓄積は、この間ほとんど見られない。その後繰返し履歴後の極限荷重を測定するため杭を貫入させると、荷重はほぼ残留値を示し荷重の増加が見られないのに対し、間隙水圧は確実に上昇して行くのが分かる。図-5の下図には杭頭変位の経時変化も同時に示してある。これは杭頭の変位量と過剰間隙水圧の蓄積の関係を表すものである。これより、間隙水圧の蓄積は変位の累積と極めて良い相関を示している。すなわち、杭の変位量が増せば間隙水圧が蓄積すると考えられるし、逆に間隙水圧が上昇しているから杭の変位が進むとも考えられる。

(4) 二方向繰返し試験 (変位制御方式) 図-7は変位振幅±4mmで押込み方向から繰返した場合の、変位, 荷重, 過剰間隙水圧の各々の変化の時刻歴を示している。荷重は繰返しと共にしだいに低下していき、ある一定値に落ち着いていく。これは稲・藤井・岸田 (1987) の報告と同様である。水圧は変位振幅同様大きな変化を

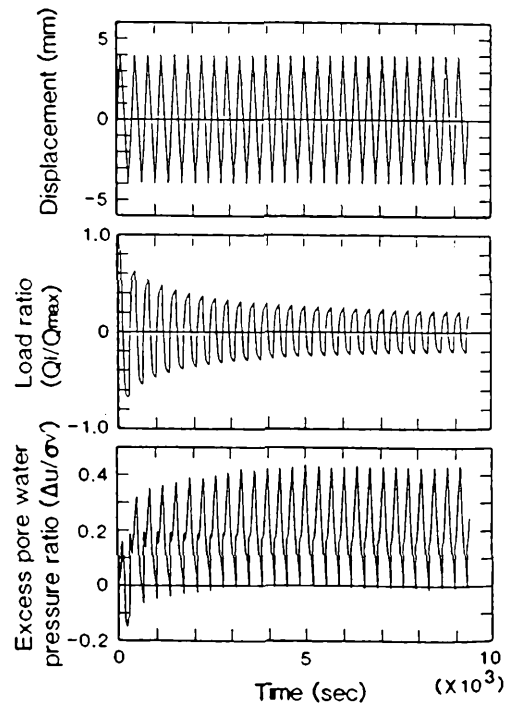


図-7 変位, 荷重, 過剰間隙水圧の時刻歴 (二方向繰返し試験)

示している。この間隙水圧変化と荷重比の変化を比較すると、繰返しによる間隙水圧の上昇（平均的過剰間隙水圧の蓄積）は荷重比の低下に密接に関係していることがうかがえる。

【4】非排水状態の確認

比較的短時間で完了する貫入試験，押込み・引抜き試験は、実験途中における間隙水圧消散の懸念は少ないものと考えられる。ここでは繰返し試験時を取り上げる。図-8は Procter & Khaffaf (1987) の実験結果である。本実験と同様模型による研究であり、杭径 (25mm) もほぼ同じサイズである。有効上載圧は 800kN/m^2 で500回の繰返し載荷を行っている。図を見て分かるように繰返し載荷の途中にもかかわらず、わずか10回目あたりから過剰間隙水圧の低下が起り、明らかに部分排水状態となっている。彼等はこの理由として地盤中への急激な radial drainage であるとしている。本実験結果（例えば、図-5，図-7）を見ると、このような現象は生じておらず、ほぼ非排水状態が満足されているものと考えられる。

【5】まとめ

- (1) 本模型実験で得られた過剰間隙水圧値は、実大杭の結果，解析値と極めて良い一致を示し、発生する過剰間隙水圧の大きさに Scale effects はない。
- (2) 間隙水圧の変化と杭の挙動の変化には密接な関係が認められる。これらの結果は Effective stress concepts の正当性を示唆している。
- (3) 試験中、間隙水圧の変化に部分排水状態は観察されず、本模型実験における非排水状態の仮定は十分満足される。

<参考文献>

- Baligh & Levadoux (1980), "Pore pressure dissipation after cone penetration", Publication No. R80-11 Order No. 662, MIT
- Burland (1973), "Shaft friction of piles in clay - A simple fundamental approach", Ground engineering, Vol. 6, pp30-42
- Esrig et al. (1979), "Initial development of a general effective stress method for the prediction of axial capacity for driven piles in clay", 9th Offshore technology conference, OTC 2943, pp. 495-506
- Meyerhof (1976), "Bearing capacity and settlement of pile foundations", Journal of the geotechnical engineering division, ASCE, Vol. 102, No. GT3, pp. 197-228
- Procter & Khaffaf (1987), "Cyclic axial displacement tests on model piles in clay", Geotechnique 37, No. 4, pp. 505-509
- Puech (1980), "The effects of long time cyclic loadings on the behavior of a tension pile", 12th Offshore technology conference, OTC 3870, pp. 153-162
- Randolph et al. (1979), "Driven piles in clay - the effects of installation and subsequent consolidation", Geotechnique 29, Vol. 4, pp. 361-393
- 稲・藤井・岸田 (1987), "繰返し軸方向荷重を受ける粘性土地盤中の摩擦杭の挙動", 第22回土質工学研究発表会, pp. 1183-1184
- 土質工学会 (1987), "支持杭に頼らない基礎工法", 第32回土質工学シンポジウム

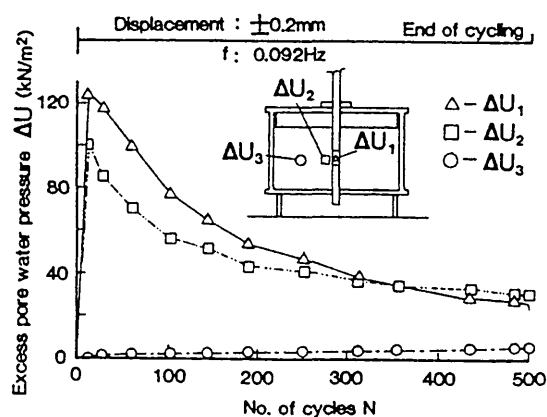


図-8 繰返し試験中の過剰間隙水圧変化 (After Procter & Khaffaf:1987)