

拘束圧力下における模型杭水平載荷試験

川田和生*・梅崎邦男**・竹内幹雄***・
浅野 剛****

本研究では拘束圧力下における地盤と構造物の相互作用に関する一つの問題として水平荷重を受ける杭の深部をとりあげ、この領域では地盤は水平面内の二次元的挙動を示すという仮定のもとに模型実験を実施した。その結果、この領域において杭前面地盤に発生するせん断帯の形状、ひずみ分布および地盤反力特性を把握することができた。

Keywords : soil-pile interaction at confining stress, model experiment, shear-band formation

1. まえがき

筆者らは送電用鉄塔あるいは高速道路等の基礎として多用される大口径杭に着目し実規模水平載荷試験を実施してきたが¹⁾、本報告では拘束圧力下における地盤と構造物の相互作用に関する一つの問題として水平荷重を受ける大口径杭の深部をとりあげた。水平荷重を受ける杭周辺地盤の挙動は図-1の領域Ⅰ、Ⅱに示すような深さにより異なった形態をとると考えられているが²⁾、ここでは上載効果により水平面内の二次元的挙動が支配的であると考えられる領域Ⅱ内のある水平断面を実験対象断面とし、この領域での地盤の変形、破壊パターンを模型実験により把握することを試みた³⁾。

本報告は、実験により得られた杭の荷重変位特性、杭周辺地盤の破壊パターン・ひずみ分布について述べるものである。

2. 実験装置

設計した実験装置および主な寸法を図-2に示し、特徴を以下に述べる。実験装置における使用鋼材はSS41であるが、杭(直径10cm)についてのみSCM21を用いた。

(1) 三軸圧縮状態の再現

本実験装置では実験対象断面を模擬した土槽の周囲に13本のジャッキが設置されており、土槽内に領域Ⅱにおける応力状態を再現することが可能である。土槽の広さの決定にあたっては応力分布について弾性論と二次元剛体ばねモデルによる解析結果とを比較し、杭周辺の挙動に土槽境界の影響が及ばない程度の広さを確保するよ

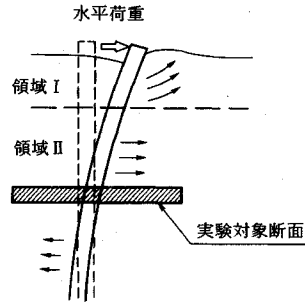


図-1 杭周辺地盤の挙動

うにした。

(2) 土槽—供試体間の摩擦低減

土槽上・下面と供試体の間にグリースを塗布しラテックスメンブレンを貼ることにより摩擦を低減した³⁾。

(3) 観測窓の設置

土槽の上蓋にアクリル製の観測窓を備えているため、供試体と一体となって変形するラテックスメンブレンに印刷した1cm×1cmのメッシュを土槽上部から写真撮影することにより供試体の挙動が観測できる。

3. 実験内容

(1) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。地盤材料は気中乾燥状態の豊浦標準砂を用いた。CD三軸圧縮試験(気中乾燥状態・含水比=1%未満、初期相対密度=70%)の結果、粘着力は0.58 tf/m²、内部摩擦角は37.5度、載荷初期のポアソン比 ν は0.3であった、また杭と供試体との間の摩擦を確保するため杭の周囲には接着剤により標準砂を付着させた。鉛直圧の設定にあたっては、杭と地盤の挙動が水平面内の二次元的な挙動として表現できると考えられる最小土被りを杭径の5倍⁴⁾、地盤の単位体積重量 $\gamma=2.0$ tf/m³として最小鉛直圧を式(1)のように

* 正会員 東京電力(株)送変電建設準備事務所
(〒107 港区赤坂1-6-14)

** 東京電力(株)送変電建設本部

*** 正会員 工修(株)奥村組 技術開発部

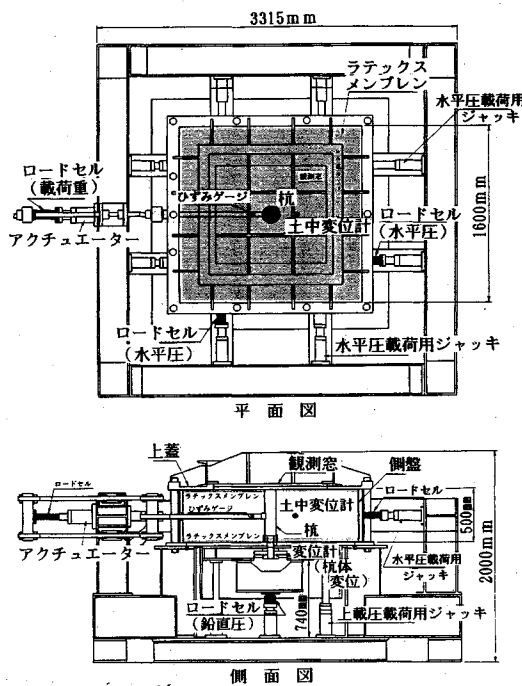


図-2 実験装置およびセンサーの設置位置

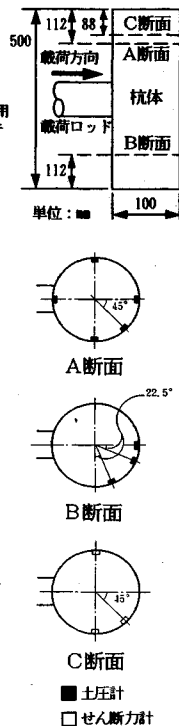


表-1 実験ケース

	Dr (%)	拘束圧 (tf/m ²)		載荷形態
		鉛直圧	水平圧	
CASE1	70	5.00	2.15	静的片押
CASE2	70	3.00	1.28	静的片押
CASE3	70	1.00	0.43	静的片押

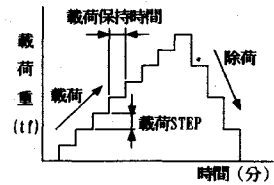


図-3 載荷パターン

表-2 杭の水平載荷パターン

	STEP (tf)	速度	保持時間 (分)
CASE1	0.5	1 min step	3
CASE2	0.25		3
CASE3	0.1		3

決定し、各ケースにおける鉛直圧はこの値以上に設定した。

$$(最小鉛直圧) = 0.5 \times \gamma = 1.0 \text{ tf/m}^2 \dots \dots \dots (1)$$

水平圧は $\nu = 0.3$ とし、式 (2) により決定した。

$$(水平圧) = (鉛直圧) \times \nu / (1 - \nu) \dots \dots \dots (2)$$

また、拘束圧が高い領域では一般に相対密度が大きいと考えられることから、相対密度は 70% に設定した。

(2) 実験手順

a) 供試体の作成

ホッパーによる気中落下法⁵⁾により所定の相対密度を持つ供試体を作成した。本実験では予備試験結果に基づきホッパー移動速度 12.5 cm/sec, 開口幅 3 mm, 落下高さ 61 cm とした。

b) 拘束圧の載荷

作用圧の大きさはジャッキに設置したロードセルにより計測・管理するとともに杭に作用する拘束圧については杭に設置した土圧計によりチェックした。所定の拘束圧載荷後各ジャッキのストロークを固定し、杭の水平載荷中の拘束圧載荷盤の変位を拘束した。

c) 杭の水平載荷

杭の水平載荷は静的な片押しにより行った。載荷パターンを図-3、表-2に示す。

(3) 計測項目

拘束圧および杭の水平荷重載荷時の計測項目、各センサーの位置を図-2に併記する。土中変位は2重管パイ

プと変位計により杭前面 30 cm, 深さ 25 cm の地点を計測するもので、これにより地盤の挙動が土槽深さ方向に一樣であることのチェックを行った。

4. 杭・地盤系模型載荷試験

(1) 実験結果

実験結果について項目別に述べる。b), c), d) に関しては CASE 3 についてのみ示しているが、すべり面の形状、地盤反力の発生状況および杭周辺地盤のひずみの分布は各ケースに共通している。また、各ケースとも 2 回の実験を行い再現性を確認した。

a) 載荷重-杭体変位関係

実験により得られた CASE 1~3 における荷重変位曲線を図-4に示す。いずれのケースも変位が杭径の 1% に達する前に折れ点が生じる。しかしその後は荷重と変位の関係には非線形性は強く現れず、変位が杭径の 30% に達してもピーク荷重は認められない。折れ点以降の各ケースの荷重変位曲線における水平地盤反力係数は図-5に示すように初期拘束圧にほぼ比例している。

b) 杭周辺地盤の変形・破壊パターン

杭周辺に発生した変位の不連続帯の形状を図-6に示す。変位の不連続帯は 5~10 mm の幅を持ち、相対ずれ量は最終的には最大 10 mm 以上に達しており、見かけ上のすべり面を形成する。すべり面は荷重の増大とともに載荷方向にほぼ平行な方向(すべり面 A)とこれと約

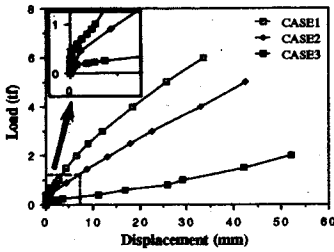


図-4 荷重変位曲線

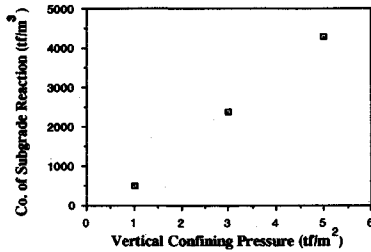


図-5 鉛直圧と水平地盤反力係数の関係

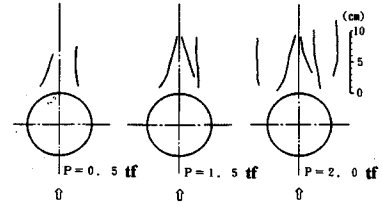


図-6 すべり面発生状況

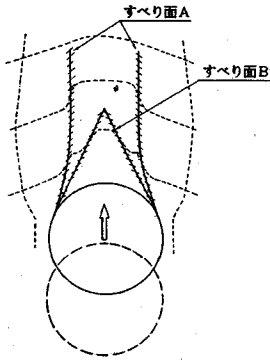


図-7 発生すべり面の模式図

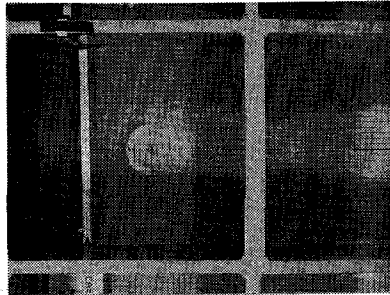


写真-1 すべり面発生状況

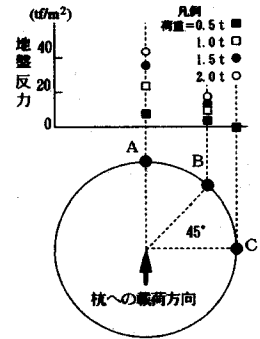


図-8 杭前面の地盤反力分布

10~30度傾いた方向(すべり面B)に進展し、図-7に示すように模式化することができる。なお、図-7における破線は初期状態からの地盤の変形を表している。写真-1にCASE 3における荷重が2.0 tfの時点でのすべり面の発生状況を示す。

c) 地盤反力特性

杭周面に設置した土圧計およびせん断力計により計測された杭に対する法線方向土圧、接線方向せん断力の載荷方向成分の和により得られた載荷方向の地盤反力分布を図-8に示す。地盤反力はA点が最も大きくB点での値はA点での値の40%~60%となっている。またC点では初期拘束圧の存在にもかかわらず、載荷直後に法線方向土圧が0になるとともにせん断力も作用しなくなり、その後はこの状態が維持される。

d) 杭周辺地盤のひずみ分布

杭体の変位が約30 mmに達した時の杭周辺地盤のせん断ひずみ(γ_{xy})、杭の載荷方向の直ひずみ(ϵ_x)、杭の載荷直角方向の直ひずみ(ϵ_y)の各分布を図-9に示す。ひずみの大きさは円の直径に対応しており直ひずみについては黒丸が圧縮、白丸が伸びを表している。これらのひずみ分布は、撮影された写真からメッシュで構成された節点の座標をデジタイザーで同定するとこにより得られた節点変位より求めたものであるため、すべり面が構成されるとせん断ひずみに関しては図-9(a)のように100%を越える場合がある。なお、発生したすべり面は図において杭前面の破線により示している。

- γ_{xy} の分布 杭両端付近より杭載荷方向に伸びるライン上およびくさび状に卓越する傾向がある。
- ϵ_x の分布 すべり面のAの内側の比較的狭い領域に圧縮ひずみが卓越する。

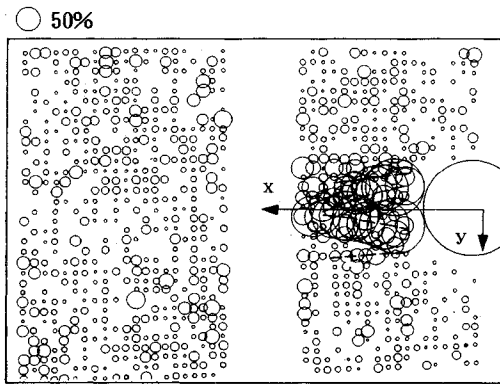
(2) 地盤反力および破壊パターンに関する考察

荷重変位曲線に折れ点が生じることにより載荷初期に杭前面地盤において塑性域が形成されることが推測される。さらに載荷が進むと、すべり面Bに囲まれたくさび型の土塊は杭前面地盤に貫入し同時にすべり面Aが載荷方向に進展する。この間の荷重変位曲線の勾配はほぼ一定であるが、今回の実験対象領域のように上載効果により杭と地盤の挙動が水平面内の二次元的な挙動として表現できる場合は、載荷が進むにつれて杭前面地盤の平均主応力が増加するため極限支持力に至らずひずみ硬化的挙動を示すものと思われる。すべり面が形成される方向は、図-10に示すように最大主ひずみの方向に対し35~50°の傾きをなす。最大主ひずみ方向と伸び縮みのない方向のなす角度の理論値は $45^\circ - \nu/2 = 39^\circ$ (ν はダイラタンシー角であり本実験では約12%)となり、すべり面が形成される方向は伸び縮みのない方向に概ね一致していることがわかる。図-11に伸び縮みのない方向とすべり面を示す。

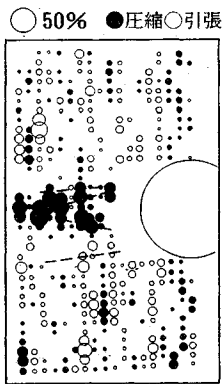
5. 結 論

実験結果を以下に要約する。

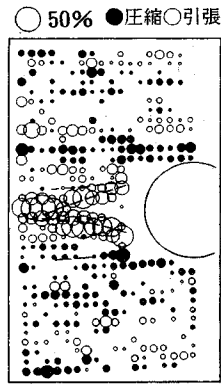
- (1) 荷重変位関係においては、載荷初期(変位が杭径



(a) γ_{xy}



(b) ϵ_x



(c) ϵ_y

図-9 杭前面のひずみ分布

の1%以下)に折れ点が生じるが、その後非線形性はほとんど現れず明確なピーク荷重は認められない。また折れ点発生後の水平地盤反力係数は初期拘束圧に比例する。

(2) 杭前面地盤ではまずくさび状のすべり面(すべり面B)が発生し、若干遅れて杭の両端から荷重方向にすべり面(すべり面A)が発生する。すべり面Aは荷重の増加とともに荷重方向に進展していく。

(3) すべり面Aの内側では荷重方向の圧縮ひずみが

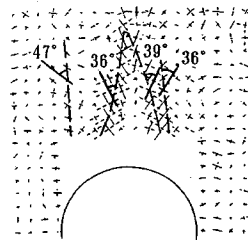


図-10 主ひずみ方向

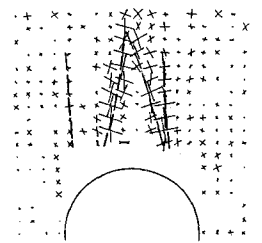


図-11 伸縮のない方向

卓越し、外側では圧縮ひずみはほとんど生じない。

(4) すべり面が発生する方向は、相対的に伸びと縮みのない方向にはほぼ一致する。

謝 辞：本研究を進めるにあたり埼玉大学工学部建設工学科渡辺啓行教授、東京大学生産技術研究所龍岡文夫教授のご懇切なるご指導を賜りました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yoshii, Y., Uto, K., Takeuchi, M. and Seno, Y. : Prediction of horizontal behavior of pier foundations, Proc. of THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER AND PHYSICAL MODELLING IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, pp.149~159, 1989.
- 2) Parker, F. and Reese, L.C. : Experimental and Analytical Studies of Behavior of Single Piles in Sand under Lateral and Axial Loading, Research Report 117-2, Center for Highway Research, 1970.
- 3) 龍岡文夫他：模型砂地盤の支持力実験における砂箱側壁面摩擦の影響 I~VII, 生産研究, 1983~1984.
- 4) 岸田英明・中井正一：地盤反力-変位関係の非線形性, 土と基礎, Vol.25, No.8, pp.21~28.
- 5) Yanagihara, S., Takeuchi, M and Ishihara, K. : Dynamic Behavior of Embankment on Locally Compacted Sand Deposits, Proc. of SDEE '91, pp.365~376, 1991.
- 6) Tatsuoka, F. : Discussion on to paper by Bolton, Geotechniqu, Vol.37, No.2, pp.219~226, 1987.

(1991. 10.1 受付)

HORIZONTAL LOADING TESTS OF A MODEL PILE AT CONFINING STRESS

Kazuo KAWADA, Kunio UMEZAKI, Mikio TAKEUCHI and Takeshi ASANO

In this study, some model experiments have been carried out in order to investigate the soil-pile interaction at confining stress. The model is designed so that it represents a selected horizontal plane at a deeper level from the pile and in this region the stress-deformation characteristics of the pile and soil are assumed to be 2-dimensional. The summaries fo the experimental results are shown below. 1)In load-displacement relation, a yield point appears prominently at an early stage of loading, followed by strain hardening behavior. 2)Two kinds of sliding surfaces are observed. One is wedge-shape and in another kind two parallel sliding surfaces are observed. 3)Compressive strain is observed in the direction of loading and it is distributed in a narrow area between the parallel sliding surfaces. 4)The direction of sliding surface is almost coincides with the direction of zero extension.