

杭基礎の終局挙動に関する実験的研究

佐藤 博¹・大矢 孝²・松島 学³

¹正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 土木グループ (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 1-4)

²正会員 工修 東京電力株式会社 送変電建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

³正会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

本研究は杭頭回転固定条件で実施した実物大単杭(場所打ち杭、径 80cm)の大変形水平載荷実験について述べるものである。実構造物では杭頭の回転が拘束されている場合が多いが、この点を考慮して単杭を載荷した実験例は少ない。さらに、有限長の杭に分類される短尺の杭は、その挙動が底面の回転等に影響され、大変形領域までの評価が難しいなどの課題がある。本研究では新たな載荷装置を考案し、短杭と通常の長さの杭について杭頭回転固定条件により単杭の大変形領域までの水平載荷実験を行った。その結果、いずれの杭も十分な靱性を有すること、杭頭に塑性ヒンジが形成されて終局を迎えることを把握した。

Key Words: full-scaled single pile, lateral loading test, rotation-fixed head, ultimate behavior, short pile

1. はじめに

杭基礎の設計は許容応力度設計から限界状態設計へ、さらに性能設計へと移行しつつあり、これに対応して大変形領域における挙動や終局状態を把握することが求められている。杭基礎の終局までの挙動を解明するための大変形水平載荷実験は、これまでにいくつか実施されている(例えば^{1)~4)}。実構造物では、ほとんどの場合フーチング等により杭頭の回転が拘束されているため、これらの実験では、杭頭回転固定条件を実現するため、フーチングを設けて複数本の杭を用いたものがほとんどである。この時、各杭の挙動は、杭間隔が小さい場合は群杭効果の影響があり、杭間隔が大きくても複数杭の相互作用の影響が問題となる。

実構造物で見られる複数杭の挙動を正しく評価するには、単杭の挙動を正しく評価することが必要である。そのため、実構造物で見られる杭頭回転固定条件における単杭の挙動を把握することが重要である。

近年、基礎構造物の合理化の観点から、支持層が深い場合には支持層まで根入れしない摩擦杭の採用、また支持層が浅い場合には支持層で打ち止める傾向がある。このような場合、有限長の杭、いわゆる短杭となることが多い。短杭の挙動は、浅層地盤の非線形挙動の影響を強く受けたり、底面の回転

の影響等、通常の杭とは異なるため、大変形領域までの挙動を明らかにする必要がある。

本研究は、実物大の杭を対象に、短杭と通常の長さの杭2本について、終局に至るまでの杭基礎の挙動を把握するため、大変形領域までの水平載荷実験を行った。実験は載荷装置を工夫し、水平載荷に伴う杭頭の傾斜に対応した反転モーメントを加えることにより元に戻し、杭頭回転固定条件を実現させたことが特徴である。

2. 水平載荷実験の概要

(1) 試験杭と地盤条件

試験杭は径 80cm、長さ 4m と 12m の場所打ちコンクリート杭 2本で、それぞれ短い杭と半無限長の杭に分類される。以降、それぞれを短杭、長杭と呼ぶ。杭の諸元を表-1 に示す。反力体は長さ 6m の 9本のH鋼で支持し、回転、水平力に抵抗できるようにした。

実験位置の地盤は、図-1 に示すように GL-1m 以浅の表層部はN値が 2~4 の沖積粘性土、それ以降は 5~26 の細砂で構成されている。

(2) 載荷装置

本実験は、現実によく用いられる基礎杭の杭頭条件を再現するため、新しい載荷方法を考案して単杭

表-1 杭の諸元

名称	杭種	杭径 D (mm)	杭長 L (m)	βL	備考
短杭	RC 場所打ち	800	4.0	1.07	鉄筋比 1% かぶり 15cm
長杭			12.0	3.02	
反力杭	H鋼	H-400	6.0	—	

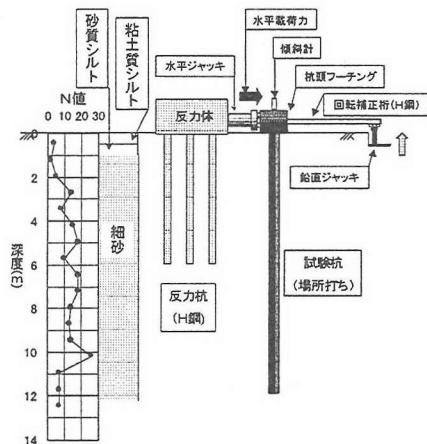


図-1 試験装置の概要と地質断面

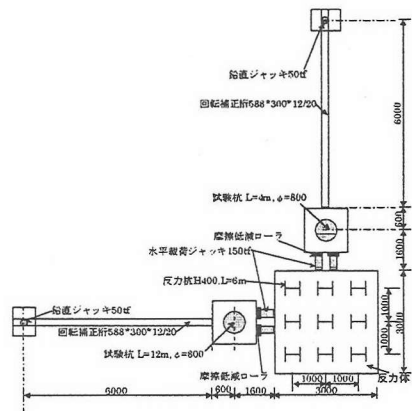


図-2 試験装置概要 (平面図)

の杭頭を回転固定条件により実施したことが特徴である。

試験装置の全体概要を図-1, 2, 写真-1 に示す。杭頭回転固定条件とするための新しい荷重方法とは、杭頭フーチングに設置したH鋼（以下、回転補正桁）を介して杭芯より6.6m離れた位置で水平荷重の進展に応じて鉛直力を与え、これにより杭頭が回転しないように制御する方法である。フーチング上面に設置した傾斜計により杭頭回転量を常に把握し、この読みに応じて鉛直力を決定した。

回転補正桁端部に設置した鉛直ジャッキの下部には摩擦低減ローラを取り付け、鉛直ジャッキの水平方向への移動を可能とした（写真-2）。

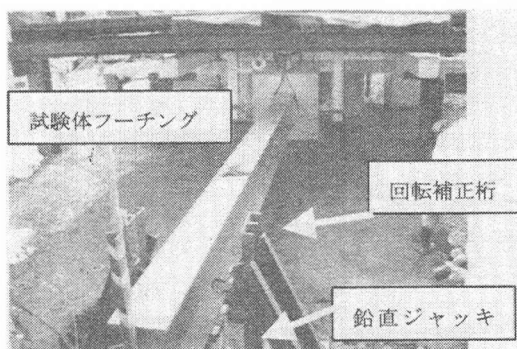


写真-1 試験装置概要



写真-2 鉛直ジャッキ部

試験体と水平荷重ジャッキの間には、摩擦低減ローラと球面ブッシュを取り付け、荷重に伴い杭が引抜かれようとすることによって生じる鉛直変位を拘束しないようにするとともに、万が一杭頭が傾斜した場合でも荷重荷重の鉛直成分が杭に作用しないようにした。

回転補正桁により杭体には引抜力が作用する。実験時の最大引抜力は、短杭で160kN、長杭で210kNであった。杭の断面力に及ぼす影響は、杭体断面の引張応力に換算して0.03~0.04 (kN/cm²) と杭体コンクリートの引張強度（約0.27kN/cm²）に比べて約1/10と小さい。

また、支持力に関しては、杭の引抜抵抗力を地盤強度×周面積としたとき、三軸試験結果の強度定数から、短杭で530kN、長杭で2460kNと、いずれも最大引抜力の3倍以上となり、地盤の鉛直支持力には十分な裕度がある。

(3) 計測項目

a) 杭頭・反力体変位

杭頭と反力体の変位は、水平方向（荷重方向及びこれと直交方向）、鉛直方向の3方向を全て計測できるように変位計を配置した。精度は劣るが測定レンジの大きいワイヤー式変位計も併せて設置し、大変形時の杭頭水平変位を変位計を盛り換えることなく連続的に測定できるようにした。杭頭フーチン

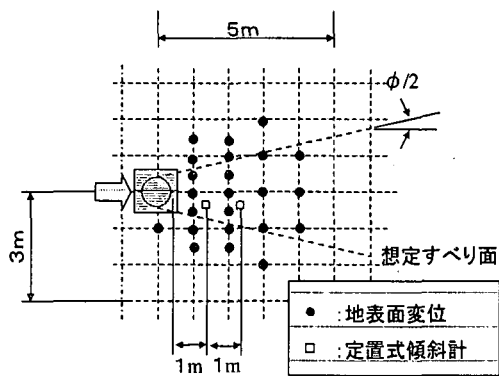


図-3 地盤計測位置 (地表面光波測量)

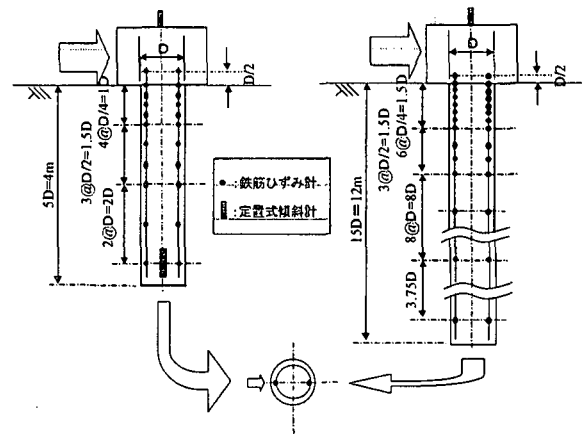


図-4 杭体計測位置

グの上には定置式傾斜計を設置し、回転補正桁と鉛直ジャッキによる杭頭の回転補正はこの傾斜量を確認しながら行った。

b) 地表面変位

地表面変位は、図-3 に示すように杭前面地盤上にターゲットを設置し、三次元光波測量により計測した。

c) 杭体変形

杭体の挙動は、図-4 に示すように荷重軸方向の正負側2ヶ所にひずみゲージを設置し、計測した。杭体の曲率が最も大きくなる浅い領域では測定間隔を小さく ($D/4=20\text{cm}$, D : 杭径)、深部に向かって測定間隔を広げる配置とした。フーチングからの鉄筋の抜け出しを想定してフーチング内の鉄筋にもゲージを貼付した。また、短杭は杭底部の回転が生じることを予め予想し、杭下端に傾斜計を設置し、回転量を計測した。

(4) 荷重方法

荷重方法は多サイクル方式とし地盤工学会「杭の水平荷重試験方法・同解説」⁷⁾を参考にし、設定した。

ただし、地表面変位測量を行うことから、処女荷重時の荷重保持時間を20分と通常より長くした。制御方式は、杭及び地盤が降伏したと判断できるまでは荷重制御とし、降伏以降は変位制御とした。

水平力と回転補正桁による鉛直力を同時に荷重することは制御が難しいことから、最初に水平力を与え、次に傾斜した杭頭を水平になるように補正桁で鉛直力を与えることにより杭頭回転固定条件を保持した。補正桁で杭頭を水平に引き戻すことにより水平荷重、変位が変動するが、ここでは回転補正桁による補正後の値を採用した。

3. 実験結果

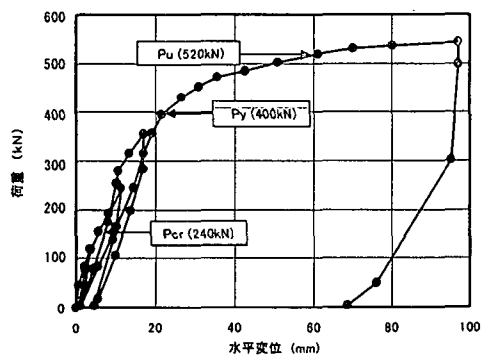
(1) 杭頭荷重と水平変位の関係

杭頭荷重と水平変位の関係を図-5 に示す。長杭は水平変位が約50cmまで荷重したため拡大図も示してある。図中の P_{cr} , P_y , P_u はそれぞれひび割れ発生、鉄筋降伏、終局時の荷重を示す。ひび割れ発生と鉄筋降伏は鉄筋ひずみから判断し、終局は、本研究では圧縮縁コンクリートが圧壊する時点と考え、RC断面の計算結果から求めた値とした。最大荷重は短杭で540kN、長杭で760kNであり、短杭は長杭の約70%であった。これらの値を表-2にまとめて示す。両杭とも終局荷重 P_u 以降荷重が増大しているのは、せん断補強筋を十分に配筋していることから、杭体の一部が圧壊しても杭頭部に塑性化した領域(ここでは塑性ヒンジと呼ぶ)が形成されるまでは、隣接する部分で荷重を分担できると考えられる。

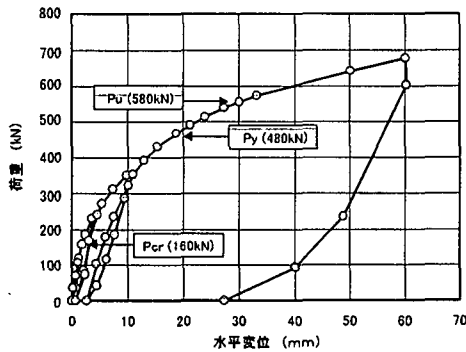
水平変位は、杭体の鉄筋降伏荷重(P_y)時までは緩やかに増加し、圧縮側コンクリートが圧壊する終局荷重(P_u)時以降急激に進展している。これは、初期は地盤の塑性変形により変位が支配され、その後杭頭に塑性ヒンジが形成されて急激に変位が進展したものと推測される。このように杭頭に塑性ヒンジが形成されると変位が急増し、塑性ヒンジが水平耐力の支配要因になると考えられる。

短杭において水平荷重280kN時に変位が戻っているのは、280kN以前は今回初めて回転補正桁を使用することから、回転補正の程度が十分ではなかったことが原因である。長杭において大変形時に荷重変動が大きいのは、水平変位130mm以降杭頭のH鋼取付部が破損し回転補正(杭頭固定)が完全にできなくなったことが原因である。

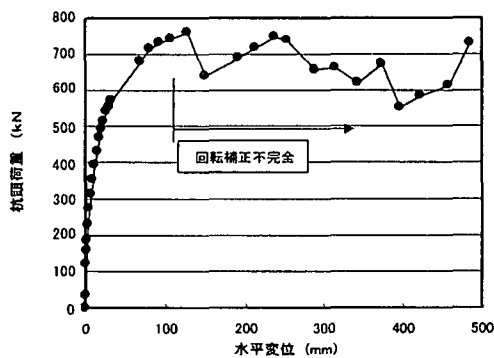
最大水平変位は短杭で94mm(杭径の12%)、長



(a) 短杭



(b) 長杭

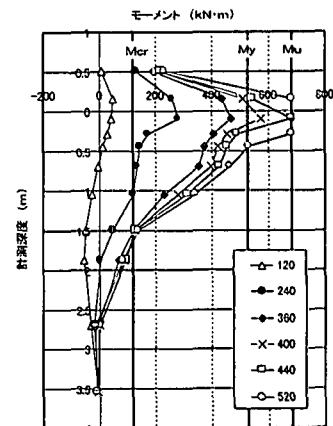


(c) 長杭 (拡大図)

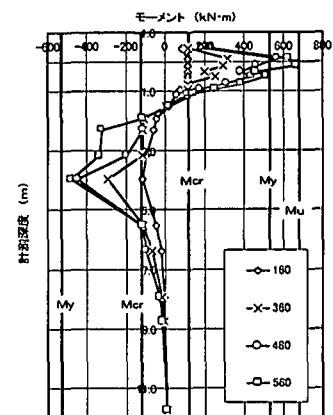
図-5 杭頭荷重と変位の関係

表-2 実験結果 (各荷重) (単位: kN)

項目	短杭	長杭
ひび割れ発生荷重(Pcr)	240	160
鉄筋降伏荷重 (Py)	400	480
終局荷重 (Pu)	520	580
最大荷重	540	760



(a) 短杭



(b) 長杭

図-6 モーメント分布

杭では480mm(杭径の60%)までとしたが、いずれの杭も最終段階に至るまで急激な耐力の低下が認められない。短杭では最終変位 $\delta u=94\text{mm}$ 、長杭では回転補正桁による補正が十分にできなくなるまでの変位 $\delta u=130\text{mm}$ に対し、これらを角鉄筋降伏荷重時の変位 δy で除すことにより靱性率 $\mu(=\delta u/\delta y)$ を算定すると、短杭で4.7、長杭で6.5と十分な靱性を有することが確認された。

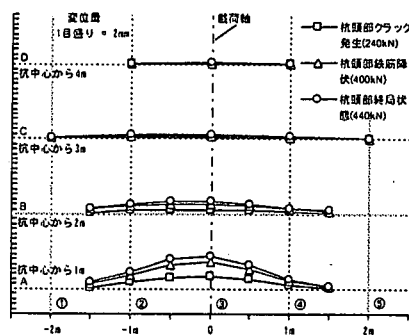
(2) 杭体の曲げモーメント分布

杭体の曲げモーメント分布を図-6に示す。曲げモーメントは、杭体の鉄筋ひずみから曲率を算出

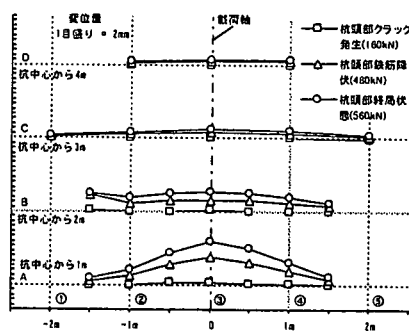
し、断面剛性の低下を考慮したRC断面の計算により求めた杭のM- ϕ 関係を用いて算出した。

短杭の曲げモーメント分布は杭頭部にのみピークがあり、先端部は終局時にもほぼゼロである。杭頭に塑性ヒンジが発生することにより終局を迎えており、荷重・変位関係でも確認されたように急激な倒壊は生じていない。

長杭の曲げモーメント分布は、杭頭と地中部(GL-3m)の2箇所にピークが見られ、GL-6m以深ではほとんどゼロであり、変形モードの違いにより短杭とは明らかに異なっている。定性的にはChangの半無限長杭とよく似た挙動を示す。杭頭

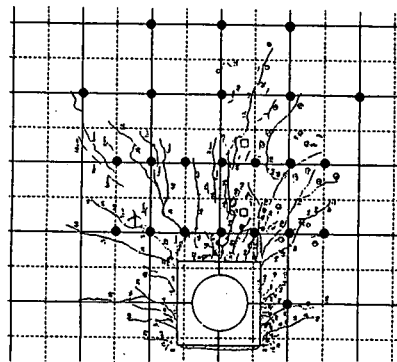


(a) 短杭

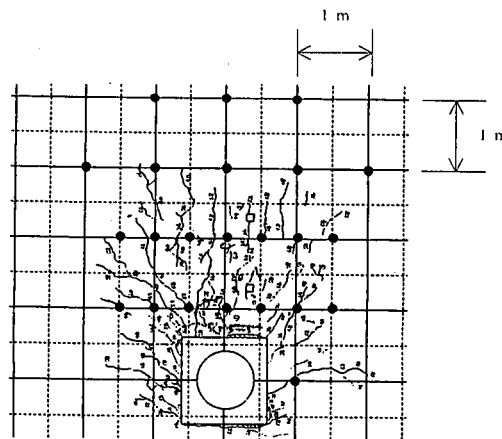


(b) 長杭

図-7 地表面変位測量結果



(a) 短杭



(b) 長杭

図-8 地表面のひび割れ図

部に塑性ヒンジが発生して終局に至ったが、杭頭だけでなく地中部でもひび割れ発生モーメント

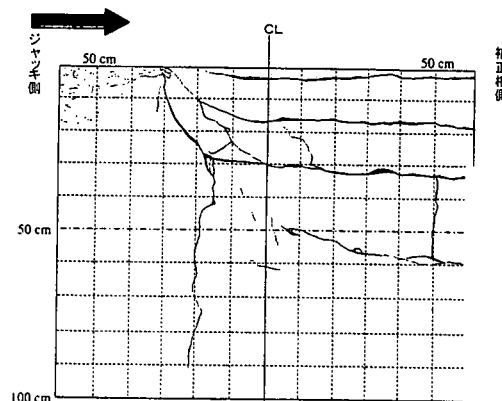
($M_{cr} : 130kNm$) を超えており、ひび割れが発生したことが推測される。ただし、地中部の鉄筋は降伏までには至っていない。モーメントの反転位置は、杭頭が塑性化する前は $GL-1.8m$ で一定であるが、杭頭の塑性化後若干上昇する。これは杭頭に塑性ヒンジが形成されることにより応力が再配分されているためである。

(3) 杭体前面地盤の挙動

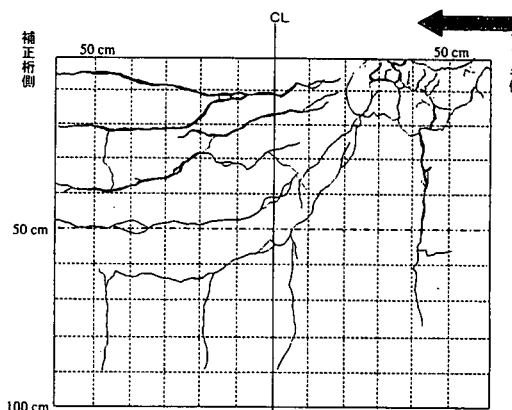
地表面変位測量の結果及び地表面のひび割れのスケッチ(目視観察)を図-7, 8に示す。杭体近傍の前面地盤は持ち上がりながら水平に変位し、短杭、長杭ともほぼ同様な傾向を示している。これらから、杭の载荷による地盤の影響範囲は地表面ではほぼ杭中心から前方4m、杭中心から左右方向に1.5~2m程度と判断される。地表面のひび割れは前方3m程度の位置まで観察され、杭長による破壊形態に顕著な違いは認められなかった。

(4) 杭体の破壊状況

杭体の破壊状況を確認するため、実験終了後杭頭部を半面だけ掘削し観察した。図-9にスケッチの



(a) 短杭



(b) 長杭

図-9 杭頭破壊状況

展開図を示す。いずれの杭もフーチングからの鉄筋の抜け出しは認められず、ジャッキ側のコンクリートが圧壊し、補正桁側に向かってせん断ひび割れ、曲げひび割れが発生している。

両杭とも引張側のひび割れ間隔は約 15cm とフープ筋間隔とほぼ等しく、塑性ヒンジ長は杭頭から約 60cm (約 0.75D, D: 杭径, 80cm) であった。塑性ヒンジ長はコンクリート構造物の終局変形に影響するものである。既往のコンクリート柱や梁の気中における実験から、塑性ヒンジ長はせん断スパン比や軸力等の影響を受けるが、一般に 1 D 程度と言われている。杭基礎のような地中構造物においても、これと同程度の値であることが確認できた。

4. まとめ

短杭と長杭について、杭頭固定条件で大変形水平載荷実験を実施し、以下の事項が明らかになった。

- (1) 杭頭にモーメントを与えることにより、単杭を杭頭固定条件として載荷する装置を考案し、この条件で大変形載荷実験を行うことができた。
- (2) 短杭は水平変位約 100mm, 長杭は約 500mm まで載荷したが、いずれの杭も急激な耐力低下はみられず十分な靱性を有していることが確認された。
- (3) 短杭と長杭では、変形モードの違いにより曲げモーメント分布が異なるが、最終的な破壊形態に大

きな違いはなく、杭頭に塑性ヒンジが形成されて終局を迎えた。また、塑性ヒンジ長もほぼ同一であった。

(参考文献)

- 1) 大西靖和, 山本稜威夫, 太田実: 場所打ちコンクリート杭の終局水平耐力, 第 18 回土質工学研究発表会, 1983. 6
- 2) 小笠原政文, 飯古道則, 五瀬伸吾, 川口光雄: 杭基礎の耐力に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 37 A, pp. 1467-1477, 1991. 3
- 3) 木村亮, 幸左賢二, 伊藤恭平, 坂本眞徳: 場所打ち杭の大変形水平挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 39 A, pp. 1385-1394, 1993. 3
- 4) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀雄: 終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, 土木学会論文集, No.596, III-43, pp. 249-259, 1998. 6
- 5) 小野勇, 山田清臣, 菊田征勇, 松井邦人, 松浦聖: 粘性土地盤における杭頭固定条件と水平抵抗に関する研究, 第 32 回地盤工学研究発表会, pp. 1591-1592, 1997. 7
- 6) 吉岡正道, 前田良文, 脇田和試, 三反畑勇: 実大杭基礎を用いた水平載荷試験, 第 23 回土質工学研究発表会, pp. 1447-1448, 1988. 6
- 7) (社)地盤工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983

STUDY ON THE BEHAVIOR OF FULL-SCALED PILES WITH ROTATION-FIXED HEAD UNDER LARGE LATERAL DEFORMATION

Hiroshi SATO, Takashi OHYA and Manabu MATSUSHIMA

This paper describes the behavior of full-scaled single piles with rotation-fixed head under large deformation. It is necessary to understand the ultimate behavior of pile foundation to develop the limit state design method. Although pile is usually used in the condition that the pile head is fixed, few tests focused on ultimate behavior were conducted in this condition. In this study, lateral loading tests of cast-in-place piles with the diameter of 80cm were conducted regarding a short-length pile and a long-length pile in this condition which was realized by extra test apparatus. According to the test results, both piles had sufficient ductility and the ultimate states of both piles were similar, namely plastic hinges were formed at the pile heads.