

# 実物大単杭の水平載荷実験における 杭と砂質土地盤および粘性土地盤の挙動

佐藤 博<sup>1</sup>・大矢 孝<sup>2</sup>・松島 学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力株式会社 技術開発研究所 建設技術グループ (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)  
E-mail:sato.hiro@tepcoco.jp

<sup>2</sup>正会員 工修 東京電力株式会社 送変電建設部 送変電企画グループ (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

<sup>3</sup>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、砂質土地盤および粘性土地盤において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の結果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。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。さらに、性能設計を行う上では、杭の終局挙動を精度良く把握することが重要である。本研究では単杭の杭頭回転固定条件を再現できる装置を用い、砂質土地盤および粘性土地盤中の長さを変えた杭の大変形終局挙動を把握した。さらに粘性土地盤では杭頭自由条件の実験も行った。これらから、地盤、杭長、杭頭条件の違いによる実物大単杭および周辺地盤の終局挙動の差異を考察した。

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

## 1. まえがき

土木構造物の設計は性能設計に移行しつつあり、杭基礎の設計も上部構造物の機能に応じた設計が必要とされてきている。これに対応して変形を許容する設計が主流となりつつあり、基礎の非線形挙動を精度良く把握する技術、さらには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。杭基礎の終局状態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<sup>1)~4)</sup>。実構造物では、フーチング等により杭頭の回転が拘束されていることが多いことから、これらの実験では、杭頭回転固定条件を実現するため、主にフーチングを設けて複数本の杭を用いている。

この時、各杭の挙動には、杭間隔が小さい場合は群杭効果や、また杭間隔が大きくても、フーチングを介した複数杭の相互作用の影響が問題となることがある。そのため、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、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。このことから、吉岡ら<sup>5)</sup>は単杭を杭頭回転固定条件で載荷する実験を行っているが、強制的に杭頭を抑える構造により鉛直荷重の影響が生じたために、終局状態までの載荷は実施していない。

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。

以上の背景を踏まえ、著者らはこれまで単杭の杭頭回転固定条件を再現するための実験装置を開発し、砂質土地盤を対象に実物大の短杭と通常の長さの杭 2本について、単杭の杭頭変位が 10cm 以上の大変形領域までの実験を行い、杭と地盤の挙動を報告した<sup>6)~7)</sup>。この実験は載荷装置を工夫して、水

表-1 杭の諸元

地盤	名称	杭頭条件	杭型	杭径 D (mm)	杭長 L (m)	$\beta L$
砂質土地盤	短杭	固定	RC 場所打ち杭 鉄筋比1% かぶり15cm	800	4.0	1.07
	長杭				12.0	3.02
粘性土地盤	短杭	自由			5.0	1.05
	長杭	固定			12.0	2.53

平載荷に伴う杭頭回転固定条件を実現し、終局状態までの挙動を把握することができるものである。

本研究は、さらに粘性土地盤を対象に、同様の大変形水平載荷実験を行い、これらの結果を地盤工学の観点から検討したものである。実験の対象とした杭は場所打ちコンクリート杭で、有限長に分類される短杭、半無限長に分類される長杭を用いている。杭長の違い、地盤の違いによる杭、地盤の大変形挙動の差異を検討した。また、粘性土地盤の杭については、杭頭自由条件の実験も実施し、杭頭条件の違いによる挙動の差異も検討した。

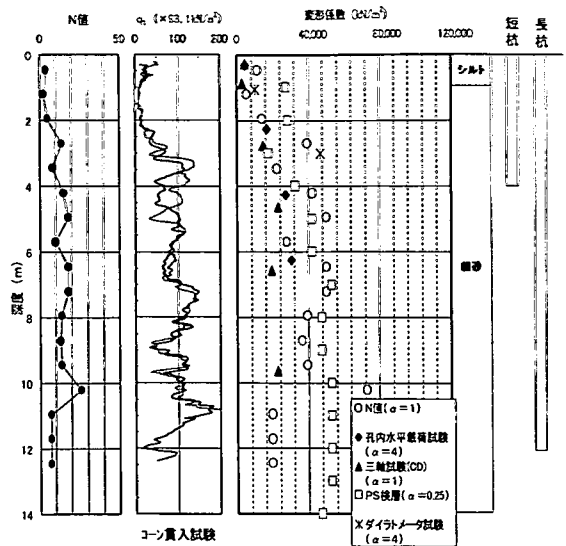
## 2. 試験体と載荷装置

### (1) 試験体と地盤条件

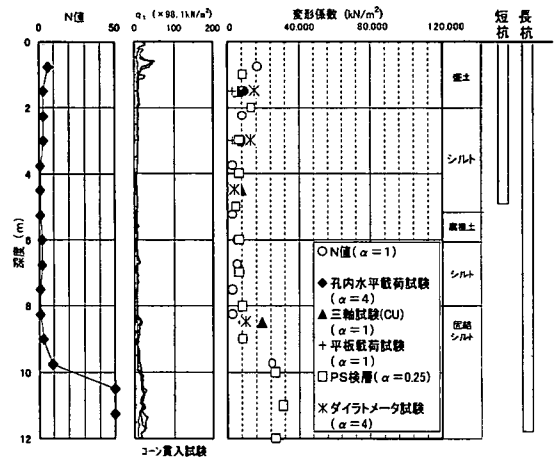
著者らはこれまで砂質土地盤を対象に、現実によく用いられる基礎杭の杭頭条件を再現するため、後述する載荷方法を考案して単杭の杭頭を回転固定条件により載荷試験を実施してきた。本研究では、これまで実施した砂質土地盤の2本の杭と今回新たに粘性土地盤で実施した3本の杭、計5本を対象として、地盤、杭長および杭頭条件の違いによる挙動の差異に着目して分析を行った。

試験杭の諸元は表-1に示すとおり、径80cmの場所打ちコンクリート杭である。長さは、砂質土地盤では4m、12m、粘性土地盤では5m、12mで、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。短杭の長さは $\beta L$  ( $\beta$ :杭の特性値、 $L$ :杭長)が両地盤でほぼ1になるように決定した。このように、短杭の $\beta L$ を両地盤で同一にすることにより、杭の有限長の程度を両地盤で同一にでき、地盤の違いによる挙動の差異を比較できる。なお、ここで杭の特性値 $\beta$ は、道路橋示方書・同解説<sup>9)</sup>を参考に杭長区間の平均的な地盤反力係数から算定した。粘性土地盤の変形係数が小さいため、短杭の $\beta L$ が1となる杭長は、粘性土地盤では5mとなり砂質土地盤の4mに比べてやや大きくなっている。

実験位置の地盤の各種調査結果を図-1に示す。砂質土地盤はGL-1m以浅の表層部のN値が2~4の沖積粘性土、それ以深は5~26の沖積細砂で構成されている。粘性土地盤はGL-2m以浅の表層部は盛土、それ以深はGL-11



(a) 砂質土地盤



(b) 粘性土地盤

図-1 地盤の各種調査結果

mまでが沖積シルトで、N値はいずれも1~9である。それ以深はN値50以上の洪積固結シルトで構成されている。ボーリング調査時の地下水位は両地盤ともにGL-1mであった。これは、両地盤の周辺の状況(砂質土地盤は河川近傍、粘性土地盤は近傍に水田有り)から判断して恒常的な地下水位と判断される。

地盤調査結果を基に設定した変形係数の深度分布は、N値、孔内水平載荷試験、平板載荷試験、PS検層、ダイラトメータ試験の各原位置試験結果およびボーリング孔から採取した不攪乱試料の三軸圧縮試験結果から算定したものである。変形係数は、道路橋示方書・同解説を参考に、各試験の歪みレベルに応じた補正係数 $\alpha$ を乗じて求めた値で、平板載荷試験と同程度の歪みレベル(今回の場合概ね $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$ )に相当する値と考えられる。こ

表-2 地盤の物性値

地盤	区分	項目	単位	物性値
砂質土地盤	表層シルト	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	18.8
		N値	-	4
		粘着力	kN/m <sup>2</sup>	60
		内部摩擦角	度	0
	細砂	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	19.3
	N値	-	4~26	
	粘着力	kN/m <sup>2</sup>	2~26	
	内部摩擦角	度	38~41	
粘性土地盤	盛土	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	17.8
		N値	-	3~6
		粘着力	kN/m <sup>2</sup>	30
		内部摩擦角	度	21
	シルト	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	17.3
		N値	-	3~9
		粘着力	kN/m <sup>2</sup>	14~28
		内部摩擦角	度	15~27
	固結シルト	単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	18.5
		N値	-	50以上
粘着力		kN/m <sup>2</sup>	160	
	内部摩擦角	度	34	

注) 三軸試験の条件：砂質土地盤の表層シルト：UU，  
細砂；CD 粘性土地盤；CU(何れも同じ)  
側圧；150~400 kN/m<sup>2</sup>(何れも同じ)

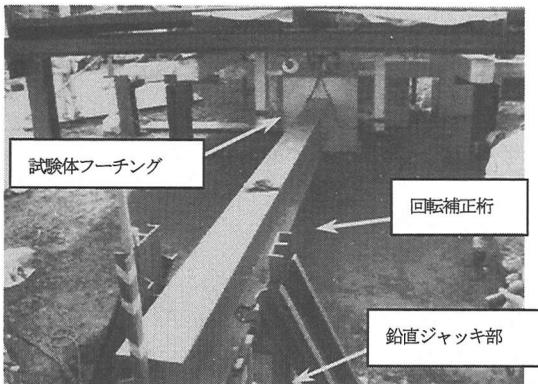


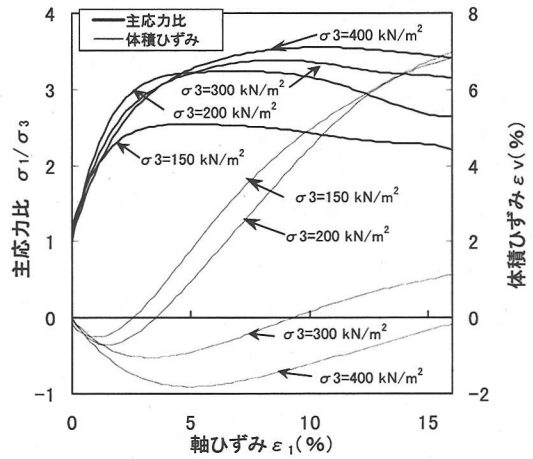
写真-1 試験装置の概要

これらの結果にはややばらつきはみられるが、図中のコーン貫入試験結果と比較すると地盤の硬軟の傾向を捉えている。

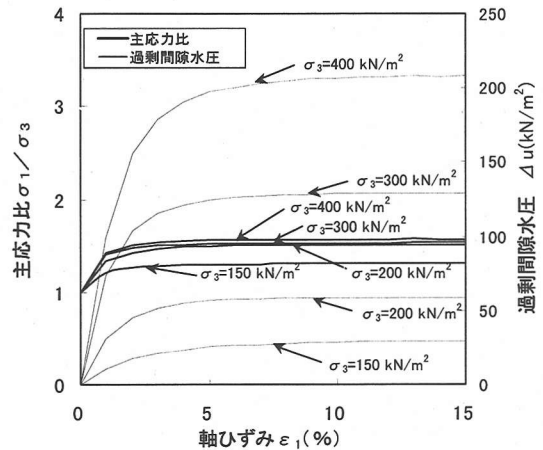
載荷実験の前に実施した杭位置におけるボーリング孔から採取した不攪乱試料の三軸圧縮試験結果から求めた地盤の物性値を表-2に示す。両地盤の代表的な三軸圧縮試験結果を図-2に示す。砂質土地盤と粘性土地盤を比較すると、砂質土地盤の方が主応力比が大きく、最大主応力比に達する軸歪みも大きい。

(2) 載荷装置

試験装置の全体概要を図-3および写真-1に示す。前述の杭頭回転固定条件とするための載荷方法とは、杭頭フ



(a) 砂質土地盤 (CD) (GL-5.0~5.75m)



(b) 粘性土地盤 (CU) (GL-4.1m~4.9m)

図-2 三軸試験結果の例

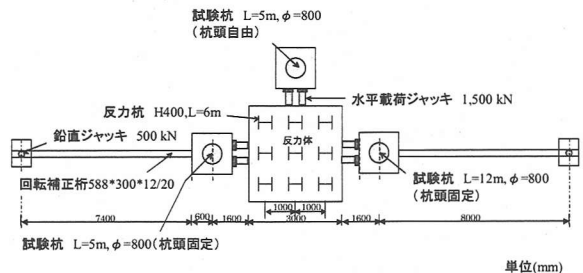


図-3 試験装置の概要 (平面図) (粘性土地盤)

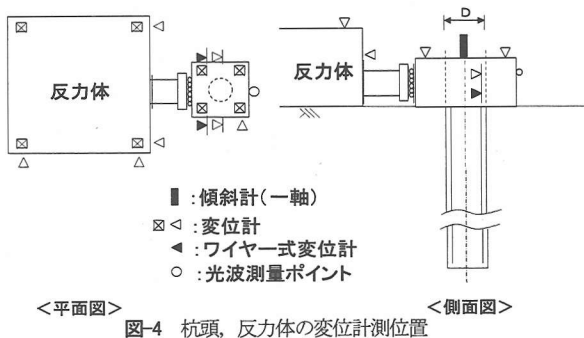


図-4 杭頭、反力体の変位計測位置

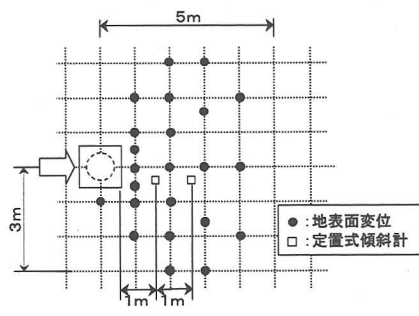


図-6 地表面変位計測位置(粘性土地盤)

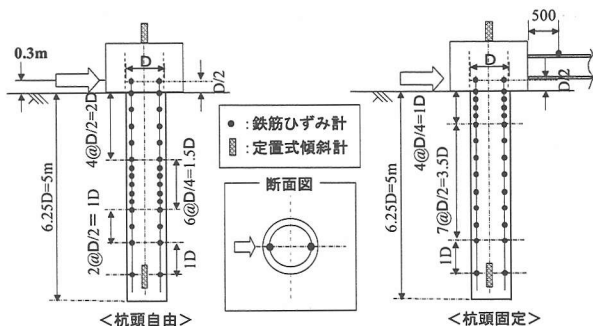


図-5 杭体計測位置の例(粘性土地盤、短杭)

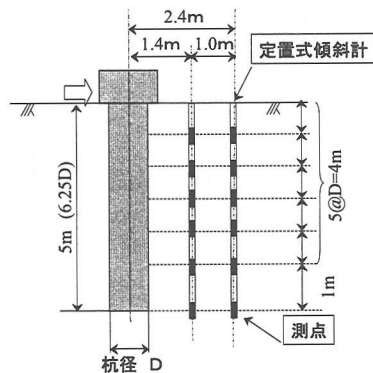


図-7 杭前面地盤の地中変位計測位置の例(粘性土地盤、短杭)

一チングに設置したH鋼(以下、回転補正桁)を介して杭芯より6~8m離れた位置で水平荷の進展に応じて鉛直方向に押し上げ、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、この読みに応じて押し上げ力を決定している。また、水平力により杭頭に作用する曲げモーメントをできるだけ小さくするため、水平力の作用高さをGL+0.3mと载荷に支障の無い範囲で可能な限り小さくした。

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ている。鉛直ジャッキと回転補正桁の間には球面ブッシュを設置し、杭頭の回転や杭頭フーチングの破壊等により回転補正桁が傾いた場合でも確実に押し上げ力を伝達できる構造としている。

試験体と水平载荷ジャッキの間には、摩擦低減ローラと球面ブッシュを取り付け、载荷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、杭頭が傾斜した場合でも载荷荷重の鉛直成分が杭に作用しないようにしている。

回転補正桁を鉛直ジャッキで押し上げると杭体に引抜力が作用する。回転補正桁を長くすれば、杭頭の回転補正に必要な押し上げ力が小さくて済み、引抜力は小さくなるが、実験の制御が難しくなる。本研究では、杭体への影響を小さくすることに主眼を置いて補正桁の長さを

決定している。

実験の結果、杭の鉄筋の引張歪みは杭頭部のみ発生し、深部には伝達されていないこと、この引張歪みはほとんどは水平力によるものであることを確認している。このことから、本装置を用いても引抜力により杭が浮き上がる等の引抜力の影響は無視できると判断した。

### (3) 計測項目

#### a) 杭体変形

杭頭と反力体の変位は、図-4に示すように水平方向(载荷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。測定レンジの大きいワイヤー式変位計も併せて設置し、大変形時の計測に対応できるようにした。杭頭フーチングの上には定置式傾斜計を設置し、杭頭の回転補正はこの傾斜量を確認しながら行った。

杭体の挙動は、図-5に示すように、载荷軸方向の正負側2ヶ所に歪みゲージを設置し、計測した。杭体の曲率が大きくなる領域で測定間隔を小さくした。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。

#### b) 地盤変位

地表面変位は、図-6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。地中変位は、図-7に示すように、杭前面地盤2ヶ所をボー

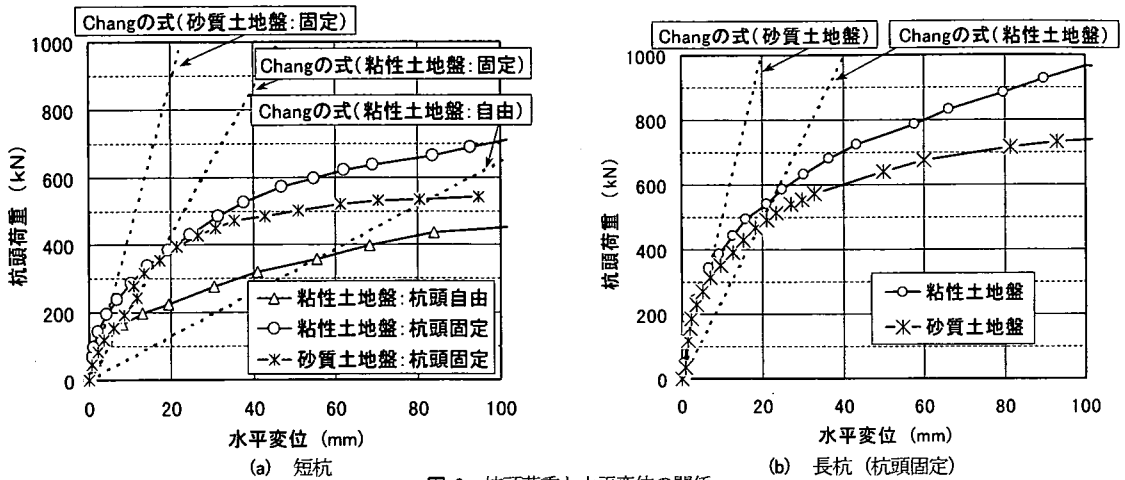


図-8 杭頭荷重と水平変位の関係

リングし、孔内に傾斜計を設置し、計測した。計測点は両杭の予想される変形モードの違いを考慮した。短杭は、剛体が回転するような変形が予測されることから、杭全長区間、長杭は、変形が大きい浅い領域では短杭と同じ間隔、変形が小さい深い領域は杭下端深度の位置とした。地盤の違いによる杭と地盤の挙動の差異は短杭の場合で評価することとし、粘性土地盤の長杭は地中変位を計測していない。

#### (4) 載荷方法

載荷方法は多サイクル方式とし地盤工学会「杭の水平載荷試験方法・同解説」<sup>10)</sup>を参考にし、設定した。ただし、地表面変位計測を行うことから、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。

載荷の順序は、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押し上げ力を与え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、本実験では水平荷重、変位および他の計測データも回転補正桁による補正後の値を採用した。

### 3. 実験結果

地盤、杭長および杭頭条件の違いにより、杭、地盤の挙動の差異に着目して実験結果を考察した。さらに、杭地盤系の大変形時の挙動についても考察した。

#### (1) 砂質土地盤と粘性土地盤の比較

砂質土地盤と粘性土地盤の挙動の差異に着目し、短杭、長杭に分けて検討する。また、短杭、長杭の結果を比較

することにより、杭長の違いによる両地盤の挙動の差異への影響についても検討する。

#### a) 短杭 (杭頭固定条件)

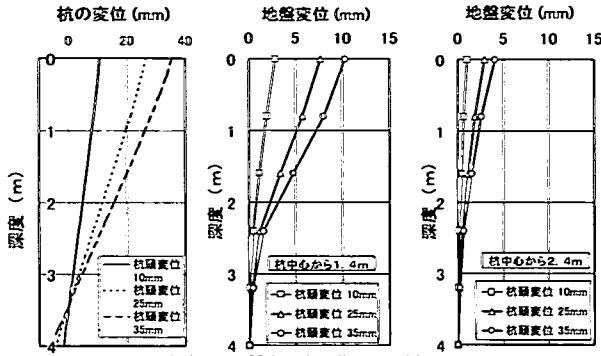
##### ① 杭頭荷重と水平変位

砂質土地盤および粘性土地盤の短杭 (杭頭固定条件) の杭頭荷重と水平変位の関係を図-8(a)に示す。図中には弾性支承上の弾性梁の理論で、現行設計で一般に用いられる Chang の式<sup>14)</sup>を併記している。砂質土の短杭で、杭頭荷重が 280kN 時に変位が戻っているのは、280kN までは今回初めて回転補正桁を使用することから、回転補正が十分でなく、杭頭の傾斜を完全に戻しきれていなかったことが原因である。

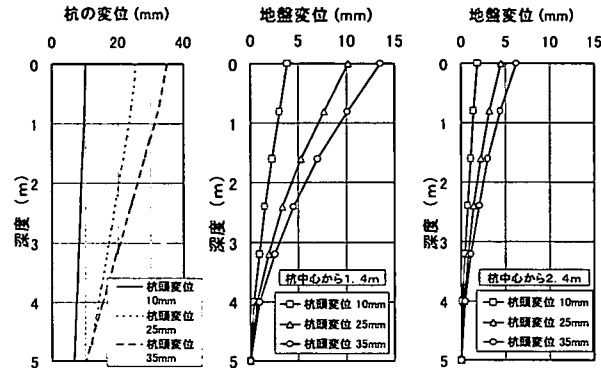
杭頭荷重が 400kN 程度までの初期荷重段階では、前述の 280kN までを除けば、両地盤の荷重～変位関係は比較的良好に一致している。

Chang の式における荷重～変位関係の勾配は、砂質土地盤で大きく、粘性土地盤で小さい。これは、図-1 に示したように、杭の設置されている深度範囲の砂質土地盤の変形係数は粘性土地盤の 2～3 倍程度と大きいためである。実験結果では初期荷重段階の荷重～変位曲線は両地盤で比較的良好に一致し、Chang の式とは傾向が異なる。この差異の理由は、次の 2 点が考えられる。

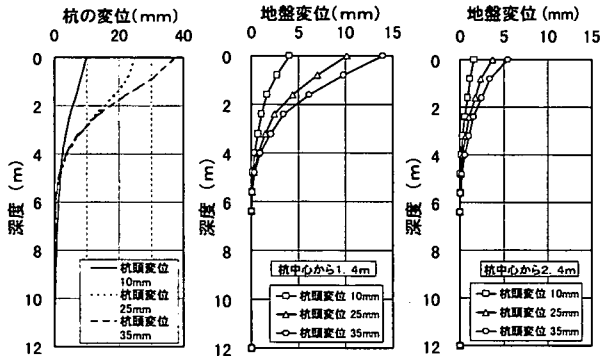
- 1) Chang の式では、地盤物性を平均化して均一な 1 層としているのに対し、実地盤は均一ではなく、杭の変形に影響を及ぼす浅い層 (ここでは GL-2～3m 以浅) の変形係数は、両地盤とも 10,000 kN/m<sup>2</sup> 程度と概ね等しいこと (図-1)。
- 2) 初期荷重段階では、杭周辺地盤は比較的健康で、前面地盤の他、側面地盤も荷重を分担する。各種試験から求めた地盤の変形係数は圧縮特性で、主に杭前面地盤の特性を表していると考えられる。側面地盤には引張力やせん断力が作用し、杭の変形に影響を及ぼす浅い層では、砂質土地盤に比べて粘性土地盤の方が粘着力



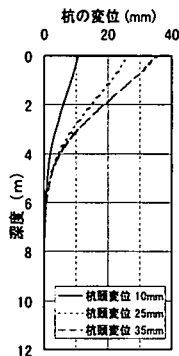
(a) 短杭：砂質土盤（杭頭固定）



(b) 短杭：粘性土盤（杭頭固定）

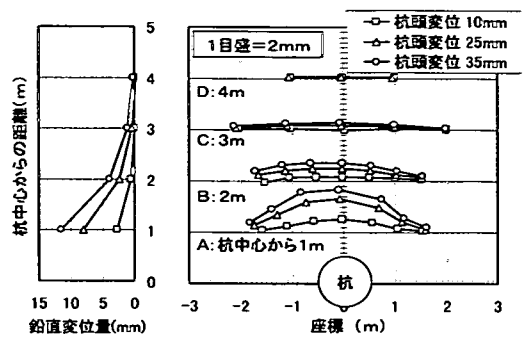


(c) 長杭：砂質土盤（杭頭固定）

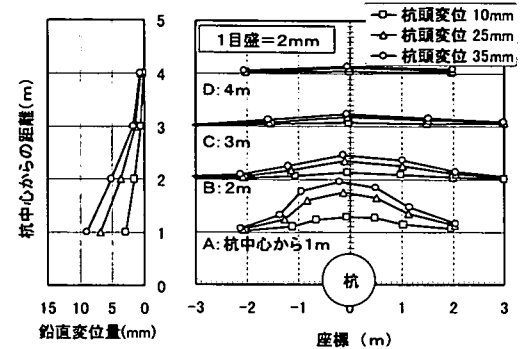


(d) 長杭：粘性土盤（杭頭固定）

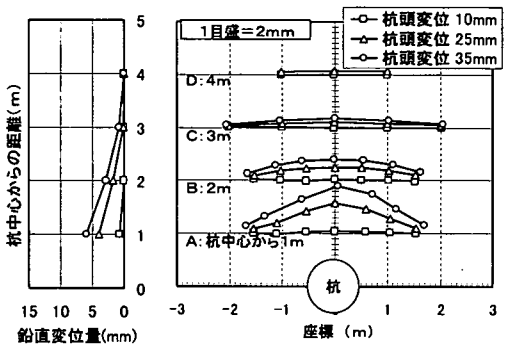
図-9 杭変位と地盤変位の深度分布（その1）



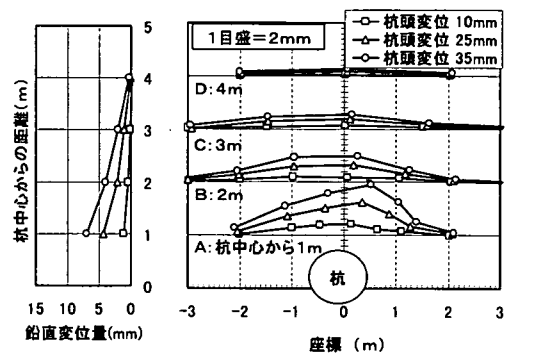
(a) 短杭：砂質土盤（杭頭固定）



(b) 短杭：粘性土盤（杭頭固定）

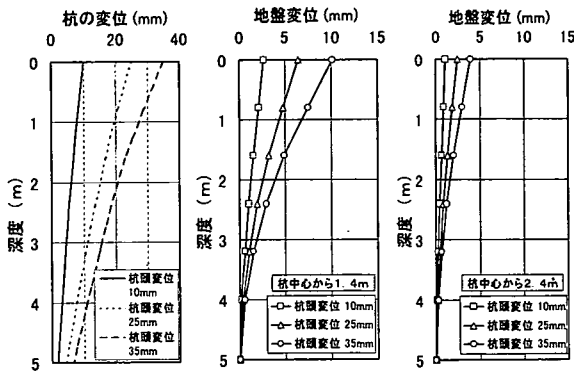


(c) 長杭：砂質土盤（杭頭固定）



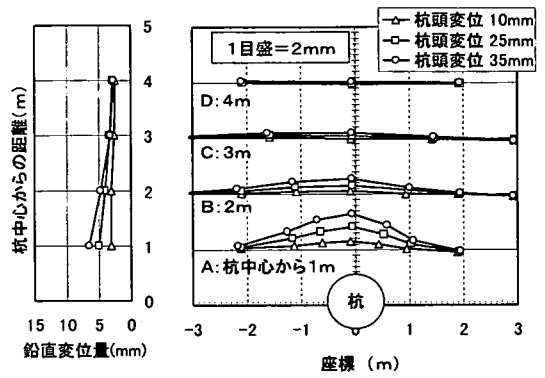
(d) 長杭：粘性土盤（杭頭固定）

図-10 地表変位の計測結果（その1）



(e) 短杭：粘性土地盤（杭頭自由）

図-9 杭変位と地盤変位の深度分布（その2）



(e) 短杭：粘性土地盤（杭頭自由）

図-10 地表変位の計測結果（その2）

によりせん断強度が大きいため応力を伝達する能力（応力の分散性）が大きく、広い範囲で荷重を分担する傾向がある<sup>15)</sup>。このことから、側面地盤の影響は粘性土地盤の方が大きいと考えられること。

以上のように、現行設計で用いられることの多いChangの式を適用する上で、特に浅層地盤の変形係数の設定が重要であると判断される。

杭頭荷重 400kN 以降は、砂質土地盤では荷重があまり増加せずに変位が急増していくが、粘性土地盤では荷重がさらに増大し、両地盤の荷重～変位関係に顕著な差異が認められる。粘性土地盤の方が応力の分散性が高いため、杭が損傷した後でも砂質土地盤に比べて広い範囲の地盤で杭頭荷重を分担するためと考えられる。このことは、後述の図-11(a)、(b)の地表面変位コンター図より、粘性土地盤の方が影響範囲が大きいことから判断される。

## ② 杭の変形と地中地盤変位

この応力の分散性の違いは、地盤の挙動に現れている。杭頭水平変位が 10mm、25mm および 35mm の時点における両地盤の短杭の水平変位と杭中心から 1.4m、2.4m の位置における地盤の水平変位の深度分布を合わせて図-9(a)、(b)に示す。ここで、各杭頭水平変位の時点は、杭・地盤系の挙動になかでそれぞれ下記の時点に相当する。

- ・比較的弾性的挙動を示す時点
- ・鉄筋降伏荷重に近い時点（ただし、後述の表-3のように杭頭自由は降伏に至っていない。）
- ・終局荷重（ここでは、杭体圧縮側コンクリートの圧壊時の荷重、後述の表-3）に近い時点

杭変位の深度分布は、杭の断面が常に平面を保持すると仮定し、載荷軸方向の正負側 2 箇所の鉄筋歪みから算定するため、測定位置に依存してばらつく。このため、鉄筋歪みから求めた曲率分布を 3 次のスプライン関数で近似し、これを 2 階積分し、算定した。境界条件は、短

杭であることから、杭先端回転角（＝計測値）と杭頭水平変位（＝計測値）を用いた。杭先端条件は、後述する短杭と長杭の挙動を比較した結果から判断し、自由と設定した。杭変位の算定精度は、計測値である杭頭変位を除いては変形モードの把握に主眼を置くこととして評価する。

図-9(a)、(b)より、杭は両地盤ともに剛体が回転するような挙動を示す。地盤の水平変位の深度分布は、いずれの時点も粘性土地盤の方が大きく、両地盤の応力分散性の違いによる差異が認められる。

## ③ 地表面地盤の挙動

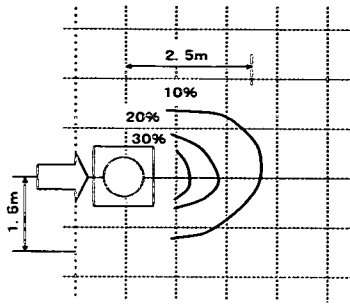
3 時点の地表面変位の計測結果を図-10(a)、(b)に示す。各測定点の水平変位と、杭中心載荷方向測線上の鉛直変位を示している。これから、両地盤ともに杭前面地盤は持ち上がりながら、水平に広がるように変位する傾向が認められる。

この結果を用いて、杭頭水平変位 35mm 時点の地盤の載荷方向水平変位を杭頭水平変位で基準化した変位コンターを図-11(a)、(b)に示す。これから、粘性土地盤は砂質土地盤に比べ載荷方向、載荷直角方向ともに水平変位の広がり大きい。杭頭水平変位の 10%に相当する地盤水平変位の範囲は、載荷直角方向では砂質土地盤で杭中心から約 1.5m、粘性土地盤で約 2m、載荷方向では砂質土地盤で杭中心から約 2.5m、粘性土地盤で約 4m である。さらに、粘性土地盤は砂質土地盤に比べ、杭近傍を除いて水平変位、鉛直変位ともに大きく、砂質土地盤では水平変位、鉛直変位ともに杭中心から 4m で 0 に収束している（図-10）。

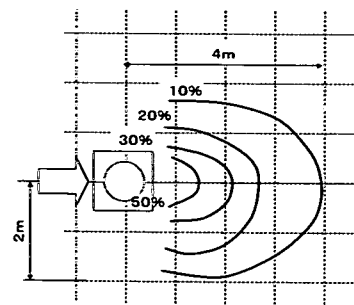
## b) 長杭（杭頭固定条件）

### ① 杭頭荷重と水平変位

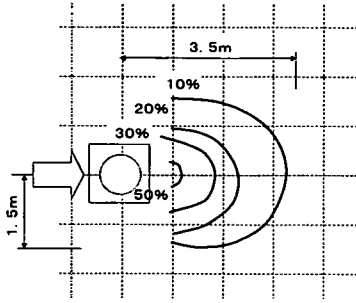
砂質土地盤および粘性土地盤の長杭（杭頭固定条件）の杭頭荷重と水平変位の関係を図-8(b)に示す。杭頭荷重が 300kN 程度までの初期荷重段階では両地盤の荷重～変位関係は良く一致し、それ以降では短杭と同様に、同



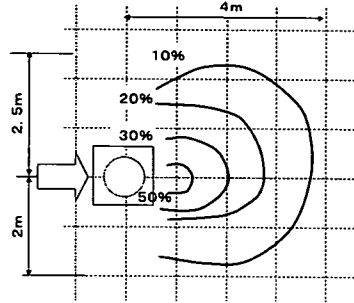
(a) 短杭：砂質土地盤（杭頭固定）



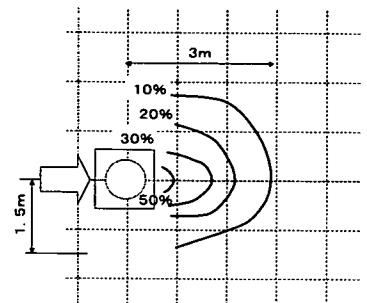
(b) 短杭：粘性土地盤（杭頭固定）



(c) 長杭：砂質土地盤（杭頭固定）



(d) 長杭：粘性土地盤（杭頭固定）



(e) 短杭：粘性土地盤（杭頭自由）

図-11 地表面変位コンター図（杭頭変位35mm）

一荷重に対する水平変位は砂質土地盤の方が大きく、最終荷重は粘性土地盤の方が大きい。

Chang の式における荷重～変位関係の勾配は、短杭の場合と同様に両地盤の変形係数の違いにより、砂質土地盤で大きく、粘性土地盤で小さい。実験結果との差異は短杭の場合と同様の理由と考えられる。また、初期荷重段階以降の挙動の差異も、短杭の場合と同様、応力の分散性の違いによると考えられる。

## ② 地表面地盤の挙動

3時点の地表面変位の計測結果を図-10(c), (d)に示す。また、杭頭水平変位35mm時点の基準化した地盤の水平変位コンターを図-11(c), (d)に示す。

これらから、短杭の場合と同様、粘性土地盤は砂質土地盤に比べ荷重方向、荷重直角方向ともに水平変位の広がり大きい。杭頭水平変位の10%に相当する地盤水平変位の範囲は、荷重直角方向では砂質土地盤で杭中心から約1.5m、粘性土地盤で2～2.5m、荷重方向では砂質土地盤で杭中心から約3.5m、粘性土地盤は約4mまで達している（図-11）。以上から、短杭と同様、地盤の違いによる杭頭荷重～水平変位関係、地表面地盤の挙動に差が認められ、その傾向は短杭の場合と同じであり、杭長の違いによる顕著な差異は認められない。

## (2) 短杭と長杭の比較

杭長の違いによる挙動の差異に着目し、砂質土地盤、粘性土地盤に分けて検討する。また、砂質土地盤、粘性土地盤の結果を比較することにより、地盤の違いによる挙動の差異への影響についても検討する。

### a) 砂質土地盤

#### ① 杭頭荷重と水平変位

図-8(a), (b)より、砂質土地盤の短杭および長杭（いずれも杭頭固定条件）の杭頭荷重と水平変位の関係を比較する。短杭の280kNまでの荷重制御の不良な領域を除いても、同一荷重に対する杭頭変位は常に短杭の方が大きい。弾性論によれば、同一荷重時の短杭と長杭の杭頭変位の大小関係は、短杭の $\beta L$ が1以下の領域では短杭の杭先端条件に依存する<sup>16)</sup>。杭先端が自由の場合は短杭の方が大きく、固定およびピンの場合はこれとは逆に短杭の方が小さくなる。従って、今回の実験では、短杭の杭先端は自由に近い状態にあったことが推察される。

#### ② 杭の変形と地中地盤変位

3時点における短杭および長杭の水平変位と地盤の水平変位の深度分布を、図-9(a), (c)に示す。長杭の杭変位は、短杭の場合と同様、スプライン関数を用いる方法で求めた。短杭は剛体が回転するような挙動であるのに対し、長杭は深部が地盤に固定された片持ち梁に似た挙動を示し、変形モードに顕著な差異が認められる。弾性



表-3 杭の各イベント時の荷重と変位 (単位: kN, mm)

項目	砂質土地盤		粘性土地盤		
	短杭	長杭	短杭	短杭 F	長杭
ひび割れ荷重(P <sub>cr</sub> )	240 (12)	160 (2)	200 (5)	240 (19)	300 (6)
鉄筋降伏荷重 (P <sub>y</sub> )	400 (22)	480 (19)	450 (25)	—	550 (21)
終局荷重 (P <sub>u</sub> )	520 (61)	580 (33)	520 (38)	—	600 (25)
最大荷重	540 (94)	760 (128)	820 (221)	510 (133)	1070 (256)

注) 短杭Fは杭頭自由を示す。( )は水平変位を示す。

論よれば、長杭の第一不動点深さは、 $3\pi/4\beta$ で示され、今回の場合9.4mとなるが、実験結果は約6mとこれより小さい。杭頭固定条件であることから、荷重の増加に伴い地盤と杭の剛性の比である杭の特性値 $\beta$ がChangの式よりも大きくなったため、すなわち杭、地盤ともに杭頭部から塑性化していくが、地盤よりも杭の剛性低下が大きかったことが理由と推測される。

地盤変位は、いずれの時点も長杭の方が大きく、深部まで及び、杭長の違いによる顕著な差異が認められる。

### ③ 地表面地盤の挙動

3時点の地表面変位の計測結果を図-10(a), (c)に示す。また、杭頭水平変位35mm時点の基準化した水平変位コンターを図-11(a), (c)に示す。

これらから、長杭は短杭に比べ荷重方向、荷重直角方向ともに水平変位の広がりや大きい。杭頭水平変位の10%に相当する地盤水平変位の範囲は、荷重直角方向では両杭ともに杭中心から約1.5mとほぼ等しいが、荷重方向では短杭で約2.5m、長杭では約3.5mである(図-11)。

### b) 粘性土地盤

#### ① 杭頭荷重と水平変位

図-8(a), (b)より、粘性土地盤の短杭および長杭(いずれも杭頭固定条件)の杭頭荷重と水平変位の関係と比較する。砂質土地盤と同様、同一荷重に対する杭頭変位は常に短杭の方が大きく、粘性土地盤でも短杭の杭先端は自由に近い状態にあったことが推察される。

#### ② 杭の変形と地中地盤変位

3時点における短杭および長杭の水平変位と地盤の水平変位の深度分布を、図-9(b), (d)に示す。ただし、長杭の場合は地盤変位を計測していない。砂質土地盤と同様、杭長の違いによる変形モードの差異が認められる。長杭の第一不動点深さは、弾性論では11.8mとなるのに対し、砂質土地盤の場合と同様の理由により実験結果は約6mと小さく、砂質土地盤とほぼ同じ値である。

#### ③ 地表面地盤の挙動

3時点の地表面計測結果を図-10(b), (d)に示す。また、杭頭水平変位35mm時点の基準化した水平変位コンター

を図-11(b), (d)に示す。

これらから、砂質土地盤とは異なり、杭長の違いによる水平変位の大きさ、平面的な広がりや顕著な差異は認められない。杭頭水平変位の10%に相当する地盤水平変位の範囲は、荷重直角方向では両杭ともに杭中心から約2m、荷重方向では両杭ともに約4mである(図-11)。以上から、粘性土地盤では、杭頭荷重～水平変位関係、杭の変形モードは砂質土地盤と同様、杭長の違いによる顕著な差異が認められるが、地表面地盤の挙動は、杭長の違いによる顕著な差異が認められず、砂質土地盤の場合とは異なる傾向を示している。

### (3) 杭頭条件の違いの比較

#### a) 杭頭荷重と水平変位

粘性土地盤の短杭で、杭頭条件の違いによる挙動の差異を比較する。杭頭荷重と水平変位の関係は、図-8(a)に示すように、同一荷重に対する杭頭変位は常に杭頭自由の方が大きく、顕著な差異が認められる。杭頭条件の違いにより杭の変形モードが異なり、杭頭変位が同じであっても、深部の杭変位は杭頭自由の方が小さいと考えられる。このため、同一荷重に釣り合う地盤反力を得るには、杭頭自由の方が杭頭変位が大きくなると考えられる。杭頭固定の場合は水平変位が25mmで鉄筋降伏に至るが、杭頭自由の場合は128mmまで変位させたが降伏まで至らなかった(表-3)。

#### b) 杭の変形と地中地盤変位

3時点の両杭の水平変位と地盤の水平変位の深度分布を図-9(b), (e)に示す。杭頭自由の杭変位は、杭頭固定の短杭と境界条件を含めて同じ方法で求めた。いずれも剛体が回転する挙動を示すが、杭頭条件の違いにより、杭頭部の変形モードに差異が認められる。

地盤変位は、いずれの時点も杭頭固定の方が大きい。これは、杭頭部の変形モードの違いにより、杭頭固定の方が深部まで地盤の変形を及ぼすためと考えられる。

#### c) 地表面地盤の挙動

3時点の地表面変位の計測結果を図-10(b), (e)に示す。また、杭頭水平変位35mm時点の基準化した水平変位コンターを図-11(b), (e)に示す。

これらから、杭頭自由は杭頭固定に比べ荷重方向、荷重直角方向ともに水平変位の広がりや小さい。杭頭水平変位の10%に相当する地盤水平変位の範囲は、荷重直角方向では杭頭自由で杭中心から約1.5m、杭頭固定で約2m、荷重方向では杭頭自由で杭中心から約3m、杭頭固定で約4mである(図-11)。一方、鉛直変位は、図-10(e)より、杭頭自由では杭中心から4mでも収束せず、杭頭固定よりも大きい。このように、杭頭条件の違いにより、地表面地盤の変形モードには顕著な差異が認められる。

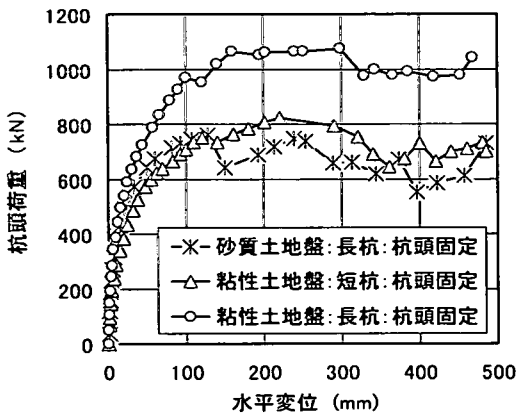


図-12 杭頭荷重と水平変位の関係 (大変形)

#### (4) 大変形時の挙動

図-8 に示す杭頭荷重と水平変位において、水平変位 100mm 程度以降の大変形領域の挙動を考察する。ここで水平変位 100mm は、杭、地盤によるが、杭の圧縮側コンクリートが圧壊する時点の 1.6~4 倍程度の大きな変形領域に相当する。表-3 に杭に生じる各イベント時の杭頭荷重、水平変位を示す。これらは、杭の断面が常に平面を保持すると仮定し、載荷軸方向の正負側 2 箇所の鉄筋歪みから求めた値である。本研究では終局荷重は圧縮縁コンクリートが圧壊する時点 (終局圧縮歪 0.0035) とした。

図-8 より、粘性土地盤では、杭長、杭頭条件によらず水平変位 100mm の時点でも杭頭荷重が増加する傾向にあり、砂質土地盤と顕著な差異が認められる。粘性土地盤では、杭が損傷した後も周辺地盤が荷重を分担するためと考えられる。水平変位 100mm 時点の杭頭荷重は、杭長によらず、粘性土地盤は砂質土地盤の約 1.3 倍である。

今回の実験では、砂質土地盤の長杭、粘性土地盤の短杭、長杭 (いずれも杭頭固定条件) の 3 本の杭については、杭頭変位約 500mm まで載荷している。この場合の杭頭荷重と水平変位の関係を図-12 に示す。水平変位 100mm 以降、杭頭荷重が増減するのは、杭、地盤の塑性化の進展に伴い荷重の再配分が起こる等不安定な状態にあるためと考えられる。このような状態でも、杭頭固定の杭は、荷重が急激に低下することは認められない。実験後掘削して杭頭部の破壊状況を観察したところ、いずれの杭も、圧縮側コンクリートは圧壊し、引張側コンクリートには曲げクラックが入り、杭頭から約 60cm の区間に塑性ヒンジが形成されていた。地盤中の杭は気中の実験で見られような急激な耐力の低下が認められず、大きな変形性能を有していることが確認できた。

## 4. まとめ

試験装置を工夫し、粘性土地盤において、杭頭回転固定条件で短杭、長杭の大変形水平載荷実験を実施し、これまで実施した砂質土地盤の実験結果と比較し、以下の事項が明らかになった。

- (1) 地盤の違いによる杭頭荷重と水平変位の関係は、杭頭固定条件の短杭、長杭いずれも、初期荷重段階 (300~400kN) では差異が認められず、杭が損傷した終局荷重以降、砂質土地盤では変位が急増するが、粘性土地盤では荷重が増加する傾向を示し、顕著な差異が認められた。両地盤の変形係数の違いが初期荷重段階に現れないのは、杭の変形挙動に大きい影響を及ぼす表層地盤の変形係数が両地盤でほぼ等しかったこと、杭側面地盤の影響が粘性土地盤において大きいこと等によると考えられる。終局荷重以降の挙動の差異は、粘性土地盤と砂質土地盤の応力の分散性の違いによると考えられる。
  - (2) 終局荷重に近い杭頭変位 35mm 時点の杭前面地盤の挙動は、杭頭固定条件の短杭、長杭いずれも、粘性土地盤の方が地中、地表を含め水平変位が大きく、影響範囲が広い。これも両地盤の応力の分散性の違いによると考えられる。
  - (3) 杭頭固定条件の場合、杭長の違いによる杭頭荷重と水平変位の関係は、砂質土地盤、粘性土地盤のいずれも、同一荷重に対する変位は短杭で大きく顕著な差異が認められた。これより、短杭の杭先端は自由に近い挙動をしたと考えられる。
  - (4) 杭頭固定条件の場合、終局荷重に近い杭頭変位 35mm 時点の杭前面地盤の挙動は、砂質土地盤では、長杭の方が地中、地表を含め水平変位が大きく、影響範囲が広い。一方粘性土地盤では、杭長の違いによる顕著な差異は認められなかった。
  - (5) 粘性土地盤の短杭の場合、杭頭条件の違いによる杭頭荷重と水平変位の関係は、同一荷重に対する変位は杭頭自由の方が大きく顕著な差異が認められた。また、終局荷重に近い杭頭変位 35mm 時点の杭前面地盤の挙動は、杭頭固定の方が水平変位、影響範囲が大きく、杭頭部の変形モードの違いによると考えられる。
  - (6) 砂質土地盤の短杭 (杭頭固定)、粘性土地盤の短杭 (杭頭自由) は水平変位約 100mm、砂質土地盤の長杭、粘性土地盤の短杭、長杭 (いずれも杭頭固定) は約 500mm まで載荷したが、いずれの杭も急激な耐力の低下はみられず、大きな変形性能を有していることを確認した。杭が損傷しても、周辺地盤が杭頭荷重を分担するためと考えられる。
- 以上のような実験結果が得られたが、詳細な地盤挙動

を実験のみから推定することには限界がある。今後は、FEM等の解析手法を用いて実験結果の数値シミュレーションを行い、より詳細な地盤挙動を考察する予定である。

#### 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, 土質工学会第18回土質工学研究発表会, pp.1041-1044, 1983.
- 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.37A, pp.1467-1477, 1991.
- 3) 木村亮, 幸左賢二, 伊藤恭平, 坂本真徳: 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.39A, pp.1385-1394, 1993.
- 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.
- 5) 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, 土質工学会第23回土質工学研究発表会, pp.1447-1448, 1988.
- 6) 大矢 孝, 佐藤 博, 松島 学, 藤嶋 泰輔: 杭頭固定条件における単杭の水平載荷試験とその解析的検討, 土木学会第55回年次学術講演会, 第3部(B), pp.6-7, 2000.
- 7) 佐藤 博, 大矢 孝, 松島 学: 杭基礎の終局挙動に関する実験的研究, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書, 土木学会, pp.15-20, 2001.
- 8) 大矢 孝, 佐藤 博, 松島 学, 山下 俊英, 藤嶋 泰輔: 粘性土地盤における単杭の実大水平載荷試験(その1試験結果), 地盤工学会第36回地盤工学研究発表会, Vol.2, pp.1667-1668, 2001.
- 9) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, IV下部構造編, pp.238-241, 1996.
- 10) (社)地盤工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983.
- 11) 岸田英明, 中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文集, 第281号, pp.41-55, 1979.
- 12) 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 田口敬二, 坂本昭夫: 載荷試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査, 土木研究所資料第2721号, 1989.
- 13) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 杭の載荷試験結果の整理方法, 基礎工, pp.21-30, 1982.
- 14) Chang, Y.L.: Discussion on "Lateral Pile-Loading Test" by Feagin, Trans., ASCE, pp.272~278, 1937.
- 15) 山口柏樹: 土質力学, pp.147-168, 技報堂, 1975.
- 16) (社)日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.246-251, 1997.

(2002. 2. 14 受付)

## STUDY ON BEHAVIOR OF SANDY AND CLAYEY GROUND UNDER LATERAL LOADING TESTS OF FULL-SCALED SINGLE PILES UNDER LARGE DEFORMATION

Hiroshi SATO, Takashi OHYA and Manabu MATSUSHIMA

This paper describes the behavior of sandy and clayey ground under lateral loading tests of full-scaled single piles under large deformation. Most of the real structures have rotation-fixed head, whereas there have been few tests of single piles in its consideration. Also, it is difficult to evaluate the ultimate state of a short-length pile, since the behavior is affected by the rotation of the pile bottom. In this study, lateral loading tests of some cast-in-place piles were conducted in sandy and clayey ground. In the tests, a new apparatus was used to deal with the rotation-fixed head. Finally, the differences of the behavior of the piles and ground under large deformation are considered, from the viewpoint of the difference of ground (sand or clay), pile length (short or long), and rotation condition of pile head (free or fixed), based upon the test results.