

ソイルセメント埋込み杭工法で施工された節杭の水平載荷試験

載荷試験 杭 地盤反力係数

ジオトップ 正会員 本間裕介
 広島大学 正会員 富永晃司
 広島大学 正会員 徐挺

1. はじめに

ソイルセメント埋込み杭工法とは、セメントミルクを注入しながら掘削・攪拌を行うことで造成されたソイルセメント柱に杭を建て込む工法である。この工法で施工された杭は、杭体と掘削孔壁間のソイルセメントの影響から杭の曲げ剛性が增大するため、ソイルセメントと杭体との複合体(以下、複合杭)として考える必要があると指摘されている¹⁾。

複合杭の場合、ソイルセメントにひび割れが生じると曲げ剛性も低下するので、このことが少なくとも水平変位性状に影響を与える可能性がある。また、コンクリート系杭を用いた複合杭の場合には、杭体自身のひび割れによりさらに曲げ剛性が低下することが考えられる。しかし、このような杭の水平挙動について検討された事例は少なく、解決すべき問題が残されている。そこで、杭頭自由の条件でソイルセメント埋込み杭工法により施工された PHC 節杭の水平載荷試験を行った。本報告ではコンクリート系杭としての複合杭の水平挙動について検討した結果を述べる。なお、本報告で示す試験杭の諸元および試験方法等は文献²⁾で既に報告してある。

2. 試験概要

水平載荷試験を行った敷地の土質柱状図と試験杭の姿図および試験杭の諸元を図1および表1にそれぞれ示す。試験地盤は、腐植物を少量混入するが、G.L.-2mまでN値4~6でそれ以深はN値2のほぼ一様なシルトで構成されている。試験杭は、節部径500mm、軸部径400mm、杭長10mのPHC節杭である。杭の施工は、ソイルセメント埋込み杭工法で行った。杭周面に充填したソイルセメントの外径は約550mmである。また、試験杭の造成状態の目視観測から、ソイルセメントは、G.L.+0.2mまで地中部とほぼ同じ形状で造成されていることがわかった。なお、ひずみを計測した位置(G1~G10)を図1に示す。

試験杭と反力杭の関係を図2に示す。載荷方法は、土質工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」³⁾を参考に、一方向多サイクル段階方式を採用した。主な計測項目は、荷重、試験杭の変位量(計4点)および杭体のひずみとした。なお、詳細については文献²⁾を参照されたい。

3. 試験結果

載荷点位置での logH ~ logy 関係および処女荷重時のひずみ分布を、それぞれ図3および図4に示す。図3から荷重50kN付近と荷重100kN付近で明確な2つの折れ点を確認できる。図4より96kN以上の荷重が作用し始める頃から圧縮ひずみが位置G5で増加する現象が顕著に現れていることが読み取れる。この位置はちょうど節部の付け根にあたり、断面形状の変化による影響から圧縮応力が集中したことが原因と推測される。また、同図より108kN以上の荷重が作用すると、引張ひずみが急激に増加する箇所が見られる。これは杭体の引張側にひび割れが生じ、コンクリートの負担応力分がPC鋼棒に転化したために生じたと考えられる。この荷重108kNは、図3の第二折れ点の荷重とほぼ一致していることから、第二折れ点は杭体のひび割れにより生じたと推定できる。

表1 試験杭

杭	杭種	杭径(mm)		肉厚(mm)	EI(N・mm ²)
		節部径	軸部径		
節杭	B	500	400	65	4.20 × 10 ¹³

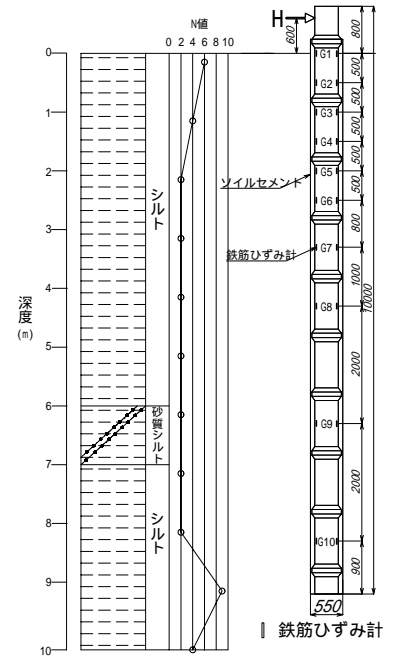


図1 土質柱状図

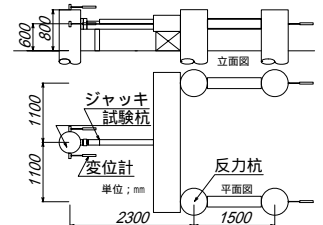


図2 試験杭と反力杭の関係

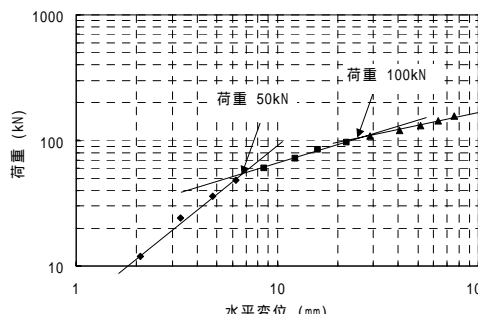


図3 logH ~ logy

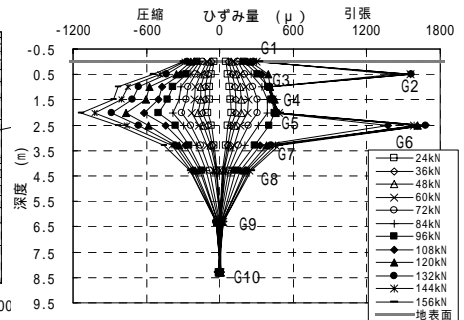


図4 ひずみ分布

The lateral load test for a nodular pile cemented soil composite pile

HOMMA Yusuke(GEOTOP Corporation), TOMINAGA Kohji(Hiroshima Univ.), XU Ting(Hiroshima Univ.)

4. 各物理量の算定

ソイルセメントの性状が杭の水平挙動に影響を与えられらるため、ソイルセメントを杭体の一部とした複合杭として各物理量を算出する。複合杭に生じる曲げモーメント M は、各断面において計測されたひびきより曲率 G_1 を求め、杭体とソイルセメントを含めた複合曲げ剛性 $EpIp_{(+soil)}$ を乗じて求めることとした。ここで、 $EpIp_{(+soil)}$ は、断面 $G1$ がソイルセメントを含み、かつ地表面にほぼ一致した位置にあるため、位置 $G1$ の曲げモーメント $M(EpIp_{(+soil)})$ と G_1 の積を水平荷重 H と突出長 h の積 ($H \times h=M$) として、試験結果から逆算して求めた²⁾。

このように逆算した $EpIp_{(+soil)}$ と曲率 G_1 の関係を図 5 に示す。同図から、曲率が 8.0×10^{-4} より大きくなると、 $EpIp_{(+soil)}$ が低下する性状にあることがわかる。この低下は、ソイルセメントのひび割れにより生じたものと判断できる。したがって、曲率の大きさを表 2 に示す 3 区分の $EpIp_{(+soil)}$ を定めた。

M の算出において、複合曲げ剛性は曲率に応じて表 2 の値を用いた。さらに、求めた M を微積分することで、せん断力 Q 、水平地盤反力 p 、水平変位 y を算出した⁴⁾。これらの、 M 、 y の深度分布を図 6 ~ 図 8 に示す。求めた深度分布は、杭体が弾性範囲と考えられる荷重値 96kN までとした。

図 6 に示す G_1 分布から、荷重値 48kN

時に最大曲率がソイルセメントにひび割れを生じる曲率 (8.0×10^{-4}) を超えていることがわかる。この荷重値 48kN は図 3 の第一折れ点の荷重値 50kN とほぼ一致しており、このことから、第一折れ点はソイルセメントのひび割れにより生じたと推定できる。また、図 8 に示す M 分布の荷重値 96kN 時の最大値は、前述したようにほぼ杭体のひび割れ曲げモーメントと考えられ、その値は設計ひび割れより約 1.7 倍の大きさをもつことがわかった。

5. 水平地盤反力係数の検討

今回、複合杭の水平地盤反力係数 k_{hc} をソイルセメントの性状変化を考慮に入れて算出した。杭の水平抵抗に支配的と考えられる 1/ 程度 (深度 1.5m) を対象に、 k_{hc} はソイルセメントの性状変化を考慮に入れて求めた各深度の水平地盤反力 p をソイルセメント径 $D_s (=550\text{mm})$ と各深度の水平変位 y の積で除して求めた。図 9 に $k_{hc} \sim y$ 関係および k_{hc} を累乗近似して求めた $k_{hc}' \sim y$ 関係を示す。また、同図には建築基礎構造設計指針⁵⁾で示されている式(1)で求めた $k_h \sim y$ 関係も併記した。

$$k_h = k_{h0} \cdot y^{-0.5} \quad k_{h0} = \dots \cdot E_0 \cdot D_s^{0.75} \quad \dots (1)$$

ここに、 k_{h0} ; 定数 (=60) E_0 ; 地盤の変形係数 (=700N, 平均 N 値 =4)

図 9 から、 k_{hc}' は N 値から求めた k_h より大きな値が得られた。これから、ソイルセメント埋込み杭工法による水平地盤反力係数は、原地盤の N 値から算定する方法で安全側に評価できると考えられる。

今回算出した $k_{hc}' \sim y$ 関係を用いて Chang 式から求めた複合杭の曲げモーメント分布と試験結果を図 10 に比較して示した。なお、 k_{hc}' は各荷重時に発生した地表面変位 (図 8) における値とし、その他の解析に用いた諸定数を表 3 に示す。図 10 から、解析値は試験値とよく一致している様子がわかる。

6. まとめ

コンクリート系杭を用いた複合杭の場合、ソイルセメントおよび杭体で生じるひび割れが水平変位性状に影響を与えることを確認した。また、杭体をソイルセメントと杭の複合体として考え、ソイルセメントの性状変化を考慮に入れて求めた水平地盤反力係数 k_{hc}' は、通常の設計で用いられている方法で求めた k_h より大きな値が得られた。さらに、求めた k_{hc}' を用いて行った弾性解析は、試験結果と良い対応を示した。

参考文献； 1) 日本建築学会構造委員会 基礎構造運営委員会：地盤の変形係数評価方法に関する研究の現状 1997.9 pp.101-102 2) 本間裕介他：鋼管と PHC の継杭の水平載荷試験 日本建築学会中国支部研究報告集 (現在投稿中) 3) 土質工学会基準：杭の水平載荷試験方法・同解説 1983 4) 富永晃司他：杭頭自由および固定の単杭が終局状態に至るまでの水平挙動性状に関する理論と実験 構造工学論文集 1991.3 pp.1-10 5) 日本建築学会；建築基礎構造設計指針 2001

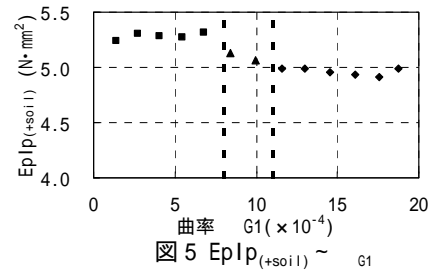


図 5 $EpIp_{(+soil)} \sim G_1$

表 2 $EpIp_{(+soil)}$

区分	曲率 G_1 ($\times 10^{-4}$)	$EpIp_{(+soil)}$ ($N \cdot mm^2$)
	0.0 ~ 8.0	5.28×10^{13}
	8.0 ~ 11.0	5.10×10^{13}
	11.0 ~	4.96×10^{13}

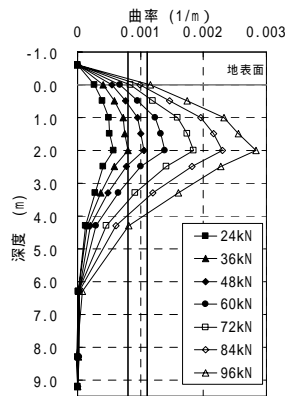


図 6 分布

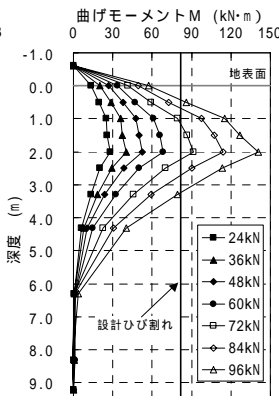


図 7 M 分布

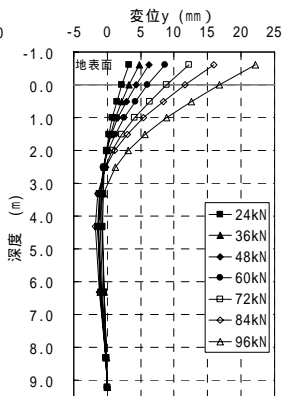


図 8 y 分布

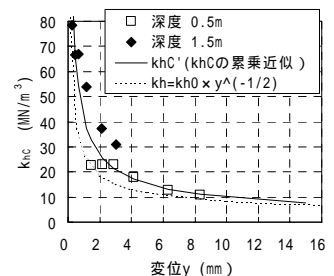


図 9 $k_{hc} \sim y$

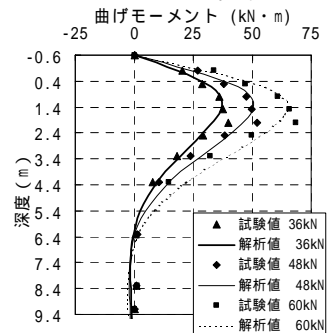


図 10 M 分布の比較

表 3 解析諸定数

荷重 (kN)	khC' (MN/m^3)	曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)
36	20.00	5.28×10^{14}
48	16.85	5.11×10^{14}
60	13.60	4.96×10^{14}