

鋼管とPHCの継杭の水平載荷試験

正会員○本間 裕介*1 同 板東 真平*1
 同 勘 愛軍*2 同 徐 挺*3
 同 富永 晃司*4

載荷試験 継杭 曲げモーメント 剛性

1. はじめに

杭基礎の地震時水平抵抗に関する設計では、外力として建物の慣性力が支配的であると考え、通常、上部構造物の慣性力を杭頭に作用させて設計する。この場合、杭頭の回転を拘束(固定)して行うことが多く、最大曲げモーメント、最大せん断力は杭頭部分で発生する。そのため、杭頭部分に曲げ耐力のある杭を使用し、それより下方の部分には曲げ耐力をあまり重視しない杭を用いる方が経済的な設計となる。例えば、鋼管杭とPHC杭の継杭を用いた設計などである。

この場合、継手位置の上下での曲げ剛性の違いが杭体に発生する曲げモーメントに影響を及ぼす懸念がある。そこで、杭頭自由の条件ではあるが、ソイルセメント埋込み杭工法で地盤中に施工された鋼管杭とPHC節杭との継杭の水平載荷試験を行った。その際、継手位置を地中部最大曲げモーメントが発生する付近としたため、最も厳しい条件下での試験となっている。また、平行して同様な工法で同一地盤にPHC節杭およびSC杭も施工し、水平載荷試験を行っている。

本報告では、これらの試験のうち鋼管杭とPHC節杭の継杭について、試験により得られた曲げモーメント分布から剛性の違いによる曲げモーメントへの影響を検討したので報告する。

2. 試験概要

載荷試験を行った数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。試験地盤は腐植物が少量混入するが、約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、①鋼管杭(杭径400mm、肉厚6mm、長さ2m)とPHC節杭(節部径500mm、軸部径400mm;以下φ500-400と表記、長さ8m)を溶接結合した杭長10mの合成杭の他、②PHC節杭(杭径φ500-400、長さ10m)および③SC杭(杭径500mm、長さ10m)である。施工は、試験杭①、試験杭③および試験杭②の順に、セメントミルクを注入しながら掘削・攪拌を行い造成したソイルセメント柱に杭を建て込むソイルセメント埋込み杭工法で行った。杭周囲に充填したソイルセメントの外径は約550mmである。

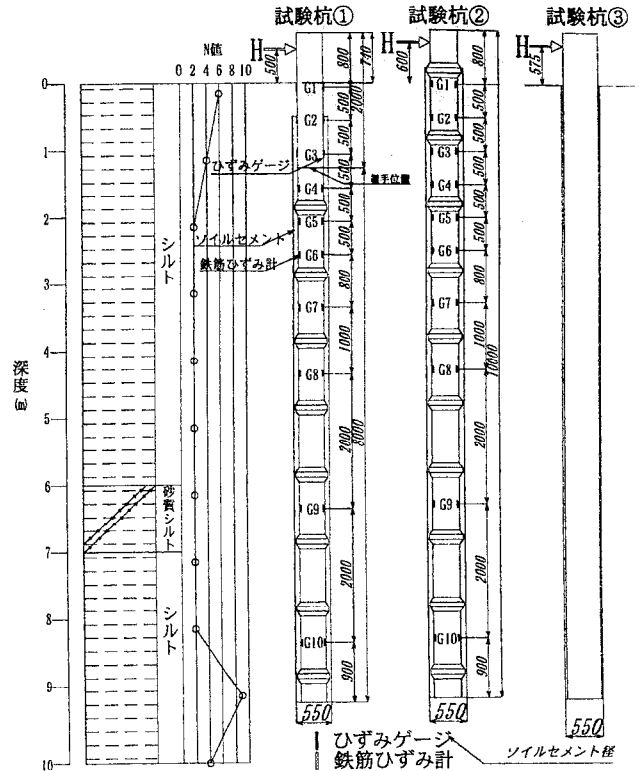


図1 土質柱状図および試験杭の姿図

表1 試験杭の諸元

杭	①		②	③
	鋼管杭	PHC節杭	PHC節杭	SC杭
杭径(mm)	400φ	φ500-400	φ500-400	500φ
杭長(m)	2	8	10	10
肉厚(mm)	6	65	65	80 (鋼管厚6)
EI (N・mm ²)	3.04×10 ¹³	4.20×10 ¹³	4.20×10 ¹³	1.32×10 ¹⁴

なお、試験杭の造成状態の目視観測から、試験杭①のソイルセメントは、図1に示すようにG.L.-0.5mまで造成されておらず、その範囲の地盤は施工前の地盤より緩んだ状態となっていると推測される。この原因としては、腐植物の影響からソイルセメントが流出したためと考えられる。そして、施工に伴ってソイルセメントの流出が止まり、試験杭③では計画通りのG.L.±0mおよび試験杭②では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分かった。

試験杭③を除いて、これらの試験杭にはひずみゲージを設置しており、試験杭①は鋼管部表面に3断面とPHC節杭部のPC鋼棒に7断面(計20点)、試験杭②は10

断面（計 20 点）に配置している。なお、試験杭①および②の最上断面位置（図中の G1 断面）は、それぞれ G.L.-6cm および G.L.±0cm であり、前者の鋼管杭と PHC 節杭の継手位置は、深度 1.26m に位置している。

試験杭と反力杭の全体配置を図 2 に示し、各試験杭の突出長さ、載荷点高さおよび変位計測位置などの基本的関係を表 2 に示しておく。なお、図 2 のように反力杭は 8 本の PHC 節杭（杭径φ650-500）で構成し、それぞれ 2 本を組として H 鋼で結合している。

載荷方法は、地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・

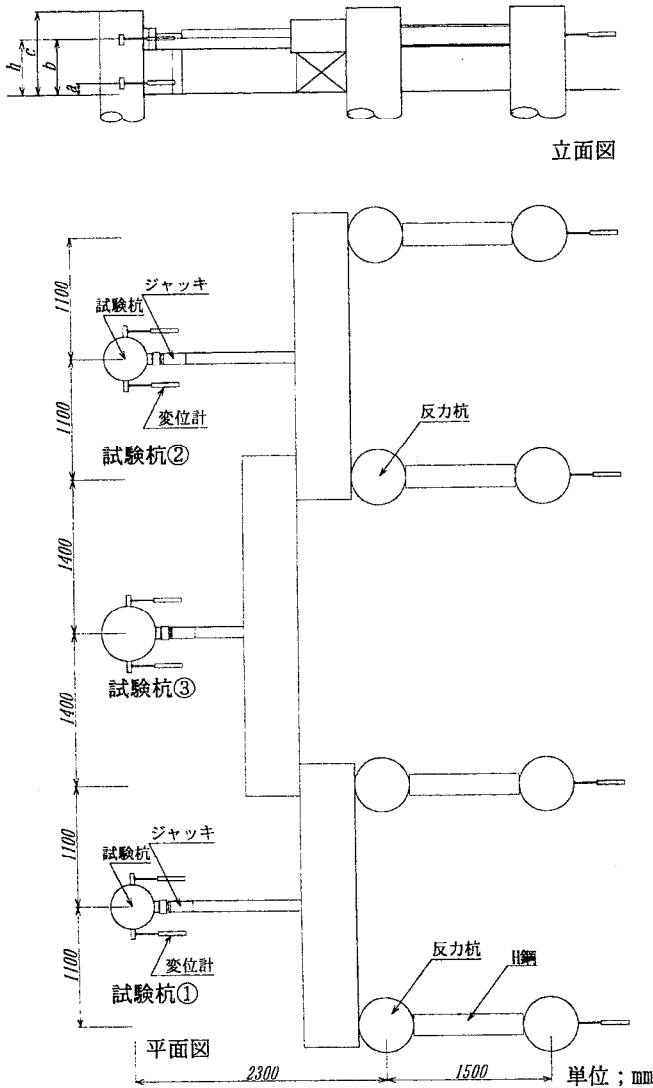


図 2 試験杭と反力杭の関係
表 2 各寸法

高さ (mm)		① 鋼管杭+PHC節杭	② PHC節杭	③ SC杭
a	変位計1	100	-	100
b	変位計2	500	600	575
c	突出長さ	740	800	770
h	載荷点	600	600	575

②PHC節杭の変位計1は杭頭部

同解説」を参考に、試験杭①および②では一方向多サイクル段階方式を採用した。また試験杭③は、一方向段階方式と一方向連続方式の両方で行った。試験杭①の載荷計画を図 3 に示しておく。

試験時の計測項目は、荷重、試験杭の変位量（計 4 点）および杭体のひずみ量とし、これらの計測間隔は、増荷時に各荷重段階 0 分および 3 分、0 荷重時の 0,2,4,8,14 分とした。

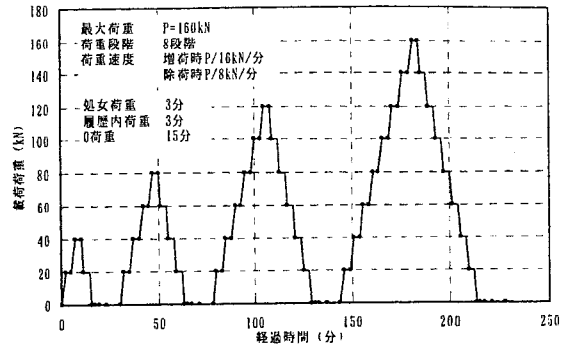


図 3 試験杭①の載荷計画

3. 実験結果

本報告で対象とする試験杭①（鋼管杭と PHC 節杭の合成杭）の試験で得られた結果のうち、載荷点位置での荷重～変位関係および処女荷重時のひずみ分布を、それぞれ図 4 および 5 に示す。

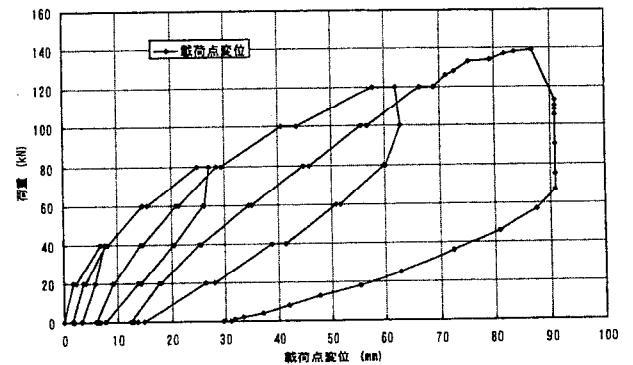


図 4 荷重～変位関係

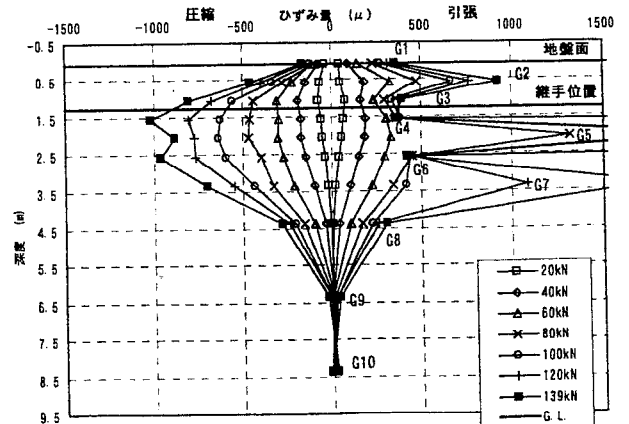


図 5 ひずみ分布

図5において、PHC節杭部分のひずみ分布に着目すると、引張ひずみが急激に増加する箇所が見られるが、これは杭体にひび割れが発生し、コンクリートの応力負担分がPC鋼棒に転化したためと考えられる。この現象は、初めに荷重80kN時に深度2.06m、続いて荷重120kN時に深度3.36mの位置で生じており、図4で荷重保持間のクリープ変位が80kN以上の荷重から増加する現象とも一致している。ただし、この現象が現れた後も荷重の増加は認められた。

つぎに、計測されたひずみから曲げモーメントの深さ方向分布を、下式で求めることとした。

$$\phi_i = (\varepsilon_{ci} + \varepsilon_{ti}) / D \quad \dots(1)$$

$$M_i = EI_{(+soil)} \times \phi_i \quad \dots(2)$$

ここに、 ϕ : 曲率 (1/cm)

$\varepsilon_c, \varepsilon_t$: 圧縮側ひずみ、引張側ひずみ (μ)

D : ひずみ計の取付け位置の直径 (cm)

鋼管杭; 40cm, PHC節杭 33.5cm

添え字 i : ひずみゲージの位置 (G1~G10)

上式における曲げ剛性 EI としては、杭体とソイルセメントを含めた合成曲げ剛性 ($EI_{(+soil)}$) として評価する必要がある。しかし、ソイルセメントと鋼管杭の曲げ剛性 $E_s I_s (+soil)$ は、前述したようにソイルセメントの造成が一部欠損していたため、適切に評価することができない。したがって、以降の考察には鋼管杭部分の曲げモーメントは無視して、PHC節杭部分の曲げモーメント分布のみを対象としていることをお断りしておく。

ここに、PHC節杭部分の合成曲げ剛性 $EpIp_{(+soil)}$ は、試験杭②の G1 断面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 (G.L. ± 0 cm) にあることから、試験杭②の G1 における合成曲げ剛性を実験結果から逆算する方法を採用した。具体的には、水平荷重と突出長の積が G1 位置の曲げモーメントであるので、各荷重段階における合成曲げ剛性は、次式により逆算できる。

$$EpIp_{(+soil)} = (H \times h) / \phi_{G1} \quad \dots(3)$$

ここに、H : 水平荷重 (kN)

h : 載荷点高さ (cm)

ϕ_{G1} : G1 位置の曲率 (1/cm)

上式に基づいて逆算した曲率 ϕ_{G1} と合成曲げ剛性 $EpIp_{(+soil)}$ の関係を図7に示す。同図より、曲率が大きくなるに従い $EpIp_{(+soil)}$ が低下する性状のあることが分かった。したがって、曲率の大きさにより表3に示す3区間の合成曲げ剛性 $EpIp_{(+soil)}$ を定め、全ての試験におけるPHC節杭部分の曲げモーメントをこの区分の下で評価することとした。

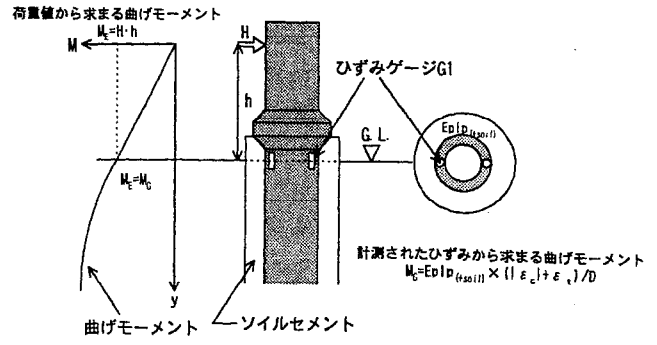


図6 $EpIp_{(+soil)}$ の逆算方法

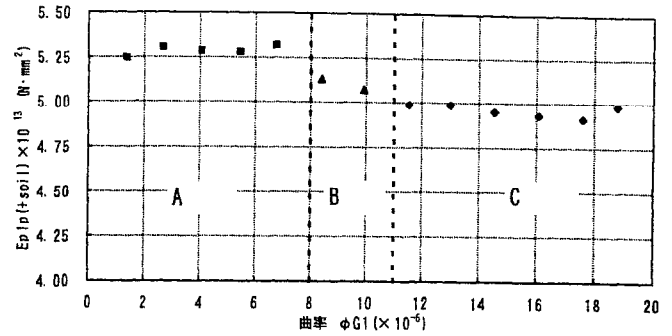


図7 ϕ_{G1} と $EpIp_{(+soil)}$ の関係

表3 $EpIp_{(+soil)}$ の値

範囲	曲率 ϕ_{G1} ($\times 10^{-5}$)	$EpIp_{(+soil)}$ ($N \cdot mm^2$)
A	0.0 ~ 8.0	5.28×10^{13}
B	8.0 ~ 11.0	5.10×10^{13}
C	11.0 ~	4.96×10^{13}

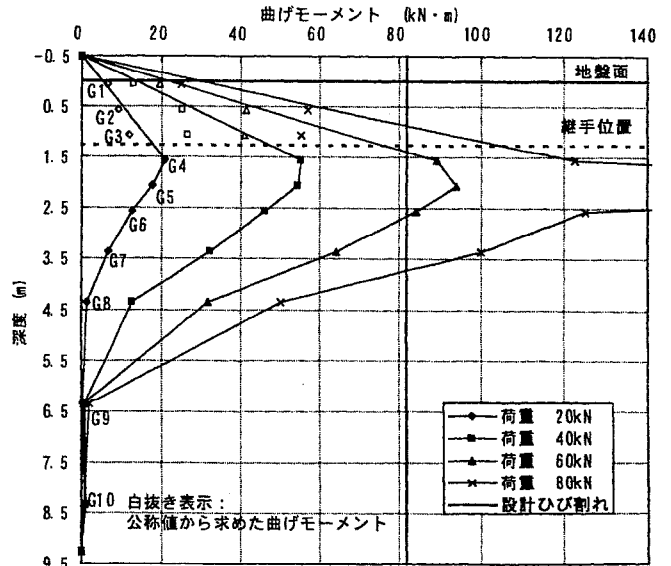


図8 曲げモーメント分布

式(3)および表3に基づいて計算した試験杭①の曲げモーメント分布を図8に示す。ただし、前述したように鋼管杭部分は、PHC節杭の位置G4と載荷点を直線で結んで表示している。なお、図8中には鋼管杭の曲げ剛性を杭材の公称値 $E_s I_s = 3.04 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ として求めた曲げモーメントの値もプロットしている。

この図から、全体的に荷重の増加とともに地盤反力が低減し、地中部最大曲げモーメントの位置が深くなっていく様子が分かる。なお、位置G1,G2の公称値から求めた鋼管杭の曲げモーメントの値は、直線で結んだ曲げモーメント分布とよく対応している。すなわち、この部分のソイルセメント欠損状況とほぼ一致しており、杭体みの曲げ剛性に近い結果となっている。さらに、全体的に曲げモーメント分布に特異な点が見られないことから、曲げ剛性の違いが与える影響は少ないと結論できた。

一方、試験杭①のような合成杭に関する設計を行うことを考えて、弾性支承梁理論に基づく多層地盤解析法による解析結果と実験結果との比較・検討を以下で行う。この杭の一次設計レベルとなる荷重 40kN を対象とし、基準水平地盤反力係数を次式で与えた。ただし、通常的设计にならってこの解析では各杭の曲げ剛性として公称値を用いた。

$$k_{h0} = \alpha \times E_0 \times B^{3/4} \quad \dots(4)$$

ここに、
 α : 定数 (=60)
 E_0 : 地盤の変形係数 (=700N)
 平均 N 値はボーリング柱状図によった
 B : 杭径(cm)
 鋼管 ; 40cm
 PHC節杭 ; 節部径 50cm

解析値と実験値を比較した曲げモーメント分布を図9に示す。この図より両者の曲げモーメント分布の性状は対応しているが、全深度において実験値が解析値を下回ることが分かる。この結果から本試験杭のような曲げ剛性の異なる杭を継いだ場合でも、通常的设计を行えば一次設計レベルでは安全側に評価できることが確認できた。

さらに、杭頭固定の条件においても同様な解析を行い、合成杭の有効性をPHC節杭単体の場合と比較して検証することを試みることにし、図10に短期許容曲げモーメント程度の杭頭曲げモーメントが発生する荷重時の両者の曲げモーメント分布を示した。ただし、杭の曲げ剛性の違いによる比較を行うため、杭頭変位量に応じた水平地盤反力係数の低減は行っていない。

図10より、合成杭はPHC節杭の約2倍の荷重が作用するまで短期許容曲げモーメントに達していないことが判明した。また、合成杭のPHC節杭部分の最大曲げモーメントの値もその短期許容曲げモーメントの値を下回

る結果となっている。

以上のことから、杭頭固定の条件で合成杭を用いた場合、杭の水平耐力は約2倍の値に向上したと結論できよう。

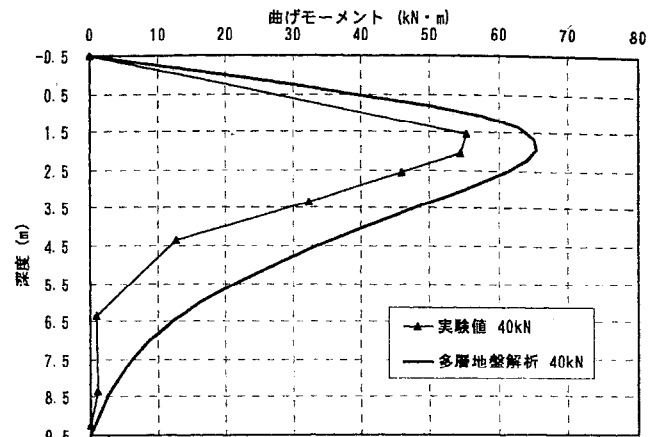


図9 解析値と実験値の比較 (曲げモーメント分布)

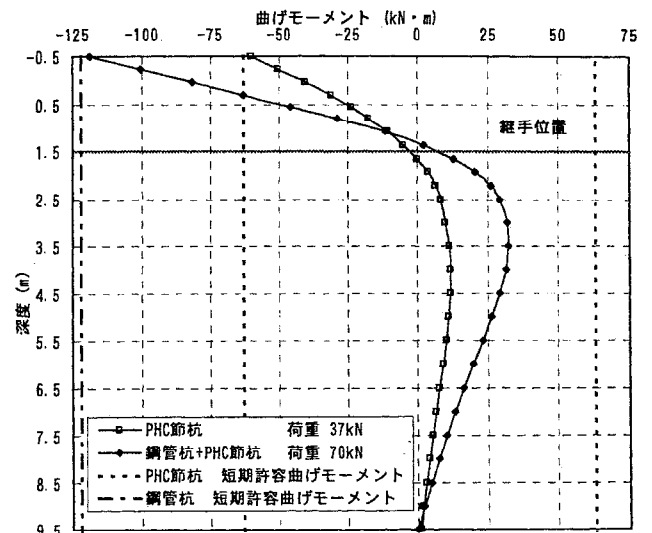


図10 杭頭固定の条件での合成杭とPHC節杭の比較

4. まとめ

鋼管杭とPHC節杭をつないだ合成杭の水平載荷試験から得られた曲げモーメント分布より、曲げ剛性の違いが曲げモーメントへ与える影響は少ないことを確認した。また、実務の設計で行う多層地盤解析は十分に安全側の設計であること、さらにPHC節杭の杭頭側に鋼管杭をつなぐ合成杭の有効性を示した。

参考文献

- (1) 地盤工学会 ; 杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983
- (2) 日本建築学会 ; 建築基礎構造設計指針, 2001

*1 (株)ジオトップ 設計技術本部
 *2 広島大学大学院国際協力研究科大学生
 *3 広島大学大学院国際協力研究科助手, 工博
 *4 広島大学大学院国際協力研究科教授, 工博

GEOTOP Corporation, Design & Engineering Division
 Grad. Student, School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ.
 Res. Assoc., School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ., Dr. Eng.
 Prof., School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ., Dr. Eng.