

软土地基中 PHC 管桩水平受荷性状的试验研究

王 钰^{1,2}, 林 军³, 陈锦剑¹, 王建华¹

(1. 上海交通大学 土木工程系, 上海, 200030; 2. 中铁十三局集团第三工程有限公司, 辽宁 盘锦 124021;
3. 浙江省绍兴市水利局, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 桩在水平荷载作用下的受力性状是一个复杂的桩土相互作用过程。针对软土地集中预应力管桩受水平荷载的问题, 结合工程实例, 通过水平静载试验, 实测得到了水平荷载作用下 PHC (超长预应力) 桩与土共同作用时的工作性状, 分析了 PHC 桩受水平力作用时的内力、变形和临界承载力以及地基土的水平抗力比例系数。试验结果可为今后同类地区水平受荷桩的设计与研究提供参考。

关 键 词: 水平受荷; PHC 桩; 软土; 共同作用; 试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Field test for the behavior of pre-stressed pipe piles in soft subsoil under lateral load

WANG Yu^{1,2}, LIN Jun³, CHEN Jin-jian¹, WANG Jian-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Third Company, China Railway Thirteenth Bureau Group Corporation, Panjin 124021, China; 3. Shaoxing Municipal Water Resource Bureau of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The behavior of pile under lateral load is a very complex process of pile-soil interaction. The interaction behavior of laterally loaded PHC piles (pre-stressed pipe pile with super high strength) in soft subsoil is analyzed by field test. The internal force and deformation of piles, the critical bearing capacity, and lateral modulus of subgrade reaction can be obtained from the test results. These experiment results are useful for the practical engineering and analysis of PHC piles in same areas.

Key words: lateral load; PHC piles; soft subsoil; interaction; field test

1 前 言

在桥梁基础、水工结构、港工码头及海洋平台等工程中, 桩基础除了承受竖向荷载之外同时还承受水平荷载。桩顶受横向荷载的作用, 桩和地基的破坏性状因桩的几何尺寸、桩顶约束条件、桩身材料强度和地基土特性等差异而不同。根据地基反力假定的不同, 对水平受荷桩的分析方法大致有 3 类^[1]: 一是用极限平衡法 (又名极限地基反力法) 计算刚性短桩, 假定承载力极限状态完全由桩侧土的屈服引起; 二是弹性地基反力法包括张氏法、m 法、C 法、K 法和双参数法等; 三是复合地基反力法包括考虑土体非线性效应的 P-y 法^[2, 3]等。在我国目前的设计规范中^[4], 关于水平荷载作用下桩基的计算仍采用 m 法、C 法、K 法等单一参数法。由于桩在水

平荷载作用下的受力性状是一个复杂的桩土相互作用过程, 这些分析方法都不能很好地描述水平荷载作用下桩土共同工作的机理。本文结合浙江某综合水利工程, 通过深厚软土地基中的桩基水平静力试验, 分析了水平荷载作用下超长预应力管桩 (PHC 桩) 与地基土共同作用的工作性状, 从而为 PHC 桩的内力和变形分析提供了可靠依据, 可以为今后同类地区水平受荷桩的设计与理论研究提供参考依据。

2 试验概况

2.1 工程地质概况

某水利枢纽及堵坝、大桥系列工程位于靠近江口的深厚软土冲积平原。根据地质资料, 工程场地的土层基本情况为 II₀ 砂质粉土: 灰黄色, 呈千层

饼状，稍密，中等压缩性，局部高压缩性，为近期沉积物。II₄ 砂质粉土：灰黄色，微层理发育，呈千层饼状；中密-密实，局部稍密，中到低压缩性。III₁ 淤泥质粘土、粉土互层：灰色-灰黑色，土质不均，呈千层饼状。淤泥质粘土的层厚一般 3~5 mm，流塑；粉土以砂质粉土为主，局部可为中细砂，层厚一般为 1~2 mm，稍密，总体为高压缩性。III₂ 淤泥质粉质粘土夹粉土：灰色-灰黑色，土质不均，微层理发育，呈千层饼状，高压缩性。IV 粉质粘土、粉土互层：灰色，土质不均，微层理发育，呈千层饼状，夹细小白色贝壳碎片。粉质粘土层厚一般为 5~15 mm，软塑-流塑，粉土以砂质粉土为主，层

厚一般 3~10 mm，稍密，中等压缩性-高压缩性。IV_L 淤泥质粘土：灰色，流塑，高压缩性。一般夹层厚度在 0.5~8.7 m。V 粉砂：灰色，上部为砂质粉土或粘质粉土，上部偶夹直径 2~10 mm 可塑状粉质粘土团块，局部含直径为 1~3 cm 卵石，中密-密实，中等压缩性-低压缩性。

各土层的基本物理力学指标见表 1。地层钻孔柱状图如图 1 所示。为了控制基础沉降，并确保基础稳定，采用 55~65 m 长的 C80 预应力钢筋混凝土管桩（PHC）。

表 1 土层物理力学指标统计参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of the soils

层号	土层名称	层顶深度 /m	含水量 <i>W</i> /%	重度 <i>r</i> /kN·m ⁻³	孔隙比 <i>e</i>	塑性 指数 <i>I_p</i>	液性 指数 <i>I_L</i>	粘聚力 <i>c</i> /kPa	内摩 擦角 /(°)	压缩模量 <i>E_s</i> 0.1-0.2 /MPa	标贯 击数 <i>N</i> /次	<i>q_c</i> /MPa	<i>f_s</i> /kPa
II ₀	砂质粉土	0	27.3	19.0	0.804	5.5	0.40	9.0	32.3	14.88	10.3	0.5~3.0	5~40
II ₄	砂质粉土	8.2	25.4	19.2	0.760	5.4	0.39	7.0	34.2	13.69	16.9	4.0~12.0	60~130
III ₁	淤泥质粘土、粉土互层	13.7	40.1	17.7	1.154	14.2	1.31	16.0	7.7	3.04	10.2	0.4~1.0	10~20
III ₂	淤泥质粉质粘土夹粉土	24	34.3	18.2	1.018	13.7	1.02	21.0	9.8	3.89	12.3	0.8~1.1	10~18
IV	粉质粘土、粉土互层	44	30.1	18.5	0.918	13.8	0.72	27.0	13.4	4.96	13.0	1.2~2.5	30~60
V	粉砂	60.4	21.8	19.5	0.678			6.0	33.3	11.18	27.1	7.0~11.0	50~90

2.2 基桩概况与试验现场布置

共 4 根试桩，呈菱形布置，桩间距为 3.55 m。基桩为 AB 型 PHC 管桩，桩径为 800 mm，壁厚 110 mm，桩尖开口，单桩长约 65.6 m。沉桩后休止期超过 25 d 再进行试验。

结合竖向静载和水平静载试验综合考虑桩身钢筋应力计的布置。静载试验时，应力计布置在土层分界面，当土层较厚时，在该层中部适当增加断面；为准确测试水平静载下桩身弯矩分布，一般在地面下 10 倍桩径内的测试断面间距不超过 1 倍桩径，但在 PHC 管桩上布置应力计难度较大，在 10 倍桩径深度范围内的应力计的间距放大至 2~3 m。根据以上原则，在 T1、T3 桩上各布置了 10 个断面，每个断面 2 只钢筋应力计，钢筋计布置见图 1。

2.3 加载方法

水平静载测试时采用 T1 桩对 T2 桩、T3 桩对 T4 桩两两对推提供反力。采用快速荷载维持法进行试验，桩头自由。荷载分级：试验时荷载分级施加，T1 桩荷载增量为 30 kN，最大试荷载为 450 kN；T3 桩荷载增量为 20 kN，最大试荷载为 440 kN；位移观测：每级荷载施加后，按第 0，5，15，30，45，60 min 各测读 1 次基桩各表位移量后，施加下一级荷载；终止加载：T1、T2 桩及 T3、T4 桩水平位移

接近或超过 30 mm 时，终止加载。

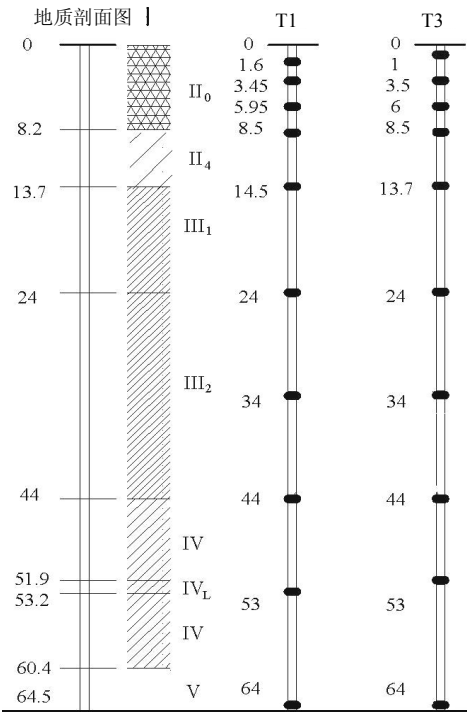


图 1 土层分布及 T1、T3 桩钢筋计布置图(单位: m)

Fig.1 Distribution of soil strata and layout of stress gages for reinforced bars at piles T1 and T3(unit: m)

3 试验结果与分析

3.1 竖向抗压静载荷试验结果

各试桩的竖向抗压静载荷试验结果见表 2。卸载后的桩顶回弹率在 74 %~94 %之间,回弹率较高,表明卸载后桩身混凝土回弹性较好。在最大试验荷载下桩身混凝土完整性较好。对 T1、T3 桩在各级荷载作用下的桩身轴力、桩侧摩阻力和端阻力分析可知,随着荷载的增加,上部土层的摩阻力先达到峰值,并逐渐往下传递。T1 桩在 8 100 kN 荷载作用下的端阻力为 849 kN,占桩顶荷载的 10 %; T3 桩在 8 100 kN 荷载下的端阻力为 564 kN,占荷载的 7 %; 2 根基桩在 8 100 kN 荷载下的摩阻力、端阻力分布规律相似。随着桩顶荷载的增大,桩端阻力占承载力的比例有所提高。T3 桩在 10 530 kN 荷载作用下的桩端阻力为 2 035 kN,占桩顶荷载的 19 %。

表 2 单桩竖向静载荷试验结果

Table 2 Results of the vertical load test for single pile

桩号	最大荷载 /kN	最大桩顶沉降 /mm	残余沉降 /mm	回弹率 /%	极限承载力 /kN
T1	8 100	17.85	1.3	93	>8 100
T2	8 100	16.02	0.89	94	>8 100
T3	10 530	29.41	7.71	74	>10 530
T4	9 720	20.02	3.6	82	>9 720

3.2 单桩水平位移

根据水平静载试验结果得到试桩的水平力-位移和水平力-位移梯度关系曲线如图 2、图 3 所示。T1~T4 试桩在最大试验荷载所对应的最大水平位移 y_0 分别为 20.16, 32.5, 26.64, 20.58 mm。

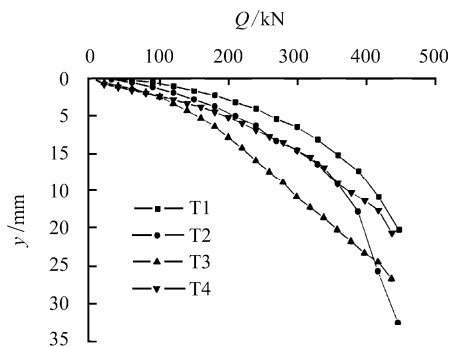


图 2 试桩水平力-位移关系曲线

Fig.2 The horizontal displacement-load curve of test piles

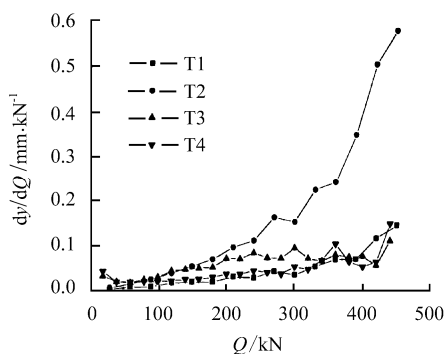


图 3 水平力-位移梯度关系曲线

Fig.3 The displacement gradients-horizontal load⁴¹ relationship of piles

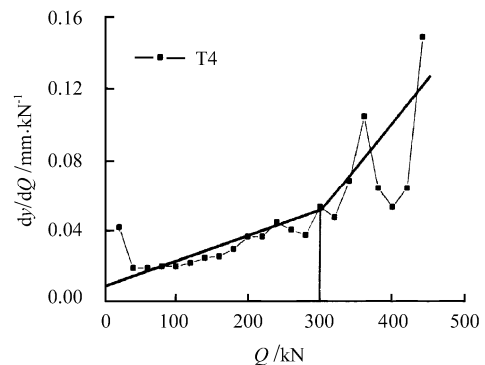
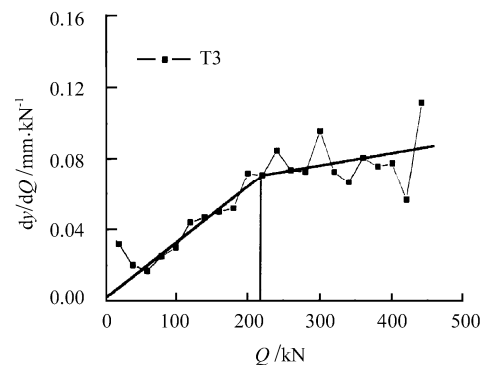
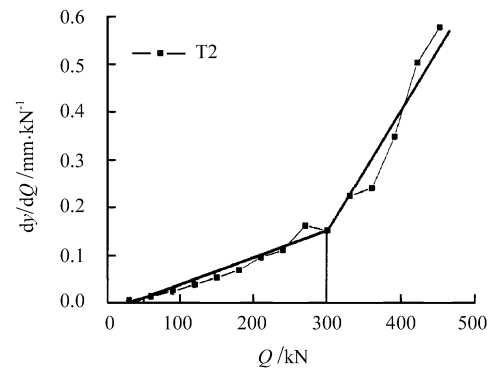
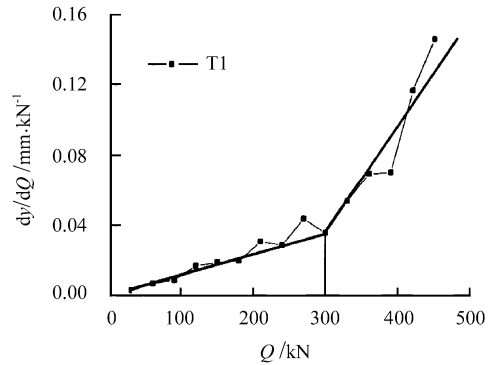


图 4 水平力-位移梯度关系分析

Fig.4 Analysis of displacement gradients-horizontal load relationship

3.3 水平临界荷载

对荷载-位移梯度关系曲线进行的分析如图 4

所示。确定其第一直线段终点所对应的荷载为单桩的水平临界荷载,得到 T1、T2、T4 的临界荷载 Q_{cr} 为 300 kN, T3 的临界荷载为 220 kN, 临界荷载所对应的水平位移分别为 6.41, 9.47, 9.18, 9.48 mm。

3.4 桩身弯矩

由桩身各点应变计的读数可以计算出 T1 和 T3 两根试桩在各级荷载下完整的弯矩分布, 见图 5。图 6 为桩身最大弯矩 M_{max} 与水平荷载 Q 的关系, 图 7 为 T1 和 T3 最大弯矩截面处 (分别为 -2.94 m 和 -5.44 m) 的钢筋应力和水平荷载的关系。

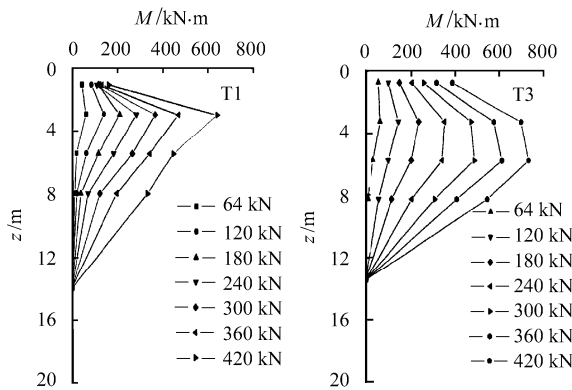


图 5 水平力作用下的桩身弯矩分布
Fig.5 Bending moment distribution of pile under horizontal load

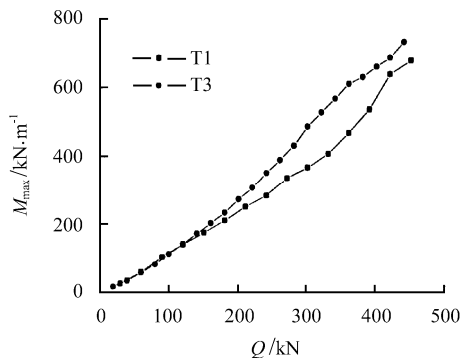


图 6 桩身最大弯矩与水平力关系
Fig.6 Relationship between maximum bending moment and horizontal load

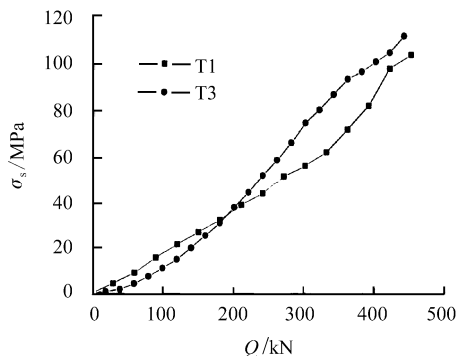


图 7 最大弯矩截面处钢筋拉应力与水平力关系

Fig.7 Relationship between tensile stress of reinforcement steel bar and horizontal load

3.5 水平抗力比例系数

根据前面的分析可以按 m 法^[1]计算临界荷载所对应地基土水平抗力系数的比例系数 m 。各试桩的最大试验荷载的地基土水平抗力比例系数 m 分别为 25.8, 13.4, 8.4, 13.4 MN/m^4 。

3.6 分析小结

T1 和 T3 桩的应力测试表明, 埋深 13.5 m 及其以下各测点的应力均为零, 因此桩长的增加对于单桩的水平承载力并无明显贡献。T1 桩的最大弯矩点钢筋应力出现在水平推力点以下 2.99 m 处。T3 桩的最大弯矩点钢筋应力在 220 kN 前出现在水平推力点以下 2.99 m, 在 220 kN 后最大弯矩点位置向深部发展, 出现在水平推力点以下 5.77 m 处。

水平试验时, 检测场地的堆重对水平位移的成果有一定的影响, 故建议该工程地基土水平抗力系数的比例系数取低值, 即 $m=8.4 \text{ MN}/\text{m}^4$ 。但是堆重对荷载-位移梯度关系曲线的趋势影响较小, 可取 4 根桩的平均临界荷载作为该工程地基土的临界荷载。根据以上分析, 可以认为, 该工程地基土的临界荷载为 280 kN, 水平力影响深度在 13.5 m 以内, 桩身最大弯矩出现在 2.99 ~ 5.77 m 之间。

4 结 语

水平受荷桩在各类基础工程中应用广泛, 但由于其受力后桩土相互作用的性状极为复杂, 至今没有很好的分析计算方法。本文通过浙江某综合水利工程单桩的水平静载试验, 分析了软土中预应力管桩 (PHC) 在水平荷载作用下的工作性状, 讨论了其变形与受力特点。试验结果对今后同类地区水平受荷桩的设计与理论研究具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [2] Brown D A, Morrison C, Reese L C. Lateral load behavior of pile group in sand[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 1988, 114(11):1 261 - 1 276.
- [3] 王梅, 楼志刚, 李建乡, 等. 水平荷载作用下单桩非线性 m 法试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 23 - 26.

- [4] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].