

DOI: 10.11779/CJGE2017S2042

黄河冲积平原 PHC 管桩双桩水平承载性能现场试验研究

亓 乐¹, 宋修广^{2, 3}, 张宏博^{2, 3}, 周志东^{2, 3}, 岳红亚^{2, 3}

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061;

3. 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 目前规范中管桩的水平承载设计仍参考普通灌注桩, 造成设计偏于保守。为了揭示管桩双桩在水平荷载下的承载机理及群桩效率综合系数的安全储备值, 结合黄河冲积平原某工程进行了现场试验。结果表明: 管桩双桩承载力试验值大于规范计算结果, 得到的群桩效率系数是规范法计算值的 1.20~1.35 倍。研究成果可为今后同类地区水平承载管桩的设计工作提供参考依据。

关键词: 管桩; 双桩; 水平承载; 现场试验; 群桩效应系数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S2 - 0171 - 04

作者简介: 亓 乐(1981 -), 男, 山东淄博人, 博士, 高级工程师, 主要从事电力工程勘察和地基处理等领域的科研工作。E-mail: qile@sdepci.com。

Field tests on bearing behavior of double pipe piles under horizontal load in Yellow River alluvial plain

QI Le¹, SONG Xiu-guang^{2, 3}, ZHANG Hong-bo^{2, 3}, ZHOU Zhi-dong^{2, 3}, YUE Hong-ya^{2, 3}

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Ltd, Jinan 250013, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong

University, Jinan 250061, China; 3. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Jinan 250061, China)

Abstract: During the past decades, the design of horizontal bearing pipe piles has still referred to that of bored piles, as a result, the conservative design has been found frequently. In order to get the bearing mechanism and pile group effect coefficient of double pipe piles under horizontal load, field tests are carried out. The test results show that the bearing capacity of double piles are larger than the calculated results from the China's Technical Code for Building Pile Foundations. The Coefficients of pile group effect of model tests are approximately 1.20 to 1.35 times than the calculated results from the Code. The research results are useful for the design of pipe piles under horizontal load in the same areas.

Key words: pipe pile; double piles; horizontal bearing capacity; field test; coefficient of pile group effect

0 引 言

预应力混凝土管桩在港口、岸坡、高桩码头、大跨度桥梁、电厂冷却塔、海洋平台等工程中主要承受水平向荷载作用。中国的设计规范中关于水平荷载作用下桩基的计算主要采用 m 法^[1-2], 设计依据是单桩水平承载试验的结果。单桩水平承载试验一般是基于顶端自由、尽量接近地表、试验桩与锚桩距离较大等条件开展工作。而实际工程桩多以群桩形式存在, 桩基锚入基础承台且承台刚性较大, 建构基础埋置较深。因此试桩的水平承载设计与实际工程桩受力状态有一定的差别, 没有充分考虑桩基顶端的承台约束、打桩后桩间土的挤密作用、桩基顶端土质与试验条件的约束差别、承台侧回填土的约束、群桩的相互影响因素等, 工程桩设计相对比较保守。

岳红亚等^[3]、宋修广等^[4]对群桩的水平承载特性

进行了数值分析, 刘汉龙等^[5-6]对 PCC 单桩进行过现场水平试验, 卢成原等^[7]对双桩支盘桩进行了室内模型试验, 但是关于 PHC 管桩群桩的现场试验研究成果较少。

为充分发挥预应力混凝土管桩的承载特性, 确定群桩水平承载力的安全储备, 优化完善桩基设计计算理论及方法, 进行了现场管桩双桩的水平承载试验, 深入研究管桩基础在水平荷载作用下工作性状, 并确定规范计算群桩效率综合系数的安全储备值, 为工程设计阶段群桩水平承载力的合理取值及设计优化提供依据。

1 试验场地工程地质条件

试验现场位于黄河下游冲积平原某电厂工程, 厂

表 1 地基土的主要物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical parameters of ground soils

地层名称	含水率 w/%	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	压缩模量 E_s/MPa	标贯击数 /击	侧阻力 f_s/MPa	锥尖阻力 q_c/kPa
②粉土	28.4	19.3	0.755	24	22.9	16.8	4.2	1.986	44.7
③粉质黏土	28.2	19.3	0.767	14	13.2	8.3	4.4	0.896	27.2
④粉土	24.9	19.6	0.678	23	26.2	20.8	8.2	2.665	41.3
④ ⁻¹ 粉质黏土	39.1	18.1	1.038	19	16.0	8.6	4.8	1.092	22.2
⑤粉土	23.9	19.6	0.673	23	28.2	19.9	21.8	10.912	152.4
⑥粉质黏土	22.9	20.1	0.623	22	17.5	10.1	6.3	1.262	38.9
⑦粉土	16.5	20.1	0.532	26	30.4	28.9	21.3	9.107	169.1
⑧粉质黏土	24.9	20.0	0.652	66	11.2	12.3	14.6	2.285	86.8
⑨ ⁻¹ 粉土	24.3	19.7	0.667	8	24.8	16.2	24.8	6.636	150.9
⑨粉砂	20.5	18.5	0.716	/	26.8	22.4	59.9	23.300	328.5

址区上部土层工程性质较差，承载力仅为 90~120 kPa，且粉土层在 7 度地震烈度时产生液化，承载力及抗变形能力不能满足主要建筑物对地基强度的要求，需采用桩基并以⑨层粉砂作为桩基持力层。各地层岩性主要特征及分布规律如下：①杂填土：主要成分为灰渣、粉煤灰及少量碎石、砖块等，松散，厚度 0.90 m。②粉土：稍密，层厚 1.50 m。③粉质黏土：可塑状态为主，局部软塑状态，层厚 2.40~3.50 m。④粉土：稍密，厚度 3.30~4.00 m。⑤粉土：中密，局部相变为粉砂，厚度 3.20~4.70 m。⑥粉质黏土：可塑状态，厚度 1.40~3.30 m。⑦粉土：中密，饱和。该层以粉土为主，局部相变为粉砂，层厚 3.65~4.15 m。⑧粉质黏土：可塑—硬塑状态，厚度 3.50~6.20 m。⑨粉砂：密实，饱和，厚度 7.50~10.90 m。⑩粉质黏土：硬塑状态，最大揭露厚度 8.40 m。

各地层的基本物理力学指标见表 1，其中含水率试验采用烘干法；密度试验采用环刀法；剪切试验采用快剪法；固结试验采用标准固结试验法，稳定标准每 1 小时变形量≤0.01 mm，等级分别采用 50，100，200，400 kPa。

2 现场试验方案设计

本次进行了 3 组单桩的水平荷载试验，并结合工程桩进行了 2 组群桩承台的水平荷载试验。试验按检测规范^[8]的要求进行，加载方法为慢速维持荷载法。相邻工程桩提供反力，千斤顶施加水平推力。通过在桩顶安设量测仪表，监测其在各级水平荷载下的位移，并依此确定桩顶位移与水平荷载的关系，确定管桩的水平承载力。

2.1 试验桩

采用的试验桩型号为 PHC-AB-600-130-25，预应

力管桩类别为 AB 桩，外径为 600 mm，壁厚 130 mm，桩长为 25 m。

2.2 加载及反力系统

水平加载系统由压力传感器、油压千斤顶、传力架组成（图 1）。千斤顶最大加载 100 t，使用油泵控制器控制加载，以压力传感器测读压力。千斤顶作用力水平通过桩身轴线，为防止作用点处产生应力集中导致局部挤压破坏，须用钢垫块进行局部补强。试验反力系统由相邻工程桩的基础承台提供。



(a) 单桩 (b) 双桩

图 1 试验装置图

Fig. 1 Devices of pile tests

2.3 测试系统

水平位移量测系统主要包括位移的量测仪表和基准梁（图 2）。在群桩承台背面面的对称位置上下设置机械式千分表，千分表通过基准梁固定。测量数据由试验人员读取，试验仪器均由国家计量部门进行检定，并在运行周期内。其中基准桩应设置在试验桩及结构反力影响范围之外。

2.4 试验加载方法

根据勘察资料，预估单桩最大荷载。加载时取预估最大荷载的 1/10~1/15，作为每级荷载的加载增量（表 2）。



图 2 量测系统

Fig. 2 Measuring system

表 2 水平加荷分级

Table 2 Grades of horizontal loading

工况	级数	1	2	3	4	5	...	20
单桩 600 mm	荷载 /kN	10	20	30	40	50	...	200
群桩 1×2-4D		40	80	120	160	200	...	800
群桩 2×1-4D		40	80	120	160	200	...	800

群桩试验中： $m \times n$ 中的 m 为垂直荷载方向列数， n 为沿荷载方向排数，4D 代表桩间距 4 倍桩径。

本次试验采用慢速维持荷载法，加载时，每级荷载维持 20 min，间隔 5 min 测读一次；卸载时，每级卸载量为加载量的 2 倍，每级荷载维持 10 min，间隔 5 min 测读一次；卸到零载时，维持 30 min，间隔 10 min 测读一次。

本次群桩试验所选桩为工程桩，为了保证桩体不被破坏，不影响到试验桩以后的使用，因此，本次加载的水平位移控制为 6~10 mm。

3 管桩水平荷载试验结果分析

由于现场群桩试验桩为工程桩，加载到第 10 级时便停止加载，而此时桩顶最大位移未达到 10 mm，因此分析实测与规范法的群桩效应综合系数时，采用 6 mm 水平位移对应荷载。

3.1 单桩试验结果分析

根据图 3 单桩水平静载试验的水平荷载 - 位移曲线可知，随着荷载的增大，位移曲线最初呈线性，然后曲线斜率逐渐增大在临界荷载处出现拐点。6 mm 位移对应的水平承载力为 80 kN，10 mm 对应的水平承载力为 108 kN，其对应的水平承载力特征值分别为 60，81kN。根据规范公式推算得地基土抗力系数的比例系数 m 为 12.8 MN/m⁴（桩顶允许位移 6 mm），9.0 MN/m⁴（桩顶允许位移 10 mm）。

由图 4 单桩试验的水平荷载 - 位移梯度曲线可知，随着水平荷载的增大，位移梯度曲线最初呈线性，然后曲线斜率逐渐增大在临界荷载和极限荷载处出现拐点。其中，临界荷载为 80 kN，极限荷载为 130 kN。

3.2 双桩试验结果分析

图 5 为 1×2-4D 双桩水平荷载 - 位移曲线，考虑

现场试验桩为工程桩，以及位移计和千斤顶等各方面因素，加载到第 10 级时即停止加载，根据计算得桩顶最大水平位移为 7.66 mm，6 mm 位移对应的水平承载力为 350 kN。

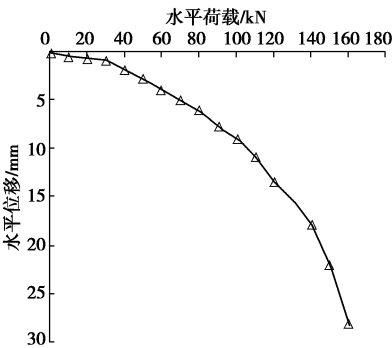


图 3 单桩水平荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Horizontal load-displacement curves of single pile

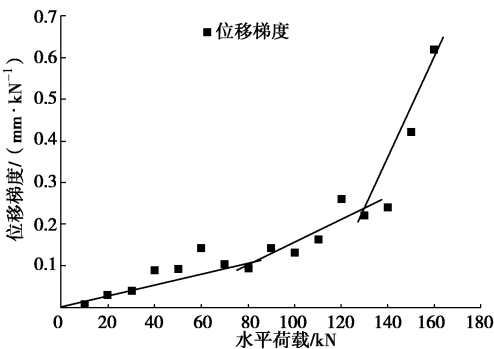


图 4 单桩水平荷载 - 位移梯度曲线

Fig. 4 Load-displacement gradient curves of single pile

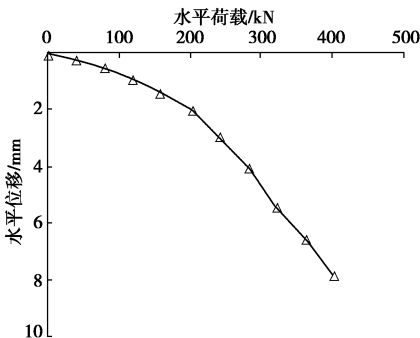


图 5 1×2-4D 双桩水平荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Horizontal load-displacement curves of double piles (1×2-4D)

图 6 为 2×1-4D 双桩水平荷载 - 位移曲线，根据计算得桩顶最大水平位移为 6.35 mm，6 mm 位移对应的水平承载力为 389 kN。

3.3 布桩形式对群桩效应的影响分析

根据现场具体试验条件，群桩承台侧向无填土，因此本次试验主要对桩的相互影响系数和承台底摩阻效应系数对群桩效应综合系数的影响进行分析、探讨，而未考虑承台侧向土水平抗力效应系数。

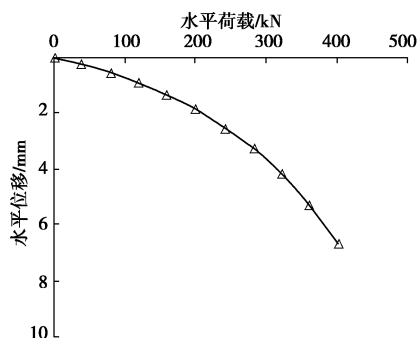


图6 2×1-4D 双桩水平荷载-位移曲线

Fig. 6 Horizontal load-displacement curves of double piles (2×1-4D)

由表3可知:①现场实测群桩效应综合系数为规范推荐方法所得结果的1.2~1.4倍;②现场试验实测群桩效应综合系数与规范计算结果体现的规律相一致,即沿水平荷载方向比垂直水平荷载方向的桩数的增加引起的群桩效应要更显著。

表3 现场实测群桩效应综合系数结果

Table 3 Coefficients of pile group effect of field tests

群桩形式	6 mm 群桩 对应荷载 值/kN	6 mm 单桩 对应荷载 值/kN	规范计 算值 R_t	现场实 测值 R_c	实测值/规 范值
1×2-4D	350	80	1.62	2.19	1.350
2×1-4D	389	80	2.02	2.43	1.204

4 结 论

结合实际工程,对管桩单、群桩的水平承载特性进行了现场试验分析,得到以下4点结论。

(1)单桩现场试验结果表明:在黄河下游冲积平原类似工程地质条件下,PHC-600B(130)试验管桩:6 mm位移对应的荷载值为80 kN,10 mm位移对应的荷载值为108 kN;水平临界荷载为80 kN,水平极限荷载为135 kN。

(2)根据规范公式推算得地基土抗力系数的比例系数 m 分别为12.8 MN/m⁴(桩顶允许位移6 mm)、9.0 MN/m⁴(桩顶允许位移10 mm)。

(3)群桩现场试验结果表明:由于承台对管桩桩顶的嵌固效应及承台底部土体摩擦作用,群桩承载力较单桩明显增大。对于双桩基础,现场实测群桩效应综合系数为规范推荐方法所得结果的1.20~1.35倍;沿水平荷载方向比垂直水平荷载方向的桩数的增加引起的群桩效应要更显著。建议在群桩基础设计时可在该安全储备范围内进行适当选取,以满足设计要求。

(4)限于现场试桩条件,未能对其它布桩型式、承台底部土压力,桩身弯矩、桩侧土压力等数据进行监测,后期将对此进行更多现场试验,并进行更深入

的分析,以确定实际工程桩在管桩水平荷载作用下的群桩效应。

参考文献:

- [1] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (ZHANG Zhong-miao. Pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [2] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [3] 岳红亚, 亓乐, 庄培芝, 等. 群桩水平承载特性关键影响因素数值模拟研究[J]. 公路, 2015(9): 109 - 113. (YUE Hong-ya, QI Le, ZHUANG Pei-zhi, et al. Numerical simulation study on key influencing factors of horizontal load-bearing characteristics of pile group[J]. Highway, 2015(9): 109 - 113. (in Chinese))
- [4] 宋修广, 岳红亚, 周志东, 等. 群桩水平承载特性数值模拟研究[J]. 铁道建筑, 2015(8): 97 - 100. (SONG Xiu-guang, YUE Hong-ya, ZHOU Zhi-dong, et al. Numerical simulation study on horizontal load-bearing characteristics of group of piles[J]. Railway Engineering, 2015(8): 97 - 100. (in Chinese))
- [5] 刘汉龙, 张建伟, 彭 劼. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 161 - 165. (LIU Han-long, ZHANG Jian-wei, PENG Jie. Full-scale model test for the behavior of cast-in-place concrete large diameter pipe pile under lateral load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 161 - 165. (in Chinese))
- [6] 刘汉龙, 陶学俊, 张建伟. 水平荷载作用下 PCC 桩复合地基工作性状[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2716 - 2722. (LIU Han-long, TAO Xue-jun, ZHANG Jian-wei, et al. Behavior of PCC pile composite foundation under lateral load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2716 - 2722. (in Chinese))
- [7] 卢成原, 颜建华. 不同桩距支盘桩群桩水平承载性状试验研究[J]. 建筑技术, 2013, 44(4): 373 - 377. (LU Cheng-yuan, YAN Jian-hua. Experimental research on horizontal bearing performance of clustered branch piles with different spacing[J]. Architecture Technology, 2013, 44(4): 373 - 377. (in Chinese))
- [8] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 2003. (JGJ 106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2003. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)