

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.01.007

填芯管桩在基坑支护工程中水平承载性状分析

沈朗¹, 杨庆光¹, 李毛毛², 唐庭军¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 为研究混凝土管桩在基坑支护中的承载性能, 通过对2组不同内径的6根混凝土管桩进行填芯或不填芯处理, 并进行室内水平承载性能模型试验, 分析基坑开挖后混凝土管桩在不同内径和相同内径条件下不同填芯强度对混凝土管桩的水平承载性能的影响。试验结果表明: 通过填芯可以有效提高混凝土管桩的基坑支护性能, 且外径相同的条件下, 内径越大桩身受基坑开挖影响越大; 通过填芯加固处理可以有效提升管桩支护的安全性。

关键词: 填芯管桩; 基坑支护; 水平承载性能

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)01-0041-05

Analysis of Horizontal Loading Behavior of Filling Core Pipe Piles in Foundation Pits

SHEN Lang¹, YANG Qingguang¹, LI Maomao², TANG Tingjun¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: With an aim to study the bearing capacity of concrete pipe piles in foundation pit supports, an indoor model test of its horizontal bearing capacity has thus been made of 6 sets of concrete pipe piles of different inner diameters in 2 groups, after a filling treatment as well as a non-filling treatment, followed by an analysis of the horizontal bearing capacity of concrete pipe piles of different diameter and with different core strengths after the excavation of foundation pits. Experimental results show that the core filling can effectively improve the foundation pit supporting performance of the concrete pipe piles. With the external diameter a constant, the longer the pile diameter is, the greater the effect exerted by the excavation on the pile foundation pits will be. Thus the core filling and reinforcement help to effectively enhance the safety of pipe pile supports.

Keywords: core pipe pile; foundation pit supporting; horizontal bearing capability

0 引言

混凝土管桩具有竖向承载力高, 环境适应能力强以及造价低廉等优点, 在软土地基施工中得到了广泛的应用。随着城市建筑规模的扩大, 基坑开挖深度越

来越大, 基坑开挖与支护成本也随之增加。为减小基坑投资成本, 混凝土管桩逐渐被应用到基坑支护中, 并在部分地区取得了良好的效果。但是由于管桩水平抗剪能力相对于实芯桩有一定差距, 因此, 深入研究管桩水平承载性能对于管桩的应用有着重要的意义。

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208194), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ2046)

作者简介: 沈朗(1990-), 男, 江苏宿迁人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基处理技术,

E-mail: shenlangwelcomeu@163.com

目前, 混凝土管桩在桩基础中的应用, 学者们研究较多, 对于水平承载性能的研究也逐渐引起了学者的注意, 并取得了一些成果^[1-2]。在混凝土管桩抗弯性能方面, 宋寅等^[3-4]通过室内模型试验, 并根据管桩开裂弯矩和极限弯矩, 推导出填芯管桩的抗弯承载力和抗裂弯矩理论公式; 王威等^[5]通过室内大模型试验研究, 认为采用素混凝土填芯可以提高PHC管桩抗弯承载力, 并对PHC填芯管桩的抗弯承载力计算方法进行了探讨; 张忠苗等^[6]根据原型试验, 对管桩抗弯和抗剪能力进行研究, 得到通过布置普通螺旋钢筋可以较大幅度提高管桩的抗弯承载性能, 但对其抗剪承载力影响不大的结论。在混凝土管桩填芯性能方面, 盛海等^[7]通过对ANSYS模型分析, 认为通过钢筋混凝土填芯可以将管桩抗剪承载力提升30%左右, 但填芯部分箍筋作用不明显; 唐孟雄等^[8]通过室内试验对填芯管桩抗压性能进行了研究, 结果表明通过混凝土填芯可以使管桩抗压强度提升50%以上, 并且随着管径增大, 填芯材料对抗压承载力贡献越大; 黄阳等^[9]采用孔内摄像检测技术确定管桩缺陷类型, 提出应针对管桩缺陷类型进行合理填芯措施的观点, 填芯不当可能影响管桩水平承载性能; 郑刚等^[10]讨论了多种剪跨比、混凝土强度等级等因素对填芯管桩抗剪强度的影响, 并提出了相应的理论计算公式。管桩在基坑支护中的应用方面, 吴步青^[11]分析了土体侧移下管桩的受力特性, 对比分析了各种开挖方式下管桩的侧移与内力; 葛鹏等^[12]依托工程证明了管桩在软土地基中的适用性及经济性, 并建议与内支撑同时使用; 张仕等^[13]通过深度为7~9m的地下基坑支护, 探讨了管桩在深基坑工程综合治理中应用的方法和可行性, 建议采用混凝土填芯、边挖边锚等综合措施, 提高管桩在支护中的有效性。

本文通过对管桩模型的室内试验, 分析管桩在支护过程中的承载性状, 并根据承载性状的变化规律, 提出通过填芯来增强管桩支护性能的措施, 为工程实践提供参考。

1 水平承载性能计算方法

1.1 非填芯混凝土管桩抗裂弯矩

根据GB50010—2010《混凝土结构设计规范》, 考虑混凝土塑性发展性能的影响, 得到非填芯混凝土管桩的抗裂弯矩公式

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0,$$

式中: σ_{pc} 为混凝土有效预压应力;

γ 为混凝土管桩抗弯截面塑性影响系数,

$\gamma = (0.7 + 60/R) \times (1.6 - 0.24r/R)$, 其中 r, R 分别为混凝土管桩内外半径, $R \leq 200$ mm 时, 取 $R = 200$ mm, 当 $R \geq 800$ mm 时, 取 $R = 800$ mm;

f_{tk} 为混凝土管桩抗拉强度标准值;

W_0 为管桩混凝土换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

1.2 填芯混凝土管桩抗裂弯矩

填芯混凝土管桩填芯材料性质与原材料存在差异, 使其在承受荷载时应力分布更加复杂。假设填芯材料与混凝土管桩内壁不存在相对移动, 在共同受力时符合平截面假设。

在混凝土管桩进入开裂阶段, 受力边缘达到极限拉应变 $\varepsilon_{芯}$, 根据假设和弹性理论, 可得填芯材料此时的应变

$$\varepsilon_{芯} = \frac{r}{R} \varepsilon_{桩} = \frac{r}{R} \cdot \frac{f_{tk} + \sigma_{pc}}{E_{c桩}},$$

式中: $\varepsilon_{芯}, \varepsilon_{桩}$ 分别为管桩外径边缘和填芯部分外边缘的应变值;

$E_{c桩}$ 为混凝土管桩弹性模量。

根据叠加原理, 将桩身与填芯部分进行叠加可得填芯混凝土管桩的抗裂弯矩公式

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0 + \gamma' f_{t芯} W_{0芯},$$

式中: γ' 为管桩填芯材料抗弯截面塑性影响系数, $\gamma' = 1.6(0.7 + 60/r)$;

$f_{t芯}$ 为填芯材料抗拉强度标准值;

$W_{0芯}$ 为填芯材料受拉边缘弹性抵抗矩^[6]。

2 模型试验与分析

2.1 试验装置与数据采集

试验在 $6.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 的室内基坑中进行, 桩间距 1.3 m (大于 $6d$), 具体布置如图1所示。

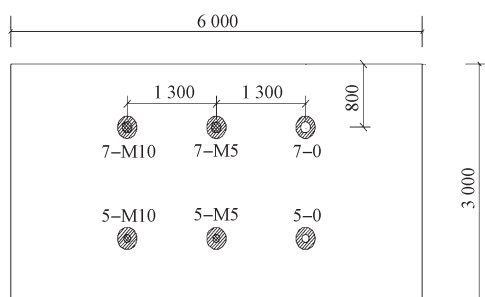


图1 模型桩布置

Fig.1 Arrangement of model piles

试验加载采用桩一侧堆载和另一侧土层开挖形式实现, 开挖分2层进行, 每层开挖 200 mm , 具体加载如图2所示。试验中, 侧向堆载采用 5 kg 标

准砝码施加, 荷载通过 360 mm × 360 mm 荷载板传递至地表, 堆载距桩外径边缘 50 mm。桩身应力通过 DH3815N 型应变采集仪采集, 应变片为 BX120-200AA, 桩身表面对称粘贴, 上下应变片之间间隔 100 mm, 共计 7 组 14 个, 采用连续采集。桩顶位移采用 30 mm 百分表测量, 每次读表间隔 15 min, 每根桩计读 300 min。

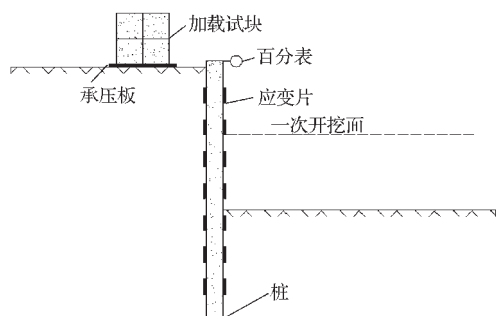


图2 加载示意图

Fig.2 Diagram of the loading process

2.2 模型桩与试验土样

试验管桩外壁采用自制钢模成型, 管桩内壁采用内置 70 mm 和 50 mm 的 PVC 管实现。桩身材料采用 M15 水泥砂浆, 填芯材料采用 M5 和 M10 水泥砂浆。桩身养护完成后, 将管桩内壁打磨并压入基坑后, 灌入对应砂浆, 养护 28 d, 具体操作如图 3 所示。



a) 管桩制作



b) 填芯养护

图3 模型桩制作和填芯

Fig.3 Making and filling of model piles

本试验采用 6 根管桩进行试验模拟, 包括 2 根空心管桩和 4 根填芯管桩。试验分为 2 组进行, 桩身长

度均为 700 mm, 材料采用 M15 砂浆, 试验桩内径和填芯材料不同, 填芯材料为 M5 和 M10 砂浆。试验桩有关参数见表 1。

试验用土取自某小区基坑 4.2 m 处黏性土, 加水拌匀静置养护后使用。试验前对基坑内土体进行常规土工试验, 土体参数见表 2。

表1 试验桩参数

Table 1 Parameters of test piles

桩编号	外径 / mm	内径 / mm	桩身强度	填芯强度	桩长 / mm	备注
1#	140	70	M15		700	空芯
2#	140	70	M15	M5	700	填芯
3#	140	70	M15	M10	700	填芯
4#	140	50	M15		700	空芯
5#	140	50	M15	M5	700	填芯
6#	140	50	M15	M10	700	填芯

表2 土的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of the soil

含水率 $\omega / \%$	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	压缩模量 E_s / MPa
21	19	9.8	8	2.1

3 试验结果与分析

3.1 桩顶水平位移

图 4 为不同开挖深度下 6 根试验桩的桩顶水平位移 - 时间变化曲线。从开挖结束开始每 15 min 对百分表读数进行记录。当 1 h 内百分表读数变化不超过 0.01 mm 时, 认为变形基本稳定, 再进行第二层开挖。

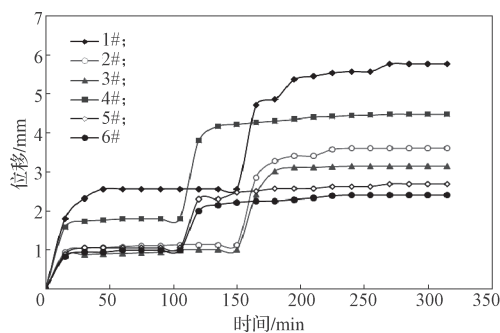


图4 桩顶水平位移 - 时间曲线

Fig.4 Horizontal displacement-time curves of the pile top

在土层开挖过程中, 开挖侧土体应力释放, 桩后土体向桩身运动, 管桩悬臂端受到主动土压力使桩身产生横向位移。从图 4 中可以看出, 开挖阶段桩顶位移均呈现陡变型, 且相同开挖深度下, 二次开挖产生桩顶位移大于第一层开挖位移量。此外, 2#, 3#, 5#, 6# 桩的桩顶水平位移明显小于未进行填芯处理的 1# 和 4# 管桩, 且填芯强度越大桩顶位移越小。这表明通过填芯可以有效增强管桩抗侧移能力。

目前, GB50497—2009《建筑基坑工程检测技术规范》对各类支护桩的水平位移进行了详细规定, 但未对支护桩桩顶位移允许值进行规定。本文以钢板桩水平位移允许值为参考依据, 分析管桩支护水平性能。在开挖第一层至稳定阶段, 开挖深度约为桩长的 28.6%, 1# 桩顶最大位移为 2.558 mm, 大于 2 mm ($0.01h$, 其中 h 为基坑开挖深度), 满足基坑支护三级安全标准; 2~6# 桩顶位移均小于 2 mm, 满足二级安全标准。第二层开挖至稳定阶段, 开挖深度约为桩长的 57.1%, 1# 和 4# 桩顶位移均大于 4 mm ($0.01h$), 不满足二级安全边坡要求; 填芯管桩位移最大为 3.609 mm 均满足二级安全边坡要求。因而, 混凝土管桩在二级安全等级及以上边坡应谨慎使用, 通过填芯或缩小管桩内径可以有效减小管桩水平位移, 增强管桩的适用性。

3.2 桩身弯矩

根据应变采集数据, 通过处理与分析获得桩身不同深度时的桩身弯矩值, 得 1#, 2# 和 3# 桩在两次开挖条件下的桩身弯矩曲线, 如图 5 所示。

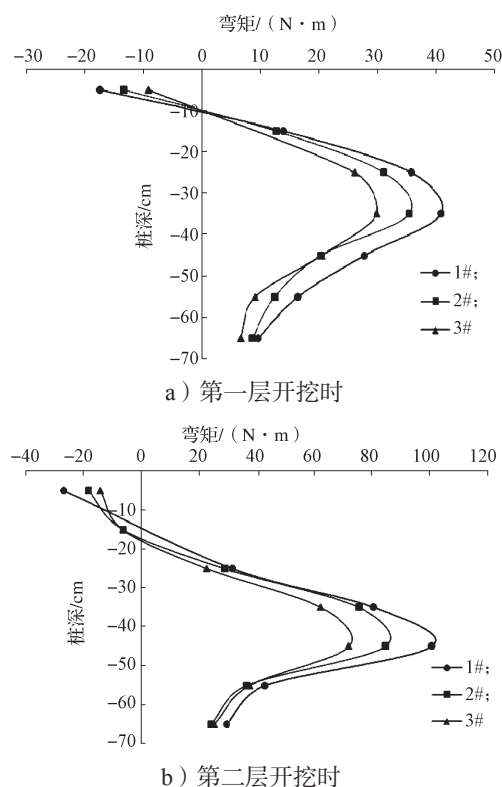


图 5 桩身弯矩曲线

Fig. 5 Bending moment curves of the pile body

对比图 5a 与 5b 中弯矩变化曲线可知, 无论是否填芯, 两次开挖后桩身弯矩均呈现先增大后减小的趋势, 且最大弯矩在开挖面以下, 嵌固段弯矩趋于一致。此外, 在开挖深度一致时, 填芯管桩桩身弯矩小于空

心管桩, 且填芯强度越大, 桩身弯矩变化越小。因此可以认为, 通过填芯措施可以有效增强管桩在基坑支护中的横向承载性能。

混凝土管桩桩身开裂后, 由于其工作环境特殊, 细小裂缝可能造成桩身钢筋锈蚀, 因而保证管桩在工作过程中表面应力小于管桩开裂弯矩产生的应力也是衡量管桩水平承载性状的重要依据。模型桩最大实测弯矩与桩身抗裂弯矩理论值比较如表 3 所示。

表 3 桩身弯矩实测值与桩身抗裂弯矩理论值比较

Table 3 A comparison between the calculated values of piles at cracked moment and its measured values

桩编号	弯矩实测值 $M/(N \cdot m)$		开裂弯矩理论值 $M_{cr}/(N \cdot m)$	$\frac{M_1}{M_{cr}}$	$\frac{M_2}{M_{cr}}$
	第一层开挖	第二层开挖			
1#	42.2	101.8	334.88	0.13	0.30
2#	37.7	83.2	345.08	0.11	0.24
3#	29.1	67.3	354.88	0.08	0.19

注: M_1, M_2 分别为第一层、第二层开挖后桩身的弯矩实测值。

由表 3 可知, 通过填芯, 2#, 3# 桩的抗裂弯矩值得到一定的提升, 在开挖过程中, 桩身产生的最大弯矩均小于桩身开裂弯矩, 随着填芯强度的增大, 开挖所产生的弯矩与开裂弯矩的比值逐渐减小, 在 3 根试验桩中, 最大比值为 0.30, 有较大的安全储备, 因而管桩在基坑支护中其桩身表面抗裂弯矩满足支护要求。

4 结论

通过上述研究可得如下结论:

1) 通过对支护管桩进行填芯处理, 可以有效减小桩顶水平侧移, 填芯强度越大, 管桩抗侧移能力越强; 在外界条件相同时, 管桩壁厚越大, 管桩抗侧移能力越大。因而根据工程实际选择管桩壁厚及填芯措施可以有效提高管桩的安全性。

2) 在基坑支护中, 管桩桩身弯矩随深度呈先增大后减小的趋势, 并在桩端趋于相同。随着开挖深度增加, 桩身弯矩有显著增大。对于填芯管桩, 其桩身弯矩增大幅度小于空心管桩, 这与桩土间分担土体侧压力的比例有关。

3) 在基坑开挖过程中, 桩身产生的弯矩满足桩身材料的抗裂弯矩值, 并具有较大安全储备, 通过填芯可以提升混凝土管桩抗裂弯矩值, 因而满足基坑支护需求。

本文对填芯管桩在开挖过程中的弯矩变化规律进行了研究, 其变化原因与桩土间桩侧土压力分担比例有关, 具体关系有待进一步研究。

参考文献:

- [1] DAVISSON M T, SALLEY J R. Model Study of Laterally Loaded Piles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1605-1627.
- [2] MAYNE P W, KULHAWY F H, TRAUTMANN C H. Laboratory Modeling of Laterally-Loaded Drilled Shafts in Clay[J]. Journal Geotechnical Engineering, 1995, 121(12): 827-835.
- [3] 宋 寅. 预应力混凝土管桩填芯混凝土抗弯试验研究及理论分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
SONG Yin. Experiment Research & Theoretical Analysis on Resistance to Bending of Core Concrete of Prestressed Concrete Pipe Pile[D]. Hefei: Heifei University of Technology, 2006.
- [4] 宋 寅, 柳炳康, 李建宏, 等. 填芯与非填芯预应力混凝土管桩抗弯性能的比较[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(5): 607-610.
SONG Yin, LIU Bingkang, LI Jianhong, et al. Comparison of Bending Moments Between Prestressed Concrete Pipe Piles with the Concrete Core and Hollow Prestressed Concrete Pipe Piles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2007, 30(5): 607-610.
- [5] 王 威, 刘 杰, 王 宁, 等. 填芯对PHC管桩抗弯性能影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 19-22.
WANG Wei, LIU Jie, WANG Ning, et al. Study on Bending Performance of PHC Pipe Piles with Concrete Core[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(5): 19-22.
- [6] 张忠苗, 刘俊伟, 邹 健, 等. 加强型预应力混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1074-1080.
ZHANG Zhongmiao, LIU Junwei, ZOU Jian, et al. Experimental Study on Flexural and Shearing Property of Reinforced Prestressed Concrete Pipe Pile[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(6): 1074-1080.
- [7] 盛 海, 张星宇, 宋满荣. 预应力混凝土管桩受剪承载力非线性有限元分析[J]. 工程与建设, 2007, 21(5): 674-676.
SHENG Hai, ZHANG Xingyu, SONG Manrong. Nonlinear FEM Analysis of Shear Bearing Capacity with the Pre-Stressed Concrete Pipe Piles[J]. Engineering and Construction, 2007, 21(5): 674-676.
- [8] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 填芯PHC管桩桩身抗压承载力试验与理论计算方法研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 67-71, 86.
TANG Mengxiong, QI Yuliang, ZHOU Zhiguo, et al. Study on Experiment and Theoretical Calculation Method of Compressive Bearing Capacity of Filled PHC Pipe Piles[J]. Building Structure, 2015, 45(1): 67-71, 86.
- [9] 黄 阳, 蔡来炳. PHC桩采用填芯法补强适用性的探讨[J]. 工业建筑, 2006, 36(增刊1): 749-751.
HUANG Yang, CAI Laibing. Discussion on The Feasibility of the Filling Core Reinforcement Method for PHC Piles[J]. Industrial Construction, 2006, 36(S1): 749-751.
- [10] 郑 刚, 张天奇, 李庆钢, 等. 考虑剪跨比及截桩填芯影响的PHC管桩抗剪承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 97-109.
ZHENG Gang, ZHANG Tianqi, LI Qinggang, et al. Experimental Study on Shear Capacity for PHC Pipe Piles Considering Influence of Shear Span-Effective Depth Ratio and Reinforced Concrete Core[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 97-109.
- [11] 吴步青. 预应力管桩在基坑开挖中的受力特性及有限元分析[J]. 结构工程师, 2005, 21(3): 60-63, 43.
WU Buqing. Mechanical Behavior and Finite Element Analysis of Pretensioned Spun Concrete Piles in Excavation[J]. Structural Engineers, 2005, 21(3): 60-63, 43.
- [12] 葛 鹏, 仝小彬. 预应力砼管桩支护体系的设计与施工[J]. 地质学刊, 2010, 34(1): 84-88.
GE Peng, ER Xiaobin. Design and Construction on Prestressed Concrete Pipe Pile Timbering System[J]. Journal of Geology, 2010, 34(1): 84-88.
- [13] 张 仕, 李欢秋, 王爱勋. 提高PHC管桩在深基坑支护中应用的技术途径[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1643-1647.
ZHANG Shi, LI Huanqiu, WANG Aixun. Technical Approaches to Improvement of Application of PHC Pile in Deep Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1643-1647.

(责任编辑: 邓光辉)