

DOI: 10.11779/CJGE2014S2062

不同嵌固深度排桩受力与变形特性现场试验研究

左殿军^{1,2}, 邓成发³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所岩土工程研究中心, 天津 300456; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 浙江省水利河口研究院岩土工程研究所, 浙江 杭州 310020)

摘要: 根据某一水闸基坑开挖工程, 在排桩桩体内埋设测斜仪、钢筋应力计对非等长双排桩基坑支护结构变形特性进行了现场观测, 采用规范法讨论了后排桩不同嵌固对前、后排桩的变形、内力影响。研究结果表明: 非等长双排桩桩顶位移、桩身剪力、弯矩与传统等长双排桩基坑支护结构规律一致; 增大后排桩的嵌固深度, 前、后排桩的桩顶位移均减小; 前排桩桩身剪力、弯矩减小, 后排桩增大, 但当嵌固深度超过桩长3/4时, 前、后排桩的桩顶水平位移、桩身剪力、弯矩减小或增大趋势均不明显; 研究成果为双排桩基坑支护结构设计优化提供一定参考。

关键词: 嵌固深度; 双排桩; 支护结构; 变形特性; 现场试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0354-06

作者简介: 左殿军(1983-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 工程师, 主要从事软土地基加固处理技术、重金属污染土治理与控制技术方面的研究。E-mail: zdj647@163.com。

Field test on mechanical properties and deformation characteristics of double-row piles with different embedded depths

ZUO Dian-jun^{1,2}, DENG Cheng-fa³

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for water transport engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Zhejiang institute of Hydraulics& Estuary, Hangzhou 310020, China.)

Abstract: Based on excavation of foundation pit for a sluice in Zhejiang Province, field tests on deformation characteristics of retaining structure with non-equal-length double-row piles are performed by burying inclinometers and reinforcement stress meters in row piles. The influences of the mounted depth of back row piles are discussed by using the elastic foundation beam method. The results indicated that: the change laws of top displacement, pile shear and bending moment of double piles are consistent with those of equal-length double-row piles. With the increase of the embedded depth of back row piles, the top horizontal displacement of front and back row piles decreases. The shear force and bending moment of front row piles decrease, while those of back row piles increase. When the embedded depth is more than 3/4 of the pile length, the decrease or increase trend of top horizontal displacement, shear force and bending moment of piles are not obvious. These achievements may provide certain reference for the design optimization of supporting structures for foundation pits with double-row piles.

Key words: embedded depth; double-row pile; supporting structure; deformation characteristic; field test

0 引言

双排桩支护体系作为一种基坑支护结构, 因其具有抗侧移刚度大, 造价低, 后续土方开挖施工方便, 占地范围小(与拉锚支护体系相比)等优点, 在工程中得到广泛的应用^[1]。

关于双排桩基坑支护体系的受力特性, 国内外学者从土压力分布, 桩间土拱效应, 支护体系空间效应等^[2-7]方面做了大量的研究, 并根据前后排桩间距、桩身嵌固深度、联系梁及冠梁刚度、桩土相互作用特性等因素提出了多种双排桩基坑支护计算模型^[2, 8-11]。

在双排桩基坑支护工程中, 排桩的嵌固深度大小对于支护结构安全稳定性、工程造价影响较大。针对前后排桩不同嵌固深度对双排桩基坑支护结构变形特性的影响, 相关研究文献相对较少。《建筑基坑支护技术规程》^[12]基于平面刚架结构模型按抗倾覆稳定性计算排桩的嵌固深度, 根据桩端不同持力层规定了最小嵌固深度, 但并未对前、后排桩嵌固深度能否不同作具体规定; 张泽坤^[13]通过有限元方法分析“h”型抗

滑桩的传递规律及锚固深度的影响, 发现锚固深度大于桩长 1/2 时, 桩体位移降低幅度不大, 前排抗滑桩锚固深度增加时, 位移和剪力变化不大, 后排桩弯矩增大; 于洋等^[14]通过 FLAC^{3D} 建立简化的有限差分模型, 以位移边界代替滑动推力, 研究了有连梁双排抗滑桩不同锚固深度组合对变形、内力的影响规律, 结果表明: 对于有联系梁的双排桩支护结构, 前后排桩嵌固深度对排桩桩顶位移、桩身剪力、弯矩的影响与边界位移值有关; 当边界位移值大于临界值时, 增加后排桩嵌固深度, 排桩桩顶位移减小, 后排桩的剪力、弯矩增大, 前排桩剪力、弯矩减小。

基于以上, 本文根据某一水闸基坑开挖双排桩支护工程, 在前、后排桩体内埋设测斜仪、钢筋应力计, 对排桩的水平位移、桩身内力进行了现场观测, 讨论了后排桩嵌固深度增大双排桩支护结构的影响, 研究结果为双排桩基坑支护结构设计优化提供一定参考。

1 工程概况

某翻板闸工程位于浙江省富阳市清水河道, 工程主要功能调节水体交换以保持水质。水闸闸室基坑开挖深度 9.15 m。基坑坑底为粉质黏土, 距淤泥质黏土层顶 3 m, 工程北侧距离河道岸坡 20 m 距离为居民区, 翻板闸基坑支护采用格构式双排桩。

图 1 (a) 为翻板闸基坑支护结构平面布置图, 图 1 (b) 为翻板闸基坑支护结构剖面图。如图 1 所示: ①基坑支护结构呈南北对称, 顶高程 -4.00 m, 基坑支护施工先由地面 0.00 m 高程按 1:1.5 边坡开挖至 -4.00 m, 然后施工排桩支护结构及搅拌桩止水体系, 基坑分两级开挖, 先开挖至 -7.00 m, 然后开挖至坑底 -9.15 m; ②排桩采用钻孔灌注桩, 桩径 0.8 m, 前、后排桩间距 3.2 m, 前排桩长 17.15 m, 间距 1 m, 嵌固深度 12 m; 后排桩长 19 m, 间距 2 m, 嵌固深度 13.85 m; 排桩之间采用冠梁连接, 前、后排桩之间采用设置联系梁。

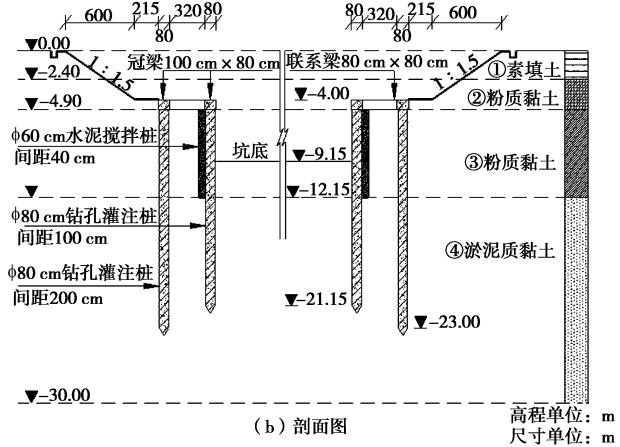
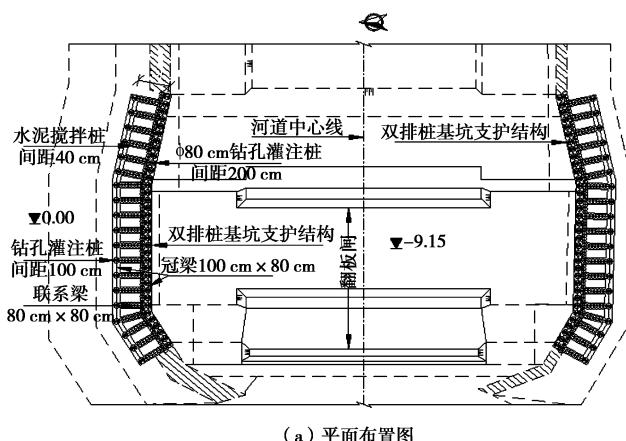


图 1 翻板闸基坑开挖支护结构布置图

Fig. 1 Retaining structure of excavations

闸址地基土层由上至下依次为: ①0.00~ -2.40 m: 素填土; ②-2.40~ -4.90 m: 粉质黏土; ③-4.90~ -12.20 m: 粉质黏土; ④-12.20~ -30.00 m, 淤泥质黏土。表 1 总结了地基各土层物理力学指标。

表 1 地基土层物理力学指标

Table 1 Soil properties

编号	层厚 /m	密度 /(g·cm ⁻³)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	压缩模量/MPa
①	2.4	1.80	14.3	16.5	1.76
②	2.5	1.77	27.2	13.2	6.11
③	7.3	1.79	10.3	26.2	4.90
④	17.8	1.71	10.1	8.4	2.48

2 现场试验及结果分析

2.1 观测仪器布置

选取翻板闸北侧双排桩基坑支护结构钻孔灌注桩进行现场观测, 其中 #7, #12 桩为前排桩, #5 桩为后排桩。

图 2 为观测仪器布置平面图, 图 3 为观测仪器布置剖面图。如图 2, 3 所示: ①为测试双排桩支护结构排桩的水平位移, 在双排桩支护结构内测 #7, #12 桩体埋设两个测斜管, 编号为 CX-1, CX-3; 在双排桩支护结构外侧 #5 桩埋设测斜管, 编号为 CX-3; ②在 #5, #7, #12 钻孔灌注桩钢筋笼内外侧钢筋主筋上分别焊接 5 只钢筋应力, 仪器埋设前进行标定, 在桩基施工完成后, 基坑开挖之前完成上述仪器埋设, 观测工作从 2010 年 5 月开始至 2010 年 7 月止。

2.2 试验结果及分析

(1) 排桩水平位移分析

图 4 为排桩高程与水平位移关系曲线图。从图中可以看出: 双排桩基坑支护结构排桩位移随着基坑开挖深度的增加逐渐变大, 前排 #7 桩位移最大值 21.47 mm, #12 桩位移最大值 21.12 mm, 均发生在桩顶; 后排 #5 桩位移最大值为 19.98 mm, 发生在距离桩顶 2.5 m 深度处; 前排桩位移值大于后排桩位移, 联系

梁之间的前排桩位移值略小于连接处的前排桩, 说明冠梁和联系梁在双排桩基坑支护结构中起到位移协调作用, 这与文献[15~17]研究结果一致。

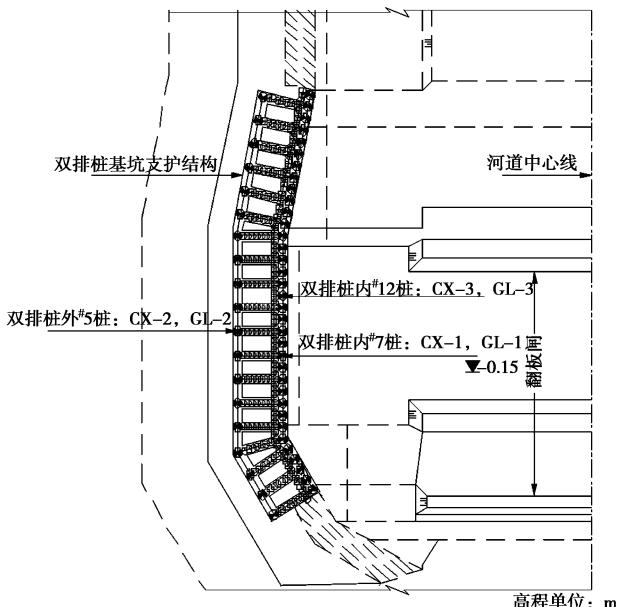


图 2 观测仪器布置平面图

Fig. 2 Layout of instrumentation

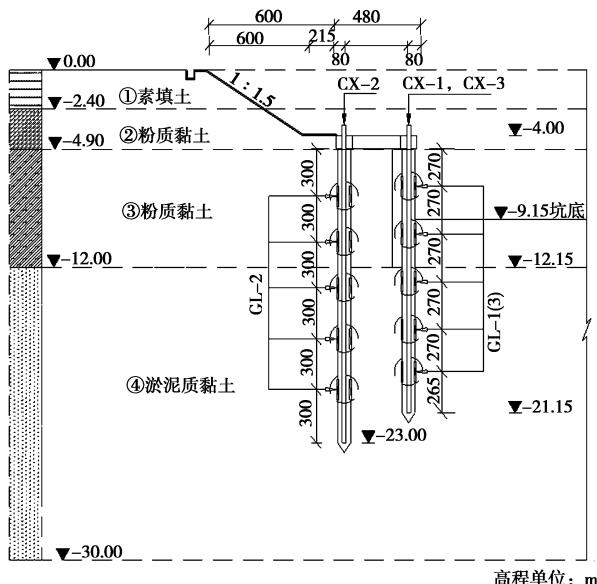
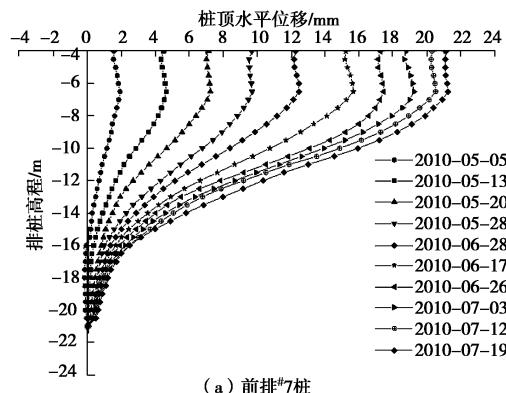
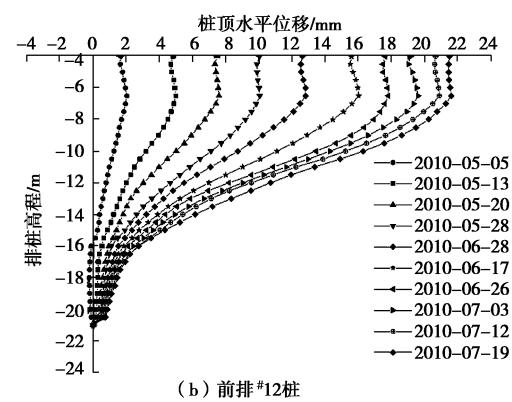


图 3 观测仪器布置剖面图

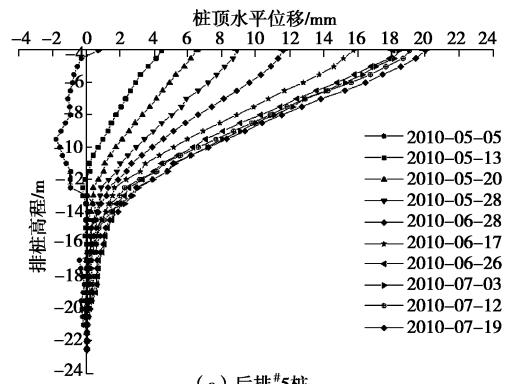
Fig. 3 Sectional layout of instrumentation



(a) 前排#7桩



(b) 前排#12桩



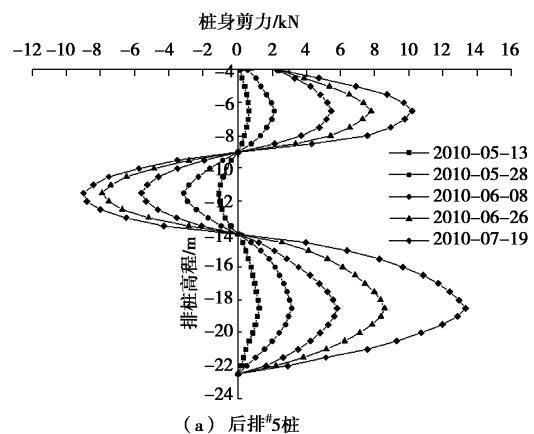
(c) 后排#5桩

图 4 排桩高程 - 位移曲线

Fig. 4 Displacement of double-row piles

(2) 排桩桩身剪力分析

图 5 为排桩高程与桩身剪力关系曲线图。从图中可以看出: 双排桩基坑支护结构排桩桩身剪力随着基坑开挖深度的增加变化规律相似, 前排#7 桩桩身剪力最大值 12.53 kN, #12 桩剪力最大值 12.29 kN, 发生在距离桩顶 5.50 m 处; 后排#5 桩桩身剪力最大值 13.32 kN, 发生在距离桩顶 6.50 m; 后排桩桩身最大值大于前排桩, 主要是由于双排桩间距较大时, 后排桩分担的土压力荷载较大, 前排桩分担的土压力荷载较小, 这与文献[15]研究结果一致。



(a) 后排#5桩

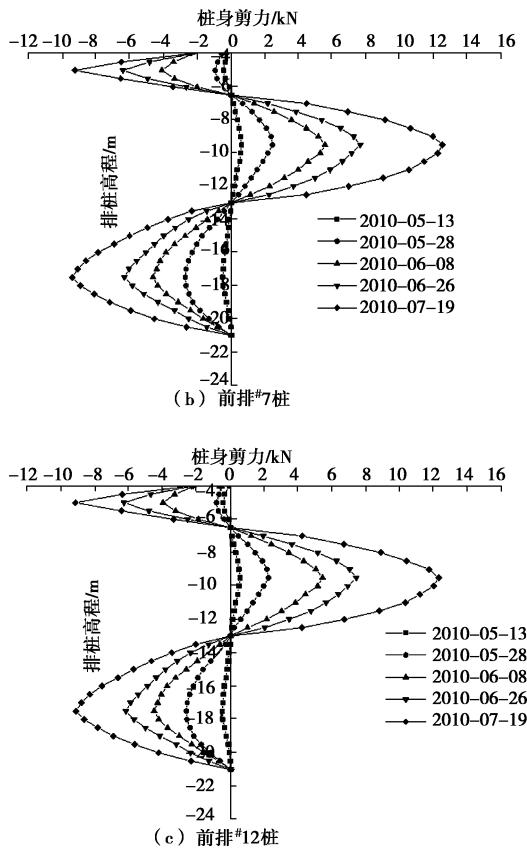


图 5 排桩高程 - 剪力曲线 (指向坑内为正)

Fig. 5 Shear stress of double-row piles

(3) 排桩桩身弯矩分析

图 6 为排桩高程与桩身弯矩关系曲线图。从图中可以看出:前排^{#7}、^{#12} 桩桩身弯矩最大值分别为 48.3, 6.02 kN·m, 发生在距离桩顶 9 m 处, ^{#7} 桩桩身弯矩略大于^{#12} 桩桩身弯矩, 说明联系梁和冠梁在控制桩身应力方面起到协调作用;后排^{#5} 桩桩身弯矩最大值 79.27 kN·m, 发生在桩顶位置, 后排桩桩身弯矩大于前排桩, 说明在前、后排桩间距较大时, 后排桩承担的土压力荷载较大。

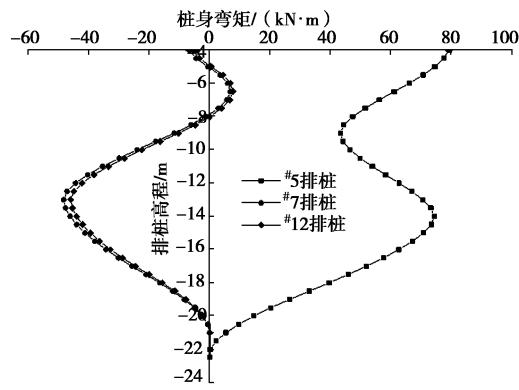


图 6 排桩高程 - 弯矩曲线

Fig. 6 Bending moment of double-row piles

(4) 嵌固深度影响分析

依据本文现场试验, 为研究后排桩嵌固深度对双

排桩基坑支护结构的变形、内力的影响, 基于弹性地基梁理论按《建筑基坑支护技术规程》采用理正计算软件对本文双排桩基支护结构进行计算分析, 其中前排^{#7} 桩嵌固深度与现场设计一致, 取 12 m, 后排^{#5} 桩嵌固深度分别取 12, 13.85, 15, 18 m。

图 7~9 为后排^{#5} 桩不同嵌固深度下, 前、后排桩桩顶位移、剪力、弯矩沿排桩高程变化趋势图。从图中可以看出:当后排桩嵌固深度为 13.85 m 时, 采用规范法理论计算前、后排桩顶水平位移、桩身剪力、弯矩与现场试验结果规律吻合较好, 理论计算最大值分别比现场试验值大约 10%、8%, 12%, 在合理的误差范围之内。

图 7 表明: ^{#5} 桩嵌固深度分别为 12, 13.85, 15, 18 m 时, 其桩顶水平位移值分别为 22.58, 21.58, 17.58, 17.05 mm; 对应的前排^{#7} 桩桩顶水平位移值分别为 24.26, 23.19, 18.89, 18.25 mm。可以看出, 随着后排桩嵌固深度的增大, 前、后排桩的桩顶水平位移值均减小, 但当嵌固深度增大到 3/4 桩长时, 减少幅度变小。

图 8, 9 显示: ^{#5} 桩嵌固深度分别为 12, 13.85, 15, 18 m, 其桩身剪力最大值分别为 2.13, 2.61, 2.95, 3.06 kN, 桩身弯矩最大值分别为 69.76, 85.62, 96.75, 98.47 kN·m; 对应前排^{#7} 桩桩身剪力最大值分别为 2.90, 2.61, 2.13, 2.06 kN, 弯矩最大值分别为 58.01, 52.21, 42.54, 41.09 kN·m; 由此可见, 随着后排^{#5} 桩嵌固深度的增大, 前排^{#7} 桩桩身剪力最大值分别减小 10%, 27%, 29%, 弯矩最大值分别减小 10%, 26.7%, 29.2%; ^{#5} 桩桩身剪力分别增加 22.5%, 38%, 44%, 弯矩最大值分别增大 22.7%, 38.7%, 41.2%, 说明后排桩嵌固深度的增大减少了前排桩的桩身剪力、弯矩, 增加了后排桩的桩身剪力、弯矩, 但当嵌固深度增大到后排桩 3/4 桩长时, 前、后排桩桩身剪力、弯矩减少和增大的幅度均减小。

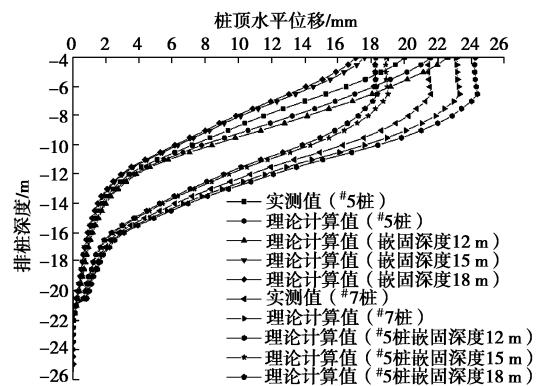


图 7 排桩高程 - 位移曲线 (后排桩不同嵌固深度)

Fig. 7 Displacement of double-row piles (different depths)

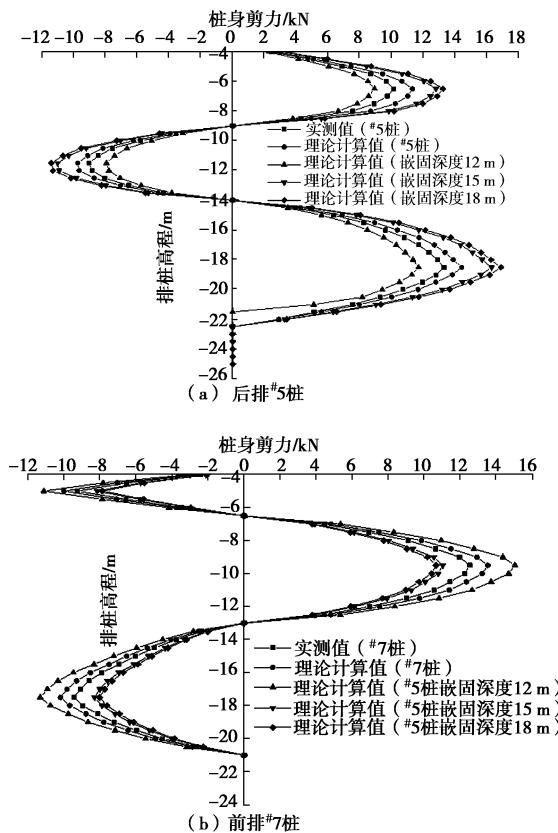


图 8 排桩高程 - 剪力曲线 (后排桩不同嵌固深度)

Fig. 8 Shear stress of double-row piles (different depths)

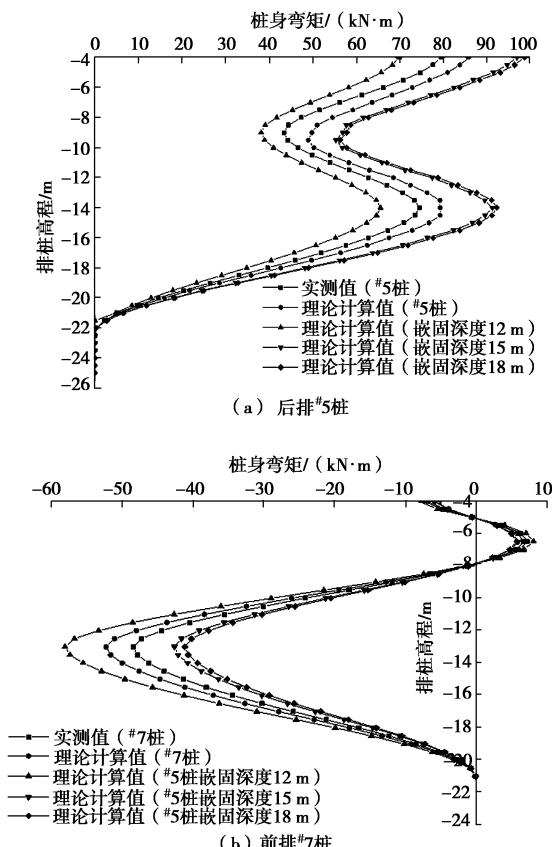


图 9 排桩高程 - 弯矩曲线 (后排桩不同嵌固深度)

Fig. 9 Bending moment of double-row piles (different depths)

3 结 论

本文根据某一翻板闸室基坑开挖双排桩基坑支护工程现场试验, 研究了排桩桩顶位移、桩身剪力、弯矩随基坑开挖变化趋势, 讨论了嵌固深度对排桩的变形、受力特性的影响, 得出以下结论:

(1) 现场试验表明非等长双排桩基坑支护结构排桩桩顶水平位移、桩身剪力、弯矩分布规律与等长双排桩基坑支护结构一致。

(2) 基于弹性地基梁理论采用规范法计算非等长双排桩基坑支护结构排桩水平位移值、桩身剪力值、弯矩值与现场试验结果吻合, 误差在合理范围之内。

(3) 理论计算对比分析结果表明, 随着后排桩嵌固深度的增大, 双排桩基坑支护结构前、后排桩的桩顶水平位移最大值均减小; 前排桩的桩身剪力、弯矩最大值减小, 后排桩增大, 但在后排桩嵌固深度超过3/4桩长时, 排桩桩顶水平位移、桩身剪力、弯矩最大值减小和增大趋势均不明显。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan. Manual of deep foundation pit engineering design and construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [2] 何颐华, 杨斌, 金宝森, 等. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 58 - 56. (HE Yi-hua, YANG Bin, JIN Bao-sen, et al. A study on the test and calculation of double-row fender piles[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2): 58 - 56. (in Chinese))
- [3] 胡敏云, 夏永承, 高渠清. 桩排式支护结构侧土压力计算原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 376 - 379. (HU Min-yun, XIA Yong-cheng, GAO Qu-qing. Calculation principle of earth pressure against retaining piles of piles-row retaining structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 376 - 379. (in Chinese))
- [4] 钟小春. 基坑支护桩间土体拱效应理论及有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 2): 1501 - 1504. (ZHONG Xiao-chun. Soil arching between protecting piles of foundation pits and FEM analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S2): 1501 - 1504. (in Chinese))
- [5] 赖冠宙, 房营光, 史宏彦. 深基坑排桩支护结构空间共同变形分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1749 - 1752. (LAI Guan-zhou, FANG Ying-Guan, SHI Hong-yan. Spatial deformation analysis of deep foundation pit pile-supported structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 28(8): 1749 - 1752. (in Chinese))

- mutual deformation analysis method for row of piles of deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1749 - 1752. (in Chinese))
- [6] 平 扬, 白世伟, 曹俊坚. 深基双排桩空间协同计算理论及位移反分析[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(2): 79 - 83. (PING Yang, BAI Shi-wei, CAO Jun-jian. Calculation theory considering spatial influence and displacement feedback design of double-row piles in deep foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(2): 79 - 83. (in Chinese))
- [7] 何建明, 白世伟. 深基坑排桩-圈梁支护结构协同作用研究 [J]. 岩土力学, 1997, **18**(3): 41 - 46. (HE Jian-ming, BAI Shi-wei. Study of cooperative action between row of piles and ring beam of deep foundation pit supporting structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(3): 41 - 46. (in Chinese))
- [8] 吴 刚, 白 冰, 聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2753 - 2758. (WU Gang, BAI Bing, NIE Qing-ke. Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2753 - 2758. (in Chinese))
- [9] 郑 刚, 李 欣, 刘 畅, 等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报, 2004, **25**(1): 99 - 106. (ZHENG Gang, LI Xin, LIU Chang, et al. Analysis of double row piles in consideration of the pile-soil interaction[J]. Journal of Building Structures, 2004, **25**(1): 99 - 106. (in Chinese))
- [12] JGJ120—2012 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 张泽坤. h 型抗滑桩的有限元分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (ZHANG Ze-kun. Finite element analysis of h anti-slide pile[D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2008. (in Chinese))
- [14] 于 洋, 孙红月, 尚岳全. 锚固深度对双排抗滑桩力学性能影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(10): 1999 - 2006. (YU Yang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Influence of anchorage depth of on mechanical behavior of double-row anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(10): 1999 - 2006. (in Chinese))
- [15] 杜秀忠, 杨光华, 孙昌利, 等. 双排桩支护在某水利基坑中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **11**(增刊 1): 490 - 494. (DU Xiu-zhong, YANG Guang-hua, SUN Chang-li, et al. Application of retaining structurewithdouble-row pilesin a hydraulic excavation[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2012, **11**(S1): 490 - 494. (in Chinese))
- [16] 郑陈旻, 王曾辉, 章 昕, 等. 双排桩支护在福建沿海软土深基坑工程中的经济性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 317 - 320. (ZHENG Chen-min, WANG Zeng-hui, ZHANG Xin, et al. Economic analysis of double-row piles in deep foundation pits in soft soils in coastal areas of Fujian Province[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 317 - 320. (in Chinese))
- [17] 林 鹏, 王艳峰, 范志雄, 等. 双排桩支护结构在软土基坑工程中的应用分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 331 - 334. (LIN Peng, WANG Yan-feng, FAN Zhi-xiong, et al. Application and analysis of retaining structure with double-row piles in soft ground[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 331 - 3334. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)