

DOI: 10.11779/CJGE2014S1016

预制混凝土支护管桩在深基坑工程中的应用

赵升峰¹, 黄广龙², 马世强¹, 周文苑¹, 章新¹

(1. 南京市测绘勘察研究院有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 先张法预应力预制混凝土支护管桩作为一种新型的基坑支护桩, 具有桩身质量好、强度高和成桩可靠等特点值得推广与应用。基于基坑位移计算方法, 分析了采用预应力预制混凝土支护管桩进行基坑支护, 影响其位移变化的参数, 并结合南京邮电大学科研综合楼基坑工程实例, 介绍了支护桩的布置方式, 对比了基坑位移的理论计算值与实测值, 结果表明: 计算位移变化平缓, 最大值约在 17.0~23.2 mm 之间; 现场实测的最大水平位移值在 16.10~21.50 mm 之间, 二者数值接近, 变化规律基本一致, 证实了预应力预制混凝土支护管桩用于基坑支护的可靠性和有效性, 值得在同类工程中参考。

关键词: 预制支护管桩; PCMW 工法; 增量法; 基坑位移; 弹性支点法

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S1-0091-06

作者简介: 赵升峰(1986-), 男, 注册岩土工程师, 从事岩土工程设计与咨询工作。E-mail: zhaosf510@163.com。

Application of precast concrete pipe piles in a deep excavation project

ZHAO Sheng-feng¹, HUANG Guang-long², MA Shi-qiang¹, ZHOU Wen-yuan¹, ZHANG Xin¹

(1. Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation Co., Ltd, Nanjing 210019, China; 2. College of Transportation

Science & Engineering Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: As a new type of retaining pile for foundation pit engineering, the pre-tensioned prestressed concrete pipe pile has many advantages, such as a good pile quality, high strength and reliable construction quality. It is worthy of popularization and application. Based on the displacement calculation method, the parameters that affect the displacement of excavation are further analyzed when the prestressed concrete pipe pile is used as the retaining pile. Through a practical example of research building of NUPT, the layout of retaining piles is introduced, and the measured displacement of the foundation pit is compared with the theoretical results. It is shown that the calculated displacement changes gently, and the maximum varies from 17.0 mm to 23.2 mm; while the measured values are between 16.1mm and 21.5mm. They are consistent with each other, and the change rule is almost identical. Thus the reliability and validity of the prestressed concrete retaining pipe pile are conformed. It may provide a good reference for similar projects.

Key words: precast concrete pipe pile; PCMW construction method; incremental method; displacement of deep foundation pit; elastic subgrade method

0 引言

预制混凝土支护管桩, 即先张法预应力混凝土支护桩(下文简称支护管桩), 其作为一种新型支护结构, 得到了一定的应用和发展^[1-3]。该支护桩可采用常规预制桩的施工工法(静压法、锤击法)打入土中, 或者插入三轴水泥土搅拌桩^[4]、或 TRD 搅拌墙、或 CSM 双轮铣搅拌墙内形成连续的预应力高强度支护管桩水泥土复合支护墙支护结构。

支护桩截面形状及材料强度将影响支护结构的变形稳定性, 根据文献[5]可知, 控制基坑变形的主要因素是支护桩截面惯性矩和材料弹性模量。增大截面惯性矩势必增加材料用量; 增大弹性模量势必提高混凝

土等级。因此, 在尽可能降低建筑能耗及建筑材料使用的情况下满足基坑变形稳定已成为需解决的问题。

已有研究表明^[6-8]采用高强度预制桩是解决上述问题的有限途径。按照支护桩截面形状分为预制高强度矩形桩、预制高强度管桩、预制高强度 U 形板桩。其中预制高强度支护管桩具有桩身质量好、施工速度快、工程造价低、桩身检测方便、工厂化生产等特点, 被广泛应用于基坑工程中^[9]。

国内外较多科研人员对水平承载桩的作用机理进

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金项目(BY2012031); 南京市住房与城乡建设委员会立项课题(201207)

收稿日期: 2014-07-28

行了研究和探讨,但由于岩土体结构的复杂性,用作基坑支护主要承受水平向土压力的预制桩,还没有形成完整的计算方法体系,因此有必要对预制支护桩受力与计算性能进行分析,特别是支护管桩承受土压力性能的变化规律及其设计计算模型进行研究分析。

目前,关于预制桩用于基坑支护的研究,主要是分析其自身抗弯、抗剪性能的变化规律。颜荣华等^[10]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则,对预应力混凝土支护管桩沿斜截面破坏时的受力机理进行理论分析,推导出了预应力混凝土支护管桩的抗剪承载力计算公式。黄广龙等^[11]通过 24 根预应力高强混凝土支护管桩的抗弯承载力试验,分析其在弯矩作用下的破坏机理,提出适用于支护管桩的抗弯承载力计算公式。周文苑等^[12]通过 9 根矩形支护桩的受弯性能试验,研究了矩形支护桩的受弯破坏特征、裂缝开展情况和受弯承载力。上官精灵等^[8]推导出 U 型预应力混凝土支护板桩的水平承载力计算方法,并采用试验结果验证了其正确性。雷亮亮^[13]在抗弯试验的基础上对管桩的抗弯性能做了分析,得出管桩具有良好的抗弯性能。杨庆光等^[14]考虑桩身挤土效应及深度效应,利用 Vesic 圆孔扩张理论,推导出挤土管桩水平承载力与水平位移之间的关系式。

随着预制桩在基坑工程中的广泛应用,支护管桩承受水平土压力,处于受弯及受剪复合状态,其控制基坑变形稳定起到工程成功的关键,因此研究其设计计算方法具有实际意义。但是目前,针对支护管桩在基坑变形计算方面的分析与研究鲜见报道。鉴于此,本文采用弹性支点法和增量法的计算方法,结合南京邮电大学科研综合楼,对工程实际设计中预制支护管桩的设计计算要点进行了详细分析,并对比了理论计算与实测的基坑位移,证实了预应力预制支护管桩的可靠性和有效性,值得在同类工程的设计与施工中参考。

1 基坑支护结构变形计算分析

在国内,目前基坑开挖支护结构设计中,等值梁法和弹性地基梁应用最多。开挖面以上的挠曲线微分方程可分为:桩身弯矩为多项式函数,即

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} = e_a(z_i)b_s, \tag{1}$$

式中, E , I 分别是支护桩弹性模量和截面惯性矩, z_i 为计算点深度, $e_a(z_i)$ 为基坑外侧开挖面以上水平荷载标准值分布函数, b_s 为水平荷载计算宽度。开挖面以下的挠曲线微分方程为

$$EI \frac{d^4x}{dz^4} = e_a(h)b_s + m(h_n - z_i)xb \tag{2}$$

式中, m 是水平抗力比例系数, $e_a(h)$ 为基坑外侧开挖面以下水平荷载标准值分布函数, b 为支护结构计算宽度。基于式 (1) 和式 (2) 分析,在基坑开挖深度以及地质条件和坑外荷载一定的条件下,影响基坑计算位移的主要因素为支护桩桩身材料弹性模量 E 和桩身支护断面截面惯性矩 I 两个参数。其中弹性模量是由具体材料确定的,惯性矩由截面形式决定的。目前用于基坑支护的预制支护桩大多数是空心管桩,其截面型式见图 1。

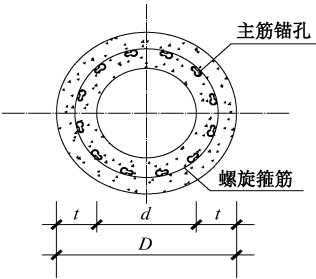


图 1 支护管桩截面型式示意图
Fig. 1 Section of a pipe pile

现在设计单位使用的商业基坑设计软件无法考虑支护桩的空心问题。以下根据材料力学原理,对使用最多的支护管桩的参数进行分析,结果详见表 1。

表 1 支护管桩截面特性

Table 1 Section properties of pipe piles					
桩型号	截面积	形心	惯性矩	抵抗矩	面积矩
$D(t)$	m/cm^2	$/cm$	I/cm^4	W/cm^3	S/cm^3
800(160)	3217	40	1750040	43751	33451
800(180)	3506	40	1826632	45666	35568
800(400)	5027	40	2010615	50265	42667

根据表 1 分析,壁厚为 160 mm 空心支护管桩与同直径实心桩相比,其惯性矩减小约 12.96%;壁厚为 180 mm 的空心支护管桩与同直径实心桩相比,其惯性矩减小约 9.15%。两种桩型惯性矩减小值均较小,因此管桩空心部分减小的截面惯性矩可不予考虑,且由于管桩施工结束后,空心部分全部被水泥土填充,水泥土的强度对支护管桩起到一定的有利因素,但是在计算时可不考虑水泥土的强度,以作为安全储备。

2 基坑支护工程实例

2.1 工程概况

场地位于南京市新模范马路中段北侧。基坑北侧地下室外墙与该侧用地红线最近距离约为 3.0 m,与模范马路最近距离约 3.5 m;南侧地下室外墙与用地红线最近距离约为 3.0 m,与该侧新模范马路最近距离约为 3.5 m;东侧地下室外墙与用地红线最小距离约为 3.0 m,与东侧建筑物最近距离约 3.0 m;西侧地

下室外墙距离用地红线最小约为 3.1 m, 与该侧道路最近距离约 3.5 m。基坑周边道路下埋设了众多市政管线。环境保护要求较高。

2.2 工程地质概况

场地地形平坦, 地面标高最大值 11.35 m, 最小值 10.50 m, 相对高差 0.85 m。场地地貌单元为长江漫滩, 基坑开挖影响范围内土层物理力学性质详见表 2。

表 2 土层物理力学性质

Table 2 Mechanical parameters of soil layers

土层名称	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	土层厚度 /m	固结快剪标准值	
			c_{eq}/kPa	$\varphi_{\text{eq}}/(^{\circ})$
①杂填土	18.8	0.80~3.30	5.0	15.0
② ₁ 粉质黏土	19.2	0.40~3.90	20.0	18.3
② ₂ 粉土夹粉砂	18.9	3.10~10.40	7.0	27.9
② _{2A} 粉质黏土	18.0	0.70~7.00	11.0	21.2
③ ₁ 粉砂	19.3	7.20~12.60	6.0	31.2
③ ₂ 粉细砂	19.0	10.60~15.50	5.0	31.4
③ ₃ 粉质黏土	19.7	1.80~8.70	29.5	13.7
④中粗砂混卵石 砾石	20.0	0.60~4.50	—	—

2.3 水文地质概况

场地地下水属潜水, 主要赋存于①层填土、②层土以及③₁层、③₂层, 受大气降水、地表水补给, 以蒸发和渗流形式排泄。勘探期间有部分钻孔测得的初见水位埋深为 1.80~2.20 m, 相应标高为 8.50~9.01 m; 稳定水位埋深为 1.60~2.10 m 相应标高为 8.72~9.53 m。地下水位的年变幅约为 0.5 m。近年最高地下水位约为 10.00 m。

2.4 基坑支护结构设计

综合该项目水文地质、工程地质以及周边环境的保护要求, 本工程具体支护方案如下: 支护结构采用 PCMW 工法(三轴水泥土搅拌桩内隔一孔插一根预制支护管桩)结合两道钢筋混凝土支撑; 三轴水泥土搅拌桩采用 $\Phi 850@1200$ 的型式。基坑顶部设置排水沟, 兼做截水作用, 坑内采用混凝土管井疏干降水。具体支护型式见图 2 支护结构剖面图。

2.5 支护设计施工工况

本基坑工程开挖深度较深, 环境保护要求高, 施工难度较大。整个基坑工程实施历时 8 个多月, 其中从基坑正式开挖到基础底板全部浇筑完毕接近 6 个月。基坑开挖前布置的各个监测测点记录了基坑开挖过程中主要工况下支护结构的位移变化, 其主要测点布置详见图 3。

各施工工况概述如下: 施工支护结构, 待其施工结束后, 卸土开槽至一层支撑底, 浇筑圈梁及一层支

撑; 待支撑体系强度达到设计强度的 80%后, 向下分层分区开挖至二层支撑标高; 浇筑二层支撑; 二层支撑体系达到强度要求后, 向下分层分区开挖至基坑底部; 砼垫层应随挖随浇, 且延伸至支护桩边与支护桩紧密浇注; 浇筑混凝土底板且延伸至支护桩边; 待底板达到设计强度的 80%后拆除第二层支撑; 浇筑负二层主体结构及换撑块; 负二层底板及换撑块达到强度要求后拆除第一层支撑; 向上施工主体结构, ± 0.000 下全部施工完成后, 回填土方。

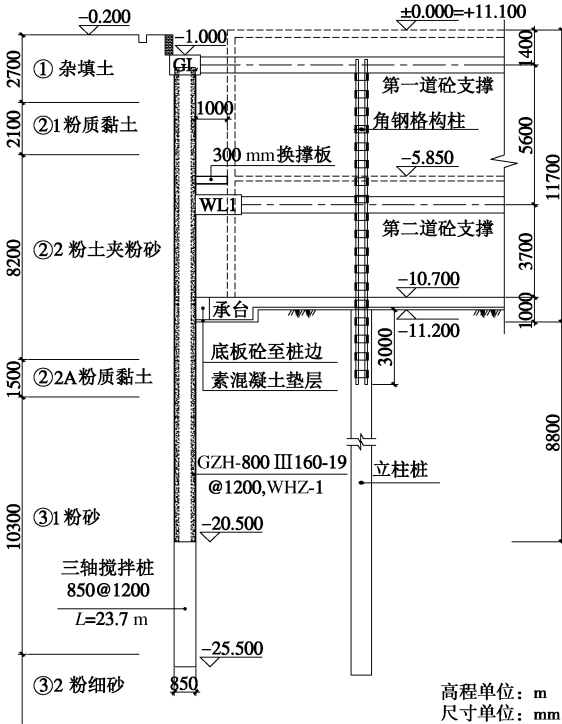


图 2 基坑支护结构剖面图

Fig. 2 Section of retaining structures

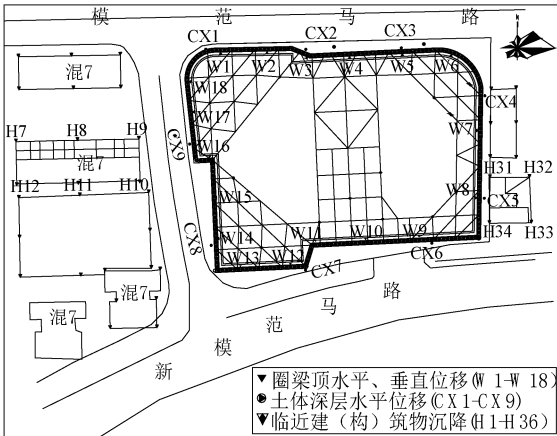


图 3 支撑平面及主要测点布置图

Fig. 3 Layout of supports and monitoring points

3 计算及实测结果分析

3.1 支护体水平位移

图 4 为基坑四周典型位置水平位移计算值与相应

点的实测值比较曲线, 由图 4 可看出, 计算位移变化平缓, 比较均匀, 最大值约在 17.0~23.2 mm 之间, 与实测的最大水平位移值接近, 变化规律基本一致, 没有发生突变。计算点与监测点水平位移均很小, 且变化稳定, 表明支护结构是稳定的。桩身水平位移变形是上大下小, 呈现“纺锤状”, 主要发生地面下 8.0~10.0 m 之间, 这是由于开挖后土体主动土压力作用导致上部土体变形而成, 但下部土体在被动土压力作用下难以变形。

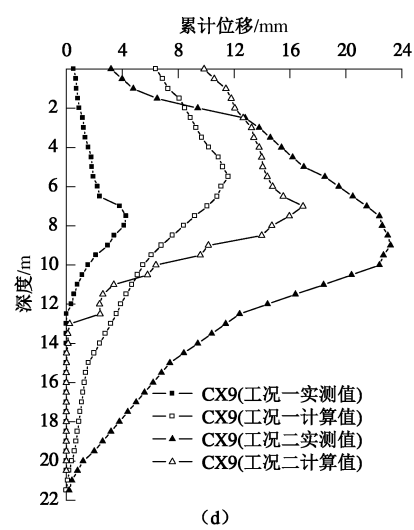
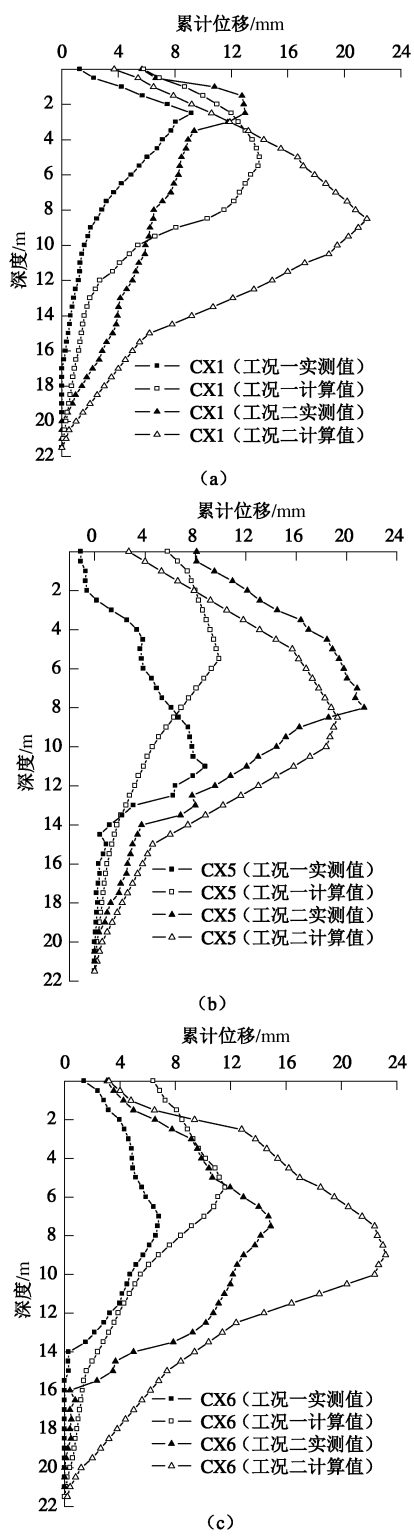


图 4 水平位移计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between measured and calculated horizontal displacements

从图 4 中可看出, 开挖浅层土体时, 土体的变形普遍较小。开挖直至坑底时, 土体变形较大且变化规律相似。北侧 CX1、CX2、CX3 三个实测点的最终位移值分别为 12.98, 16.53 及 12.17 mm, CX2 处于北侧中部, 其变形较靠近于基坑角部的 CX1 和 CX3 要大。其它三侧每侧各有 2 个测点且均在角部, 其中 CX4 和 CX5 最大位移值分别为 19.95 mm 和 20.41 mm, CX6 和 CX7 最大位移值分别为 14.76 mm 和 16.11 mm, CX8 和 CX9 最大位移值分别为 15.83 mm 和 15.96 mm。这说明基坑周边的土体变形存在一定的空间效应。

3.2 支护墙顶沉降位移

图 5 为支护墙顶的沉降曲线, 图中将四侧墙体的测点连在一起。支护墙顶由于墙体的侧移而表现为沉降, 沉降的发展规律与墙体的侧移变形密切相关。从图中可看出总体沉降较小, 在步骤 1 (开挖到圈梁底) 和步骤 4 (浇筑二层支撑) 时相近, 在步骤 5 (开挖至基坑底部) 和步骤 6 (设置底板换撑) 时相近。在地下室底板浇筑完成时, 墙体最大沉降为 6.5 mm, 发生在 W8 测点位置。从图 5 中还可看出整体沉降比较均

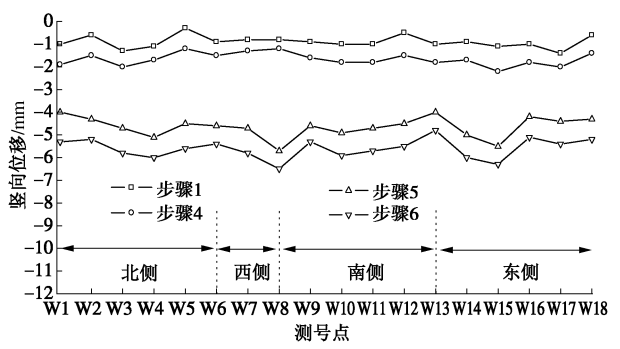


图 5 支护墙顶部沉降实测值

Fig. 5 Measured settlements at top of wall

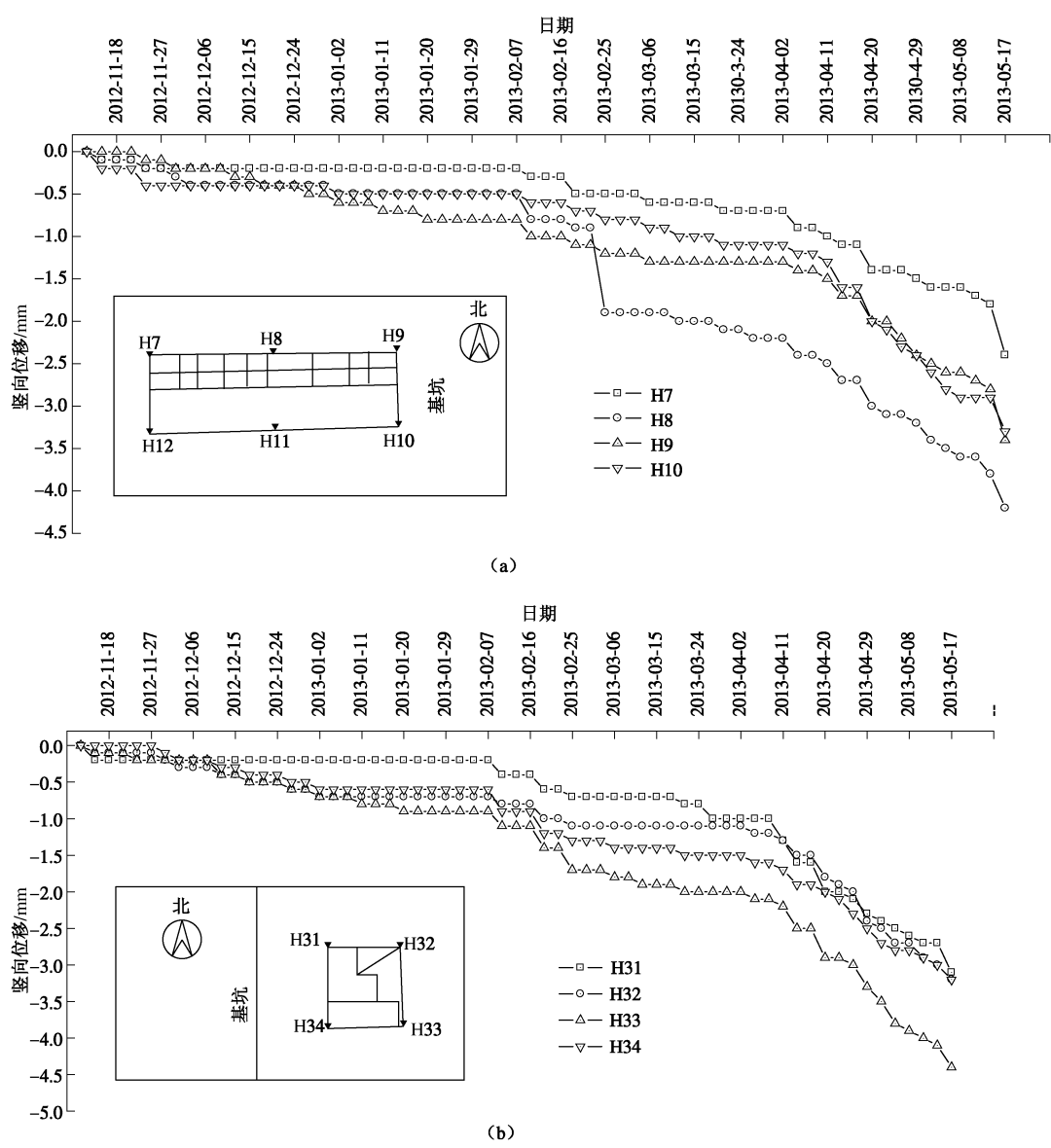


图 6 基坑周边建筑物沉降曲线

Fig. 6 Settlement curves of surrounding buildings

匀, 最大沉降差异发生在 W13 和 W14。W15 和 W16 处, 最大沉降差异为 1.2 mm。

3.3 基坑周边建筑物沉降

图 6 为基坑周边距离其最近的建筑物沉降测点的沉降情况。从图中可看出, 在整个施工阶段, 各建筑物都发生了轻微的沉降, 测点在整个阶段产生的最大沉降不足 5.0 mm。整体而言, 基坑周边建筑物沉降较小, 未对建筑物的正常使用造成影响。

4 结 论

(1) 通过现场巡视以及监测数据看, 本工程采用三轴搅拌桩内插支护管桩结合两道混凝土内支撑的支护方式是可行的。实践证明本工程的围护结构设计是合理而且有效的。

(2) 对于采用三轴水泥土搅拌桩内插支护管桩

(即 PCMW 工法) 的支护方案, 高强度支护管桩起到了非常重要的作用。根据本文采用商业理正软件计算的结果与现场实际监测的数据进行对比分析, 二者变化趋势基本一致, 变化数值大小接近。

(3) 关于预应力高强度支护管桩用于深基坑的计算参数取值, 本文进行了初步分析, 但是对支护管桩内部的水泥土强度以及施加预应力以后支护管桩的力学性能变化, 今后有待进一步通过科学实验和观测实践检验和改进。

参考文献:

[1] 何永福, 朱进军. 管桩在连云港地区基坑支护中的应用及实测分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 57 - 59. (HE Yong-fu, ZHU Jin-jun. Application and observational analysis of pipe-pile for excavation support system in Lianyungang

- district[J]. Architectural Construction, 2009, **39**(7): 57 - 59. (in Chinese))
- [2] 黄广龙, 李 勇, 夏 佳. 预应力管桩在基坑围护中的应用[J]. 建筑技术, 2006, **37**(12): 926 - 927. (HUANG Guang-long, LI Yong, XIA Jia. Application of pre-stressed concrete pipe-pile deep foundation bracing structure[J]. Architecture Technology, 2006, **37**(12): 926 - 927. (in Chinese))
- [3] 周建凡. PHC 管桩在深基坑工程中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. (ZHOU Jian-fan. Study on application of PHC pile in deep foundation pit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [4] 耿 平, 陆秀华, 蒋柏东. PCMW 工法在深基坑工程中的应用[J]. 建筑技术, 2012, **43**(3): 231 - 233. (GENG Ping, LU Xiu-hua, JIANG Bo-dong. Application of PCMW method in deep foundation pit engineering[J]. Architecture Technology, 2012, **43**(3): 231 - 233. (in Chinese))
- [5] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1885 - 1896. (YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1885 - 1896. (in Chinese))
- [6] 杨 波, 黄广龙, 赵升峰, 等. 预应力高强混凝土矩形支护桩在基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 371 - 376. (YANG Bo, HUANG Guang-long, ZHAO Sheng-feng, et al. Application of rectangular prestressed high strength concrete supporting piles in excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 371 - 376. (in Chinese))
- [7] 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(增刊 2): 1643 - 1647. (ZHANG Shi, LI Huan-qiu, WANG Ai-xun. Technical approaches to improvement of application of PHC pile in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(S2): 1643 - 1647. (in Chinese))
- [8] 上官京灵, 黄广龙, 耿山河. U 型预应力混凝土支护板桩承载力计算方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, **35**(5): 100 - 104. (SHANGGUAN Jing-ling, HUANG Guang-long, GENG Shan-he. Calculation method for bearing capacity of U-shaped prestressed reinforced concrete sheet pile[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2013, **35**(5): 100 - 104. (in Chinese))
- [9] 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 Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 317 - 320. (in Chinese))
- [10] 颜荣华, 黄广龙, 梅国雄, 等. 预应力混凝土支护管桩抗剪计算分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2010, **32**(5): 49 - 54. (YAN Rong-hua, HUANG Guang-long, MEI Guo-xiong, et al. Analysis of shear resistant capacity of prestressed concrete supporting pipe pile[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2010, **32**(5): 49 - 54. (in Chinese))
- [11] 黄广龙, 颜荣华, 周 峰, 等. 预应力高强混凝土支护桩抗弯试验研究及计算方法探讨[J]. 建筑结构, 2012, **42**(4): 113 - 116. (HUANG Guang-long, YAN Rong-hua, ZHOU Feng, et al. Experimental study and discussion on the flexural capacity of prestressed high strength concrete supporting piles[J]. Architectural Construction, 2012, **42**(4): 113 - 116. (in Chinese))
- [12] 周文苑, 黄广龙, 凌德祥, 等. 预应力高强混凝土矩形支护桩的受弯性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, **33**(5): 84 - 89. (ZHOU Wen-yuan, HUANG Guang-long, LING De-xiang, et al. Flexural performance of rectangular pre-stressed high strength concrete supporting pile[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2011, **33**(5): 84 - 89. (in Chinese))
- [13] 雷亮亮. PHC 管桩应用于基坑支护的模拟分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. (LEI Liang-liang. Simulation and analysis of PHC pipe pile used in the foundation pit support[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 杨庆光, 严鹤鸣, 罗善煌, 等. 悬臂式管桩在基坑支护工程中的应用研究[J]. 湖南工业大学学报, 2013, **27**(3): 31 - 35. (YANG Qing-guang, YAN He-ming, LUO Shan-huang, et al. Application of cantilever pipe piles in foundation pits engineering[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, **27**(3): 31 - 35. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)