

# 预应力高强混凝土矩形支护桩在基坑工程中的应用

杨波<sup>1,2</sup>, 黄广龙<sup>2</sup>, 赵升峰<sup>1</sup>, 李书波<sup>1</sup>, 周文苑<sup>1</sup>

(1. 江苏今迈工程勘察有限公司, 江苏 南京 210005; 2. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 预应力高强混凝土矩形支护桩(简称矩形支护桩)是近几年新开发的桩型, 截面外方内圆。就其截面形式而言, 相较于管桩和方桩, 其抗弯刚度有较大的提高, 更适用于以受水平力为主的基坑支护工程。将矩形支护桩应用于大面积、深开挖的软土基坑中, 结果表明, 基坑运营状况良好, 支护结构变形及桩内力均在可控范围内, 不仅在安全上有保证, 并在很大程度上提高了基坑支护的经济性及施工便捷性, 对预应力结构矩形支护桩在基坑工程中的应用有一定的参考价值。

**关键词:** 预应力结构; 矩形支护桩; 基坑工程; 变形监测

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0371-06

**作者简介:** 杨波(1986-), 女, 四川内江人, 硕士, 从事岩土工程设计。E-mail: yangpohe@163.com。

## Application of rectangular prestressed high strength concrete supporting piles in excavation engineering

YANG Bo<sup>1,2</sup>, HUANG Guang-long<sup>2</sup>, ZHAO Sheng-feng<sup>1</sup>, LI Shu-bo<sup>1</sup>, ZHOU Wen-yuan<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Jinmai Engineering Investigation Co., Ltd., Nanjing 210005, China; 2. College of Transportation Science & Engineering,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** A new type of pile with rectangle and internal circular cross section is developed in recent years, which is named prestressed high strength concrete rectangular supporting pile (rectangular supporting pile for short). Compared with that of the pipe pile and square pile, the flexural stiffness of rectangular supporting pile is greatly improved in cross-section form. Thus it is more suitable to be used as supporting structures in the excavation engineering in which the pile mainly bears horizontal force. An engineering case of the rectangular supporting piles used as the supporting structures of the excavation in soft soils is introduced, and the excavation is in good condition during its construction. The monitoring results indicate that the deformation of the supporting structures and the internal force of piles are in the controllable range. So the rectangular supporting piles have security assurance and greatly improve the economy and convenience for the pit excavation. Therefore this case study and the results may provide a reference for the application of rectangular supporting piles in excavation.

**Key words:** prestressed structure; rectangular supporting pile; excavation engineering; deformation monitoring

## 0 引言

随着城市建设的发展, 地下空间的合理利用成为大势所趋, 基坑的开挖规模向大而深的方向发展, 作为临时支护, 基坑花费的代价越来越大<sup>[1]</sup>。在当下环保、高效及经济的理念下, 迫切需要将一些新工艺、新方法应用于基坑支护。而预应力混凝土桩具有桩身质量好、施工速度快、工程造价低、施工绿色环保、桩身检测方便、可工厂化生产等优点, 并在基坑支护中得到一定的应用, 也取得了良好的效果。

目前, 在基坑工程中, 较为常用的预应力混凝土桩为预制管桩, 且已有较为成熟的施工工艺, 不少专家学者对其进行了研究。黄广龙等<sup>[2-3]</sup>对预应力管桩作为支护结构的设计计算方法进行了讨论, 并就具体工

程进行了分析。王翠英等<sup>[4]</sup>分析了管桩受力破坏的机理和单桩承载力提高的原因, 以及预应力管桩作为基坑支护桩的受力特性。肖桃李等<sup>[5]</sup>探讨了 PHC 管桩在深厚软土基坑中应用的可行性, 并提出了 PHC 管桩用作基坑桩锚支护的要求。周建凡等<sup>[6]</sup>从受力特性、抗弯性能试验、经济效应及施工工期等方面说明了 PHC 管桩用于基坑支护的适宜性。

另外, 一些小型预制桩也常应用于劲性水泥土墙围护中, 以代替 H 型钢作为劲性材料, 徐东, 徐洪球等<sup>[7-8]</sup>针对实际工程对其进行了现场试验和理论分析,

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金资助项目 (BY2012031)

收稿日期: 2012-08-21

效果较好。

预应力高强混凝土矩形支护桩<sup>[9]</sup>是近几年新开发的桩型,截面形状外方内圆,与支护管桩及空心方桩相比,其力学性能更好,节省材料,含钢率低,具有更大的抗弯刚度,也更有利于水平受力,所以其应用于基坑支护等以抗水平力为主要用途的结构上具有更广泛的前景<sup>[10]</sup>。研究表明,在相近的成本下,矩形支护桩比空心方桩抗弯承载力增加约 10%~20%<sup>[11]</sup>。

本文以某大面积、深开挖、应用预应力高强混凝土矩形支护桩的软土基坑为例,就基坑的设计、施工及监测结果等各方面进行了较为详细的介绍和分析。

1 预应力高强混凝土矩形支护桩

预应力高强混凝土矩形支护桩(简称矩形支护桩)是以特制模具,采用离心和预应力技术相结合的方式生产的一种新型预制桩<sup>[12]</sup>。预应力高强混凝土矩形支护桩截面为长宽不等的矩形截面,内部为空心管状,采用离心法成型,并施加预应力,混凝土强度等级为 C80,蒸汽养护,单节桩长最大可达 18 m。

矩形桩的生产工艺流程与现有的管桩、空心方桩类似,主要的不同点是钢筋骨架和模具外观形式是长方形,以及针对矩形支护桩的截面形式,生产工艺作了相应的调整和改进。矩形支护桩模具采用沿矩形截面对角线对半分开的方式,预应力主筋采用 Φ<sup>D</sup>12.6 预应力混凝土用钢棒,箍筋为冷拔低碳钢丝,端板采用铸坯轴向模轧生产工艺。

矩形支护桩按配筋形式分为:预应力高强混凝土矩形桩(SPR)、含普通钢筋的预应力高强混凝土矩形支护桩(CSPR)。矩形支护桩的优点主要有:

(1)作为基坑支护桩,桩的抗弯性能是关键所在。而就截面形式而言,矩形截面的支护桩在抗弯刚度方面有进一步的提高。

(2)由于施加预应力,可改善结构的抗弯性能。

(3)由于可工厂化生产,其桩身质量好,且工程造价相对较低,无泥浆污染,施工速度快。

2 工程概况

盐城某工程地下为二层车库<sup>[13]</sup>。基坑普遍侧挖深为 10.15 m,局部电梯坑挖深 14.7 m。基坑平面尺寸为 160 m×115 m,周长约 540 m,开挖面积 18500 m<sup>2</sup>。

场地处于泻湖相沉积平原,基坑开挖影响范围内主要分布:

1 层,杂填土:灰—灰黑色,湿,主要成份为粉质黏土,夹大量建筑垃圾,土质松散;2 层,粉质黏土:灰—灰黄色,湿—饱和,可塑,韧性及干强度中等;3 层,淤泥质粉质黏土:灰色,饱和,流塑,夹少量粉土团块或薄层,薄层厚 1~15 mm,韧性及干强度中等,土质较均匀;4 层,粉质黏土:灰黄—黄褐色,饱和,可塑,夹少量铁锰质结核,韧性及干强度中等,土质较均匀;5A 层,粉土:灰色,湿,中密,局部稍密,韧性及干强度低,土质欠均匀;5B 层,粉土:灰色,湿,中密,局部密实,韧性及干强度低,土质欠均匀;5C 层,粉土:灰色,湿,稍密—中密,韧性及干强度低,土质欠均匀。

场地地下水类型主要为孔隙潜水,其次为承压水。孔隙潜水主要赋存于第 4 层以上土层中,承压水赋存于 4 层之下含水土层中。土层参数详见表 1。

3 基坑支护方案

3.1 支护方案选择

综合分析本工程的基坑开挖深度、开挖面积、地质条件及周边环境等因素,如何在保证基坑及周边环境安全的前提下,尽量缩短施工工期及减少工程造价是本工程的主要问题。

根据以上设计条件,较为常规的做法可采用钻孔灌注桩加内支撑的支护形式。经过对比分析,矩形支护桩安全、经济及施工方便,最终采用矩形桩支护加二层混凝土内支撑的支护形式。

整个基坑采用 450×600@600 矩形桩支护(SPR),竖向设置两道混凝土内支撑,500×500 预制空心方桩

表 1 土层参数  
Table 1 Parameters of soils

| 层号 | 层厚/m | 含水率<br>w/% | 重度<br>γ (kN·m <sup>-3</sup> ) | 孔隙比<br>e | 压缩模量<br>E <sub>s</sub> /MPa | 固结快剪标准值       |               | 渗透系数                                  |                                       |
|----|------|------------|-------------------------------|----------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|    |      |            |                               |          |                             | 黏聚力 c<br>/kPa | 内摩擦角<br>φ/(°) | K <sub>v</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> ) | K <sub>h</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> ) |
| 1  | 2.2  | —          | (18.5)                        | —        | —                           | (12.0)        | (3.0)         | (2.50×10 <sup>-4</sup> )              | (3.80×10 <sup>-4</sup> )              |
| 2  | 0.7  | 27.3       | 19.1                          | 0.773    | 4.0                         | 27.0          | 11.4          | 2.86×10 <sup>-7</sup>                 | 1.14×10 <sup>-6</sup>                 |
| 3  | 8.8  | 45.8       | 17.1                          | 1.265    | 2.3                         | 12.0          | 7.1           | 2.56×10 <sup>-6</sup>                 | 4.45×10 <sup>-6</sup>                 |
| 4  | 4.0  | 24.4       | 19.5                          | 0.699    | 6.0                         | 26.0          | 11.5          | 9.88×10 <sup>-7</sup>                 | 1.22×10 <sup>-6</sup>                 |
| 5A | 7.6  | 27.9       | 18.9                          | 0.775    | 7.0                         | (3.0)         | (16.0)        | (3.25×10 <sup>-4</sup> )              | (5.00×10 <sup>-4</sup> )              |
| 5B | 4.2  | 25.7       | 19.4                          | 0.704    | 10                          | (3.0)         | (19.0)        | (5.00×10 <sup>-3</sup> )              | (6.00×10 <sup>-3</sup> )              |

作为立柱。基坑外侧设置 $\Phi 850@1200$ 三轴深搅桩作为止水帷幕。矩形支护桩长 21 m, 立柱桩长 38.2 m, 深搅桩长 29.5 m, 进入不透水层, 形成全封闭止水帷幕<sup>[14]</sup>。支护剖面如图 1 所示。

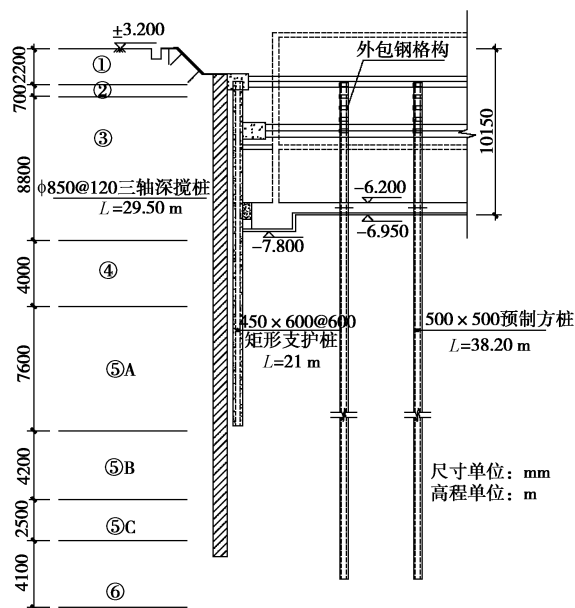


图 1 基坑支护剖面图

Fig. 1 Profile of excavation

3.2 矩形支护桩计算

常用矩形支护桩参数列于表 2。经计算分析, 将一层支撑设置于地面下 2 m, 二层支撑位置为地面下 5 m。

根据土质条件及环境情况选取不同剖面计算支护桩弯矩, 当基坑开挖到底时, 各区段计算桩身最大弯矩设计值为 561 kN·m, 低于桩身极限弯矩值。

表 2 常用矩形支护桩参数

Table 2 Parameters of rectangular supporting piles

| 宽度<br>/mm | 高度<br>/mm | 内径<br>mm | 混凝土<br>强度<br>等级 | 抗弯性能                                   |   |
|-----------|-----------|----------|-----------------|--|---|
|           |           |          |                 | 极限弯矩<br>$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | 抗裂弯矩<br>$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$ |
| 375       | 500       | 200      | C80             | 450                                    | 201                                       |
| 450       | 600       | 250      | C80             | 643                                    | 312                                       |

3.3 支护方案经济性分析

根据本工程基坑挖深、土质条件及周边环境等因素, 若采用常规钻孔灌注桩作为支护桩, 需选用 $\Phi 1000@1200$ , 桩体配筋为 24 $\Phi 25$  (HRB400 级)。而 450×600 矩形支护桩主筋为 14 $\Phi^{D12.6}$  钢棒, 螺旋箍筋直径  $\Phi^b5$ , 极限弯矩达 643 kN·m。

经估算, 就支护桩造价而言, 采用 450×600@600 矩形支护桩比钻孔桩造价低 20%~25%; 且本工程采用 500×500 预制方桩作为立柱, 比钻孔桩立柱造价约低 30%。由此可见, 矩形支护桩及方桩立柱方案经济性较好。

采用此方案优点主要有: ①经计算, 预应力混凝土

矩形支护桩结合两道混凝土支撑, 在强度、稳定及变形方面均可保证; ②采用预应力混凝土矩形支护桩, 相对于常规桩型, 其工程造价相对低, 经济性明显; ③由于矩形桩生产过程中施加预应力, 在基坑施工过程中, 可更好的发挥其力学性能; ④矩形桩可工厂化生产, 不仅质量可靠, 减少了钻孔桩现场浇筑的许多不确定因素, 并且节省了现场养护的时间, 另外, 矩形桩现场施工速度相当快, 也缩短了整个基坑的施工工期。

4 支护结构施工

在选用矩形支护桩后, 在本次基坑支护结构施工过程中, 尚存在着以下几个难点:

(1) 单节矩形支护桩最大桩长为 18 m, 本次基坑支护中所采用桩长为 21 m, 从而在施工过程中需要接桩, 须考虑接桩位置及接桩处的处理。

(2) 基坑四周均为道路, 且下埋管线, 采用静压法施工矩形桩, 在压桩过程中, 可能会对周边环境造成一定影响。

(3) 立柱采用预制方桩, 须采取有效措施保证立柱桩与支撑节点的有效连接, 保证支撑体系的稳定性。

针对以上几个问题, 施工过程中所采用的解决方法分别为:

(1) 经计算, 支护桩桩身弯矩及最大位移处在基坑开挖面附近, 因此, 将接桩位置设置于基坑开挖面以下, 以减小接桩对整个桩身力学性能的影响。采用内扣式机械接头加焊接解决了接桩问题, 使上下两端矩形支护桩连接牢靠, 不影响桩身稳定性及受力特性。

(2) 采用合理的施工顺序、施工工艺及措施, 以减少压桩对周边环境的影响。

(3) 一、二层支撑间方桩立柱外包钢格构及焊接缀板, 保证方桩立柱与支撑的连接。

开挖到底时基坑实景见图 2。



图 2 基坑开挖现场

Fig. 2 Excavating site of excavation

5 基坑变形监测

基坑部分监测点位置详见图 3。

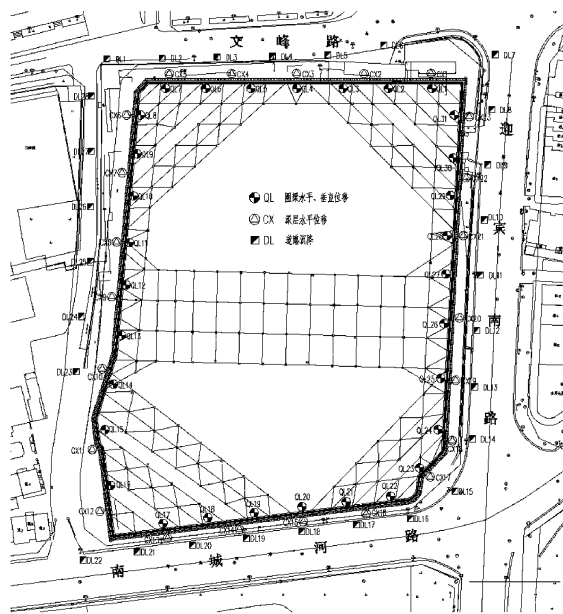


图 3 监测点平面布置图

Fig. 3 Layout of monitoring points

5.1 道路沉降

沿临近基坑侧道路每 20 m 布设一观测点，共 28 个测点，选取其中几个测点进行分析。DL3、DL5 位于基坑北侧文峰路，DL11 位于东侧迎宾路，DL17 位于南侧南城河路，DL25 位于西侧道路。

由图 4 可知，在基坑监测过程中，路面沉降最大为北侧文峰路，最大达 26.39 mm，其余三侧沉降相对较小。原因主要为：①支护结构北侧距离文峰路较近，且该侧为支护桩先施工区段，压桩过程对桩周土体产生挤土效应，在土方开挖至圈梁顶时，此部分应力释放，从而产生先期的地面裂缝与沉降。②该侧水平支撑体系为八字撑，支撑体系受力不均匀是导致该侧沉降大的另一原因。

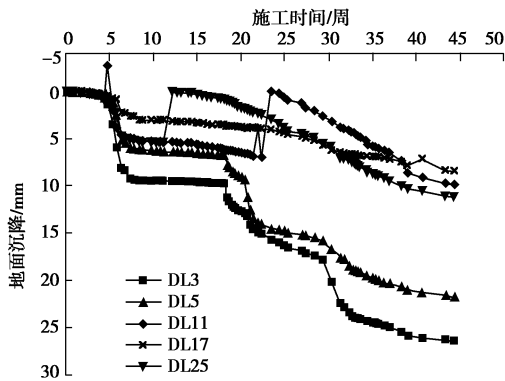


图 4 道路沉降变化曲线

Fig. 4 Curves of ground settlement

5.2 圈梁水平位移

基坑开挖顺序为先施工北侧角撑部分，再施工对撑部分，最后为南侧角撑。于基坑支护结构外侧每隔

15~20 m 布设一观测点，选取部分测点进行分析。

基坑北侧中部圈梁水平位移最大，测点 QL2 位移达 27.65 mm。除北侧外，其余侧水平位移均较小，不超过 20 mm。

从图 5 可以看出，在一层土方开挖过程中，圈梁水平位移变化速率有明显增大，在围檩及二层支撑的约束后，变化速率趋于稳定；随着二层土方的开挖，位移变化速率进一步增长，但基坑开挖到底后随着基础垫层及底板的浇筑，位移变化速率趋于稳定。

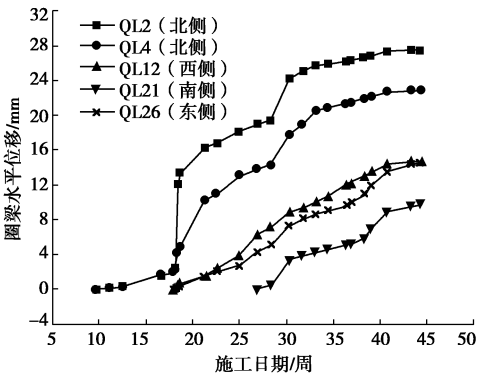


图 5 圈梁水平位移曲线

Fig. 5 Curves of horizontal displacement of ring beam

5.3 土体深层水平位移

根据工程实际情况，于基坑四周桩侧间隔 25 m 左右布设测斜孔。

从图 6 可知，土体深层水平位移呈现“中间大两端小”的趋势。这主要是桩顶圈梁以及坑底对桩的约束作用，限制了两端的位移。且随土方开挖工况的发展，桩体侧向变形逐渐增加，最大位移位置随开挖深度的增加而逐渐下移。

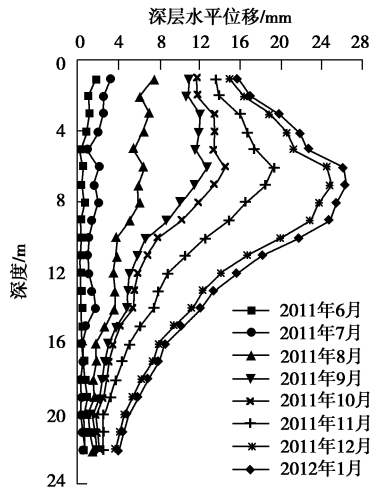


图 6 深层水平位移曲线

Fig. 6 Curves of deep lateral displacement

从监测数据看到，桩体最大位移位于基坑开挖面

上方, 该测点桩的侧向位移最大为 26.4 mm, 均小于计算值。矩形支护桩在生产过程中施加预应力, 对控制支护结构变形发挥了重要作用, 而目前设计计算时尚无法考虑预应力对变形控制的有利作用。

#### 5.4 桩身完整性观测

经现场巡视检查, 在基坑开挖过程中, 矩形支护桩及方桩立柱外观完好, 仅在北侧开挖到底时, 个别支护桩桩身出现了细微裂缝, 但裂缝程度并不影响正常使用, 且裂缝宽度并未开展。

通过以上各项监测结果分析表明, 在基坑整个开挖过程中, 基坑变形较小, 稳定性好, 表明本基坑选择矩形支护桩设计方案的合理性和可行性。

## 6 结 论

(1) 从截面形式看, 相对于管桩及方桩而言, 矩形支护桩抗弯刚度有较大提高, 更适合于以受水平力为主的基坑支护工程。

(2) 本基坑工程采用了矩形支护桩加内支撑的支护形式, 通过实践证明, 矩形支护桩较好的控制了基坑变形, 对其在基坑工程中的应用推广有一定的参考价值。

(3) 相对于常规桩型, 矩形支护桩在保证基坑安全的基础上, 降低了基坑支护的工程造价, 且缩短了施工周期, 对于基坑的经济性及施工便捷性都有了进一步的提高。

(4) 根据现场实际施工情况, 支护桩的施工可能对周边环境及基坑本身造成一定的影响。因此, 在矩形支护桩的施工过程中, 须根据实际情况, 采用合理的施工工艺及有效措施, 降低对周边环境的可能造成的影响以及对本基坑的变形影响。

(5) 据现场实测结果, 土体深层水平位移均比计算值小很多, 由于支护桩施加了预应力, 矩形支护桩对控制支护结构变形有着明显作用, 而目前计算过程中尚无法考虑预应力因素, 有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈忠汉, 黄书轶, 陈丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (CHEN Zhong-han, HUANG Shu-yi, CHEN Li-ping. Deep excavation engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 黄广龙, 李 勇. 预应力混凝土管桩在深基坑支护工程中的应用研究[J]. 建筑施工, 2005, 27(4): 12 - 14. (HUANG Guang-long, LI Yong. Study on prestressed concrete pipe pile applied to retaining and protecting of deep foundation excavation engineering[J]. Building Construction, 2005, 27(4): 12 - 14. (in Chinese))
- [3] 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 prestressed concrete pipe-pile in deep foundation bracing structure[J]. Architecture Technology, 2006, 37(12): 926 - 927. (in Chinese))
- [4] 王翠英, 王克俭, 王继伟. 预应力管桩的工作机理及其在基坑支护中的应用[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(3): 90 - 94. (WANG Cui-ying, WANG Ke-jian, WANG Ji-wei. Working mechanism and application of prestressed concrete tubular pile in foundation pit supporting[J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(3): 90 - 94. (in Chinese))
- [5] 肖桃李, 李新平, 戴翼飞. PHC 管桩在深厚软土基坑支护中的应用[J]. 施工技术, 2007, 36(1): 47 - 49. (XIAO Tao-li, LI Xin-ping, DAI Yi-fei. Application of PHC pipe pile in deep soft pit supporting[J]. Construction Technology, 2007, 36(1): 47 - 49. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 徐 东, 周顺华. 小型预制桩用于劲性水泥土墙基坑围护结构的计算分析[J]. 城市轨道交通研究, 2004(6): 32 - 35. (XU Dong, ZHOU Shun-hua. Calculation analysis of mini-type prefabricated piles through SMW method[J]. Urban Mass Transit, 2004(6): 32 - 35. (in Chinese))
- [8] 徐洪球, 姚燕明. 小型预制桩用于 SMW 工法基坑围护结构的计算分析[J]. 工程建设与设计, 2003(6): 18 - 20. (XU Hong-qiu, YAO Yan-ming. Calculation analysis of minitype prefabricated piles in SMW method to brace the pit[J]. Construction & Design for Project, 2003(6): 18 - 20. (in Chinese))
- [9] 苏 G/T21—2011 预应力高强混凝土矩形桩[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011. (Su G/T21—2011 Rectangular prestressed high strength concrete supporting pile[S]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2011. (in Chinese))
- [10] POULOS H G. Pile behavior-theory and application[J]. Géotechnique, 1989, 39(3): 35 - 37.
- [11] 周文苑, 黄广龙, 凌德祥, 等. 预应力高强混凝土矩形支护桩抗弯性能试验[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. Experiment research on

- flexural performance of rectangular prestressed high strength concrete supporting pile[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(5): 84 - 89. (in Chinese))
- [12] 周文苑. 预应力高强混凝土矩形支护桩承载性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2011. (ZHOU Wen-yuan. Research on bearing performance of rectangular prestressed high strength concrete supporting pile[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [13] 五洲广场岩土工程勘察报告[R]. 盐城: 东华理工大学勘察设计院, 2010. (Geotechnical investigation report of Wuzhou square building[R]. Yancheng: The surveying and Designing Institute of Donghua University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [14] 五洲广场深基坑支护设计文件[R]. 南京: 江苏今迈工程勘察有限公司, 2010. (Designing documents of deep foundation pit supporting structure of Wuzhou square building[R]. Nanjing: Jiangsu Jinmai Engineering Investigation Co., Ltd., 2010. (in Chinese))

(本文责编 明经平)