

北京市某深基坑支护工程实录

杨生彬¹, 王晓义², 朱艳艳²

(1. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要: 以开挖深度为 19.55 m 的北京市某深基坑支护工程为例, 对其所在区域的场地条件、周边环境及工程地质条件进行了具体的分析, 提出土钉墙与桩锚相结合的复合支护方案, 充分发挥两种支护形式相应的优势。方案设计紧密结合施工工艺的适用性, 针对卵石地层采用人工挖孔法成孔技术, 有效解决机械成孔所带来的诸多不利因素, 并制定合理的施工过程。支护效果表明, 方案设计合理, 边坡变形得到有效控制, 水平位移最大值仅为 12.1 mm, 各支护单元的受力性能发挥正常。同时, 合理的施工过程使得支护工程先于预定工期 11 d 完成, 为整个项目的后续施工赢得了宝贵的时间, 为类似工程提供一定的借鉴经验。

关键词: 岩土工程; 深基坑; 支护体系; 土钉墙; 锚杆

中图分类号: TU 47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4471 - 06

ENGINEERING CASE OF A DEEP FOUNDATION PIT SUPPORTING IN BEIJING

YANG Shengbin¹, WANG Xiaoyi², ZHU Yanyan²

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on a deep foundation pit supporting engineering with excavation depth 19.55 m, the ground situation and surroundings as well as engineering geology are analyzed; and a composite support plan combining the soil-nailed wall with pile-anchor system is proposed to make use of their respective advantages. The technique of artificially excavated piles is adopted for the cobble stratum to solve the problems that power drilling brings about. The maximum value of horizontal displacement is only 12.1 mm and the mechanical properties of each support element are all in working consequence. The support result illustrates that the design is reasonable and the displacement of the pit is controlled effectively. Meanwhile, the work is completed 11 days ahead of the construction arrangement, which leaves much time for the following work. The experience is valuable for the similar projects.

Key words: geotechnical engineering; deep foundation pit; supporting system; soil-nailed wall; anchor

1 引言

近年来, 在城市建筑中高层乃至超高层建筑大量涌现, 同时城市地下空间的开发也随之逐步向更

深处发展, 深基坑、超深特大型基坑层出不穷, 因而, 深基坑支理论及技术正面临新的挑战^[1]。其中土钉支护技术经过近 20 a 的应用, 支理论及设计方法都得到了长足的发展, 尤其是近几年针对钉土相互作用机制、土钉复合支护结构以及土钉

收稿日期: 2007 - 09 - 04; **修回日期:** 2007 - 10 - 11

作者简介: 杨生彬(1979 -), 男, 2000 年毕业于长春工程学院岩土与道桥工程系岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程、岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: yangshbin@126.com

结构稳定性算法等进行了比较深入的研究^[2~5]。同时，在基坑支护优化设计研究方面也取得了一定的成果，从系统工程的角度建立了深基坑工程设计方案模糊优化决策与评价模型^[6~8]，对设计与施工中诸如设计参数、施工工法、施工过程及工期造价等进行综合考虑与评价，取得很好的经济效益。

在北京地区，挖深达 20 m 左右的基坑是比较常见的，目前针对这一深度的支护设计比较成熟，形成了一种主流的设计思路，即土钉墙与桩锚支护相结合的支护形式，大量的工程实践说明这种支护形式能够有效控制深基坑边坡变形，且易于操作。本文结合北京市某深基坑工程支护方案设计，详细介绍了该工程的设计过程，并结合基坑布局提出了合理的施工方案，进行信息化施工，做到了过程控制，取得了很好的支护效果。

2 工程概述

2.1 工程概况

拟建北京市创世纪高新技术大厦位于北京市海淀区，西侧紧临中关村南大街，规划用地面积约 $2.49 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，总建筑面积 95 490 m^2 ，写字楼 A 座地上 27 层，写字楼 B 座地上 14 层，北侧公寓地上 8.5 层，框剪结构。地下均为 4 层，拟采用筏板基础，基坑挖深为 19.95 m，基坑平面图见图 1。

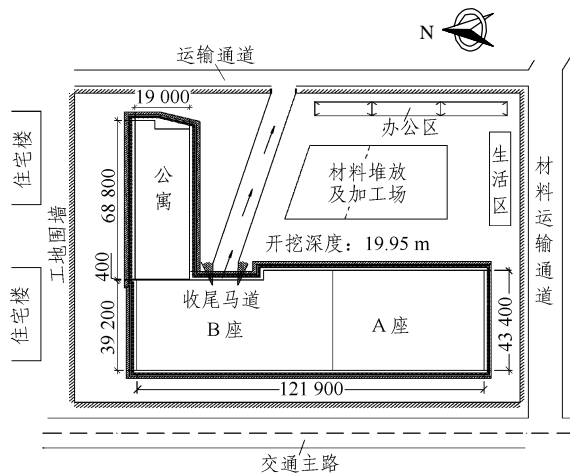


图1 基坑平面图(单位: mm)

Fig.1 Plane of pit(unit: mm)

2.2 工程地质及水文地质条件

本次勘察揭露 55 m 深度范围内，岩性以卵石层夹砂土、黏性土为主，基坑开挖深度范围内的土层参数及其物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

土层名称	层厚/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa
杂填土	1.6	16.5	10.0	10
黏质粉土	4.3	19.7	26.8	38
砂质粉土	4.0	18.7	21.5	26
细砂	3.1	19.7	17.0	32
中砂	1.9	20.5	39.0	0
卵石	13.1	21.0	44.0	0

拟建场区的水文地质单元属永定河冲洪积扇中上部。据勘察，地面以下 55 m 深度范围内，地下水水位埋深 27.4~27.8 m。部分孔存在上层滞水，水位埋深 5.8 m。经对地下水的腐蚀性测试分析，地下水对混凝土结构无腐蚀性。

2.3 工程分析

(1) 基坑四周的环境相对比较简单，其中西侧道路距离西坡上口线 13 m，北坡已有建筑物距离边坡上口线 12.6 m，距离南坡上口线 5 m 为材料运输通道，坡顶无堆载；

(2) 基坑开挖深度范围内的土层主要由黏质粉土、细砂、中砂及卵石组成，表层为杂填土，层厚 1.6 m，状态均为稍密~中密，地质条件较好，在支护中主要预防在砂层段发生流砂现象；

(3) 地下水水位在基底标高以下，因而在开挖前无需降水，对于局部上层滞水可采取明沟排水及坡面引流的方法将其疏干；

(4) 要进行总体布局，充分考虑基坑形状特点及其与周边的关系，制定合理的施工方案。

2.4 支护方案的选定

通常根据基坑周边环境的严峻程度，结合基坑开挖深度、工程地质和水文地质条件来确定支护方式，支护方式的确定也要考虑不同环境条件下约束下的基坑或基坑各边不同的“安全度”。此外，支护结构要密切与施工相配合，以期整个工程的经济效益最大化^[9, 10]。

结合工程分析，本工程选择土钉墙与桩锚相结合的复合支护型式，基坑上部黏质粉土层深度范围采用土钉墙支护法，考虑土钉间排距布置的合理性，支护深度确定为 6.7 m，放坡系数 0.2，充分利用基坑四周的空间。而基坑 6.7 m 深度以下部分，则采用“护坡桩+锚杆”的组合式改良支护法，该法在悬臂结构上加设一排或多排锚杆(索)，支护系统可简化为简支(外伸)梁或超静定(外伸)梁，挡土效果好，

土体变形可得到有效限制。

3 支护方案设计

3.1 土钉墙支护设计

3.1.1 设计方法

按照相关规程^[11]所提供的土钉墙设计原理进行设计, 并进行整体稳定性验算。

土钉设计内力计算:

$$1.25\gamma_0 T_{jk} \leq T_{uj} \quad (1)$$

其中,

$$T_{jk} = \zeta e_{ajk} S_{xj} S_{xj} / \cos \alpha_j$$

$$T_{uj} = \frac{1}{\gamma_s} \pi d_{nj} \sum q_{sik} l_i$$

式(1)中各参数含义见相关规程^[11]。土钉墙整体稳定性分析方法: 圆弧滑动条分法, 取安全系数 $F_s \geq 1.5$ 。

3.1.2 设计结果

土层计算参数采用表 1 提供的数据, 根据规范法进行计算后, 针对土钉的设计长度进行优化^[12], 最后得出: 土钉钢筋采用二级螺纹钢筋, 设计参数见表 2, 整体稳定性安全系数 $F_s = 1.77$ 。

表 2 土钉设计参数

Table 2 Design parameters of soil-nailed supporting

层序	锚孔直径 /mm	间距×排距 / (m×m)	倾角 / (°)	土钉直径 /mm	土钉长度 /m	设计拉力 /kN
1	100	1.6×0.9	10	16	3	5.8
2	100	1.6×1.4	15	20	9	54.2
3	100	1.6×1.3	15	20	9	66.9
4	100	1.6×1.3	15	20	9	42.6
5	100	1.6×1.3	15	16	6	31.8

坡面铺设 $\phi 6 \text{ mm} @ 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 钢筋网片, 并设置 $1\phi 16 \text{ mm}$ 横向压筋及 $1\phi 16 \text{ mm}$ 竖向压筋, 面层喷射 C20 细石混凝土, 喷层厚 80 mm, 混凝土配合比为水泥: 砂子: 石屑 = 1: 2: 2。

3.2 桩锚支护设计

3.2.1 护坡桩成桩工艺选择

本工程 -15 m 以下为卵石层, 总层厚 13.1 m, 基坑深度范围内层厚约 3.7 m, 其中局部含有粒径较大的漂石。对于这种地层, 机械成孔相当困难, 参

考类似地层桩孔施工的教训, 若选用机械成孔势必造成施工人员严重窝工、施工效率低, 甚至个别桩位无法成孔的后果。而人工挖孔法可控性强, 在地层条件和周边环境允许的前提下, 专业的作业队伍其工作效率是很高的, 并可以有效解决场区内卵石层较厚、机械施工无法成孔的问题。因此, 护坡桩采用人工挖孔灌注桩。

3.2.2 桩锚支护设计

运用岩土工程专业设计软件——深基坑支挡结构分析计算软件进行桩锚支护系统的初步参数设计, 然后紧密结合工程实践及地区经验, 选取科学、合理的支护参数。

(1) 支护参数的确定

护坡桩采用 $\phi 800 \text{ mm} @ 1\ 600 \text{ mm}$ 人工挖孔灌注桩, 桩顶标高为 -6.7 m; 设置两道支撑, 分别位于 -6.9 和 -11.5 m, 计算时考虑地面超载 20 kPa。

(2) 预应力锚杆设计

采取水土分算、矩形土压力模式, 支护刚度 50 MN/m², 算得的支撑轴力分别为第 1 道 171.3 kN/m、第 2 道 560.5 kN/m, 支挡结构弯矩及剪力包络图见图 2。

根据支撑轴力配置两道预应力锚索的材料参数, 选材为 7 $\phi 5 \text{ mm}$ (1860 级) 高强度低松弛钢绞线, 直径 $d = 15 \text{ mm}$, 截面面积 139 mm², 抗拉强度设计值 $f_{py} = 1\ 320 \text{ MPa}$ 。对于第一道锚索, 布置型式为两桩一锚, 即横向间距为 3 200 mm, 其轴向拉力设计值为 $T = 171.3 \times 3.2 = 548.16 \text{ kN}$, 则要求锚杆截面积为

$$A_g = \frac{T}{f_{py} \cos \theta} = 415.27 \text{ mm}^2$$

每根锚杆需要由 2.98 束组成, 实际配置 4 束钢绞线, 考虑 35% 的应力松弛, 张拉锁定值为 300 kN, 锚杆总长 18 m, 其中自由段 5 m、锚固段 13 m。同理算得第 2 道预应力锚索的设计参数, 见图 3。

(3) 护坡桩设计

多层支点排桩的嵌固深度计算值宜按整体稳定条件采用圆弧滑动简单条分法确定^[6], 算得护坡桩嵌固深度为 4.23 m, 实际取值 4.25 m, 桩身混凝土强度等级 C30, 见图 3。

根据图 2 中的弯矩及剪力分布状态进行护坡桩钢筋笼配筋。采取非对称配筋, 即首先按照圆形截面均匀配置纵向钢筋, 然后在受拉侧弯矩突变区段

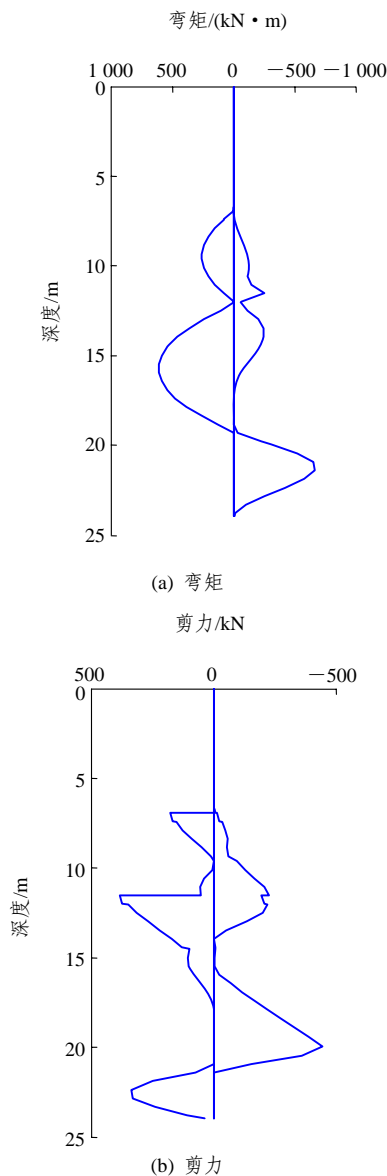


图2 支护结构弯矩及剪力包络图
Fig.2 Moment and shear force distribution

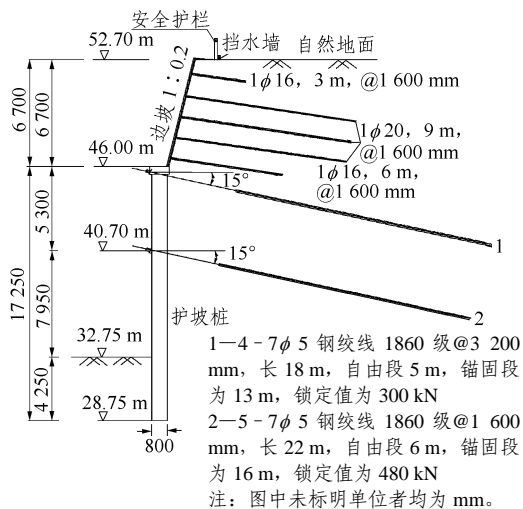
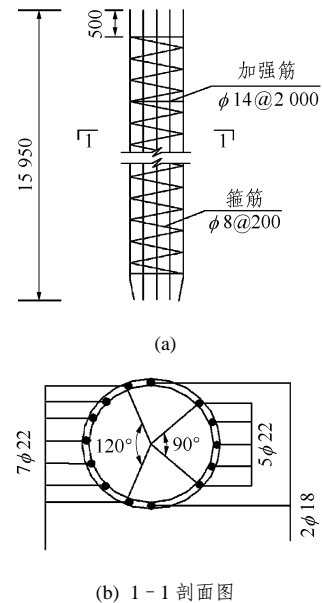


图3 基坑支护设计详图
Fig.3 Supporting design of the pit

加配两根主筋, 以改善整个支护体系的支护刚度, 护坡桩配筋见图4。



注: 图中未标明单位者均为 mm。

图4 护坡桩配筋图
Fig.4 Reinforcement of pile

(4) 冠梁及腰梁设计

桩顶设置一道冠梁, -11.5 m 位置设置一道腰梁, 冠梁截面及配筋和腰梁的设计见图5。

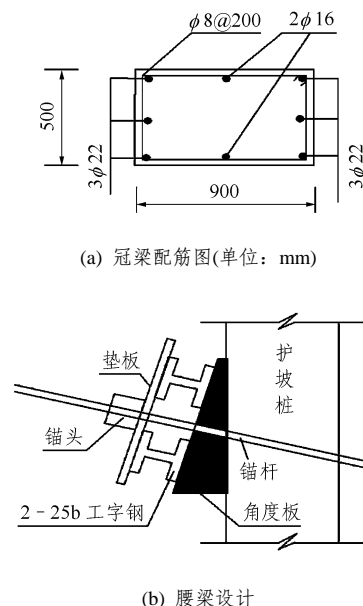


图5 冠梁及腰梁设计图
Fig.5 Design of cap beam and wale

(5) 计算结果的验算

按照规范进行了各个指标的验算, 验算结果分

别为: 整体稳定性验算 $k = 1.83$, 墙底抗隆起验算 $k = 20.42$ (Prandtl)、 $k = 26.16$ (Terzaghi), 坑底抗隆起验算 $k = 2.36$, 抗倾覆验算 $k = 13.64$, 均满足规范要求。

4 支护效果及质量检验

主要包括在基坑开挖前后和支护施工过程中, 对基坑边坡的水平位移和竖向沉降的监测, 以及对土钉及预应力锚索受力性能的测试。

4.1 位移监测

运用坐标法对基坑周边位移及护坡桩桩顶位移进行了监测, 坡顶设置 30 个测点, 桩顶冠梁上设置 15 个测点, 监测点布置见图 6。基坑底沿 20 m 间隔均布设置竖向位移监测点。监测周期为: 在基坑开挖期间, 每天监测一次; 开挖结束后以 7 d 为增量加大监测时间间隔, 具体要结合边坡变形情况而定。

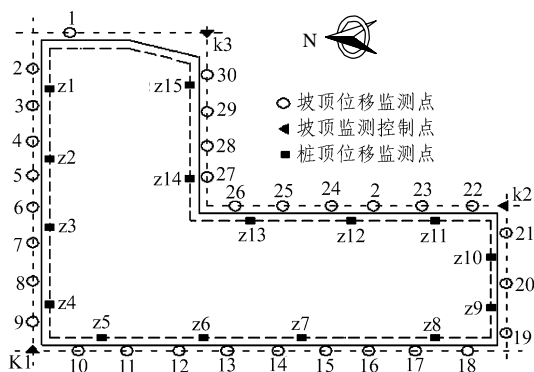


图 6 位移监测点布置

Fig.6 Displacement monitoring points layout

根据监测数据汇总分析, 坡顶水平位移最大值为 12.1 mm, 桩顶水平位移最大值为 4.3 mm, 地面及基底竖向位移均在 10 mm 以内, 基坑整体变形量微小。坡顶位移监测典型曲线见图 7。

4.2 土钉及预应力锚索拉拔试验

按照规范进行土钉及预应力锚索的拉拔试验, 以检验其受力状态及施工质量。土钉试验主要针对 9 m 长土钉进行, 共试验 18 根, 试验极限抗拔力最小值为 108.3 kN; 预应力锚索共试验 8 根, 试验结果见表 3。

试验结果表明, 土钉及预应力锚索极限抗拔力均高于其设计拉力, 在试验过程中均未发生失稳现象, 说明其力学性能发挥正常, 支护效果良好。

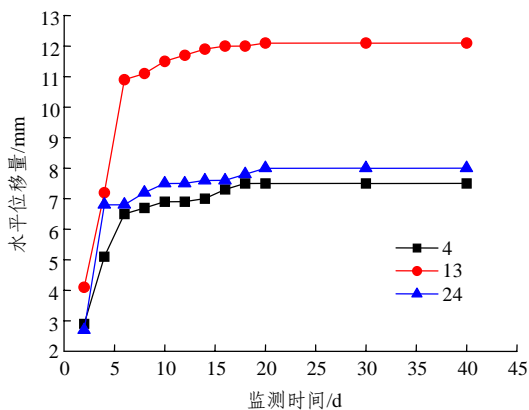


图 7 坡顶位移典型曲线

Fig.7 Typical curves of top displacement

表 3 预应力锚索拉拔试验结果

Table 4 Test results of prestressed cable

编号	锚索规格	锚固段长度/m	设计拉力/kN	极限抗拔力/kN
1	4×7φ5 mm	13	548	610
2	4×7φ5 mm	13	548	590
3	4×7φ5 mm	13	548	605
4	4×7φ5 mm	13	548	580
5	5×7φ5 mm	16	895	900
6	5×7φ5 mm	16	895	920
7	5×7φ5 mm	16	895	905
8	5×7φ5 mm	16	895	960

5 结 论

(1) 土钉墙与桩锚相结合的复合型支护体系可以有效控制深基坑变形, 支护结构合理, 充分发挥各支护单元所具有的特点, 特别适合于地层条件相对较好但放坡空间小、地下水位较低的深基坑支护工程;

(2) 在支护设计中选择适当的土钉墙支护高度, 并将该区段按照一定的比例进行放坡开挖, 可以起到一定的卸载作用, 有利于整个支护的优化设计;

(3) 进行信息化施工, 对支护结构要采取科学、合理的监测手段, 及时反馈信息, 指导工程设计, 以期取得最佳的经济效益和社会效益。

参考文献(References):

[1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Excavation engineering

- handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 黄志全, 刘玲霞, 王文中. 土钉支护结构中钉土相互作用机制分析[J]. 华北水利水电学院院报, 2007, 28(2): 65 - 68.(HUANG Zhiquan, LIU Lingxia, WANG Wenzhong. Analysis of the mutual action mechanism between nail and soil in soil-nailed wall structure[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(2): 65 - 68.(in Chinese))
- [3] 沈恺伦. 土钉加排桩复合围护结构的共同作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 169 - 174.(SHEN Kailun. Interaction analysis of composite building enclosure of soil nailing and cast-in-pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 169 - 174.(in Chinese))
- [4] 杜修力, 王智慧, 李立云, 等. 土钉结构稳定验算的经验遗传—单纯形算法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 598 - 602.(DU Xiuli, WANG Zhihui, LI Liyun, et al. Interior stability analysis method of soil-nailed structure based on empirical genetic-simplex algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 598 - 602.(in Chinese))
- [5] 杨生彬. 土钉墙与预应力锚杆联合支护技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(8): 8 - 16.(YANG Shengbin. Composite support technique for soil-nailed wall and prestressed anchor[J]. Exploration Engineering(Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2006, 33(8): 8 - 16.(in Chinese))
- [6] 徐杨青. 深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 844 - 848.(XU Yangqing. Study on the optimum decision-making and evaluation model for the design of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 844 - 848.(in Chinese))
- [7] 徐杨青. 深基坑工程设计的优化原理与途径[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 248 - 251.(XU Yangqing. On the principle and method of design-optimization for deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 248 - 251.(in Chinese))
- [8] 肖武权, 冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1 201 - 1 211.(XIAO Wuquan, LENG Wuming. Optimization methods of retaining structure in deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1 201 - 1 211.(in Chinese))
- [9] 王翠英, 王家阳. 论深基坑支护优化设计的重要性[J]. 武汉工业学院学报, 2005, 24(2): 56 - 59.(WANG Cuiying, WANG Jiayang. Discussion on the significance of foundation pit supporting optimizing design[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2005, 24(2): 56 - 59.(in Chinese))
- [10] 尹双, 张仲先, 王勇. 深基坑支护方案的分析与优化[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 152 - 155.(YIN Shuang, ZHANG Zhongxian, WANG Yong. Analyses and optimizing on supporting plans of deep excavation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(3): 152 - 155.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ120 - 99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 120 - 99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [12] 曹文贵, 杨期君, 张永杰. 基坑土钉合理设计长度优化确定方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 2007, (2): 116 - 120.(CAO Wengui, YANG Qijun, ZHANG Yongjie. Study on optimizing method of determination of rational design length of soil-nails in foundation pit[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, (2): 116 - 120.(in Chinese))