

明挖地铁车站围护结构内支撑力学参数研究

张明聚, 李云刚, 李方, 王成

(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 100124 北京)

摘要: 以北京某地铁车站深基坑工程为研究对象, 结合现场监测数据, 分析基坑开挖过程中围护结构的水平位移随开挖深度和时间的变化规律, 同时, 运用 FLAC^{3D} 进行有限差分法数值模拟, 对比分析围护结构水平位移的监测值与模拟值, 并对钢支撑在不同预加轴力及刚度作用下的桩体水平位移及弯矩进行量化分析. 主要结论有: 1) 实测值和模拟值的桩体水平位移曲线变化趋势大体相似, 都表现出两头小、中间大的括弧状, 最大变形都发生在基坑侧壁中部上下; 2) 预加轴力的大小对桩体位移变化有一定影响, 因此在基坑施工中应合理地选择钢支撑的预加轴力来限制围护结构变形; 3) 在基坑施工中, 对变形要求严格的工程, 可通过加大钢支撑的刚度来减小桩体的水平位移.

关键词: 地铁车站; 基坑工程; 监测

中图分类号: TU 94⁺1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)10-1512-06

Inner Support Mechanical Parameters Study of Open-cut Subway Station Supporting Structure

ZHANG Ming-ju, LI Yun-gang, LI Fang, WANG Cheng

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Through the combined monitoring and analysis of construction site data of a subway station deep foundation pit project in Beijing, the horizontal displacement of the retaining structure in relation to the depth and time of construction was studied. At the same time, a comparative analysis of calculation and monitoring results of the retaining structure was carried out using FLAC^{3D} finite element simulation. A quantitative analysis on the effects of the steel support under different pre-axial force and stiffness on the horizontal displacement and bending moment of the pile was conducted. The conclusions are as follows; 1) pile measured and simulated values of the horizontal displacement curve trend are generally similar, exhibiting bracket shapes big in the middle and small at both ends, with maximum deformation occurring around the mid-depth of the pit at the right side; 2) pre-axial force has significant influence on the displacement of the pile, therefore, the pre-applied force of steel support should be reasonably chosen to limit deformation of retaining structure in the construction of foundation pit; 3) during excavation of deep foundation pit, pile top horizontal displacement can be reduced by increasing the rigidity of the steel support, in cases where requirement for deformation are high.

Key words: subway station; foundation pit engineering; monitor

收稿日期: 2013-10-17

基金项目: 城市与工程安全减灾教育部重点实验室重点项目(ZD201304)

作者简介: 张明聚(1962—), 男, 教授, 主要从事岩土工程、隧道及地下工程方面的研究, E-mail: zhangmj@bjut.edu.cn

随着城市基础设施的快速建设, 地铁车站基坑变得越来越大、越来越深, 常用的基坑围护方式已不能完全保证复杂地区对基坑支护的要求, 这就对基坑支护结构设计提出新的挑战. 国内学者对明挖基坑施工支护问题十分关注, 主要体现在以下两个方面: 一是以既有实际工程现场监测资料为依据, 对明挖深基坑围护结构变形规律进行研究. 如丁勇春^[1]、郑刚^[2]、张明聚^[3-4]、姜忻良^[5]等总结了支护结构参数、每个施工步骤开挖空间的几何尺寸、围护桩的无支撑暴露时间等的变化, 对基坑开挖引起围护结构中的锚索应力、支撑轴力、桩体位移变化的影响. 二是结合现有数值模拟软件进行分析, 如江刚等^[6]、张新东等^[7]、胡仲春等^[8]、张钦喜等^[9]等分别运用 Plaxis、FLAC^{3D}、ANSYS、Geo-Slope 分析软件对深基坑开挖过程进行模拟分析, 主要对排桩支护、钻孔灌注桩结合钢管内支撑支护、劲性水泥土桩嵌合钻孔桩支护、地下连续墙支护体系下的支护结构位移、坑周土体位移等变化情况进行分析, 通过与实测数据对比, 得到基坑开挖过程中支护结构受力特点及基坑周边土体水平位移的变化规律. 综上所述, 目前对深基坑围护结构变形规律研究论文较多, 但是不同的地质情况、技术手段, 引起的支护结构受力特点及基坑周边土体水平位移的变化规律有一定差别.

本文以某地铁明挖车站为背景, 通过实测围护结构的水平位移值, 分析基坑开挖过程中围护结构的水平偏移随开挖深度和时间的变化规律, 同时运用有限差分软件 FLAC^{3D} 对基坑开挖过程中桩体水平位移进行数值模拟, 并与实测数据进行对比, 最后, 对钢支撑采用不同预加轴力、刚度及支撑位置作用下的水平位移进行量化分析.

1 工程概况

本车站位于北京市首经贸北路与芳菲路十字路口, 沿首经贸北路东西向布置, 设计总长度 490 m. 车站为岛式站台, 主体建筑面积 19 740.8 m², 采用明挖法结合局部盖挖法施工, 主体结构标准段基坑深度为 17.747 ~ 18.439 m, 宽度为 22.9 m.

基坑主体通过的地层依次为人工堆积层、新近沉积层、第四纪晚更新世冲洪积层 3 大类, 并按地层岩性及其工程地质学性质进一步分为 5 层, 主要物理及力学指标见表 1. 勘测得知地下水主要分布在卵石层中, 水位埋深约 27.30 ~ 28.80 m, 对基坑施工不产生影响. 由于车站基坑窄而长, 采用内部钢支撑, 可以控制支护结构变形及地面沉降. 基坑

采用钻孔灌注桩加 3 道 $\phi 600$ 、 $t = 16$ mm 钢管支撑作为基坑支护结构, 其中钻孔灌注桩在标准段均采用 $\phi 1 000 @ 1 800$ mm、嵌固深度为 4.5 m、沿基坑竖向设 3 道钢支撑, 从上往下每道钢支撑的预加轴力设计值为: 第 1 道 250 kN、第 2 道 1 300 kN、第 3 道 800 kN; 而支撑实际加载值分别为: 第 1 道 210 kN、第 2 道 1 060 kN、第 3 道 660 kN.

表 1 岩土物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil materials

土层	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	剪切模 量/MPa
人工填土	2.0	16.5	0.0	9.0	78.1
粉土	6.0	19.5	28.0	24.1	98.4
圆砾	6.0	20.5	0.0	35.0	181.5
粉土	1.5	19.5	28.0	24.1	98.4
卵石	20.5	21.5	0.0	45.0	225.4

2 实测数据分析

桩体水平位移是基坑监测的一个主要内容, 是考察围护结构安全状况的重要指标. 作者选取典型桩体的测斜结果, 绘制水平位移曲线(见图 1).

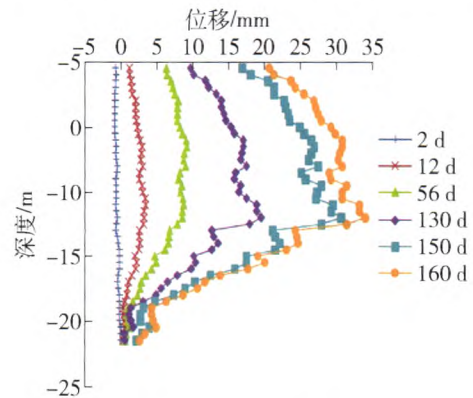


图 1 典型围护桩水平位移曲线

Fig. 1 Horizontal displacement curve of retaining pile

由图 1 可知, 在施工到第 12、56、130 d 时分别架设第 1、2、3 道钢支撑, 由于钢支撑预加轴力的作用, 开挖初期, 桩体顶部向基坑外方向发生微小位移, 随后的施工阶段中, 埋深在 8.2 m 和 13.9 m 支撑处桩体水平位移都有明显减小. 开挖到底部后, 因底板及侧墙施工缓慢, 延长了基坑暴露时间, 使得桩体水平位移持续增大, 到第 160 d 趋于稳定后, 埋深在 11.0 m 处的桩体水平位移达到最大值 33.20 mm, 超过警戒值(30 mm).

从整体变形情况可以看出,围护桩水平位移随着开挖深度的增加而增大,最大位移点也逐渐下移,最终处于基坑开挖深度中部上下.由于各阶段工程的开挖进度、预加轴力值、主体结构施工时间及施工环境等对桩体水平偏移量有较大影响,各阶段的水平位移与深度变化规律有一定不同.

3 有限差分法数值模拟

3.1 计算模型建立

本文采用岩土工程专业软件 FLAC3D 对车站第三施工区段进行模拟分析.该段开挖区域对称,作者仅选取一半区域建立模型,模型尺寸为 $60\text{ m} \times 30\text{ m} \times 18\text{ m}$ (横向 \times 竖向 \times 纵向),共划分成 32 400 个单元和 35 929 个节点.土体采用摩尔-库仑模型,桩体采用桩单元模拟,冠梁、围檩及钢支撑采用梁单元模拟,为了合理模拟截断位置钢支撑的作用效果,在此处通过限制梁单元节点的三向位

移来模拟.模型上部为地表,为自由面,两侧及底边均受法向约束.

3.2 模拟结果与实测数据分析

根据现场施工工序,将数值模拟的分析步骤概括为:

- 步骤 1 初始应力平衡;
- 步骤 2 围护桩及冠梁施工;
- 步骤 3 第 1 层土体开挖;
- 步骤 4 架设第 1 道钢支撑;
- 步骤 5 第 2 层土体开挖;
- 步骤 6 架设第 2 道钢支撑;
- 步骤 7 第 3 层土体开挖;
- 步骤 8 架设第 3 道钢支撑;
- 步骤 9 土体开挖至基坑底部;
- 步骤 10 计算平衡.

最后选取关键步骤的桩体水平位移监测值与模拟值对比分析,绘制曲线如图 2 所示.

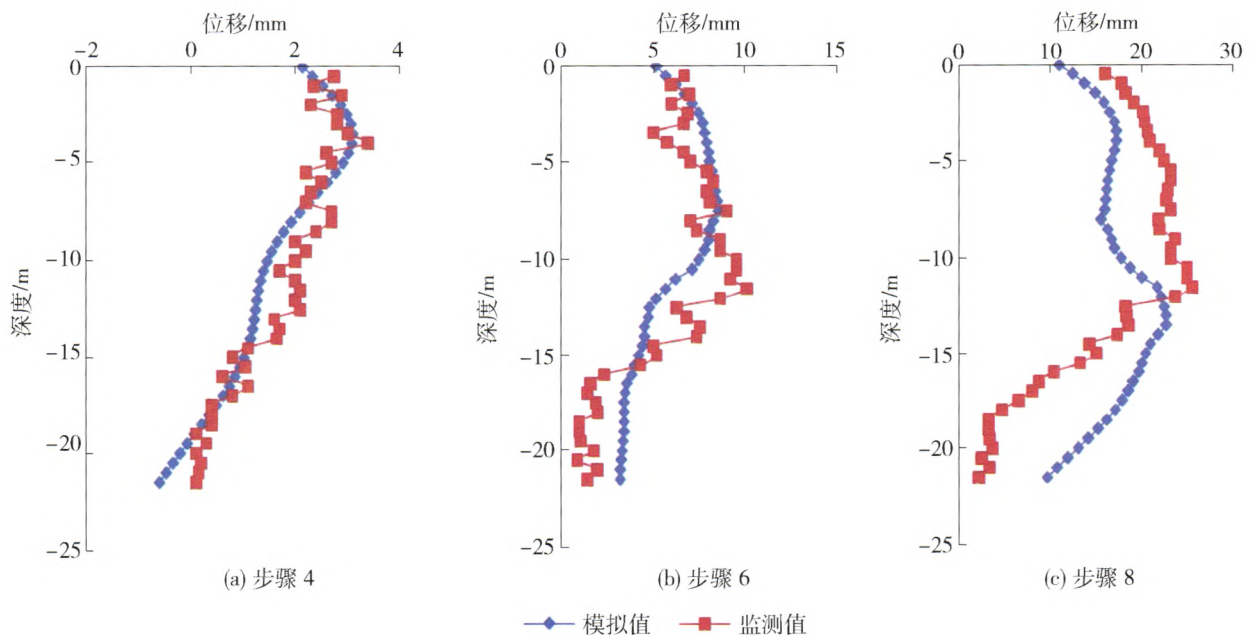


图 2 关键步骤围护桩监测值与模拟值对比曲线

Fig. 2 Horizontal displacement contrast curves of measured and simulated value of retaining structure for key steps

由模拟数据可知,模拟开挖至 4 m,第 1 道钢支撑架设后,桩体水平位移最大值为 3.10 mm,随桩体埋深的增加其位移缓慢减少,最终,桩底发生微小反方向位移.第 2、3 道钢支撑架设后,桩体最大水平位移值分别增加到 8.50、22.60 mm,均小于实测值.在模拟过程中,围护桩受到钢支撑预加轴力的影响,水平位移整体变化平缓.

对比分析可知,实测数据和模拟结果表现出来的桩体水平位移曲线变化趋势相似,较好地反映了

基坑变形的一般规律,同时,表明本基坑开挖工程的施工安全可靠,但关键位置的偏移量存在一定偏差,具体数值如表 2 所示.

实测数据的桩顶及桩身最大位移值大于模拟结果,经分析研究,原因有以下 2 点:

1) 基坑旁边经常有大型的施工机械设备进行吊土、架设钢支撑等施工操作,对基坑附近的土体扰动性较大.

2) 复杂的地质条件、多变的天气状况等对围护

表 2 关键位置的实测值与模拟值对比

Table 2 Horizontal displacement contrast of measured and simulated value of retaining structure for key position mm

项目	步骤 4		步骤 6		步骤 8	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
桩顶位移值	2.75	2.15	6.70	5.15	15.90	10.90
桩身最大位移	3.40	3.10	10.05	8.50	25.50	22.60
桩底位移值	0.10	-0.55	1.45	3.25	2.10	9.60

桩水平位移产生影响. 而桩底处位移变化实测数据却小于模拟结果, 这是由于实际施工中开挖速度相对缓慢, 对开挖面以下的桩体及土体扰动较小, 而模拟各阶段施工均采用一次性开挖, 深度较大, 引起的桩体位移及土体回弹量较明显.

3.3 钢支撑预加轴力对围护桩水平位移的影响

在钻孔灌注桩加内支撑的支护体系下, 一般采用增加钢支撑的预加轴力的方法来控制桩体最大水平位移量, 结合上述模拟, 在其他条件均不变的情况下, 单独改变钢支撑的预加轴力, 同时记录桩体位移及弯矩, 并分别绘制曲线进行对比分析, 变化曲线如图 3 所示.

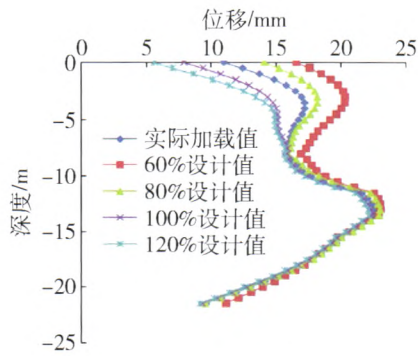
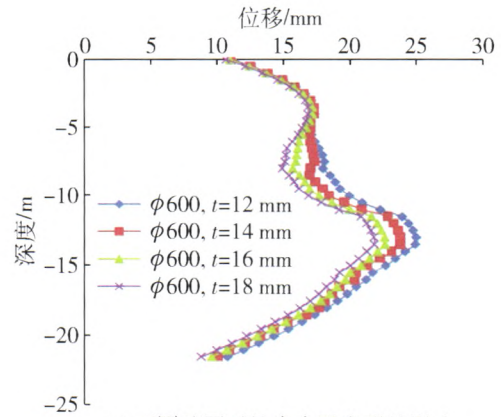


图 3 不同预加轴力对桩身水平变形的影响
Fig. 3 Effect on horizontal deformation of pile body with different pre-applied forces

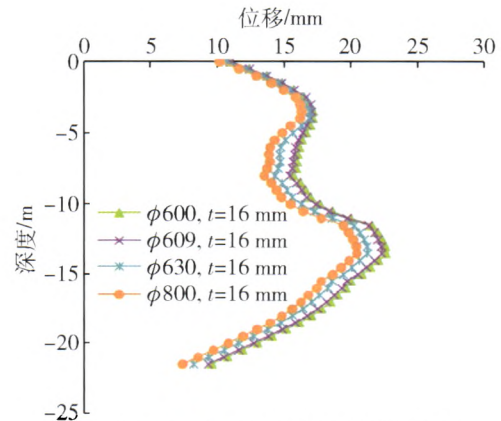
初始预加轴力设计值从 60% 增大到 120% 的过程中, 桩身整体水平位移呈减少趋势, 桩顶位移变化较大, 桩身中下部位移变化较缓. 结合桩身监测数据及模拟结果可知: 本工程选取的钢支撑预加轴力是安全合理的.

3.4 钢支撑刚度对围护桩水平位移的影响

结合本工程的数值模拟, 分别对采用不同钢管直径(ϕ)和不同壁厚(t)钢支撑的桩身位移进行对比分析如图 4 所示. 可以看出, 通过增加壁厚及直径的方法来提升钢支撑刚度对桩身水平变形的影响



(a) 不同壁厚对桩身水平变形的影响



(b) 不同直径对桩身水平变形的影响

图 4 不同钢支撑刚度对桩身水平变形的影响

Fig. 4 Effect on horizontal deformation of pile body with different steel support stiffness

规律相似, 桩体顶部变化均较少, 都在开挖深度中部以下位置变化明显, 表明适当增加钢支撑的刚度能一定程度上控制桩体水平位移, 但钢支撑刚度增大到一定程度后, 桩体水平位移的减小幅度甚微, 因此, 应合理选择钢支撑刚度以达到安全经济的效果.

3.5 钢支撑架设位置对围护桩水平位移的影响

分别设置 4 种工况:

工况 1 3 道钢支撑同时向下调整 2 m;

工况 2 第 1 道钢支撑不动, 第 2、3 道钢支撑

分别向上调整 2 m;

工况 3 第 1、3 道钢支撑位置不动,第 2 道钢支撑向下调整 2 m;

工况 4 第 1、3 道钢支撑位置不动,第 2 道钢支撑向上调整 2 m.

将这 4 种工况与设计工况进行对比,绘制曲线见图 5. 对比曲线可以看出,同时下调 3 道钢支撑的位置,桩体位移变化趋势与设计工况相似,桩身大部分偏移均有增加,仅在第 2、3 道钢支撑作用位置处有减少. 而单独下调第 2 道钢支撑位置,加大了第 1 道与第 2 道钢支撑之间的距离,桩体在此范围内的偏移量有明显增加. 在保持第 1 道钢支撑位置不动,上调第 2、3 道钢支撑位置,桩体偏移仅在桩顶处减少,其中部及下部偏移量均有明显增加. 而单独上调第 2 道钢支撑,使得第 2 道与第 3 道钢支撑之间的距离加大,而在该范围内的土压力释放相对较大,桩体向基坑内产生较大变形,在设计施工中应尽量避免采用此类工况. 4 种工况的最大位移值分别为 23. 31、27. 02、23. 69、29. 18 mm,均大于设计工况 22. 60 mm.

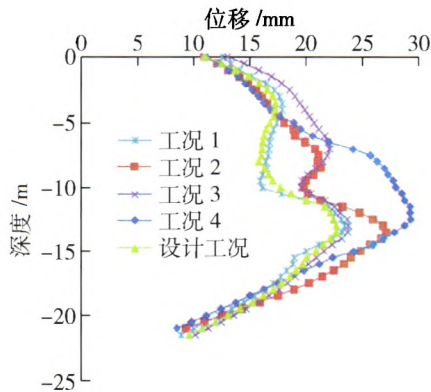


图 5 钢支撑施作在不同位置时围护桩水平位移对比曲线

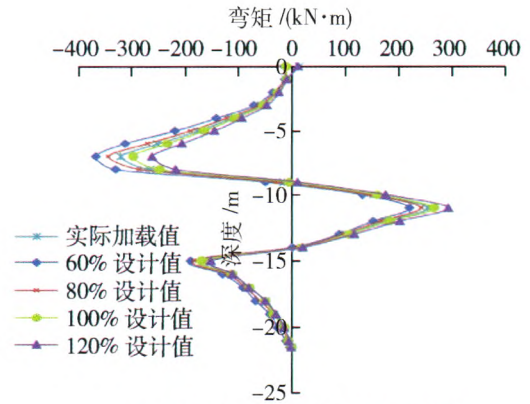
Fig. 5 Horizontal displacement contrast curves of retaining pile in different steel support locations

因此,从整体位移分析来看,在设计工况下的桩顶及桩身水平位移控制是合理的,也进一步验证了围护结构设计的合理性.

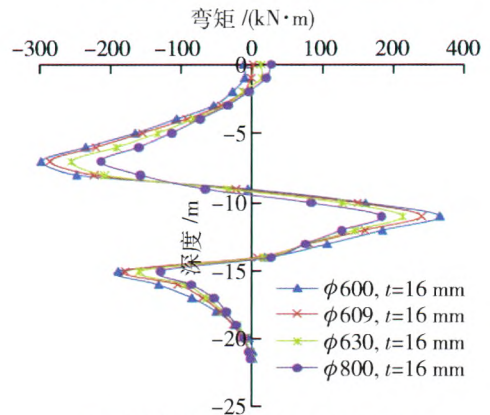
3.6 不同预加轴力及支撑刚度对围护桩弯矩的影响

在模拟不同支撑参数对围护桩水平位移的同时,对钢支撑在不同预加轴力及刚度作用下的桩身弯矩进行了对比分析,得到 2 种不同参数下桩身弯矩随深度变化图(见图 6).

随着预加轴力的变大,桩体负弯矩变小,正弯矩



(a) 不同预加轴力对桩身弯矩的影响



(b) 不同支撑刚度对桩身弯矩的影响

图 6 不同预加轴力和刚度对桩身弯矩的影响

Fig. 6 Effect on bending moment of pile body with different steel support stiffness and pre-applied force

变大,正负最大弯矩值变化明显,而支撑点处及基坑底部以下桩体弯矩值变化不大. 增加钢支撑刚度,支撑点之间的正负弯矩值均有所减少,但围护桩支撑点处的弯矩却有所增大,对基坑底部桩身弯矩的影响也相对较少. 虽然采用增大轴力及支撑刚度能减少桩体水平位移,但在此应多加考虑围护桩的截面积和配筋情况,以保证桩身的抗弯能力.

4 结论

1) 在明挖深基坑采用钻孔灌注桩加内支撑支护结构体系中,实测数据和模拟结果的桩体偏移曲线都表现出两头小、中间大的括弧状,最大变形都发生在开挖深度中部上下,因此在类似基坑设计中,要加大基坑中部的支护强度.

2) 钢支撑采取不同预加轴力对桩体水平位移有明显影响,因此在基坑施工中合理选择钢支撑的预加轴力,对控制围护结构变形显得尤其重要.

3) 增大钢支撑刚度不仅可以减少围护结构的

水平变形,又可以减少其桩身弯矩,但对基坑开挖面以下桩体变形和弯矩的影响较小。

4) 初步分析了钢支撑作用位置不同对桩体偏移的影响,结果表明:钢支撑架设位置的选择对桩体水平位移有重要影响,不同位置组合情况下的桩体偏移量相差较大,因此,在设计施工中,应尽量合理设计相邻钢支撑之间的架设距离。

5) 对变形要求严格的工程,如采用增大预加轴力或支撑刚度的方法来减小围护桩的水平位移,应加以考虑围护桩的截面面积和配筋情况,以保证桩身的抗弯能力。

参考文献:

- [1] 丁勇春,戴斌,王建华,等. 某邻近地铁隧道深基坑施工监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(5): 492-497.
DING Yong-chun, DAI Bin, WANG Jian-hua, et al. Field observation of a deep excavation adjacent to subway tunnels [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(5): 492-497. (in Chinese)
- [2] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638-643.
ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 638-643. (in Chinese)
- [3] 张明聚,由海亮,杜修力,等. 北京地铁某车站明挖基坑施工监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(10): 874-878.
ZHANG Ming-ju, YOU Hai-liang, DU Xiu-li, et al. Construction monitoring analysis for an open excavated foundation-pit of a subway station in Beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(10): 874-878. (in Chinese)
- [4] 张明聚,司峰军,叶新丰,等. 深基坑围护混合支撑体系内力与变形监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11): 1496-1503.
ZHANG Ming-ju, SI Feng-jun, YE Xin-feng, et al. Internal force and deformation monitoring analysis on mixed-supporting system for supporting structure of some deep foundation pit [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(11): 1496-1503. (in Chinese)
- [5] 姜忻良,宗金辉,孙良涛. 天津某深基坑工程施工监测及数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 79-84.
JIANG Xin-liang, ZONG Jin-hui, SUN Liang-tao. Construction monitoring and numerical simulation for some deep excavation in Tianjin [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 79-84. (in Chinese)
- [6] 江刚. 深基坑施工过程的三维数值分析[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2008, 37(1): 109-111.
JIANG Gang. Three-dimensional numerical analysis of deep foundation pit excavation [J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 37(1): 109-111. (in Chinese)
- [7] 张新东,姚爱军. 某深基坑围护桩结构性能监测与数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1139-1142.
ZHANG Xin-dong, YAO Ai-jun. Monitoring and numerical simulation of structure behaviour of supporting a deep piles in foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1139-1142. (in Chinese)
- [8] 胡仲春,任高峰,胡逢春. 基于有限元数值模拟的基坑联合支护系统分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1648-1652.
HU Zhong-chun, REN Gao-feng, HU Feng-chun. Analysis of excavation combined support system based on finite element numerical simulation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Suppl 2): 1648-1652. (in Chinese)
- [9] 张钦喜,韩银山,张明聚. 明挖车站深基坑支护结构受力变形分析[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(3): 151-154.
ZHANG Qin-xi, HAN Yin-shan, ZHANG Ming-ju. Research and analysis of axial force and deformation in retaining structures of deep foundation engineering [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2010, 24(3): 151-154. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)