

黄土深基坑桩锚联合支护结构变形与稳定性分析

刘 科, 赵 浩

(西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003)

摘要: 为保证某临近地铁车站深基坑在施工过程中安全, 采用数值模拟的方法分析了该基坑临近地铁车站一侧桩锚联合支护结构在施工过程中的变形情况, 并对其进行稳定性分析. 分析表明: 临近地铁车站一侧基坑支护结构最大侧移发生在离坑顶约 7 m 处, 最大侧移为 13.4 mm; 最大地表沉降出现在距离基坑边约 4 m 处, 最大沉降量为 8.81 mm; 桩锚联合支护结构具有较好的稳定性, 能够有效控制基坑在开挖过程中变形, 工程深基坑的开挖没有影响到地铁车站安全.

关键词: 深基坑; 桩锚联合支护; 数值分析; 稳定性

中图分类号: TU354

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0513-05

1 工程概况

某商业广场项目位于十字路口, 地下三层地下室, 基坑开挖深度约 18.8 m. 该项目邻近住宅区与城市主干道, 工程环境比较复杂. 基坑北侧临近正在建设中的地铁车站深基坑, 该车站深基坑开挖深度 22.5 m, 地铁车站基坑南侧距商业广场基坑北侧约 40 m. 商业广场工程环境如图 1 所示.

拟建场地地形较为平坦, 场地地层自上而下依次由主要土层物理力学参数见表 1. 场区稳定水位深度 9.20~14.70 m, 属潜水类型.

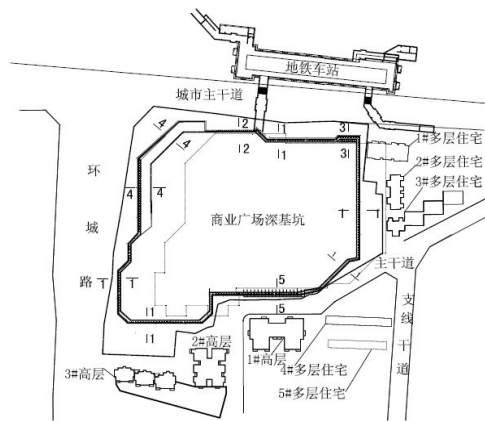


图 1 工程环境示意图
Fig.1 Rroject environment sketch

由于该基坑北侧临近正在建设中的地铁车站深基坑, 北侧坑壁稳定性控制是工程关键问题之一, 基坑北侧采用排桩—预应力锚索联合支护^[1]. 为明确基坑开挖过程中北侧支护结构的变形及地表沉降情况, 采用数值模拟的方法分析该基坑临近地铁车站一侧支护结构在施工过程中的变形情况, 并对其进行稳定性分析.

2 基坑北侧支护方案

由于基坑周边环境复杂, 工程北侧临近地铁车站一侧采用桩锚支护相结合的方案. 该支护结构桩顶标高-0.95 m, 桩长度

表 1 场区主要土层的物理力学指标 Tab.1 Natural and property characteristics o soil at the project field				
土层	厚度/m	天然重度/kN·m ⁻³	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
黄土	0.7~5.3	16.3	25.0	20.0
黄土	2.0~11.0	17.6	21.0	18.5
古土壤	1.6~5.6	18.3	24.0	19.0
黄土	2.6~6.0	19.2	20.0	19.0
粉质粘土	23.2~28.7	19.8	33	21.5

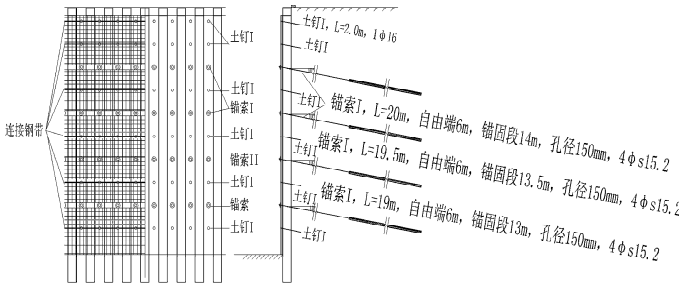


图 2 支护形式
Fig.2 Timbering form

31.30 m, 桩间距1.60 m. 桩顶设截面尺寸0.6 m×0.7 m梁. 排桩设四道预应力锚索. 如图2所示.

该支护段护坡桩桩径为700 mm, 混凝土强度均为C30, 桩间采用短土钉挂网喷浆护面, 土钉长度2.0 m, 6.5@200钢筋网片, C20喷射混凝土厚度 60 mm. 锚索采用250 mm(宽)×20 mm(厚)钢带连接,4孔锚具锚固, 钢垫板200 mm×200 mm×20 mm. 土钉墙土钉长度为6 m, 水平和竖向间距为1.5 m, 内设1根16钢筋, 面层采用6.5@200钢筋网片, 喷射80 mm厚的C20混凝土^[2].

3 基坑侧壁变形数值分析

3.1 模型建立与工况设置

利用对称性建立二维平面应变模型, 对基坑支护剖面进行分析, 将支护体系简化为二维平面应变问题处理, 对地层土体采用四边形等参元离散, 土钉的作用简化为仅承受拉力的弹性杆单元, 土层开挖后喷射的混凝土面层简化为线弹性单元. 为模拟土钉与土的相互作用, 引入界面单元的概念, 用一个弹塑性模型描述界面的性质.

根据以往的工程经验及有限元计算结果, 基坑开挖影响宽度约为开挖深度的3~4倍, 影响深度一般为挖深的2~4倍^[3-4], 考虑到基坑的对称性, 取半截面进行分析, 分析中选取的范围为60 m×33 m, 计算模型的边界条件为: 左右边界水平方向位移为零, 下边界水平与竖向方向的位移为零.

基坑开挖分为11个工况, 工况1: 开挖1.05 m, 设置6 m土钉, 设置混凝土喷射面层; 工况2: 开挖1.75 m, 设置6 m土钉, 设置混凝土喷射面层; 工况3: 开挖1.75 m, 设置20 m预应力锚索, 4 m自由段, 16 m锚固段, 设置混凝土喷射面层; 工况4: 开挖1.75 m, 设置6 m土钉, 设置混凝土喷射面层; 工况5: 开挖1.75 m, 设置20 m预应力锚索, 设置混凝土喷射面层; 工况6: 开挖1.75 m, 设置6 m土钉墙, 设置混凝土喷射面层; 工况7: 开挖1.75 m, 设置20 m预应力锚索, 设置混凝土喷射面层; 工况8: 开挖1.75, 设置6 m土钉, 设置混凝土喷射面层; 工况9: 开挖1.75 m, 设置20 m预应力锚索, 设置混凝土喷射面层; 工况10: 开挖1.75 m, 设置6 m土钉, 设置混凝土喷射面层; 工况11: 开挖2 m, 设置混凝土喷射面层基坑开挖结束. 计算模型示意图如下图3:

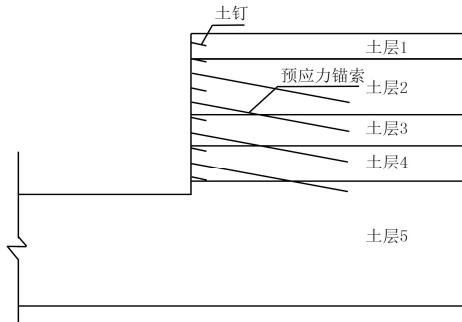


图 3 计算模型示意图
Fig.3 Calculation model diagram

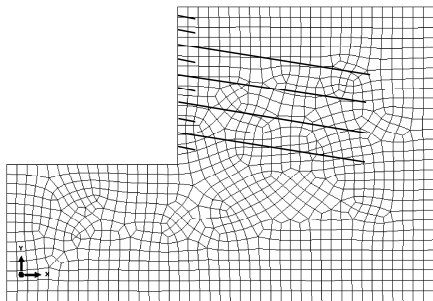


图 4 开挖后有限元计算模型
Fig.4 Finite element model after excavation

3.2 本构模型与计算参数

土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 结构材料包括支护桩、冠梁、混凝土喷层采用线弹性材料模型. 土层的计算参数见表 1; 其他参数见表 2

3.3 结果分析

(1) 基坑侧壁水平位移

基坑分步开挖时坑顶实测与计算水平位移变形曲线如下图所示 5.

由图 5 可知, 工况 1 结束时, 最大位移发生在坑顶处, 水平位移值为 1.87 mm, 至工况 2 结束, 由于土钉的设置, 坑顶侧移有所回弹, 侧移值达到 1.05 mm, 此时最大侧移发生在距离坑顶约 1 m 的位置, 工况 3 结束后, 最大侧移值为 3.51 mm, 发生在距离坑顶约 2.7 m 处, 工况 4 结束后, 最大侧移为 4.53 mm 发生在距离坑顶约 3 m 处, 坑顶侧移为 4.02 mm, 工况 5 结束后最大侧移达到 9.55 mm, 发生在距离坑顶约 5 m 处, 坑顶侧移为 8.84mm, 工况 6 结束后侧移最大值略有回弹, 达到 9.43 mm, 仍然发生在距离坑顶约 5

表 2 计算参数

Tab.2 Calculation parameters			
	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
土钉	20	30	0.2
锚索	25	30	0.2
排桩	20	0.1	0.25

m 处, 工况 7 结束后最大侧移达到 11.01 mm, 发生在距离坑顶约 5.4 m 处, 工况 8 结束后最大侧移到达 14.16 mm, 发生在距离坑顶约 4.2 m 处, 工况 9 结束后最大侧移到达 10.95 mm, 有所回弹, 发生在距离坑顶约 6.2 m 处, 工况 10 结束后最大侧移达到 15.92, 发生在距离坑顶约 9 m 处, 工况 11 结束后, 基坑开挖完毕, 最终最大侧移为 13.4 mm, 发生在距离坑顶约 7 m 处位置, 此时坑顶侧移为 11.72 mm.

分析计算结果表明, 坑壁最大侧移并未发生在坑顶处, 而是随着基坑的开挖逐渐由坑顶向下部移动, 开挖结束后坑壁最大侧移发生在距离坑顶约 7 m 处位置. 由整个开挖过程中坑壁水平位移曲线可知, 随着开挖的进行, 最大侧移一般大致位于开挖深度的 2/3 处.

(2)地表沉降

基坑地表沉降变形曲线见下图 6, 分析可得, 工况 1 结束时地表沉降最大值为 3.78 mm, 工况 2 结束, 地表沉降最大量达到 2.61 mm, 沉降有所回弹, 工况 3 结束后, 最大沉降量达到 4.51 mm, 工况 4 结束后, 最大沉降量为 4.91 mm, 工况 5 结束后最大沉降量达到 4.31 mm, 有所回弹, 工况 6 结束后最大沉降量达到 6.3 mm, 工况 7 结束后最大沉降量达到 6.73 mm, 工况 8 结束后最大沉降量到达 8.57 mm, 工况 9 结束后最大沉降量到达 8.36 mm, 略有回弹, 工况 10 结束后最大沉降量达到 9.49 mm, 工况 11 结束, 基坑开挖完毕, 最终最大沉降量为 8.81 mm.

由地表沉降曲线可知, 地表沉降量最大值大致位于距离基坑边约 4 m 处, 距离基坑约 16 m 以外的地表沉降受开挖影响较小, 最终沉降量不大于 10 mm. 该基坑在开挖过程中变形较小, 支护方案安全性与稳定性满足规范要求^[5-6].

4 基坑整体稳定性分析

4.1 稳定性计算参数

本文采用简化 Bishop 法进行稳定性计算, 并找出最危险滑移面^[7], 计算参数如表 3, 4. 计算过程中设定土条数为 100 条, 采用总应力法计算应力, 不考虑水平地震系数, 计算简图如 7 所示.

表 3 土钉与护坡桩计算参数
Tab.3 Parameters calculation of soil nailing and slope protection pile

结构类型	周长/m	截面积/m ²	抗剪强度/kPa	抗拉强度/kPa	与岩土介质粘结力/kPa
土钉	0.110 00	0.000 15	300 000.00	300 000.00	30.00
护坡桩	—	0.42	658.00	3 231.00	—

表 4 土锚计算参数
Tab.4 Parameters calculation of soil anchor

结构类型	非锚固段截面积/m ²	非锚固段抗剪强度/kPa	非锚固段抗拉强度/kPa	锚固段与土体粘结强度/kPa	锚固体直径/m
土锚	0.000 56	200 000.00	200 000.00	100.00	0.10

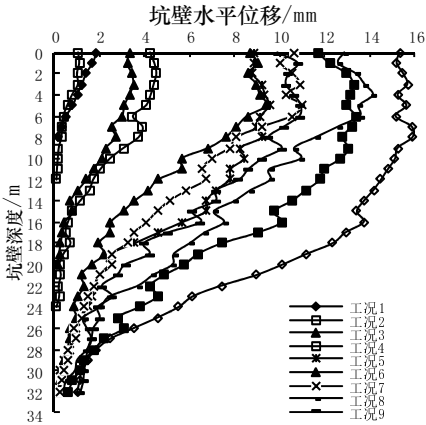


图 5 坑壁水平位移曲线
Fig.5 Displacement curve of base hole sides

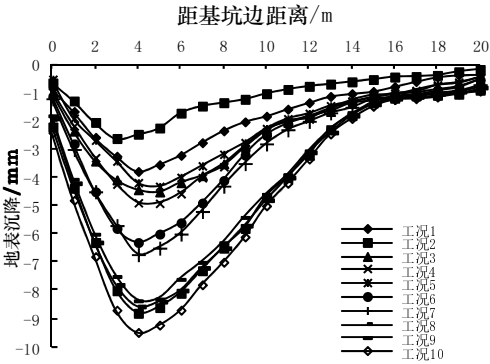


图 6 地表沉降曲线
Fig.6 Ground surface subsidence curve

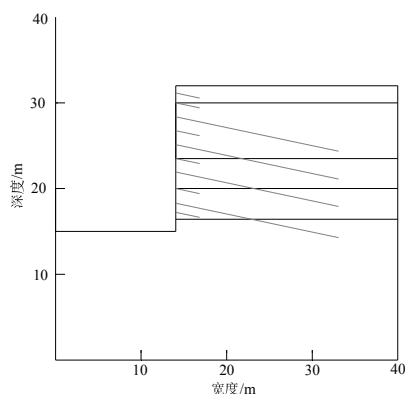


图7 计算简图

Fig.7 Calculating diagram

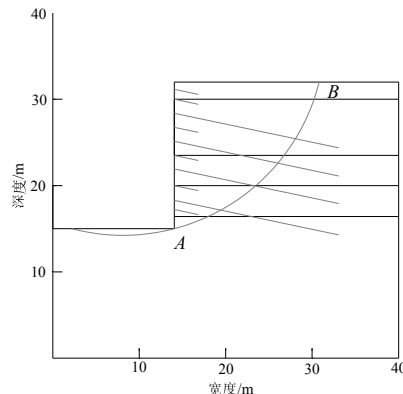


图8 最危险滑移面

Fig.8 Critical slip surface

4.2 计算结果

采用简化 Bishop 法对基坑稳定性进行分析得出边坡安全系数 $F_s=1.1016$, 说明该支护结构稳定性较好, 偏于安全^[8-10]。采用遗传算法搜索最危险滑移面, 所得滑移面如图 8 所示, AB 弧即为最危险滑移面, 滑移面距基坑边缘约 30 m, 因此, 背景工程深基坑的开挖没有影响到地铁车站深基坑的稳定性。

5 结论

(1)黄土深基坑桩锚联合支护结构能够较好的控制基坑在开挖过程中基坑侧壁的变形及地表沉降。

(2)数值分析表明, 基坑北侧最大侧移大致位于距离坑顶约 1/3 倍开挖深度处, 工程基坑最大侧移位于距离坑顶约 7 m 处, 基坑地表沉降最大值发生在距离基坑边约 4 m 处位置。

(3)经计算, 基坑北侧侧壁边坡安全系数为 1.1016, 说明该支护结构稳定性较好。搜索最危险滑移面距基坑边缘约 30 m, 没有影响到地铁车站深基坑的稳定性。

参考文献 Reference

- [1] 陈忠汉. 深基坑工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
CHEN Zhonghan. Deep foundation[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
CHEN Zhaoyuan, CUI Jinghao. Application of soil nail in foundation engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.
- [3] 宋二祥, 邱明. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 241-244, 253.
SONG Erxiang, QIU Yue. Finite element analysis of composite soil nailing for excavation support[J]. Rock & Soil Mechanics, 2001, 22(3): 241-244, 253.
- [4] 樊胜军, 胡长明, 刘振江. 某深基坑施工期围护结构变形监测与数值模拟分析[J]. 施工技术, 2010, 40(350):82-84.
FAN Shengjun, HU Changming, LIU Zhenjiang. Deformation monitoring and numerical analysis of a deep foundation excavation support in construction[J]. Construction Technology, 2010, 40(350):82-84.
- [5] 赵杰, 邵龙潭. 深基坑土钉支护的有限元数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4):983-988.
ZHAO Jie, SHAO Longtan. Numerical simulation and stability analysis of soil nailing support for deep foundation pit by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):983-988.
- [6] 孙凯, 许振刚, 刘庭金, 等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):293-298.
SUN Kai, XU Zhengang, LIU Tingjin. Construction monitoring and numerical simulation foundation of a analysis pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):293-298.
- [7] 胡长明, 黄双喜, 李文广. 基于遗传算法的土钉支护结构整体稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(2):332-336.
HU Changming, HUANG Shuangxi, LI Wenguang. Integral stability analysis of soil-nail braced structure based on genetic algorithms[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2005, 37(2):332-336.
- [8] 蔡海波, 吴顺川, 周喻. 既有基坑延深开挖稳定性评价与支护方案确定[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3306-3311, 3324.
CAI Haibo, WU Shunchuan, ZHOU Yu. Stability evaluation and supporting scheme for deepening excavation of existing foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3306-3311, 3324.
- [9] 张雷, 文谦, 姚海明. 通过搜索破裂面法验算基坑的稳定性[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 867-869, 902.
ZHANG Lei, WEN Qian, YAO Haiming. Checking the stability of foundation pit by to rupture searching[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 867-869, 902.
- [10] 高印立. 土钉加固边坡稳定性分析与计算[J]. 岩土工程技术, 1998 (2): 9-11.
GAO Yinli. Stability analyze and calculation of nailed slope[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1998 (2): 9-11.

- [11] Sivakumar Babu G L, Vikas Pratap Singh. Deformation and stability regression models for soil nail walls[C]. Proceedings of the institution of civil engineers. Geotechnical engineering, 2009, 162(GE4): 213-223.
- [12] WANG Guihe, ZHANG Qinxi, HUANG Xuegang, et al. Analysis of monitoring and numerical simulation on anchor force of foundation pit[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(3b): 216-220.
- [13] ZHOU Y D, CHEUK C Y, Tham L G, et al. Numerical modelling of soil nails in loose fill slope under surcharge loading[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 837-850.
- [14] FAN Chiacheng, LUO Junhiming. Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(4): 585-599.
- [15] Mostafa A Ismail, Mohamed A Shahin. Numerical modeling of granular pile-anchor foundations (GPAF) in reactive soils[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 6(2): 149-155.

Numerical analysis and stability analysis of a commercial plaza excavation engineering foundation in loess area

LIU Ke, ZHAO Hao

(Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China)

Abstract: In order to ensure safety of deep foundation pit nearby the subway station in the construction process, the deformation of pile-anchor retaining structure nearby the subway station in the construction process is analyzed by numerical simulation method, and its stability is also analyzed. The study showed that the maximum lateral displacement of pit-retaining structure occurs at about 7m away from the top of the pit, and maximum lateral displacement is 13.4mm. And the maximum surface subsidence occurs at about 4m away from the pit, and the largest settlement is 8.81mm. the pile-anchor retaining structure has good stability, and can effectively control the deformation of the pit during excavation. This background engineering deep foundation excavation does not affect the safety of the subway station.

Key words: deep foundation pit; combined pile-anchor supporting; numerical analysis; stability of foundation pit

(本文编辑 沈波)

(上接第 507 页)

- [9] 秦从律, 张爱晖. 基于截面纤维模型的弹塑性时程分析方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(7): 1003-1008.
QIN Conglü, ZHANG Aihui, Nonlinear time history analysis based on section fiber model[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(7): 1003-1008.
- [10] 聂利英, 李建中, 范立础. 弹塑性纤维梁柱单元及其单元参数分析[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 15-20.
NIE Liying, LI Jianzhong, FAN Lichu. Elastic-Plastic fiber beam column element and its parametric analysis[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 15-20.
- [11] SPACONE E, FILIPPOU F, TAUCER F. Fiber beam-column modeling for non-linear analysis of R/C frames[J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711-725.

Seismic response analysis of widening bridges in soft site

REN Wei¹, GAI YiTing², HUANG Yanan¹

(1. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology Ministry of Communications, PRC, Xi'an 710064, China;

2. CCCC First Highway Consultants CO., LTD, Xi'an 710075, China)

Abstract: In view of the deficiency of seismic research on widen bridge at soft soil area, the paper, based on an unequal span continuous beam bridge at Pearl River Delta, took pile-soil effect into consideration. Fiber inelastic beam element, finite element program Midas/civil is used to do elastic-plastic seismic response analysis on existing bridge model and widen bridge model under two field soil conditions. The paper researched displacement response of the structure's key position corresponding with different input direction of seismic wave, the occurrence moment, position and failure mode of plastic hinge. Researches showed that the seismic response displacement extreme of widen bridge at soft soil field was the biggest, which was nearly 1.15 times of it at the sand field. Under hierarchical vertical and lateral seismic loads, plastic hinge firstly occurred at pier of widen bridge at soft soil field, where failure happened easily and the failure moment was earlier. By contrasting existing bridge model with widen bridge model, structure widening was bad for aseismic action, the paper suggested that seismic checking requirements of widen bridge should be enhanced.

Key words: bridge engineering; soft soil area; pile-soil effect; fiber inelastic beam element; seismic response

(本文编辑 吴海西)