

太原河漫滩地区深基坑施工扰动效应研究

张攀¹ 杨双锁²

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院¹,上海 200240;太原理工大学矿业工程学院²,太原 030024)

摘要 以太原地铁二号线南内环街站深基坑为背景,针对太原地区独特的漫滩地质条件,采用有限差分软件 FLAC3D 对基坑开挖的全过程进行了模拟;同时采用正交试验研究了不同的支护参数(插入比,地下连续墙刚度,内支撑纵向间距)对河漫滩地区深基坑施工扰动的效应。研究结果表明:太原地铁车站深基坑施工过程中地表沉降最大值发生在距离基坑 0.7H(H 为基坑深度)的位置,开挖的影响范围大致在 4H 左右;将地下连续墙插入比控制在 0.9~1.0,同时将最下面一道支撑尽可能靠近基坑底部对于控制基坑变形具有重要意义。

关键词 深基坑 施工扰动 数值模拟 地下连续墙 正交试验
中图法分类号 TU470.3; **文献标志码** A

为缓解城区的交通拥堵情况,太原市首批规划并拟建七条地铁线路,且地铁二号线为首条启动地铁线路。太原地铁二号线全长 24.9 km,全长范围内共有 21 个地铁车站,其中有 5 个为换乘站^[1]。在以往基坑工程的施工过程中事故频发,这其中主要是由于两个方面的原因:一方面是由于人们对于施工扰动效应研究不足;另一方面是由于工程地质条件以及施工背景的差异性^[2,3]。鉴于目前对于上海地区软土地层以及西安地区黄土地层中基坑工程的研究较多^[4,5],而对于太原地区特殊的河漫滩地层可采用的研究成果较少,相关工程经验缺失。基于此,以太原地铁二号线南内环街站深基坑(太原地区在建的最大地铁车站深基坑)为研究背景,采用有限差分软件 FLAC3D 对基坑开挖的全过程进行研究,分析基坑的变形规律,对基坑施工扰动效应进行研究,为以后太原地区深基坑工程的施工提供参考依据。

1 工程地质条件

太原地铁二号线南内环街站位于长治路与南内环街交叉口处,长治路和南内环街均为城市主干道,车流量大。南内环街站为太原地铁二号线的中间换乘站,主体结构为两层岛式站台,上下两层分别为站厅层和站台层。南内环街站长 518.0 m,外包尺寸为

21.6 m(宽)×13.67 m(高),盾构端外包尺寸为 25.7 m(宽)×14.72 m(高),车站采用明挖法进行施工。

南内环街站深基坑支护采用地下连续墙与内支撑相结合的方式,第一道支撑采用钢筋混凝土支撑,第二、三道支撑采用钢管支撑,支撑主要参数如表 1 所示。

汾河穿过太原地区,导致河漫滩特性显著^[6]。地层主要以黏质粉土和粉质黏土为主,具有较强的振动液化特性以及渗透性,在外界荷载、扰动、地下水的影响下土体易发生液化现象,导致地下连续墙槽壁发生坍塌、渗漏。同时黏质粉土及粉质黏土地层土体的力学性质变异性大,受到施工扰动时,土体的性质会发生较大变化,在施工过程中需考虑这种影响。南内环街站土体主要力学参数如表 2 所示。

表 1 横向支撑设计参数
Table 1 The parameters of horizontal support

参数	砼支撑	钢支撑
弹性模量 $E/10^9\text{ Pa}$	30	200
泊松比 μ	0.167	0.3
横截面积 $A/10^{-2}\text{ m}^2$	72	0.305
Z 轴惯性矩 $I_z/10^{-3}\text{ m}^4$	48.6	1.31
Y 轴惯性矩 $I_y/10^{-3}\text{ m}^4$	34.8	1.31
极惯性矩 $J/10^{-3}\text{ m}^4$	83.4	2.62

表 2 土体参数
Table 2 Soil parameters

土体类别	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/(kg·m ⁻³)	土层厚度/m
杂填土	6.23	3.11	8.0	2.0	1 900	5
素填土	6.23	3.11	6.0	4.7	1 900	1
粉质黏土	12.28	5.34	20.0	18.4	1 940	8
黏质粉土	10.00	3.80	17.7	15.6	1 930	6
粉细砂	10.46	5.95	20.0	18.4	1 950	4
中砂	10.42	5.95	28.0	2.0	1 970	9

2016 年 9 月 30 日收到 国家自然科学基金(41272318)资助
第一作者简介:张攀(1992—),硕士研究生。研究方向:岩土工程。E-mail:zhangpan0628@hotmail.com。
引用格式:张攀,杨双锁.太原河漫滩地区深基坑施工扰动效应研究[J].科学技术与工程,2017,17(10):277—280
Zhang Pan, Yang Shuangshuo. Research on construction disturbance effect of foundation pit in the region of taiyuan flood plain[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 277—280

2 模型建立

数值计算模型主要包括两个大的部分:实体模型部分和结构单元部分^[7]。根据对称性原理,通常采用 1/2 的实际工程进行模拟,但实际上考虑到本工程 的长度达到了 518 m,根据经验虽然选取一半的长度进行计算能够较好地还原真实的工程情况,但是由于中间部分的基坑处于相同的受力状态,如果仍取 1/2 进行计算那么会使大部分的计算变为重复的过程,严重地降低了计算的效率。因此根据初步计算结果确定的基坑尺寸为:长度为 30 m,宽度为 20 m,开挖深度为 15 m。模型的大小必须考虑覆盖到基坑开挖的影响范围,同时必须要兼顾计算效率。根据《建筑基坑工程技术规程》(JGJ 120—2012)相关规定,同时结合相关文献确定的影响范围为 3~5 倍开挖深度,因此本模型选取的尺寸为 180 m×90 m×33 m(长×宽×高)。网格划分所遵循的主要原则是:基坑附近密集,远处稀疏,提高计算效率。计算不平衡力比率的临界条件为 10^{-4} ,本构模型选择摩尔-库伦模型,基坑顶部为自由面,其他五个方向均进行约束^[8]。

根据土力学原理,计算模型最下部的土压力有

$$\sigma_z = \gamma z = \rho g z = [(1\ 900 \times 5 + 1\ 900 \times 1 + 1\ 940 \times 8 + 1\ 930 \times 6 + 1\ 950 \times 4 + 1970 \times 9) \times 10] \text{ Pa} = 640\ 300 \text{ Pa} = 6.403 \times 10^5 \text{ Pa}$$

由应力云图 1 与土压力计算结果对比可知二者吻合度较好。但是在基坑边缘处,由于地下连续墙的存在导致发生了明显的应力集中现象。

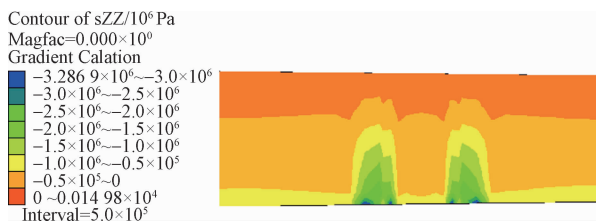


图1 模型竖向应力云图

Fig. 1 The vertical stress contour

3 施工扰动效应分析

3.1 工况选取

FLAC3D 中是采用赋空模型(model null)的命令来模拟开挖的过程,由于施工工艺的限制,施工过程中除了第一步采用先挖后撑外,其他各个步骤都是采用先撑后挖的工序,从而保障了工程的安全性。模拟过程中主要工况主要分四步:①由地表向下开挖一米(-1 m);②施工冠梁和第一道混凝土支撑(0 m),然后向下开挖五米(-6 m);③架设第二道

钢管内支撑(-6 m),继续向下开挖六米(-12 m);④架设第三道钢管内支撑(-12 m),最后向下开挖三米(-15 m)。

3.2 插入比影响效应分析

选取地下连续墙厚度为 800 mm,内支撑竖向间距为 6 m 的情况为研究对象,通过改变插入比的数值,得到如图 2 所示的地表沉降规律和如图 3 所示的变形效应图。

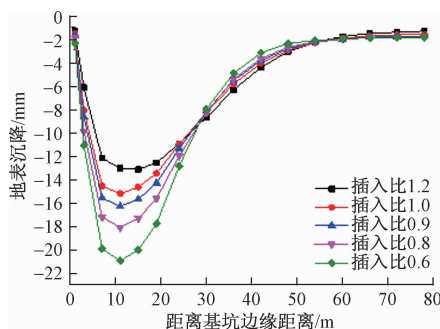


图2 不同插入比情况下基坑周围地表沉降规律

Fig. 2 Ground surface settlement over different ratio of embedded depth

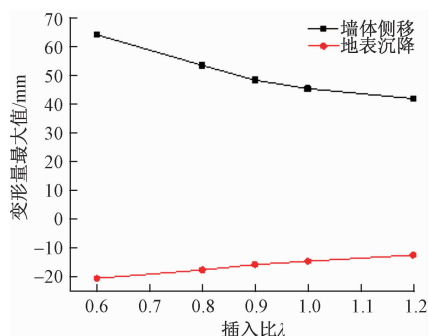


图3 不同插入比情况下变形效应图

Fig. 3 Deformation effect over different ratio of embedded depth

在不同的插入比下,基坑周围地表沉降整体呈现“凹槽型”,通过计算可知基坑周围地表沉降的最大值发生在距离基坑边缘 11 m 的位置,约为 $0.7H$ (H 为基坑开挖深度)。当距离基坑边缘 60 m 以外时,地表沉降量几乎都接近零,这说明基坑开挖对地表沉降的影响范围大致在 $4H$ 左右^[9]。

对比分析可知:当插入比发生变化时,地表沉降和墙体侧移呈现大致相同的变化趋势,即先逐渐减小最后趋于平缓。插入比由 0.6 提高到 1.0,地表最大沉降和地下连续墙的最大水平侧移量分别减小了 30% 左右。然而当继续增加墙体的入土深度(即提高插入比)时,变形量的减小并不明显,同时还会导致施工投资的增加,是不够合理的举措。因此对于太原河漫滩地区地铁车站的深基坑适于将插入比控制在 0.9~1.0,这样既能控制基坑的变形,同时

也能达到较好的经济效益。

3.3 内支撑竖向间距影响效应分析

不同内支撑竖向间距情况下的变形效应如图 4 所示。

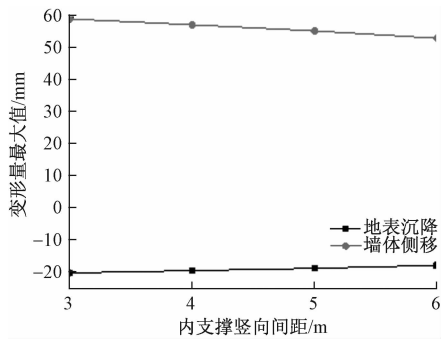


图 4 不同内支撑竖向间距情况下的变形效应图
Fig. 4 Deformation effect of different spacing of supporting systems

分析图 4 可知:当内支撑的竖向间距逐步增大时,地表沉降和墙体侧移都有所减小,内支撑竖向间距越大也就意味着最下面一道内支撑距离基坑底部的距离越近,这说明适当将最下面一道设置在适当靠近基坑底部的位置有利于控制基坑的变形。

4 正交试验研究

在考虑了数值模拟计算的可行性以及单因素的影响作用效果后,南内环街站深基坑的正交试验方案主要考虑了三个因素:插入比、地下连续墙厚度、内支撑竖向间距^[10]。正交试验各项参数及结果如表 3,表 4 所示。

表 3 正交试验因素及水平 Table 3 The factors and levels of orthogonal test			
水平	因素		
	插入比 λ	地下连续墙厚度 d/mm	横向支撑间距 h/m
1	0.6	600	4
2	0.8	800	5
3	1.0	1 000	6

由极差分析可知:若以地表沉降 Y_1 为评价指标,则三个因素对沉降的敏感性根据极差大小排序依次是:插入比、地下连续墙厚度、横向支撑间距,说明插入比对地表沉降的影响效果最大,地下连续墙厚度其次,横向支撑间距的影响效果最小。若以地下连续墙体的水平位移 Y_2 为评价指标,三个因素的敏感性由大到小分别为:插入比、地下连续墙体厚度、横向支撑间距,分析可知插入比的极差值远大于其他两项。综合分析沉降指标 Y_1 和侧移指标 Y_2 可知插入比大小对于变形沉降和侧移的

影响起着绝对性的作用,在考虑控制变形的条件下,需要优先考虑插入比的数值,即地下连续墙插入土体的深度。

表 4 正交试验及计算结果 Table 4 The result of orthogonal test					
试验号	插入比/λ	地下连续墙厚度 d/mm	横向支撑间距 h/m	试验指标	
				地表沉降 Y_1 /mm	水平侧移 Y_2 /mm
1	1(0.6)	1(600)	1(4)	21.6	65.9
2	1(0.6)	2(800)	2(5)	22.3	67.2
3	1(0.6)	3(1 000)	3(6)	18.6	58.5
4	2(0.8)	1(600)	2(2)	19.6	57.9
5	2(0.8)	2(800)	3(6)	17.9	53.2
6	2(0.8)	3(1 000)	1(4)	18.1	53.7
7	3(1.0)	1(600)	3(6)	15.8	48.1
8	3(1.0)	2(800)	1(4)	16.0	48.2
9	3(1.0)	3(1 000)	2(5)	14.3	43.3
地表沉降	K1	20.8	19.0	18.6	
	K2	18.5	18.7	18.7	
	K3	15.4	17.0	17.4	
	R	5.4	2.0	1.3	
水平侧移	K1	63.9	57.3	55.9	
	K2	54.9	56.2	56.1	
	K3	46.5	51.8	53.3	
	R	17.4	5.5	2.8	

正交试验的目的是希望找到三个因素所对应水平的最优化组合,需要将地表沉降和水平侧移两个指标尽量控制在较小的范围内,为此在选取各个水平时应该考虑选择效应值比较小的水平。由正交试验结果(表 4)可知,在以地表沉降和水平侧移为指标的情况下,两者所选取的最优水平组合是一致的:插入比、地下连续墙厚度、横向支撑间距都取第 3 水平,即插入比取 1.0、地下连续墙厚度取 1 000 mm、横向支撑间距取 6 m。

5 研究结论

- (1) 太原河漫滩地区深基坑开挖地表沉降整体呈现凹槽型,沉降最大值发生在距离基坑 $0.7H$ (H 为基坑深度) 的位置,开挖的影响范围大致在 $4H$ 左右。
- (2) 当地下连续墙插入比由 0.6 提高到 0.9 ~ 1.0 时,地表最大沉降和地下连续墙的最大水平侧移量减小了 30% 左右,当继续提高插入比时,对于控制变形的效果并不明显。因此,太原地区适于将插入比控制在 0.9 ~ 1.0。
- (3) 河漫滩地区适当将最下面一道支撑设置在

靠近基坑底部的位置有利于控制基坑的变形。

(4) 正交试验结果表明南内环街站基坑支护参数的最优组合为:插入比 $\lambda = 1.0$, 地下连续墙厚度 $d = 1\,000\text{ mm}$, 横向支撑间距 $h = 6.0\text{ m}$ 。

参 考 文 献

1 焦清杰. 太原地铁 2 号线工程建设面临的主要岩土工程问题分析. 铁道建筑科学, 2014; (1): 35—40
Jiao Qingjie. The main geotechnical problems in the No. 2 line of Taiyuan metro construction. Railway Construction Technology, 2014; (1): 35—40

2 孙 钧, 等. 城市环境土工学. 上海: 上海科学技术出版社, 2005
Sun Jun, *et al.* City environment geotechnics. Shanghai: Shanghai Scientific Technology Press, 2005

3 王景春. 考虑施工扰动效应的基坑性状分析. 杭州: 浙江大学, 2008
Wang Jingchun. Behaviors of deep excavation considering disturbance effect due to construction. Hangzhou: Zhejiang University, 2008

4 李佳宇, 张子新. 圆砾层地铁车站深基坑变形特征三维数值分析. 地下空间与工程学报, 2012; 8(1): 71—76, 110
Li Jiayu, Zhang Zixin. 3D numerical analysis of deep station excavation constructed in round gravel strata. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012; 8(1): 71—76, 110

5 侯永茂, 王建华, 陈锦剑. 超大型深基坑开挖过程三维有限元分析. 岩土工程学报, 2006; 28(增刊 1): 1374—1377
Hou Yongmao, Wang Jianhua, Chen Jinjian. 3D FEM analysis of

over size and deep excavation. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006; 28(Sup1): 1374—1377

6 于 洋, 杨双锁, 刘光宇, 等. 太原地铁车站基坑变形规律三维数值模拟研究. 施工技术, 2016; 45(7): 74—77
Yu Yang, Yang Shuangsoo, Liu Guangyu, *et al.* 3D numerical simulation analysis on the deformation of deep foundation excavation of subway station in Taiyuan. Construction Technology, 2016; 45(7): 74—77

7 陈育民, 徐鼎平. FLAC / FLAC3D 基础与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 43—44
Chen Yumin, Xu Dingping. The basis and engineering examples of FLAC / FLAC3D. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 43—44

8 彭文斌. FLAC3D 实用教程. 北京: 机械工业出版社, 2011: 113—117
Peng Wenbin. FLAC3D practical tutorial. Beijing: China Machine Press, 2011: 113—117

9 胡 意, 吴大志. 基坑开挖引起的地表沉降分析. 施工技术, 2012; 41(增刊): 39—41
Hu Yi, Wu Dazhi. Analysis of surface settlement caused by deep foundation excavation. Construction Technology, 2012; 41(Sup): 39—41

10 罗海燕, 杨双锁, 王 婧, 等. 基于正交试验的深基坑变形影响因素及特征机理研究. 科学技术与工程, 2016; 16(24): 286—291
Luo Haiyan, Yang Shuangsoo, Wang Jing, *et al.* Research on the influence factors and characteristics of deformation of deep foundation pit based on orthogonal experiment. Science Technology and Engineering, 2016; 16(24): 286—291

Research on Construction Disturbance Effect of Foundation Pit in Rhe region of Taiyuan Flood Plain

ZHANG Pan¹, YANG Shuang-suo²

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University¹, Shanghai 200240, P. R. China;
College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology², Taiyuan 030024, P. R. China)

[Abstract] Based on the background of Nan-nei-huan Station on Taiyuan Metro line 2, the whole process of deep excavation and deformation features are studied by FLAC3D software. Considering the ratio of embedded depth, thickness of diaphragm wall and spacing of supporting systems, orthogonal test was adopted to analyze the deformation effect. The main conclusions as follows: the location of maximum ground settlement occurred is about $0.7H$ around the deep excavation edge; the effect range of excavation for surface subsidence is roughly $4H$. It's effective to set the ratio of embedded depth approach $0.9 \sim 1.0$ and the lowest supporting near the bottom of the deep foundation pit.

[Key words] deep foundation pit construction disturbance numerical simulation diaphragm wall
orthogonal test