

软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析

吕高乐¹, 易领兵², 杜明芳³, 李帅兵⁴

- (1. 郑州市轨道交通有限公司, 河南 郑州 450000;
2. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100000;
3. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450000;
4. 上海城铁建筑科技有限公司, 上海 200000)

摘要: 以某软土地区邻近地铁车站及盾构隧道的双侧深基坑工程为背景, 运用 ABAQUS 数值计算软件对邻近地铁车站及盾构隧道的双侧深基坑施工进行数值模拟, 研究了双侧深基坑施工过程对基坑坑内土体隆起与坑外土体沉降的影响, 分析了双侧深基坑施工过程中地铁车站及盾构隧道变形情况, 得出地铁车站及盾构隧道变形规律。计算结果表明: 基坑内侧土体隆起最大值为 54.3 mm; 围护结构 X 向位移最大值为 32.8 mm, Y 向位移最大值为 26.8 mm; 车站竖向位移最大值发生在 A1 区开挖至坑底工况, 最大值为 6.8 mm, 而车站水平位移最大值为 7.6 mm; 弯矩累计增量最大值 155.9 kN·m/m, 经计算, 施工过程对车站主体结构影响很小; 盾构隧道 X 向水平位移最大值为 4.7 mm; 而盾构隧道沉降最大值为 3.8 mm, 发生在 A1 区开挖至坑底工况。

关键词: 双侧深基坑; 地铁车站; 盾构隧道; ABAQUS; 影响

中图分类号: U231; U456

文献标识码: A

ANALYSIS OF INFLUENCE OF DEEP FOUNDATION PIT CONSTRUCTION ON DEFORMATION OF ADJACENT SUBWAY STATION AND SHIELD TUNNEL IN SOFT SOIL AREA

LV Gaole¹, YI Lingbing², DU Mingfang³, LI Shuaibing⁴

- (1. Zhengzhou Railway Transportation Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China;
2. The Hand in Railway Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100000, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China;
4. Shanghai City Railway Construction Technology Co., Ltd. Shanghai 200000, China)

Abstract: Taking the bilateral deep foundation pit construction in some soft soil area adjacent to the subway station and shield tunnel as an example, using the numerical calculation software ABAQUS to carry out the numerical simulation of bilateral deep foundation pit construction, The influence of the construction process on the soil uplift in the foundation pit and the soil settlement outside the pit is studied, the deformation conditions of the subway station and shield tunnel were analyzed and the regularity were obtained. The calculation results show that the maximum value of soil uplift inside the foundation pit is 54.3 mm. The maximum x-direction displacement of the surrounding structure is 32.8

mm and the maximum y-direction displacement is 26.8 mm. The maximum vertical displacement of the station occurs from excavation to pit bottom in area A1, with a maximum value of 6.8 mm, while the maximum horizontal displacement of the station is 7.6 mm. The maximum cumulative increment of bending moment is 155.9 kN · m/m. The maximum x-directional horizontal displacement of shield tunnel is 4.7 mm. The maximum settlement value of shield tunnel is 3.8 mm, which occurs when the tunnel is excavated from area A1 to the bottom of the pit.

Key words: bilateral deep foundation pit; subway station; shield tunnel; ABAQUS; influence

0 引言

随着城市建设的全面铺开, 基坑因其特殊性(临近环境不同^[1-2]、所处地理位置不同^[3-4]、开挖深度不同)造成其设计^[5-6]、施工等无统一标准^[7-8]。国内外专家学者从基坑开挖对周边环境影响^[9-10]、基坑自身稳定性、支护桩自身受力变形^[11-12]、支护结构计算方法及有限元软件模拟等方面进行了论证研究^[13]。龙宏德等以深圳某深路堑基坑工程为背景, 研究基坑施工对地铁 11 号线隧道的影响, 并提出了施工控制措施^[14]。孙立柱通过运用有限元软件模拟深基坑施工开挖对临近地铁车站的影响研究, 分析了深基坑围护结构自身受力并研究了地铁车站内力变形情况^[15]。吴薪柳研究了复杂基坑施工对相邻地铁的影响, 并总结了地铁车站沉降的变形规律^[16]。

天津位于古黄河及海河冲洪积平原。土层以粉质粘土、粉土、淤泥质土等为主, 地下水位埋深 0.0~2.5 m, 是典型的高水位软土, 地质环境复杂。总结过往研究成果发现, 目前对邻近地铁车站及盾构隧道复杂情况的双侧深基坑设计施工研究涉足较少, 因此研究软土区域双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道的影响显得非常必要。研究成果以期为类似条件的深基坑支护设计施工及对周边建构筑的保护提供技术参考。

1 工程概况

1.1 基坑环境

该工程位于天津市河北区律纬路、五马路、八马路与调纬路围合地块。该地块内部包含两层地下室。在地块中部, 南北贯穿整体地块为地铁 6 号线新开河站(目前正在施工), 将基坑分为东西两个部分。位于地铁站体西部为 A 地块, 东部为 B

地块。如图 1 所示。

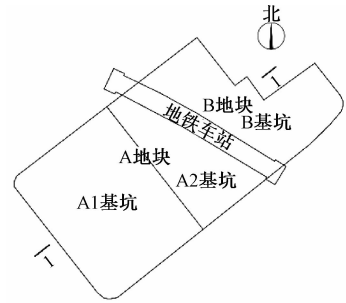


图 1 基坑总平面图

Fig. 1 General plan of the foundation pit

工程 A 地块拟建物包括五栋住宅(17 层两栋、18 层一栋、32 层两栋), 三栋办公楼(17 层一栋、20 层一栋、36 层一栋部分用于酒店); 地块南部包含 2~3 层裙房。B 地块拟建物包括九栋住宅(三层两栋、五层五栋、六层两栋); 地块西部包含 2~4 层的裙房。其中两个地块均包含两层地下室, 为基坑支护的对象。

工程现场地平均大沽标高为 2.3 m, 基坑坑深情况详见表 1 所示。地铁新开河站共地下三层, 地铁基坑深 24.14 m。围护结构: 1.0 m 厚地下连续墙, 长度 45.1 m。

表 1 各分区开挖信息表

Table 1 Information table for excavation of each division

区域	现场地大沽标高/m	地下室层高/m	基础(含垫层)厚度/m	坑底大沽标高/m	地下室埋深/m
A 地块裙房	2.3	6.2/3.7	1.4	-9.6	11.9
A 地块百米塔楼	2.3	6.2/3.7	2.1	-10.3	12.6
B 地块	2.3	4.0/5.55	1.4	-19.0	11.15

1.2 工程地质水文条件

该基坑所在场地土层自上而下依次分布有杂填土、素填土、粉质粘土、粉土。地下潜水水位埋深 2.0~3.0 m。基坑典型剖面图如图 2 所示。土体物理参数如表 2 所示。

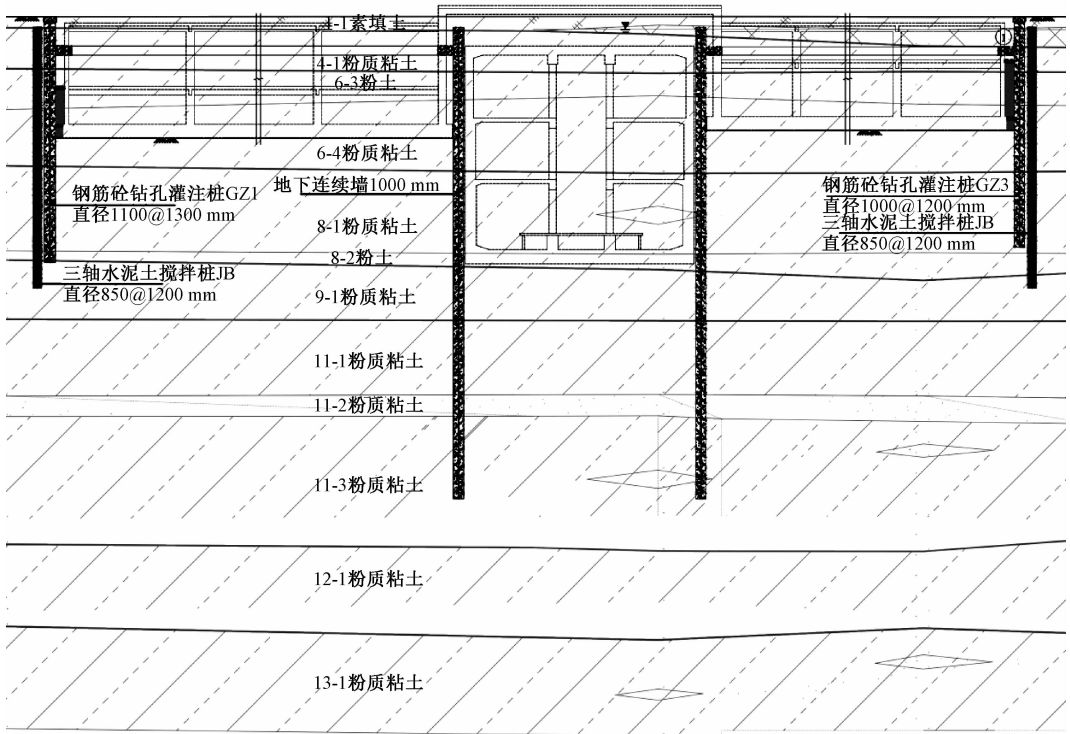


图2 基坑典型地质剖面图 1-1

Fig.2 Typical geological profile of the foundation pit 1-1

表2 土体物理参数表

Table 2 Physical parameters table of the soil

地层 编号	土体名称	重度 γ / (kN/m^3)	直剪固结快剪		直剪快剪	
			c/kPa	$\phi/(\circ)$	c/kPa	$\phi/(\circ)$
1-1	素填土	18.8	12.8	15.0	10.0	6.3
4-1	粉质粘土、粘土	19.0	14.9	17.8	12.5	12.8
6-3	粉土	19.6	7.8	31.0	7.5	29.5
6-4	粉质粘土	19.1	13.8	17.4	11.1	15.0
8-1	粉质粘土	20.0	20.4	18.5	18.8	16.6
8-2	粉土	20.0	8.1	30.9	6.4	29.3
9-1	粉质粘土	20.1	20.4	21.0	18.3	19.1
11-1	粉质粘土	20.0	20.8	21.2	18.7	19.4
11-2	粉质粘土	20.0	20.9	21.5	18.5	19.7
11-3	粉质粘土	20.0	20.2	21.7	18.9	19.2
12-1	粉质粘土	20.4	20.4	21.0	18.3	19.1
13-1	粉质粘土	20.6	20.9	21.1	18.6	19.5

2 基坑支护设计方案

基坑采用连排灌注桩（基坑临近地铁站体处，利用站体支护用地下连续墙作为支护结构）+三轴水泥土搅拌桩止水帷幕+一层钢筋混凝土水平支撑系统的支护方案。由于工程A区基坑面积很大，从地铁保护及业主建设时序角度出发，将A区分为A1和A2两个基坑。先期施工A1基坑，待其地下主体结构施工至地下二层结构顶板，并完成相应换撑措

施以后，再进行A2基坑及B区基坑的开挖。

2.1 支护结构

A地块基坑深为11.9 m， $\phi 1100@1300$ mm灌注桩，桩长23.5 m，嵌固深度为12.1 m。桩顶位于地表下0.5 m，桩端嵌入8-2粉土层。

A地块基坑局部百米塔楼处深为12.6 m， $\phi 1200@1400$ mm灌注桩，桩长24.5 m，嵌固深度为12.4 m。桩顶位于地表下0.5 m，桩端嵌入9-1粉质粘土层。

B地块基坑深为11.15 m， $\phi 1000@1200$ mm灌注桩，桩长22.0 m，嵌固深度为11.35 m。桩顶位于地表下0.5 m，桩端嵌入8-1粉质粘土层。

B地块东侧局部邻近住宅小区基坑深11.15 m， $\phi 1100@1300$ mm灌注桩，桩长23.5 m。

基坑中部为地铁6号线新开河站，在其站体两侧为支护用地下连续墙，基坑利用其作为支护结构。该地下连续墙厚度为1000 mm，地连墙有效长度45.0 m。墙顶位于地表下1.830 m。

2.2 止水帷幕

基坑拟采用三轴水泥土搅拌桩 $\phi 850@1200$ mm作为止水帷幕，搅拌桩上端位于地表下1.0 m。搅拌桩有效桩长25.5 m，下端嵌入9-1粉质粘土层，将8-2粉土层（第一层承压含水层）隔断。

B区基坑北侧临近地铁站体端头井范围采用800 mm厚TRD工法桩作为止水帷幕,工法桩上端位于地表下1.0 m。有效桩长25.5 m,下端嵌入9-1粉质粘土层,将8-2粉土层(第一层承压含水层)隔断。

2.3 水平支撑系统

由于工程基坑与地铁站体相连,支护结构借用部分地铁站体支护用地下连续墙,基坑设置一道水平支撑支撑系统与地铁站体顶板的标高一致,水平支撑系统表见表3所示。

表3 水平支撑系统表

Table 3 Horizontal support system table

项目	支撑中心 标高/m	支撑下皮与 结构净空/m	腰梁/m	环梁 a/m	环梁 b/m	环梁 c/m	对撑/m	角撑、辐射撑/ m	联系杆件/ m	板/m
A1区	-1.0	3.05	1.6×0.9	2.6×0.9	2.0×0.9	1.4×0.9	-	0.8×0.9	0.6×0.7	0.4
A2区	-1.0	3.05	1.6×0.9	-	2.0×0.9	1.4×0.9	1.4×0.9	0.8×0.9	0.6×0.7	0.4
B区	-1.0	0.45	1.8×0.9	1.8×0.9	1.4×0.9	-	1.4×0.9	0.8×0.9	-	0.4

3 基坑开挖模拟分析

采用大型有限元软件 ABAQUS, 建立三维模型, 研究基坑开挖对地铁车站及盾构区间的影响。

3.1 模型建立

坑外土体边界取至由坑边向外延伸60 m, 为基坑的5倍开挖深度; 对于竖向边界, 坑下取60 m, 为基坑5倍开挖深度, 超过站体工程桩桩底15 m, 最终计算模型尺寸为470 m×350 m×70 m。有限元模型如图3和4所示。

13-1合并。计算模型中土体计算参数见表4, 基于天津地区的工程经验, $\kappa = (1/6 \sim 1/10) \lambda$, 方程中取 $\kappa = 1/8\lambda$ 。土的计算参数见表4所示。基坑围护结构灌注桩抗弯等效为墙体, 计算模型中结构尺寸及计算参数见表5所示。

表4 土的计算参数

Table 4 Calculation parameters of the soil

编号	对应土层	厚度/ m	γ / (kN/m ³)	Φ / (°)	E_s / MPa	λ	κ	M
1	1-1和4-1	5.5	18	16	4	0.004	0.006	0.61
2	6-3	6.4	19.5	31	12.1	-	-	-
3	6-4和8-1	10.1	19.2	18	5.6	0.031	0.004	0.69
4	8-2	2	19.8	30.9	10.9	-	-	-
5	9-1	6.3	20	21	6.5	0.026	0.003	0.81
6	11	22	19.9	17.3	6.9	0.025	0.003	0.65
7	12-1和13-1	17.7	20	19.9	8	0.021	0.003	0.73

表5 基坑结构、新建地铁车站尺寸及计算参数

Table 5 Structure of the foundation pit, dimensions and calculation parameters of the new subway station

结构、围护类型	厚度/m	材料	容重 γ / (kN/m ³)	弹性模量 E / MPa	刚度 (KN/m)
灌注桩 $\phi 1000$	等效为1.1	C30	25	-	-
灌注桩 $\phi 1100$	等效为1.1	C30	25	等效为19900	-
灌注桩 $\phi 1200$	等效为1.1	C30	25	等效为26200	-
地下连续墙	1.0	C30	25	30000	-
水平支撑	-	C30	25	30000	-
基坑换撑	-	C30	25	-	1000
站体顶板	0.9	C30	25	30000	-
站体底板	1.4	C30	25	30000	-
站体中板	0.4	C30	25	30000	-
站体边墙	1.1	C35	25	31500	-
站体立柱	-	C45	25	33500	-

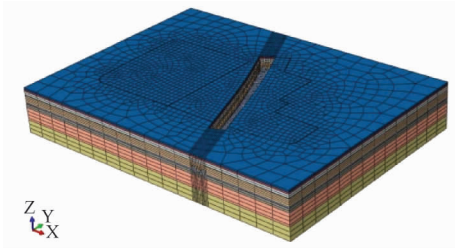


图3 整体有限元计算模型示意图(土体)

Fig. 3 A schematic diagram of the overall finite element model (soil)

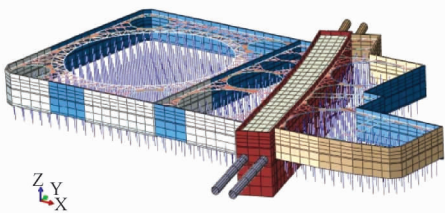


图4 整体有限元计算模型示意图(结构)

Fig. 4 Overall finite element calculation model schematic diagram (structure)

计算中对土性及土体参数接近的土层进行了归并。其中1-1、4-1合并, 6-4、8-1合并, 12-1、

3.2 施工过程模拟

为准确模拟基坑开挖对新建地铁的影响, 计算采用动态模拟施工过程的分析方法, 共设置12个计算分析步。施工步序如表6所示。

表6 施工步骤

Table 6 Construction step

序号	内容
1	模拟基坑围护结构、坑内工程桩, 车站顶板进行覆土
2	A1区开挖, 至第一层坑底深度-3.30 m
3	施工该区域水平支撑
4	A1区第二层土体岛式开挖, 撑下区域挖至坑底深度-11.90 m
5	开挖A1区剩余土体
6	施工A1区换撑, 挖除覆土, 施工地铁站体上部结构
7	A2区与B区同时开挖, 至第一层坑底深度-3.30 m
8	施工该区域水平支撑
9	A2区与B区同时开挖, A2至坑底深度-11.90 m, B区至坑底深度-11.15 m
10	水平支撑在温度变化及混凝土干缩作用下收缩
11	施工A2区与B区换撑
12	拆撑A1区、A2区与B区的水平支撑

4 有限元计算结果

4.1 土体沉降分析

基坑降水开挖, 对周围土体产生扰动, 引起围护结构两侧土压力的不平衡, 导致围护结构发生侧移, 进而引起基坑内外土体位移场发生改变, 表现为坑外土体沉降, 坑内土体隆起。选取A1区开挖至坑底、A2与B区开挖至坑底、考虑水平支撑的温度及混凝土干缩作用、拆除水平支撑四个阶段进行分析。计算结果如图5—图8所示。

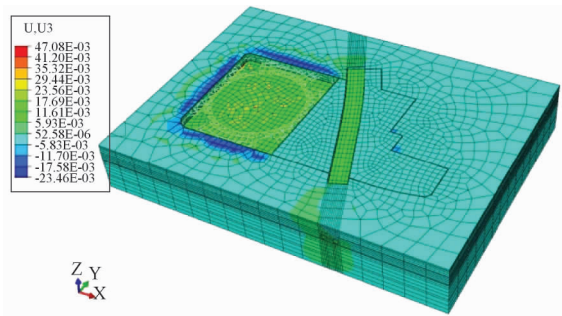


图5 A1区开挖至坑底沉降图

Fig. 5 Settlement diagram from excavation to the bottom of the pit in Area A1

A1区开挖至坑底时, 基坑外侧土体最大沉降量23.5 mm, 基坑内侧土体最大隆起量47.1 mm; A2区与B区开挖至坑底时, 基坑外侧土体最大沉降量23.6 mm, 基坑内侧土体最大隆起量53.7 mm; 考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用时, 基坑外侧土体最大沉降量23.5 mm, 基坑内侧土体最大隆起量54.3 mm; 拆除水平支撑后, 基坑外侧土体最

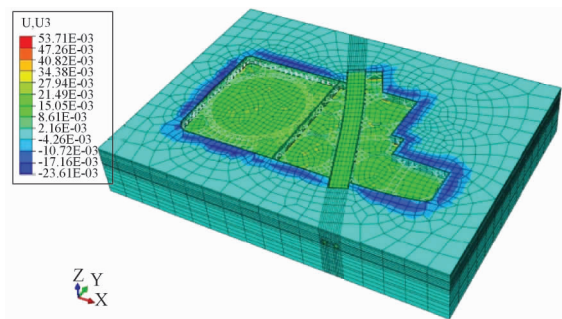


图6 A2区与B区开挖至坑底沉降图

Fig. 6 Settlement diagram from excavation to the bottom of the pit in Area A2 and Area B

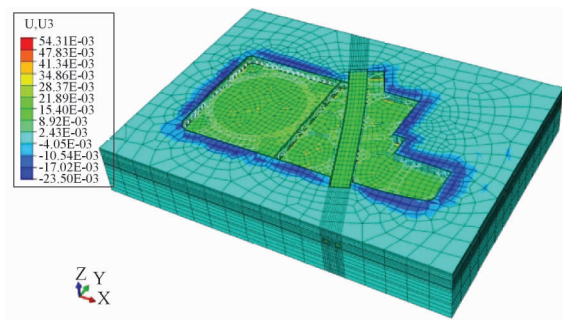


图7 考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用沉降图

Fig. 7 Settlement diagram considering the horizontal support temperature and the concrete dry shrinkage

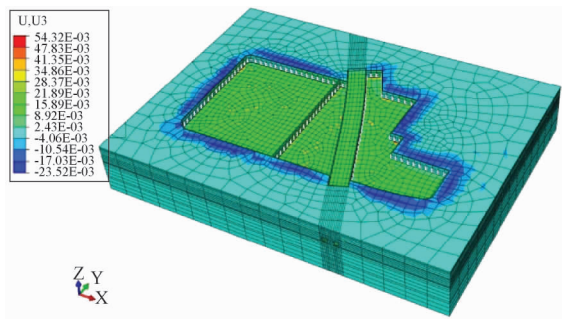


图8 拆除水平支撑后沉降图

Fig. 8 Settlement diagram after the removal of the horizontal support

大沉降量23.5 mm, 基坑内侧土体最大隆起量54.3 mm。随着施工步的进行, 基坑外侧土体最大沉降量维持在23.5 mm, 基本保持不变, 基坑内部隆起量最大值在A2区与B区开挖至坑底以后施工步达到54.3 mm, 基本保持不变。

4.2 围护结构灌注桩变形分析

基坑开挖导致作用在围护结构上的土压力发生了改变, 围护结构在土压力及支撑作用下寻求新的平衡而发生变形。选取A1区开挖至坑底、A2

与 B 区开挖至坑底、考虑水平支撑的温度及混凝土干缩作用、拆除水平支撑四个阶段进行分析。

文中给出了基坑围护结构变形值 (见表 7), 从表中数据可以看出: 随施工步进行围护结构 X 向最大值逐渐增大, 最大值达到 32.8 mm, 发生在拆除水平支撑工况; Y 向最大值也逐渐增大, 最大值达到 26.8 mm, 发生在拆除水平支撑工况, 但增加幅度较 X 方向小。

4.3 地铁车站结构位移分析

地铁 6 号线新开河站位于待建基坑中部, 随着基坑开挖引起坑内土体的卸荷变形, 基坑中部新建站体结构将产生相应的位移。选取 A1 区开挖至

表 7 基坑围护结构变形值表

Table 7 Table of deformation values of enclosure structure in the foundation pit

阶段	X 向	Y 向
	最大值/mm	最大值/mm
A1 区开挖至坑底	23.6	23.8
A2 区与 B 区开挖至坑底	23.6	23.8
考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用	31.7	25.8
拆除水平支撑	32.8	26.8

坑底、A2 与 B 区开挖至坑底、考虑水平支撑的温度及混凝土干缩作用、拆除水平支撑四个阶段进行分析。车站位移云图见图 9—图 12 所示, 最大位移值见表 8 所示。

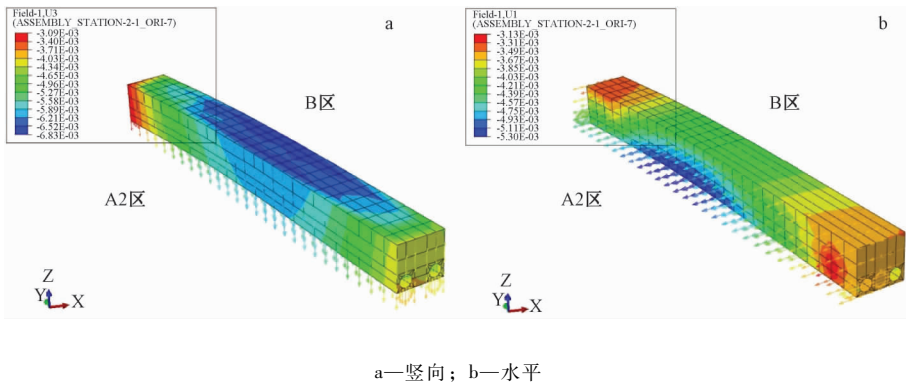


图 9 A1 区开挖至坑底车站竖向位移图与水平位移图

Fig. 9 Vertical displacement diagram of the subway station from excavation to pit bottom in Area A1

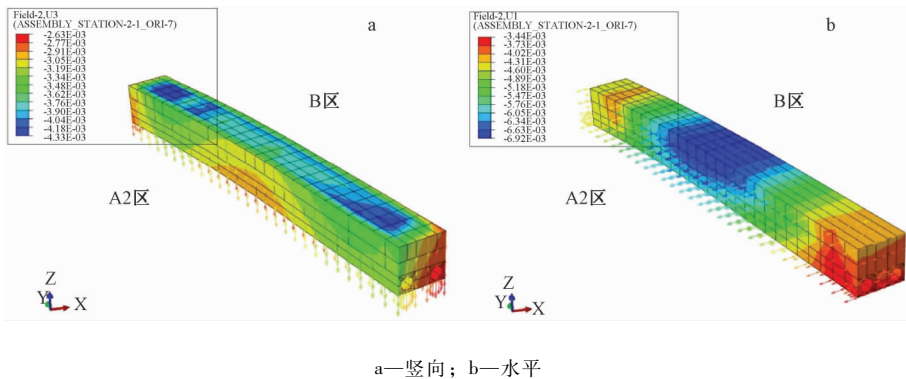


图 10 A2 区与 B 区开挖至坑底车站竖向位移图与水平位移图

Fig. 10 Vertical displacement diagram of the subway station from excavation to pit bottom in Area A2 and Area B

表 8 车站结构变形值表

Table 8 Station structure deformation value table

阶段	竖向位移	水平位移
	最大值/mm	最大值/mm
A1 区开挖至坑底	6.8	5.3
A2 区与 B 区开挖至坑底	4.3	6.9
考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用	4.3	7.6
拆除水平支撑	4.3	7.6

从表中数据可以看出: 车站竖向位移最大值发生在 A1 区开挖至坑底工况, 最大值为 6.8 mm, 之后随着施工步进行, 最大值减小到 4.3 mm, 并保持不变; 而车站水平位移最大值随施工步进行逐渐增大, 最大值达到 7.6 mm。

4.4 地铁车站附加内力分析

新建站体在基坑开挖过程中发生变形, 对站

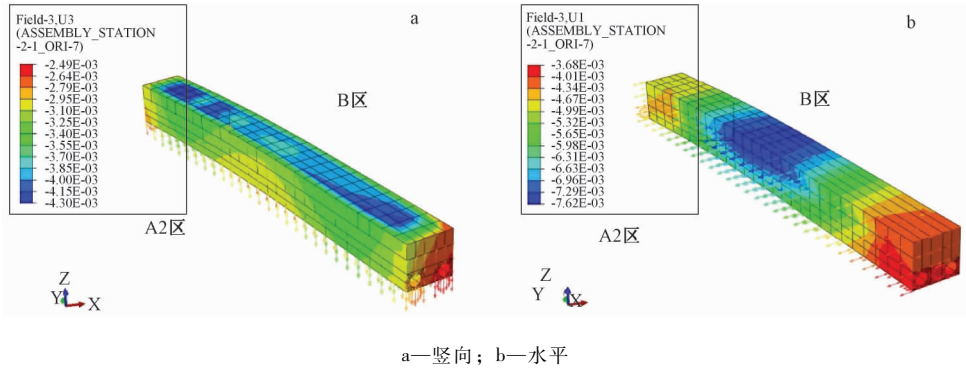


图 11 考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用车站竖向位移图与水平位移图

Fig. 11 Vertical and horizontal displacement diagrams of the subway station considering horizontal support temperature and concrete dry shrinkage

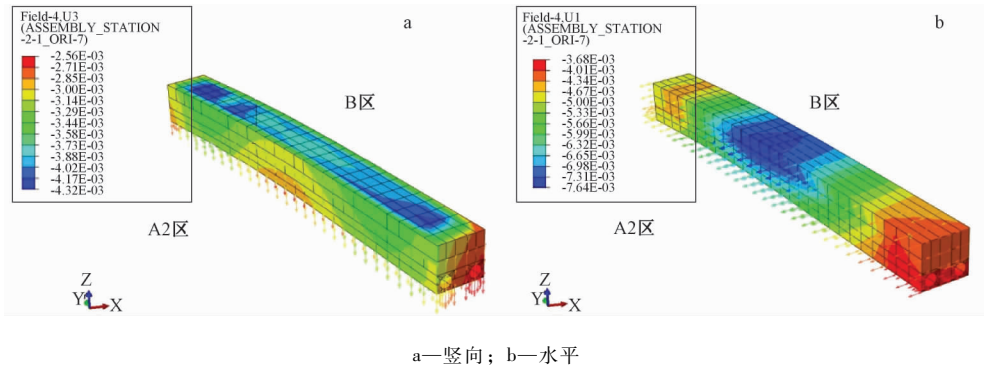


图 12 拆除水平支撑后车站竖向位移图与水平位移图

Fig. 12 Vertical and horizontal displacement diagrams of the subway station after the removal of the horizontal support

体结构内力产生影响。选取 A1 区开挖至坑底、A2 与 B 区开挖至坑底、考虑水平支撑的温度及混凝土干缩作用、拆除水平支撑四个阶段的每个阶段中站体附加弯矩增量进行分析。

文中列出了地铁车站结构附加弯矩变化情况(见表 9)。弯矩累计增量最大值 155.9 kN·m/m。经计算,对车站主体结构影响很小。

表 9 地铁车站附加弯矩表

Table 9 Additional bending moment table for the subway station

阶段	X 向最大值 (kN × m/m)	Y 向最大值 (kN × m/m)
A1 区开挖至坑底, 该步弯矩增量	34.7	36.1
A2 区与 B 区开挖至坑底, 该步弯矩增量	113.7	34.9
考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用, 该步弯矩增量	52.3	15.3
拆除水平支撑, 该步弯矩增量	24.2	10.9
弯矩增量和	155.9	65.9

表 10 盾构隧道位移表

Table 10 Displacement table of the shield tunnel

阶段	X 向水平位移 最大值/mm	沉降最大值 /mm
A1 区开挖至坑底	4.4	3.8
A2 区与 B 区开挖至坑底	4.5	2.8
考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用	4.6	2.7
拆除水平支撑	4.7	2.8

从表中数据可以看出: 盾构隧道 X 向水平位移最大值随着施工步进行逐渐增大, 最大值达到 4.7 mm; 而盾构隧道沉降最大值随施工步进行先逐渐减小至 2.7 mm, 随后增大到 2.8 mm, 最大值为 3.8 mm, 发生在 A1 区开挖至坑底工况。

4.5 盾构隧道位移分析

鉴于目前地铁隧道已有部分开始施工, 为保

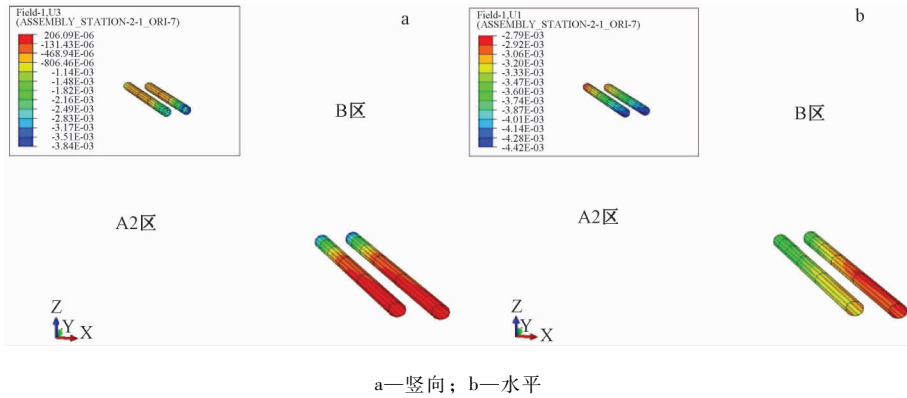


图 13 A1 区开挖至坑底盾构区间竖向位移图与水平位移图

Fig. 13 Vertical and horizontal displacement diagrams of the shield section from excavation to pit bottom in Area A1

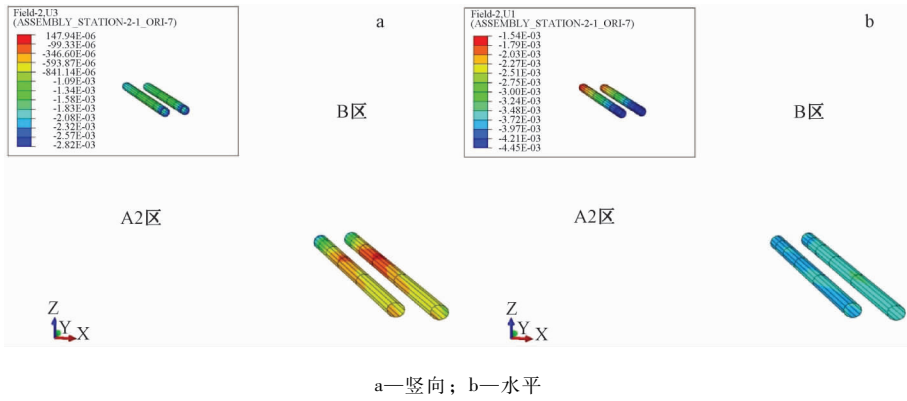


图 14 A2 区与 B 区开挖至坑底盾构区间竖向位移图与水平位移图

Fig. 14 Vertical and horizontal displacement diagrams of the shield section from excavation pit bottom in Area A2 and Area B

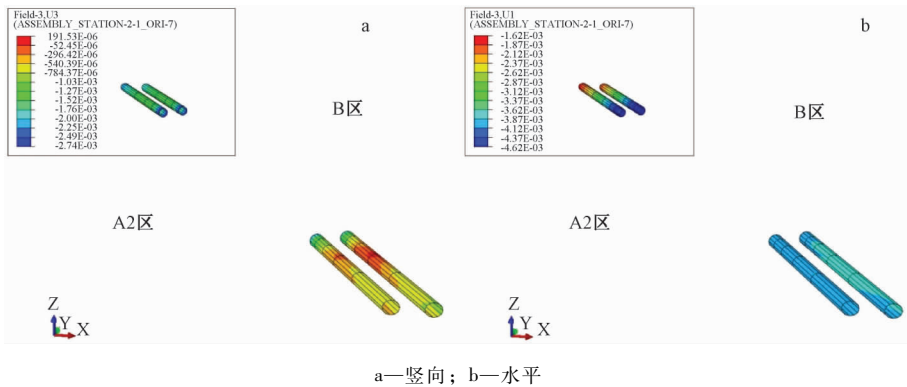


图 15 考虑水平支撑温度及混凝土干缩作用盾构区间竖向位移图与水平位移图

Fig. 15 Vertical and horizontal displacement diagrams of the shield section considering horizontal support temperature and concrete dry shrinkage

5 指标控制分析

根据现行规范、新建地铁车站现状及周围环境, 参考国内类似工程经验并结合理论分析^[2-9],

制定该工程变形控制指标及标准, 见表 11 所示。

综合上述计算结果, 工程施工完成后, 基坑、新建地铁车站及隧道变形如下:

- (1) 基坑: 坑内最大隆起 54.3 mm, 坑外最大沉降 23.5 mm。

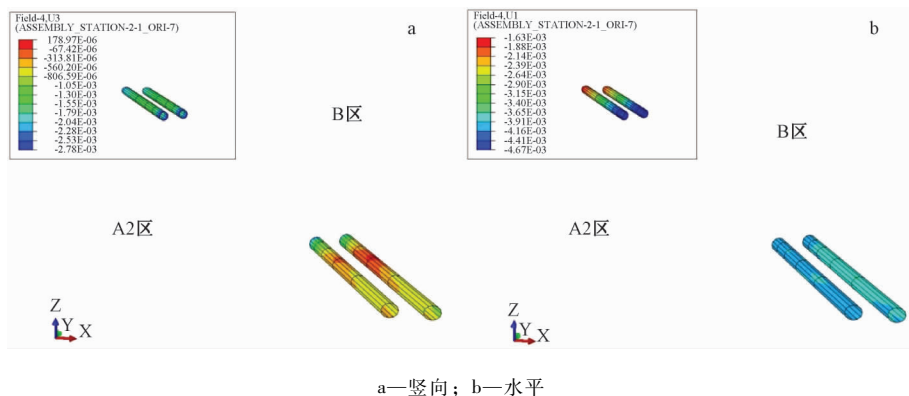


图 16 拆除水平支撑后盾构区间竖向位移图与水平位移图

Fig. 16 Vertical and horizontal displacement diagrams of the shield section after the removal of the horizontal support

表 11 盾构隧道位移表

Table 11 Displacement table of the shield tunnel

控制项目	累计值/mm	变化速率/(mm/d)
车站结构竖向位移	10	0.5
车站结构水平位移	10	0.5
隧道竖向位移	10	0.5
隧道水平位移	6	0.5

(2) 基坑围护结构: 最大侧移 32.8 mm。

(3) 地铁车站: 最大水平位移为 7.6 mm, 最大沉降为 6.8 mm。

(4) 盾构隧道: 最大水平位移为 4.7 mm, 最大沉降为 3.8 mm。

基坑施工完成后, 新建地铁车站最大水平位移为 7.6 mm, 最大竖向位移为 6.8 mm, 小于控制指标 10 mm; 盾构隧道最大水平位移为 4.7 mm, 小于控制指标 6 mm, 最大竖向位移为 3.8 mm, 小于控制指标 10 mm, 均处于变形控制标准之内, 满足地铁管理部门对临近基坑的在建、新建地铁车站及隧道的保护要求。

由此可见, 该基坑支护设计方案可满足临近新建地铁车站及隧道的保护要求。

6 结论

对邻近地铁车站和盾构隧道的双侧深基坑进行了数值计算, 研究了双侧深基坑施工后地铁车站和盾构隧道的位移, 并分析了土体沉降问题, 得出如下结论:

(1) 随施工步进行, 基坑外侧土体沉降最大值先增大后减小至 23.5 mm 并保持不变; 基坑内侧土体隆起最大值逐渐增大至 54.3 mm 并保持

不变。

(2) 随施工步进行, 围护结构 X 向位移最大值逐渐增大至 32.8 mm; Y 向位移最大值逐渐增大至 26.8 mm, 但增加幅度较 X 方向小。

(3) 车站竖向位移最大值发生在 A1 区开挖至坑底工况, 最大值为 6.8 mm, 之后随着施工步进行, 最大值减小到 4.3 mm, 并保持不变; 而车站水平位移最大值随施工步进行逐渐增大, 最大值达到 7.6 mm。

(4) 弯矩累计增量最大值 155.9 kN × m/m。经计算, 对车站主体结构影响很小。

(5) 盾构隧道 X 向水平位移最大值随着施工步进行逐渐增大, 最大值达到 4.7 mm; 而盾构隧道沉降最大值随施工步进行先逐渐减小至 2.7 mm, 随后增大到 2.8 mm, 最大值为 3.8 mm, 发生在 A1 区开挖至坑底工况。

参考文献/References

- [1] 冯国健. 紧邻深大长基坑的地铁结构保护对策与实践 [J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38 (1): 103 ~ 109.
FENG Guojian. Protection countermeasures for metro structure adjacent to deep and large foundation pit [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (1): 103 ~ 109. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘蕾, 刘雪玲, 周金喜. 地裂缝与斜交地铁隧道动力响应数值分析 [J]. 地质力学学报, 2018, 24 (2): 238 ~ 243.
LIU Lei, LIU Xueling, ZHOU Jinxi. Numerical analysis on dynamic response of the oblique metro tunnel in ground fissure area [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (2): 238 ~ 243. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈晓丹, 柏文锋, 张旭群, 等. 岩溶强发育地区基坑施工对邻近地铁结构影响分析 [J]. 施工技术, 2017, 46 (11): 131 ~ 134.

- CHEN Xiaodan, BAI Wenfeng, ZHANG Xuqun, et al. Impact analysis of foundation excavation construction on adjacent to subway structures in strong karst development area [J]. Construction Technology, 2017, 46 (11): 131 ~ 134. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王罡. 基坑开挖施工对邻近运营地铁隧道变形影响分析 [J]. 施工技术, 2016, 45 (20): 86 ~ 90.
- WANG Gang. Influence analysis of deep foundation excavation construction on deformation of adjacent subway tunnel [J]. Construction Technology, 2016, 45 (20): 86 ~ 90. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蒋志珍. 多基坑同时施工对相邻地铁线路的叠加效应影响及控制措施 [J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20 (10): 102 ~ 105.
- JIANG Zhizhen. Influence of superposed effect on subway by simultaneous construction of multiple foundations and the control measures [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20 (10): 102 ~ 105. (in Chinese with English abstract)
- [6] 冯龙飞, 杨小平, 刘庭金. 紧邻地铁侧方深基坑支护设计及变形控制 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (6): 1581 ~ 1587.
- FENG Longfei, YANG Xiaoping, LIU Tingjin. Supporting design and deformation control of deep excavation adjacent to the metro side [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (6): 1581 ~ 1587. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李光伟, 杜宇本, 蒋良文, 等. 大瑞铁路高黎贡山越岭段主要工程地质问题与地质选线 [J]. 地质力学学报, 2015, 21 (1): 73 ~ 86.
- LI Guangwei, DU Yuben, JIANG Liangwen, et al. Research on the engineering geology condition and railway routes comparison along the Mt. Gaoligong section, Dali-RUILI railway [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21 (1): 73 ~ 86. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王德斌, 曹思云. 洼东煤矿软岩巷道支护方式选择 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (1): 113 ~ 116.
- WANG Debin, CAO Siyun. Selection of soft rock roadway supporting methods in the Wadong coal mine [J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2013, 19 (1): 113 ~ 116. (in Chinese with English abstract)
- [9] 曹前. 既有地铁隧道上方基坑开挖特性研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (5): 109 ~ 115.
- CAO Qian. Research on characteristics of foundation pit excavation above existing subway tunnel [J]. Railway Standard Design, 2018, 62 (5): 109 ~ 115. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郑余朝, 施博文, 孙克国, 等. 基坑近接既有地铁盾构隧道施工影响分区方法 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52 (5): 910 ~ 918.
- ZHENG Yuchao, SHI Bowen, SUN Keguo, et al. Impact of partition method in pit construction adjacent to existing metro shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52 (5): 910 ~ 918. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨骏, 李夫杰. 深基坑施工对临近地铁盾构隧道的影响原理及规律研究 [J]. 南京理工大学学报, 2016, 40 (4): 493 ~ 503.
- YANG Jun, LI Fujie. Influence principle and law on deep foundation pit construction to near subway shield tunnel [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40 (4): 493 ~ 503. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭永发, 杨翔, 叶林, 等. 某基坑支护方案对相邻地铁区间的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (3): 726 ~ 731.
- GUO Yongfa, YANG Xiang, YE Lin, et al. Influence of foundation pit supporting scheme on adjacent existing subway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (3): 726 ~ 731. (in Chinese with English abstract)
- [13] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (S2): 391 ~ 395.
- ZUO Dianjun, SHI Lin, LI Mingming, et al. Numerical analysis of influence of deep excavations on adjacent subway tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (S2): 391 ~ 395. (in Chinese with English abstract)
- [14] 龙宏德, 刘俊景, 王定军, 等. 地铁隧道上方长距离并行基坑开挖的施工影响及变形控制 [J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21 (1): 106 ~ 112.
- LONG Hongde, LIU Junjing, WANG Dingjun, et al. Influence of long distance parallel foundation pit excavation on subway tunnel construction and deformation control [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21 (1): 106 ~ 112. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙立柱. 基坑开挖对紧邻地铁车站的影响分析 [J]. 特种结构, 2016, 33 (6): 52 ~ 55.
- SUN Lizhu. Influence analysis of foundation pit excavation on adjacent metro station [J]. Special Structures, 2016, 33 (6): 52 ~ 55. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴薪柳. 复杂基坑施工对相邻地铁车站沉降的影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34 (2): 93 ~ 97.
- WU Xinliu. Analysis of influence of complex foundation pit construction on the settlement of adjacent metro station [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34 (2): 93 ~ 97. (in Chinese with English abstract)