

下穿桥梁紧邻高铁地铁联络线基坑群施工力学特性数值模拟

芮勇勤,安月,王振华,于晓莎

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要 目的 以大连地铁5号线后关村车辆段出入段线为工程实例,研究地铁站基坑群施工对邻近桥梁、高铁路基稳定性影响。**方法** 应用岩土有限元计算软件进行数值模拟,结合工程实际资料设定模型平面尺寸;基于摩尔-库伦的本构模型,采用复合单元建立有限元模型,分析地铁站联络线基坑群施工对周围土体、邻近桥梁、高铁路基的变形影响。**结果** 联络线基坑群施工完成时基坑边坡墙横向位移最大值为31.55 mm,桥桩的横向位移最大值为11.37 mm,竖向沉降最大值为11.24 mm,高铁路基竖向沉降最大值为11.20 mm。**结论** 联络线基坑群施工使匝道桥桥桩的横、竖向位移均达到预警值10 mm,在地铁站联络线基坑施工前应对匝道桥桥桩做好加固防护措施;高铁路基满足变形控制标准,需加强安全监测;第4步开挖施工时基坑边坡墙、桥桩、高铁路基的增量位移均达到最大,应加强该施工阶段安全监测。

关键词 地铁工程;联络线;基坑群;通道施工;稳定性;数值模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Numerical Simulation of the Construction Mechanics Characteristics of the Foundation Pit Group on Metro Connection Line with Undercrossing Bridge Adjacent to High-Speed Railway

RUI Yongqin, AN Yue, WANG Zhenhua, YU Xiaosha

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819)

Abstract: Taking the entry and exit section of the Houguancun rolling stock section of Dalian Metro Line 5 as an example, this paper investigated the influence of foundation pit construction on the stability of adjacent bridges and high-speed railway foundations by using the geotechnical finite element software for numerical simulation. The plane size of the model was set according to the actual engineering data. Based on the Moors-Coulomb constitutive model, a composite element finite element

收稿日期:2020-12-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1503101)

作者简介:芮勇勤(1962—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事道路与铁道工程、防灾减灾与防护工程方面研究。

model was established to analyze the influence of the construction of the subway station connecting line foundation pit on the surrounding soil, adjacent bridges and high-speed rail foundations. When completed the construction of the connecting line foundation pit group, the maximum lateral displacement of the sidewall of the foundation pit is 31.55 mm, the maximum lateral displacement of the bridge pile is 11.37 mm, the maximum vertical settlement is 11.24 mm, and the maximum vertical settlement of the high-speed rail foundation is 11.20 mm. The horizontal and vertical displacements of the bridge piles of the ramp bridge reach the warning value of 10 mm during the foundation pit group construction of the connection line. The ramp bridge piles should be reinforced and protected before the construction of the foundation pit of the connecting line of the subway station to meet the deformation control standards of high railway foundation, and safety monitoring needs to be strengthened. In the fourth step, the incremental displacement of the side wall of the foundation pit, the bridge pile and the high railway foundation all reached the maximum, so should strengthen the safety monitoring in this construction stage.

Key words: metro engineering; connection line; foundation pit group; tunnel construction; stability; numerical simulation

随着城市建设的飞速发展,城市土地资源紧张、建筑空间拥挤和交通问题日益突出,发展地铁工程是城市集约发展的必然趋势^[1-3]。由于地质条件复杂,若设计与施工方案不合理,极易导致地铁站基坑变形、围护结构渗漏、周边环境破坏等风险。一旦发生事故,可能造成严重的人身财产损失,地铁工程建设安全应引起极大重视^[4-6]。

研究地铁基坑开挖稳定性的方法主要有经验类比法、模型试验法、数值模拟法、整体分析法四种^[7]。引发事故的原因非常复杂,应用最为广泛的是数值模拟法。采用数值模拟能够预测施工过程引起的邻近建/构筑物的变形^[8-10]。李大鹏等^[11]归纳总结国内外关于深基坑开挖引发周围环境的平面变形情况并做了综述研究。王恒等^[12]采用数值模拟法分析基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响,研究得到采用二维简化等效研究大间距的桩基是合理的。雷华阳等^[13]采用数值模拟法研究不同间距条件下基坑开挖对自身围护结构及邻近桥桩的影响规律,根据规律对方案进行优化。刘静等^[14]采用理论分析及有限差分数值模拟法模拟浅埋暗挖不同工况对地表和邻近桩基沉降的影响,确定了有效降低

地表沉降和桩基变形的施工工法。影响基坑施工稳定的因素过多,基坑施工时很难对基坑自身变形及基坑对周围环境的影响进行系统研究^[15-16]。

目前,国内外专家学者对基坑施工力学特性的分析研究主要集中在单个基坑,而对周边环境复杂的基坑群施工力学特性分析较少。基于此,笔者在模拟分析前,先根据风险分级标准识别与评价工程风险,再具体分析风险级别较高的风险源;对基坑群及下穿桥梁、紧邻高铁路基进行数值模拟;首先对基坑群施工过程中自身的稳定性进行研究,在确定地铁站稳定情况下,对邻近桥梁、高铁路基的影响进行研究;通过数值模拟结果分析不仅能明确基坑群施工过程中存在的高风险,且验证了风险等级划分标准的合理性。

1 工程背景

1.1 联络线走向

后关村车辆段出入段线以填挖相间通过,场地属低丘陵地貌,地势起伏大,整体北高南低,地势最大高差为 27.4 m。出入段线明挖段基坑位于规划绿地下方,哈大高铁、沈大高速路西侧,地铁站联络线布置情况见图 1。

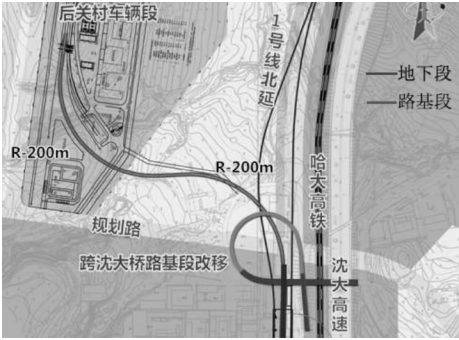


图1 地铁站联络线布置

Fig. 1 Layout of tie-line in metro station

1.2 工程水文地质条件

该工程地质主要包括素填土、强风化石灰岩(W3)、中风化石灰岩(W2)等,工程地质断面情况见图2。场地地形地貌、岩性较复杂,围岩性质较好,未见地下水位。

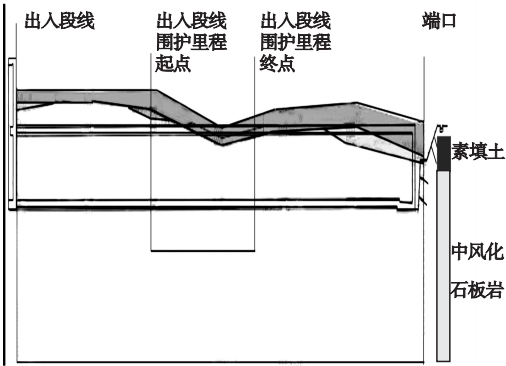


图2 工程地质断面图

Fig. 2 Vertical plan of the engineering geology

1.3 联络线基坑施工方法

联络线标准段明挖基坑采用放坡+岩层喷锚方式施工。上部采用放坡,喷射100 mm 混凝土,内配Φ6.5@150 钢筋网,Φ16、土钉长度 $L=6\text{ m}$ 、 2.0×2.0 土钉梅花形布置。下部采用Φ25、 $L=3\text{ m}$ 、 $2.0\text{ m}\times2.0\text{ m}$ 砂浆锚杆梅花形布置。基坑深7.8~11.0 m。下穿桥桩段采用单排Φ219@750 钢管桩,架设2~3 道锚杆,锚杆水平间距1.5 m。左线及出入线基坑岩面高,右线存在较厚黏土层,右线基坑在冠梁处架设一道Φ609,钢管壁厚度 $t=14\text{ mm}$ 钢管内支撑,水平间距4 m。

1.4 周围环境风险

经风险辨识,总结联络线基坑群的主要环境风险有下穿桥桩、测穿哈大高铁路基,其断面布置见图3。开挖基坑不当易造成桥桩不均匀沉降、桥身与桥梁结构开裂。

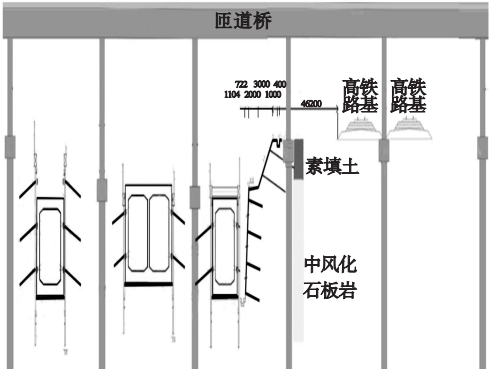


图3 断面布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of section layout

2 联络线基坑群环境风险分析

综合环境设施的重要性分类及周围环境设施邻近程度,建立地铁站施工环境影响的风险分级标准^[17-18]。既有城市轨道交通线路和铁路属重要设施、匝道桥属一般设施。其中区域范围 $<0.7H$ (H 为新建基坑深度) 属非常接近,区域范围在 $0.7H\sim1.0H$ 属接近,区域范围在 $1.0H\sim2.0H$ 属较接近,区域 $>0.2H$ 属不接近。具体风险等级划分标准见表1。

表1 施工环境影响的风险分级标准

Table 1 Risk classification standard of construction environment

风险等级	环境设施分类	相邻位置关系
I	邻近重要设施	非常接近
	一般设施	接近
II	邻近重要设施	非常接近
	一般设施	较接近
III	邻近重要设施	接近
	一般设施	不接近
IV	邻近重要设施	较接近
	一般设施	较接近

在风险辨识的基础上,依据施工环境影

响的风险分级标准对地铁站基坑群施工致险因素进行评级。其中匝道桥是邻近重要设施,并且基坑测穿匝道桥桥桩,结构距桥桩最小距离约2.88 m,区域范围在“非常接近”,

表2 联络线工程风险分级

Table 2 Risk classification of tie line engineering

风险类型	风险名称	风险情况描述	风险事件	风险等级
环境风险	下穿匝道桥	下穿匝道桥,结构距桥桩最短约2.88m	桥桩不均匀沉降,桥身结构开裂	Ⅱ
	哈大高铁路基	明挖基坑边缘距高铁路基最小距离约46.2m	爆破作业可能使线路、机车受损	Ⅲ

对邻近基坑联络通道的施工与既有桥梁、高铁路基结构之间的相互影响研究主要从两个方面考虑:①联络线基坑群施工对邻近既有桥桩结构、高铁路基的影响;②邻近桥桩、高铁路基结构的施工力学特性。

3 有限元建模及施工过程

通过采用有限元软件建立有限元模型,

表3 物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters

土层	重力密度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/(m·d ⁻¹)
杂填土	19.7	8	15.0	4.9	0.36	3.4
强风化石灰岩	24.6	30	39.5	17.0	0.26	3.1
中风化石灰岩	27.4	35	39.3	28.5	0.29	2.7
桥桩	24.0	5.0	30.0	25 000	0.20	—
板	22.0	0.65	30.0	24 000	0.20	—
锚杆	20.0	3 140	25.0	29 300	0.20	—
土钉	18.0	500	25.0	20 000	0.20	—

3.1 有限元模型建立

模拟界面长142.0 m,深43.5 m,基于摩尔-库伦本构模型,采用岩土材料+桩+锚杆+土钉+板+界面单元组成数值模拟有限元模型。采用板+界面单元模拟地下连续墙主体结构、侧壁,采用锚杆单元模拟钢管内支撑,其有限元模型网格剖分图见图4所示。

模型四周施加沿法线方向的约束,底面固定,划分有限单元为13 136,进行地下水渗流与力学、交通荷载耦合分析。考虑桥面车辆荷载为10 kN/m²,高铁车辆作用在道床上荷载为50 kN/m²。考虑桥梁梁板简支梁,桩

属于Ⅱ级风险源。哈大高铁路基为邻近重要设施,基坑边缘距高铁路基最小距离约46.2 m,区域范围在“较接近”,属于Ⅲ级风险。具体致险因素及其危险等级见表2。

对地铁站联络线稳定性进行数值模拟分析。在本次模拟中假设主要岩土层均为均质、各向同性的材料,考虑基坑施工降水引起的渗流影响,考虑基坑开挖与围护结构、桥梁桩基、高铁路基以及车辆荷载影响。参考相关研究文献,结合该工程所在地地质条件,模拟过程中选取的物理力学参数见表3^[19]。

径1.5 m、长15 m。坐落于桩墩盖梁上,路面为沥青路面+桥面混凝土铺装层。

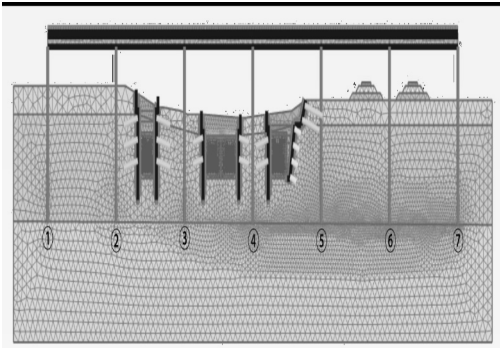


图4 有限元模型网格剖分图

Fig. 4 The meshing diagram of finite element model

3.2 施工过程的模型模拟

根据地铁站联络线基坑施工的顺序,对地铁站联络线基坑群的施工过程进行模拟,共设置八种施工工况,施工过程模拟见图5所示。

工况1:匝道桥桥梁+墩柱桩基、双线沈大高铁路基的原始地貌,模型见图5(a)。

工况2:基坑开挖边壁墙,施工冠梁,模型见图5(b)。

工况3:基坑边壁挡土墙施工,墙体采用钻孔灌注桩,模型见图5(c)。

工况4:左线基坑施作第一排锚杆;右线箱通,一级放坡施作两排锚杆,施作与冠梁铰

接横撑,模型见图5(d)。

工况5:左线基坑施作第二排锚杆开挖;中部基坑施作第一排锚杆开挖;右线二级放坡施作第一排土钉,模型见图5(e)。

工况6:基坑分别开挖至底部。左线基坑施作第三排锚杆;中部基坑施作二排锚杆;右线基坑施作二、三排土钉,模型见图5(f)。

工况7:基坑底部碎石垫层、素混凝土找平,待混凝土强度达到70%以上时,进行钢筋混凝土结构箱通施工,模型见图5(g)。

工况8:首先进行箱通防渗,部分回填砂土至箱通顶板,其次进行横撑拆除,最后回填砂土至原始地貌,模型见图5(h)。

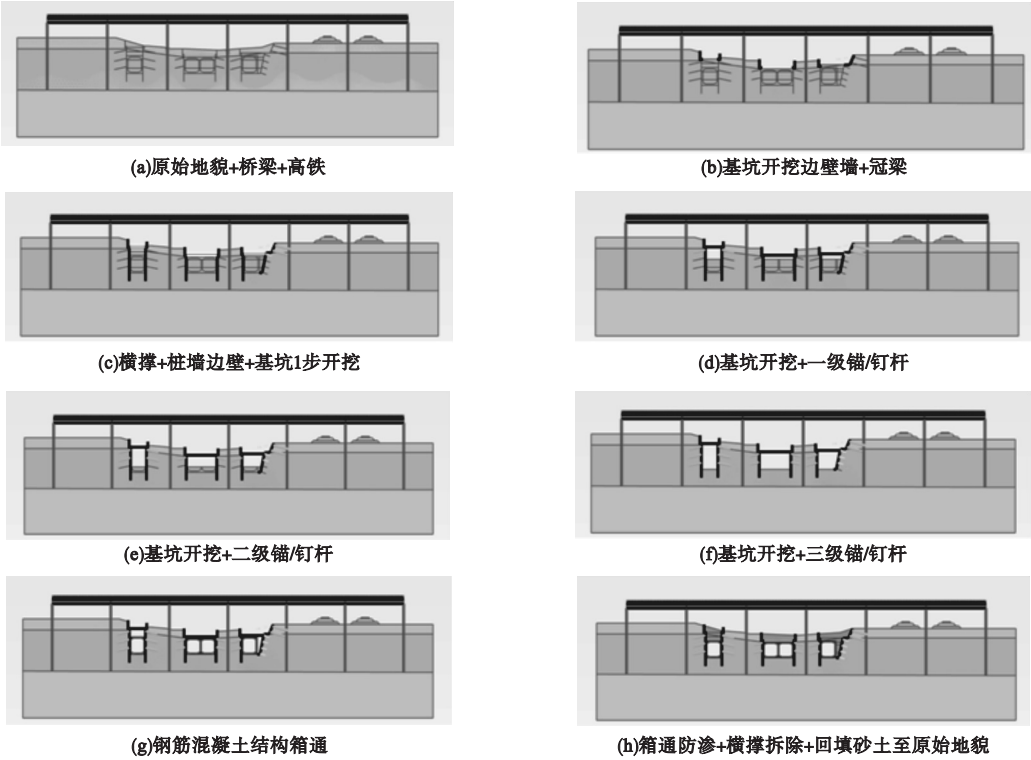


图5 施工过程模拟

Fig. 5 Construction process simulation

4 联络通道工程力学特性

将联络线车站土体回填完成后,联络线基坑开挖之前的位移清零,主要分析联络线工程的力学特性,并研究地铁站联络线对邻

近桥梁、高铁路基工程的稳定性影响。

4.1 地下水渗流

地下水水头等值线分布云图、地下水渗流矢量图如图6所示。

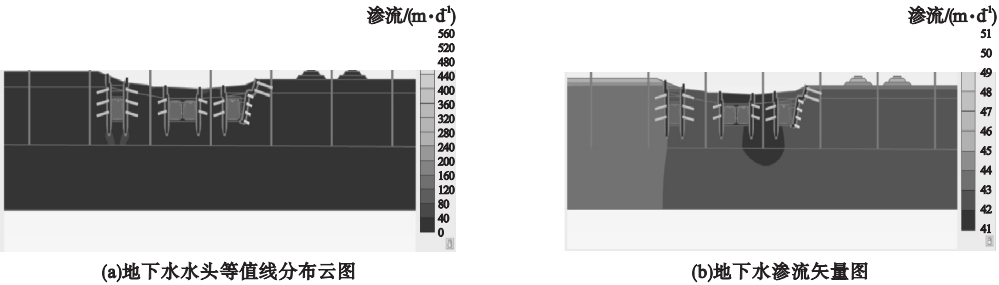


图6 地下水水头和渗流云图

Fig. 6 Groundwater head and seepage cloud diagram

由图6可知,横撑拆卸、砂土回填后的地下水水头最大值为53.5 m,渗流最大值为0.741 1 m/d,地下水对基坑开挖影响较小。

4.2 基坑位移变形

左线、中部、右线基坑边壁墙在不同施工工况下的增量位移变化情况见图7。

根据数值模拟结果,统计基坑边壁墙在各个施工阶段的位移增量最大值见表4。

表4 边壁墙位移增量

Table 4 The incremental displacement of the wall

工况	增量位移/mm		
	左线	中间	右线
2	5.852	3.794	1.401
3	3.486	3.812	2.206
4	3.33	0.635 6	1.465
5	8.81	3.055	8.627
6	11.28	6.647	9.442
7	3.512	3.82	3.936
8	0.189 6	0.078 95	0.185 1

由表4可知,第4步开挖基坑,左线基坑边壁墙位移增量值最大,达11.28 mm。施工结束边壁墙横向位移最大值为31.55 mm,小于变形限值40 mm,基坑自身变形相对稳定。

分析砂土回填至原始地面施工阶段位移变形特征,变形总位移云图如图8所示。

由图8可知,基坑周围土体向中部方向挤压并呈下沉趋势,导致基坑周围地表沉降及底部土体隆起。这是由于基坑开挖过程中产生临空面,应力得到释放,支护结构的周围发生卸荷作用^[20]。基坑边壁墙向坑内发生侧向位移。这是由于墙外侧土体的静止土压力逐渐转化成主动土压力,使支护结构向基坑内侧发生水平位移。

4.3 有效应力相对剪应力

剪切应力主要集中在桥梁中部、邻近基坑桥桩的桩顶和桩身、高铁路基。基坑第3、4步开挖,其相对剪应力云图见图9。

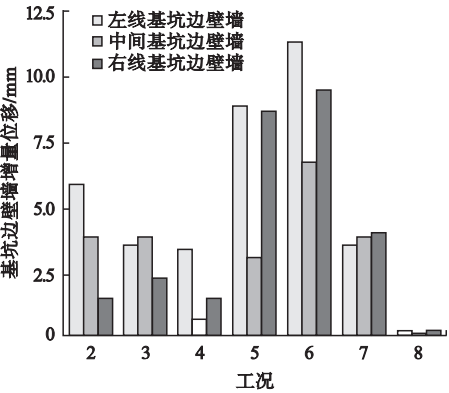


Fig. 7 Incremental displacement of the side wall

由图7可知,基坑群施工过程中左线基坑边壁墙整体位移增量值大于中部基坑和右线基坑。这是由于基坑开挖深度越大,自身结构变形及对周围土体产生的变形影响越大。基坑第2步开挖时,基坑边壁墙的增量位移减小,这是由于施作锚钉杆对基坑起到一定的加固作用。基坑第3、4步开挖基坑边壁墙的增量位移明显加大,这两阶段的变化是由于基坑的进一步开挖导致变形突然加大,应注意加固支护方案的设计合理性,加强安全监测。钢筋混凝土结构箱通和砂土回填阶段增量位移减小,说明基坑群施工对周围土体变形影响逐渐达到安全的稳定状态。

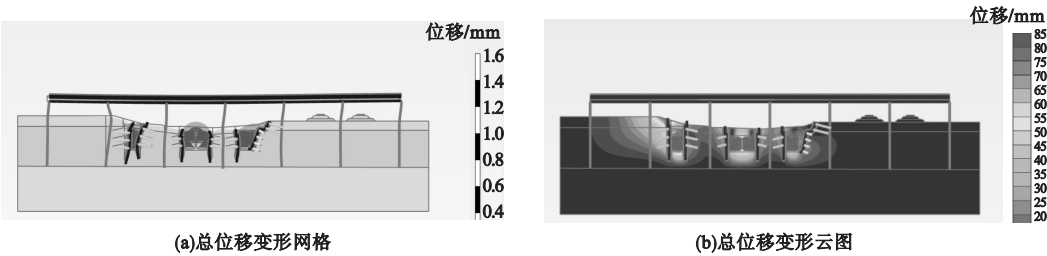


图8 总位移分布云图

Fig. 8 Contour distribution cloud map of total displacement

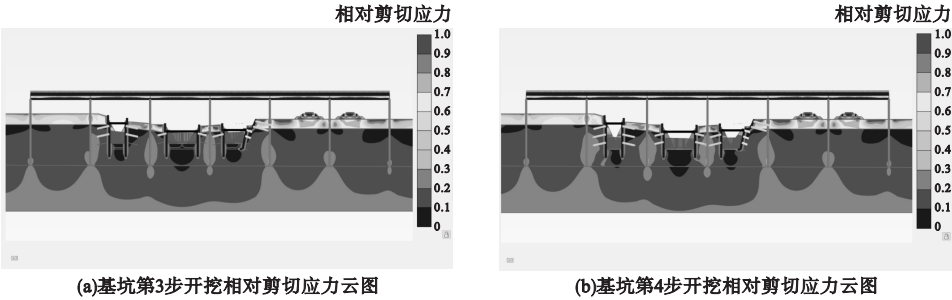


图9 相对剪切应力等值线分布云图

Fig. 9 The cloud map of relative shear stress contour distribution

由图9可知,当基坑第3步开挖完成后进行基坑第4步开挖,相对剪切应力最小值由 0.7521×10^{-3} 变为 1.851×10^{-3} ,因此施工中要加强这一阶段基坑边壁、桥梁桩、高铁路基等结构安全监测。

4.4 匝道桥受力变形

车站侧方桩距结构轴线的水平距离不超过 $B+4.0H$,应考虑土体水平变形引起的附加内力和变形^[2]。各施工阶段桥桩横向增量位移、纵向增量位移变形最大值见表5。

表5 桥桩增量位移最大值

工况	增量位移/mm	
	横向	纵向
1	0.540	0.480
2	0.540	0.380
3	0.600	1.240
4	0.570	0.150
5	5.760	1.030
6	7.220	2.480
7	1.350	1.470
8	0.071	0.540

由表5可知,桥桩横向增量位移最大值为7.22 mm,纵向增量位移最大值为2.48 mm。根据模型,将匝道桥桥桩从左到右排序,序号参见图4。分析7根桥桩在不同工况下最大横向、纵向增量位移值变化。根据匝道桥桥桩变化趋势分析其受力变形特征。

模拟7个桥桩在不同工况下纵向增量位移情况见图10。由图10可知,基坑群开挖支护过程中,桥桩变形呈“M”趋势。随着基坑开挖深度增加,桥桩的横、竖向增量位移逐渐增大。这是由于开挖前期土体卸荷量较小,随着基坑开挖深度的加大,土体卸荷量增加,桥桩位移变形随之加大。基坑第2步开挖时,桥桩的横、纵向位移值均减小。但随着基坑开挖深度的增加,基坑第4步开挖时桥桩的横向、纵向位移值在所有施工段中达最大。钢筋混凝土结构箱通施工时,基坑变形达稳定状态,增量位移逐渐减小。

据《城市轨道交通工程监测技术规范》和《建筑桩基技术规范》规定,结合已有类似

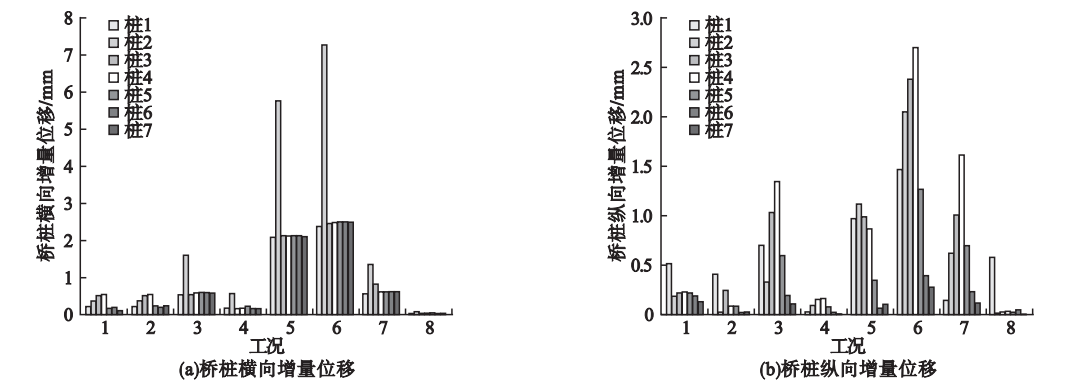


图 10 桥桩横、纵向增量位移变化图

Fig. 10 The incremental displacement of bridge piles in transverse and longitudinal directions

工程,参考研究文献确定的桥桩变形各项目预警值见表 6。

表 6 桥桩变形监测项目及其预警值

Table 6 Deformation detection of bridge piles and warning values		
监测项目	变形预警值/mm	变形警戒值/mm
桩身横向位移	10	15
桩身竖向沉降	10	15

在所有桩中,桥桩 2 的横向增量位移明显大于其他桥桩,桥桩 2、3、4 纵向增量位移明显大于其他桥桩,说明基坑群的开挖使周围土体向坑内挤压,具体分析最后一个计算工况的桥桩受力变形情况。砂土回填施工完成时桥桩变形特征见图 11。

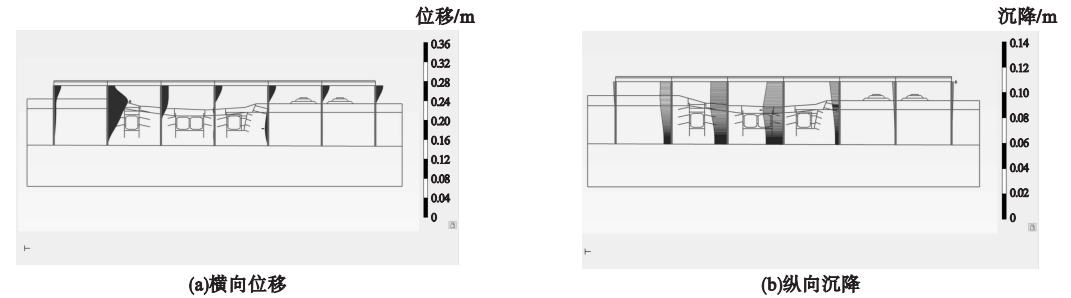


图 11 桥桩横向/纵向变形

Fig. 11 The lateral/longitudinal deformation of bridge pile

联络线基坑开挖面以上的土体为杂填土和黏土。基坑开挖过程中,坑内土体卸荷,桥桩变形呈“鱼腹”状。由图 11 可知,左线基坑放坡坡度较小,基坑深度最大,其左侧邻近桥桩的横向位移变形最大,最大值为 11.37 mm,纵向最大沉降值为 11.24 mm。并且邻近基坑的桥桩出现竖向沉降,竖向沉降由基坑群中部向外逐渐减小。

桥桩的轴力、弯矩情况见图 12。由图 12 可知,匝道桥桥桩所受基坑开挖影响的范围主要集中于桩身;离基坑群较近的桥桩的

所受压力明显大于离基坑群较远的桥桩,这是由于土体开挖,使桥桩身受到的负摩阻力加大,导致桩的沉降加大、承载力降低。弯矩最大值为 17 kN·m,弯矩较大部位集中在:①桩顶,这是由桩顶固定约束的变性协调作用效应造成。②开挖面处,这是由于土体卸荷变形造成的。③杂填土与风化石灰岩的分界面处,这是由于土层交界面处模量发生突变。基坑施工须重点监测弯矩最大值集中处,并采取相应的预防措施^[12]。

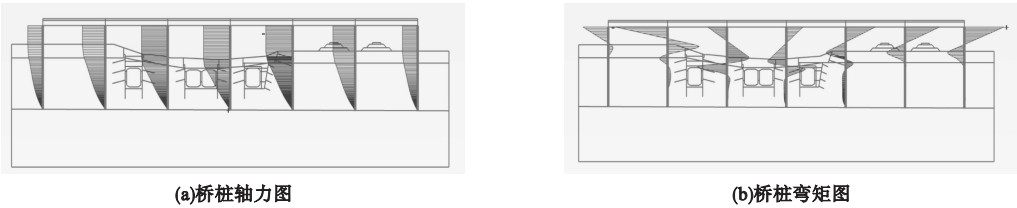


图 12 桥桩轴力和弯矩图

Fig. 12 The axial force and bending moment of bridge pile

桥桩所受的轴力与弯矩分布比较对称,并沿着桩身逐渐向两端减小。说明基坑群开挖对土体以及结构的影响是可以预测的。

4.5 高铁路基受力变形

通过分析不同工况下高铁路基的增量位移分析高铁路基受力变形情况,其增量位移变形图见图 13。

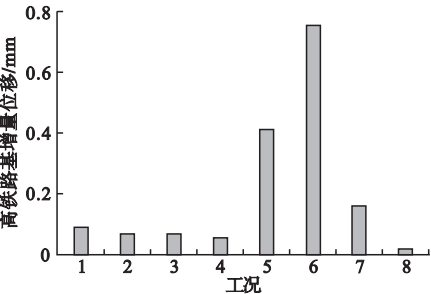


图 13 高铁路基增量位移变化

Fig. 13 Incremental displacement of high railway foundation

由图 13 可知,高铁路基增量位移在基坑第 4 步开挖时达到最大值 0.754 mm,施工结束时竖向沉降最大值为 3.2 mm。根据我国《铁路线路维修规则》和《城际铁路设计规范》规定,符合设计要求。路基变形限值情况如表 7 所示。

表 7 路基变形限值

Table 7 Deformation limits of the foundation mm

路基沉降	轨道高低差	轨道水平差
10	4	4

5 结 论

(1)基坑开挖过程中,其左线基坑为最深基坑,并且放坡坡度最小,变形最大。应注意加强安全监测和支护加固。

(2)基坑开挖过程中基坑边壁墙横向位移最大值为 31.55 mm,横向增量位移最大值出现在基坑第 4 步开挖,为 11.28 mm。开挖后,应力得到释放,沿支护结构水平方向产生卸荷作用,但基坑自身变形相对稳定。

(3)联络线工程施工过程中,桥桩增量位移横向最大值为 7.22 mm,纵向最大值为 2.48 mm。施工结束时桥桩的横向位移最大值为 11.37 mm,竖向沉降最大值为 11.24 mm,均已经达到预警值 10 mm。高铁路基竖向沉降最大值为 3.2 mm,满足设计及规范的要求。因此,在地铁站联络线基坑施工前应对匝道桥桥桩做好加固防护措施。

(4)该联络线基坑群开挖施工模拟结果符合工程实际,能够为类似工程提供参考价值。

参考文献

[1] 温淑荔.深基坑开挖对紧邻建筑物影响分析及加固措施优化研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):98-103.
(WEN Shuli. Analysis of the impact of deep foundation pit excavation on adjacent buildings and optimization of reinforcement measures [J]. Modern tunnel technology, 2020, 57(4): 98-103.)

[2] 曹浪,高骏,孟小伟,等.复杂环境下超深基坑变形控制技术研究[J].建筑结构,2020,50(增刊1):1007-1013.
(CAO Lang,GAO Jun,MENG Xiaowei,et al. Research on deformation control technology of ultra-deep foundation pit under complex environment [J]. Building structure, 2020, 50(S1):1007-1013.)

[3] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016,49(6):1-24.
(ZHENG Gang,ZHU Hehua,LIU Xinrong,et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment [J]. China civil engineering journal,2016,49(6):1-24.)

[4] 刘念武,陈奕天,龚晓南,等.软土深开挖致地

- 铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515 - 1525.
(LIU Nianwu, CHEN Yitian, GONG Xiaonan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil [J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(4): 1515 - 1525.)
- [5] 杜彬. 地铁车站浅埋暗挖法施工对邻近桩基的影响及控制措施[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
(DU Bin. Regulations and control measures of pile foundation near subway station by excavation for shallow tunnels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.)
- [6] 程鸿群, 余佳雪, 袁宁, 等. 深基坑工程施工过程风险综合评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 491 - 498.
(CHENG Hongqun, SHE Jiaxue, YUAN Ning, et al. Synthetic evaluation on risk of deep excavation engineering construction process [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2016, 44(3): 491 - 498.)
- [7] 张铁成. 地铁车站施工对紧邻重要建筑物影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
(ZHANG Tiecheng. Research on the impact of subway station construction on adjacent important buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [8] 郭健, 钱劲斗, 陈健, 等. 地铁车站深基坑施工风险识别与评价[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(5): 32 - 38.
(GUO Jian, QIAN Jindou, CHEN Jian, et al. Risk identification and evaluation for foundation pit construction of subway station [J]. Journal of civil engineering and management, 2017, 34(5): 32 - 38.)
- [9] ZHAO Jinxian, MENG Wei, SUN Fei. Construction risk assessment of metro elevated station based on C-OWA operator and improved extenics [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2020, 525(1): 012012.
- [10] 郭海峰, 姚爱军, 张剑涛, 等. 建筑施工荷载引起邻近地铁隧道变形机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊1): 341 - 353.
(GUO Haifeng, YAO Aijun, ZHANG Jiantao, et al. Study on the influence of construction loading on the deformation of adjacent subway tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(S1): 341 - 353.)
- [11] 李大鹏, 阎长虹, 张帅. 深基坑开挖对周围环境的影响研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(8): 659 - 668.
(LI Dapeng, YAN Changhong, ZHANG Shuai. Advances in researching influences of deep excavation on surrounding environment [J]. Journal of Wuhan university (engineering science edition), 2018, 51(8): 659 - 668.)
- [12] 王恒, 陈福全, 林海. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1257 - 1265.
(WANG Heng, CHEN Fuquan, LIN Hai. Behaviors and strengthening of bridge piles subjected to excavation-induced soil movement [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(5): 1257 - 1265.)
- [13] 雷华阳, 彭志文, 冯双喜, 等. 水上基坑开挖对自身围护结构及临近桥桩的影响规律与改进措施研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊1): 148 - 155.
(LEI Huayang, PENG Zhiwen, FENG Shuangxi, et al. Study on the influence law and improvement measures of water foundation pit excavation on its enclosure structure and adjacent bridge piles [J]. China civil engineering journal, 2019, 52(S1): 148 - 155.)
- [14] 刘静, 田晓艳. 地铁浅埋暗挖施工对地表沉降及邻近桥基的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 60 - 63.
(LIU Jing, TIAN Xiaoyan. Effects of shallow metro tunnel excavation on surface sedimentation and adjacent bridge foundation [J]. Journal of He'nan university of science and technology (natural science edition), 2017, 38(3): 60 - 63.)
- [15] 尚艳亮, 师文君, 杜守继, 等. 盾构近距离下穿桥梁数值分析与监测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 247 - 256.
(SHANG Yanliang, SHI Wenjun, DU Shouji, et al. Numerical analysis and monitoring research on shield passing through bridge at close range [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(2): 247 - 256.)
- [16] SHI Xin, RONG Chuanxin, CHENG Hua. Analysis on deformation and stress characteristics of a multibridged pit-in-pit excavation in a subway transfer station [J]. Advances in civil engineering, 2020(10): 1 - 19.
- [17] LI H, LIU S, TONG L. Evaluation of lateral response of single piles to adjacent excavation using data from cone penetration tests [J]. Canadian geotechnical journal, 2019, 56(2): 236 - 248.
- [18] 杨涛, 童立元, 李丹. 基坑开挖卸荷引起的公路桥梁桩基变形受力响应[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 214 - 222.
(YANG Tao, TONG Liyuan, LI Dan. Stress response of pile foundation deformation of highway bridge caused by unloading of pit excavation [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2020, 37(5): 214 - 222.)
- [19] 章润红, 刘汉龙, 仇文岗. 深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 857 - 866.
(ZHANG Runhong, LIU Hanlong, ZHANG Wengang. Numerical investigation on tunnel responses induced by adjacent deep braced pit excavations [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2018, 38(5): 857 - 866.)
- [20] ZHOU Y, LI S, ZHOU C, et al. Intelligent approach based on random forest for safety risk prediction of deep foundation pit in subway stations [J]. Journal of computing in civil engineering, 2019, 33(1): 5 - 18.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)