

地铁站间临近联络线基坑施工过程变形力学特性数值模拟

芮勇勤,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 研究既有地铁站造成的土体应力重分布对临近联络线基坑开挖及回填稳定性的影响,并确定基坑及联络线楼板薄弱区域。**方法** 应用 Midas GTS^{3D}有限元计算软件建立从地铁站开挖及围护结构施工到联络线回填完成全过程数值模型,并与工程实测值进行对比,分析地铁站存在对联络线基坑施工过程中土体及楼板力学性能及稳定性的影响。**结果** 地铁联络线施工过程中,基坑周围土体位移从上到下依次减小,垂直及侧向位移均在联络线连续墙附近达到最大值,分别为 25.7 mm 及 7.0 mm;楼板应力及挠度在联络墙及车站连接处达到最大值,分别为 1.4 MPa 和 7.5 mm。**结论** 联络线基坑回填完成时,其背向车站连续墙处地表沉降接近规范限值,应作为基坑监测着重关注点;楼板应力及挠度远小于限值,地铁站的存在对联络线工程起有利作用,在一定程度上可提高施工过程中的稳定性。

关键词 地铁车站;基坑开挖;联络线施工;基坑监测;数值模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Numerical Simulation of Deformation Mechanical Characteristics of Foundation Pit near Connecting Line between Subway Stations during Construction

RUI Yongqin, YU Xiaosha

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

Abstract: To study the influence of the redistribution of soil stress caused by the existing subway station on the stability of the excavation and backfilling of the adjacent connection line, and determine the weak area of the foundation pit and the connection line floor, the Midas GTS^{3D} finite element calculation software was used to establish a numerical model for the entire process from subway station excavation and construction of the enclosure structure to completion of the backfill of the connecting line, with which the measured value of the project is compared with to analyze

收稿日期:2021-06-02

基金项目:国家重点研究发展计划(973)项目(2017YFC1503101,2016YFC0801602)

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

the influence of the presence of the subway station on the mechanical properties and stability of soil and floor slab during the construction of the connecting line foundation pit. During the construction of the subway connecting line, soil around the foundation pit displacement decreases sequentially from top to bottom. The vertical and lateral displacements both reach the maximum near the continuous wall of the connecting line, which are 25.7 mm and 7.0 mm respectively. The stress and deflection of the floor slab reach the maximum at the connection between the connecting wall and the station, respectively 1.4 MPa and 7.5 mm. When the backfilling of the foundation pit of the tie line is completed, the surface settlement at the back of the diaphragm wall of the station is close to the specification limit. Analyzing the existence of subway stations has a beneficial effect on the construction of the connecting line, and it can improve the stability during the construction process to a certain degree.

Key words: metro station; foundation pit excavation; tie line construction; foundation pit monitoring; numerical simulation

伴随着我国城市化进程的日益加快,地下空间的拥挤造成新建多层地下结构的安全性隐患越来越严重,可能造成基坑踢脚隆起、围护变形、整体失稳等问题,最终导致基坑塌陷、地表建筑物坍塌等事故^[1-2],因此对邻近既有地下建筑的基坑工程稳定性研究已经迫在眉睫^[3-5]。

地铁作为最常见地下建筑物,其基坑稳定性正成为的一个重要研究课题^[6],国内外学者对此进行了广泛研究:Y. S. SHEN 等^[7]通过分析地铁车站施工因素,提出可以利用基坑综合评价体系来进行地铁站基坑施工安全指标性分析;L. Li 等^[8]考虑地铁站附属结构基坑开挖的施工风险,提出一种消除风险的控制方法并进行验证;王立忠等^[9]对地铁深基坑倒塌机制进行了研究,证明采用MMSD上限分析法对于基坑安全分析是真实有效的;王志杰等^[10]、马乾瑛等^[11]分析了基坑施工对邻近既有地铁站的影响,研究成果可应用于地下拥挤区域基坑开挖问题的处理。

地铁联络线是将枢纽内的两车站间相互衔接的线路,一般在车站基坑回填完成后开挖建设^[12-13],是地铁工程的重要组成部分。王彦洋等^[14]通过考虑温度梯度对使用冻结法施工的联络线工程进行研究,确定了相应的力学性能规律;何家成等^[15]针对联络线开

挖顺序所造成的影响进行研究,得到了其最佳开挖工序。

综上所述,国内外对于地铁基坑稳定性研究主要集中在风险评估、温度效应等方面,大部分以地铁站基坑为研究对象,少数存在关于地铁联络线的研究也是以温度场及施工技术为主,而鲜有以联络线为研究主体对其力学性能展开分析。基于此,笔者通过模拟车站临近地铁联络线施工的全过程,定量地给出新建联络线工程各个安全性参数,确定基坑最危险区域;笔者所得研究成果可为地铁站附近配套工程的后续开发提供指导性建议。

1 工程背景及施工组织设计

1.1 工程概况

某地铁站实际工程计划在东北角设联络线将一、二号线连接,联络线长 171.209 m,基坑工程长约 171.2 m,宽约 6.9 m,深约 24~30 m,联络线选择明挖顺作法进行施工,选用多层矩形框架式车站主体,支撑体系为 4 道外径 600 mm、壁厚 14 mm 的钢管和 1 道截面长×宽为 1 000 mm×1 000 mm 的钢筋混凝土协同构成。为了确定多层车站的存在对临近联络线稳定性的影响,笔者选择既有二号线车站与该联络线工程的东端连接区域(见图 1)作为研究对象进行分析,此区域

地下空间较为拥挤,是本工程中受力最复杂且最易出现安全事故的位置。

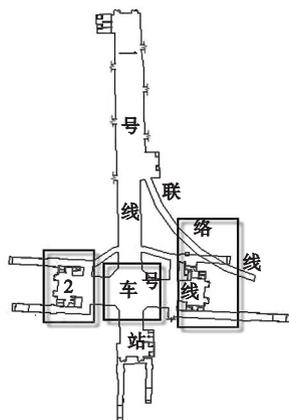


图1 地铁站平面布置与联络线工程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the layout of the subway station and the connecting line project

1.2 工程施工设计

(1) 施工安排

首先进行二号线基坑及主体结构的施工,施工完毕后再进行联络线工程施工。

(2) 围护结构施工

本联络线基坑通过沿基坑轴线设置1 000 mm厚地下连续墙进行围护,竖向依次

设置5道支撑保证基坑稳定,选用刚性连续墙接头使得相邻槽段共同承受上部荷载,采用旋喷桩止水帷幕减少地下水渗入。

(3) 联络线工程施工工艺

第一步:围护结构施工,如图2(a)所示。首先进行管线迁改及工程场平,并进行联络线基坑地下连续墙的设置及施工。

第二步:基坑开挖及支护施工,如图2(b)所示。施工进行至第1道支撑设计标高下0.2 m时,进行第一道钢筋混凝土支撑,之后开挖至第2~5道支撑下0.5 m时,依次架设剩余4道 $\phi 600$ 钢管支撑,最后开挖至离基坑底3 m处时,开始进行基底加固,随即继续开挖直至最终基坑面。

第三步:基坑底板及底部侧墙施工,如图2(c)所示。依次浇注联络线主体的基础底板和下部侧墙,同时拆除第5道支撑。

第四步:上部侧墙及顶板施工,如图2(d)所示。

第五步:基坑回填及道路恢复,如图2(e)所示。逐步进行基坑的回填,并依次拆除4道支撑,进行道路铺设后恢复路面交通。

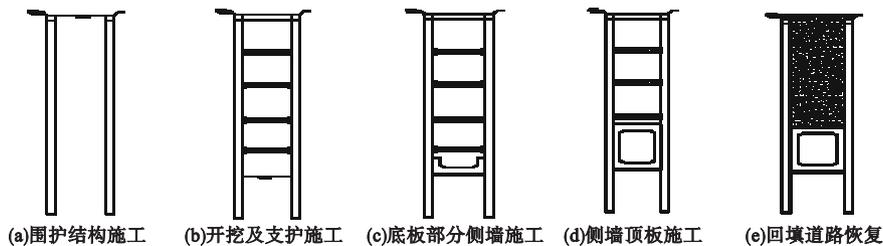


图2 联络线工程施工工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the construction process of the connecting line project

2 有限元建模及施工过程

运用Midas GTS^{3D}软件,建立地铁站及联络线三维模型,对其力学特性进行数值模拟分析。假定模型中为均质材料,不考虑材料各向异性,各土层假定为线性均匀分布^[18-19],考虑基坑降水引起渗流作用影响,不考虑基坑围护施工对土体扰动影响,由勘测得出各土层深度及力学参数如表1所示。

2.1 建立有限元模型

地铁车站联络线工程模型长 \times 宽 \times 高为126 m \times 28 m \times 44 m,选择的本构模型为:线弹性模型(LE)混凝土结构、Mohr-Coulomb(MC)模型中砂和圆砾、节理岩石模型(JR)中风化泥质粉砂岩和微风化灰岩、土体硬化模型(HS)杂填土和粉质黏土,由于本模拟需考虑小应变土体刚度,而HSS模型满足上述条件并继承HS模型的所有特性,故采用精

度更高的HSS模型,具体参数见表2。

表1 各土层深度及力学参数表

Table 1 Table of soil depth and mechanical parameters

岩土层 MC	厚度/m	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	渗透系 数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
杂填土	2	19.4	21	11	4.9	0.36	0.1
粉质黏土	7	19.8	39	16.7	10	0.32	0.1
中砂	3.5	19.2	0	23.3	17.9	0.30	10
圆砾	4	19.6	0	25.2	45	0.29	33
中风化泥粉砂岩	8.5	24.6	138	39.5	170	0.26	0.13
微风化灰岩	19	27.4	176	39.3	243	0.24	0.02
基坑侧墙	—	22.5	300	45	1 000	0.18	—
混凝土结构	—	23	500	50	1 400	0.15	—

表2 HSS模型本构参数表

Table 2 The constitutive parameters of HSS model

土层 HSS	$E_{s_{0.1-0.2}}$ /kPa	$E_{\text{od}}^{\text{ref}}$ /kPa	E_{50}^{ref} /kPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /kPa	m	c' /kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
杂填土	2 000	2 000	3 000	16 000	1	21	11
粉质黏土	6 000	6 000	6 000	30 000	0.75	39	16.7

注: $E_{s_{0.1-0.2}}$ 为固结实验10~20 kPa对应的压缩模量; $E_{\text{od}}^{\text{ref}}$ 为标准固结实验测定的参考应力下的切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水剪切实验测定的参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水加卸载试验测定的加卸载模量; m 为模量应力水平相关幂指数; c' 为土的有效黏聚力; φ' 为土的有效内摩擦角。

有限元模型假设基坑周围土体为变形连续体,基坑周围土体单元设置为实体,联络线、车站框架及连续墙选用板单元进行模拟,利用梁单元模拟结构框架柱及设置在基坑内的5道支撑。经分析,可将此联络线模型周围土体边界条件设置为:顶面自由,底面完全固定,侧面定义为各自方向的法向约束^[9]。

2.2 施工过程模拟

根据二号线地铁站实际施工工序,对地铁联络线的施工过程进行模拟,具体步骤如下。

工况1:进行二号线地铁站深基坑土方开挖及基坑支护等工序的施工。

工况2:开展车站多层框架主体结构施工。

工况3:二号线地铁站深基坑进行分层土方回填。

工况4:进行联络线深基坑开挖、支护结

构及地下连续墙的施工。

工况5:联络线框架主体结构施工。

工况6:联络线基坑土体回填,基坑回填的同时逐次拆除各道支撑。

3 联络线工程力学特性分析

笔者研究既有车站对联络线施工的影响,选择从联络线工程土体开挖支护到回填完成的施工过程(见工况4~6),具体研究分为的渗流特征和力学特性两部分。

3.1 地下水渗流特征

为减少外界水体渗入,本联络线工程降水方案采用旋喷桩止水帷幕,根据勘查测得地下水位埋深为2.90~8.20 m,通过考虑最高地下水位埋深(2.90 m)来分析联络线基坑内侧降深引起的基坑渗流作用,绘制联络线基坑开挖至第1、3、5道支撑时降水示意图如图3所示。

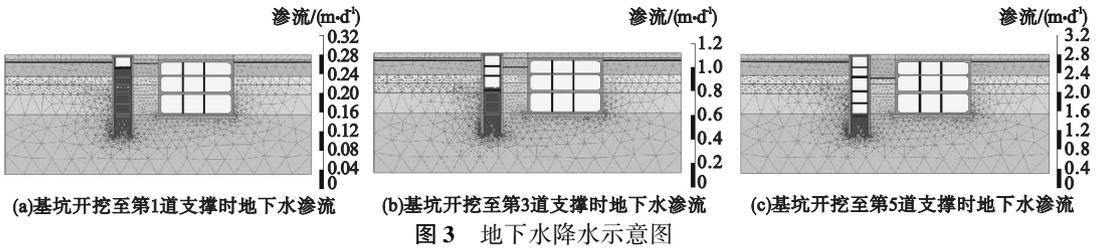


图 3 Schematic diagram of groundwater precipitation

由图 3 可知,基坑开挖至第 5 道支撑时,地下水渗流达到最大值 $0.175 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,渗流效果不明显,不影响工程施工过程中的安全性及稳定性,说明该降水方案合理有效,在具体施工过程中可忽略地下水的渗流作用。

3.2 整体变形分析

联络线基坑土体回填完成时的总位移云图如图 4 所示。由图可知:联络线背向车站方向连续墙附近土体位移变化较为明显,最大值达到 25.7 mm ,接近规范位移限值,说明联络线工程施工对附近土体扰动影响较大,在施工过程中应增加此区域的变形监测频率及基坑监测点位的布设。

于车站和联络线地下连续墙的阻隔作用,导致土体位移无法有效传递,也使得地铁站一侧的土体变形相对较小,而联络线与二号线车站之间土体变形更加不明显,由此说明二号线地铁站的存在对临近联络线工程的施工产生了有利的影响。

3.3 垂直位移分析

分析工况 4~6 完成时的车站周围土体垂直位移特征,如图 5~图 7 所示。由图可知,三种工况施工完成时的地表沉降最大值分别为 23.1 、 22.9 和 25.7 mm ,规范要求联络线基坑最大沉降值为 30 mm ,本工程满足设计要求。

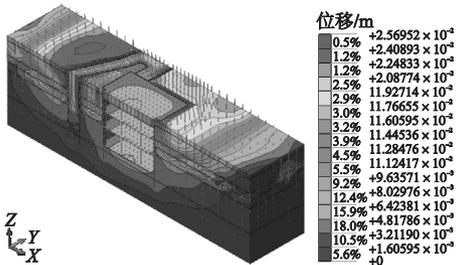


图 4 联络线回填完成时的总位移云图

Fig. 4 Cloud diagram of total displacement when backfilling of the connecting line is completed

分析图 4 中土体位移矢量方向可以得出:车站周围土体由于自重呈现下沉趋势,并往联络线基坑中部方向挤压;围护结构根部也出现不可逆侧移及塑性变形,这是由于基坑开挖过程中产生悬空面,应力得到释放,支护结构的周围产生卸荷作用导致的,以上两点最终导致车站周围地表的沉降以及基坑中部土体的隆起。从竖向角度观察车站周围土体,发现在其地表处总位移最大,且随着标高的降低,基坑周围土体变形逐渐减小,这是由

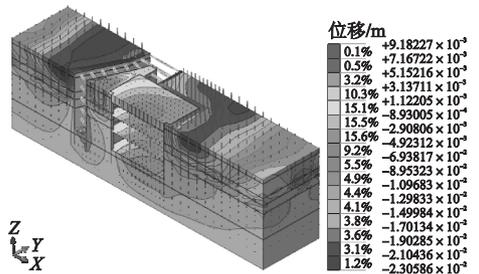


图 5 联络线基坑开挖及围护结构完成时的垂直位移云图

Fig. 5 Cloud diagram of vertical displacement when the connecting line foundation pit excavation and construction of enclosure structure is completed

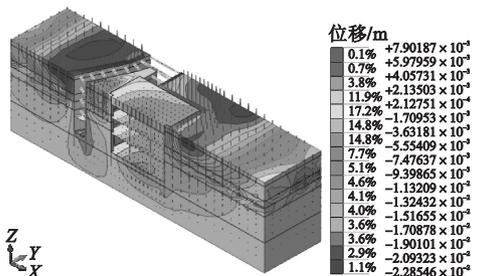


图 6 联络线主体施工完成时的垂直位移云图

Fig. 6 Cloud diagram of vertical displacement when the main construction of the connecting line is completed

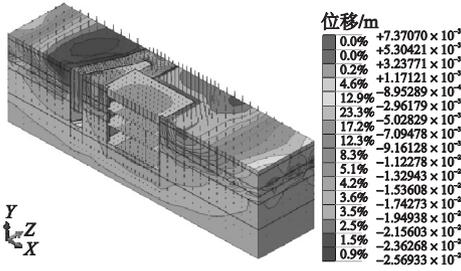


图7 联络线回填完成时的垂直位移云图

Fig. 7 Cloud diagram of vertical displacement when backfilling of the connecting line is completed

工况4完成时在车站及联络线相对背侧位置地表附近土体沉降量较大,需要适当增加监测频率,并要着重对此区域的浅埋地下管线、地上建筑位移及倾斜度进行监测。当联络线主体结构施工完成时,相比上一工况土体垂直位移变化较小,分布情况也基本一致;而当联络线顶部土体回填后,车站附近土体垂直位移明显减小,而在联络线背离车站方向的土体沉降有小幅增加,最多增加3 mm左右,进一步接近限值,因此在联络线施工完成时要继续进行地表沉降的监测直至土体达到稳定状态。

由前文分析可知,当工况6施工完成时,土体沉降已达25.7 mm,最接近规范限值,绘制此时各层土体的垂直位移曲线如图8所示。首先从横向上,发现土体垂直位移大致呈抛物线分布,在临近基坑处由于墙体的阻隔使得沉降量较小,远离基坑后土体沉降逐渐增大并在一定距离处达到最大值,而后继续减小直至土体平稳;从纵向上看,下层土体垂直

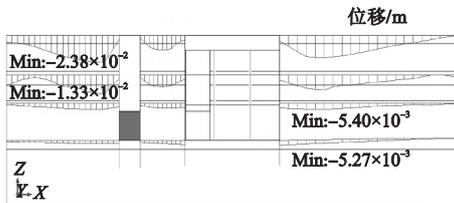


图8 联络线回填完成时各层土体垂直位移曲线

Fig. 8 Vertical displacement curve of each layer when backfilling of the connecting line is completed

位移较小而上层土体位移较大,这是由于上层土体松软受到扰动时易发生较大的沉降,在基坑设计施工时要充分考虑土体沉降规律,防止出现安全性事故。

3.4 水平位移分析

工况4~6完成时基坑周围土体水平位移分布如图9~图11所示。发现三者的位移最大值分别为6.5 mm、6.1 mm和7.0 mm,均小于规范限值,不易产生明显的地面裂缝。当联络线顶部土体回填完成后,联络线基坑一侧土体水平位移较紧前工况有小幅增长,而在车站附近土体的水平位移却有明显减小,而水平位移峰值发生在与车站相连的联络线最外侧连续墙附近处,施工时应特别加强此部位土体水平位移的监测。

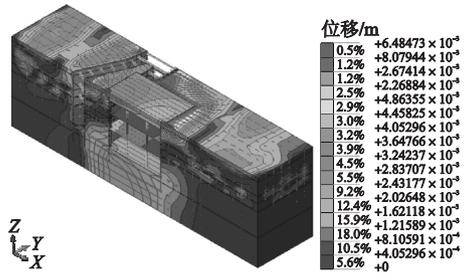


图9 联络线基坑开挖及围护结构完成时的水平位移云图

Fig. 9 Cloud diagram of horizontal displacement when the connecting line foundation pit excavation and construction of enclosure structure is completed

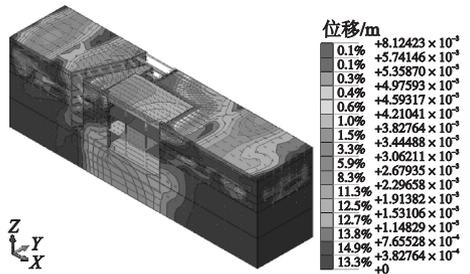


图10 联络线主体施工完成时的水平位移云图

Fig. 10 Cloud diagram of horizontal displacement when the main construction of the connecting line is completed

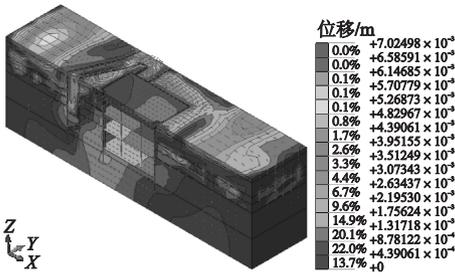


图 11 联络线回填完成时的水平位移云图

Fig. 11 Cloud diagram of horizontal displacement when backfilling of the connecting line is completed

绘制联络线基坑回填完成时各层土体的水平位移曲线如图 12 所示。发现土体水平位移分布大致呈波浪状,由地表至基坑底部各层土体的最大水平位移依次为 4.6 mm、3.6 mm、1.9 mm、1.6 mm,从上到下逐渐减小,这与基坑土层垂直位移分布规律相同。

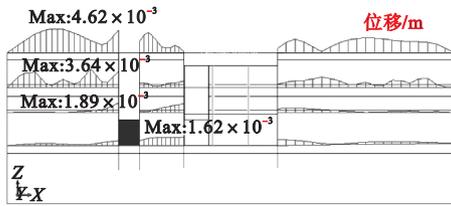


图 12 联络线回填完成时各层土体水平位移曲线

Fig. 12 Horizontal displacement curve of each layer when backfilling of the connecting line is completed

3.5 楼板应力分析

联络线土体回填完成时楼板的应力特征云图如图 13 所示。将应力最危险区域截面定为截面 2,着重对截面 2 处应力分布进行研究,并绘制此截面应力分布曲线图,见图 14。

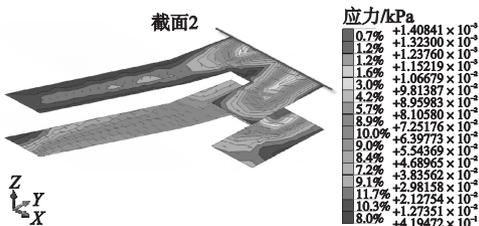


图 13 联络线回填完成时楼板最大主应力云图

Fig. 13 Cloud diagram of floor maximum principal stress when backfilling of the connecting line is completed

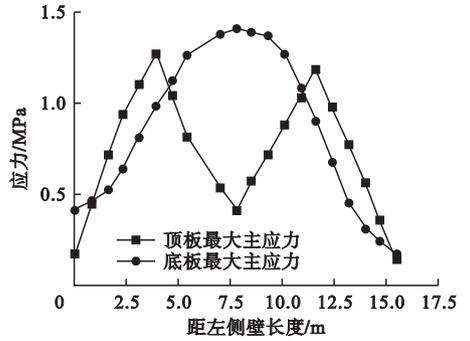


图 14 截面 2 应力分布曲线

Fig. 14 Stress distribution curve of section 2

由图 13 可知,联络线与二号线车站交界转角处因土体压力造成的应力集中较明显,应通过改变配筋形式等方法改善此区域应力分布情况。由图 14 可知,危险截面 2 处的顶板应力曲线分布呈波浪形,应力峰值产生在距左侧壁 3.5 m 位置处,为 1.3 MPa;截面 2 底板应力分布大致呈抛物线形,两端应力较小而在中部区域应力较大,在跨中处应力达到峰值,为 1.4 MPa。

联络线楼板混凝土等级为 C35,根据计算楼板的主应力限值为 18.72 MPa,而联络线顶板及底板最大主应力均小于此数值,因此本联络线工程楼板应力满足要求。

3.6 楼板挠度分析

联络线土体回填完成时楼板的垂直位移如图 15 所示,绘制联络线顶板及底板截面 2 处的挠度分布曲线见图 16,挠度值以向上为正。

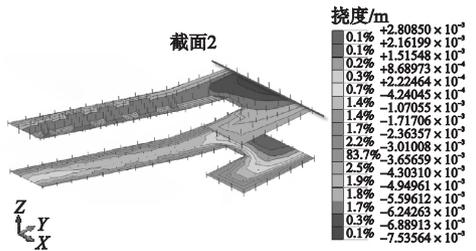


图 15 联络线回填完成时楼板挠度云图

Fig. 15 Cloud diagram of floor deflection when backfilling of the connecting line is completed

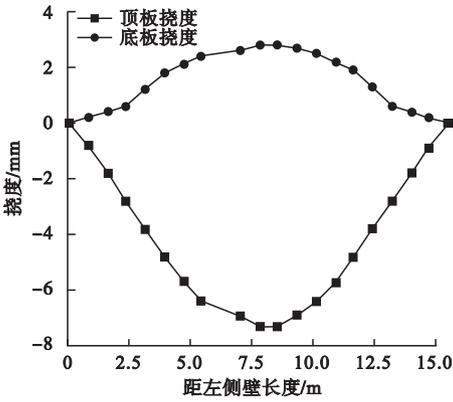


图 16 截面 2 挠度分布曲线

Fig. 16 Deflection distribution curve of section 2

由图 15、图 16 可以得出:联络线顶板及底板跨中区域挠度值较大,与侧壁的距离越近,楼板的挠度越小,在两侧壁处挠度值接近为 0,在跨中处顶板及底板挠度达到最大值,分别为 2.8 mm 和 7.5 mm。本工程楼板的计算跨度约为 15.5 m,根据结构设计规范要求,计算跨度大于 9 m 的楼板挠度限值为 $l_0/300$,经计算本联络线楼板挠度限值为 51.7 mm,可看出联络线楼板实际挠度小于此值,因此联络线楼板挠度满足规范要求。

4 监测数据分析

为验证模拟结论的可靠性,在联络线施工过程中进行实时监测,监测其地表沉降,分别设置 24 个监测点,代号为 DJ;监测其墙体水平位移,分别设置 24 个监测点,代号为 QW。监测点布置情况如图 17 所示。

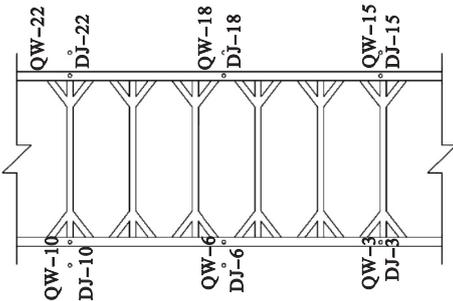


图 17 监测点布置图

Fig. 17 Layout drawing of monitoring points

4.1 地表沉降量

在地铁站联络线两侧交错选点用以验证结论,每个监测断面选取最大地表沉降值,结果如图 18 所示。由图可以看出,地表的沉降随着时间的推移而逐渐趋于稳定,而最大地表沉降值出现在监测点 DJ15 的位置,为 23.75 mm,与模拟结果相差小于 10%。

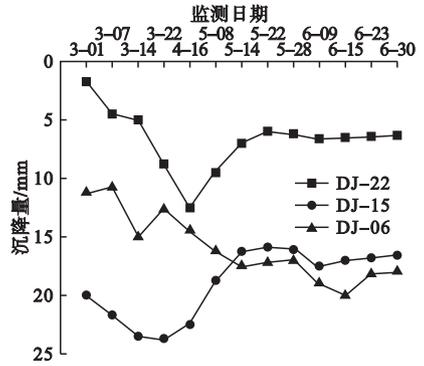


图 18 地表沉降量

Fig. 18 Surface settlement

4.2 墙体水平位移

经统计,本工程侧壁墙体最大水平位移出现在 QW18 测点,绘制其监测结果如图 19 所示。由图可以看出,在联络线基坑开挖前,墙体水平位移很小,而随着开挖深度的逐渐增加,墙体的最大水平位移也逐渐增大,在 5 月达到最大值 7.15 mm,与模拟结果 7 mm 相差小于 5%。

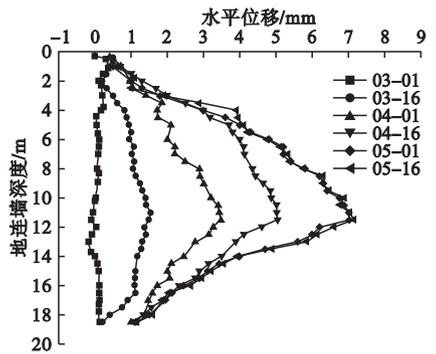


图 19 QW18 测点水平位移 - 深度关系

Fig. 19 Relationship between horizontal displacement and depth of QW18 measuring point

综上所述,地铁站联络线工程监测结果与数值模拟结果相近,验证了笔者所做研究模拟的可靠性,也为类似工程提供借鉴。

5 结 论

(1) 由于二号线和联络线地下连续墙的阻隔作用,使得二号线地铁站一侧土体的变形相对较小,因此基坑监测重心应放在联络线背向车站方向的连续墙附近土体上。

(2) 随着深度的增加,联络线基坑周围土体的垂直和水平位移逐渐减小,地表附近土体受深基坑工程扰动影响最大。

(3) 联络线与二号线地铁站之间的土体变形很小,在联络线施工时,既有地铁站可阻隔土体传递位移,并在一定程度上提高其在施工过程中的稳定性。

(4) 本联络线工程降水及施工方案合理,联络线施工过程中地表沉降、水平位移、楼板最大主应力和最大挠度指标满足规范限值要求,能够为类似工程提供参考价值。

参考文献

- [1] 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. Safety and environmental impact control of foundation pit engineering and underground engineering [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(6): 1-24.)
- [2] 李兵,曲晶彤,葛思远. 温度对地铁深基坑支护结构的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 69-76.
(LI Bing, QU Jingtong, GE Siyuan. Effect of temperature on supporting structure of metro deep foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 69-76.)
- [3] LI H J, LIU S Y, TONG L Y. Evaluation of lateral response of single piles to adjacent excavation using data from cone penetration tests [J]. NRC research press, 2018, 56(2): 236-248.
- [4] 杨悦,侯公羽,刘亚祺,等. 渗流对基坑变形及应力的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1053-1058.
(YANG Yue, HOU Gongyu, LIU Yaqi, et al. Influence of seepage on deformation and stress of foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6): 1053-1058.)
- [5] LIU H L, LI P, LIU J Y. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction [J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 26(2): 276-283.
- [6] ZHOU Y, LI S Q, 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): 05018004.
- [7] SHEN Y S, WANG P, LI M P, et al. Application of subway foundation pit engineering risk assessment: a case study of Qingdao rock area, China [J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(11): 4621-4630.
- [8] LI L, QIU Z, DONG Y, et al. Risk caused by construction of the metro shaft adjacent to building and its control measure [J]. Procedia engineering, 2016, 165: 40-48.
- [9] 王立忠,刘亚竞,龙凡,等. 软土地铁深基坑倒塌分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1603-1611.
(WANG Lizhong, LIU Yajing, LONG Fan, et al. Collapse of deep excavations for metro lines in soft clay [J]. Rock and soil mechanics, 2020, 42(9): 1603-1611.)
- [10] 王志杰,周飞聪,周平,等. 基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2131-2147.
(WANG Zhijie, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. Research on deformation theory of existing stations based on single side excavation and unloading of large foundation pits with strong close connection [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(10): 2131-2147.)
- [11] 马乾瑛,毛念华,赵均海,等. 基坑开挖对已建地铁站结构的安全性影响研究[J]. 铁道工程学报, 2014(4): 107-112.
(MA Qianying, MAO Nianhua, ZHAO Junhai, et al. Research on the existing subway station structure safety effected by foundation pit excavation [J]. Journal of railway engineering society, 2014(4): 107-112.)
- [12] 蔡海兵,黄以春,庞涛. 地铁联络通道三维冻结温度场有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1436-1443.
(CAI Haibing, HUANG Yichun, PANG Tao. Finite element analysis on 3D freezing temperature field in metro connected aisle construction [J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(6): 1436-1443.)
- [13] 覃伟,杨平,金明,等. 地铁超长联络通道人工冻结法应用与实例研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 1065-1071.
(QIN Wei, YANG Ping, JIN Ming, et al. Application and survey analysis of freezing method applied to ultra-long connected aisle in metro tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6(5): 1065-1071.)
- [14] 王彦洋,唐华瑞,李顺群,等. 考虑温度梯度变化的地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 135-140.
(WANG Yanyang, TANG Huarui, LI Shunqun, et al. Temperature gradient based 3D numerical simulation for freezing construction of a metro tunnel cross passage [J]. Modern tunnelling technology, 2015, 52(6): 135-140.)
- [15] 何家成,施成华,田瑞忠. 地铁联络线洞室群施工安全性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1209-1215.
(HE Jiacheng, SHI Chenghua, TIAN Ruizhong. Safety analysis on construction of cave group in metro connecting lines [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(4): 1209-1215.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)