

运营线路下换乘节点施工变形分析与现场监测

唐勇¹, 刘锐², 洪源¹, 张健¹, 黄靓钰³, 阳军生³

(1.中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.深圳地铁建设集团有限公司; 3.中南大学 土木工程学院)

摘要: 换乘节点施工对既有线路的运营可能造成较大影响,但是这方面的研究较少。该文以深圳地铁石厦站的换乘节点工程为研究背景,分析了施工过程中可能出现的风险,并提出了应对的施工方,采用有限元软件 Abaqus 并结合自动化监测的数据进行分析和计算。结果表明:换乘节点施工对负二层中板的影响较大,对顶板和负一层中板的影响较小,所以应重点监测负二层中板的位移变化;采用在开挖前进行注浆封闭止水,洞内开挖时进行补注浆,分层分块开挖,以及小导洞注浆+台阶法+临时仰拱的整套施工方法可行,保证了既有结构的安全运营。

关键词: 换乘节点; 施工工序; 数值分析; 自动化监测

换乘节点的施工对既有车站的正常运营可能产生较大的影响,为了保证既有地铁的正常运营,开展施工对既有地铁影响的研究显得十分必要。由于缺少对既有结构的位移和内力测试,分析施工过程中的连续墙和结构板的内力和位移变化有一定难度。因此对换乘节点的施工过程进行数值模拟和自动化监测是十分重

要的,对换乘节点的设计和施工也有重要意义。

一些学者通过数值计算和现场监测对新建隧道下穿既有车站进行了研究,王春希采用 FLAC^{3D} 软件对不同施工方法和加固范围进行了计算,得到合理的加固范围;Liao 等对上海地铁 6 号线穿越既有车站进行分析和研究;黄合理提出采用数值模拟和经验分析法

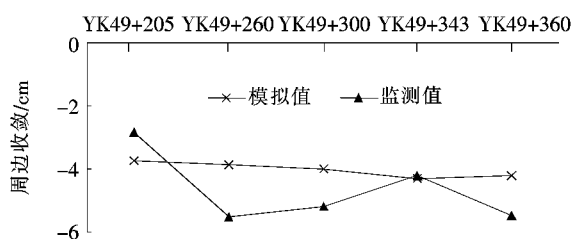


图 11 隧道右线累计周边收敛纵向曲线图

应变之间的数学关系式。

(2) 根据 Lemaitre 的应变等效假说的思想,推导了主要岩石力学参数劣化与损伤变量间的关系,弹性模量 E 和黏聚力 c 与损伤变量间呈线性关系,而内摩擦角 φ 的大小基本不受损伤影响。

(3) 为验证动态损伤数值模拟的合理性,分别进行了隧道开挖过程的常规数值模拟和动态损伤数值模拟,并对应力分布、位移分布、塑性破坏区进行了对比分析。将模拟值与监测值进行对比,发现动态损伤模拟更能体现隧道开挖过程中围岩累进性破坏的过程。

(4) 通过对动态损伤模拟分析,模型在计算过程中,隧道围岩的力学参数是随着计算时步逐渐劣化的,且越靠近隧道洞壁处的围岩,劣化程度越高。这与大量的研究结果是一致的,说明动态损伤模拟更为客观地体现了隧道开挖过程。

参考文献:

- [1] 王喷,赵明阶,蒋树屏,等.隧道开挖中围岩损伤演化分析及力学参数预测[J].岩土力学,2009(增刊1).
- [2] 张倬元.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,2009.
- [3] 江权,冯夏庭,陈国庆.考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008(1).
- [4] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009(增刊1).
- [5] 唐春安.岩石破裂过程中的灾变[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [6] Lemaitre J. How to Use Damage Mechanics[J].Nuclear Engineering and Design, 1984: 233-245.

收稿日期:2019-04-10

基金项目:中国水利水电第八工程局有限公司课题(编号:SZDT-5122-2018-L01)

作者简介:唐勇,男,高级工程师,E-mail: 18945087415@163.com

估计盾构隧道下穿既有车站时的地表沉降,并提出了加固方案;Yu等采用Abaqus有限元软件,对计算结果和监测结果进行比较分析,认为既有结构处于安全的状态;Fang等提出顶管施工和全断面注浆等风险控制措施,成功保证了换乘车站施工的安全;Abela等认为盖挖逆作法开挖大型基坑有助于减少紧邻建筑物的变形;Zheng等研究了基坑开挖对紧邻建筑物的影响,并建立了考虑基坑降水条件下的基坑开挖模型。

在换乘节点工程研究方面,少数学者做了一些研究,例如:杨世东等对换乘节点的设计及施工技术进行了研究,并给出换乘节点远期站的施工方法;熊竺结合现场监测情况并通过计算,提出了抽条分块开挖的施工方法;井博晖等通过有限元软件计算得到换乘节点的最大变形位置和车站结构的薄弱环节。

这些研究大多数都是隧道下穿既有车站的分析和研究,但是换乘节点工程方面的研究较少。该文以深圳地铁3号线和7号线石厦站换乘节点工程为研究背景,利用Abaqus有限元软件并结合监测数据,对换乘节点的结构板和地下连续墙的位移和内力进行计算和分析,得出一些有益的结论。石厦站换乘节点的运营线底板(厚40 cm)薄弱,且基底强风化,地质情况较差,该类情况国内外罕见。

1 工程概况

石厦站是深圳地铁3、7号线工程的换乘站,位于福民路与石厦北二街交叉路口。换乘节点东西长40.2 m、宽19.5 m,地铁3号线预留的换乘节点为叠合结构,原设计采用顺作法施工,但先期仅施工了地下三层换乘节点基坑围护结构,地下一、二层结构已施做完成,并已通车运营,节点地下三层因各种原因而未开挖施做,该预留换乘节点为深圳地铁7号线石厦站沿福民路东西向布置,在石厦北二街交叉口与地铁3号线在石厦站“T”形换乘(图1)。

换乘节点基坑深约26.2 m,基底位于强风化花岗岩层,局部为全风化花岗岩层,3号线已施工的围护结构是采用厚度为0.8 m的连续墙,墙嵌固深度为5.0 m。地层自上而下主要是素填土、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中、微风化花岗岩。

2 换乘节点施工风险及施工工序

2.1 施工风险

由于地铁3号线已经运营,工况已发生了较大变

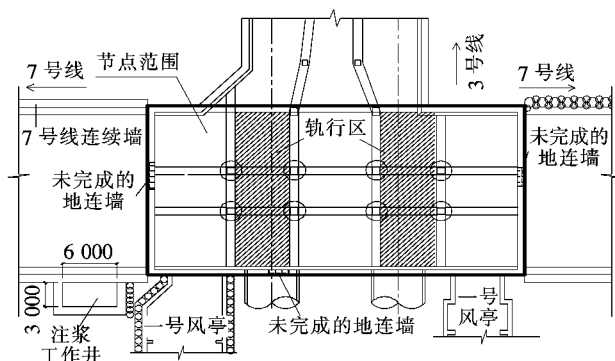


图1 换乘节点平面位置图(单位:cm)

化,原仅考虑在未覆土、未运营工况下的结构设计已不能满足现工况下的受力要求,前后相比,主要存在以下几方面风险:

(1) 未封闭的3处连续墙产生渗漏水,负三层开挖可能造成原石厦站结构变形及3号线行车道板的不均匀沉降,影响3号线的运营安全,是该工程最大的施工风险。

(2) 节点处8根桩按无覆土、无运营条件进行设计,无法满足现工况的竖向承载要求,且需经受抗拔→竖向受压→抗拔的受力转换。

(3) 节点负三层结构净高8.6 m,基坑开挖深度达9.8 m,原施工期间地连墙已发生最大45 mm的变形,如果水平支撑不到位,连续墙变形可能过大甚至破坏。

(4) 负二层板与连续墙连接部位部分接驳器损坏,而采用植筋,形成半刚性连接。

开挖过程中如何保证上部3号线结构沉降满足运营要求,是该工程的关键。

2.2 换乘节点施工工序

石厦站换乘节点工程的具体施工工序如下:

工序1:在换乘节点外侧设竖井,开挖前对未封闭的地下连续墙进行注浆封闭止水及洞内开挖时补注浆。

工序2:7号线车站基坑开挖土体分层对称开挖至负二层底板,换乘节点两侧保留20 m长度的反压土。

工序3:从东西两侧4个作业面开挖换乘节点角部土体,全断面开挖每次开挖长度0.5 m,架设钢斜撑。

工序4:下导洞施工,顶部设大管棚,全断面注浆,小导管超前支护,上下台阶法开挖,同时对下部土体进行注浆加固。

工序5:下导洞挖通后,进行人工挖孔桩、部分底板和底纵梁施工,形成中部底板受力体系。通过底板

与底梁将部分节点荷载传给地基土,以实现“地基土+立柱桩+地连墙”三者共同承担竖向荷载,同时对地基土进行必要的注浆加固,并且对东西两侧的 Z1 和 Z4 叠合柱进行施工。

工序 6:换乘节点第一层中部土体开挖。

工序 7:分 3 段施工电缆夹层板。

工序 8:换乘节点南北两侧剩余土体以及中部剩余土体分 3 层开挖,架设钢支撑,开挖、初支及内衬墙施工方式与角部施工方式相同,如图 2 所示。

工序 9:施工剩余部分底板。

工序 10:拆除型钢支撑及角部斜撑,完成换乘节点施工。

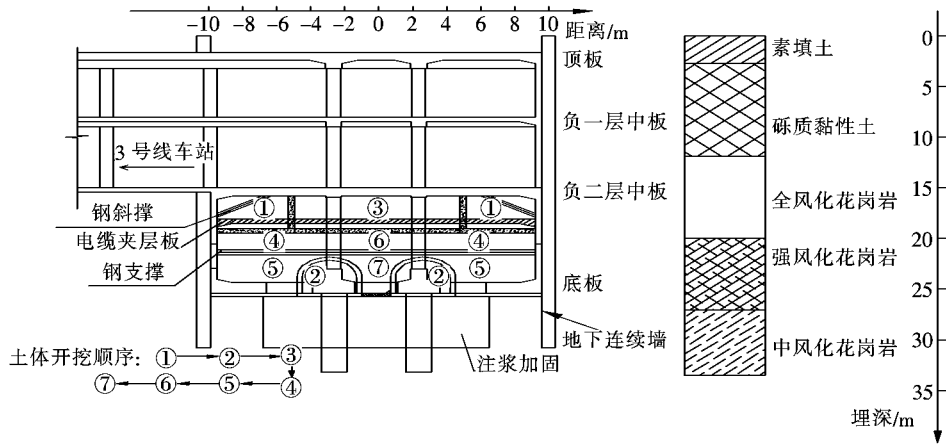


图 2 换乘节点土体开挖的施工顺序

3 换乘节点开挖的数值分析

3.1 参数选取

根据石厦站岩土工程勘察报告,选取土层及基坑结构力学参数如表 1 所示。采用有限元分析软件 Abaqus 建立换乘节点开挖模型。为减少边界约束效应,计算范围按基坑开挖深度的 3 倍取值,底部边界按基坑开挖深度的 2 倍确定。模型大小为 320 m×200 m×60 m。模型两侧和下部边界均施加法向约束,上表面为自由边界。土体、地下连续墙、抗拔桩均采用 C3D8 单元模拟。基坑开挖和连续墙的施作采用

表 1 土层及基坑结构力学参数

材料类型	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
钢筋混凝土	2 400	30.000	0.20	—	—
素填土	1 800	0.015	0.28	22.0	24.2
砾质黏土	1 790	0.020	0.33	27.3	22.1
全风化花岗岩	1 810	0.200	0.35	31.8	24.2
强风化花岗岩	1 890	0.300	0.25	26.4	29.6
中风化花岗岩	2 200	0.800	0.24	80.0	38.0
微风化花岗岩	2 450	10.000	0.22	120.0	42.0
钢支撑	7 800	210.000	0.30	—	—

Model Change, Remove 和 Add 生死单元。围护墙和土体之间均采用摩擦接触,抗拔桩与土体之间采用摩擦接触。

3.2 模型建立

结合施工现场实际情况,数值分析步骤如下:

步骤 1:地应力平衡。

步骤 2:施作 3 号线车站和换乘大厅既有结构。

步骤 3:从东西两侧 4 个作业面开挖换乘节点角部土体,全断面开挖每次开挖长度为 0.5 m,架设斜撑,开挖前进行注浆加固。

步骤 4:上下台阶法开挖下导洞。

步骤 5:下导洞开挖完成后,分 5 段施工底板及底纵梁。

步骤 6:换乘节点第一层中部土体开挖。

步骤 7:施作电缆夹层板。

步骤 8:分 3 层开挖换乘节点中部剩余土体,并架设钢支撑。

步骤 9:施工剩余部分底板。

步骤 10:拆除型钢支撑及角部斜撑,完成换乘节点施工。

3.3 数值计算结果分析

为了分析换乘节点土体开挖对既有结构的顶板影响,并结合 Abaqus 有限元软件网格划分的实际情况,在顶板选取 5 个分析点,分析点与顶板的距离参考图

2 所示。选取在土体开挖过程中,对 3 号线车站影响较大的 4 个分析步进行研究,分别是:步骤 4、步骤 6、步骤 8 和步骤 10。顶板、负一层中板、负二层中板的竖向位移如图 3~5 所示。

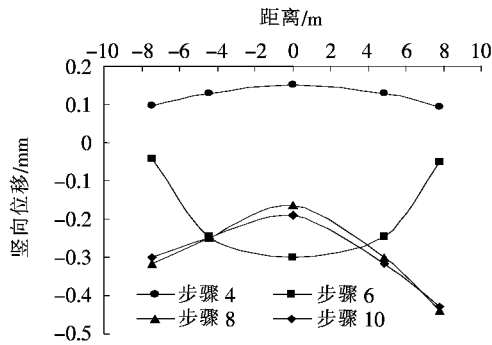


图 3 顶板的竖向位移

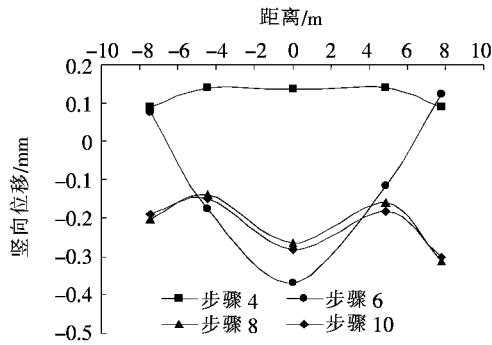


图 4 负一层中板的竖向位移

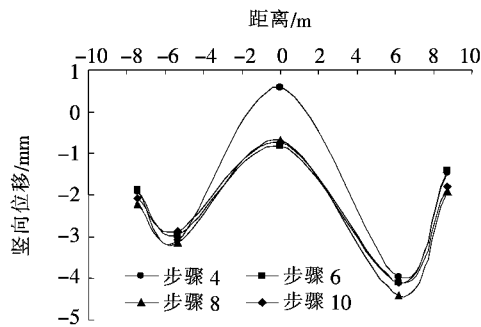


图 5 负二层中板的竖向位移

从图 3~5 可看出:整个施工过程中,顶板的最大沉降值为 0.44 mm,负一层中板的最大沉降值为 0.37 mm,负二层中板的最大沉降值为 4.41 mm。步骤 8 施工完成后,结构板出现最大沉降值。根据文献[12]规定结构绝对变形量的预警值为 10 mm(表 2),由此可见计算结果满足规范要求,说明换乘节点顶板的竖向变形在安全可控范围内。说明换乘节点施工对顶板和负一层中板的影响较小,换乘节点施工对负二层中板的影响较大。

表 2 既有结构变形控制标准 mm

监测项目	预警值	报警值	控制值
结构绝对变形量	10	16	20

3.4 换乘节点地下连续墙的计算结果分析

为了分析换乘节点施工开挖对既有地下连续墙的影响,并结合网格划分的实际情况,在地下连续墙选取 9 个分析点。与结构板变形分析一样,结果如图 6 所示。此处“+”代表地下连续墙向基坑外发生侧移,“-”代表地下连续墙向基坑内发生侧移。

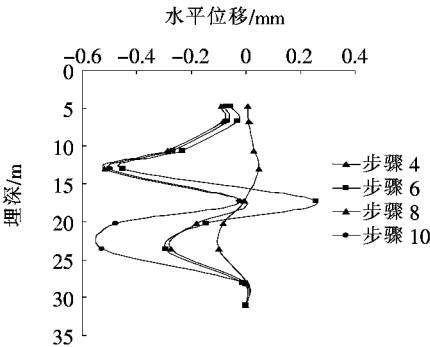


图 6 地下连续墙的水平位移

从图 6 可看出:步骤 10 施工完成后,地下连续墙继续向基坑内发生侧移,在整个换乘节点施工过程中,在埋深 23.6 m 处,地下连续墙出现最大水平位移值为 -0.53 mm。根据文献[12]结构绝对变形量的预警值为 10 mm(表 2),可见计算结果满足规范要求,说明换乘节点地下连续墙的水平位移在安全可控范围内。

3.5 数值计算结果和监测数据的对比分析

施工过程中结构的变形量计算结果与实测结果如图 7 所示。

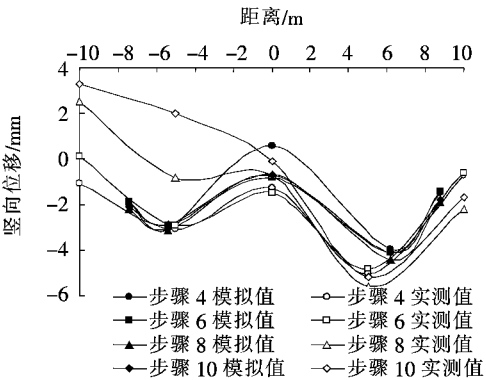


图 7 模拟结果和监测数据的对比

从图 7 可看出:数值计算结果与实测结果相近,变化规律相近。数值计算结果与实测结果都表明:受换乘节点土体开挖的影响,负二层中板呈现先下沉后略

微隆起的变化过程。负二层中板最大沉降值都出现在步骤 8 完成后。数值计算结果为 4.41 mm, 实测结果为 5.6 mm, 数值计算结果略小于实测结果。根据文献[12]规定结构绝对变形量的预警值为 10 mm(表 2), 计算值和实测值均满足规范要求, 说明换乘节点负二层中板的竖向变形在安全可控范围内。

4 实时监测及影响评价

4.1 现场测点的布置

为了确保施工过程中既有 3 号线车站的安全运营, 因此对 3 号线轨行区沉降变形进行 24 h 自动化监测。监测里程为 DK4+140~DK4+265。监测点布置如图 8 所示。

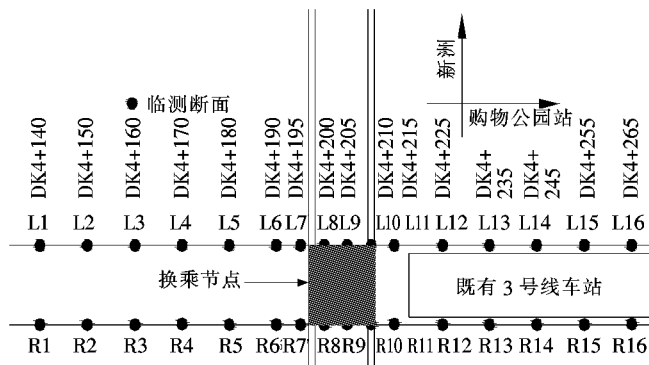


图 8 自动化测点布置示意图

4.2 实测数据整理与分析

为了单独分析换乘节点施工对既有车站的影响, 对新建 7 号线石厦站施工引起既有车站的水平位移和竖向位移进行清零处理, 并选取关键施工工序完成的时间点所对应的位移, 分析换乘节点开挖的影响。

(1) 左线隧道沉降的分析

由于篇幅所限, 以左线隧道的沉降和水平位移为例进行分析。X 轴以里程 DK4+140 为起点, 购物公园站方向为正方向。Y 轴为竖向位移, “+”表示隆起, “-”表示下沉。为了方便和数值分析过程相结合, 仍然选取在换乘节点施工过程中, 对 3 号线车站影响较大的 4 个施工步骤进行研究, 分别是: 步骤 4、6、8 和 10。根据 4 个不同步骤所对应的测点竖向位移进行整理分析。结果如图 9、10 所示。

由图 9、10 可知: 最大沉降值和位移值均出现在道床测点, 而且大多数测点的最大沉降值出现在步骤 8 完成后; 大多数测点的最大隆起值出现在步骤 10 完成后。在步骤 8 完成后, 在断面 ZKD4+200 上, 道床测

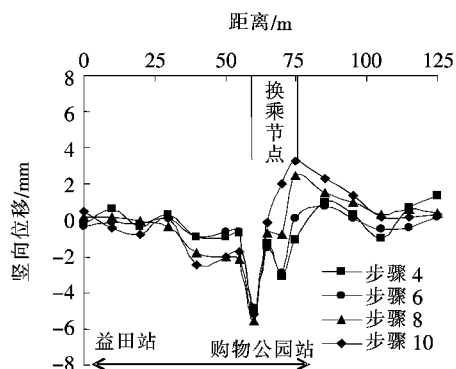


图 9 不同施工步骤下道床测点竖向位移

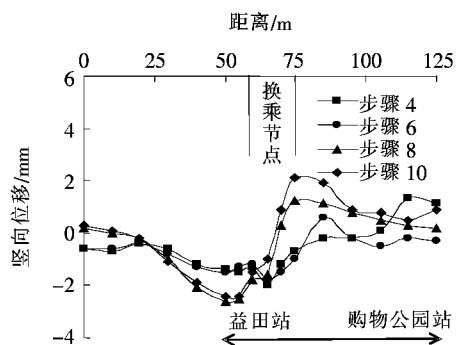


图 10 不同施工步骤下边墙测点竖向位移

点出现最大沉降值 5.6 mm; 在步骤 10 完成后, 在断面 ZKD4+215 上, 道床测点出现最大隆起值 3.3 mm。换乘节点开挖对测点的影响呈现“中间大、两边小”。对比表 2 可知: 既有车站和盾构隧道的最大沉降值和隆起值均满足规范要求, 说明换乘节点开挖引起的竖向变形在安全可控范围内。

(2) 左线隧道水平位移的分析

对左线隧道的水平位移分析方法与竖向位移一致。X 轴以里程 DK4+140 为起点, 购物公园站方向为正方向。Y 轴为水平位移, 水平位移量为“+”值表示隧道向新洲方向移动, “-”值表示向水围方向移动。为了方便和数值分析过程相结合, 仍然选取在换乘节点施工过程中, 对 3 号线车站影响较大的步骤 4、6、8 和 10 共 4 个步骤进行研究。根据 4 个不同步骤所对应的测点水平位移进行整理分析。整理结果如图 11、12 所示。

由图 11、12 可知: 最大水平位移值出现在道床测点, 而且大多数测点的最大水平位移值出现在步骤 10 完成后。在步骤 10 完成后, 在断面 ZKD4+210 上, 道床测点出现最大水平位移值 2.9 mm, 向新洲方向移动。换乘节点开挖引起各测点的水平位移开始先向水围方向移动, 后向新洲方向移动, 换乘节点开挖对测点

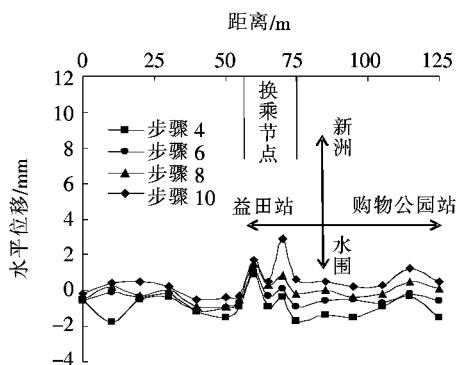


图11 不同施工步骤下道床测点水平位移

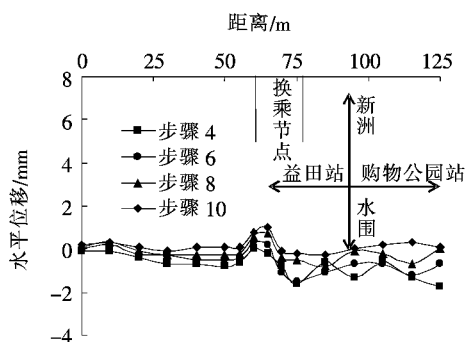


图12 不同施工步骤下边墙测点水平位移

的影响呈现“中间大、两边小”。根据表2可知,既有车站和盾构隧道的最大水平位移值满足规范要求,说明换乘节点开挖引起的水平位移在安全可控范围内。

5 结论与讨论

以深圳地铁3号线和7号线石厦站换乘节点工程为研究背景,详细阐述了现场的施工工序,利用有限元软件Abaqus对既有结构的位移和内力进行计算,并结合自动化监测数据,得到以下结论:

(1) 石厦站换乘节点的施工方法和施工工艺有效地控制了既有结构的变形,采用在开挖前进行注浆封闭止水,洞内开挖时补注浆,分层、分块开挖节点范围内的土体,以及小导洞注浆+台阶法+临时仰拱的施工方法是可行的。这种施工方法耗时少,能做到及时封闭,可有效地减少既有车站的沉降,结构变形控制在安全范围内,保证了既有结构的安全运营,可为以后类似工程的施工提供经验。

(2) 换乘节点施工对既有结构的负二层中板位移影响最大,对顶板和负一层中板及地下连续墙的影响较小,所以对负二层中板应加强监测。

(3) 绝大多数监测点的竖向位移在步骤8完成

后,竖向位移达到最大值,而且整个过程呈现先沉降后略微隆起;绝大多数监测点的水平位移在施工全部完成后,水平位移达到最大值,而且最终向新洲方向移动。

(4) 最大水平位移和最大竖向位移均出现在道床监测点上,所以应重点关注道床变形。换乘节点施工对靠近换乘节点的自动化监测点影响较大,远离换乘节点的监测点影响较小。

参考文献:

- [1] 王春希.暗挖隧道下穿既有站沉降控制措施[J].铁道标准设计,2014(6).
- [2] LIAO Shao-ming, FAN Yao-yao, SHI Zhen-hao, et al. Optimization Study on the Reconstruction and Expansion of an Underground Rail Transit Center in Shanghai Soft Ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38(3): 435-446.
- [3] 黄合理.地铁隧道穿越既有车站的沉降预测及加固措施[J].现代隧道技术,2013(2).
- [4] YU Hai-tao, YUAN Yong, YU Guang-xi, et al. Evaluation of Influence of Vibrations Generated by Blasting Construction on an Existing Tunnel in Soft Soils [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 59-66.
- [5] FANG Qian, ZHANG Ding-li, Louis Ngai Yuen Wong. Environmental Risk Management for a Cross Interchange Subway Station Construction in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 750-763.
- [6] ABELA J. M., POTTS D. M., VOLLUM R. L., et al. Geotechnical Analysis of Blinding Struts in Cut-and-Cover Excavations [J]. Computers & Geotechnics, 2013, 48(3): 179-191.
- [7] ZHENG Gang, ZENG Chao-feng, Diao Yu, et al. Test and Numerical Research on Wall Deflections Induced by Pre-Excavation Dewatering [J]. Computers & Geotechnics, 2014, 62(8): 244-256.
- [8] 杨世东,刘庆方.盖挖换乘站换乘节点桩柱预留设计及施工技术研究[J].隧道建设,2013(3).
- [9] 熊竺.利用二层车站围护施工三层换乘节点的方法[J].土工基础,2015(3).
- [10] 井博晖,刘建志.软土地区超深预留换乘节点结构稳定性研究[J].天津建设科技,2011(3).
- [11] 深圳市市政设计研究院有限公司.深圳市城市轨道交通7号线工程施工图设计[R],2014.
- [12] QB/SZMC-10102-2010 深圳城市轨道交通地下工程监测技术规范[S].