

# 地铁基坑与托换桩相互影响的数值分析与监测\*

卢慈荣<sup>1</sup>, 许原骑<sup>1</sup>, 范礼彬<sup>1</sup>, 赵元保<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014; 2. 河南省新乡水文水资源勘测局, 河南 卫辉 453100)

**摘要:** 地铁深基坑工程在城市中周边环境条件复杂, 基坑开挖过程中对变形控制标准高, 当深基坑临近既有建(构)筑物时尤其严格。本文以深圳地铁7号线某地下三层站下穿既有立交桥为工程背景, 采用三维数值模拟分析、信息化施工和现场监控量测信息反馈相结合的方法, 对既有立交桥桩基托换及深基坑开挖对立交桥的叠加影响进行分析, 保证立交桥在桥桩基托换和深基坑开挖过程中的安全。从安全可靠、经济合理的方面进行总结, 提出了针对措施及建议, 供类似工程参考。采用桩基托换、盖挖逆作法, 并通过合理的施工组织安排, 将基坑施工对周边环境的影响控制在安全范围内, 是安全可行的。

**关键词:** 地铁车站; 立交桥; 桩基托换; 基坑工程; 变形控制

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)02-0500-07

## Numerical Analysis and Monitoring of Mutual Influence between Subway Excavation and Pile Foundation Underpinning

Lu Cirong<sup>1</sup>, Xu Yuanqi<sup>1</sup>, Fan Libin<sup>1</sup>, Zhao Yuanbao<sup>2</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310014, P.R.China; 2. Xinxiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Weihui, Henan 453100, P.R.China )

**Abstract:** Deep foundation pit engineering of subway environment condition is complicated in the urban area, the deformation control standard is very high during the foundation pit excavation, when the deep foundation pit adjacent to the existing building (structure) is especially strict. Taking a three floor underground station under interchange bridge of Shenzhen Metro Line 7 as the engineering background, using the simulation method of combining the analysis, information construction and feedback of monitoring information of three-dimensional numerical, overpass pile foundation underpinning and deep foundation pit excavation on the overpass superposition effect is analyzed, in order to reduce the influence of foundation pit deformation on the overpass, from safe and reliable, economical and reasonable were summarized, proposed measures and suggestions, to offer a reference for similar engineering. It is safe and feasible to adopt the method of pile foundation underpinning and cover digging and reversed construction, and to control the influence of the construction of the foundation pit on the surrounding environment through the reasonable construction organization and arrangement.

**Keywords:** underground subway station; overpass; pile foundation underpinning; foundation pit engineering; deformation control

\* 收稿日期: 2017-10-15(修改稿)

作者简介: 卢慈荣(1979-), 男, 福建三明人, 硕士, 高工, 主要从事城市轨道交通、地下工程等领域的设计与科研工作。E-mail: 55994599@qq.com

0 引言

近年来,深圳市以城市地铁为代表的公共交通建设得到了蓬勃发展,到目前为止,已开通了 5 条地铁线路,正在建设的有地铁 7 号线、9 号线、10 号线、11 号线等线路。由于深圳市周边环境的复杂性及建设的集中性,上述地铁车站基坑工程遇到了越来越多的复杂环境保护问题<sup>[1-4]</sup>。

本文以深圳地铁 7 号线某地下三层站下穿立交桥工程为例,采用三维数值模拟分析计算,结合监测信息化施工反馈,探讨和分析了立交桥的桩基托换、立交桥下地铁车站基坑工程等对立交桥的影响,总结此类复杂环境条件下深基坑工程的针对措施和建议,以期对同类工程提供借鉴。

1 工程背景

1.1 工程概况

本地铁车站位于深圳市泥岗西路与笋岗西路交叉路口的黄木岗立交桥下,沿泥岗西路南北向布置(如图 1 所示)。为了减少桩基托换数量及对立交桥的影响,采用地下三层上、下重叠同向侧式站台的車站形式。地下一层为站厅层,地下二层为右线站台层,地下三层为左线站台层。车站设 4 个出入口通道,5 个出入口,3 组风亭及风道。车站主体部分采用明挖法和部分采用盖挖法施工,出入口、风道采用明挖法施工。车站主体为单柱双跨,车站主体总长 232 m,标准段宽度为 21.85 m,标准段总高为 23.89 m,标准段基坑挖深为 27.0 m。

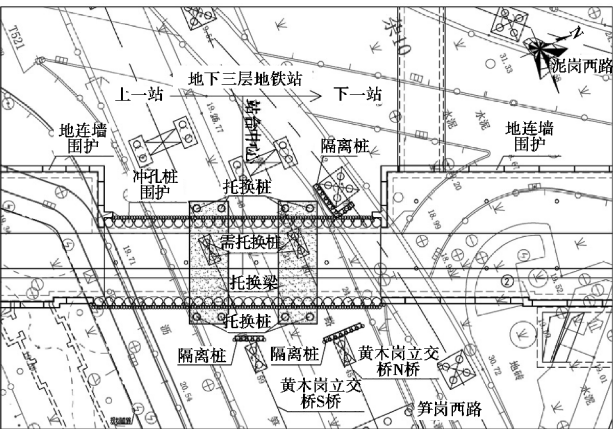


图 1 地铁车站与立交桥平面位置关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plane position of the metro station and the overpass

本工程实施对黄木岗立交桥的影响主要有两个方面:其一是桥梁桩基托换过程中对桥梁变形的影

响;其二是超深基坑工程开挖对桥梁变形的影响。

1.2 周边环境

本地铁车站位于泥岗西路黄木岗立交桥下的绿化带中及辅道正下方,基坑周围建(构)筑物为建于 20 世纪 80 年代的市政道桥及 90 年代的体育大厦。车站东侧为体育大厦及笋岗西路东行车道,西侧为黄木岗立交环形通道、市二医院,北侧为泥岗西路,南侧为海关海馨苑。车站范围内高压电力管、给水管、污水管、燃气管、雨水箱涵等管线错综复杂,大部分与车站斜交,施工场地条件复杂。

主要建构筑物如下:①深圳市黄木岗立交桥 N 桥和 S 桥:为连续梁桥,桩基为端承桩;立交南桥 S8 号桥墩桩基,北桥 N8 号桥墩桩基位置正好位于车站基坑内部,需对 S8 号、N8 号两处桥墩进行桩基托换处理。②黄木岗立交桥 A、B、C 匝道桥:为连续梁桥,桩基为端承桩。③深圳市体育大厦:地下室 1 层;主楼 20 层,局部 22 层,裙楼 3 层,距离围护结构约 8.7m,采用端承桩基础,桩端位于强风化花岗岩层或微风化花岗岩层。④深圳市实验学校中学部综合楼(在建):地上 6 层,地下 1 层,筏板基础;地上 11 层,地下 1 层,筏板基础。

1.3 工程地质条件

场地为台地地貌,地面高程一般为 18.97 ~ 24.22 m。本工程详细勘察显示,本车站范围内无地质构造现象。车站范围内上覆第四系人工填土层( $Q_4^{ml}$ )、第四系全新统冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ )、坡积层( $Q_3^{dl}$ )、残积层( $Q^{el}$ ),下伏燕山期花岗岩( $\gamma 53$ )。

基坑开挖范围内从上至下主要土层为①<sub>1</sub>素填土、④<sub>2</sub>淤泥质土、④<sub>10</sub>粗砂、⑥<sub>2</sub>含砾黏土、⑦<sub>1</sub>砾质黏性土、⑧<sub>1</sub>全风化花岗岩、⑧<sub>2</sub>强风化花岗岩、⑧<sub>3</sub>中风化花岗岩、⑧<sub>4</sub>弱风化花岗岩(如表 1 所示),坑底坐落在全、强风化岩中。

表 1 岩土层主要物理力学指标表

Table 1 Physical and mechanical indexes of each layer of rock and soil

土类	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	渗透 系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	桩端 阻力 特征 值/ kPa	桩侧 阻力 特征 值/ kPa
① <sub>1</sub> 素填土	18.0	10~15	10~15	1.0	—	9
④ <sub>2</sub> 淤泥质 黏土	20.2	27	20	0.001	—	6

续表1

土类	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	渗透 系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	桩端 阻力 特征 值/ kPa	桩侧 阻力 特征 值/ kPa
④ <sub>10</sub> 粗砂	19.8	16	12	12.0	—	33
⑥ <sub>2</sub> 含砾 黏土	18.5	26	26	0.1	—	30
⑦ <sub>1</sub> 砾质 黏性土	17.7	29	26	0.2	450	30
⑧ <sub>1</sub> 全风化 花岗岩	18.3	29	31	1.0	700	62
⑧ <sub>2</sub> 强风化 花岗岩	18.0	32	25	2.5	800	80
⑧ <sub>3</sub> 中风化 花岗岩	25.5	—	—	3.0	4 000	—
⑧ <sub>4</sub> 弱风化 花岗岩	26.5	—	—	0.3	5 000	—

本工程场地地下水主要为孔隙水、潜水及基岩裂隙水,基岩裂隙水具有微承压性。孔隙水主要赋存于冲洪积粗砂层中,其次赋存于坡积含砾黏土、全风化岩中,基岩裂隙水主要储存于强风化、中风化岩层中。本场地稳定地下水位埋深 2.1~7.2 m。

2 车站实施方案对立交桥的影响研究

2.1 桩基托换方案对立交桥的影响分析

立交桥主桥总长约 222 m,南北主桥各三联,除第二联为预应力钢筋混凝土连续箱梁外,其余为钢筋混凝土连续箱梁,S8、N8 号桥墩均位于第三联。南北主桥的断面型式为单箱双室,梁高 1.65 m,箱顶面宽 14.2 m,底面宽 9.6 m,南、北主桥墩柱为直径 1.6 m 圆柱,基础采用直径 1.2 m 钻孔桩,均为两桩承台,以微风化花岗岩为桩端持力层,南桥 S8 号桥墩桩基承台底标高 +17.50 桩底标高 -14.70,桩长 32.2 m,北桥 N8 号桥墩桩基承台底标高为+17.00,桩底标高为-16.00,桩长 33.0 m。南、北主桥原设计荷载:汽超-20,挂-120;托换设计荷载取值:城-A 级。

南桥 S8 号桥墩和北桥 N8 号桥墩桩基托换均采用由托换桩和托换大梁组成的门字架托换体系,

托换桩采用直径 1.5 m 钻孔灌注桩,托换梁截面为 6.0 m(宽)×3.5 m(高)×21.3 m(跨度),按两端简支设计。由于墩柱底荷载大,托换梁跨度大,采用主动托换方式处理。桩基托换在约 6.0 m 深的基槽内施工,基槽四周采用放坡开挖,支护结构型式均采用喷锚支护,并采用直径 600 mm 双管旋喷桩止水帷幕(如图 2、图 3 所示)。

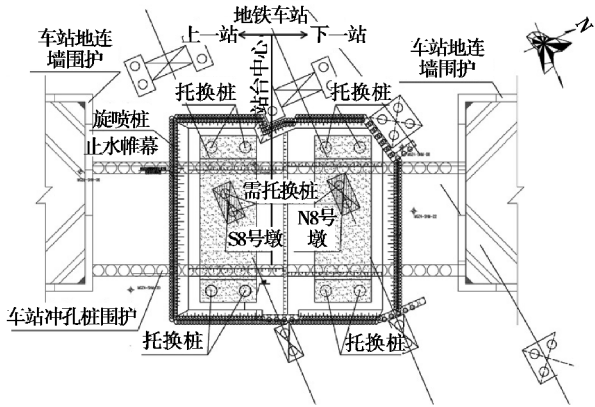


图 2 桩基托换平面示意图

Fig. 2 Plane diagram of pile foundation underpinning

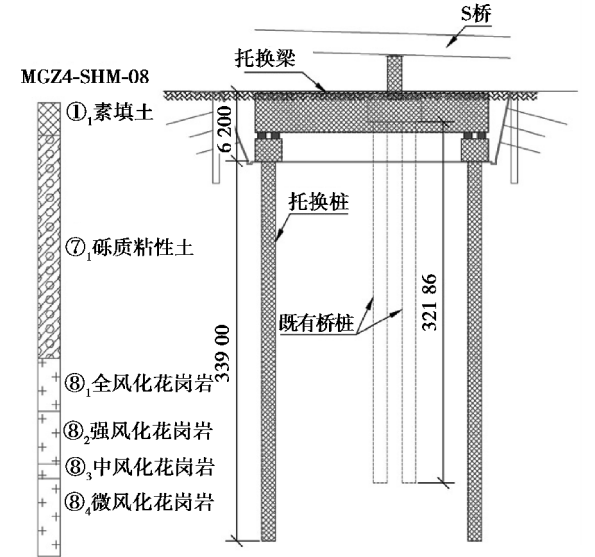


图 3 桩基托换剖面示意图(单位:mm)

Fig. 3 Section diagram of pile foundation underpinning (unit: mm)

由于立交桥原桩基及托换桩基均为嵌岩桩,桩基托换开挖的 6.0 m 深基槽及其降水,对桩基承载力及竖向变形影响很小。而托换桩承载后,承载力不是控制性因素,托换桩承载也不会引起较大的竖向沉降变形,可认为基本无影响。

虽然桩基托换期间,原桩基及托换桩本身承载



力及沉降均不是引起桥梁沉降的关键,但在原桩与托换桩力的转换期间,对临时受力的千斤顶的控制水平要求很高,是此期间桥梁沉降变形控制性因素<sup>[5-6]</sup>。三维数值模拟分析及工程实施期间的监测数据也验证了这一点:桩基托换基槽开挖及降水期间、托换桩受力期间,桥梁的沉降微乎其微,而在千斤顶临时受力期间,部分桥梁沉降监测稍有波动。

2.2 基坑开挖方案对立交桥的影响分析

基坑开挖不可避免地会引起周边地下水位的下降,而由于托换桩为嵌岩桩,可以认为地下水位的下降引起桩基的沉降微乎其微,进而可基本忽略因为地下水位下降引起立交桥的沉降<sup>[7-8]</sup>。

但另一方面,托换后的立交桥桩基距离基坑围护桩净距仅约 0.8 m,基坑开挖引起的围护桩及周边土体向基坑内侧的侧向位移,会引起坑外土体的水平移动及土体松动,进而引起托换桩侧摩阻力的降低及水平位移,对托换桩起削弱作用。因而,基坑开挖期间,限制围护结构的水平变形就显得尤为重要。

本工程受立交桥桥下净高限制,难以采用刚度大防水效果好的地连墙作为围护结构形式,因此采用  $\phi 1500@1700$  大直径冲孔灌注桩+ $\phi 600@1700$  旋喷桩桩间止水+ $\phi 600@450$  旋喷桩止水帷幕的围护结构方案。为了控制围护结构水平变形,采用限制围护变形较好的盖挖逆作法进行本部分的基坑工程施做<sup>[9-10]</sup>(如图 4 所示)。

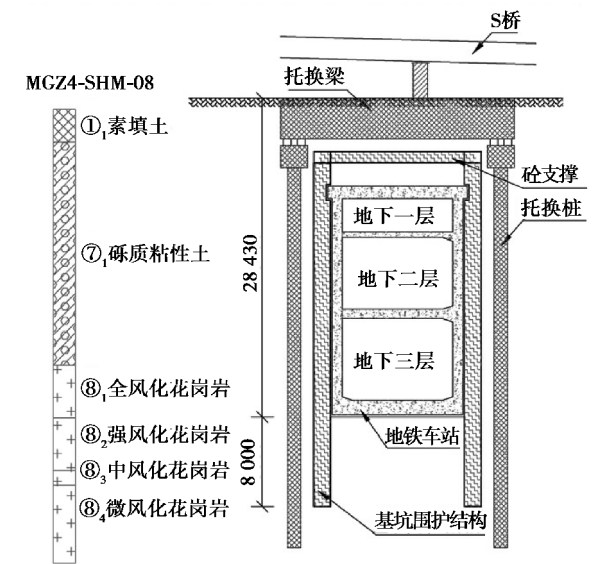


图 4 盖挖法逆作法基坑横剖面示意图(单位:mm)

Fig. 4 Cross section sketch diagram of the foundation pit by the cover digging and reversed construction method (unit: mm)

3 计算分析

3.1 分析模型

本工程计算工具采用 GTS MIDAS,岩土计算本构采用修正摩尔库仑模型(HS 模型)(如图 5、图 6 所示)。

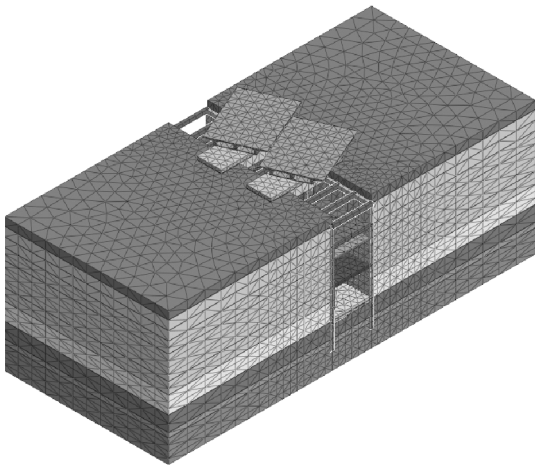


图 5 计算分析模型

Fig. 5 Numerical analysis model

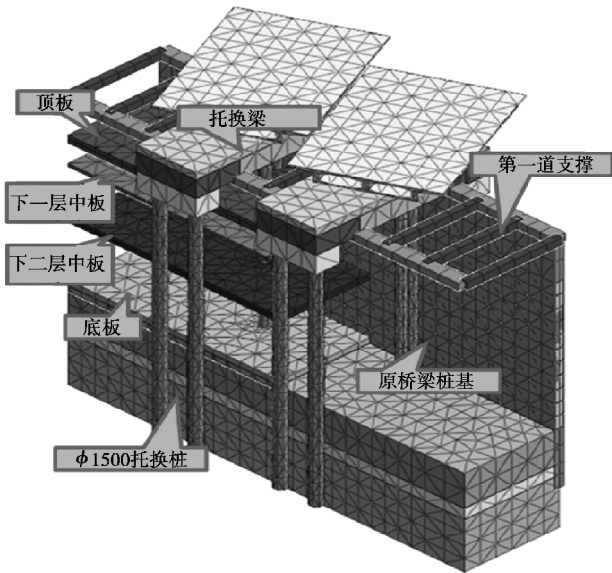


图 6 计算分析模型剖面示意图

Fig. 6 Section diagram of computational analysis model

3.2 分析工况

为了比较精确地计算出桩基托换及基坑开挖对立交桥的影响,分析时首先对立交桥结构建造过程进行了模拟,立交桥建造完毕后把各单位位移清零,再对桩基托换、车站基坑开挖过程进行模拟。简要分析工况如下:

- 工况一:托换桩基施工;
- 工况二:托换基槽开挖;
- 工况三:托换梁施工;
- 工况四:原桩基截桩;
- 工况五:围护桩施工;
- 工况六:开挖至第一道支撑;
- 工况七:架设第一道支撑;
- 工况八:开挖至顶板处;
- 工况九:顶板浇筑;
- 工况十:顶板上部覆土回填;
- 工况十一:开挖至站厅层并浇筑侧墙和中板;
- 工况十二:开挖至负二层并浇筑中板和侧墙;
- 工况十三:开挖至底板并浇筑底板和侧墙。

3.3 计算分析结果

为了得到桩基托换、基坑开挖分别对立交桥的影响,对分析计算进行了阶段性的分析,分析结果如图 7~9 所示。

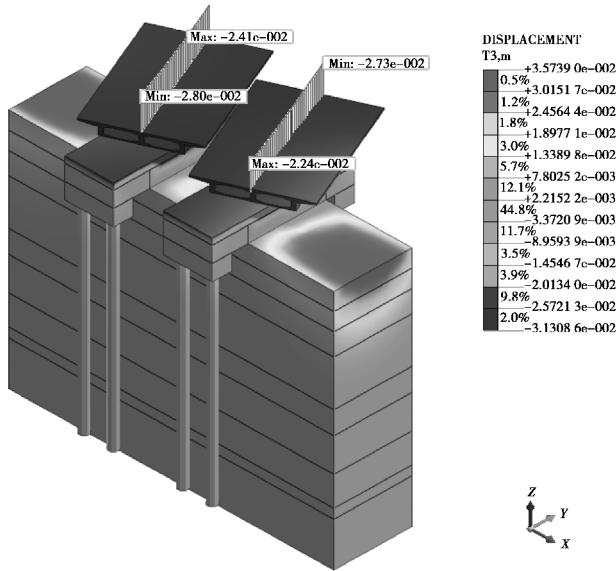


图 7 桩基托换完成时竖向变形云图

Fig. 7 Vrtical deformation nephogram when pile foundation underpinning is completed

从计算分析结果看,桩基托换完成时,桥面最大沉降约为 2.8 mm,基坑盖挖逆作法施工过程中,桥面最大沉降为 4.46 mm,均满足允许沉降限值 5.0 mm 的要求。

开挖到坑底时,围护结构侧向位移从上向下逐渐增加,在坑深 23.8 m(约 0.85 倍的坑深)附近达到最大值,约为 7.43 mm。

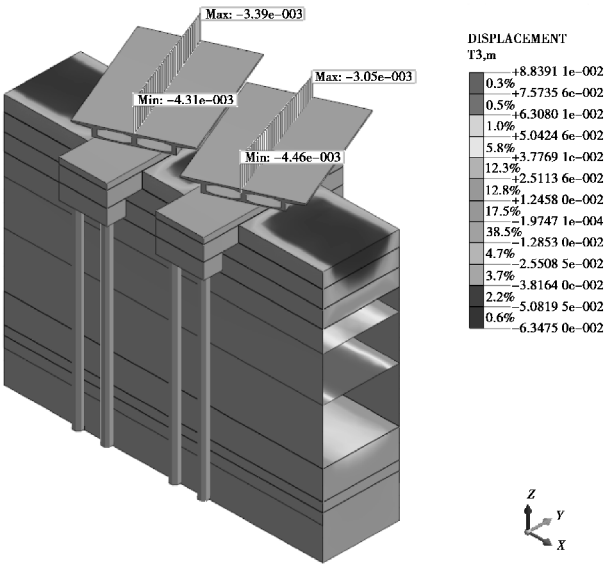


图 8 基坑开挖到坑底时竖向变形云图

Fig. 8 Vertical deformation nephogram of the pit bottom when excavate to the bottom

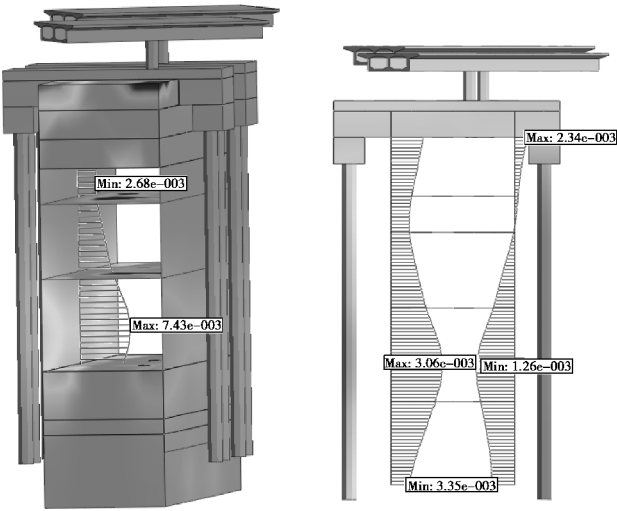


图 9 基坑开挖到坑底时围护结构水平变形云图

Fig. 9 Horizontal deformation nephogram of the foundation pit retaining structure when excavate to the bottom

4 工程监测结果及其对比分析

4.1 工程监测结果及与数值分析结果对比

在施工过程中,对立交桥的沉降、基坑围护结构的水平变形进行了详细的实时监测<sup>[11]</sup>,并根据监测结果实时调整施工进度。

(1)2012 年 12 月 13 日开始桩基托换的基槽开挖,2013 年 4 月 20 日完成桩基托换及围护结构施工。桥面点于本期沉降整体平缓,各测点未出现异常突变情况,累计变化最大点下沉约 2.5 mm,

与数值计算分析的沉降 2.8 mm 基本符合。

(2)2013 年 4 月 28 日开始车站基坑盖挖逆作法施做,于 2014 年 3 月 20 日车站底板浇筑完毕。期间累计变化最大点下沉约 4.7 mm,各测点未出现异常突变情况,与数值计算分析的沉降 4.46 mm 基本符合(如图 10~13 所示)。

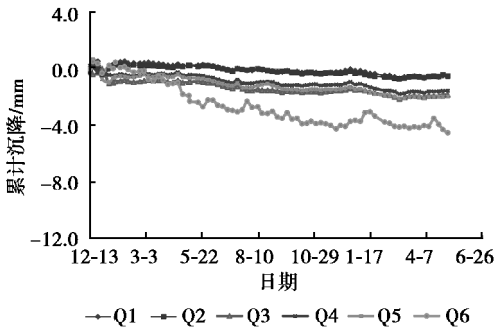


图 10 测点 1~6 点的桥面沉降时程曲线图  
Fig. 10 Time history curves of bridge deck subsidence at point 1~6

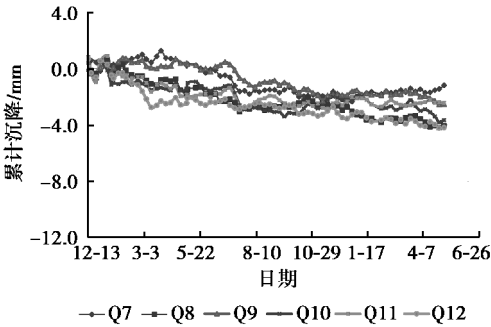


图 11 测点 7~12 点的桥面沉降时程曲线图  
Fig. 11 Time history curves of bridge deck subsidence at point 7~12

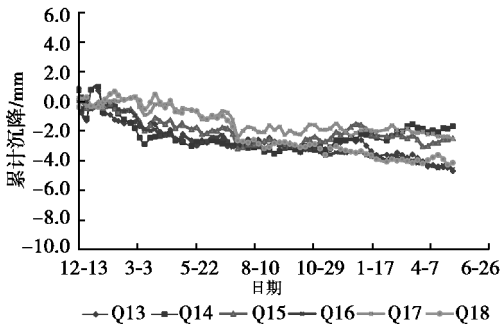


图 12 测点 13~18 点的桥面沉降时程曲线图  
Fig. 12 Time history curves of bridge deck subsidence at point 13~18

(3)车站基坑盖挖逆作法施做期间,围护结构累计变化最大点水平位移约 8.0 mm,各测点未出

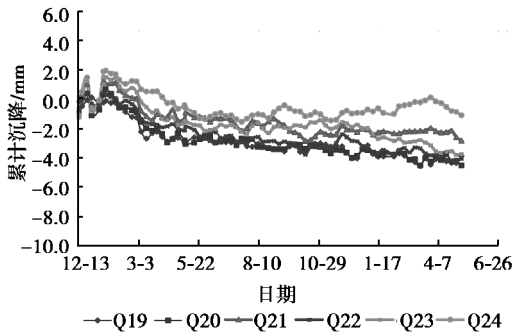


图 13 测点 19~24 点的桥面沉降时程曲线图  
Fig. 13 Time history curves of bridge deck subsidence at point 19~24

现异常突变情况,与数值计算分析的沉降 7.43 mm 基本符合(如图 14 所示)。

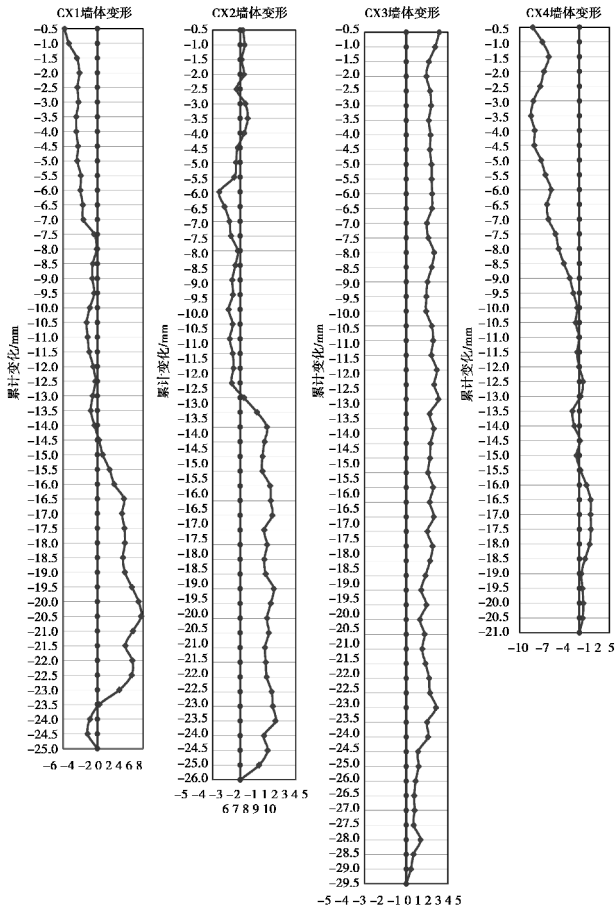


图 14 围护结构墙体测斜曲线图  
Fig. 14 Inclinator curves of the Retaining structure wall of the foundation pit

4.2 工程监测结果分析

由监测结果及数值分析结果对比可以看出：

- (1)数值模拟分析工况基本反映现场实际工况,计算结果与现场监测数据较为接近。
- (2)桩基托换期间的立交桥沉降,受临时受力

千斤顶施做的影响较大。

(3) 桩基托换期间, 桥面总趋势是下沉, 但沉降速度和幅度较小, 均在报警值控制范围以内。

(4) 基坑开挖施做期间, 桥面总趋势下沉, 但沉降速度和幅度均较小, 均在报警值控制范围以内。

(5) 盖挖逆作法基坑施做期间, 围护结构侧向位移速度和幅度均较小, 均在报警值控制范围以内。

通过以上结果分析显示, 本工程采用桩基托换、盖挖逆作法, 并通过合理的施工组织安排, 将基坑施工对周边环境的影响控制在安全范围内, 确保了本工程的安全实施, 是安全可行的。

5 结论及建议

以深圳地铁 7 号线某立交桥下地铁车站深基坑为例, 从数值模拟、信息化施工、现场监控量测等方面进行全面的分析, 得到以下结论和启示:

(1) 桩基托换施工期间, 对立交桥的竖向沉降影响较大, 甚至出现抬升情况, 需根据监测情况实时调整临时受力千斤顶的顶力。

(2) 桩基托换在严格控制千斤顶顶力、信息化施工前提下, 桩基托换对立交桥的竖向沉降影响较小。

(3) 逆作法具有较好的限制水平变形效果。

(4) 基坑工程地域性特点非常显著, 各地应研究和探索适合当地土质和环境的深基坑支护工法。

参考文献(References)

[1] 陈湘生. 深圳地铁 2 号线工程创新与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (Chen Xiangsheng. Innovation and practice of Shenzhen Metro Line 2 [M]. Beijing: People's Communications Press, 2014. (in Chinese))

[2] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 620-626. (Xu Zhonghua, Wang Weidong. Deformation Control Criteria of Deep Excavations [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 620-626. (in Chinese))

[3] 王卫东, 朱合华, 李耀良. 城市岩土工程与新技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增 1): 1274-1291. (Wang Weidong, Zhu Hehua, Li Yaoliang. Urban geotechnical engineering and new technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supp.1): 1274-1291. (in Chinese))

[4] 苏卜坤, 姜燕, 姚丽娜. 深圳市某大型地铁车站盖挖

逆作法设计探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增 1): 728-734. (Su Bokun, Jiang Yan, Yao Lina. Design of cover and excavation method for a large metro station in Shenzhen [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Supp.1): 728-734. (in Chinese))

[5] 许满吉. 吊脚连续墙在深圳地铁 5 号线深基坑施工中的应用[J]. 铁道标准设计, 2011(8): 89-93. (Xu Maji. Application of partial diaphragm walls in the deep foundation pits on Shenzhen Metro Line 5 [J]. Railway Standard design 2011(8): 89-93. (in Chinese))

[6] 毕经东. 地铁施工中的桩基托换技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2007. (Bi Jingdong. Study on technology of pile foundation underpinning in subway construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway Institute, 2007. (in Chinese))

[7] 陈远元, 程刚. 桩基托换技术研究与设计[J]. 广东土木与建筑, 2005(10): 15-16, 19. (Chen Yuanyuan, Cheng Gang. Study on the pile underpinning technology and its design [J]. Guangdong Civil Engineering & Construction, 2005(10): 15-16, 19. (in Chinese))

[8] 丁红军, 王琪, 蒋盼平. 地铁盾构隧道桩基托换施工技术研究[J]. 隧道建设, 2008, 28(2): 209-212. (Ding Hongjun, Wang Qi, Jiang Panping. Pile foundation underpinning technology applied in construction of shield-bored tunnels [J]. Tunnel Construction, 2008, 28(2): 209-212. (in Chinese))

[9] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (Ye Shulin, Ye Guanbao. Ground treatment and underpinning technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))

[10] 金方方, 徐前卫, 马忠政, 等. 桥梁下方桩基托换过程中开挖暴露长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 396-403. (Jin Fangfang, Xu Qianwei, Ma Zhongzheng, et al. Study on the pile exposure length during the construction process of pile underpinning under the road bridge [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 396-403. (in Chinese))

[11] 邹伟彪, 张冬梅, 蔡雄威. 基坑开挖对邻近地铁变形的时间监测与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 8(增 2): 1729-1736. (Zou Weibiao, Zhang Dongmei, Cai Xiongwei. Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 8(Supp.2): 1729-1736. (in Chinese))