

长距离上叠并行的基坑开挖对既有下卧隧道的施工影响与变形控制*

杜红劲¹ 段 罗² 杨 革² 徐前卫³ 崔越榜³

(1. 深圳市市政工程质量安全监督总站, 518034, 深圳; 2. 中铁二局第五工程有限公司, 610073, 成都;
3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 上叠并行的基坑合理加固和开挖是保证基坑稳定和下卧的既有隧道位移控制的关键。合理选择基坑开挖施工方案, 可以有效控制既有隧道变形并保障施工中基坑的安全稳定。方法: 依托深圳岗厦北枢纽南区基坑工程实例, 采用有限元数值模拟的方法对施工过程进行模拟, 分析了不同降水深度和不同加固范围条件下的基坑开挖方案对既有下卧隧道变形规律的影响; 根据对下卧隧道变形控制效果的分析, 对施工方案进行比选, 优选了合理的施工方案; 最后经现场实测数据加以验证。结果及结论: 研究结果表明: 长距离上叠并行的上方基坑开挖易引起既有下卧隧道产生较大竖向位移; 现场监测结果与对应的数值模拟结果较为一致, 推荐的降水至隧道底部及坑底以下抽条加固的方案可有效控制既有下卧隧道的位移。

关键词 基坑开挖; 既有隧道; 变形控制; 数值模拟; 施工优化

中图分类号 U433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.028

Construction Influence of Long-distance Parallel Over-spanning Foundation Pit Excavation on Existing Underlying Tunnel and Deformation Control

DU Hongjin, DUAN Luo, YANG Ge, XU Qianwei, CUI Yuebang

Abstract Objective: Reasonable reinforcement and excavation of parallel over-spanning upper foundation pit are key to ensuring foundation pit stability and controlling existing underlying tunnel displacement. Construction scheme for foundation pit excavation should be reasonably selected for effectively controlling existing tunnel deformation and ensuring foundation pit safety and stability throughout construction. Method: Based on the foundation pit engineering practical case of Gangxia North Hub South Area in Shenzhen, finite element numerical simula-

tion method is used to simulate the construction process, the impact of different foundation pit excavation schemes under different dewatering depths and reinforcement range conditions on the deformation law of the existing underlying tunnel is analyzed. According to the analysis of the underlying tunnel deformation control effect, the construction plans were compared and selected, and a reasonable construction scheme is selected and finally verified by field-measured data. Result & Conclusion: Research results show that excavation of the long-distance parallel over-spanning upper foundation pit is prone to cause a large vertical displacement of the existing underlying tunnel; the field-monitored results are in good agreement with the corresponding numerical simulation results, and the recommended scheme of dewatering to tunnel bottom and strip reinforcement below the pit bottom can effectively control the displacement of the existing underlying tunnel.

Key words foundation pit excavation; existing tunnel; deformation control; numerical simulation; construction optimization

First-author's address Shenzhen Municipal Engineering Quality and Safety Supervision Station, 518034, Shenzhen, China

0 引言

近年来,中国的城市轨道交通建设和车站规模不断扩大,如何合理地选择基坑施工方案以有效控制既有隧道的变形位移并保障施工中基坑的安全稳定,已成为这类工程研究的难题和焦点^[1]。

针对基坑上跨既有隧道的合理施工方案及施工影响性研究,国内外已有学者完成了大量工作。例如,文献[2]分析了在建地铁车站区间基坑周边环境,其中将淤泥质黏土地层对深基坑失稳

* 国家自然科学基金项目(41672360)

破坏的影响作为重点研究对象,揭示深基坑失稳破坏机理;文献[3]研究了无隧道保护措施、采取地层加固、抗拔桩及地层加固加抗拔桩等3种不同工况对已运营隧道的影 响;文献[4]研究了多种隧道保护方案的效果,研究了隧道位移的主要原因;文献[5]研究了基坑开挖引起隧道上浮的原因,并结合工程经验提出了不同的控制既有隧道上浮的坑底加固措施;文献[6]提出了“降压疏干、按需降水、抽灌结合”的降水技术有助于控制坑底隆起和既有隧道上浮;文献[7]等分析了天津市某基坑在施工时对邻近隧道的变形影响;文献[8]研究了基坑施工设计方案对盾构隧道变形控制的有效性;文献[9]分析了上覆地下室开挖对既有隧道应力分布规律和变形特征的影响;文献[10]研究了不同参数露天基坑开挖对既有隧道的影响,并讨论了合理的土方开挖顺序。

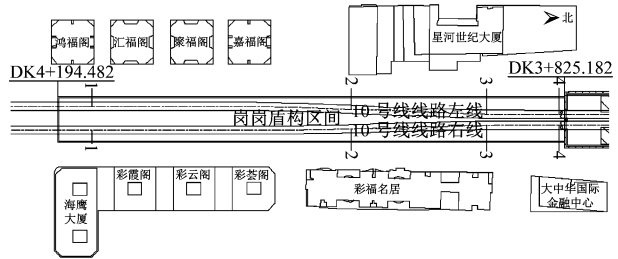
上述研究表明基坑合理加固和开挖是保证基坑稳定和既有隧道位移控制的关键。然而关于与既有下卧隧道长距离并行的基坑开挖对既有隧道上浮控制的研究较少。本文结合具体的工程案例,运用有限元方法模拟不同降水、加固方案下的基坑开挖过程,分析与既有下卧隧道长距离并行的基坑开挖对既有下卧隧道受力特性和变形规律的影响,优选了施工方案,并结合现场监测数据进行验证。

1 工程概况

1.1 工程背景

岗厦北枢纽南区基坑位于深圳福田区市民中

心东侧,深南大道与彩田路的交叉口,在深圳地铁10号线(以下简称“10号线”)车站南侧的上方。其设计起点的地铁10号线里程为DK3+825.182,终点为DK4+194.482,如图1所示。结构总长为369.300 m,标准宽度为32.000 m,基坑深度为13.216 m。主体基坑采用800 mm厚的地下连续墙+内支撑围护结构形式。岗厦北枢纽周边的建筑物密集、管线复杂,因此基坑施工期间对周围环境稳定性的影响十分重要。



注:1-1、2-2、3-3、4-4 为基坑典型剖面位置。

图1 南区基坑平面示意图

Fig.1 Plan of foundation pit in the south area

1.2 工程地质和水文地质

根据地勘报告,南区基坑原始地貌为台地及其间沟谷地貌单元,所处地层从上至下为:素填土、素填土(碎石)和砾质黏性土。车站、暗挖区间隧道结构底板主要位于砾质黏性土和全风化花岗岩地层中。岗厦北枢纽南区基坑纵断面地层示意图如图2所示,其主要地层可分为6层:①₁素填土、⑦₃砾质黏性土、⑧₁全风化花岗岩、⑧₂₋₁砂土状强风化花岗岩、⑧₃中等风化花岗岩和⑧₄微风化花岗岩。

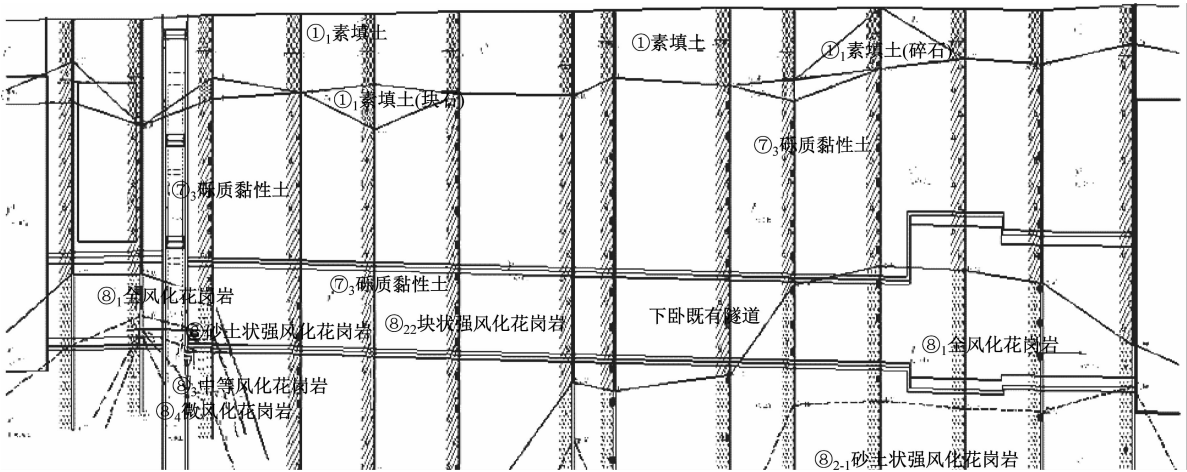


图2 岗厦北枢纽南区基坑纵断面地层示意图

Fig.2 Profile stratigraphical diagram of foundation pit in the south area of Gangxia North Hub

场地内地下水主要有 2 种类型：一是松散岩类孔隙水，主要赋存于第四系松散地层中；二是基岩裂隙水，主要赋存于块状强风化和中等风化带中，略具承压性。

2 基坑开挖过程数值模拟

2.1 计算断面选取

针对长大基坑开挖对并行下卧的长轨行区的施工影响研究,采用二维有限元分析有较好的适用性。选取图 1 中的 4 个典型剖面进行各施工工序对既有下卧隧道影响的数值模拟研究。剖面 1-1—剖面 4-4 处的既有隧道与基坑断面空间位置关系示意图如图 3 所示。

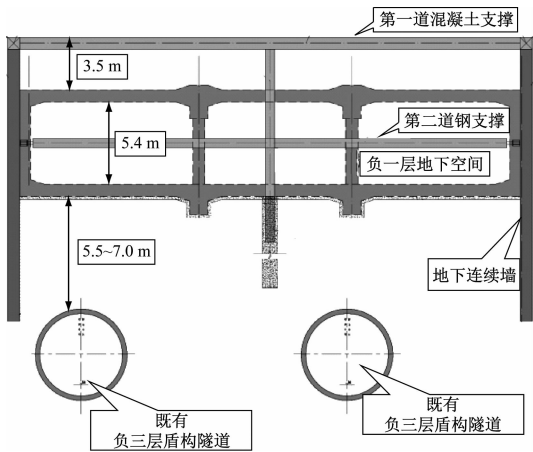


图 3 既有隧道与基坑断面空间位置关系图

Fig. 3 Spatial relationship diagram of tunnel-foundation pit profile

2.2 模型建立

以剖面 2-2(DK3+981)为例进行计算,该处地层以黏土为主,地层自上而下依次为素填土、素填土(碎石)、砾质黏性土、全风化花岗岩和强风化花岗岩。剖面 2-2 的计算模型如图 4 所示。其尺寸为 133 m(宽)×54 m(高)。10 号线隧道底部至模型底部约为 30 m,基坑侧壁至模型边缘约为 50 m。地层采用二维平面应变单元进行模拟。本构模型选用修正 Mohr-Culumb 准则模型,而地下连续墙、内

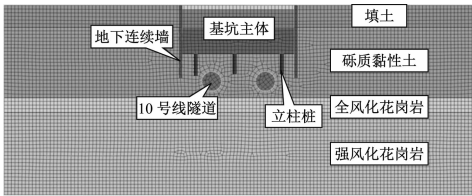


图 4 剖面 2-2 的计算模型

Fig. 4 Calculation model of profile 2-2

支撑、立柱桩和隧道衬砌等采用梁单元进行模拟,按弹性材料考虑。相关计算参数的选取参照表 1 与表 2 所示。

表 1 土体力学参数表

Tab. 1 Soil mechanical properties parameters

| 土层名称 | 重度/ (kN/m ³) | 压缩模量/ MPa | 内摩擦角/ (°) | 黏聚力/ kPa |
|--------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 素填土 | 18.2 | 5 | 15 | 12.0 |
| 砾质黏性土 | 18.1 | 6 | 23 | 22.0 |
| 全风化花岗岩 | 18.6 | 8 | 24 | 24.5 |
| 强风化花岗岩 | 18.9 | 12 | 27 | 25.5 |

表 2 结构计算参数表

Tab. 2 Structural calculation parameters

| 结构名称 | 重度/ (kN/m ³) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 |
|-------|-----------------------------|--------------|-----|
| 地下连续墙 | 24 | 30 000 | 0.2 |
| 混凝土支撑 | 24 | 30 000 | 0.2 |
| 钢支撑 | 76 | 250 000 | 0.3 |
| 立柱桩 | 76 | 250 000 | 0.2 |
| 隧道衬砌 | 24 | 30 000 | 0.2 |

2.3 工况计算

基坑采用明挖顺作法施工,施工步序 S1 和施工步序 S2 分别是初始应力场分析和隧道开挖,其中位移清零,施工步序 S3—施工步序 S5 分别是开挖第一至第三层土,施工步序 S6—施工步序 S8 分别是底板施工、结构施工及回填和正常使用。4 个断面分别记为工况 1—工况 4,各工况计算施工步序相同,然后综合比较分析 4 个剖面的计算结果。

2.4 结果分析

为研究 4 种工况下土体开挖的不利影响,将各施工步序下的坑底最大竖向和水平位移、隧道最大竖向和水平位移及隧道衬砌最大剪力和弯矩分布情况等进行比较分析。

2.4.1 竖向位移

图 5 为基坑底板施作完后剖面 2-2 处土体的竖向位移云图。由图 5 可知,坑底土体出现隆起,其中最大变形达 32.24 mm。这显然对坑底之下的隧道安全不利。

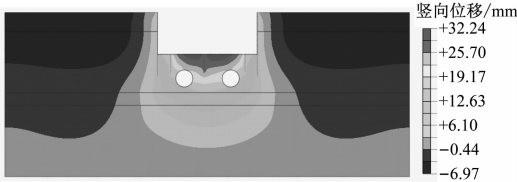


图 5 基坑底板施作完后剖面 2-2 处的土体竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement nephogram of soil at section 2-2 after foundation pit bottom plate construction

图6为4种工况下不同施工工序的土体最大竖向位移变化曲线。由图6可以看出,几种工况下均是在基坑土体开挖完成后隆起最大,且在主体结构施工后有所回落,其中工况2的隆起位移最大。

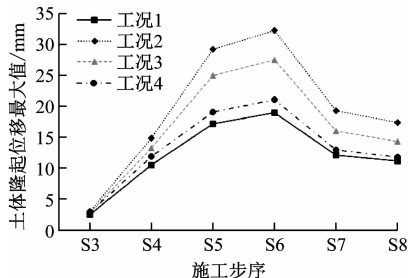


图6 4种工况下不同施工工序的土体最大竖向位移变化曲线

Fig. 6 Maximum uplift displacement curves of pit bottom soil at different construction steps under 4 different working conditions

2.4.2 水平位移

图7为基坑底板施作完后剖面2-2处土体的水平位移云图。由图7可知,土体水平位移最大值发生在基坑底部靠近地下连续墙区域,其最大位移量为11.88 mm。由于水平变形主要集中在地下连续墙与隧道之间的土体,显然对既有隧道的安全不利。

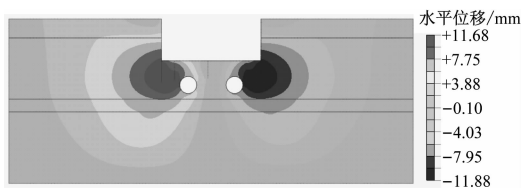


图7 基坑底板施作完后剖面2-2处土体的水平位移云图

Fig. 7 Horizontal displacement nephogram of soil at section 2-2 after foundation pit bottom plate construction

图8为4种工况下不同施工工序的土体最大水平位移变化曲线。由图8可知,几种工况下均是在第二道支撑施作后水平位移达到最大,之后趋于稳定,其中工况4的位移量最大。对于地下连续墙的位移量,剖面1-1、剖面2-2和剖面4-4较为接近,约为10.00~12.00 mm,而剖面3-3的位移量明显较小,只有8.71 mm,这是由于在4个剖面中,只有剖面3-3的岩层较浅,地下连续墙深入岩层,因此基坑自身安全性较高,地下连续墙变形最小。

2.4.3 隧道竖向位移

图9为基坑土体开挖完成后剖面2-2处既有隧道竖向位移云图。由图9可知,既有隧道出现整体上浮,其中拱顶处隆起量最大,达到了23.27 mm。

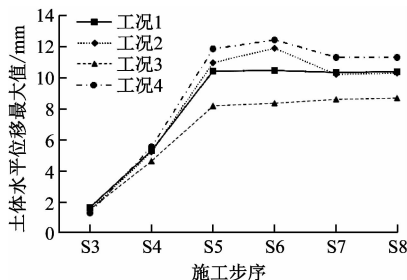


图8 4种工况下不同施工工序的土体最大水平位移变化曲线

Fig. 8 Maximum horizontal displacement curves of soil at different construction steps under 4 different working conditions

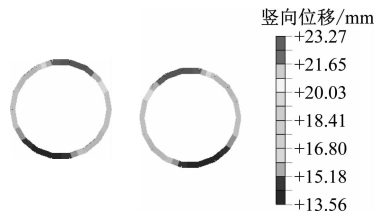


图9 基坑土体开挖完成后剖面2-2处既有隧道竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement nephogram of the existing tunnel at section 2-2 after foundation pit bottom plate construction

图10为4种工况下不同施工工序的既有隧道最大竖向位移变化曲线。由图10可知,4个剖面既有隧道隆起值大小顺序为:剖面2-2隆起值>剖面3-3隆起值>剖面1-1隆起值>剖面4-4隆起值。4种工况下均是在基坑土体开挖完成后的隆起值为最大,且在主体结构施工后有所回落。其中,工况2的隆起变形最大,因为此处隧道完全处于砾质黏性土层,地质条件最差;剖面4-4由于既有隧道大部分处于岩层,地质条件最好,且距基坑较远,因而变形量最小。

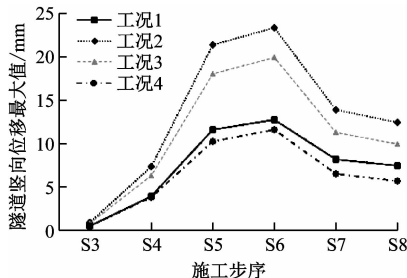


图10 4种工况下不同施工工序的既有隧道最大竖向位移变化曲线

Fig. 10 Maximum vertical displacement curve of the existing tunnel at different construction steps under 4 different working conditions

2.4.4 隧道水平位移

图 11 为基坑底板施作完后剖面 2-2 处既有隧道水平位移云图。由图 11 可知,基坑开挖完成后,既有隧道向基坑内侧的水平位移最大值为 10.81 mm。

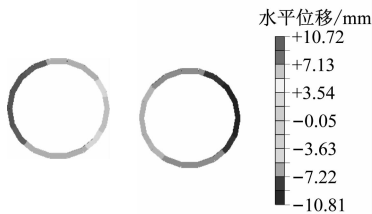


图 11 基坑底板施作完后剖面 2-2 处既有隧道水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacement nephogram of the existing tunnel at section 2-2 after foundation pit bottom plate construction

图 12 为 4 种工况下不同施工步骤的既有隧道最大水平位移变化曲线。由图 12 可知,4 种工况下均是在基坑土体开挖完成后隆起值为最大,且在主体结构施工后有所回落。其中,工况 2 的变形最大。对于 4 个剖面既有隧道水平位移,大小顺序为:剖面 2-2 位移值 > 剖面 1-1 位移值 > 剖面 4-4 位移值 > 剖面 3-3 位移值。在剖面 3-3 与剖面 4-4 中,10 号线左、右线隧道相距较近,且左、右线隧道中间有施工立柱桩,因此向中间靠拢趋势较弱。

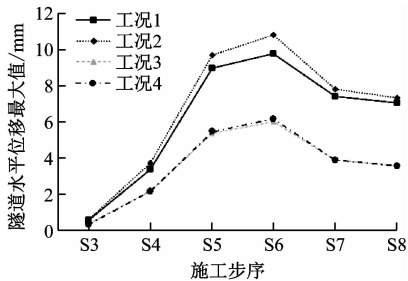


图 12 4 种工况下不同施工步骤的隧道最大水平位移变化曲线

Fig. 12 Maximum tunnel horizontal displacement curves at different construction steps under 4 different working conditions

综上可知,基坑开挖会导致剖面 2-2 产生较大的土体和隧道位移,因此以剖面 2-2 作为最不利断面开展后续研究。

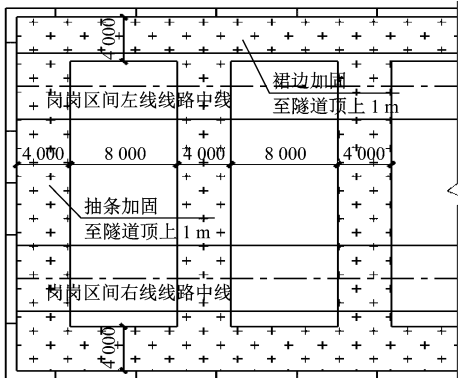
3 施工方案比选

3.1 施工方案

对最不利地质情况的剖面 2-2 分别进行不同降水和加固方案的比较研究,提出了 7 种方案:

1) 方案 1—方案 4 仅考虑基坑降水。方案 1 为降水至基坑底,方案 2 为降水至隧道顶,方案 3 为降水至隧道中部,方案 4 为降水至隧道底部。

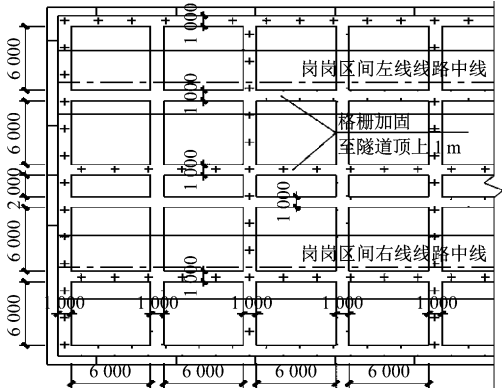
2) 方案 5—方案 7 为考虑在基坑降水的前提下进行坑底加固。方案 5 为裙边 4 m + 抽条 4 m (间隔 8 m) 加固,方案 6 为格栅 1 m (间隔 6 m) 加固,方案 7 为既有隧道正上方 6 m + 抽条 4 m (间隔 10 m) 加固,分别如图 13—图 15 所示。



注:除标注外,其余单位为 mm。

图 13 方案 5 坑底加固形式

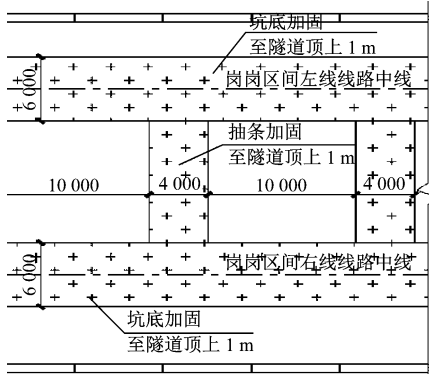
Fig. 13 Pit bottom reinforcement form in scheme 5



注:除标注外,其余单位为 mm。

图 14 方案 6 坑底加固形式

Fig. 14 Pit bottom reinforcement form in scheme 6



注:除标注外,其余单位为 mm。

图 15 方案 7 坑底加固形式

Fig. 15 Pit bottom reinforcement form in scheme 7

3.2 降水开挖计算结果分析

在基坑开挖过程中,土体卸载达最大时产生的坑底隆起与既有隧道上浮是影响结果的关键因素,因此对开挖完成第三层土体后(至基坑垫层底)的土体变形和既有隧道位移作为方案合理性的关键因素。

表 3 为开挖最后一层土前降水采用方案 1—方案 4 的计算结果。由表 3 可知,仅考虑基坑降水情况下基坑开挖引起的既有隧道竖向变形最大值均超过了 10 mm 的控制值,无法有效控制既有隧道上浮。方案 4 既有隧道最大竖向位移为 14.82 mm,坑外地地面最大沉降为 32.40 mm,对既有隧道上浮控制最好,但对坑外地地面沉降影响显著。

表 3 开挖最后一层土前降水采用方案 1—方案 4 的计算结果

Tab. 3 Dewatering to the calculation results in schemes 1-4 before excavation of the last soil layer

| 方案 | 隧道竖向位移/ mm | 坑底隆起/ mm | 坑外地面 沉降/mm |
|----|---------------|-------------|---------------|
| 1 | 28.02 | 34.84 | 19.80 |
| 2 | 23.12 | 29.26 | 24.69 |
| 3 | 18.98 | 25.14 | 28.47 |
| 4 | 14.82 | 20.96 | 32.40 |

综合考虑不同降水方案,最终选取了方案 4 作为降水方案,并基于此考虑地层加固条件下基坑开挖对既有隧道变形的影响。

3.3 坑底加固数值模拟结果比较

据方案 4 的降水,分别对方案 5—方案 7 建立模型,各项最大竖向位移统计如表 4 所示。相对于方案 4,加固方案 5—方案 7 对既有隧道和土体变形均有很大程度的控制,其中方案 7 的既有隧道竖向最大位移为 10.27 mm。

表 4 方案 5—方案 7 各项最大竖向位移统计表

Tab. 4 Statistics of maximum deformation of each item in scheme 5-7

| 方案 | 隧道竖向 位移/mm | 坑底隆起/ mm | 坑外地面 沉降值/mm |
|----|---------------|-------------|----------------|
| 5 | 11.47 | 16.81 | 30.52 |
| 6 | 10.36 | 15.55 | 30.22 |
| 7 | 10.27 | 14.49 | 29.60 |

方案 7 的抗浮效果最优,而对基坑周边地层影响也较低。从工程安全性角度出发,推荐方案 7。

4 实测结果分析

根据施工现场条件,本工程实际采取降水至坑底以下 1 m 深度,加固范围为隧道正上方 3~6 m,并采取抽条 6 m(间隔 10 m)的加固形式。

在基坑开挖过程中,对基坑剖面 2-2 东、西两侧地面按日进行监测,东侧测点 DBC-13-01 距离地下连续墙外边缘 14.06 m,西侧测点 DBC-13-05 距离地下连续墙外边缘 7.47 m,监测点布置见图 16。

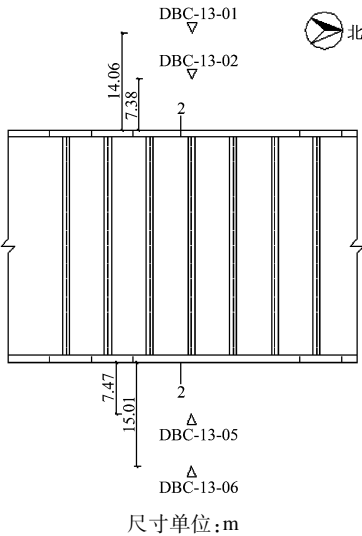


图 16 剖面 2-2 东西两侧监测点布置图

Fig. 16 Layout of monitoring points on the east and west sides of section 2-2

图 17 为左、右线的 DBC-13-01 与 DBC-13-05 监测点最大累计竖向位移。随着基坑开挖进行,既



图 17 左右线的 DBC-13-01 与 DBC-13-05 监测点最大累计竖向位移

Fig. 17 Maximum cumulative deformation at monitoring points DBC-13-01 and DBC-13-05 on the left and right lines

有隧道会发生竖向位移和水平位移,实测拱顶 DBC-13-05 测点最大竖向位移为 4.6 mm,拱腰处水平位移最大值为 4.9 mm,均不影响地铁正常运营。

图 18 为随基坑施工剖面 2-2 东、西侧地面累计沉降的实测局部历时曲线。基坑开挖加剧地面沉降,地面沉降值随着与基坑地下连续墙外边缘距离的增加而减小。由于水平分块东侧的土方开挖先于西侧,东侧地面沉降比西侧大。数值模拟沉降量与地面西侧实测沉降量吻合度高,而较东侧地面实测沉降量大,说明采取该施工方法对基坑施工周围扰动控制的有效性。

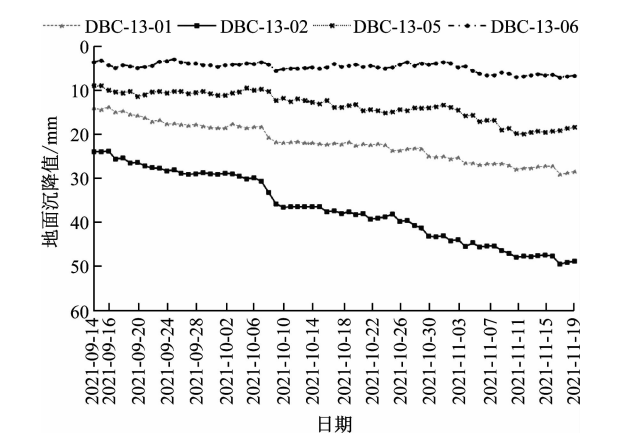


图 18 随基坑施工剖面 2-2 东、西侧地面累计沉降值局部历时曲线

Fig. 18 Settlement local time-history curve of monitoring points on the east and west sides of profile 2-2 throughout foundation pit construction

5 结论

- 1) 基坑开挖易引起既有隧道整体上浮和水平内拢,剖面 2-2 的土体和既有隧道的位移最为不利。
- 2) 降水施工对既有隧道变形存在影响,可以适当减弱土方开挖引起的既有隧道上浮影响。因此,实际施工中应充分考虑降水引起的土体固结沉降。
- 3) 基坑降水需要与坑底土体加固相配合方可有效控制下卧隧道上浮在可控范围之内。根据数值模拟结果,采用隧道上部 6 m + 抽条 4 m (间隔 10 m) 的坑底加固方案其抗浮效果最好。
- 4) 数值模拟计算得到隧道上浮量相对监测数据偏于安全,数值模拟比选得到的降水及加固方案应用于实际基坑加固的效果良好。

参考文献

[1] 刘长宝, 邹金杰, 彭加强. 既有地铁隧道上方明挖基坑施工

方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 133.
LIU Changbao, ZOU Jinjie, PENG Jiaqiang. Analysis of open-cut foundation pit construction scheme above existing metro tunnel [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 133.
[2] 于雅琳, 武科, 王亚君. 深圳地铁在建明挖隧道区间基坑工程施工过程数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 158.
YU Yalin, WU Ke, WANG Yajun. Numerical simulation of deep open cut foundation pit construction in large subway station of Shenzhen subway[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 158.
[3] 丁祖德, 计霞飞, 张博, 等. 基坑开挖对既有公路隧道的影响分析和保护措施[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 107.
DING Zude, JI Xiafei, ZHANG Bo, et al. Analysis on influence of foundation pit excavation on existing highway tunnels and protective measures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 107.
[4] 范东方, 孙文昊, 胡威东. 复杂环境条件下地铁隧道保护方案探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 2): 861.
FAN Dongfang, SUN Wenhao, HU Weidong. Discussion on protecting scheme of shield tunnel under complicated surrounding circumstance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 861.
[5] LEI Y, HE X. Floating control technology of lower collinear metro shield section during cut-and-cover tunnel construction: a case study of rapid rehabilitation project on Guimiao Road in Shenzhen [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1888.
[6] 郭彦兵. 复杂环境条件下深基坑长隧道快速施工技术研究[J]. 施工技术, 2016, 45(增刊 1): 456.
GUO Yanbing. Rapid construction technology research of deep foundation excavation and long tunnel in complex environment [J]. Construction Technology, 2016, 45(S1): 456.
[7] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599.
ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599.
[8] 徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 41.
XU Zhonghua, ZONG Ludan, SHEN Jian, et al. Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 41.
[9] SHI J, Ng C W W, CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 146.
[10] BEYABANAKI A R, GALL V. 3D numerical parametric study of the influence of open-pit mining sequence on existing tunnels [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 459.

(收稿日期:2021-02-06)