

上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形影响的 监测与数值分析

何小龙¹,董浩伟¹,陈燕青¹,代建波²

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安石油大学, 陕西 西安 710065)

摘要:以厦门第二西通道A3标段上跨地铁一号线明挖基坑工程为背景,研究基坑开挖过程对地铁区间隧道变形的影响。依据监测数据对不同开挖工序下的隧道结构的竖向位移和水平相对收敛进行分析,建立基坑支护体系与土体的三维有限元模型,并将结构竖向位移的模拟结果同监测数据进行了对比。分析结果表明,地铁区间隧道与基坑中央的距离与其隆起量成负相关,开挖土体与区间隧道的距离与其隆起量成负相关,开挖底层土所引起的相对收敛量大于其余工况,结构的相对收敛变化速率和开挖土体与隧道距离成正相关,模拟结果与监测数据略有差异,但两者变形规律基本一致。

关键词:地铁隧道;基坑支护结构;变形影响;监测分析

中图分类号:U459.5

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2019)04-0039-06

Field Monitoring and Numerical Analysis of the Influence of Tunnel Deformation of Foundation Excavation Above the Subway

HE Xiaolong¹, DONG Haowei¹, CHEN Yanqing¹, DAI Jianbo²

(1. The First Engineering Bureau, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: A study on tunnel deformation caused by foundation excavation above is carried out by taking the Xiamen Haicang Tunnel crossing over Xiamen Metro Line 1 as an example in this paper. The vertical displacement and horizontal relative convergence of the tunnel under different excavation procedures are analyzed based on the filed monitoring data. A three-dimensional finite element model of foundation pit supporting system and soil around is established to analyze the effect of excavation of such foundation pit on the deformation of tunnel. Results show that the distance between the subway tunnel and the center of the foundation pit is negatively correlated with its uplift, the distance between excavated soil and interval tunnel is negatively correlated with its uplift, the relative convergence caused by excavation of subsoil is greater than that in other working conditions, the relative convergence rate of the structure is positively correlated with the distance of the tunnel, and the simulation results are slightly different from the monitoring data, but the deformation rules are basically the same.

Keywords: metro tunnel; foundation pit support structure; deformation effects; monitoring analysis

城市用地的日趋紧张,使得诸多城市向地下寻求发展空间,开始修建诸多市政公路隧道。而这些隧道有时需上跨地铁区间隧道,这给公路隧道明挖基坑支护体系的变形控制提出了很高的要求,故需对此类工程的基坑开挖对地铁隧道变形的影响进行

专项的研究,以保证安全施工。张治国等^[1]在周围土体荷载卸荷影响的基础上,提出基坑开挖阶段对邻近区间隧道阶段性分析的方法。曹顺^[2]结合工程实际分析了列车动荷载对基坑围护结构的影响和基坑开挖时既有地铁隧道的变形情况。高广运

等^[3]根据邻近区间隧道与基坑的位置关系,分析了明挖基坑开挖步序对邻近区间隧道变形的影响。唐鹏军^[4]结合一地铁出入口深基坑工程建立三维模型,进行了施工过程的动态模拟与地铁出入口的安全评价。邹伟彪等^[5]借助模拟分析结合现场自动监测,研究了基坑开挖对邻近既有地下结构的影响。唐仁等^[6]、宋兆锐等^[7]、陈思明等^[8]、戚长军等^[9]、高强等^[10]建立了基坑有限元模型对地铁区间隧道影响进行了分析。赵志强等^[11]针对基坑开挖对区间隧道影响评估,提出了数值分析与理论解析相结合的新思路。丁毅等^[12]对超长、超大基坑开挖对临近地铁结构安全影响进行了数值模拟分析,并介绍了控制变形影响采取的工程措施。丁乐^[13]、吕高乐等^[14]分析了基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道的变形影响。魏纲等^[15-16]对不同加固措施影响进行了数值模拟,并收集了多个基坑工程实例,对实测数据进行了理论分析和统计分析。雷裕霜^[17]通过理论分析和数值模拟对下卧地铁变形控制措施及监测方案提出了相应的工程建议。

上述文献对基坑开挖对周边环境的影响进行了分析,但未能对超宽基坑对超近上跨地铁结构的变形影响进行专项分析,故本文依托厦门第二西通道 A3 标段石鼓山立交明挖基坑上跨地铁一号线工程,结合区间隧道变形监测数据,建立基坑支护体系与土体的三维有限元模型,对此类基坑开挖时对区间隧道变形的影响进行分析。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

厦门第二西通道是连接厦门岛外海沧区和厦门本岛的重要交通公路,工程在石鼓山立交段需上跨厦门地铁一号线火炬园—高殿区间隧道,采用明挖暗埋法施工。按交通疏解方案,石鼓山立交段基坑分三期实施,分为 3 个区段,其中上跨地铁基坑对区间隧道影响最大。该段基坑长 54.9 m,宽 31.6 m,开挖深度 11.3 m ~ 13.7 m。上跨地铁区段基坑与区间隧道斜交,约 55°。明挖基坑与地铁 1 号线区间隧道的平面关系如图 1 所示。

地铁区间隧道为单线隧道,采用矿山法施工,衬砌横断面如图 2 所示。区间隧道监测点布设见图 3。

1.2 工程地质条件

根据地勘报告,基坑工程场区属剥蚀残丘地带。从地表往下主要地层依次有:杂填土、粉质黏土、全

风化花岗岩、砂砾状强风化花岗岩、弱风化花岗岩等。岩土层物理力学参数如表 1 所示。场区内的地下水以上层滞水为主,补给为大气降水及松散岩体孔隙水为主。

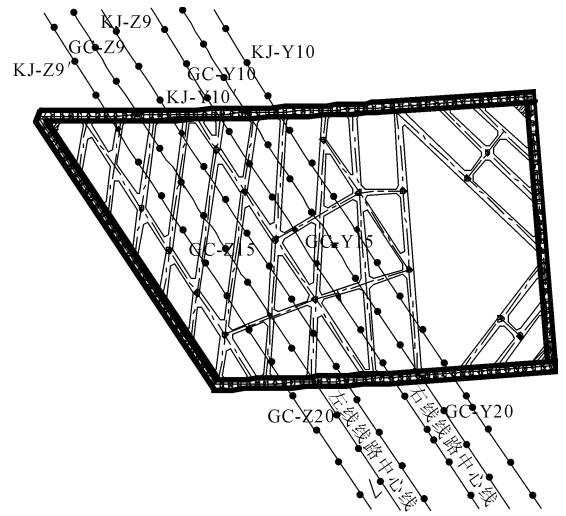


图 1 基坑支护结构与地铁一号线平面位置图

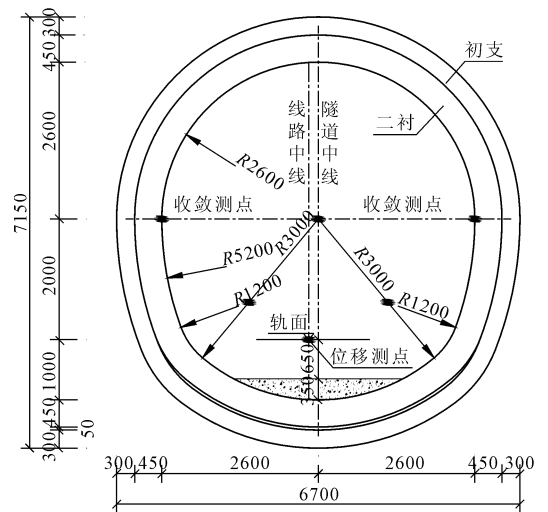


图 2 区间隧道结构横断面

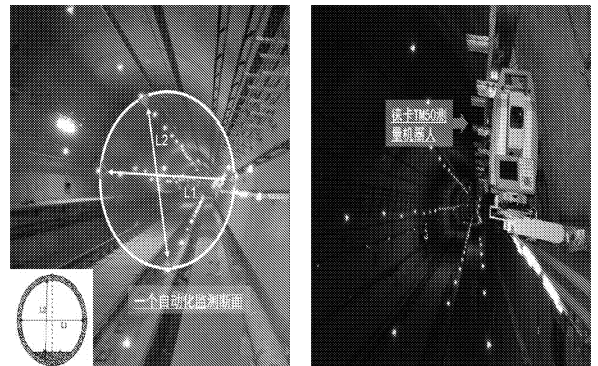


图 3 区间隧道监测点布设

表 1 岩土体参数

地层序号	地层名称	压缩模量	泊松比	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
1	1-1 杂填土	5.0	0.30	18.0	12	15
2	2-3 粉质黏土	5.5	0.28	19.0	30	13
3	3 残积砾质黏性土	6.0	0.26	19.4	25	22
4	5-1 全风化花岗岩	6.5	0.24	18.9	26	25
5	5-2-1 砂砾状强风化花岗岩	10.0	0.24	21.0	28	27
6	5-2-2 碎块状强风化花岗岩	15.0	0.24	22.0	30	28
7	5-3 中风化花岗岩	20.0	0.22	26.1	50	32

2 基坑支护体系

基坑平面形状近梯形,上、下边长为 66 m、45 m,宽 31.6 m。围护结构采用 C35 强度等级 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}@1\ 200\ \text{mm}$ 灌注桩 + $\Phi 800\ \text{mm}@1\ 200\ \text{mm}$ 旋喷桩止水帷幕。桩顶冠梁尺寸为 $1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$ 。基坑支撑体系为 1 道钢筋混凝土支撑 + 2 道钢支撑。其中,第 1 道为 $900\ \text{mm} \times 900\ \text{mm}$ 混凝土支撑;第 2、3 道为 $\Phi 609\ \text{mm} \times 16\ \text{mm}$ 钢支撑,端部支撑在两侧钢围檩上。坑底采用袖阀管注浆 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$ 梅花型布置,加固深度为 4 m。混凝土系梁尺寸为 $600\ \text{mm} \times 600\ \text{mm}$,刚系梁采用两 40 a 槽钢;立柱桩直径 $1\ 000\ \text{mm}$ 。上跨区间隧道基坑横断面图见图 4。

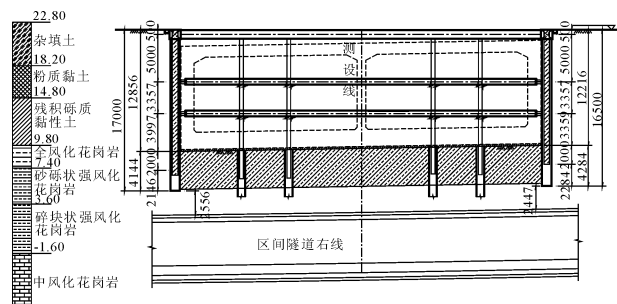


图 4 基坑支护结构横断面

3 区间隧道监测数据分析

3.1 道床竖向位移分析

基坑开挖过程中,由于卸荷的作用,基坑下区间隧道段会有一些的隆起。为了反映开挖过程中隧道变形情况,本文选取了道床竖向位移和隧道结构相对收敛,对它们在开挖中的变化情况进行分析。道床竖向位移和隧道结构相对收敛测点各有 29 个(对),沿隧道轴线间隔 5 m 布置,测点平面布设见图 1,横断面布设见图 2 与图 3。基坑开挖阶段见表 2。图 5 和图 6 分别为不同施工工况下区间隧道左线和右线的道床竖向位移变化曲线。

表 2 基坑施工阶段

工况编号	基坑施工阶段
1	围护桩、立柱桩、格构柱施作,基底加固
2	开挖第一层土,施作第一道混凝土支撑
3	开挖第二层土,施作第二道钢支撑
4	开挖第三层土,施作第三道钢支撑
5	开挖至基坑底

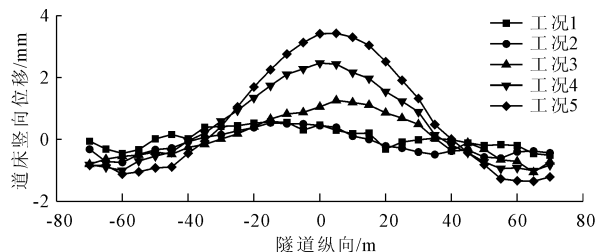


图 5 左线隧道竖向位移

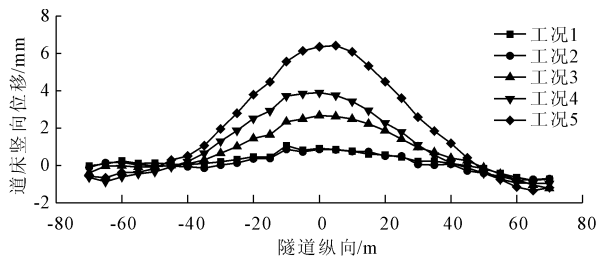


图 6 右线隧道竖向位移

由图中可以看到,在 $-20\ \text{m} \sim 20\ \text{m}$ 基坑范围内的区间隧道表现为隆起,在基坑中间附近隆起量最大,基坑范围外由隆起逐渐转为少量下沉。左线隧道最大隆起量为 $3.43\ \text{mm}$,右线隧道为 $6.42\ \text{mm}$,大 87.2%,主要是由于右线区间隧道更靠近基坑中央,隆起更明显。五种工况下,隧道最大隆起量左线分别为 $0.57\ \text{mm}$ 、 $0.54\ \text{mm}$ 、 $1.26\ \text{mm}$ 、 $2.47\ \text{mm}$ 、 $3.43\ \text{mm}$;右线分别为 $1.06\ \text{mm}$ 、 $0.87\ \text{mm}$ 、 $2.68\ \text{mm}$ 、 $3.91\ \text{mm}$ 、 $6.42\ \text{mm}$,相应的各工况下左线引起隆起增量分别为 $0.57\ \text{mm}$ 、 $-0.03\ \text{mm}$ 、 $0.72\ \text{mm}$ 、 $1.21\ \text{mm}$ 、 $0.96\ \text{mm}$;右线引起隆起增量分别为 $1.06\ \text{mm}$ 、 $-0.19\ \text{mm}$ 、 $1.81\ \text{mm}$ 、 $1.23\ \text{mm}$ 、 $2.51\ \text{mm}$ 。工况 2 引起隆起量为负,主要是因为施作混凝土支撑且开

挖土层仅有 1 m, 区间隧道竖向位移整体变化都很小。可以看出, 工况 4、工况 5 即开挖下半土体引起的隆起量要大于开挖上半土体引起的隆起量。

3.2 隧道结构相对收敛分析

图 7 和图 8 分别为不同施工工况下区间隧道左线和右线的道床竖向位移变化曲线。可以看出, 沿隧道纵向相对收敛曲线呈折线波动, 与隧道竖向位移呈顺滑曲线分布有明显不同。在 $-20\text{ m} \sim 20\text{ m}$ 基坑范围内的结构相对收敛整体上大都为负值, 只在部分工况个别点上结构相对收敛为正值且较小, 这主要是因为隧道顶竖向卸荷相比水平卸荷更为明显。左、右线隧道收敛最大值都出现在 0 m 即基坑中线附近处, 分别为 -5.24 mm 、 -5.40 mm , 相比右线大 3.1% , 差异较小, 这与左右线隧道隆起量差异较大有很大不同。五个工况下, 左、右线隧道结构最大相对收敛分别为 -1.22 mm 、 -1.10 mm 、 -1.96 mm 、 -2.81 mm 、 -5.24 mm 和 -0.67 mm 、 -0.80 mm 、 -1.76 mm 、 -2.63 mm 、 -5.40 mm , 相应的各工况引起左、右线相对收敛量差异为 -1.22 mm 、 0.12 mm 、 -0.86 mm 、 -0.85 mm 、 -2.43 mm 和 -0.67 mm 、 -0.13 mm 、 -0.96 mm 、 -0.87 mm 、 -2.77 mm 。可以看出, 工况 5 即开挖土体至基坑底引起的相对收敛量要比其余工况偏大很多, 说明越靠近区间隧道开挖结构的相对收敛量变大越快。

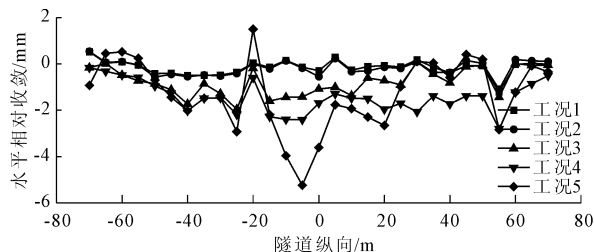


图 7 左线隧道结构相对收敛

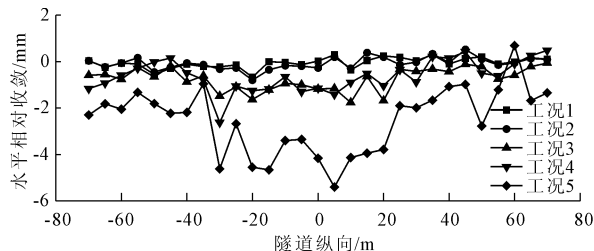


图 8 右线隧道结构相对收敛

4 数值模拟与分析

4.1 数值计算模型

本基坑工程支护体系空间不对称, 又上跨地铁区间隧道, 建立三维模型能较好反映实际, 采用有限

元软件 MIDAS/GTS 建立了基坑支护体系与土体的三维有限元模型, 并对基坑土体分层开挖进行了模拟。在模型中, 基坑围护桩按等效刚度法折算成墙, 厚度为 788 mm , 采用板单元模拟; 桩顶冠梁、混凝土支撑、钢围檩、钢支撑、格构柱、立柱桩依据实际尺寸均采用梁单元模拟; 地铁 1 号线区间隧道二衬采用板单元模拟, 岩土体采用摩尔-库仑本构模型模拟。模型尺寸为 $180\text{ m} \times 120\text{ m} \times 60\text{ m}$, 模型网格划分如图 9 所示, 基坑与区间隧道相对位置关系如图 10 所示。

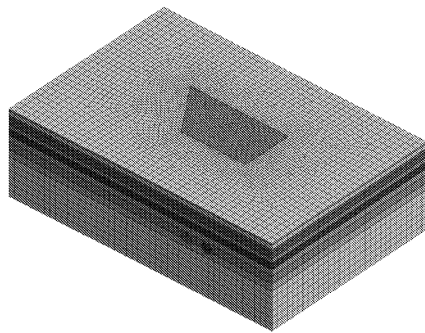


图 9 三维有限元模型

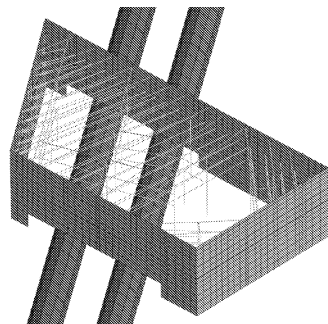


图 10 基坑与隧道相对位置关系

4.2 计算参数选取

模型中岩土体采用摩尔-库仑本构模拟; 支护结构体系刚度较大, 采用线弹性模型模拟。围护桩和立柱桩为 C35, 弹性模量取为 31.5 GPa , 泊松比取为 0.2 ; 桩顶冠梁、第一道混凝土支撑、混凝土系梁为 C30, 弹性模量取为 30 GPa , 泊松比取为 0.2 ; 钢围檩、钢支撑、格构柱弹性模量取为 210 GPa , 泊松比取为 0.25 。

4.3 结果分析

为了与监测数据道床竖向位移形成对比, 模型中竖向位移选用隧道底部位置数据。图 11 为开挖至坑底时地铁区间隧道竖向位移。可以看出, 右线隧道竖向位移相对左线隧道竖向位移较大; 基坑区域内隧道整体位移表现为竖向隆起, 基坑范围外两侧区域的隧道竖向位移变化很小。

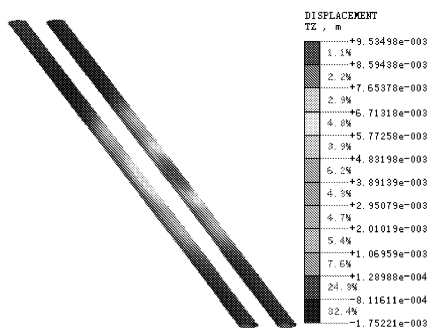


图 11 区间隧道竖向位移

图 12 和图 13 分别为数值模拟不同工况下左线和右线区间隧道底部位置的竖向位移变化曲线。工况 1 时的隧道有一定下沉,主要是与数值模拟时围护桩和基底加固引起竖向荷载一定增加有关。左线隧道最大隆起量为 5.87 mm,右线隧道为 8.25 mm,大 40.5%,右线隆起更明显。五种工况下,左、右线隧道最大隆起量左线为 0.11 mm、0.07 mm、1.81 mm、3.93 mm、5.87 mm,右线为 0.10 mm、0.02 mm、2.58 mm、5.58 mm、8.25 mm,相应的各工况引起隆起量左线为 0.11 mm、-0.04 mm、1.74 mm、2.12 mm、1.93 mm,右线为 0.10 mm、-0.08 mm、2.56 mm、3.01 mm、2.67 mm。可以看出,开挖下半土体引起的竖向位移要稍大于开挖上半土体引起的竖向位移。

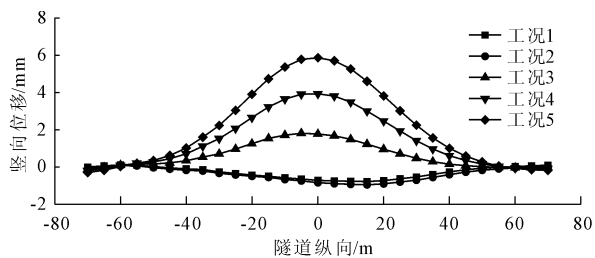


图 12 左线隧道竖向位移

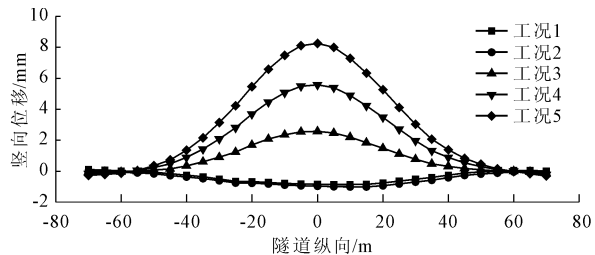


图 13 右线隧道竖向位移

图 14 和图 15 分别为工况 1、工况 3、工况 5 下左线和右线竖向位移数值模拟与监测变化曲线对比。可以看出,数值和监测数据整体上变形趋势基本一致,基坑区域内隧道大都隆起,基坑区域外有较小下沉。不过 -40 m ~ 40 m 区域内,左、右线数值

模拟最大隆起位移 5.87 mm、8.25 mm,大于监测最大隆起位移 3.43 mm、6.42 mm,分别大 71.1%、28.5%;两侧区域,左、右线数值模拟最大沉降 -0.30 mm、-0.32 mm,小于监测最大沉降 -1.35 mm、-1.34 mm。三种工况下,左线隧道监测与数值模拟隆起位移最大值分别为 0.57 mm、1.26 mm、3.43 mm 和 0.11 mm、1.81 mm、5.87 mm;右线隧道监测与数值模拟隆起位移最大值分别为 1.06 mm、2.68 mm、6.42 mm 和 0.10 mm、2.58 mm、8.25 mm,除工况 1 外,其他土层开挖工况,左线隧道隆起均小于右线隧道隆起。通过对比说明本模型能一定程度上模拟上跨区间隧道位移变形情况。

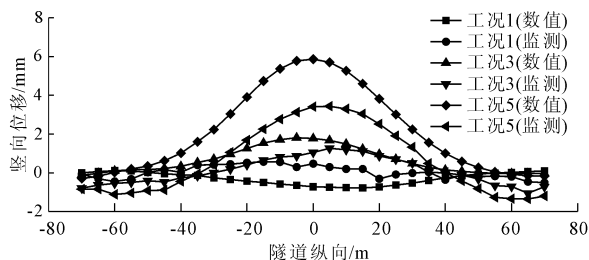


图 14 左线隧道竖向位移对比

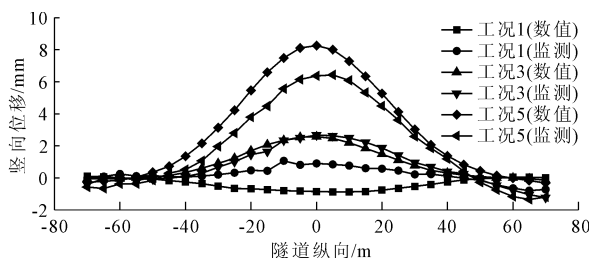


图 15 右线隧道竖向位移对比

5 结 论

本文以明挖基坑上跨地铁一号线工程为背景,围绕明挖基坑开挖过程对区间隧道变形进行了监测数据与数值分析同步分析研究,得到了以下结论:

(1) 基坑区域内隧道隆起模拟值略大于监测值,基坑区域外隧道沉降模拟值略小于监测值,不同工况下两者变形规律基本一致。

(2) 地铁区间隧道与基坑中央的距离与其隆起量成负相关,右线隧道隆起量更明显。开挖土体与区间隧道的距离与其隆起量成负相关,开挖基坑下半部分土体引起的隆起量更大。在基坑开挖时需分层分块开挖,以减小开挖卸载引起的区间隧道隆起。

(3) 开挖底层土所引起的相对收敛量大于其余工况,结构的相对收敛变化速率和开挖土体与隧道距离成正相关。

(4) 本次模拟能较好反映上跨区间隧道段基坑

施工所引起的基坑及区间隧道位移变形规律,对类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [2] 曹 顺. 动载条件下地铁运行时对上跨深基坑开挖的影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
- [3] 高广运,吴 勇,张先林,等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 114-117.
- [4] 唐鹏军. 邻近地铁出入口深基坑支护方案的研究及优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 186-191.
- [5] 邹伟彪,张冬梅,蔡雄威. 基坑开挖对邻近地铁变形的实时监测与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S2): 1728-1731.
- [6] 唐 仁,林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S1): 1629-1634.
- [7] 宋兆锐,王 强,徐 岩,等. 基坑开挖对邻近地铁区间隧道的影响分析[J]. 隧道建设, 2011, 31(S1): 214-219.
- [8] 陈思明,欧雪峰,韩雪峰,等. 临近既有地铁隧道新建基坑的数值计算分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1585-1592.

- [9] 戚长军,刘争宏,余武术,等. 基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 142-146.
- [10] 高 强,于文龙. 市政隧道基坑开挖对既有下卧地铁盾构隧道影响分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 311-317.
- [11] 赵志强,张冬梅. 临近基坑开挖对地铁区间隧道影响评价[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1040-1046.
- [12] 丁 毅,邢艳如. 超长、超大基坑开挖对临近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 170-175.
- [13] 丁 乐. 基坑开挖对邻近地铁车站安全影响的三维有限元分析——以西朗公交枢纽站为例[J]. 隧道建设, 2015, 35(4): 547-548.
- [14] 吕高乐,易领兵,杜明芳,等. 软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 682-691.
- [15] 魏 纲,胡凌威,朱佳定. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 46-49, 56.
- [16] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428.
- [17] 雷裕霜. 上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形的影响与控制研究[D]. 泉州:华侨大学, 2017.

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 宋中南,石云兴. 透水混凝土及其应用技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 李秋义. 混凝土再生骨料[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 彭 成,肖苗良,叶恒达,等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 126-130.
- [4] 孙宏友. 基于正交试验法的透水混凝土配合比设计和试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [5] 姜 骞,周华新,谢德擎,等. 透水混凝土增强剂对透水混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2018(1): 64-67.
- [6] 王永海,寇卫锋,周永祥,等. 再生骨料透水混凝土力学性能的影响因素研究[J]. 工程质量, 2015, 33(5): 46-50.
- [7] 杨小龙,李 波,李艳博. 基于 CT 扫描技术的透水混凝土堵塞率无损评估方法[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 257-262.
- [8] 薛冬杰,刘荣桂,徐荣进,等. 再生骨料透水性混凝土的制备与基本性能研究[J]. 混凝土, 2013(6): 124-

127.

- [9] 张浩博,杜晓青,寇佳亮,等. 再生骨料透水混凝土抗压性能及透水性能试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(2): 247-256.
- [10] Wu H, Liu Z, Sun B, et al. Experimental investigation on freeze - thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 63-71.
- [11] 解 伟,范程程,陈爱玖,等. 再生骨料和橡胶颗粒对透水混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1492-1498.
- [12] 余乃宗,刘卫东,欧阳瑞,等. 再生细骨料对混凝土力学性能及抗冻性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 117-122.
- [13] 再生骨料透水混凝土应用技术规程: CJJ/T 253—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] 郑木莲. 多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2006(4): 41-46.
- [15] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999(1): 41-49.