

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.040

黄土地区基坑开挖对下卧变截面地铁 隧道影响数值分析

贺希英¹, 高强², 张晓光², 贾阳¹, 焦奔康¹, 饶伟¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 为预先了解黄土地区深基坑开挖工程对下卧变截面地铁隧道的影响, 以现场地层及地铁隧道相关参数为依据, 采用 FLAC^{3D} 对施工及降水过程进行了数值模拟计算。结果表明: 地下水位的变化引起土体应力的改变, 进而会对隧道变形产生影响; 开挖卸荷引起坑底回弹, 导致整体隧道发生向上隆起, 基坑开挖范围内马蹄形隧道隆起量相对较小; 另外, 盾构隧道和马蹄形隧道的接头部位位于隆起最大区域, 施工期间应加强这一区域变形监测, 需要密切关注结构防水措施的破坏。

关键词: 地铁隧道; 基坑开挖; 数值分析; 变截面

中图分类号: TU46⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0221-06

Numerical Analysis of Influence of Deep Excavations on Underlying Subway Tunnels with Different Section

HE Xiyi¹, GAO Qiang², ZHANG Xiaoguang², JIA Yang¹, JIAO Benkang¹, RAO wei¹

(1. Highway College, Changan University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: In order to understand the influence of Xi'an East Gate Plaza deep excavation engineering to underlying subway tunnel with variable cross-section, this paper adopted FLAC^{3D} to analysis the influence of the deep excavation to underlying subway tunnel with variable cross-section, based on the stratum information and subway tunnel parameters. The results show that the change in the groundwater level causes a change in the stress of the soil, which in turn affects the deformation of the tunnel. The bottom rebound caused by excavation unloading, which lead to tunnel upward bulge. The amount of horseshoe-shaped tunnel structure upward bulge is relatively slow, the relative risk ratio of shield tunnel is bigger than horseshoe-shaped tunnel. In addition, joints of shield tunnel and horseshoe-shaped tunnel located in the maximum uplift area, which need to be payed close attention to the destruction of waterproofing measures structure during excavation construction.

Keywords: subway tunnels; foundation pit excavation; numerical analysis; variable cross section

随着城市轨道交通网络的不断完善, 在已运营地铁沿线附近开展工程活动变得日趋频繁, 而在地铁隧道沿线上方开挖基坑, 会由于卸载作用, 引起坑内土体回弹, 同时因为土体的变形也定将引起隧道位移场及应力场产生变化。随着隧道变形不断增

加, 可能会产生接缝漏水等现象, 严重的变形将导致地铁无法正常安全运营, 所以变形控制对于运营中的地铁影响极为严重, 特别是对于不同施工方法地铁隧道结构而言, 变形否得到很好地控制是衡量工程成败的重要关键。所以对变形准确有效地预测及

控制就成为地铁隧道工程成功的关键。近年来学者们也不断对此类问题进行讨论,文献[1-14]主要根据在建工程及地铁隧道运营期间各类监测数据,综合数值模拟及经验分析,提出施工改进措施以降低基坑施工对隧道变形的意向。文献[15]以紧邻上海某地铁车站的基坑工程为背景,建立三维数值分析模型模拟基坑开挖工程,结果与实测基本吻合,并详细讨论了控制既有车站变形的几项施工措施。文献[16]以上海地铁一号线变形控制为基准,采用有限元数值分析手段,研究了新世界商贸中心深基坑开挖对地铁结构的影响,并依据计算结果对深基坑的设计与施工提出指导性意见。但由于岩土介质和基坑工程边界的复杂性,很难通过解析法准确求解基坑开挖对其下隧道的影响,并对可能出现的情况做出预判。本文依托东环广场建设项目建设实际,针对深基坑开挖对下卧运营西安地铁 1 号线变截面区域隧道结构的影响机制,采用 $FLAC^{3D}$ 建立三维模型模拟基坑开挖工程,分析了隧道顶部基坑降水,基坑分部开挖条件下,地铁结构的变形和受力变化特征,研究结果为黄土地区类似工程提供了指导意义。

1 研究背景

1.1 工程概况

西安东环广场建设项目地上由塔楼和裙房组成,主屋面高度 179.8 m,主屋面高度为 38.20 m,其中塔楼 41 层(局部 43 层),裙房 7 层(局部 8 层);基坑开挖长度 126 m,宽度 57 m,裙楼部分基坑挖深 8.2 m(I 区),主楼开挖至 12.6 m(II 区),核芯筒部分开挖至 13.4 m(III 区)。如图 1 所示,I 区基坑位于运营地铁隧道 1 号线正上方,隧道截面形式由盾构断面逐渐变型到矿山法施工马蹄形断面,其中马蹄形断面宽度 9.0 m,高度约 9.2 m,初期支护 0.3 m,全断面支护,二次衬砌为 C40 防水混凝土,厚度 0.55 m;马蹄形断面与盾构断面过渡段宽度 10 m,高度约 10.2 m,初期支护 0.3 m,全断面支护,二次衬砌为 C40 防水混凝土,厚度 0.45 m;盾构隧道建筑界限内径 6 m,管片壁厚 0.3 m。裙楼和主楼基础桩直径都为 1 m,裙楼防水板厚 0.6 m,主楼筏板厚度为 1.8 m,矿山法断面与盾构区断面接头区在盾构区在盾构端实施旋喷桩加固。裙楼和主楼基础桩直径都为 1 m,裙楼防水板厚 0.6 m,主楼筏板厚度为 1.8 m。其中地铁隧道与基础底板之间的关系如图

2 所示。可见,隧道结构地层下平均埋深约 16 m,其中防水板底部距离隧道顶部垂直距离最小处约 8.7 m,非垂直距离最小处约 4.6 m。

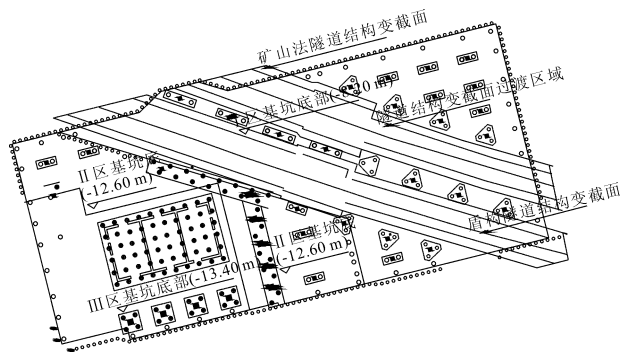


图 1 基坑与地铁隧道平面关系图

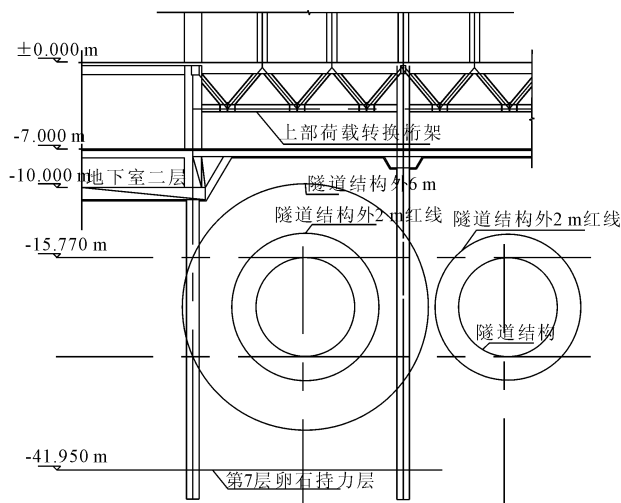


图 2 典型盾构地铁隧道与基础底板之间的关系

1.2 地质条件

项目所在场地位于近浐河附件区域,地质条件复杂,勘探点孔口高程介于 403.29 m~404.57 m,地面最大高差 1.28 m。场区地层在 60.0 m 深度范围内主要由:①杂填土(层厚 3.6 m~5.1 m,层底埋深 3.6 m~5.1 m);②黄土状粉质黏土(层厚 0.2 m~0.9 m,层底埋深 4.4 m~5.7 m);③卵石(层厚 12.1 m~14.0 m,层底埋深 16.9 m~19.2 m);④粉质黏土层厚(13.6 m~18.0 m,层底埋深 32.3 m~35.5 m);⑤卵石(层厚 2.9 m~5.1 m,层底埋深 36.5 m~37.8 m);⑥粉质黏土(层厚 2.8 m~6.9 m,层底埋深 40.2 m~41.1 m);⑦卵石等地层(最大揭露厚度 19.8 m,相应孔深 60.0 m)构成。地下水属潜水类型,其稳定水位埋深为 8.90 m~10.60 m,相应标高为 394.55 m~394.66 m。勘察期间,地下水稳定水位埋藏深度范围在 8.90 m~10.60 m,建筑物基坑开挖最大深度

约 13.40 m。可见由于工程场地范围内存在渗透系数较大的卵石层,场地地下水位较高,场址距离泾河较近,地下水力联系较强,因此给工程降水的有效性增添了一定的不确定因素;由于隧道上部基坑开挖,隧道由深埋转变为浅埋,隧道在受力特性、管片衬砌的配筋情况、以及隧道周边地层塑性区发展情况等方面存在明显的差异,可能会引起既有隧道的隆起变形与裂缝的开展。

2 基坑施工全过程动态模拟分析

2.1 模拟分析工况

由于本文计算模型中隧道一直埋深地下平均水位以下,计算主要考虑两种工况,其一是基坑开挖前降水对地铁结构的影响,实体工程实施基坑周边井点降水,数值分析过程中首先通过设置位移和孔隙水压力边界条件,实现地层原始应力和孔隙水压力初始化,使得模型整体达到初始平衡,然后利用 fish 函数实现逐步抽水,并根据基坑深度模拟不同降深。其二是基坑开挖卸荷过程对地铁结构的影响,具体计算过程是:(1) 基坑全区开挖至 3.5 m;(2) 基坑全区开挖至 4.5 m;(3) 基坑 I 区开挖至 8.2 m;(4)

基坑 II 区开挖至 12.6 m;(5) 基坑 III 区开挖至 13.4 m。

2.2 计算模型及参数

根据以上的基坑开挖面积深度,数值计算时采用的模型尺寸如图 3 所示。模型长 225 m,宽 158 m,为了边界约束方便,在左上角沿着垂直隧道轴线方向截取一块(见图 3)。模型建立过程中,地铁隧道采用 shell 结构单元,土体采用 Mohr - Coulomb 弹性 - 完全塑性模型,采用“空单元”来模拟基坑开挖,根据实际基坑开挖施工工况将其抽象为数值分析所采用的施工步,同时假设受基坑开挖影响,土体深度 80 m 以内土层产生回弹变形且如图 3(a)所示平面区域内土体自重对基坑及下部已建地铁隧道变形影响显著;随后将所有的土体与结构物离散为网格,并定义这些网格的起始施工步和终止施工步,起止施工步的不同也就体现了不同区域的开挖和构筑物的建筑情况。计算参数均为室内试验和施工中提供的参数,土体计算参数由现场勘查提供,如表 1 所示。隧道结构衬砌单元弹性模量 E_0 取 30 GPa,泊松比 ν 取 0.18,法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 取 606 kPa。图 4 是地铁隧道和基坑在数值模型中的空间关系。

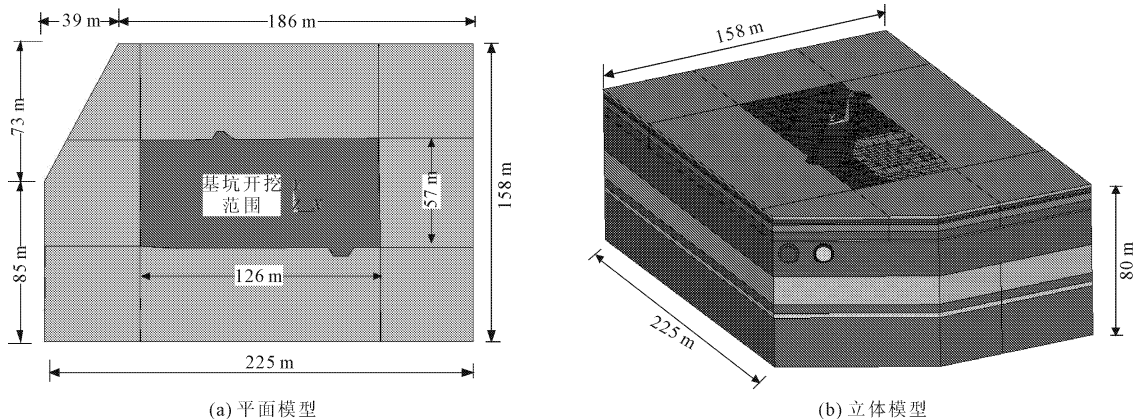


图 3 计算模型

表 1 土体参数取值

地层	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	平均渗透系数 $/ (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	c / kPa	$\phi / (^\circ)$	$a_{0.1-0.2} / \text{MPa}^{-1}$	E_0 / MPa	ν
①杂填土	17.3	2.1×10^{-9}	25	17	7	18	0.3
②黄土状粉质黏土	14.8	7.2×10^{-8}	29	21	8	18	0.3
③卵石	20.0	4.7×10^{-3}	0	30	30	30	0.2
④粉质黏土	19.3	5.4×10^{-7}	29	21	8	30	0.3
⑤卵石	20.0	3.0×10^{-5}	0	30	45	30	0.2
⑥粉质黏土	19.1	4.3×10^{-9}	37	20	10	24	0.3
⑦卵石	20.0	2.9×10^{-3}	0	30	60		0.2

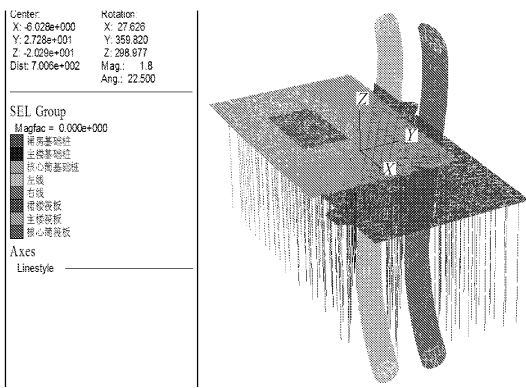


图 4 隧道和基坑空间关系

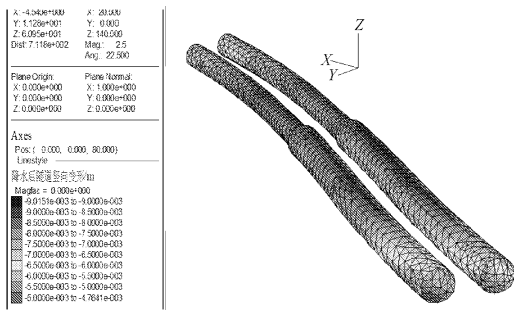


图 6 降水后隧道竖向变形图

3 计算结果分析

3.1 基坑降水的影响分析

图 5 是截取的某一地层竖向变形剖面,从图 5 中可以看出由于隧道的刚性作用,隧道两侧土体的竖向变形较隧道处土体大。图 6 是基坑降水引起的隧道竖向变形云图,从图 6 中可以看到,降水后隧道衬砌的竖向变形从 5 mm 增大到 9 mm,也就是说,由于降水沉降引起的隧道竖向变形量约为 4 mm。从图 6 中还可以看出,隧道竖向变形发生的大部分产生于马蹄形隧道拱顶,这可以用马蹄形隧道相对于盾构隧道在基坑范围内的长度大的原因来解释。表 2 反映了基坑降水过程对地层及地铁结构的整体影响,由表 2 表明抽水时产生渗流,渗透力的作用会使得土体压密,即渗流压密效应,产生土体沉降。由于该项目由于降水的变动范围位于卵石层,降水后变形不会太大,降水后地面变形仅仅有 6 mm。水位下降后土体有效应力增加,相应的地铁上覆荷载会增加,因此会引起地铁隧道竖向变形。另外,由于土体的压密作用引起的了隧道衬砌内力的增加。弯矩最大值从 308 kN·m 增加到了 338 kN·m,约增加了 30 kN·m;轴力最大值从 1.9 MN 增加到了 2.38 MN,约增加了 0.48 MN。

表 2 基坑降水影响统计值

监测状态	地面沉降 /mm	隧道变形 /mm	弯矩 /(kN·m)	轴力 /MN
降水前		5	308	1.90
降水后	6	9	338	2.38
变化值	6	4	30	0.48

3.2 基坑开挖卸荷对地铁结构的影响分析

通过分析截取的变形剖面左线隧道沿着隧道轴线方向拱顶和拱底的竖向变形可以知道:基坑开挖前左线隧道拱顶和拱底的竖向变形量值分比约为 5 mm 和 3 mm。基坑开挖以后,随着开挖深度增加,隧道变形变小。当基坑开挖到 13.4 m 埋深时,左线隧道拱顶和拱底的隆起变形增量分别约为 3 mm,即在这一基坑卸荷过程中,隧道结构发生了约 10 mm 的隆起变形量。其中:左线马蹄形隧道拱顶和拱底的隆起变形增量约为 7 mm,盾构隧道拱顶和拱底的变形增量分别约为 8 mm 和 7 mm。分析右线隧道拱顶和拱底的竖向变形:右线马蹄形隧道拱顶和拱底的变形增量分别约为 9 mm 和 10 mm,盾构隧道拱顶和拱底的变形增量分别为 8 mm 和 7 mm。从而说明,马蹄形隧道的竖向变形增量相对于盾构隧道段的竖向变形量较缓变,预示着盾构隧道受到的影响更为显著。同时基坑的开挖引起的了隧道拱起,并且盾构隧道的拱起的区域相对多些。隆起的部位包括了盾构隧道和马蹄形隧道结合部,因此,该结合部的隧道防水问题需要施工时密切监控。

图 7、图 8 是基坑开挖不同深度时左、右线隧道拱顶和拱底的弯矩变化曲线图,可以看出,基坑开挖范围内,由于卸荷的作用,隧道拱顶和拱底的弯矩都呈减小趋势,减小幅度不大,左线拱顶和拱底的弯矩最大减小值约为 89 kN·m 和 97 kN·m,右线拱顶和拱底相应的弯矩最大减小值约为 88.6 kN·m 和 98 kN·m。

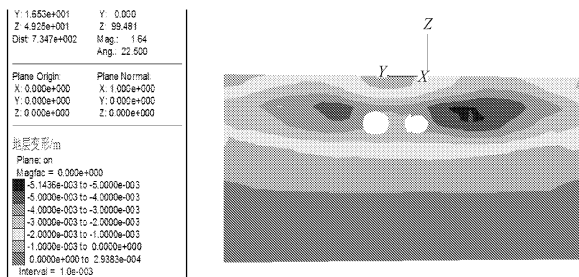


图 5 降水后竖向变形图

图 9、图 10 是基坑开挖不同深度时,左、右线隧

道拱顶和拱底的轴力变化曲线图,从图中可以看出,左线马蹄形隧道拱顶和拱底轴力变化值分别为 0 kN 和 200 kN,盾构隧道拱顶和拱底轴力变化值分别为 200 kN 和 0 kN;右线隧马蹄形隧道拱顶和拱底的

变化值约分别为 250 kN 和 0 kN,盾构隧道的拱顶和拱底轴力变化值分别约为 200 kN 和 0 kN。从而说明,基坑开挖导致隧道上部土体卸荷,隧道结构受力处于有利状态。

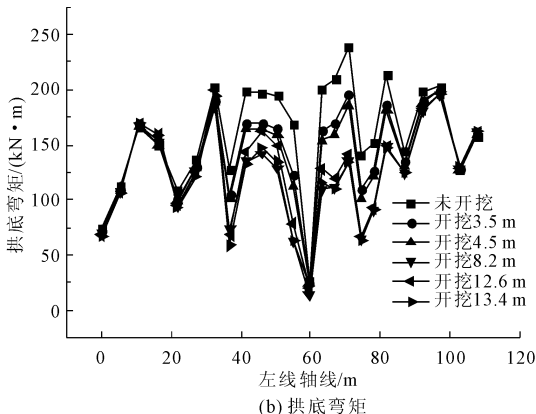
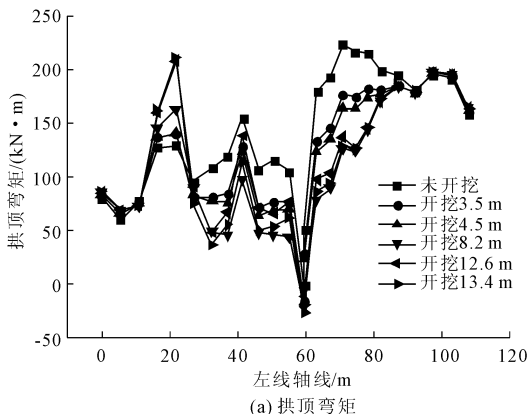


图 7 基坑范围内隧道左线弯矩

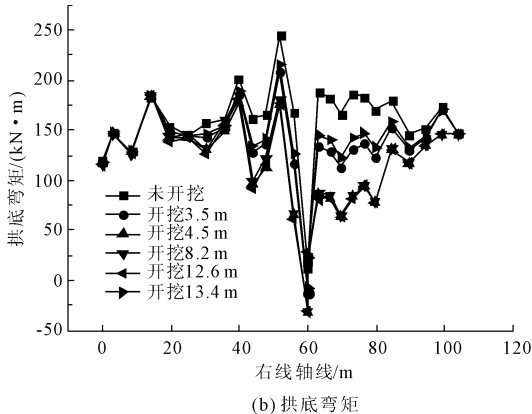
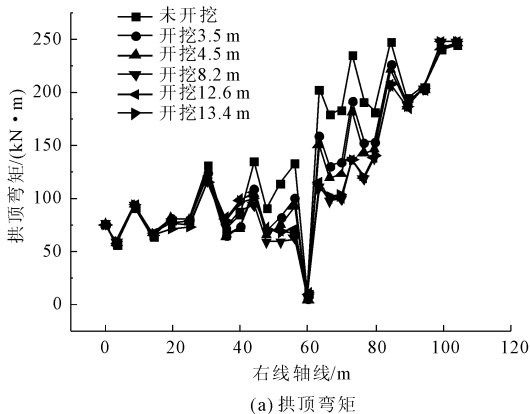


图 8 基坑范围内右线弯矩

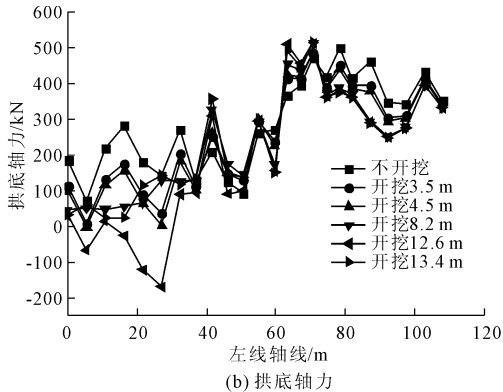
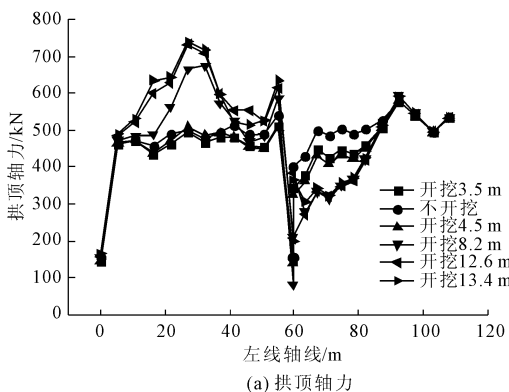


图 9 基坑范围内隧道左线轴力

4 结 论

(1) 基坑开挖前地层水位埋深的降低,使渗流压密引起了地面沉降,且由于隧道的存在使得隧道以外范围地层沉降量大于隧道顶部地面沉降。结果表明降水引起的隧道上覆土体有效应力增加,隧道

上覆荷载增加,隧道衬砌会产生较大的变形量。
 (2) 基坑开挖卸荷引起线左线隧道弯矩和轴向力分别最大降低 92 kN·m 和 200 kN,右线隧道弯矩和轴向力分别最大降低 97 kN·m 和 250 kN,数值分析的结果可以为施工开挖过程中的质量控制提供参考。

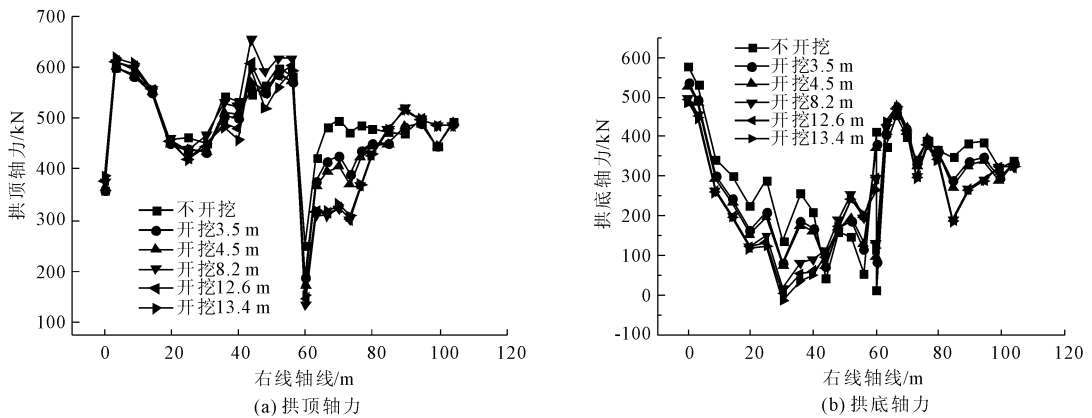


图 10 基坑范围内隧道右线轴力

(3) 基坑开挖卸荷引起坑底回弹,导致隧道发生向上的隆起,矿山施工马蹄形隧道隆起量相对比较缓,盾构隧道比马蹄形隧道相对危险。结果表明盾构隧道和马蹄形隧道的接头部位位于隆起最大区域,施工期间应加强这一区域变形监测,并需要密切关注结构防水措施的破坏。

参考文献:

- [1] 刘纯洁. 地铁车站深基坑位移全过程控制与基坑邻近隧道保护[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [2] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 202-207.
- [3] 程 斌, 刘国彬. 基坑工程施工对邻近建筑物及隧道的相互影响[J]. 工程力学, 2000(S3): 486-491.
- [4] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报, 2001, 29(5): 531-535.
- [5] 陈 郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91-94.
- [6] 刘保健, 谢永利, 翁效林. 岩土工程问题的过程分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 79-85.
- [7] 张玉伟, 翁效林, 谢永利. 非对称基坑开挖对浅埋下卧地铁隧道的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 770-778.
- [8] 高 强. 地铁暗挖双连拱隧道下穿既有铁路施工影响

分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 66-70.

- [9] 关永平. 隧道开挖对周边建筑物变形的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 227-232.
- [10] 魏少伟. 基坑开挖对坑底已建隧道影响的数值与离心试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] Marta Dolezalova. Tunnel complex unloaded by a deep excavation, Computers and Geotechnics, 2001, 28(6/7): 469-493.
- [12] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 93-98.
- [13] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸荷对地铁区间隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 251-255.
- [14] 陶云平. 软弱围岩隧道变形破坏机制及处治措施研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 69-72.
- [15] 郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1459-1468.
- [16] Hu Z F, Yue Z Q, Zhou J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels[J]. Canadian geotechnical journal, 2003, 40(5): 933-948.