

箱涵顶进施工对地铁隧道变形的影响分析

郭院成¹,李腾飞¹,李振¹,张新武²

(1. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘要 目的 研究箱涵顶进施工导致下卧既有地铁隧道变形机理,得出隧道结构变形规律以及发展趋势,为箱涵顶进施工设计提供借鉴。方法 基于郑州某跨越地铁的箱涵顶进施工案例,运用 ABAQUS 软件建立箱涵顶进施工上穿既有盾构隧道的数值分析模型,模拟分析箱涵顶进施工对地铁隧道变形的影响规律。结果 隧道结构因箱涵顶进施工引起的变形响应是三维的,主要体现在隧道整体向上抬升以及顺箱涵顶进方向偏移,隧道沿纵向变形曲线近似于正态分布,隧道距离箱涵越近变形值越大。结论 抗拔桩管幕门式加固措施能减小既有隧道 47% 的竖向位移值以及使隧道整体水平位移基本归 0 mm,并能有效降低顶进施工过程中隧道结构最大位移的增长速率,控制隧道变形效果显著。

关键词 地铁隧道;箱涵顶进;数值模拟;变形;隧道保护

中图分类号 TU93;U452.2

文献标志码 A

Influence Analysis of Box Culvert Jacking Construction on Deformation of Subway Tunnel

GUO Yuancheng¹, LI Tengfei¹, LI Zhen¹, ZHANG Xinwu²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureall, Tianjin, China, 300457)

Abstract: This paper aims to study the deformation law and the development trend of tunnels caused by the jacking construction of the box culvert above the tunnel and provides a reference for the jacking construction design of box culvert. Based on a case of box culvert jacking construction above the tunnel in Zhengzhou, the numerical analysis model is established by ABAQUS software and the deformation law of the tunnel caused by box culvert jacking construction is simulated and analyzed. The deformation response of tunnel structure caused by box culvert jacking construction is three-dimensional, which is mainly reflected in the overall upward lifting of the tunnel and the deviation of the jacking direction of the box culvert. The tunnel deformation curve along the longitudinal direction is approximately normal distribution, and the deformation of the tunnel is

收稿日期:2021-12-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078469)

作者简介:郭院成(1965—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事基坑支护及地铁隧道保护等方面研究。

proportional to the distance of the box culvert. The reinforcement measures can reduce the vertical displacement of the existing tunnel by 47% and make the overall horizontal displacement of the tunnel basically return to 0 mm, and effectively reduce the growth rate of the maximum displacement of the tunnel structure during jacking construction, which has a significant effect on controlling tunnel deformation.

Key words: subway tunnel; box culvert jacking; numerical simulation; deformation; tunnel protection

进入21世纪后,我国城市在地下空间的开发和利用进入快车道,催生了大量地下工程,例如地下隧道、综合管廊、人防工事、地下商城及街道等,类似地下连通道等新建隧道与既有地铁隧道近接施工问题逐渐凸显^[1-2]。基于实际多方面因素以及箱涵顶进施工的特点^[3],现在很多连通道采用箱涵顶进施工工艺。但针对箱涵顶进施工引起隧道响应规律的研究尚且不足,因此研究箱涵顶进施工对既有地铁隧道的影响规律是目前我国地下空间开发利用过程中亟待解决的一个重要问题。

郭瑞^[4]采用数值分析方法研究了箱涵顶进过程中箱涵结构的应力应变规律以及顶进施工影响范围,得出箱涵顶进引起路面沉降量以及路面受扰动范围,并提出有效地减小箱涵阻力的改进措施。Z. C. Wang^[5]通过数值分析结合现场测量方法研究了箱涵下穿公路路堤的沉降特性,得出公路沉降曲线并分析路面沉降发展过程与形成机理。黄生根等^[6]对箱涵顶进引起的地层位移进行研究,得出地层最大沉降位置以及水平位移分布规律。李秋香等^[7]利用有限元方法分析了箱涵顶进施工过程中周边结构物以及地层的变形规律并针对其影响因素展开分析。P. Zhang等^[8-10]分析了箱涵下方设置加固管幕条件下,箱涵顶进施工对下卧隧道受力变形的影响规律,并总结了调整取土方式、衡重顶进以及注浆加固等对确保运营地铁隧道安全性的技术效果。

目前,国内外学者对基坑开挖卸荷引起的隧道变形分析和隧道保护加固措施等方面^[11-12]研究较充分,而关于箱涵顶进施工上

穿或下穿既有隧道方面的研究还很缺乏。基于此,笔者以郑州市轨道交通1号线郑州东站-市体育中心站区间上方箱涵顶进工程为研究对象,通过有限元软件建立了箱涵顶进施工的三维数值分析模型,对箱涵顶进施工引起地铁隧道变形的影响进行了研究,得到了箱涵顶进过程引起既有隧道的位移响应规律,并验证了抗拔桩与管幕加固方案对隧道变形的控制效果,进而为以后类似工程提供参考。

1 有限元分析

以郑州东区某地下连通道项目为背景,地下连通道采用箱涵顶进施工工艺,共有六条地下连通道,每条地下连通道横跨郑州轨道交通1号线。考虑到箱涵底部与隧道顶部净距、卸荷比(箱涵底部埋深与隧道顶埋深的比值)以及箱涵尺寸是影响隧道响应的主要因素,综合对比后以3号连通道为例开展相关研究。

根据中铁四院现场钻探、原位测试以及室内土工试验结果,场地70 m勘探深度范围内,除浅部填土外,主要为第四系全新统粉土、粉细砂层和第四系上更新统粉质黏土、粉土层。

1.1 几何模型简介

模型简图如图1所示。既有隧道外径为6.0 m,内径为5.4 m,管片厚度为0.3 m,环宽1.5 m,隧道中心埋深为16.8 m,两平行隧道中心距离为13.0 m,隧道中轴线距离箱涵底板9.0 m;矩形箱涵横截面长13.0 m、宽5.6 m,需顶进施工总长度为50 m,箱涵顶进方向与既有隧道走向90°正交,两隧道中心

位于箱涵正下方,箱涵上部有效覆土厚度为 2.1 m。计算模型简图中左上角和右上角两处缺角是工作竖井,在施工阶段是箱涵顶进始发和结束位置。

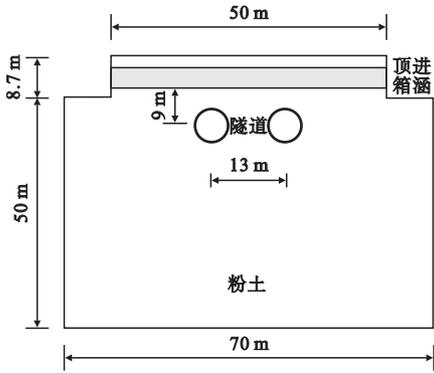


图1 计算模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

运用有限元软件 ABAQUS 建立箱涵顶进施工上穿既有隧道的三维模型如图 2 所示。采用三维实体单元 C3D8R 模拟土体、箱涵、既有隧道,考虑边界效应后数值模型长 80 m、宽 70 m、高 58.7 m,其中箱涵长 50 m,隧道长 80 m,为了得到更准确的隧道受力变形模拟结果,对隧道周围土体网格进行加密处理。仅考虑箱涵顶进施工过程技术参数对既有隧道结构的影响。

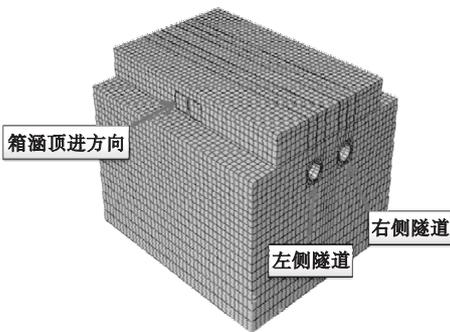


图2 有限元分析模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element analysis model

1.2 基本假定

- (1) 土体视为均质单一的弹塑性体,不考虑施工过程中土体变形的时间效应;
- (2) 忽略顶进工作坑以及中继间的影响;
- (3) 箱涵结构、隧道结构为各向同性的

线弹性材料,忽略箱涵接头的影响;

- (4) 箱涵受土体的摩擦阻力,均匀分布于箱涵外表面。

1.3 土体及支护结构参数

土体屈服准则采用 Mohr-Coulomb 本构;箱涵与隧道结构采用线弹性本构模型,不考虑其塑性变形;隧道管片混凝土强度等级为 C50,考虑到盾构隧道结构是由钢筋混凝土管片通过高强度螺栓连接而成,通过刚度折减系数来反映其结构特性,将刚度折减系数取为 0.15^[13],弹性模量取为 30 GPa;箱涵结构混凝土强度等级为 C40,弹性模量为 32.5 GPa;土体参数依据中铁四院对场地的地勘报告,数值模拟时将土体按厚度加权平均简化为单一粉土,其弹性模量根据地层性质均值为 25 MPa,各构件参数取值见表 1。

表1 土体及结构参数

Table 1 Soil and structure parameters

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/MPa	泊松比 ν	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
土体	1.97	25	0.3	20	22
隧道	2.65	30 000	0.2	—	—
箱涵	2.60	32 500	0.2	—	—

1.4 结构间接触与边界条件

计算模型中箱涵与土、隧道与土间采用面-面接触单元,接触面的法向行为采用硬接触,切向行为采用罚函数,切向接触摩擦系数参考文献[14-15],取为 0.35。

有限元土体模型中左右四个侧面限制 X 方向位移,前后两个面限制 Y 方向位移,土体底面限制三个方向上的位移,土体上表面设置为自由面;地铁隧道结构在其纵向两端约束 Y 方向位移;箱涵无边界约束条件。

1.5 箱涵顶进过程模拟

为了得到箱涵顶进施工对隧道的影响规律,在地应力平衡时将土体与隧道同时进行,地应力平衡后模型位移数量级在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m,满足计算精度要求。ABAQUS 中的生死单元法^[16]可以良好模拟土体开挖效应

以及箱涵顶进施工,考虑到土体开挖面卸载作用下的应力释放效应,在数值模拟分析时先将箱涵顶进部分的土体刚度进行折减,折减系数取为40%,再将土体单元集合“杀死”。箱涵顶进施工通过25步模拟实现,每步顶进长度为2 m。采用施加位移的方式模拟箱涵结构的顶进施工,与箱涵外表面接触的土体施加面荷载,以模拟箱涵顶进对土体产生的摩擦力,摩擦系数的取值及摩擦力计算参考顶管施工方法^[14]以及文献^[17],有限元计算中摩擦系数在箱涵顶部、侧板、底板处分别取为0.3、0.5和0.7,三者对土体的法向力分别为上覆土体自重(无交通荷载)、两侧承受的主动土压力、上覆土体自重加箱涵自重。按摩擦公式计算后得出作用于箱涵外壁土体的摩擦力为顶板处12.41 kPa、两侧板处21.96 kPa、底板处44.08 kPa,按均布荷载施加于箱涵外壁处的土体,摩擦力方向与顶进方向一致。

2 数值模拟分析

2.1 隧道竖向位移

箱涵顶进施工过程对下部既有隧道竖向位移的影响如图3所示。图3(a)、图3(b)显示箱涵顶进施工结束后,左侧隧道和右侧隧道顶部竖向位移基本一致,由于土体的卸荷,隧道结构呈现上浮趋势,隧道与箱涵距离越近,竖向位移越大,在没有加固措施下峰值10.5 mm。图3(c)、图3(d)显示隧道结构底部竖向位移变化规律与隧道结构顶部竖向位移的变化规律一致,隧道底部结构距离箱涵施工处较远,受到的施工影响相对较小,所以竖向位移数值较小。由图3可知,箱涵顶进不同长度时左、右隧道竖向位移规律存在较大差异,箱涵顶进前半程中,左侧隧道先受到施工影响且受影响较重,造成左侧隧道顶部、底部竖向位移变化幅度远大于右侧隧道顶部、底部竖向位移变化情况;箱涵顶进后半程中,左侧隧道顶部竖向位移增长幅度较小、

底部竖向位移有较大增幅,右侧隧道顶部、底部竖向位移均有显著增幅。

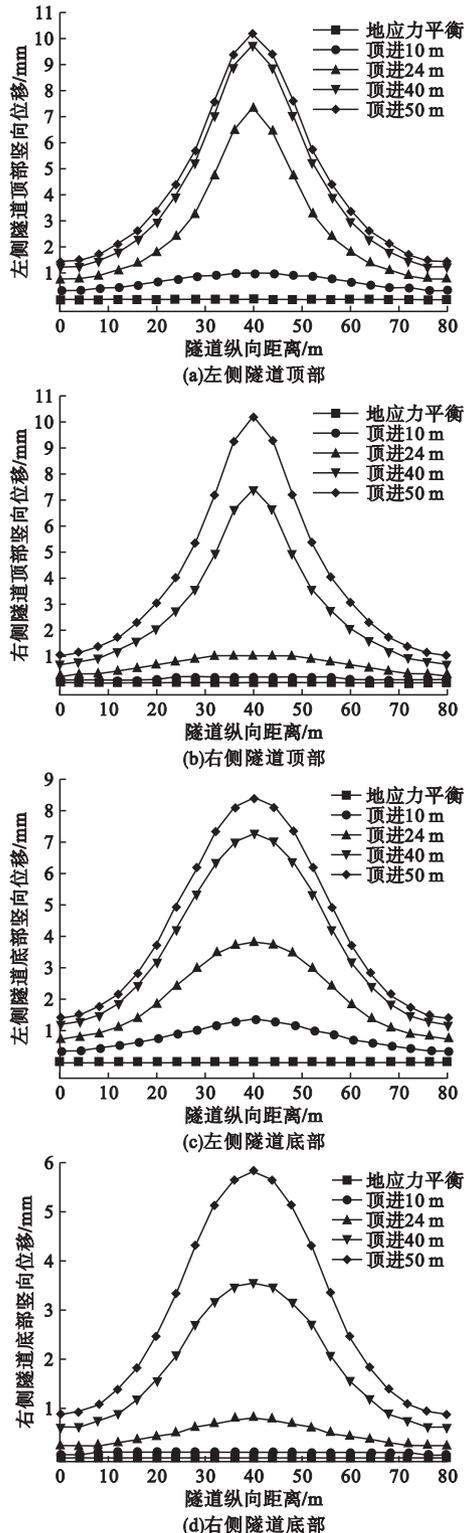


图3 隧道结构竖向位移图

Fig. 3 Vertical displacement diagrams of tunnel structure

2.2 隧道水平位移

为便于描述箱涵顶进施工对下部既有隧道结构各位置位移的影响规律,由隧道顶开始顺时针提17个节点(见图4)。

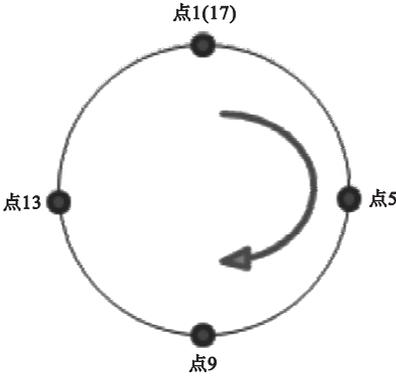


图4 隧道中心横截面图

Fig. 4 Cross section view of tunnel center

箱涵顶进引起隧道中心截面的水平位移响应情况如图5所示,图中环向坐标表示隧道中心节点位置,径向坐标表示水平位移值,单位 mm。由图可知,上部箱涵顶进施工过程中,顶推力主要作用于下部隧道的上半部分,显示出隧道结构中心截面上半部分的水平位移较大且较为集中,位移方向与箱涵顶进方向一致。箱涵顶进时长距离对左侧隧道产生影响,使左侧隧道水平位移值较大且隧道上部分基本发生整体移动;右侧隧道受箱涵顶进影响相对较小,表现在隧道结构水平位移值较小且隧道上部分水平位移差异明显。在没有加固措施下,最大水平位移峰值为6 mm。

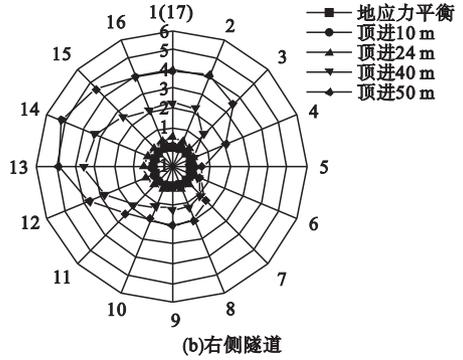
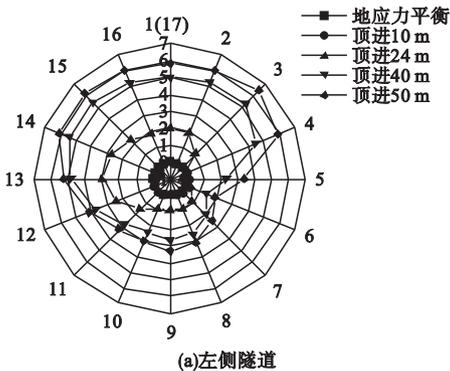


图5 隧道中心截面水平位移图

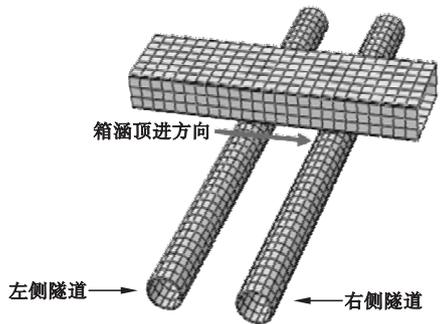
Fig. 5 Horizontal displacement diagram of tunnel center section

2.3 隧道整体位移响应

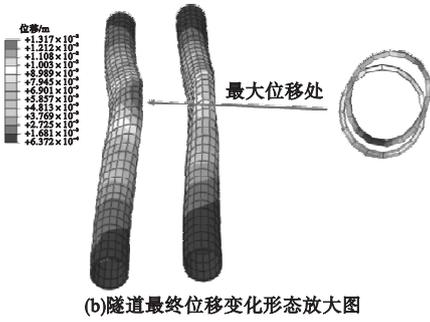
箱涵与隧道结构的相对位置以及施工完成后既有隧道的最终位移形态如图6所示。由图6(b)可知,箱涵顶进施工对下部既有隧道结构位移的影响是三维的,包含有隧道结构的竖向位移和水平位移,左侧隧道结构的竖向位移和水平位移均大于右侧隧道的竖向位移和水平位移。隧道结构的竖向位移随着箱涵顶进施工过程逐步增大,最大竖向位移位于箱涵结构形心正下方,位于隧道结构的顶部位置;隧道的水平位移发展趋势与箱涵顶进方向基本一致,且箱涵形心下方隧道截面水平位移受箱涵顶进影响最为显著。从隧道变形放大图中可清晰看出隧道变形形态:左侧隧道变形基本呈“竖椭圆”形状,受土体卸荷及顶进作用后向右上方变形,右侧隧道中心截面变形为“竖椭圆”形状,隧道拱腰处向隧道中心水平收敛。



(a)左侧隧道



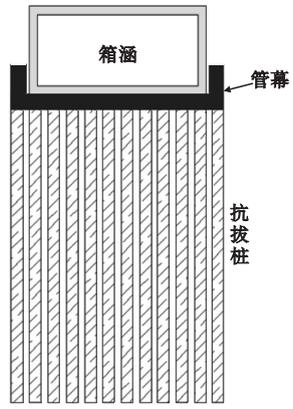
(a)箱涵与既有隧道相对位置图



(b)隧道最终位移变化形态放大图

图 6 箱涵与隧道相对对位及隧道变形图

Fig. 6 Box culvert and tunnel relative alignment and tunnel deformation diagram



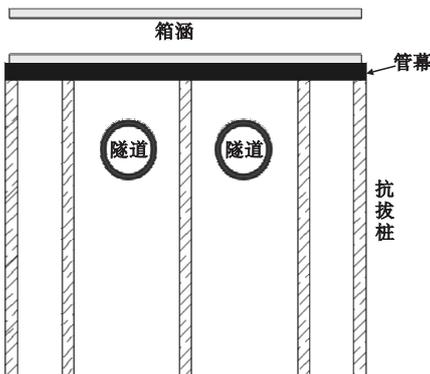
(b)箱涵截面加固示意图

3 隧道加固方案分析

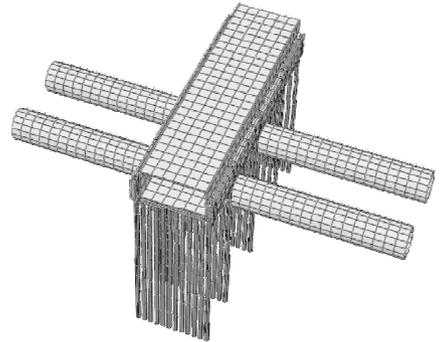
郑州地区地铁隧道结构的控制标准中规定:隧道结构绝对竖向、水平位移量要小于等于 10 mm。由上述模拟分析可知,箱涵顶进施工引起的隧道结构最大竖向位移量不能满足郑州地区隧道结构变形控制标准要求,因此需采取加固措施,以确保箱涵顶推施工过程中下卧既有隧道的安全运营。实际工程中对六条地下连通道下方的隧道均采取了控制隧道变形的加固方案,笔者研究对象 3 号连通道采用抗拔桩复合管幕门式加固方案,箱涵采用单侧顶进施工方案。

3.1 加固方案

数值模拟时加固方案与实际工程保持一致,采用竖向抗拔桩复合管幕注浆门式加固措施方案(见图 7)。抗拔桩采用 $\Phi 800@1\ 500$ 、注浆管幕采用 $\Phi 1\ 200@1\ 500$ 。抗拔桩采用全套管跟进成孔工艺施工;管幕顶进施工之后相邻管幕间采用型钢焊接锁扣。抗拔桩沿



(a)隧道截面加固示意图



(c)整体加固模型图

图 7 抗拔桩管幕加固示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of reinforcement of tensile pile pipe curtain

隧道纵向布置每排 12 根、共设 5 排,桩长取为 35 m;箱涵下方管幕设为 U 型,且水平向管幕和竖向抗拔桩采用刚性连接。

数值分析时考虑到管幕与抗拔桩的强度、刚度较大,均采用线弹性本构模型并取弹性模量为 30 GPa、泊松比为 0.2,采用三维实体单元 C3D8R 模拟抗拔桩、管幕。抗拔桩与土体之间、管幕与土体之间的相互作用均设置为面-面接触,摩擦系数取 0.35^[14-15],抗拔桩顶部与管片接触位置设置为 tie 约束。

3.2 加固效果对比

隧道结构顶部竖向位移受箱涵顶进施工影响较大,选择隧道顶部位置作为研究对象,在箱涵顶进施工完成后左侧隧道、右侧隧道结构顶部最大竖向位移沿纵向分布曲线如图 8 所示。由图可知,抗拔桩复合管幕加固方案能有效减小箱涵顶推施工对既有隧道竖

向位移值的影响,加固后左侧隧道竖向位移减小47.4%,右侧隧道竖向位移减小47.1%,

加固效果显著,隧道竖向变形满足郑州地区地铁隧道结构的控制标准。

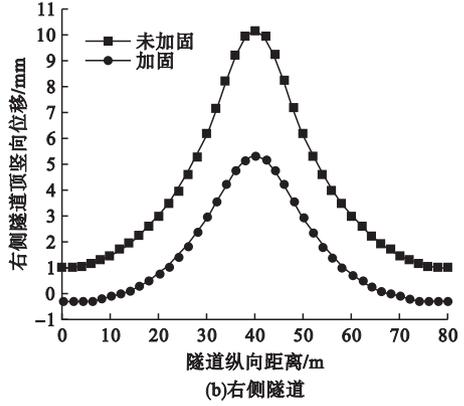
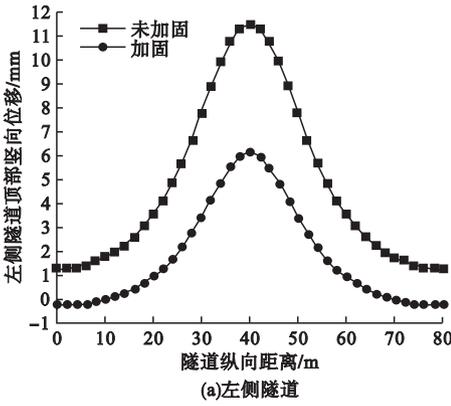


图8 加固前后隧道竖向位移对比图

Fig. 8 Contrast diagrams of vertical displacement of tunnel before and after reinforcement

由上述数据对比可知箱涵顶进作用下,隧道水平位移最大值均发生在隧道中心截面位置,因此提取隧道中心截面水平位移值进行对比,结果如图9所示。图中数值为正表示此处变形与箱涵顶进方向一致,数值为负时反之。由图可知,采用抗拔桩复合管幕加固方案可显著减小箱涵顶进施工引起的隧道中心截面水平位移,尤其隧道拱顶位置减小

明显。抗拔桩管幕加固措施可有效控制隧道周围土体水平位移量,隧道结构水平位移在0 mm附近变化,隧道结构水平位移极值位于隧道拱腰位置附近。隧道进行加固处理后,箱涵顶进施工主要引起隧道及周围土体竖向卸荷,隧道中心处横截面向“竖椭圆”形状发展,隧道拱腰处向隧道中心收敛,导致隧道结构左、右拱腰处水平位移的方向相反。

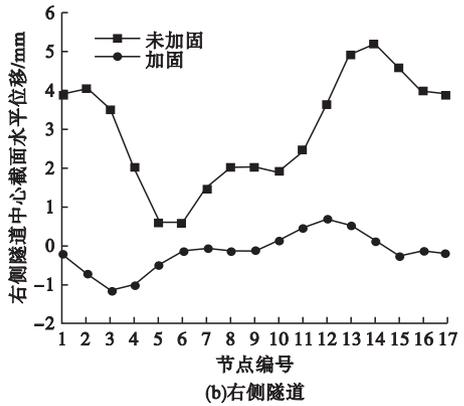
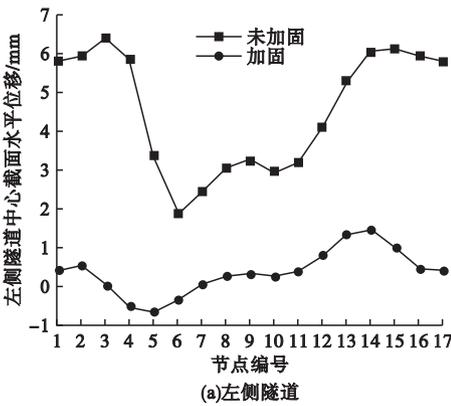


图9 加固前后隧道中心截面处水平位移对比图

Fig. 9 Comparison diagrams of horizontal displacement at central section of tunnel before and after reinforcement

4 结论

(1)隧道结构因箱涵顶进施工引起的变形响应是三维的,主要体现在隧道整体向上抬升以及顺箱涵顶进方向偏移;隧道结构沿长度方向的竖向变形曲线呈正态分布,峰值

点处于箱涵形心正下方;距离顶进箱涵越近隧道受到扰动越为明显,且隧道发生的位移量也越大,隧道截面有向斜椭圆、竖椭圆变形趋势。

(2)抗拔桩复合管幕门式加固方案能有效减小箱涵顶推施工对既有隧道变形影响,

加固方案相比于未采取加固措施,能减小左、右侧隧道结构47%的竖向位移;同时使隧道结构从最大水平位移6 mm变为整体水平位移基本为0 mm。抗拔桩复合管幕门式加固方案对控制下方隧道隆起和收敛变形效果显著。

参考文献

- [1] 刘新荣,王永新,孙辉,等.城市可持续发展与城市地下空间开发利用[J].地下空间与工程学报,2004,24(11):585-588.
(LIU Xinrong, WANG Yongxin, SUN Hui, et al. Urban sustainable development and utilization of urban underground space [J]. Underground space, 2004, 24(11):585-588.)
- [2] YIN M L, JIANG H, JIANG Y S, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels [J]. Tunneling & underground space technology, 2018, 78(1):245-258.
- [3] 赵锐峰.箱涵顶进在实际工程中的应用[J].建筑技术开发,2020,47(12):101-103.
(ZHAO Ruifeng. Application of box culvert jacking in practical engineering [J]. Building technology development, 2020, 47(12):101-103.)
- [4] 郭瑞,王枫,洪刚,等.浅覆土特长箱涵顶进结构受力特性数值分析[J].公路交通科技,2017,34(6):94-98.
(GUO Rui, WANG Feng, HONG Gang, et al. Numerical analysis on mechanical characteristics of jacking structure of extra-long box culvert with shallow soil cover [J]. Science and technology of highway and transportation, 2017, 34(6):94-98.)
- [5] WANG Z C, HU Z, LAI J X, et al. Settlement characteristics of jacked box tunneling underneath a highway embankment [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2019, 33(2):401-410.
- [6] 黄根生,张健,张晓炜.超大型箱涵顶进引起的地层位移规律研究[J].岩土力学,2009,30(2):387-392.
(HUANG Gensheng, ZHANG Jian, ZHANG Xiaowei. Study on strata displacement caused by jacking of super large box culverts [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(2):387-392.)
- [7] 李秋香.由拳路下穿沪昆铁路箱涵顶进施工监测及变形控制分析[D].南昌:南昌大学,2011.
(LI Qiuxiang. Construction monitoring and deformation control analysis of box culvert jacking from Quan road under Shanghai-Kunming railway [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.)
- [8] ZHUANG P, MA B S, ZENG C, et al. Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date: a case study of Gongbei tunnel [J]. Tunneling & underground space technology, 2016, 59:134-145.
- [9] 徐福田.可调节配重顶进技术在箱涵上穿地铁隧道施工中的应用[J].现在隧道技术,2019,56(4):182-187.
(XU Futian. Application of adjustable counterweight jacking technology in subway tunnel construction over box culvert [J]. Current tunnel technology, 2019, 56(4):182-187.)
- [10] 张俊儒,严丛文,叶伦,等.箱涵顶进对下方管幕的力学作用分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(增刊1):73-79.
(ZHANG Junru, YAN Congwen, YE Lun, et al. Analysis of mechanical action of box culvert jacking on lower pipe curtain [J]. Tunnel construction, 2019, 39(S1):73-79.)
- [11] 杜建强,朱兆荣,吴红刚.深基坑开挖对下卧近距地铁盾构隧道的影响分析与保护技术研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊2):236-245.
(DU Jianqiang, ZHU Zhaorong, WU Honggang. Influence analysis and protection technology research of deep foundation pit excavation on underground short-distance shield tunnel [J]. Tunnel construction, 2021, 41(S2):236-245.)
- [12] 刘波,范雪辉,王园园,等.基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):253-258.
(LIU Bo, FAN Xuehui, WANG Yuanyuan, et al. Research progress of influence of foundation pit excavation on adjacent existing subway tunnel [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2):253-258.)
- [13] 王涛.近距离平行隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[D].天津:天津大学,2006.
(WANG Tao. Numerical simulation of influence of shield construction on old tunnel in close parallel tunnel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.)
- [14] 高乃熙,张小珠.顶管技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1984.
(GAO Naixi, ZHANG Xiaozhu. Pipe jacking technology [M]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 1984.)
- [15] 郭孝坤.郑州地铁盾构下穿施工对既有建筑桩基承载力的影响研究[D].郑州:郑州大学,2015.
(GUO Xiaokun. Research on influence of shield underpass construction on bearing capacity of existing pile foundation in Zhengzhou metro [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.)
- [16] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
(FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2013.)
- [17] 吴炜.某高速顶推箱涵施工技术研究[J].贵州大学学报,2015,32(1):114-118.
(WU Wei. Research on construction technology of a High speed pusher box culvert [J]. Journal of Guizhou university, 2015, 32(1):114-118.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)