

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120820240490

文章编号:1674-599X(2024)02-0047-08

引用格式:罗驰恒,王泽军,汤善彪,等.钻爆法隧道下穿既有隧道门架桩加固方案研究[J].交通科学与工程,2024,40(2):47-54.

Citation: LUO Chiheng, WANG Zejun, TANG Shanbiao, et al. Study on the reinforcement scheme of gantry pile for drilling and blasting tunnel under existing tunnel[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 47-54.

钻爆法隧道下穿既有隧道门架桩加固方案研究

罗驰恒^{1,2}, 王泽军^{1,2}, 汤善彪^{1,2}, 曹翔鹏^{1,2}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;

2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘要:针对钻爆法隧道开挖引起的上部既有隧道沉降问题,提出了一种新型门架桩加固方案。以惠盐高速公路隧道上行线盾构隧道建设工程下穿如意路嶂背隧道为背景,建立三维荷载结构模型和三维地层结构模型,使用ABAQUS有限元软件数值模拟钻爆法隧道的循环开挖施工过程,研究不采用门架桩保护措施和采用门架桩保护措施下上部既有隧道的沉降规律。结果表明:1) 门架桩加固方案能有效降低既有隧道开挖导致的隧道沉降,采用门架桩保护措施后既有隧道最大沉降降低至2.49 mm,相较于无保护措施降幅达30%。2) 采用门架桩保护措施会增大横梁与隧道连接位置隧道的剪力与纵向轴力,其中,峰值剪力增大了433.2 kN。采用该方案后,需要在连接处进行局部加固,防止隧道在该位置发生应力集中,导致局部剪坏。

关键词:下穿隧道;近接施工;数值分析;地层加固;钻爆法隧道;门架桩加固

中图分类号:U45

文献标志码:A

Study on the reinforcement scheme of gantry pile for drilling and blasting tunnel under existing tunnel

LUO Chiheng^{1,2}, WANG Zejun^{1,2}, TANG Shanbiao^{1,2}, CAO Xiangpeng^{1,2}

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

2. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: A new gantry pile reinforcement scheme is proposed to handle the settlement issue of pre-existing tunnel caused by drilling and blasting tunnel excavation in the top. Three-dimensional loading and stratum structure model are established for the shield tunnel of Huiyan Expressway under the Ruyi Road Zhangbei Tunnel. We performed finite element simulation using ABAQUS to model the cyclic excavation construction process of the tunnel. The settlement patterns of the pre-existing tunnels in the top with and without gantry pile protection are studied. The results show that: 1) the gantry pile protection can effectively reduce the tunnel settlement caused by excavation in pre-existing tunnels. The maximum settlement of pre-existing tunnels is reduced by 2.49 mm when using gantry pile protection, which is 30% lower than that without protection. 2) The use of gantry pile protection increases the shear force and longitudinal axial force in the tunnel at connection of the crossbeam and the tunnel. The peak shear stress increases by 433.2 kN. The use of this technique requires local

收稿日期:2022-12-08

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600400)

通信作者:罗驰恒(1990—),男,高级工程师,主要从事隧道设计方面的研究工作。E-mail:tjulch@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

reinforcement of the connection to prevent local shear damage due to stress concentration in the tunnel.

Key words: undercrossed tunnel; close construction; numerical analysis; ground stabilization; drilling and blasting tunnel; reinforcement of gantry pile

为满足城市日益增长的交通需求,地下交通工程建设进入了快速发展阶段^[1-5]。在当今的隧道施工过程中,钻爆法是主流工法。相较于盾构法对施工区域地质条件的较高要求,钻爆法具有适应性强、节省工期等一系列优点。然而,软土地层中的钻爆法隧道开挖势必会引起场地应力的重新分布,打破邻近隧道的受力平衡,若不严格控制隧道开挖过程中的施工效应,受影响的邻近隧道易出现由过大的不均匀沉降导致的渗漏及主体结构的破坏^[6-9]。

为减少新建隧道对下穿既有隧道结构的影响,已有许多国内学者对下穿既有建筑的加固措施开展了相关研究。王雨等^[10]通过ANSYS有限元软件的计算,探明了管线材料参数、土层参数等因素对管线下沉规律的影响。周飞等^[11]将有限元数据与现场检测结果进行对比,验证了单层大管棚加小导管注浆在降低隧道变形方面的有效性。刘夏临等^[12]针对隧道下穿城市高架桥桩基提出了4种预加固方案,通过有限元分析指出,设置袖阀管注浆和隔离桩能有效控制桩基变形。陈敬军^[13]针对城市双层隧道埋深浅、地质差、环境复杂的特点,结合工程案例提出了“大管棚+小导管+掌子面TSS型注浆管注浆”的加固措施。孙逸玮等^[14]研究了临近桥桩对盾构开挖所引起的地表变形的影响,结果表明,地表变形会使桩基处出现“绕桩”现象。

鉴于此,本文以惠盐高速公路隧道工程为例,结合以往的研究经验,采用ABAQUS有限元软件建立三维模型,分别对采用门架桩保护措施和不采用门架桩保护措施两种工况开展下穿既有隧道数值模拟,计算结果可为相关工程提供理论支撑和应用参考。

1 依托工程概况

惠盐高速公路深圳段是国家纵向高速公路——长深和沈海高速公路的一段,广东省第三纵、第五横高速公路的重要组成部分,珠三角东部

地区最重要的纵向高速公路之一,也是一条贯通中国东南沿海地区的高速公路。图1为如意路嶂背隧道、惠盐高速公路隧道平面示意图。



图1 如意路嶂背隧道、惠盐高速公路隧道平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Ruyi Road Zhangbei Tunnel and Huiyan Expressway Tunnel

惠盐高速公路下穿隧道为如意路嶂背隧道,该隧道采用复合式衬砌,初期支护以钢架、锚杆、钢筋网、混凝土组成联合支护系统,二次衬砌为C35混凝土。隧道于YK50+865.917~YK50+895.963下穿在建如意路钻爆法隧道,线路纵坡2.7%,隧道埋深34.58 m,路面标高37.141 8 m,最小净距6.31 m,隧道穿越区主要岩土层为强风化泥质粉砂岩夹砂岩、强风化炭质板岩、微风化石英砂岩,地下水埋深8.1~22.6 m,水位高程48.7~52.7 m。强风化炭质板岩为极破碎极软岩,风化程度高,围岩等级为V级。隧道水平跨径为30.98 m,竖直跨径为11.24 m,其衬砌结构如图2所示。

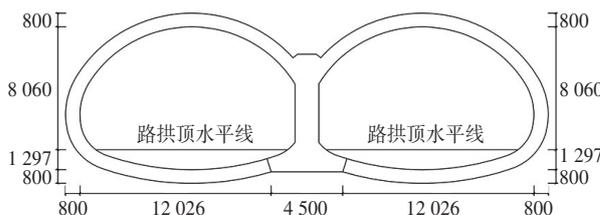


图2 如意路嶂背隧道衬砌结构(单位:mm)

Fig. 2 Lining structure of Ruyi Road Zhangbei Tunnel (unit:mm)

惠盐高速公路钻爆法隧道采用 V_p 型衬砌结构,采用 $\varnothing 180$ mm 洞身大管棚(搭接 5 m)+ $\varnothing 50$ mm 超前小导管+3 m 径向注浆的超前措施,并采用“井”字支撑开挖法的开挖工序。同时,对如意路漳背隧道进行相应支护措施:如意路市政隧道仰拱加厚,下部采用门架桩(直径 800 mm,间隔 2 300 mm),并在桩基处增设横梁,以改善节点处的受力,与如意路漳背隧道形成整体受力体系(图 3)。

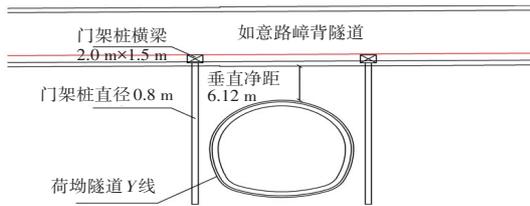


图 3 如意路漳背隧道门架桩三维模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three-dimensional model of Ruyi Road Zhangbei Tunnel gantry pile

2 门架桩三维荷载结构模型分析

2.1 计算模型的参数

为验证门架桩加固方案的合理性以及采用门架桩保护措施对既有隧道的影响,本节采用 ABAQUS 有限元软件,建立三维壳(Shell)-梁(Beam)荷载结构模型(图 4),分析有无门架桩对既有隧道变形以及内力的影响。模型纵向计算长度为惠盐立体层隧道开挖外径的 3 倍,如意路衬砌结构采用 C35 混凝土,桩基及横梁采用 C40 混凝土。图 5 为如意路漳背隧道荷载分布示意图。

依据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)附录 G 中的连拱隧道围岩压力计算方法,本文按超浅埋连拱隧道计算围岩压力,并采用最不利地勘参数,计算最不利水土荷载,结果见表 1。



图 4 如意路漳背隧道门架桩荷载结构模型

Fig. 4 Load structure model of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

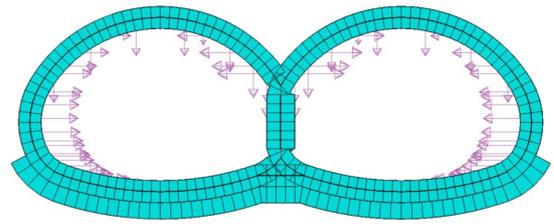


图 5 如意路漳背隧道荷载分布示意图

Fig. 5 Load distribution diagram of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

表 1 如意路漳背隧道水土荷载

Table 1 Soil and water load of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

荷载类别	荷载/kPa	荷载类别	荷载/kPa
顶部垂直土压力	426	连拱顶部垂直土压力	62
顶部侧向土压力	112	连拱顶部侧向土压力	112
底部侧向土压力	162	连拱底部侧向土压力	124

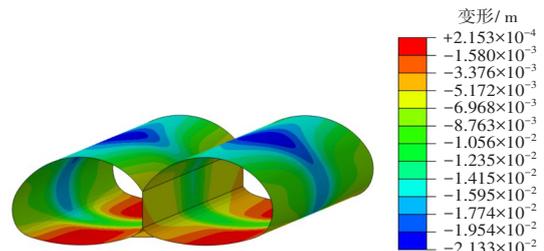
2.2 结果分析

对比有无门架桩保护措施下的隧道变形与内力云图(图 6),可以得到如下结论:

1) 无论是否施加门架桩保护措施,如意路漳背隧道交叉段的受力均以横向受力为主。

2) 中隔墙顶部及底部衬砌受力最大,峰值弯矩达 4 813 kN·m,主要分布于隧道拱顶与左、右拱脚位置;边墙区域衬砌的弯矩较大,达 4 014 kN·m;仰拱及拱顶区域衬砌的峰值弯矩达 3 175 kN·m。对比有无门架桩的情况,发现采用门架桩保护措施能略微降低隧道的横向弯矩,有门架桩时正弯矩峰值降低了 4.0%,负弯矩峰值降低了 6.2%。但需要注意的是,施作门架桩也会增大隧道的横向轴力。

3) 当如意路漳背隧道底部脱空后,采用门架桩保护措施后结构的最大位移约为 21.33 mm,不采用门架桩保护措施下结构的最大位移约为 24.76 mm,位移增大了约 3.43 mm,采用门架桩方案后隧道底部变形降低了 13.85%。



(a) 门架桩加固隧道结构变形

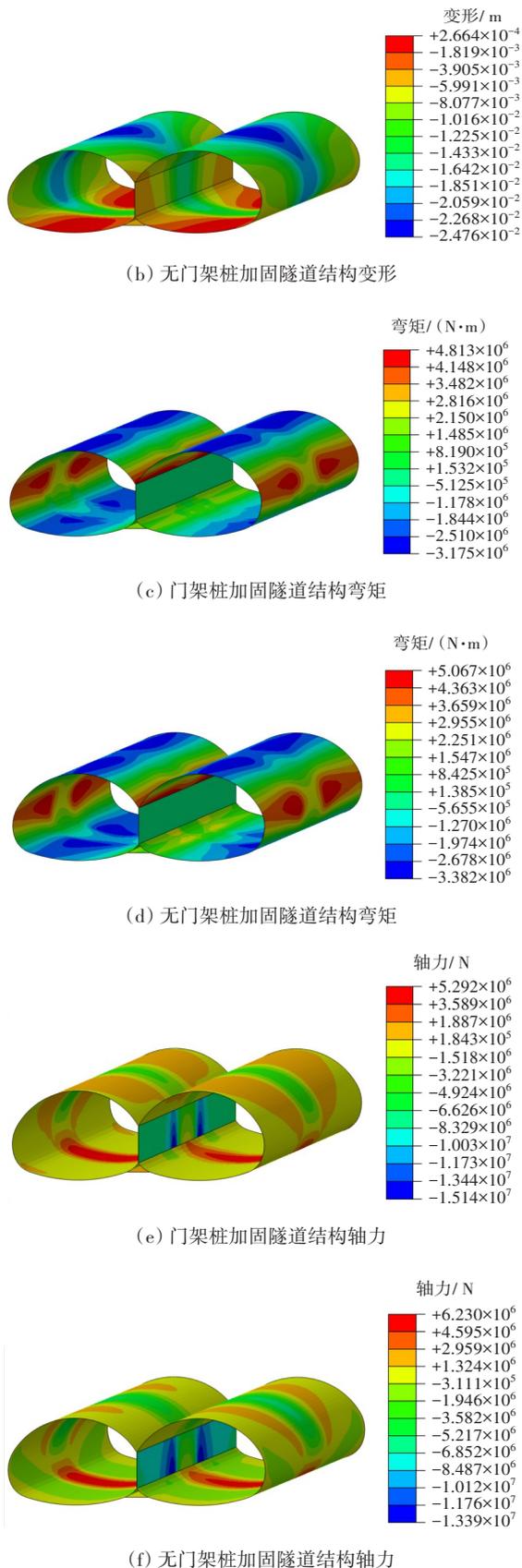


图6 如意路漳北隧道变形与内力云图

Fig. 6 Cloud diagram of deformation and internal force of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

3 门架桩三维地层结构模型分析

3.1 计算模型的参数

为探究门架桩保护措施在隧道开挖阶段对既有隧道的影响,本节计算模型采用ABAQUS软件对钻爆法隧道开挖进行三维精细化建模分析。计算范围取隧道水平方向两侧洞径的3倍,顶面以上取至地表,底部边界为隧道底部下方洞径的3倍位置,最终模型按照竖向高度120 m,横向宽度100 m以及纵向50环建立三维有限元模型。隧道模型尺寸为:宽×高×长=100 m×120 m×120 m。

假定隧道周围土体为弹塑性材料,破坏准则采用摩尔-库伦准则,采用默认的六面体网格单元。模型中衬砌结构采用壳单元。管棚及锚杆加固区采用实体单元,具体模型如图7所示。模型中土层以及新旧隧道结构参数见表2。

模型边界条件为:左右两侧水平方向固定,底部为竖直方向固定,上部(地表面)为自由边界。

本文三维数值计算分为两种工况,设置如下:

1) 工况1:采取常规加固保护措施。钻爆法隧道采用管棚及锚杆加固措施,在加固措施施工完成后,盾构隧道下穿如意路漳背隧道。

2) 工况2:采取常规加固保护措施+门架桩加固。钻爆法隧道采用管棚及锚杆加固措施,同时在

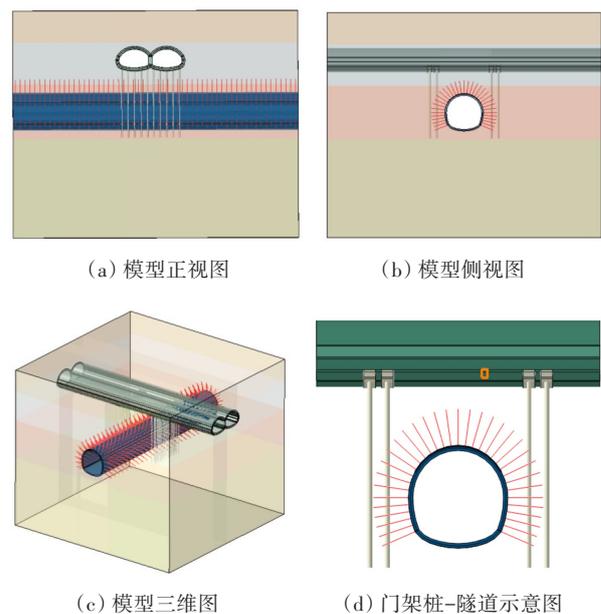


图7 地层结构模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of formation structure model

表 2 土层及隧道结构材料参数

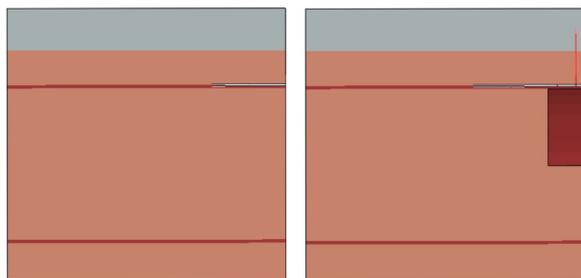
Table 2 Parameters of soil layer and tunnel structure materials

名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦 角/($^\circ$)	泊松比	弹性模 量/ GPa
粉质黏土	1 850	22	18	0.38	0.016
强风化泥质粉砂岩	1 900	30	28	0.35	0.070
强风化炭质板岩	1 850	28	25	0.35	0.065
中风化炭质板岩	2 200	200	30	0.33	2.000
喷层+钢拱架	2 400			0.20	32.100
衬砌结构	2 400			0.20	32.500
大管棚超前支护	3 200	79	25	0.30	17.350
锚杆	7 800			0.20	210.000

如意路嶂背隧道下方施作门架桩加固措施,当所有加固措施施工完成后,盾构隧道下穿如意路嶂背隧道。

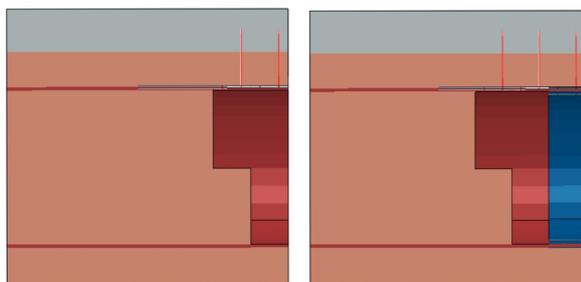
为分析隧道采用门架桩保护措施对既有如意路嶂背隧道结构的影响,本次计算参考了实际施工流程,并对隧道开挖以及支护措施进行了一定的简化,以提高计算的收敛性。以工况 2 为例,隧道开挖过程的典型施工步骤如下(图 8):

- ① 对土体进行地应力平衡,如意路嶂背隧道一步挖通,同时施作门架桩等保护措施;
- ② 对隧道进行 10 m 超前管棚支护;



(a) 施工步骤②

(b) 施工步骤③



(c) 施工步骤④

(d) 施工步骤⑤

图 8 隧道开挖施工步骤示意图

Fig. 8 Construction step diagram of tunnel excavation

③ 在隧道上半部分开挖 4 m 土体,同时对开挖区域进行初期支护和锚杆支护;

④ 在隧道上半部分和下半部分开挖 4 m 土体,同时对开挖区域进行初期支护和锚杆支护;

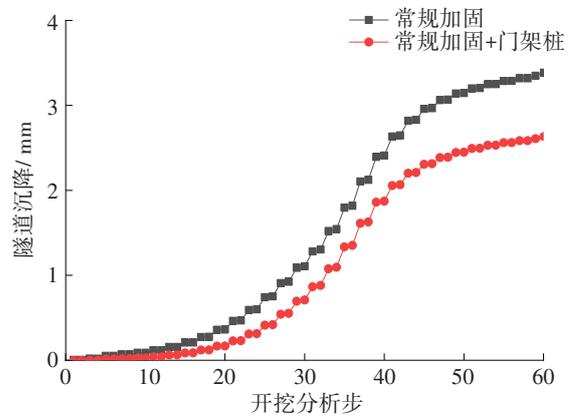
⑤ 对步骤④开挖的土体施作二次衬砌;

⑥ 对步骤④、⑤循环 30 次,开挖完成。

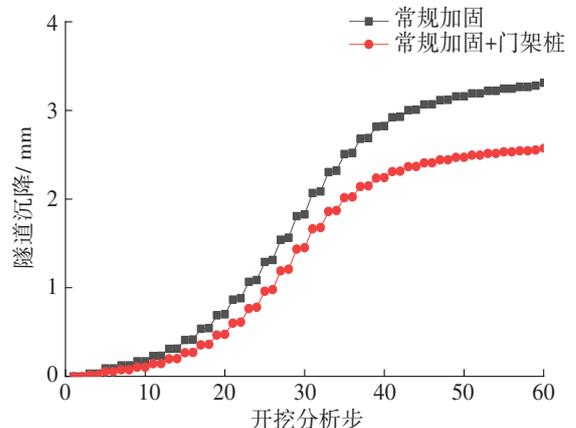
需要注意的是,由于 ABAQUS 软件没有如 FLAC^{3D} 以及 GTS NX 等专业岩土通用有限元软件中清除初始位移场的操作,故在如意路开挖(步骤①)后隧道会不可避免地出现较大的初始位移,后文中所有的分析均以相对位移进行比较。通过对完成上述步骤后的结果进行分析,可以从整体上评估隧道施工对上部隧道结构安全性的影响。

3.2 如意路嶂背隧道沉降结果分析

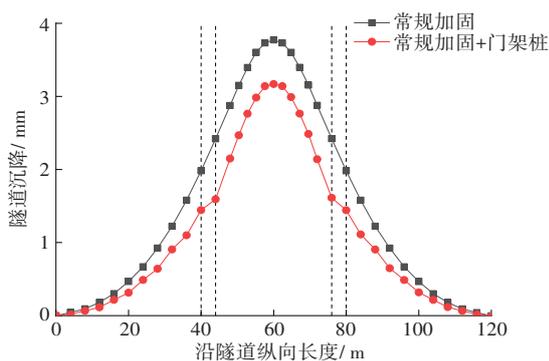
提取如意路嶂背隧道开挖结束时刻隧道左线与右线中心位置的沉降,同时提取隧道沿纵向的沉降,比较有无门架桩对如意路嶂背隧道变形的影响。汇总各工况下隧道的沉降曲线,结果如图 9 所示。



(a) 左线隧道中心仰拱沉降曲线



(b) 右线隧道中心仰拱沉降曲线



(c) 隧道沿纵向仰拱沉降曲线

图9 如意路嶂背隧道沉降曲线

Fig. 9 Settlement curve of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

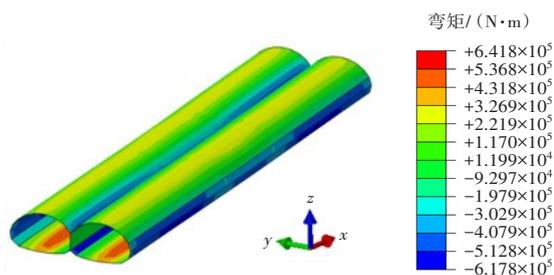
分别观察如意路嶂背隧道中心位置和隧道沿轴线方向的沉降。从图9可以看出,施作门架桩可以有效降低如意路嶂背隧道开挖引起的沉降。其中,左线隧道沉降最大降低了0.75 mm,降低幅度达22%;右线隧道沉降最大降低了0.72 mm,降低幅度达21%。

观察如意路嶂背隧道沿纵向的沉降曲线可知,在隧道0~20 m以及100~120 m的区域,无论是否施作门架桩,其沉降差距都很小,但越接近隧道中心,两者的差距越大。在40~45 m以及75~80 m的位置(门架桩施作区域),采用门架桩加固措施后,隧道沉降曲线的斜率发生了突变,斜率明显减小,表明施作门架桩能够有效降低隧道沉降。

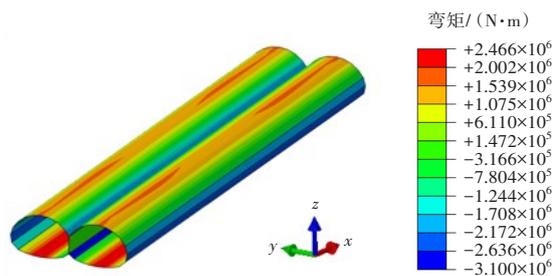
3.3 如意路嶂背隧道内力结果分析

根据如意路嶂背隧道开挖结束时刻隧道的弯矩与轴力云图,比较有无门架桩对如意路嶂背隧道内力的影响。各工况下隧道的内力云图见图10。

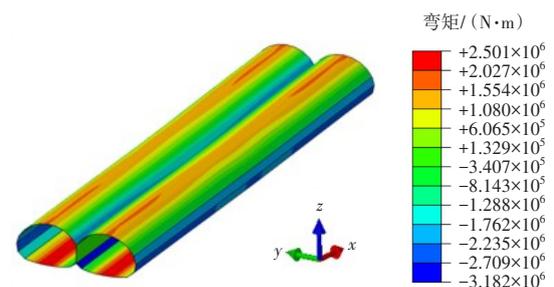
从图10可以看出,如意路嶂背隧道在开挖过程中主要承受地应力荷载,即以横向弯矩为主。同时,由于隧道沿纵向发生了不均匀沉降,隧道沿纵向的内力也不可忽视。对比有无门架桩的两种工况可以看出,施作门架桩会增大门架桩影响区域内隧道的内力。提取各项内力峰值,结果见表3。



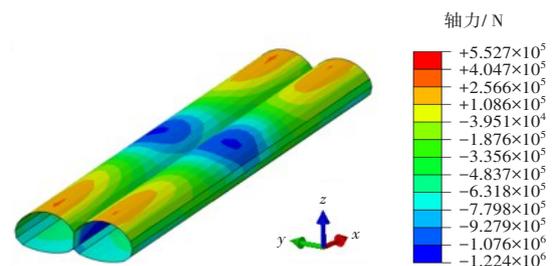
(b) 门架桩+常规加固措施下隧道纵向弯矩



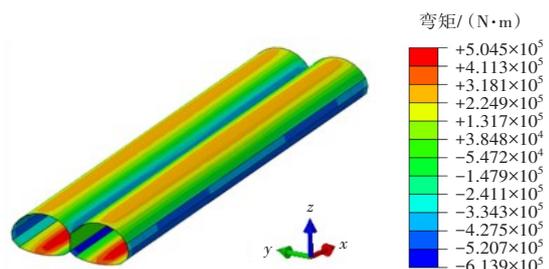
(c) 常规加固措施下隧道横向弯矩



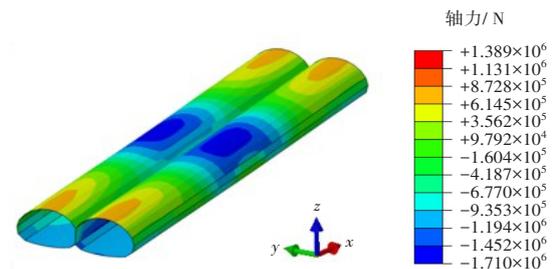
(d) 门架桩+常规加固措施下隧道横向弯矩



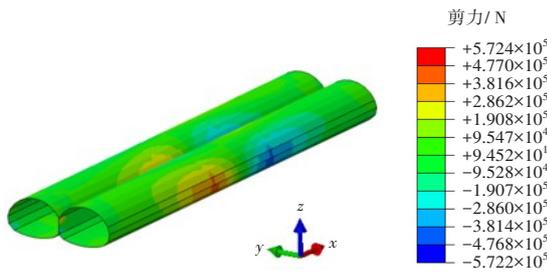
(e) 常规加固措施下隧道纵向轴力



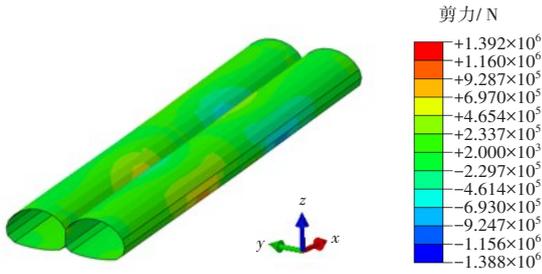
(a) 常规加固措施下隧道纵向弯矩



(f) 门架桩+常规加固措施下隧道纵向轴力



(g) 常规加固措施下隧道横向剪力



(h) 门架桩+常规加固措施下隧道横向剪力

图 10 如意路漳背隧道内力云图

Fig. 10 Cloud diagram of internal force of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

表 3 如意路漳背隧道峰值内力

Table 3 Peak internal force of Ruyi Road Zhangbei Tunnel

工况	横向弯矩/ (kN·m)	纵向弯矩/ (kN·m)	横向剪力/ kN	纵向轴力/ kN
无门架桩	3 100.0	613.9	139.2	1 224.0
有门架桩	3 182.0	617.8	572.4	1 701.0

从表 3 可以看出,施作门架桩使隧道横向与纵向弯矩峰值得到了小幅提升,但提升幅度有限,最大增幅仅为 3%;施作门架桩极大地提高了隧道的横向剪力峰值(处于门架桩施作位置),增幅为 433.2 kN,增大了 311%;隧道纵向轴力峰值也有一定程度的提升,增大了 39%。

4 结论与建议

本文通过数值仿真软件 ABAQUS,首先采用荷载结构模型对门架桩保护措施进行了校核,初步验证门架桩加固方案的可行性以及计算的合理性。在此基础上,重新建立了三维精细化地层结构模型,模拟了当采用门架桩保护措施时,钻爆法隧道施工对如意路漳背隧道结构的影响,得到如下

结论:

1) 在不采用保护措施的工作下,在惠盐钻爆法隧道开挖过程中,既有如意路漳背隧道最大沉降为 3.56 mm;当采用门架桩保护措施后,如意路漳背隧道最大沉降降低至 2.49 mm,降幅达 30%,表明采用门架桩能够有效降低既有隧道开挖导致的沉降。

2) 当采用门架桩保护措施后,如意路漳背隧道无论是纵向还是横向内力均有不同程度的提升,其中纵向与横向弯矩峰值提升不明显,最大增幅仅为 3%。但是需要着重关注隧道轴力与剪力的变化情况,其中,隧道横向剪力峰值的增幅最为明显,增幅达 311%。

3) 由两种工况的计算结果可知,无论是否采用保护方案,如意路漳背隧道的沉降变形均未达到 10 mm,即在安全范围内,但采用门架桩保护措施能够增大隧道整体的安全冗余,更好地控制隧道变形。

参考文献(References):

[1] 钱七虎. 城市可持续发展与地下空间开发利用[J]. 地下空间, 1998, 18(2): 69-74.
Qian Qihu. Sustainable development of the cities and the development and utilization of underground space [J]. Underground Space, 1998, 18(2): 69-74.

[2] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.002.
HONG Kairong. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123-134. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2017.02.002.

[3] 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.01.001.
HE Chuan, FENG Kun. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel with large cross-section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.01.001.

[4] 郭卫社. 浅埋暗挖法新趋势[J]. 隧道建设, 2012, 32(6): 757-762.
GUO Weishe. New trends of shallow-cover mining method [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(6): 757-

- 762.
- [5] 李倩倩, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增刊2): 3911-3918. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.065.
- LI Qianqian, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Analysis of deformation characteristics of shallow-buried and underground excavation method under existing shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (sup 2): 3911-3918. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.065.
- [6] 周晓军, 周佳媚. 城市地下铁道与轻轨交通[M]. 2版. 成都: 西南交通大学出版社, 2016.
- ZHOU Xiaojun, ZHOU Jiamei. Urban metro and light rail transit [M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [7] 刘建美, 刘洋. 地铁隧道近距离下穿既有地铁站变形规律和安全控制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14 (6): 202-207, 212. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.039.
- LIU Jianmei, LIU Yang. The settlement and controlling measures of subway station in short distance during the under-passing of metro tunnel construction[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14 (6): 202-207, 212. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.039.
- [8] 周建伟. 地铁隧道下穿高速公路的围岩变形机理研究[J]. 四川水力发电, 2015, 34 (6): 58-60. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2184.2015.06.023.
- ZHOU Jianwei. Study on deformation mechanism of surrounding rock of subway tunnel under expressway[J]. Sichuan Water Power, 2015, 34 (6): 58-60. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2184.2015.06.023.
- [9] 陈赟, 李倩. 基于复杂网络的隧道施工塌方风险演化研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 129-137. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.013.
- CHEN Yun, LI Qian. Research on evolution of collapse risk in tunnel construction based on complex network[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19 (2): 129-137. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.013.
- [10] 王雨, 徐锦斌, 王凯旋, 等. 隧道下穿引起地下管线下沉的主控因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(1): 39-45. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2014.01.006.
- WANG Yu, XU Jinbin, WANG Kaixuan, et al. Analysis on main controlling factors of settlement induced by tunnel beneath through underground pipeline[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(1): 39-45. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2014.01.006.
- [11] 周飞, 陈志敏, 文勇, 等. 交通荷载作用下超浅埋隧道洞口段变形及控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 168-175. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.04.024.
- ZHOU Fei, CHEN Zhimin, WEN Yong, et al. Research on deformation and control of entrance section in ultra-shallow buried tunnel under traffic load [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(4): 168-175. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.04.024.
- [12] 刘夏临, 张军, 陈必光, 等. 盾构隧道下穿城市高架桥桩基预加固方案研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 218-224. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.06.026.
- LIU Xialin, ZHANG Jun, CHEN Biguang, et al. Study on pre-reinforcement schemes for a shield tunnel passing under the pile foundation of an urban viaduct[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 218-224. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.06.026.
- [13] 陈敬军. 超浅埋暗挖双层隧道下穿城市主干道设计[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 825-833.
- CHEN Jingjun. Design of double deck tunnel under passing urban main road with super shallow buried subsurface excavation method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 825-833.
- [14] 孙逸玮, 黄戡, 李宇健. 既有桥桩对盾构引起地表沉降槽的变形影响[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 79-87. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.013.
- SUN Yiwei, HUANG Kan, LI Yujian. Influence of existing bridge pile foundation on the deformation of surface settlement trough induced by shield tunneling[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38 (1): 79-87. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.013.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:刘治军)