



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308729

引用格式:杨超,刘远明,刘凯,等.贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路沉降规律[J].科学技术与工程,2025,25(5):2100-2110.

Yang Chao, Liu Yuanming, Liu Kai, et al. Settlement laws of Guiyang metro shield tunnel passing through high-speed railway[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 2100-2110.

贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路沉降规律

杨超¹, 刘远明^{1*}, 刘凯², 田茂亮¹, 程家军¹, 王忠星¹

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025; 2. 中铁开发投资集团有限公司, 昆明 650000)

摘要 盾构隧道穿越高速铁路会对铁路轨道、路基等构筑物沉降产生影响,严重影响高速铁路的运行。为研究贵阳地区盾构隧道下穿高速铁路对框架涵、路基和高铁轨道沉降规律的影响和适用于贵阳地区的盾构施工参数,依托贵阳轨道交通3号线,建立土层-框架涵-道床-轨道的模型,分析在石灰岩中盾构施工对框架涵、既有高铁轨道和路基的沉降规律,并且对盾构施工参数进行优化。结果表明:盾构隧道下穿框架涵,框架涵的横向沉降和纵向沉降呈“W”形,从沉降曲线整体来看,沉降曲线呈“双蝶状”曲线,掘进过程中框架涵沉降峰值为1.805 mm;盾构机穿越路基和隧道贯通时会引起路基沉降的突变,随着开挖的进行,路基沉降会产生沉降峰值的转移,路基沉降峰值为1.753 mm;高铁轨道沉降曲线随着开挖呈现单个峰值且沉降槽的宽度与框架桥宽度大致相同,轨道沉降的峰值为1.41 mm;通过分析8种盾构掘进压力和8种注浆压力对路基沉降的影响规律可知,注浆压力较掘进压力对沉降具有较好的控制效果,并且随着注浆压力的提升,路基表面沉降峰值在减小,注浆压力为800 kPa时,路基表面沉降峰值为1.355 mm,变形率最大为20.7%,经分析,将盾构机的注浆压力和掘进压力分别设置为400 kPa和100 kPa。

关键词 盾构隧道; 沉降; 框架桥涵; 铁轨; 路基; 盾构参数

中图法分类号 U45; 文献标志码 A

Settlement Laws of Guiyang Metro Shield Tunnel Passing through High-speed Railway

YANG Chao¹, LIU Yuan-ming^{1*}, LIU Kai², TIAN Mao-liang¹, CHENG Jia-jun¹, WANG Zhong-xing¹

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. China Railway Development & Investment Group Co., Ltd., Kunming 650000, China)

[Abstract] The construction of the shield tunnel for the high-speed railway will impact the settlement of railway tracks, roadbeds, and other structures, potentially affecting the railway's operation. In order to study the influence of shield tunnel underneath the high-speed railway in Guiyang area on the settlement pattern of frame box culvert, roadbed and high-speed railway track and the shield construction parameters suitable for Guiyang area, relying on Guiyang Rail Transit Line 3, the model of soil layer-frame culvert-roadbed-track was established to analyze the settlement law of shield construction in limestone on frame culvert, existing high-speed railroad track and roadbed, and to optimize the parameters of shield construction. The results indicate that the settlement of the frame culvert exhibits a “W” shaped transverse and longitudinal settlement pattern, with a peak settlement value of 1.805 mm during the tunneling process. The shield machine's crossing causes a sudden change in subgrade settlement, with the peak value reaching 1.753 mm. High-speed rail track settlement shows a single peak with excavation, with a peak value of 1.41 mm. Analysis of eight types of shield tunneling pressure and grouting pressure reveals that grouting pressure has a better control effect on settlement than excavation pressure. Increasing grouting pressure leads to a decrease in the peak value of subgrade surface settlement, with the peak value reaching 1.355 mm at 800 kPa grouting pressure. The maximum deformation rate is 20.7%, with grouting pressure set at 800 kPa and tunneling pressure at 100 kPa for the shield machine.

[Keywords] shield tunnel; settlement; frame bridge culvert; railroad track; roadbed; shield parameters

随着中国社会经济等各方面的快速发展,城市轨道交通得到快速发展,地铁盾构隧道下穿既有铁路框架桥常有发生,在石灰岩发育的地质情况下,

下穿既有铁路施工时,尤其是盾构隧道下穿高速铁路框架涵,对框架涵变形、内力和沉降等提出了更高的要求。由于盾构隧道施工改变了既有铁路地

收稿日期: 2023-11-07 修订日期: 2024-07-04

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2022]一般082); 贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1057号); 贵阳市轨道交通科研项目(GD3-FW-YJ-05-2020-13-ZB)

第一作者: 杨超(1998—),男,汉族,贵州遵义人,硕士研究生。研究方向: 岩土与隧道空间。E-mail: 1492604588@qq.com。

* 通信作者: 刘远明(1975—),男,汉族,贵州铜仁人,博士,教授。研究方向: 岩土及隧道工程。E-mail: 845612605@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

基岩土体应力场,造成开挖面周围土体的扰动,导致隧道周围土体发生位移,进而引起地表变形,势必引起铁路线路的变形,严重时还会影响到铁路的运营安全^[1]。贵阳地层中石灰岩分布极为广泛,在此地区修建地铁,穿越石灰岩地层是非常普遍的,地下水丰富,而且地铁隧道较多部分通过该地层,石灰岩岩溶对工程施工的安全、质量、工期、投资等均会造成不利影响^[2]。目前,国内对盾构隧道下穿框架桥进行了众多研究,常惠涵^[3]以长沙市轨道交通3号线某段为例,重点分析施工过程存在的难点,提出了影响穿越的因素为框架桥自身的状况、盾构施工控制,并提出相应的解决方案;王国富等^[4]以盾构隧道下穿京沪铁路框架涵为背景,分析了下穿施工中桥涵结构应力变形和铁路轨道变形特征;朱仔旭等^[5]在中风化泥质粉砂岩中基于铁路大系统动力学与有限元理论建立耦合动力模型,研究了地层加固前后和开挖完成后所引起铁路框架涵沉降变形规律;刘成虎^[6]以贵阳地铁3号线一期师范学院站—东风镇站盾构区间下穿贵广高铁框架涵掘进施工为例,通过采取几种地表和洞内岩溶探测手段,提前进行岩溶的探测和处理,为岩溶地区地铁盾构下穿重要建(构)筑物工程提供参考;欧阳鸿志等^[7]通过工法比选、数值分析及现场监测等方法对富水砂层盾构隧道下穿独立浅基础铁路桥的加固方案进行了研究;王继峰等^[8]、张亚洲等^[9]、刘维正等^[10]、李辉平^[11]分析了盾构隧道下穿框架桥的变形规律并提出相关的控制措施;师亚龙等^[12]通过分析吉隆坡的特殊地质下隧道掘进过程中的监控量测数据,提出石灰岩地质隧道掘进过程中地面塌陷具有突发性,提出利用地质扫描提前探测溶洞并予以处理;刘琤玉等^[13]就盾构隧道施工对斜交框架结构内力的影响进行了研究。

盾构隧道施工对铁轨和地基等结构的沉降的影响研究由来已久。亓培先^[14]通过数值模拟研究了在粉砂地层中盾构下穿高速铁路施工时引起的路基、地表、铁轨变化规律;高洪吉等^[15]研究了浅埋大直径土压平衡盾构施工穿越砂卵石地层造成的地表沉降规律,得出隧道上方地表最大沉降和地层损失率随覆土厚度增加而减小;郝爽^[16]分别通过室内模型试验、三维数值模拟和理论分析研究手段,对隧道下穿铁路箱涵引起的上部铁路轨道变形进行了研究;Gong等^[17]以两个高速铁路桥下盾构隧道施工工程实例为研究对象,分析了隧道施工对轨道不平顺的影响;Liu等^[18]以潍坊市襄阳路隧道下穿胶济铁路客运专线和胶济铁路改造工程隧道为例,研究了双线平行隧道盾构施工对既有铁路轨道群的影响;杨景超等^[19]结

合成都地铁9号线下穿铁路线为工程背景,研究了盾构下穿铁路线加固措施,并通过分析实地监测数据,确定合理的盾构施工参数;Liu等^[20]以郑州地铁4号线下穿陇海铁路为例分析了盾构施工对既有铁路的影响;付春青等^[21]以北京地铁12号线盾构穿越机场专线为背景,提出了适合既有隧道纵向刚度折减的修正等效连续模型分析近距离下穿施工对既有盾构隧道的影响。

上述研究对盾构隧道穿越铁路对框架涵、轨道和地基在地质等因素的影响下内力、变形等方面进行了详细研究。但贵阳地区地质复杂,修建地铁采用盾构尚属首次,无相关经验可循,并且盾构隧道下穿框架涵为盾构穿越施工的难点,也是此标段盾构施工的关键点,并且,在贵阳地区进行盾构掘进,盾构掘进过程中对高速铁路路基、框架涵、高铁轨道的沉降规律尚不明确。因而,现基于贵阳地铁3号线下穿贵广客专框架涵工程,研究盾构隧道在石灰岩地区下穿对框架涵的沉降的影响,分析盾构下穿过程中对铁路轨道和路基沉降的影响,并通过对盾构施工设置不同注浆压力和掘进压力分析路基沉降的规律,以此来优化盾构施工的参数,以期为石灰岩地区盾构下穿高速铁路施工提供借鉴。

1 工程概况

贵阳轨道交通3号线一期工程全长43.191 km,起点为花溪环城高速公路北侧的桐木岭站,终点为乌当区洛湾站^[22],地铁全线多次穿越石灰岩地层。

师范学院站—东风镇站区间盾构段自区间明挖段盾构始发井出发,沿东风大道由东向西敷设,最终到达东风镇站小里程端盾构接收井。区间在里程YDK46+416.046~YDK46+433.470、ZDK46+415.252~ZDK46+432.738范围下穿贵广客专水东路框架涵,区间隧道下穿贵广客专框架涵的卫星图如图1所示,区间隧道与贵广客专水东路立交框架平面关系图如图2所示,贵广客专框架涵中心里程10+433。框架涵为两跨12 m框架结构,基础采用CFG桩加固,桩底标高1 022.86 m,梁底高1 035.63 m,区间隧道在下穿位置轨面标高1 012.577~1 012.230 m,盾构区间拱顶距离框架涵底板的设想距离约11 m,覆土埋深13.670~13.790 m,其中岩层厚度5.2~10 m,主要穿越地层中风化石灰岩。

工程采用盾构法施工,衬砌采用环宽1.5 m钢筋混凝土管片,内径5.5 m,外径6.2 m。厚0.35 m,强度等级C50,抗渗等级为P12,管片组装方式采用“3+2+1”错缝拼装,实际施工中,管片实际拼装如图3所示。

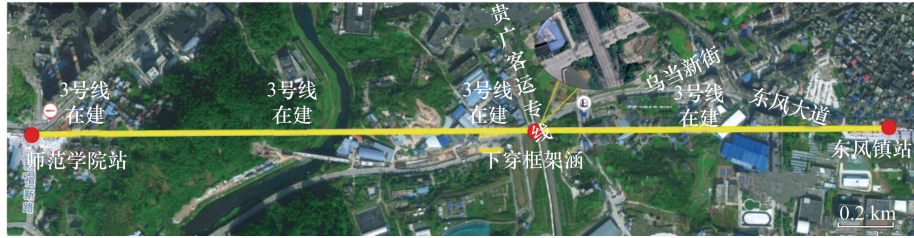


图1 研究区间线路平面

Fig. 1 Line plan of the studied interval

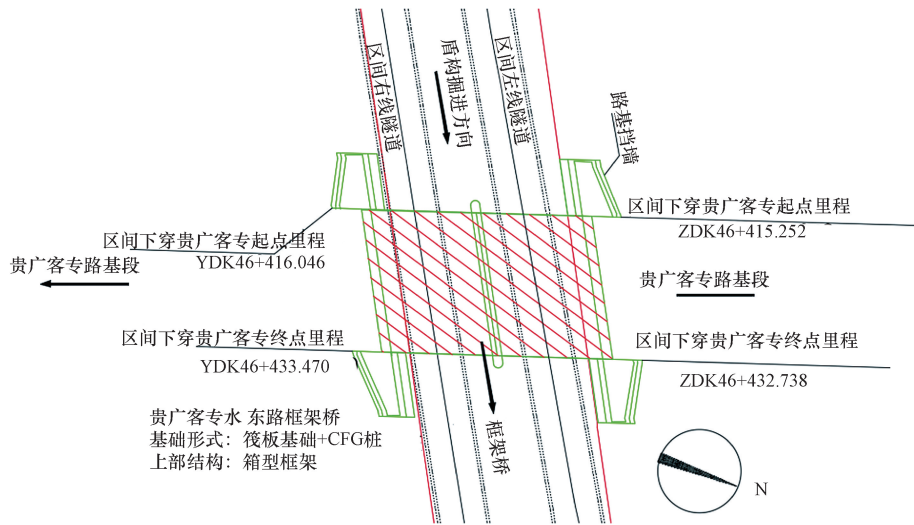


图2 区间隧道与贵广客专水东路立交框架平面关系图

Fig. 2 Relationship between the inter-district tunnel and the framework of Shuitong Road Interchange of Guiguang Hakka specialized railway

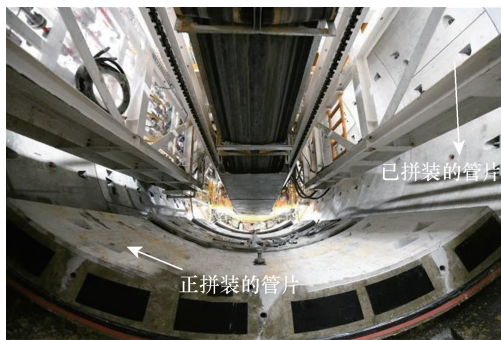


图3 管片拼装图

Fig. 3 Tube piece assembly diagram

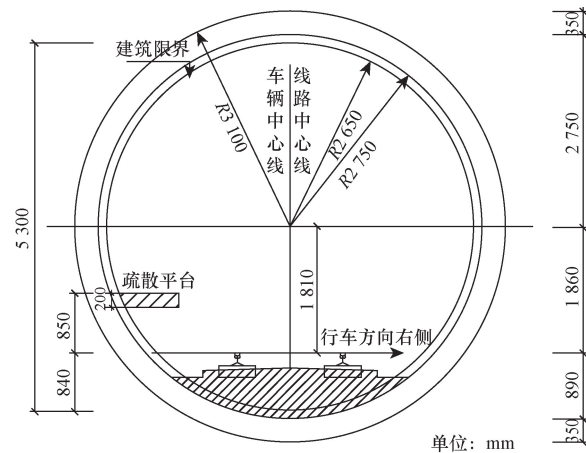


图4 隧道断面设计图

Fig. 4 Tunnel cross-section design

2 数值模拟模型建立

2.1 数值模拟模型

采用 Midas GTS NX 数值模拟软件,为减弱边界效应的影响,模型尺寸长 110 m × 宽 60 m × 高 80 m (包含杂填土 1),模型以自重应力为主,边界条件设置为四周和地面边界 x 、 y 轴方向位移均为零。

根据实际工程综合考虑,取双线隧道埋深 11 m。双线隧道间距 13 m,单洞内径 5.5 m,外径 6.2 m,隧道断面设计图如图 4 所示,管片厚 0.35 m。

基于区间地勘报告,经过均匀化处理^[23],将模型分为 4 层,上面两层为杂填土,(其中杂填土 1 在修建框架涵时已被开挖),下面两层依次分别是粉质黏土和中风化灰岩,如图 5 所示。

三维模型中土层和注浆层(硬化前以及硬化后)选用 Mohr-Coulomb 本构模型,地层物理力学参数和支护结构材料参数分别如表 1 ~ 表 3 所示。

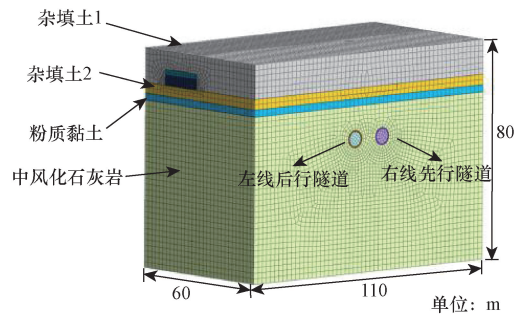


图5 原始地层图形

Fig. 5 Graphic of the original stratigraphy

表1 地层物理力学参数

Table 1 Stratigraphic physico-mechanical parameters

土层名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
杂填土1	19.2	8.0×10^3	0.42	8	17
杂填土2	19.2	8.0×10^3	0.42	8	17
粉质黏土	17	2.5×10^4	0.37	40	15
中风化灰岩	27.1	5.0×10^5	0.27	500	40

表2 支护结构参数

Table 2 Support structure parameters

结构名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	单元类型
管片	25	3.45×10^7	0.2	2D
盾壳	1 850	2.06×10^8	0.3	2D
注浆未硬化	22	3.5×10^5	0.25	3D
注浆硬化	23	1.05×10^6	0.25	3D

表3 既有结构参数

Table 3 Established structural parameters

结构名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	单元类型
框架涵	23	3.6×10^7	0.2	—	—	3D
褥垫层	23	3.6×10^7	0.2	—	—	3D
CFG 桩	23	3.0×10^7	0.2	—	—	1D
钢轨	60	2.1×10^8	0.3	—	—	1D
基床表层	21.56	1.7×10^5	0.3	—	—	3D
基床底层	20.58	1.2×10^5	0.3	—	—	3D

2.2 盾构施工模拟

不考虑地下水、盾构停机以及长期固结等影响因素,对双线隧道进行盾构下穿框架涵模拟,根据施工资料,右线先行,开挖进尺为 1.5 m,即一环管片的宽度,以两环管片作为一个开挖段,每循环包括两个阶段:钝化本开挖段内全部土体、激活盾壳和掘进压力;激活本开挖段的管片、注浆层、注浆压力和千斤顶力,并钝化掉盾壳。下一个开挖段开始后,需要钝化上个开挖段的掘进压力、千斤顶力和注浆压力,其中注浆层需要两次改变属性,第一次是在浆液刚注入盾壳与管片之间时改变材料属性

为浆液未硬化的材料属性,接着将之前的注浆材料属性再次改变为浆液硬化后的材料属性,一个完整的施工过程如图 6 所示。

由于实际施工中,要求间隔在 15 m 以上施工,而实际穿越地段仅 17 m 左右,故施工阶段设置为右线全部开挖完成后,再进行左线开挖,盾构隧道穿越框架涵地表及最终建立的模型如图 7、图 8 所示。

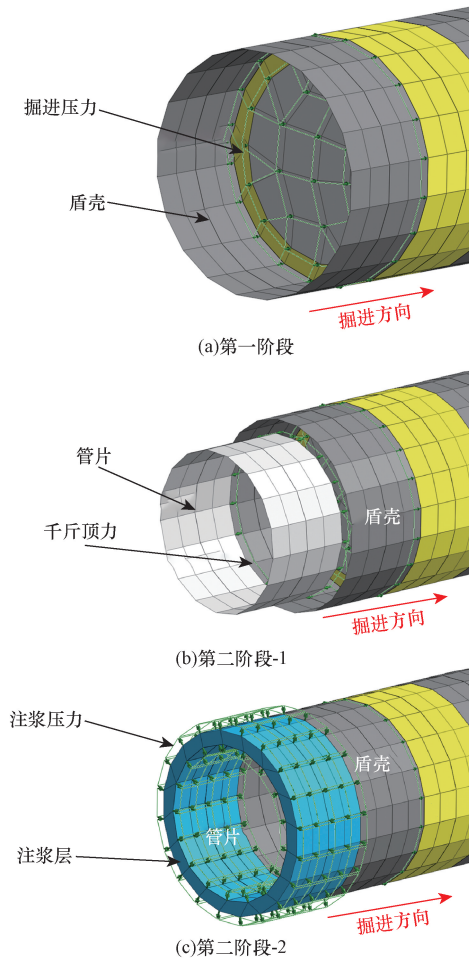


图6 一个开挖段完整施工过程

Fig. 6 Complete construction process for an excavated section



图7 盾构隧道穿越框架涵地表

Fig. 7 Shield tunnel through frame culvert surface

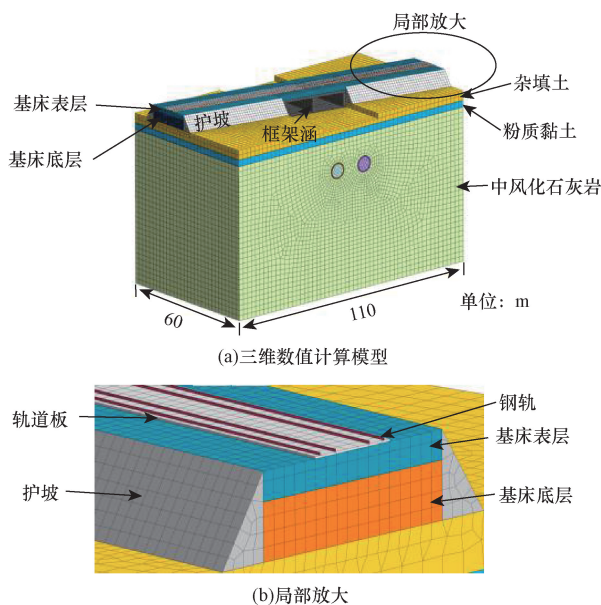


图8 数值模拟模型

Fig. 8 Numerical simulation model

2.3 模型验证

为验证数值模拟模型的准确性,根据工程提供的监测数据,选取 DK46 + 415 截面和 DK46 + 435 截面的监测点数据进行对比,分析地表沉降的实测数据及模拟数据,验证模型的适用性,如图9、图10所示。

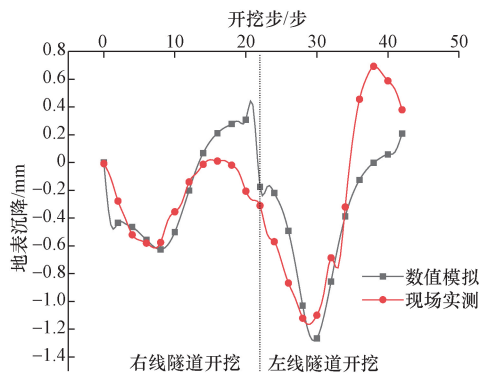


图9 DK46 + 415 截面

Fig. 9 DK46 + 415 cross-section

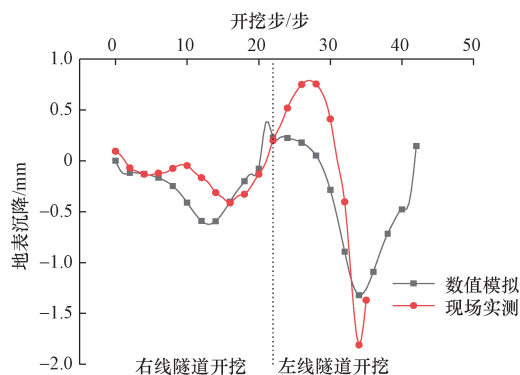


图10 DK46 + 435 截面

Fig. 10 DK46 + 435 cross-section

根据盾构下穿框架涵的监测数据及数值模拟结果显示,模型对实际工程的适合度较好,虽然从数值上来看仍有一定差距,但考虑到相关的简化,此模型较好地模拟实际工程情况。并根据施工对地表沉降的累计值不得超过 30 mm,地表隆起不得超过 10 mm 的要求,根据数值模拟的结果综合看来,数值模拟的结果较为符合《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)要求。

3 沉降规律分析

3.1 框架涵顶面竖向沉降

贵阳地区框架涵在盾构施工中的沉降规律尚不明确,并且关于此地区框架涵沉降规律研究较为少见,因此对框架涵在贵阳地区的沉降规律进行研究。

在框架涵顶面和底面各自布设了 17 个测点,其中,纵向(即与隧道开挖方向相同)布设了 9 个提取结果的测点,从右至左(这里的左和右均与隧道开挖的左右一致)分别为“a-i 点”“b-i 点”和“c-i 点”,其中 $i = 1, 2, 3$;横向(即垂直与隧道开挖方向)布设了 9 个点,从前往后(这里的“前”为盾构机刚开始开挖的那个面,“后”为相应的反面)分别为“1-i 点”“2-i 点”“3-i 点”,其中 $i = 1, 2, 3$;底面布设与顶面一一对应名称分别为 a'、b'、c'、1'、2'、3',其中有一个点是共用的,布设情况如图 11 所示。

框架涵顶面不同测线的部分测点在右隧开挖时的测量数据如图 12 和图 13 所示。

根据图 12 和图 13 可知,就单一曲线而言,框架涵横、纵向沉降呈现“U”形,在仅有右线隧道开挖,框架涵的横向沉降随着距右线距离的增大,其沉降也在逐渐减小,并且随着注浆及后续工艺的完成,以及考虑到框架涵整体刚度较大的情况下,沉降逐渐减小,并且距开挖隧道最远的框架涵一侧出现隆起;对于位于同一纵线上的测点,其沉降的最大值出现的开挖步与其距洞口距离成正相关,说明沉降的发展与盾构开挖的进程相关;对同一纵线上的测

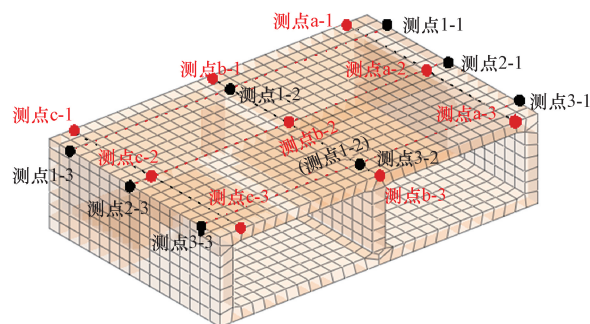


图11 测线布置图

Fig. 11 Layout of survey lines

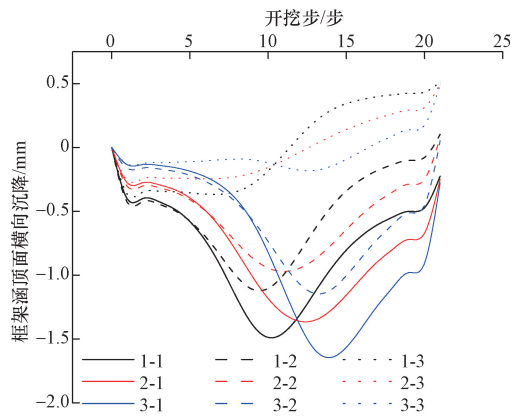


图 12 框架涵顶面横向沉降

Fig. 12 Lateral settlement of the top surface of the frame culvert

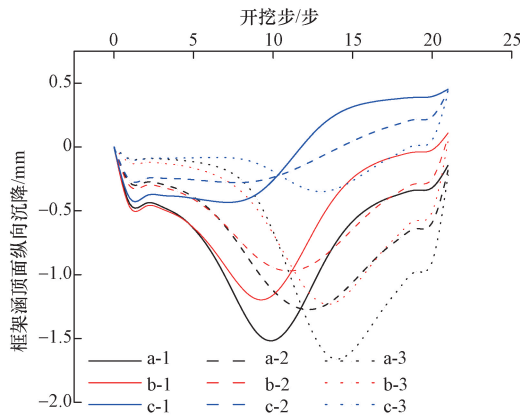


图 13 框架涵顶面纵向沉降

Fig. 13 Longitudinal settlement of the top surface of the frame culvert

点来说,从框架涵的纵向沉降曲线来看,沉降曲线随着盾构隧道开挖呈“蝶状”,并且随着纵线距离开挖线越来越远时,沉降曲线的“蝶状”变得“萎缩”,表明随着纵线距离开挖线越远,框架涵纵向每个测点之间相对沉降量逐渐减小,表明沉降的发展也具有明显的“距离效应”,距离越远,沉降发展得越缓慢;框架涵底面的横向、纵向沉降和顶面的变化规律相一致。

框架涵顶面不同测线的部分测点在先右隧-后左隧开挖时的测量数据如图 14 和图 15 所示。

根据图 14 和图 15 可知,在右隧开挖以后再进行左隧道的开挖。此时,就单一曲线而言,框架涵横、纵向沉降呈现“W”形,并且在先行线的影响下,沉降要大于后行线,并且,从沉降曲线整体来看,框架涵沉降曲线由于两次开挖的影响,呈现“双蝶状”的规律,框架涵的顶面横向沉降、纵向沉降的变化规律与仅右线掘进规律类似,并且也存在明显的距离效应。但是在先进行了右线开挖,而后进行左线

开挖,此时左线整体沉降的最大值明显小于右线,与地表沉降规律不尽相同,考虑到框架涵本身具有较大的刚度,在一定情况下减弱了地层沉降的影响。从整体上看,框架涵的沉降并未超过如表 4 所示的限定值。

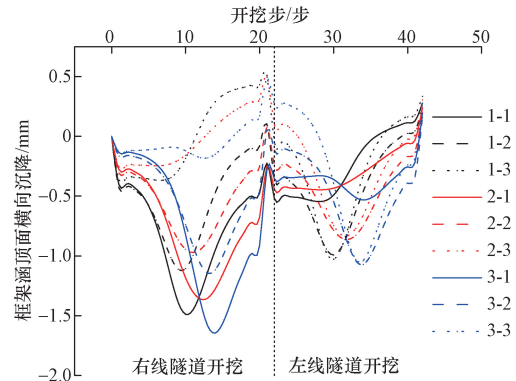


图 14 框架涵顶面横向沉降

Fig. 14 Lateral settlement of top surface of frame culvert

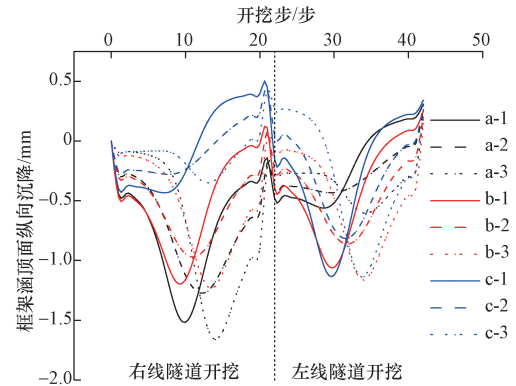


图 15 框架涵顶面纵向沉降

Fig. 15 Longitudinal settlement of the top surface of the frame culvert

表 4 贵广客专水东路框架涵变形控制值

Table 4 Deformation control values of Shuidong Road frame culvert of high-speed passenger line from Guiyang to Guangzhou

项目	预警值/mm	报警值/mm	控制值/mm
框架涵沉降	2.0	4.0	6.0
轨道沉降	1.3	2.6	4.0

3.2 高速铁路基沉降

在盾构隧道开挖时,路基沉降表现为 2 个方面:一方面,随着盾构隧道的开挖,路基沉降的沉降峰值由路基与框架涵交界的中部向交界边缘移动;另一方面,在盾构隧道开挖时,路基沉降发生了 4 次突变,分别发生在右线和左线之中,为便于分析,此处仅对右线出现的两次突变予以分析。

3.2.1 路基沉降峰值的转移

为表示沉降峰值的转移,此处选取了路基表面

沿着路基方向的一条测线来表示,如图 16 所示,相关沉降峰值仅代表测线上点的峰值,并不代表路基整体沉降峰值。

沉降峰值的转移如图 17 所示,可知,当施工步为第 9、10 和 11 个施工步及第 29、30 和 31 个施工步时,盾构隧道在右和左线开挖时路基沉降达到峰值,由图 17 可清楚地知道,路基沉降峰值逐渐发生了转移;沉降峰值的转移是随着盾构隧道的开挖,路基沉降峰值由路基与框架涵交界的中部向交界边缘移动,并且随着盾构隧道右线和左线分别进行开挖,路基沉降曲线的峰值也在朝着右线和左线的方向上移动。在整个隧道开挖过程中,路基的最大沉降为 1.753 mm,满足《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)对路基沉降量的相关要求。

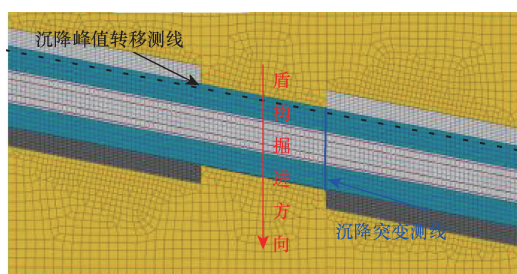


图 16 路基的沉降峰值转移及突变测点布设图(俯视图)

Fig. 16 Layout of settlement peak transfer and sudden change measurement points of roadbed (top view)

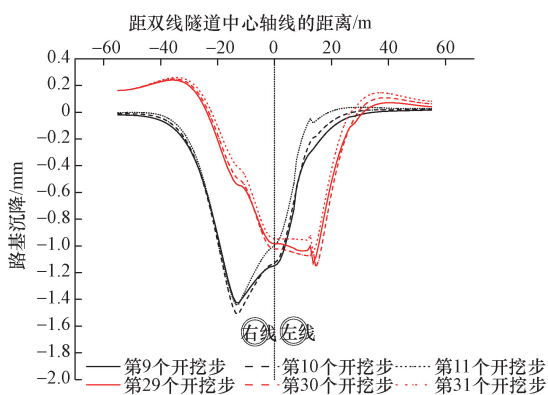


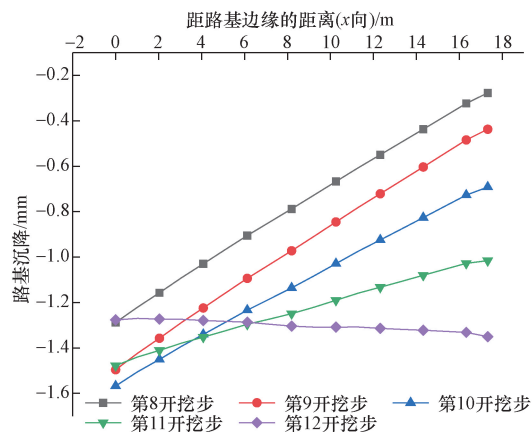
图 17 沉降峰值转移

Fig. 17 Peak sedimentation transfer

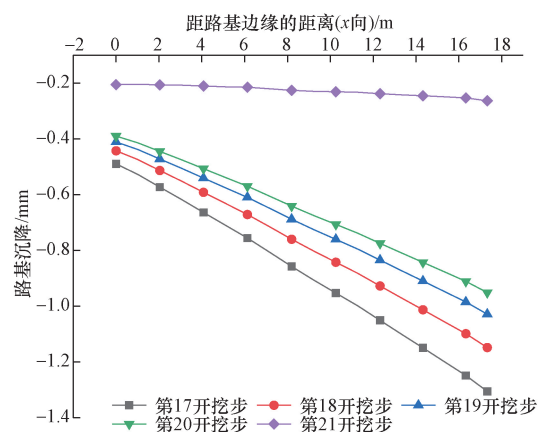
3.2.2 路基沉降的突变

路基沉降的突变如图 18(a)和图 18(b)所示。

路基沉降的突变主要发生在框架涵与路基交界处,故通过选择交界处的路基表面在突变前 3 个开挖步来与突变施工步的沉降来进行对比,由图 18(a)可知,在开挖步为第 8、9 和 10 的时候,各自对应的路基沉降曲线保持平行,并且相邻开挖步之间的差值也较小,但是,第 11 开挖步和第 12 开挖步的路基沉降曲线开始出现不同的规律,首先沉降曲



(a)路基沉降的突变1



(b)路基沉降的突变2

图 18 路基沉降突变

Fig. 18 Sudden change in roadbed settlement

线的平行趋势被打破,在相同的测点上,沉降曲线完成了由陡峭向平缓的转变,在第 12 开挖步时,各测点的沉降值相差不大,与第 8、9、10 开挖步形成明显对比,并且前 4 个开挖步的路基沉降在逐渐变小,而第 12 开挖步的沉降却是在增加,考虑到在开挖过程中,第 12 开挖步为盾构隧道开始穿越高速铁路,此处为盾构施工过程中风险点之一,应着重加强观测。

由图 18(b)可知,路基沉降亦发生了突变,与图 18(a)不同的是,此处突变发生于一侧盾构隧道贯通之时,并且突变开挖步的沉降曲线与图 18(a)表现得不同,此处突变开挖步为第 21 开挖步,与第 17、18、19、20 开挖步相比,第 21 开挖步的沉降曲线较为平缓,而且沉降量均不大,并且与前面开挖步的沉降曲线差值较大,差值由 0.07 mm 增加到 0.63 mm,突变较为明显,表明在隧道贯通之时,也会出现路基沉降的突变,这两种状况下的突变前人少有研究,虽然这突变并没有导致沉降的增加或者是导致沉降由沉降变为隆起,但为保证安全,在隧道贯通之时也应加强观测。

3.3 盾构开挖对高铁轨道沉降影响规律

如图 19 所示,对高铁轨道进行编号,1#~4#高铁轨道在各开挖步上的沉降大致相同,并未出现较大的轨道沉降差异。取 4#轨道随着隧道开挖的沉降数据来分析,如图 20 所示。

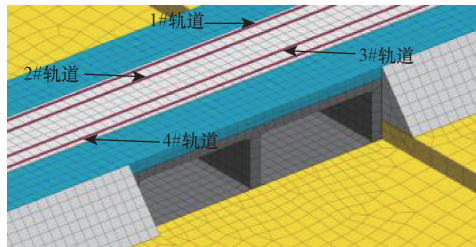


图 19 高铁轨道编号

Fig. 19 High-speed rail track numbering

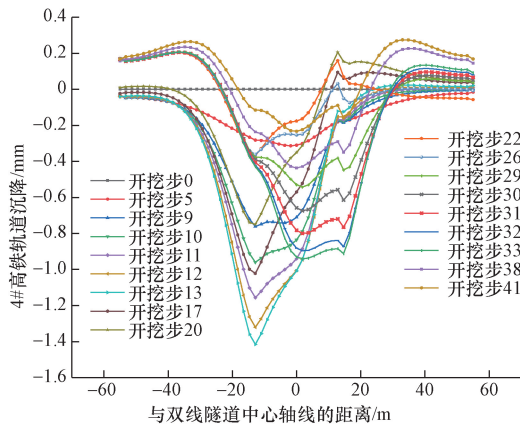


图 20 盾构掘进时 4#高铁轨道沉降

Fig. 20 Settlement of 4# high-speed rail track during shield excavation

轨道沉降规律具有明显的时空效应,即各轨道的沉降曲线随着盾构隧道开挖过程而不断地发生变化。

高铁轨道的沉降曲线呈现单个峰值状态,在右线隧道开挖、左线隧道未开挖的状态下,轨道沉降峰值发生在右线隧道上方略微偏右位置处,当左线隧道开挖贯通后,沉降的峰值则发生在两隧道的中心线上方。

右线开挖过程中轨道的最大沉降达 1.41 mm,当右线贯通后,左线开挖过程中轨道最大沉降达到 0.91 mm,满足施工过程中《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》(TB 10314—2021)所要求的对轨道沉降的控制要求。双线隧道贯通后,沉降槽底部宽度为 20 m 左右,与框架桥的宽度大致相等。

4 优化盾构开挖的注浆压力和掘进压力参数

4.1 不同注浆压力

为探究不同的注浆压力对既有高速铁路路基的

影响,选取注浆压力为 100、200、300、400、500、600、700、800 kPa 进行数值模拟分析,其余参数保持不变,不同注浆压力下,高速铁路路基表面沉降峰值如图 21 所示。

由图 21 可知,随着注浆压力的增大,高速铁路路基表面的沉降表现为减少的趋势,当注浆压力为 100 kPa 时,路基表面沉降峰值为最小值,当注浆压力为 800 kPa 时,路基表面沉降峰值为最大值,两者相差 0.361 mm,又由于在不同注浆压力下,路基表面沉降的峰值出现在右线掘进的过程中,即路基表面沉降曲线峰值也表现出向右线集中的趋势。鉴于对注浆压力作用机理的分析,为既要保证沉降量控制在安全范围内,又要保证各构筑物的安全,经综合考虑,注浆压力取 400 kPa。

不同注浆压力下路基的最大变形和最大变形率如表 5 及图 22 所示。

从表 5 和图 22 可知,注浆压力的增大对路基沉降量的控制是显著的,但是将注浆压力盲目的提升,会导致路基产生隆起等不良现象,也会对路基及列车运行产生影响。

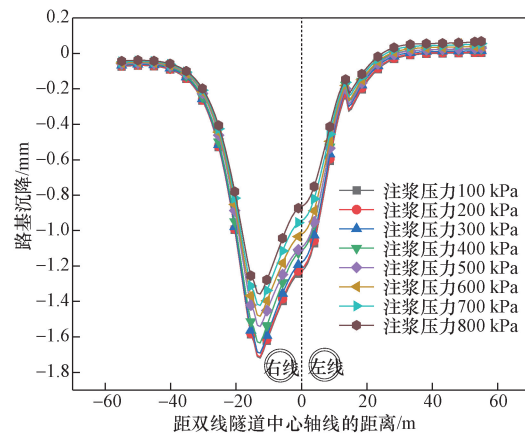


图 21 不同注浆压力路基表面沉降分布图

Fig. 21 Distribution of surface settlement of roadbed with different grouting pressures

表 5 不同注浆压力路基最大变形变化率

Table 5 Maximum deformation change rate of roadbed with different grouting pressure

注浆压力取值/kPa	路基最大变形/mm	最大变形率/%
100	-1.716	-0.5
200	-1.708	0
300	-1.688	1.2
400	-1.630	4.6
500	-1.538	10.0
600	-1.480	13.4
700	-1.419	16.9
800	-1.355	20.7

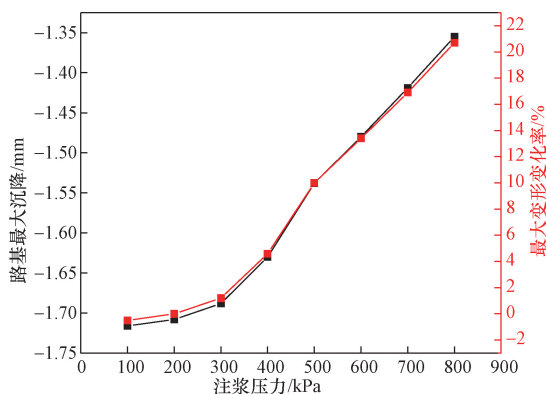


图 22 不同注浆压力路基峰值变形点线图

Fig. 22 Peak deformation point line of roadbed with different grouting pressure

4.2 不同掘进压力

为探究不同的掘进压力对既有高速铁路路基的影响,选取掘进压力为 100、200、300、400、500、600、700、800 kPa 进行数值模拟分析,其余参数保持不变,不同掘进压力下,高速铁路路基表面沉降峰值如图 23 所示。

从图 23 可知,随着掘进压力的增大,路基表面沉降并没有明显的变化,掘进压力对沉降的控制效果明显比注浆压力的控制效果要弱,又由于此盾构掘进处于石灰岩中,也说明了岩层自身的自稳能力也在一定程度上减弱了掘进压力对沉降的控制效果。

从表 6 可知,路基表面沉降的峰值和路基整体的峰值沉降在不同的掘进压力下分别为 1.71 mm 和 1.753 mm,可见,掘进压力越大,对沉降的控制效果并没有明显效果,并且掘进压力过大也会产生一些负面效果,比如能源浪费、换刀不便等影响,经过综合考虑,掘进压力采用 100 kPa。

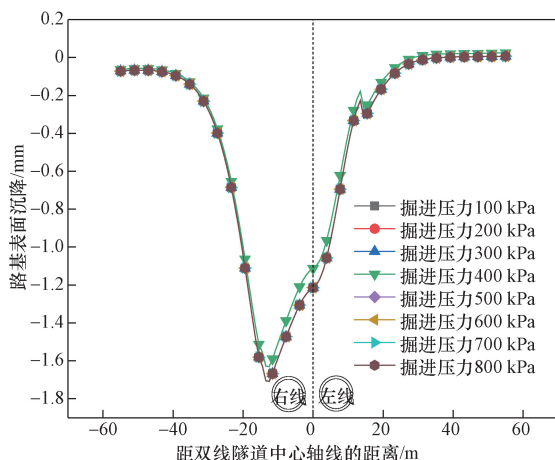


图 23 不同掘进压力路基表面沉降分布图

Fig. 23 Distribution of surface settlement of roadbed with different digging pressures

表 6 不同掘进压力路基表面和路基整体最大变形

Table 6 Maximum deformation of roadbed surface and roadbed as a whole with different digging pressures

掘进压力取值/kPa	路基表面最大变形/mm	路基最大变形/mm
100	-1.71	-1.753
200	-1.71	-1.753
300	-1.71	-1.753
400	-1.71	-1.753
500	-1.71	-1.753
600	-1.71	-1.753
700	-1.71	-1.753
800	-1.71	-1.753

5 结论

以贵阳轨道交通 3 号线的实际工程背景为依托,研究了盾构隧道穿越高速铁路过程中,框架箱涵、路基和高铁轨道沉降的变化规律并且对盾构施工的相关参数进行优化,主要结论如下。

(1)在仅有右线开挖的情况下,框架涵横、纵沉降曲线表现为“U”形,从框架涵沉降曲线整体来看,框架涵沉降曲线呈现“蝶状”曲线,在双线完成开挖后,单个框架涵的横、纵向沉降曲线表现为“W”形,整体框架涵沉降曲线呈现“双蝶状”曲线,框架涵沉降的最大值为 1.805 mm。

(2)盾构隧道穿越高速铁路路基,会引起路基沉降的峰值转移和突变,路基沉降峰值的转移是随着先右线隧道一后左线掘进而逐渐进行的;突变主要发生在盾构机穿越路基和隧道贯通之时,沉降突变增量从 0.07 mm 增加到 0.63 mm,路基沉降峰值为 1.753 mm。

(3)盾构掘进时会对高铁轨道带来极大的影响,轨道的不平顺会对高铁行车带来极大风险,高铁轨道沉降曲线的沉降槽宽度与框架涵宽度相同,表明框架涵沉降对轨道的沉降具有一定的影响,轨道沉降峰值达 1.41 mm,满足《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》(TB 10314—2021)要求。

(4)通过对不同注浆压力对路基沉降影响的分析,发现随着注浆压力的提升,路基表面沉降呈现减小的趋势,并且从最大变化的变化率来看,表明沉降的减小是较为显著的,当注浆压力为 100 kPa 时,此时路基表面沉降峰值为 1.716 mm,当注浆压力为 800 kPa 时,此时路基表面沉降峰值为 1.355 mm。

(5)基于对不同掘进压力的分析,发现随着掘进压力的增大,路基表面沉降或者整个路基沉降随着掘进压力改变并没有产生显著变化,甚至是基本没有变化,路基整体沉降的峰值保持在 1.753 mm,表明掘进压力对路基沉降的控制效果要弱于注浆

压力,当然也表明岩质地层对掘进压力对路基沉降的控制效果有一定的削弱作用,对优化盾构施工参数具有一定参考意义。

参 考 文 献

- [1] 霍军帅,王炳龙,周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 71-77.
Huo Junshuai, Wang Binglong, Zhou Shunhua. Safety analysis of foundation reinforcement scheme for shield tunnel under-passing intercity railway[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 71-77.
- [2] 黄焰,伍永胜. 岩溶地区城市地下浅埋隧道工程技术研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 107-113.
Huang Yan, Wu Yongsheng. Engineering techniques for construction of shallow underground tunnels in urban karst regions[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 107-113.
- [3] 常惠涵. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工控制及影响分析[J]. 智能城市, 2018, 4(4): 108-109.
Chang Huihan. Construction control and influence analysis of railway frame bridge under shield tunnel[J]. Smart City, 2018, 4(4): 108-109.
- [4] 王国富,王建,路林海. 盾构下穿铁路桥涵变形规律及控制技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2471-2477.
Wang Guofu, Wang Jian, Lu Linhai. Rules and control technology of deformation caused by shield tunnel under-passing the railway bridge culvert[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2471-2477.
- [5] 朱仔旭,徐庆元,刘维正,等. 行车作用下盾构隧道下穿框架桥梁耦合动力学特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(7): 2788-2798.
Zhu Zaixu, Xu Qingyuan, Liu Weizheng, et al. Coupling dynamics characteristics of undercrossing shield tunnel-frame bridge under action of train running[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2023, 54(7): 2788-2798.
- [6] 刘成虎. 岩溶地区地铁盾构下穿高铁框架涵关键技术研究[J]. 交通世界, 2023(21): 158-160.
Liu Chenghu. Research on key technology of high-speed rail frame culvert under subway shield in karst area[J]. Transportation World, 2023(21): 158-160.
- [7] 欧阳鸿志,朱定桂,安斌,等. 富水砂层盾构隧道下穿独立浅基础铁路桥加固方案比选研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 246-253.
Ouyang Hongzhi, Zhu Dinggui, An Bin, et al. Comparative study on reinforcement schemes for shield tunnel under-crossing railway bridge with isolated shallow foundation in water-rich sand stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 246-253.
- [8] 王继峰,刺宝成,孟祥丰,等. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工变形规律及控制措施[J]. 公路, 2022, 67(3): 373-377.
Wang Jifeng, La Baocheng, Meng Xiangfeng, et al. Construction deformation law and control measures of railway frame bridge under shield tunnel[J]. Highway, 2022, 67(3): 373-377.
- [9] 张亚洲,林志宇,马凝宇,等. 砂卵石地层盾构隧道下穿施工对既有铁路框架桥的影响[J]. 四川建筑, 2021, 41(6): 101-104.
Zhang Yazhou, Lin Zhiyu, Ma Ningyu, et al. Influence of under-pass construction of shield tunnel in sand and pebble stratum on existing railway frame bridge[J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(6): 101-104.
- [10] 刘维正,孙康,戴晓亚,等. 地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 208-218.
Liu Weizheng, Sun Kang, Dai Xiaoya, et al. Numerical simulation and field monitoring of influence of metro shield tunnel undercrossing the existing railway frame bridge by long distance[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 208-218.
- [11] 李辉平. 盾构下穿既有高铁框架桥沉降机理及控制技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
Li Huiping. Study on settlement mechanism and control technology of shield under-passing frame bridge from high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] 师亚龙,邢晓飞,刘志强,等. 石灰岩地层盾构掘进中地面塌陷成因及预防措施研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 108-114.
Shi Yalong, Xing Xiaofei, Liu Zhiqiang, et al. Analysis of causes of ground collapse during TBM excavation in limestone formation and its preventive measures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S1): 108-114.
- [13] 刘琤玉,王炳龙,宋福贵,等. 盾构施工对铁路大角度斜交框架桥的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 318-325.
Liu Chengyu, Wang Binglong, Song Fugui, et al. Influence of shield tunneling on a large-angle skewed railway box culvert[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 318-325.
- [14] 亓培先. 盾构下穿高速铁路基地层变形规律及管控对策[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2021.
Qi Peixian. Deformation law and control strategy of the subgrade under shield crossing high railway[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021.
- [15] 高洪吉,谢文达,孙正阳,等. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12143-12149.
Gao Hongji, Xie Wenda, Sun Zhengyang, et al. Analysis on surface subsidence by shallow buried shield tunneling[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12143-12149.
- [16] 郝爽. 地铁盾构下穿箱涵对既有铁路轨道的影响及安全分析[D]. 郑州:郑州大学, 2022.
Hao Shuang. Influence and safety analysis of subway shield under-pass box culvert on existing railway tracks[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [17] Gong Q M, Shan Y, You X M, et al. Shield tunneling analysis and measures under elevated high-speed railway[C]//8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Seoul: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014: 303-308.
- [18] Liu C G, Liu Y, Zhang L L. Analysis on the influence of double-line large diameter shield tunnel orthogonally underpassing tunneling on railway track group[C]//4th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology. Nanchang: IOP Publishing, 2018: 201-206.
- [19] 杨景超,衣绍彦,汪岩,等. 泥岩地层条件下盾构下穿成昆铁

- 路非预加固控制技术[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 1491-1493.
- Yang Jingchao, Yi Shaoyan, Wang Yan, et al. Control technology of unprestressed reinforcement of Chengdu-Kunming railway under shield driving in mudstone stratum [J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 1491-1493.
- [20] Liu B, Xi D H, Xu P. Study on the interaction of metro shield tunnel construction under-crossing the existing Longhai railway [J]. Geotechnical and Geological Engineering: An International Journal, 2020, 38(2): 2159-2168.
- [21] 付春青, 张功, 张雯超, 等. 盾构法近距离下穿施工对既有盾构隧道的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7319-7326.
- Fu Chunqing, Zhang Gong, Zhang Wenchao, et al. The influence of undercrossed shield tunneling on the adjacent tunnels [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7319-7326.
- [22] 莫伟平. 贵阳喀斯特地区地铁盾构施工风险及防范措施[J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 67-70.
- Mo Weiping. Construction risk and preventive measures for subway shield in Guiyang's Karst area [J]. Railway Engineering, 2021, 61(4): 67-70.
- [23] 袁侨蔚, 刘远明, 欧洵, 等. 上软下硬地层隧道盾构施工地表沉降影响因素及规律研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 68(2): 167-175.
- Yuan Qiaowei, Liu Yuanming, Ou Xun, et al. Study on the factors and laws affecting surface settlement of tunnel shield construction in upper soft and lower hard strata [J]. Railway Standard Design, 2022, 68(2): 167-175.