

公路路基爆破开挖对既有铁路隧道影响研究

李淑华¹, 龚兴旺¹, 杨有诚², 杨蕴琨³

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都, 610031; 2. 陕西兴通监理咨询有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 贵州西南交通投资实业集团有限公司, 贵州 贵阳 558200)

摘要: 随着国家交通路网的不断发展, 新建工程上跨既有隧道比例逐年增加, 因此研究合理的开挖方式至关重要。文章以西南地区路基上跨既有铁路隧道施工工程为例, 通过数值模拟研究路基爆破开挖对既有铁路隧道造成的影响, 结合衬砌各部位振速值, 依据爆破振速控制标准, 得到研究成果: 每层路基开挖完成时既有隧道振速均先增大, 后期逐步随着阻尼的影响而逐步衰减; 随着路基爆破开挖从上层逐步开挖至下层, 隧道整体的振速在不断增加; 最大振速出现在拱顶部位, 达到 1.403 cm/s, 小于控制标准, 并提出 3 种减震措施以确保既有隧道运营安全。本文所提出的爆破开挖法和相应的减震措施能降低路基开挖对既有隧道造成的影响, 可为类似的路基上跨既有隧道工程案例提供参考。

关键词: 铁路隧道; 公路路基; 爆破开挖; 影响研究; 减震措施

中图分类号: T416.1; U451

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)12-0044-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.12.160

Study on the impact of highway subgrade blasting and excavation on existing railway tunnels

LI Shuhua¹, GONG Xingwang¹, YANG Youcheng², YANG Yunkun³

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031;

2. Shaanxi Xingtong Supervision Consulting Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. Guizhou Southwest Communications Investment Industrial Group Co., Ltd., Guiyang 558200, Guizhou, China)

Abstract: In recent years, with the continuous development of the national transportation network, the proportion of new construction projects spanning existing tunnels has gradually increased. Therefore, it is crucial to study reasonable excavation methods. This paper takes the construction project of the existing railway tunnel above the roadbed in southwest China as an example to study the impact of roadbed blasting and excavation on the existing railway tunnel through numerical simulation. Combined with the vibration speed value of each part of the lining, according to the blasting vibration speed control standard, the research is obtained Results: When excavation of each layer of roadbed is completed, the vibration speed of the existing tunnel first increases and then It gradually decays with the influence of damping during the period; as the roadbed blasting excavation is gradually excavated from the upper layer to the lower layer, the overall vibration speed of the tunnel continues to increase; the maximum vibration speed appears at the top of the arch, reaching 1.403 cm/s. is less than the control standard, and three shock absorption measures are proposed to ensure the safety of existing tunnel operations. The research results show that the blasting excavation method and corresponding shock absorption measures proposed in this article can reduce the impact of roadbed excavation on existing tunnels, with a view to providing a reasonable reference for similar cases of roadbed over-span existing tunnel projects.

Key words: railway tunnel; roadbed; blasting excavation; impact study; shock-absorbing measures

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478392)

作者简介: 李淑华(1992—), 男, 高级工程师, 从事隧道及地下工程近接施工研究。

近年来,随着道路交通方式的多样化,截至2023年底,中国铁路营业里程达到15.9万km。其中,投入运营的铁路隧道18573座,总长度为23508km。铁路隧道里程数始终高于公路隧道,修建的难度也远高于公路隧道。目前建筑结构上跨既有隧道已十分常见,其中新建公路路基和铁路路基占比最多,分析并降低路基开挖对既有隧道结构造成的影响应是目前研究的重点^[1~3]。

在国内外,关于路基开挖对既有隧道产生的潜在影响,已有广泛而深入的研究。王晓星等^[4]借助数值模拟软件,系统探讨了不同路基开挖方式对既有隧道的影响;史世波等^[5]则运用有限元法,对路基开挖与回填等施工工况进行了模拟分析,重点关注衬砌结构的应力与位移变化。最终研究结果表明:在新建路基换填过程中,采用轻质泡沫土作为一种有效的处理措施,可以显著减少对既有隧道的影响;彭志勇等^[6]针对临近盾构区间上部路基开挖问题进行了深入分析。揭示了路基卸荷对盾构衬砌位移的影响规律,进而为制定合理的路基开挖方案提供了科学依据;陈永伟^[7]则通过数值模拟和经验公式相结合的方法,对爆破振动速度进行了精确计算。确定根据经验公式与数值计算得到的质点峰值振动速度均远低于规程要求的10cm/s,从而确保了既有铁路路基的安全稳定;钱明渊^[8]利用深孔结合浅孔台阶微差爆破开挖路基,通过选取合理的爆破参数和防护措施,保证了爆破施工质量和既有线路的安全运营;叶道奎^[9]采用两种方法分析路基施工对隧道衬砌的影响,结合强度、应力等指标,确定既有隧道在路基施工及运营两阶段受到的影响;黄文杰^[10]通过数值模拟,并结合衬砌竖向位移,最大与最小主应力等指标,研究路基开挖对既有隧道造成的影响;顾兴民^[11]用有限元软件分析在不同的围护桩深度下,铁路路基的沉降数值,通过对比现有规范,证明工程实施的可行性;张世宁^[12]采用数值分析方法,探讨基坑开挖对高铁路基变形的影响。

前人研究成果多从衬砌应力和与位移指标进行分析,未考虑爆破振速这一指标,但爆破开挖研究重点就是探讨衬砌各部位因上方路基爆破振动产生的振速,因此本文将对爆破开挖对既有隧

道振速产生的影响进行阐述,依托新建公路路基上跨既有隧道工程,研究路基爆破开挖对既有隧道衬砌各部位振速影响,结合爆破振速控制标准,确定合理的路基爆破施工方案,并提出相应的爆破减震措施,以期可为类似路基爆破开挖上跨既有隧道工程提供参考。

1 工程概述

1.1 隧道简况

隧道全长度为2200m,最大埋深达到150m,进口里程DK282+400,出口里程DK284+600。隧道平面如图1所示。

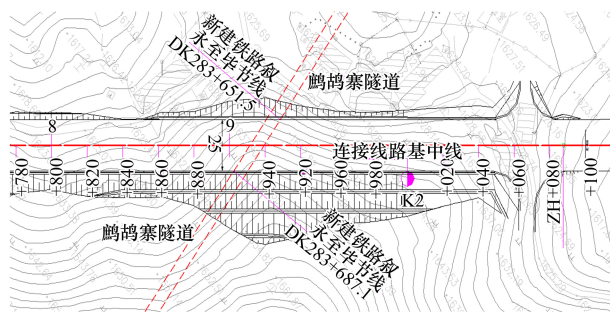


图1 隧道各连接工程平面 m

隧道洞身DK283+740~DK284+040、DK284+440~DK285+540、DK284+600~DK284+665段穿越可溶岩地层段,岩溶中等至强烈发育。DK282+700~DK284+040段为岩溶水水平径流带,岩溶水水平径流长度为1340m;全隧道预测涌水量约为21340m³/d,围岩级别为IV级,衬砌采用C40混凝土,衬砌厚度为45cm。隧道工程横断面如图2所示,隧道衬砌断面如图3所示。

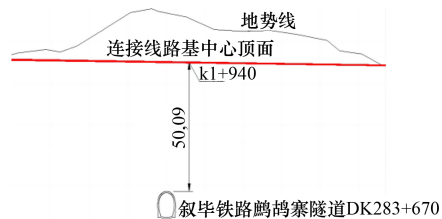


图2 隧道工程横断面 m

1.2 地质条件

该深挖方路堑段属构造溶蚀、侵蚀低中山斜坡地形地貌区,地形相对起伏较大,局部横坡较陡,路线穿越坡面山脊。根据地质调查和钻探分析土层结构和相关物理力学特征,配合当地地质资料,该深挖方路堑段覆盖层按成因可分为:第

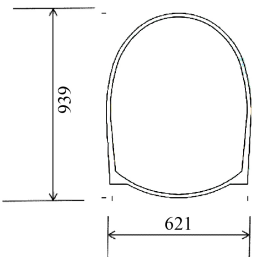


图 3 既有隧道断面 cm

四系全新统坡残积(Q^{4dl+el}); 下古生界寒武系上中统娄山关群第二段($\epsilon 2-3ls2$)白云岩。地下水多为松散岩类孔隙水与基岩裂隙水两类, 但水位埋深均较深, 地下水对深挖路堑影响不大。深挖路堑段属于构造侵蚀、溶蚀低中山地貌区。

2 数值模型及开挖方案

2.1 计算模型及参数

考虑到开挖路基具有一定的距离, 为加快施工进度, 通常采用爆破加快路基的施工速度, 对此采用 flac3d 动力计算对上方路基爆破施工进行分析。为减小上方爆破开挖对下方隧道的影响, 在分析过程中, 将路基开挖采用分层爆破方式实现。并针对最不利的情况进行分析, 其中选取了路基与隧道相交点进行分析, 既有线隧道里程 DK283+687 建立模型, 如图 4 所示。

根据公式计算所得药量, 将 1.35 m^2 的掏槽面积等效为单个孔洞作用下的压力计算, 计算时选取的爆破长度不小于 10 m (围岩较好时), 本工

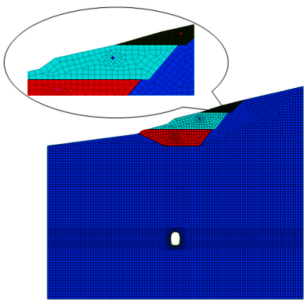


图 4 爆破模型 cm

程所处地质围岩较差, 为保证数值模拟计算结果的精确性, 需要沿路基纵向取 5 m 进行建模计算, 模型周围施加无反射(安静)边界。围岩采用 M-C 模型进行模拟, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则; 隧道衬砌取实体单元, 采用弹性本构, 在计算时, 先进行地应力平衡, 然后位移清零, 因考察的是路基爆破对既有隧道的影响, 隧道开挖采用一次性开挖, 并施作衬砌, 隧道开挖整个过程不涉及其他工法, 待开挖完成后, 再次进行位移清零, 最后考察路基分层爆破开挖对既有隧道的影响。

为保证数值模拟计算符合工程实际情况, 岩土体计算参数按地勘测得的地层参数选取, 混凝土物理力学参数按《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)^[13]选取, 各材料及爆破计算参数如表 1、2 所示。

2.2 荷载确定

公路荷载根据《公路工程技术标准》(JTGB 01—2014)^[14]选取, 荷载单位均为 kN, 长度单位为 m, 车辆荷载布置如图 5 所示。

表 1 计算参数

名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	黏聚力/kPa
硬塑黏土	19	1.5	0.40	12	0.025
泥质白云岩	26	10.7	0.25	45	1.100
衬砌(C40)	23	33.5	0.20	—	—

表 2 爆破计算力学参数

名称	黏性阻尼/($\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$)	爆破直径/m	药卷直径/m	炸药密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	爆破速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	爆破压力/GPa
断面 1	1 083	0.021	0.014	1 000	36	9
断面 2	1 006	0.021	0.014	1 000	36	9

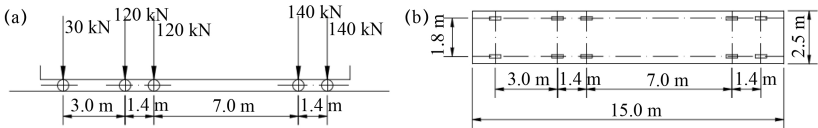


图 5 车辆荷载布置

假设路面宽度为 24.0 m, 则汽车均布荷载换算为

$$q_k = q_1 \times 1 \times 2/s \quad (1)$$

$$q_k = \frac{(140 \times 2 + 120 \times 2 + 30) \times 4}{1 \times 2} =$$

12.2 kN/m

式中: q_k 为总荷载, kN/m; q_1 为分荷载, kN; s 为路面面积, m^2 。

2.3 既有隧道控制标准

根据《爆破安全规程》^[15], 评估爆破对不同类型建(构)物、设施设备和保护对象的振动影响, 应采用不同的安全判据和允许标准。爆破振动后隧道安全允许标准如表 3 所示。

表 3 爆破振动安全允许标准(f 为主振频率)

保护对象类别	安全允许质点振动速度 $V/(cm \cdot s^{-1})$		
	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz
交通隧道	10 ~ 12	12 ~ 15	15 ~ 20

交通隧道的爆破震动判据, 应采用隧区的基础质点峰值振动速度和主振频率, 其安全允许振速为 10 ~ 20 cm/s。为保证既有隧道结构安全, 计算时通常取其下限值。

考虑到既有隧道新建时间不长的实际情况, 隧道衬砌劣化等级较低, 将爆破振动对既有隧道衬砌影响根据爆破振速分为如下 3 级:

- 1) 无影响区: 爆破振速满足 $v < 2$ cm/s;
- 2) 一定影响区: 爆破振速满足 $2 \text{ cm/s} \leq v \leq 4 \text{ cm/s}$, 表示新建隧道爆破振动对既有隧道衬砌结构有一定影响, 应采取必要的爆破振动监测措施。
- 3) 安全性影响区: 当爆破振速满足 $v > 4 \text{ cm/s}$, 应采取减振措施, 必要时对既有隧道局部病害严重处进行提前加固处治。

隧道开挖爆破作业震动波可能会对临近既有线造成影响, 根据中铁二院成贵铁路项目部文件“设成贵项发[2018] 02 号”规定, 成贵高铁安全爆破震速为 10 cm/s, 综合各方面因素, 本次评估按照该标准的 50% 取值, 即 5 cm/s。

3 计算结果及减震措施研究

3.1 计算结果分析

为准确分析上方路基开挖对既有隧道的影响, 设置监测断面, 其中监测断面需关注既有隧道拱

顶、拱腰、边墙以及仰拱等 6 个部位的爆破振速, 具体的监测部位如图 6 所示。

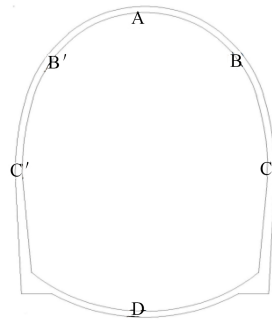
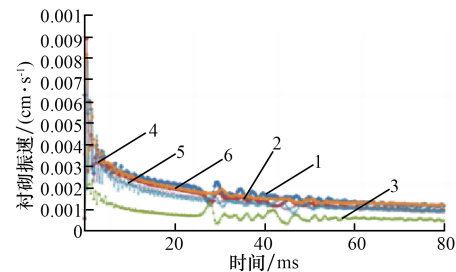


图 6 既有隧道位移沉降监测部位

当上方路基爆破开挖至上层路基阶段时, 既有隧道衬砌各个监测点位的振速如图 7 所示。

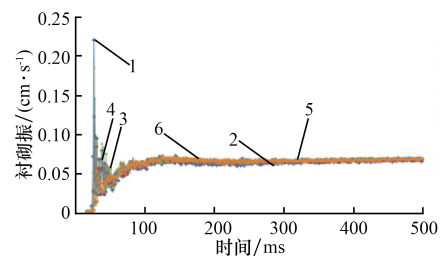


1—拱顶; 2—左拱腰; 3—右拱腰;
4—左边墙; 5—右边墙; 6—仰拱。

图 7 上层路基开挖爆破各点振速

由上图可知: 当开挖至上层路基时, 既有隧道振速较小, 振速呈现为先增大后期逐步随着阻尼的影响逐步衰减, 其中振速最大值位于振左拱腰, 其振动速度为 0.009 cm/s。振动速度小于控制标准的 5 cm/s。

当上方路基爆破开挖至中层路基阶段时, 既有隧道衬砌各个监测点位的振速如图 8 所示。



1—拱顶; 2—左拱腰; 3—右拱腰;
4—左边墙; 5—右边墙; 6—仰拱。

图 8 中层路基开挖爆破振速

由上图可知: 当开挖至中层路基时, 隧道振速有所增加, 但是既有隧道整体的振速较小, 振速呈现为先增大后期逐步随着阻尼的影响逐步衰

减,其中振速最大值位于拱顶,其振动速度为 0.226 cm/s。振动速度小于控制标准的 5 cm/s,认为上方中层路基开挖对既有隧道结构影响较小。

当上方路基爆破开挖至下层路基阶段时,既有隧道衬砌各个监测点位的振速如图 9 所示。

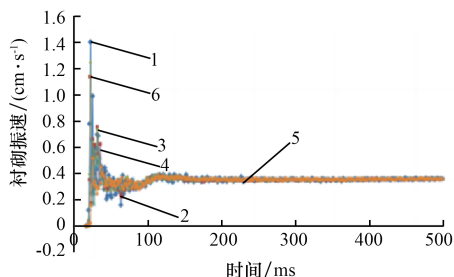


图 9 下层路基开挖爆破振速

由上图可知:当开挖至下层路基时,隧道振速有所增加,但是既有隧道整体的振速不大,振速呈现为先增大后期逐步随着阻尼的影响逐步衰减,其中振速最大值位于拱顶,其振动速度为 1.403 cm/s。振动速度小于控制标准的 5 cm/s,认为上方下层路基开挖对既有隧道结构有一定影响,但是整体影响不大,在上方路基爆破施工阶段需加强对既有隧道各部位的监测,防止上部路基爆破开挖影响既有隧道结构安全,降低爆破开挖带来的地层扰动影响。上方路基不同开挖阶段最大振速如表 4 所示。

表 4 不同开挖阶段最大振速 cm/s

开挖里程	最大振动速度	最大振速点位
上层路基开挖	0.009	左拱腰
中层路基开挖	0.226	拱顶
下层路基开挖	1.403	拱顶

由上表可知,当上方路基采用爆破开挖时,爆破施工会对既有隧道产生一定的影响但影响不大。随着路基爆破开挖从上层开挖逐步至下层,隧道整体的振速呈现增大趋势。其振速最大值主要位于下层路基开挖阶段,位于拱顶位置,其值为 1.403 cm/s,其值小于控制标准所要求的 5 cm/s,认为上方路基爆破开挖对隧道结构振动影响不大,考虑到平面阶段相交点的施工影响较小,认为在隧道整个静力影响段落之内的影响也较小,但是在施工阶段需要对相交里程点 DK283+687 加强振速的监测,防止隧道振速过高影响列车运营安全,

若衬砌存在拱顶空洞等病害时,还会造成拱顶混凝土出现掉块等风险。

3.2 爆破减震措施

爆破振动的危害必须控制在允许的范围内,以确保新建隧道周围的现有结构和人员安全。因此爆破设计时需要考虑爆破振动对现有结构的影响,为了保证现有结构的安全性能,施工时需要根据测量的数据对爆破参数进行及时调整,避免实际工程爆破过程中出现异常,影响既有结构的运营安全。常用的减振措施主要内容如下所述。

(1) 优化开挖工法。选择合理的开挖工法能降低新建结构对既有隧道的扰动,同时通过分层开挖能最大限度地减少开挖断面面积,将开挖产生的影响降低最低,最终才能保证现有隧道的安全。

(2) 分段引爆,控制装药量。隧道爆破单段装药量对爆破震动影响较大,因此需要采用分段引爆的方式,尽可能降低路基爆破带来的影响,甚至可有效减少爆破施工对现有结构的冲击,合理的控制分段数和单段装药量至关重要。

(3) 掏槽形式要合理。要根据岩石性质和隧道断面选择合理的掏槽形式,掏槽形式最终会影响爆破的效果及质量,只有多因素综合考虑,才能降低爆破开挖对既有隧道造成的影响。

4 结 论

(1) 上方路基不同开挖阶段对既有隧道各部位振速呈现为先增大后随阻尼的影响逐步衰减,而随着路基爆破开挖从上层逐步开挖至下层,隧道整体的振速呈现为增大的规律,振速最大值为 1.403 cm/s,其值小于控制标准所要求的 5 cm/s。

(2) 上方路基待上层开挖完后,振速最大值位于左拱腰处,而中层和下层路基开挖完后,振速最大值均位于拱顶处。表明在施工阶段需要对相交里程点 DK283+687 拱顶和拱腰部位加强振速监测。

(3) 针对相交里程点 DK283+687,提出 3 种爆破减震措施,分别为:优化开挖工法、控制起爆药量、选择合理掏槽,以此将爆破振动危害控制在允许范围内,有效降低爆破施工对既有隧道的影响。

参考文献:

- [1] 巩江峰,王伟,王芳,等.截至2023年底中国铁路隧道情况统计及2023年新开通重点项目隧道情况介绍[J].隧道建设(中英文),2024,44(2):377-392.
- [2] 黄新连.市政道路近距离上跨运营铁路隧道方式研究[J].铁道建筑技术,2019(5):41-44;69.
- [3] 王志杰,陈铁卫.新建公路路基上跨既有铁路隧道安全性评估[J].四川建筑,2019,39(6):88-91.
- [4] 王晓星,张昱辉,鲁彪.机械与爆破法下路基开挖对既有临近隧道的影响[J].公路交通科技,2022,39(4):101-107.
- [5] 史世波,刘尚各,陈飞飞,等.新建路基开挖换填对下方既有盾构隧道影响研究[J].路基工程,2021(3):165-170.
- [6] 彭智勇,杨秀仁.路基开挖对邻近既有盾构区间变形的影响分析[J].低温建筑技术,2019,41(3):107-110.
- [7] 陈永伟.路堑爆破开挖对既有铁路路基振动影响研究[J].铁道勘察,2021,47(3):61-64.
- [8] 钱明渊.紧邻皖赣铁路的高边坡路基开挖爆破施工[J].煤矿爆破,2017(4):21-25.
- [9] 叶道奎.高速公路路基施工对下部深埋铁路隧道的影响分析[J].黑龙江交通科技,2020,43(5):129-130.
- [10] 黄文杰.上方路基开挖对既有隧道的影响研究[J].浙江水利水电学院学报,2023,35(4):68-74.
- [11] 顾兴民.桥梁基坑开挖对邻近铁路路基的影响研究[J].现代交通技术,2023,20(3):41-43.
- [12] 张世宁.基坑开挖对邻近高速铁路路基的影响分析[J].四川建筑,2023,43(5):204-206.
- [13] 铁路隧道设计规范:TB 10003—2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.
- [14] 公路工程技术标准:JTGB 01—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [15] 爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:冶金工业出版社,2014.

(上接第43页)

应采用岩体的等效内摩擦角而非内摩擦角、采用基底应力而非基底附加应力,通过改进的计算公式得出,新建地下通道开挖不会对高速公路桥墩地基存在影响,通道实际的顶板厚度大于1.5倍的极限平衡厚度,地基判定为稳定。

(2)通过有限元数值模拟分析,受运输通道开挖影响,桥墩底部综合位移为0.171 mm,桥梁路面的综合位移为0.160 mm,小于设计及规范要求值;采用综合掘进开挖引起的应力应变未传递到高速公路桥墩底部,新建下穿运煤通道对既有高速公路桥墩基础稳定性影响较小,下穿方案可行。

(3)数值模拟结果和理论计算结果进行对比,发现新建运煤通道开挖影响范围在地表处符合规范建议的按破裂角 $45^\circ + \varphi/2$ 划定的影响范围,但在开挖通道到地面这段范围内的开挖影响范围却超出了破裂角影响范围,这与高速公路对变形比较敏感及该区域围岩(粉砂质泥岩)的岩体力学参数较

低有关,应引起相应类似下穿工程重视。

参考文献:

- [1] 杜明芳,张燕,陈家豪,等.下穿通道施工全过程对既有地铁隧道变形的影响[J].工程建设,2024,56(4):20-24.
- [2] 相博,张学东,王才静,等.新建隧道正交下穿既有隧道间距影响分析[J].云南水力发电,2023,39(12):63-66.
- [3] 余敦猛.暗挖隧道施工对下穿既有铁路路基沉降规律分析[J].城市道桥与防洪,2023(1):250-255.
- [4] 唐浩,李有福.新建隧道爆破施工对既有隧道的影响分析[J].工程建设,2021,53(8):62-66.
- [5] 冯超,谭威.盾构下穿施工对既有立交桥桥墩位移影响研究[J].福建交通科技,2021(3):60-62.
- [6] 冉章清,王刘文,潘显威,等.荷载临界影响深度法在小煤窑采空区场地稳定性评价中的运用[J].土工基础,2023,37(3):418-421.