

# 岩溶地区隧道衬砌施工缝渗漏水处治技术

陈兴<sup>1</sup>, 苏卫迪<sup>1</sup>, 蒋雅君<sup>2\*</sup>, 杜坤<sup>2</sup>, 肖华荣<sup>3</sup>

(1. 广西交通投资集团河池高速公路运营有限公司, 广西 河池 547000; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;  
3. 成都扬华源动新材料科技有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要:**岩溶隧道最常见的病害为施工缝渗漏水,由于岩溶水析出碳酸钙结晶堵塞排水通道,也会造成处治后的隧道衬砌施工缝出现复漏,对隧道结构安全和行车安全造成严重影响。为了提高隧道衬砌施工缝结构的可维护性,该文依托广西河池六河路隧道衬砌施工缝渗漏水的处治工程,采用疏水涂料对混凝土基面进行处理,以延缓碳酸钙结晶的出现;预留检查孔,方便运营期间对管内情况进行检查和维护,提高衬砌施工缝结构的可维护性。

**关键词:**岩溶隧道;衬砌施工缝;渗漏水处治;可维护性

目前,中国隧道建设蓬勃发展,隧道的数量及里程也急剧增加<sup>[1]</sup>。然而,由于隧道所处的地质条件比较复杂,特别是在岩溶地区,由于地下水丰富、运移通道多,隧道往往在运营不久便发生大范围的渗漏水病害,尤其是施工缝部位渗漏水比较集中,严重影响隧道的运营及行车安全。

在岩溶地区,由于地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  含量较高,容易在隧道排水系统中出现碳酸钙结晶,堵塞排水通道,引发隧道排水不畅,进一步导致施工缝渗漏水的出现<sup>[2-4]</sup>。针对岩溶隧道在运营期间出现的施工缝渗漏

水问题,目前大多采用埋管引排和注浆封堵的方法来治理<sup>[5-8]</sup>,但是这种方法也存在一些不足,比如岩溶水出现结晶堵塞管道、管道封闭以后难以进行检查和有效疏通等。所以这种处理方法往往是短期内有效,无法杜绝施工缝渗漏水在修复后反复出现的现象<sup>[9]</sup>。

该文依托兰海高速公路六寨—河池段多条隧道的施工缝渗漏水处治实践,对隧道衬砌施工缝进行防结晶处理,并且增加可维护性措施,以方便运营期间的检查和维护,可为岩溶地区运营隧道的施工缝渗漏水处治提供借鉴和参考。

- \*\*\*\*\*
- [13] KAHRIMAN A. Analysis of Parameters of Ground Vibration Produced from Bench Blasting at a Limestone Quarry[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004,24(11):887—892.
- [14] AK H, IPHAR M, YAVUZ M, et al. Evaluation of Ground Vibration Effect of Blasting Operations in a Magnesite Mine[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2009,29(4):669—676.
- [15] CHOI B H, RYU C H, DEB D, et al. Case Study of Establishing a Safe Blasting Criterion for the Pit Slopes of an Open—Pit Coal Mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,57:1—10.
- [16] DEB D, KAUSHIK K N R, CHOI B H, et al. Stability Assessment of a Pit Slope under Blast Loading: A Case Study of Pasir Coal Mine[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011,29:419—429.
- [17] 孙鹏昌, 卢文波, 雷振, 等. 单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5):877—885.
- [18] 王刚. 地下爆破振动作用下陡高顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 中外公路, 2018,38(3):24—28.
- [19] 胡风明, 宋健, 闫磊, 等. 危岩带下锚碇基坑施工技术及其爆破振动监测[J]. 中外公路, 2021,41(1):173—177.
- [20] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]
- [21] 卢文波, Hustrulid W. 质点峰值振动速度衰减公式的改进[J]. 工程爆破, 2002,8(3):1—4.

收稿日期:2021—05—27(修改稿)

基金项目:成都扬华源动新材料科技有限公司科技项目(编号:2018H010255)

作者简介:陈兴,男,大学本科,高级工程师. E-mail:771256960@qq.com

\* 通信作者:蒋雅君,男,博士,副教授. E-mail: yajunjiang@swjtu.edu.cn

## 1 工程概况

兰海高速公路六寨—河池段位于广西壮族自治区河池市境内,处于云贵高原边缘地带,地下水充足,岩溶发育。隧道衬砌形式采用复合式衬砌,排水系统主要包括中央排水沟、侧沟、纵向、环向和横向排水管(图 1)。

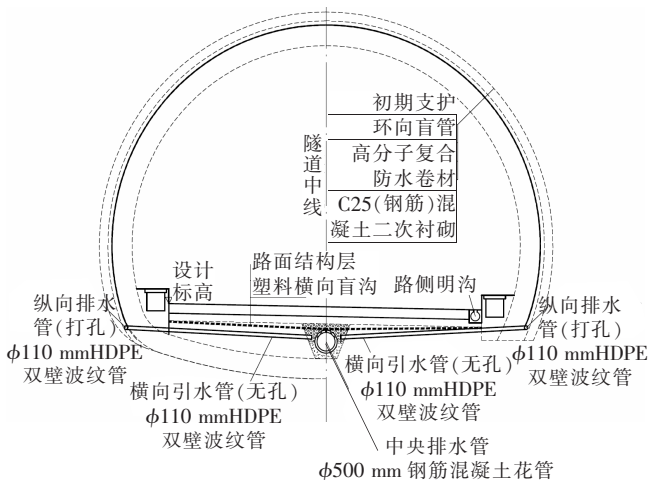


图 1 依托工程隧道排水系统设计

该路段于 2012 年 7 月通车,由于当地雨量充足,于 2014 年全线隧道便出现不同程度的渗漏水<sup>[5]</sup>,其中以施工缝渗漏水为主,并造成了隧道洞内路面大范围滴水,对行车安全造成严重的影响。

## 2 渗漏水原因分析及前期处治情况

### 2.1 施工缝渗漏水原因分析

通过对当地岩溶地区隧道相关资料的整合,并结合对隧道渗漏水情况的长期监测情况,可以得出造成六河路隧道出现大范围施工缝渗漏水的原因主要有以下几个方面:

(1) 地质条件。隧址区域年平均降水超过 1 400 mm,且岩溶十分发育,隧道上方地表存在较多的落水洞、岩溶漏斗且地下多溶孔、溶洞,围岩也多为透水性极强的破碎灰岩,这种地质构造能够加速地表降水对于地下水的补充,造成地下水在隧道衬砌施工缝处进入隧道。

(2) 排水系统失效。在岩溶地区,造成隧道排水系统失效的原因很多<sup>[10]</sup>,相关学者也做了具体分析,总结出造成岩溶地区隧道排水系统失效的原因主要分为地质、水文、设计施工等。在隧址区域,地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  含量较高,发生脱酸作用生成  $\text{CaCO}_3$

结晶堵塞隧道排水管。通过使用工业内窥镜对隧道排水盲管进行检查,发现存在较多处的结晶堵塞病害,因为隧道横向排水盲管被结晶堵塞,地下水便从隧道防水体系的薄弱处排出,造成隧道出现大范围的施工缝渗漏水。

(3) 设计及施工。隧道环向排水管采用  $\phi 50$  mm 的塑料弹簧管,横向、纵向引水管及横向盲沟采用  $\phi 110$  mm 的 HDPE 双壁波纹管。从现有资料分析,在暴雨季节,现有排水沟尺寸难以满足隧道的排水需求,从而导致隧道出现严重的施工缝渗漏水病害。在隧道施工过程中也难免存在一些问题:如隧道排水系统施工期间对于排水管的保护不到位,将一些建筑垃圾留在排水管内,造成隧道排水系统部分失效;施工缝处的防水措施难以得到保证,形成渗漏水的薄弱环节,也是导致该地区隧道出现严重施工缝渗漏水的一个原因。

综上所述,该地区隧道出现严重的施工缝渗漏水是主观因素和客观因素共同作用的结果。客观因素主要包括:岩溶发育;围岩破碎;地下水充足;地表降雨较强以及隧道排水管内  $\text{CaCO}_3$  结晶堵塞排水系统。主观因素主要包括:设计期间对当地降雨量及地下水情况考虑不周,导致在暴雨期间隧道排水系统的排水能力严重不足;隧道施工期间难以控制施工质量问题等。

### 2.2 前期处治情况

针对该线路隧道出现的大面积施工缝渗漏水病害,运营单位对该路段的三叉岭隧道 4 处出现严重渗漏水的施工缝采用了凿槽埋管将水引排至隧道两侧电缆沟中的处治方法,处治方案构造如图 2 所示,具体处治工序见文献<sup>[5]</sup>。

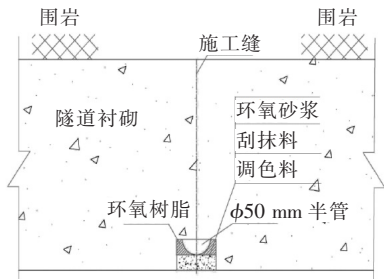


图 2 隧道衬砌施工缝渗漏水处治示意

处治后的施工缝在随后的 3 年内并未重新出现渗漏水情况,但是在 2018 年雨季期间又出现复漏现象,造成路面滴水、积水严重。将处理后的施工缝重新打开后,发现施工缝内存在严重的  $\text{CaCO}_3$  结晶情况,已经将排水通道完全堵塞。可以判断出对该隧道施工缝

渗漏水的前期处理措施已经完全失效,所以必须对渗漏水重新进行处治,避免该部位的渗漏水情况加剧。

3 施工缝渗漏水处治方案设计

3.1 排水设施基面防结晶处理

从现场观察数据并结合文献[2-4]及文献[10-11]研究成果可知:在岩溶地区,碳酸钙结晶堵塞隧道排水系统使得排水系统失效是造成隧道衬砌施工缝反复出现渗漏水的主要原因。所以,有效地延缓碳酸钙在改造后的施工缝结构中结晶附着是解决衬砌施工缝出现反复渗漏水的关键性因素。

延缓碳酸钙在混凝土基面上的结晶时间,主要环节在于延长碳酸钙的结晶诱导期<sup>[12-14]</sup>,而超疏水涂料可以通过提高混凝土基面的接触角防止岩溶水在混凝土上附着来延长碳酸钙的结晶诱导期。所以该文选取一种疏水涂料(由底涂和面涂组成),选取不同用量的底涂和面涂组合,对预制的砂浆试块进行处理,测量处理之后的砂浆试块表面接触角。

底涂的使用目的是使混凝土基底具有一定的抗渗性能,并提高面涂与混凝土基底的附着能力,综合达到良好的持久效果。在同时使用底涂涂料和面涂涂料的情况下,面涂涂料用量为 80 g/m<sup>2</sup> 时,对应的混凝土表面接触角明显大于其他用量。面涂涂料用量为 80 g/m<sup>2</sup>,底涂涂料用量为 120~300 g/m<sup>2</sup>,混凝土表面接触角的变化规律如图 3 所示。

由图 3 可以看出:在面涂用量为 80 g/m<sup>2</sup> 的情况下,混凝土试块表面接触角随着底涂用量的增大呈先增大后减小的趋势。其中,当底涂用量为 240 g/m<sup>2</sup> 时,混凝土表面接触角最大,最大可达 148.4°,平均接触角大小为 144.1°。

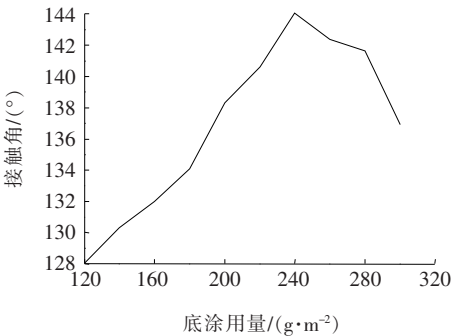


图 3 面涂用量 80 g/m<sup>2</sup> 时接触角随底涂用量的变化

3.2 试验段应用效果

2018 年 8 月以六河路三叉岭隧道 4 条存在严重渗

漏水的施工缝作为试验段,进行了防结晶措施的对比,并且对施工缝内部碳酸钙结晶发育情况进行了为期 1 年的观察<sup>[10]</sup>。试验结果表明:未做疏水处理的 2 条施工缝都出现了严重程度的碳酸钙结晶情况,缝内碳酸钙结晶发育迅速,参照之前的施工缝渗水处治经验,在处理 2~3 年内将可能再次出现施工缝渗漏水。

而对基面进行过疏水处理的施工缝内结晶情况较轻,仅有几缕条状结晶出现,而并非像未做疏水处理方式那样出现大面积覆盖的结晶情况。

由三叉岭隧道试验段观察的结果可以得出如下结论:提高混凝土基面的接触角能够延缓岩溶水在施工缝的结晶速度,从而达到防止或延缓施工缝出现复漏的情况。

3.3 处理后的施工缝结构可维护性

由于常规处理后施工缝结构被水泥砂浆完全封闭,所以难以对其内部的碳酸钙结晶堵塞进行检查及维护,并且当施工缝内再次堵塞的时候,难以进行疏通,只能通过再次开槽进行处理,费时费力。

为了增强该段隧道衬砌施工缝结构的可维护性,在 PVC 半管上设计了带有三通接头和堵头的检查孔伸出衬砌表面(图 4),检查孔的位置和数量可以根据隧道施工缝渗水点的位置和数量进行调整。在后期运营过程中,可以打开检查孔的堵头,使用工业内窥镜等工具对施工缝的内部情况进行检查和维护。

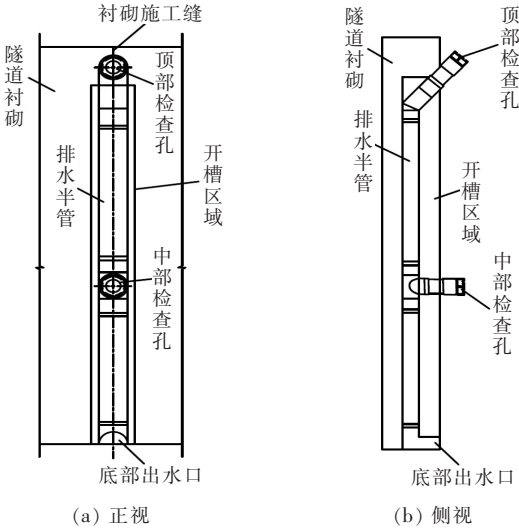


图 4 增加检查孔的隧道衬砌施工缝渗水排水设施

4 施工缝渗漏水处治实施及效果

基于三叉岭隧道衬砌施工缝渗漏水的处治经验,



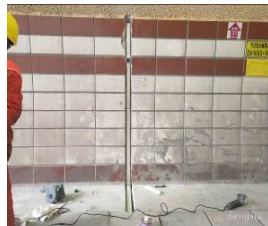
2019 年 11 月开始,对兰海高速公路六寨—河池段隧道进行施工缝的渗漏水处治,全面推广相关的技术。

#### 4.1 施工工序

(1) 切槽。首先找出施工缝渗漏水的出水点,从最高出水点部位向下切 U 形槽将水引入隧道侧沟内,切槽宽度为 10 cm、深度约为 8 cm。

(2) 基面清理及涂料喷涂。对施工缝处的 U 形槽基面平整,并对基面上的尘土进行清理。对基面处理完成后的施工缝 U 形槽按照  $240 \text{ g/m}^2$  的用量喷涂底涂涂料,养护 2 d 左右,待底涂涂料完全渗透入混凝土基面,再按照  $80 \text{ g/m}^2$  用量喷涂面涂涂料。

(3) 埋管挂网封闭。将带有检查孔的 PVC 半管嵌入 U 形槽内,形成施工缝的排水通道,并用管扣固定(图 5);再用环氧砂浆抹平,并挂钢丝网,最终将衬砌复原。



(a) 埋管



(b) 挂网

图 5 埋管挂网

#### 4.2 效果检验

用喷壶向涂刷完涂料的混凝土基面上喷水,能够观察到混凝土基面有明显的疏水效果,根据三叉岭隧道衬砌施工缝渗漏水处治经验,可以认为碳酸钙结晶在该施工缝内发育会变缓慢,不易发生结晶堵塞排水通道。同时,由于预留了检查孔,后期也便于对隧道衬砌施工缝部位的排水管道进行检查、疏通等维护工作。综合来看,采用该文所述的处理措施有利于提高隧道衬砌施工缝渗漏水引排设施的可维护性。

### 5 结论

依托广西河池六河高速公路隧道施工缝渗漏水的处理施工,采取增大混凝土基面接触角的方法来延缓碳酸钙在混凝土基面上结晶,并增加检查孔从而延缓处理后的衬砌施工缝部位出现复漏的情况,得出以下结论:

(1) 造成岩溶隧道施工缝渗漏水难以根治的原因是由于岩溶水在改造后的衬砌施工缝形成碳酸钙结晶堵塞排水通道,从而出现复漏情况。

(2) 提高混凝土基面接触角能够延缓碳酸钙结晶的发育速度,延缓处理后的衬砌施工缝排水通道堵塞的出现,提高处理后的衬砌施工缝结构的可靠性。

(3) 常规处理的隧道衬砌施工缝结构可维护性较差,所以在对衬砌施工缝进行处理时,应预留可对施工缝内部进行检查维护的检查孔,提高其可维护性,以便运营期间对于施工缝排水通道进行检查和清理。

#### 参考文献:

- [1] 徐希娟. 排水性路面在山区高速公路中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 136—142.
- [2] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 131—135.
- [3] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [4] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2016.
- [5] 冉弥, 孙文龙, 李磊. 岩溶区高速公路隧道渗漏水原因分析及处治[J]. 中国建筑防水, 2018(4): 24—26, 29.
- [6] 田志宇, 李海清, 钟勇. 岩溶隧道处治方案的支护参数选取[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 82—86.
- [7] 邹育麟, 何川, 何聪, 等. 重庆岩溶地区季节性富水营运隧道渗漏水病害特征及其机制分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 18—27.
- [8] 李雄周, 王星星, 秦之富. 云南省某高速公路隧道岩溶段处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 433—441.
- [9] 万利, 吕康成, 李振江, 等. 隧道衬砌渗漏水微创处治技术[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1 239—1 243.
- [10] 蒋雅君, 杜坤, 廖甲影, 等. 岩溶隧道衬砌施工缝排水设施可维护性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 91—96.
- [11] 张小霓. 电导率法评定阻垢剂及碳酸钙结晶动力学研究[D]. 武汉大学硕士学位论文, 2004.
- [12] 杨传芳, 徐敦硕, 沈自求.  $\text{CaCO}_3$  结垢诱导期的理论分析与实验研究[J]. 化工学报, 1994, 45(2): 199—205.
- [13] 杨钦, 罗莊竹, 谭生, 等. 超疏水自清洁涂层防结冰技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 10—22.
- [14] 殷帅. 纳微米结构疏水表面结霜过程及其抑霜特性研究[D]. 广州大学硕士学位论文, 2012.