

广东高速公路隧道排水系统结晶堵塞分布及防治

夏小明¹, 刘夏冰^{2,3}, 区国钊¹, 张彦龙^{2,3}

(1. 广东省政府还贷高速公路管理中心, 广东 广州 510623; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420;
3. 广东省隧道工程安全与应急保障技术及装备企业重点实验室, 广东 广州 510420)

摘要: 通过调研广东地区运营高速公路隧道, 分析其排水系统结晶分布特征、排水系统结晶机理和防治措施。结果表明: 广东地区高速公路隧道排水系统结晶现象普遍, 主要分布在粤北地区的岩溶隧道, 部分非岩溶隧道也存在该现象, 且隧道渗漏水是普遍伴随的病害现象; 岩溶区隧道排水系统结晶主要与碳酸盐沉积反应有关, 非岩溶区结晶则主要与衬砌混凝土 Ca^{2+} 析出有关, 结晶严重程度均与地下水的 CO_2 浓度相关; 隧道排水系统结晶防治措施包括优化排水系统设计与混凝土的抗 Ca^{2+} 析出率、排水沟降水和结晶堵塞疏通。研究结果可为公路隧道排水系统建养提供参考。

关键词: 隧道工程; 排水系统; 结晶堵塞; 治理措施

中图分类号: U453.6

文献标识码:

Crystallization Clogging Distribution and Its Prevention in Drainage Pipes of Highway Tunnels in Guangdong Province

XIA Xiaoming¹, LIU Xiabing^{2,3}, OU Guozhao¹, ZHANG Yanlong^{2,3}

(1. Guangdong Provincial Government Repayment Highway Road Management Center, Guangzhou 510623, Guangdong, China; 2. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Tunnel Safety and Emergency Support Technology & Equipment, Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract: The crystallization clogging distribution phenomenon and hazard in drainage system of highway tunnels in Guangdong Province was investigated, and the characteristics of crystal distribution in drainage system, crystallization mechanism and prevention measures of highway tunnel drainage system were then discussed. The results show that the crystallization phenomenon in the drainage system of highway tunnels was common in Guangdong Province, which was mainly distributed in the karst area in the north Guangdong, and this phenomenon also existed in a few non-karst tunnels, which could always lead to tunnel leakage. The crystallization of tunnel drainage system in karst area was mainly related to the carbonate deposition reaction, while that in non-karst area was mainly related to the Ca^{2+} precipitation of lining concrete. The crystallization control measures of drainage system in highway tunnels were put forward, including optimization of the drainage system structure design and the Ca^{2+} precipitation of concrete, ditch precipitation and dredging for the drainage system. The research results provide reference for construction and maintenance of highway tunnel.

Key words: tunnelling engineering; drainage pipes; crystallization blockage; clogging treatment measure

隧道是公路建设中克服复杂地形地貌影响的重要媒介, 现阶段, 随着我国投入运营的公路隧

收稿日期: 2023-05-24

作者简介: 夏小明, 高级工程师, 本科, 研究方向为高速公路建设管养

基金项目: 广东省交通集团有限公司科技项目 (编号: JT2021YB23); 广东省重点领域研发计划资助项目 (编号: 2002B0101070001)

道里程和运营时间的增加, 各类隧道渗漏水病害现象不断显现^[1-2]。现有研究表明, 部分公路隧道的渗漏水、衬砌开裂等病害现象与其排水系统结晶堵塞相关^[1-4]。

公路隧道排水系统结晶现象目前已得到许多管理单位、科研人员的关注。为探究公路隧道排水系统结晶堵塞机理及特征, 田崇明等^[3]分析了某岩溶区公路隧道排水系统的结晶堵塞过程, 从设计和施工两方面提出防治建议。蒋雅君等^[4]从岩溶发育和沉积机理等方面出发, 研究了岩溶隧道排水系统堵塞原因。段海澎^[5]等分析了岩溶区隧道可能出现的排水系统结晶堵塞难题。徐筱等^[6]通过试验研究了岩溶区隧道排水管内结晶规律。马文镇等^[7]报道了东溪山隧道排水系统发生大面积结晶堵塞现象。这些研究表明岩溶区隧道排水系统出现结晶的原因主要是化学沉积和碎屑沉积, 化学沉积归因于岩溶动力系统及其沉积反应; 碎屑沉积指的是可溶性碳酸盐在地下水溶解产生细小颗粒。而非岩溶区隧道排水系统结晶则可能由地下水含有的重碳酸根离子与初支混凝土析出 Ca^{2+} 发生化学反应逐步沉积造成^[7-8]。随着隧道运营时间的增加, 结晶程度逐步严重而影响隧道排水系统的功能, 其普遍特征如下: 隧道排水盲管堵塞使衬砌背后水压力升高, 产生二次衬砌表面浸渗、渗漏, 结晶物在排水暗沟内沉积时, 易导致路面涌水、路基上抬。

不少学者提出了隧道排水系统结晶治理措施, 主要有两种类型, 一是更换防结晶管材, 如郭小雄等^[9]研制了隧道防结晶排水盲管; 黄少雄等^[10]提出了基于电场的隧道防结晶排水盲管; 陈昱池等^[11]提出采用永磁体排水管材预防结晶; 高何杰等^[12]提出了岩溶区隧道可更换排水管方案, 降低排水系统结晶概率。另一类是提出结晶清理措施, 主要针对隧道排水暗沟, 如詹树高等^[13]提出采用超声波联合有机酸技术对岩溶隧道排水系统结晶堵塞进行治理; 蒋雅君等^[14]采用高压水射流清洗、化学清洗方法对公路隧道环向排水盲管进行疏通。综上, 现有措施较少涉及初支混凝土抗溶蚀、优化排水系统结构等方面。

目前, 广东省内部分运营高速公路隧道出现严重的排水系统结晶堵塞现象, 为评估和治理这类现象, 本研究调研了广东省 32 座运营高速公路隧道排水系统, 总结了公路隧道排水系统结晶堵塞分布和产生机理, 提出了公路隧道排水系统结晶现象的防治对策, 研究成果可为隧道养护提

供参考。

1 广东高速公路隧道排水系统运行状态概述

广东地区是我国降雨量最丰富的地区之一, 丰富的地下水给广东地区隧道运营带来了难题。截至 2022 年底, 广东省运营高速公路隧道总里程超过 800 km, 部分隧道的服役年限已超过 25 年, 随着隧道运营时间的增加, 隧道渗漏等水病害问题也在逐年增加^[1,15-16]。为分析广东地区高速公路隧道排水系统的运行现状, 首先对广东 32 座运营高速公路隧道开展了现场调研。

初步分析结果表明, 渗漏水病害较重的公路隧道普遍存在排水系统堵塞问题, 而在这些隧道中, 排水系统结晶等现象普遍, 几乎已经遍布全省的高速公路隧道网。进一步分析调查表明, 出现排水系统结晶现象的隧道约 60% 分布在粤北地区, 尤其是隧道群较多的京港澳高速、武深高速粤境段等运营线路, 排水系统结晶严重的隧道有 8 座, 占调研隧道总数的 25%, 少数隧道则分布在粤东、粤西地区。综上, 排水系统结晶现象普遍导致公路隧道存在渗漏水病害, 严重时甚至存在隧道衬砌开裂现象。

2 隧道排水系统结晶分布特征

2.1 时空分布特征

2.1.1 结晶分布位置特征

表 1 总结了前文所调研的 32 座高速公路隧道排水系统结晶现象的典型特征及发生原因。由表 1 可知, 公路隧道排水系统结晶主要出现在衬砌表面、泄水孔、纵向排水管、排水暗沟、施工缝等位置, 典型位置结晶现象的照片如图 1 所示。

表 1 公路隧道排水系统结晶特征和发生原因

典型特征	发生原因
衬砌表面长斑	地下水从施工缝、衬砌裂缝等防水薄弱位置渗出, 结晶物在二次衬砌表面析出
泄水孔或排水孔结晶	地下水量增大时, 泄水孔排水能力不足, 在泄水孔口或泄水孔道析出结晶物
纵向排水边管或排水暗沟结晶	地下水流经排水沟(管)后, 结晶物在沟(管)壁沉积, 减小了隧道排水沟(管)的过水能力
横向排水盲管结晶	排水系统淤堵结晶导致排水能力不足, 地下水大量涌入路基横向盲管, 造成堵塞

2.1.2 排水结晶堵塞的隧道地质特征

对调研发现排水系统结晶现象严重隧道的围岩岩性类别进行初步统计, 统计结果如表 2 所示。处于石灰岩、灰岩地区的公路隧道排水系统



(a) 边墙表面及施工缝出现长斑



(b) 纵向排水管及排水沟结晶

图1 隧道排水系统结晶现象

结晶现象明显多于其他岩性地区，堵塞程度一般也更为严重，表明公路隧道排水系统结晶现象的出现与隧道所处的地质条件有关。

表2 排水系统结晶堵塞隧道围岩岩性类别与堵塞程度

隧道名称	结晶段岩性类别	堵塞程度
洋碰隧道	石灰岩	严重
大宝山隧道	灰岩、石灰岩	严重
媯双坳隧道	灰岩	严重
茶林顶隧道	石灰岩	严重
石门坳隧道	灰岩	一般
梅子坳隧道	灰岩、石灰岩	一般
大王顶隧道	砂岩	一般
东溪山隧道	花岗岩、凝灰岩	严重

2.1.3 结晶物的成分特征

对广东地区洋碰隧道、东溪山隧道、大王顶隧道等8座运营高速公路隧道排水暗沟内的白色结晶物进行取样分析，发现这些结晶物的主要成分均为 CaCO_3 ，典型结晶物 XRD 分析结果如图2所示。

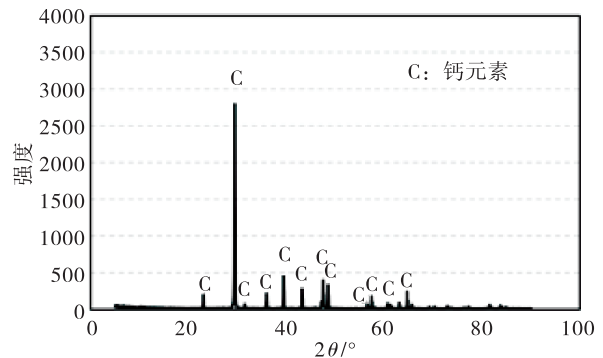


图2 结晶物 XRD 分析结果

2.1.4 结晶时间分布特征

调研发现，广东地区高速公路隧道排水系统结晶现象存在明显的季节性特征，其严重程度还与区域降水量相关。根据 1987—2008 年气象资料，广东地区的降雨主要发生在 4 月至 9 月，其中 6 月的年平均降雨量超过 300 mm。

在大潮高速东溪山隧道开展降雨量现场监测，图3为里程 YK61+800 处隧道排水沟流量与降雨量的关系曲线，图4为二次衬砌背后水压力与降雨量响应曲线。由图3可知，监测曲线总体呈现“心电图”的波动特征，5月初至6月上旬，降水量明显增大时隧道排水沟的水流量快速增长，在6月初达到峰值。由图4可知，6月和7月二次衬砌背后水压力明显增大，最大值为 0.287 MPa，说明当排水系统不畅时，降雨导致二次衬砌背后水压力上升。图3和图4的结果表明隧道排水边沟流量、二次衬砌背后水压力的变化特征与降雨量密切相关，地下水和围岩、衬砌结构的接触也明显加强，因此，排水系统结晶现象对降雨量具有较高的敏感性。

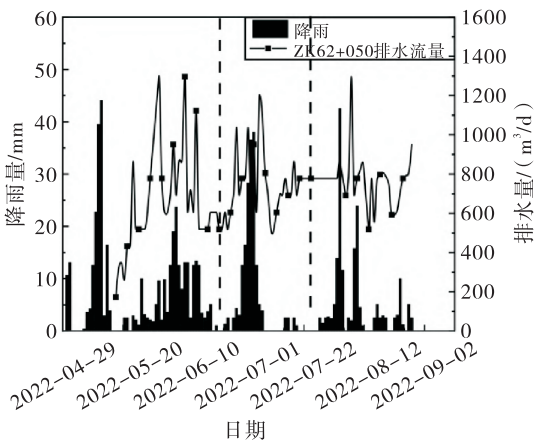


图3 隧道排水沟流量与降雨量响应曲线

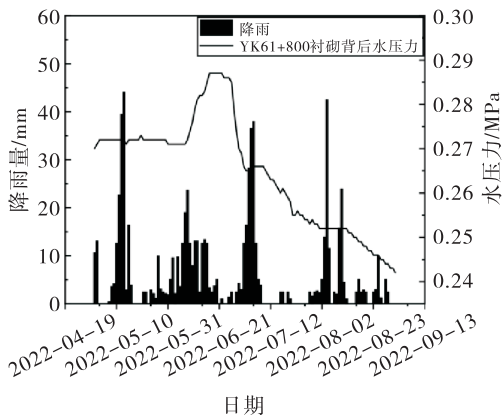


图4 二次衬砌背后水压力与降雨量响应曲线

2.2 隧道排水系统结晶的危害

2.2.1 渗漏水

隧道排水系统结晶堵塞后, 降雨使衬砌背后水压力增大, 造成地下水可能从施工缝等位置渗出, 并逐渐发展为点、线渗漏等更严重病害。

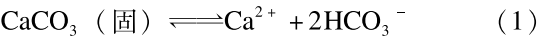
2.2.2 衬砌开裂、路面涌泥

隧道排水系统堵塞后衬砌背后水压力增大, 可能导致衬砌结构开裂, 造成隧道路面隆起、涌泥等危害, 且这些现象容易在运营期反复出现。

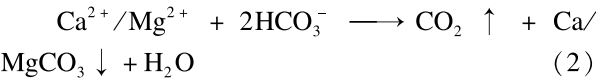
3 典型公路隧道排水系统结晶堵塞产生机理

3.1 岩溶区隧道排水系统结晶堵塞产生机理

广东地区岩溶主要分布在粤北地区^[15], 其次在粤西、粤东有少量分布, 岩溶地区地下水丰富, 导致公路隧道排水系统的结晶现象更加明显。岩溶区隧道排水系统结晶机理与岩溶动力系统反应过程和隧道围岩岩性类别密切相关^[5,16]。碳酸岩在地下水中发生的溶解和沉积可用式 (1) 表示:



地下水中的 CO₂ 和 H₂O 相互作用后产生 H⁺, 促进了碳酸盐的溶解反应, 隧道开挖打破了岩溶地下水平衡状态, 可能造成含有 Ca²⁺、Mg²⁺ 等的岩溶水在隧道排水系统中发生式 (2) 的沉积反应:



根据调研结果, 强降雨造成部分岩溶隧道存在大范围渗漏, 在地下水长期冲刷下, 可溶性碳酸岩在地下水中发生部分溶解, 产生细小颗粒或

碎片, 在岩溶水的搬运作用下进入隧道排水系统沉积而造成堵塞; 富水断层带、地表冲沟段等区段地下水涌水量较大, 隧道排水系统结晶程度明显严重。

上述分析表明, 岩溶区隧道排水系统产生结晶堵塞现象的原因主要与碳酸盐沉积反应有关, 还与地下水作用下的碎屑搬运沉积作用有关。

3.2 非岩溶区隧道排水系统结晶堵塞产生机理

调研发现非岩溶区隧道也存在排水系统结晶堵塞现象, 且少数隧道的堵塞程度更严重, 与现有文献结果一致, 如东溪山隧道^[7]、珠海隧道^[8]等。研究表明, 非岩溶区隧道排水系统结晶机理与岩溶区隧道不同。本节以东溪山隧道为例说明非岩溶区隧道排水系统的结晶堵塞机理。东溪山隧道建设和运营期均出现了排水系统结晶堵塞现象, 该隧道全长 1820 m, 所处地层岩性为凝灰岩和花岗岩, 结晶堵塞严重区段左、右线分别为 760 m 和 1125 m, 右线占比超过全长的 50%。

对隧道排水系统结晶堵塞严重区段的岩性及地表进行取样分析, 结果见表 3。东溪山隧道的花岗岩、凝灰岩等的化学组分以 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 为主, CaO 的含量均未超过 2%。表 4 为对右线隧道排水系统结晶堵塞严重区段围岩的调查结果。根据表 4, 洞身段和洞口段的开挖时间均早于左线隧道 1 个月, 地下水与初支混凝土的接触时间更长, 隧道右线排水系统结晶淤堵程度和长度也更严重, 推测可能原因: 率先施工的右线隧道比左线隧道施工存在更大的地下涌水, 初支混凝土中游离 Ca²⁺ 与地下水的接触更多。

表 3 隧道区域岩土样 X 射线衍射半定量岩矿分析结果 单位: %

编号	岩土样	SiO ₂	TiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
R01	凝灰岩	48.82	1.64	20.70	11.65	0.19	1.34	1.91	2.84	0.41	0.45
R02	土样	46.49	1.41	24.56	11.27	0.12	1.07	0.35	0.14	0.36	0.39
R03	花岗岩	55.30	0.10	24.83	1.52	0.02	0.21	0.02	0.27	7.35	0.02
R04	花岗岩	68.08	0.13	15.63	1.84	0.06	0.28	1.37	3.44	5.56	0.02
R05	花岗岩	70.32	0.18	13.60	1.98	0.07	0.40	1.98	2.33	5.27	0.04

表 4 东溪山隧道排水系统结晶堵塞严重段的围岩状况

结晶严重区段	隧道修建情况
YK61 + 655 ~ YK62 + 100	YK61 + 655 ~ YK61 + 745 段处于洞口堆积体, 施工期掌子面线涌水现象严重。YK61 + 745 ~ YK61 + 870 段为 V 级围岩, 穿越全 ~ 强风化凝灰岩, 节理密集发育, 洞身大面积积渗、滴水。YK61 + 870 ~ YK62 + 100 段主要为 III 级围岩, 穿越中 ~ 微风化花岗岩, 基岩涌水量大
YK62 + 515 ~ YK63 + 080	YK62 + 515 ~ YK62 + 700 段主要为 III 级围岩, 穿越中 ~ 微风化花岗岩, 地下水主要为基岩裂隙水。YK62 + 700 ~ YK63 + 080 段穿越强风化花岗岩, 局部岩质软弱, 需要穿越受 F2 断层, 地下水涌水量大, 呈股状水发育。YK63 + 030、K62 + 800 附近地表有 2 条较大冲沟, 长年流水

采用水力连通试验方法对东溪山隧道的地下水径流规律进行初步探查。在隧道南北两侧各布置一个钻孔,并投放罗丹明示踪剂和荧光素钠示踪剂,左右线隧道内共设置6个接收点,图5为ZK62+800处两种示踪剂浓度的变化曲线,其余接收点的结果也基本类似。图5表明罗丹明浓度一直处于背景值附近,即投放点处的地下水未进入ZK62+800排水管处;在投放示踪剂约2 h, ZK62+800的荧光素钠浓度上升到0.18 mg/L,并在5 h后恢复到背景值,说明进入隧道内的荧光素钠量很少,投放点处补给到隧道ZK62+800处的地下水较少。因此,东溪山隧道内地下水主要接收大气降雨补给,主要径流通道是前半段的地层交界处和K62+800附近的F2断裂带等裂隙发育区,大气降水通过垂向裂隙通道进入隧道。

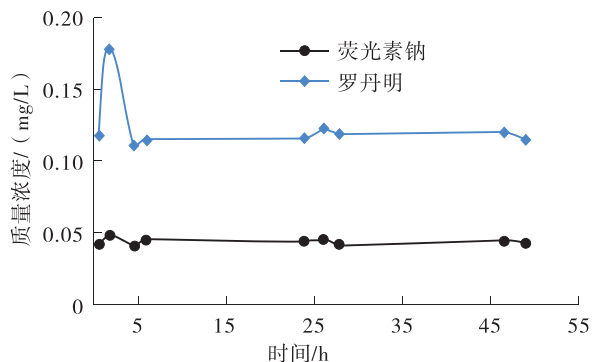


图5 东溪山隧道ZK62+800处示踪剂浓度变化曲线

研究表明非岩溶区隧道排水系统结晶堵塞形成机理如下:结晶物的 Ca^{2+} 主要来源于初支混凝土,这些地区地下水普遍含有一定量的侵蚀性 CO_2 和 HCO_3^- ,地下水流经隧道围岩和衬砌混凝土后,混凝土中游离的 Ca^{2+} 在地下水中持续溶解,并与其中的侵蚀性 CO_2 、 HCO_3^- 结合生成 CaCO_3 ,随着流入排水系统地下水的 CaCO_3 饱和度和上升,地下水在很短的时间内析出 CaCO_3 结晶,附着在排水管沟的内壁并硬化堵塞。综上可知,无论是岩溶区还是非岩溶区隧道,其排水系统结晶程度均与地下水中 CO_2 浓度相关,岩溶区隧道的沉积反应难以避免,非岩溶区隧道排水系统结晶还与混凝土中 Ca^{2+} 的析出有关。

4 公路隧道排水系统结晶防治

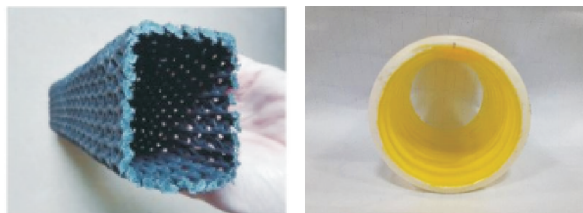
公路隧道排水系统结晶现象的防治应覆盖隧道全寿命周期,但目前多数隧道排水系统未考虑运营期检查和维护的便利性,隧道排水系统堵塞便成为了棘手的技术难题。

4.1 公路隧道排水系统结晶的预防

公路隧道排水系统结晶的预防措施主要针对隧道建设期。

4.1.1 隧道排水系统设计优化

从提升隧道排水系统运营期的可维护性出发,排水系统设计优化主要分为两类:第一类是改善排水管道材质,降低结晶概率,如图6a所示,采用防结晶、可更换型的排水管道;第二类是对排水系统结构进行优化,如图6b所示,将原排水暗沟改造为带有格栅式盖板的排水明沟,有利于隧道运营期对结晶物进行清理。



(a) 新型排水管



(b) 轻质高强盖板路侧排水边沟

图6 排水系统的优化设计

4.1.2 混凝土配合比优化

根据3.2节的研究结果,隧道衬砌混凝土中游离的 Ca^{2+} 可能会与地下水中的侵蚀性 CO_2 、 HCO_3^- 等产生化学反应而形成结晶物。因此,通过优化混凝土配合比抑制 Ca^{2+} 的溶出可以预防排水系统结晶。主要方法为通过掺入抗侵蚀抑制剂(TIA)、活性胶凝材料(RMA)、疏水密实材料(SM)等外掺剂优化混凝土配合比。考虑到交通隧道一般采用复合式衬砌,对于初支喷射混凝土,掺入HDC和TIA等外掺剂抑制 Ca^{2+} ,确保 Ca^{2+} 稳定;二次衬砌混凝土一般掺入HME或RMA提高其抗渗性和密实性。

为获得混凝土抗溶蚀优化配合比,表5列出了不同掺加方式的混凝土配合比,分别掺加RMA、TIA及SM进行溶蚀试验,制作得到的混凝土1 d强度见图7,图8为不同溶蚀时间下混凝土孔隙率变化曲线。

根据图7~图8的结果,溶蚀后水泥浆体密实性变差,表面疏松多孔,各组的严重程度不同,

表 5 混凝土抗溶蚀配合比

类型	水泥	水	粗骨料	砂	外加剂
基准组	515	205	790	790	不加
RMA	474	205	790	790	RMA-41
TIA	515	175	790	790	TIA-30
SM	515	178	790	790	SM-27

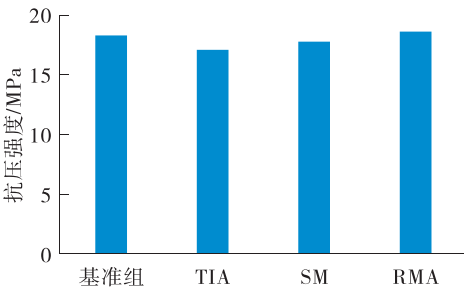


图 7 混凝土的 1d 抗压强度

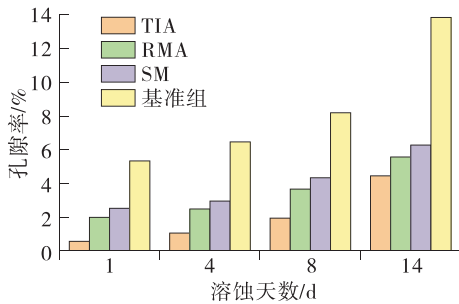


图 8 不同溶蚀时间下混凝土孔隙率变化曲线

同, 4 组的 1 d 混凝土强度差别不大, 基准组孔隙率均明显大于 TIA 组、RMA 组和 SM 组, 掺加外掺剂的混凝土溶蚀后依然较为密实; 相同条件下, 掺加 RMA、TIA 和 SM 可提升抗溶蚀性能。

将表 5 中掺加 TIA 的混凝土配合比用于汕湛高速华陆段观音坳隧道, 与采用基准组配比的初支混凝土区段进行工程试验对比, 通过对试验区段进行喷水, 得到的对比效果如图 9 所示。由图 9 可知, 红线以下区段为掺加 TIA 初支混凝土区段, Ca^{2+} 溶出率明显减少, 优于红线以上采用基准配合比的区段, 证明通过优化衬砌混凝土配合比可以预防隧道排水系统产生结晶堵塞。



图 9 初期支护抗溶蚀性喷射混凝土的工程对比

4.2 公路隧道排水系统结晶堵塞的治理

公路隧道排水系统结晶堵塞治理分为两类: 排水边沟井点降水、结晶物疏通。

排水边沟井点降水。采用降水措施降低排水边沟的地下水位, 减少地下水与隧道衬砌混凝土的接触, 减少隧道内排水系统的结晶概率, 主要措施为在隧道排水边打设井点降水, 降低地下水与混凝土的接触程度, 该方法已在东溪山隧道试用^[7], 但存在治标不治本、可能对隧道周边环境产生影响、治理费用高等问题。

结晶物疏通。当隧道排水系统结晶现象无法避免时, 需要在运营期对隧道排水系统定期、定时检查及疏通, 依据结晶物状态选择合理的疏通方式是隧道养护的关键。现阶段对公路隧道排水系统结晶淤堵的疏通技术研究尚处于起步阶段, 除传统人工清掏法之外, 主要引入市政管道清淤方法清理^[14-15], 如高压水射法等。同时, 部分情况下公路隧道排水系统内的结晶物强度高, 清理难度大, 需结合高速公路运营特点, 研发更合理、高效的疏通设备。

5 结论

- (1) 粤北岩溶区高速公路隧道排水系统结晶现象分布最广、结晶程度最重, 且普遍存在隧道渗漏水病害; 隧道排水系统结晶堵塞严重程度与所处地质环境等因素相关, 结晶主要出现的位置为衬砌表面、泄水孔、纵向排水管、排水暗沟、施工缝, 广东降雨量频发的 6 月和 7 月是隧道排水系统结晶堵塞频率较高的时期。
- (2) 广东地区公路隧道排水系统的结晶物成分以 CaCO_3 为主, 岩溶区隧道的碳酸盐沉积反应难以避免, 非岩溶区隧道排水系统结晶的成因与衬砌混凝土中 Ca^{2+} 的析出有关, 两种情形结晶程度均与地下水中 CO_2 浓度相关。
- (3) 本研究提出公路隧道排水系统结晶防治措施。预防措施针对隧道建设期, 包括隧道排水系统结构优化、提升混凝土配合比 Ca^{2+} 析出率等; 治理措施主要针对隧道养护期, 包括排水边沟降水、结晶物疏通等。

参考文献:

[1] 蒋雅君, 刘世圭, 周睿, 等. 运营交通隧道衬砌排水系统病害成因及分级研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(3): 124-129.

[2] 田崇明, 叶飞, 宋桂锋, 等. 隧道排水系统结晶堵塞机理

- 及防治措施初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 66-76, 83.
- [3] 张兴华, 钟文健, 王辉, 等. 公路隧道排水系统结晶堵塞治理[J]. 广东公路交通, 2023, 49(1): 61-66.
- [4] 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(7): 131-135.
- [5] 段海澎, 陈发根, 姚春江, 等. 岩溶区隧道结晶堵管现象及其诱发的风险问题浅析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 332-335.
- [6] 徐筱, 张胤, 李杰, 等. 岩溶区隧道排水管结晶规律模型试验[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 133-139.
- [7] 马文镇, 张豹, 张彦龙. 公路隧道排水系统结晶堵塞机理及处治措施[J]. 广东公路交通, 2021, 47(5): 52-56.
- [8] 缪仑, 周裕, 任辉. 非岩溶隧道排水系统结晶机理及防治措施研究[J]. 中国市政工程, 2022(5): 66-69, 124.
- [9] 郭小雄. 铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 71-77.
- [10] 黄少雄, 刘小飞, 张学富, 等. 基于电场的隧道排水管防结晶堵管技术研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5217-5226.
- [11] 陈昱池, 陈相阁, 张学富, 等. 基于磁处理法的隧道永磁体排水管防结晶试验[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2105-2111.
- [12] 高何杰, 陈胜, 吕建兵, 等. 灰岩隧道防化学结晶淤堵及新型可更换排水管研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 403-406.
- [13] 詹树高, 钟祖良, 陈宇波, 等. 岩溶隧道排水管结晶堵塞机理及疏通试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 717-721.
- [14] 蒋雅君, 杜坤, 魏晨茜, 等. 铁路隧道排水盲管结晶沉积疏通清洗技术[J]. 隧道与轨道交通, 2020, (4): 9-13.
- [15] 张彦龙, 田卿燕, 张建同. 广东地区某公路岩溶隧道水害分析及其数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 307-313.
- [16] 李清, 祝志恒, 李林毅. 强降雨作用下岩溶区公路隧道衬砌破坏机制分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 1102-1110.

(上接第3页)

但砂率过大时, 河砂的总比表面积增大, 在水泥浆体体积一定的情况下, 水泥砂浆的稠度增大, 流动性降低, 导致混凝土流动性大幅降低。

砂率对自密实混凝土的抗压强度影响不显著, 自密实混凝土的抗压强度随着砂率的增大会有所降低。当砂率低于 52% 时, 7 d 和 28 d 抗压强度降低幅度较小, 降幅均小于 3.5%; 当砂率超过 52% 时, 7 d 和 28 d 抗压强度降幅较大, 降幅超过了 10%。砂率过大时, 水泥砂浆体积较大、粗骨料体积较小, 硬化混凝土结构密实性降低, 因此其抗压强度随之降低。

3 结语

(1) 河砂的细度模数对自密实混凝土工作性能影响较为显著。随着细度模数增加, 自密实混凝土的流动性和填充性均增强, 但细度模数到 2.97 时, 由于混凝土的黏聚性变差, 填充性减弱; 为满足该项目自密实混凝土设计要求的工作性能, 细度模数应控制在 2.4 ~ 2.9 范围内。

(2) 河砂的含泥量对自密实混凝土工作性能有一定的影响。随着含泥量增大, 混凝土工作性能逐渐降低。含泥量 $\leq 1.5\%$ 时, 各项指标变化不明显; 当含泥量 $> 1.5\%$ 时, 虽然各项指标都满足要求, 但混凝土工作性能有明显降低。

(3) 砂率对自密实混凝土施工性能和强度均

有影响。随着砂率的增大, 混凝土的流动性和填充性均先增大后减小, 混凝土强度则逐渐降低。但当砂率低于 52%, 混凝土抗压强度降幅较小; 当砂率达到 54%, 混凝土抗压强度降幅达到 10% 以上。为满足该工程自密实混凝土设计要求的工作性能和强度等级, 砂率应控制在 47% ~ 52% 范围内。

参考文献:

- [1] 吕卫清, 王胜年, 吕黄, 等. 钢壳沉管自密实混凝土配制技术研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 3952-3958.
- [2] 陈辉, 陈志超, 林艳. 自密实混凝土填充性能及细观结构的优化研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(3): 189-192.
- [3] 郑建岚, 罗素蓉, 王国杰, 等. 自密实混凝土技术的研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 1-36.
- [4] 徐杰, 叶燕华, 朱铁梅, 等. 砂率对自密实混凝土工作性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 82-86.
- [5] 包丽丽. 细骨料对自密实混凝土性能的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2020(7): 62-64.
- [6] 宗琦, 颜鑫, 方跃, 等. 骨料粒径及砂率对自密实混凝土力学性能的影响[J]. 安徽理工大学学报, 2021, 41(1): 1-6.
- [7] 谢清泉, 于连山, 马昆林, 等. 细骨料对填充层自密实混凝土施工稳定性的试验研究[J]. 科技研究, 2020(06): 10-13.