

多断层网状填充性岩溶隧道衬砌结构水灾患处治效果研究

白建营^{1,2}, 戴晓威^{3,4}, 张彦龙^{3,4}, 刘夏冰^{3,4}, 林海山^{3,4}

(1. 广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510623; 2. 广东省高速公路有限公司京珠北分公司, 广东 韶关 512700;

3. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420;

4. 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: 针对运营期岩溶隧道渗漏水治理后易反复渗漏的问题, 以京港澳高速洋碰隧道左线为研究对象, 采用自动化监测和数值模拟方法分析了多断层岩溶区段隧道水灾的患处治效果。研究表明: 裂隙发育、地下水丰富及季节性降雨是多断层岩溶区隧道密集渗漏水的主要原因; 针对此, 提出了针对多断层网状填充性岩溶区段的隧道渗漏水病害患处治措施; 自动化监测显示, 长期运营中二次衬砌荷载随地下水环境及溶洞填充物季节性流动而变化, 拱顶、拱腰、墙脚等位置可能承受较大内力, 实测最大拉压应力均出现在7—9月, 衬砌受力与背后水压力正相关, 雨季荷载明显增加; 考虑实际水压力时, 衬砌结构安全系数满足规范要求, 结合自动化监测和现场观测, 表明采用的患处治措施长期效果良好。

关键词: 多断层; 岩溶隧道; 水灾患处治; 衬砌结构安全

中图分类号: U455

文献标识码: A

Study on the Water Disaster Treatment Effect of Karst Tunnel Lining Structure with Multi-fault Network Filling

BAI Jianying^{1,2}, DAI Xiaowei^{3,4}, ZHANG Yanlong^{3,4}, LIU Xiabing^{3,4}, LIN Haishan^{3,4}

(1. Guangdong Provincial Highway Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China;

2. Jing-Zhu North Branch of Guangdong Provincial Highway Co., Ltd., Shaoguan 512700, Guangdong, China;

3. Guangdong Hua-lu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Tunnel Safety and Emergency

Support Technology & Equipment, Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the issue of recurrent water seepage after the treatment in karst tunnels during operational phases, this study investigates the left line of the Yangpeng Tunnel on the Beijing-Hong Kong-Macao Expressway, and the automated monitoring and numerical simulation methods were used to analyze the treatment effect of multi-fault karst tunnel. The research findings indicate that: fracture development, abundant groundwater, and seasonal rainfall are the primary causes of intensive water seepage in tunnels within multi-fault karst zones; targeted treatment measures for multi-fault network-filled karst zones were proposed. Automated monitoring revealed that the secondary lining load in long-term operations varies with groundwater conditions and seasonal flow dynamics within karst voids. Critical sections such as the crown, arch waist, and sidewall footings may experience significant internal forces. Measured maximum tensile and compressive stresses occurred between July and September, with lining stress positively correlated to the pore water pressure behind the lining. Rainy seasons significantly increased the load. When accounting for actual hydraulic pressures, the structural safety factor of the lining meets code requirements. Integrated analysis of automated monitoring and on-site observations confirms the long-term efficacy of the adopted treatment measures.

Key words: multiple faults; karst tunnel; water disaster treatment; safety of lining structure

收稿日期: 2025-01-22

作者简介: 白建营, 工程师, 本科, 研究方向为高速公路养护管理

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (编号: 2022B0101070001)

我国岩溶分布广泛,岩溶对隧道建设和运营造成了严重影响。受季节性降雨影响,处于岩溶区和断层带的隧道时常会发生隧道渗漏水、衬砌开裂等病害问题^[1-4]。岩溶发育程度、地下水长期作用会对运营隧道衬砌结构的安全性产生影响^[5],各类隧道衬砌结构病害日益显现。

已有部分学者对岩溶区隧道水害特征、治理方案和结构安全性开展了研究。邹育麟等^[6]通过调查重庆地区66座公路营运隧道渗漏水状况,发现隧道水害与岩溶地质、季节性降雨存在必然联系;周关学等^[7]查明了隧道穿越大型溶洞群的形态及特征,并提出了治理方案;卜林^[8]提出了隧道充填介质基于不同破坏模式的渗透模型,揭示了充填介质在水-力作用下的灾变演化过程;黄明利^[9]开展了隧道衬砌结构抗水压力足尺模型试验,验证富水区溶岩隧道衬砌结构的安全性能;尚海松等^[10]建立了“全封堵”衬砌结构模型研究岩溶富水隧道水压变化引起结构受力特征;杨润霞^[11]建立了基于雷达图法的岩溶隧道风险评估模型,实现了岩溶隧道的安全风险评估;刘浩等^[12]基于高密度电法与水连通试验探究了岩溶隧道周边不良地质的分布情况,揭示了降雨后溶岩区隧道结构应力场和渗流场的规律特征;赵少忠等^[13]调查了某隧道施工过程中发现的26处溶洞,对溶洞群的特征和成因进行了分析,通过数值模拟探究了溶洞对隧道围岩变形的影响规律,分析了隧道溶洞处治技术;黄海峰等^[14]建立了隧道侧部存在溶洞的围岩模型,探究了岩溶处治效果。既有研究成果揭示了岩溶区隧道水害形成机理,对岩溶区隧道水害治理和隧道结构安全评估作出了指导,但既有研究尚未开展隧道水害处治后的效果评估。

京港澳高速粤境北段洋碰隧道左线(北京方向) LK1920+255~LK1920+300 穿越复杂岩溶区和多条地质断层,岩溶区存在多种填充物,为地下水强渗透性区域,该区段自运营以来水害频发。本研究采用自动化监测、数值模拟对该多断层网状填充性岩溶隧道处治后结构变形与受力特征开展研究,以期类似隧道的水害处治提供参考。

1 研究实例概况

1.1 洋碰隧道岩溶区段施工期及运营期水害概况

洋碰隧道位于广东省韶关市乳源瑶族自治县,隧址区地形地貌为大瑶山山脉南端西麓构造

剥蚀-风化-堆积中低山沟谷区,为分离式隧道,最大埋深约230 m,单洞总长为4 183 m,于2003年通车。洋碰隧道左线(北京方向) LK1920+255~LK1920+300 区段在施工期和运营期曾多次发生水害,涉及隧道衬砌开裂、严重渗漏水等问题,如图1所示,具体情况如下。

2000年, LK1920+268 段施工时发生严重涌水涌泥,出水点水量大,泥沙含量高达20%~50%。LK1920+253 处发生严重涌水,造成LK1920+248~LK1920+273 段衬砌严重破坏,边墙出现不同程度的开裂。

2003年, LK1920+263 段衬砌表面有剥落现象,从平行导洞向隧道拱顶进行了地质钻孔,发现衬砌背后存在空洞,破碎层厚度达20 m。

2004年, LK1920+263~LK1920+269 段拱顶发现防火层剥落、多处龟裂和混凝土大面积空鼓等病害,该区段边墙有混凝土张裂,且有较小错动。

2012年,破除隧道 LK1920+265~LK1920+275 段的衬砌混凝土后,发现拱部和边墙存在混凝土开裂和破损的情况,此外,边墙的混凝土出现局部脱空、钢筋锈蚀变形、有股状水以喷射的方式流出等问题。

2018年, LK1920+245~LK1920+300 段存在大范围的严重渗漏水现象,部分漏水点呈股状喷射,主要涉及隧道边墙及拱顶等位置。



(a) 边墙混凝土开裂破损 (b) 拱部纵向裂缝密集

(c) 边墙内部钢筋锈蚀变形 (d) 打孔有股状的水喷射状流出

图1 隧道历史水害例图

1.2 多断层岩溶区段隧道水害成因

洋碰隧道左线(北京方向)的地质纵断面如图2所示,左线 LK1920+255~LK1920+300 区段位于F13断裂层,该断层为由强—弱—微风化构造角砾岩组成,大部分风化成亚黏土夹碎石。通过地震映像法结合钻孔法对左线 LK1920+255~

LK1920+300 区段隧道衬砌背后的不良地质体进行了探测, 结果如图 3、表 1 所示。由表 1 的探测结果结合隧道水害的发生现象可知: 该区段普遍存在岩溶和围岩破碎带, 探测区域的岩溶部位均有不同厚度的充填物, 填充物以亚黏土为主, 部分呈现黄褐色的淤泥质泥浆。分析认为该隧道频繁水害的原因主要如下。

(1) 隧址区地表降水丰富, 近年来平均降水量 1 702.4 mm, 该区段位于典型多断层岩溶区段, 溶洞、裂隙发育, 岩溶水成片连通, 受大气降水及地表径流补给影响, 地下水源丰富, F13 断层上盘砂岩层的阻隔, 岩溶水滞留于隧道左侧, 地下水呈连通状态, 形成高水头, 隧道衬砌承受高水压力作用。

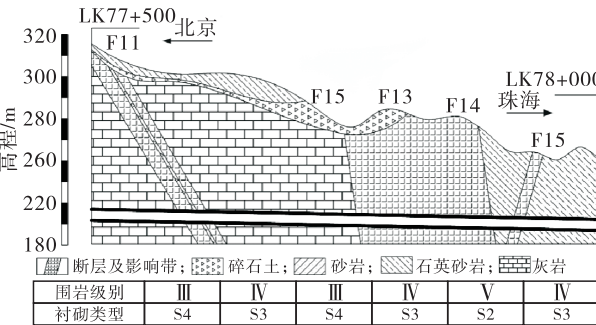


图2 隧道水害段地质纵断面

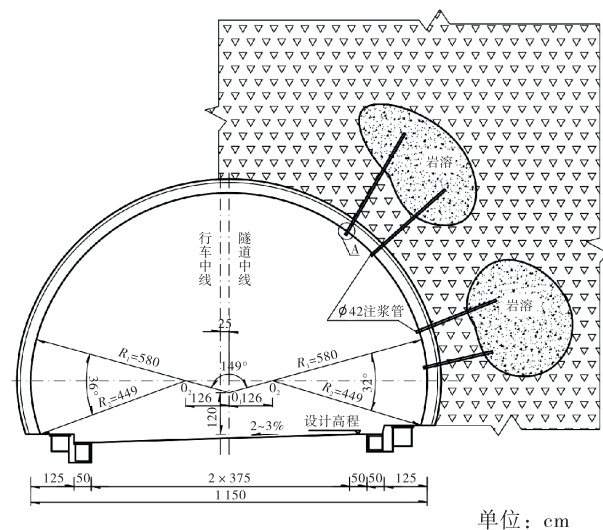


图3 衬砌背后溶洞探测结果示意图

(2) F13 断层内填充物稀软杂乱, 处于流动状态, 隧道拱墙背后存在较大溶洞, 隧道衬砌长期处于偏压状态, 导致此区段隧道衬砌开裂严重。

1.3 多断层岩溶区段水灾患处治措施

针对洋碰隧道出现的水害问题, 采用了钻孔注浆、平行导洞、粘贴钢带加固、渗漏水接缝处治等多种综合处治措施, 隧道处治部位及具体的处治措施见表 2。

表 1 隧道左线 LK1920+255 ~ LK1920+300 段衬砌背后溶洞探测结果

序号	测线号	起始里程	终止里程	隧道背后异常宽度/m	隧道背后异常深度/m	推断异常性质
1	A (右车道边墙)	LK1920+255	LK1920+295	40	0.6~20	构造带
2		LK1920+268	LK1920+274	6	1.2~3.8	岩溶
3		LK1920+274	LK1920+278	4	5.4~8.1	岩溶
4	B (右车道拱脚)	LK1920+255	LK1920+285	30	0.6~20	构造带
5		LK1920+267	LK1920+275	8	3.9~9.3	岩溶
6	C (拱顶)	LK1920+265	LK1920+300	35	0.6~20	构造带
7		LK1920+267	LK1920+273	6	1.5~5.6	岩溶
8	D (左车道拱脚)	LK1920+260	LK1920+300	40	0.6~20.0	构造带
9	E (左车道边墙)	LK1920+265	LK1920+315	50	0.6~20.0	构造带
10	G (右车道路面)	LK1920+263	LK1920+300	37	0.6~20.0	构造带
11		LK1920+263	LK1920+275	12	1.6~-5.8	岩溶

表 2 多断层岩溶区段水灾患处治措施表

序号	处治部位	处治措施
1	断层带内溶腔	采取钻孔注浆方法, 注浆压力为 0.2~0.5 MPa, 填充直至孔内轻质混凝土流出。钻孔注浆管采用 $\varnothing 42$ mm 钢管, 钢管长度和混凝土配合比可根据现场试验进行调整
2	平行导洞	在主洞渗漏水病害密集段二次衬砌边墙上的泄水减压孔、集中出水点和二衬裂缝渗水处向平行导洞钻孔, 以达到排水减压的效果。平行导洞长 748 m, 并与洋碰隧道左线平行, 平行导洞中线至洋碰隧道左线测设中线距离为 30 m

续表

序号	处治部位	处治措施
3	衬砌薄弱断面	采用钢板带加固方法，加固材料为环向镀锌钢带，钢带厚度 5 mm，宽度 750 mm，钢板带长度根据衬砌内空周长确定，钢带与隧道二衬模筑砼之间用 YG3-M20 型胀锚螺栓连接，并采用复合粘钢胶将钢板与二次衬砌全面黏接
4	渗漏水病害接缝	采用凿槽埋管的处治方法，凿槽凿至电缆沟底部，并对槽内进行清理。在凿槽内环向每隔 3 m 向围岩内钻孔深 3 m 的 $\varnothing 57$ mm 泄水孔，内设 TS-50 软式透水管，透水管长 3 m。在凿槽内沿环向安装埋设半剖 $\varnothing 100$ mm 聚氯乙烯管，安装后先在管外侧涂刷 E380 封边胶，充填遇水膨胀腻子条，然后用杜拉纤维防水砂浆充填割缝

1.4 处治效果长期监测方案

洋碰隧道左线（北京方向）LK1920 + 255 ~ LK1920 + 300 区段的水灾害问题频发，从建设到运营期不断出现衬砌开裂、渗漏水等病害。为减小水害对隧道交通的影响，2018—2020 年采用表 2 所示的综合处治措施进行了水害处治。为研究该区段水灾害处治措施的效果，结合隧道水害的实际情况，对该区段开展了隧道结构自动化监测。

采用的自动化监测系统架构见图 4，自动化监测项目包括二次衬砌表面应力、周边位移和排水导洞衬砌背后孔隙水压力等，监测频率均为不少于 1 次/月，二次衬砌表面应力和周边位移监测于 2020 年实施，排水导洞衬砌背后孔隙水压力监测于 2021 年实施。

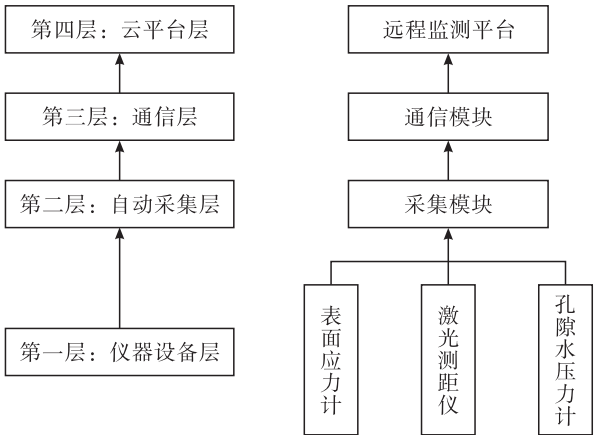


图 4 洋碰隧道左线自动化监测系统架构示意图

二次衬砌表面应力监测点布设于 LK1920 + 255 ~ LK1920 + 305 区段，每隔 10 m 布设一个监测断面。监测断面桩号为 LK1920 + 255、LK1920 + 265、LK1920 + 275、LK1920 + 285、LK1920 + 294 以及 LK1920 + 305，各断面监测点的布置如图 5 所示。

周边位移监测点每隔 10 m 沿隧道拱脚布设，监测断面分别为 LK1920 + 250、LK1920 + 260、LK1920 + 270、LK1920 + 280、LK1920 + 290 以

及 LK1920 + 300，采用激光测距仪进行监测，图 6 为激光测距仪测点布设断面示意图。

衬砌背后孔隙水压力监测点布设于靠近洋碰隧道右车道侧边墙的排水导洞，选取边墙有明水流出的泄水孔作为测点，其中，KYJ01 测点位于导洞 + 430 m 处，对应主洞 LK1920 + 370 m 的位置；KYJ02 测点则位于导洞 + 502 m 处，对应主洞 LK1920 + 298 m 的位置。根据洋碰隧道左线地质纵断面图可知两测点埋深约 136 m，图 7 为孔隙水压力监测点布设示意图。

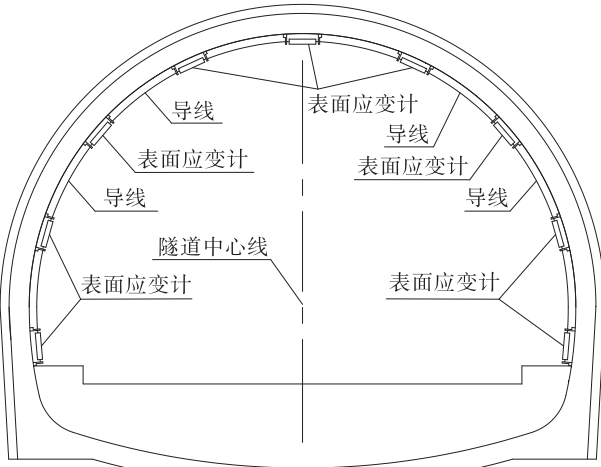


图 5 测点布设示意图

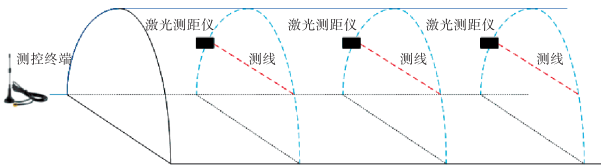


图 6 激光测距仪测点布设断面示意图

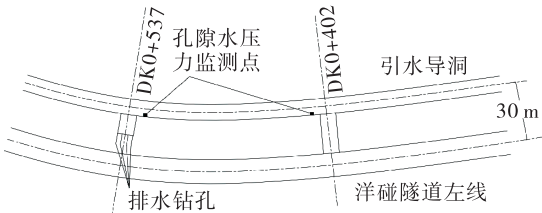


图 7 孔隙水压力监测点布设示意图

2 监测结果

2.1 二衬表面应力

基于隧道二次衬砌表面的监测设备是在运营阶段布设的,布设时隧道二次衬砌已经承受了既有荷载的作用,故将首期监测数据的应变值当作初始值(即零值,2020年12月量测),后续监测数据(每月15日量测)为初始值的相对值。图8为二次衬砌表面应力监测结果,监测发现:

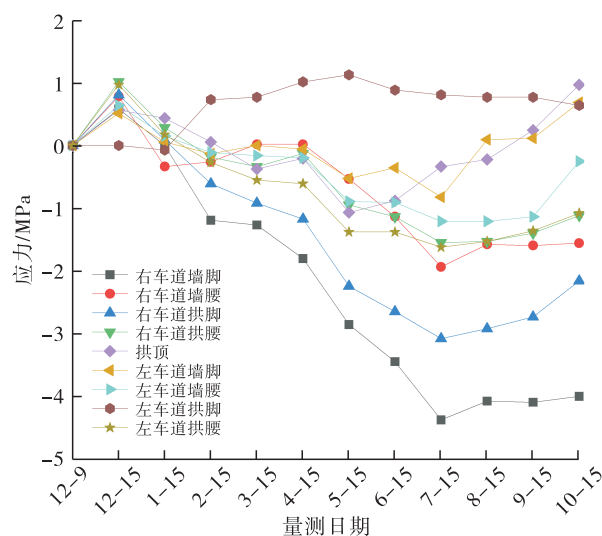
(1) 6个断面中大多数监测点均在7~9月后由受压转为受拉状态或部分测点存在呈往复拉压的变化趋势。如LK1920+255、LK1920+265断面右车道墙脚、右车道拱脚、右车道拱腰、左车道墙腰和左车道拱腰均表现为先受拉,再受压的变化趋势。LK1920+275断面和LK1920+285断面中右车道墙脚、左车道拱腰测点整体上呈先受拉、再受压的变化趋势。LK1920+275断面拱顶、左车道墙腰、左车道拱腰整体上呈往复拉压的变化趋势。根据监测结果及溶洞探测结果,在长期运营过程中,二次衬砌承受的荷载随着衬砌背后复杂地下水环境和衬砌背后溶洞中填充物的季节性流动而变化,拱顶、拱腰、墙脚等均可能承受较大内力,溶洞内填充物的季节性流动会导致隧道部分截面拉压应力变化。

在全部6个监测断面中,LK1920+255断面的最大应力位于右车道墙脚位置,最大值为4.4 MPa;LK1920+265断面右车道墙脚、右车道拱脚、拱顶、左车道拱腰在9月达到压应力最大值,左车道拱腰应力最大,为7.21 MPa;LK1920+275断面左车道墙腰测点压应力在10月达最大值6.0 MPa;LK1920+285断面拱顶测点拉压转化明显,最大拉应力在1月达到3.4 MPa,在7月压应力达到历史最大值11.6 MPa,小于混凝土标准抗压强度,隧道结构整体安全;LK1920+294断面各测点的压应力在8月达到最大值6.3 MPa,拱顶测点拉压转化较为明显,拉应力在9月达到最大值2.6 MPa;LK1920+305断面左车道拱腰测点在7月达到历史最大压应力值,为4.3 MPa。推测上述监测结果可能与7月后该隧道所在地区的降雨量增大导致的衬砌背后水压力增加有关。

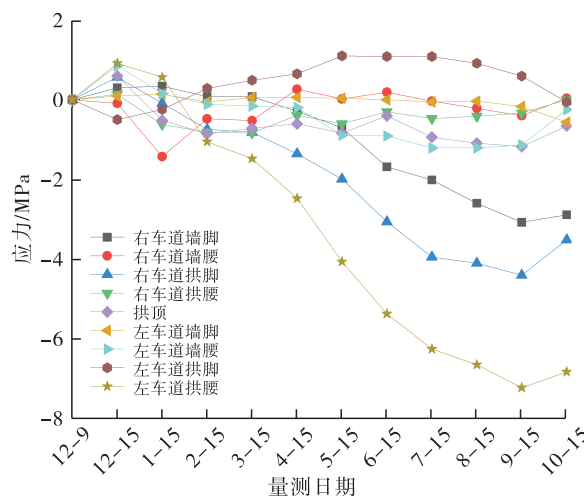
2.2 周边位移

考虑到周边位移监测传感器为在运营期安装,因此将安装后的初次读数设为初始值,后续每期的监测值均为相对值,各监测断面的周边位移-

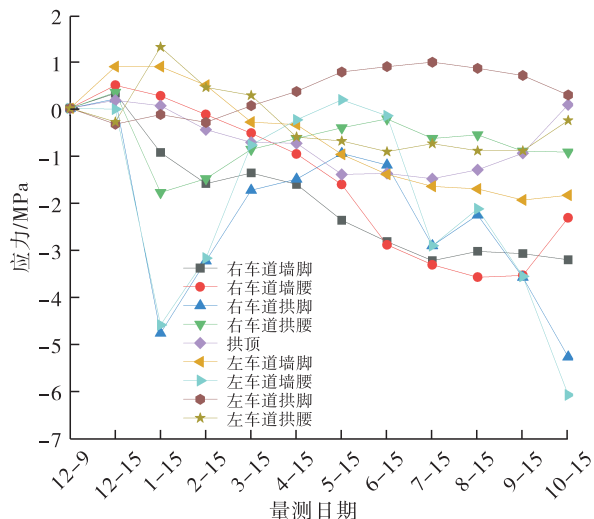
时间关系曲线见图9,其中,负值表示测线长度相对于初始值变小(向隧道内侧收敛),正值表示测线长度相对于初始值变大(向隧道外侧扩展)。



(a) LK1920+255 断面

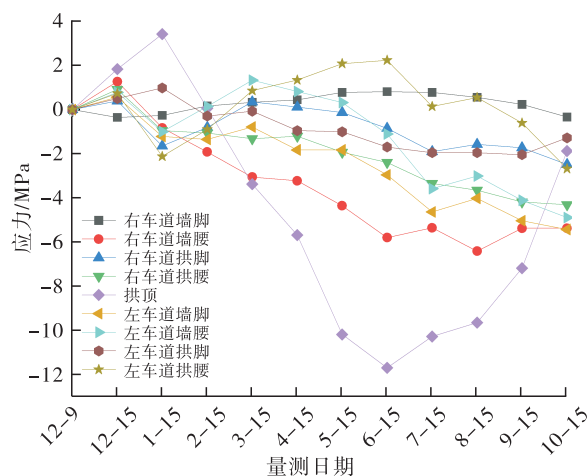


(b) LK1920+265 断面

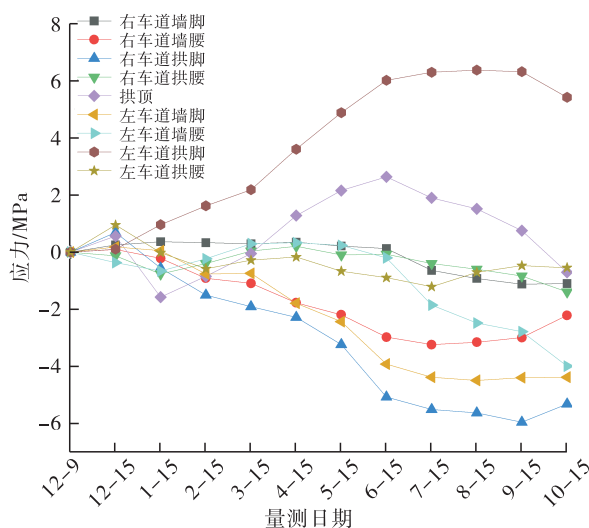


(c) LK1920+275 断面

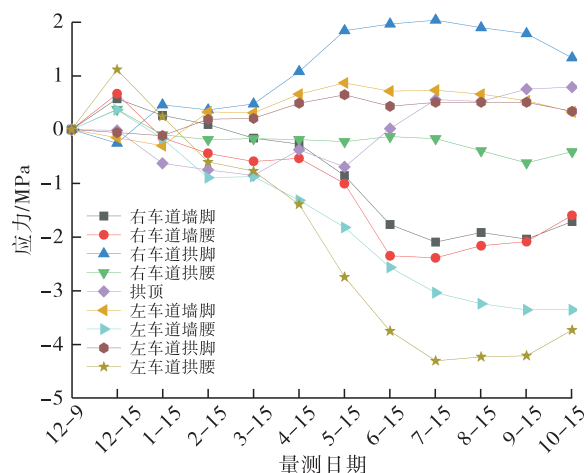
图8 监测断面各测点应力-时间关系曲线



(d) LK1920 + 285 断面



(e) LK1920 + 294 断面



(f) LK1920 + 305 断面

图8 监测断面各测点应力-时间关系曲线(续)

由图9的监测结果可知, LK1920 + 250、LK1920 + 260、LK1920 + 270 和 LK1920 + 290 断面在监测期的周边位移均表现为单一变化趋势; 其中, LK1920 + 250 断面周边位移在4—8月明

显向隧道内侧收敛, 且收敛值呈不断增加的趋势, 并在9月达到最大值, 约为6 mm, 推测LK1920 + 250处的泄水减压孔排水不畅通, 隧道衬砌背后的地下水压力增加, 促使隧道衬砌向围岩内侧发生周边收敛; 而LK1920 + 260、LK1920 + 270 和 LK1920 + 290 断面的周边位移规律均表现为两侧点的相对距离向隧道外侧扩张变形的趋势, 但变形趋势相对平缓, 没有出现4—8月明显增大的变化趋势, LK1920 + 260 在监测期内数值变化较小, LK1920 + 270、LK1920 + 290 断面在8月周边位移数值达到最大值, 推测原因为季节性降雨导致隧道衬砌背后地下水压力上升, 隧道排水相对通畅, 部分泄水孔仅存在局部堵塞, 地下水压力得以正常排出, 孔隙水压力局部减小导致隧道衬砌得到周边相对位移由内侧向围岩侧扩张。

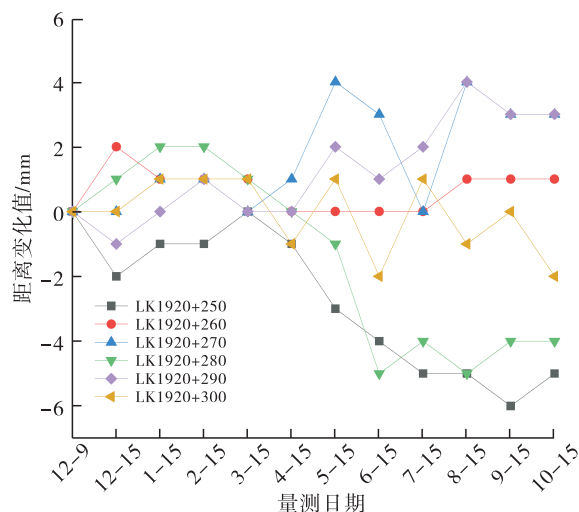


图9 隧道各监测断面周边位移-时间关系曲线

2.3 排水导洞衬砌背后孔隙水压力

隧道排水导洞衬砌背后孔隙水压力及隧址区降雨量监测结果见图10, 由监测结果可知: KYJ01 测点(导洞 + 430, 主洞 LK1920 + 370)的监测值较小, 最大值为0.01 MPa; 位于监测区段的 KYJ02 测点(导洞 + 502, LK1920 + 298)的监测值在8月份维持在1.4 MPa左右, 推测与季节性降雨有关, 且排水量较大的泄水孔主要集中于导洞 + 402 ~ 导洞 + 502 (LK1920 + 398 ~ LK1920 + 298)段。

3 隧道衬砌结构安全性评估

3.1 计算参数与计算工况

采用有限元法对隧道衬砌结构安全进行评估, 建立的隧道三维荷载-结构模型见图11, 选取LK1920 + 260作为典型断面进行分析, 隧道埋

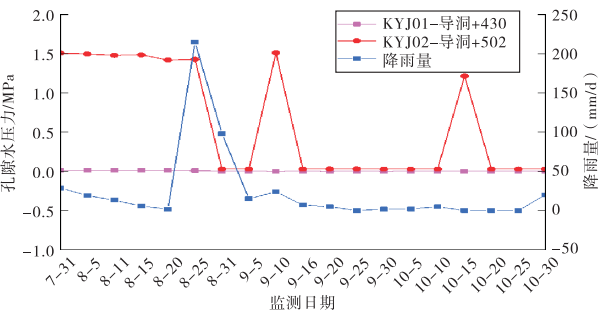


图 10 隧道平行导洞衬砌背后孔隙水压力及降雨量-时间关系曲线

深为 160 m，查询水文地质资料，地下水头高度约 80 m，围岩等级为 V 级，隧道二次衬砌采用 C30 混凝土，厚度为 50 cm。计算模型中，采用径向弹簧单元模拟二次衬砌与初期支护之间的相互作用，仅考虑弹簧受压而不考虑其受拉作用；二次衬砌的计算参数见表 3。

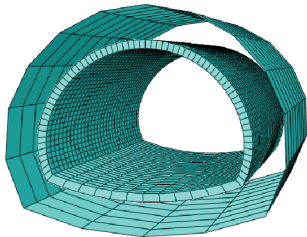


图 11 隧道三维荷载-结构模型

表 3 荷载-结构模型计算参数

材料名称	E/GPa	ν	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
二次衬砌	27.4	0.2	25

如图 12 所示，本次计算共设置两种计算工况，工况 1 为最不利工况，即当隧道排水系统完全堵塞时，此时二次衬砌承担的水压力按全封堵型衬砌计算，水压力为 0.8 MPa；工况 2 为实测水压工况：根据上文监测结果中实测最大水压力值为 0.168 MPa，设置二次衬砌承担的水压力为该值。根据规范^[15]计算隧道衬砌承担的围岩压力，二次衬砌受到的竖向压力为 0.223 MPa，水平压力为 0.067 MPa，将围岩压力和水压力视为作用在二次衬砌表面上的面力进行计算。

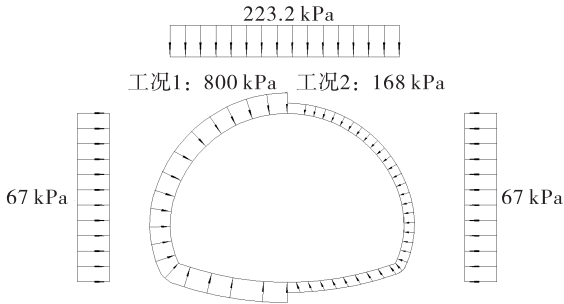


图 12 隧道二次衬砌受到的荷载示意图

3.2 计算结果

隧道结构轴力主要表现为受压，由图 13 可以看出两个工况下轴力最小值均位于拱脚，在考虑最不利条件下二次衬砌各个典型截面的轴力整体在一个较高的水平，若以最不利条件下二次衬砌各典型截面轴力为参照，根据实际衬砌水压监测下的二次衬砌各典型截面轴力平均下降约 63.3%，其中拱顶的降幅最大约 69.4%。

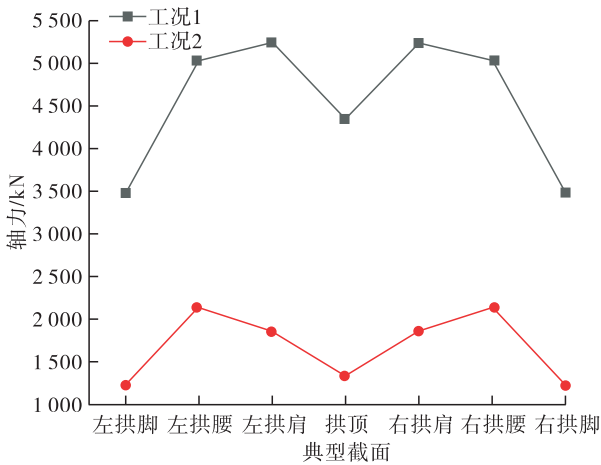


图 13 两个工况下典型截面轴力分布图

弯矩分布见图 14，二次衬砌表现为拱顶和拱腰内侧受拉，拱脚和拱肩外侧受拉。若以最不利条件下二次衬砌弯矩为参照，实际衬砌水压条件下的二次衬砌各典型截面弯矩平均下降约 50.2%，拱脚降幅最大约 60.1%。

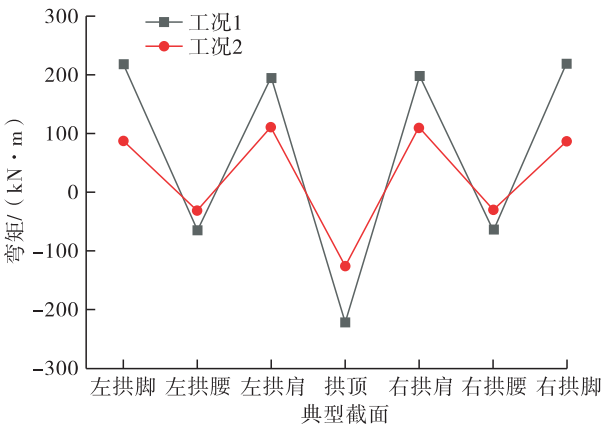


图 14 两个工况下典型截面弯矩分布图

根据现行公路隧道设计规范^[15]，由数值计算结果可求得两个工况下隧道各个典型截面上的安全系数，结果见图 15。在实测水压力计算工况下，隧道衬砌安全系数均大于 3.0，满足规范要求。对比最不利工况和实测水压工况，在实测水压工况下二次衬砌的截面安全系数相较于最不利工况下截面安全系数有显著提升。具体而言，在

实测水压工况下二次衬砌各典型截面的安全系数平均增加约169.8%。特别是拱顶部位安全系数的增幅最为显著,约191.7%。最不利工况下的二次衬砌受力已处于不安全状态,宜及时对隧道排水系统进行疏通,加强隧道的排水能力,减小衬砌背后地下水压力。

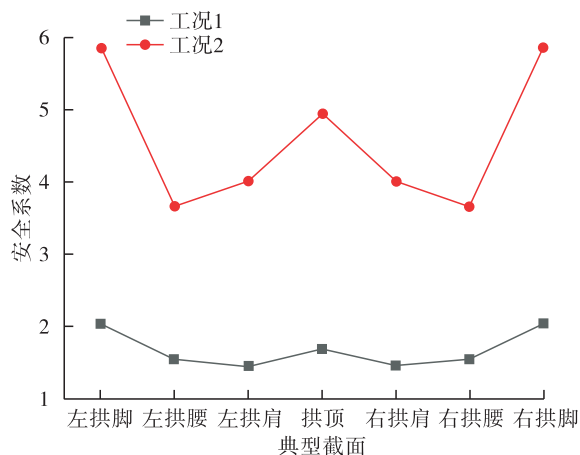


图15 两种工况下典型截面安全系数分布图

4 结论

(1) 洋碰隧道左线 LK1920+255~LK1920+300 区段为多断层岩溶区,隧道衬砌背后围岩的溶洞、裂带十分发育,在季节性强降雨补给下,该区段地下水位上升,隧道衬砌结构承受较大水压力作用,出现渗漏水病害密集现象。基于隧道水害成因提出了多断层岩溶隧道区段的水害处治措施,包括钻孔注浆填充断层带内溶腔、从主洞向平行导洞钻孔降低隧道背后水压力、钢板带加固衬砌薄弱断面、凿槽埋管法处治隧道渗漏水病害接缝。

(2) 根据自动化监测数据和探测结果,在隧道长期运营过程中,二次衬砌所承受的荷载会因衬砌背后地下水和溶洞中填充物的变化而持续波动,拱顶、拱腰、墙脚等部位可能会承受较大内力。衬砌背后溶洞中填充物的季节性流动是造成隧道结构受力偏压和部分截面拉压反复变化的主要原因,最大压应力值达11.6 MPa,最大拉应力值为2.6 MPa,通常出现在7—9月,衬砌受力与地下水压力呈正相关,雨季衬砌背后的水压升高。

(3) 通过自动化监测结果和现场观察可知采

用的隧道水害处治措施长期效果良好,隧道衬砌结构安全评估表明隧道衬砌结构在实际水压作用下其受力是安全的,为保障隧道结构的长期安全应及时对隧道排水系统进行养护。

参考文献:

- [1] FAN H, ZHU Z, SONG Y, et al. Water pressure evolution and structural failure characteristics of tunnel lining under hydrodynamic pressure[J]. Engineering failure analysis, 2021, 130: 105747.
- [2] 徐强,宋玉香,樊浩博,等. 富水岩溶隧道衬砌结构水压力分布特征模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(4): 74-83.
- [3] 李近,曹聪,许模,等. 重庆中梁山隧道群涌突水时空特征分析[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 119-127, 135.
- [4] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [5] 王亚强,王先龙,伍尚前,等. 隧道岩溶水引排及防治措施研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 866-875.
- [6] 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成因机制分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 18-27.
- [7] 周关学,王科,冯涛. 安六铁路对门寨隧道大型溶洞群形成机理分析及整治方案设计[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 75-79.
- [8] 卜林. 隧道充填型致灾构造突涌水机理与灾害防控方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [9] 黄明利,姜波,王成林,等. 岩溶隧道衬砌结构抗水压能力足尺模型试验研究: 以新圆梁山隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增1): 48-55.
- [10] 尚海松,郑波,郭瑞. 岩溶富水隧道水压变化引起的结构力学响应及防治措施[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增1): 374-381.
- [11] 杨润霞. 雷达图法在复杂地质下岩溶隧道风险评估中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 125-129.
- [12] 刘浩,祝志恒,李林毅. 京珠高速公路洋碰隧道水害原因分析及安全性评价[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 747.
- [13] 赵少忠,黄鑫,许振浩,等. 齐岳山隧道岩溶发育特征与溶洞处治技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7): 1289.
- [14] 黄海峰,畅振超,骆俊晖,等. 岩溶隧道结构受力变形特性分析及处置技术研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 183-190.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.