

富水岩溶铁路隧道水害成因及排水洞整治效果分析

胡恒福

(黔张常铁路有限责任公司, 长沙 410008)

摘要:以既有铁路拱桥铺隧道为依托,通过现场调查、地质分析等手段归纳隧道水害的典型特征,采用仿真模拟方法探究明确暴雨后高水位下隧道结构内力、位移与渗流场的规律特征,并探讨排水洞工程的整治效果。结果表明:连续强暴雨下岩溶地层的地下水位骤升、运营期排水系统的堵塞以及洞内过度泄水措施引发的水害风险是案例隧道水害发生的主要原因;经仿真数值模拟研究,创新提出邻近既有高铁隧道新增排水洞科学合理的空间位置和断面,有效解决运营安全问题;经排水洞整治后,外水压力(尤其是隧底)明显降低,仰拱隆起得到有效控制,即使面临高地下水位仍能保障运营隧道的结构安全与稳定。该研究对于后期岩溶隧道设计施工具有一定的实践指导意义,针对岩溶发育地区创新并提升地下岩溶发育及地下水勘探水平,科学优化隧道结构设计,确保运营安全。

关键词:铁路隧道;水害;岩溶;数值模拟;排水洞

中图分类号:U45 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)07-0170-07

据铁路隧道运营情况调查表明,富水岩溶地层因其地质条件复杂、地层富水性强、岩溶特征难以全面揭示,已成为运营水害的高发地层之一^[1-3];加之暴雨事件异常增多、隧道防排水系统可能的堵塞失效,使得近年来富水岩溶地区铁路隧道水害频发,造成了隧道渗漏水、结构开裂破碎、区段异常隆起等一系列病害问题^[4-8]。目前,不少学者及工程人员从现场调研、地质勘探、仿真分析、模型试验等方面对运营铁路隧道水害问题的病害成因及整治方法进行了研究。代鸿明^[9]归纳了数个铁路隧道典型水害案例,分析讨论了仰拱隆起及裂损的原因,从预防与治理两方面提出了相应建议;李铁钟^[10]依托某铁路隧道轨道上拱案例,通过现场调研、仿真分析等方法对水害原因进行了分析,并结合病害情况提出针对性整治措施;肖广智和薛斌^[11]针对向莆铁路雪峰山等 4 座隧道存在的渗漏水与结构隆起问题,开展了现场探查与病害成因仿真探讨,提出了以“泄水降压、底部加固、水流归槽”为原则的整治技术方案;高春君等^[12]针对隧道运营存在排水系统堵塞失效问题,基于流固耦合数值方法,分析了不同水位、不同堵塞条件下的衬砌应力变化规律;李林毅等^[13]针对铁路隧道运营期存在的排水系统堵塞问题,通过融合 3D 打印技术的模型试验,探究了排水系统堵塞对隧道结构及轨道线路的影响。上述研究经工程实践验证,一定程度上揭示了此

类水害问题的病害机理,较好地指导了富水地区隧道工程整治及设计。为进一步揭示富水岩溶地区铁路隧道运营水害机制,本文依托既有铁路拱桥铺隧道水害案例,从地质条件、排水系统现场调查等方面对病害原因进行分析;结合 FLAC^{3D} 软件仿真模拟现场病害,探究病害时隧道结构内力、变形与外水压力特征,并进一步探讨增设泄水洞的整治效果,以期为富水岩溶铁路隧道的整治与设计提供参考。

1 拱桥铺隧道基本概况

1.1 隧道概况及工程地质条件

拱桥铺隧道位于邵阳市,设计时速 200 km/h,双线铁路隧道,全长 3 866 m,最大埋深约 170 m。隧道进口段为 3‰ 上坡,出口段为 9‰ 下坡。隧道于 2014 年 11 月底动工,2017 年 11 月全隧贯通,2018 年 12 月底开通运营。隧道区山脉总体呈北东走向,地形复杂多变。洞身穿越地层地质构造复杂,主要处于石炭系灰岩地层,褶皱、断裂发育,累计穿越断层 4 处。地下岩溶水水量丰富,补给主要来源于雨水;隧道涌出水量受气候影响变化大。

1.2 隧道设计

全隧采用复合衬砌,隧道防排水采用排堵结合,隧道二衬背后敷设防水板,两侧边墙防水板下部纵向设置打孔波纹管;排水至隧道侧沟和中心水沟。此外,在水量丰富断层破碎带、岩溶等区段采

收稿日期:2022-10-13

作者简介:胡恒福(1968—),男,安徽芜湖人,黔张常铁路有限责任公司,高级工程师,研究方向为地下隧道工程。

用超前预注浆措施;在一般地段裂隙水较多、围岩自稳地段采取开挖后径向注浆等措施。

1.3 施工期水害

施工期间揭示洞身穿越灰岩地层,岩溶发育,共计揭露 36 处溶洞及溶槽。其中,在施工至 K115+547 时,揭示了大型填充型溶腔(图 1),掌子面涌泥涌砂约 3.6 万 m³,且造成隧道地表出现陷坑。经设计调整,采取“释能降压、超前加固、管棚支护、迂回绕行”的综合处理方案,最终施工期安全通过。隧道建设期间曾多次出现水害情况,尤其是在暴雨后渗漏水、洞内积水问题较为突出,如图 2 所示。施工期水害进一步验证了隧身地下水与地表降雨之间确存在较强的水力联系。

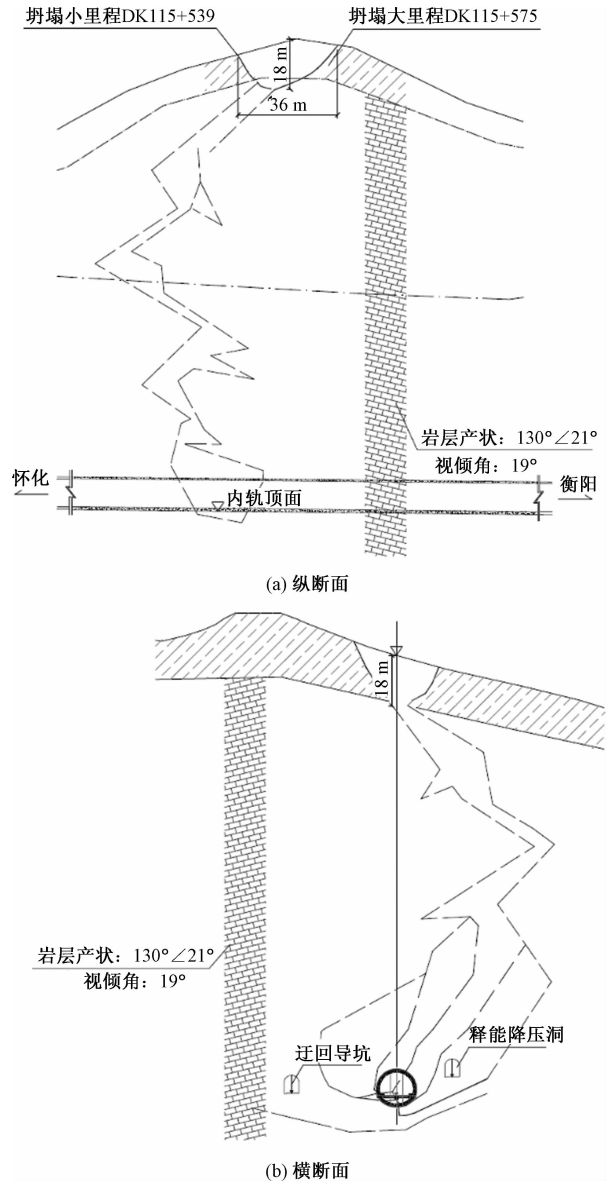
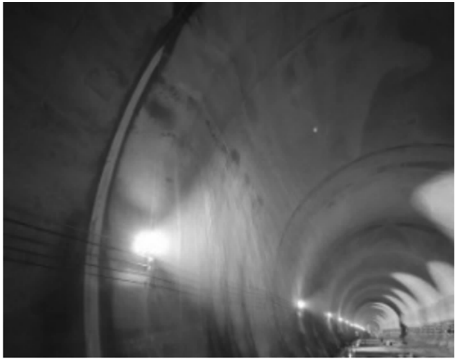


图 1 大型溶腔展示图



(a) 施工缝渗漏水



(b) 雨后洞内积水

图 2 施工期现场水害情况

1.4 运营期水害

2019 年 3—7 月,隧址区出现多次强降雨,运营部门检查发现拱桥铺隧道不同段落多次出现隧道渗漏水情况,存在较大安全隐患。

2 现场调查及整治方案

2.1 排水系统检查情况

病害发生后经工务部门巡检发现,拱桥铺隧道水害段落存在着不同程度的排水管堵塞问题,堵塞物基本为泥沙与白色结晶物,主要附着于衬砌排水管口以及管沟内壁,如图 3 所示。经化验分析,地下水镁离子溶度较高,白色结晶物主要成分为碳酸钙、镁结晶物。上述问题出现后,工务部门对排水管道进行了疏通处理,但因堵塞区段长、疏通工序繁多、堵塞反复性强且时间受限(仅能在天窗点疏通),隧道排水系统通畅性仍未能恢复至常态。根据现场情况可初步判定,隧道排水系统的淤堵应是导致拱桥铺隧道水害频繁出现的主要原因之一。

2.2 初步整治及现场效果

鉴于拱桥铺隧道运营期内的水害频繁出现,工务部门依照“以排为主,以堵为辅”的整治方针,于 2019 年 3—6 月采取了渗漏水段注浆封堵、新增边墙排水孔、施作仰拱泄水孔等一系列整治措施。现场巡检显示,经初步整治后效果较好,2019 年 7 月数次暴雨下未再发生隧道病害。但是,由于采取

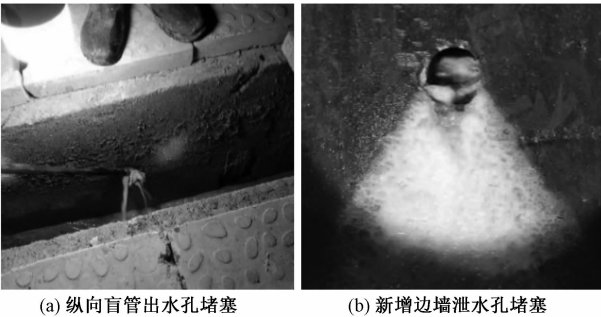


图 3 隧道排水系统堵塞

“以排为主”的整治方案,隧道运营又存在如下水害隐患:

- 1)2019 年 7 月暴雨后,边墙排水口因水压过大导致涌水射至道床面,进而影响行车安全。
- 2)新增泄水孔虽一定程度上降低了隧身水压力,但因排水量的提升导致了暴雨后隧道侧沟满排现象的频繁出现,隧道排水量已接近设计最大排水量。如遇更大暴雨可能引发地下水溢出侧沟,进而造成隧道内的大量积水。

2.3 病害原因与新增泄水洞方案

基于前述地质资料、巡检结果与病害特征,可基本确定拱桥铺隧道水害原因如下:

- 1)水害段埋深总体不大,洞身穿越单斜灰岩地层,断层及节理密集带发育,岩溶强烈发育,位于岩溶水的垂直渗流带。地表降水后雨水下渗补给迅速,地下水汇聚形成了较高的地层水压力,为隧身水压力骤增提供了外部条件。
- 2)由于地下水挟裹泥沙或因钙镁离子产生的结晶反应,使得隧道排水系统被逐步淤堵,造成了隧道排水能力的逐渐减弱。尤其是当隧身高水压力骤增时,排水系统难以及时排水泄压,无法有效降低地层水压影响。

3)当隧身承受着高水压力时,一方面地下水会自行寻找结构薄弱环节(如施工缝、止水带),并在高水压下突破上述节点,造成结构渗漏水问题^[14],另一方面,高水压力还会造成结构的不良变形,导致仰拱结构上拱,最终引发轨隆病害的出现。

4)“以排为主”的洞内整治方针虽能有效降低外水压力,降低水害风险,但是因排水量的较大提升造成了暴雨后侧沟满排与水流溢出的风险。

因此,在隧道内部排水能力已接近其极限,且运营隧道整治时间受限的情况下,经研究提出在隧道外侧新增排水洞的整治方案。新增排水洞位于线路右侧,全长 3 049 m,与正洞平行、结构相距

30 m,排水洞坑底标高低于正洞结构底标高 2~3 m,以利于排水。排水洞宽度为 4.0 m,高度为 4.5 m,V 级围岩段落采用复合整体衬砌,其余段落采用喷锚式衬砌。此外,水害严重段落还设置了垂直于排水洞的横通道,横通道与排水洞内以每 10 m 钻 3 个孔的密度钻 $\phi 150\text{ mm}$ 仰斜排水孔,每孔长 20 m。

3 新增泄水洞效果仿真评价

3.1 数值模型及边界条件

为明确新增泄水洞对隧道渗流场、应力应变及结构安全的影响规律,本文基于 FLAC^{3D} 软件^[15]进行仿真模拟研究。依据实际病害特征,选取病害严重的 K115+217 作为典型断面进行分析。根据地质资料,该断面埋深约 93 m,计算模型顶部围岩单元埋深为 50 m,上覆围岩采用顶部地应力进行等效模拟;两侧及底部距离隧道 3 倍洞径以上;计算模型最终范围取 110 m×110 m(宽×高),如图 4 所示。计算断面采用 IV_b 型复合式衬砌方案,建立精细隧道内部网格。根据地层岩性与隧道排水方式,建立隧道结构渗流模型且渗流模拟遵循假定如下:①地下水渗流服从 Darcy 定律;②围岩为均质、各向同性材料;③隧道排水仅依靠边墙排水口实现,而环向盲管的排水效果通过提高初支渗透系数进行模拟。

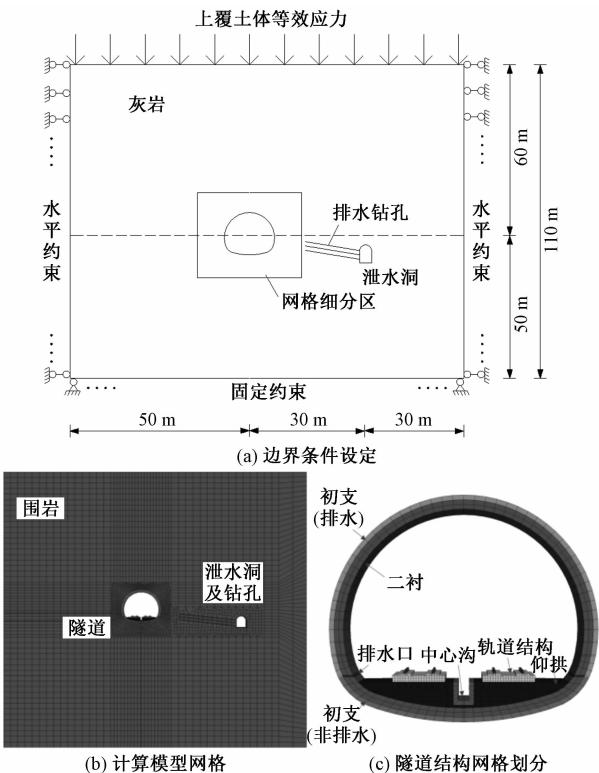


图 4 计算模型

力学边界:两侧水平约束,底部固定约束,顶部施加土体应力。渗流边界:底部、两侧孔压固定,能与外界交换液体;根据不同工况,调整地下水面高度。围岩与隧道结构均采用实体单元模拟,围岩服从摩尔库仑屈服准则,而隧道结构服从弹性本构模型。

3.2 模拟工况及参数选定

3.2.1 材料参数

依据地质资料,所建模型范围仅为灰岩地层,具体材料参数参考地勘资料取值,按照“等效刚度法”,计算获得支护结构的等效力学参数,初支结

构、排水口的渗透系数采用“以管代孔”的方法进行等效^[16]。模型中材料对应参数见表 1。

3.2.2 计算工况

根据病害成因分析,暴雨下的地层水头骤增与运营期间的排水系统堵塞是引发病害的关键因素。同时类似研究显示^[16],降雨作用下地下水位动态变化幅度可超过 50 m。因此,共设置如下 6 种模拟工况,具体工况细节见表 2。其中,工况 1~工况 4 的设置用以探究地下水位升高及排水系统堵塞后的影响规律,而工况 5、工况 6 则用以验证泄水洞修筑后隧道水害防治效果。

表 1 材料计算参数

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	渗透系数/(m·s ⁻¹)
灰岩	2 200	5.2	0.32	38	1.2	1×10 ⁻⁵
初支(排水)	2 400	25.5	0.2	—	—	5×10 ⁻⁷
初支(非排水)	2 400	25.5	0.2	—	—	1×10 ⁻⁷
排水管	2 400	25.5	0.2	—	—	1×10 ⁻³
二衬	2 500	26	0.166	—	—	不透水
钢轨	7 800	210	0.25	—	—	不透水
仰拱填充	2 400	23.5	0.2	—	—	不透水
泄水洞初支	2 400	25.5	0.2	—	—	1×10 ⁻⁷
集水钻孔	2 200	5.2	0.32	38	1.2	1×10 ⁻³

表 2 计算工况

整治情况	工况	排水系统	水位高度/m
泄水洞施作前	工况 1	未堵塞	20
	工况 2	未堵塞	40
	工况 3	未堵塞	60
	工况 4	堵塞	60
泄水洞施作后	工况 5	未堵塞	60
	工况 6	未堵塞	80

3.3 模拟结果分析

根据工况 1~工况 6 的计算结果,获得隧道外水压力分布,如图 5 所示。提取仰拱结构不同测点位置的隆起位移如图 6 所示。通过编译软件内嵌 FISH 语言,提取隧道结构衬砌内力,并依据《铁路隧道设计规范》计算其结构安全系数,绘制计算结果如图 7 所示。其中轴力值绘于隧道外侧代表受压,弯矩值绘于受拉侧。根据工况 1~工况 4 的计算结果可知:

1)在整治前且隧道未堵塞时,随地下水位的升高,隧道外水压力逐步增长,且全环水压力分布呈现“隧底>拱顶>拱脚>边墙”的量值特征。同时,还可以注意到随水位升高,不同部位的水压力增长亦不相同。20~60 m 水位,隧底水压增量为 370 kPa,拱顶水压增量为 416 kPa,而边墙水压增量仅为 52 kPa。因此,全环数值最高、随水位快速增长

的隧底高水压力应是导致隧底整体隆起的关键所在,而随水位增长最快的拱顶水压力则是引发隧道现场拱部渗漏水的主要原因。

2)在整治前且隧道未堵塞时,随地下水位的升高,仰拱出现了整体的抬升,且隆起位移存在“中间大、两头小”的量值规律。至 60 m 地下水位时,轨道最大隆起达到了 10.23 mm,与现场轨隆值基本一致,即可认为现场病害时地层水位应达 60 m。

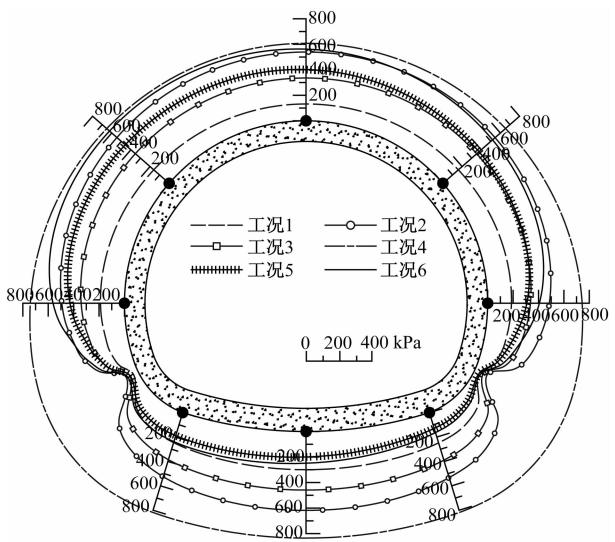


图 5 各工况外水压力分布

3)工况 3 的内力与安全系数结果显示,在 60 m 水位下衬砌全环最大弯矩、轴力均位于边墙,其值分别为 1 881 kN、120.2 kN·m,而隧底衬砌也承受着较大的内力;衬砌结构安全系数呈现“拱部最大,仰拱其次,边墙最小”的量值规律,同时衬砌最小安

全系数为 3.96,可以满足规范中“结构安全系数不小于 2.4”的限值要求^[6]。因此,可认为在高水压作用下拱桥铺隧道虽出现了一定的轨道隆起,但是衬砌内力整体处于合理范围,未有安全系数超限的情况,这与现场结构相对完好的情况基本吻合。

4)工况 4 的模拟结果显示,当隧道排水系统堵塞后衬砌水压力将进一步提升,且水压增量有“边墙>隧底>拱脚>拱顶”的量值关系。由于隧底水压的较大增长,也引发了仰拱结构的整体抬升,轨道最大隆起从 10.23 mm 增至 13.52 mm;同时,排水堵塞还导致了全环衬砌内力的进一步增长,致使衬砌结构最小安全系数从 3.96 降至 3.03,虽仍能满足限值要求,但是结构安全余量已被大幅削弱。因此,排水系统的堵塞确会导致外水压力的明显提升,进而恶化结构受力,削弱结构安全储备,同时还导致了轨道的进一步隆起,最终造成水害情况的恶化。

结合工况 3、工况 5、工况 6 的模拟结果可知:
1)经泄水洞方案整治后,隧道外水压力出现了

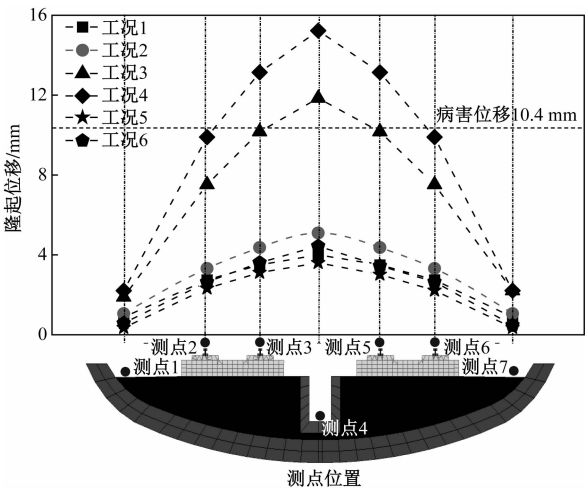


图 6 各工况仰拱隆起位移分布

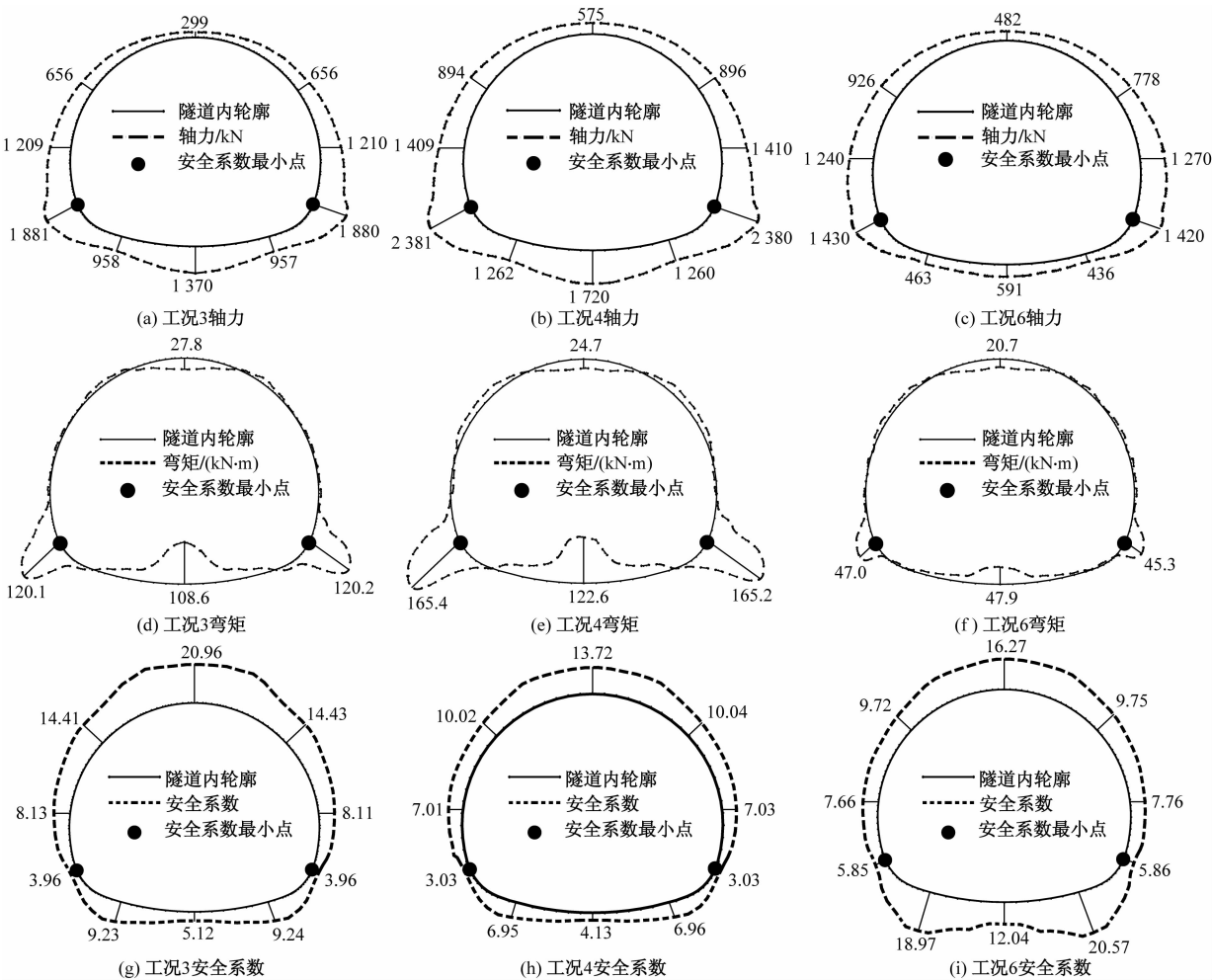


图 7 各工况衬砌轴力、弯矩及安全系数分布

一定降低,且隧底水压降幅最为明显。即使水位达到 80 m,隧底水压力仍可控制在 200 kPa 以内,这证明了排水洞方案在仰拱降压方面的有效性。然而值得注意的是,经排水洞方案降压后拱部水压力降幅相对较小且成为全环水压最高处,应对隧道拱部的渗漏水风险予以一定关注。

2)经排水洞整治后,由于良好的隧底降压作用,仰拱隆起得到了明显控制,60 m 水位下轨道最大隆起从 10.4 mm 降至 3.12 mm,即使水位升至 80 m 轨道隆起亦仅有 3.42 mm。

3)经排水洞整治后,全环衬砌结构的内力出现了一定降低,其中仰拱、边墙部位的内力降幅最为明显。因结构受力的改善,衬砌结构最小安全系数从工况 3 时的 3.96 增至工况 6 时的 5.85,结构安全性不仅满足规范限值要求,且留有一定安全余量。

综合上述结果可以认为:在暴雨引起的地下水位升高的情况下,隧道排水系统虽具有一定降压效果,但外水压力的增大恶化了结构受力,削弱了衬砌安全性,引发了仰拱结构的整体隆起,尤其是当排水系统堵塞时上述不利影响更为显著;而经排水洞方案整治后,隧道外水压力得到良好控制,仰拱隆起值大大降低,结构受力得到一定改善。但是,对于暴雨时拱部高水压可能引发的结构渗漏水风险应予以一定防范。

4 结论

1)依托既有铁路拱桥铺隧道水害案例,通过病害区段地质分析、现场调查等手段,归纳了施工期与运营期隧道水害的典型特征,明确了区段水害频发的主要原因包括暴雨下岩溶地层的地下水位骤升、隧道运营中因泥沙和结晶物淤堵产生的排水堵塞以及洞内过度泄水措施引发的突水风险。同时考虑洞内排水量已接近极限值,科学合理提出新增排水洞工程加强外部排导是十分必要的。

2)基于 FLAC^{3D} 软件分析了暴雨后高水位下隧道结构内力、位移与渗流场的规律特征,模拟结果表明排水系统虽具有一定降压效果,创新提出邻近既有高铁隧道新增排水洞科学合理空间位置和断面,有效解决运营安全问题。

3)基于排水洞方案的模拟结果,施作排水洞工程后隧道外水压力可以得到良好控制,仰拱隆起值大幅降低,结构受力得到一定改善;但是,由于排水洞工程在拱部处的泄压能力相对较弱,如遇暴雨时拱部高水压可能引发结构渗漏水风险,应予以一定防范。

4)对于后期岩溶隧道设计施工具有一定实践指导意义,针对岩溶发育地区创新并提升地下岩溶发育及地下水勘探水平,科学优化隧道结构设计,确保运营安全。

参考文献

- [1] 张彦龙,李清,刘浩. 阳江至阳春段高速公路鹅步岭隧道水害机理及评价研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016,12(9):193-196.
- [2] FANG Y, GUO J, GRASMICK J, et al. The effect of external water pressure on the liner behavior of large cross-section tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 80-95.
- [3] 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.
- [4] 宋林锦. 隧道水害成因及防治措施探讨[J]. 山西建筑, 2017(27):145-146.
- [5] MOTHERSILLE D, LITTLEJOHN S. Grouting of anchors to resist hydrostatic uplift at Burnley Tunnel, Melbourne, Australia[C]//International Conference on Grouting and Deep Mixing. New Orleans; American Society of Civil Engineers, 2012: 1073-1084.
- [6] 何昌国,黄棋,赵万强. 贵广铁路岩溶隧道水害原因分析及整治措施[J]. 高速铁路技术, 2018(S1): 67-73.
- [7] 马青,罗禄森,阳军生,等. 岩溶富水区深埋水沟排水隧道注浆圈参数研究[J]. 隧道建设, 2018, 38(11): 1793-1799.
- [8] 李林毅,阳军生,王立川,等. 强降雨作用下高速铁路隧道仰拱隆起原因分析及整治[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 27-36.
- [9] 代鸿明. 运营铁路隧道水害引发的仰拱起鼓及衬砌开裂防治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 202-206.
- [10] 李铁钟. 某高速铁路隧道无砟轨道上拱处治技术[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 125-128.
- [11] 肖广智,薛斌. 向莆铁路隧道道床积水、轨道隆起病害整治技术[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 200-204.
- [12] 高春君,向立辉,张学富,等. 不同水位下隧道排水管结晶堵塞引起的衬砌应力分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 49-55.
- [13] 李林毅,阳军生,高超,等. 排水管堵塞引起的高铁隧道结构变形与渗流场特征模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 715-724.
- [14] 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.
- [15] 陈育民,徐鼎平. FLAC\FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [16] 王恩志,王洪涛,邓旭东. “以管代孔”排水孔模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 346-349.
- [17] 铁道第二勘察设计院. 铁路隧道设计规范:GB 10003—2016[S]. 北京:中国铁道出版社, 2016.

Analysis on the Causes of Water Distress in Water-rich Karst Railway Tunnels and Treatment Effect of Drainage Tunnel

HU Hengfu

(Huaihua-Shaoyang-Hengyang Railway Co., Ltd., Changsha 410008, China)

Abstract: Based on the existing railway arch bridge paving tunnel, the typical characteristics of tunnel water damage is summarized through on-site investigation and geological analysis, simulation method is to explore and clarify the regular characteristics of internal force, displacement and seepage field of tunnel structure under high water level after heavy rainfall, and discusses the remediation effect of drainage tunnel engineering. The results show that the sudden rise of the groundwater level of the Karst formation under continuous heavy rainfall, the blockage of the drainage system during the operation period and the risk of water damage caused by excessive water discharge measures in the cave are the main reasons for the occurrence of water damage in the case tunnel. Through simulation numerical simulation research, the scientific and reasonable spatial location and section of the new drainage hole adjacent to the existing high-speed rail tunnel are innovatively proposed, which effectively solves the operational safety problem. After the drainage hole is remediated, the external water pressure (especially the bottom of the tunnel) is significantly reduced, and the upright arch uplift is effectively controlled. Even in the face of high water tables, the structural safety and stability of the operating tunnel can be guaranteed. It has certain practical guiding significance for the design and construction of Karst tunnels in the later stage, innovates and improves the level of underground Karst development and groundwater exploration in Karst development areas, scientifically optimizes the tunnel structure design, and ensures operational safety.

Keywords: railway tunnel; water disaster; Karst; numerical simulation; drainage tunnel