

在役岩溶隧道衬砌水压分布及预警控制标准研究

樊浩博^{1,2}, 陈宏文³, 赵东平^{2,4}, 朱正国³, 赵梓宇³, 朱永全¹, 高新强¹

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

4. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 随着强降雨天气的频发, 在役岩溶隧道衬砌开裂、渗漏水及失稳破坏事故日益增多。地表降雨补给下衬砌背后积聚高水压力是岩溶隧道发生水压灾害的主要原因, 对在役岩溶隧道开展监测预警是避免灾害发生的重要手段。以郑万线岩溶隧道为依托, 开展了相似模型试验及渗流数值模拟, 研究了不同岩溶形态下衬砌背后水压分布规律及衬砌隆起位移, 制定了岩溶隧道运营监测预警控制标准。结果表明: 当地表降雨补给超过隧道排水能力时, 衬砌背后将形成“地表补给+洞内排水”的动水压力, 仰拱底部极易积聚高水压力; 地层中存在岩溶管腔和溶蚀裂隙带时, 地表降雨将会导致衬砌水压局部增高, 衬砌承受偏压荷载, 并使仰拱受力进一步劣化; 以隧道仰拱中心水压力和隆起位移作为控制基准, 将岩溶隧道运营监测预警等级划分正常运营、临时补修、限速整治和封闭整治。研究成果可为岩溶隧道的结构设计优化及监测预警提供借鉴。

关 键 词: 岩溶隧道; 岩溶管腔; 溶蚀裂隙带; 衬砌水压力; 预警控制标准

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 07-2153-14

Study on lining water pressure distribution and early warning control standard of in-service karst tunnel

FAN Hao-bo^{1,2}, CHEN Hong-wen³, ZHAO Dong-ping^{2,4}, ZHU Zheng-guo³, ZHAO Zi-yu³,
ZHU Yong-quan¹, GAO Xin-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: With the frequent occurrence of heavy rainfall weather, the accidents of lining cracking, water leakage, and instability failure of in-service karst tunnels are becoming more prevalent. The accumulation of high water pressure behind the lining due to surface rainfall recharge is the primary cause of hydraulic disasters in karst tunnels. Monitoring and early warning for in-service karst tunnels are crucial methods to prevent such disasters. Taking the karst tunnel of Zhengzhou-Wanzhou railway as an example, similar model tests and seepage numerical simulations were conducted to investigate the water pressure distribution behind the lining and the uplift displacement of the lining under different karst morphologies. The research results provide a reference for the operational monitoring and early warning control standards of karst tunnels. The results indicate that when the recharge of surface rainfall exceeds the drainage capacity of the tunnel, a hydrodynamic pressure system of "surface recharge + tunnel drainage" will form behind the lining, making the bottom of the invert prone to accumulating high water pressure. When there are karst cavities and dissolution fracture zones in the strata, surface rainfall will lead to localized increases in water pressure on the lining, causing it to bear eccentric loads and further deteriorating the stress on the invert. Using the water pressure and uplift displacement at the invert center as the control basis, the monitoring and early warning levels for karst tunnel operation are classified into normal operation, temporary repair, speed limit rectification, and closure for rectification. The research findings can offer insights for the

收稿日期: 2023-09-07

录用日期: 2023-12-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 52108378); 青年人才托举工程项目 (No. 2021QNRC001); 河北省高等学校科学技术研究项目 (No. BJK2023079)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (52108378), the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2021QNRC001) and the Science and Technology Project of Hebei Education Department (BJK2023079).

第一作者简介: 樊浩博, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事富水隧道衬砌水压力及结构病害研究。E-mail: fanhb@stdu.edu.cn

structural design optimization and monitoring and early warning of karst tunnels.

Keywords: karst tunnel; karst cave; dissolution fracture zone; lining water pressure; early warning control standard

1 引 言

我国岩溶地貌分布广泛, 约占国土面积的三分之一。随着我国交通基础设施的蓬勃发展, 在岩溶地区修建的隧道数量日益增多。岩溶隧道在运营过程中病害时有发生, 出现衬砌开裂、渗漏水等问题, 严重威胁隧道运营的安全。

对于在役岩溶隧道而言, 衬砌背后积聚的高水压力是导致水压灾害发生的主要原因。水压力作为引起衬砌灾害的外部荷载, 其分布形态和大小关系着衬砌灾害的发生形式。为了探明衬砌背后水压力的分布规律, Tian^[1]、李林毅^[2]、Fang^[3]、樊浩博^[4]等分别开展室内试验, 研究隧道衬砌水压特征, 揭示出衬砌水压与降雨的关系。对隧道围岩采取注浆加固是降低衬砌水压力的有效手段, 高新强^[5]、Li^[6]、徐强^[7]、张治国^[8]等开展了系列渗流模型试验, 探明了不同注浆封堵条件下衬砌水压力的分布规律, 为富水岩溶隧道注浆参数的选取提供了重要的理论支撑。在隧道衬砌中设置排水盲管、防水板、中心排水沟等防排水系统是排除衬砌背后高水压的关键。防排水布置形式影响着衬砌水压力的分布形态, 排水系统的畅通性则关系着衬砌水压力的分布和大小。Li^[9]、Zhao^[10]、王秀英^[11]、Zhou^[12]等对比了多种排水结构型式对衬砌水压力分布的影响, 通过改变外水压力和隧道排水量, 研究了不同防排水形式下衬砌的水压力分布规律。蒋雅君等^[13]研究了排水系统堵塞时衬砌水压力的变化特征, 揭示了排水系统工作能力及畅通性对降低衬砌水压力的重要性。

岩溶地区通常围岩渗透性较强, 地表强降雨时, 大量雨水在短时间内通过溶蚀裂隙或岩溶通道流向隧道, 引发水压病害^[14]。何川^[15]、Fan^[16]、欧雪峰^[17]、Fang^[18]等分别研制了隧道渗流模型试验系统, 对高水压作用下岩溶隧道衬砌结构的受力性能及破坏特征进行了研究。结果表明, 高水压作用下岩溶隧道仰拱极易发生底鼓变形及开裂破坏。为了保障岩溶隧道的运营安全, 对隧道开展岩溶运营监测并及时预警尤为关键。申志军^[19]依托宜万铁路高风险岩溶隧道, 开展了衬砌水压力长期运营监测, 探明了衬砌水压力与洞内排水及地表降雨的相关关系。郑波等^[20]针对岩溶隧道在持续降雨下结构失稳问题, 构建了岩溶隧道结构安全预警体系。

上述学者针对隧道衬砌水压力开展了全面的研究, 取得了丰硕的成果。然而, 既有研究大多是考虑一定的隔离岩层, 分析局部水压对隧道衬砌的影响, 考虑“降雨补给+排水条件”影响的衬砌水压力研究还相对欠缺。另外, 针对运营岩溶隧道开展长期监测是避免隧道水压病害发生的重要手段。然而, 目前还未形成关于岩溶隧道运营监测的控制标准。基于此, 本文以郑万线岩溶隧道工程为依托, 提出隧道-岩溶系统概化模型。基于岩溶概化模型, 开展模型试验和数值模拟, 分析不同岩溶形态下衬砌的水压分布规律及结构变形特征, 进而提出岩溶隧道衬砌水压力和仰拱位移预警控制标准。研究成果可为岩溶隧道的结构设计优化提供借鉴, 并为岩溶隧道的长期运营监测提供指导。

2 依托工程概况

郑万高铁为西南地区至华中、华北地区的快速客运通道。其湖北、重庆段长度约为 471 km, 通过岩溶区约为 92.48 km, 沿线分布多条岩溶隧道, 隧道岩溶长度为 72.52 km。岩溶区地层岩性主要为灰岩、灰岩夹页岩、白云岩等, 围岩渗透性较强, 渗透系数约为 $2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-4}$ m/s。部分隧道可溶岩地层占隧道全长 60% 以上, 如罗家山隧道、楚峰隧道、荣家湾隧道等。隧道最大埋深约为 1 100 m, 地下水以孔隙水、基岩裂隙水、构造裂隙水及岩溶水为主, 隧址区伴随季节性强降雨, 给隧道运营安全带来极大隐患。沿线岩溶发育类型及特征如下:

(1) 落水洞及岩溶洼地

地表可见溶沟、溶槽, 岩溶洼地、落水洞等岩溶形态。落水洞对地下岩溶管道的发育极其重要。落水洞洞口多呈圆形或椭圆形(见图 1(a)), 直径为 3~8 m, 普遍发育深度为 5~15 m, 少数深不见底, 底部多充填黏土夹碎石, 以竖井状为主(见图 1(b))。

(2) 岩溶管道、溶缝、地下廊道

岩溶管道、溶缝、地下廊道以竖向发育为主, 将地表岩溶槽谷、洼地与地下河系统彼此连通, 形成一个上下相互连通的岩溶系统, 并成为岩溶水补给、径流、排泄的重要通道。

(3) 岩溶溶洞及大型岩溶溶腔

地下岩溶以溶洞及大型岩溶溶腔为主, 溶洞多以水平状发育为主, 竖向及缓倾斜状为次。溶洞口直径一般为 2~5 m 不等, 可见深度为 2~6 m。溶

腔发育规模大小不一，多呈大厅状、扁平状，部分为干溶洞，部分常年或季节性流水（见图 1(c)）。

（4）断层带及岩溶裂隙带

沿线穿越多条断层及岩溶裂隙带（见图 1(d)），断层带及岩溶裂隙带宽度从几米至数百米不等，汇水条件好，岩溶水极其丰富，导水能力强。地表降雨时，岩溶水极易沿断层带及岩溶裂隙带导入隧道。

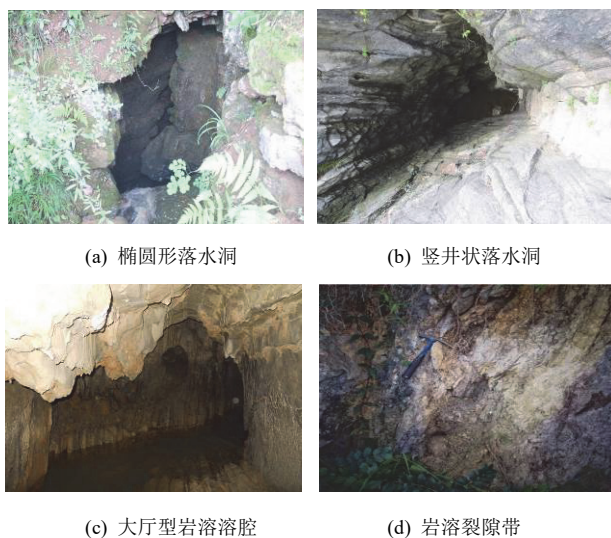


图 1 郑万线典型岩溶形态

Fig.1 Typical karst morphology of Zhengzhou-Wanzhou railway

3 隧道-岩溶系统概化模型

3.1 在役岩溶隧道病害特征分析

为了探明在役岩溶隧道发生水压病害的特征，全面搜集并调研了西南岩溶地区 20 余座在役岩溶隧道渗漏水、开裂及破坏的病害案例。选取了若干座典型岩溶隧道进行统计分析，对岩溶病害特征及病害成因进行了归纳总结，为后续隧道-岩溶系统概化模型的提出奠定了基础。典型在役岩溶隧道病害特征及成因如表 1 所示。

由表 1 可知，在役岩溶隧道病害特征主要如下：

（1）从岩溶病害地层特征来看，地层岩性以灰岩等可溶岩为主，病害发生的区域大多存在溶蚀裂隙带、岩溶管腔及大型充填型溶洞，并且岩溶形态与地表水力联系较为密切，受地表降雨影响显著。

（2）从岩溶病害原因来看，病害的发生与地表降雨关系甚密，大量的岩溶病害案例均表明，强降雨条件下大量地表水下渗，超过隧道的排水能力，衬砌背后形成“地表补给+洞内排水”的动水压力，是导致结构破坏的重要原因。另外，岩溶隧道长期运营后排水系统被堵塞，造成排水不畅甚至排水系统失效，也是产生岩溶病害的重要原因。

（3）从隧道病害发生的位置及类型来看，岩溶病害大多发生于隧道边墙及仰拱部位，并以衬砌开裂及仰拱隆起居多，病害严重的会发生隧道底板及道床板隆起开裂，这与隧道仰拱区域极易汇聚大量岩溶水有关。

表 1 典型在役岩溶隧道病害特征及成因

Table 1 Disease characteristics and causes of typical karst tunnels in service

序号	线路	隧道名	病害特征	病害成因
1	贵广线	高天隧道	道床上拱、道床板与仰拱填充脱离，中心水沟冒水	暴雨沿岩溶裂隙带流向地下水系统，隧道排水系统不能及时排走岩溶水。
2	贵广线	尖山营隧道	衬砌边墙严重渗漏水	短时强降雨导致大量的地表水通过溶蚀裂隙带及岩溶裂隙流向隧道，进而引发病害。
3	包茂高速	秀山隧道	路面隆起、施工缝开裂渗漏、边墙涌水，排水系统局部堵塞	地层溶蚀性槽谷和落水洞较多，持续强降雨后，大量雨水沿落水洞及岩溶管腔作用于隧道衬砌引发病害。
4	武吉高速	南石壁隧道	洞内涌水突泥，路面拱起、开裂，二衬开裂、渗漏，排水系统局部堵塞	岩溶地层以灰岩为主，地层中发育有充填型溶洞，连续暴雨导致地下水位上涨，引发病害。
5	宜万线	马鹿箐隧道	拱顶掉块、边墙开裂	岩溶管腔发育，岩溶水长期侵蚀，短时强降雨后引发衬砌病害。
6	宜万线	大支坪隧道	拱腰及边墙部位严重渗漏水	围岩中发育有充填型溶洞，地表降雨导致衬砌背后积聚岩溶水引发病害。
7	广邻高速	华蓥山隧道	隧道沉砂池涌水突泥	岩溶管道发育显著，岩溶水及岩溶充填物汇入沉砂池中，超过了沉砂池的承载量。
8	黔桂线	邓山隧道	隧道水沟底涌水、涌砂，水沟盖板被淤泥顶起，涌水进入道床	隧道围岩内岩溶裂隙发育，极端暴雨使岩溶裂隙发育扩大形成溶蚀裂隙带，岩溶水携带泥沙涌入隧道侧沟。

3.2 隧道-岩溶系统概化模型

岩溶地貌复杂多变，为便于分析在役岩溶隧道病害问题，需要将隧道-岩溶系统抽象概化为典型的力学模型。基于岩溶发育特点、在役岩溶隧道病害特征及郑万线典型岩溶发育特征，考虑岩溶水长期溶蚀及地表降雨补给的影响，构建以下 3 种隧道-岩溶系统概化模型。

（1）均质渗流模型。当隧道穿越规模较大的充填型溶洞时，强降雨条件下溶洞内将会重新汇聚大量的岩溶水，岩溶水透过均质充填层作用在隧道衬砌上，此种地层概化为均质渗流模型（见图 2(a)）。

（2）局部溶管模型。对于隧道周边施工期间未探明的岩溶管腔，在岩溶水长期溶蚀下，可能会发育形成上通地表、下连隧道的岩溶管腔。强降雨时地表水沿岩溶管腔作用于隧道衬砌上，此种地层概化为局部溶管模型（见图 2(b)）。

(3) 裂隙导通模型。岩溶地层中可能存在由各种构造裂隙经溶蚀作用形成的溶蚀裂隙。在运营期岩溶水的进一步溶蚀作用下,溶蚀裂隙发育、扩展,形成广泛而连通的溶蚀裂隙带。强降雨时地表水沿溶蚀裂隙带作用于隧道衬砌上,此种地层概化为裂隙导通模型(见图 2(c))。

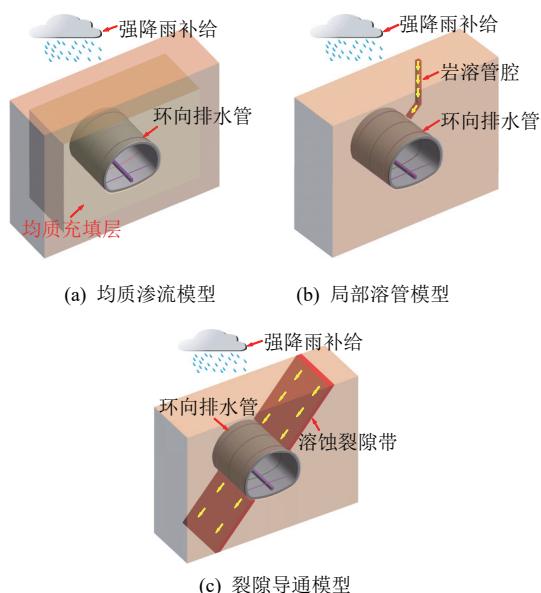


图 2 隧道-岩溶系统概化模型

Fig.2 Generalized model of tunnel-karst system

4 岩溶隧道衬砌水压分布试验研究

4.1 模型试验平台构建

为了研究岩溶隧道均质渗流地层条件下衬砌水压分布规律,搭建了岩溶隧道水压衬砌平台,主要由高压加载系统和渗流试验系统组成^[21],如图 3 所示。升降水箱与模型箱通过进水管连接,模型箱用钢板、槽钢和工字钢焊接加工而成,箱体尺寸长×宽×高=1.00 m×2.25 m×2.25 m,在箱体前侧预留一个孔洞,用于隧道衬砌结构的安放,预留孔洞的下

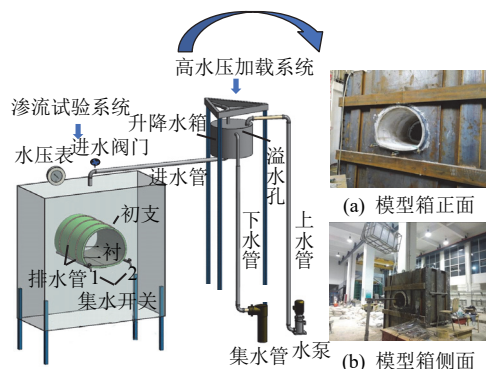


图 3 岩溶隧道衬砌水压测试平台

Fig.3 Water pressure test platform for karst tunnel lining

侧设置 3 个排水阀门,用于实现渗流过程中衬砌周围水体的排出。升降水箱上水管和下水管能使水箱内液面保持不变,从而实现恒定水头高度,可提供最大水头高度为 15 m。为保证试验结果的准确性,在模型箱接缝与预留孔处涂匀玻璃胶,在顶部盖板和箱体之间加设橡胶圈,从而达到模型箱整体的密封性。

4.2 相似模型的确定

综合考虑试验周期及可实施性,确定模型几何相似常数 $C_L=20$,重度相似常数 $C_r=2$,根据相似定理推出其余力学参数的相似关系,如表 2 所示。

表 2 各物理力学参数的相似关系

Table 2 Similarity relations of physical and mechanical parameters

物理量	相似关系	相似比
长度 L	$C_L=20$	20
重度 r	$C_r=2$	2
弹性模量 E	$C_E=C_L C_r$	40
泊松比 μ	$C_\mu=1$	1
内摩擦角 ϕ	$C_\phi=1$	1
黏聚力 c	$C_c=C_L C_r$	40
应力 σ	$C_\sigma=C_L C_r$	40
应变 ϵ	$C_\epsilon=1$	1
渗透系数 k	$C_k=1$	1

4.3 相似材料的选择

4.3.1 围岩相似材料

郑万线岩溶地区围岩节理裂隙发育,渗透性强,渗透系数约为 $2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-4}$ m/s,黏聚力为 0.05~0.20 MPa,内摩擦角为 $20^\circ \sim 27^\circ$ 。试验主要研究地表强降雨情况下衬砌背后的水压力,重点以渗透系数相似来配置围岩相似材料。经比选,采用石英砂:细砂=1:3 来模拟围岩,所得材料渗透系数为 2×10^{-6} m/s,内摩擦角为 35.1° ,黏聚力为 2.4 kPa。

4.3.2 二衬相似材料

实际工程中二衬采用 C35 钢筋混凝土,弹性模量为 31.5 GPa,厚度为 50 cm。根据弹性模量及强度相似选取二衬相似材料。经比选,选取石膏:水=1.4:1 模拟二衬,所得石膏强度为 0.51 MPa,弹性模量为 790 MPa,厚度为 2.5 cm,按照比例浇筑二衬模型,如图 4 所示。为保障二衬的防水性,在二衬内侧及外侧涂抹防水清漆。

4.3.3 防排水系统模拟

实际工程中隧道采用半包半排的防排水方式,试验中采用透水纱布包裹直径为 5 mm 的弹簧模拟隧道环向及纵向排水盲管。采用厚度为 0.2 mm 的不透水玻璃布模拟防水板。



图 4 隧道二衬模型
Fig.4 Tunnel lining model

4.4 模型试验设计

郑万线各岩溶隧道埋深差异较大,从几米至上千米不等。为了模拟地表强降雨对隧道衬砌的影响,在室内采用升降水箱加水的方式近似模拟,试验中施加的水头高度为 30~160 cm,近似模拟实际隧道工程中拱顶上方水头高度为 6~32 m 的工况。

试验中采用均质的围岩材料,近似模拟前述概化的均值渗流模型。为分析最不利情况,将监测断面选取在两环排水盲管中间的位置,并在隧道二衬外侧拱顶、拱腰、边墙中部、边墙脚、仰拱拱腰、仰拱中心处安装水压力计,监测隧道衬砌的水压分布规律,测点布置如图 5 所示。

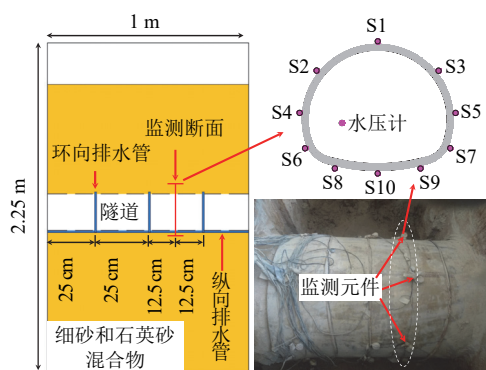


图 5 测点布置示意图
Fig.5 Schematic diagram of measuring point arrangement

试验具体流程为:

(1) 将细砂和石英砂按比例混合好分层装入模型箱内,每层砂的填入厚度不超过 10 cm 并仔细夯实。当填砂高度达到 1 m 时,放入预制好的二衬模型,并继续逐层装填围岩材料直至模型箱顶部(隧道拱顶上方土体厚约 60 cm)。隧道纵向排水盲管固定在边墙脚两侧并与模型箱前侧预留的 1#和 2#排水阀门接通。

(2) 通过升降水箱往模型箱内注水模拟强降雨。初次注水高度为隧道拱顶以上 30 cm,并开始采集数据,保持模型箱内水头高度不变,将其放置 15 h,使其完全渗透围岩,测得隧道不排水时衬砌水压力分布规律。

(3) 待上述渗流过程完成后,打开隧道边墙脚两侧的排水管 1#和 2#模拟隧道正常排水(见图 6),同时不断往模型箱顶部注水,保持隧道上部水头高度不变,监测隧道正常排水时衬砌背后的水压分布。

(4) 逐步增加水头高度,重复上述测试过程。分别测试拱顶上部初始水头高度为 30、40、50、60、100、160 cm 的工况。试验工况如表 3 所示。

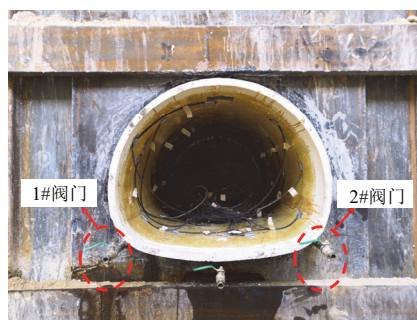


图 6 隧道排水控制
Fig.6 Tunnel drainage control

表 3 模型试验工况

Table 3 Model test conditions

工况	隧道拱顶上部初始水头高度		测试项目	
	模型/cm	实际工程/m		
工况-1	30	6	初始 渗流场	衬砌 动水压力
工况-2	40	8		
工况-3	50	10		
工况-4	60	12		
工况-5	100	20		
工况-6	160	32		

4.5 模型试验结果分析

分别提取不同水头高度时隧道各测点的水压力值,并将其绘制成水压力包络图。为便于分析,将所有试验数据均按相似关系换算为实际工程中对应的结果。隧道拱顶上部水头高度分别为 6、8、10、12、20、32 m 时,衬砌背后的水压分布包络图如图 7 所示。

由图 7 可知,在隧道不排水时,各测点水压力近似等于静水压力。随着拱顶初始水头高度的增加,衬砌水压力在结构左右侧呈对称增长趋势,隧道各部位受水压影响范围逐渐增大。当隧道在常规排水达到稳态渗流时,隧道衬砌背后水压力在边墙脚位置有明显降低,呈“蘑菇”状分布。由于隧道采取半包式排水,拱顶与边墙脚处布设环向与纵向排水盲管,导致该部位水压折减率较大。在工况-1 时,拱顶 S1 处水压力由 60 kPa 降低至 48 kPa(折减率为 20%),左边墙脚 S6 和右边墙脚 S7 处水压力由 164 kPa 分别降低至 18 kPa 和 20 kPa,水压折减率约为 88%。在仰拱处未布设排水盲管,导致该部位水压折减率较

小。仰拱中心 S10 处水压力由 184 kPa 降低至 166 kPa (折减率约为 9.8%)。由此可见,隧道排水管的布置方式对水压力的分布影响十分显著。

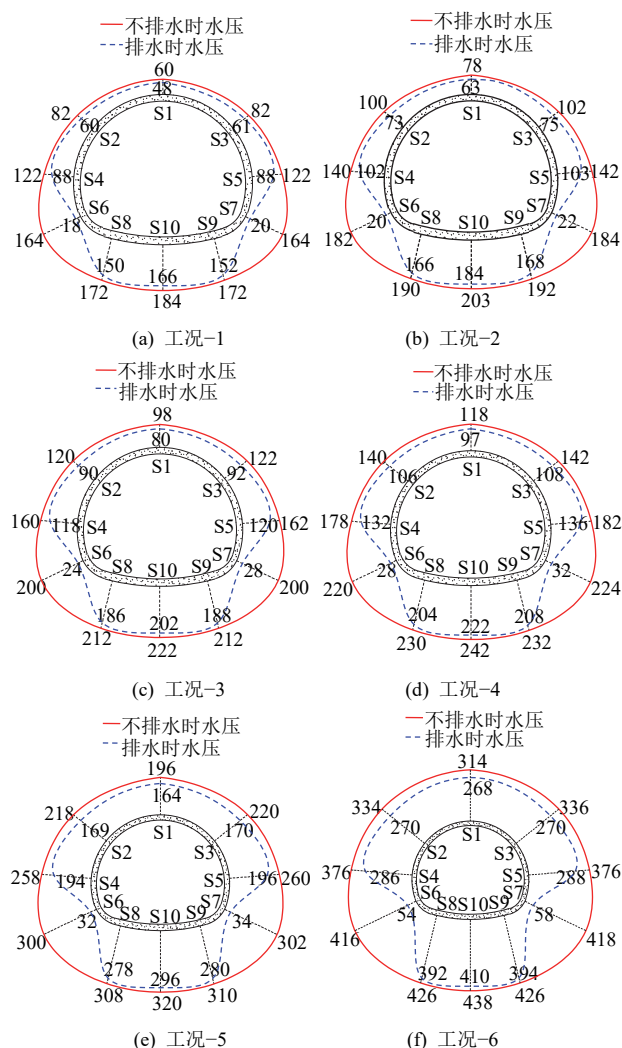


图7 各工况衬砌水压力分布 (单位: kPa)

Fig.7 Distribution of lining water pressure under different working conditions (unit: kPa)

随着水头高度的增加,隧道衬砌水压力分布形式大致相似,但水压折减率在逐渐减小。工况-1至工况-6拱顶 S1 处水压折减率由 20.0%降低至 14.7%,左边墙脚 S6 和右边墙脚 S7 处水压折减率由 88%降低至 86.5%,仰拱 S10 处的水压力折减率由 9.8%降低至 6.4%。由此说明,当隧道地表降雨补给超过隧道排水能力时,衬砌背后将形成“地表补给+洞内排水”的动态平衡状态,并且仰拱区域将汇聚较大的水压力,对结构安全产生威胁。

5 不同岩溶形态下衬砌水压分布数值模拟研究

基于前述提出的隧道-岩溶系统概化模型,分别

研究不同岩溶形态下衬砌背后的水压力分布规律及衬砌结构位移。

5.1 计算模型建立

建立三维渗流模型,模型尺寸为长×宽×高=115 m×14 m×112 m。隧道埋深为 50 m,围岩均为 V 级,均质渗流模型如图 8(a)所示。局部溶管模型在隧道围岩中增加一个直径为 1 m 的岩溶管腔(见图 8(b))。裂隙导通模型在隧道上方增加一条宽度为 1 m 并贯穿地层的溶蚀裂隙带(见图 8(c))。隧道支护结构(见图 8(d))、防水板、无纺布、排水管、中心排水沟(见图 8(e))、局部溶管和溶蚀裂隙带均采用实体单元。围岩采用 Mohr-Coulomb 本构,衬砌、排水管、防水板及无纺布等采用弹性本构。模型四周及底部施加位移约束,荷载只考虑自重的作用。

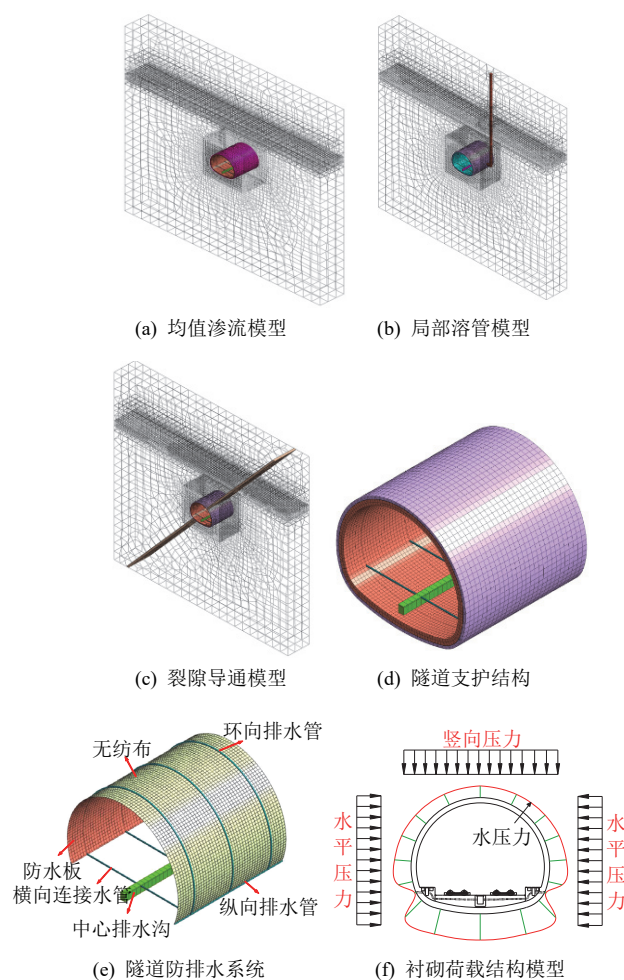


图8 数值模拟模型

Fig.8 Numerical simulation model

模型渗流边界条件为:①模型顶面为自由水面,初始水位不随着隧道排水而降低,地表水头无限补给模拟地表强降雨。②模型四周为稳定边界,各点水头为等水头。③模型底面为不透水边界,法向流速及流量均为 0。④隧道进口和出口处中心排水沟

为浸出面，压力水头设定为 0。

为进一步分析隧道衬砌背后水压力对衬砌结构的影响，建立荷载-结构模型（见图 8(f)），将提取的水压力作为外荷载施加至隧道衬砌上，分析衬砌结构的受力及变形情况，进一步分析结构的安全性。

5.2 模型参数选取

初期支护采用喷射 C25 混凝土，厚为 28 cm；二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土，拱墙厚为 50 cm，仰拱厚为 60 cm。防水板和无纺布厚度均为 3 mm，排水管直径为 10 cm，中心排水沟的长和宽分别为 84.4、60.0 cm。三维渗流计算时仅提取衬砌背后的水压力。因此，各材料的渗透系数对计算结果影响较大，通过赋予各材料不同的渗透系数，实现水在材料中的渗流，各材料的渗透系数结合文献[22-23]选取，如表 4 所示。其中，排水管、中心排水沟、局部溶管和溶蚀裂隙带可近似看作具有连通孔洞的管状或带状裂隙状材料，其渗透系数参考《水利水电工程地质勘察规范》（GB50487—2008）^[24]选取，取值为 4×10^{-2} m/s。

表 4 各材料计算参数

Table 4 Calculation parameters of each material

材料	弹模 E/GPa	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松 比 ν	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
围岩	1.800	21.50	0.30	0.45	55	2×10^{-6}
初支	23.000	22.00	0.20	—	—	2×10^{-8}
二衬	32.500	25.00	0.20	—	—	2×10^{-10}
环向排水管	0.650	9.32	0.20	—	—	4×10^{-2}
中心排水沟	21.000	22.00	0.20	—	—	4×10^{-2}
防水板	0.065	9.80	0.25	—	—	4×10^{-11}
无纺布	0.065	6.00	0.25	—	—	8×10^{-6}
局部溶管	0.050	20.00	0.30	—	—	4×10^{-2}
溶蚀裂隙带	1.500	18.50	0.35	0.12	45	4×10^{-2}

5.3 模型计算流程及工况

（1）假定降雨补给层位于地表，计算隧道排水情况下衬砌背后的水压力，并将水压力提取出来作为外荷载施加至荷载-结构模型，对衬砌结构进行安全验算，根据《铁路隧道设计规范》（TB10003—2016）^[25]（简称为规范）选取安全系数 2.4 作为结构安全的临界值，将安全系数 1.0 作为失稳破坏的临界值。

（2）如果安全性不满足上述要求，降低降雨补给层的高度，再次进行上述计算过程，并对衬砌结构进行安全验算。

（3）重复上述过程，直至找出衬砌结构分别达到 2 个临界值时对应的地层水头高度。此时对应的衬砌背后水压力和仰拱位移值即为结构处于安全状

态和失稳破坏的临界值。

计算工况分别考虑岩溶形态及岩溶位置对隧道的的影响，如表 5 所示，表中的总水头高度为上述试算后得到的临界水头高度。

表 5 计算工况

Table 5 Calculation conditions

工况	模型类型	溶管直径或溶蚀裂 隙带宽度/m	岩溶与隧道 位置关系	总水头高度/m
1	均质渗流	—	—	20.0, 33.0
2	局部溶管	1	拱顶	22.0, 37.0
3			拱腰	21.0, 37.0
4			边墙	20.0, 33.0
5	裂隙导通	1	拱顶	21.5, 37.0
6			拱腰	21.0, 37.0
7			边墙	19.0, 31.0

5.4 隧道衬砌水压力分布规律

5.4.1 均质渗流地层隧道衬砌水压力分布

分别在隧道拱顶、拱腰、边墙、边墙脚及仰拱中心沿隧道纵向设置水压力观测线，将两环排水管中间的截面作为典型断面，提取隧道衬砌背后环向及纵向的水压力。隧道拱顶上部总水头高度分别为 20、33 m 时，衬砌背后的水压分布规律及安全系数如图 9、10 所示。

由图 9、10 可知，在考虑隧道排水情况下，隧道拱墙部位水压力沿纵向变化极其明显，在存在环向排水管的截面（2、7、12 m）水压力趋近于 0，而在两环排水管中间的位置（4.5、9.5 m）水压力达到峰值。隧道上部铺设有无纺布和排水管，衬砌上的水压力则随之降低。边墙脚处由于存在纵向排水盲管，隧道纵向范围内水压力均较小，而仰拱中心由于没有排水系统，始终保持较高的水压力。

对隧道典型截面水压进行分析，当隧道上部水头高度分别为 20、33 m 时，拱顶 S1 水压分别为 127、211 kPa，相比静水压力均折减了 35%。仰拱中心 S10 水压力分别为 277、374 kPa，相比静水压力约折减了 14%。在水压力作用下，仰拱中心分别隆起 9.6、17.6 mm。二衬安全系数以隧道中线为基准，左右两侧呈对称分布，并且隧道两侧拱腰处安全系数最大，为抗压控制。安全系数最小截面位于仰拱中心，为抗拉控制。当隧道衬砌上部水头高度为 20 m 时，仰拱中心处安全系数为 2.4，达到规范规定的钢筋混凝土抗拉安全系数临界值。当隧道拱顶上部水头高度为 33 m 时，仰拱中心及边墙脚处衬砌安全系数达到 1.0，衬砌结构处于失稳破坏的临界状态。仰拱部位安全系数普遍较小，这对仰拱结构的运营安全极为不利。

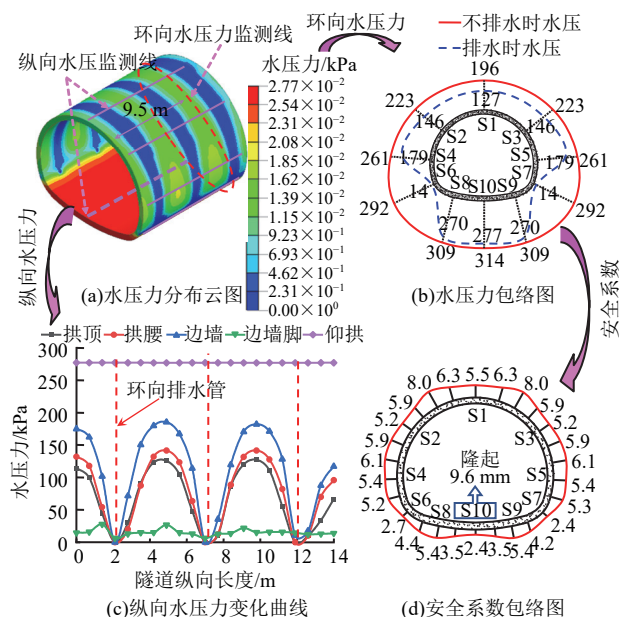


图9 20 m水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况1)
(单位: kPa)

Fig.9 Distribution of lining water pressure and safety factor at 20 m water head of working condition 1 (unit: kPa)

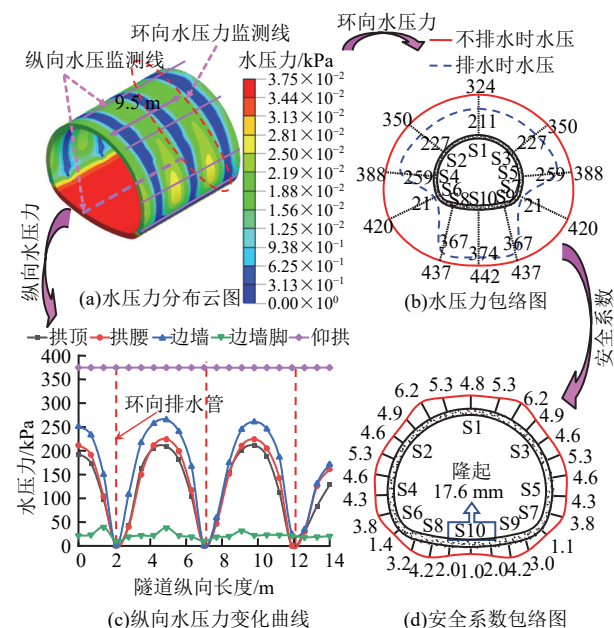


图10 33 m水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况1)
(单位: kPa)

Fig.10 Distribution of lining water pressure and safety factor at 33 m water head of working condition 1 (unit: kPa)

进一步选取模型试验中的工况5和数值模拟中20 m水头的工况进行对比,分析数值模拟和模型试验结果的差异性,20 m水头时数值模拟和模型试验结果对比如图11所示。

由图11可知,当隧道衬砌上部水头高度为20 m时,模型试验和数值模拟所得衬砌水压力分布规律基本吻合,均呈“蘑菇”状。但模型试验中由于试验条件的限制,忽略了初期支护和无纺织的影响。因

此,从衬砌水压力大小来看,数值模拟所得水压力比模型试验结果偏小。数值模拟所得拱顶S1和仰拱中心S10水压力分别为127 kPa(折减率为35%)和277 kPa(折减率为14%)。模型试验所得拱顶S1和仰拱中心S10水压力分别为164 kPa(折减率为16%)和296 kPa(折减率为7.5%)。

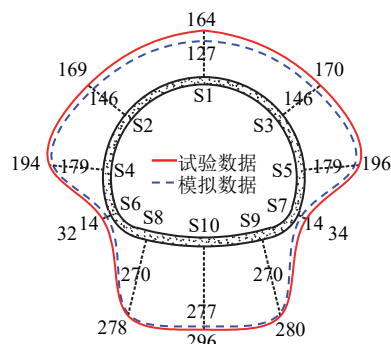


图11 20 m水头时数值模拟和模型试验结果对比(单位: kPa)
Fig.11 Comparison of numerical simulation and model test results at 20 m water head (unit: kPa)

数值模拟和试验结果均表明,隧道采用半包半排防排水方式时,仰拱极易积聚较大的水压力。因此,隧道运营过程中,在岩溶水压作用下,仰拱极有可能最先破坏,仰拱又与上部轨道板联系紧密,其对行车安全影响较大,运营时应重点关注仰拱结构的变形及安全。

5.4.2 局部溶管地层隧道衬砌水压力分布

5.4.2.1 溶管位于隧道拱顶

隧道拱顶上部总水头高度分别为22、37 m时,隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数如图12、13所示。

由图12、13可知,当隧道拱顶上方存在溶管时,边墙脚部位水压力较小,仰拱区域水压力较大,且有排水管的地方水压力趋近于0。由于隧道拱顶上方存在溶管,围岩中的岩溶水更易从拱顶流向隧道衬砌。因此,在隧道拱顶处形成局部高压。

隧道正常排水后,当隧道水头高度分别为22、37 m时,拱顶S1的水压力相比静水压力分别折减了20.0%、17.9%,水压力折减率相比不存在溶管时大幅降低,这与拱顶溶管处有大量水压补给有关。仰拱S10相比静水压力分别折减了15.3%和15.8%。仰拱中心安全系数分别为2.4和1.0,隆起位移分别为9.6、18.6 mm。

5.4.2.2 溶管位于隧道拱腰

隧道拱顶上部总水头高度分别为21、37 m时,隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数,如图14、15所示。

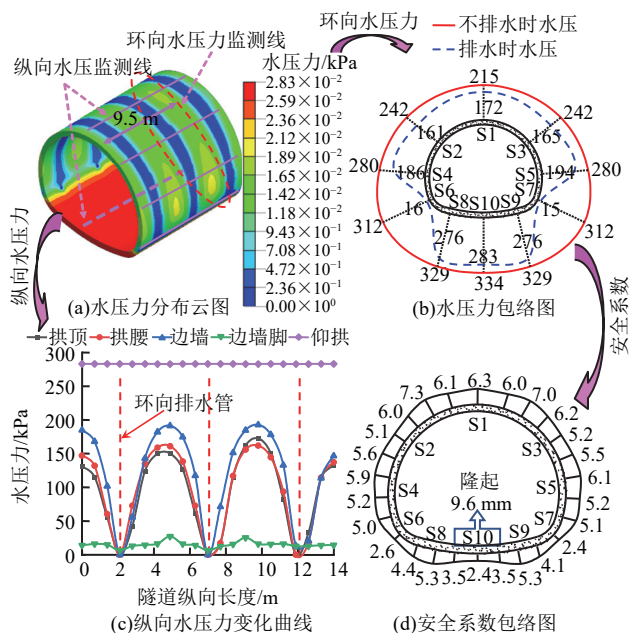


图 12 22 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数 (工况 2)
(单位: kPa)

Fig.12 Distribution of lining water pressure and safety factor at 22 m water head of working condition 2 (unit: kPa)

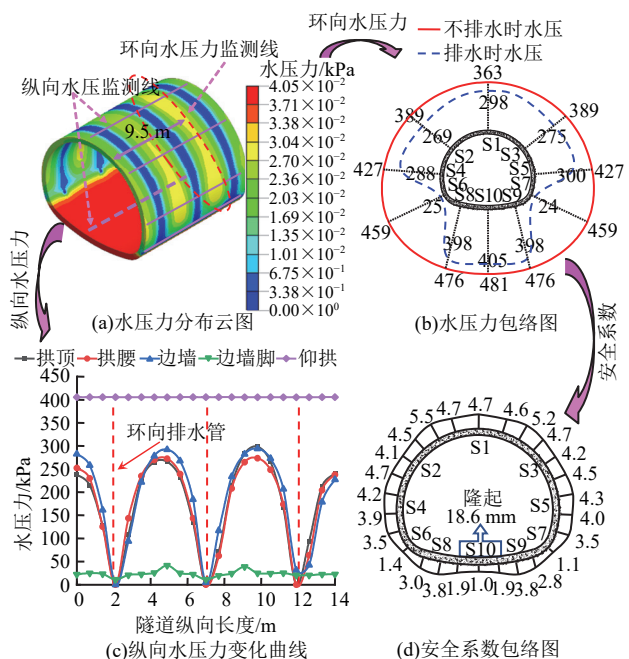


图 13 37 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数 (工况 2)
(单位: kPa)

Fig.13 Distribution of lining water pressure and safety factor at 37 m water head of working condition 2 (unit: kPa)

由图 14、15 可知,当隧道右侧拱腰存在溶管时,衬砌水压分布出现偏压现象,右侧拱腰水压大于左侧拱腰,在隧道仰拱处水压力变化不大,均承受较高的水压力。隧道正常排水后,当隧道水头高度分别为 21、37 m 时,左右两侧拱腰最大水压力差分别为 33、49 kPa。拱顶 S1 水压力分别折减了 34.0%和

29.5%,仰拱 S10 水压力分别折减了 14.2%和 14.8%,仰拱中心安全系数为 2.4 和 1.0,隆起位移值分别 9.3、19.6 mm。

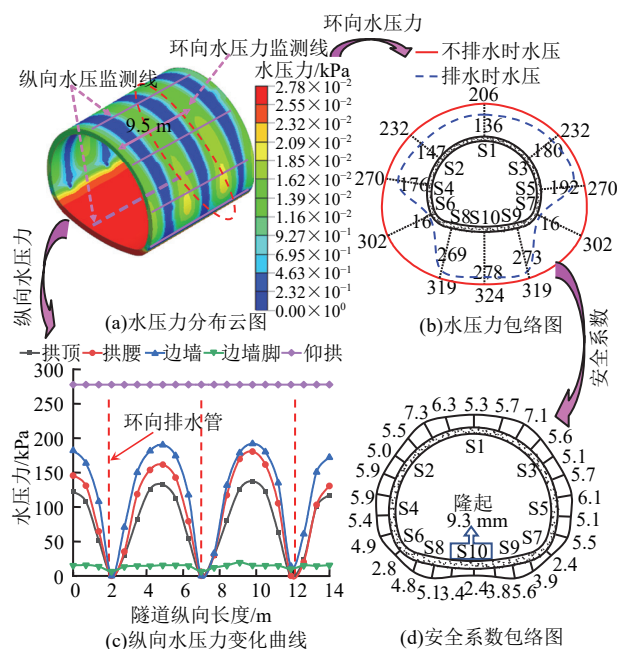


图 14 21 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数 (工况 3)
(单位: kPa)

Fig.14 Distribution of lining water pressure and safety factor at 21 m water head of working condition 3 (unit: kPa)

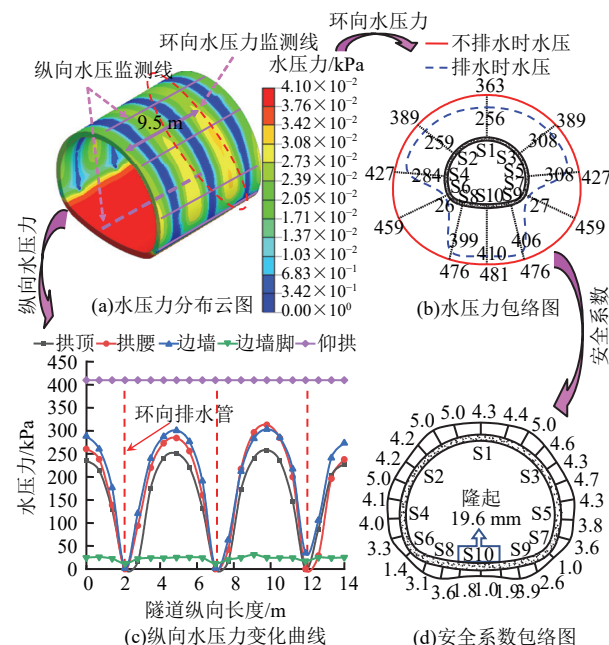


图 15 37 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数 (工况 3)
(单位: kPa)

Fig.15 Distribution of lining water pressure and safety factor at 37 m water head of working condition 3 (unit: kPa)

5.4.2.3 溶管位于隧道边墙

隧道拱顶上部总水头高度分别为 20、33 m 时,

隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数,如图16、17所示。

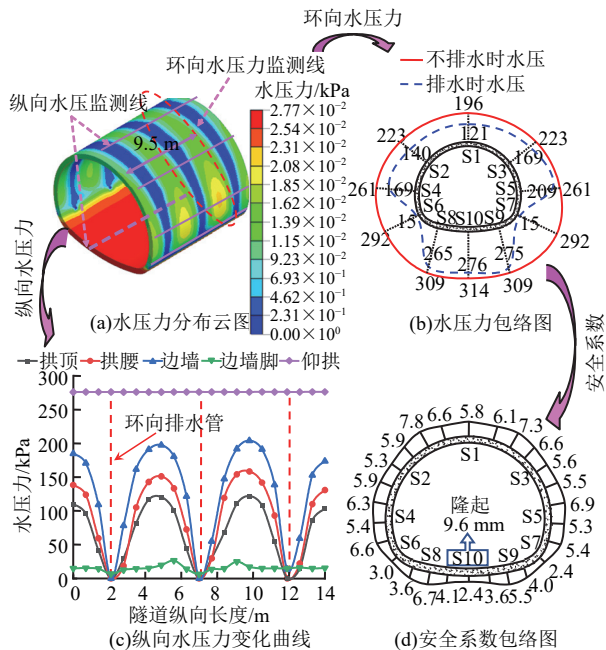


图16 20 m水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况4)
(单位: kPa)

Fig.16 Distribution of lining water pressure and safety factor at 20 m water head of working condition 4 (unit: kPa)

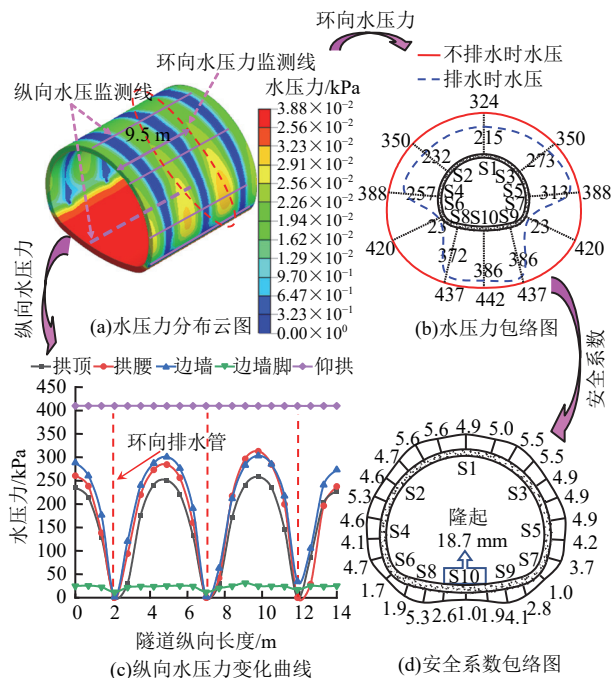


图17 33 m水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况4)
(单位: kPa)

Fig.17 Distribution of lining water pressure and safety factor at 33 m water head of working condition 4 (unit: kPa)

由图16、17可知,当隧道右侧边墙存在溶管时,衬砌水压分布偏压现象更为明显。当水头高度为33 m

时,左右两侧边墙最大水压力差为60 kPa。当隧道水头高度分别为20、33 m时,拱顶S1水压力分别折减了38.3%、33.6%,仰拱S10水压力约折减12%,隆起位移分别为9.6、18.7 mm,仰拱中心仍然为最不利位置。

5.4.3 裂隙导通地层隧道衬砌水压分布

5.4.3.1 溶蚀裂隙带位于隧道拱顶

当隧道拱顶上部总水头高度分别为21.5、37.0 m时,隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数如图18、19所示。

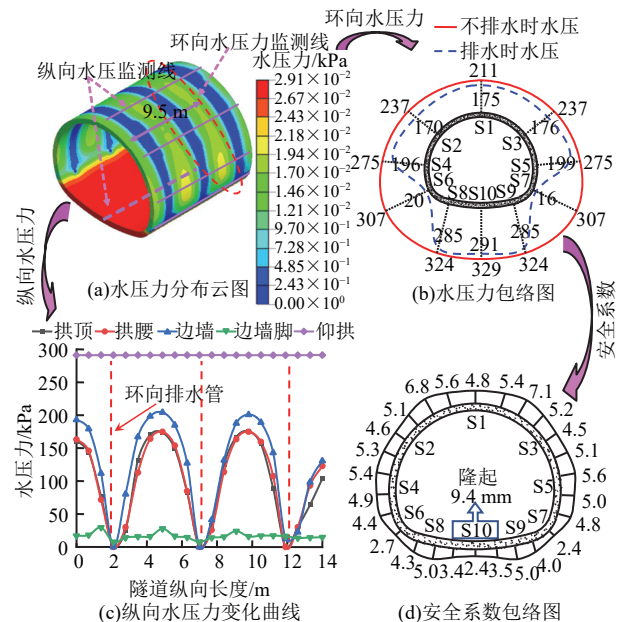


图18 21.5 m水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况5)
(单位: kPa)

Fig.18 Distribution of lining water pressure and safety factor at 21.5 m water head of working condition 5 (unit: kPa)

由图18、19可知,当隧道拱顶上方有溶蚀裂隙带相交时,衬砌背后水压分布规律与没有溶蚀裂隙带时类似,均表现出拱墙部位水压力较小,仰拱区域水压力较大的规律。隧道正常排水后,当隧道水头高度分别为21.5、37.0 m时,拱顶S1水压力分别折减了17.1%和14.6%,仰拱S10水压力约折减了12%,仰拱区域水压力相比不存在溶蚀裂隙带时折减率降幅较小,而拱顶处水压力折减率大幅降低,这与溶蚀裂隙带处有大量水压补给有关。达到临界状态时仰拱中心隆起位移值分别为9.4、19.0 mm。

5.4.3.2 溶蚀裂隙带位于隧道拱腰

当隧道拱顶上部总水头高度分别为21、37 m时,隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数,如图20、21所示。

由图20、21可知,当隧道拱腰有溶蚀裂隙带相交时,衬砌背后水压明显存在偏压现象,右侧拱腰

水压力大于左侧拱腰。当隧道水头高度分别为 21、37 m 时,拱顶 S1 水压力分别折减了 27.2% 和 23.4%,仰拱 S10 水压力约折减了 11%, 达到临界状态时仰拱分别隆起 9.2、19.6 mm。

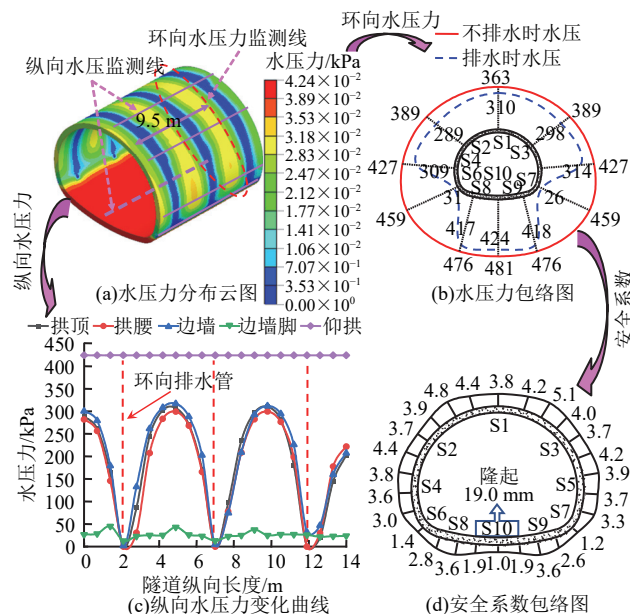


图 19 37 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况 5) (单位: kPa)

Fig.19 Distribution of lining water pressure and safety factor at water head of 37 m of working condition 5 (unit: kPa)

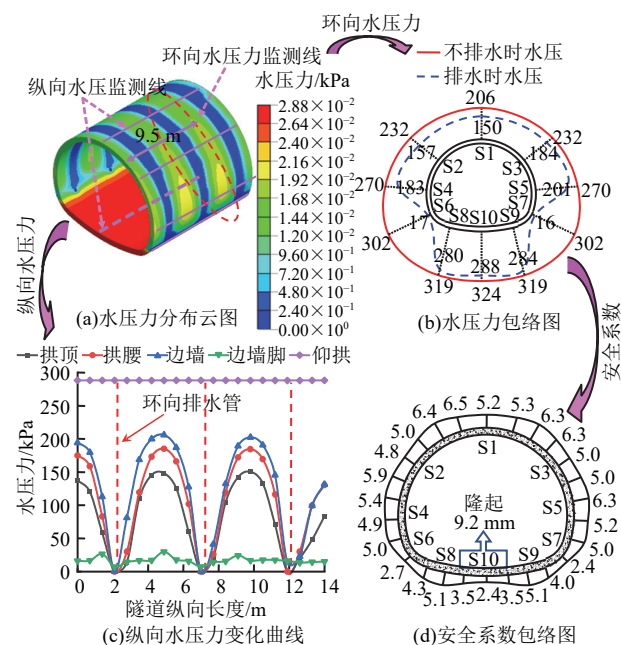


图 20 21 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况 6) (单位: kPa)

Fig.20 Distribution of lining water pressure and safety factor at 21m water head of working condition 6 (unit: kPa)

5.4.3.3 溶蚀裂隙带位于隧道边墙

当隧道拱顶上部总水头高度分别为 19、31 m 时,隧道衬砌背后的水压分布规律及安全系数,如图

22、23 所示。

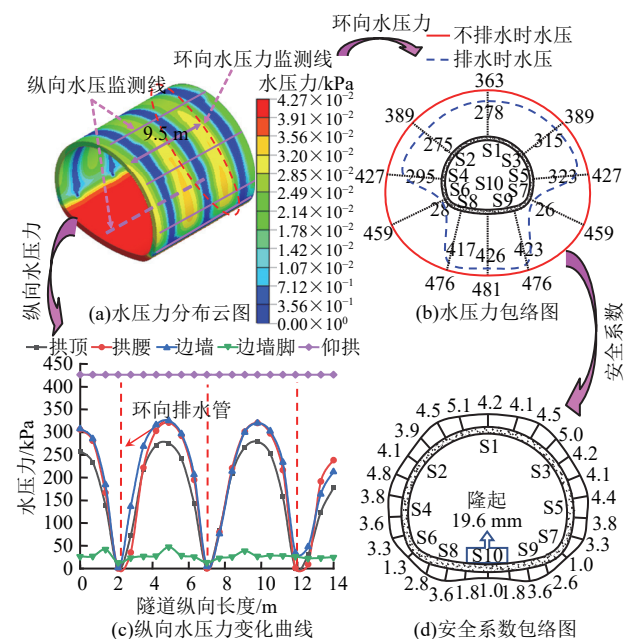


图 21 37 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况 6) (单位: kPa)

Fig.21 Distribution of lining water pressure and safety factor at 37 m water head of working condition 6 (unit: kPa)

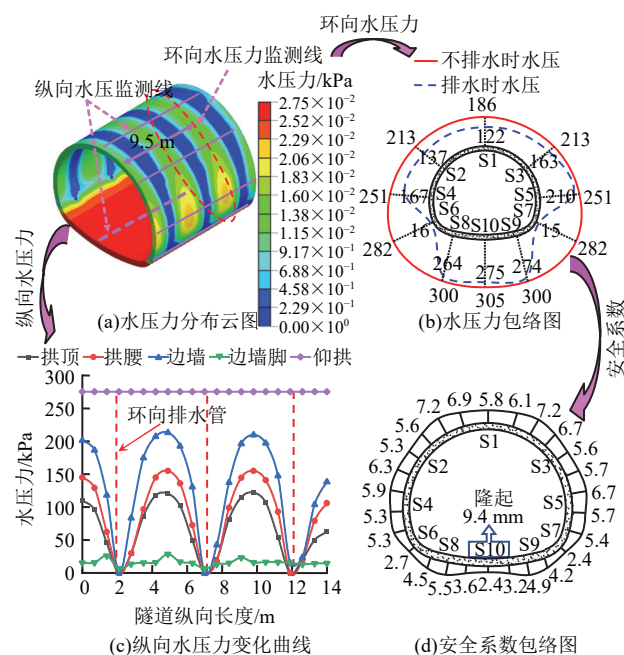


图 22 19 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数(工况 7) (单位: kPa)

Fig.22 Distribution of lining water pressure and safety factor at 19 m water head of working condition (unit: kPa)

由图 22、23 可知,当隧道边墙有溶蚀裂隙带相交时,衬砌背后水压偏压更为明显,当拱顶水头高度为 31 m 时,左右侧边墙最大水压力差为 62 kPa,对衬砌结构受力极为不利,当隧道上部水头持续增大时,衬砌左右两侧的水压差也会更大,则边墙部位

存在被高压水击穿的可能。隧道衬砌达到安全临界状态时, 仰拱分别隆起 9.4、17.9 mm。

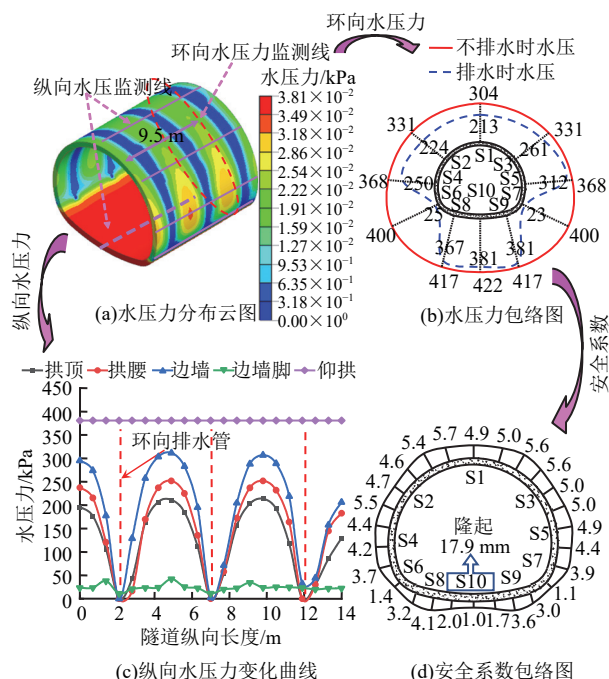


图 23 31 m 水头时衬砌水压分布规律及安全系数 (工况 7)
(单位: kPa)

Fig.23 Distribution of lining water pressure and safety factor at 31 m water head of working condition (unit: kPa)

表 6 隧道衬砌水压力及仰拱位移临界值

Table 6 Tunnel lining water pressure and critical displacement value of the inverted arch

岩溶形态	岩溶与隧道位置关系	溶管直径或溶蚀裂隙带宽度/m	拱顶总水头高度/m	仰拱中心安全系数	仰拱中心水压力/kPa	仰拱竖向位移/mm
均质渗流	—	—	20.0	2.4	277	9.6
			33.0	1.0	374	17.6
局部溶管	拱顶	1	22.0	2.4	283	9.6
			37.0	1.0	405	18.6
	拱腰	1	21.0	2.4	278	9.3
			37.0	1.0	410	19.6
	边墙	1	20.0	2.4	276	9.6
			33.0	1.0	386	18.7
溶蚀裂隙带	拱顶	1	21.5	2.4	291	9.4
			37.0	1.0	424	19.0
	拱腰	1	21.0	2.4	288	9.2
			37.0	1.0	426	19.6
	边墙	1	19.0	2.4	275	9.4
			31.0	1.0	381	17.9

6.2 衬砌水压力和仰拱位移控制阈值及预警等级划分

以隧道仰拱中心水压力和隆起位移作为控制基准, 分别制定不同的预警等级。

(1) 正常运营: 仰拱中心处水压力值 $P \leq 275$ kPa 或仰拱隆起量 $S \leq 9$ mm。其中 275 kPa 和 9 mm 为衬砌安全系数达到 2.4 时对应的临界水压力和仰拱

6 岩溶隧道运营监测预警控制标准

强降雨条件下岩溶隧道衬砌周围极易积聚较大水压力, 进而导致衬砌开裂、渗漏水、仰拱隆起等病害。因此, 对岩溶隧道开展长期运营监测并提前预警是保障隧道运营安全的重要手段。基于前述研究, 提出一套在役岩溶隧道水压监测预警控制标准。

6.1 不同岩溶形态下隧道水压力及仰拱位移

由前述分析可知, 强降雨影响下仰拱中心是隧道衬砌结构的最危险截面。因此, 以衬砌达到临界安全状态时仰拱中心的水压力和位移值作为控制基准, 制定运营岩溶隧道的预警控制标准。不同岩溶地层情况下衬砌水压力及位移临界值如表 6 所示。

由表 6 可知, 当隧道衬砌达到临界状态时, 不同岩溶形态下的衬砌水压力和仰拱竖向位移值基本相似。当以衬砌抗拉安全系数 2.4 为界定标准时, 仰拱中心水压力范围为 275~291 kPa, 竖向位移为 9.2~9.6 mm。当以衬砌抗拉安全系数 1.0 为界定标准时, 仰拱中心水压力为 374~426 kPa, 竖向位移为 17.6~19.6 mm。为了保证隧道的运营安全, 应选取各指标的最低值作为控制值, 即当隧道仰拱中心水压力达到 275、374 kPa, 或仰拱隆起达到 9、17 mm 时, 需要采取措施。

位移值。此时, 衬砌的安全系数均大于 2.4, 衬砌结构处于安全状态。此时, 安全等级设定为 I 级。

(2) 临时补修: $275 \text{ kPa} < P \leq 325 \text{ kPa}$ 或 $9 \text{ mm} < S \leq 13 \text{ mm}$ 时, 其中 325 kPa 和 13 mm 为衬砌安全系数分别为 2.4 和 1.0 对应的临界水压力和位移值的中间值。此时, 隧道衬砌安全系数小于 2.4, 隧道仰拱已经发生一定的变形, 为了仰拱结构的安全性及

耐久性,需要对变形区段进行临时补修处理。此时,安全等级设定为II级。

(3) 限速整治: $325 \text{ kPa} < P \leq 374 \text{ kPa}$ 或 $13 \text{ mm} < S \leq 17 \text{ mm}$ 时。其中, 374 kPa 和 17 mm 为衬砌安全系数达到 1.0 时对应的临界水压力和仰拱位移值。此时,衬砌结构安全系数接近于 1.0,衬砌结构存在开裂的风险,并影响线路的平顺性。因此,为了保证列车的行车安全,需要降速通行,并及时查找隧道仰拱隆起的原因,进行相应的整治。此时,安全等级设定为III级。

(4) 封闭整治: 仰拱中心水压力 $P > 374 \text{ kPa}$ 或隆起量 $S > 17 \text{ mm}$ 时,隧道衬砌结构已经濒临失稳破坏,需要及时的进行结构安全治理。此时,安全等级设定为IV级。岩溶隧道运营监测预警等级划分如表 7 所示。

表 7 岩溶隧道运营监测预警等级划分

Table 7 Classification of operation monitoring and early warning level of karst tunnel

序号	判别指标	安全等级	预警状态
1	$P \leq 275 \text{ kPa}$ 或 $S \leq 9 \text{ mm}$	I	正常运营
2	$275 \text{ kPa} < P \leq 325 \text{ kPa}$ 或 $9 \text{ mm} < S \leq 13 \text{ mm}$	II	临时补修
3	$325 \text{ kPa} < P \leq 374 \text{ kPa}$ 或 $13 \text{ mm} < S \leq 17 \text{ mm}$	III	限速整治
4	$P > 374 \text{ kPa}$ 或 $S > 17 \text{ mm}$	IV	封闭整治

岩溶隧道运营监测过程中,由于仰拱位移对结构安全影响最为直接。因此,监测时建议以表 7 中位移作为主要判别指标,衬砌水压力作为辅助判定指标,确保岩溶隧道的运营安全。

7 结 论

(1) 当隧道地表降雨补给超过隧道排水能力时,衬砌背后将形成“地表补给+洞内排水”的动水压力。在半包半排防排水方式下,隧道衬砌背后水压力分布模式呈拱墙小、仰拱大的“蘑菇”状。仰拱区域极易积聚高水压力并引发隧道水压病害。

(2) 当隧道地层中存在岩溶管腔或溶蚀裂隙带时,地表降雨将沿溶管或溶蚀裂隙带作用至隧道衬砌,使衬砌结构承受偏压荷载。溶管或溶蚀裂隙带与隧道接触位置越靠近仰拱,仰拱中心水压力及隆起位移越大,仰拱发生破坏的风险就越高。运营时应进行重点关注仰拱结构的变形及安全。

(3) 以隧道仰拱中心水压力和隆起位移作为控制基准,制定运营岩溶隧道预警控制标准。将岩溶隧道运营监测预警等级划分为 4 级,即I级-正常运营、II级-临时补修、III级-限速整治和IV级-封闭整治。

参 考 文 献

- [1] TIAN Q Y, ZHANG J T, ZHANG Y L. Similar simulation experiment of expressway tunnel in karst area[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 176: 1-13.
- [2] 李林毅, 阳军生, 高超, 等. 考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场解析研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 133-141.
LI Lin-yi, YANG Jun-sheng, GAO Chao, et al. Analytical study on seepage field of tunnels with external drainage considering effect of grouting rings[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(1): 133-141.
- [3] FANG Y, GUO J N, 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.
- [4] 樊浩博, 周定坤, 刘勇, 等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1884-1898.
FAN Hao-bo, ZHOU Ding-kun, LIU Yong, et al. Mechanical response characteristics of lining structure of pipeline karst tunnels in water-rich areas[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(7): 1884-1898.
- [5] 高新强, 仇文革, 孔超. 高水压隧道修建过程中渗流场变化规律试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 50-58.
GAO Xin-qiang, QIU Wen-ge, KONG Chao. Test study on the variation law of seepage field during the construction process of high water pressure tunnel[J]. **China Railway Science**, 2013, 34(1): 50-58.
- [6] LI Z, HE C, CHEN Z Q, et al. Study of seepage field distribution and its influence on urban tunnels in water-rich regions[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2019, 78(6): 4035-4045.
- [7] 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.
XU Qiang, SONG Yu-xiang, FAN Hao-bo, et al. Model test study on water pressure distribution characteristics of lining structure in water-rich karst tunnel[J]. **China Railway Science**, 2022, 43(4): 74-83.
- [8] 张治国, 叶铜, 朱正国, 等. 波浪作用下含气海床内盾构隧道水力及位移响应分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1557-1574.
ZHANG Zhi-guo, YE Tong, ZHU Zheng-guo, et al. Hydraulic and displacement response analysis of shield tunnel in gassy seabed under wave action[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(6): 1557-1574.
- [9] LI P F, LIU H C, ZHAO Y, et al. A bottom-to-up drainage and

- water pressure reduction system for railway tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 81: 296-305.
- [10] ZHAO D P, FAN H B, JIA L L, et al. Research on waterproofing and drainage optimization scheme for karst tunnel lining in water-rich areas[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2021, 80(4): 1-18.
- [11] 王秀英, 谭忠盛, 李健, 等. 隧道工程全包与半包结构防水体系受力特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 654-659.
- WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, LI Jian, et al. Laboratory tests on mechanical characteristics of fully and partially wrapped waterproof systems for tunnel lining[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 654-659.
- [12] ZHOU Z L, TAN Z S, LIU Q, et al. Experimental investigation on mechanical characteristics of waterproof system for near-sea tunnel: a case study of the gongbei tunnel[J]. **Symmetry**, 2020, 12(9): 1-14.
- [13] 蒋雅君, 李彬, 杨其新, 等. 隧道排水系统工作能力对衬砌水压力的影响探讨[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 179-185.
- JANG Ya-jun, LI Bin, YANG Qi-xin, et al. Discussion on influence of working capacity of drainage system on water pressure acting on tunnel lining[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2020, 42(12): 179-185.
- [14] 孙星亮, 郭旭柯, 司南. 强降雨条件下管道型隐伏溶洞对隧道衬砌结构影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(11): 1831-1841.
- SUN Xing-liang, GUO Xu-ke, SI Nan. Study on the influence of pipe-type hidden caverns on tunnel lining structure under strong rainfall conditions[J]. **Tunnel Construction**, 2023, 43(11): 1831-1841.
- [15] 何川, 李铮, 杨赛舟, 等. 施工及运营期矿山法隧道渗流模型试验系统的研制及应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 114-121, 131.
- HE Chuan, LI Zheng, YANG Sai-zhou, et al. Development and application on mined tunnel seepage model test system for construction and operation period[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2017, 30(5): 114-121, 131.
- [16] FAN H B, ZHU Z G, SONG Y X, et al. Water pressure evolution and structural failure characteristics of tunnel lining under hydrodynamic pressure[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2021, 130: 1-17.
- [17] 欧雪峰, 欧阳淋旭, 张学民, 等. 高压富水岩溶隧道底鼓变形演化机制及防控对策研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 323-334.
- OU Xue-feng, OUYANG Lin-xu, ZHANG Xue-min, et al. Study on the bottom heave deformation mechanism and prevention countermeasures for high-pressure water-rich karst tunnel[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2023, 36(11): 323-334.
- [18] FANG X H, YANG J S, XIANG M L, et al. Model test and numerical simulation on the invert heave behaviour of high-speed railway tunnels with rainstorm[J]. **Transportation Geotechnics**, 2022, 37: 1-16.
- [19] 申志军. 基于长期监测的高水压岩溶隧道二次衬砌水压特征研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 110-116.
- SHEN Zhi-jun. Study on characteristics of water pressure on the second lining for high water level karst tunnel based on long term monitoring[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2015, 37(11): 110-116.
- [20] 郑波, 吴剑, 郭瑞. 季节性岩溶隧道结构安全预警体系构建及对策[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊 2): 67-72.
- ZHENG Bo, WU Jian, GUO Rui. Building-up of a safety early-warning system for seasonal karst tunnel structure and its prevention counter measures[J]. **Modern Tunnel Technology**, 2019, 56(Suppl.2): 67-72.
- [21] 刘博, 徐飞, 赵维刚, 等. 隧道工程结构模型试验系统研究综述与展望[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 452-468.
- LIU Bo, XU Fei, ZHAO Wei-gang, et al. Review and prospect of model test system for tunnel engineering structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 452-468.
- [22] MA D, MIAO X X, BAI H B, et al. Effect of mining on shear sidewall groundwater inrush hazard caused by seepage instability of the penetrated karst collapse pillar[J]. **Natural Hazards**, 2016, 82: 73-93.
- [23] HU J, WEN H J, XIE Q L, et al. Effects of seepage and weak interlayer on the failure modes of surrounding rock: model tests and numerical analysis[J]. **Royal Society Open Science**, 2019, 6: 190790.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50487—2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2008.
- [25] 中华人民共和国国家铁路局. TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10003—2016 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2017.