

降雨条件下纵向排水管堵塞状态隧道衬砌力学性能试验研究*

罗丁未¹, 杨健², 汪波¹, 钱王莘³, 熊文威¹

(1. 西南交通大学 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 浙江景文高速公路有限公司, 浙江杭州 310024; 3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116.)

摘要: 为了探明降雨条件与纵向排水管堵塞对岩溶隧道衬砌结构安全的影响, 以浙江临建高速公路虎溪台隧道作为依托工程, 采用室内物理模型试验方法对岩溶隧道在不同水头高度、纵向排水管不同堵塞程度时隧道衬砌力学性能进行研究, 并进行不同降雨季节现场监测分析。研究结果表明: (1) 溶腔水位下降速度随水头升高基本呈线性增长, 但水头超过50cm后, 增长速度减缓, 隧道排水能力不能完全满足要求; (2) 隧道排水量随水头升高而不断增大, 其增长速度逐渐增加, 且在达80cm水头后速度明显增大; (3) 衬砌背后水压力与衬砌结构压应力均随水头升高而不断增大, 且增长速度在超过50cm水头后显著增加, 其增长率分别达到77.2%和39%; (4) 排水管堵塞程度越大, 衬砌背后水压力和衬砌结构压应力随水头高度的变化越敏感; 相比纵向排水管低堵塞条件, 完全堵塞时其水压和应力增长速率分别提高了27.6%和60.9%。该研究成果可为强降雨条件下岩溶隧道衬砌结构安全评估提供理论依据。

关键词: 岩溶隧道; 纵向排水管堵塞; 衬砌结构; 降雨条件; 力学性能

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(XXXX)XX-0001-10

Experimental investigation on the mechanical properties of tunnel lining with the blocked longitudinal drainage pipe under rainfall conditions

LUO Dingwei¹, YANG Jian², WANG Bo¹, QIAN Wangping³, XIONG Wenwei¹

(1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031; 2. Zhejiang Jingwen Expressway Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310024; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou, 221116)

Abstract: To investigate the impact of rainfall conditions and longitudinal drain blockage on the lining structure safety of karst tunnels, the Hu-Xi-Tai Tunnel of Zhejiang Lin-Jian Expressway was used as a supporting engineering, the mechanical properties of the tunnel lining structure under different water head heights and longitudinal drain blockage degrees were investigated adopted by indoor physical model experimental methods, and the field monitoring analysis was carried out in different rainfall seasons. The results illustrate that: (1) The decline rate of the water level in the karst cavity increases al-

* 收稿日期: 2024-08-15; 修回日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208395, U2468217), 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021051), 甘肃省科技重点研发计划(22YF11GA307)

作者简介: 罗丁未(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事隧道工程方面研究。E-mail: dingweiluo2001@163.com

通信作者: 汪波(1976-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事隧道与地下工程方面研究。E-mail: ahbowang@163.com

most linearly with the increase of water head height. However, when the water head exceeds 50cm, the increase rate slows down, indicating that the drainage capacity of the tunnel is insufficient. (2) The drainage volume continuously increases with the increase of water head height, and the increase rate gradually accelerates, particularly after reaching a water head of 80cm. (3) The water pressure behind the lining and the pressure stress of the lining structure both continuously increase with the increase of the water head height. Moreover, the growth rate significantly accelerates after surpassing a water head height of 50cm, with increases of 77.2% and 39% respectively. (4) The greater the degree of drainage pipe blockage, the more sensitive the change of water pressure behind lining and pressure stress of lining structure with the water head height. Compared to low blockage conditions of longitudinal pipe, the water pressure and pressure stress growth rates increase by 27.6% and 60.9% respectively when the longitudinal pipe is completely blocked. These research results can provide a theoretical basis for the safety assessment of lining structures of karst tunnels under heavy rainfall conditions.

Keywords: Karst tunnel; Longitudinal drain blockage; Lining structure; Rainfall conditions; Mechanical properties

0 引言

随着我国隧道建设的快速建设与陆续运营,大量隧道因碳酸盐结晶和围岩碎屑沉积而发生排水系统堵塞病害^[1-2],尤其是岩溶富水区隧道。隧道排水能力因堵塞而降低,在季节性强降雨条件,隧道所受水压力将显著增加,会导致衬砌结构发生破裂、掉块等病害,甚至严重时致使衬砌结构被击穿,直接影响隧道运营安全^[3-4]。

衬砌结构所受水压力的增大是隧道发生破坏的重要原因之一,大量研究发现^[5-8],隧道衬砌内力及其所受水压力主要受到其所处地区降雨条件的影响。Zheng Li等研究了强降雨引起的隧道场地区渗流场和应力场动态演化对隧道结构安全性的影响^[9]。尚海松等通过数值模拟研究了不同影响因素下水压变化引起的结构力学响应,并针对既有季节性岩溶隧道,在降雨条件下存在的隧道衬砌背后和仰拱水压过大问题提出了解决方法^[10]。此外,排水系统的堵塞也是致使衬砌所受水压力增大的重要原因^[11-13]。Arjoi等通过数值模拟探讨了排水条件对排水隧道孔隙水压力分布和衬砌应力的影响并得出结论,全排水条件可以有效地减少衬砌的最大应力^[14]。Qing Xu等通过模型试验,将排水口以阀门控制分为完全堵塞、中度堵塞和排水通畅,设计了不同的地下水高度,对隧道衬砌力学特性进行了研究,并提供数值模拟进行了验证,结果表明,隧道衬砌受到的水压随排水口的堵塞增加而增加,且隧

道拱脚处最显著^[15]。Sulei Zhang等提供数值仿真模拟了隧道排水系统劣化过程,分析了衬砌的破坏机理^[16]。李林毅等基于3D打印技术构建了高铁隧道结构及排水系统设施精细模型,探讨了在不同堵管条件、不同地层水头下隧道渗流场及结构位移量的变化规律特征^[17]。徐强等通过模型试验,在考虑岩溶均质地层条件下不同水头高度带来影响的基础上,分不排水、常规排水和优化排水3种方案,揭示了富水岩溶隧道分别沿纵向和断面的衬砌水压力分布特征^[18]。因此,岩溶隧道的受力状态与降雨情况和排水系统堵塞两者之间存在密切地关联性。

综合以上研究成果可知,既有研究都单方面强调了不同降雨条件或排水系统堵塞情况对隧道衬砌内力的影响。总体上,关于岩溶隧道纵向排水管堵塞和强降雨的综合作用的相关研究比较欠缺。而且,纵向排水管堵塞比环向盲管堵塞引起的水压增加更明显^[19]。但目前,关于纵向排水管不同堵塞程度与不同降雨条件共同作用下对隧道衬砌结构影响的研究相对较少。

为了探明岩溶隧道在不同降雨条件与纵向排水管堵塞状态时隧道衬砌力学性能演化规律,本文依托浙江临建高速公路虎溪台隧道作为背景工程,采用模型试验方法,对岩溶隧道在不同水头高度、纵向排水管不同堵塞程度时的隧道衬砌力学响应特征进行研究。研究成果以期强降雨与排水系统堵塞共同作用时岩溶隧道衬砌结构安全评估提供理论依据。

1 工程背景

虎溪台隧道为双向分离式隧道,位处浙江西南部喀斯特地貌岩溶山群内。隧址区围岩多以强风化灰岩为主,隧道富水、围岩岩体破碎且隧址区内岩溶极为发育,里程段多处揭示半充填型岩溶溶腔以及溶蚀裂隙,施工技术难,安全风险大。洞身K65+100~K65+500段灰岩岩溶发育,地表发育多处较大落水洞,区段岩溶管道连通性好,岩溶水较为发育,水量较大,且由于隧道设计线路横穿岩溶补给区的水平径流带,故其岩溶管道与垂向空洞极为发育。隧道建设期多处揭示溶洞及岩溶通道,其中K65+324~K65+327处存在两个溶腔,如图1所示。



(a) K65+327 溶腔 (b) K65+324 溶腔

图1 隧道岩溶溶腔

Fig.1 Karst cavity

由于虎溪台隧道岩溶极为发育,初支喷混结束后一段时间即会显现部分岩溶结晶,并随时间推移至地下水停止渗漏后,结晶将由粉末状松散结构变化为类似钟乳石的坚硬状态,如图2所示。因此,隧道排水系统在施工期间就发生不同程度堵塞,如图3所示。同时,在强降雨季节,其地下水供给充足,排水管在施工建设期结晶堵塞后,雨季大量降水无法及时排出,严重影响了施工进度和施工安全。

隧道岩溶段排水系统设计由隧道底部预制中央排水沟、衬砌背后环向盲管、纵向盲管和横向排水管构成,如图4所示。其中,环向盲管采用 $\Phi 50\text{mm}$ 软式透水管;纵向盲管采用 $\Phi 100\text{mm}$ 打孔管;横向排水管采用 $\Phi 100\text{mm}$ HDPE管;纵向盲管和横向排水管之间采用三通接头连接;横向排水管弯折处采用异性弯头连接;环向盲管局部水量丰富区段可加密,单个隧道总体按:Ⅲ级10m一道、Ⅳ级5m一道、Ⅴ级3m一道按实计算数量,环向盲管插入纵向盲管深度约30mm左右。排水坡度不小于2%。



图2 初支孔隙处结晶

Fig.2 Crystallization at pore of initial support



图3 排水管结晶

Fig.3 Crystallization at drainage pipe

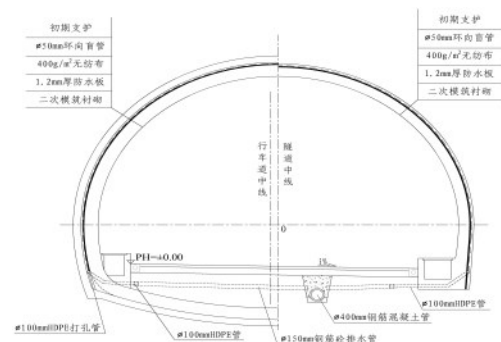


图4 隧道排水系统设计图

Fig.4 Design of tunnel drainage system

2 室内模型试验

2.1 模型设计概况及相似比确定

该室内模型试验装置可模拟岩溶隧道,控制纵向排水管堵塞状态以及水头高度,并监测隧道衬砌结构的力学响应^[1]。室内模型试验系统由渗流箱、注水箱、隧道衬砌结构、隧道排水系统、岩溶通道和监测装置组成,各部分介绍如下。

渗流箱尺寸为长 \times 宽 \times 高:3m \times 2m \times 3m,注水箱由升降式水箱架、固定水箱、循环式水箱三部分组成,如图5所示。固定水箱采用潜水泵与循环式水箱相连,其作用是为循环式水箱与渗流箱输送水。循环式水箱的作用是通过升降式水箱架高度设置,可以实现不同渗流箱中水头高度的模拟。当

循环式水箱中水头超过设定值时,部分水体会通过溢水孔流入下方固定水箱,从而保证试验的水头保持一个相对稳定的状态。

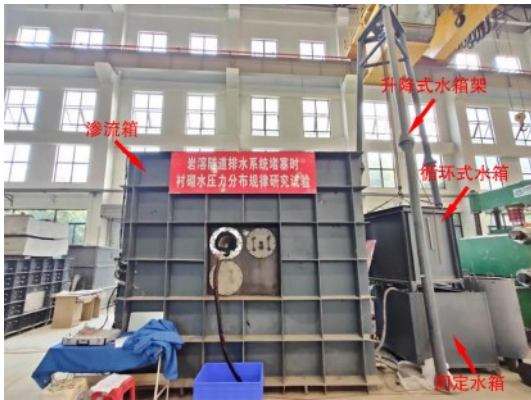


图5 模型试验装置图
Fig.5 Model test device

隧道排水系统包括环向盲管和纵向盲管,其中纵向盲管设计为可分离式套筒结构,其结构由外套筒、内置堵塞套筒与横截面挡片三部分组成,可模拟纵向排水管不同的横截面堵塞和纵向堵塞情况,如图6所示。模拟不同堵塞工况时,将内置堵塞套筒从外套筒中抽出,并把横截面挡片插入相应堵塞长度的两端环向卡槽内,在两挡片间的内置堵塞套筒上填充土体后,再将内置堵塞套筒推回外套筒内,即可实现纵向盲管不同堵塞状态的工况模拟。



图6 纵向盲管设计图
Fig.6 Design of longitudinal drainage pipe

本试验以探究不同水头高度纵向排水管堵塞条件下衬砌结构受力特性为主,故将控制材料的主要力学参数及围岩渗透系数作为综合指标以配制室内相似模型材料^[20]。试验模型基础相似比确定为几何相似比 $C_L=50$ 、重度相似比 $C_\gamma=1$ 、渗透系数

相似比 $C_K=1$,并以此确定其他相关参数相似比,如表1所示。

表1 模型试验相似关系表

Table 1 Similarity relation of experimental model

特性类别	物理量	符号	相似系数	相似常数
几何特性	长度	l	C_l	50
	重度	γ	C_γ	1
力学特性	应力	σ	$C_\sigma = C_r C_l$	50
	应变	ϵ	$C_\epsilon = 1$	1
	弹性模量	E	$C_E = C_r C_l$	50
渗流特性	泊松比	μ	$C_\mu = 1$	1
	渗透系数	K	C_K	1
	水压力	P	$C_P = C_r C_l$	50
	水头高度	H	$C_H = C_l$	50
	时间	t	$C_t = C_l / C_K$	50

2.2 材料与试验工况设计

根据先行室内试验结果^[1],本次相似试验的围岩土体采用黏土粒径 ≤ 0.075 mm,细砂 ≤ 0.3 mm并按照黏土:细砂=1:1.2的质量比进行混合制成。根据试验测定,围岩相似材料力学主要参数见表2。

表2 围岩相似材料主要力学参数表

Table 2 Main mechanical parameters of surrounding rock similar materials

力学参数	原型材料测定值	相似材料测定值
渗透系数(m/s)	3×10^{-6}	3.13×10^{-6}
粘聚力(kPa)	2200	48.1

地下工程模型试验常用的石膏或者砂浆等材料难以制成小模型且防水性差。而环氧树脂具有许多良好的物理性能^[21],由此,本试验综合考量后选择环氧树脂为隧道衬砌相似材料。

如图7,在对不同组材料进行单轴压缩试验后,选择隧道模型的二次衬砌材料配比为:粒径比(小粒径:大粒径)=1:4,胶砂比(环氧树脂胶体质量:砂石质量)=1:0,环固比(环氧树脂质量:固化剂质量)=2:1。

为防止室内模型试验过程中排水系统受到土体挤压而导致排水效果不佳,排水系统均采用不锈钢管材质制作。此外,岩溶通道选用PVC管,且侧壁进行密集钻孔并用滤网布多次包裹处理后,固定于隧道模型的左拱腰与右拱肩位置。其制作与安装过程如图8所示。



(a) 浇筑试件 (b) 单轴抗压加载
图7 单轴抗压试验图

Fig.7 Uniaxial compression test

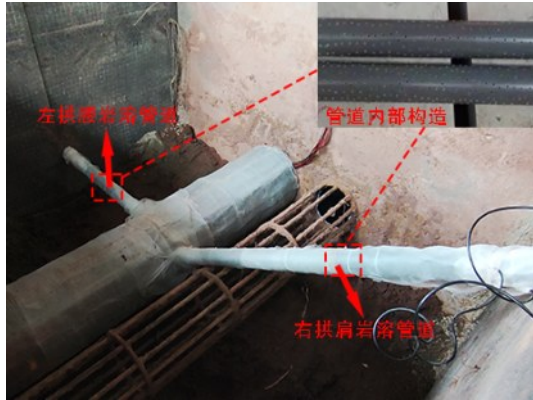


图8 岩溶管道的安装与制作

Fig.8 Installation and manufacture of karst pipeline

为了探究不同水头高度以及纵向排水管不同堵塞程度下隧道衬砌的力学响应变化,将堵塞条件按横截面堵塞率和纵向堵塞率分别设置为低堵塞(20%)、中等堵塞(60%)和完全堵塞(100%),以110 cm水头高度,真实模拟55 m的局部高压,并设定了5种不同的水头高度。具体试验工况如表3所示。

表3 试验工况设计表

Table 3 Test conditions

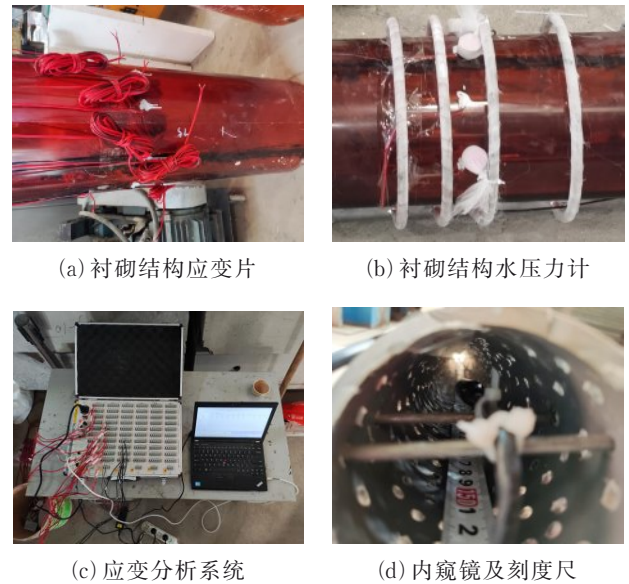
工况名称	工况设计
模型地下水高度(cm)	0、20、50、80、110
实际地下水高度(m)	0、10、25、40、55
横截面堵塞率(%)	20、60、100
纵向堵塞率(%)	20、60、100

2.3 测量设备及流程

本次试验主要监测数据为排水量、右拱肩溶腔内水位下降速度、二衬结构的应力值以及衬砌背后水压力值。其中溶腔内布置一刻度尺及内窥镜,用以时刻监测溶腔内水位变化情况;水压力使用LY-350 应变式微型渗压计测量;衬砌受力由

120-5AA型应变片监测,并使用TST3826E静态应变分析系统监测;排水量使用蓄水箱收集排水,并定时测量排水量的方法测得,具体监测过程如图9所示。

试验期间应变片与水压力计均布置在溶腔断面的拱顶、拱肩、拱腰、拱脚与拱底处。其中应变片固定于二次衬砌结构模型内外表面对称位置,且应变片表面做密封防水处理;水压力计固定于环向盲管与二次衬砌间。



(a) 衬砌结构应变片 (b) 衬砌结构水压力计
(c) 应变分析系统 (d) 内窥镜及刻度尺
图9 监测设施及过程
Fig.9 Monitoring facilities and processes

根据试验设计,本试验流程如下:

- (1)安装隧道模型试验装置、隧道排水系统及岩溶通道,布设应变片与水压力计。
- (2)调试应变仪。将应变片与水压力计连接应变仪,应变仪设置补偿并接地。
- (3)按照试验工况设置堵塞工况。
- (4)消除初始应力影响。
- (5)稳定渗流箱水头。
- (6)数据监测。测量衬砌应力、水压力、排水量及溶腔水位变化情况。每组工况重复三次后,依次执行下一组工况试验。

3 试验结果与分析

3.1 溶腔水位下降速度

以溶腔水位下降方向为正方向,图10描述了在

纵向排水管的不同横截面堵塞率和纵向堵塞率下,右拱肩溶腔水位下降速度随水头高度变化的关系(注:Z—纵向堵塞率;H—横截面堵塞率)。可见,水头高度对于溶腔内水位下降速度有着较大影响,当隧道堵塞程度较小时,其变化大致可以划分为两个阶段:(1)在水头高度低于50 cm时,随着水头高度的增长,水位下降速度快速增大,二者呈线性变化。此阶段隧道排水能力仍满足排水需求,溶腔内的水可以及时排出。(2)当水头高度超过50cm后,溶腔水位下降速度仍继续增大,但其增长速度减缓。此时隧道排水能力不能完全满足需要,随着水头高度的增加,溶腔内水量将逐渐积攒;当隧道堵塞程度过大后(Z60%—H100%,Z100%—H100%),

溶腔水位下降速度会发生显著降低,当排水管完全堵塞时,其水位下降速度趋近于0,但仍有小幅度变化,可能是溶腔与围岩中的水发生了交换。

可见,当水头高度过高时,即使隧道仅处于低堵塞条件,其溶腔内水量仍会逐渐积聚,长期以此可能会导致衬砌结构失效。而随着隧道排水系统堵塞程度的增加,这种水压的积攒将更加严重,特别是堵塞程度过大时,溶腔水位下降速度将显著降低,水压快速增长,很可能诱发隧道病害。因此,在强降雨地区若岩溶隧道发生堵塞时,快速增长的水头高度将进一步扩大隧道排水管堵塞的影响,溶腔内水位长期居高不下,严重影响隧道运营的安全。

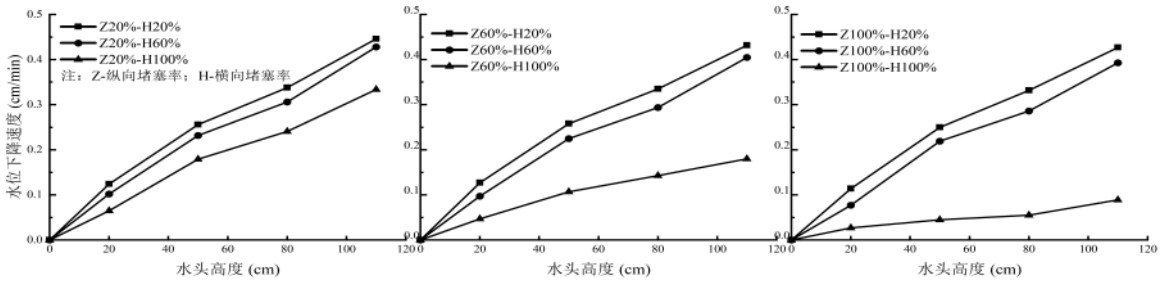


图10 右拱肩溶腔水位随堵塞程度变化关系曲线图

Fig.10 Relationship curve of water level of right spandrel cavity with degree of blockage

3.2 纵向排水管排水

图11为纵向排水管的不同横截面堵塞率和纵向堵塞率下,隧道排水量随水头高度变化曲线图。根据曲线变化情况,水头高度对于隧道排水量有着较大的影响。当排水管堵塞程度较小时,排水量变化情况存在两个阶段:(1)在水头高度逐渐增长至80 cm的过程中,隧道排水量随水头高度的升高而不断增大,且其增长速度逐渐增加,但在水头高度

小于80cm前,增幅不明显,二者基本呈线性关系。此外,在堵塞程度最小时(Z20%—H20%),排水量增长值最大,达到48.13 m³/d。(2)水头超过80 cm后,由于溶腔水位下降排水速度过高,排水量增长速度提升明显,排水量快速增加。在堵塞程度最小时(Z20%—H20%),排水量达到最大,为74.43 m³/d;然而,当排水管发生纵向大规模横截面堵塞(Z60%—H100%,Z100%—H100%)后,隧道排水能力大幅下降,排水量显著降低,水头高度对排水量的作用效

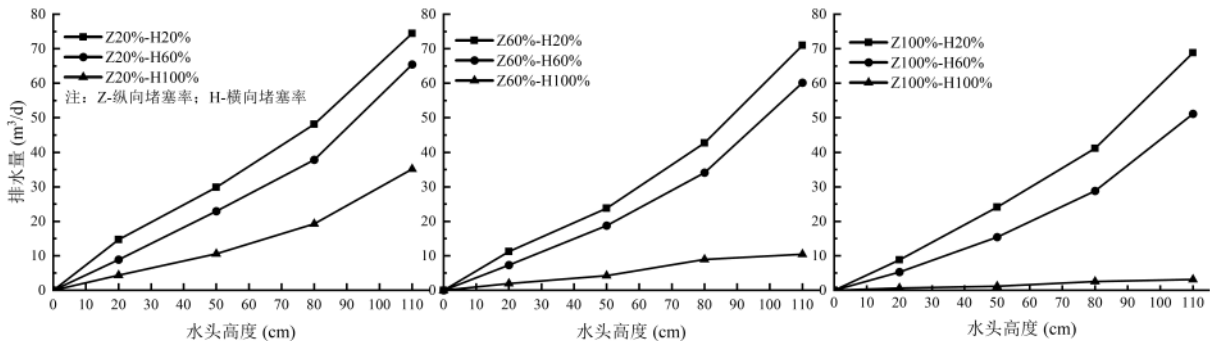


图11 隧道排水量随水头高度变化关系曲线图

Fig.11 Relationship curve of tunnel discharge with water head

果不再明显。且在纵向和横截面都完全堵塞时(Z100%—H100%),隧道排水系统完全失效,排水量趋近于0。当排水系统基本失效时,隧道衬砌背后的水无法及时排出,可能引起水压力过大而致使衬砌结构发生破坏。

可见,在降雨条件充足的地区,水头高度过大,隧道纵向排水管堵塞将导致隧道排水量明显降低,影响运营安全。因此,综合溶腔水位下降速度与纵向排水管排水量的演化规律,强降雨、高水头地区需要保障排水系统的通畅。

3.3 隧道衬砌背后水压力

首先,选取110 cm水头,纵向堵塞率为40%时不同横截面堵塞率工况,探讨衬砌横截面各监测点的衬砌背后水压力变化规律。如图12所示,随着横截面堵塞率的增长,拱底处衬砌背后水压力快速上升并变为最不利点位,由此,以拱底水压力为依据,分析在纵向排水管的不同横截面堵塞率和纵向堵塞率下,隧道衬砌背后水压力随水头高度的变化规律。

如图13所示,在不同的堵塞程度下,其水压力的变化规律基本相似,均随水头高度的增长而增长。其变化可大致划分成两个阶段:(1)当水头高度低于50 cm时,衬砌背后水压力增长速率较慢,最大从0增长至4.57 KPa,单位增长量为0.0914 KPa/cm。(2)当水头高度高于50 cm时,水压力增长速率明显增大,特别是50~80 cm段,其水压力最大增长了4.86 KPa,单位增长量达0.162 KPa/cm,相对第一

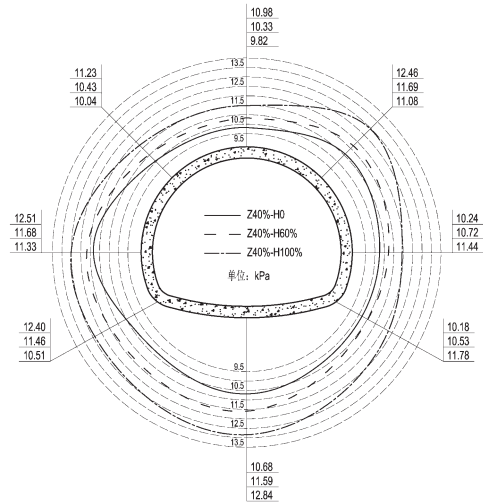


图12 衬砌各监测点外水压力分布包络图

Fig.12 Envelope diagram of external water pressure distribution at each monitoring point of lining

阶段增长了77.2%。

此外,衬砌背后水压力随水头高度的增长情况还受到堵塞程度的影响,特别是排水管横截面堵塞情况影响更为显著。当隧道处于最小堵塞时(Z20%—H20%),随着水头高度从50 cm增长至110 cm,其水压力增长了7.31KPa;而当堵塞程度增大时,其水压力增长量也逐渐增大,当隧道完全堵塞时(Z100%—H100%),其水压力增长量达到9.33. KPa/cm,增长了27.6%。因此,当处于高水头且排水管堵塞程度较高状态时,在两因素的共同影响下,隧道更容易因衬砌背后水压过大,而导致隧道衬砌结构破坏甚至失效。

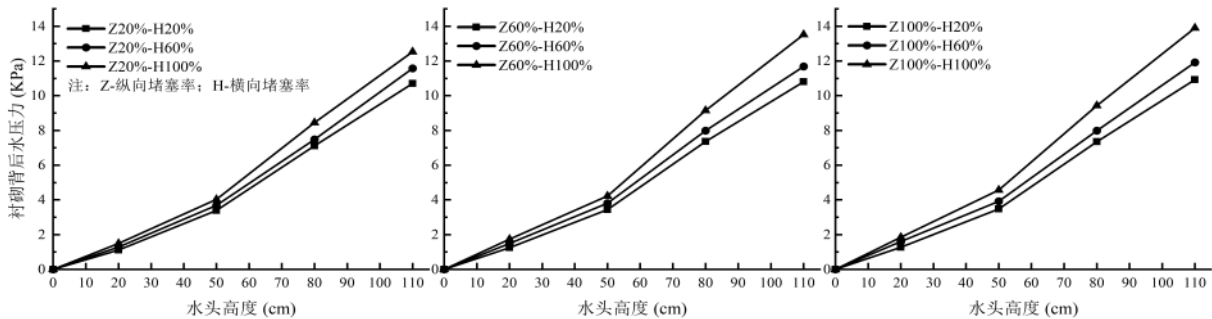


图13 衬砌水压力随水头高度变化关系曲线图

Fig.13 Relationship curve of water pressure on lining with water head

3.4 隧道衬砌结构应力

为更好地分析因堵塞引起的高水压对于衬砌结构力学特性的影响,不考虑隧道衬砌结构原应力

状态,仅分析因水头高度和堵塞状态变化而引起的衬砌结构压应力增量,以此作为衬砌结构应力。选取110 cm水头下,纵向堵塞率为40%时不同横截面堵塞率工况,探讨衬砌横截面各监测点的应力变化

规律。如图 14,不同堵塞程度状态,衬砌横截面的压应力最大值均出现在左拱腰处,故将衬砌横截面最不利点位定为左拱腰处。

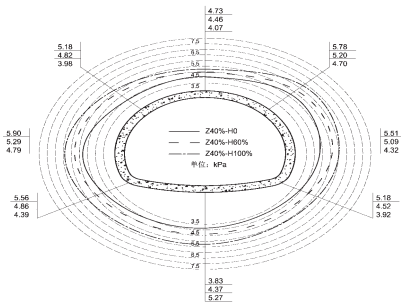


图 14 衬砌各监测点压应力分布包络图

Fig.14 Envelope diagram of compressive stress distribution at each monitoring point of lining

隧道衬砌结构压应力随水头高度变化的规律如图 15 所示。可见,在不同的堵塞状态下,衬砌压应力随水头高度的变化规律基本相似,均随着水头

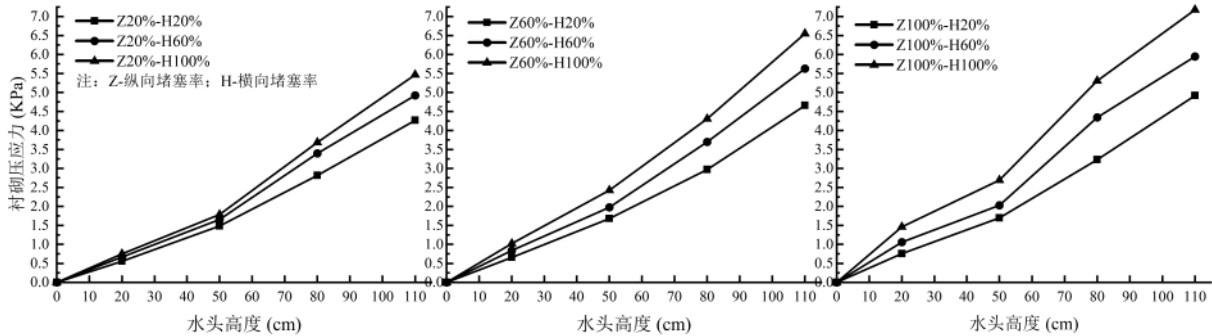


图 15 衬砌结构压应力随水头高度变化关系曲线图

Fig.15 The relationship curve of compressive stress of lining structure with water head

4 不同降雨条件现场监测结果

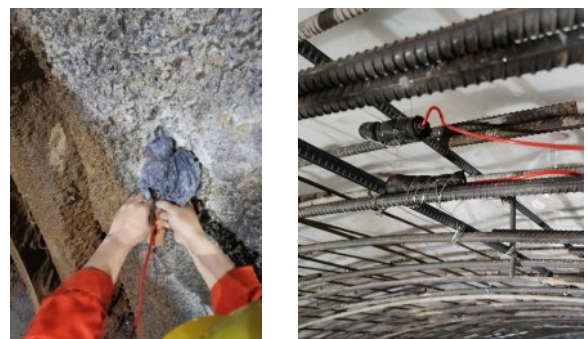
在依托工程施工过程中,溶洞断面布置了振弦式实智能孔隙水压计与钢筋混凝土应力计,如图 16 所示,可动态监测不同降雨条件下隧道力学特征。安装完毕后,测量了元器件初始数据,并于冬季枯水期与夏季富水期进行了现场实测数据,不同时期的测试结果如表 4 与表 5 所示,其中测点 1 与 2 为横断面常规位置,测点 3 与 4 为横断面溶洞位置。

由表 4 与表 5 的现场监测数据可以看出,在富水季节内不同测点处的水压计与应力计监测值大幅度增加,其值为枯水季节结果的两倍左右,故降雨会引起了水压力与应力的快速增长。同时,对比

高度的增长而逐渐增大,并且可分为两个阶段:(1)当水头高度低于 50 cm 时,衬砌压应力增长速率较慢,压应力在完全堵塞(Z100%-H100%)时最大为 2.69 KPa,单位增长量 0.0538 KPa/cm。(2)当水头高度超过 50 cm 后,压应力增长速率明显增大,相同堵塞条件下,其单位增长量达 0.074 8 KPa/cm,相对增长了 39%。

衬砌压应力随水头高度的增长规律也同时受到堵塞程度的影响。当隧道处于最小堵塞时(Z20%-H20%),随着水头高度从 50 cm 增长至 110 cm,其压应力增长了 2.79 KPa;而堵塞程度增大时,压应力增长量也不断增大,当隧道完全堵塞时(Z100%-H100%),其压应力增长量为 4.49 KPa,相对增长了 60.9%。因此,在强降雨地区,更需要重视隧道运营过程中排水系统堵塞状况监测,并定期对堵塞物进行清理,保证排水管通畅。在水头高度过大且隧道排水管堵塞程度较高时,隧道更容易因为内力过大而发生破坏。

不同监测位置,由于溶腔的存在,衬砌背后地下水会更快地汇集于溶腔内,故溶腔处监测点的水压力与应力均大于其他监测点。



(a) 振弦式实智能孔隙水压计 (b) 钢筋混凝土应力计

图 16 溶洞断面传感器布置

Fig.16 Sensor layout in karst cave section

表4 现场水压力传感器监测结果

Table 4 Monitoring results of water pressure sensor

KPa				
不同测量条件	测点1	测点2	测点3	测点4
初始测量	3.97	4.36	15.83	14.16
枯水季节测量	5.87	5.58	17.63	19.54
富水季节测量	12.16	17.24	43.11	53.37

表5 现场应力传感器监测结果

Table 5 Monitoring results of stress sensor

KPa				
不同测量条件	测点1	测点2	测点3	测点4
初始测量	133.01	232.43	274.82	301.87
枯水季节测量	165.18	246.67	270.18	313.18
富水季节测量	445.25	663.60	621.91	804.98

综上,强降雨会显著增加衬砌背后水压力与衬砌结构应力,尤其是溶洞位置处。

5 结论

本文通过室内物理模型试验方法,研究了不同降雨与纵向排水管堵塞状态下岩溶隧道衬砌结构力学性能特性,并进行了不同降雨季节现场监测结果的分析,具体结论如下:

(1) 溶腔水位下降速度与隧道排水量均随水头高度的变化呈现非线性增长趋势。相比其它堵塞条件,完全堵塞状态会显著降低水位下降速度与隧道排水量,隧道排水功能几乎失效。因此,在强降雨条件下,隧道排水能力不能完全满足需求,溶腔的水无法及时排出。

(2) 衬砌背后水压力与衬砌结构压应力的变化规律相似。随着水头高度的升高,水压力及应力均呈现先缓慢增大而后快速增大的趋势。并且,排水管堵塞程度越大,衬砌背后水压力与衬砌结构压应力随水头高度升高的变化越敏感。

(3) 通过不同降雨季节现场监测结果,强降雨会显著增加衬砌背后水压力与隧道衬砌结构应力,尤其是溶洞位置处。

(4) 在岩溶富水区域,受强降雨与排水系统堵塞联合作用,隧道衬砌结构更容易发生破坏的现象。因此,需要重视隧道运营过程中排水系统的堵塞状况监测与定期清理,保障隧道的排水能力,避免隧道水压力及衬砌结构应力进入快速增长阶段,

进而降低强降雨对隧道衬砌结构安全的影响。

参考文献:

- [1] 徐金华,周华求,熊文威,等.岩溶隧道排水系统不同堵塞条件下衬砌结构力学特性[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(01):91-104.
Xu Jinhua, Zhou Huaqiu, Xiong Wenwei, et al. Mechanical characteristics of lining structure under different blocking conditions of drainage system of karst tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2024, 44(01): 91-104. (in Chinese)
- [2] 叶飞,田崇明,何彪,等.在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J].中国公路学报,2021,34(03):159-170.
Ye Fei, Tian Chongming, He Biao, et al. Experimental study on scaling and clogging in drainage system of tunnels under construction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(03): 159-170. (in Chinese)
- [3] 源小梦,张佳华.深埋岩溶隧道掌子面突水灾害可靠性上限分析[J].防灾减灾工程学报,2024,44(02):301-312.
Yuan Xiaomeng, Zhang Jiahua. Reliability Analysis of Water Inrush Disaster Prevention at Faces in Deeply Buried Karst Tunnels Based on Upper Bound Theory [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(02): 301-312. (in Chinese)
- [4] 方星桦,刘澍,陈维,等.软岩隧道围岩变形季节性特征与防控措施研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(06):1331-1338.
Fang Xinghua, Liu Shu, Chen Wei, et al. Seasonal Characteristics of Surrounding Rock Deformation in Soft Rock Tunnel and Prevention Measures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(06): 1331-1338. (in Chinese)
- [5] 邹育麟,何川,胡雄玉,等.富水区隧道合理防排水型式及注浆加固参数研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(04):485-491.
Zou Yulin, He Chuan, Hu Xiongyu, et al. Study on Reasonable Waterproof and Drainage Pattern and Grouting Parameter of Rich Water Tunnel [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(04): 485-491. (in Chinese)
- [6] 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 Zhijun. 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. (in Chinese)
- [7] 段海澎, 陈发根, 姚春江, 等. 岩溶区隧道结晶堵塞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.
Duan Haipeng, Chen Fagen, Yao Chunjiang, et al. The phenomenon of crystal pipe blocking in karst tunnel and its induced risk [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 332-335. (in Chinese)
- [8] 万飞, 李开军, 王华牢, 等. 强降雨下岩溶隧道衬砌结构受力特征分析 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 312-322.
Wan Fei, Li Kaijun, Wang Hualao, et al. Analysis of mechanical characteristics of karst tunnel lining structure under heavy rainfall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 312-322. (in Chinese)
- [9] Li Z, Chen Z, He C, et al. Experimental simulation of seepage field distribution for small interval tunnel under varying-head infiltration [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 41(06): .
- [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(S1): 374-381.
Shang Haisong, Zheng Bo, Guo Rui. Structural mechanical response caused by water pressure change of karst water-rich tunnel and prevention measures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 374-381. (in Chinese)
- [11] Xu Z, Wang X, Zhang C, et al. Scaling and clogging treatment of aging tunnel drainage pipes in karst areas using eco-friendly acid agent [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(4): 896-910.
- [12] 陈武, 曾鹏飞, 何礼航, 等. 岩溶隧道排水管结晶堵塞除垢试验及数值模拟研究 [J]. 铁道勘察, 2023, 49(01): 73-78.
Chen Wu, Zeng Pengfei, He Lihang, et al. Study on crystal clogging descaling test and numerical simulation of karst pipeline [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(01): 73-78. (in Chinese)
- [13] 毛成君, 杨蕴, 吴剑锋, 等. 岩溶管道结晶堵塞水动力-化学反应耦合模拟对比研究 [J]. 中国岩溶, 2023, 42(02): 245-256.
Mao Chengjun, Yang Yun, Wu Jianfeng, et al. Numerical simulation of crystallization blocking in tunnel drainage pipes based on dynamic mesh and level set [J]. Car-
- sologica Sinica, 2023, 42(02): 245-256. (in Chinese)
- [14] Arjnoi P, Jeong J-H, Kim C-Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 376-89.
- [15] Xu Q, Zhang S, Li P, et al. Lining failure performance of highway tunnels induced by the drainage system deterioration [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149(06): 107236.
- [16] Zhang S, Xu Q, Yoo C, et al. Lining cracking mechanism of old highway tunnels caused by drainage system deterioration: A case study of Liwaiao Tunnel, Ningbo, China [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137(06): 106270.
- [17] 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(04): 715-724.
Li Linyi, Yang Junsheng, Gao Chao, et al. Simulation tests on structural deformation and seepage field of high-speed railway tunnels under drainage clogging [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(04): 715-724. (in Chinese)
- [18] 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(04): 74-83.
Xu Qiang, Song Yuxiang, Fan Haobo, et al. Model test study on water pressure distribution characteristics of lining structure in water-rich karst tunnel [J]. China Railway Science, 2022, 43(04): 74-83. (in Chinese)
- [19] Bao T, Zhang S, Liu C, et al. Experimental Study on the Effect of Hydraulic Deterioration of Different Drainage Systems on Lining Water Pressure [J]. Processes, 2022, 10(10): 1975.
- [20] 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(01): 50-58.
Gao Xinqiang, Qiu Wengge, 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(01): 50-58. (in Chinese)
- [21] Leng G-Y, Yan W, Ye H-M, et al. Evaluation of the injection and plugging ability of a novel epoxy resin in cement cracks [J]. Petroleum Science, 2024, 21(02): 1211-1220.