

DOI: 10.11779/CJGE20240323

城市小净距隧道运营期渗流场-应力场演变规律及防排水结构优化

陈子全¹, 何 川^{*1}, 喻炳鑫¹, 李 铮^{1,2}, 张 航², 刘冒佚²

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 重庆市城市建设投资(集团)有限公司, 重庆 400023)

摘 要: 复杂水文地质环境富水隧道在运营期的结构安全问题及其与地下水环境的互馈机制受到越来越多的重视。为探究城市小净距隧道在运营期的渗流场-应力场演变规律并提出合理的防排水方法, 基于重庆市科学城隧道开展了变水头及强降雨条件下的渗流模型试验与数值模拟研究, 揭示了衬砌水压力与围岩压力的演变过程, 提出了一种基于排水量-结构安全性协同调控的地下水环境保护主动控制技术。研究表明: 城市小净距隧道左右洞形成的降水漏斗在空间上部分重叠并相互影响, 水压力在水平方向呈“W”形分布, 随着埋深增大或减小逐渐演变为下凹弧形, 其水平方向影响范围超过 80 m。注浆圈对水压力与围岩压力的折减效果随着水头高度的增加而减弱, 水头高度为 30~50 m 时注浆圈对总荷载的折减比例约为 18.6%~40%。小净距隧道衬砌荷载分布呈现出显著的非对称性。强降雨过程中, 衬砌荷载演变可划分为缓慢增长、快速增长、逐渐稳定 3 个阶段, 高水压引发的二次衬砌开裂和突水灾害主要集中在拱腰、拱脚和隧道底部。高水压地段建议增设衬砌底部排水盲管, 生态环境敏感区隧道地下水排放需采取主动调控技术, 从而保护地下水环境的生态平衡。

关键词: 城市小净距隧道; 运营期; 渗流场-应力场; 衬砌力学性能; 防排水结构; 主动调控

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)08-1572-11

作者简介: 陈子全(1989—), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: chenziqian@swjtu.edu.cn。

Evolution characteristics of seepage-stress fields and optimization of waterproof-drainage system during operation period of urban tunnels with small interval

CHEN Ziquan¹, HE Chuan¹, YU Bingxin¹, LI Zheng^{1,2}, ZHANG Hang², LIU Maoyi²

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,

China; 2. Chongqing City Construction Investment (Group) Co., Ltd., Chongqing 400023, China)

Abstract: The long-term structural safety issues of water-rich tunnels under complex hydrogeological conditions during operation period and their mutual interaction mechanism with groundwater environment are receiving increasing attention. To study the evolution process of seepage and stress field of urban tunnels with small interval and propose reasonable waterproof-drainage methods, the model tests and numerical studies on seepage are carried out based on the Kexuecheng Tunnel in Chongqing City. The evolution process of water and earth pressure on the lining structures is revealed. Subsequently, a proactive control technology for groundwater environmental protection based on the collaborative regulation of drainage and structural safety is proposed. The results indicate that the precipitation funnels formed by the left and right holes of urba tunnels with a small interval partially overlap and affect each other in space. The water pressure exhibits a W-shaped distribution in the horizontal direction, gradually evolving into a concave arc shape as the burial depth increases or decreases. The horizontal influence range of the seepage field and stress field exceeds 80 meters. The reduction effects of grouting circle on water pressure and surrounding rock pressure decrease with the increase of water head height. When the water head height is 30~50 m, the reduction ratio of grouting circle to the total load is about 18.6%~40%. The distribution of earth and water pressure of

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378415, 52441801); 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2024TIAD-KPX0065) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52378415, 52441801), and the Chongqing Key Project of Technological Innovation and Application Development (Grant No. CSTB2024TIAD-KPX0065).

收稿日期(Received): 2024-04-07 **修回日期(Revised):** 2024-10-24 **接受日期(Accepted):** 2024-11-01 **网络出版日期(Online):** 2024-11-02

***通信作者** (E-mail: chuanhe21@swjtu.edu.cn)

© Editorial Office of Chinese Journal of Geotechnical Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

tunnels with small interval shows significant asymmetry. Under heavy rainfall conditions, the evolution process of the total load on the lining can be divided into three stages: slow growth, rapid growth and gradual stability phase. The secondary lining cracking and water inrush disasters caused by high water pressure are mainly concentrated at the haunch, arch foot and bottom of tunnel. For high water pressure sections of urban tunnels with small interval, it is recommended to add drainage blind pipes at the inverted arch. In ecologically sensitive areas, the active regulation technology should be adopted for groundwater discharge in tunnels to protect the ecological balance of groundwater environment.

Key words: urban tunnel with small interval; operation period; seepage-stress field; mechanical performance of lining; waterproof-drainage structure; active control

0 引言

在“建设交通强国”政策的推动下,中国交通网络不断发展与完善,隧道工程建设得到了快速发展,但同时也面临着很大的挑战。其中,复杂地质环境富水隧道在运营期的长期安全问题及其与地下水环境的互馈机制越来越受到重视^[1-3]。富水环境中地层-隧道处于应力场-渗流场的耦合作用下,地下水位的往复变化使得这个系统难以保持一种持续稳定的平衡状态^[4-5]。首先,复杂水文地质条件下,隧道的渗流场演变机制复杂,应力场分布也会受之扰动。其次,城市隧道埋深小,地下水主要源于大气降水入渗,受降气候变化等因素影响,地下水位往往快速升高或降低,进而改变应力场-渗流场的分布规律。另外,山地城市生态环境敏感,不对隧道运营期间地下水排放加以主动控制,易产生系列生态负效应现象。受此影响,中国大量山地城市隧道在运营过程中,出现了很多强降雨引发的结构开裂、漏水、路基隆起甚至二衬击溃等事故^[6-7],不仅严重影响了隧道的正常服役,还造成巨额的维修费用。同时,生态敏感区富水隧道建设破坏了地下水系统的平衡,导致水资源的浪费和破坏,导致隧址区地下水大量流失、地下水位下降、地表水源枯竭,伴随着水土流失、植被破坏、地面塌陷等灾害^[8]。在坚持“绿水青山就是金山银山”理念下,工程建设与生态环境保护和谐共存的需求正变得日益突出。

富水环境下,隧道围岩的稳定性和支护结构的安全性应力场-渗流场的三维空间分布密切相关。地下水渗流路径发育和强降雨产生的高水压往往是导致隧道运营期水灾害的主要原因^[9-10]。在此背景下,隧道防排水结构体系及其设计参数的合理性不可忽视^[11-12]。另外,中国山地城市隧道受地形地貌及地理空间位置的制约,基本采用大断面分离式双洞布置方案,而且左右洞的间距往往很小^[13-14]。这种情况下,隧道左右洞渗流场与应力场的影响区域在空间上部分重叠,使得隧道结构水土荷载分布更加复杂。近年来,中国山地城市遭遇极端气候屡见不鲜,几乎每年都会有局部地区出现严重干旱和突发持续性暴雨,对城市小净距隧

道地下水环境保护与隧道结构安全的影响不容忽视。

目前,大量学者已经针对复杂环境隧道渗流-应力场进行了理论分析、数值模拟、模型试验研究。刘立鹏等^[15]推导了隧道渗流量和复合衬砌水压力折减系数求解公式;朱成伟等^[16]结合渗流力学和保角变换方法,给出了任意埋深隧道渗流场的解析解;Zhang等^[7]结合试验与数值模拟研究了富水区隧道水压力与衬砌破坏模式的关系;李林毅等^[17]通过模型试验研究了暴雨导致隧道排水系统堵塞引起衬砌结构破坏的机理。但这些研究工作主要针对单洞隧道工程开展,较少考虑小净距隧道左右洞的相互影响及其渗流场-应力场的演变规律^[18-19]。同时,现有隧道防排水结构体系对地下水主动保护技术可操作性差、智能管控技术尚为空白,无法实现隧道结构安全与地下水环境保护的协同调控。

为深入研究富水环境下城市小净距隧道渗流场-应力场分布规律及其对衬砌结构力学行为的影响,以“山城”重庆市区的科学城隧道作为依托工程,应用自行研制的小净距隧道渗流模型试验装置,系统开展了渗流模型试验、数值模拟研究和现场监测验证。揭示了城市小净距隧道在变水头及强降雨条件下的渗流场-应力场演变规律,提出了隧道防排水结构体系优化方法与地下水环境主动调控技术。

1 工程背景

中国山地城市广泛分布,尤以“山城”重庆最具特色,重庆主城穿越系列南北走向的平行山系,城市的快速发展修建了大量的公路、铁路和地铁隧道。这些隧道工程的工程地质、水文地质条件复杂,地层岩性以灰岩、砂岩等可溶岩为主,节理裂隙构造十分发育,遍布溶洞、地下暗河、承压水系、地表水库、泉眼、采空区等。地下水位受降雨的影响波动很大,隧址区渗流场-应力场演变极为复杂,隧道运营期间常常引发系列支护结构开裂破损与地下水环境失衡问题(图1)。

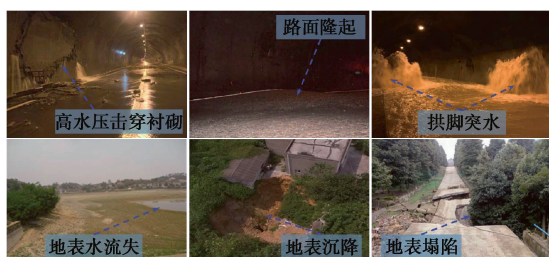


图1 富水隧道运营期发生的突水及环境灾害

Fig. 1 Water inrush and environmental disasters during operation period of tunnels in water-rich areas

选取穿越重庆主城中梁山系的科学城隧道为依托工程,该隧道属于典型的城市小净距公路隧道,全长4075 m,最大埋深约220 m,受地理环境和空间位置的限制,科学城隧道左、右洞之间净距仅16 m。同时,双向六车道的设计方案使隧道开挖跨度和高度达15.97, 10.83 m。沿线地层岩性以砂岩、灰岩、泥岩为主(如图2),岩体节理裂隙及构造面极为发育。在复杂水压力与围岩压力共同作用下,隧道围岩-支护结构体系的安全性能控制难度大。此外,重庆降雨以突发性、集中性暴雨为主,日降雨量可达150~300 mm,同时,夏季炎热干燥,经常面临数十天的干旱天气,地下水位受天气影响显著。隧址区地表生态环境敏感,隧道建设地下水排放极易诱发系列水环境负效应问题。因此,有必要研究山地城市小净距隧道在变水头条件下的渗流-应力场和支护结构力学行为的演变特征,并对防排水结构体系进行合理优化,保障隧道运营过程结构安全稳定的同时对地下水环境进行主动保护。

2 城市小净距隧道渗流模型试验研究

2.1 试验模型

为了探究山地丘陵地区城市小净距隧道在不同水头作用下的渗流-应力场特征及合理的防排水结构,以科学城隧道ZK4+886为研究断面开展模型试验,如图3所示,研究区段隧道埋深约为60 m。在试验中,

选择几何尺寸、渗透系数和重度作为基本变量,相似比分别为 $C_L=100$, $C_K=C_\gamma=1$ 。根据相似性理论的原理,计算了其他参数的相似比: $C_E=C_c=C_i=100$, $C_Q=10000$,其中 C_E , C_c , C_i 和 C_Q 分别为弹性模量、黏聚力、时间和排水量的相似比。

试验中采用黏土、细砂、玻璃纤维、机油、重晶石粉等配制围岩相似材料,注浆圈相似材料由水泥、碳渣和细砂配制^[20]。模型中将初期支护的渗透性能和承载能力分开考虑,采用3层编织土工布来模拟初期支护的渗流效应,将初期支护的刚度与二次衬砌叠加在一起实现支护结构体系整体承载能力。刚度等效方法为

$$E_A I_A = E_S I_S + E_P I_P \quad (1)$$

式中: E_P , E_S 和 E_A 分别为初期支护、二次衬砌和整体支护结构的弹性模量;而 I_P , I_S 和 I_A 分别是初期支护、二次衬砌和整体支护结构的面积惯性矩。

在隧道原型的设计中,初期支护采用厚度为24 cm的C25混凝土,二衬采用厚度为50 cm的C40混凝土。衬砌外表面涂有防水胶,故在衬砌结构中钻孔来模拟排水盲管的作用,通过大量测试,最终确定在横截面上钻8个小孔,每个孔的直径为5 mm,纵向间距为5 cm(图4),以此来模拟排水盲管间距为5 m。隧道围岩和支护结构体系的原型参数如表1。渗流试验中采用模型底部进水口注水,水经模型侧面透水板渗入土体。通过观测水位计使其达到预定的水头高度:30, 40, 50 cm。降雨模拟试验中则直接由模型顶部降雨模拟装置给模型加水,通过改变模拟降雨装置底部的透水孔的数量与密度来调节降雨强度。试验加载过程中监测围岩和衬砌的水压力与围岩压力。

2.2 地层中水压力随水头高度变化的分布规律

隧道开挖为地下水提供了渗流通道,在一定范围内形成一个倒锥形的地下水下降漏斗。而小净距隧道左右洞的渗流场相互影响,进而使得围岩中水压力分布更加复杂。试验中在围岩内沿水平方向布置了3条水压力测线,分别为测线1(埋深47 m),测线2(埋

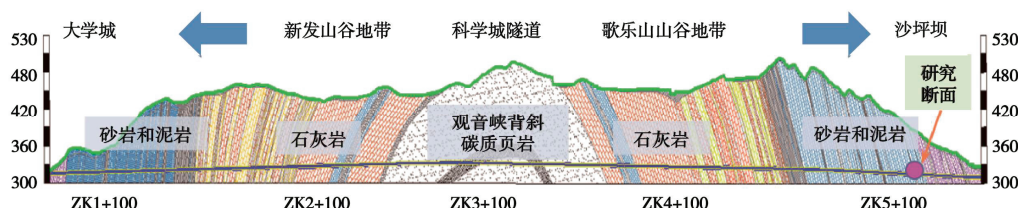


图2 科学城隧道纵断面图

Fig. 2 Longitudinal profile of Kexuecheng Tunnel

深 67 m) 和测线 3 (埋深 92 m), 如图 5 所示。

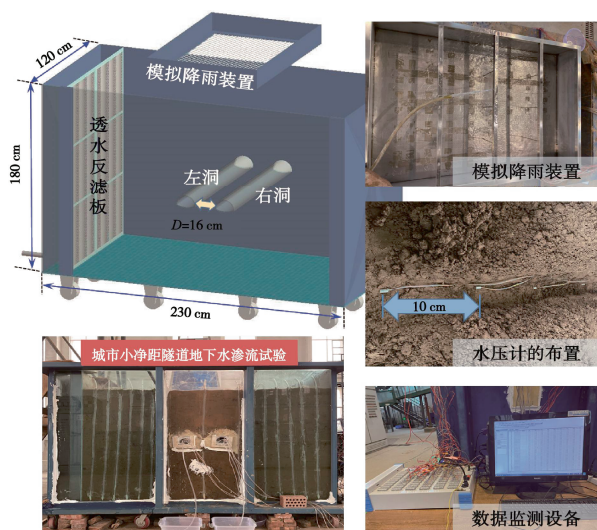


图 3 隧道渗流模型试验装置

Fig. 3 Experimental devices for tunnel model

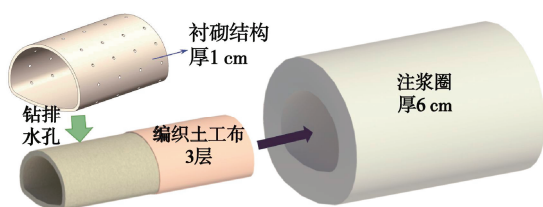


图 4 模型中的衬砌结构与注浆圈模拟方法

Fig. 4 Simulation methods of lining structures and grouting circles

表 1 隧道围岩与衬砌原型材料参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock

材料	E/GPa	μ	$\gamma /$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\varphi /$ ($^{\circ}$)	$c /$ MPa	$K /$ ($10^6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
围岩	2.1	0.34	24.0	33	0.30	2.00
注浆圈	6.8	0.32	23.4	36	0.45	0.36
初期支护	24.0	0.23	24.0	—	—	0.25
二次衬砌	32.5	0.20	25.0	—	—	—

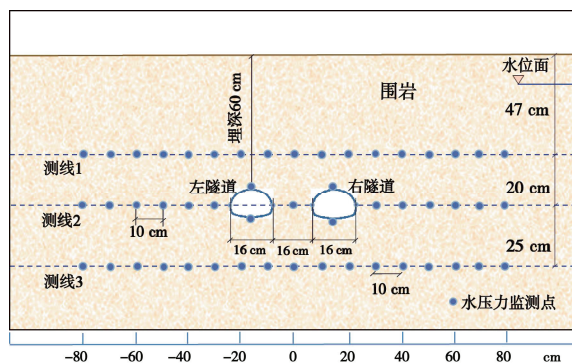


图 5 试验中水压力测点布置示意图

Fig. 5 Layout of measuring points for water pressure during experiment

受隧道衬砌结构排水作用的影响,从水源补给边

界向隧道渗流影响区域水压力逐渐降低。左右洞身周边位置的水压最低,而两隧洞之间的区域水压力又略有回升,使得测线 2 的水压力呈显著的“W”形分布特征(图 6(b))。受小净距隧道左右洞渗流效应叠加影响,隧道左右拱腰的水压力呈现为非均匀分布特征,内侧水压力较外侧降低了约 20~40 kPa。

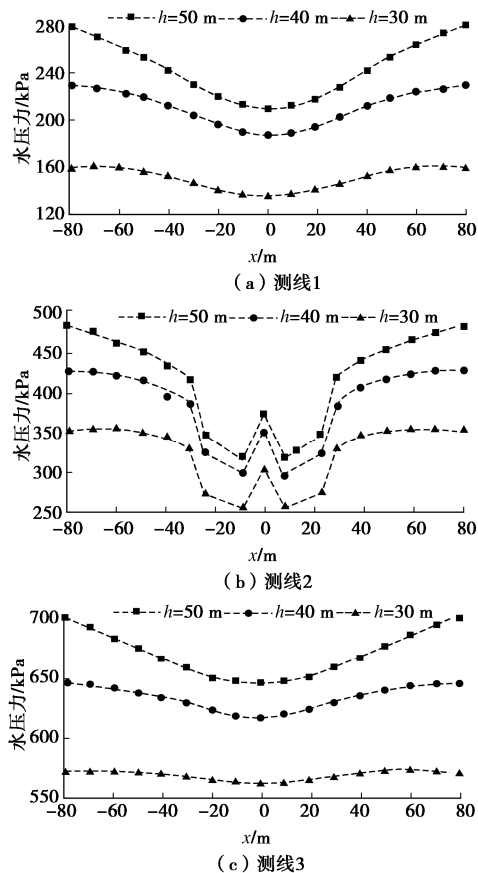


图 6 试验中不同地下水位高度下的测线水压力

Fig. 6 Water pressures of measuring lines at different groundwater levels in experiments

对于测线 1 和测线 3, 地层水压力在水平方向的分布模式变化为下凹的弧线 (图 6 (a) 和 (c))。对于埋深最浅的测线 1, 水头高度为 30, 40, 50 m 时隧道正上方位置的水压分别比边界水压低 24.4%, 18.1%, 14.5%。而受隧道排水影响最严重的测线 2, 在水位为 30, 40, 50 m 时隧道拱腰处的水压分别比其边界水压降低了 34.7%, 30.6%, 27.9%。地下水位越高, 降水漏斗越明显。相比之下, 隧道施工对其下方围岩渗流场的影响相对较小, 测线 3 在不同水位高度下的最小水压比其边界值平均降低了 7.1%。根据水压分布拟合曲线的“W”形演变规律, 小净距隧道渗流场的影响范围可能超过 80 m, 达到开挖跨度的 5 倍以上。

2.3 注浆圈与衬砌水压随水头高度变化的演变规律

试验中,在注浆圈内外侧拱顶、拱底、左右拱腰

4 个位置布置了水压力和围岩压力测点。根据图 6 可知小净距隧道左右洞水压力呈对称分布, 故以左洞为例来分析衬砌和注浆圈水压力分布特征(下文同)。图 7 揭示了注浆圈外侧与衬砌外侧(注浆圈内侧)监测断面水压力随水头高度变化的演变规律。当水头高度为 50 m 时, 注浆圈外侧拱顶、左右拱腰和拱底的水压力分别为 413.6, 497.3, 482.1, 583.7 kPa, 衬砌外侧拱顶、左拱腰、右拱腰和拱底的水压力分别为 325.1, 386.0, 365.6, 531.9 kPa。注浆圈的堵水效应能够一定程度降低衬砌水压力。但由于衬砌底部无排水孔, 导致高压水集中在拱脚至拱底区域。因此, 隧道底部经常在服役期间发生由高压水聚集引起的路基底鼓变形。注浆圈和衬砌外侧的水压力随着地下水头高度的增加而增大。与注浆圈外水压力相比, 当水头高度分别为 30, 40, 50 m 时, 衬砌拱顶处的水压分别降低了 26.7%, 25.2%, 21.3%, 而衬砌拱底的水压分别降低了 12.7%, 10.2%, 8.9%。表明注浆圈对水压力的折减效应随着初始水头的增大而减弱。

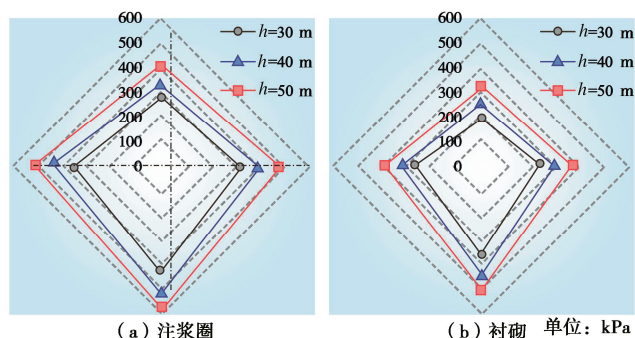


图 7 不同水头条件下注浆圈与衬砌外水压力

Fig. 7 Water pressures of linings and grouting circles under different water heads

由于隧道排水系统的疏水作用, 隧道附近的围岩中水压力降低。而小净距隧道左右洞的渗流影响区域部分重叠, 使得左右洞之间的水压小于两侧水压。当水头高度分别为 30, 40, 50 m 时, 注浆圈左拱腰水压力比右拱腰大 33.3, 24.6, 15.7 kPa, 而衬砌左拱腰的水压力比右拱腰分别大 38.1, 27.4, 21.2 kPa。表明注浆圈和衬砌左右拱腰的水压力不对称性随着水头高度的增大而减弱, 而且注浆圈的水压力折减效应进一步加剧了衬砌结构外水压力的非对称分布。

2.4 注浆圈与衬砌围岩压力随水头变化的演变规律

隧道围岩中的应力场与渗流场是相互影响的, 地下水位的改变往往伴随着岩体有效应力的变化。随着地下水位的升高, 隧道左洞监测断面各测点的围岩压力逐渐降低, 如图 8 所示。当地下水位 $h=0$ m 时, 衬砌拱顶、左拱腰、右拱腰和拱底的围岩压力分别为

394.1, 199.8, 216.6, 279.9 kPa。当地下水位增加到 50 m 时, 各测点的围岩压力分别下降了 37.2%, 51.0%, 45.8%, 36.7%。这主要是由于水头高度的增加使得土层有效应力降低, 导致各测点的围岩压力降低。相反, 隧道开挖引起的地下水位下降将增加地层的有效应力, 在地层应力与渗流效应的耦合作用下, 隧道可能发生挤压变形、衬砌开裂, 诱发地面沉降和地表上覆建筑物坍塌灾害。当水头高度分别为 30, 40, 50 m 时, 衬砌总荷载比注浆圈减小了 32.3%, 26.7%, 18.6%。

与水压力的非对称特征相反, 小净距隧道左右洞之间的围岩压力较大, 两侧较小。在 $h=0, 30, 40, 50$ m 条件下, 注浆圈右拱腰围岩压力比左拱腰分别大 32.9, 37.4, 42.7, 51.8 kPa。受开挖扰动影响, 中夹岩体的强度和自承载能力通常较差, 在渗流与应力耦合作用下容易失稳。随着水压力的持续增长, 中部围岩的稳定性进一步破坏, 加剧了围岩压力的非对称分布。由于注浆圈具有较高的强度和抗变形能力, 可以在一定程度上降低作用于衬砌上的围岩压力。当初始水头 $h=0, 30, 40, 50$ m 时, 作用于衬砌右拱腰的围岩压力比左拱腰分别大 12.8, 16.9, 19.1, 22.6 kPa, 注浆圈的存在一定程度上削弱了小净距隧道围岩压力分布的不对称性。

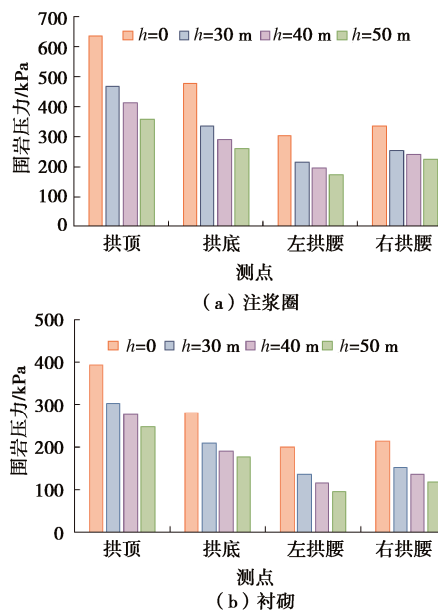


图 8 不同水头条件下注浆圈与衬砌围岩压力

Fig. 8 Soil pressures of grouting circles and linings under different water heads

2.5 强降雨过程中衬砌荷载演变特征

为了探究连续强降雨引起的隧道结构安全性能演变特征, 开展了强降雨条件下的渗流模型试验。试验中通过改变降雨模拟装置底部的透水孔数量来调节降雨强度, 经过多次测试得到降雨量为 2.5 mm/h (60

mm/d)。在测试过程中, 使用降雨模拟装置施加 2 h 的强降雨 (根据相似定律, 约 8 d 的连续降雨), 并监测了整个降雨和渗流过程中的水压力与围岩压力。

降雨过程中小净距隧道的水压力和围岩压力的演变大致可以分为 3 个阶段 (如图 9 所示): ①渗透阶段 (0~50 h): 地层饱和度随着雨水的入渗逐渐增大, 各测点水压力缓慢增长。由于渗入的地下水主要流入隧道下部, 故拱底水压比其他位置增长更早。受雨水自重的影响, 围岩压力在降雨试验的初始阶段有一个短期应力增加阶段, 而且主要体现在垂直方向, 而水平方向无明显变化。②饱和阶段 (50~100 h): 由于注浆圈的阻水能力, 地下水位持续上升。水压力增速随着地层饱和和区域逐渐增大而增大, 各测点的水压增大的过程呈 “S” 形。随着地层饱和度的增大, 有效应力逐渐减小。由此可见, 强降雨后隧道衬砌水压会在短时间内迅速升高且围岩自承能力减弱, 不利于隧道结构安全。③平衡阶段 (约 100 h 后): 地下水渗流量与隧道排水量几乎一致, 衬砌各测点的水压力和围岩压力逐渐趋于稳定。

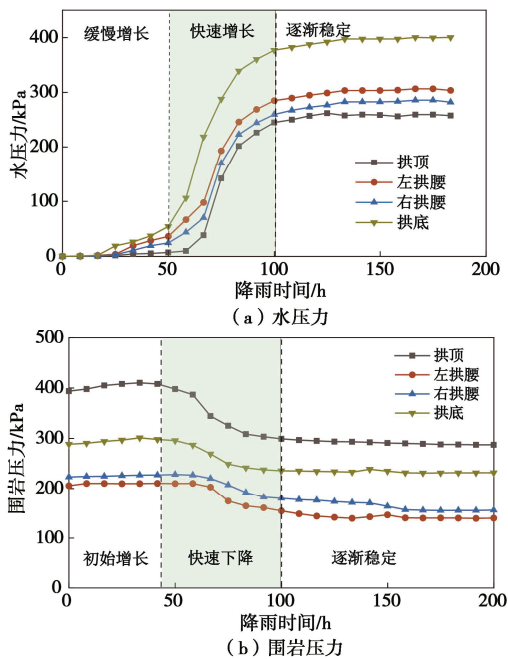


图 9 降雨期间衬砌荷载演变历程

Fig. 9 Evolution of load of linings during rainfall

根据试验获得的渗流场-应力场分布特征, 发现拱顶和拱底围岩压力较高, 由于隧道埋深较浅, 侧向围岩压力相对较小。在水平方向上, 小净距隧道中夹岩区域的围岩压力大于隧道两侧区域, 而水压力则相反。渗流场和应力场叠加后, 小净距隧道衬砌总荷载的非对称性减弱, 如图 10 所示。降雨过程中衬砌总荷载增长速度先增大后减小, 最后趋于稳定。降雨持续 110 h 后基本保持稳定, 衬砌拱顶、左腰、右腰和底部

的总荷载分别为 555.6, 440.3, 449.9, 625.7 kPa, 与强降雨前相比分别增加了 41.0%, 113.9%, 101.7%, 117.0%。因此, 强降雨条件下高水压产生的二次衬砌开裂和坍塌灾害主要集中在拱腰和隧道底板。尤其是隧道拱底, 在高水压长期作用下, 容易引起路基隆起变形甚至突水等病害。

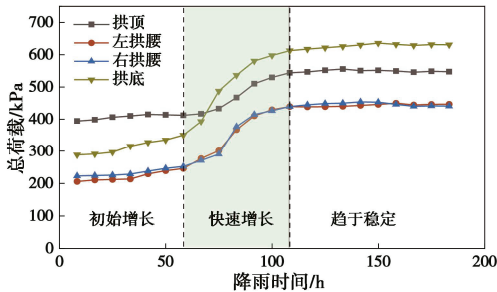


图 10 降雨过程中衬砌总荷载的变化历程

Fig. 10 Evolution of total load on linings during rainfall process

3 小净距隧道三维渗流-应力场分析

3.1 有限元模型

为了进一步探究隧道渗流场的三维分布特征, 应用 ABAQUS 软件建立了有限元模型如图 11 所示, 进行了不同水头和降雨强度的数值模拟分析。模型尺寸为 230 m×120 m×140 m, 包括围岩、注浆圈、初期支护、二次衬砌, 二次衬砌与初支之间设置排水盲管, 纵向盲管布置在拱脚位置, 拱脚以上部分布置环向排水盲管。模型应力场边界条件: 底面施加固定约束, 四周施加法向约束, 顶面自由; 模型渗流场边界条件: 左右侧面上施加固定水压力来模拟远场水源补给, 其余边界面设置为不透水边界。

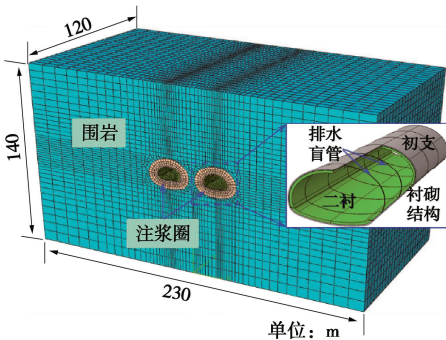


图 11 三维有限元模型

Fig. 11 Three-dimensional finite element model

3.2 隧道渗流场的三维分布特征

通过数值模拟得到水头高度从 30 m 增加到 40, 50 m 时的隧道渗流场三维分布形态如图 12 所示。受隧道排水作用的影响, 地下水位下降。水头高度为 30, 40, 50 m 时, 地下水位分别下降了 7.8, 8.5, 9.4 m。

水头高度越大,地下水位降越大。在水平方向上,从模型边界到隧道洞身水压力逐渐减小,隧道初支与二衬之间布置有排水盲管使得洞身处水压力最低,而小净距隧道左右洞之间的中间区域水压力又略有增大,该分布特征与试验得到的规律一致。

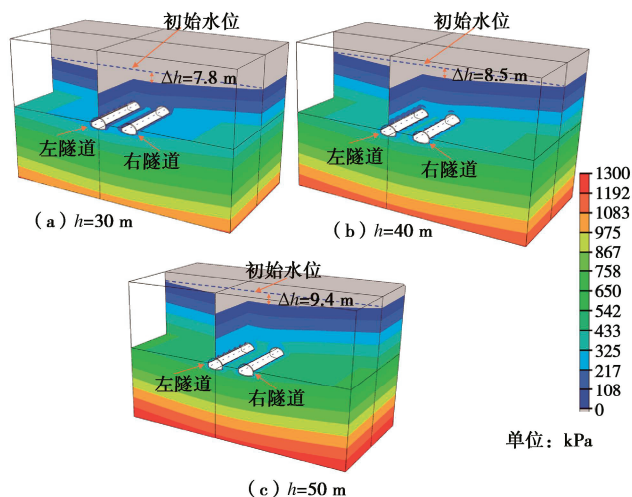


图 12 隧道渗流场三维空间分布

Fig. 12 Three-dimensional spatial distribution of seepage field of tunnel

注浆圈内侧水压力明显低于外侧 (图 13 (a)), 表明注浆圈起到了阻水效果。而且注浆圈左右侧水压力表现出不对称性。初期支护内外侧水压力分布如图 13 (b) 所示, 环向盲管的疏水作用使得初期支护内外侧形成水压力增大与减小交替的环形条带。而纵向排水盲管的作用使得衬砌拱脚位置水压力骤减。由于衬砌底部没有布置排水管道, 所以拱底承受高压显著, 容易造成隧道拱底隆起甚至涌突水等病害。随着水头高度的增大, 衬砌整体水压力逐渐增大 (图 13 (c)), 此外, 衬砌左右侧承受水压力不对称, 当水头分别为 30, 40, 50 m 时, 左拱腰水压比右拱腰分别大 22.9, 28.9, 34.7 kPa, 与实验结果一致性良好。

3.3 强降雨条件下小净距隧道衬砌结构安全分析

数值模拟中, 在模型顶部施加一个入渗速度荷载来模拟降雨, 不同的入渗速度代表不同的降雨强度。模型中降雨入渗面的入渗速度分别设为 20, 40, 80, 100 mm/d, 分别代表中雨、大雨、暴雨和大暴雨。模型中初始水头高度为 30 m, 其它边界条件保持不变。

由于隧道中的排水系统排水能力有限, 当降雨的入渗量大于隧道的排水量时, 围岩中水位升高, 相较于初始水位, 小净距隧道中轴线位置的水位在暴雨、大雨、暴雨和大暴雨条件下分别升高了 4, 9, 19, 26 m, 从而导致衬砌水压力整体增大 (图 14), 与试验结果一致。与降雨前相比, 衬砌拱顶水压力在经历中

雨、大雨、暴雨和大暴雨后分别增大了 6.7%, 20.9%, 49.3%, 66.7%, 而拱底分别增大了 0.7%, 5.3%, 14.7%, 20.4%, 表明衬砌拱顶水压力受降雨的影响较大, 拱底水压力受降雨影响较小, 但衬砌拱底水压力一直是最大的。衬砌左右侧水压力的非对称性随降雨强度的增强而逐渐减弱, 降雨强度分别为中雨、大雨、暴雨和大暴雨时, 左拱腰水压力比右拱腰分别大 11.9%, 10.7%, 8.8%, 7.8%。

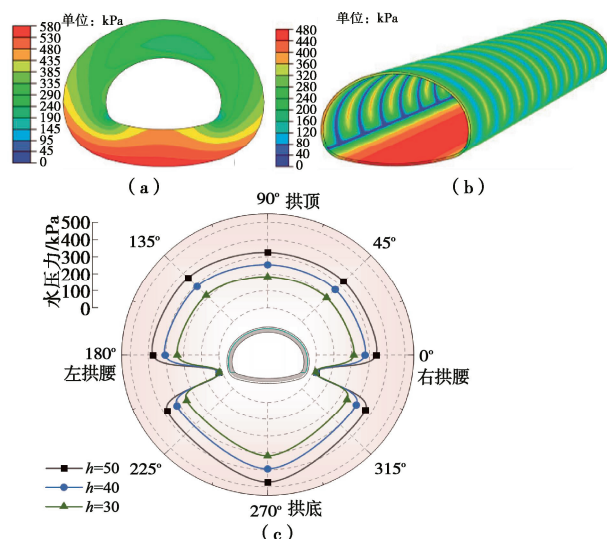


图 13 注浆圈与衬砌水压力三维分布特征

Fig. 13 Three-dimensional distribution characteristics of water pressure on grouting circles and linings

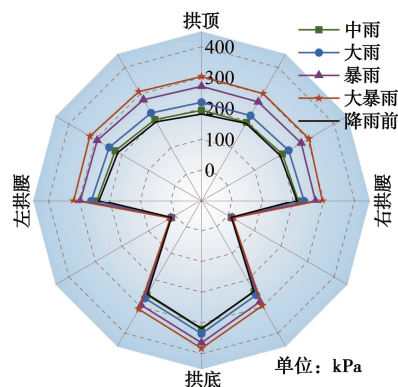


图 14 衬砌水压力随降雨强度的演变

Fig. 14 Evolution of water pressure of linings with rainfall intensity

在水压力与围岩压力的耦合作用下, 二次衬砌拱顶下沉, 拱底隆起, 造成拱脚位置剪应力集中 (图 15 (a)), 而最大拉应力分布在拱底 (图 15 (b)), 表明衬砌最危险的位置在拱底或拱脚。图 15 (c) 为二次衬砌在不同降雨强度下的最大拉应力与最大剪应力, 表明衬砌最大拉应力与剪应力随着降雨强度的增大而逐渐增大, 当降雨强度足够大时, 衬砌的最大拉应力与剪应力将超过其强度值, 从而发生局部开裂甚至垮塌。

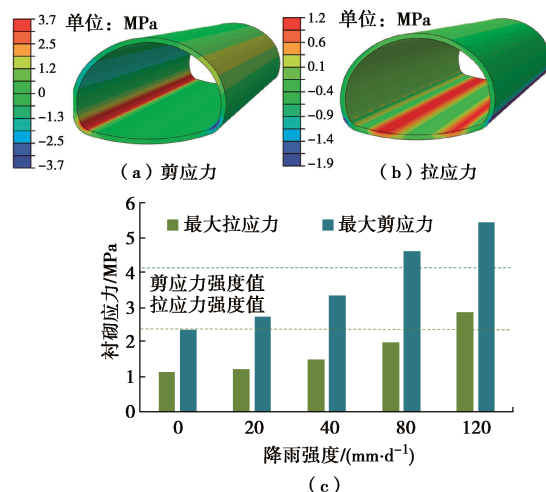


图 15 隧道衬砌应力随降雨强度的变化

Fig. 15 Evolution of stress of linings with rainfall intensity

4 小净距隧道排水系统优化分析

4.1 环向排水盲管间距优化

通过数值模拟分析了暴雨条件下 (80 mm/d) 排水盲管间距为 10, 5, 2.5 m 时衬砌水压力分布演变特征, 如图 16 所示。随着环向排水盲管间距的减小, 衬砌拱脚以上部分的水压力减小带区变密, 当盲管间距足够小时, 衬砌水压力降低影响区相交, 使得衬砌水压力沿纵向分布更加均匀。此外, 衬砌整体水压力随着盲管间距的减小而减小, 尤其是拱脚以上水压力变化显著。同时, 当环向盲管纵向间距分别为 5.0, 2.5 m 时, 隧道涌水量分别为 9.59, 11.02 m³/(d·m), 与 $L=10$ m 相比, 分别增大了 24.7%, 43.3%。而拱底由于缺乏排水通道, 其水压力对排水管间距的敏感性不高, 环向盲管间距从 10 m 减小到 5, 2.5 m 时, 衬砌最大水压力分别降低 16, 84 kPa。若采取减小环向盲管间距的方法来降低衬砌整体水压力, 则需盲管间距达到一个足够小的值 (如 $L=2.5$ m), 这无疑会使施工成本大幅增加。因此, 提出采用较为经济的优化方案, 如增设衬砌底部环向排水盲管。

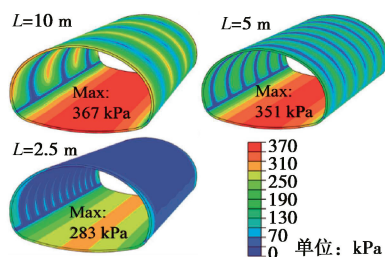


图 16 不同盲管间距衬砌水压力分布

Fig. 16 Distribution of water pressure on linings with different blind pipe spacings

4.2 增设底部环向排水盲管

由于减小环向排水盲管间距对衬砌拱底高压的缓解效果不理想, 提出增加衬砌拱底环向排水盲管的方案。数值模型中在初支与二衬之间拱底部分增设环向排水盲管, 从而形成整环排水盲管。在暴雨条件下 (80 mm/d) 衬砌水压力分布与原防排水方案相比如图 17 所示。衬砌底部排水盲管的疏水作用使得衬砌底部水压力显著减小, 同时, 也使得衬砌整体水压力显著降低。衬砌拱顶、左拱腰和拱底的水压力分别为 258.9, 274.5, 287.2 kPa, 与原防排水方案相比, 分别降低了 19.1%, 26.4%, 39.2%, 与试验所揭示的规律一致。

此外, 当衬砌底部增设排水盲管时, 隧道排水量为 8.99 m³/(d·m), 小于 $L=2.5$ m 时的排水量, 可见该优化方案和加密环向盲管间距相比不仅能显著降低拱底高压, 增加衬砌安全性且降低了施工成本, 并减少了地下水资源的浪费。

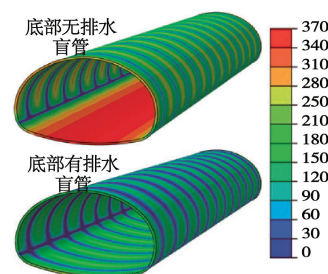


图 17 数值模拟中初支内外水压力

Fig. 17 Water pressures of linings in numerical simulation

4.3 地下水排放主动控制技术

根据上述分析可知增大排水盲管密度和增设衬砌底部环向排水盲管均能够降低衬砌水压力。但隧道大量的排水引起地下水位急剧下降, 打破了地下水环境的平衡。如果地下水位长期不能恢复则会影响地表水资源和植被的生长。为了能将地下水位控制在一个合理的范围内, 提出在隧道中应用主动控制排水方法。该方法的关键是应用安装在排水口位置的控制阀来主动调节隧道的排水量, 从而达到控制地下水水位的目的, 其工作原理如图 18 所示。数据采集系统实时监测隧道衬砌水压力、围岩压力和地下水位, 并通过无线网络传输至监控云平台, 监控终端可根据监测结果发出排水控制指令, 并最终反馈给排水控制阀, 从而实现隧道排水量可控。

重庆科学城隧道施工期间, 地下水位的变动受隧道排水和降雨量的影响, 如图 19 所示。在掌子面推进至水位监测点前后, 地下水位受隧道排水的影响最强烈, 下降量最大, 达 18.1 m。当掌子面通过水位监测点后, 由于隧道内安装了防排水结构, 在排水阀的调

控作用下水位逐渐恢复。随着掌子面推进距离的增加,地下水位逐渐稳定,主要受降雨影响,最大升降幅度不超过 12 m,表明主动控制排水技术对地下水位起到了良好的控制作用。

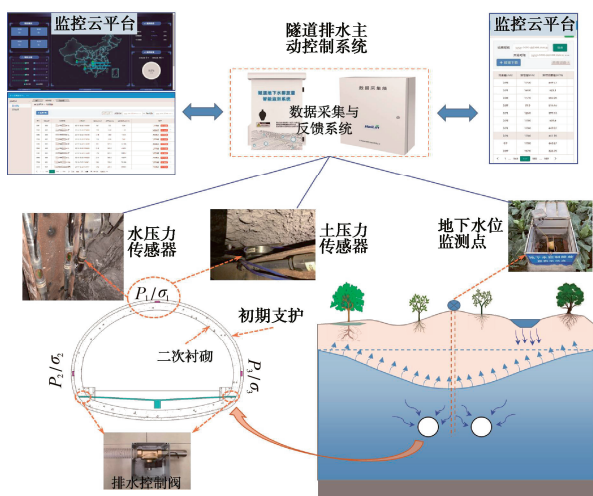


图 18 隧道排水主动控制系统工作原理

Fig. 18 Working principle of active control system for tunnel drainage

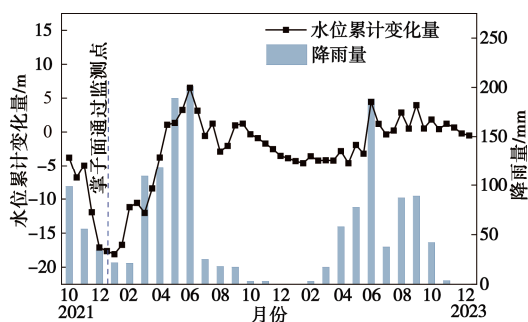


图 19 科学城隧道采用主动控制技术后的水位变化情况

Fig. 19 Change of groundwater level of Kexuecheng Tunnel using active control technology

隧道开挖后地下水位逐渐趋于稳定,监测断面的水土荷载如图 20 所示,图中 P_1 , P_2 , P_3 分别为衬砌拱顶和左右拱腰的水压力, σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为衬砌拱顶和左右拱腰的围岩压力。衬砌水压随着排水阀压力的增大而增大,而且左拱腰的水压大于右拱腰。当排水阀压力分别为 0, 100, 200, 300, 400, 500 kPa 时,二次衬砌拱顶处的水压分别为 260.1, 298.0, 336.1, 374.1, 451.3 kPa。隧道左右侧水压力差随着排水控制阀压力的增大而逐渐减小。衬砌围岩压力随着排水阀压力的增大而逐渐减小,而且左拱腰的围岩压力低于右拱腰。当排水阀压力分别为 0, 100, 200, 300, 400, 500 kPa 时,衬砌拱顶的围岩压力分别为 492.9, 446.1, 415.9, 386.1, 355.1, 324.1 kPa。该结果表明,地下水排放主动控制技术可有效实现排水阀压力、地下水位、衬砌荷载的协同调控。

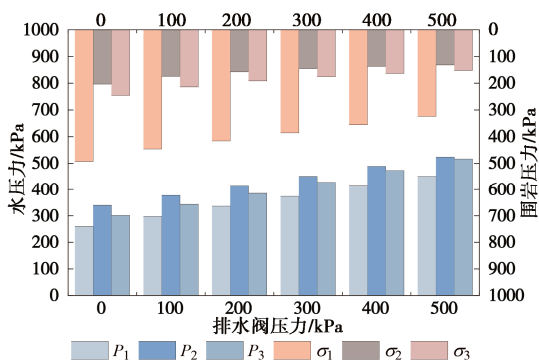


图 20 地下水位稳定后隧道监测断面水-土荷载

Fig. 20 Water-soil load on tunnel monitoring section after stability of underground water level

5 结 论

为探究生态环境敏感区山地城市小净距隧道在运营期的渗流场-应力场演变规律,提出合理的防排水结构体系,基于重庆市科学城隧道开展了变水头及强降雨条件下的渗流模型试验与数值模拟研究,得到以下 4 点结论。

(1) 城市小净距隧道左右洞形成的降水漏斗在空间上部分重叠并相互影响,水压力在水平方向呈现为“W”形分布特征,随着埋深增大或减小逐渐演变为下凹弧形,围岩渗流场-应力场的影响范围超过 80 m。注浆圈对水压力与围岩压力的折减效果随着水头高度的增加而减弱。衬砌荷载呈现出显著的非对称性,衬砌结构内侧的水压力比外侧小 5%~15%,而内侧的围岩压力则比外侧大 10%~20%。

(2) 强降雨条件下,隧道衬砌总荷载呈现为“S”形演变规律,其过程可划分为初期增长、快速增长和逐渐稳定阶段。小净距隧道地下水位涨幅、衬砌水压力与衬砌应力均随着降雨强度的增大而增大。暴雨条件下,作用于衬砌结构拱顶、左拱腰、右拱腰和拱底的总压力比强降雨前分别增加了 41.0%, 113.9%, 101.7%, 117.0%。强降雨条件下高水压引发的二次衬砌开裂和突水灾害主要集中在拱腰、拱脚和隧道底部。

(3) 传统的防排水方案容易造成高水压在衬砌底部聚集,加密环向排水盲管或增设衬砌底部排水盲管,可有效降低水压力 20%~40%。前者对降低仰拱部位的高水压效果不明显,且排水量较后者大幅增加。综合考虑隧道防排水系统的复杂性、施工成本、地下水环境控制与优化效果,在高水压地段优选增设衬砌底部排水盲管方案。

(4) 基于隧道与地下水环境的互馈机制,提出了生态环境敏感区隧道地下水排放主动控制技术,实现隧道排水量与结构安全的协同调控。在强降雨条件下,

降低水压力控制值,增大地下水排放量,有利于降低衬砌水压与结构安全。无降雨或降雨量较小时,增大排水控制阀的压力值可以避免地下水位大幅下降,进而保护地下水环境的生态平衡。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 陈子全、喻炳鑫、李铮参与试验设计、数据分析、数值模拟、论文撰写;何川提供技术指导;张航、刘冒佚参与数据分析、论文修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by CHEN Ziquan, YU Bingxin and LI Zheng. The technical guidance was provided by HE Chuan. The data analysis and manuscript revision were completed by ZHANG Hang and LIU Maoyi. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 刘志春,王梦恕.隧道工程因素对地下水环境影响研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 2): 281-288. (LIU Zhichun, WANG Mengshu. Research on impact of tunnel engineering factors on groundwater environment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 281-288. (in Chinese))
- [2] 邱军领,秦祎文,赖金星,等.突发高压渗流作用下黄土地铁隧道水压阶跃效应分析[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(4): 758-767. (QIU Junling, QIN Yiwen, LAI Jinxing, et al. Step effects of hydraulic pressure of metro tunnels in loess under sudden high-pressure seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(4): 758-767. (in Chinese))
- [3] YANG F J, ZHANG C Q, ZHOU H, et al. The long-term safety of a deeply buried soft rock tunnel lining under inside-to-outside seepage conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **67**: 132-146.
- [4] 李 铮,何 川,杨赛舟,等.城市隧道动、静水头作用下的渗流模型试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1767-1774. (LI Zheng, HE Chuan, YANG Saizhou, et al. Seepage model experiments on urban tunnel influenced by dynamic and hydrostatic head[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1767-1774. (in Chinese))
- [5] 马少坤,韦榕宽,邵 羽,等.基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型试验研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(10): 1798-1806, 1958. (MA Shaokun, WEI Rongkuan, SHAO Yu, et al. 3D visual model tests on stability of tunnel excavation surface based on transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(10): 1798-1806, 1958. (in Chinese))
- [6] 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 Xuefeng, OUYANG Linxu, ZHANG Xuemin, et al. Floor heave mechanism and prevention countermeasures for high-pressure water-rich karst tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, **36**(11): 323-334. (in Chinese))
- [7] ZHANG Z Q, CHEN B K, LI H Y, et al. The performance of mechanical characteristics and failure mode for tunnel concrete lining structure in water-rich layer[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **121**: 104335.
- [8] LV Y X, JIANG Y J, HU W, et al. A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in Karst areas: Current status, challenges, and perspectives[J]. Journal of Hydrology, 2020, **586**: 124891.
- [9] 邹 陈,张广泽,毛邦燕.沪昆客专白岩脚隧道突水致灾机理分析[J]. 铁道工程学报, 2018, **35**(12): 46-50, 61. (ZOU Chen, ZHANG Guangze, MAO Bangyan. Analysis of the mechanism of water-inrush of Baiyanjiao tunnel in Shanghai-Kunming passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, **35**(12): 46-50, 61. (in Chinese))
- [10] 郭 瑞,郑 波,吴 剑,等.降雨过程中隧道衬砌水压力的动态规律研究[J]. 铁道工程学报, 2023, **40**(5): 75-81. (GUO Rui, ZHENG Bo, WU Jian, et al. Research on the dynamic law of water pressure in tunnel lining during rainfall[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, **40**(5): 75-81. (in Chinese))
- [11] 刘新荣,刘 坤,钟祖良,等.深埋隧道排水系统非对称堵塞后渗流场的解析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(5): 1088-1100. (LIU Xinrong, LIU Kun, ZHONG Zuliang, et al. Analytical study on seepage field of the deep tunnel with asymmetric blocked drainage system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1088-1100. (in Chinese))
- [12] 黄国富,陈觅杭,汪 淼,等.铁路隧道排水盲管施工质量现状及控制[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, **16**(7): 1751-1756. (HUANG Guofu, CHEN Mihang, WANG Miao, et al. Construction quality and control of blind drainage pipe in railway tunnels[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, **16**(7): 1751-1756. (in Chinese))
- [13] 章慧健,仇文革,冯冀蒙.小净距隧道夹岩力学特征分析

- [J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 434-439. (ZHANG Huijian, QIU Wenge, FENG Jimeng. Mechanical performance of shared rock of neighborhood tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 434-439. (in Chinese))
- [14] CHEN Z Q, LI Z, HE C, et al. Investigation on seepage field distribution and structural safety performance of small interval tunnel in water-rich region[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, **138**: 105172.
- [15] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 水岩分算隧道衬砌外水力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 495-500. (LIU Lipeng, WANG Xiaogang, JIA Zhixin, et al. Method to determine reduction factor of water pressure acting on tunnel linings using water-rock independent calculation methodology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 495-500. (in Chinese))
- [16] 朱成伟, 应宏伟, 龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 1984-1991. (ZHU Chengwei, YING Hongwei, GONG Xiaonan. Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 1984-1991. (in Chinese))
- [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**(4): 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**(4): 715-724. (in Chinese))
- [18] 傅鹤林, 安鹏涛, 伍毅敏, 等. 考虑排水体系时隧道突涌水分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, **19**(11): 3335-3342. (FU Helin, AN Pengtao, WU Yimin, et al. Analysis of tunnel water inrush considering drainage system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, **19**(11): 3335-3342. (in Chinese))
- [19] YU B X, CHEN Z Q, LI Z, et al. Analysis of water pressure distribution and optimization of waterproof-drainage system for tunnels in water-rich region[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, **83**(4): 137.
- [20] 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 Saizhou, 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. (in Chinese))