

城市建成区岩溶隧道渗漏水机理及防治措施 ——以重庆土主隧道渗水事故为例

侯元立, 王 锐, 杨华富

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401100)

摘 要: 城市建成区岩溶隧道的渗漏水事故发生频繁, 而对其成因机制、致灾机理以及针对性防治措施的研究还相对匮乏。因此, 以重庆市土主隧道渗漏水事故为典型案例, 探讨了该种隧道的主要渗漏水机理, 包括: 因地表排水系统不畅通而使大量地表水汇集于塌陷坑并经垂向通道快速下渗, 引起隧道外水压力急剧上升; 岩溶区围岩裂隙发育且存在多处空洞, 地下水借助岩溶通道汇聚至隧道拱顶, 高外水压力击穿二衬; 隧道设计抗水压衬砌厚度不足, 排水通道易堵塞, 外水压力易远超设计值, 引发二衬破损。据此提出的防治措施核心思路为: 充分考虑岩溶通道风险, 利用地质雷达等技术, 精准定位漏水点和岩溶通道; 优化施工方案, 减少施工扰动; 依实际地质条件合理选择堵排模式, 预留充足排水能力或强化抗水压衬砌强度; 严格把控施工质量, 确保防排水系统有效运作, 并构建完善的监测和预警体系。此防治措施可为类似工程提供有益的借鉴, 助力提升城市岩溶隧道的建设质量和运营安全性。

关键词: 岩溶隧道; 城市建成区; 岩溶通道; 堵排模式

中图分类号: U457+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0403-07

Mechanism and Prevention Measures of Water Seepage in Karst Tunnels within Urban Built-up Areas

HOU Yuanli, WANG Rui, YANG Huaifu

(Chongqing Surveying Institute, Chongqing 401100, China)

Abstract: In urban built-up areas, the water seepage and leakage accidents of karst tunnel occur frequently. However, research on the causal mechanism, disaster-causing mechanism and targeted prevention and control measures is still relatively scarce. Taking the water seepage accident of Chongqing Tuzhu Tunnel as a typical case, the main seepage mechanisms of this tunnel are discussed. Due to the unsmooth surface drainage system, a large amount of surface water accumulates in the collapse pit and seeps down rapidly through the vertical channel, causing a sharp increase in the water pressure outside the tunnel. The fissures are well developed in the surrounding rock of the karst area and there are multiple cavities. Groundwater converges to the tunnel vault through karst channels. The high external water pressure penetrates the secondary lining. The thickness of the water-resistant lining in the tunnel design is insufficient, which makes the drainage channels prone to blockage, and the external water pressure is likely to far exceed the design value, which causes damage to the secondary lining. Based on this, the core ideas for prevention and control measures are proposed to fully consider the risk of karst channels and accurately locate the leakage points and karst channels by using ground-penetrating radar and other technologies. The construction schemes are optimized to reduce the construction disturbance. According to the actual geological conditions, the blocking and drainage mode should be reasonably selected, and the sufficient drainage capacity should be reserved or the strength of the water-resistant lining should be strengthened. The construction quality should be strictly controlled to ensure the effective operation of the waterproofing and drainage system. The comprehensive monitoring and early warning system is established. The prevention measures can provide the beneficial reference for the similar projects, and help improve the construction quality and operational safety of urban karst tunnels.

Keywords: karst tunnel; urban built-up area; karst channel; blocking and drainage mode

0 引 言

收稿日期: 2025-04-29

作者简介: 侯元立(1992—), 男, 博士, 工程师, 从事岩土勘察工作。

随着城市化进程加速, 地下空间开发已成为缓

解土地资源紧张、优化交通网络的核心策略。城市隧道作为地下交通系统的重要组成部分,承担着连接城市核心区域、提升交通效率的关键职能。然而,在岩溶地貌广泛分布的城市区域,隧道工程常面临复杂的地质挑战,尤其是岩溶发育区水文地质条件的高度异质性,使得渗漏水问题频发,严重威胁着隧道结构的安全和运营稳定性^[1-2]。以重庆市土主隧道为例,该隧道作为城市快速路二横线西段的核心节点,因岩溶区特殊地质条件叠加极端气象事件,于2024年5月突发特大渗漏水事故,导致交通中断、经济损失及公众对基础设施可靠性的质疑。此次事故凸显了岩溶隧道渗漏水机理的复杂性,以及既有设计与防控体系的局限性。

土主隧道事故的直接诱因因为短时强降雨引发地表水通过岩溶垂向通道快速下渗,形成高压外水压力击穿二衬结构。事故段位于三叠系嘉陵江组灰岩地层,岩溶管道与裂隙发育密集,地表塌陷与排水系统堵塞加剧了地下水动态失衡(见图1)。尽管隧道设计采用了“以堵为主、限量排放”的理念,但泄水能力不足、注浆封堵不彻底及二衬抗压强度与排水系统的适配性缺陷,导致局部薄弱区在高水压作用下失效。这一案例表明,岩溶区隧道渗漏水不仅是单一地质或工程因素作用的结果,更是水文地质条件、极端气候、设计施工耦合作用下的系统性风险。

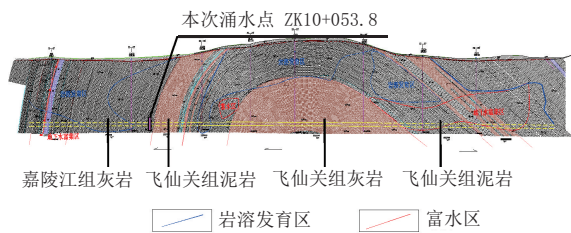


图1 土主隧道纵断面图与漏水点位置

当前,我国城市岩溶隧道建设规模持续扩大,已有大量学者和工程研究人员针对岩溶地区隧道的地质灾害致灾因子、地下水岩溶作用机理、相关的施工处理措施等进行了研究^[3-6],但针对复杂城市建成区的岩溶渗漏水机理、针对性调查和处理手段的系统研究仍显不足。同时,现有规范多基于一般地质条件,对岩溶区地下水动态响应、围岩-衬砌-排水系统相互作用等关键问题缺乏精细化考量。因此,亟需从多学科交叉视角,揭示岩溶隧道渗漏水的形成机制与演化规律,提出针对性调查方案和应对措施,构建兼顾地质适应性与工程经济性的防治技术体系,为城市地下交通网络的安全运营提供理论支撑。

本研究以土主隧道渗漏水事故为切入点,旨在系统揭示城市建成区岩溶隧道渗漏水的多尺度耦合机理,并提出针对性的防治措施。研究目标包括:(1)解析岩溶区隧道渗漏水的动态形成过程,阐明地质构造、水文循环与工程响应之间的相互作用机制;(2)分析极端气象条件和岩溶管道发育对渗漏水风险的贡献率;(3)优化“堵-排-防”协同的工程措施,提升隧道结构在高压富水环境下的耐久性。

研究的科学意义和实践价值体现在两方面:

其一,保障城市交通基础设施安全运营。渗漏水不仅导致隧道结构损伤,还可能诱发次生灾害(如围岩失稳、地表塌陷)。通过厘清渗漏水的发生场景并快速定位渗漏水原因,可为设计阶段的风险预判、运营期的动态监测提供理论依据,避免类似土主隧道的重大事故重演。

其二,降低全生命周期经济损失。渗漏水事故造成的直接修复成本和间接交通中断损失巨大。本研究基于渗漏水机理提出的精细化防治技术,可减少抢险工程中的盲目性和资源浪费,同时延长隧道使用寿命,降低运维成本。

1 工程概况

1.1 隧道基本情况

土主隧道为分离式特长隧道,全长4.0 km,双向6车道,设计速度80 km/h,最大埋深260 m,属重庆市快速路二横线西段的重要组成部分。隧道采用复合式衬砌结构,暗挖段以钻爆法施工,支护结构安全等级为一级,防水等级为二级,设计使用年限100 a。其纵坡呈“人”字形,底板设计高程276.72~304.03 m,抗震设防等级按6度区提高1度执行。隧道连接沙坪坝区、北碚区和两江新区,是串联成渝辅助通道、西部物流园与礼嘉大桥的关键节点,日均交通流量大,承担着区域主干路网的核心功能。作为城市快速路网的骨干工程,其封闭运营对区域交通和经济影响显著,凸显其在城市交通中的战略地位。

1.2 隧道地质条件

土主隧道穿越中梁山构造剥蚀丘陵区 and 低山区,漏水段位于构造剥蚀岩溶槽谷地貌区。槽谷沿观音峡背斜轴部延伸,宽500~800 m,由三叠系嘉陵江组灰岩受溶蚀作用形成,地表发育溶隙、溶沟、落水洞和塌陷坑等典型岩溶地貌,为地下水垂向运移提供了地形基础。

隧址区地层由新至老依次为第四系(Q)素填土

及残坡积层,侏罗系泥岩、砂岩,三叠系嘉陵江组(T_{1j})灰岩、白云质灰岩及盐溶角砾岩。其中,嘉陵江组灰岩呈灰色、隐晶质结构,中厚层状,CaO含量达40%~50%,溶蚀孔洞发育,遇稀盐酸剧烈反应,属较硬岩(Ⅲ级围岩)。受地下水和裂隙影响,围岩级别修正为Ⅳ级。

区域构造属川东南新华夏构造体系,隧址区穿越观音峡背斜西翼。背斜轴线呈 $N15^{\circ}\sim40^{\circ}E$,岩层倾向 $265^{\circ}\sim280^{\circ}$,倾角 $80^{\circ}\sim85^{\circ}$,发育2组主要构造裂隙: $J_1(95^{\circ}\sim120^{\circ}\angle15^{\circ}\sim75^{\circ})$ 为张扭性裂隙,宽5~10 mm; $J_2(210^{\circ}\sim225^{\circ}\angle50^{\circ}\sim78^{\circ})$ 为压扭性闭合裂隙。裂隙延伸长度大、充填方解石脉,深部多为硬性结构面,浅部因风化呈软弱结构面。

1.3 隧道水文地质条件

隧址区浅部地下水流向由北向南,深部受区域分水岭控制转向南向北,最终排泄至嘉陵江。土主隧道位于水平径流带,属中深部循环系统,地下水通过溶隙、管道向隧道集中排泄。

区内地下水类型包括岩溶水、裂隙水和孔隙水。嘉陵江组灰岩岩溶含水岩组富水性最强,透水性极强,溶隙、溶洞和暗河管道发育,单孔渗透系数达0.1~1.5 m/d。其富水性受岩性纯度与构造控制,灰岩连续沉积厚度达220~250 m,溶蚀孔洞密集,形成多层岩溶管道(标高150~540 m)。

岩溶水主要赋存于标高150~540 m的溶隙和管道中,分浅表、中深循环系统。浅表系统以垂直渗入为主;中深系统受嘉陵江侵蚀基准面控制,水平径流显著(见图2)。岩溶水补给以大气降雨为主,槽谷、落水洞和裂隙为入渗通道。径流路径受背斜轴部纵张裂隙控制,沿灰岩层面向北运移,最终排泄至嘉陵江。隧道建设后,地下水排泄点被人工截夺,加速了浅层水向深部系统的越流补给。

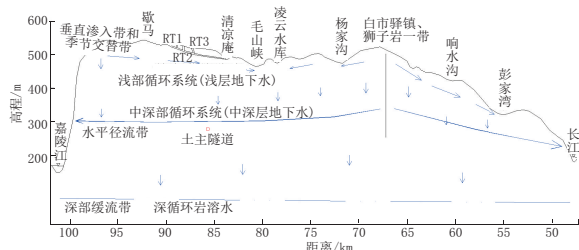


图2 隧址区岩溶地下水径流系统示意图

1.4 渗水部位地质情况

土主隧道渗水段位于左线 $ZK10+048.8\sim ZK10+053.8$ 里程处,围岩属三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})灰色微晶灰岩、泥质灰岩,夹生物碎屑灰岩及鲕状灰

岩。岩体隐晶质结构,中厚层状,CaO含量40%~50%,遇稀盐酸剧烈反应,溶蚀孔洞发育,局部见溶蚀结晶现象,岩芯呈中短柱状。受地下水和裂隙影响,围岩级别由Ⅲ级修正为Ⅳ级(见图3)。该处岩层倾向 $265^{\circ}\sim280^{\circ}$,倾角 $80^{\circ}\sim85^{\circ}$,发育2组构造裂隙: J_1 (张扭性,宽5~10 mm)、 J_2 (压扭性,闭合状),延伸长度大,充填方解石脉或铁锰质,为岩溶水垂向运移提供通道。大地电磁测深(EH4)揭示:漏水段穿越岩溶强烈发育区,周边存在多个岩溶空腔,最大空腔长1.8 m,且隧址区第2层岩溶管道(标高340~370 m)与漏水点标高313.7 m邻近,局部岩溶管道与垂向裂隙连通。

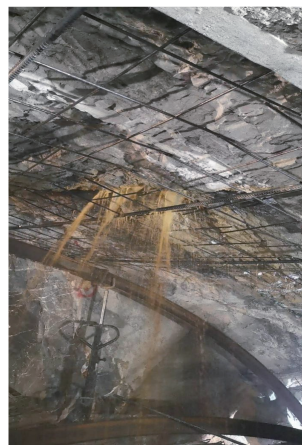


图3 嘉陵江组一段地层K10+24里程段岩溶发育区地层特征

在水文地质上,该段属于高压富水区,外水压力达1.40 MPa。地下水赋存于标高350~400 m溶隙带,受中深循环系统控制,暴雨后地表水通过塌陷坑下渗,经垂向岩溶通道快速补给,形成短时高水头压力。施工期间虽围岩整体较完整,但拱腰右侧揭露直径10 cm岩溶管道,结合二衬背后空洞及注浆封堵不彻底,导致外水压力击穿衬砌薄弱部位,引发集中涌水。渗水点兼具岩溶发育、高水压和结构缺陷三重特征,为典型岩溶隧道渗漏隐患区。

2 岩溶隧道渗漏水机理讨论

土主隧道本次漏水区域所在的嘉陵江组一段为可溶性碳酸盐岩地层,其水文地质情况受岩溶作用影响较大。岩溶发育受到可溶性岩石性质、区域地质构造特征、地下水动力条件、气候等综合因素的影响和制约,而前3种因素是岩溶发育的3个必要条件。因此对岩溶作用的深入探究对于了解岩溶区越岭隧道漏水现象的处理有着重要的指导意义。

2.1 区域内岩溶发育特点

碳酸盐岩中 CaCO_3 含量越高,可溶性越强,岩溶发育程度越高,其连续沉积厚度也影响岩溶发育,调查区内广泛出露的碳酸盐岩为岩溶发育提供了物质基础^[7]。区内的构造格局控制了碳酸盐岩地层的分布、产状,以及岩溶形态的特征、发育位置、方向和程度;岩溶管道展布方向与构造延伸方向基本一致,且与层面相关,存在纵张和横张2组裂隙。流动水环境和空气是岩溶形成的基本条件,地下水系统补给充足、径流广泛发育的区域,易形成岩溶作用^[8-9]。隧址区地质地貌特征反映出不同区域岩溶发育的差异,存在浅部暗河干枯被深部岩溶系统替代即洼地中叠加漏斗、水平溶洞叠加落水洞的现象。地下水流动特征由边界条件和内部介质决定,存在地下水强径流带的地区易形成大的岩溶洞穴。隧址区隧道施工改变了地下水的运移方向和流动速度,加强了岩溶发育和联通。西槽谷因存在较多开放边界,水动力条件较弱,岩溶水以溶隙、裂隙流为主。这些因素相互作用,共同影响着岩溶作用的发育和特征。

土主隧道渗漏水点位所属的嘉陵江组一段岩性较纯, CaO 含量多为 40%~50%, 该区内洼地、漏斗、落水洞和暗河分布较多,同时厚度较大,约 220~250 m。巨厚的纯灰岩形成的构造裂隙往往比较稀疏、宽而长,有利于形成大型岩溶洞穴、暗河管道,岩溶发育不均匀。构造上位于观音峡背斜西翼,倾角陡,可溶岩出露面积较东翼小,且较陡峭垂直的层面也有助于岩溶通道顺层发育,形成垂直岩溶通道;嘉陵江组一段组内地层裂隙发育,岩溶水主要以溶隙、裂隙流为主。此外本区普遍存在着的浅部暗河干枯逐渐被深部岩溶系统所替代,即存在洼地中叠加漏斗、水平溶洞叠加落水洞的现象,因此区域内垂直岩溶通道较为发育。

2.2 地下岩溶水垂直运移

地表区岩溶发育也与地下岩溶水垂直运移密切相关,如岩溶漏斗、落水洞和塌陷。岩溶漏斗和落水洞多与洼地相伴而生,是地表向地下岩溶形态过渡的类型。它形成于地下水垂直循环极为流畅的地区,即在潜水面以上,属岩溶发育垂直作用阶段的产物。落水洞的形成,在开始阶段,以沿垂直裂隙溶蚀为主,当溶隙扩大以后,下雨时,地表大量流水集中于落水洞或漏斗,流向地下暗河。岩溶塌陷则与落水洞有相似的发育机理。

本次抢修过程中多次经历暴雨天气,出现过城

区地表塌陷和落水洞因排水系统再次堵塞后大范围积水现象,并造成再次塌陷,导致隧道内持续漏水(见图4)。可发现地表塌陷对地下深部岩溶水垂直运移有一定的正反馈作用。



(a)隧道内渗水加剧情况 (b)地表落水洞堵塞后大面积积水
图4 城区地表塌陷阻塞后地表积水及隧道内漏水加剧

2.3 岩溶通道不规则发育

岩溶通道的发育是一个复杂的地质过程,受到多种地质因素的共同影响,包括岩石的可溶性、地质构造、地下水的流动路径、气候条件等。在土主隧道所在的区域,岩溶作用显著,由于三叠系嘉陵江组地层的岩性以灰岩为主,具有较高的可溶性,加之区域构造和地形地貌的影响,岩溶通道的发育呈现出 irregularity。

首先,岩溶通道的形成和发展依赖于地下水的化学溶蚀作用和物理冲刷作用,这些作用在不同地层、不同方向的裂隙和节理中表现出不同的强度和速度。在勘探阶段,由于技术和方法的限制,很难全面准确地探测到所有岩溶通道的分布,尤其是那些细小、隐伏或尚未完全发育的通道。

其次,岩溶通道的发育受到地质构造的控制,如断裂、褶皱等,这些构造特征会影响地下水的流动路径和岩溶作用的强度。在勘探阶段,虽然可以通过地质调查和地球物理勘探等方法对地质构造有一个大致了解,但往往难以精确预测岩溶通道的具体位置和发育情况。

再者,气候条件的变化也会影响岩溶作用的强度,如降雨量的多少和季节性变化,这会导致地下水位的波动,进而影响岩溶通道的发育。勘探阶段通常无法完全预测未来气候变化对岩溶通道发育的影响。

本次土主隧道渗漏水段(ZK10+048.8~ZK10+053.8)所在的嘉陵江组一段灰岩区,岩溶通道的发育具有显著的不规律性,这是导致本次渗漏事故难以在勘察阶段完全预见和规避的关键地质背景。同时大地电磁测深(EH4)虽揭示了漏水段穿越岩溶强烈发育区并存在多个岩溶空腔(最大空腔长1.8 m),但在前期勘察中,可能未能完全精确探测到

所有细微、尚未贯通的垂向裂隙(如J1、J2裂隙)及其与第2层岩溶管道(标高340~370 m)在特定点(如标高313.7 m漏水点)的连通关系。这种探测的不彻底性正是岩溶通道不规律发育特性的体现。此外观音峡背斜西翼陡倾地层发育的张扭性裂隙(J1)和压扭性裂隙(J2)为岩溶水提供了垂向运移通道,然而,这些裂隙在空间上的延伸、交汇以及溶蚀扩大的程度极不均匀,形成了复杂且难以完全查明的网络,正是这些未被完全探明或评估不足的垂向通道,在暴雨后成为地表水快速下渗、汇聚至隧道拱顶并形成高压的关键路径。

因此,岩溶通道的发育受到多种复杂地质因素的共同作用,其分布具有高度的不确定性和不规律性,在勘探阶段很难彻底查明其分布。这就要求在隧道设计和施工过程中,要充分考虑岩溶通道可能带来的风险,采取相应的预防和应对措施。

2.4 后期施工扰动影响

岩溶通道,特别是那些原先封闭或半封闭的岩溶通道,可能由于施工过程中的振动、地层应力变化、地下水位的波动等因素而发生变化。这些变化可能导致原先被堵塞的通道松动,甚至贯通,从而引发新的漏水问题。这些影响可能包括:

隧道开挖、爆破等施工活动会产生振动,这些振动可能扰动周围的岩体,特别是对于已经存在裂隙和溶蚀孔洞的岩溶区域。振动可能导致岩体中的裂隙进一步扩展,或者使原本堵塞的溶洞顶部或侧壁的松散物质掉落,从而打开新的通道。本次土主隧道爆破振动很可能加剧了渗水段附近本就发育的J1、J2裂隙的扩展,或震松了充填裂隙的方解石脉和铁锰质等堵塞物,降低了其封闭性,为后期高水压下水流的快速贯通创造了条件。

隧道施工会改变地层原有的应力状态,尤其是在岩溶发育区域,这种应力变化可能加剧岩溶通道的不稳定性。地层应力的重新分布可能导致岩溶管道的变形或破坏,使得原本封闭的通道重新贯通。土主隧道开挖形成巨大临空面,显著改变了隧道周围的地应力场和地下水渗流场。这种改变可能导致该区域岩溶管道和裂隙网络中的应力重新分布,可能促使某些潜在通道贯通或原有堵塞失效。同时,施工期抽排水可能导致局部地下水位波动,对堵塞物产生侵蚀作用。

施工过程中,地下水的排放和引流可能导致地下水位的显著变化。地下水位的下降可能暴露出更

多的岩溶通道,而水位的上升则可能增加水压力,对岩溶通道的堵塞物产生更大的水力侵蚀作用,导致堵塞物的松动和通道的贯通。

在隧道衬砌和防水层施工过程中,如果材料选择不当或施工方法存在缺陷,可能导致防水层与岩体之间的黏结不牢固,或者在衬砌和初期支护之间形成水流通道。这些施工缺陷可能为地下水提供了绕过原设计防排水系统的途径,增加漏水的风险。本次土主隧道漏水点存在二衬背后空洞和注浆封堵不彻底的问题,正是施工质量控制不足的直接体现。这些空洞不仅提供了水流积聚的空间,更使得该处衬砌实际厚度不足、结构不连续,成为显著的薄弱点。同时,注浆不彻底意味着未能有效封闭围岩中的溶隙、裂隙以及可能存在的与岩溶空腔连通的通道,使得高压地下水得以持续作用并最终在结构缺陷处击穿二衬。施工遗留的这些质量缺陷是导致‘以堵为主’设计失效,高外水压力得以集中作用于局部薄弱点并引发击穿涌水的直接工程原因。

3 岩溶隧道渗漏水防治措施

土主隧道渗漏水防治通过地表阻渗、结构补强、排水优化和注浆加固四维协同,形成“防-排-堵-固”一体化技术体系(见图5)。

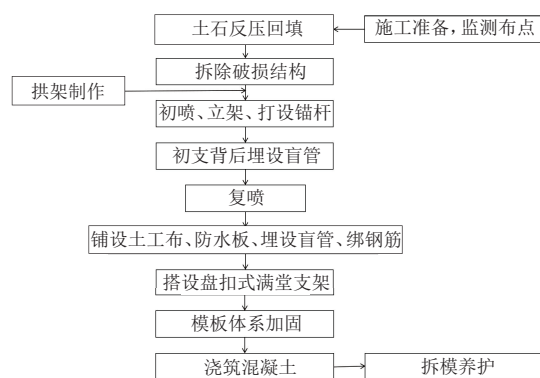


图5 土主隧道漏水抢修工程施工流程图

3.1 地表阻渗

针对土主隧道渗漏事故中地表塌陷和排水系统失效的关键诱因,需构建“源头阻渗-系统疏导”的地表综合防控体系。首先,对已形成的3处椭圆形塌陷坑(直径8~15 m,深度3~6 m)进行彻底处理。在清除坑内松散堆积物和积水后,采用低渗透性材料分层回填。主要回填材料选用红黏土,利用其低渗透性(渗透系数 $k<10^{-7}$ cm/s)有效阻隔地表水垂直下渗。回填施工严格分层(每层压实厚度不大于30 cm),采用重型压路机碾压,确保压实度不小于95%。回

填至地表后,表层覆土植草,防止水土流失和新的侵蚀发生。其次,全面疏通地表建成区排水系统,清除淤积物并修复破损沟渠;在槽谷汇水区上游和隧道轴线两侧潜在汇水路径上,增设或完善截水沟和沉砂池,将地表径流引导至外围河道。对于高风险汇水区,采用透水混凝土改造地表,降低短时强降雨的集中下渗量。

3.2 结构补强

基于破损二衬检测结果(局部厚度不足45 cm、钢筋保护层偏差 ± 8 mm),采取“分段拆除-强化重建”的修复方案。(1)采用I20a型钢钢架(间距1 m)进行临时加固;随后采用纵向逐段、环向先拱顶后边墙的拆除顺序,每次拆除纵向长度严格控制在1 m以内;再使用机械破碎锤或风镐进行凿除,避免对保留结构造成损伤。(2)架设I20a型钢拱架作为新的初期支护核心,拱墙范围全环施作R25自进式锚杆,喷射C25混凝土,形成完整受力壳体。(3)用C35防水混凝土重筑二衬,并在初支表面重新铺设无纺布缓冲层和厚2.0 mm EVA防水板;待二衬混凝土强度达到设计要求后,严格按照原设计参数对衬砌背后可能存在的空洞进行注浆回填,确保二衬与初支密贴。锚杆铺设示意图见图6。

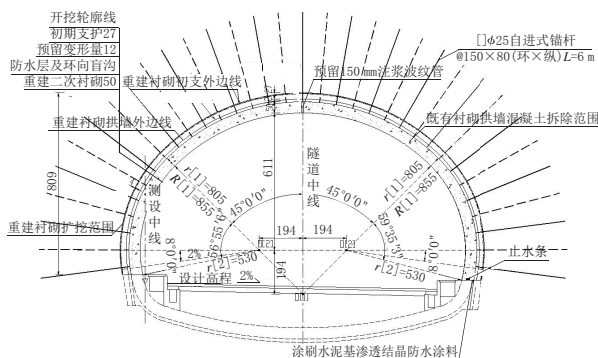


图6 锚杆铺设示意图(单位:cm)

3.3 排水优化

根据邹育麟等^[10]对重庆岩溶地区现役运营隧道的调研,“排为主,堵为辅”的治理原则更符合重庆一类的山地城市岩溶隧道的治理工程。因此,构建“立体排水-动态调控”的洞内排水体系,实现外水压力分级消减,对于渗漏水治理具有重要意义。首先,在渗漏水风险区段(左洞破损段前后延伸段、右洞有渗漏痕迹段)的两侧拱脚处,钻设径向泄水孔,以释放衬砌背后的积水,直接降低作用在衬砌上的外水压力,同时在富水区段的一般部位,每2榀钢架设置1道环向 $\phi 80$ 双壁打孔波纹管盲沟,将水有序引至排水沟;其次,在右洞富水区段以往有漏水痕迹的施工

缝及其前后段,以及左洞修复段邻近的施工缝,增设不锈钢接水盒;最后,将原设计边沟在ZK10+040~ZK10+060段和右洞对应高风险区扩容改造为 $\phi 120$ mm排水管,以显著提升其过水能力。

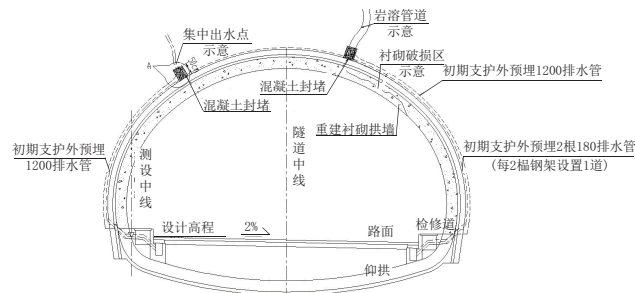


图7 衬砌排水设计

3.4 注浆加固

针对围岩空洞和渗漏通道,实施“精准注浆-分序充填”技术:采用超细水泥+水玻璃双液浆、微膨胀环氧树脂浆液灌注细微裂隙。

实施时严格控制注浆参数控制,并对ZK10+040~+060段实施3序注浆。一序注浆针对大空洞和主要岩溶管道;二序注浆针对一序注浆后残留的较小空隙和较宽裂隙;三序注浆针对细微裂隙和封堵效果检验中发现的局部渗漏点。最后注浆结束后,通过钻孔取芯、压水试验、地质雷达复测等手段,综合检验注浆充填的密实度和堵水效果,确保达到预期目标。

4 城市建成区岩溶隧道勘察施工和漏水抢修工程指导思路

(1)充分调查地表地形特点、汇水条件、地表排水设施情况,尤其是城市建成区排水情况,了解落水洞和潜在岩溶塌陷分布。施工前及施工过程中严格监测地表排水情况,避免因排水阻塞导致落水洞或潜在塌陷区大面积汇水。同时对落水洞和塌陷进行提前封堵,避免汇水通过垂向岩溶通道快速进入隧道工程区域。尤其需避免施工或抢修过程中地表塌陷造成的隧道多次漏水。

(2)充分认识岩溶发育区岩溶通道的展布规律和形成机理,应重视结构面、溶隙等大量发育或层面倾角不利的区域。尽管由于岩溶通道的不规则发育,勘查阶段无法对岩溶通道的发育做到完全识别,但仍应对潜在风险区进行划分。对于高风险岩溶发育区域、地下水富水区域,需进行超前预报,提前作好堵、排水措施和应急预案。

(3)隧道设计需结合实际考虑堵排模式。对于

“以排为主”的隧道设计,需预留足够排水能力的泄水通道;对于“堵排结合”的隧道设计,需在保证泄水能力的同时加大抗水压衬砌的强度。以堵为主时,加强堵水效果,且排水标准应严格执行;同时不能按照隧道平均排水量进行控制,需要对关键位置提出特殊的设计要求。

(4)保障设计和施工品质,充分考虑勘察建议的外水压力以及相关设计参数,尤其不可忽视极端条件的相关参数,避免二衬厚度不够导致局部存在相对薄弱位置,或施工期间因注浆堵水不到位导致的在洞壁产生高水头的外水压力。

(5)充分考虑后期施工对岩溶通道等地下水系统的影响。在施工阶段优化施工方案,选择合适的施工方法和材料,减少对岩溶通道的扰动;同时加强隧道衬砌和防水层的施工质量控制,确保防排水系统的有效性;在施工的同时建立完善的监测和预警系统,及时发现并处理施工过程中可能出现的漏水问题。

5 结 语

(1)城市建成区岩溶隧道渗漏水风险的一般表现为:极端暴雨通过地表岩溶垂向通道快速下渗,在封闭的岩溶管道系统中形成瞬态高压外水;岩溶发育区围岩裂隙网络和空洞群为地下水向隧道拱顶汇聚提供了优势路径;隧道二衬存在结构薄弱点。三者叠加导致高外水压力集中击穿隧道衬砌,造成渗漏。隧道设计“以堵为主”模式中排水能力不足,无法及时消减动态水压峰值,进一步放大了风险。

(2)防治措施需立足系统性防控。前期应精细化勘探岩溶通道空间展布,重点查明垂向渗流路径和富水空腔;设计依据外水压力极值优化衬砌抗压强度和排水容量,高风险区优先采用“堵排协同”策略,预留分级泄压通道;同时严格监控城市地表排水系统效能,对汇水洼地、塌陷隐患区实施低渗透性封堵,阻断地表水垂向补给;施工阶段需最小化岩溶扰动,并建立衬砌密实度和注浆效果量化验收标准,杜绝结构缺陷。

参考文献:

- [1] 徐荣文,张建.高楼山隧道季节性渗漏水成因分析及治理方案[J]. 科技与创新, 2024(16): 91-97.
- [2] HE Chuan, WANG Bo. Research progress and development trends of highway tunnels in China [J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 209-223.
- [3] 王鹰,陈强,魏有仪,等.岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 55-58.
- [4] 李利平,李树才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1345-1355.
- [5] 王帅.隧道渗漏水的原因及处置方案[J]. 工程技术研究, 2020, 23(7): 154-155.
- [6] 张永生,吴奇靖,马强.岩溶地下水场地勘察所面对的问题及处理方案[J]. 地下水, 2024, 46(4): 54-56.
- [7] 武鑫,王艺霖,黄敬军,等.徐州地区碳酸盐岩溶蚀特征及影响因素分析[J]. 地质科学情报, 2019, 38(3): 120-126.
- [8] 张政.岩溶地区公路隧道渗漏水处治原则研究[D].成都:西南交通大学, 2014.
- [9] 张之淦.岩溶发生学[M].桂林:广西师范大学出版社, 2006.
- [10] 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.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

