

庄旭峰,孙 东.实例分析隧道建设对岩溶水的影响[J].中国岩溶,2016,35(6):681-687.
DOI:10.11932/karst20160610

实例分析隧道建设对岩溶水的影响

庄旭峰,孙 东
(中国中铁二院工程集团有限公司贵阳公司,贵阳 550000)

摘 要:贵州省是岩溶地貌发育的地区,在进行铁路建设时经常遇到隧道工程与地下岩溶水系统相互干扰的问题,文章以磨雄隧道和银山隧道为例,借助大地电磁解译和 MIDAS-GTS 程序计算,阐述岩溶地下水系统与隧道建设的不和谐关系。磨雄隧道施工后,居民饮泉点干涸,水位未按预期设计恢复,造成原本饮水紧缺的山区雪上加霜;银山隧道施工中遭遇罕遇暴雨,竖直侧墙被突增岩溶水压爆,侧墙破坏长度达 20 m,中断列车通行超过 24 h。因此建议贵州地区隧道建设的前期选线时,要查清岩溶地下水系统边界,尽量避让岩溶强烈发育地段,设计期应充分考虑岩溶水可能造成的危害,施工期对所遇岩溶水通道宜通不宜堵。

关键词:岩溶水;隧道建设;突泥突水;隧道病害;贵州

中图分类号:U45;P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)06-0681-07

0 引 言

在隧道工程建设中往往只注重施工安全,对自然环境的协调性和人文环境的影响却未得到应有的重视。在隧道建设施工中,可能造成山区仅有的岩溶泉水干涸,或揭露地下岩溶管道在建设期造成突泥突水,或因旱季岩溶水管道干涸,在施工建设时并未引起重视而使岩溶水管道被封堵,造成建成后轨面翻浆、衬砌挤爆等隧道病害。因此,在勘察设计时,查清岩溶地下水系统边界,充分考虑岩溶水可能造成的危害,综合协调岩溶水与隧道建设的关系显得格外重要。

目前,国内外关于岩溶的学术研究仍偏重于岩溶水及岩溶对隧道安全的影响,隧道施工对岩溶水环境的影响分析较为困难,缺少较成熟的模拟分析程序和较为成功的工程案例以及相关的学术资料。作者结合工作中遇到的两个特殊隧道案例,以磨雄隧道为例,阐述隧道建设对岩溶径流系统的影响;以银山隧

道为例,采用 MIDAS-GTS 系统三维仿真模拟正常情况和岩溶水压下隧道二衬的内力与位移,分析隧道建成后岩溶水对隧道的影响,以期今后类似隧道选线、设计及施工等处理方案提供参考。

1 黄织线磨雄隧道工程特征

1.1 地形地貌

磨雄隧道是黄织铁路的控制性工程,全长 1.618 km。隧址区属中低山区,相对高差 250~300 m,地形起伏强烈。山脊线呈 NE 走向。主峰磨雄大坡海拔 1 501.8 m,为地表分水岭,山脊线 SE 侧为碳酸盐岩地段(T_1d),溶蚀山丘洼地相间,植被不发育,基岩裸露多;局部地表溶蚀严重,形成溶沟、石芽,平缓斜坡及洼地被开垦为旱地。山脊线 NW 侧为二叠系含煤地层龙潭组(P_2l),地表大部为林地,部分垦为旱地,自然斜坡陡缓不均,基岩零星出露,地表沟壑纵横,许多冲沟内常年有水,但水量较小,冲刷微弱^[2]。

第一作者简介:庄旭峰(1987—),男,硕士,工程师,主要从事勘察设计。E-mail:1041208077@qq.com。
收稿日期:2015-09-14

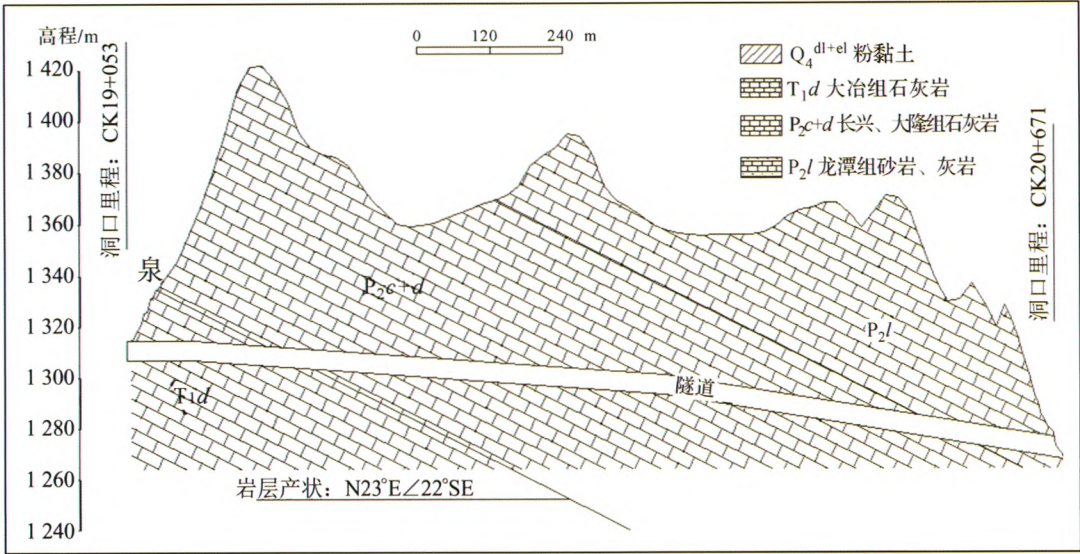


图 1 磨雄隧道地质剖面图
Fig. 1 Geological cross section of the Moxiong tunnel

1.2 地质特征

隧道测区位于普定向斜 NW 翼,地质构造单一,为单斜构造,隧道洞身附近岩层产状: $N20^{\circ}\sim 40^{\circ}E/N22^{\circ}\sim 30^{\circ}SE$,岩层走向与线路呈 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 斜交,区内无断层构造,局部软质岩地段发育有小褶曲。

隧道洞身地表覆盖第四系冲洪积(Q^{al+pl})粉质黏土、残坡积(Q^{el+dl})黏土和粉质黏土;隧道穿越三叠系大冶组(T_1d)、二叠系长兴组和大隆组(P_2c+d)及龙潭组(P_2l)地层(图 1)。

1.3 岩溶水

岩溶水发育于隧道进口段石灰岩地层(T_1d),长度约 520 m,以岩溶管道水为主,主要由大气降水补给,部分为基岩裂隙水补给,岩溶管道直接与地面落水洞相通,成为地表水排泄通道。隧道上方有两个封闭洼地,大气降水汇集于此,但暴雨后无并积水,地表水从落水洞直接流向岩溶管道进入地下,成为地下水。从 CK19+096 左(北)139 m 处(井泉点 CShm—

4)流出地表,出水点高程 1 340 m。隧道洞身处岩溶管道水为承压潜水,因此水量集中,地表水补给迅速。从野外调查来看,灰岩段地下水露头均高于隧道路肩标高,表明隧道位于压力饱水带中,加之岩溶极发育,该段地下水则可能通过溶蚀裂隙或管道汇集于隧道建设区。因此地下水具有突发性、集中性的特点,特别是暴雨后,隧道涌水量可能迅猛增大,极有可能发生突水、突泥灾害。

1.4 保护水环境的设计方案

CK19+096 左(北)139 m 处井泉点水为当地居民饮用水源,对村民的生产、生活至关重要。隧道位于水源下方,隧道施工存在切断岩溶水通道、打漏泉水的风险,因此,主动保护水源,保证岩溶水地下管道径流畅通,防止泉水渗漏是隧道施工全过程的指导思想。

经探测(图 2),地下岩体整体结构完整,局部较为破碎,应为地下水径流通道,因此,隧道施工中产生突水、造成上部泉水干涸的可能性极大。

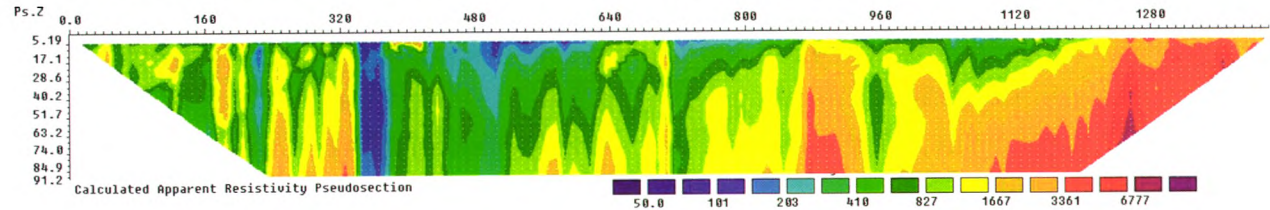


图 2 磨雄隧道物探图
Fig. 2 Geophysical prospecting map of the Moxiong tunnel

为确保泉水不断流和施工安全,首先在地表泉点与隧道间沿硐轴线增设防渗帷幕,地表帷幕深入隧道

底板下方,帷幕宽度 4.5 m,为 3 排 $\phi 108$ mm 注浆孔。洞内全断面径向小导管注浆,注浆管直径 ϕ 为

42 mm,长度为 5 m。浆液采用水泥—水玻璃双浆液,目的是减小下游渗透系数,防止因下部施工造成渗透系数加大,泉水漏失,水位下降。

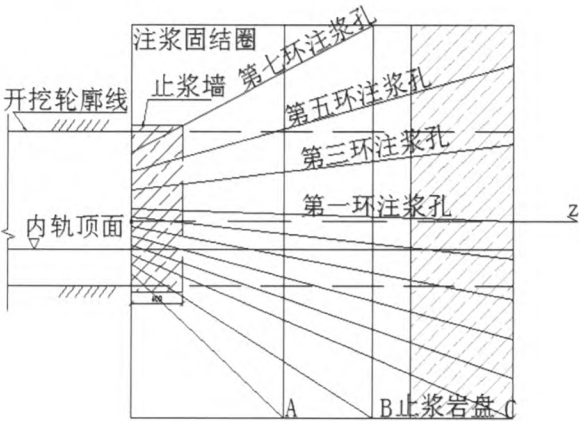


图 3 洞内帷幕工艺图
Fig. 3 Curtain drawing process in tunnel

1.5 处理效果及问题反馈

按照设计方案施工后,隧道施工过程中未发生安全事故,顺利贯通,然而地表水源水量却大幅度减少,说明地下水径流通道被扰动。

后经过近两个水文年观测,泉水仍未回复到施工前的流量,推测可能由于洞内帷幕注浆的长度和深度不够,或是施工时放炮等震动造成深层渗透系数增大。由于工程的不可逆转性,未能对推测进行二次试验。为稳定当地居民,最终选择投巨资外调水源,而未投入经费再进行回水的后续研究。

通过此实例笔者体会到,今后若有相类似地质条件的隧道建设,施工中应控制爆破药量,减小围岩破

碎圈,同时,加强来水侧注浆处理,达到保护水源的目的。岩溶地下水通道错综复杂,地下水径流路径难以把握,尽管人们利用钻探、物探、模拟等手段全面分析模拟,但理论的水流路径很可能与实际径流路径差别较大,很难准确解析、把握。若施工山区水源紧缺,泉水为当地居民唯一饮用水源时,建议隧道建设选线时应尽量远离水源点,以达到保护水源的目的。

2 水柏线银山隧道工程特征

2.1 地形地貌

银山隧道是水柏铁路线的重要工程,主洞长 3.185 km。隧址区属于中低山溶蚀地貌,自然坡度为 15°~20°,平缓地带多为旱地,局部有陡坎,其余地带多为基岩裸露,植被不发育。施工段内上覆土层较薄,基岩大部分为硬质岩,但灰岩溶蚀严重,岩溶发育。银山顶部封闭溶蚀洼地、落水洞、漏斗、倒悬等零星分布。

2.2 地质特征

该隧道由进口至出口依次穿过三叠系下统永宁镇组灰岩夹泥质灰岩(T_{1yn} ,薄至中层状,溶蚀严重,洞内长约 1 008 m)、三叠系中统一段泥质白云岩夹泥岩(T_{2g}^1 ,薄至中层状,洞内长约 1 415 m,灾害发生地段)、三叠系中统二段灰岩泥质灰岩(T_{2g}^2 ,中厚至巨厚层状、溶蚀严重、岩溶发育、洞内长约 980 m)、三叠系中统三段白云岩夹泥岩(T_{2g}^3 ,中厚层状、溶蚀严重、洞内长约 485 m);岩层倾向与隧道出口方向交角为 35°~50°,倾角为 20°~25°^[3](图 4)。

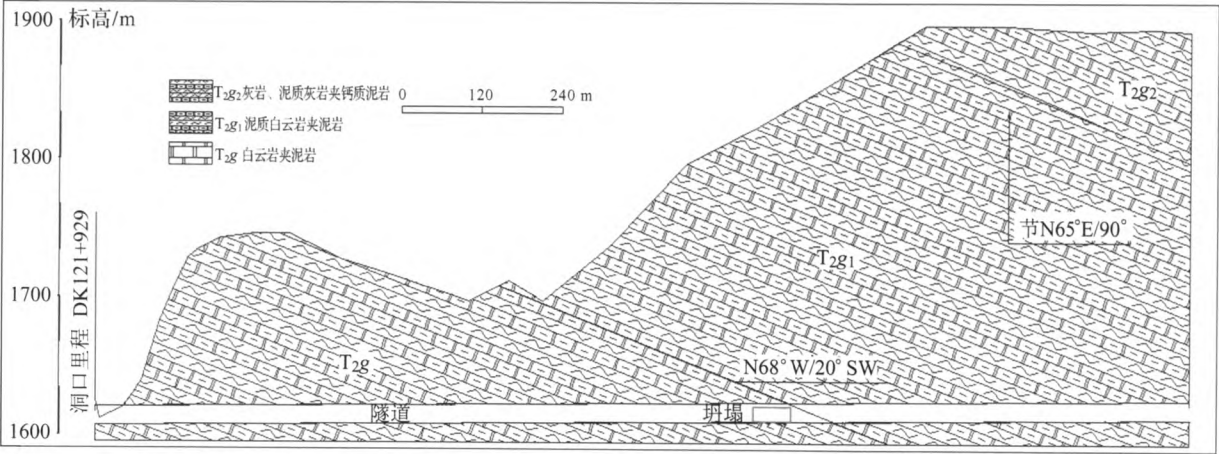


图 4 银山隧道进口端地质剖面图
Fig. 4 Geological profile at entry of Yinshan tunnel

2.3 岩溶通道及岩溶水

隧道洞顶洼地、落水洞密布。隧道施工揭露岩体可见多处发育溶蚀破碎带、溶洞。岩溶水主要为降雨补给,季节性较为明显,旱季溶洞基本干枯,雨季地表汇水量较大,岩溶通道内水流湍急,形成暗河。

2.4 病害特征及问题分析

2014 年 9 月 5 日凌晨,隧道所在区域内突降大暴雨,局部时段降雨量高达 127 mm/h,降雨造成多处民房屋被淹或倒塌,并诱发多处山体滑塌及小型泥石流。9 月 5 日 5 时 10 分,银山隧道 K102+780~+800(设计里程 DK122+817~+837)段左(北)侧边墙被墙后高压水挤裂,导致墙体折断、倾倒及垮塌,造成行车中断。



图 5 左(北)边墙挤裂、折断、倾倒

Fig. 5 Compressive crack, break and toppling of left wall

银山汇水面积较大,加之隧道上方岩溶洼地及落水洞密布,暴雨期岩溶通道瞬间形成地下暗河,银山隧道埋深两百多米,隧道附近岩溶通道一旦堵塞,瞬时对隧道衬砌产生近百米水柱的压力,破坏力极大。笔者尝试用建立 MIDAS-GTS 三维有限元仿真模型,对比分析正常情况及左(北)侧侧墙施加百米水柱后衬砌的内压力及变形量。

2.5 MIDAS-GTS 三维有限元仿真模型分析

本次计算分析按照平面应变进行假设,采用结构一荷载模式,根据地下结构的埋深以及穿越土层的

地质特点,将结构覆土换算成上覆土荷载和侧土压力,施加在结构上进行结构内力计算,水压力法向作用于隧道二衬上。隧道二衬承受荷载分布如图 6 所示:

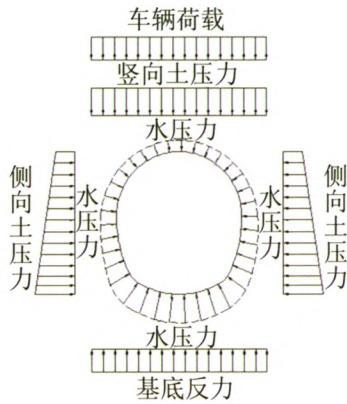


图 6 荷载分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of load distribution

2.5.1 计算模型

二衬采用弹性梁单元模拟,计划分为 66 个单元。隧道与围岩相互作用,围岩对隧道的支反力采用只能受压的径向曲面弹簧单元模拟。

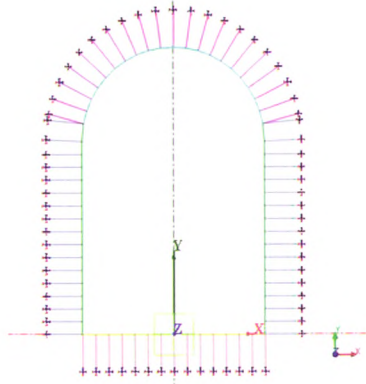


图 7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

2.5.2 计算参数

围岩及衬砌材料的物理力学指标取值见表 1 与表 2。计算中考虑复合式衬砌背后完全回填密实,计算均假定衬砌背后围岩能提供弹性反力。

表 1 围岩计算参数表

Table 1 Calculation parameters of surrounding rock

围岩	重度/ KN/m ³	综合内摩擦 角 $\varphi_c/^\circ$	摩擦角 $\theta/^\circ$	隧道宽度/ B/m	压实系数 λ	弹性抗力系数/MPa	
						水平	垂直
强风化灰岩	26.2	50	$0.5\varphi_c$	11.2/6.7	0.16	250	300
中风化灰岩	26.7	55	$0.7\varphi_c$	11.2/6.7	0.14	500	600

表 2 衬砌材料参数表
Table 2 Parameters of lining material

材料名称	衬砌力学指标			
	$\rho/\text{kN}/\text{m}^3$	E_c/GPa	R_a/MPa	R_t/MPa
C35 钢筋混凝土	25	32.3	26	2.5

2.5.3 模拟结果分析

左(北)侧侧墙施加百米水柱前、后衬砌的内力及变形量对比图如下:

通过云图对比分析:正常状况下二衬位移量为 2.59 mm,线路左(北)侧侧墙施加水压后位移量变为 38.4mm。

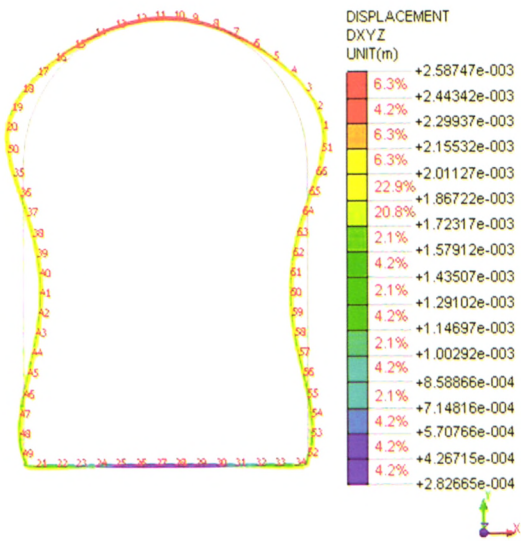


图 8 水压前竖向衬砌变形图
Fig. 8 Displacement of the vertical lining before water pressure is loaded

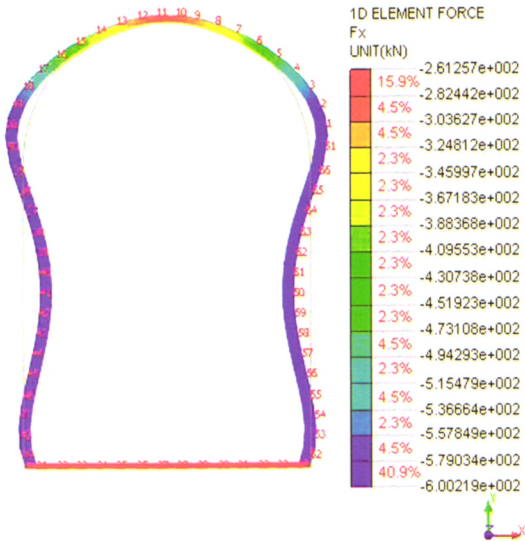


图 10 水压前衬砌轴力图
Fig. 10 Axial stress before water pressure is loaded

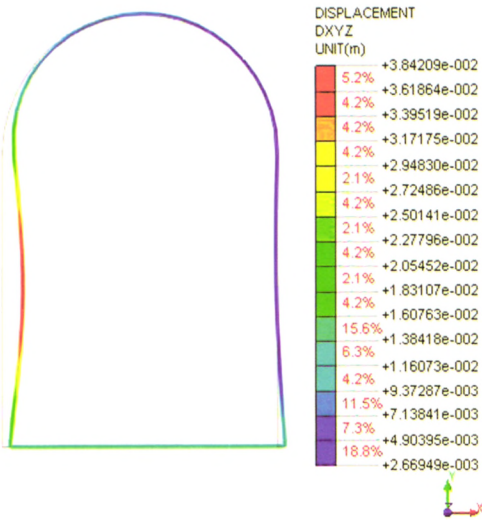


图 9 水压后竖向衬砌变形图
Fig. 9 Displacement of the vertical lining after water pressure is loaded

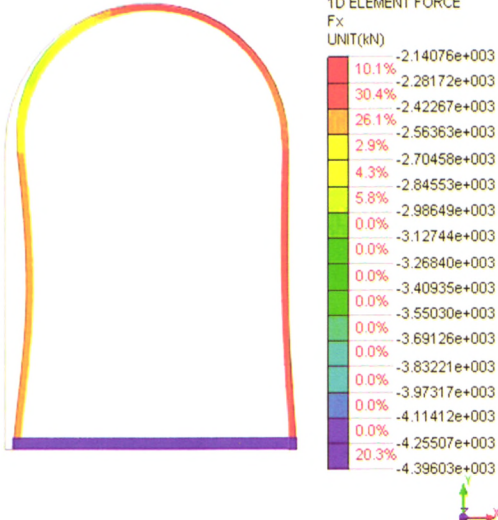


图 11 水压后衬砌轴力图
Fig. 11 Axial stress after water pressure is loaded

通过云图对比分析:正常状况下二衬轴力为 2.61×10^2 KN,线路左侧侧墙施加水压后二衬轴力变为 2.14×10^3 KN。

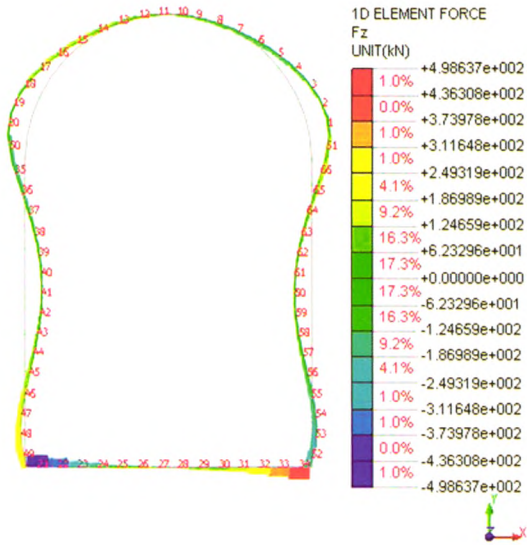


图 12 水压前衬砌剪力图

Fig. 12 Shear stress before water pressure is loaded

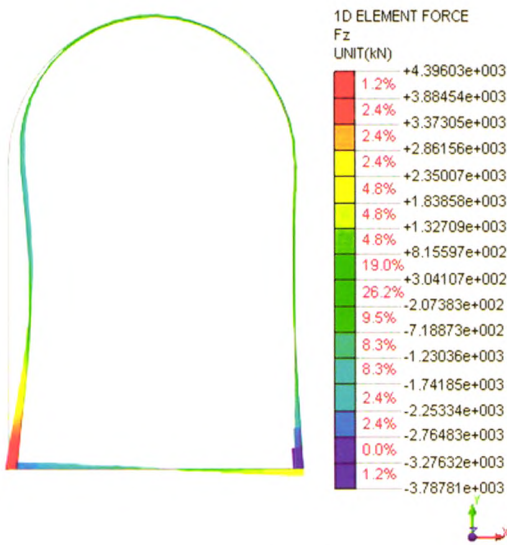


图 13 水压后衬砌剪力图

Fig. 13 Shear stress after water pressure is loaded

通过云图对比分析:正常状况下二衬剪力为 4.986×10^2 KN,线路左(北)侧侧墙施加水压后二衬剪力变为 4.396×10^3 KN。

通过以上数据可以看出,在瞬时水柱下产生的位移量、轴力及剪切力均为正常情况下的 10 倍左右。基于以上分析,减压泄水是类似工程的关键,修筑集水廊道、疏通岩溶管道是根治此类病害的较好选择。

3 结论与讨论

通过分析隧道建设工程和水环境的紧密联系和相互影响,在岩溶区进行隧道建设中必须注意以下几方面的问题:

(1)岩溶水径流路径复杂,隧道建设必然会扰乱地下水径流系统,目前尚未找到较为理想的处理措施。对于岩溶泉为当地主要水源时,在选线阶段尽量不要以隧道形式通过,无法避免时需考虑补水水源措施。

(2)对于隧道上方山体汇水区域较大,山顶岩溶洼地、漏斗极发育地段在选线阶段尽量采取避让措施,无法避开时,施工图设计阶段必须充分考虑岩溶水给排突变的影响,在施工期间加强超前地质预报工作。

(3)隧道开挖若遇到岩溶管道应尽量疏通,对于开挖揭露的干枯岩溶管道或间歇性岩溶管道,需经设计方进行暴雨汇水对隧道衬砌影响的专项论证及处理,不能盲目填堵,以防在运行期遇到罕见暴雨,岩溶管道充水对隧道衬砌产生较大水压力影响隧道稳定。

(4)多数隧道在建设过程中虽未遇到异常,但建成后路面翻浆、侧墙涌水时有发生。如贵阳市内多条新建城市隧道投入使用后,遇到丰水期路面出现冒水、喷水现象,造成行车中断等不良的社会影响;而部分隧道建设时铺设横向排水盲沟、侧沟或设置中心水沟却未出现此类灾害。因此,提高岩溶区地下水排泄管道的探测精度,在设计中优化隧道排水工艺,对预防和减少灾害发生是十分必要的。

岩溶水处理的困难之处在于把握径流轨迹,目前的物探方法尚不能准确判别岩溶水流的路径,有关科研部门若能在判断岩溶水渗流路径方面取得突破,将会对可溶岩地区基础建设产生较大的安全及经济效益。

参考文献

[1] 蒙彦,雷明堂.岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J].中国岩溶,2003,23(4):287-292.

[2] 铁道部第二勘察设计院.黄织线磨雄隧道勘察报告[R].2008.4.

[3] 铁道部第二勘察设计院.水柏线银山隧道抢险纪要[R].2014.9.

[4] 牟忠霞,潘海泽,黄涛.石太客运专线特长隧道岩溶水对隧道影响研究[J].地下空间与工程,2009,5(3):87-89.

[5] 吕言新,张猛,董之龙.富水岩溶隧道注浆堵水技术研究[J].中国矿山工程,2012,41(1):60-63.

[6] 杜毓超,李兆林,韩行瑞,等.沪蓉高速公路乌池坝隧道区岩溶发育特征及其涌水分析[J].中国岩溶,2008,27(1):11-17.

[7] 尚红林,徐鲁勤.基于 FLAC3D 模型的新集一矿岩溶水危险性研

究[J]. 中国煤炭地质,2011,23(3):31-38.

[8] 曹柏树. 复杂岩溶地区长大隧道工程地质勘测及评价[J]. 铁道勘察,2004,(1):37-40.

[9] 李新平,代翼飞,胡静. 某岩溶隧道围岩稳定性及涌水量预测的流固耦合分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2009,39(4):1-6.

[10] 吴治生. 岩溶隧道的环境地质问题[J]. 铁道工程学报,2006,(1):70-73.

[11] 胡树林. 超高密度电阻率法在岩溶及破碎带探测中的应用[J]. 物探与化探,2011,35(6):821-824.

Influence of tunnel construction on karst water: Case analyses

ZHUANG Xufeng, SUN Dong

(Engineering Group Co. Ltd. , Second Institute of China Railway, Guiyang, Guizhou 550000,China)

Abstract Karst areas and karst water are widely present in Guizhou Province. The interaction between tunnel construction and karst water has long been a problem encountered in railway projects in Guizhou. Using the Moxiong and Yinshan tunnels as examples, this paper attempts to address this issue. Via the interpretation of magnetotelluric data and the application of MIDAS GTS, groundwater problem and its disharmonious relationship with the tunnel are analyzed. After the construction of the Moxiong tunnel was commenced, the groundwater level dropped and did not recover as expected in the springs at nearby residences, leading to the withering of the springs and severe water shortage in the communities. Yinshan tunnel on the other hand had experienced a severe rainstorm, as a result the karst water pressure elevated and eventually blasted one of the vertical side walls, which damaged the tunnel in a length up to 20 meters, interrupting train pass for more than 24 hours. The lessons from these examples suggest that when selecting the tunnel line in Guizhou, the boundaries of karst water systems should be clarified to avoid the areas with well-developed karst water. In the design stage, full consideration should also be taken to avoid any possible hazard from karst water. During the construction of tunnels, the karst channels encountered should be dredged rather than plugged.

Key words karst water, tunnel construction, water inrush, tunnel problem, Guizhou

(编辑 张玲)