

文章编号:1000-582X(2012)02-028-07

## 深埋隧道填充型溶腔溃水机制及风险识别

刘新荣<sup>1</sup>,张旭东<sup>1</sup>,黄 明<sup>1,2</sup>,李晓红<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045;2. 福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

**摘 要:**结合国内外岩溶隧道修建过程中涌、突水灾害的特征分析,将大体量且有一定静储量的高压岩溶水瞬间释放,并伴随突泥、突巨石的特殊涌水定义为岩溶溃水;基于宜万铁路马鹿箐隧道特大岩溶溃水灾害分析,得到了岩溶溃水的基本特征,通过分析岩溶溃水的机理获得了构成岩溶溃水风险的几个主要因素;基于理论分析、数值模拟等方法,并结合现场工程经验,对岩溶溃水风险发生的几个门槛条件进行了初步的确定;针对溃水风险识别的实施方案,提出了超前水平钻探并结合放水试验和闭水试验的方法。

**关键词:**岩溶溃水;岩溶水规模;风险识别

**中图分类号:**U457+.2

**文献标志码:**A

## Feature and risk identification of super karst water burst in deeply buried karst tunnel

LIU Xin-rong<sup>1</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1,2</sup>, LI Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, P. R. China)

**Abstract:** With the acceleration of tunnel construction, emerging issue of high-pressure karst water burst becomes more and more complex, and the study subject of analyzing and grasping its features and taking effective risk control measures is still a world-class long-standing puzzle. Based on the feature analysis of the karst water burst disaster during the construction of karst tunnels at home and abroad, the special water burst accompanied with high pressure water burst, earth burst and rock burst is defined as super karst water burst. With the analysis of super karst water burst which happened in Maluqing Tunnel of Yi-Wan Railway, five basic characteristics of super karst water burst are obtained, and its risk sources are also identified from the respects both of geology and human engineering activities. Based on the theoretical analysis, numerical simulation and on-site engineering experience, several threshold conditions for the occurrence of super karst water are identified. In response to implementation plan of risk identification, the method of advanced horizontal drilling with drainage test and closed water test is also proposed.

**Key words:** super karst water burst; scale of karst water; risk identification

收稿日期:2011-08-05

基金项目:国家自然科学基金李晓红创新群体项目(50621403);教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-05-0763);重庆大学研究生科技创新基金资助(200811A1A0090298)

作者简介:刘新荣(1969-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩土工程、地下空间与工程等方向研究,  
(E-mail)liuxrong@126.com。

高压岩溶水和大规模的岩溶发育带来的工程灾害问题,一直是隧道安全施工的亟待解决的技术难题。渝怀铁路的圆梁山隧道、歌乐山隧道、武隆隧道等的岩溶突水问题,曾引起铁路工程界广泛关注。随着我国现代化建设进程的推进,铁路工程进入了岩溶高度发育的所谓隧道建造“禁区”,“超级”规模的岩溶突水问题凸显。2006年1月12日,在建的宜万铁路马鹿箐隧道,发生瞬间涌水量达  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  的突水事故,140 min 内涌水总量  $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,涌水淹没了隧道坑道,并冲毁洞口设施,把重达 14 t 的矿车冲到 200 m 以外,“超级”规模的突水显示了极大的破坏力。其后 2 年建设期内,在隧道的进出口不同方向,发生单次 10 万  $\text{m}^3$  以上的突水共 5 次。“超级”突水灾害的强大的破坏力使隧道工程的防灾问题面临新的挑战,因此如何更为准确地掌握这种“超级”突水灾害的形成机理将成为灾害预防及处置的关键。

对于岩溶突水的成灾机理研究,David J. Weary 和 Randall C. Orndorff 等<sup>[1]</sup>利用岩层信息构件概念模型,以此了解岩溶地区铅锌矿对大溶泉的影响,认为沿着岩层面的溶管、溶洞提供了地下水补给、运动、排泄的通道。通过对节理的走向进行研究,发现其是否控制溶洞、溶管的方向。F. Gabrovsk<sup>[2]</sup>基于石灰岩岩溶含水层建立在长度和深度演化的新模型,描述洞穴随时间的演化情况,并利用该模型对深 30 000 mm,长 200 000 mm 的含水层进行计算,定性描述了岩溶水扩展机制。Michael<sup>[3]</sup>等从洞穴坍塌机制入手,提出用土体两种潜在破坏准则评价土体塌陷稳定性及塌陷形成或对上部的影响的结构简化方法。Rudolf Liedl 等<sup>[4]</sup>采用包括岩溶系统的水

力学、溶解动力学在内的复杂模型方法对岩溶产生的控制机制进行了研究。高导水地存储和管道网络和低导水高存储的岩体相互作用控制着岩溶水力特征。当不考虑流动机制的耦合系统,其他相关因素的作用表现不出。L. Plan 和 K. Decker R. Faber 等<sup>[5]</sup>认为:岩溶地貌在岩溶含水层弱点评价受岩溶地貌影响较大。空隙可称为积聚水进入岩溶的管道,积水面积与岩溶管道的直径成比例。Randall C. Orndorff 等<sup>[6]</sup>通过了解美国地勘局近 10 年对某地碳酸盐含水层的资料,认为通过构成地质框架和对地表特征的调查有助于了解含水层入水机制和地下水的运动等问题。Richard W. Harrison 等<sup>[7]</sup>介绍了一处 Pergamos 由岩溶引起的地面塌陷现场勘查情况,分析产生地面塌陷的原因是由于地表水沿着断层系统集中进入地表下,从而导致碳酸岩和石膏的溶蚀。

马鹿箐隧道“1.21”灾害发生前,通过 TSP、地质雷达、超前水平钻孔等方法发现了在 PDK255+978 附近存在 2~8 m 的岩溶空腔。并进行了帷幕注浆处理,如图 1 所示为马鹿箐隧道 PDK255+978 溶腔平面示意图。反思马鹿箐隧道“1.21”突水事故,虽然地质预报在探测不良地质方面发挥了一定的作用,但灾害的发生反映出在工程防灾方面对灾害发生的机理和规模仍然认识不足。对在特定的地质条件下,岩溶突水会在瞬间造成隧道坑道全部充水没有认识。同时,也缺乏防范这类超级灾害的技术手段。马鹿箐隧道的突水灾害的规模,是铁路隧道的建设史上没有的。按普通突水涌水的治理理念和预防方法来对付这种超级“突水”,是灾害发生的主要原因之一。

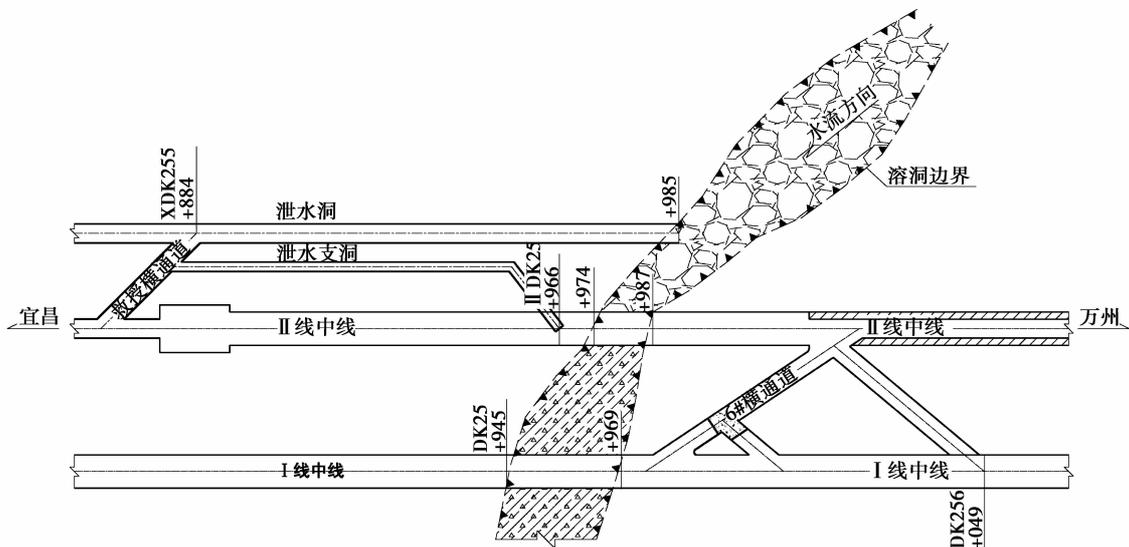


图 1 马鹿箐隧道 PDK255+978 溶腔平面示意图

笔者曾参与了歌乐山隧道、马鹿箐隧道的施工管理,鉴于岩溶溃水对隧道工程施工的极度危害,将重点结合马鹿箐隧道历次岩溶突涌水情况,分析总结出岩溶溃水的基本特征,提出岩溶溃水的概念,并基于风险控制理论,从研究致灾机理出发,尝试对岩溶溃水的风险源进行识别,提出“与隧道工程相关的岩溶水规模”的新概念,并探索隧道岩溶水规模的探测和界定方法,从而建立预防岩溶溃水的预警机制。

## 1 岩溶溃水定义与特征分析

### 1.1 岩溶溃水概念的提出

为了对不同规模的突水分级防范,在工程中的习惯作法是,按水量的变化<sup>[8-9]</sup>,将隧道突水分为集中涌水和恒定涌水;按单位时间涌水量大小,可将突水为特大涌水、大量涌水、少量涌水,如表 1 所示<sup>[9]</sup>;按股状涌水大小还可分为小股状涌水( $<100 \text{ m}^3/\text{d}$ ),中等股状涌水( $100\sim 1\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ ),大股状涌水( $1\ 000\sim 10\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ ),特大股状涌水( $>10\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

表 1 地下洞室岩溶涌水类型表

涌水分类	涌水量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	涌水类型	危害程度
特大涌水	$\geq 5$	暗河或岩溶管道涌水	影响施顺利进行,可造成重大设备及人身事故。排水困难。
大量涌水	1~5	岩溶管道涌水	影响施顺利进行,可造成设备及人身事故。排水较困难
少量涌水	$\leq 1$	脉状管道或岩溶裂隙涌水	

从涌水的分类可以看出,目前的研究对于规模  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  以上的特大涌水还没有更细致的分类。在隧道风险评估时,只对一般“突水”、“涌水”进行风险识别,而对大体量或超大体量的静态的岩溶承压水在隧道坑道内突然集中释放的风险还没有概念,从而不能识别对此类工程的风险。难以引起工程技术人员和管理者在隧道安全风险上的高度警惕。所以,必需提出一种区别于特大涌水类型,更能表征情如马鹿箐隧道这样的超级“涌水”类型的岩溶突水分类方法。

为了与普通的岩溶突水、涌水区别,定性地将这种大体量且有一定静储量的具有高水头的岩溶水在隧道坑道的狭小空间内的瞬间释放,并伴随突泥、突巨石的特殊涌水称为岩溶溃水。岩溶溃水就其规模而言,既是集中涌水,也是特大涌水,相当于“地下水库”在隧道坑道内的突然“溃决”。

### 1.2 岩溶溃水特征分析

溃水是一种特殊的涌水、突水,规模远大于普通类型,具有以下性质。

1)岩溶溃水在时间上具有突发性,岩溶水在瞬间释放,在极短的时间内就使隧道坑道完全充水。

马鹿箐隧道“1.21”溃水灾害发生时,水势极大,在 15 min 内就将总容积达  $18 \text{ 万 m}^3$  的平导、正洞全部淹没,溃水从平导和正洞相继喷出。瞬时的涌水量无法测量, $200 \text{ m}^3/\text{s}$  的瞬时涌水量是用 15 min 内的涌水量推算的。即  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  的涌水至少持续了 15 min。

2)具有水量大、水压高、泥石流含量高、持续时间长,破坏力强的明显特征。

表 2 几次典型岩溶溃水情况表

溃水日期	降雨情况	突水前后马 2 孔标高 /m	峰值到达时间 /h	峰值流量 / ( $\text{万 m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	峰值持续时间 /min	溃水总量 / $\text{万 m}^3$
1.21	0	1 110~1 070	无法观测	70	140	110
8.13	17.5	1 046	无法观测	0.2	900	2.7
4.19	88.7	突水前无,突水后 1 047	20	25.2	90	25.6
5.10	75.1	1 054	51	25.7	125	23
8.28	149.8	无水	43	1.2	1 805	37

注:马 2 孔为与 +978 溶腔相通的探测孔

表 2 为马鹿箐隧道在建设过程中 PDK255 + 978 溶腔典型的 5 次突(涌)水情况,可以看出,马鹿

箐隧道的突水量比“特大涌水”和“特大股状涌水”的起始值数十倍的倍数关系。出口端“1.21”溃水持续

2 h,总出水量达 110 万  $\text{m}^3$ ,洞内泥沙达  $13 \times 10^4 \text{ m}^3$  (事后调查统计)。溃水前水压 1.6 MPa。隧道进口段“4.19”、“5.10”等溃(涌)水灾害发生时,泥水瞬间从泄水洞、I 线、II 线奔涌而出,在洞口形成惊天骇浪,事后在隧道内清理了约 5 万  $\text{m}^3$  的块石、碎石、泥沙等淤积物,并有大量巨石,最大达 30  $\text{m}^3$ ,洞内所有机械设备及部分二次衬砌被冲毁,现场溃水情形如图 2 所示。

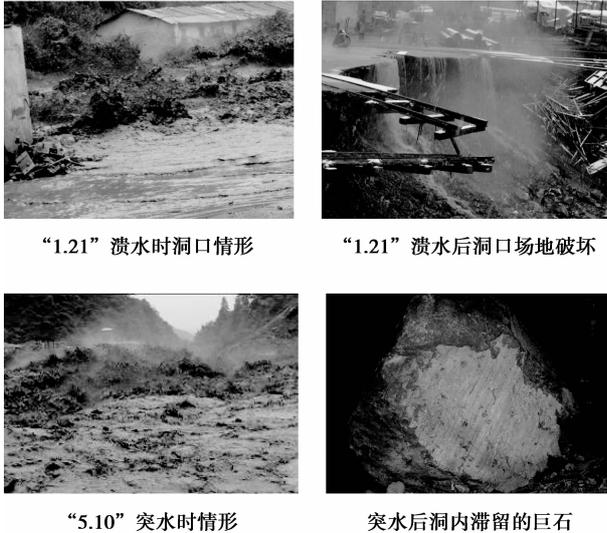


图 2 马鹿箐隧道现场溃水情形

### 3) 集中突出,且瞬间突出水量远大于补给量

通过对马鹿箐隧道的水文地质观测<sup>[10]</sup>,岩溶水的水位、水量变化与降雨强度密切相关,在无降雨的情况下,补给量约为 500  $\text{m}^3/\text{d}$ 。“1.21”溃水总量为  $110 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而在强降雨量 149.8 mm 情况下“8.28”溃水总量为  $37 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,前者是后者的数倍,如此巨大的溶腔静态储水量也是岩溶溃水的明显特征之一。

### 4) 溶腔水体动态变化,兼具瞬间性和延时性

对隧道附近的暗河出口的长期水文观测,发现蝌蚪口暗河系统岩溶水的流量动态与降雨关系密切,对降雨的反应较敏感,一般在中、大雨的第 2 天,地下水流量明显增长,第 4 天达到峰值。

由于地下水的运移作用,溶腔水体进入隧道坑道的通道时而堵塞,时而疏通,兼具瞬时和延时性。

由于岩溶的复杂性,即使在旱季,岩溶水体也有可能受到远端地下水系的补给。表现为水文地质观察发现,溃水发生时,地表监控的水系的水位未受影响。

### 5) 溃水对溶腔周围的地下水系有一定的袭夺

作用

由于水体涌入隧道坑道的真空负压,水体对附近的地下水体和地表水体的袭夺明显。

### 1.3 溃水与涌水的初步界定

鉴于岩溶溃水是一个全新的定义,目前研究的案例还比较少,文中基于对马鹿箐隧道溃水的特征分析,给出初步的建议值。

1) 瞬时涌水量大于隧道断面面积;

2) 溃水的水头压力大于隧道洞高 3~5 倍。

3) 单次突入隧道的水量  $\geq$  隧道开挖面积  $\times$  50 m。

## 2 岩溶溃水灾害的机理分析

岩溶溃水不是天然发生的地质灾害,它是伴随人类的工程活动而产生的次生灾害。其灾害源是储集在溶腔中的巨量地下水和充填物(泥沙、砾石、巨石等)。其发生的必要条件是灾害源进入隧道坑道的通道必须畅通。在隧道掘进过程中,隐伏溶腔与隧道周边围岩的岩体(原岩或注浆加固圈)受到不断切削,当腔壁围岩厚度达到极限岩盘厚度时,腔壁受力达到极限平衡状态,若隧道再次进尺则这种平衡将被打破,导致腔壁薄弱位置应力集中,在溶腔储水的高水头压力下作用下发生突然溃决,从而发生岩溶溃水。

从灾害源的角度看,溶腔静态储水量和岩溶发育程度密切相关,而高水压和隧道的埋深密切相关。从马鹿箐现场情况看,该类型溶洞的充填介质为淤泥质粘土与石块的混合物;溶洞的形成往往是呈垂直向发育,倾角大,因而溶洞的充填物和上部的水体所积蓄的势能很大。

### 2.1 岩溶发育规模影响静水储量的大小

岩溶发育的规模主要是指岩溶发育的形态和形成空腔的大小。

岩溶地区蓄水构造存在多种形式<sup>[11-12]</sup>,依据国内工程突水实例分析,容易导致大型岩溶隧道突水的蓄水形式主要为岩溶水静储量蓄水构造,包括裂隙岩溶蓄水形式、溶腔溶潭蓄水形式、断层岩溶蓄水形式、层间岩溶蓄水形式以及地下河及岩溶管道蓄水形式。其中,以断层、溶腔、溶潭的蓄水体量大,并常常伴有泥沙、岩屑、巨石岩块等充填物。

但是,隧道穿越区域的岩溶发育规模是一个宏观的概念,大规模岩溶的发育,仅仅为地下水的存储提供了空间条件。而隧道是线状的地下空间开发。由于岩溶地质的复杂性,溶腔的形态和空间展

布千姿百态,在掌子面前方遇到富水概率是随机的,几乎没有规律可循。如马鹿箐隧道的进口段设计文件显示该段可能遭遇地下暗河,预测的涌水量  $80 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,而在施工过程中仅观测到围岩较破碎,少量出水,而发生 1.21 溃水灾害的 +978 溶腔,已位于背斜核部,设计文件预测涌水量为  $9\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

同时,即使在同一套地质系统中,隧道所处的高程不一,恶性溃水灾害的概率也不一致。在同一地区的沪蓉西高速公路的隧道,高程比铁路隧道高约 100 m,在施工中安然通过。

## 2.2 深部岩溶导致高压水的形成

对于在隧道线位以上无水或者被完全填充的岩溶而言,并不具备发生溃水的条件。只有溶腔在稳定地下水位以下,并有一定的埋深,才有可能诱发溃水。

马鹿箐隧道突水后的水位在洞口(高于突水点 40 m)既不消退,也不溢流,说明了突水的溶腔“+978”位于区域稳定的水位线以下。通过水文地质观测、水化学组分分析、隧道涌水的  $^{14}\text{C}$  测年、氡分析<sup>[13]</sup>,1.21 隧道涌水属于年代较老的深部岩溶封存水。而 1.21 后的历次突水,是岩溶地下水水位在水源补给下恢复的结果。

深部岩溶(deep karst)一般是指在深部缓流带内发育或存在于深部缓流带的岩溶<sup>[2]</sup>。深部岩溶作为一种特殊的岩溶现象,是岩溶发育在空间尺度上的一种表现形式。

在马鹿箐隧道观察到,PDK255+978 溶腔后方向宽约 10 m、在线路以上的可见高度约 100 m,并在顶部发育有分支溶洞向上延伸,属于典型的垂直发育的深部岩溶。

深部岩溶是高压水形成的地质条件,然而在工程实践中,在掌子面测试的水压达到多高才算是高压水,目前这一问题还是一个模糊的概念,还没有相应的技术规范或标准。

对于泥沙填充型溶洞,文中对高压水给出如下定义:在水压力作用下,当巷道开挖至泥沙覆盖层底部时恰好产生覆盖层整体塑性区贯通的水压力值,即为高压水临界值。

高压水值与填充物在隧道底部以上的厚度、隧道的断面形式以及填充层的力学特性有关。如马鹿箐隧道溶腔的泥沙覆盖层厚度约为 25 m。基于这一前提条件,结合马鹿箐隧道的实际情况,可采用有限差分软件进行计算,计算模型如图 3 所示,计算结果表明,马鹿箐隧道的岩溶高压水零界值为  $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 。即在隧道内测得的水压值为  $0.5 \text{ MPa}$ ,

约为隧道洞高的 5 倍。

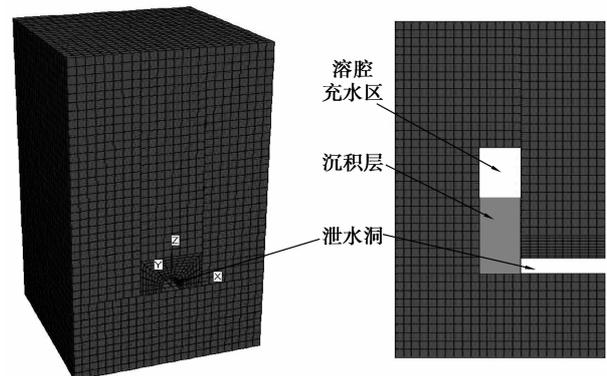


图 3 三维计算模型

基于马鹿箐隧道计算得到的这一高压水临界值可作为今后相关工程的参考。但需要注意的是,对于不同的隧道工程,其地质及水文条件等各方面因素都有所差异,所以对于岩溶隧道普遍适用的高水压判别模型的研究还需要具体情况具体分析。

## 2.3 岩溶形态与隧道的空间关系

从可能引起溃水灾害的岩溶形态和隧道的空间关系分析,只有下述情况,才可能产生影响。

1) 正面遭遇。如隧道从大型溶腔、溶洞中穿越,或大型管道从隧道中穿越。

2) 邻近通过。当隧道不与岩溶正面遭遇时,情况就要复杂一些。需要确定岩溶隐伏溶洞的安全距离。

对于开挖面前方与隧道相交的溶蚀空腔,其安全距离和围岩等级和开挖断面的面积有关。歌乐山隧道对于完好的原岩和帷幕注浆加固后的安全距离为距正洞 5 m(开挖面积  $80 \sim 100 \text{ m}^2$  为 7 m,平导开挖面积  $17 \text{ m}^2$ )。马鹿箐隧道前期的帷幕注浆也按此参数控制。

对于隐伏的周边溶蚀空腔,宜万铁路初步定为隧道开挖轮廓线 6 m 以外可以不处理,后根据现场方案论证<sup>[15]</sup>,将其改为 10 m。安全距离以水平钻探控制为主,地质雷达探测为辅;对周边的溶腔,靠调整钻探角度控制。

## 2.4 溶腔与周边水系的连通性

溶腔与水系的连通性问题,主要影响溶腔水的补给速度。一般存在以下 3 种类型。

1) 未连通型。溶洞施工过程中涌水量较大,施工完成后,溶洞内涌水量不受地表降雨影响,一直处于稳定状态。对于与现代地下水系没有直接联系的古岩溶,古代封存在溶腔中的静态水排放后不会得到迅速的补充,处理的难度相对较小。

2)半连通型。溶洞施工过程中,溶洞内涌水量受地表降雨有一定的影响,当地表降雨量大时,溶洞内有所反映,且洞内涌水滞后一定时间,当地表降雨量小时,溶洞内没有反映。

3)连通型。连通型又分为连通 I 型和连通 II 型。连通 I 型是和地表直接连通,或与地下暗河体系直接沟通、汇水面积大,地表降雨对溶洞涌水量影响明显,降雨后在较长的一段时间内溶洞内仍保持较大的涌水量,因此对于有强大补给的现代岩溶,溃水发生时的巨大吸力,将袭夺邻近的水体的水量,增大溃水的威力。连通 II 型是和地表直接连通,但地表汇水面积小,地表降雨后溶洞内反映明显,但地表降雨完成后溶洞内就基本无水。在实际工程中,当隧道穿越的溶腔、溶隙与地表的水库、河流等连通属连通 I 时,其溃水的风险将剧增。

歌乐山隧道在 DK2+619.6 淹没隧道的特大突涌水,就是因为该处很小的溶隙(在隧道内的开口约  $0.1 \text{ m}^2$ )和地表水库连通的结果,且属连通 I 型。

综上所述,岩溶溃水发生的概率和危害烈度与区域的岩溶发育规模、岩溶发育部位、地下水水位及水系和溶腔的关系、溶腔泥沙填充情况;以及隧道和溶腔的空间关系、隐伏溶腔地下水进入隧道的通道等综合因素密切相关。

要预防岩溶溃水,必须对这些相关的变量进一步研究,从而找出预防岩溶溃水这一类超高烈度的工程地质灾害。

对这些致灾因素分析整合,将其综合定义为“与隧道相关的岩溶水规模”,主要包括以下 4 个方面。

- ① 隐伏的含水岩溶和隧道线路关系;
- ② 可测量到的水量和水压;
- ③ 泥沙填充物在隧道的厚度;
- ④ 进入隧道的通道。

在隧道建造过程中关于溃水风险的识别,将针对这些因素进行。

### 3 溃水风险识别的实施方案分析

在岩溶富水地段,超前水平钻探是隧道施工中比较常用的勘测手段。目前隧道掌子面的超前水平钻,一般只是在钻孔过程中记录地质状况,钻孔出水后测量钻孔的水量和水压。对于岩溶强烈发育的深部岩溶隧道,对于岩溶水规模的探测,目前的探测方法还不能解决。

笔者在马鹿箐隧道的施工过程中,发明了 1 套

基于超前水平钻孔的超前地质预报技术,通过特殊的钻孔方法和通过检测程序,来进行岩溶溃水风险的辨识。主要方法:在超前水平的基础上分别进行原始水压力测试、放水试验、闭水试验、地表水水位观测和大气降雨观测;根据观测结果进行溃水风险判断,当溶腔水容量大于临界值时,即可认定有溃水风险。在水头压力小于隧道洞高 3 倍时,按一般涌水风险处理;当水头压力大于隧道洞高 3 倍时,需进行放水试验验证水量。

在放水全过程中观测流量和水头压力,绘制压力—时间曲线、流量—时间曲线和压力—流量关系曲线。关闭全部放水孔,绘制压力—时间曲线图,补给量较大时,应加强地表水系的水位监测,防止超量的地表水通过岩溶管道涌入隧道;在放水试验和闭水试验的同时,对区域地表水系观测和降雨量观测,观测降雨量和洞内水位变化关系和延迟响应的时间,如图 4~图 6 所示为马鹿箐隧道溃水期间各项观测数据记录结果。

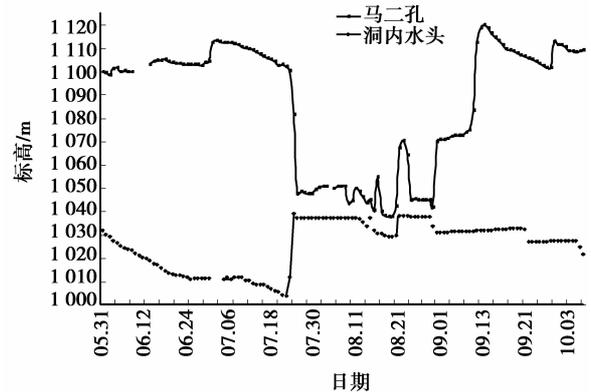


图 4 洞内水头标高与洞外水位(马 2 孔)关系曲线

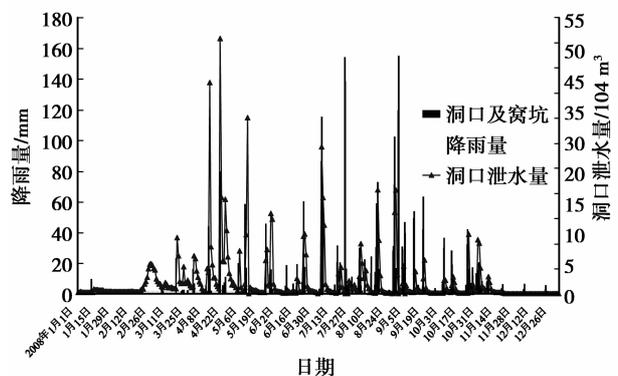


图 5 泄水量与降雨量对照曲线

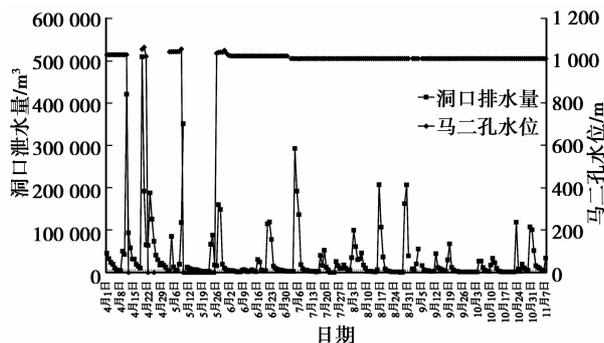


图 6 泄水量与马 2 孔水位关系曲线图

## 4 结 语

结合国内外岩溶隧道修建过程中涌、突水灾害的特征分析,将大体量且有一定静储量的高压岩溶水瞬间释放,并伴随突泥、突巨石的特殊涌水定义为岩溶溃水。结合马鹿箐隧道特大岩溶溃水灾害分析,得到了岩溶溃水的 5 个基本特征及以下主要结论。

1) 基于马鹿箐隧道岩溶溃水灾害的地质成因分析,得到了影响隧道岩溶溃水发生的 4 个重要的因素:岩溶的发育规模、溶腔内岩溶水压力、溶腔和隧道的空间关系及溶腔和地表水系的连通性。

2) 结合歌乐山隧道、马鹿箐隧道岩溶水的实际治理过程,建议采用综合的探测手段,特别是“放水试验”,来进行隧道岩溶溃水的风险识别。

### 参考文献:

- [1] OMDOFF R C, WEARY D J, SEBELA S. Geologic framework of the ozarks of south-central missouri—contributions to a conceptual model of karst [C]// Proceedings of U. S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, February 13-16, 2001, St. Petersburg, Florida, USA. [S. l.]: U. S. Geological Survey, 2001:18-24.
- [2] GABROVSEK F, DREYBRODT W. A model of the early evolution of karst aquifers in limestone in the dimensions of length and depth [J]. Journal of Hydrology, 2001,240(3-4):206-224.
- [3] YANG M Z Q, DRUMM E C. Stability evaluation for the siting of municipal landfills in karst [J]. Engineering Geology, 2002, 65(2-3):185-195.
- [4] LIEDL R, SAUTER M, HUCKINGHAUS D, et al. Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model [J]. Water Resources Research, 2003, 39(3):6-11.
- [5] PLAN L, DECKER K, FABER R. Attributed sinksa GIS-tool quantifying morphological vulnerability

parameters in karstic catchment area[J]. Geophysical Research Abstracts, 2003, 5:10280.

- [6] OMDOFF R C, HARLOW G E. Hydrogeologic framework of the northern shenandoah valley carbonate aquifer system [C]//Proceedings of U. S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, August 20-22, 2002, Shepherdstown, West Virginia, USA. [S. l.]: U. S. Geological Survey, 2002: 81-89.
- [7] HARRISON R W, NEWELL W L, NECDET M. Structure and genesis karstification along an active fault zone in cyprus [C]//Proceedings of U. S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, August 20-22, 2002, Shepherdstown, West Virginia. [S. l.]: U. S. Geological Survey, 2002: 45-50.
- [8] 蒙彦,雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J]. 中国岩溶,2003,22(4):287-292.  
MENG YAN, LEI MING-TANG. The advance and suggestion for the study on discharge rate in karst tunnel gushing[J]. Carsologica Sinica,2003,22(4):287-292.
- [9] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京:水利水电出版社,1994.
- [10] 金新锋,夏日元,梁彬. 宜万铁路马鹿箐隧道岩溶突水来源分析[J]. 水文地质工程,2007, 34(2):71-74.  
JIN XIN-FENG, XIA RI-YUAN, LIANG BIN. Analysis of bursting water source of Maluqing tunnel, Yichang-Wanzhou railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2):71-74.
- [11] 王建秀,杨立中,何静. 大型地下工程岩溶涌(突)水模式的水文地质分析及其工程应用[J]. 水文地质工程地质,2001,28(4):49-52.  
WANG JIAN-XIU, YANG LI-ZHONG, HE JING. The hydro-geological analysis of karst groundwater's blow in large-scale underground engineering[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2001,28(4):49-52.
- [12] 铁道部工程管理中心组织. 宜万铁路马鹿箐隧道工程技术方案论证会[R]. 北京:铁道部工程管理中心组织, 2008.
- [13] 王树仁,何满潮,刘招伟. 岩溶隧道突水灾变过程分析及控制技术[J]. 北京科技大学学报,2006, 28(7): 613-618.  
WANG SHU-REN, HE MAN-CHAO, LIU ZHAO-WEI. Analysis on the process of water burst catastrophe and it's prevention counter measures in a karst tunnel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2006,28(7): 613-618.

(编辑 陈移峰)