

隧道岩溶溃水延滯性特征分析及其安全风险规避

刘新荣¹, 张旭东¹, 黄 明^{1,2}

(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:通过对宜万铁路马鹿箐隧道多达19次的突涌水数据统计和现象分析,总结提出了“岩溶溃水”的概念,通过对各个施工阶段溃水特征分析表明岩溶溃水还具有延滯性特征。通过对溃水发生的时程分析,得到溶腔溃水延滯性形成的机理为溶隙、脉管及填充物由于压力差从渗流扩大呈汇流,袭夺周围脉管和溶隙的地下水,溶腔地下水潜蚀充填物封堵,最后集中释放;分析得到溃水延滯性的主要影响因素为溶腔内蓄积的水量和达到瞬间疏通的临界水压条件,以及溶腔内水流通道的淤塞条件;研究表明,对大气补给的响应,溃水延滯时间有不断缩短的规律,据此可判断隧道溃水可能性将不断减小;结合降雨量、涌水量和水位观测成果,基于降雨入渗法和统计分析法预测得到的溶腔涌水量结果,提出了抢险和泄水期间的安全作业控制指标。

关键词:隧道工程; 岩溶溃水; 延滯性; 控制指标

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)09-1326-07

作者简介: 刘新荣(1969-),男,浙江开化人,博士,教授,主要从事岩土工程、地下空间与工程等领域的教学与科研工作。E-mail: huangming05@163.com。

Delay characteristics and risk mitigation of karst water burst flood of tunnels

LIU Xin-rong¹, ZHANG Xu-dong¹, HUANG Ming^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Based on field tests on 19 groups of data and phenomenon analysis of inrush or bursting waste from karst cavity of Maluqing tunnel of Yichang-Wanxian Railway, a conceptual model of karst water burst flood (KWBF) is proposed by means of statistical analysis and phenomenological induction. Through analyzing its characteristics during different construction stages, it is shown that KWBF has the delay characteristics. The time history analysis of the karst water burst flood shows that because of pressure dispersion between inside and outside of the cavity, seepage enlargement is evolved into conflux so as to deprive groundwater from aquifer aqueduct and fracture, and the water together with mud suddenly releases from karst into the tunnel. The key factor for the delay characteristic of KWBF is water amount and silt or filling degree of conflux aqueduct. The delay time of KWBF on supply air continuously reduces the response time, according to which the possibility of KWBF is reduced. Forecasting of KWBF is conducted by use of the rainfall seeping theory and statistical analysis method. The basic data are obtained from field quantity observation such as rainfall and hydrograph measurement. The control index of safe operation during the rescue and discharge period is proposed.

Key words: tunnelling engineering; karst water burst flood; delay characteristic; control index

0 引言

据不完全统计,国内外隧道大型涌、突水事件中,70%发生在岩溶隧道中^[1]。对于涌水的突发性,瞬时性带来的安全问题,工程界给予了极大的关注。GB 12329—90《岩溶地质术语 Karst geology terminology》定义“岩溶突水 karst declogging”为:储集和运动于岩溶含水层中的地下水,当被人工揭露或受自然因素影响而骤然产生的大量涌水,并常伴随涌沙涌泥的

现象。

岩溶突水的发生往往具有骤然性,然而由于蓄水地质结构的多样性和复杂性,隧道开挖揭露填充型溶腔,当填充物具有一定稳定性和隔水性时,涌水并不

基金项目:国家自然科学基金李晓红创新群体项目(50621403);福州
大学校人才基金项目(022356)

收稿日期:2010-06-23

会立即发生，而是稳定一段时间后，在某些诱因的触

表 1 +978 溶腔突（涌）水统计表
Table 1 Statistics of +978 karst water cavity

编 号	突水日期	降雨量 /mm	时间	当日涌水总量 $/10^4 m^3$	持续时间/min	最大流量 $/10^4 m^3$
1	2006-01-21	0	无降雨	110	140	110
2	2006-01-24	0	无降雨	3	15	12
3	2006-07-23	24	7月23日	36	正洞170；平导3360	5
4	2006-08-13	17.5	8月7日	2.7	900	0.2
5	2006-08-18	165.6	8月15日~19日	62	1200	0.8
6	2008-04-11	61.1	进口揭穿溶腔（下同），4月9日~11日	1.5 (19.5)	20	4.5
7	2008-04-19	88.7	4月17日~19日	18.4 (25.6)	90	25.2
8	2008-05-10	75.1	5月8日~9日	14 (23)	125	25.7
9	2008-05-23	45.5	5月22日~23日	4.3 (13.4)	10	17.6
10	2008-05-26	31.7	5月26日~27日	2.5 (11.9)	5	19.7
11	2008-06-12	30.8	6月10日~12日	10	85	6.76
12	2008-06-18	21.4	6月15日~16日	5	18	16.7
13	2008-06-20	68.3	6月19日~21日	4	20	1.026
14	2008-06-21			14	180	1.1
15	2008-07-04	174	7月3日~5日	29	840	6.8
16	2008-07-05			21	660	1.78
17	2008-07-22	170.3	7月22日~23日	由于山上洪水冲毁变电器、料场，人员撤离，未观测		
18	2008-08-15	161.5	8月13日~16日	25	965	2.25
19	2008-08-28	149.8	8月27日~29日	37	1805	1.2

发下，突然发生溃决。这种溃决往往是高压岩溶水伴随溶腔填充物在巨大势能作用下以流体（伴随有泥、巨石）高速运移形式在隧道狭小的空间内瞬间释放，威力惊人，破坏力极大，在隧道内作业的人员设备没有条件避险，将造成重大的工程灾害。隧道穿越大型填充型溶洞使岩溶涌水表现出发生前的延滞性和发生时的骤然性，给隧道工程的施工作业带来的安全隐患极大，使岩溶涌水的预测预防的难度更大，发生的规律难以掌握。研究涌水延滞性机理、规律和相应的安全控制措施，对于隧道工程穿越大型填充型溶洞时的安全风险控制，有着重要意义。

1 隧道岩溶突水的延滞性特征分析

2006年1月21日，在建的宜万铁路马鹿箐隧道出口发生了特大涌水事故，瞬间涌水量高达 $200 m^3/s$ ，140分钟内涌水总量 $7.0 \times 10^5 m^3$ 。洞内泥沙沉积总量

约 $6 \times 10^4 m^3$ 。在其后两年建设期内，分别在其出口和进口方向，又观测记录到 $1.0 \times 10^5 m^3$ 以上的突水 19 次（见表 1）。多次大规模的涌水对隧道施工安全风险控制带来极大的困扰。

马鹿箐隧道的涌水不同于一般的岩溶隧道涌水，其表现出类似于水坝溃决的特征。在兼具突发性、间隣性、延滞性的同时，还区别于普通的岩溶隧道突、涌水，其规模极大，高速水流挟带大量泥沙在瞬间在充满狭小的隧道空间。本文将这种具有超大静储量的高压岩溶水在施工扰动作用下以流体（伴随有泥、巨石）高速运移形式瞬间释放的涌突水定义为岩溶溃水（KWB）。如图 1 所示为马鹿箐岩溶溃水特征。

对于表 1 中 2006 年“1.21”溃水、2006 年“1.24”溃水、2006 年“4.11”溃水及 2008 年“5.10”溃水发生过程，都表现出不同情况的滞后：

（1）“1.21”事故发生前，对引发灾害的

PDK255+978 溶腔进行了超前帷幕注浆, 经注浆效果评价后继续开挖, 从出口方向揭露溶腔 2 d 后已进入溶洞 4 m, 经观察发现溶洞破碎裂隙被浆液充填。再进行 4 个 4.5 m 长超前浅孔钻探, 钻孔无水正常。之后, +978.1 掌子面在在无扰动的情况下准备出碴时, 掌子面有掉块、坍方响声, 伴随少量流水, 拱部围岩突然崩塌, 发生突水与突泥, 事故之前并没有明显预兆。

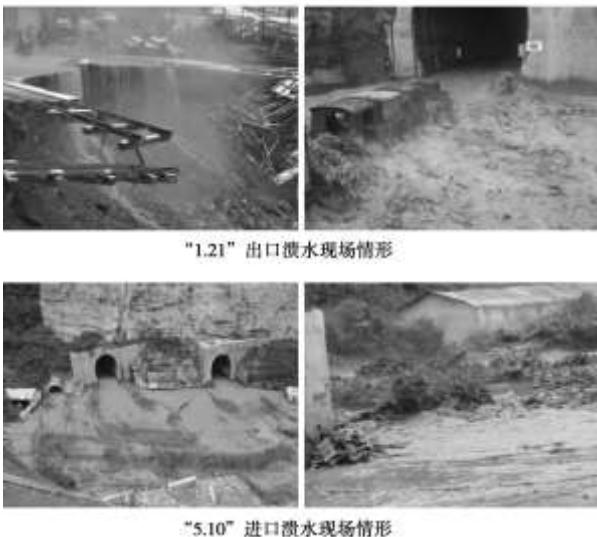


图 1 岩溶溃水特征

Fig. 1 Characteristic results of KWBF

(2) “1.24”溃水, 是在“1.21”溃水施工发生后启动强排水时发生的。

(3) “4.11”的溃水, 是在进口方向揭露溶腔 11 d 后发生的。

(4) “5.10”的溃水发生前, 天气晴好, 两天之前有降雨。

以上表明, 尽管诱发溃水的因素各不相同, 但溃水发生都表现出延滞性。马鹿箐隧道岩溶溃水的延滞性在各个施工阶段主要表现出如下几个特征: ①在掘进过程中掌子面施工扰动前后导致的溃水延滞性; ②在抢险救援期间抽排水过程中的溃水的延滞性; ③在泄水期间大气降雨后溶腔储水量得到补充后形成溃水的延滞性。

此外, 岩溶管道、溶隙与上部暗河纵横交错, 构成复杂网络系统。并存的破碎带、节理裂隙带组成复杂的富水带为地表水的下渗、地下水的运移提供了通道。抢险抽排水过程是不断疏通 - 淤塞 - 喷发的过程, 岩溶溃水不会一次持续完成, 必然受地表水和地下暗河补给, 同样具有间歇性。

对于岩溶隧道涌水预测, 从定性分析发展到定量预测, 国内外学者作了大量的工作^[2-14]。然而由于岩

溶溃水具有延滞性特征, 因此溃水灾害发生时机难以掌握, 预测存在较大困难。随着延滞时间的增长, 溶腔积聚的泥水能量越大, 溃水灾害性更严重。

2 溃水延滞性的形成机理分析

2.1 地质因素

在溃水发生之后的后续施工中发现, 所有的溃水灾害都是由位于隧道 PDK255+978 的大型岩溶溶蚀系统引起的。探测发现, PDK255+978 溶腔是一个巨型的地下古溶潭, 由大型溶腔和其联通的暗河及溶管形成的复杂地下储水系统。并被岩屑和地下水运移物等填充。

隧道区主要为碳酸盐岩地层^[15], 漏斗、落水洞、暗河系统普遍发育, 岩溶发育强烈, 似枝状暗河系统特征。隧道穿越油竹一垮岩湾暗河、小马滩—凉风洞暗河、鸟腊河—凉风洞—蝌蚪口暗河、朱家槽—和尚鞍暗河、道湾暗河, 如图 2 所示。

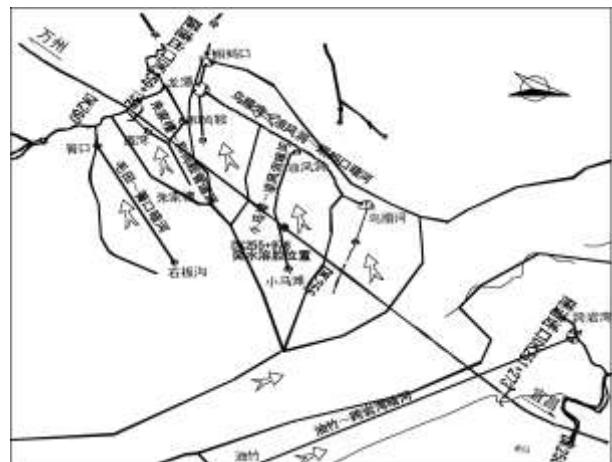


图 2 马鹿箐隧道暗河示意图

Fig. 2 Sketch map of underground river of Maluqing tunnel

据龙潭、蝌蚪口长期观测资料, 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。反映了岩溶水系统补给条件良好, 径流途径较长, 径流较通畅。

大气降雨改变了溶腔附近的流场(流速、流量、压力和流径)状况, 引起隐伏溶腔内水量和压力瞬间增大, 从而诱发突(涌)水(含大量泥、石块)。岩溶水的流量动态与降雨关系密切, 反映了岩溶水系统补给条件良好, 径流途径较长, 径流较为通畅。溶腔内的水流通道被淤塞, 导致泄水洞的排泄量小于溶腔的补给量, 大量水体在溶腔内蓄积, 当蓄积水体的压力达到可以冲破淤塞物的程度时, 大量水体瞬时涌出,

发生带泥突水事故。

基于表 1 的分析及泄水过程中的观测结果, 泄水支洞揭示溶腔前, 溶腔内水压力为 0.8~1.2 MPa, 一般在中、大雨 2 d 后, 地下水流明显增长, 第 4 天达到峰值, 泄水量为 1000~5000 m³/h。泄水支洞揭示溶腔后, 溶腔内水压力为 0.1~0.35 MPa, 一般在中、大雨 1 d 后有明显水流响应, 泄水量为 1000~5000 m³/h。这一水力响应特征表明, 岩溶溃水是延滞性和突发性的矛盾与统一。

2.2 临界水压条件

由于填充层的阻水作用, 在溶腔与隧道之间形成一个天然的透水淤塞体, 此时溶腔溃水延滞性表现为: 随着地下水补给或排泄条件变化导致作用在淤塞体的压力上升, 溶隙、脉管及填充物由于压力差从渗流扩大呈汇流, 袭夺周围脉管和溶隙的地下水, 溶腔地下水潜蚀充填物而集中释放, 形成岩溶溃水。形成延滞性的关键是水压上升到溃决临界水压的时间及淤塞体的物理力学特性恶化(或参数劣化)而最终形成溃决条件。

基于以上分析, 表明溃水发生延滞性的主要原因是在经历降雨、淤塞(帷幕注浆或通道内填充物在水流变化、自重等因素作用下发生形态改变阻塞通道)等过程后, 导致溶腔内水压在一定时间内不断上升。

由此可见, 出现溃水延滞性特征的决定性因素主要有以下两个: ①溶腔内蓄积的水体量和达到瞬间疏通的临界水压条件; ②溶腔内水流通道的淤塞条件。

3 延滞性溃水的安全风险规避

溶腔内蓄积的水量可以根据预测涌水量及泄水洞的排水量进行推算。因此, 可以通过相关水文观测数据推算出溶腔内是否在蓄积水体及蓄积的水体量、蓄积速率, 分析淤塞体力学特性, 并根据触发隧道溃水的临界距离(溶腔与隧道或其他相邻临空面的距离)确定承压岩盘的厚度。基于上述理论, 就可以通过在隧道施工的各个阶段, 通过隧道泄水量观测, 降雨量、排水量观测, 水压观测等, 找出各观测量(变量)的相关性, 从而制定出在隧道施工期间的安全避险条件, 从而达到安全风险控制的目的。

对于天然的淤塞而言, 溶腔内水流通道的淤塞程度则未知, 属不确定因素。但可根据泄水量对降雨的相应时程内判断。对于人工淤塞体, 也可以通过综合渗透系数来判断, 从而制定出安全控指标。

3.1 溃水后抢险期间的安全控制

(1) 淤塞体水压两端水压差观测

马鹿箐隧道出口段在“1.21”事故以后, 采用深

孔注浆阻塞坑道, 然后强排水的抢险救援方案。并在抢险救援期间, 通过对淤塞体水压两端水压差的观测进行淤塞体完好性的判断。

通过对与溶腔直接连通的地质钻孔水位观测, 可以测算出作用在淤塞体上的水压差, 如图 3 所示为马鹿箐隧道洞内水头标高与马二孔水位的关系(其中马二孔为地表超长钻孔至溶腔的水位观测点), 图 4 为泄水量与马二孔水位关系曲线。利用图 3 和图 4 的监测结果即可粗略推算出淤塞体上下的水压差, 进而判断淤塞体的稳定性。

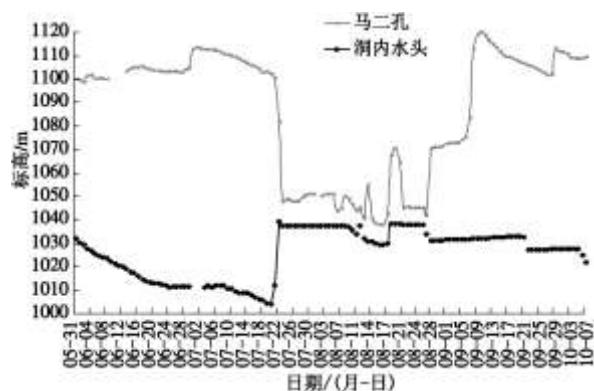


图 3 洞内水头标高与洞外水位(马 2 孔)关系曲线

Fig. 3 Relation curves between inner head and outer water level (#2 hole)

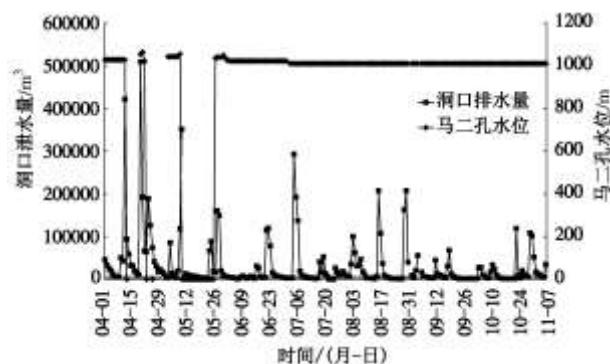


图 4 泄水量与马二孔水位关系曲线

Fig. 4 Relation curves between sludge quantity and water level

(2) 淤塞体渗水量观测

在强排水过程中, 当淤塞体工作正常时, 整体处于稳定状态。假定淤塞体是均质体, 通过淤塞体的水流都是渗流。虽然水流量随强排水水压差的增加而增加, 据达西定律, 渗流系数不变的情况下, 渗流量增加和水压差的增加呈线性关系。这样就可以强排一定水位线的水量, 然后停机观测汇水量, 绘制回水量曲线, 进而判断水压差。如表 2 所示为马鹿箐隧道内回水量现场部分观测记录。

3.2 泄水期间的安全控制

根据泄水洞揭穿溶腔前后的历次漏水情况分析水力响应特征, 主要是岩溶水对降雨的响应时间和岩溶水到达峰值后流量衰减到降雨前水平的时间, 涌水量的作用时机和持续时间, 确定进洞施工时机; 基于降雨入渗法、统计分析法预测涌水量, 进而确定避险量化指标。

表 2 洞内回水量观测表

Table 2 Observation method for back water in tunnel

时间	#1 监测点 (4号坑边)	#2 监测点 (3号坑边)	#4 横通道		#3 监测点 (原封堵墙和硬壳接缝)	#3 横通道	#2 横通道	注浆钻孔出水量
			点	横通道				
10-18	4号坑内回水 $4\text{m}^3/\text{h}$				周边有渗水, 钢管内水流出约3cm, 总共渗水 $5\text{m}^3/\text{d}$	无渗水, 水压表无压力	#7孔出水由 $2.34\text{m}^3/\text{h}$ 减小到 $1.5\text{m}^3/\text{h}$	
10-19	混凝土和硬壳接缝处冒水 $1\text{m}^3/\text{h}$	混凝土和硬壳接缝处	混凝土和硬壳接缝处	周边有渗水, 钢管内水流出约3cm, 总共渗水 $5\text{m}^3/\text{d}$	无渗水, 水压表无压力	#8钻孔出水 $0.5\text{m}^3/\text{h}$, #9孔出水 $2.5\text{m}^3/\text{h}$		
10-20	混凝土和硬壳接缝处冒水 $1.5\text{m}^3/\text{h}$	混凝土和硬壳接缝处	混凝土和硬壳接缝处	周边有渗水, 钢管内水流出约3cm, 总共渗水 $5\text{m}^3/\text{d}$	无渗水, 水压表无压力	#8钻孔出水 $0.2\text{m}^3/\text{h}$, #10孔出水 $0.2\text{m}^3/\text{h}$		
10-21	混凝土和硬壳接缝处冒水 $1.5\text{m}^3/\text{h}$	无水	混凝土和硬壳接缝处	周边有渗水, 钢管内水流出约3cm, 总共渗水 $5\text{m}^3/\text{d}$	无渗水, 水压表无压力	#10孔出水 $0.5\text{m}^3/\text{h}$		

(1) 泄水量观测

如图 5 所示为岩溶泄水量与降雨量的关系对照图。据观测结果, 岩溶漏水对降雨的响应时间 4~38 h; 岩溶漏水的峰值滞后时间 10~51.5 h; 岩溶漏水到达峰值后流量衰减到降雨前水平的时间为 9.5~88 h; 马 2 孔与溶腔水力联系密切。泄水洞揭穿溶腔后进口的多次漏水, 使“+978”溶腔内淤积体内部过水水路越加通畅, 漏水峰值到达时间也逐渐缩短, 峰值流量及瞬时流量越来越小, 峰值持续时间逐渐增长, 漏水特征表现为“来势缓、峰值低、时间长”。

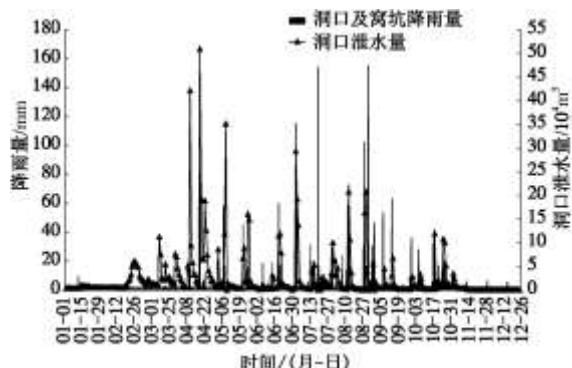


图 5 泄水量与降雨量对照曲线

Fig. 5 Contrast curves between sluice quantity and rainfall

根据降雨量、涌水量观测成果, 研究采用降雨入渗法、统计分析法进行涌水量预测。不同降雨条件、不同方法预测涌水量见表 3, 回归分析结果如图 6 所示。涌水量与降雨量密切相关, 降雨强度、降雨频次及岩溶水循环系统(管道系统)同时控制突涌水量大小。考虑到降雨入渗法变量多、修正复杂, 采用回归分析上限值预测涌水量, 根据实际观测数据不断完善涌水量预测。

表 3 涌水量预测表

Table 3 Prediction of water-gushing volume

降雨量 /mm	降雨入渗法		回归分析法	
	$/(m^3 d^{-1})$	$/(m^3 h^{-1})$	$/(m^3 d^{-1})$	$/(m^3 h^{-1})$
10	64196	2675	18624 ~	776 ~
			47846	1993
20	128392	5350	32216 ~	1342 ~
			70749	2948
25	160490	6687	39012 ~	1625 ~
			82200	3425
50	320980	13374	72993 ~	3042 ~
			139457	5811
100	641960	26748	140954 ~	5873 ~
			253971	10582
203.9 (50 年)	1308596	54540		

(2) 泄水期间观测结果分析

基于历次突涌水分析表明:

- 50 a 一遇溶腔的最大动态补给量为 $1308596 \text{m}^3/\text{d}$; 溶腔的静储量约 $7.0 \times 10^5 \text{m}^3$ 。
- “+978 溶腔”岩溶水主要通过管道径流至溶腔, 岩溶水在汇集过程中, 除在“+978 溶腔”附近产生聚集外, 溶腔外岩溶发育部位也可能产生聚集; 由于降雨的间歇性、降雨组合强度的变化, 溶腔充填物在地下水不同压力、流速的作用下产生疏通、淤积, 形成反复漏水。
- 在泄水洞揭穿溶腔前, 马 2 孔水位标高超过 1025 m 时, 洞内就会产生漏水。
- 在泄水洞揭穿溶腔后, 当降雨大于 50 mm 时发生了“4.11”、“4.19”、“5.10”漏水; 当降雨量大于

20 mm 发生了“5.23”、“5.27”突水。可见, 超过 20 mm 的降雨就可能导致突水, 且雨量越大, 突水的规模越大, 岩溶水的滞后时间也越短, 由突水质变成溃水。

e) 泄水洞揭穿溶腔后经历了 14 次突(涌)水, 反复突水, 反复冲刷, 特别是经过主汛期的冲刷, 岩溶管道变得愈加通畅, 突水滞后时间已由勘察时的 4

天缩短至 1 d, 之后随着岩溶水的排泄将进一步缩短, 峰值涌水量也会不断增大。突水所产生的涌水均为动态补给水。

f) 溶腔水的蓄积速率过大, 或水流通道充填物处于临界平衡状态, 或承压岩盘厚度在内外水压差作用

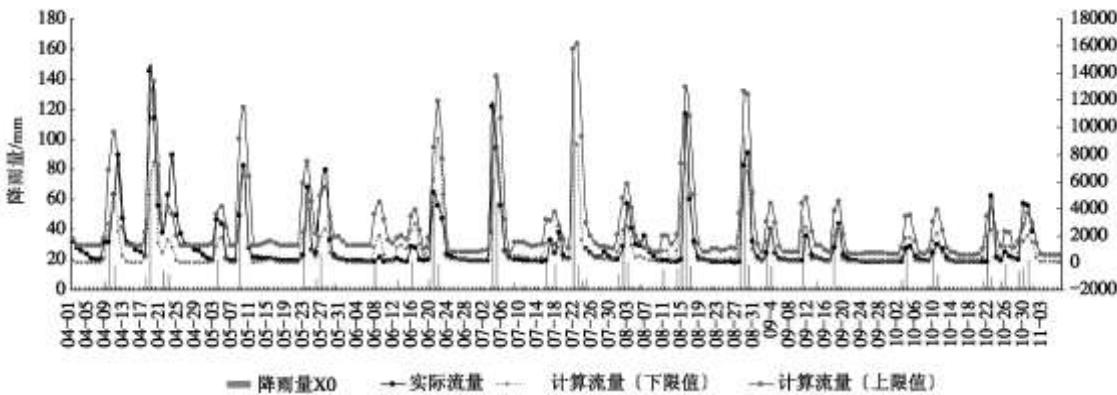


图 6 分段回归综合曲线图

Fig. 6 Synthetical subsection regression curves

下发生塑性区贯通, 都可能会发生突水(泥), 应提前预警, 并采取相应措施规避风险。

3.3 抢险与泄水期间安全控制指标

通过马鹿箐隧道溃水抢险期间的水文观测数据分析, 得到了马鹿箐隧道抢险救援期间的安全控制指标, 说明人员进(出)洞必须在低水压、少水量、无降雨的原则下, 若未满足以下 4 个条件必须出洞避险:

(1) 出口抢险期间, 在洞内采取措施隔断溃水点前, 追水距离超过 400~600 m(降低洞内积水水位标高 6~9 m) 就会发生突水。

(2) 日降雨量在 20 mm 以下, 每次降雨后观察 72 h。

(3) 溶腔水位标高保持在 1025 m 以下(通过马 2 孔观测判断)。

(4) 进口泄水量稳定在 1000 m³/h 以下, 没有大的波动。

(5) 泄水水质清澈、不浑浊。

4 结语

通过对马鹿箐隧道多达 19 次的岩溶突水分析, 总结提出了带有超大量静态储水性质的承压岩溶水在隧道内突然集中释放的“岩溶溃水”概念, 并归纳得到了各个施工阶段岩溶溃水延滞性的基本特征, 表明岩溶溃水延滞性出现主要受到两个因素的影响: ①腔内蓄积的水体量和达到瞬间疏通的临界水压条件; ②溶腔内水流通道的淤塞条件。

研究建议基于溶腔内是否在蓄积水体及蓄积的水

体量、蓄积速率、充填泥沙力学特性和承压岩盘的厚度作为安全风险控制关键参数和预警指标, 并采取相应措施规避风险。岩溶溃水延滞性给隧道施工安全控制带来困扰, 但可以通过在施工中观测与研究掌握其规律。施工和抢险的基本避险原则为: 避免溃水过程的疏通-淤塞多次反复, 保证隔水承压岩盘的厚度。避险条件为: 低水压、少水量、日降雨量在 20 mm 以下。

参考文献:

- [1] 任旭华, 陈祥荣, 单治钢. 富水区深埋长隧洞工程中的主要水问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1924~1929. (REN Xu-hua, CHEN Xiang-rong, SHAN Zhi-gang. Water problems and corresponding countermeasures in projects of deep-lying long tunnels located in water-enriched regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1924~1929. (in Chinese))
- [2] WILLIAM B White. Conceptual models for karstic aquifers[J]. Speleogenesis and Environment of Karst Aquifers, 2003, 1(1): 11~16.
- [3] LAURENT Eisenloht, MAHMOUD Bouzelboudjen, LASZLO Kiraly. Numerical versus statistical modeling of natural response of a karst hydrogeological system[J]. J Hydrology, 1997(202): 244~262.
- [4] 林传年, 李利平, 韩行瑞. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1469~1476. (LIN Chuan-nian, LI Li-ping, HAN Xing-rui. Research on

- forecast method of tunnel water inrush in complex karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1469 - 1476. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 徐国峰, 杨建峰, 陈侃福. 台缙高速公路苍岭隧道水文地质勘察与涌水量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊 2): 5531 - 5542. (XU Guo-feng, YANG Jian-feng, CHEN Kan-fu. Surveying of hydrogeology condition and forecasting of water inflow in Cangling tunnel Taizhou—Jinyun highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5531 - 5542. (in Chinese)).
- [7] 李兴高, 刘维宁, 张昀青. 隧道渗涌水量的随机模型预测[J]. 中国安全科学学报, 2002, **12**(4): 60 - 64. (LI Xing-gao, LIU Wei-ning, ZHANG Yun-qing. Predicting the amount of water inflow in tunnel by stationary random model[J]. China Safety Science Journal, 2002, **12**(4): 60 - 64. (in Chinese))
- [8] 叶志华, 韩行瑞, 张高朝, 等. 隧道岩溶涌水专家评判系统在朱家岩隧道涌水预报中的应用[J]. 中国岩溶, 2006, **25**(2): 139 - 145. (YE Zhi-hua, HAN Xing-rui, ZHANG Gao-chao, et al. Application of expert's judging system to predicting karst water bursting in Zhujiayan tunnel[J]. Carsologica Sinica, 2006, **25**(2): 139 - 145. (in Chinese))
- [9] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道涌水量数值计算中的试算流量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(12): 1776 - 1780. (WANG Jian-xiu, YANG Li-zhong, HE Jing. Trial method for simulating tunnel discharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(12): 1776 - 1780. (in Chinese))
- [10] 李苍松, 何发亮, 陈成宗. 渝怀线武隆隧道岩溶涌水量计算新方法[J]. 中国铁道科学, 2005, **26**(5): 41 - 46. (LI Cang-song, HE Fa-liang, CHEN Cheng-zong. New calculation method of water inflow quantity in Wulong tunnel on Chongqing-Huaihua Railway[J]. China Railway Science, 2005, **26**(5): 41 - 46. (in Chinese))
- [11] 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水机理及其防治对策[D]. 北京: 中国地质大学, 2004. (LIU Zhao-wei. Karst waterburst mechanism and prevention countermeasures in Yuanliangshan tunnel[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2004. (in Chinese))
- [12] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994. (ZOU Cheng-jie. Karst geology engineering in hydropower project[M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1994 (in Chinese))
- [13] ZHANG L L, FRANKLIN A. Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, **30**(1): 37 - 46.
- [14] 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]. 水文地质工程地质, 2007, 2: 71 - 75. (JIN Xin-feng, XIA Ri-yuan, LIANG Bin. Analysis of bursting water source of Maluqing tunnel[J]. Yichang-Wanzhou Railway, 2007, 2: 71 - 75. (in Chinese))
- [15] 铁道第四勘察设计院. 宜万铁路宜昌至万州段新建工程施工图——马鹿箐隧道设计图[R]. 武汉: 2004. (Fourth Survey and Design Institute of Railway. New construction drawings of Yichang-Wanzhou section in Yichang-Wanzhou Railway——design drawings of Maluqing tunnel[R]. Wuhan: 2004. (in Chinese))