

郑宗利, 关惠军, 苟想伟, 等. 岩溶隧道突涌水预警体系的建立[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 41–46. [ZHENG Zongli, GUAN Huijun, GOU Xiangwei, et al. Establishment of Early – warning System for Water Inrush in Karst Tunnel [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 41–46. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.008.]

岩溶隧道突涌水预警体系的建立^{*}

郑宗利¹, 关惠军¹, 苟想伟¹, 石恒岳¹, 于咏妍²

(1. 甘肃路桥建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088)

摘 要:为加强岩溶隧道突涌水预警的准确性, 基于理论分析方法及岩溶隧道实际特点, 提出溶洞侵入及未侵入隧道两类情况下的岩溶隧道突涌水预警体系的建立方法。通过理论分析, 确定了突涌水的主要影响因素及其发生过程中变化显著的监测项目。选择溶洞特质、水的变化、岩盘破损程度、节理裂隙形态为预警体系的主要评价指标。根据溶洞与隧道相对位置关系, 建立溶洞侵入及未侵入隧道两种类型的突涌水预警体系。工程应用显示预警结果与现场吻合较好, 验证了预警体系的合理性与可行性。

关键词:突涌水; 预警体系; 四色预警; 岩溶隧道

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2022)01–0041–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.008

岩溶地区的隧道施工改变了所在位置原有的水文地质环境, 形成了新的地下水排泄通道, 容易在施工过程中形成突涌水灾害。岩溶隧道突涌水灾害的发生不仅损毁工程器械、延误工期, 还有可能造成施工人员伤亡。隧道施工地质灾害预警体系的建立可以有效地减小灾害的发生, 降低或避免工程损失。

针对岩溶隧道的突涌水灾害, 现阶段已有研究人员提出了多种预警模型的建立方法。现阶段突涌水预警体系建立主要方法包括: ①李术才^[1–2]、周捷^[3]基于超前地质预报结果建立了突涌水预警体系。②匡星^[4]、杨茂林^[5]、葛颜慧^[6]、马士伟^[7–8]、曹鹏程^[9]基于现场监测数据的变化建立突涌水预警体系。③杨寅静^[10]、刘希亮^[11]基于围岩破损程度建立突涌水预警体系。④马士伟^[12]基于主要风险源数据及权重计算突涌水预警等级。

现有研究结果虽已得到了大量工程验证, 但其准确性仍可进一步加强。①超前地质预报主要判别溶洞内是否含水, 但对施工过程中突涌水发生的可能性的判断准确性依然需要提高。②监测数据建立的预警体系中钢拱架应力和围岩位移的变化, 两指标除预报突涌水也可预报隧道坍塌变形, 因此对突涌水的预警指向性有待加强。③围岩破损程度法如果能与水压水质变化等指标结合将更能准确的建立突涌水预警体系。④以主要风险源数据和权重计算预警体系过程中, 尚未能更好的体现预警体系的动态性。

现阶段多以单一类型的指标建立预警体系, 对多类型指标的综合考虑较少。同时, 考虑到隧道与溶洞的相对位置关系差异, 应以溶洞侵入隧道与未侵入隧道分别建立突涌水预警模型。溶洞侵入隧道时看做揭露性溶洞, 考虑溶洞规模、位置及涌水量等因素。溶洞未侵入隧道时看做未揭露性溶洞, 主要考虑岩盘对水压的承受能力。

本文综合考虑现有岩溶隧道突涌水预警体系中各指标的合理性与不足, 并考虑溶洞与开挖隧道的相对位置关系, 综合考虑工程地质条件、现场监测、围岩破损程度多个指标, 分别提出溶洞侵入隧道及未侵入隧道两种情况下的突涌水预警体系的建立方法。

1 岩溶隧道突涌水影响因素分析

1.1 突涌水灾害地质特点

(1)地层岩性。岩溶主要发生在三类可溶性岩石中, 包括碳酸盐类岩石、硫酸类岩石和卤素类岩石。中国境内的岩溶以碳酸盐占绝对优势。

围岩主要成分及结构特性等直接影响了岩溶的特点。一般硫酸盐和卤素类岩层岩溶发育较快, 硫酸盐类发育较慢。质纯层厚的岩层, 岩溶发育强烈且形态齐全, 规模较大; 含有泥质或其他杂质的岩层, 岩溶发育较弱。结晶颗粒粗大的岩石,

^{*} 收稿日期: 2021–07–20 修回日期: 2021–09–27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2021–9048)

第一作者简介: 郑宗利(1978–), 男, 汉族, 山东泰山人, 高级工程师, 主要从事隧道施工及监测研究。E-mail: 18293879608@139.com

通讯作者: 于咏妍(1983–), 女, 汉族, 北京人, 博士, 副研究员, 主要从事隧道施工风险评估研究。E-mail: 535165839@qq.com

岩溶较为发育；结晶颗粒细小的岩石，岩溶发育较弱。可溶岩被泥质或方解石填充后，岩层的透水性将受到影响。

(2)地质构造。岩溶地区地质构造可综合考虑：节理裂隙、断层、褶皱、岩层产状、可溶岩与非可溶岩的接触。

具有稀疏和宽大节理裂隙的可溶岩及节理裂隙的交汇处或密集处，容易形成巨大的岩溶系统。断层破碎带中，正断层处的岩溶发育程度明显大于逆断层处的。在褶皱轴部岩溶发育程度比翼部的强烈。在不对称的褶皱部分，陡部的岩溶发育比缓部的岩溶发育强烈。同理，在倾斜或倾斜程度明显的岩层，比水平或倾斜程度平缓区域岩溶发育强烈。

非可溶岩在岩溶隧道中可看做为相对的隔水层。在可溶岩与非可溶岩岩层为倾斜产状时，水的渗流及产生的汇水面积大于直立产状的，更容易加剧岩溶的发育。

(3)水的影响。丰富的地下水是突涌水形成的主要原因之一。可获得持续性补给的地下水，例如丰富的大气降水地区，溶洞揭露后突涌水出现的几率明显上升。

(4)填充物含量及类型。填充物中水含量的高低直接影响到突涌水发生的可能性。当溶洞内涌出水中的泥沙含量超过 50%，则应更准确的被定义为突涌泥灾害。

(5)岩盘破损程度。岩溶洞穴与隧道之间的隔水结构为防突岩盘。岩盘厚度较小，岩盘内部存在裂隙，水压较高的情况下，容易出现岩盘失稳和突涌水灾害。

1.2 突涌水灾害发生监测数据变动

(1)局部涌水量的变化。现有研究认为突破围岩型的突涌水，涌水量有逐步增加的过程。对于渗流发生后涌水量的监测可以预测突涌水灾害发生的危险程度。揭开型涌水，事故发生更具有突发性，施工过程中需要做好充分地超前预报和水压测试。根据相关资料研究，不同类型围岩被涌水突破所需最小突水量如表 1 所示。

表 1 围岩被涌水突破所需最小突水量^[7]

围岩类别	喀斯特化 石灰岩	碎屑岩	变质岩	黏土岩
最小突水量/(m ³ /h)	100 ~ 200	125 ~ 300	150 ~ 200	10 ~ 40

(2)水压力变化。施工过程中水压的大小与岩盘完整程度及厚度，直接影响到了突涌水的发生。现有资料看，不同岩体的种类与岩盘可承受的水压相关。相关研究成果显示，单位厚度的岩体能承受的水压如表 2 所示。

表 2 不同岩体能承担的水压(单位厚度岩体)^[7]

围岩类别	砂岩	砂质页岩	黏土质 页岩	断层角 砾岩
单位厚度岩体能 承担的水压 p/MPa	0.1	0.07	0.05	0.035

2 突涌水预警模型的建立

2.1 四色预警等级

现有的突涌水预警体系为四色预警，各预警等级的特征如表 3 所示。

表 3 预警等级及其特征

预警等级	特征
红色预警	特别紧急预警，会发生严重的突涌水地质灾害，为隧道施工带来灾难性后果
橙色预警	紧急预警，会发生较为严重的突涌水灾害，严重影响隧道施工
黄色预警	较紧急预警，会发生突涌水灾害，影响隧道施工，不会造成重大安全事故
蓝色预警	不会影响隧道施工，不会发生安全事故

2.2 突涌水评价指标及等级

2.2.1 现有突涌水评价指标分析

现有岩溶隧道突涌水评价指标，主要基于超前地质预报结果确定地质情况及不良地质特征；或考虑水质、水压或水量的变化、支护及围岩力学响应等。但现阶段超前地质预报结果更倾向于判定隧道前方是否存在突涌水致灾因素，若能与施工中突涌水状态等因素结合，则能加强预警体系的准确性。水的监测结果及支护、围岩力学响应的监测结果建立的预警体系有一定的预警作用，但如果能结合岩盘厚度及溶洞与隧道相对位置等因素，则能加强预警体系的准确性和及时性。

2.2.2 突涌水指标的选取方法

本文中突涌水预警指标的确定将充分考虑超前地质预报可获得的地质指标。同时为保证指标的准确性和适用性，也将综合考虑突涌水灾害的地质特点。

综合超前地质预报主要以地质调查法为基础，地震波反射法(TSP)作为长距离辅助探测，以瞬变电磁法(TEM)为核心，以超前地质钻孔法验证预报结果准确性。其原则为“洞内外结合，以洞内为主；长短结合，以短为主”。综合超前地质预报利用物探和钻探结合的方法预测掌子面前方围岩、地下水等地质信息。

以综合超前地质预报结果确定的突涌水预警评价指标主要考虑溶洞特质、水的特点、岩盘破损程度、节理裂隙状态。

其中溶洞特质将主要考虑溶洞内填充物、溶洞位置、溶洞规模等因素；水的特点将主要考虑涌水量变化及水压变化。

2.2.3 突涌水评价指标及等级确定

突涌水灾害出现主要受到溶洞特质，水的变化等因素的影响。其中部分研究中隧道突涌水预警体系中还考虑了支护体系指标，包括隧道围岩的位移及钢拱架应力的变化。在本次预警体系建立过程中，专家讨论认为支护体系的力学响应指标更适合用于隧道塌方预警体系中。在突涌水预

警指标中, 建议主要考虑溶洞特质、水的变化及岩盘状态, 不再考虑支护体系力学响应指标。

2.2.3.1 突涌水评价指标确定

(1) 溶洞特质。溶洞特质中主要考虑溶洞填充物量、溶洞规模、溶洞位置等因素的影响。

溶洞内填充水是隧道施工过程中突涌水发生的基本条件, 当溶洞内含水量极低或无水溶洞则无法发生突涌水事件。因此当溶洞内填充物含水量极低, 评价指标对应等级直接取为Ⅳ级。

小型溶洞因其规模小发生突涌水后对隧道施工影响及造成的危害程度有限, 因此在评价过程中, 当隧道周边为小型溶洞且不连通时, 评价指标对应等级直接取为Ⅳ级。

溶洞与隧道的相对位置关系直接影响到了突涌水发生的可能性及规模。当溶洞位于隧道拱顶及拱墙处, 揭露溶洞后因重力作用下突涌水发生的可能性及危害明显高于同等条件时溶洞位于隧道仰拱处的。因此在评价过程中, 当溶洞位于隧道仰拱或低于仰拱处, 溶洞内填充物涌入隧道的可能性较低, 评价指标直接取为Ⅳ级。

(2) 水的变化。

①局部涌水量。水的变化中一般考虑局部涌水量和水压力的变化, 局部涌水量的变化一般情况下能直观显示突涌水发生及危害程度从弱到强的过程。当涌水量较小或渗水可认为前方溶洞含水量偏低。表4显示了涌水量与预警等级的关系。

②水压力变化。水压力变化判定突涌水预警等级, 常采用的测试方法为水压法。主要试验步骤为现场以混凝土封闭掌子面, 监测水压力稳定时间超过48h, 稳定水压力与围岩临界水压力的比值。当比值较高时, 则认为突涌泥预警等级较高。

水压力判断法的主要原理是通过对比岩盘临界水压力和稳定水压力, 判定稳定水压是否会破坏岩盘。因此, 在此次预警体系中, 水压力变化指标将主要结合岩盘完整性来判定突涌水状态。

水压法建立预警体系中, 考虑当水压力 p 达到围岩临界水压力 p_{cr} 的85%时, 围岩在水压作用下破坏发生突水的风险增大, 水压力与预警等级的关系见表5。

(3) 岩盘破损程度。当溶洞未侵入轮廓线, 岩盘较薄且岩盘出现破损时, 突涌水发生可能性有所增长(表6)。

(4) 节理裂隙发育形态。当溶洞未侵入轮廓线时, 溶洞与隧道间如有节理裂隙发育带, 裂隙形态的差异也将对突涌水发生可能性有所影响(表7)。

2.2.3.2 突涌水评价指标等级

在本次岩溶隧道突涌水预警体系建立中, 将分别考虑溶洞侵入隧道及溶洞未侵入隧道两类情况分别进行讨论。

(1) 溶洞侵入隧道。溶洞侵入隧道状态中, 将主要考虑溶洞规模、溶洞与隧道相对位置、溶洞内填充物含量大小与溶洞涌水量指标。溶洞侵入隧道状态时, 建立岩溶隧道突涌水指标等级划分及评价指标关系(表8)。

(2) 溶洞未侵入隧道。溶洞未侵入隧道状态中, 将主要考虑岩盘破损程度、溶洞与隧道间节理裂隙形态、水压力变化。溶洞未侵入隧道时的突涌水预警指标, 仅考虑溶洞与隧道近距离接触。当溶洞与隧道间距离较大不足以出现突涌水灾害时, 无需进行隧道突涌水预警。溶洞未侵入隧道状态时, 建立岩溶隧道突涌水指标等级划分及评价指标关系(表9)。

2.3 预警等级划分

隧道突涌泥预警采用四色预警, 预警等级的确定和对应的警限如表10所示。溶洞侵入隧道与未侵入隧道因所考虑指标不同, 根据表8和表9所列指标分别判定预警等级。溶洞侵入与未侵入隧道预警等级如有不同时, 预警等级取最高值。

表4 涌水量与预警等级关系

预警等级	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
涌水量 $Q/(m^3/h)$	$100 > Q \geq 0$	$300 > Q \geq 100$	$400 > Q \geq 300$	$Q \geq 400$
突涌水状态描述	股状涌水	小型涌水	中型涌水	大(特大)型涌水

表5 水压力变化与预警等级的关系

预警等级	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
水压力变化	$p < 0.85p_{cr}$, 且 $\Delta p \leq 0$	$p < 0.85p_{cr}$, 且 $\Delta p > 0$	$0.85p_{cr} < p < p_{cr}$, 且 $\Delta p \leq 0$	$0.85p_{cr} < p < p_{cr}$, 且 $\Delta p > 0$

表6 岩盘破损程度与预警等级的关系

预警等级	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
岩盘破损程度	无破损	岩盘出现裂缝并扩展	岩盘裂缝加速扩展, 裂缝有贯通趋势	岩盘裂缝贯通, 岩盘出现大规模破损

表7 节理裂隙形态与预警等级的关系

预警等级	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
溶洞与隧道间节理裂隙形态	裂隙闭合, 裂隙宽度 $< 1\text{ mm}$	裂隙部分张开, 裂隙宽度 $1 \sim 3\text{ mm}$	裂隙张开, 裂隙宽度 $3 \sim 5\text{ mm}$	裂隙张开且夹黏土, 裂隙宽度 $> 5\text{ mm}$

表 8 指标等级(溶洞侵入隧道)

评价指标	指标等级			
	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
溶洞规模、位置、填充量	大型溶洞，位于隧道拱部，溶洞部分填充	大型溶洞，位于隧道拱部，溶洞半填充	大型溶洞，位于隧道拱部，溶洞填充过半	大型溶洞，位于隧道拱部，溶洞全填充
	大型溶洞，位于隧道边墙，溶洞半填充~部分填充	大型溶洞，位于隧道边墙，溶洞填充过半	大型溶洞，位于隧道边墙，溶洞全填充	
	中型溶洞，溶洞部分填充~填充过半	中型溶洞，溶洞全填充		
涌水量 $Q/(m^3/h)$	$100 > Q \geq 0$	$300 > Q \geq 100$	$400 > Q \geq 300$	$Q \geq 400$
突涌水状态描述	股状涌水	小型涌水	中型涌水	大(特大)型涌水

注：Ⅰ 大型溶洞指溶洞体积 $V > 50 m^3$ ；中型溶洞指溶洞体积 $50 m^3 \geq V > 10 m^3$ ；小型溶洞指溶洞体积 $10 m^3 \geq V$ 。

表 9 指标等级(溶洞未侵入隧道)

评价指标	指标等级			
	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
岩盘破损程度	无破损	岩盘出现裂缝并扩展	岩盘裂缝扩展速度加快，裂缝有贯通趋势	岩盘裂缝贯通，岩盘出现大规模破损
溶洞与隧道间节理裂隙形态	裂隙闭合，裂隙宽度 $< 1 mm$	裂隙部分张开，裂隙宽度 $1 \sim 3 mm$	裂隙张开，裂隙宽度 $3 \sim 5 mm$	裂隙张开且夹黏土，裂隙宽度 $> 5 mm$
水压力变化	$p < 0.85p_{cr}$ ，且 $\Delta p \leq 0$	$p < 0.85p_{cr}$ ，且 $\Delta p > 0$	$0.85p_{cr} < p < p_{cr}$ ，且 $\Delta p \leq 0$	$0.85p_{cr} < p < p_{cr}$ ，且 $\Delta p > 0$

表 10 预警等级与警限划分

预警等级	警限
红色预警	任一指标预警等级为Ⅰ级，或两项及两项以上预警等级为Ⅱ级
橙色预警	无预警等级超过Ⅰ级，且有一项指标预警等级为Ⅱ级
黄色预警	无预警等级超过Ⅱ级，且有一项指标预警等级为Ⅲ级
蓝色预警	所有指标预警等级都为Ⅳ级

预警等级通常基于预警指标的变动而出现变化。因此在预警状态发布后，根据工程实际情况不断的根据预警指标的变动，进行预警级别的调整。并及时对新预警等级进行发布，保证隧道施工过程中的快速和安全性。

2.4 预警对策

通过对专家意见的汇总，并参考现有研究成果，确定各预警等级的施工应对措施如表 11 所示。

表 11 预警等级及应对措施

预警等级	应对措施
红色预警	立即停止所有施工工序，及时采取加固措施或应急处置措施，撤出其他所有人员
橙色预警	停止开挖面施工，撤出开挖面工作人员，开展加固措施施工
黄色预警	加强监测
蓝色预警	正常施工

在预警信息发布后，接收到警情的施工区各类工作人员，应该根据警度高低，加强对预警指标的观察和监测，严格按照风险防控措施进行下一步的施工。

3 工程实例验证

3.1 工程概述

柳州市莲花大道工程位于柳州市北部，西起于规划经一路交叉口，东至环江村回龙休闲山庄附近的柳州市官塘大桥工程西岸互通立交起点。其中的莲花山隧道左线长 1 870 m，右线长 1 871 m。

莲花山隧道岩溶发育强烈，岩溶灾害的可预见性差、突发性明显。

莲花山隧道岩体浅部以溶蚀风化或小规模溶蚀沟槽发育为主，岩体内在石炭系上统马平组(C3m)、二叠系下统栖霞阶(P1q)岩层中发育有溶洞、空洞；在二叠系下统茅口阶(P1m)、二叠系上统合山组(P2h)岩层中岩体水平层理明显，被切割成层状，碎块状，形成的裂隙表面则被风化溶蚀，形成强风化层，或者呈团状分布于完整或较完整的岩体之中，裂隙宽窄不一，内为黏性土充填。地勘钻孔的遇溶洞率为 84%，线岩溶率为 16.7%，岩溶强烈发育。

场地地下水主要有松散岩类孔隙水和裂隙水。松散岩类孔隙水主要赋存于第四系坡残积黏性土中，补给来源为大气降水和地表水入渗，本场区的坡残积黏性土多为相对隔水层，其透水性及富水性均较差，大气降水不易入渗，加上在隧址地段地形较陡，横向冲沟发育，降水迅速形成地表径流向低处排泄，因此此类地下水不易大量富集，水量贫乏，对隧道施工基本无影响。

裂隙水主要赋存于基岩风化裂隙及构造裂隙带中。隧道沿线长度较长，场区赋水条件变化较大，

表 12 掌子面地质素描

断面	YK2 + 870	YK3 + 065	YK3 + 076
掌子面尺寸	开挖宽度 15 m, 开挖高度 5 m		开挖宽度 15 m, 开挖高度 5 m
掌子面状态	正面不能自稳	稳定	正面不能自稳
毛开挖面状态	自稳困难, 要及时支护	自稳	需超前支护
岩石强度/MPa	其他	15 ~ 30	其他
风化程度	其他	弱风化	其他
裂隙宽度/mm	>5	>5	其他
裂隙形态	张开	张开	部分张开
涌水状态	渗水	渗水	渗水

表 13 岩溶隧道突涌水预警等级

评价指标		指标描述	指标等级	预警等级
YK2 + 922 ~ YK2 + 810	溶洞揭露状况	中型溶洞溶洞全填充	Ⅲ	黄色预警
	溶洞侵入隧道	涌水量 $Q/(m^3/h)$	$100 > Q \geq 0$	
	突涌水状态描述	渗水为主, 局部点状出露	Ⅳ	
	岩盘破损程度	溶洞侵入隧道类型		
	溶洞未侵入隧道	溶洞与隧道间节理裂隙形态	溶洞侵入隧道类型	
		水压力变化	溶洞侵入隧道类型	
YK3 + 093 ~ YK3 + 063	溶洞揭露状况	大型溶洞溶洞填充过半	Ⅱ	橙色预警
	溶洞侵入隧道	涌水量 $Q/(m^3/h)$	$100 > Q \geq 0$	
	突涌水状态描述	渗水为主, 局部点状出露	Ⅳ	
	岩盘破损程度	溶洞侵入隧道类型		
	溶洞未侵入隧道	溶洞与隧道间节理裂隙形态	溶洞侵入隧道类型	
		水压力变化	溶洞侵入隧道类型	

水量不均匀, 受裂隙发育程度和联通性控制, 裂隙发育强且联通性好的地段则水量丰富, 反之则少, 主要来自大气降水沿松散土体及顺浅部岩层层面, 裂隙浸渗形成。由于山体均覆盖有土体且植被发育, 下伏基岩裂隙发育, 便于赋存地下水, 故隧道开挖过程会出现不同程度渗水, 少者可见岩体潮湿, 大者呈淋雨状。

3.2 突涌水预警以及处理

以莲花山隧道右线 YK2 + 922 ~ YK2 + 810 和 YK3 + 093 ~ YK3 + 063 区间为例进行岩溶隧道突涌水预警体系。

YK2 + 922 ~ YK2 + 810 围岩以微风化灰岩、泥质灰岩、硅质灰岩夹泥岩为主。岩体节理裂隙较发育, 岩体破碎 ~ 较破碎, 岩体呈小块状结构, 围岩稳定性差 ~ 较差, 测段岩溶较发育。超前地质预报预判 YK2 + 922 ~ YK2 + 810 段岩溶发育 ~ 较发育, 多以填充型溶洞、空腔或岩溶裂隙出现, 围岩稳定性差。掌子面溶洞位于进洞方向右侧拱部, 有向前和向右延伸趋势, 填充物主要为软塑状黏性土, 含水量较大, 无自稳能力。出水形式主要以渗水为主, 局部点状出露。

其中断面 YK2 + 870 处, 于拱顶右侧(中岩墙一侧)出现口径为 1.5 m 左右的溶腔, 内部填充物为软塑状黏性土, 含水量较大。

YK3 + 093 ~ YK3 + 063 掌子面前方 17 m 附近(即 YK3 + 076)、28 m 附近(即 YK3 + 065)发育软弱夹层或层间节理间夹泥, 掌子面主要以渗水出

露为主。在此区间隧道拱顶出现全填充型不规则柱状溶洞, 溶洞体积约 260 m³, 可判定为大型溶洞, 内部填充为淤泥质土及水。

YK2 + 870、YK3 + 065、YK3 + 076 掌子面地质素描如表 12 所示。

两里程段岩溶隧道突涌水评价指标描述及预警等级如表 13 所示。

YK2 + 922 ~ YK2 + 810 里程段为突涌水黄色预警, 因此在施工中加强监测, 在施工中并未出现突涌水灾害。YK3 + 093 ~ YK3 + 063 里程段为突涌水橙色预警。因突涌水预警等级较高, 因此在施工中进行了及时处理。

通过对工程中两个里程段进行突涌水预警分析可知, 当突涌水预警体系显示预警程度较低时, 在施工中加强了监测, 在施工中并未出现突涌水灾害。当预警程度较高时, 施工过程中进行了及时处理, 避免了灾害的发生及人员的伤亡以及财产的损失。因此可认为本研究中岩溶隧道突涌水预警体系可靠。

4 结论

(1)通过理论分析, 确定了岩溶隧道突涌水的主要影响因素以及突涌水发生过程中变化较为显著的项目作为突涌水评价指标。

(2)分析现有突涌水评价指标的利弊, 确定以溶洞特质、水的变化、岩盘破损程度、溶洞与隧

道间节理裂隙形态为主要指标建立突涌水预警模型。

(3)根据溶洞与隧道相对位置关系,分别提出溶洞侵入隧道及未侵入隧道两种类型的突涌水预警体系的建立方法。其中溶洞侵入隧道的突涌水预警体系主要考虑溶洞特点、涌水量、突涌水状态,溶洞未侵入隧道突涌水预警体系主要考虑岩盘破坏程度、溶洞与隧道间节理裂隙形态和水压力变化。

(4)预警体系应用于莲花山隧道工程中,预警结果与现场吻合较好,验证了预警体系的合理性与可行性。

参考文献:

- [1] 李术才,薛翊国,张庆松,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(7): 1297-1307.
- [2] 李术才,李晓昭,靖洪文,等. 深长隧道突水突泥重大灾害致灾机理及预测预警与控制理论研究进展[J]. 中国基础科学, 2017, 19(3): 27-43.
- [3] 周捷,席锦州. 综合超前地质预报在新铜锣山隧道中的运用[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 207-212.
- [4] 匡星,白明洲,王成亮,等. 基于模糊评价方法的隧道岩溶突水地质灾害综合预警方法[J]. 公路交通科技, 2010, 27(11): 100-103.
- [5] 杨茂林. 8.8 m 超大采高综采工作面顶板水害动态监测技术研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(8): 63-71.
- [6] 葛颜慧,李术才,张庆松. 高风险岩溶隧道突水预警防灾体系研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(3): 122-128.
- [7] 马士伟,梅志荣,张军伟. 长大隧道突发性地质灾害预警信息系统研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 103-108.
- [8] 马士伟,梅志荣,张军伟,等. 岩溶隧道涌突水灾害预警与防治技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 12-16.
- [9] 曹鹏程. 山岭大断面岩溶隧道突水风险分析及预警方案分析[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 234-238, 274.
- [10] 杨寅静. 岩溶区隧道突水地质灾害的临界预警特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [11] 刘希亮,武文龙,郭佳奇. 隧道防突水岩体的破坏模式、特征及预警判识[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 109-117, 183.
- [12] 马士伟,梅志荣,张军伟. 长大隧道突水突泥灾害的地质构造量化评价与监测预警[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(2): 99-104.

Establishment of Early - warning System for Water Inrush in Karst Tunnel

ZHENG Zongli¹, GUAN Huijun¹, GOU Xiangwei¹, SHI Hengyue¹ and YU Yongyan²

(1. Gansu Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to enhance the accuracy of early warning of water inrush in karst tunnel, the early warning system is established under the conditions of cave invasion tunnel and non-invasion tunnel. In the process of establishment, theoretical analysis method and characteristics of karst tunnel are considered. Based on the theoretical analysis, the main influencing factors of water inrush in karst tunnel and the monitoring items with significant changes in the process of water inrush are determined. The main indexes of water inrush warning system are determined in early - warning system, which are based on the characteristics of karst cave, the change of water, damage degree of rock plate and characteristics of fissures. According to the relative position relationship between the cave and the tunnel, two types of water inrush warning models are established, which are cave intrusion tunnel and cave non-intrusion tunnel. The application shows that results of the system are in consistency of construction, which validates the rationality and feasibility of the method.

Key words: water inrush; early warning system; four color warning; karst tunnel