

贵州老鹰岩隧道水文地质特征及涌水量预测

刘臻^{1*}, 张基进¹, 童文富¹, 杜毓超^{2#}

¹贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳

²山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南

收稿日期: 2023年2月3日; 录用日期: 2023年3月2日; 发布日期: 2023年3月10日

摘要

针对我国西南岩溶地区隧道工程施工遭遇地下涌水灾害, 严重影响施工进度、威胁施工安全等问题, 开展隧道涌水预测。以老鹰岩隧道为研究对象, 在岩溶水文地质调查的基础上, 结合岩溶地貌类型、岩溶及岩溶水的发育特征, 分析了隧道区内岩溶地下水系统与隧道的水力关系。对隧道进行了分区段水文地质评价, 同时采用大气降水入渗系数法对隧道进行涌水量预测。其中, 隧道涌水高风险段(ZK137 + 977~ZK138 + 222)涌水量达 $11.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 需给予重视。本研究可为施工设计与水害防治提供科学依据。

关键词

老鹰岩隧道, 岩溶水文地质, 地下河及管道, 涌水

Characteristics of Hydrogeology and Prediction of Water Inflow at the Laoyingyan Tunnel in Guizhou Province

Zhen Liu^{1*}, Jijin Zhang¹, Wenfu Tong¹, Yuchao Du^{2#}

¹Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd, Guiyang Guizhou

²Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Feb. 3rd, 2023; accepted: Mar. 2nd, 2023; published: Mar. 10th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘臻, 张基进, 童文富, 杜毓超. 贵州老鹰岩隧道水文地质特征及涌水量预测[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(3): 193-201. DOI: 10.12677/ag.2023.133018

Abstract

Aiming at the problem of water-gushing disaster to be frequently encountered during the tunneling construction within the karst areas in the Southwest China, which is to seriously impact the construction progress and threaten the construction safety, a prediction on the water-gushing during tunneling construction is carried out. By taking the construction of Laoyingyan Tunnel in Guizhou Province as the study object, the hydraulic relationship of the tunnel to Underground System within the tunnel area is analyzed in combination with the karst geomorphological type, karst and karstwater development characteristics on the basis of the relevant karst hydrogeological investigation. Meanwhile, the hydrogeological evaluation is made on Laoyingyan Tunnel in sections, while the water-gushing predictions on the sections with the maximum probability of water-gushing, but the water-gushing yield of the section of ZK137 + 977~ZK138 + 222 is as high as $11.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, thus it is indicated that the section of ZK137 + 977~ZK138 + 222 is a section with high risk of water-gushing and then the relevant necessary attention must be paid to. This study can provide a scientific basis for the relevant construction design and the water disaster control for the tunneling.

Keywords

Laoyingyantunnel, Hydrogeology of Karst, Underground Rivers and Pipelines, Water Inflow

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为适应贵州经济的发展,贵州省正在大力的建设高速公路。然而,贵州省地处我国西南岩溶集中连片典型发育区,洼地、落水洞、地下河广泛分布[1][2],对高速公路尤其是隧道建设提出了很高的挑战,岩溶隧道突涌水事故屡有发生。因此,查明隧道岩溶地区水文地质条件,分析岩溶发育规律以及岩溶地下水系统特征[3][4][5][6],对预防隧道涌水突水灾害、保障隧道施工安全具有重要意义。

1994年,王家服[7]指出地下水出流过程必须用多个不等调蓄系数的线性水库并联来模拟,还对隧道涌水过程进行分析,并用地下水汇流模型对某隧道某涌水点出流过程进行模拟。1996年,杨立中、黄涛等[8]做了渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量的预测研究,并用此方法对秦岭特长隧道岩体裂隙水涌水量进行了预测。1999年,黄涛、杨立中等[9]提出了渗流-应力-温度耦合环境下大埋深裂隙围岩隧道涌水量预测计算的确定性数学模型方法。2000年,毕焕军[10]做了裂隙岩体数值法预测计算特长隧道涌水量的应用研究,并计算秦岭隧道涌水量,结果较为理想。同年,徐则民、杨立中、黄润秋等[11]提出了特长超深隧道涌水量预测的镜象法,将特长深埋隧道概化为补给边界附近井,通过镜象法得出了隧道最大涌水量的计算模型。2002年,陈崇希、刘文波、彭涛等[12]提出了隧道外水压力的地下水流模型。同年,王建秀、杨立中、何静等[13]提出了深埋隧道外水压力计算的解析-数值法。2004年,韩行瑞[14]在对我国典型岩溶隧道突水规律研究基础上,提出隧道岩溶突水专家评判系统。2005年,Chungsik Yoo [15]在研究隧道掘进和地下水的关系时利用三维孔压力的方法结合解析法对涌水量的大小作了预测。2006年,Dimitrios Kolymbas [16]用地下水动力学的解析法推出有关公式($q = 2\pi K(H-h_a)/\log(2h_1/r)$)对隧道

突水进行了计算。2021年,常威[17]改进降雨入渗法,将面状入渗和点状集中灌入二元补给纳入计算模型,在MODFLOW-CFP模块的基础上改进岩溶管道-裂隙介质双重介质以及层流紊流并存的地表-地下水耦合模型,分别进行隧道涌水量预测。

虽然以上预测和计算涌水量的方法很多,但绝大部分都是适用于裂隙岩体中的隧道,在岩溶区隧道涌水量预测的新方法在国内外很少见到。尽管国内外岩溶研究具有十分悠久的历史,而且也已积累了若干重要的研究成果,但到目前为止这些成果仍然不能有效指导深埋岩溶隧道的涌水预测问题。因此,对岩溶水文地质特征的研究,不论是找水打井、物探解译,还是隧道涌水预测,都具有重要意义。

老鹰岩隧道位于贵州省普安县白沙乡境内。隧道洞身主体由北西-南东向展布,进口段总体走向方位角 144° ,出口段走向约 167° ,呈弧形展布。拟建隧道采用分离式隧道方案,左幅起讫里程桩号ZK135+560~ZK138+715,长3155m,本标段隧道右幅起讫里程桩号YK135+545~YK138+680,长3135m,最大埋深约266.3m。隧道工区内岩溶水文地质条件复杂、岩溶强烈发育,特别是隧道出口段处于富水向斜构造区,发育白水地下河系统,为典型的地下河及管道型蓄水构造[18]。虽然前期开展过工程地质勘察和水文地质勘察,但对极端气候条件下隧道发生岩溶涌水的几率和涌水量尚未进行详细分析和评价,本次通过隧道岩溶水文地质条件分析,并采用适宜的方法预测极端气候条件下的涌水量,是确保隧道施工安全及营运安全的有力保障。

2. 地质背景

可溶岩分布受地层岩性、地形地貌和构造控制[19]。隧道区内出露地层为泥盆系中统、泥盆系上统、石炭系、二叠系、三叠系下统,第四系仅洼地、谷地底部见部分分布,缺失侏罗系、白垩系下统,区内以石炭系、二叠系分布最广,并且各时代碳酸盐岩系分布较广泛,使区内岩溶发育及岩溶水富集具备了基本条件。

除沉积层外,区内尚有海西期玄武岩、辉绿岩(主要见于测区西北部)以及燕山期偏碱性超基性岩类、基性岩类(分布于测区东南部)存在。但除早二叠世晚期一晚二叠世早期的玄武岩外,其余岩浆岩体不但分布零星,而且规模甚小,不具水文地质意义。

工作区位于扬子准地台威宁北西向构造变形区及普安旋扭构造变形区,区内地质构造体系分属新华夏构造体系,多分布北东、近东西向展布的褶皱和断裂,地质构造复杂,在漫长的地质发展过程中,先成体系控制、制约后生体系,同时后生体系改造、破坏先成体系,产生了构造体系间的多种复合关系。老鹰岩隧道处龙吟背斜南端核部偏南翼区(凉水营向斜北翼),由北西而南东依次分布二叠系下统平川组(P_{1p})灰岩、泥质砂岩、页岩,茅口-栖霞组(P_{1m+q})灰岩。老鹰岩隧道所处位置为一小型向斜,为老鹰岩向斜。见图1。

3. 地下河系统及其特征

3.1. 岩溶地貌及个体形态特征

根据地貌形态的不同,可划分为以溶蚀为主的溶丘谷地地貌和溶丘洼地地貌,以溶蚀-侵蚀为主的岩溶中、低山地貌岩等三大类地貌。

溶丘谷地,位于隧址区的东南,莲花山-白水一带,近南北走向呈带状分布,长约3km、宽约0.1~0.5km,地势北西高南东低,海拔标高在1000~1500m。位于白水地下河下游,岩性主要以二叠系下统栖霞组(P_{1q})中厚层灰岩为主,岩层产状大致为 $235^{\circ} \angle 50^{\circ}$ 。该地貌特征与区域构造线基本一致,溶峰一般高度为50~100m不等,溶丘多成倒锥状或馒头状。

溶丘洼地,位于隧址区及其周边,其中卡塘-牛屎冲-小冲头一带和瓦厂-小马厂一带溶丘洼地出

露的地层为二叠系下统栖霞组(P_{1q})、茅口组(P_{1m})中-厚层灰岩。洼地主要发育于老鹰岩向斜构造西翼，溶丘多成倒锥状或馒头状，各溶丘间以大小不等、形态各异的洼地相连，洼地多呈漏斗状和锅底状，可见明显消水洞，具有一定消水能力，地表水通过洼地等向地下河排泄。

岩溶中、低山地貌，其与一般中、低山峡谷地貌相似，相对高差 100 m~400 m，地表水流深切，形成峡谷。在分水岭地区，地表仍有早期岩溶现象；山谷两翼碳酸盐岩区河流强烈下切，垂直岩溶形态强烈发育，地表侵蚀作用和地下溶蚀作用都很强烈。老鹰岩隧道及其周边发育岩溶中低山地貌区。

岩溶区，在水流冲刷和溶蚀的作用下形成独特的地表和地下岩溶形态[20]，这些多样的岩溶形态成因及发育均有一定相关性，因此它们中的一些可以形成岩溶的组合类型。根据隧道区岩溶形态特征调查，区发育的主要岩溶个体形态划分为溶沟溶槽、岩溶洼地、落水洞、溶洞、溶蚀裂隙、伏流口、地下河管道七种类型。

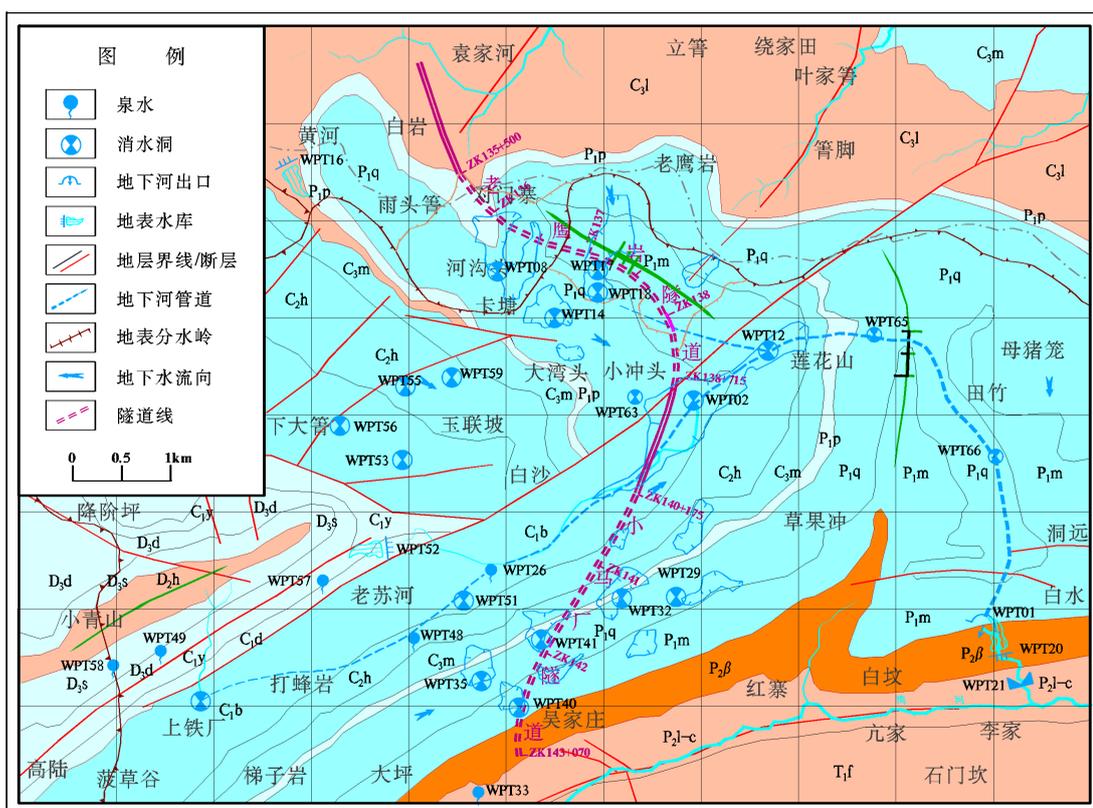


Figure 1. Hydrogeologic map of the tunnel area
图 1. 隧道区水文地质图

3.2. 地下河系统特征

区内岩溶地下水系统的空间分布主要受地形地貌、地质构造共同控制[21] [22]，区内地势总体南高北低，西高东低。主要表现在：岩溶水系统的空间总体展布是受白沙逆断层及老鹰岩向斜的控制。其中，白水地下河系统与隧道有密切关系。

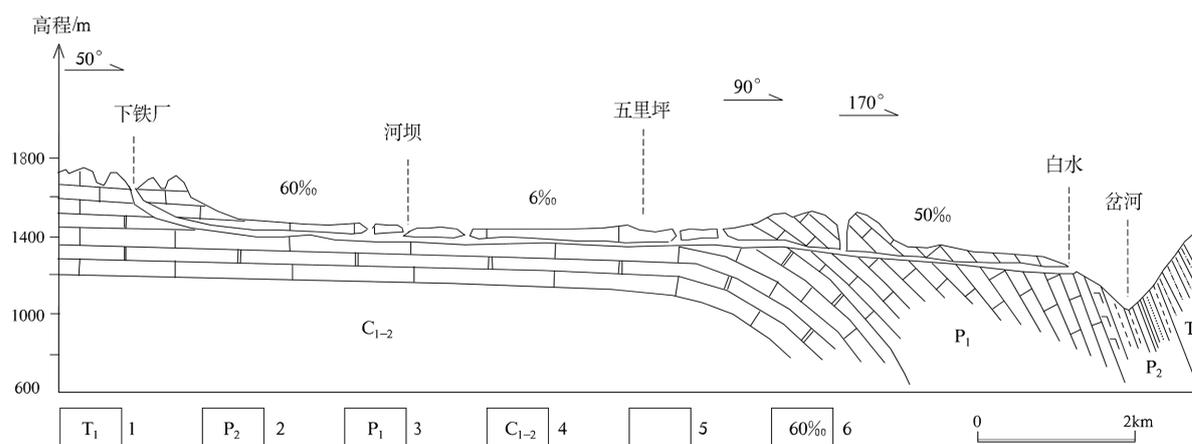
白水地下河系统发源于普安县白沙乡下铁厂一带，向北东经五里坪后，折向南于白沙乡白水村流出，呈线状钩形展布，主管道全长约 12 km，总汇水面积约 50 km²，管道埋深一般大于 50 m，地下河出口高程 1180 m，地层岩性为茅口组灰岩。据前人调查资料，地下河出口平水期流量 5959 L/s，枯水期流量 315.7

L/s。目前已被建设为景区,调查时测得水量约 56.1 L/s (2022 年 8 月 21 日),地下水呈股状于溶隙中流出,动态变化大。

白水地下河系统是单管道型地下河系统,该地下河系统结构相对简单,以南西-北东向、近南北向的主管道为主,以洼地降水汇入补给和落水洞灌入补给为主。地下河主管道大体由西向东径流,经伏流入口(WPT26)及落水洞(WPT02、WPT12)等补给,汇集五里坪村东侧折向南,经田竹村落水洞(WPT66)等补给后于白水村伏流出口(WPT01)出露,形成地表径流。

该地下河发育于石炭系摆佐组至二叠系茅口组灰岩及白云质灰岩地层中,地表以条形洼地和串珠状洼地显示,洼地中发育落水洞。其中,下铁厂至五里坪段,地下河在白沙逆断层下盘石炭系地层中径流,流至五里坪东,沿裂隙穿入老鹰岩向斜的二叠系下统地层中径流,最终因二叠系下统玄武岩的阻隔而出露地表。

该地下河汇水区域属峰丛洼地地貌,地表溶丘、峰丛基座相连,大小不一的岩溶中低山峰丛密布,山体中常见溶洞发育。沿地下河纵剖面形态可分为三段(图 2),其中下铁厂至河坝段为上游段,平均水力坡度约为 60‰,五里坪至白水段为下游段,平均水力坡度约为 50‰,河坝至五里坪为中游段,平均水力坡度约为 6‰,中游段距离老鹰岩隧道和小马厂隧道最近。三段平均水力坡度约为 35‰。结合平面呈钩状的展布特征,可以追溯多期发育的历史,它受地貌和古水文网变迁的控制。地下河发育早期,可能沿白沙断层向北东侧麻布河排泄,后期由于岔河(西泌河支流)的溯源侵蚀,袭夺了地下河水,使其自五里坪以下呈急剧的转折,向西泌河流域排泄,其间可能存在袭夺裂点。因此,地下河管道为隧道涌水最大的风险来源。



1、三叠系下统砂页岩; 2、二叠系上统砂页岩及玄武岩; 3、二叠系下统灰岩; 4、石炭系中、下统灰岩及白云质灰岩; 5、地下河及落水洞; 6、地下河坡降。

Figure 2. Hydrogeologic section of the Baishui underground river system

图 2. 白水地下河剖面图

4. 隧道涌水水文地质分析

4.1. 隧道水文地质分段评述

裂隙蓄水构造均处于碎屑岩中,围岩多处于弱风化状态,破碎地带风化较严重,有裂隙水渗漏,在裂隙发育带可能涌现裂隙水及滴渗水,涌水量不大[23] [24]。然而,岩溶蓄水构造是造成岩溶涌水的重要因素。特别是断层影响带、背斜和向斜核部,岩溶往往较发育,极易形成地下河及管道型蓄水构造,往

往造成大型、特大型岩溶涌水，对隧道施工安全影响极大。

通过地面水文地质调查，结合水文地质条件特征，将隧道分4段进行分析评述。隧道纵剖面如图3所示。

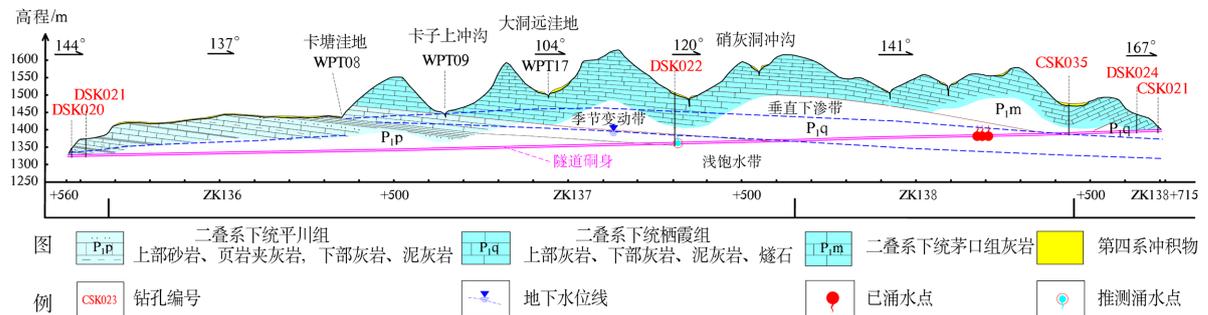


Figure 3. Longitudinal section of the tunnel
图3. 隧道纵剖面图

1) 隧道 ZK138 + 450~ZK138 + 715 段水文地质评述

据调查资料，隧道 ZK138 + 450~ZK138 + 715 段长 690 m，隧道洞身围岩为二叠系地层，其中 ZK138 + 450~ZK138 + 510 段洞身穿越二叠系下统茅口组地层，岩性主要为薄层燧石灰岩及灰色厚层隐晶至细晶灰岩，局部含燧石结核。ZK138 + 510~ZK138 + 750 段洞身穿越二叠系下统栖霞组地层，岩性主要为黑灰色中厚层灰岩。

通过地面水文地质调查，本隧道段地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙溶洞穴水，属区域性强岩溶含水层，且隧道洞身处于垂直下渗带，具备季节性岩溶涌水条件之一。但该段处于岩溶槽谷区，地表沟谷发育，降雨后多形成地表径流，不具备大型涌水条件。

2) 隧道 ZK137 + 650~ZK138 + 450 段水文地质评述

据调查资料，ZK137 + 650~ZK138 + 360 段洞身穿越二叠系下统栖霞组地层，岩性主要为黑灰色中厚层灰岩。ZK138 + 360~ZK138 + 450 段洞身穿越二叠系下统茅口组地层，岩性主要为薄层燧石灰岩及灰色厚层隐晶至细晶灰岩，局部含燧石结核，属区域性强岩溶含水层段。

通过地面水文地质调查，本隧道段地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙溶洞穴水，属区域性中一强岩溶含水层段，且隧道洞身处于季节变动带，具备季节性大型岩溶涌水条件之一。

其中，隧道 ZK137 + 977~ZK138 + 222 段，主要处于溶丘洼地区，地表溶蚀洼地(WPT18)发育且洼地底部发育消水洞，降雨后洼地汇集地表径流灌入式补给地下水，具备季节性大型岩溶涌水条件之二。

区域发育白沙地下河系统，隧道处于该地下河系统的补给径流区，推测其支管道立于隧道下方，强降雨时地下水位急剧上升，具备季节性大型岩溶涌水条件之三。

3) 隧道 ZK137 + 300~ZK137 + 650 段岩溶水文地质评述

据调查资料，ZK137 + 300~ZK138 + 360 段洞身穿越二叠系下统栖霞组地层，岩性主要为黑灰色中厚层灰岩。ZK138 + 360~ZK138 + 450 段洞身穿越二叠系下统茅口组地层，岩性主要为薄层燧石灰岩及灰色厚层隐晶至细晶灰岩，局部含燧石结核，属区域性强岩溶含水层段。

通过地面水文地质调查，本隧道段地下水类型主要为碳酸盐岩裂隙溶洞穴水，属区域性强岩溶含水层段，且隧道洞身处于浅饱水带，具备大型岩溶涌水条件之一。

区域发育白沙地下河系统，隧道处于该地下水系统的补给区，具备中大岩溶涌水条件之二。

受区域地质构造的影响，隧道区北东向($315^\circ \angle 72^\circ$)与北西向($175^\circ \angle 40^\circ$)两组溶蚀裂隙发育，地表、地下岩溶主要沿这两组方向发育，成为良好的过水通道。具备中小岩溶涌水条件之三。

该段主要处于溶丘洼地区，地表溶蚀洼地发育且洼地底部发育消水洞，降雨后洼地汇集地表径流灌入式补给地下水，还具备季节性岩溶涌水条件。

综上所述，隧道 ZK137 + 300~ZK138 + 715 段具备中型涌水条件。该段隧道开挖可能遇垂向型岩溶管道及顺层发育的岩溶裂隙，可能会出现有压涌水，且往后一个降雨过程可能会发生一次大的涌水。特别是隧道 ZK137 + 977~ZK138 + 222 段，涌水量的估算涉及到静储量和动储量两部分，但由于隧道大部分洞段已开挖，故只考虑动储量部分，采用降雨入渗系数法估算。

4) 隧道 ZK135 + 560~ZK137 + 300 段岩溶水文地质评述

老鹰岩隧道 T18 合同段(左洞桩号 ZK135 + 560~ZK137 + 140)隧道洞身围岩为二叠系下统平川组地层，岩性主要为深灰色中厚层微晶灰岩，灰黑色泥质砂岩和页岩，夹石英砂岩，属区域性弱岩溶含水层段。且隧道洞身处于浅饱水带，具备小型岩溶涌水条件之一。

区域发育白沙地下河系统，隧道处于该地下水系统的补给区，具备小型岩溶涌水条件之二。

受区域地质构造的影响，隧道区北东向($315^\circ \angle 72^\circ$)与北西向($175^\circ \angle 40^\circ$)两组溶蚀裂隙发育，地表、地下岩溶主要沿这两组方向发育，成为良好的过水通道。具备小型岩溶涌水条件之三。

综上所述，隧道 ZK135 + 560~ZK137 + 300 段具备小型涌水条件。该段隧道开挖可能遇垂向型岩溶管道及顺层发育的岩溶裂隙，可能会出现有压涌水，且往后一个降雨过程可能会发生一次大的涌水。涌水量的估算涉及到静储量和动储量两部分，但由于隧道大部分洞段已开挖，故只考虑动储量部分，采用降雨入渗系数法估算。

4.2. 隧道涌水量预测

岩溶隧道突涌水预测方法主要有水文地质比拟法、径流模数法、水文地质数值法等，但采用何种方法、如何确定参数使得隧道的涌水量大小预测更加符合实际涌水量的大小，一直是个难题[25] [26] [27]。

《隧道岩溶涌水专家评判系统》在深入分析隧道岩溶涌水的机理上，构建了评判模型，并提出了参数的选取，在我国铁路、公路隧道建设中得到了广泛应用[28] [29] [30]。本隧道采用该方法评价，涌水量 Q 由动储量 Q_1 和静储量 Q_2 两部份组成，但由于隧道大部分已开挖，故涌水量只考虑动储量 Q_1 。

动储量(Q_1)为强降雨期引起的最大涌水量，采用大气降水入渗系数法估算[28] [29] [30]:

$$Q_1 = N \cdot \alpha \cdot A \cdot F / T \quad (1)$$

式(1)中: Q_1 为强降雨期引起的最大涌水量, m^3/d ; N 为涌入系数; α 为入渗系数; A 为一个降雨过程的最大降雨量, mm ; F 为汇水面积, km^2 ; T 为降雨周期, d 。

隧道涌水部位的外水压力(P)采用下式估算[28] [29] [30]:

$$P = 0.001\beta \cdot \gamma \cdot H \quad (2)$$

式(2)中: P 为外水压力, MPa ; γ 为水容重, KN/m^3 ; H 为计算点水头, m ; β 水头折减系数。

上述有关参数按《隧道岩溶涌水专家评判系统》给出，计算参数见表 1，涌水量计算结果见表 2。

Table 1. Calculation parameters of tunnel water inflow

表 1. 隧道涌水量计算参数表

隧道段	动储量参数					外水压力参数	
	N	α	A	F	T	β	γ
ZK135 + 560~ZK137 + 300	0.3	0.2	205	1.4	1		
ZK137 + 300~ZK137 + 977							
ZK138 + 222~ZK138 + 715	0.3	0.35	205	1.6	1	0.6	9.8
ZK137 + 977~ZK138 + 222	0.75	0.6	205	1.2	1	1.0	9.8

Table 2. Calculation results of tunnel water inflow
表 2. 隧道涌水计算结果表

隧道段	动储量 m ³ /d	最大涌水量 m ³ /d	外水压力 MPa
ZK135 + 560~ZK137 + 300	1.72 × 10 ⁴	1.72 × 10 ⁴	
ZK137 + 300~ZK137 + 977	3.44 × 10 ⁴	3.44 × 10 ⁴	0.56
ZK138 + 222~ZK138 + 715	11.07 × 10 ⁴	11.07 × 10 ⁴	0.57

5. 结论

老鹰岩隧道处龙吟背斜南端核部偏南翼区(凉水营向斜北翼),由北西而南东依次分布二叠系下统平川组(P_{1p})灰岩、泥质砂岩、页岩,二叠系下统栖霞、茅口组(P_{1m} + q)灰岩。老鹰岩隧道所处位置为一小型向斜,为老鹰岩向斜,且地表、地下岩溶发育,发育大型地下河系统——白水地下河。

本文结合地层地质构造和岩溶地下水系统,分区段的评价了该隧道水文地质条件。对隧道岩溶涌水可能性进行了分析,并确定了洞身所处水文地质条件的垂向分带。指出该隧道施工揭露岩溶管道的机率较高地段分布在隧道 ZK137 + 977~ZK138 + 222 段,特别是大雨过后极易产生突水、突泥等灾害。并采用大气降水入渗系数法,参照《隧道岩溶涌水专家评判系统》选取参数,对隧道涌水量进行综合计算与评价。给出暴雨期,隧道 ZK137 + 977~ZK138 + 222 段涌水量达 11.07 × 10⁴ m³/d,涌水部位外水压力约为 0.57 MPa,隧道施工过程应予以特别注意的建议。施工证实,依据上述工作方法进行隧道岩溶涌水分析,预测的涌水位置、涌水量及涌水部位外水压力值更接近实际,从而弥补了前期勘查尚未明确极端气候条件下隧道涌水位置、涌水状态、极值涌水量等重要水文地质参数。为确保隧道施工安全及营运提供数据支撑和有力保障。

基金项目

贵州省科技厅科技项目(2020-123-004)。

参考文献

- [1] 杨振华,宋小庆,屈秋楠,等.岩溶地区水资源-环境系统服务功能评价修正——以贵州省为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1259-1268.
- [2] 王明章,等.贵州岩溶石山生态地质环境研究[M].北京:地质出版社,2005.
- [3] Kiraly, L. (2003) Karstification and Groundwater Flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1, 155-192.
- [4] 柴春阳,巫锡勇,张广泽.丽香铁路岩溶发育特征及对隧道工程的影响分析[J].铁道标准设计,2018,62(3):114-117+123.
- [5] 田清朝,万军伟,黄琨,等.高家坪隧道岩溶水系统识别及涌水量预测[J].安全与环境工程,2016,23(5):13-19.
- [6] Estrela, T. and Sahuquillo, A. (1997) Modeling the Response of a Karstic Spring at Arteta Aquifer in Spain. *Groundwater*, 35, 18-24. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00055.x>
- [7] 王家服.隧道涌水量计算探讨[J].铁道学报,1994(4):110-116.
- [8] 杨立中,黄涛,钟生军.隧道含水围岩非均质各向异性渗透特性的研究[J].铁道工程学报,1996(2):63-69.
- [9] 黄涛,杨立中.渗流-应力-温度耦合下裂隙围岩隧道涌水量的预测[J].西南交通大学学报,1999(5):554-559.
- [10] 毕焕军.裂隙岩体数值法预测计算特长隧道涌水量的应用研究[J].铁道工程学报,2000(1):59-62.
- [11] 徐则民,杨立中,黄润秋.特长超深隧道涌水量预测的镜象法[J].铁道工程学报,2000(1):55-58.
- [12] 陈崇希,刘文波,彭涛.确定隧道外水压力的地下水流模型——读《深埋隧道外水压力计算的解析-数值法》一

- 文随笔[J]. 水文地质工程地质, 2002(5): 62-64.
- [13] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道外水压力计算的解析-数值法[J]. 水文地质工程地质, 2002(3): 17-19+28.
- [14] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218.
- [15] Yoo, C. (2005) Interaction between Tunneling and Groundwater-Numerical Investigation Using Three Dimensional Stress-Pore Pressure Coupled Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 240-250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(240\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(240))
- [16] Kolymbas, D. and Wagner, P. (2007) Groundwater Ingress to Tunnels—the Exact Analytical Solution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**, 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.02.001>
- [17] 常威. 复杂岩溶水系统识别及其在隧道涌水量预测的应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2021. <https://doi.org/10.27492/d.cnki.gzdz.2021.000279>
- [18] 钱学溥. 中国蓄水构造类型[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [19] 高奋飞, 刘宏, 邓杰文. 贵州省岩溶洼地地质成因分析[J]. 路基工程, 2012(6): 23-26.
- [20] 冯文凯, 杨星, 周强, 等. 贵州某机场场地岩溶发育特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 227-233.
- [21] 罗云菊, 张瑞, 王新敏, 等. 岩溶槽谷区多条隧道条件下拟建隧道对岩体渗流场的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 83-89.
- [22] 曾红彪, 邵莲芬, 余宏明, 陈鹏宇. 贵州平坝县龙井岩溶水系统发育特征研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 155-159.
- [23] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2406-2414.
- [24] 林永生, 杜毓超, 朱丹尼, 邹胜章. 贵州省德江隧道岩溶水文地质特征及涌水量预测[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 63-70. <https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.008>
- [25] 王晓明, 曹正波. 基于水均衡方法的隧道涌水量概率预测[J]. 交通标准化, 2014, 42(23): 112-114+118.
- [26] 刘佳, 刘晒搏, 曹文翰, 张强. 隧道涌水量预测计算方法总结探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(2): 33-37.
- [27] 李亮经, 马广海, 田佳辉, 李婧. 坎上铁矿水文地质特征及涌水量预测[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 37-41.
- [28] 杜毓超, 韩行瑞, 李兆林. 基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统及其应用[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 281-287.
- [29] 杜毓超, 李兆林, 韩行瑞, 李光辉. 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): 11-18.
- [30] 靳俊奇, 杜毓超, 左杰, 王国丰. 贵州德江隧道区岩溶蓄水构造特征及涌水量预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(4): 497-504. <https://doi.org/10.12677/AG.2021.114045>