

牛栏江引水工程岩溶隧洞涌水准确性分析

罗雲丰^{1,2}, 郑捷³, 魏良帅^{1,2}

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川成都 611734; 3.电子科技大学成都学院,四川成都 611731)

摘要:由于岩溶地区发育的复杂多变性,对于如何准确地预测复杂岩溶地区长大隧洞涌突水量,已成为一直以来难以突破的水文地质大难题。本文基于牛栏江—滇池引水工程中涌突水实例分析,从地层岩性特征及地质构造的影响、涌突水预测方法选取、计算参数选取、隧洞涌水影响范围确定、水文地质单元划分 5 大主控因素,分别总结分析各因素对隧洞涌突水预测准确性的影响。根据不同因素控制下其预测值与实际值的变化规律,提出提高隧洞涌突水预测准确性的方法,并结合工程实例验证其可行性。其结论可为以后提高岩溶地区隧洞涌突水预测准确性提供借鉴。

关键词:牛栏江—滇池引水工程;岩溶隧洞;涌突水预测

中图分类号:P641;U452.1+1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0151-04

Accuracy Analysis on Water Gushing in Karst Tunnel of Niulanjiang Water Diversion Project/LUO Yun-feng^{1,2}, ZHENG Jie³, WEI Liang-shuai^{1,2} (1.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Chengdu College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Due to the complex variability of karst areas, it has been a major problem difficult to break through in hydrogeology for how to accurately predict the water inrush of long tunnels in complex karst areas. Based on the case of the water inrush in Niulanjiang-Dianchi water diversion project, 5 major control factors: the lithological characteristics of the stratum and the influence of geological structure, the selection of the inrush water prediction method, the selection of calculation parameters, the determination of the influence range of the tunnel gushing water and the diversion of the hydrogeological unit are used respectively to summarize and analyze the impact on the prediction accuracy of water inrush in tunnels. According to the change law of the predicted value and the actual value under different factors control, a method to improve the prediction accuracy of the water inrush in tunnel is put forward, and its feasibility is verified by combining engineering examples. The conclusion can provide reference for improving the future prediction accuracy of tunnel water bursting in karst area.

Key words: Niulanjiang-Dianchi water diversion project; karst tunnel; water inrush prediction

0 引言

隧洞涌水量的预测计算方法很多,如水理统计法、水平衡法、地下水动力学法、地下径流模数法等^[1-5],但目前对其进行精确的预测难度还比较大,主要是因为隧洞作为一个复杂开放的非线性系统,人们对其的认识还不够充分和完善,所以隧洞涌水量的预测不仅仅是单一因素就能解决,必须采用多种方法相结合,多种学科交叉的手段,才能提高预测精度^[6-8]。张雷等^[9]系统地阐述了隧洞涌水量预测的各种方法,从各种方法的原理出发,阐明了它们的优缺点和适用条件及其工程应用情况。王建秀等^[10]结合工程实例采用正演和反演方法计算了隧洞涌水量,得到本质上不同的结果。林传年等^[11]从

岩溶蓄水模式角度揭示岩溶区易发生涌水的构造机制,指出当前地质超前预报手段在涌水预报方面存在的问题。郭玉法等^[12]用数值模拟方法进行了某隧洞涌水的预测研究,认为数值模拟方法是进行隧洞涌水量预测的有效方法。曹廷^[13]采用降水入渗法和地下水动力学法计算了隧洞涌水量。吴治生^[14]根据浅埋岩溶长隧洞涌水量及地表泉的长期观测资料,利用反演推导得出新的方法。

笔者以牛栏江—滇池引水工程中大五山隧段及大公山隧段为例,在详细了解研究区水文地质的差异条件下,以岩溶地区隧洞涌水量预测的理论研究现状为基础,系统地分析了 2 种隧洞涌水量预测方法的影响因素、优缺点以及适用范围和条件,针对

收稿日期:2018-07-01

作者简介:罗雲丰,男,汉族,1989 年生,硕士,从事水文地质、工程地质、环境地质专业相关研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,173595939@qq.com。

涌突水的预测准确性,提出了相应较合理的对比分析,根据最终的分析结果,可为此后在同类岩溶隧道中的涌水预测研究提供借鉴。

1 地质环境条件

研究区位于滇东岩溶高原,海拔 2000~3000 m,在云南省昆明市东北部寻甸县与昆明市之间,为云南高原的主体部分,属金沙江、南盘江、元江流域的分水岭地带^[15]。

大五山及大公山引水隧道所在区域地貌的形成经过了地质历史上的多次构造变动,直到中生代三叠纪才逐渐升高形成陆地。燕山运动时期发生褶皱、断裂并形成盆地,至中新世完成夷平阶段。上新世末、更新世初期,伴随着青藏高原的巨大隆起,开始大面积差别上升。在差别上升相对稳定阶段,以剥蚀为主,高原面上发育了一些盆地。以后,地面陆续上升,河流下切,形成连绵起伏的中山地貌,山脊顶部保留有残存高原面。区内地层出露较齐全,从元古界蓟县系—新生界第四系均有出露。研究区的地层岩性主要为灰岩、白云岩等,以碳酸盐为主。由于地质构造和地层岩性的控制作用,地表岩溶较为发育,岩溶洼地常常形成负地形。优越的地表汇水条件,使岩溶地下水的循环径流交替作用更为强烈,地下暗河和溶洞在宰格组(D_3zg)和阳新组(P_1y)的灰岩中发育最多,研究区多年的平均气温只有 14℃,四季温差小,昼夜温差大,年平均降雨量为 1360 mm,降雨量在季节上分配较为不均,枯季(10月—次年4月)降水量占 15%,雨季(5—10月)降水量占 85%。

水文条件上研究区属金沙江水系,其中牛栏江是金沙江右岸较大的一级支流,发源于昆明市官渡区流经云南省嵩明、马龙、寻甸、曲靖、沾益、宣威、巧家、鲁甸、昭阳区等 11 个县(区)及贵州省威宁县,在昭通麻砂村汇入金沙江。

2 隧道涌水量预测方法及结果

2.1 预测方法

首先利用大气降雨入渗系数法及地下水径流模数法两种预测方法对大公山隧洞及大五山隧洞进行涌突水整体预测。部分隧段结合地下水动力学法,包括大岛洋志公式、科斯加可夫公式以及铁路勘测规范中经验公式共同得出预测结果推荐值。

2.2 隧道涌水量预测结果

大公山隧洞 K00+000~K10+809 与 K14+940~K26+997 段正常涌水量为 81331 m³/d,单位长度稳定涌水量最大值出现在 2 号支洞暗河—F₅ 段 K6+100~945 处,其值为 0.000358 m³/(s·m);采用地下水径流模数法预测正常涌水量为 81112 m³/d,单位长度正常涌水量最大值也出现在该段,值为 0.000366 m³/(s·m)。以上预测分析是基于理想状态下均质含水层的结果。在汛期,岩溶管道及溶洞水在暴雨—大暴雨工况下极速增加,施工过程中具有极高的危险性。

大五山隧洞推荐隧道正常涌水量 151742 m³/d,最大涌水量 269514 m³/d,单位长度正常涌水量 7.01 m³/d。其中推荐进出口浅埋段 K9+055~K17+679 和 K29+091~K30+702 段采用大气降水入渗法得出的涌水值,正常涌水量分别为 98012、7500 m³/d,最大涌水量分别为 196023、14999 m³/d。

3 隧洞涌突水预测准确性及其影响因素分析

3.1 实际涌突水情况

施工完成后,大公山隧洞、大五山隧洞全长 61362.25 m,实际涌水量 15562 m³/h。出水支洞总计 26 个,进出口段 4 个,其中共有 8 个支洞、2 个进口段、1 个出口段预测准确性极高(见表 1),大大超出目前国内预测平均水平(见表 1)其中大公山隧洞 8 号支洞,大五山隧洞 4 号支洞、6 号支洞、8 号支洞涌水量>1000 m³/h 出水量较大,水量丰富。大公山隧洞支洞实际涌水量<500 m³/h 的支洞占 78%,实际涌水量处于 500~1000 m³/h 的支洞占 15%,

表 1 大公山及大五山隧洞涌水量统计

隧洞名称	施工段	施工段长/ m	预测涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	实际最大涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹)
大公山	进口段	1707	360	500
	2 号支洞	3188.1	1080	900
	出口段	2290.618	360	200
大五山	进口段	1608.545	160	200
	1 号支洞	2392	290	350
	2 号支洞	2845.137	290	350
	15 号支洞	912	390	500
	6 号支洞	1425	1080	1119
	8 号支洞	863	1080	1118
	14 号支洞	2044	720	800
出口段	12 号支洞	1738.1	360	300
	出口段	478	70	50

实际涌水量 > 1000 m³/h 的支洞占 7%。大五山隧道各支洞中,实际涌水量 < 500 m³/h 的支洞占 47%,实际涌水量处于 500~1000 m³/h 的支洞占 35%,实际涌水量 > 1000 m³/h 的支洞占 18%。

3.2 隧洞涌突水量预测准确性对比分析

由隧洞涌突水量预测结果与实际隧洞涌突水量进行对比分析可知,大公山隧洞和大五山隧道的实际涌水量较预测涌水量偏小 30%。其中,大公山隧洞实际涌水量较预测涌水量偏小 57%,大五山隧洞实际涌水量较预测涌水量偏小 6%。因此大公山隧洞的预测准确率明显低于大五山隧洞(见图 1、图 2)。

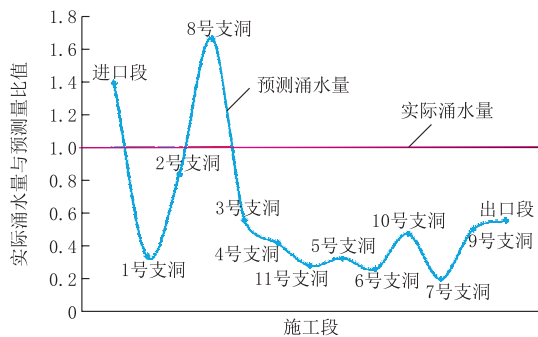


图 1 大公山隧洞预测涌水量与实际涌水量比值图

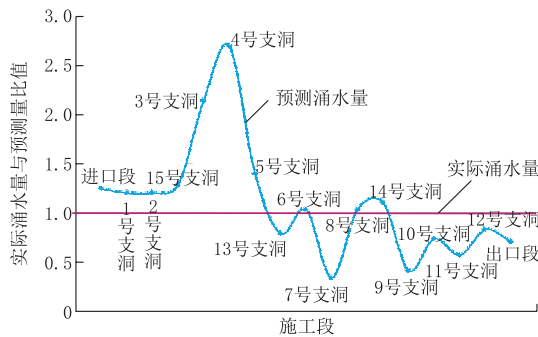


图 2 大五山隧洞预测涌水量与实际涌水量比值图

3.3 隧洞涌突水预测准确性影响因素分析

3.3.1 地质背景条件差异

3.3.1.1 地层岩性特征及地质构造的影响

不同地层条件对预测结果准确性影响进行分别讨论具体情况见表 2。

由于岩溶现象在不同地层的发育情况不同,导致用相同的预测方法所得结果的准确性差距明显,寒武系地层中的预测结果相对准确率较高。二叠系下统阳新组(P_{1y})、石炭系中统威宁组(C₂₊₃)地层中的支洞预测结果与实际涌突水结果均偏大。其余穿过多个岩层的支洞,没有明显规律。由此在岩溶发育的长大隧洞涌突水预测中,建议其预测水量

表 2 不同岩性对涌水量预测准确性的影响

地 层	岩 性	预测量与实际涌水量平均比值	预测准确性
峨眉山玄武岩(P _{2β})	玄武岩	0.69	偏大
统阳新组(P _{1y})	灰岩	0.28	偏大
威宁组(C ₂₊₃)	灰岩	0.42	偏大
宰格组(D _{3zg})	白云岩	1.60	偏小
龙潭组(Є _{2s})	白云岩	0.79	偏大
陡坡寺组(Є _{2d})	砂岩、页岩	0.42	偏大
龙王庙组(Є _{1l})	白云岩	1.04	准确
沧浪铺组(Є _{1c})	砂岩、页岩	1.14	准确

推荐值可据地层条件的不同按比例减小或增大。结合本次工程实例,在岩性比较单一的隧段可用隧洞涌突水量修正公式对预测结果进行修正。

$$A = Q\alpha$$

式中:A——涌突水预测量修正值,m³/d;Q——隧洞正常涌水量计算值,m³/d;α——修正系数,峨眉山玄武岩(P_{2β})地层、统阳新组(P_{1y})地层、威宁组(C₂₊₃)地层、宰格组(D_{3zg})地层、寒武系地层的修正系数分别为:0.78、0.47、0.52、0.65、1。

3.3.1.2 研究区水文地质单元划分的影响

水文地质单元是根据水文地质条件的差异性而划分的若干个区域。对于隧洞内的涌水情况,通过对岩溶地下水系统的研究,大致可以确定各岩溶地下水系统对隧洞涌水量的影响,水文地质单元的范围确定一般由现场探勘并结合当地水文地质报告中得出,其影响范围人为划分计算所得。由于研究区处于岩溶非常发育的地区,虽然在总体上能对其水文地质单元进行划分,但由于岩溶地区地下岩溶发育情况是极为复杂的,导致其在具体支洞预测时准确性不高。只有在准确划分岩溶水文地质单元的基础上,结合一些其它的研究,方能较为准确地对隧洞涌水量进行预测。

3.3.2 研究区涌突水预测方法选取

大公山与大五山隧洞都分别用不同方法对各地层进行了涌水量预测,但在其预测结果最终选取上,大公山隧洞各支洞涌突水量推荐值以大气降雨入渗法所得结果为主,地下水动力学法所得结果为辅。而大五山隧洞则与之相反,其推荐值以地下水动力学法所得结果为主大气降雨入渗法所得结果为辅。结合施工完成后实际涌突水情况可以看出大五山隧洞的预测准确性更高。因此,每种预测方法都有自己使用条件,在具体情况下,要综合分析其水文地质情况,选择分析其最适方法,这样才能得出更准确的

预测结果。

3.3.3 研究区涌突水计算参数选取

只要根据实际情况准确地选取技术参数,计算结果的准确性一定会提高。但是如何准确地选取计算参数又是一个相当复杂的过程。如隧洞涌水影响半径 R 的确定,由于其地层的复杂多变性,在一个水文地质单元内,统一的选用一个含水层渗透系数便不能对其影响半径进行正确的评估,因此要综合考虑研究区的各种水文地质条件,进行合理细分和取值。所以,只有结合实际情况,对隧址影响范围内的各种基本参数进行更加准确的确定,才能保证预测的准确性。

3.3.4 研究区隧道涌水影响范围确定

根据调查人员现场地质调查的结果,再结合具体公式对隧道涌水的影响范围进行划分,故涌水影响范围的确定存在自然因素(客观因素)和人为因素的干扰。

3.3.4.1 自然因素(客观因素)

岩溶地区构造复杂多变,而前期基础地质调查、钻孔勘查局限性较大,难以查明岩溶地区的地层岩性、地质构造、岩溶发育特征,而最重要的岩溶地下水含水岩组类型、特点、补径排条件、水力联系系统等水文地质条件都难以准确确定,因此其影响范围的确定往往偏大或偏小。

3.3.4.2 人为因素

在隧洞建设过程中和隧洞建设完成后,由施工对原始地层造成的人为变动,必然导致其地下水与周围环境之间水力联系发生改变。在计算过程中必须考虑不同时期的影响范围,具体量化。

4 结论

(1)大公山隧洞和大五山隧道的实际涌水量较预测涌水量偏小 30%。其中,大公山隧洞实际涌水量较预测涌水量偏小 57%,大五山隧洞实际涌水量较预测涌水量偏小 6%。因此大公山隧洞的预测准确率明显低于大五山隧洞。

(2)影响岩溶隧洞涌突水预测准确性的五大主控因素分别为:研究区地层岩性及地质构造、水文地质单元的划分、涌突水预测方法的选取、计算参数的选取、隧道涌水影响范围的确定。其中研究区地层

岩性、预测方法及计算参数的选取的影响最为明显,地层岩性的不同,直接影响计算过程中隧道涌水影响范围的确定,从而对计算参数和预测方法的选取产生进一步影响,应根据不同地层选取不同预测方法及计算参数,最后通过修正系数进行涌水量最终确定。

(3)建议其预测水量推荐值可据地层条件的不同按比例减小或增大。结合本次工程实例,在岩性比较单一的隧段可用隧洞涌突水量修正公式 $A = Q\alpha$ 对预测结果进行修正,针对峨眉山玄武岩($P_2\beta$)、统阳新组(P_{1y})、威宁组(C_{2+3})、宰格组(D_3zg)、寒武系地层,修正系数分别为 0.78、0.47、0.52、0.65、1。从而整体提高岩溶地区长大隧洞涌突水预测准确性。

参考文献:

- [1] 马程昊,白晨光.隧道涌水量预测方法综述[J].城市建设理论研究:电子版,2012,(2).
- [2] 魏桐钧.隧道涌水量预测的计算方法比较[J].山西建筑,2007,(14):339-340.
- [3] 朱大力,李秋枫.预测隧道涌水量的方法[J].工程勘察,2000,(4):18-22,32.
- [4] 徐伟.岩溶地区隧道涌水量的预测方法[J].中国水运(学术版),2007,(1):91-92.
- [5] 吴治生.不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望[J].铁道工程学报,2007,(11):48-55,64.
- [6] 王媛,秦峰,夏志皓,等.深埋隧洞涌水预测非达西流模型及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1862-1868.
- [7] 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,(4):38-43.
- [8] 刘高,杨重存,谌文武,等.深埋长大隧道涌(突)水条件及影响因素分析[J].天津城市建设学院学报,2002,(3):160-164,168.
- [9] 张雷,赵剑,张和平.隧道涌水量预测的计算方法研究[J].公路交通技术,2007,(1):121-123,129.
- [10] 王建秀,朱合华,叶为民.隧道涌水量的预测及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2004,(7):1150-1153.
- [11] 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,(7):1469-1476.
- [12] 郭玉法,鲍庆煜.岩溶隧道涌水量的预测方法研究[J].铁道勘察,2007,(5):73-75.
- [13] 曹廷.隧道涌水预测分析[J].铁道建筑,2010,(11):29-31.
- [14] 吴治生.不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望[J].铁道工程学报,2007,(11):48-55,64.
- [15] 李云,朱国金,凌云.牛栏江一滇池补水工程长输水隧洞特殊地质问题处理措施研究[J].岩土锚固工程,2012,(4):17-21.