

文章编号: 1674—8247(2024)04—0087—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.016

## 川西北某隧道涌水量及水压力分析

邹和兵<sup>1</sup> 宋章<sup>1</sup> 陶玉敬<sup>1</sup> 周航<sup>1</sup> 李鸣荣<sup>2</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 昆明 650041)

**摘要:**川西北某隧道工程区构造发育、岩体破碎、水压高,隧道施工和运营面临严峻考验。为了研究涌水量及水压力对隧道施工和运营的影响,对隧址区开展了地质勘探,并采用理论计算和有限元模拟分析了隧道施工期和运营期的涌水量、水压力分布。研究表明:(1)隧址区水文地质单元内岩性为非可溶岩,地下水属于中等含水岩层的基岩裂隙水;受构造作用的影响,地层岩体裂隙发育,为地下水渗流提供了良好的通道;隧址区内地下水主要补给来源为大气降水,多年平均降雨量约 620 mm,最大降雨量约 1 034 mm;(2)隧道全长正常涌水量约为 6 940 m<sup>3</sup>/d,最大涌水量约为 11 610 m<sup>3</sup>/d;(3)隧道开挖后,上方围岩产生降水漏斗,地下水部分流失,而强降雨天气导致地下水位大幅增长;(4)随着水头高度的增大,隧道水压力和涌水量剧增,威胁隧道结构的安全。隧道的防排水结构与衬砌设计需考虑强降雨天气的影响。

**关键词:**隧道;川西北;水文地质;涌水量;水压力;强降雨

中图分类号: TU456.3<sup>+</sup>2

文献标志码: A

## Analysis of Water Inflow Volume and Water Pressure in a Tunnel Located in Northwest Sichuan

ZOU Hebing<sup>1</sup> SONG Zhang<sup>1</sup> TAO Yujing<sup>1</sup> ZHOU Hang<sup>1</sup> LI Mingrong<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Yunnan Institute of Transportation Planning and Design Co., Ltd., Kunming 650041, China)

**Abstract:** The work area of a tunnel in northwest Sichuan is characterized by active tectonics, heavily fractured rock masses, and high water pressure, posing severe challenges for both construction and operation of the tunnel. To investigate the impacts of water inflow and water pressure on tunnel construction and operation, geological explorations were conducted in the tunnel site, followed by theoretical calculations and finite element simulations to analyze the water inflow volume and water pressure distribution during both construction and operational phases. The findings are summarized as follows:

(1) The rocks within the hydrogeological units of the tunnel site are non-soluble rocks, with groundwater classified as fissure water in moderately water-bearing rock strata. Due to tectonic activities, the rock masses are extensively fractured, providing favorable conduits for groundwater seepage. The primary recharge source of groundwater in the tunnel site is precipitation, with an annual average rainfall of approximately 620 mm and a maximum recorded rainfall of around 1 034 mm. (2) The normal water inflow for the entire tunnel is estimated at about 6 940 m<sup>3</sup>/d, with a maximum potential inflow of up to 11 610 m<sup>3</sup>/d. (3) Following tunnel excavation, a precipitation funnel forms above the rock over the

收稿日期: 2023-11-15

作者简介: 邹和兵(1985-),男,工程师。

基金项目: 云南省科技厅科技重点研发计划项目(202303AA080005); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KDNQ202006; KDNQ202008)

引文格式: 邹和兵, 宋章, 陶玉敬, 等. 川西北某隧道涌水量及水压力分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 87-93.

ZOU Hebing, SONG Zhang, TAO Yujing, et al. Analysis of Water Inflow Volume and Water Pressure in a Tunnel Located in Northwest Sichuan[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 87-93.

tunnel, leading to partial loss of groundwater, while heavy rainfall events significantly elevate the groundwater level. (4) As the water head height increases, a substantial surge in tunnel water pressure and inflow is observed, threatening the structural safety of the tunnel. The design of drainage and waterproofing structures, as well as tunnel lining, shall take into account the effects of heavy rainfall.

**Key words:** tunnel; northwest Sichuan; hydrogeology; water inflow; water pressure; heavy rainfall

随着我国西南地区交通网的不断发展与完善,涌现出许多地质复杂且富水环境的隧道工程,构造多、岩性差、高水压等特点给隧道施工和运营带来巨大的挑战<sup>[1-2]</sup>。富水区隧道的开挖会改变地下水环境,从而改变地下水天然补径排状态,使地下水以隧道为中心构成新的汇势,在隧道排水影响范围内形成新的地下水循环,进而改变影响区地下水压力的分布特征。最为直观的是隧道周围水力梯度增大,形成以隧道为中心的降水漏斗,严重时可导致含水层疏干,造成地表水干涸、植被死亡等灾害<sup>[3-5]</sup>。在生态敏感地区,为了保护地下水与地表生态环境,隧道防排水设计通常遵循“以堵为主,限量排放”的原则<sup>[6-7]</sup>。此时,隧道运营期排水量的大小关系到衬砌结构水压力的分布<sup>[8-9]</sup>。此外,遭遇强降雨时,雨水的入渗会使地下水位提高,在隧道排水能力有限的条件下,衬砌水压力将会骤增,水流中夹带的泥浆还可能会导致隧道排水系统堵塞,不利于隧道结构的安全<sup>[10-11]</sup>。

本文以川西北某隧道为研究对象,通过现场地质勘察与数据收集,分析了隧址区的地形地貌、地层岩性和水文地质等特征,采用理论计算和数值模拟研究了隧道施工期和运营期的涌水量、隧道水压力,提出了涌突水灾害防治的针对性建议,以期为类似工程地

质下的隧道工程建设和运营提供依据。

## 1 隧址区地质条件

### 1.1 地形地貌

依托隧道位于岷江右岸,隧址区地形起伏较大,高程处于2 290~2 921 m之间,地表自然坡度一般为10°~50°,局部稍陡,总体上属高中山剥蚀地貌。岷江位于隧道线路左侧,岷江两侧横向沟谷发育,河谷内分布有河流堆积地貌,主河谷较窄,多呈“V”型,山间支沟多为“V”型谷。

### 1.2 地层岩性

隧道穿越地层岩性包括砂岩、板岩、千枚岩等,岩体较为破碎,节理裂隙发育,整体性、稳定性较差。根据JTG 3370.1-2018《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》可将隧道围岩划分为V~Ⅲ级。选取K 89+500~K 89+700作为研究对象,分析其涌水量及水压力。该区段隧道上覆岩体主要为中风化砂岩和板岩,其中砂岩为灰色,薄~中厚层状,节理发育,岩体较破碎;板岩为深灰、灰黑色,块状构造,中厚~厚层状为主,节理发育,岩体较破碎,为地下水提供了良好的渗流通道。隧道纵断面如图1所示。

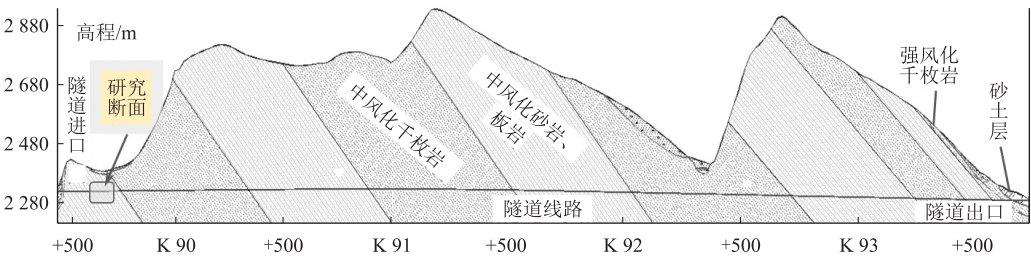


图1 隧道纵断面图

### 1.3 水文地质

隧址区位于四川省西北部山区,地表水系较发育,水资源较丰富,主要的河流为岷江。岷江为隧址区主要干流,4—10月为汛期,11月—次年3月为枯水期,补给形式主要有降水、融雪、地下水,丰水期与枯水期流量变化幅度较大。

隧址区地下水包括松散堆积层孔隙水、基岩裂隙

水。孔隙水主要赋存于崩坡积层( $Q_4^{col+dl}$ )、泥石流堆积层( $Q_4^{sef}$ )和冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ )。其中斜坡地带覆盖层厚度不大,坡度较陡,孔隙水补给差且径流排泄条件好而含量弱;河漫滩、阶地覆盖层厚度较大,且具多层性,分布不连续,厚薄不均,孔隙水与河水联系较密切,赋水性差异大。裂隙水主要赋存于三叠系上统侏倭组( $T_3zh$ )砂岩中,富水性中等。

隧道线路东侧傍山,西侧毗邻岷江,隧道路面标高处于 2 319.3~2 287.5 m 之间,而岷江水位标高为 2 279.3~2 231.6 m,岷江水位标高低于隧道路面。结合图 1 可知,岷江为隧址区内最低排泄基准面。结合区域水文地质条件与野外实地调查对区域内地下水补径排特征进行归纳、分析,可将隧址区划分为 2 个一级水文地质单元:岷江东岸水文地质单元(Ⅰ)、岷江西岸水文地质单元(Ⅱ),均隶属于岷江水系,如图 2 所示。

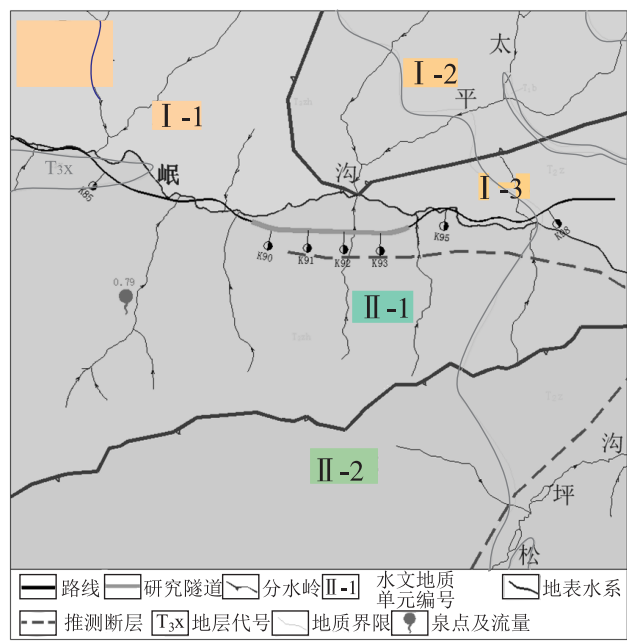


图2 隧址区地质单元划分图

1.3.1 岷江东岸水文地质单元

该单元整体地势东高西低,东以岷江水系与涪江水系的分水岭为隔水边界,西以岷江为排水边界,地下水整体由东向西径流。单元内岩性以三叠系砂岩、石英砂岩、板岩等非可溶岩为主;单元内部构造复杂多样,褶皱、断裂发育。根据单元内小型河流,将该单元进一步划分为 3 个二级水文地质单元。该隧道未穿越岷江东岸水文地质单元(Ⅰ),且该单元与隧道穿越的其他水文地质单元没有显著的水力联系,故对隧道涌水无直接影响。

1.3.2 岷江西岸水文地质单元

该单元整体地势西高东低,西以岷江水系与大渡河水系的分水岭为隔水边界,东以岷江为排水边界,地下水整体由西向东径流。单元内岩性以三叠系石英砂岩、砂岩、板岩、千枚岩等非可溶岩为主;单元内部构造复杂多样,褶皱、断裂发育,主体构造为岷江隐伏断层、松坪沟隐伏断层。根据单元内小型河流

(松坪沟),将该单元进一步划分为 2 个二级水文地质单元。

其中隧道跨越水文地质单位Ⅱ-1,该水文地质单元北、西、南侧受地表分水岭控制;东侧岷江为排泄边界。单元内地势起伏较大,整体为北高南低、西高东低。单元内主要构造为岷江隐伏断层,出露地层有三叠系上统侏倭组( $T_3zh$ )砂岩、板岩。单元内岩性为非可溶岩,因此该单元属于中等含水岩层的基岩裂隙水。单元内褶皱、断层构造较发育,地层遭受强烈挤压,岩体破碎,裂隙强烈发育。单元内主要的地下水补给来源为大气降水、冰雪融水。

1.4 隧址区地下水补径排特征

隧址区地表植物茂盛,构造、褶皱较发育,地层受强烈挤压,节理裂隙发育,岩体破碎,利于接受降水补给;隧址区主要干流岷江是区内排泄侵蚀基准面,岷江两岸横向沟谷发育且距离较短,在这样的地形条件控制下,地下水在接受补给后沿岩体内的裂隙向河谷的径流途径较短,同时基岩裂隙水处于当地侵蚀基准面以上,地下水坡度较大,随深度增加裂隙发育程度愈弱,所以地下水径流强度随深度的增加而减弱。马道山—马岭子一线为研究区的地表水、地下水分水岭,分水岭的西侧区域,既远离隧道经过的区域,大气降雨、冰雪融水垂直入渗后向西侧地势较低的松坪沟径流排泄,最后汇入叠溪海子;分水岭的东侧区域,即隧道经过的区域,大气降雨、冰雪融水垂直入渗后,向东侧地势较低的岷江、叠溪海子径流排泄(如图 3 所示),表明隧道处于地下水浅层径流补给区。

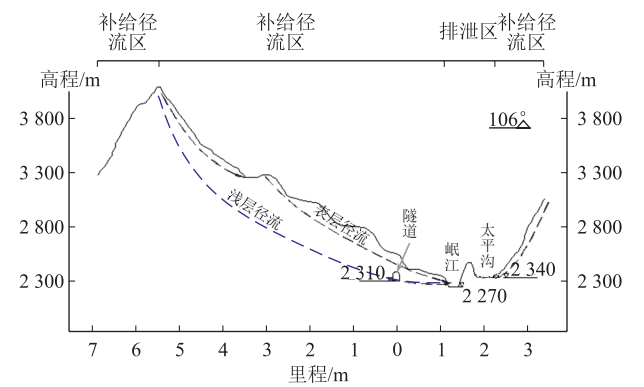


图3 隧址区径流图

地下水排泄方式有两种:其一,泉水形式,在碎屑岩中,通常以基岩裂隙水泄出后,被零星的松散堆积物掩盖其出口,在松散层孔隙中潜流一段距离后溢出地表,经现场水文地质调查发现出露井、泉点较少;其二,分散排泄,不见股状溢出,顺溪沟而下,水量陆续

增大,谓之溪沟沿途补给。

2 隧道涌水量预测

(1)大气降水入渗法计算公式为:

$$Q_s = 2.74\alpha \times W_{\text{年}} \times A \tag{1}$$

式中:  $Q_s$ —隧道正常涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$\alpha$ ——降水入渗系数;

$W_{\text{年}}$ ——年平均降水量( $\text{mm}$ );

$A$ ——隧道涌水点的集水面积( $\text{km}^2$ )。

隧址区多年平均降雨量约 620 mm,最大降雨量约 1 034.7 mm,隧道集水面积为隧道通过含水层地段在地面长度与其对两侧的影响宽度之积,基于图 4 对地下水补径排特征的分析,可知该隧道集水面积主要为傍山来水侧,约 24.134  $\text{km}^2$ 。入渗系数的大小受地形地貌、地层岩性、地质构造及当地气候条件的影响,参照《水文地质手册》中降雨入渗系数经验值选取降水入渗系数值  $\alpha = 0.15$ 。通过式(1)计算得到隧道正常涌水量为 6 149.8  $\text{m}^3/\text{d}$ ,将年最大降雨量代入式(1)可得隧道最大涌水量为 10 263.3  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

(2)地下水径流模数法公式为:

$$Q_s = M_{\text{年}} \times A \tag{2}$$

式中:  $A$ ——隧道通过含水层地段的集水面积( $\text{km}^2$ );

$M_{\text{年}}$ ——年平均为流域地下径流模数( $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$ ),

$$M_{\text{年}} = Q' / F = 286.85 \text{ L/d} \cdot \text{km}^2;$$

$Q'$ ——地表水对地下水补给的流量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$F$ ——地表流域面积( $\text{km}^2$ ),根据隧址区补径排特征可知隧道地表流域面积主要在傍山来水侧。

由式(2)计算得隧道正常涌水量为 6 922.8  $\text{m}^3/\text{d}$ 。隧道最大涌水量可由式(3)计算。

$$Q_{\text{max}} = \lambda \times Q_s \tag{3}$$

式中,  $\lambda$  为模比系数,等于多年最大降雨量与多年平均降雨量之比。由式(3)计算得到隧道最大涌水量为 11 553.3  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

(3)地下水动力学方法

地下水动力学法将渗流力学与数学方法相结合来计算隧道涌水量。常见的经验公式包括:

大岛洋志公式:

$$Q_{\text{max}} = \frac{2\pi mK(H_0 - r)L}{\ln\left(\frac{2(H_0 - r)}{r}\right)} \tag{4}$$

佐藤邦明公式:

$$Q_s = Q_{\text{max}} - 0.584 \times \varepsilon \times K \times r \tag{5}$$

科斯嘉可夫公式:

$$Q_s = \frac{2\alpha KH_0 L}{\ln R - \ln r} \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{H_0}{R} \tag{7}$$

古德曼经验公式:

$$Q_{\text{max}} = \frac{2\pi KH_0}{\ln\left(\frac{2H_0}{r}\right)} \tag{8}$$

我国铁路经验公式:

$$Q_{\text{max}} = 0.0255 + 1.9224 KH_0 \tag{9}$$

$$Q_s = KH_0(0.676 - 0.06K) \tag{10}$$

式中:  $Q_{\text{max}}$ ——最大涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$Q_s$ ——隧道正常涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );

$r$ ——隧道等效圆半径( $\text{m}$ );

$R$ ——隧道涌水影响半径( $\text{m}$ );

$H_0$ ——岩层中初始水位至隧道等效圆中心的距离( $\text{m}$ );

$L$ ——隧道通过含水层的长度( $\text{m}$ );

$m$ ——转换系数,一般取 0.86;

$K$ ——岩体的渗透系数( $\text{m/d}$ ),结合现场压水试验测试结果,根据式(11)计算地层渗透系数。

$$K = \frac{Q_1}{2\pi H_1 L} \ln \frac{l}{r_1} \tag{11}$$

式中:  $Q_1$ ——试验孔压水流量( $\text{m}^3/\text{min}$ );

$H_1$ ——实验点水头高度( $\text{m}$ );

$L$ ——试验段长度( $\text{m}$ );

$l$ ——试验孔影响半径( $\text{m}$ );

$r_1$ ——试验孔半径( $\text{m}$ )。

经过多次压水试验,计算地层平均渗透系数为

$$K \approx 0.013 \text{ m/d}.$$

根据隧道水文地质特征的实际条件,应用式(4)~式(10)得到隧道各里程段的隧道涌水量,如表 1 所示。

表 1 隧道涌水量表(地下水动力学方法)

里程段	$H_0/\text{m}$	$R/\text{m}$	$Q_s/(\text{m}^3/\text{d})$			$Q_{\text{max}}/(\text{m}^3/\text{d})$		
			佐藤邦明	科斯嘉可夫	铁路经验	大岛洋志	古德曼	铁路经验
K 89 + 413 ~ K 89 + 900	38	53.4	200.9	487.9	162.8	353.5	580.8	475.9
K 89 + 900 ~ K 90 + 360	142	385.9	1 021.8	777.9	573.4	962.5	1 358.9	1 644.2
K 90 + 360 ~ K 91 + 650	228	785.1	2 942.4	2 879.4	2 581.7	3 976.6	5 460.4	7 383.3
K 91 + 650 ~ K 93 + 450	137	365.7	2 644.4	2 984.8	2 164.6	3 658.2	5 177.6	6 208.7
K 93 + 450 ~ K 93 + 793	41	59.9	157.1	355.2	126.0	269.4	436.7	367.5
合计	—	—	6 966.6	7 485.2	5 608.5	9 220.2	13 014.4	16 079.6

由表 1 可知,我国铁路经验公式计算的隧道正常涌水量偏小,科斯嘉可夫公式计算的隧道正常涌水量偏大。地下水径流模数法与佐藤邦明公式计算值较为相近,故取两者的平均值作为隧道正常涌水量,约 6 940 m<sup>3</sup>/d。对于隧道最大涌水量,铁路经验公式预测值偏大,大岛洋志公式计算值偏小,大气降水入渗法、地下水径流模数法和古德曼经验公式计算值偏差不大,故取 3 者的平均值作为隧道最大涌水量,约 11 610 m<sup>3</sup>/d。

3 隧道运营期涌水量数值分析

3.1 数值模型的建立

该隧道为分离式双洞布置,全长 4 350 m,隧道直径约为 11.2 m,两隧洞之间净距约为 15 m,属于典型小净距隧道。研究区段(K 89+500~K 89+700)隧道平均埋深 115 m,水位高度约为 30~70 m,受气候的影响,旱季水位面下降,雨季水位面升高,故需考虑不同水位高度以及强降雨对隧道水压力和涌水量的影响。采用有限元软件建立二维模型进行渗流计算,如图 4 所示,模型尺寸为 300 m×200 m,包括围岩、初期支护和二次衬砌,隧道拱顶到地面的距离为 115 m。模型左右两侧施加法向位移约束边界和梯度水压力边界,模型底部施加固定约束边界和不透水边界。模型中围岩、初支和二衬材料参数如表 2 所示。通过将初始水位高度(隧道拱顶到地面的距离)分别设定为 38 m、48 m、58 m、68 m 和 78 m,来分析不同水位高度条件下隧道水压力与涌水量的演变规律。此外,通过给模型顶部施加一个渗流速度来实现降雨对隧道水压力和涌水量的影响。

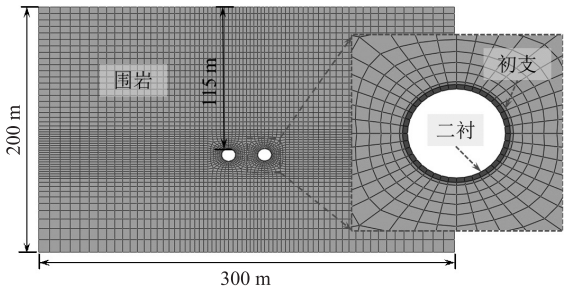


图 4 有限元模型图

表 2 模型材料参数表

类别	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	渗透系数/(m/s)
围岩	2 200	3. 0	0. 32	1. 5e-6
初支	2 300	28. 0	0. 22	1e-7
二衬	2 500	32. 5	0. 20	1e-8

3.2 隧道水压力与涌水量分析

隧道开挖给地下水提供了流动通道,附近的水从

隧道排出,从而导致隧道附近水压力减小,同时围岩中的水位面降低。数值计算得到隧道渗流场水压力分布如图 5 所示。隧道渗流场呈左右对称分布,从远场渗流边界到隧道,水压力逐渐减小,从而在隧道上方形成降水漏斗。当初始水头高度  $H$  分别为 38 m、58 m、78 m 和 98 m 时,隧道围岩水位面分别下降 10.06 m、11.82 m、12.79 m 和 13.86 m。随着初始水头高度的增大,隧道围岩中的水位面降低幅度逐渐增大,这可能受水压力与隧道涌水量的影响。

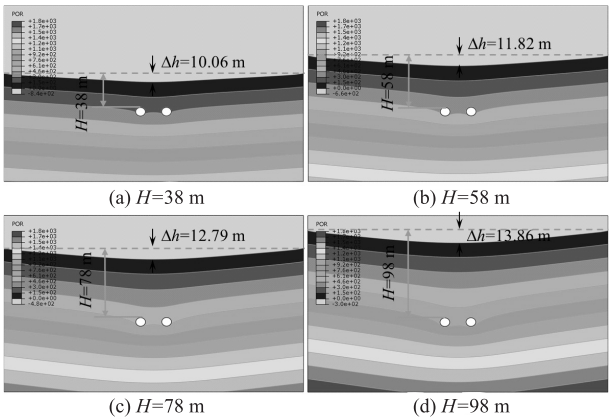


图 5 围岩中的水压力分布特征图

以左隧道为例,分别提取隧道二次衬砌拱顶、拱腰和拱底的水压力,如图 6 所示。随着初始水头高度的增大,衬砌拱顶、拱腰和拱底水压力均增大;当水头高度从 38 m 增大到 98 m 时,衬砌拱顶、左拱腰、右拱腰和拱底水压力分别增大 173.4%、144.3%、122.5% 和 144.5%。在同一断面中,衬砌拱底水压力最大,拱顶水压力最小。此外,受右隧道排水作用的影响,左隧道右拱腰水压力低于左拱腰。

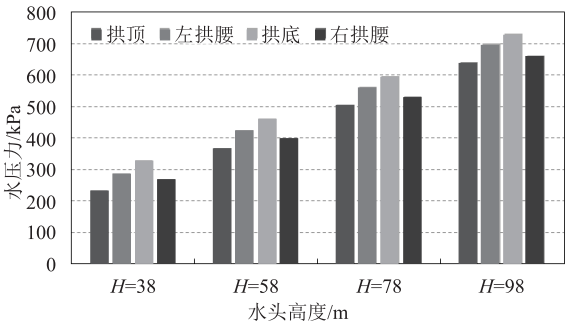


图 6 不同水头高度条件下二衬水压力图

隧道在不同水头高度条件下的涌水量,如图 7 所示。隧道涌水量随水头高度的增大呈线性增大趋势;当水头高度为 38 m 时,隧道涌水量为 1.54 m<sup>3</sup>/d·m;当水头高度增大到 98 m 时,隧道涌水量增大 144.5%。

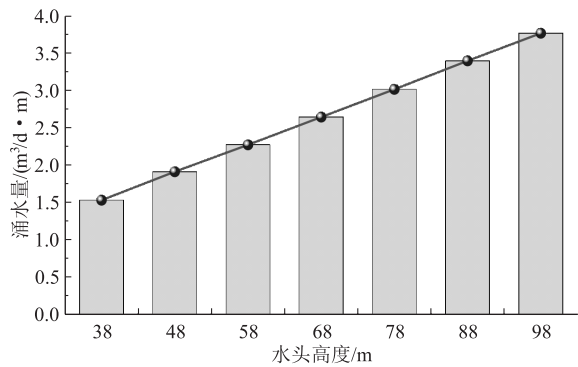


图7 不同水头高度条件下隧道涌水量图

3.3 降雨条件下隧道水压力与涌水量分析

以水头高度为38 m为例,研究强降雨对隧道水压力与涌水量的影响。降雨前隧道围岩水压力分布如图8(a)所示,围岩渗流场处于动态平衡状态。此时给模型顶部施加80 mm/d的强降雨,持续20 h后水位面上涨7.1 m;降雨持续30 h后,水位面上涨21.1 m;降雨持续48 h后水位面上涨32.2 m,由此可见强降雨对地下水位的影响很大。

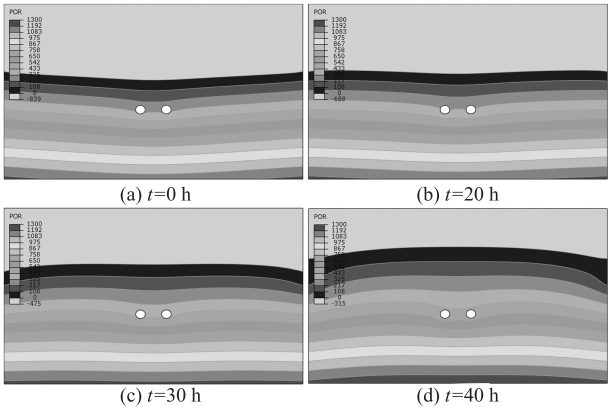


图8 降雨期间围岩渗流场演变特征图

围岩中地下水位的上漲必然会导致衬砌水压力增大,衬砌水压力随着降雨时间的变化历程如图9所示。随着降雨时间的增长,衬砌拱顶、拱腰和拱底的水压力均表现出先缓慢增大,然后快速增大,最后趋于稳定的状态。这是因为降雨初期,雨水由地表缓慢入渗,对隧道水压力没有明显影响;当雨水与地下水位相汇时,隧道水压力开始逐渐增大,并且随着围岩饱和度增大,隧道水压力增长速度加快;隧道水压力增大的同时,其排水量也逐渐增大。水压力演变特征如图10所示。当降雨入渗速度与隧道排水速度逐渐达到平衡时,隧道水压力趋于一个平衡状态。

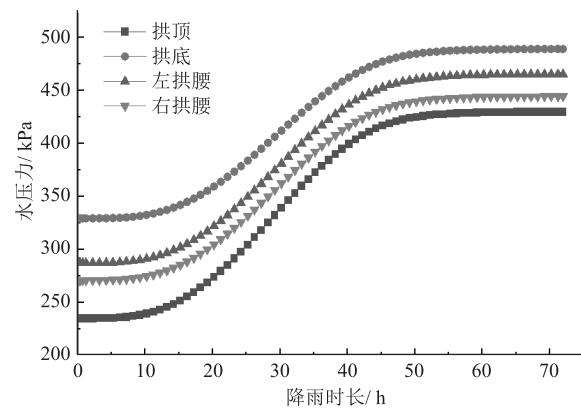


图9 降雨期间衬砌水压力演变特征图

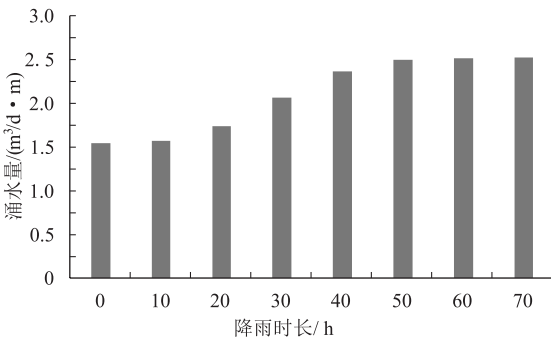


图10 降雨期间衬砌涌水量演变特征图

4 结 论

基于对川西北某隧道的地质调研,分析了隧址区地形地貌、岩层特性以及水文地质特征,采用理论分析和有限元模拟研究了运营期隧道在不同水头和降雨条件下的水压力和涌水量,得到主要结论如下:

- (1)隧址区水文地质单元内岩性为非可溶岩,地下水属于中等含水岩层的基岩裂隙水。单元内褶皱、断层构造较发育,地层遭受强烈挤压,岩体破碎,裂隙强烈发育,为地下水渗流提供了良好的通道。单元内主要的地下水补给来源为大气降水、冰雪融水。
- (2)采用大气降雨入渗法等多种理论方法计算了隧道涌水量,得到隧道全长正常涌水量约为6 940 m³/d,最大涌水量约为11 610 m³/d。预测隧道涌水量较大,应作好洞内防排水措施,并最大限度保护好地表、地下水环境,减少施工建设对当地环境、居民生活的影响。
- (3)隧道开挖后上方围岩产生降水漏斗,强降雨天气导致地下水位大幅增长。随着水头高度的增大,隧道水压力和涌水量几乎呈线性增大。因此,设计隧道防排水结构与衬砌承载力时需考虑强降雨天气的影响。

## 参考文献:

- [1] 田四明,王伟,杨昌宇,等. 中国铁路隧道40年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1903–1930.  
TIAN Siming, WANG Wei, YANG Changyu, et al. Development and Prospect of Railway Tunnels in China in Recent 40 Years [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1903–1930.
- [2] 周航,陈仕阔,刘彤,等. 复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究:以杨家坪隧道为例[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 852–862.  
ZHOU Hang, CHEN Shikuo, LIU Tong, et al. Large Deformation Mechanism of Soft Rock Surrounding Tunnel Deep Buried in Complex Mountainous: a Case Study of Yangjiaping Tunnel [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 852–862.
- [3] 白明洲,陈云,师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评估[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 5–10, 15.  
BAI Mingzhou, CHEN Yun, SHI Hai. Environmental Risk Assessment of Underground Water Level Falling Induced by Construction in Mountain Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 5–10, 15.
- [4] 李晓军,徐昊, Gokdemir Cagri,等. 隧道排水诱发地下水位下降对地表植被影响的TSPAC分析方法[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(9): 1261–1271.  
LI Xiaojun, XU Hao, CAGRI G, et al. TSPAC Analysis Method for Impact of Groundwater Drawdown Induced by Tunnel Drainage on Terrestrial Vegetation [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1261–1271.
- [5] 肖泽荣. 基于地下水生态平衡埋深的隧道排水量设计计算[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(10): 1471–1479.  
XIAO Zerong. Design and Calculation of Tunnel Drainage Based on Ecological Equilibrium Embedment Depth of Groundwater [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(10): 1471–1479.
- [6] 郭鸿雁,纪亚英,方林,等. 基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 165–168.  
GUO Hongyan, JI Yaying, FANG Lin, et al. Study on External Water Pressure and Limited Discharge Standard of Water-rich Tunnel Based on Fluid-solid Coupling Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 165–168.
- [7] 陈国栋. 城际铁路矿山法隧道防排水体系探讨[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 45–51.  
CHEN Guodong. Discussion on Water Handling System for Mined Tunnels of Intercity Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 45–51.
- [8] 樊浩博,周定坤,刘勇,等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1884–1898.  
FAN Haobo, ZHOU Dingkun, LIU Yong, et al. Mechanical Response Characteristics of Lining Structure of Pipeline Karst Tunnels in Water-rich Areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1884–1898.
- [9] 尚海松,郑波,郭瑞. 岩溶富水隧道水压变化引起的结构力学响应及防治措施[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 374–381.  
SHANG Haisong, ZHENG Bo, GUO Rui. Structural Mechanical Response Caused by Water Pressure Change in Karst Water-rich Tunnel and Its Prevention Measures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 374–381.
- [10] 郭瑞,郑波,吴剑,等. 降雨过程中隧道衬砌水压力的动态规律研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(5): 75–81.  
GUO Rui, ZHENG Bo, WU Jian, et al. Research on the Dynamic Law of Water Pressure in Tunnel Lining during Rainfall [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(5): 75–81.
- [11] 曹艳妮. 溶岩与非溶岩地区隧道排水系统堵塞机理[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 35–39.  
CAO Yanni. Blockage Mechanism of Tunnel Drainage System in Karst and Non-karst Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 35–39.

(上接第55页)

- Continuous Compaction Based on Energy Dissipation [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [17] 徐光辉. 路基系统形成过程动态监控技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
XU Guanghui. Dynamic Monitoring Technology of Subgrade System Formation Process [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [18] 叶阳升,蔡德钧,朱宏伟,等. 基于振动能量的新型高速铁路路基压实连续检测控制指标研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 127–132.  
YE Yangsheng, CAI Degou, ZHU Hongwei, et al. Research on New Continuous Compaction Control Index of High-speed Railway Subgrade Based on Vibration Energy [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 127–132.
- [19] 东爱明. 高速铁路粗粒土最大干密度试验方法研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(5): 1–5.  
DONG Aiming. Research on Test Method for Maximum Dry Density of Coarse-grained Soil in High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(5): 1–5.