

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.022

隧洞断层破碎带岩体涌水量分析

——安哥拉某水电站为例

李辰舟, 苏传洋, 邓争荣, 李林, 袁洋洋

(长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:隧道涌水量预测对隧道的设计和施工至关重要。笔者以安哥拉某水电站进厂交通洞涌水为例,基于涌水发生后实测的涌水量、水温、水化学、附近地下水位变化等特征,分析涌水成因。根据涌水洞段岩体透水性的不同,将隧洞断层区岩体划分为 3 个透水性段。根据建立的模型,采用流体力学伯努利方程对最大涌水量进行估算;利用稳定流裘布依理论公式对正常涌水量进行估算,估算结果与实际情况一致。另外,根据分析结果对涌水段提出相应的工程处理措施,同时提出后续开挖过程中在可能出现的岩体破碎带涌水量较丰富的洞段,布置超前钻孔排水的预防措施。论文成果可为其他类似工程的涌水问题提供参考。

关键词:正常涌水量;最大涌水量;涌水成因;地质模型;处理措施

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-0255-07

Water Inflow Analysis of Rock Mass in Fault Fracture Zones of Tunnel

——Taking a hydropower station in Angola as an example

LI Chenzhou, SU Chuanyang, DENG Zhengrong, LI Lin, YUAN Yangyang

(Changjiang Geological Engineering Corporation, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: Forecasting the water inflow in tunnels is of great importance to the tunnels' design and construction. This paper takes an access tunnel of hydropower station in Angola as an example and analyzes water inflow factors based on the statistics of water inrush, water temperature, water chemistry and variation of groundwater level. According to the difference of water permeability, rock mass of the fault fracture zone in tunnel was classified into 3 types. Based on the established model, the maximum water inflow was estimated using the Bernoulli equation of fluid mechanics and the normal water inflow was estimated using the formula of stable flow. The estimated result is consistent with the actual situation. The authors finally propose some engineering treatment measures for the water gushing section, and some preventive measures of layout of borehole drainage in the fractured rock mass zone with water inflow. The research can provide reference for other similar engineering problems of water gushing.

Keywords: normal water inflow; maximum water inflow; water inflow factors; geological model; treatment measure

收稿日期:2021-03-11;修回日期:2021-07-12;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:李辉

基金项目:湖北省自然科学基金项目“南水北调中线调水背景下汉江中下游生态补偿调控策略研究”(2015CFB515)。

作者简介:李辰舟(1988-),男,硕士,工程师,2014年毕业于中国地质大学(武汉)地质工程专业,现主要从事地质与岩土勘察工作。E-mail:472317816@qq.com。

随着国内外工程隧道建设的不断发展,隧道涌水问题在水电、交通、建筑及国防等土建工程中经常遇到,并被逐渐重视(张飞等,2012)。涌水问题直接影响到隧道的施工和运营安全,造成巨大的经济损失,甚至会造成人员伤亡。因此,准确预测隧道涌水量,对隧道设计、施工安全和运营管理都是很重要的。目前,隧洞突涌水预测由定性分析逐渐发展为定量计算与定性分析结合。隧道突涌水预测的方法主要有水均衡法、地下水动力学法、经验公式法、工程类比法等(徐国鑫等,2017)。国内很多学者对隧道突涌水进行了一定研究。其中,罗玉虎(2017)等通过对摩天岭隧道地层、构造、水文地质特征及涌水特点的综合分析,确定岩溶地下水系统的结构特征,对岩溶隧道涌水量进行综合预测研究;孙臣生(2017)通过详细分析天河山隧道涌水发生的原因,研究提出了不同的处治方案,对隧道的安全施工起到了很好的作用;浦友繁(2015)通过对牛栏江滇池补水干河泵站引水洞暗河采用“钢管引流、封堵灌浆、岩石超前固结、闸阀闭水”措施,确保安全成功地地下暗河进行了封堵;张天明等(2013)等通过查清牛栏江滇池补水工程引水隧洞涌水量、涌水补给途径、水压等情况,采取分流、强抽排、封堵等方式成功封堵涌水;钱富林(2014)为保证关角隧道顺利穿越岩溶富水区,通过研究关角隧道突涌水发生的机理,对不同的突涌水模式制订针对性方案,保证了工程顺利进行。

岩石裂隙是基岩裂隙水的储存空间和运移通道,裂隙的发育程度受构造控制强烈(周宗青等,2012)。大量的实例表明,涌水与断层关系密切,受断层影响,断层周围岩体通常极为破碎,破碎带成为地下水的储集场所(马晓辉,2010)。笔者以安哥拉某水电站进厂交通洞涌水事件为例,通过分析研究其涌水特征和成因,根据断层附近岩体透水性的不同,建立相应的地质模型;结合地质模型对岩体的正常涌水量和最大涌水量进行估算,结果与实际测量结果基本一致。研究成果可供其他类似工程参考。

1 工程概况

安哥拉某水电站进厂交通洞全长 1.5 km,洞身轴线方向 119° ,洞身地段沿线地面高程 594~660 m,地形坡度 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 。沿线第四系(Q)碎石土零

星分布,厚度一般为 2~4 m;基岩为下太古界下段(Ar_1^+)片麻岩,岩体全、强风化带厚度一般不超过 8 m;弱风化带厚度小于 5 m,微新岩体顶面埋深一般不超过 15 m,发育 2 组优势节理:第一组走向北北西—北北东,倾角以 $63^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 为主;第二组走向近东西,倾角多为 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$;2 组节理多呈闭合状,充填钙质、绿泥石,节理形态以平直稍粗糙为主。进厂交通洞建筑物区地下水按赋存条件主要为基岩裂隙水,其赋存于基岩裂隙中,接受大气降水及孔隙水补给,沿裂隙网络导水通道向地下径流,无统一地下水位。进厂交通洞沿线地段钻孔揭示,地下水埋深一般为 7.9~12.7 m。进厂交通洞沿线地段钻孔微新岩体吕荣压水试验结果:较完整—完整岩体透水率 $q<1Lu$,渗透性等级主要属微—极微透水;较破碎岩体透水率 $1Lu\leq q<10Lu$,渗透性等级属弱透水;极破碎—破碎岩体不起压,渗透性等级属中等—强透水,均位于受构造影响发育的破碎岩体部位。

进厂交通洞在开挖过程中,开挖至桩号 K1+229.3~K1+214.9 段时,揭露一逆冲断层 f1,顶拱及边墙出现大量渗水现象,多股地下水从排水孔中呈股状流出,流量较小,对工程进度影响甚微。随着隧洞继续开挖,至桩号 K1+090.2 处,因其揭穿 f2 断层,沿 3 个爆破孔发生涌水(图 1),水流清澈并具有一定承压性,初始总涌水量约 $145 m^3/h$,流量较大,造成现场停工 12 天。

2 涌水特征

2.1 实测涌水量

自桩号 K1+090.2 处初见涌水后,即对总涌水量进行了持续观测,监测到初始最大流量达 $3408 m^3/d$,后流量迅速减小,约 7 天后流量减小至 $729.6 m^3/d$ 。随后流量减小趋缓,第 61 天后减小至 $120.8 m^3/d$,之后流量趋于稳定,维持在 $120 m^3/d$ 左右,流量变化曲线见图 2。

2.2 水温特征

涌水后对其涌水点、沿断层 f1 出水点水温和洞室内温度以及就近涌水点处宽扎河河水温度分别进行了测量,结果见表 1。由此可知,涌水点水温保持相对稳定,并高出同时段就近河水水温,沿 f1 断层渗水点水温分别约 $3^{\circ}C$ 、 $0.4^{\circ}C$ 。

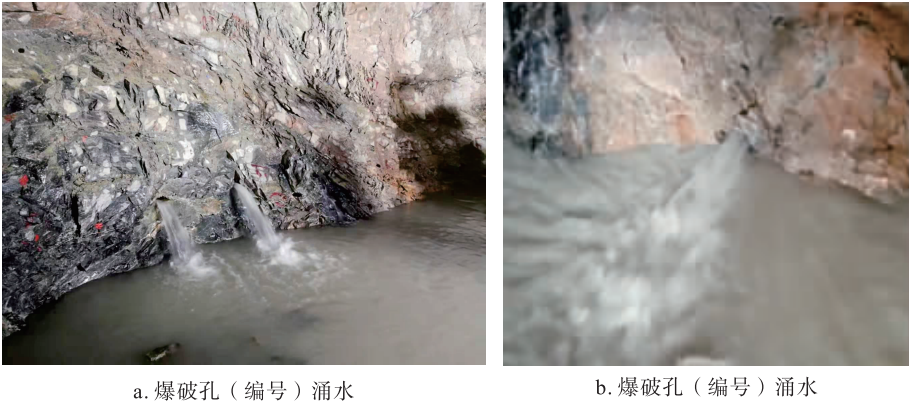


图 1 f2 断层涌水现场图

Fig. 1 Site photos of water inflow

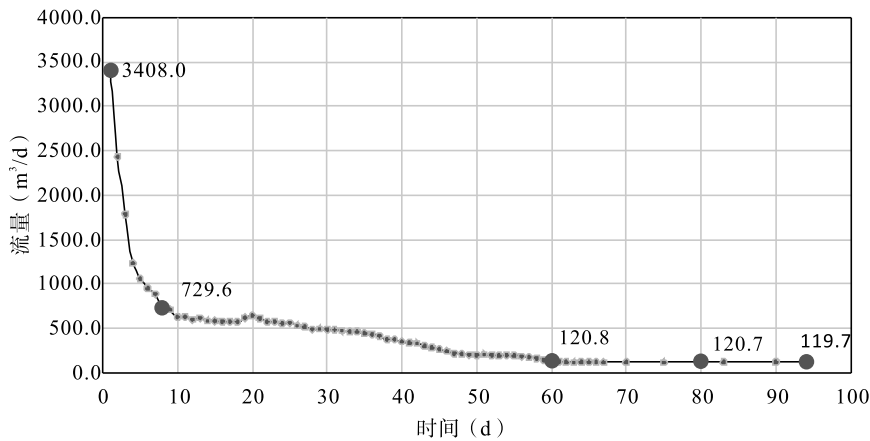


图 2 流量变化曲线图

Fig. 2 Flow change curve

表 1 涌水水温及其他位置温度观测结果表

Tab. 1 Observation results of water intrush temperature and other location temperatures

位置	观 测 时 间 及 温 度													
	第一天		第二天		第三天		第四天		第五天		第六天		第七天	
	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)	时间 (d)	温度 (℃)
就近河水水温	11:28	24.4	11:04	24.2	09:30	24.2	—	—	10:00	24.1	09:50	24.2	10:10	24.2
洞口气温	11:09	26.2	10:54	26.1	09:33	25.3	11:17	26.1	09:15	20.7	09:36	20.3	09:25	21.2
洞内温度 (K1+090.2)	08:49	24.3	11:08	24.7	09:23	24.7	11:08	24.7	09:30	23.1	08:45	23.4	09:36	24.3
涌水点水温	09:58	27.3	11:05	27.2	09:26	27.2	11:05	27.2	09:27	27.3	08:40	27.2	09:39	27.3
沿 f1 断层 渗水点水温	09:23	26.9	11:00	26.8	09:30	26.8	11:12	26.8	09:45	26.7	09:26	26.7	—	—

2.3 水化学特征

为了分析涌水点地下水与其他环境水的水化学特征关系,对涌水(K1+090.2)、沿断层 f1 渗水(K1

+220)、就近的宽扎河河水以及附件钻孔地下水分别采取了样品进行水化学分析。试验结果见表 2。结果表明,各涌水点处地下水的主要离子 Ca^{2+} 、

Mg²⁺、HCO₃⁻ 及总溶解固体含量基本相当,且远高于就近的宽扎河河水相应水化学特征值,说明桩号 K1+090.2 涌水处、沿 f1 断层渗水点的地下水与就近宽扎河河水无明显直接关联。

表 2 水化学分析主要成分结果汇总表
Tab. 2 Components of water chemical analysis results

检测项目	单位	涌水(K1+090.2)		f1 断层(K1+220.0)		就近宽扎河河水		就近钻孔地下水
HCO ₃ ⁻	mg/L	369	403	422	406	12	12	163
Cl ⁻	mg/L	<5	<5	<5	<5	<5	<5	14.2
SO ₄ ²⁻	mg/L	6	8	13	13	<5	<5	18
Ca ²⁺	mg/L	69	75	67	72	<5	<5	<5
Mg ²⁺	mg/L	20	20	22	20	<3	<3	17
PH	—	7.0	7.0	7.1	7.0	7.4	7.3	7.4
导电率	μS/cm	609	642	684	683	48	40	574
总溶解固体	mg/L	390	411	438	437	31	26	367

2.4 附近钻孔地下水水位变化

桩号 K1+090.2 处地下水涌水发生后,对其沿线前期钻孔 S625 与周边长期观测孔 S529、S533、S603、S606、S610 地下水水位变化进行了同步观测。观测结果表明:桩号 K1+090.2~K1+053 段地下水涌(渗)水持续,该隧洞沿线附近钻孔 S625 地下水位下降约 1.0 m,下降幅度较大,46 天后,累计下降

约 4.9 m;周边 5 个长期观测孔地下水位间隔 2 天,下降约 0.07~0.20 m,下降幅度明显,46 天后,累计下降约 0.3~0.7 m。

由周边及附近长期观测孔同步观测结果可知:桩号 K1+090.2~K1+053 洞段地下水涌(渗)水由周边及附近地下水补给,且距涌(渗)水段越近,地下水位下降幅度越大(图 3)。

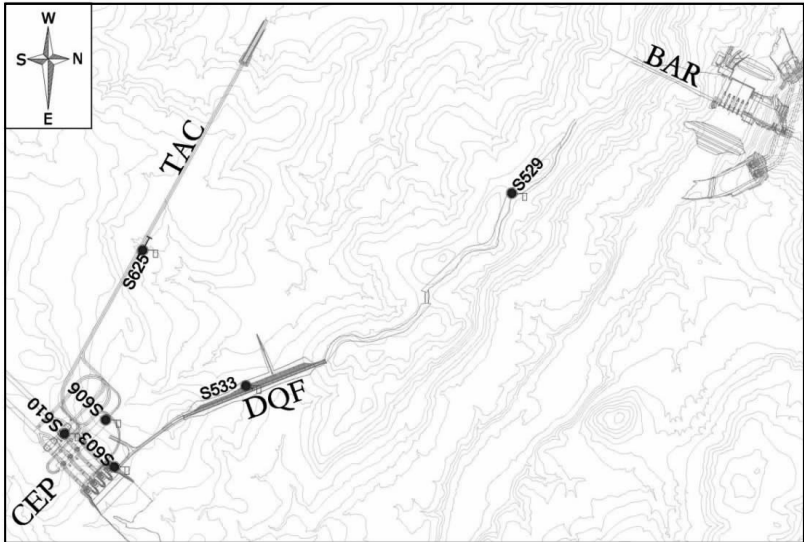


图 3 涌水处及周边钻孔位置示意图

Fig. 3 Location of water inrush and peripheral boreholes

3 涌水段地质模型及涌水量估算

3.1 涌水成因分析

发生涌水洞段的地层岩性为下太古界下段片

麻岩,片麻理总体倾向 160°~195°,倾角为 35°~50°,片麻理揉皱现象明显。后续开挖揭示:地下水沿小断层 f2 岩体破碎带涌出,断层倾向 250°~270°,倾角为 24°~35°,断层核部宽为 2~5 cm,物质组成为碎屑夹泥。受断层影响,断层两侧为岩

体破碎带(断层影响带),该带岩体结构呈碎块状,两侧带宽均约 0.4 m(图 4)。现场开挖揭示:K1+090~K1+050 段岩体节理相比于其他洞段更为发育;发育北东、北西、北北西向 3 组优势节理,节

理间距为 0.3~1.0 m,倾角以中陡倾角为主,开度小于 3 mm,钙质充填,节理两壁未蚀变,延伸长度一般为 3~8 m,节理形态多平直稍粗糙,属硬性结构面。

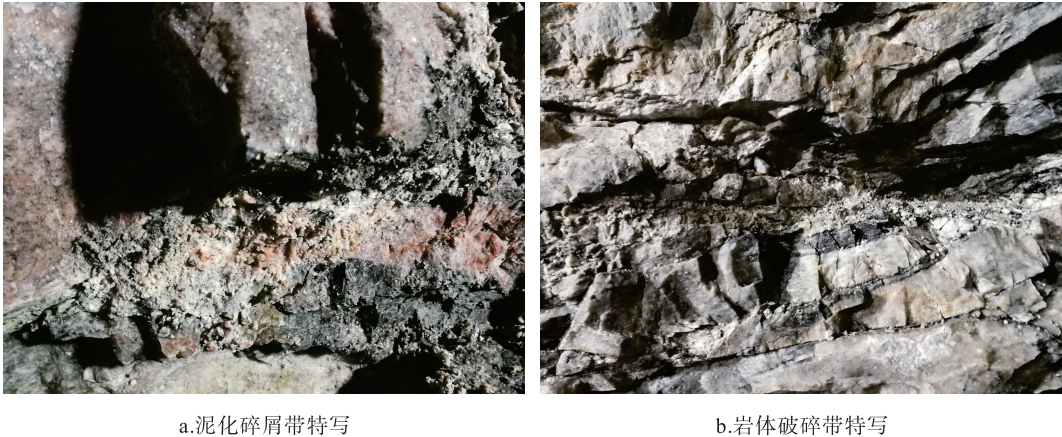


图 4 泥化碎屑带及岩体破碎带图
Fig. 4 Mud-detrimental and broken rock masses zone

工程区岩体透水率大部分属微-极微透水(GB 50287—2016,2016;GB 50287—2016, 2016),切割岩块的裂隙网络为地下水的储存和运移场所,地下水通过降雨入渗后赋存在网状裂隙中,受断层影响的岩体破碎区域岩体裂隙网络发育,赋存的地下水较多,在钻爆孔揭穿该区域后,因其透水性强而发生

涌水,地下水涌(渗)水来源主要由周边及附近地下水补给。

3.2 涌水段地质模型建立

复合渗透结构的地质模型更符合岩体破碎带渗透特征。按照隧洞段岩体透水性的不同,可将发生涌水的 f2 断层附近岩体分为 3 部分(图 5)。其中,

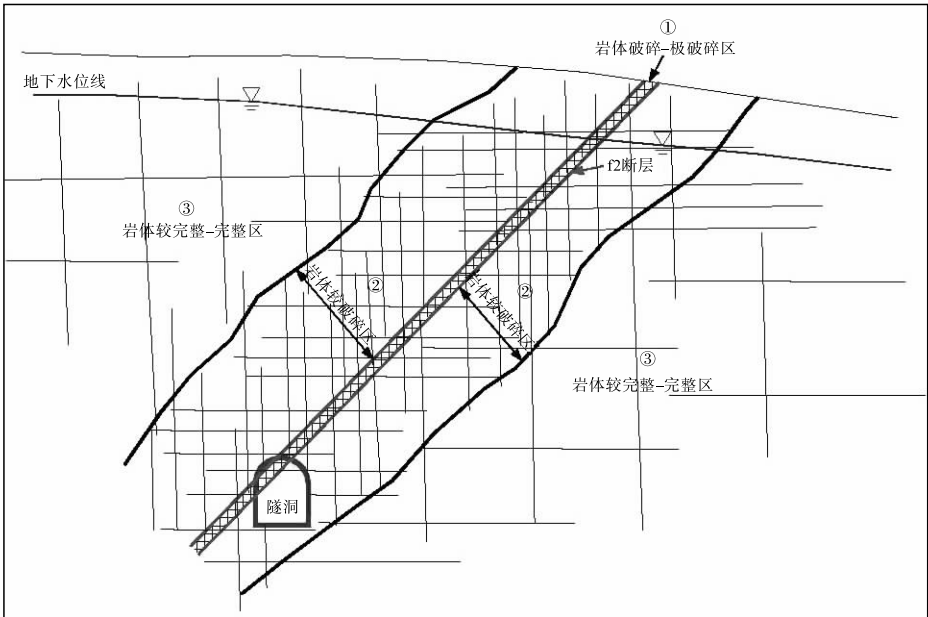


图 5 断层带区导水通道划分图
Fig. 5 Water passage formed by fracture network

①为岩体极破碎-破碎的强透水层带(核部+断层破碎带),根据钻孔压水试验结果为不起压,岩体破碎带渗透系数为 10^{-2} cm/s,初期的涌水均来自于此部分地下水。②为岩体较破碎的中等-弱透水层带(断层影响带),根据钻孔压水试验结果,岩体渗透系数为 10^{-4} cm/s,为流量缓慢衰减的涌水主要来源。③为岩体较完整-完整的微-极微透水层带,裂隙发育少,为稳定阶段的涌(渗)水提供来源。

涌水一般分初期阶段,衰减阶段,稳定阶段(GB 50487—2008, 2008),初期发生的涌水主要来源于受断层影响的极破碎-较破碎的岩体破碎带(①和②),钻孔揭露岩体破碎带后,破碎带中赋存的地下水沿钻孔涌出,因该区域岩体透水率强,涌水量随时间迅速衰减,水位迅速下降。赋存于周围裂隙带(③)中的地下水向岩体破碎带进行补给,岩体破碎带中的地下水排空后,涌水量递减趋缓,最终流量达到稳定,形成以涌水点为汇的降落漏斗。

3.3 涌水量估算

3.3.1 最大涌水量估算

岩体破碎带中,岩体透水性强,初期涌水量大,且涌水量随时间迅速衰减,该部分地下水运动不符合达西定律。因此,采用流体力学中伯努利方程(GB 50487—2008, 2008)进行估算。

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (1)$$

式中: P_1 为岩体破碎带中的大气压强; P_2 为涌水钻孔处的大气压强, $P_1 = P_2 = P_0$, P_0 为大气压强; v_2 为涌水钻孔处的流速(m/s); v_1 为岩体破碎带中水流的流速(m/s),其中 $v_1 = KI \ll v_2$, K 为岩体破碎带的渗透系数,取 10^{-2} cm/s, I 为水力坡度, $I = \frac{h}{L} \approx 0.58$, $v_1 \ll v_2$, 可视为 $v_1 \approx 0$ m/s; ρ 为水的密度,取 $1\,000$ kg/m³; h 为水头高度(m); g 为重力加速度,取 9.8 m/s²。

将式(1)进行化简得:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

根据式(2)得到最大涌水量:

$$Q_{\max} = uA \sqrt{2gh} \quad (3)$$

式中:水头 $h = 91$ m;管嘴流量系数 μ 按 0.82 取值; $g = 9.8$ m/s²; A 为钻孔面积 $1\,962.5$ mm² (钻孔直径 50 mm),计算得涌水量约 $3\,390.2$ m³/d,与实测最大涌水量 $3\,408.0$ m³/d 相当。

3.3.2 正常涌水量估算

隧洞正常涌水量根据《铁路工程水文地质勘察

规程》(TB10049—2004)(2004)及《引调水线路工程地质勘察规范》(SL 629—2014)(林建忠, 2013)中提到的裘布依理论公式进行估算:

$$Q_s = LK \frac{H_2^2 - h^2}{R_y - r} \quad (4)$$

式中:

$$R_y = 215.5 + 510.5K \quad (5)$$

其中, R_y 为隧道涌水地段的引用补给半径(m); Q_s 为隧道正常稳定涌水量(m³/d); L 为隧洞通过含水体的长度(m),为 40 m; K 为含水体渗透系数(m/d),按 10^{-4} cm/s 估算; H_2 为洞底以上含水体厚度(m),为 101 m; h 为洞内排水沟假设水深(m),取 0.5 m; r 为洞身横断面等价圆半径(m),为 4.94 m。

带入式(5)与式(4),计算得隧道通过含水体地段的正常稳定涌水量为 112.4 m³/d,略小于实测稳定涌水量 120 m³/d。

4 涌水处理措施

鉴于桩号 K1+090 处涌水主要来源于岩体中赋存的地下水,与河水无关联。为了有效排出衬砌以外的围岩裂隙水,消除二次衬砌背面的静水压力,按照“动态排水”的排水原则:①初期支护喷射混凝土中的排水管由原设计的随机设置调整为系统布置,采用 $\Phi 50$ 排水孔引排,排水孔为深 4 m 的花管,排水孔间距为 1.5 m,排水孔位置和孔深根据现场岩体破碎区域进行调整。②桩号 K1+090 位置底板两侧设置集水坑,集水坑尺寸为 1.5 m $\times$ 1.5 m $\times$ 1.5 m,采用水泵抽排,达到减少洞内积水的目的。另外,在涌水洞段范围内,布置收敛监测断面,每个断面布置 5 个测点,长期对岩体变形情况进行监测。

鉴于涌(渗)水洞段涌水处初始流量较大,考虑其对围岩长期稳定性及运行的影响,建议设计对 f2 断层带及附近部位,视需要采取掏挖后回填混凝土塞,并结合帷幕灌浆处理措施。另外,对于后续隧洞开挖过程中岩体破碎部位水量较丰富洞段,布置超前钻孔排水,提前释放岩体中赋存的地下水。

5 结论

(1)对隧洞涌水的水量、水温、水化学及附近周边钻孔地下水位变化分析表明,桩号 K1+090.2 处涌水来源于岩体网络中储存的地下水,受降雨入渗

补给,与就近河水无关联。

(2)根据涌水洞段岩体透水性的不同,将受断层影响的破碎岩体分为:岩体极破碎-破碎的强透水层带,初期的最大涌水主要来自于此部分地下水;岩体较破碎的中等-弱透水层带,为流量缓慢衰减的涌水主要来源;岩体较完整-完整的微-极微透水层带,为稳定阶段的涌(渗)水提供来源。

(3)根据建立的地质模型,利用流体力学伯努利方程得到涌水初期的最大涌水量为 $3\,390.2\text{ m}^3/\text{d}$;利用稳定流裘布依理论公式得到正常涌水量为 $112.4\text{ m}^3/\text{d}$ 。计算结果与实测最大涌水量和正常涌水量大小相近。该研究方法及其成果可供其他类似工程参考。

参考文献(References):

张飞,徐光黎,郭淋,等.裂隙岩体渗透结构类型分析[J].

工程地质学报,2012,20(2):296-304.

ZHANG Fei, XU Guangli, GUO Lin, et al. Analysis of fractured rock mass permeability structure types[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2):296-304.

徐国鑫,姚俊.长大隧洞工程建设中地下水处理的实践及思考[J].水利水电技术,2017,48(8):101-107.

XU Guoxin, YAO Jun. Practice and Thinking on Ground Water Treatment in Construction of Long Large-sized Tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8):101-107.

罗玉虎,李丹,刘亮,等.摩天岭隧道涌水原因分析及处治措施[J].地下空间与工程学报,2017,7(2):453-459.

LUO Yuhu, LI Dan, LIU Liang, et al. Reason Analysis and Countermeasure Research of Tianheshan Tunnel Serious Water Seepage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 7(2):453-459.

孙臣生.天河山隧道大量涌水原因分析及对策研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(z1):453-459

SUN Chensheng. Reason Analysis and Countermeasure Research of Tianheshan Tunnel Serious Water Seepage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(z1):453-459.

浦友繁.牛栏江滇池补水干河泵站引水洞地下涌水处理[J].云南水力发电,2015,31(1):110-115.

PU Youfan. Treatment of underground gushing water in the diversion tunnel of the Niulan river dianchiganhe pumping station[J]. Yunan Water Power, 2015, 31(1):110-115.

张天明,苏红兵,彭佑奎.干河泵站引水隧洞特大涌水处理实践[J].人民长江,2013,44(12):50-53.

ZHANG Tianming, SU Hongbing, PENG Youkui. Practice of extra severe water gushing treatment of diversion tunnel of Ganhe pumping station[J]. Yangtze River,

2013,44(12):50-53.

钱富林.关角隧道突涌水机理分析及处治技术[J].铁道建筑,2014,(10):52-59.

QIAN Fulin. Mechanism analysis and treatment technology of gushing water in Guanjiao tunnel[J]. Railway Engineering, 2014, (10):52-59.

周宗青,李术才,李利平,等.特长深埋隧道基岩裂隙水探测与应用研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):99-107.

ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Detection of Bedrock Fissure Water and Its Application in Extra Long and Deep Tunnel Engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):99-107.

马晓辉.地质水文学基础分析毛坝1号隧道大型涌(突)水带形成机制及综合治理方针[J].四川建材,2010,36(4):139-143.

MA Xiaohui. The formation mechanism and comprehensive treatment policy of large water gushing zone in Maoba No. 1 tunnel are analyzed based on geology and hydrology[J]. Sichuan Building Materials, 2010, 36(4):139-143.

GB 50287-2016,水力发电工程地质勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2016.

GB 50287-2016, Code for hydropower engineering geological investigation [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

GB 50487-2008,水利水电工程地质勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2008.

GB 50487-2008, Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.

王晃,朱荣胜,杨彪.隧道工程涌水量预测方法[J].土工基础,2009,24(1):72-75.

WANG Huang, ZHU Rongsheng, YANG Biao. Forecast Method of Water Inflow in Tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2009, 24(1):72-75.

林建忠,阮晓东,陈邦国,等.流体力学[M].北京:清华大学出版社,2013.

LIN Jianzhong, RUAN Xiaodong, CHEN Bangguo, et al. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 2013.

TB 10049-2004,铁路工程水文地质勘察规范[S].北京:中国铁道出版社,2004.

TB 10049-2004, Code for Hydrogeological Investigation of Railway Engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

SL 629-2014,引调水线路工程地质勘察规范[S].北京:中国水利水电出版社,2014.

TB 10049-2004, Code for Engineering Geological Investigation of Water Diversion Route [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.