

基于水平钻探的地形变观测平硐勘察方法研究

孙刚, 朱泳, 赵敏, 杨远陶

(四川省第八地质大队, 四川 西昌 615000)

摘要:地质结构复杂的山区隧道勘察,常用垂直钻孔,难以满足地形变观测平硐勘察要求。论文以西昌某地壳地形变观测平硐工程勘察为例,提出一种基于水平钻探技术解决隧道勘察的中精细围岩分级和涌水量估算两大关键问题的方法。通过对水平钻探全孔岩心节理裂隙进行详细编录,统计节理裂隙线密度,再结合场区节理裂隙发育优势方位及间距,建立本工程场区岩体标准模型,对标准模型的统计分析最终得到一维岩心裂隙线密度与三维岩体体积节理数 J_v 的换算系数 K ,再根据规范计算得到隧道围岩的岩体完整性系数 K_v 及 BQ 值,精细划分隧道围岩类别。水平钻探在钻进过程中能准确判断隧道涌水位置并测量涌水量,为隧道涌水量计算提供准确的计算参数。

关键词:地形变观测平硐;隧道勘察;水平钻探;节理裂隙;体积节理数;围岩类别;涌水量

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2024)02-0154-07

Research on investigation method of terrain change observation adits based on horizontal drilling

SUN Gang, ZHU Yong, ZHAO Min, YANG Yuantao

(The 8th Geological Brigade of Sichuan, Xichang Sichuan 615000, China)

Abstract: Vertical drilling technology is commonly used in mountain tunnel investigation with complex geological structure, however, it is difficult to meet the requirements of the terrain change observation adits investigation. Taking an terrain change observation adit investigation project in Xichang as an example, a method to solve the two key problems of detailed surrounding rock classification and water inflow estimation in tunnel investigation based on horizontal drilling technology is put forward. Detailed logging of the joint fissures in full-hole horizontal drilling cores and the joint fracture linear density statistics are collected. Combined with the developed orientation and space of the joint fractures in the project site area, the standard rock mass model is established. Through statistical analysis of the standard model, the conversion factor K of the one-dimensional core fracture linear density and the three-dimensional volume joint number J_v of the rock mass is finally obtained. After that, the rock mass integrity index K_v and BQ values of the tunnel surrounding rock are calculated according to the standards and specifications, and then the classification of tunnel surrounding rock can be more detailed divided. In the process of drilling, horizontal drilling can be used to accurately judge the location of tunnel water inflow and measure it, which provides accurate calculation parameters for the calculation of tunnel water inflow.

Key words: terrain change observation adits; tunnel investigation; horizontal drilling; joint fissure; volumetric joint count; surrounding rock classification; water inflow

0 引言

隧道是公路工程、铁路工程、水利工程、市政工程等工程领域中最常见的构筑物之一。近年来,随

着我国川藏铁路、川藏高速、新基建等新一轮重大基础设施建设的启动实施,长大深埋隧道越来越常

收稿日期:2023-09-18; 修回日期:2023-12-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.021

第一作者:孙刚,男,汉族,1988年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,从事地质工程和地质灾害勘察工作,四川省成都市成华区奥园国际中心1006室,118192463@qq.com。

引用格式:孙刚,朱泳,赵敏,等.基于水平钻探的地形变观测平硐勘察方法研究[J].钻探工程,2024,51(2):154-160.

SUN Gang, ZHU Yong, ZHAO Min, et al. Research on investigation method of terrain change observation adits based on horizontal drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 154-160.

见。如川藏铁路和规划的滇藏铁路都有多座 20 km 以上的特长隧道^[1]。在建的新疆天山胜利隧道,隧道全长 22.0 km,最大埋深达 1200 m^[2]。

传统的隧道勘察手段多以沿轴线布置垂直钻孔为主。在地形复杂的高陡山区,由于隧道工程多深埋于地下,其地质条件复杂多变,传统的勘察手段勘察精度较低,主要包括两个方面的原因:一方面传统的勘察手段往往受地形限制,钻探设备搬运困难,可能造成部分勘察钻孔无法实施;另一方面,考虑工期和成本,垂直钻孔的布孔间距一般较大,钻孔之间大段的地质情况只能依靠推测,往往无法满足精细化地质勘察的需求^[3-4]。由于前期勘察成果精度不足往往会引起工程后期大量的变更,造成投资增加,工期延长,甚至付出生命的代价。

在复杂山区的隧道勘察中,水平钻探作为代替传统垂直钻探拥有诸多优势。近年来许多学者在川藏铁路隧道、天山胜利隧道、输水隧洞等工程中也开展了大量水平钻探技术应用于隧道勘察的研究^[5-10]。在长大深埋隧道中采用水平定向钻对隧道进行地质勘察时,由于目前超长全孔取芯技术尚不成熟,效率低、工期长、成本高,应用范围有限^[2]。但在长度较短、要求揭露地质信息全面、工期短且经费有限的地应变监测平硐勘察中,采用水平钻探技术实现对隧道沿程围岩的精准勘察,工期和成本合理,应用前景广阔。

国标及现行公路、铁路行业工程地质勘察规范确定隧道围岩岩体完整性系数 K_v 主要有两种方法:一是波速测试法,即分别测定孔内岩体波速 (V_{pm}) 和岩块波速 (V_{pr}),按式 $K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2$ 计算得到;二是岩体体积节理数 (J_v) 测试,即每立方米岩体节理裂隙的条数,然后按照 J_v 与 K_v 对照表进行线性插值确定 K_v 值^[11-13]。

传统的孔内岩体波速测试设备是基于垂直钻孔设计的,在水平钻孔中进行岩体波速测试的设备和技术还不够成熟,本文以西昌某地壳地形变观测平硐工程勘察为例,探讨一种基于水平钻探技术进行体积节理数测试,确定隧道围岩岩体完整性,划分围岩级别,估算隧道涌水量的方法。

1 工程概况

沿主洞轴线布置水平钻孔一个,方位角 NE45°,设计孔深 330 m。钻探设备选用 EP800 型地表全液

压钻机,采用薄壁金刚石绳索取心工艺进行全孔取心,如图 1、图 2 所示。再结合物探、工程地质测绘、室内试验等手段综合查明平硐的地质条件。工作布置如图 3 所示。



图 1 EP800 型水平钻机

Fig.1 EP800 horizontal drilling rig



图 2 水平钻孔岩心

Fig.2 Core from horizontal drilling

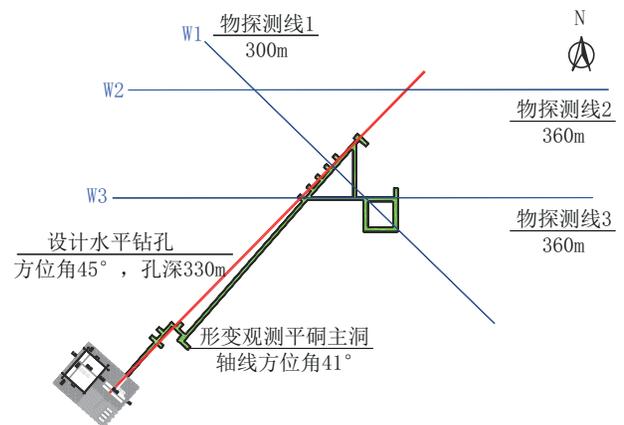


图 3 勘察工作布置平面示意

Fig.3 Layout of the investigation work

场地位于西昌市琅环镇,平硐设计主洞轴线方位角 NE41°,埋深 20~200 m,主硐及耳硐总长度约 600 m,净宽为 3.1 m,净高度为 3.1 m。勘选旨在揭示主硐轴线沿程围岩地质情况及地下水发育特征;对平硐及其周围区域进行详细工程地质测绘;查明

勘察区节理发育规律、水文地质条件;采取岩心及地下水样,得到围岩的物理力学性质、放射性以及地下水的腐蚀性等参数。

场地属中山区,地形坡度较陡,一般 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。出露岩体为三叠系混染石英闪长岩(δo_3^1)。地下水类型主要为岩浆岩裂隙水,泉流量 $0.01\sim 0.08\text{ L/s}$ 。勘察区水文地质剖面见图4。

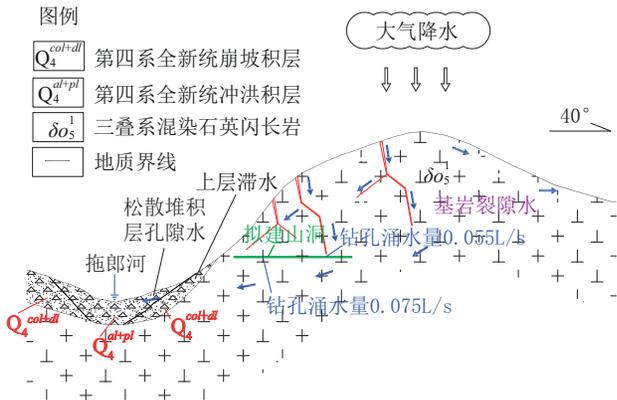


图4 勘察区水文地质剖面

Fig.4 Hydrological geological profile of the work area

2 标准岩体模型建立

2.1 岩体结构面发育情况

对平硐洞口及其周围区域进行详细的工程地质测绘,共测得76条结构面。经统计分析,平硐区结构面走向优势方位主要为 $NW300^{\circ}$ 、 $NE25^{\circ}$ 、 $NE45^{\circ}$ 、 $NW330^{\circ}$ 。倾向优势方位为 $NE25^{\circ}$ 、 $SW210^{\circ}$ 、 $SE135^{\circ}$ 、 $NW290^{\circ}$,倾角多分布于 $40^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 之间,见图5、图6。

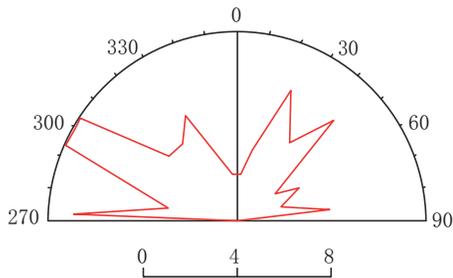


图5 结构面走向玫瑰花图

Fig.5 Strike rose chart of the structural plane

在洞口附近区域测得4组主要结构面,其发育情况见表1。对照图3、图4可知,平硐洞址区主要结构面方位基本符合区域裂隙优势方位统计结果。

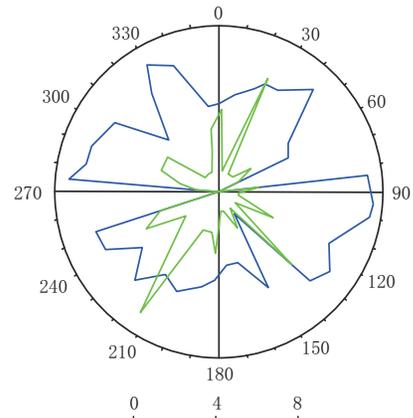


图6 结构面倾向倾角玫瑰花图

Fig.6 Dip and dipping angle rose chart of the structural plane

表1 平硐洞址区主要结构面发育情况

Table 1 Main structural plane development in the adit site

裂隙编号	裂隙产状	裂隙间距/m	平均间距/m
1	$135^{\circ}\angle 81^{\circ}$	0.2~1.0	0.6
2	$26^{\circ}\angle 50^{\circ}$	0.2~0.8	0.5
3	$206^{\circ}\angle 52^{\circ}$	0.2~0.8	0.5
4	$291^{\circ}\angle 82^{\circ}$	0.2~1.0	0.6

2.2 标准岩体模型

岩体裂隙发育间距一般存在一定的变化区间。根据林峰等^[14]、Palmstrom^[15]等进行实测研究认为,岩体裂隙二维向三维转换或一维向三维转换均存在一定的比例关系,实际间距对模型的准确性影响不大。因此,本文根据平硐洞址区实测的4组优势裂隙发育情况,按裂隙发育的平均间距,利用AutoCAD三维建模工具建立场区标准岩体模型。模型建立主要有3个步骤:第一步,首先绘制一个尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的立方体岩块;第二步,将4组主要节理裂隙按产状和间距对立方体岩块进行切割,模型如图7所示;第三步,将裂隙切割后的立方体岩块平均分割为8块尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 、体积为 1 m^3 的小岩块,模型如图8所示。

2.3 转换系数K的确定

岩体体积节理数(J_v)是指单位体积岩体中节理的条数,它是衡量岩体完整性的重要指标之一,是国际岩石力学委员会推荐的描述工程岩体完整性的主要评价方法^[16]。 J_v 值一般采用现场量测法,应

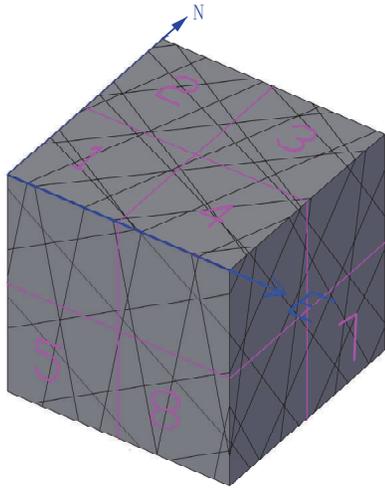


图7 2 m×2 m×2 m的立方体岩块模型
Fig.7 Cube block model of 2 m×2 m×2 m

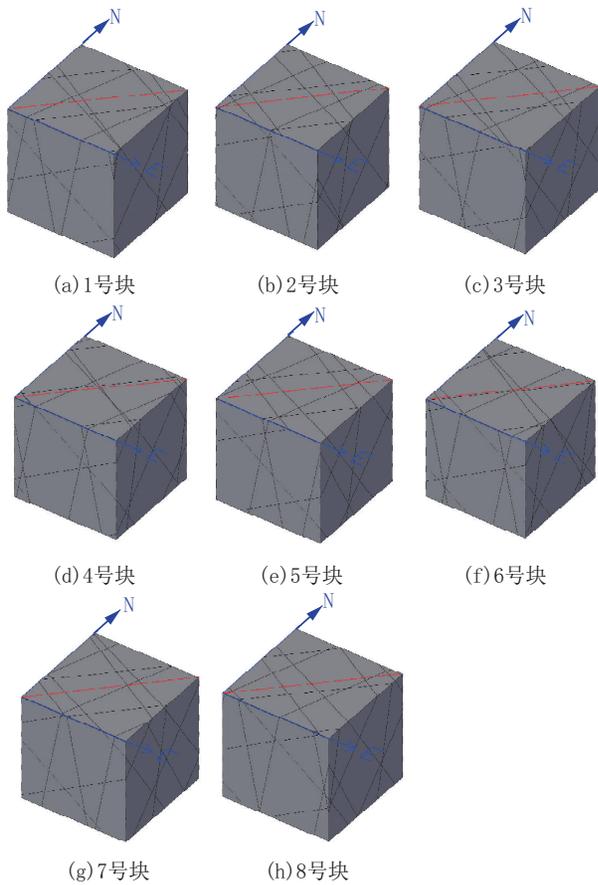


图8 1 m×1 m×1 m的小岩块模型
Fig.8 Small rock block model of 1 m×1 m×1 m

针对不同的工程地质岩组或岩性段,选择有代表性的露头或开挖壁面进行节理(结构面)统计^[11]。

J_v 值根据节理统计结果按下式计算:

$$J_v = \sum_{i=1}^n S_i + S_0, i = 1, \dots, n \quad (1)$$

式中: J_v ——岩体体积节理数,条/ m^3 ; n ——统计区域内结构面组数; S_i ——第*i*组结构面沿法向每米长结构面的条数; S_0 ——每立方米岩体非成组节理条数。

由上可知,岩体体积节理数(J_v)是建立在地表测绘基础之上的。但在实际工作中,往往不容易找到合适的露头或开挖壁面进行结构面统计。为此,本文考虑将水平钻孔看作一条沿隧道轴线的水平测线,按钻探回次对岩心结构面进行统计,并建立一维钻孔到三维体积节理数的转换关系,从而反算得到隧道轴线沿程围岩岩体体积节理数。

林峰等^[14]研究认为,利用二维测面实测结构面条数测值向 J_v 值换算时,换算经验系数为1.4~1.7。

Palmstrom^[15]提出对于等分布节理,由钻孔的一维结构面线密度向 J_v 转换时,需要乘转换系数 K , K 值通常取1.65~3.0。系数 K 的取值受钻孔方位与优势结构面走向方位的关系影响显著。若钻孔方位平行优势的节理组,则系数 K 应取较大值,若钻孔方位垂直优势节理组,则系数 K 应取较小值以适合实际情况。

对本工程,水平钻孔的方位角为NE45°,根据图7所示模型,可将模型顶面的对角线看作水平钻孔,分别统计8个小立方体顶面对角线方向的节理频数和立方体体积节理数,统计结果如表2所示。

统计结果显示,本工程的转换系数平均值 $K=3$ 。分析较正常节理分布下 K 值偏大的原因是发育两组走向与钻孔方位平行或小角度相交的结构面。

表2 标准岩体模型结构面统计
Table 2 Structural plane statistics of standard rock mass model

岩块编号	NE45°方向节理频数/(条·m ⁻¹)	体积节理数 J_v /(条·m ⁻³)	系数 K
1	3.6	12	3.4
2	5.0	14	2.8
3	4.3	12	2.8
4	5.0	14	2.8
5	3.6	13	3.6
6	5.0	14	2.8
7	3.6	12	3.4
8	5.0	13	2.6
转换系数 K 平均值			3.0

3 围岩级别划分与涌水量估算

3.1 围岩级别划分

《公路隧道设计细则》(JTG/TD 70—2010)中规定隧道围岩分级采用岩体基本质量指标 BQ 进行划分。基本质量指标 BQ 主要考虑岩石的坚硬程度和岩体完整程度 2 个因素,计算公式如下:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (2)$$

式中: BQ ——岩体基本质量指标; R_c ——岩石的饱和抗压强度值,MPa,本工程取值 74.7; K_v ——岩体完整性系数, K_v 值的确定主要有波速测试和岩体体积节理数(J_v)测试两种,本工程主要采用上文中讨论得到转换系数 K 换算得到岩体体积节理数(J_v)。

根据国标,可采用岩体体积节理数 J_v 值确定对应的 K_v 值(见表 3)。

表 3 J_v 与 K_v 的对应关系

Table 3 Correspondence between J_v and K_v

$J_v / (\text{条} \cdot \text{m}^{-3})$	K_v
< 3	> 0.75
3~10	0.75~0.55
10~20	0.55~0.35
20~35	0.35~0.15
≥ 35	≤ 0.15

一般情况下 $J_v < 3$ 时, K_v 可以取 0.75; J_v 在 3~35 区间范围内,可采用线性插值法求得 K_v 值;当 $J_v > 35$ 时可以用负指数函数进行拟合^[16]。具体的计算公式如下:

$$\begin{cases} K_v \approx 0.75 & (J_v < 3) \\ K_v = 0.75 \times \frac{J_v - 3}{35} & (3 < J_v < 10) \\ K_v = 0.55 \times \frac{J_v - 10}{50} & (10 < J_v < 20) \\ K_v = 0.35 \times \frac{J_v - 20}{75} & (20 < J_v < 35) \\ K_v = e^{-0.054J_v} & (J_v > 35) \end{cases} \quad (3)$$

算得 BQ 值后,再根据地下水状态、初始应力状态、工程轴线方位与主要结构面产状的组合关系等按下式进行修正:

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (4)$$

式中:[BQ]——岩体基本质量指标修正值; K_1 ——与地下水状态相关的修正系数,本工程取值 0.1; K_2 为与工程轴线方位与主要结构面产状的组合关系相关的修正系数,本工程取值 0.4; K_3 ——与初始应力状态相关的修正系数,本工程取值 0。

前面 2.3 节确定的本工程转换系数 K ,首先是基于对整个硐址区及其周围区域裂隙发育情况进行实地调查得出了硐址区裂隙发育的一般规律。而后根据实地调查数据进行场地标准岩体模型建立,再对标准模型进行统计分析而得出。因此,可认为本工程平硐深范围内裂隙发育情况亦符合此规律。通过对水平钻孔岩心裂隙进行实测,再利用转换系数 K 即可得到相应的体积节理数和围岩级别。

限于篇幅,本文仅选取水平钻孔第 37~47 回次岩心结构面数据进行计算,计算结果如表 4 所示。

表 4 岩体基本质量指标 BQ 值计算

Table 4 Calculation table of BQ values

回次编号	回次长度/ m	实测裂隙 条数/条	实测裂隙频 数/(条·m ⁻¹)	体积节理数 $J_v / (\text{条} \cdot \text{m}^{-3})$	岩体完整 性系数 K_v	岩体基本质 量指标 BQ	岩体基本质量指 标修正值 $[BQ]$	围岩分级
37	3	6	2.00	6	0.66	480	430	Ⅲ ₁
38	3	7	2.33	7	0.64	473	423	Ⅲ ₁
39	3	6	2.00	6	0.66	480	430	Ⅲ ₁
40	3	8	2.67	8	0.61	466	416	Ⅲ ₁
41	3	4	1.33	4	0.72	494	444	Ⅲ ₁
42	3	8	2.67	8	0.61	466	416	Ⅲ ₁
43	3	4	1.33	4	0.72	494	444	Ⅲ ₁
44	3	14	4.67	14	0.47	432	382	Ⅲ ₂
45	3	13	4.33	13	0.49	437	387	Ⅲ ₂
46	2	8	4.00	12	0.51	442	392	Ⅲ ₂
47	3	9	3.00	9	0.58	459	409	Ⅲ ₁

3.2 涌水量估算

3.2.1 钻孔涌水量测试

本工程水平钻孔在钻探过程中揭露2处地下水,分别进行流量测定,第一处为孔深94.5 m处,测得钻孔涌水量为0.075 L/s,第二处为孔深235.06~238.06 m处,测得钻孔涌水量为0.055 L/s。又根据钻进过程中冲洗液的消量分析,钻孔渗漏量很小,基本可以忽略。因此,本工程水平钻孔实际揭露的总钻孔涌水量为0.13 L/s,约等于11.2 m³/d。

3.2.2 降雨入渗法

采用《铁路工程地质手册》(修订版,2000年)中降雨入渗法进行估算,计算公式如下:

$$Q = 2.74\alpha WA \quad (5)$$

式中:Q——隧道涌水量,m³/d; α ——降水入渗系数,本工程取0.1;W——区域多年年降雨量,mm,本工程取值1013;A——隧道通过含水体的地下集水面积,km²,直接在图上量取,本工程取值0.1。

将数据代入上式计算得到隧道正常涌水量为27.8 m³/d。

3.2.3 地下径流模数法

地下水径流模数也称“地下径流率”,是1 km²含水层分布面积上地下水的径流量,表示一个地区以地下径流形式存在的地下水量的大小^[17]。

地下径流模数法预测涌水量计算公式如下:

$$Q = 86.4MA \quad (6)$$

式中:Q——隧道涌水量,m³/d;M——地下径流模数,L/s.km²,根据区域水文地质资料,本工程所处地区地下径流模数取值1.51;A——隧道积水面积,km²,本工程取值0.1。

将数据代入上式计算得到隧道涌水量为13.0 m³/d。

由以上计算结果可知,地下径流模数法涌水量计算结果与钻孔实测结果(4月属当地枯水期)较为接近,计算结果的可信度较高。由于径流模数一般在枯水期测得,丰水期涌水量会显著增加,正常涌水量一般按枯水期涌水量的2倍计算^[18],预测本工程平硐正常涌水量为26 m³/d与降雨入渗法计算结果27.8 m³/d接近。因此,本工程平硐的正常涌水量综合取值为27.8 m³/d。

4 结论与建议

本文主要通过工程实例进行平硐勘察新方法

研究。重点研究了如何利用水平钻孔技术进行地下平硐围岩分级和涌水量估算。主要得出以下结论:

(1)在一些复杂山区长度较短的平硐勘察中,配合地表调查的全孔取心水平钻探技术可以对平硐设计轴线围岩的地层岩性、节理裂隙发育程度、地下水发育情况进行精准勘察。

(2)通过建立场区标准岩体模型的方法得到钻孔岩心结构面频数和围岩岩体体积节理数(J_v)的换算系数K,以实现平硐围岩级别进行精确划分。

(3)通过水平钻孔可以直接准确定位平硐的涌水部位并准确测量勘测时涌水量大小。再结合其他隧道涌水量估算方法进行平硐正常涌水量估算,并用实测数据进行校验,可提高隧道涌水量估算精度。

参考文献(References):

- [1] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5):1-8.
- [2] 赵强.基于水平定向钻技术的隧道围岩强度与岩性反演研究[D].武汉:中国地质大学,2022.
ZHAO Qiang. Research on strength and lithology inversion of tunnel surrounding rock based on horizontal directional drilling technology [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [3] 周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):135-142.
ZHOU Mengdi, LIU Huan, HAN Lili, et al. Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering survey [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):135-142.
- [4] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.
HU Yule, ZHAO Haibin, YAO Zhenong. Adaptability analysis of tunnel directional drilling system in tunnel horizontal exploration engineering [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):116-124.
- [5] 马保松,程勇,刘继国,等.超长距离水平定向钻进技术在隧道精准地质勘察的研究及应用[J].隧道建设,2021,41(6):972-978.
MA Baosong, CHENG Yong, LIU Jiguo, et al. Tunnel accurate geological survey using long-distance horizontal directional drilling technology [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6):972-978.
- [6] 罗显梁,徐正宣,吴金生,等.川藏铁路千米级水平孔绳索取心钻进技术与应用[J].地质与勘探,2022,58(3):665-675.
LUO Xianliang, XU Zhengxuan, WU Jinsheng, et al. Applica-

- tion of the drilling technology based on wireline coring to a kilometer-level horizontal hole on the Sichuan-Tibet railway[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(3):665-675.
- [7] 谢毅,徐正宣,陈明浩,等.山区铁路隧道超长定向钻探关键技术研究[J].*铁道工程学报*,2022,287(8):1-5.
XIE Yi, XU Zhengxuan, CHEN Minghao, et al. Research on the key technology of ultra long directional drilling in railway tunnel in mountainous area[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 287(8):1-5.
- [8] 肖华,刘建国,徐正宣,等.川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J].*钻探工程*,2021,48(5):18-26.
XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal survey boreholes for the Sichuan-Tibet railway[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5):18-26.
- [9] 马映辉,贾宏福,李成志,等.某铁路勘察近水平孔取心钻探施工技术[J].*地质与勘探*,2021,57(1):190-197.
MA Yinghui, JIA Hongfu, LI Chengzhi, et al. Nearly-horizontal borehole coring and drilling techniques in the survey of a railway[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(1):190-197.
- [10] 李军,李勇,谢小国,等.狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用[J].*钻探工程*,2022,49(6):21-29.
LI Jun, LI Yong, XIE Xiaoguo, et al. Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main channel of Shiziyang[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(6):21-29.
- [11] GB/T 50218—2014.工程岩体分级标准[S].
GB/T 50218—2014. Standard for engineering classification of rock mass[S].
- [12] JTG C20—2011.公路工程地质勘察规范[S].
JTG C20—2011. Code for highway engineering geological survey[S].
- [13] TB 10012—2019.铁路工程地质勘察规范[S].
TB 10012—2019. Code for geology survey of railway engineering[S].
- [14] 林峰,黄润秋,王胜,等.岩体体积节理数(J_v)的现场测量方法评价[J].*工程地质学报*,2008,16(5):663-666.
LIN Feng, HUANG Runqiu, WANG Sheng, et al. Evaluation of in-situ measurement methods for counting volumetric joints of rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(5):663-666.
- [15] Paimstrom A. Volumetric joint count: A successful and simple measurement of the degree of rock mass jointing[C]//Proceedings 4th International Congress-International Association of Engineering Geology. India, 1982:221-228.
- [16] 胡修文,胡盛明,卢阳,等.岩体体积节理数的统计方法及其在围岩分级中的应用[J].*长江科学院院报*,2010,27(6):30-34.
HU Xiuwen, HU Shengming, LU Yang, et al. Measurement of volumetric joint count and its application in surrounding rock classification[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(6):30-34.
- [17] 张修杰,程小勇.岩浆岩地区深埋特长隧道涌水量预测及差异分析[J].*中外公路*, 2020, 40(S2):188-194
ZHANG Xiujie, CHENG Xiaoyong. Prediction and difference analysis of water inflow in deep buried long tunnel in magmatic rock area[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2020, 40(S2):188-194.
- [18] 钟贵莉.某高速公路隧道涌水量预测研究[J].*地下水*,2022, 44(1):33-37.
ZHONG Guili. Study on the prediction of water inflow in a highway tunnel[J]. *Ground water*, 2022, 44(1):33-37.

(编辑 王文)