

基于水平定向钻的隧道围岩均质区划分研究

张佳敏¹, 杨栋^{1,2*}, 王军朝², 李勇^{1,2}, 张祥祥¹, 周娟²

(1. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 本文依托香港狮子山隧道扩容改造工程前期勘察阶段水平定向钻孔项目, 基于工程地质资料、钻孔电视、声波和压水试验数据, 采用定性定量相结合的方法, 探讨其在均质区划分中的应用。钻孔电视光学成像弥补了岩石破碎时裂隙方位角获取的不足, 声波测井和压水试验提供了岩体完整性和渗透性数据。多方法联合划分均质区, 有助于提高隧道围岩分级的精度和可靠性。实验结果与实际高度吻合, 证明综合物探方法可高效探明地层裂隙发育, 围岩均质区划分方法准确, 为工程勘察提供技术支撑。

关键词: 水平定向钻孔; 均质区划分; 隧道围岩分级; 综合物探方法; 多方法联合划分

中图分类号: TV554:P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0063-08

Research on the zoning of homogeneous areas of tunnel surrounding rock based on horizontal directional drilling

ZHANG Jiamin¹, YANG Dong^{1,2*}, WANG Junchao², LI Yong^{1,2}, ZHANG Xiangxiang¹, ZHOU Juan²

(1. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: This paper relies on the horizontal directional drilling project in the preliminary investigation stage of the expansion and reconstruction project of the Lion Rock Tunnel in Hong Kong. Based on the engineering geological data, borehole television images, acoustic wave data, and water pressure test data, a method combining qualitative and quantitative analysis is adopted to explore its application in the zoning of homogeneous areas. The optical imaging of borehole television makes up for the deficiency in obtaining the dip angles of the fracture orientations when the rock is fragmented. Acoustic logging and water pressure tests provide data on the integrity and permeability of the rock mass. The joint zoning of homogeneous areas using multiple methods helps to improve the accuracy and reliability of the classification of tunnel surrounding rock. The experimental results are highly consistent with the actual situation, demonstrating that the comprehensive geophysical exploration method can efficiently detect the development of stratum fractures, and the method for zoning homogeneous areas of the surrounding rock is accurate, providing technical support for engineering investigation.

Key words: horizontal directional drilling; division of homogeneous zones; classification of tunnel surrounding rock; comprehensive geophysical exploration method; joint division by multiple methods

0 引言

水平定向钻探勘察将传统地质钻探取心与水

平定向钻进技术结合, 辅以孔内测试技术, 可直观、准确地了解隧道掌子面前方不良地质情况等^[1-2]。

收稿日期: 2025-03-11; 修回日期: 2025-04-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.008

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查技术方法升级与应用”(编号: DD20243535)

第一作者: 张佳敏, 女, 汉族, 1997年生, 助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻孔物探测试技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 2277359819@qq.com。

通信作者: 杨栋, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 注册岩土工程师, 岩土工程专业, 从事岩土体稳定性、地质灾害防治技术和孔内测试技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 271062514@qq.com。

引用格式: 张佳敏, 杨栋, 王军朝, 等. 基于水平定向钻的隧道围岩均质区划分研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 63-70.

ZHANG Jiamin, YANG Dong, WANG Junchao, et al. Research on the zoning of homogeneous areas of tunnel surrounding rock based on horizontal directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 63-70.

在复杂山区隧道勘察中,水平定向钻探相比传统垂直钻探具有显著优势。近年来,许多学者在川藏铁路隧道、天山胜利隧道等工程中开展了大量研究,推动了水平定向钻探技术在隧道勘察中的应用^[3-5]。

围岩分级和均质区划分是隧道工程的基础性工作。围岩分级是依据岩石强度、完整性、地下水等多种因素对围岩稳定性进行分级,以确定支护类型与参数,保障施工安全。均质区划分则基于地质数据统计,将具有相似特征的区域归为一类,有助于精准判断地层结构,准确识别潜在的地质异常区域,为后续工程选址、基础设计提供可靠依据。均质区划分能为围岩类别判断提供数据支撑,更精准地界定围岩类别,而明确的围岩类别也有助于理解不同均质区的工程特性,二者相互补充,共同服务于隧道工程的科学决策与高效实施^[6]。

早期岩体研究已建立起较为成熟的理论体系。1983年 Miller^[7]利用列联表分析、施密特投影网和卡方检验,以结构面产状为指标,成功划分了岩体结构均质区。2004年 Martin等^[8]提出基于不连续面走向数据的岩体结构划分方法,易于编程实现。2015年 Song等^[9]提出基于节理方向和迹线长度确定岩体结构域边界的新方法。2019年 Chen等^[10]结合 k-means 和 SSE 方法,通过 MBI 值聚类精细识别均匀结构区域。后续学者基于钻探测试数据也进一步推动了岩体均质区划分和围岩分级的发展。2003年范留明等^[11]提出密度分区法划分水电站工程侧裂结构面均质区,并验证了可行性。2010年高敬等^[12]采用产状相关性分析和圆形窗口法,确定了花岗岩体结构均质区范围。同年,胡修文等^[13]提出岩体体积节理数统计方法及其在 BQ 法围岩分级中的应用。2012年李明等^[14]基于卡方检验和迹长法,全面划分裂隙岩体均质区。同年,杨勇等^[15]通过压水试验,探索了岩体质量指标、完整性指数与透水性率的关系。2015年董育烦等^[16]利用声波测井确定薄层状岩体 RQD 分级指标。2023年李露露等^[17]以裂隙产状和线密度划分均质区,结合渗透张量理论分析了岩体渗透性及渗透主方向。2024年孙刚等^[18]通过水平孔岩心编录和节理密度统计,获得岩体完整性系数并精细划分了隧道围岩类别。

隧道围岩分级是对整个隧道周围岩体的一个宏观评价,岩体结构均质区划分能够更详细地揭示岩体内部结构的差异,有助于提高隧道围岩分级的

精度和可靠性。但现有方法存在一些问题和局限性,如:单一测试方法难以全面反映围岩特性;缺乏系统性的划分方法;对三种测试方法的联合应用研究较少等。据此,本文介绍了联合钻孔电视光学成像和声波、压水试验结合的测试方法,对隧道围岩进行均质区划分,为隧道工程勘察提供技术支撑。

1 均质区划分方法

1.1 裂隙线密度分区法

线密度反映钻孔岩体裂隙发育程度^[11]。其划分方法:先对钻孔深度按某一窗口宽度算出其范围内的裂隙数量,并用式(1)计算出其裂隙线密度;后采用重叠窗口法,按相同的步长移动窗口并统计裂隙数量,直至深度结束,可计算出一系列线密度值 λ 。这里窗口宽度是关键因素:过小可能导致窗口内无结构面,过大则无法保证结构面均匀分布,失去统计意义。该方法适用于空间连续且数据分布均匀的区域,数据采集通常依赖遥感、GIS 或实地测量,合理选择窗口移动步长影响均质区划分精度。

$$\lambda = n_w / w \quad (1)$$

式中: n_w ——单位窗口内裂隙数量; w ——单位窗口宽度。

1.2 产状分区法(卡方检验法)

针对以产状为依据的均质区划分方法, Miller^[7]的方法是最普遍的一种方法,即将概率论中的列联表和施密特等面积投影网结合,利用卡方检验分析相关性来划分岩体结构均质区。

卡方检验是一种常用的非参数检验方法,用于计数资料的假设检验。其步骤如下:(1)裂隙数据按特征分组,记录各区间的裂隙数量(观测频数);(2)假设裂隙数据服从某种理论分布(如均匀、泊松、正态分布),计算期望频数;(3)建立对比样本列联表(表1),计算卡方值(式2);(4)确定自由度 n (式3)和显著性水平 α (通常取 0.05),查找卡方分布表得到临界值;(5)比较卡方值与临界值,若卡方值大于临界值,两样本无统计相似性,反之则有相似性。该方法适用于数据取值有限的变量区间,数据采集依赖统计调查或分类观测,结果精确度取决于样本量、分类合理性及显著性水平 α 的选择。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^r (F_{ij} - f_{ij})^2 / f_{ij} \quad (2)$$

表1 两样本列联表卡方检验
Table 1 Chi-square test of two-sample contingency table

样本	属性				
	1	2	r
1	$F_{11}(f_{11})$	$F_{12}(f_{12})$	$F_{1r}(f_{1r})$
2	$F_{21}(f_{21})$	$F_{22}(f_{22})$	$F_{2r}(f_{2r})$

$$n = (\text{行数} - 1) \times (\text{列数} - 1) \quad (3)$$

式中： χ^2 ——两样本之间的卡方计算值； i ——样本编号 ($i=1, 2$)； r ——样本属性个数，即列联表中的列数； F_{ij} ——样本 i 在属性 j ($j=1, 2, \dots, r$) 上的实际

$$\gamma = \frac{\left[\sum_{i=1}^n X_i Y_i / n - \left(\sum_{i=1}^n X_i / n \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i / n \right) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n X_i Y_i / n - \left(\sum_{i=1}^n X_i / n \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n X_i Y_i / n - \left(\sum_{i=1}^n Y_i / n \right)^2 \right]}} \quad (4)$$

式中： n ——删除观测频率均为0的块后对应列数； X_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)——第一个观测频率； Y_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)——第二个观测频率。

由相关性系数的定义可知，相关系数 γ 值的范围在 -1 和 $+1$ 之间。当 $|\gamma| \geq 0.5$ 时表示两个变量间基本一致；当 $0.3 \leq |\gamma| < 0.5$ 时表示两个变量间中度相关，说明两区间的结构分布相关不太紧密；当 $0.1 \leq |\gamma| < 0.3$ 时表示两个变量间低度相关，说明两区间的结构分布基本无关；当 $|\gamma| < 0.1$ 时表示两变量间毫无关联，说明两区间的结构分布完全无关。

2 工程实例

2.1 工程概况

狮子山隧道是香港最早的行车隧道(图1),连接沙田区与九龙,是九龙与新界东部的重要通道。隧道南北线长约1.4 km,地形起伏较小。为延长隧道使用期并缓解交通拥堵,香港路政署拟进行修复工程,要求施工期间隧道保持正常通行。由于隧道探测范围岩体结构变化频繁且地下水分布不均,故在沙田区和九龙狮子山隧道分别布设水平钻孔HDC01和HDC02。HDC01揭露地层为微风化、中风化花岗岩及少量辉绿岩,HDC02揭露地层为微风化、中风化花岗岩。其中,HDC01钻孔以 $\varnothing 95$ mm钻头开孔,钻至25.50 m后换 $\varnothing 75$ mm钻头沿设计轨迹定向钻进至948.04 m终孔,平均岩心采取率97.2%;HDC2钻孔以 $\varnothing 75$ mm钻头水平定向钻进至553.50 m,实现与HDC01孔隧道轴线重叠勘察。本文通过测定岩体纵波波速,获取岩石力学参数,

频数; f_{ij} ——样本 i 在属性 j ($j=1, 2, \dots, r$) 上的理论频数。

1.3 相关系数分区法

相关系数法反映了两变量之间相互关系的密切程度^[19],首先对2个待比样本根据某一特征计算相关系数 γ (式4),若 $|\gamma| \geq 0.5$,则说明两对比样本关联紧密,在统计上是一致的,故可以将这2个样本划分为同一个均质区。该方法适用于连续型变量且线性相关的区域划分,数据采集通常基于实测数据或空间插值,结果精确度取决于变量间的相关性强度、数据质量及阈值设定的合理性。

进行围岩分级,并结合孔内电视录像和压水试验综合分析,依据结构面几何参数划分岩体均质区,为隧道改造工程地质评价提供依据。

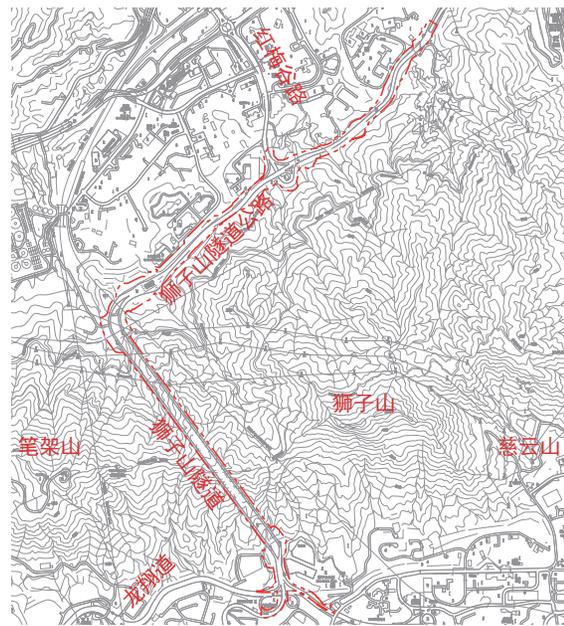


图1 狮子山隧道平面图
Fig.1 Lion Rock Tunnel planar graph

2.2 数据采集

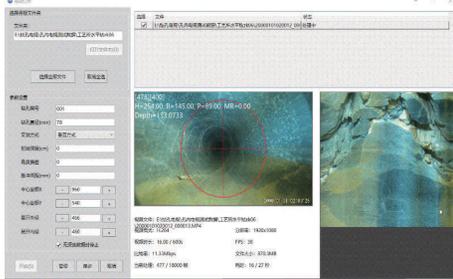
2.2.1 钻孔电视测试

测试采用中国地质科学院探矿工艺研究所研发的HR-BTV(I)型无缆存储式全方位钻孔电视设备^[20](图2a),该设备由测量探管、深度记录器和深度计数轮组成,具有高精度和可靠性。其软件功能包括钻孔视频图像采集与分析、电子岩心生成、地

层裂隙解析等(图2b)。测试前需用清水清洗孔壁以确保图像清晰。由于探头直径较小,测试时需加装居中环以保护镜头并确保居中摄像,同时控制下钻速度为1.5 m/min,保持匀速稳定,孔深通过钻杆标定。多次的洗井工作后对钻孔电视最终测得的成果进行结构面解译(图2c)。



(a) 钻孔电视设备



(b) 结构面解译软件



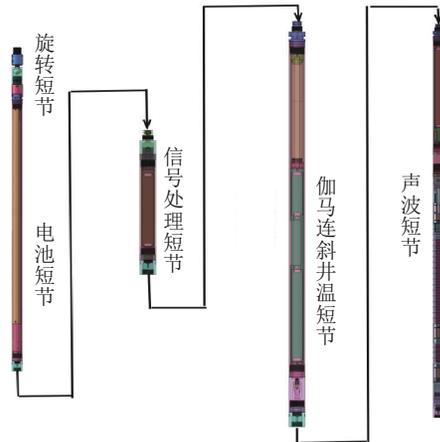
(c) 钻孔结构面解译结果

图2 钻孔电视设备及钻孔结构面二维展开图

Fig.2 Borehole television equipment and 2D unfolded diagram of the borehole wall

2.2.2 声波综合测试

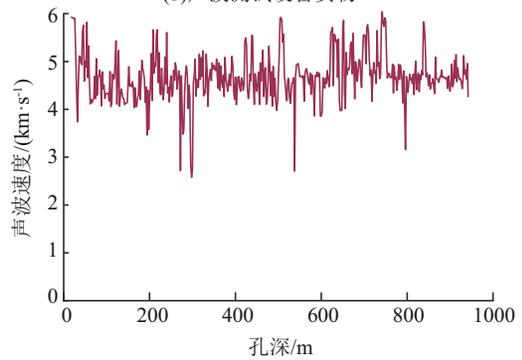
采用的声波测试设备^[20](图3a、图3b)由声波短节、伽马井温短节、信号处理短节和电池短节组成,全长6 m。孔内测试采用水力投送方式自下而上进行,通过处理软件自动分析数据,从而获取HDC01全孔岩体弹性纵波波速(图3c)。



(a) 声波测试设备连接示意



(b) 声波测试设备实物



(c) 全孔声波测试曲线

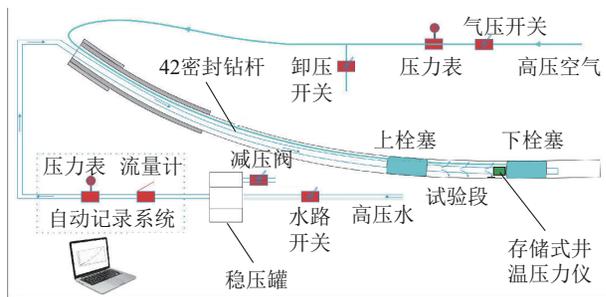
图3 声波测试设备及全孔声波曲线

Fig.3 Acoustic wave testing equipment and full-borehole acoustic wave curve

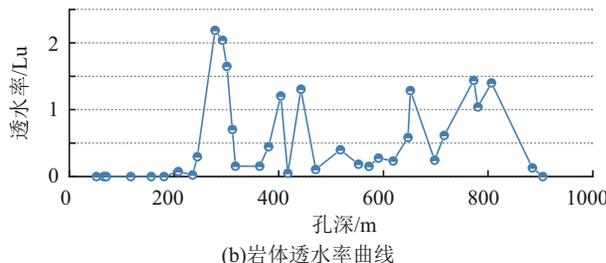
2.2.3 压水试验

压水试验通过双栓塞隔离钻孔测试段,压入水并测量水量与压力关系,确定岩体透水性。压水试验设备(图4a)包括井下系统(双塞、存储井温压力仪)和井上系统(高压空气输入与控制、数据量测与记录、压缩机及电脑)。根据压水试验得出的第三阶段数据(段长5 m)可计算出透水率^[21]。根据图4(b)可知,研究区的岩体透水率整体较低,为0~

2.19 Lu,属极微透水—微透水范围,其中 230~300 m、770~800 m 的透水率相对较大,属于微透水—高段,裂隙初步形成,长期水压作用下可能使渗透性增强;380~450 m、650~670 m 的透水率属于微透水—低段,轻微裂隙发育,隧道开挖渗水量极小。



(a) 压水试验设备



(b) 岩体透水率曲线

图 4 压水试验设备及岩体透水率曲线

Fig.4 Water pressure equipment and test result

3 钻孔岩体特征分析

3.1 裂隙数据统计

通过钻孔电视全孔壁成像和录像,可以观测断层裂隙产状及发育情况,分析裂隙几何特征。据统计,钻孔共有 2249 条裂隙(图 5a)。根据节理玫瑰花图可以掌握裂隙的大致走向方位(图 5b);绘制的极点等密度图可精确读出优势结构面产状数据,并可以掌握裂隙产状的基本分布情况(图 5c);将得出的优势结构面产状数据用赤平投影图来表示其空间组合关系,岩体有 2 组优势裂隙,其产状分别为:85°∠78°、(185°~205°)∠(70°~75°)(图 5d)。

在隧道施工中,根据优势结构面的产状可以提前调整施工工艺和支护参数,帮助优化隧道的施工顺序,避免因施工扰动导致结构面失稳。

3.2 岩体结构均质区划分

3.2.1 裂隙线密度分区

为了保证窗口内裂隙数量具有足够代表性,设计 4 种方式,设置窗口宽度为 30、50 m,采样步长为 10、20 m。编写 Matlab 程序并对上述 4 种方式进行

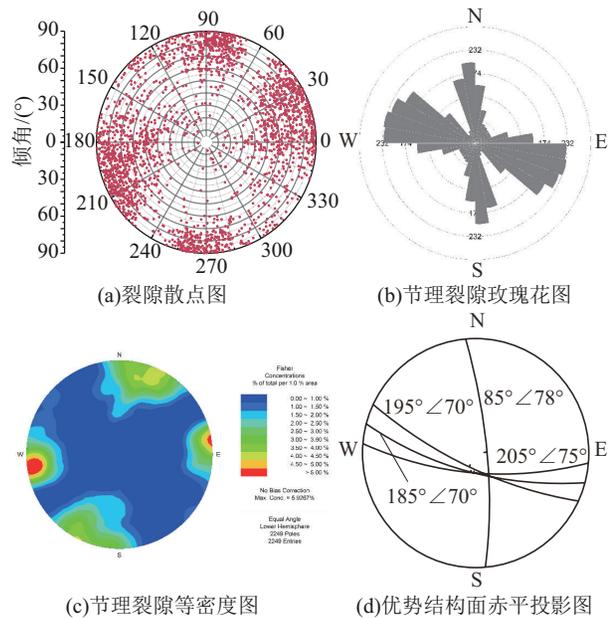


图 5 裂隙数据统计

Fig.5 Statistical diagram of fracture data

计算,其线密度计算结果如图 6 所示。由图可得, HDC01 钻孔有 4 个均质区:(100~300 m)、(350~500 m)、(550~700 m)及(750~950 m)。

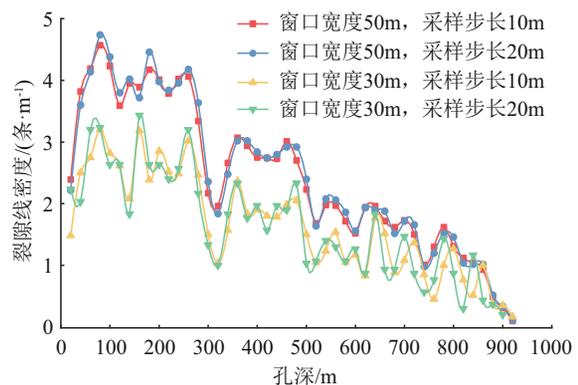


图 6 密度分区法

Fig.6 Density zoning method

3.2.2 产状分区法(卡方检验)

将裂隙数据按裂隙倾角分为 4 组。为保证每个区段的结构面数量,取孔深间隔为 50 m,建立 18 个对比样本,并统计其裂隙分布的实际频数。某一区间结构面的理论频数为两个深度区间在同一产状区间上实际频数的均值。建立列联表,根据卡方检验公式计算样本(0~50 m)和(50~100 m)范围内的裂隙倾角的卡方值为 44.16,自由度为 3,显著水平取 0.05,查卡方分布表可得临界卡方值为 7.81。该

样本卡方值大于临界卡方值,故2样本深度内裂隙不具有统计相似性,(0~100 m)为非均质区。计算结果见表2。

表2 相邻样本卡方检验结果

Table 2 Chi-square test results of adjacent samples

对比样本/m	<i>n</i>	α	临界卡方值	卡方值	是否为均质区
(0,50)和(50,100)	3	0.05	7.81	44.16	否
(50,100)和(100,150)	3	0.05	7.81	6.52	是
(100,150)和(150,200)	3	0.05	7.81	3.16	是
(150,200)和(200,250)	3	0.05	7.81	11.92	否
(200,250)和(250,300)	3	0.05	7.81	7.56	是
(250,300)和(300,350)	3	0.05	7.81	40.72	否
(300,350)和(350,400)	3	0.05	7.81	34.94	否
(350,400)和(400,450)	3	0.05	7.81	5.82	是
(400,450)和(450,500)	3	0.05	7.81	2.96	是
(450,500)和(500,550)	3	0.05	7.81	25.82	否
(500,550)和(550,600)	3	0.05	7.81	5.04	是
(550,600)和(600,650)	3	0.05	7.81	4.8	是
(600,650)和(650,700)	3	0.05	7.81	12.06	否
(650,700)和(700,750)	3	0.05	7.81	8.52	否
(700,750)和(750,800)	3	0.05	7.81	1.76	是
(750,800)和(800,850)	3	0.05	7.81	3.36	是
(800,850)和(850,950)	3	0.05	7.81	2.7	是

3.2.3 相关系数法

为了使每个方法的样本区间一致,同样按钻孔深度间隔50 m划分18个待对比样本。以岩体透水率为参数,分别统计裂隙透水率在0~0.2、0.2~0.5、0.5~1、1~1.4、>1.4 Lu这5个区间内数量,使用Matlab编写相关系数计算公式,计算得出相邻两区间裂隙实际频数的相关系数,| γ | \geq 0.5则表明其高度相关,划分为同一均质区,结果见表3。

3.2.4 综合划分结果

综合以上3种分区方法,利用数学交集原理,仅保留三种方法一致认可的均质区,确保分区结果在密度、产状、参数相关性三个维度上均成立,可把钻孔划分为13个均质区(图7)。

3.3 围岩分级

根据声波测得的纵波波速,计算岩体完整性系数。使用《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)^[22]给出的方法计算岩体基本质量指标*BQ*,其修正值[*BQ*]考虑了地下水和主要软弱结构面因素

表3 各样本透水率分布及相关系数

Table 3 The permeability rate distribution of each sample and the correlation coefficient

对比样本/m	透水率/Lu					γ
	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1	1~1.4	>1.4	
(0,50)	1	0	0	0	0	1
(50,100)	2	0	0	0	0	
(50,100)	2	0	0	0	0	1
(100,150)	1	0	0	0	0	
(100,150)	1	0	0	0	0	1
(150,200)	2	0	0	0	0	
(150,200)	2	0	0	0	0	0.875
(200,250)	2	1	0	0	0	-0.375
(250,300)	0	0	0	0	3	
(250,300)	0	0	0	0	3	-0.4082
(300,350)	1	0	1	0	0	
(300,350)	1	0	1	0	0	0.1667
(350,400)	1	1	0	0	0	
(350,400)	1	1	0	0	0	0.6667
(400,450)	1	1	0	1	0	
(400,450)	1	0	0	2	0	0.25
(450,500)	1	0	0	0	0	
(450,500)	1	0	0	0	0	1
(500,550)	1	0	0	0	0	
(500,550)	0	1	0	0	0	0.875
(550,600)	1	2	0	0	0	
(550,600)	2	1	0	0	0	-0.1021
(600,650)	0	1	1	0	0	
(600,650)	0	1	1	0	0	0.1667
(650,700)	0	1	0	1	0	
(650,700)	0	1	0	1	0	-0.4082
(700,750)	0	0	1	0	0	
(700,750)	0	0	1	0	0	-0.4082
(750,800)	0	0	0	1	1	
(750,800)	0	0	0	1	1	0.6124
(800,850)	0	0	0	0	1	
(800,850)	0	0	0	0	1	0.6124
(850,950)	1	0	0	0	1	

的影响(由于钻孔埋深较低不存在高应力情况)。

由表4可见,0~50 m和650~750 m围岩等级为Ⅱ级,其余为Ⅲ级,共分为4个深度区域。而上述岩体均质区的划分范围相较围岩分级结果更加细致,避免了整体评价带来的误差,可以更加精确地

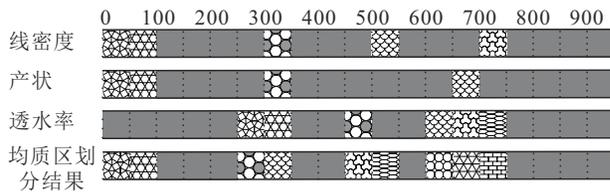


图7 岩体均质区划分结果

Fig.7 Results of the division of homogeneous areas

反映局部岩体的真实特性。

表4 围岩分级

Table 4 Classification of surrounding rock

序号	深度/m		K_v	R_c / MPa	BQ	k_1	k_2	[BQ]	围岩 分级
	自	至							
1	0	50	0.6775	90.975	532	0	0.7	462	II
2	50	100	0.5684	81.156	476	0	0.5	426	III
3	100	150	0.5308	77.772	456	0.1	0.25	421	III
4	150	200	0.5272	77.448	454	0.1	0.3	414	III
5	200	250	0.6092	84.828	497	0.1	0.6	427	III
6	250	300	0.4988	74.892	439	0.1	0.35	394	III
7	300	350	0.5756	81.804	479	0.1	0.5	419	III
8	350	400	0.5876	82.884	486	0.1	0.7	406	III
9	400	450	0.5948	83.532	489	0.1	0.6	419	III
10	450	500	0.5592	80.328	471	0.1	0.6	401	III
11	500	550	0.62	85.8	502	0.1	0.8	412	III
12	550	600	0.5684	81.156	476	0.1	0.8	386	III
13	600	650	0.618	85.62	501	0.1	0.7	421	III
14	650	700	0.6684	90.156	528	0.1	0.5	468	II
15	700	750	0.7332	95.988	561	0.1	0.6	491	II
16	750	800	0.5872	82.848	485	0.1	0.5	425	III
17	800	850	0.6096	84.864	497	0.1	0.4	447	III
18	850	948.04	0.5828	82.452	483	0.1	0.4	433	III

4 结论与建议

(1) 本文基于香港狮子山 HDC01 水平定向钻孔, 针对孔内电视、声波测试和压水试验测试方法取得的数据, 提出了一种综合多种途径(裂隙线密度分区、产状分区法、相关系数法)的系统性均质区划分方法, 并经过验证得到具有高度一致的划分结果。均质区划分和围岩分级在隧道精细化勘察中起到相辅相成的效果, 可避免“一刀切”设计带来的成本浪费或安全隐患。

(2) 在隧道工程勘察过程中要针对具体工程选择最具影响力的参数作为划分依据, 特别是在复杂

地质条件下, 需结合物探、钻探等多源数据交叉验证。

(3) 均质区划分和围岩分级在隧道工程中具有重要意义, 但现有方法在隧道工程中面临三方面核心挑战: 现有数据获取方法存在局限; 多源数据的融合缺乏统一标准, 影响划分结果一致性; 静态划分模型难以及时响应施工揭露的地质变异。针对这些问题, 未来研究应聚焦以下三方面: 开发泥浆环境适用的超声成像等新型测试技术, 突破数据获取环境限制; 建立基于机器学习的多参数加权融合算法, 优化均质区边界判定准则; 构建动态更新机制, 实现划分结果随施工进展的实时校准。这些改进将直接提升均质区划分的工程适用性。

参考文献 (References):

- [1] 聂维岭. 水平定向钻技术在岩土工程勘察中的应用[J]. 工程建设与设计, 2024(17):199-201.
NIE Weiling. Application of horizontal directional drilling technology in geotechnical engineering investigation [J]. Construction & Design for Project, 2024(17):199-201.
- [2] 房勇, 钱锋, 周策, 等. 水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(1):97-105.
FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):97-105.
- [3] 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(中英文), 2021, 41(6):972-978.
MA Baosong, CHENG Yong, LIU Jiguo, et al. Tunnel accurate geological investigation using long-distance horizontal directional drilling technology [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6):972-978.
- [4] 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. Application 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.
- [5] 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.
- [6] 魏翔, 杨春和, 刘鹏君, 等. 钻孔裂隙岩体结构均质区划分方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11):2101-2106.
WEI Xiang, YANG Chunhe, LIU Pengjun, et al. Zoning method for structural homogeneity of drilling fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11):2101-2106.

- [7] Miller S M. A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1983, 15(2): 317-328.
- [8] Martin M W, Tannant D D, et al. A technique for identifying structural domain boundaries at the EKATI diamond mine [J]. *Engineering Geology*, 2004, 74(3/4): 247-264.
- [9] Song S Y, Wang Q, Chen J P, et al. Demarcation of homogeneous structural domains within a rock mass based on joint orientation and trace length [J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 80: 16-24.
- [10] Chen Q F, Yin T C. Integration of homogeneous structural region identification and rock mass quality classification [J]. *R Soc Open Sci*, 2019, 6(1): 181353.
- [11] 范留明, 黄润秋, 丁秀美. 一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1132-1136.
FAN Liuming, HUANG Runqiu, DING Xiumei. Analysis on structural homogeneity of rock mass based on discontinuity density [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1132-1136.
- [12] 高敬, 杨春和, 王贵宾. 甘肃北山岩体结构均质区划分方法的探讨 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 588-592, 598.
GAO Jing, YANG Chunhe, WANG Guibin. Discussion on zoning method of structural homogeneity of rock mass in beishan of Gansu province [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 588-592, 598.
- [13] 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.
- [14] 李明, 李广杰, 张文, 等. 基于卡方检验法对长白山龙门峰裂隙岩体统计均质区划分 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 449-453.
LI Ming, LI Guangjie, ZHANG Wen, et al. Application of Chi-square method in statistical homogeneity zoning of fractured rock mass in longmen peak, Changbai mountain [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(2): 449-453.
- [15] 杨勇, 姜桂春, 孙伟. 裂隙岩体透水性与其完整性指数及BQ值的关系初探 [J]. *工程勘察*, 2012, 40(1): 35-38.
YANG Yong, JIANG Guichun, SUN Wei. Preliminary discussion on the relationship of permeability rate of fractured rock and its intactness index and BQ value [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(1): 35-38.
- [16] 董育烦, 孟永旭, 巴刚, 等. 利用钻孔声波测井确定薄层状岩体RQD分级指标 [C]//2015水利水电地基与基础工程—中国水利学会地基与基础工程专业委员会第13次全国学术研讨会论文集. 成都: 中国水利学会地基与基础工程专业委员会, 2015: 80-83.
- DONG Yufan, MENG Yongxu, BA Gang, et al. Determining the RQD classification index of the thin-layered rock mass by using borehole acoustic logging [C]//Proceedings of the 13th National Academic Symposium of the Professional Committee of Foundation and Foundation Engineering of the China Water Conservancy Association on Foundation and Foundation Engineering of Water Resources and Hydropower Projects in 2015. Chendu: Foundation and Foundation Engineering Professional Committee of China Water Conservancy Society, 2015: 80-83.
- [17] 李露露, 李牧阳, 周志超, 等. 基于统计均质区方法的裂隙几何及渗流特性评价 [J]. *地质科技通报*, 2023, 42(4): 288-298.
LI Lulu, LI Muyang, ZHOU Zhichao, et al. Assessment of fractures geometries and seepage characteristics based on statistical homogeneous zone method [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(4): 288-298.
- [18] 孙刚, 朱泳, 赵敏, 等. 基于水平钻探的地形变观测平洞勘察方法研究 [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.
- [19] 宋盛渊, 王清, 陈剑平, 等. 一种基于裂隙间距的岩体结构统计均质区划分方法 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015(8): 1188-1192.
SONG Shengyuan, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. A method of identifying structural homogeneity of rock mass based on fracture spacing [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015(8): 1188-1192.
- [20] 杨栋, 王军朝, 李勇, 等. 基于钻孔电视图像提取结构面特征的方法及装置和介质: CN202210875339.0 [P]. 2022-07-21.
Yang Dong, Wang Junchao, Li Yong, et al. Method, device and medium for extracting the characteristics of structural planes based on the borehole TV image: CN202210875339.0 [P]. 2022-07-21.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钻孔压水试验规程: SL31-2003 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water pressure test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL31-2003 [S]. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218-2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

(编辑 王跃伟)