

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.07.011

基于掌子面结构量化的公路隧道围岩分级方法

柳厚祥¹, 查焕奕¹, 钱程¹, 王真¹, 蒋武军²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省永吉高速公路建设开发有限公司, 湖南 吉首 416000)

摘要:公路隧道围岩级别的划分是指导隧道设计、施工及地下工程岩体稳定性评价和安全风险控制的重要依据, 目前在设计 and 施工中对隧道围岩级别的判定方法具有较多的经验性因素, 且在实际隧道工程中各级围岩的稳定性情况极为复杂, 即使是同一级别的围岩, 隧道稳定性也不尽相同。为了实现施工阶段围岩分级的可操作性与准确性, 通过研究在公路隧道开挖时采集的隧道掌子面图像, 利用 MATLAB 编程建立了照相测量围岩分级系统。根据岩体块度指标 *RBI* 的概念, 向隧道轮廓线依次布设 19 条虚拟测线, 以掌子面径向 19 个方位的 *RBI* 值综合评价了掌子面岩体结构的差异性。考虑结构面分布特征, 结合掌子面节理玫瑰花图获取岩体结构综合量化指标 *Z-RBI*, 对掌子面进行了综合评价, 得出了 *Z-RBI* 与岩体结构类型对应关系。综合考虑岩体坚硬程度、*Z-RBI*、地下水条件、初始地应力状态等主要分级指标, 利用层次分析法, 提出了隧道围岩 BT 分级方法及评价标准。实际工程应用表明: 与传统的 BQ 法相比, BT 分级方法获取的围岩等级更符合开挖后掌子面围岩的实际等级, 且各等级可靠指标的延续性可对隧道施工过程中地质属性的变化情况进行定量表征, 有助于工程地质人员据此对围岩质量的渐变过程进行动态评估。

关键词:隧道工程; 掌子面图像; 岩体块度指标; 虚拟测线; *Z-RBI*; BT 分级方法

中图分类号: U451+2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 07-0090-08

A Method for Classifying Surrounding Rock of Highway Tunnel Based on Quantization of Tunnel Face Structure

LIU Hou-xiang¹, ZHA Huan-yi¹, QIAN Cheng¹, WANG Zhen¹, JIANG Wu-jun²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China;

2. Hunan Yongzhou-Jishou Expressway Construction and Development Co., Ltd., Jishou Hunan 416000, China)

Abstract: The classification of surrounding rock grades of highway tunnels is an important basis for guiding tunnel design, construction and underground rock mass stability evaluation and safety risk control. At present, there are many empirical factors in the design and construction of tunnel surrounding rock grade determination methods, and the stability of the surrounding rock at all grades is extremely complicated in the actual tunnel engineering. Even for the surrounding rock of the same grade, the stability of the tunnel is not the same. In order to realize the operability and the accuracy of surrounding rock classification in the construction stage, by studying the images of tunnel face collected during excavation of highway tunnel, the surrounding rock photographic classification system is established by MATLAB programming. According to the concept of rock block index (*RBI*), 19 virtual measuring lines are arranged in turn to the tunnel contour line, and the difference of the rock mass structure of the excavation face is evaluated synthetically by the *RBI* values of 19 radial azimuths. Considering the distribution characteristics of structural planes and the rose diagram of joint of the excavation face, the comprehensive quantitative index of rock mass structure (*Z-RBI*)

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 湖南省交通运输厅科技创新项目 (201331); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性基金项目 (17ZDXK01)

作者简介: 柳厚祥 (1965-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授. (liuhoux1@163.com)

is obtained to comprehensive evaluate the excavation face, and the corresponding relationship between $Z-RBI$ and rock structure type is obtained. Comprehensively considering the main classification indicators such as hardening degree of rock mass, $Z-RBI$, groundwater condition and initial geostress state, the BT classification method and the evaluation criterion of tunnel surrounding rock is put forward by using AHP. The engineering application shows that compared with the traditional BQ method, the surrounding rock grades obtained by the BT classification method is more in line with the actual surrounding rock grade of excavation face, and the continuity of the reliability indicators of each grade can quantitatively characterize the changes of geological properties during tunnel construction, which helps the engineering geologists to dynamically evaluate the gradual changing process of surrounding rock quality.

Key words: Tunnel engineering; image of tunnel face; rock fragmentation index (RBI); virtual line; $Z-RBI$; BT classification method

0 引言

隧道围岩分级是评价隧道围岩稳定性、确定隧道施工与隧道支护方式的重要依据^[1]。在工程实际中,由于勘测期间受到各种条件的制约,造成勘测结果不能完全准确反映隧道穿越岩层的实际地质情况^[2],出现隧道开挖时围岩等级与勘测时给定的围岩等级不符,加之在隧道施工过程中,可能出现溶洞、涌泥、塌方等不良情况,需要对隧道围岩进行即时分级,以便及时调整隧道施工方式和支护方式^[3-4],减小安全隐患。在现行的公路隧道围岩分级方法中,各影响指标的获取往往受多种因素影响,花费时间较长,并不能满足隧道施工进度要求^[5-6]。

照相测量隧道围岩分级系统是基于对隧道掌子面图像识别分析,以获取隧道掌子面岩体结构的综合量化指标,进而采用 BT 分级方法对隧道掌子面岩体进行即时分级的隧道围岩分级系统。该系统通过 MATLAB 软件的编译,对掌子面图像进行识别分析生成掌子面表面的立体模型,再布设虚拟侧线实现对掌子面结构综合量化,最后结合掌子面岩体单轴抗压强度、地下水条件、初始地应力实现对掌子面岩体的分级。

1 照相测量的围岩分级系统的建立

1.1 掌子面图像的采集

由于隧道中环境差、光线暗,获取图像难度大^[7],因此在获取掌子面图像时,需要借助一些照明设施和分辨率清晰的相机作为获取掌子面的工具。在图像采集过程中,除了排除隧道中粉尘因素和人为干扰外,还应注意摄影位置和方向对图像的影响,以保证拍摄的掌子面图像的质量。

对于开挖方式不同的隧道,其数据采集的方式也不尽相同。如图 1 所示,在分步开挖过程中,按照开

挖顺序对区域 1~4 分别进行数据采集。而在全断面开挖过程中,将数码相机放置在隧道中线上,并保持摄影方向与掌子面垂直,然后再进行数据采集。

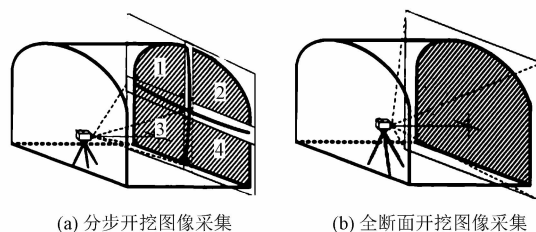


图 1 图像采集方法

Fig. 1 Image acquisition method

1.2 照相测量隧道围岩分级系统的建立

为实现在隧道工程施工过程中快速准确地对隧道进行围岩分级,达到对隧道开挖过程中围岩分级的即时性,利用现场拍摄的掌子面图像,基于 MATLAB 软件的强大功能,通过对掌子面图像的识别分析,开发了基于照相测量的围岩分级系统。该系统首先利用 MATLAB 软件对在隧道开挖过程中拍摄的掌子面图像进行图像的增强、比例转换、裁剪、二值化等一系列的预处理后,生成掌子面表面的立体模型,并对结构面进行识别;其次利用窗口测线法,实现对掌子面结构的综合量化和掌子面岩体结构的空间分析,并建立掌子面岩体结构综合量化标准;然后,利用实测岩体点荷载强度指数 $I_{a(50)}$ 获取掌子面岩体的抗压强度,并结合地下水条件、初始地应力实现对掌子面岩体的分级。最后,利用 MATLAB 软件开发出隧道围岩分级系统,系统开发的具体流程见图 2。

2 隧道掌子面岩体结构综合量化指标

2.1 岩体块度指标 RBI 的获取

目前,在围岩分级体系中,多以岩体质量评价

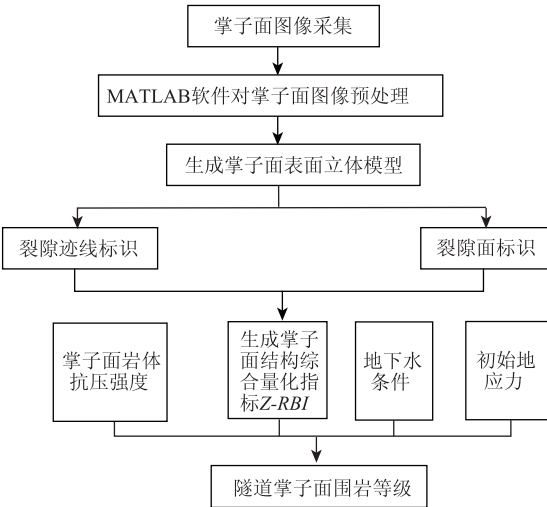


图 2 照相测量隧道围岩分级系统流程

Fig. 2 Flowchart of photographic measurement of tunnel surrounding rock classification system

指标 RQD ^[8-9] 及其改进指标作为岩体结构量化指标。但对岩体质量指标, 钻孔试验耗资大, 获取困难^[10], 并不能快速准确全面反映岩体的质量。胡卸文等^[11] 提出了岩体块度指标 RBI 并将其引入岩体质量分级中^[12-15]。 RBI 的定义为: 采用超前平硐或钻孔的形式获取岩芯, 完整岩芯长度分别为 3 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm 及 > 100 cm 的 5 级岩芯长度获得率的加权平均值^[16], 其表达式为: $RBI = 3C_{r3} + 10C_{r10} + 30C_{r30} + 50C_{r50} + 100C_{r100}$, (1) 式中, C_{r3} , C_{r10} , C_{r30} , C_{r50} , C_{r100} 分别为岩芯长度为 3 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm 及 > 100 cm 的 5 级岩芯长度获得率。

本研究借鉴岩体块度指标 RBI 的概念, 通过布置虚拟测线, 考虑结构面分布特征, 按照 3 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm 及 > 100 cm 这 5 个区间, 计算虚拟测线与结构面迹线交切形成的虚拟测线段的取样频率, 以获取 RBI 。若切割的虚拟测线段小于 3 cm, RBI 取 0; 若虚拟测线段大于 100 cm, RBI 取 100。且 RBI 与岩体结构成正相关, 与岩体结构类型具备对应关系, 如表 1 所示。

表 1 RBI 与岩体结构类型对应关系^[16]

Tab. 1 Correspondence between RBI and rock structure type		
岩体结构类型	RBI	完整性
整体结构、巨厚状结构	50 ~ 100	完整
块状结构、厚状结构	30 ~ 50	较完整
次块状、中厚状、镶嵌碎裂结构	3 ~ 30	较破碎
破裂结构、薄层状结构	1 ~ 3	破碎
散体结构	< 1	极破碎

2.2 岩体结构综合量化指标

为实现岩体结构特征的横向空间特性, 依据掌子面径向岩体结构量化方法, 以掌子面与隧道底板交线的中点为圆心, 以 10° 为虚拟测线的取值间隔 (因为间隔过大会造成误差过大, 而间隔太小会造成计算量增大, 因此 10° 的取值间隔比较适中), 通过圆心向隧道轮廓线依次布设 19 条虚拟测线, 如图 3 所示, 以掌子面径向 19 个方位的 RBI 值综合评价掌子面岩体结构的差异性。为直观显示各虚拟测线的岩体结构空间差异性, 以测线方位为自变量, 各测线方向 RBI 值为因变量, 采用极坐标的方式, 建立掌子面径向岩体结构 RBI 值的玫瑰花图。为实现掌子面岩体结构的综合量化标准, 采用式 (2) 计算掌子面岩体结构综合量化指标 $Z-RBI$:

$$Z-RBI = \frac{\sum S_i}{\pi R^2}, \tag{2}$$

式中, 半径 $R = 100$; S_i 为单元 i 的面积, 共 18 个计算单元, 因此 $Z-RBI$ 取值范围为 $[0, 1]$ 。

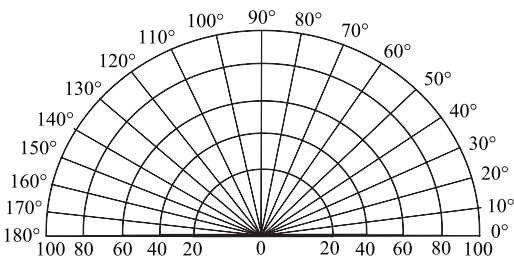


图 3 掌子面侧线布设图

Fig. 3 tunnel face side of the line layout

为方便计算, 以每个单元两虚拟侧线 RBI 的平均值为半径, 绘制扇形区域作为该单元的等效面积, 以该等效面积值量化该单元岩体结构特征, 再以 18 个单元等效面积之和量化掌子面 $Z-RBI$ 玫瑰花面积, 进而与半径 100 的半圆面积比较, 获取 $Z-RBI$ 。 $Z-RBI$ 值与岩体结构特征成正相关关系, 依据表 1 中 RBI 与岩体结构类型的对应关系, 得到 $Z-RBI$ 与岩体结构类型对应关系, 如表 2 所示。

表 2 $Z-RBI$ 与岩体结构类型对应关系^[16]

Tab. 2 Correspondence between $Z-RBI$ and rock structure type		
岩体结构类型	$Z-RBI$	完整性
整体状结构、巨厚状结构	0.25 ~ 1	完整
块状结构、厚状结构	0.09 ~ 0.25	较完整
次块状结构、中厚状结构、镶嵌结构	0.009 ~ 0.09	较破碎
破裂结构、薄层状结构	0.001 ~ 0.009	破碎
散体结构	< 0.001	极破碎

3 BT 分级方法的建立

BT 分级方法是以隧道掌子面岩体结构综合量化指标为基础，以岩体坚硬程度、岩体结构综合量化指标、地下水条件、初始地应力状态为重要指标的一种适用于现场适时快速分级的隧道围岩分级方法。该方法以隧道掌子面图像为依据，按照一定的评分标准对上述 4 个指标进行取值。综合计算出隧道掌子面围岩的总分值，对照有关标准进行围岩等级的判定。

3.1 BT 分级指标的确定

目前，现有的围岩分级方法中多以岩体坚硬程度、岩体完整性程度、地下水状态、结构面状态和初始地应力状态为隧道围岩分级主要指标。表 2 中的掌子面岩体结构综合量化指标 $Z-RBI$ 能很好地反映出岩体的完整性和结构面状态，故在 BT 分级方法中利用 $Z-RBI$ 代替岩体的完整性和结构面状态，从而形成以岩体坚硬程度、岩体结构综合量化指标、地下水条件、初始地应力状态等为代表的分级指标。

3.2 BT 分级方法各指标的评分值计算

3.2.1 各分级指标权重的计算

层次分析法^[17-18]能够把多目标、多准则又难以全部量化处理的决策问题转化为多层次单目标问题。通过两两比较确定同一层次元素相对上一层次元素的数量关系，最后进行简单的数学运算，可以清晰准确地反映各元素对目标的影响程度。为合理反映岩体坚硬程度、岩体结构综合量化指标、地下水条件、初始地应力状态等分级指标对围岩分级的影响程度，利用层次分析法（AHP 法）确定隧道掌子面围岩分级各指标的权重分配。首先，建立围岩分级指标的层次分析模型，如图 4 所示，其中 A 代表目标层， B_i 代表指标层。然后，参照岩体质量评价体系 RMR（Rock Mass Rating）分类方法中个指标的评分值大小，对上述 4 种指标的重要程度进行比较，构建判断矩阵，其中以岩体的完整性和结构面状态评分之和作为岩体结构综合量化指标 $Z-RBI$ 重要性

的评价标准。计算出各影响因素的矩阵最大特征根 $\lambda_{\max} = 4$ ，一致性指标 $CI = 0$ ，一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} = 0 \leq 0.1$ （ RI 为随机一致性指标）。说明计算结果具有满意一致性。最终计算出各影响因素指标权重 W 的分配，如表 3 所示。

表 3 BT 法各指标的权重分配表

Tab. 3 Weight distribution of indicators by BT method						
A	B_1	B_2	B_3	B_4	W	$\lambda_{\max} = 4$
B_1	1	4/3	8/3	8/3	0.40	$CI = 0$
B_2	3/4	1	2	2	0.30	$CR \leq 0.1$
B_3	3/8	1/2	1	1	0.15	具有满意
B_4	3/8	1/2	1	1	0.15	一致性

3.2.2 各项指标分值确定

根据已确定的各影响因数指标的优劣程度，对指标进行等级划分并确定其评分值，其中对隧道掌子面围岩越有利评分越高，最优取 1 分，最差为 0 分。岩体单轴抗压强度和岩体结构量化指标两项指标易于定量表示，地下水条件和初始地应力状态两项指标不易定量表示，需定性划分后再定量化。表 4 为隧道掌子面围岩分级各指标取值。

表 4 隧道掌子面围岩分级各指标取值

Tab. 4 Indicator values for classification of surrounding rock of tunnel face							
岩石单轴 抗压强度 (B_1) /MPa	评分 值	$Z-RBI$ (B_2)	评分值	地下水 条件 (B_3)	评分 值	初始地 应力状 态 (B_4)	评分 值
>60	1	0.25 ~ 1	0.25 ~ 1	干燥	1	低应力	1
60 ~ 30	0.7	0.09 ~ 0.25	0.09 ~ 0.25	潮湿	0.7	一般应力	0.6
30 ~ 15	0.4	0.01 ~ 0.09	0.009 ~ 0.09	渗水	0.4	高应力	0.3
15 ~ 5	0.1	0.009 ~ 0.01	0.001 ~ 0.009	滴水	0.1	极高应力	0
<5	0	<0.001	<0.001	流水	0	—	—

对隧道掌子面围岩各指标进行取值后，还需对围岩进行总评分，计算公式如下：

$$F = UW^T, \quad (3)$$

式中， F 为总评分值； U 为各指标的分值向量； W^T 为各指标的权重向量。最后计算出 BT 法的评价标准。表 5 是推荐采用的 BT 法的评价标准表，具体应根据工程实际情况适当划分。

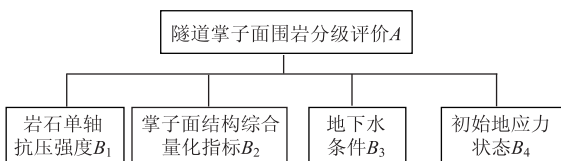


图 4 隧道掌子面围岩分级主要影响因素的层次分析模型
Fig. 4 Analytic hierarchy model of main influencing factors of classification of surrounding rock of tunnel face

表 5 BT 法的评价标准表
Tab.5 Evaluation criteria for BT method

评分值围岩等级	评分值	掌子面围岩描述
I	0.7~1	坚硬岩, 岩体完整, 呈整体或巨厚层状结构, 掌子面干燥
II	0.546~0.7	坚硬岩, 岩体较完整, 块状或巨厚层状结构, 掌子面潮湿 较坚硬岩, 岩体完整, 块状整体结构, 掌子面干燥
III	0.424~0.546	坚硬岩, 岩体较破碎, 巨块(石)碎(石)状镶嵌结构, 掌子面干燥 较坚硬岩或较软岩层, 岩体完整, 块状体或中厚层结构, 掌子面潮湿
IV	0.270~0.424	坚硬岩, 岩体破碎, 碎裂结构, 掌子面干燥 较坚硬岩, 岩体较破碎或破碎, 镶嵌碎裂结构, 掌子面潮湿 较软岩或软硬岩层, 且以软岩为主, 岩体较完整~较破碎, 薄层状结构, 掌子面潮湿或滴水
V	<0.270	较软岩, 岩体破碎, 掌子面潮湿 软岩, 岩体较破碎~破碎, 掌子面潮湿或滴水 极破碎各类岩体, 碎、裂、散体结构, 掌子面潮湿或滴水

4 工程应用

4.1 工程概况

隧道掌子面图像采集于永吉高速那丘隧道工程。隧道全长 2 865 m, 设计标高 418.65~472.95 m, 洞高 7.00 m, 最大埋深为 185 m。隧道所处地段属典型中低山地貌, 岩溶发育。隧道围岩由微风化灰岩组成, 呈厚层状结构或次块状结构, 围岩等级为Ⅲ级, 局部岩溶发育地段围岩等级为Ⅳ级, 受地下水影响较明显。隧道区域地下水位裂隙潜水, 水量较小, 开挖时可能形成点滴状出水。以那丘隧道开挖段 YK13+030~070 和 ZK13+240~290 的掌子面为例, 进行结构面量化体系研究和 BT 分级方法研究。在右洞开挖段 YK13+030~070 和 ZK13+240~290 采集 YK13+030, YK13+050, YK13+070 这 3 个掌子面的图像, 在左开挖段 ZK13+240~290 采集 ZK13+240, ZK13+270, ZK13+290 这 3 个掌子面的图像, 共计 6 个掌子面图像, 见图 5。

4.2 掌子面岩体结构量化

利用 Matlab 软件获取掌子面的结构平面模型, 研究 19 条虚拟测线与结构面迹线的关系, 按照本研究给出的方法实现对掌子面岩体的结构量化。以掌子面 YK13+030 为例, 以图 6 的方式布设虚拟测线, 并计

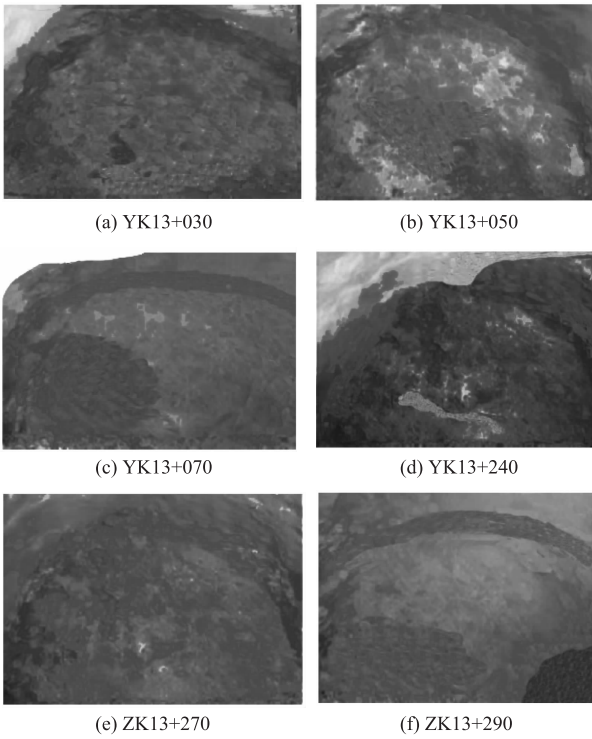


图 5 掌子面原始图像

Fig. 5 Original images of tunnel face

算掌子面各方位虚拟测线的 *RBI* 值, 计算结果见表 6。根据各方位的 *RBI* 值绘制出掌子面岩体结构 *RBI* 指标玫瑰花图, 如图 7 所示。

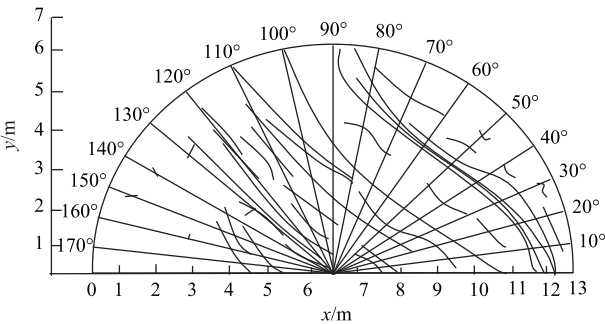


图 6 掌子面 YK13+030 虚拟测线布设图

Fig. 6 Virtual survey line layout on tunnel face YK13+030

由图 7 可见, 掌子面各测线指标基本都处于块状结构或中厚状结构区域内, 且 0°~90°区间的结构完整性明显大于 90°~180°区间, *RBI* 最大值出现在 40°~60°区间, 最小值出现在 130°~150°区间, 反映出 40°~60°区间完整性最好且呈整体状结构, 而 130°~150°区间结构完整性最差且呈镶嵌结构, 因此在进行岩体锚固支护时应应对 130°~150°区间有所偏重。

根据 *Z-RBI* 计算流程, 计算出 YK13+030 的掌子面 *Z-RBI* 值, 如表 7 所示, 得其 *Z-RBI* 值为 0.143 7, 表明 YK13+030 掌子面为块状结构或厚层状结构。

表 6 YK13 + 030 方位 RBI 值
Tab. 6 RBI values of YK13 + 030 azimuth

方位/(°)	RBI	方位/(°)	RBI
0	43.451	100	43.431
10	32.337	110	28.503
20	18.949	120	24.791
30	42.207	130	31.137
40	43.307	140	8.593
50	73.977	150	24.691
60	22.889	160	41.259
70	53.969	170	30.647
80	64.873	180	43.477
90	35.655	—	—

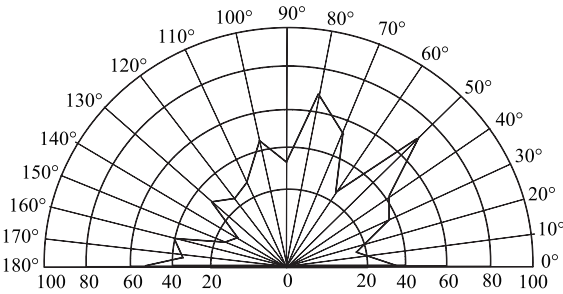


图 7 岩体结构 RBI 指标玫瑰花图
Fig. 7 RBI rose chart of rock mass structure

表 7 掌子面 YK13 + 030 的 Z-RBI 计算表

Tab. 7 Z-RBI calculation table for tunnel face YK13 + 030

计算区间/(°)	RBI 中值	区间面积	玫瑰花面积
0 ~ 10	37.894	39.879 2π	718.416 2π
10 ~ 20	25.643	18.265 6π	
20 ~ 30	30.578	25.972 6π	
30 ~ 40	42.757	20.782 3π	
40 ~ 50	58.642	95.524 6π	
50 ~ 60	48.433	65.159 9π	
60 ~ 70	38.429	41.021 8π	总面积
70 ~ 80	59.421	98.079 3π	
80 ~ 90	50.264	70.179 7π	
90 ~ 100	39.543	43.434 7π	5 000π
100 ~ 110	35.967	35.734 0π	
110 ~ 120	26.647	19.733 9π	
120 ~ 130	27.964	21.721 8π	Z-RBI
130 ~ 140	19.865	10.961 6π	
140 ~ 150	16.642	7.693 2π	
150 ~ 160	32.975	30.204 2π	0.143 7
160 ~ 170	35.953	35.906 1π	
170 ~ 180	37.062	38.155 3π	

同理可得 YK13 + 050, YK13 + 070, ZK13 + 240, ZK13 + 270, ZK13 + 290 的掌子面的 Z-RBI 值分别为 0.142 3, 0.144 8, 0.045, 0.043, 0.046。可见在短距离范围内, 掌子面岩体结构量化指标变化不大, 说明 YK13 + 030 ~ YK13 + 070 区域的岩体为块状结构或厚层状结构, ZK13 + 240 ~ ZK13 + 290 区域的岩体为中层状结构, 这与开挖过程中得到 YK13 + 030 ~ YK13 + 070 及 ZK13 + 240 ~ ZK13 + 290 区域(围岩完整性程度 K_v 分别为 0.57 和 0.48)的岩体完整性程度相一致, 见表 8, 说明该方法具备可行性。

表 8 Z-RBI 值与岩体完整性程度比较表

Tab. 8 Comparison of Z-RBI values and rock integrity

掌子面桩号	Z-RBI	岩体完整性程度	岩体完整性定性描述
YK13 + 030	0.144	0.57	块状结构或厚层状结构, 掌子面岩体较完整
YK13 + 050	0.142	0.58	块状结构或厚层状结构, 掌子面岩体较完整
YK13 + 070	0.145	0.61	块状结构或厚层状结构, 掌子面岩体较完整
ZK13 + 240	0.045	0.53	中层状结构或次块状结构, 掌子面岩体较破碎
ZK13 + 270	0.043	0.51	中层状结构或次块状结构, 掌子面岩体较破碎
ZK13 + 290	0.046	0.54	中层状结构或次块状结构, 掌子面岩体较破碎

4.3 BT 分级与 BQ 分级的比较

利用 BT 分级方法对那丘隧道掌子面岩体进行分级, 主要分两步。首先是获取 BT 分级的 4 个指标, 即岩石单轴抗压强度、Z-RBI、地下水条件、初始地应力状态。岩石单轴抗压强度采用实测岩体点荷载强度指数 $I_{a(50)}$; 下水条件、初始地应力状态根据隧道开挖换算值, 即 $R_e = 22.82I_{s(50)}^{0.75}$ 计算得到; Z-RBI 根据其定义和计算流程得到; 掌子面实际情况定性描述根据表 4 定量评价, 然后再根据 BT 分级方法对掌子面岩体进行综合分级, 其结果如表 9 所示。可见, 利用 BT 分级方法对掌子面岩体分级所得的结果更接近开挖后实际围岩等级。

5 结论

(1) 利用近景测量获取掌子面图像对图像进行分析, 提取掌子面的节理间距、迹长、组数等特征参数, 能更准确地对掌子面进行评价, 并建立基于

表9 BT 分级方法与 BQ 分级方法结果比较

Tab.9 Comparison of results of BT classification method and BQ classification method

掌子面 桩号	BT 分级指标			BT 分级	BQ 分级	开挖后 实际围 岩等级
	岩石单轴 抗压强度 (B_1)/MPa	$Z-RBI$ (B_2)	地下水 条件 (B_3)			
YK13 + 030	58.34	0.144	渗水 0.4	IV	III	IV
YK13 + 050	56.71	0.142	潮湿 0.7	III	III	III
YK13 + 070	58.39	0.145	渗水 0.4	IV	IV	IV
ZK13 + 240	49.61	0.045	潮湿 0.7	IV	III	IV
ZK13 + 270	53.56	0.043	潮湿 0.7	IV	IV	IV
ZK13 + 290	51.86	0.046	潮湿 0.7	IV	III	IV

照相测量的围岩分级系统,快速便捷地对隧道掌子面围岩进行分级,避免人为因素对掌子面围岩分级的影响。

(2) 借鉴岩体块度指标 RBI 的概念,通过布置虚拟测线,考虑结构面分布特征,结合玫瑰花图获取岩体结构的综合量化指标,对掌子面进行综合评价,并得出 $Z-RBI$ 与岩体结构类型的对应关系。

(3) 将岩体坚硬程度、岩体结构综合量化指标 $Z-RBI$ 、地下水条件、初始地应力状态等作为分级指标,利用层次分析法,提出隧道围岩 BT 分级方法,并建立 BT 法的评价标准。将其运用于那丘隧道中,实现了隧道开挖过程中掌子面围岩的快速分级。

参考文献:
References:

[1] 方昱,刘保国,刘开云. 隧道围岩分级的遗传-支持向量分类耦合模型 [J]. 铁道学报, 2013, 35 (1): 108-114.
FANG Yu, LIU Bao-guo, LIU Kai-yun. Tunnel Surrounding Rock Grading Model Based on Genetic-support Vector Classification Coupling Algorithm [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35 (1): 108-114.

[2] 王振宇,程围峰,刘越,等. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增2): 3549-3557.

WANG Zhen-yu, CHENG Wei-feng, LIU Yue, et al. Synthetic Advanced Forecast Technique Based on Geological Logging for Tunnel Face and Ground Penetrating Radar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 3549-3557.

[3] 宋克志,李福献,朱雷敏,等. 隧道二衬结构受力影响因素的敏感性分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (2): 86-91.
SONG Ke-zhi, LI Fu-xian, ZHU Lei-min, et al. Analysis on Sensitivity of Influencing Factors of Tunnel Secondary Lining Structure Stres [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 86-91.

[4] 靳晓光,李晓红. 高地应力区深埋隧道软弱围岩支护结构力学特性研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 101-105.
JIN Xiao-guang, LI Xiao-hong. Study on Mechanical Properties of Support Structure of Deep Buried Tunnel Soft and Weak Surrounding Rock in High Situ Stress Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 101-105.

[5] 祁生文,伍法权. 基于模糊数学的TBM施工岩体质量分级研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (6): 1225-1229.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Surrounding Rockmass Quality Classification of Tunnel Cut by TBM with Fuzzy Mathematics Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (6): 1225-1229.

[6] 王凯旋,苏永华,张盼凤,等. 基于改进RMR方法的深部隧道稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5) 123-128.
WANG Kai-xuan, SU Yong-hua, ZHANG Pan-feng, et al. Analysis on Stability of Deep Tunnel Based on Modified RMR Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (2): 123-128.

[7] 王洋,王述红,郭牡丹,等. 隧道掌子面节理信息快速数字识别及稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (11): 1734-1739.
WANG Yang, WANG Shu-hong, GUO Mu-dan, et al. Fast Digital Identification of Joint Information of Tunnel Work Face and Its Stability Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (11): 1734-1739.

[8] 毛惠隆,杨光辉. 煤矿床工程地质勘察中岩石质量指标(RQD)存在问题的探讨 [J]. 中国煤炭地质, 2010, 22 (12): 51-53.
MAO Hui-long, YANG Guang-hui. Probe into Existed

- Problems of Rock Quality Designation (RQD) in Coal Deposit Engineering Geological Exploration [J]. Coal Geology of China, 2010, 22 (12): 51–53.
- [9] 陈剑平, 范建华, 刘迪. RQD 应用与研究的回顾与展望 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (增2): 249–252.
CHEN Jian-ping, FAN Jian-hua, LIU Di. A Review and Prospect on the Application and Research of RQD [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (S2): 249–252.
- [10] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (4): 1326–1330.
WANG Chuan-ying, HU Pei-liang, SUN Wei-chun. Method for Evaluating Rock Mass Integrity Based on Borehole Camera Technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1326–1330.
- [11] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义 [J]. 水利学报, 2002, 33 (3): 80–84.
HU Xie-wen, ZHONG Pei-lin, REN Zhi-gang. Rock-mass Block Index and Its Engineering Practice Significance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (3): 80–84.
- [12] 唐海, 万文, 刘金海. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (4): 1181–1185.
TANG Hai, WAN Wen, LIU Jin-hai. Evaluation of Underground Cavern Rock Quality Based on Uncertainty Measure Theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (4): 1181–1185.
- [13] HAJIAZIZI M, KHATAMI R S. Seismic Analysis of the Rock Mass Classification in the Q-system [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62: 123–130.
- [14] SHI S S, LI S C, LI L P, et al. Advance Optimized Classification and Application of Surrounding Rock Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Tunnel Seismic Prediction [J]. Automation in Construction, 2014, 37: 217–222.
- [15] 唐海, 万文, 刘金海. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (4): 1181–1185.
TANG Hai, WAN Wen, LIU Jin-hai. Evaluation of Underground Cavern Rock Quality Based on Uncertainty Measure Theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (4): 1181–1185.
- [16] 李术才, 刘洪亮, 李利平, 等. 基于数码图像的掌子面岩体结构量化表征方法及工程应用 [J]. 岩石力学与工报. 2017, 36 (1): 1–9.
LI Shu-cai, LIU Hong-liang, LI Li-ping, et al. A Quantitative Method for Rock Structure at Working Faces of Tunnels Based on Digital Images and Its Application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (1): 1–9.
- [17] 段林娣, 宋成辉. 应用 BP 神经网络进行隧道围岩快速分级 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20 (2): 41–45.
DUAN Lin-di, SONG Cheng-hui. Application of BP Neural Network in the Rapid Classification of Surrounding Rock [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20 (2): 41–45.
- [18] 牛文林, 张广洋, 熊国斌, 等. 基于 ASP.NET 技术的围岩分级系统开发 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (1): 12–16.
NIU Wen-lin, ZHANG Guang-yang, XIONG Guo-bin, et al. Rock Mass Classification System Based on ASP.NET [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (1): 12–16.