中文核心期刊 中科双效期刊 CSCD核心期刊 中国科技核心期刊

Caj-cd规范获奖期刊

线-面结合的结构面粗糙系数经验计算方法

范 祥,安宏磊,包 含,任贤达,邓志颖,吴 睿

An empirical method for calculating the roughness coefficient of structural plane with line-plane combination

FAN Xiang, AN Honglei, BAO Han, REN Xianda, DENG Zhiying, and WU Rui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density 黄海, 刘建康, , 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161–168

基于Green-Ampt模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究

Rainfall infiltration process of multi-layer slope based on improved Green-Ampt model stability analysis 宋宜祥, 尹子航, 黄达 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 162-170

岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method 张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95–101

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil 丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108–108

考虑土拱效应及中主应力影响的桩间挡板土压力计算方法

A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress 尤静霖, 王士杰, 王昊岚 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 90–95

水汽场中气液态水质量比的确定方法

Determination of the ratio of liquid water mass to gaseous water mass in water vapor field 易珍莲, 宁立波, 尹峰, 赵国红 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 43-43



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205027

范祥, 安宏磊, 包含, 等. 线-面结合的结构面粗糙系数经验计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 78-86. FAN Xiang, AN Honglei, BAO Han, *et al.* An empirical method for calculating the roughness coefficient of structural plane with line-plane combination[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 78-86.

线-面结合的结构面粗糙系数经验计算方法

范 祥^{1,2},安宏磊¹,包 含¹,任贤达¹,邓志颖¹,吴 睿¹ (1. 长安大学公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075)

摘要: 岩体结构面的剪切力学特性主要取决于其表面粗糙特征,结构面粗糙系数是表征该粗糙特征的主要方法。目前对结构面粗糙系数的研究局限于单一维度,多角度且定量化计算结构面粗糙系数能避免单一维度分析导致计算精度不准的局限性。采用立方体花岗岩,通过巴西劈裂的方式制备含结构面的试样;利用高精度三维扫描仪对试样结构面进行扫描,得到结构面的点云数据,同时借助逆向软件对点云数据进行三维重构。研究了点云数据 Z 方向上的分布频率,剖面线剖面比与节理粗糙系数(JRC)值的关系,结构面面积比与 JRC 均值的关系。研究表明:点云数据 Z 方向上的分布频率可以作为初步评估结构面粗糙度的手段;剖面线剖面比与 JRC 数值、结构面面积比与 JRC 均值有二次函数的关系。通过数值分析建立了结构面 JRC 均值与剖面比、面积比的二元函数关系,并得到结构面 JRC 均值的经验计算公式。本次研究为结构面粗糙度提供了一种"点-线-面"逐渐深入的多角度评估思路,得到的经验公式为计算结构面 JRC 均值提供了一种新的计算方法。关键词: 剖面比;面积比;结构面;节理粗糙系数;计算方法

中图分类号: TU452 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)01-0078-09

An empirical method for calculating the roughness coefficient of structural plane with line-plane combination

FAN Xiang^{1,2}, AN Honglei¹, BAO Han¹, REN Xianda¹, DENG Zhiying¹, WU Rui¹ (1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: The shear mechanical properties of structural plane are mainly determined by the surface roughness, and the roughness coefficient is the main method to characterize the roughness. At present, the research on the roughness coefficient is limited to a single dimension. Multi-angle and quantitative calculation of the roughness coefficient of structural plane can avoid the limitation of inaccurate calculation caused by single dimension analysis. Cubic granite blocks with structural plane are prepared by Brazilian splitting. High-precision 3D scanner is used to scan the prepared structural interview samples and obtain the point cloud data of the structural planes. At the same time, three-dimensional reconstruction of point cloud data is carried out by reverse software. The distribution frequency in the Z direction of the point cloud data, the relationship between the section ratio and joint roughness coefficient (JRC) values of the section line, and the relationship between the structural plane area ratio and the mean JRC values are studied. The results show that the distribution frequency in the Z direction of point

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-16 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807241);中国博士后科学基金项目(2021M693544);长安大学中央高校专项资金资助项目(300102211205)

cloud data can be used as a preliminary method to evaluate the roughness of structural surface. The relationships between section ratio and *JRC* value as well as area ratio of structural plane and mean *JRC* are both quadratic function. By numerical analysis, the binary function relation between the mean *JRC* of the structural planes and the section ratio and area ratio is established, and the empirical formula of the mean *JRC* of the structural plane is obtained. This study provides a "point-line-plane" idea to evaluate the roughness of discontinuities. The obtained empirical formula provides a new method for calculating the mean value of *JRC* of the structural plane.

Keywords: profile ratio; area ratio; structural plane; joint roughness coefficient; calculation method

天然岩体有独特的地质构造特征^[1],由岩块和结构面组成,结构面的存在破坏了岩体结构的完整性和连续性。研究发现^[2-3],岩体的抗剪能力很大程度上决定于结构面的粗糙程度。因此,对结构面粗糙度的研究,在预测岩体的抗剪强度上有十分重要的意义。

几十年来,含结构面岩样的室内试验被大量开 展。Barton^[2] 较早对含有结构面的岩石试样进行了直 剪试验,得到了应用较为广泛的结构面剪切强度公 式,并总结了10条长度为10cm的标准剖面曲线,以 节理粗糙度系数(Joint Roughness Coefficient, JRC)定 义这10条剖面线的粗糙程度。目前,在工程应用中, 大多采用将结构面与10条剖面线进行比对并确定 JRC 数值, 进而预测抗剪强度的方法, 但是该方法受 主观因素影响较大。为了克服主观性的影响,即定量 确定 JRC 数值, 国内外学者进行了较多探索, 其中应 用最多的是提取剖面曲线的几何统计参数,如坡度均 方根 (Z_2) 、结构函数(SF)等,建立其与JRC值之间的 关系。如:肖维民等[4]研究了岩石节理 JRC 值的计算 方法,发现不同剪切方向下节理剖面线 JRC 值的函数 形式不同;陈世江等[5]应用图像处理技术,进一步提 出了用(Z₂, SI)和(SF, SI)评估 JRC的方法,其中 SI 为 不同采样间隔; Yu等⁶¹考虑不同采样间隔对 JRC 数值的影响,建立了不同采样间隔下 Z_{5} 、SF 等统计参 数与 JRC 的关系, 但其简陋的测量手段导致存在一定 的设备误差。为了减小设备误差, Grasselli 等[7]利用 数字软件对 10条剖面线进行重建,分别建立了 0.5 mm 与 1 mm 采样间隔下 JRC与 Z₂的关系, 为定量计算 JRC 提供了一定的参考。孙辅庭等¹⁸以 10 条标准剖面 线为研究对象,分析了平均倾斜角 (i_{ave}) 、 Z_2 、SF、轮廓 指数(Rn)4个粗糙度统计参数与剖面线离散间距的关 系,并用幂函数对统计参数与离散间距的关系进行拟 合,得到了独立于离散间距的粗糙度幂参数。班力壬 等門对同一剪切方向上长方体微凸体的计算高度进行 平均,提出了一个新的描述形貌面粗糙度的指标 c。

为了更加全面地描述岩体结构面的整体形态特

征,部分学者开始应用三维激光扫描仪,将结构面形 貌特征的研究从二维过渡到三维。利用非接触式形 貌扫描仪,Grasselli 等[10] 发现只有面向剪切方向坡度 角为正的结构面时,微元才对剪切强度产生贡献,并 定义了最大可能面积比、结构面平均倾角等三维参数。陈曦等[11] 基于 Grasselli 模型提出一个新的岩石节理三维粗糙度指标 θ_R 。 Tang 等[12] 提出了光亮面积百分比(BAP)来描述结构面粗糙度。蔡毅等[13] 将结构面粗糙度评价指标与其力学性质建立联系,提出描述结构面三维粗糙程度的新指标 I_{PAP} 。 但类似三维指标计算过程运用高新技术较多,提取过程较为复杂。

综上所述,众多学者从二维或三维角度对结构面粗糙度进行了一系列研究,但仍有一定不足。从二维角度看,统计参数是一种描述不规则曲线形态特征的较好方法。然而,许多统计参数的研究都是基于标准剖面线,而现实中结构面的形态各异,标准剖面线虽然一定程度上能提供参考,但不能全部概括。而从三维角度分析结构面粗糙度,相关参数计算复杂,运用困难。因此,如何全面地评估结构面粗糙程度,以及提高相关参数的计算效率,是亟需解决的问题。

本文利用"巴西劈裂"的方式制备天然结构面,运用非接触式激光扫描仪及三维重构技术,基于"点动成线、线动成面"的思想,从"点-线-面"3个角度全面分析结构面的形态特征,并利用数据处理软件,分析 JRC 数值与剖面比、JRC 均值与面积比的相关关系。同时,为定量计算结构面 JRC 均值提供一种经验计算方法。

1 试验及数据处理方法

1.1 结构面制作

采用长 150 mm、宽 150 mm、高 200 mm 的花岗岩岩块,利用"巴西劈裂"方式制作具有结构面的花岗岩试样(图 1),制作步骤如下:

(1)对花岗岩试样进行预处理,画出劈裂基准线, 方便对正钢条位置;

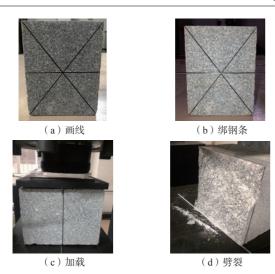


图 1 结构面制作流程 Fig. 1 Preparation procedure of structural planes

- (2)将钢条用透明胶带粘在预画线处,本次劈裂钢条使用的是304不锈钢圆棒;
- (3)利用较小的加载速度,使加载装置与垫板接触,之后用恒定的加载速率,将试样劈裂,得到具有结构面的试样。

本次共劈裂 10 组花岗岩试样, 分别记为 S1—S10, 规定剪切正向为 X 轴正方向, 并用记号笔做标记。图 2 展示试样 S3 劈裂后的形貌及规定的研究正方向。



图 2 结构面试样

Fig. 2 Samples of structural planes

1.2 点云数据处理

利用三维高精度扫描仪扫描试样的结构面,得到结构面的点云数据;并利用逆向软件 Geomagic Design X 对点云数据进行降噪及杂点消除(对导入的点云数据进行预处理,消除重复点及明显离群的点)、对齐坐标(将预处理的点云数据统一坐标系)以及终处理,得到结构面扫描图(图 3)。

对处理过的点云数据进行三维重构,用软件的断

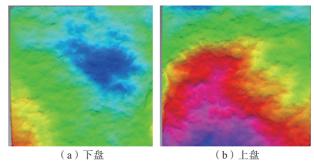


图 3 结构面扫描图

Fig. 3 Scanning images of structural planes

面功能对结构面剖面线进行提取。为了避免取单一剖面线可能产生的偶然性和离散性结果及取多个剖面线重复分析带来的冗繁性^[14],本文以 X 轴正方向为剖面线截取方向,在 Y 轴正方向上每隔 1 cm 取一条断面剖面线分析其起伏形态。所取剖面线方式及形态特征投影如图 4 所示。

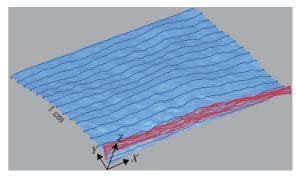


图 4 剖面线形态特征

Fig. 4 Morphological characteristic of profiles

1.3 参数提取

利用 Z_2 求得剖面线的 JRC 值进行相关研究。研究表明 $^{[6,14-16]}$,不同采样间隔 (Δx) 会影响 Z_2 的数值,最终影响 JRC 值。 Z_2 的计算公式如式(1)(2)所示 $^{[6]}$:

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}\right) \mathrm{d}x\right]^{0.5} \tag{1}$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \frac{(z_{i+1} - z_i)^2}{(x_{i+1} - x_i)^2} \right]^{0.5}$$
 (2)

式中: $x \times z$ — 采样方向/mm;

L——剖面线长度/mm;

M──采样点数目;

 $x_i(z_i)$ — 采样点坐标值/mm。

式(1)(2)分别为 Z 的积分、离散形式。采用式(2)对剖面线进行计算,可以得到相应参数值。

宋磊博等[14]建议一般情况下岩石自然结构面三

维扫描的采样间隔取为 0.5 mm。陈曦等[17] 发现节理形貌表征存在采样点距效应。考虑到采样间隔对 Z₂ 的影响,避免只取一种间距的随机性和多种间距的冗繁性,提取剖面线的点云数据后,沿研究方向以 0.25, 0.5, 1.0 mm 作为采样间距,对剖面线进行重采样。借助数据处理软件,利用采得的坐标数据并依据已有的经验拟合公式,计算每条剖面线在不同采样间隔下的 JRC值(表 1)。

表 1 拟合公式表
Table 1 Table of fitting formulas

采样间距/mm	JRC拟合计算公式	来源	
0.25	$JRC = 64.28 \tan Z_2 - 5.06$	Yu等[6]	
0.5	$JRC = 51.85Z_2^{0.60} - 10.37$	Tatone等[7]	
1	$JRC = 55.03Z_2^{0.74} - 6.1$	Tatone等[7]	

2 数据分析

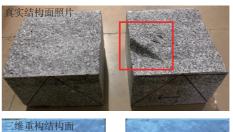
2.1 劈裂结构面点云数据分析

点云是反映结构面形态最直接的数据形式,经过扫描,每个结构面上的点可达到 1×10⁶ 个以上。对点云进行三维重构,与真实结构面进行对比,较好地复刻了结构面的形态特征(图 5)。

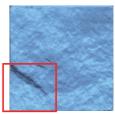
观察结构面的表面形态特征,可以明显看到结构面某些位置较为"凸起、凹陷"。岩体发生剪切破坏时,结构面提供抗剪能力的主要是这些"凸起、凹陷"部分。发生剪切变形时,表现为"凸起剪断"或者"爬坡"。如果凸起较高,可以认为岩体上下盘"咬合"较好。忽略凸起宽度的影响,从结构面整体来看,如果结构面扫描点中高于或低于平均高差的点云数占比较大,一定程度上可以认为该结构面起伏较大,相互咬合较为紧密,可以贡献较大的抗剪能力。本次劈裂试样点云数据的相关统计参量见表 2。以试样 S1 和 S4 为例进行阐述,并取 1 mm 为分布间隔,建立试样每个高度区间点数的柱状图,见图 6。

以均值高度为基准,上下扩展 5 mm 作为"均值区间",其余区间为"非均值区间"。试样 S1 处于非均值区间的点数占比高达 67.7%,从数值上看,结构面应该起伏较大,该结果与 S1 的真实结构面照片及三维重构结果面一致:从图 5(a)中可以看出,该试样结构面表面凹凸非常明显,用红色线框圈出的部分较为"凹凸不平"。同样的,试样 S4 处于非均值区间的点数占比为 16.35%,试样表面远比 S1 平缓,如图 5(b)所示。

因此,采用点云分布频率可以初步分析结构面粗 糙度情况,即通过研究处于非均值区间的点云占比,

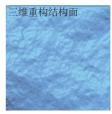






(a) S1结构面示意图







(b) S4结构面示意图

图 5 结构面示意图

Fig. 5 Diagram of structural planes

表 2 点云数据统计表

Table 2 Statistical table of point cloud data

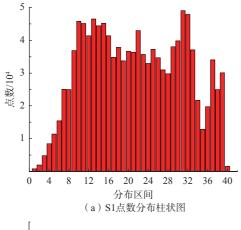
编号	点数	最大值/mm	最小值/mm	高差/mm	均值/mm
S1	1 218 937	40.058	0.981	39.077	22.050
S2	1 111 054	30.640	12.765	17.875	22.820
S3	1 088 516	32.568	8.304	24.264	20.708
S4	1 114 106	53.192	31.284	21.908	42.682
S5	1 066 901	26.803	14.064	12.739	20.668
S6	1 064 899	30.471	12.020	18.451	20.787
S7	1 112 041	30.997	9.428	21.569	20.359
S8	1 074 548	35.688	5.524	30.164	23.831
S9	1 034 419	27.192	0.079	27.113	18.420
S10	1 038 317	18.051	1.212	16.839	11.554

初步对结构面粗糙度进行评估。但是,这种分析只是 一维角度的定性分析。

2.2 剖面线 JRC 数值计算

以 S4 为例, 基于"点动成线"的思想, 通过分析剖面线, 对结构面粗糙度进行定量分析

由于采用"巴西劈裂"的方法制作结构面,试样上



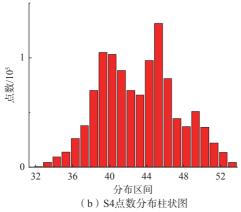


图 6 点数柱状图 Fig. 6 Histograms of points

下盘完全耦合,因此仅对试样下盘剖面线进行研究。将剖面线沿着 Y轴正方向,从 1 到 15 进行编号,将每条剖面线进行等间距重采样。利用表 1 中的公式求得每条剖面线不同采样间距下对应的 JRC数值(图 7)。从图 7 可以看出,一个完整的天然结构面,其不连续性较为明显,而且其 JRC数值集中分布在某个范围内,单纯以一条剖面线来衡量结构面粗糙度局限性较强。以 0.5 mm 采样间隔来看, JRC≥8 占比为 66.7%,

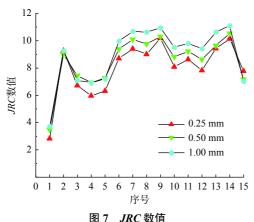


图 / JRC 数直 Fig. 7 Values of JRC

其中在 [8,10] 区间占比为 53.3%, 出现这种现象的主要原因是, 花岗岩作为极硬岩, 相对来说较为均质, 在劈裂时不会出现特别明显的破裂、掉块, 所以 JRC 数值在某个区间内分布比较集中。

无论采取何种取样间隔, JRC数值的分布情况基本一致, 仅仅有数值上的差异。在统计其他 9个试样时也出现了同样的状况。而且, 随着采样间隔的增加, JRC数值呈现出增大的趋势, 这可能与选择的经验公式有关。研究表明[14], 随着采样间距的增大, Z2 呈减小的趋势, 且有式(3)的函数关系。通过计算, 0.25, 0.5, 1 mm 采样间隔下, JRC数值分别为 7.16, 8.75, 9.64, 但是增加幅度不大, 均不超过 2。

$$Z_2 = -0.0038\Delta x^2 - 0.0054\Delta x + 0.1935 \tag{3}$$

通过对剖面线的提取及 JRC 数值计算可知, 只用一条二维线段衡量一个完整结构面的粗糙度, 显然不够全面。但是断面剖面线相比于点云分布频率, 可以定量评价结构面粗糙度, 与点数据相比更直观。

2.3 剖面比与 JRC 数值关系

2.2 节中的 JRC 数值,使用 Z,进行计算,其计算过程有累加、平方、开方,较为复杂。如果找到一个更加简便的方式计算 JRC 数值,可以加快结构面粗糙度评估过程。图 8 为 0.5 mm 采样间隔下的 2 条剖面线及 JRC 数值,并且,为了避免曲线重合,将 2 号剖面线的 Z值整体增加 20 mm,达到整体向上移动的目的。观察图 8 中剖面线的形态特征,可以直观的看到,剖面线起伏程度越大,对应的 JRC 数值就越大,其实际长度也越大。如果以一个无量纲参数"剖面比"来计算 JRC 数值,就可以减少利用 Z,进行计算时的工作量。

有些学者提出过类似概念,如汤庆浩等[18] 提出的剖面长度比,李化等[19] 提出的相对起伏度和伸长率。但是他们的研究成果都是基于标准剖面线,并不是天

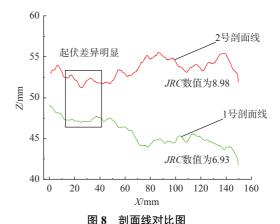


Fig. 8 Comparison of section profiles

然结构面的断面剖面线。为了克服标准剖面线的单一性,本文利用制作的结构面将此概念重新量化分析,提取每一条剖面线的实际长度(L_t)与基准线长度(L_0),利用式(4)计算对应的剖面比(λ)。同时,利用表1提到的经验拟合公式,计算每条剖面线对应的JRC数值,建立JRC数值与剖面比的近似关系。

$$\lambda = L_{\rm t}/L_0 \tag{4}$$

以 S4 为例, 分别测量每条剖面线的实际长度与基准线长度, 并计算出剖面比, 统计结果见表 3。分别建立剖面比与不同采样间距下 JRC 值的散点图, 如图 9

所示。根据图 9, JRC 数值基本随着剖面比的增大而增大,且在某一个区间较为集中。拟合 JRC 值与剖面比的关系,发现 JRC 值与剖面比呈二次函数关系,且随着采样间隔的增加,拟合效果逐渐变差。该现象与剖面线的细节处理有关,采样间隔越大,单位间隔段内忽略的起伏程度越多; Z,是累加的数值,经过迭代计算后,误差会被放大,导致采样间隔越大,拟合效果越差。通过拟合曲线可以发现 0.25 mm 与 0.5 mm 的采样间隔下,剖面比与 JRC 相关性较好,可以作为计算真实岩块剖面线 JRC 数值的方法。

表 3 S4 试样剖面比统计表

Table 3 Statistical table of profile ratio of sample S4

1 147.946 2 149.348 7 1.009 5 9 150.276 6 153.983 7 1.024 2 149.152 1 152.422 0 1.021 9 10 150.074 5 153.291 8 1.02 3 149.209 1 151.769 9 1.017 2 11 150.276 8 153.530 2 1.02 4 149.416 3 151.581 7 1.014 4 12 150.171 1 153.031 4 1.019 5 150.135 4 152.689 3 1.017 0 13 150.042 8 153.703 8 1.024 6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.026								
2 149.152 1 152.422 0 1.021 9 10 150.074 5 153.291 8 1.02 3 149.209 1 151.769 9 1.017 2 11 150.276 8 153.530 2 1.02 4 149.416 3 151.581 7 1.014 4 12 150.171 1 153.031 4 1.019 5 150.135 4 152.689 3 1.017 0 13 150.042 8 153.703 8 1.024 6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.020 7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	序号	基准长度/mm	实际长度/mm	剖面比	序号	基准长度/mm	实际长度/mm	剖面比
3 149.209 1 151.769 9 1.017 2 11 150.276 8 153.530 2 1.02 4 149.416 3 151.581 7 1.014 4 12 150.171 1 153.031 4 1.019 5 150.135 4 152.689 3 1.017 0 13 150.042 8 153.703 8 1.024 6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.020 7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	1	147.946 2	149.348 7	1.009 5	9	150.276 6	153.983 7	1.024 7
4 149.416 3 151.581 7 1.014 4 12 150.171 1 153.031 4 1.019 5 150.135 4 152.689 3 1.017 0 13 150.042 8 153.703 8 1.024 6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.020 7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	2	149.152 1	152.422 0	1.021 9	10	150.074 5	153.291 8	1.021 4
5 150.135 4 152.689 3 1.017 0 13 150.042 8 153.703 8 1.024 6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.024 7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	3	149.209 1	151.769 9	1.017 2	11	150.276 8	153.530 2	1.021 7
6 149.924 5 152.605 1 1.017 9 14 150.210 1 154.129 6 1.020 7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	4	149.416 3	151.581 7	1.014 4	12	150.171 1	153.031 4	1.019 0
7 149.966 1 153.246 1 1.021 9 15 147.501 0 150.102 4 1.017	5	150.135 4	152.689 3	1.017 0	13	150.042 8	153.703 8	1.024 4
	6	149.924 5	152.605 1	1.017 9	14	150.210 1	154.129 6	1.026 1
8 150.082 6 153.455 6 1.022 5	7	149.966 1	153.246 1	1.021 9	15	147.501 0	150.102 4	1.017 6
	8	150.082 6	153.455 6	1.022 5				

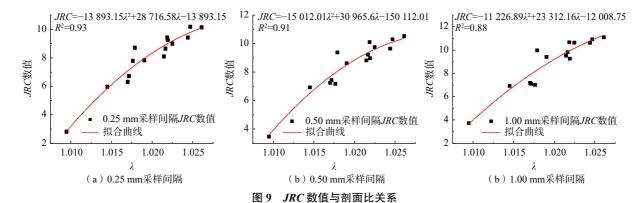


Fig. 9 Relation between JRC and profile ratio

2.4 JRC 均值与面积比之间的关系

剖面线只是从二维角度分析结构面粗糙度,完整的结构面具有凹凸不平的表面,全面分析结构面粗糙度情况才能更好的预测结构面的抗剪强度。研究试样每条剖面线 JRC 数值及观察结构面表面,发现试样呈现出有起伏但总体较为平坦的特征。以 JRC 数值来看,表现出大部分数值集中在某个区间,如试样 S4,其超过半数的 JRC 数值分布在 [8,10]。基于此,同时结合"线动成面"的思想引入面积比的概念,研究面积比与 JRC 均值之间的关系。

Belem 等[20] 提出利用表面粗糙度系数 R_s(本文称

为面积比)描述结构面粗糙度,计算方法见式(5)。该系数采用的是结构面越粗糙,其真实面积(*A*₁)就会远大于投影面积(*A*₂)的思想。

$$R_{\rm s} = A_{\rm t}/A_{\rm s} \tag{5}$$

利用劈裂的结构面研究面积比对结构面粗糙度的反映程度。理论上 A_s 应为 22 500 mm², 但考虑到试样加工的精度误差和点云数据处理时边缘杂点消除的误差, 在处理点云数据时以"结构面尽可能保留完整"为原则, 建立基准矩形框, 圈出要保留的点云数据, 删除矩形框外的杂点, 将结构面边长控制在 145~150 mm 之间, 尽可能使边界"平直", 以方便计算。因此

每个结构面的基准面积并不一样,最终统计数据见表 4。

利用式(6)计算 JRC 均值(η),对数据进行分析,可以看出面积比与 JRC 均值存在二次函数关系(图 10)。以 R² 值衡量相关性,当采样间距为 0.5 mm 时,相关性最高,拟合度"较优"。分析 JRC 均值与面积比的关系,一定程度上可以认为面积比可以较好地评价结构面粗糙度。

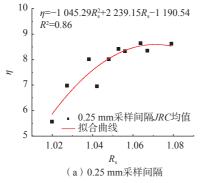
$$\eta = \left(\sum_{i=1}^{N} \eta_{JRC_i}\right) / N \tag{6}$$

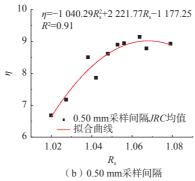
式中: η_{JRC_i} — 第 i 条剖面线的 JRC 值; N — 剖面线总条数。

表 4 试样面积比

Table 4 Area ratios of samples

编号	基准面积/mm²	真实面积/mm²	面积比
S1	22 350	24 116.034 1	1.079 0
S2	22 350	23 423.588 8	1.048 0
S3	22 350	23 201.424 4	1.038 1
S4	21 025	22 435.221 3	1.067 1
S5	22 200	22 641.000 0	1.019 9
S6	21 316	22 213.150 6	1.042 1
S7	21 609	22 986.338 9	1.063 7
S8	22 201	22 808.410 4	1.027 4
S9	21 756	22 973.348 3	1.056 0
S10	22 052	23 216.181 8	1.052 8





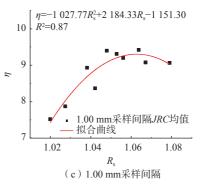


图 10 JRC 均值与面积比关系

Fig. 10 Relation between mean JRC value and area ratio

3 JRC均值的计算方法

通过第 2 节的分析, 剖面比与面积比可以分别从二维与三维的角度定量分析结构面粗糙度, 但是单独一种分析手段有其局限性。如果将剖面比与面积比相结合, 共同计算结构面 JRC 均值, 可以更加全面、定量地分析结构面的粗糙度。因此, 对试样结构面平均剖面比、面积比、JRC 均值进行统计(表 5)。

通过前文分析,采样间隔 0.5 mm 时, JRC 数值与剖面比、面积比均有较好的相关关系,故采用 0.5 mm 作为采样间隔进行研究。通过数据处理软件对 JRC 均值、平均剖面比及面积比进行分析,利用其中的二元函数拟合功能,建立 JRC 均值与面积比、剖面比的二元回归方程,如式(7)所示。拟合结果见图 11, R²值为 0.96,有较好的相关关系。

$$\eta = -3369.88 + 4754.32\lambda + 1730.38R_s
-2299.63\lambda^2 - 812.19R^2$$
(7)

式(7)建立了结构面 JRC 均值与剖面比、面积比的二元函数关系,一定程度上弥补了单独采用一种手段评价结构面粗糙度的局限性,具有较好的应用前景。

4 结论

(1)克服了以10条标准剖面线为研究对象的局限性。综合分析结构面剖面线的剖面比与*JRC*数值、结构面面积比与*JRC*均值的关系后发现,以三维扫描方式研究结构面粗糙度时的"较优"采样间距为0.5 mm。

(2)提供一种"点-线-面"多角度分析结构面粗糙度的思路。点云分布频率可以初步描述结构面粗糙度。通过研究剖面比、面积比与 *JRC* 的关系, 发现剖

表 5 试样数据统计 Table 5 Statistical data of the tested samples

序号	平均剖面比	面积比	JRC均值
S1	1.032 2	1.079 0	8.93
S2	1.029 8	1.048 0	8.62
S3	1.026 0	1.038 1	8.51
S4	1.029 5	1.067 1	8.78
S5	1.015 0	1.019 9	6.68
S6	1.016 0	1.042 1	7.86
S7	1.024 9	1.063 7	9.14
S8	1.018 0	1.027 4	7.18
S9	1.040 5	1.056 0	8.95
S10	1.026 3	1.052 8	8.90

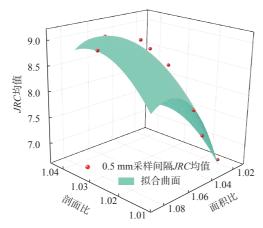


图 11 JRC 均值与剖面比、面积比的函数关系

Fig. 11 Mathematical relation of mean *JRC* value with profile ratio and area ratio

面比与 JRC 数值、面积比与 JRC 均值皆存在二次函数关系,可以作为一种定量反映结构面粗糙度情况的手段。

(3)通过数据处理软件,建立了结构面 JRC 均值与平均剖面比、面积比的经验计算公式,克服了单独采用其中一种手段评价结构面粗糙度的局限性。为计算结构面 JRC 均值提供了一种多角度结合考虑的计算方法。

参考文献(References):

- [1] 穆成林, 裴向军, 裴钻, 等. 基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 150-158. [MU Chenglin, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 150-158. (in Chinese with English abstract)]
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10: 1 54.
- [3] 张恩铭,程谦恭,林棋文,等.岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):125-135. [ZHANG Enming, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3):125-135.]
- [4] 肖维民, 刘伟超, 朱占元. 基于正反向直剪试验的岩石节理JRC值计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 2): 3098 3106. [XIAO Weimin, LIU

- Weichao, ZHU Zhanyuan. Study on calculation of rock joint JRC value based on forward and reverse direct shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 2): 3098 3106. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈世江,常建平,姬长兴,等. 两统计参数评估结构面粗糙度探讨及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 476 489. [CHEN Shijiang, CHANG Jianping, JI Changxing, et al. A two-parameter evaluation method of joint roughness and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 476 489. (in Chinese with English abstract)]
- [6] YU Xianbin, VAYSSADE B. Joint profiles and their roughness parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4): 333 336.
- [7] TATONE B S A, GRASSELLI G. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC[J].

 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(8): 1391 1400.
- [8] 孙辅庭, 佘成学, 万利台. Barton标准剖面JRC与独立于离散间距的统计参数关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3539 3544. [SUN Futing, SHE Chengxue, WAN Litai. Research on relationship between JRC of Barton's standard profiles and statistic parameters independent of sampling interval[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3539 3544. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 班力壬, 戚承志, 燕发源, 等. 岩石节理粗糙度新指标及新的JRC确定方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1059—1065. [BAN Liren, QI Chengzhi, YAN Fayuan, et al. A new method for determining the JRC with new roughness parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1059—1065. (in Chinese with English abstract)]
- [10] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(1): 25 40.
- [11] 陈曦,曾亚武. 基于Grasselli模型的一个新的岩石节理三维粗糙度指标[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 700 712. [CHEN Xi, ZENG Yawu. A new three-dimensional roughness metric based on Grasselli's model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 700 712. (in Chinese with English abstract)]

- [12] TANG Huiming, GE Yunfeng, WANG Liangqing, et al. Study on estimation method of rock mass discontinuity shear strength based on three-dimensional laser scanning and image technique[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(6): 908 913.
- [14] 宋磊博, 江权, 李元辉, 等. 不同采样间隔下结构面形 貌特征和各向异性特征的统计参数稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1121 1132. [SONG Leibo, JIANG Quan, LI Yuanhui, et al. Stability of statistical parameters of discontinuities morphology and anisotropy characteristics based on different sampling intervals [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1121 1132. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈冲, 陈胜宏. 结构面轮廓不等间距采样、向量表征粗糙度[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊1): 2798 2805. [CHEN Chong, CHEN Shenghong. Unequal interval sampling, vector representation and roughness of joint profile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 1): 2798 2805. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王昌硕, 王亮清, 葛云峰, 等. 基于统计参数的二维节 理粗糙度系数非线性确定方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 565 - 573. [WANG Changshuo, WANG Liangqing, GE Yunfeng, et al. A nonlinear method for

- determining two-dimensional joint roughness coefficient based on statistical parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 565 573. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈曦,曾亚武.粗糙节理的改进形貌表征方法及采样点距效应[J].浙江大学学报(工学版), 2021, 55(11): 2161 2169. [CHEN Xi, ZENG Yawu. Improved morphology characterization method and sampling effect of rough rock joint[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(11): 2161 2169. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 汤庆浩,张常亮,张国伟,等.基于标准结构面粗糙度曲线的JRC量化算法[J].岩石力学与工程学报,2021,40(7): 1402 1410. [TANG Qinghao, ZHANG Changliang, ZHANG Guowei, et al. Quantization algorithm of joint roughness coefficient based on standard joint roughness curves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1402 1410. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李化, 黄润秋. 岩石结构面粗糙度系数JRC定量确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3489 3497. [LI Hua, HUANG Runqiu. Method of quantitative determination of joint roughness coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3489 3497. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M.

 Quantitative parameters for rock joint surface roughness [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(4): 217 242.

编辑: 刘真真