

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0804

岩体结构面粗糙度系数确定方法研究现状

朱婉婉, 王昌硕*, 雍 睿

(宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 岩体结构面粗糙度系数(Joint Roughness Coefficient, JRC)是影响结构面抗剪强度的重要参数, 而抗剪强度是影响岩体稳定性的重要因素, 因此对结构面粗糙度系数的研究具有十分重要的意义. 在过去 50 年里, 研究人员提出了各种方法来量化结构面粗糙度, 但到目前为止研究提出的所有粗糙度参数中, 结构面粗糙度系数仍然是实践中使用最广泛的参数. JRC 具有形式简单、易于估计和明确考虑尺寸效应的优点, 使其成为自提出以来应用最广泛的结构面粗糙度量化参数. 因此, JRC 引起了许多学者的关注, 并在众多领域开发了定量表征 JRC 的相关方法. 鉴于这种发展趋势, 针对结构面粗糙度系数的确定方法进行了概述, 并主要介绍了岩体结构面表面形态获取方法, 粗糙度量化表征参数的本质特性及适用性, 以及对岩体结构面尺寸效应及各向异性的描述. 此外, 还讨论了采样间距和结构面趋势向对 JRC 的影响, 以及现有 JRC 相关方法可能会在岩石工程中得到进一步改进和扩展的趋势.

关键词: 岩体结构面; 粗糙度; 研究现状; 结构面粗糙度系数

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0028-15

岩体结构面的地质成因是岩体的不连续面, 几乎与所有近地表岩体相交, 并对其工程性质产生重大影响. 岩体结构面粗糙度是抗剪强度的一个重要组成部分, 尤其是存在充填物质情况下, 结构面粗糙度会导致膨胀性、局部应力和渗透率增加. Barton^[1]通过试验推导了岩体结构面峰值抗剪强度经验公式, 并首次提出了结构面粗糙度系数(Joint Roughness Coefficient, JRC). JRC 形式简单, 易于在实验室中对小尺寸岩体样本进行倾斜试验, 并且明确考虑了尺寸效应. 国际岩石力学学会建议将 JRC 用于评估和量化岩体结构面抗剪强度和结构面粗糙度, 也用于描述岩体结构面的不连续性.

迄今为止, JRC 相关方法逐渐发展成为解决工程问题的通用方法, JRC 概念已应用于地质、采矿、土木、环境、水利等各个工程领域. 在这些与 JRC 相关方法中, 最常用的是非线性岩石结构面抗剪强度准则 Barton-Bandis(也称为 JRC-JCS 准则或 BB

准则), Barton 等^[2]对该准则的抗剪强度部分进行了改进, 并使用新参数 JRC 和 JCS(Joint Compressive Strength, 结构面抗压强度)对 Bandis^[3]的尺寸效应进行了重要补充.

结构面粗糙度具有非均一性、各向异性、各质异性、尺寸效应等特性. 这些特征使结构面粗糙度的预测具有不确定性^[4]. Barton 等^[2]是首个提出采用倾斜试验或自重重力剪切试验方法来确定 JRC 的学者. 倾斜试验反映了岩石结构面三维的剪切行为, 同时, JRC 以三维形式记录了结构面粗糙度, 此外倾斜试验还考虑了剪切方向, 因此采用倾斜试验得出的 JRC 值记录了该方向上的粗糙度.

本文主要进行以下方面的综述: (1)岩体结构面表面形态数据获取方法; (2)试验反分析方法定量表征粗糙度系数; (3)粗糙度量化表征参数本质特性及适用性; (4)结构面尺寸效应特征描述; (5)结构面各向异性特征描述; (6)采样间距和趋势对粗

收稿日期: 2023-08-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42207175); 宁波市自然科学基金(2022J1115).

第一作者: 朱婉婉, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程. E-mail: 2111087083@nbu.edu.cn

*通信作者: 王昌硕, 助理研究员, 主要研究方向: 岩土工程. E-mail: wangchangshuo@nbu.edu.cn

糙度系数的影响。通过对岩体结构面粗糙度确定方法研究进展的总结,为能够更好地在实际工程中采用合适方法获取更加准确的结构面粗糙度提供参考。

1 JRC 测量方法

JRC 一般依据两种方法获得:基于粗糙度测量的预测方法和粗糙度仪器测量,而粗糙度系数的预测方法与结构面表面形态的精确测量密不可分。本节主要介绍用于现场和实验室测量结构面粗糙度的各种仪器和方法,具体方法可分为接触式和非接触式测量两类。

1.1 接触式测量

接触式测量主要通过探针触点在结构面上沿直线移动,应用数据转换处理设备记录结构面上相应的粗糙度信息。Barton 等^[2]研制出自由升降针状轮廓尺用于绘制结构面轮廓线,该仪器通常由一个触针和滚轮组成,该触针和滚轮与岩石结构面直接接触,当触针或滚轮横向移动时,表面的起伏会导致触针垂直移动,从而绘制出结构面剖面线。Du^[5]自制了简易纵剖面仪用于测量现场大型岩石结构面,该仪器可以快速获得轮廓线,并且能通过调整固定板长度来延长测量长度,且该仪器在野外测量结构面的最大长度已超过 7 m。此外,夏才初等^[6]研制了 RSP-I 型智能岩石表面形貌仪,实现了探针自动移动及数据自动采集,大大提高了工作效率。

接触式测量仪器因其结构简单,成本较低,具有良好的实际应用效果,在早期岩体结构面粗糙度研究中被广泛使用,但其测量精度通常受触针、滚轮直径、探针触点硬度及探针移动速度影响。接触式测量虽然较为实用,但在测量过程中会损坏脆弱的结构面,并且受到仪器尺寸限制,轮廓记录仪通常用于测量较小尺寸的结构面粗糙度。

1.2 非接触式测量

接触式测量方法存在一些缺点,例如测量较大尺寸结构面时较为耗时,并且不能记录无法到达的危险岩体位置的数据。为克服这些缺点,非接触式测量方法提供了一个很好的解决方案。目前,非接触式方法可分为结构光三维扫描、三维激光扫描、摄影测量等。非接触式测量具有不破坏结构

面、远距离测量、测量精度高等优点,在岩体结构面粗糙度测量中得到了广泛的应用。

1.2.1 结构光三维扫描仪

结构光三维扫描仪是一种 3D 扫描工具。扫描仪发射结构光,当结构光接触到物体表面后,由于表面的曲线、凹陷或突起,光线会被扭曲,扫描仪通过摄像头一帧一帧地采集被反射回来的光束信息,记录光束的扭曲程度,同时,扫描软件会分析这些光信息,并据此准确复制出扫描物体全部表面的 3D 形象。

与其他三维扫描技术相比,结构光三维扫描具有便携性、高精度、快速及更适用于中小型物体的优点。在测量岩石结构面粗糙度方面,Grasselli 等^[7]介绍了 IMAC 干涉测量装置用于测量岩石结构面,精度为 $\pm 35\ \mu\text{m}$,空间分辨率为 0.5 mm。然而,由于结构光三维扫描仪无法扫描半透明物体,因此当物体为半透明或透明材料时,不建议使用结构光扫描仪对岩石结构面进行数字化扫描。

1.2.2 三维激光扫描仪

三维激光扫描法测量结构面粗糙度是利用激光光速测量到物体的距离。扫描仪发射一束脉冲光束,测量从表面反射回来的时间,由此计算出到该表面的相对距离。这种方法可分为两类,一类用于实验室测量,另一类用于现场测量。

通常使用室内或手持式激光扫描仪对实验室中小规模岩石结构面进行测量。该类仪器能够提供较小的测量范围和较高的测量精度,然而,该方法应用于结构面现场测量时具有一定挑战性。对于现场大型岩石结构面测量,使用三维激光扫描仪是最理想的方法。利用从三维激光扫描仪获得三维虚拟结构面模型,可以更方便地表征和量化大尺寸的不连续结构面粗糙度。近年来,大量学者已经进行了许多不连续结构面的粗糙度测量,主要方法是采用三维激光扫描仪来绘制岩石结构面的原位图。比如 Rahman 等^[8]使用激光扫描仪获取了岩石结构面的空间坐标。

三维激光扫描仪具有许多优点,能更客观、更精确、更便捷、更快速并且不需要任何物理接触就能获取高精度的结构面粗糙度,但成本和可用性限制了它的有效使用,且测量准确性和精度受操作条件影响,如表面覆盖、光照要求和岩石成分等

情况都会造成测量失真。

1.2.3 摄影测量

摄影测量是指从不同角度拍摄同一场景的两个或多个二维图像,从中获取三维信息的过程,常用方法可分为立体摄影测量和近距离摄影测量。立体摄影测量方法没有结构光扫描仪准确,但它可以提供岩体颜色信息。近距离摄影测量是一种成熟通用的三维测量技术,通常应用于广泛的跨学科领域。一些研究人员已经在实验室中使用近距离摄影测量来获取不连续结构面的几何结构,并以此评估其粗糙度。Baker 等^[9]和 Haneberg^[10]已将摄影测量用于结构面粗糙度预测,并表明该方法产生的数据可用于远程表征结构面的几何结构以估算粗糙度。García-Luna 等^[11]利用摄影测量技术并结合长焦镜头,对较大尺寸(10~15 m)的结构面粗糙度进行了表征。如今,近距离摄影测量越来越多地被用于岩石结构面粗糙度的测量,尤其是现场情况下结构面的粗糙度测量。

2 JRC 估算方法

2.1 视觉对比法

Barton 等^[2]首次提出了用视觉对比法来估测结构面的 JRC 值,并对 7 种不同岩石类型的 136 个天然岩体结构面进行了表征,每个样本都测量 3 个结构面,从每个剪切试验中计算出的 JRC 值分别被划分为 0~2、>2~4,直到>18~20,最终从 390 个结构面中选择了 10 个典型剖面。因此为大致确定结构面的 JRC 值,可以将被测量的结构面轮廓线与 10 条标准轮廓线进行视觉比较(图 1)。

1978 年,国际岩土力学学会将视觉对比法作为评价结构面粗糙度的标准方法,目前也已广泛用于实际。但由于视觉对比法基于测量者的主观判断,因此存在较大偏差,为减小这种偏差,许多学者通过不同方法来提高其准确性用以评估 JRC 值。Milne 等^[12]通过拍摄并将阴影产生的轮廓线与 10 条标准剖面线进行比较来估计 JRC 值。考虑到轮廓起伏度和频率是影响粗糙度的两个重要参数,Ünlüsoy 等^[13]提出通过测量样本表面轮廓和 10 条标准剖面线的空间频域中三阶多项式函数与功率谱密度之间的相似性来评估 JRC 值。由于视觉对比法的本质是评估目标剖面线与标准剖面线之间

编号	标准轮廓线	JRC
1		0~2
2		>2~4
3		>4~6
4		>6~8
5		>8~10
6		>10~12
7		>12~14
8		>14~16
9		>16~18
10		>18~20

1 5 10 cm

图 1 Barton 标准轮廓线^[2]

的相似性,因此可以利用图像识别和深度学习技术来更准确地预测 JRC 值。

2.2 试验反算法

估算 JRC 值的试验方法主要包括直剪试验、倾斜试验和推拉试验。试验反算法^[2]实质是先由试验获取到结果,再利用模型反算求得 JRC 值。但试验反算法受岩体尺寸影响,只能求出一定规模结构面的 JRC 值,而且由于试验采样困难,无法进行大量试验。并且如果样本选择不当,得到的结果还只是具有较低代表性,造成在实际工程中不利于工程实践。但因为获取到的 JRC 值比其他方法更准确,常被用于对比验证其他方法的准确性。

2.2.1 直接剪切(直剪)试验

直接剪切试验可以采用岩芯制备的近似圆形(或椭圆形)或正方形(或矩形)形状样品进行直剪试验(图 2)。直剪试验仪核心部件由剪切盒及法向、切向加载装置构成,不同结构的直剪仪原理基本相同。通过进行直剪试验,可以获得剪切应力与位移以及剪胀与位移的关系曲线。并根据直剪试验结果,可通过式(1)对试验结果进行反分析来估算 JRC 值^[2]。

$$JRC = \frac{\tan^{-1}(\tau_m / \sigma_n) - \varphi_r}{\lg(JCS / \sigma_n)} \quad (1)$$

室内中型直剪试验通过现场取样和室内试验数据的分析来获得试验指标,由制样过程造成结构面的起伏和歪斜。Wang 等^[14]、雍睿等^[15]利用有限

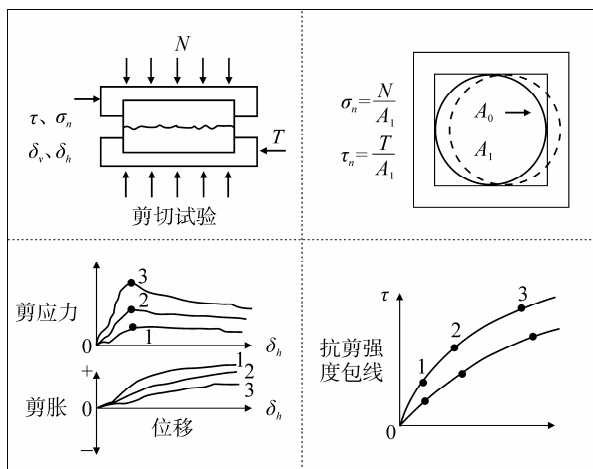


图2 直剪试验计算 JRC 值

元分析方法从微观上分析了平面直剪试验中样品制造的偏差. 而现场原位大型直剪试验全程在现场进行, 避免了实验室现场取样的难点, 从而确保了样品的原始状态, 但缺点是现场试验设备复杂, 成本高, 费时费力.

2.2.2 倾斜试验

Barton 等^[2]提出采用倾斜试验获取 JRC 和 ϕ_b , 参数 ϕ_b 实际反映了平直岩体表面的矿物学性质, 因此, 测量 ϕ_b 必须是平直且未风化的岩石表面. 倾斜试验多数是在非常低的法向应力下对较平坦的锯齿状结构面进行剪切试验, 当上部岩体发生滑动时, 就能得到此时的倾角 α , 相应试验计算如图 3 所示.

当在非常低的水平应力下发生滑动时, 倾斜角(α)是作用在结构面上的剪切应力和法向应力之比的函数:

$$\alpha = \arctan(\tau_0 / \sigma_{n0}), \quad (2)$$

$$\sigma_{n0} = \gamma b \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

式中: τ_0 为剪切应力; σ_{n0} 为作用在结构面上的法向应力; γ 为岩石密度; b 为岩体上半部分的厚度.

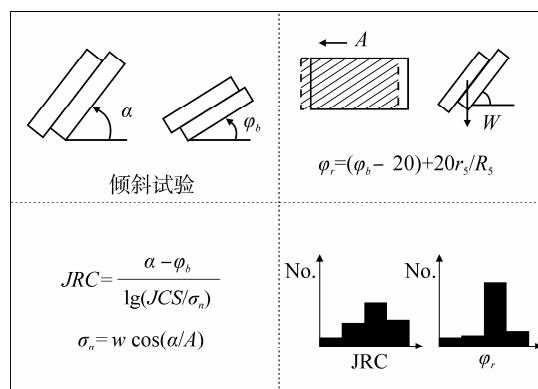


图3 倾斜试验计算 JRC 值

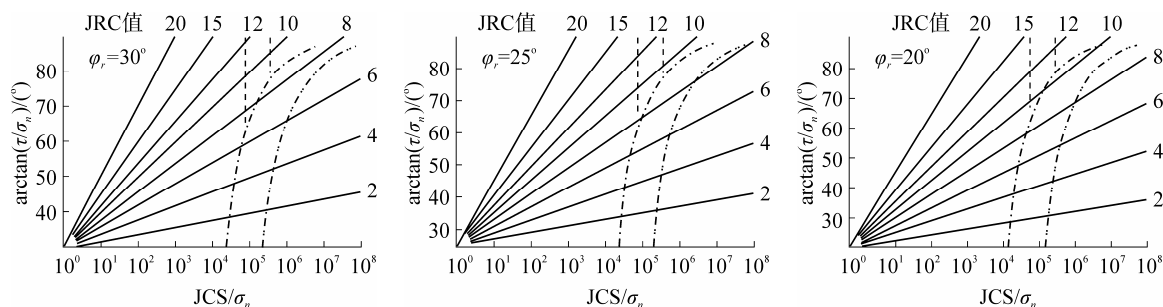
当 α 较大时, 式(3)对不均匀的应力分布进行了一定考虑. 更重要的是, 它将倾斜试验的应用范围限制在特别光滑表面上, 以便在不发生倾覆故障情况下进行试验. 因此在进行倾斜试验时, 可通过将 α 、 σ_{n0} 和 ϕ_r 值代入式(4)来计算 JRC 值.

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\lg(JCS / \sigma_{n0})}. \quad (4)$$

事实上, 作用在结构面上的法向应力是不均匀的, 虽然式(4)在一定程度上考虑了不均匀的应力分布, 但对 JRC 的估计值几乎没有影响, 更重要的是它将倾斜试验限制在结构面表面“足够光滑”, 并且不会发生倾覆破坏的情况. 图 4 表示了基于 ϕ_r 的 3 个实际值用于估算 JRC 值的倾斜试验应用范围^[1], 假设 2 个 b 值, 实验室样本为 20 mm(图 4 中点划曲线), 现场结构面为 200 mm(图 4 中双点划曲线), 此时 JCS 值为 100 MPa. 当图 4 中的曲线通过式(3)进行计算时, 显示从倾斜试验中获得的 JRC 最大值随 ϕ_r 的增加而减小.

2.2.3 推拉试验

结构面粗糙度系数可通过推拉试验进行估算. 试验时, 将结构面上半部分岩体沿平行于结构面的方向进行推拉, 下半部分岩体水平放置. 在这种

图4 确定结构面 JRC 值的倾斜试验和推拉试验的应用范围^[2]

情况下,上半部分岩体重量是唯一外部荷载.图4中直虚线显示了可使用推拉试验获得 JRC 值的大致范围.如图5所示,在进行推拉试验时,将试样叠置于平台上,运用钢丝绳、滑轮与重物对上盘岩体施加水平拉力,记录上盘滑动位移超过试样长度10%时的重物质量,每组试验至少重复5次.

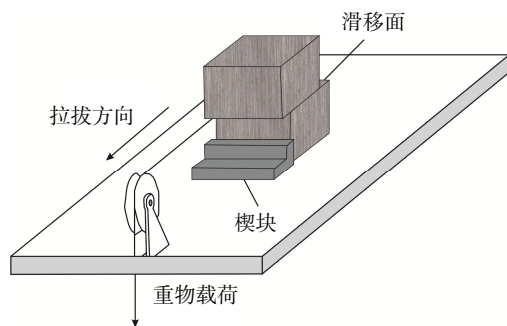


图5 推拉试验示意图

Barton 等^[2]表示,当平均 ϕ_r 值为 27.5° 时,136个试样的最大 JRC 值为12.通过对更大岩体和更多风化结构面进行现场推拉试验,可以准确确定粗糙度为20时结构面的 JRC 值(在这种情况下, JRS/σ_n 的范围可能低于2个数量级).因此,利用倾斜、推拉试验的组合试验来测量结构面粗糙度的方法是可行的,并且对于 JRC 值小于12的结构面粗糙度能够取得较好的评价结果^[2].根据推拉试验可反算结构面 JRC 的经验公式如下:

$$JRC = \frac{\arctan((T_1 + T_2)/N) - \phi_r}{\lg(JCS \times A/N)}, \quad (5)$$

式中: A 为结构面面积; T_1 、 N 分别为上部岩体在自重作用下产生的沿结构面及其法向上的分力; T_2 为外加拉力.

2.3 统计参数表征法

考虑到岩石结构面在几何结构中具有明显的结构特征和随机可变性,可以应用统计概念为随机过程提供结构关系.国际标准化组织(ISO)编撰了许多表征结构面特征的统计参数,尽管大多数

统计参数是从精密加工和机械磨损应用中得出的,但由于它们简单易用,因此被广泛应用于岩石结构面的粗糙度表征.由于岩石结构面的幅度和倾角特征对岩石结构面的力学行为具有重大影响,因此,将统计参数分为起伏幅度参数、起伏角度参数和综合参数.

2.3.1 起伏幅度参数

起伏幅度表征法是以贯穿于结构面轮廓线的一条基准线为基础,研究结构面表面轮廓线的起伏特征,进而表征其粗糙度^[16],具体如图6所示.

Barton 等^[2]表示岩石结构面的起伏幅度与剪切特性密切相关.许多学者表明,结构面轮廓线与基准线的偏差呈正态分布,因此通常使用算术平均值和均方根等方法来计算幅度参数.绝对高度算术平均值采用中心线平均值(CLA)表示,高度均方根(RMS)作为类似的起伏幅度参数作为补充,这两个幅度参数在数值上非常接近,并且都描述了轮廓线与基准线的平均偏差^[17].

表示结构面起伏特征的另一种方式是考虑结构面上不同起伏幅度的分布,可采用比如均方根(MSV)、起伏高度标准差(SD_h)、自相关函数(ACF)等方法.对于较大尺寸岩体,自相关函数值(ACF)更为准确,但应该尽可能地考虑到整个结构面的起伏情况. Sayles 等^[18]充分认识到自相关函数(ACF)不能识别重复特征的缺陷,也由此提出一种量化表面起伏形态变化的方法,即结构函数(SF).结构函数(SF)可关联具有特定采样间隔的结构面 JRC,还具有很强的定量相关性,但这种关系受采样间隔的影响很大,并且在回归关系中会造成不同采样间隔下参数间的差异很大.

Myers^[19]提出了参数坡度均方根(Z_2)、二阶导数均方根(Z_3)、区分坡向特征的起伏幅度均值(Z_4). Z_2 是一阶导数的均方根,表示结构面的平均局部坡度.当岩体结构面较平坦时,坡度通常较小,在这

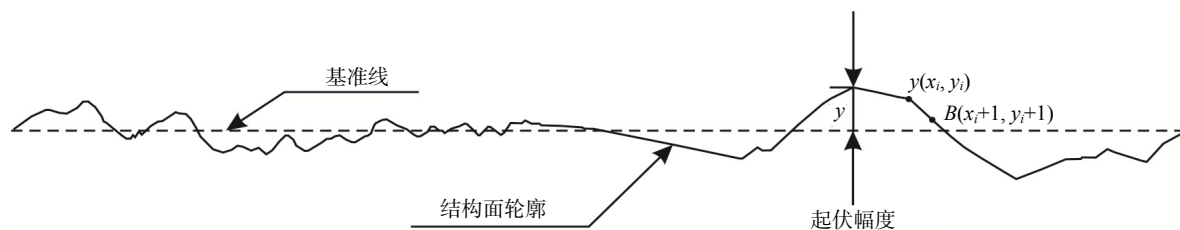


图6 结构面轮廓线起伏幅度表示示意图^[16]

种情况下, 二阶导数可以近似于局部曲率. 参数 Z_3 用于描述轮廓的平均局部曲率. Z_4 是在斜率为正情况下, 纵断面上测量距离与斜率为负的纵断面上测量距离之间的差值百分比.

对于参数 MSV、RMS、CLA、 Z_4 及 ACF, 基准线位置会影响参数的计算结果. 为消除此影响, Tse 等^[20]将给定的基准线称为中心线, 且中心线与结构面轮廓线围成面积相等的上下部分, 但此中心线的位置较难确定. 对于参数 Z_2 、 Z_3 和 SF, 研究的是轮廓线上两点的起伏差(图 6), 因此不受基准线位置的影响. 根据与 JRC 的相关性, Myers^[19]和 Krahn^[17]发现在这些参数中, Z_2 被证明是最接近、最准确的粗糙度描述参数.

Barton 等^[21]为解决 10 条标准轮廓线估测较长结构面粗糙度的难题, 在现场岩体力学试验基础上, 提出一种通过测量结构面起伏幅度来确定 JRC 的直边方法(图 7). 郭志^[22]通过结构面模型试验研究发现结构面存在的最大凸起体高度对于结构面力学效应具有控制作用, 这也是直边法测量结构面最大起伏高度以确定 JRC 值的物理基础. 杜时贵等^[23]运用小浪底粗糙度系数统计测量数据对直边

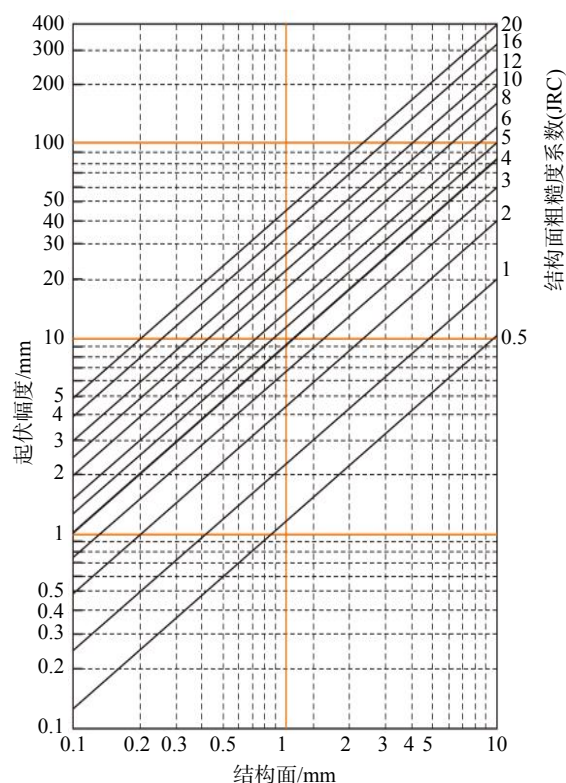


图 7 评估现场结构面粗糙度的直边法^[17]

法进行了测试, 并推导出相应修正直边法的数学

表 1 JRC 与幅度型参数之间的回归关系式

统计参数	公式	与 JRC 的回归关系	参考文献
MSV	$MSV = \frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx$	$JRC = 5.43 + 293.97MSV (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
RMS	$RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx}$	$JRC = 2.37 + 70.97RMS (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
CLA	$CLA = \frac{1}{L} \int_0^L y dx$	$JRC = 2.76 + 78.87CLA (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
ACF	$ACF = \frac{1}{L} \int_0^L f(x)f(x+Dx) dx$	$JRC = 5.47 + 293.80ACF (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
SF	$SF = \frac{1}{L} \int_0^L (f(x) - f(x+Dx))^2 dx$	$JRC = 2.69 + 245.70SF (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
		$JRC = 37.28 + 16.58 \lg SF (1.27 \text{ mm})$	文献[24]
		$JRC = 37.63 + 16.5 \lg SF (0.5 \text{ mm})$	文献[25]
Z_2	$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx}$	$JRC = -4.41 + 64.46Z_2 (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
		$JRC = -5.05 + 1.20 \tan^{-1} Z_2 (1.27 \text{ mm})$	文献[24]
		$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 (1.27 \text{ mm})$	文献[25]
		$JRC = 32.69 + 32.98 \log Z_2 (0.5 \text{ mm})$	文献[26]
Z_3	$Z_3 = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx}$	$JRC = -6.84 + 4.06Z_3 (1.27 \text{ mm})$	文献[20]
Z_4	$Z_4 = \frac{\sum (x_i)_p - \sum (x_i)_n}{L}$	$JRC = 10.14 - 2.68Z_4 (1.27 \text{ mm})$	文献[20]

表达式. 具体幅度型参数与 JRC 之间的回归关系式见表 1.

2.3.2 起伏角度参数

由于起伏幅度参数过于简单, 没有考虑结构面轮廓的倾斜角度, 而倾斜特征在力学行为表现中也起着重要作用. 在表征结构面粗糙度时, 当结构面上存在凹凸体倾斜角度明显不同时, 应考虑其分布情况. Reeves^[27]和其他学者对岩石结构面进行的粗糙度测量发现, 倾角分布为高斯分布. 此外, Yu 等^[24]也发现 SD_i (起伏角标准差)与 JRC 之间具有很强的相关关系, 并用参数 SD_i 来描述结构面粗糙度, 也给出了在不同采样间距下 JRC 与 SD_i 之间的回归关系式:

$$SD_i = \arctan \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dy}{dx} - \tan i_{ave} \right)^2 dx}, \quad (6)$$

$$JRC = 1.12SD_i - 5.06 \quad (0.25 \text{ mm}), \quad (7)$$

$$JRC = 1.14SD_i - 3.88 \quad (0.50 \text{ mm}), \quad (8)$$

$$JRC = 1.17SD_i - 2.57 \quad (1.00 \text{ mm}). \quad (9)$$

考虑到剪切方向的影响, Belem 等^[28]提出采用 S_{p+} (平均正向坡度统计参数)和 S_{p-} (平均负向坡度统计参数)来描述结构面剖面线在不同剪切方向上的粗糙度(图 8), 并用 θ_{p+} 表示 S_{p+} , θ_{p-} 表示 S_{p-} .

$$\theta_{p+} = \tan^{-1}(S_{p+}) = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{M_{x+}} \sum_{i=1}^{M_{x+}} \left[\left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \right)_+ \right]_i \right\}, \quad (10)$$

$$\theta_{p-} = \tan^{-1}(S_{p-}) = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{M_{x-}} \sum_{i=1}^{M_{x-}} \left[\left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \right)_- \right]_i \right\}, \quad (11)$$

式中, M_{x+} 和 M_{x-} 分别表示间隔为 Δx 时的正向坡度 $(\Delta z / \Delta x)_+$ 的总数及负向坡度 $(\Delta z / \Delta x)_-$ 的总数.

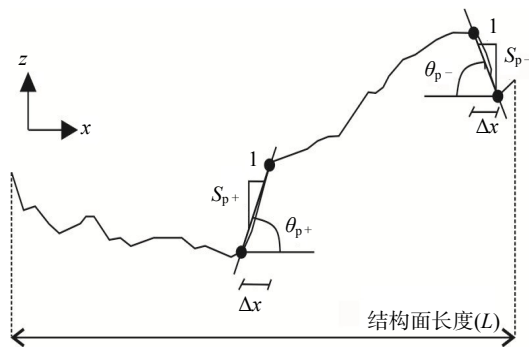


图 8 结构面轮廓线坡度参数表征示意图^[28]

2.3.3 综合参数

由于结构面轮廓线形貌具有复杂性, 采用一

种类型的参数无法全面表征其形貌粗糙特征, 因此可以使用组合参数来创建新的参数以准确获取 JRC 值. EL-Soudani^[29]提出用 R_p 表述物体的线粗糙, 该参数能同时反映起伏幅度和角度的部分共同特征. R_p 为迹线长度与其直线长度的比值, 这使得 R_p 值始终大于或等于 1; 当 R_p 大于 1 时, 意味着轮廓线是粗糙的, 其值越大, 表示结构面轮廓线越粗糙; R_p 值为 1 时, 表示为完全平滑的结构面. R_p 的三维参数 R_s 表示物体面粗糙度, 这种表征方法相对简单和直观, 此时 R_s 可用式(12)表示:

$$R_s = \frac{A_t}{A_n}, \quad (12)$$

$$A_t = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (13)$$

式(12)和式(13)中, A_t 为结构面表面实际面积; A_n 为结构面投影面积; A_i 为结构面单元的实际面积.

Yu 等^[24]计算了 10 条标准轮廓线的 R_p 值, 并建立了在不同采样间距下 $(R_p - 1)$ 与 JRC 的函数关系式, 经比较发现, 参数 $(R_p - 1)$ 与 JRC 的函数关系更紧密. Zhang 等^[30]提出参数 λ , 该参数综合考虑了起伏幅度和角度, 并对参数 Z_2 进行修改, 以确定在剪切方向粗糙度预测过程中考虑了倾角影响. 因此, 参数 λ 也可表示岩石结构面粗糙度的各向异性特征. 随后, Zhang 等^[31]通过修改参数 λ , 将其扩展到三维空间, 使其与三维 JRC 密切相关.

Grasselli 等^[32]认为, 只有在剪切方向上的结构面才会对剪切力学行为产生作用, 并以此为基础提出了剪切方向上倾角和有效接触面积比的概念. 基于 TIN 模型, Grasselli 提出岩体结构面三维粗糙度表征参数 θ_{ci} ($\theta_{ci} = \theta_{max}^* / C$), 该参数将剪切方向上的倾角和有效接触面积比结合在一起. Grasselli 等^[7]还进行了可变角度的剪切试验, 验证了 θ_{max}^* / C 参数还能反映结构面形貌的各向异性, 并给出了参数 θ_{max}^* / C 与 JRC 的函数关系式.

Cottrell^[33]指出当结构面的形状是一个规则的锯齿形时, 粗糙度参数 θ_{max}^* / C 将失去意义. 因此, Tatone 等^[34]建议用参数 $\theta_{max}^* / (C + 1)$ 表示剪切方向平均倾角及结构面粗糙度, 且该参数物理意义明确. 综合参数与 JRC 之间的回归关系式见表 2.

2.4 分形维数表征法

Mandelbrot^[35-36]最早提出分形的概念, 用来命

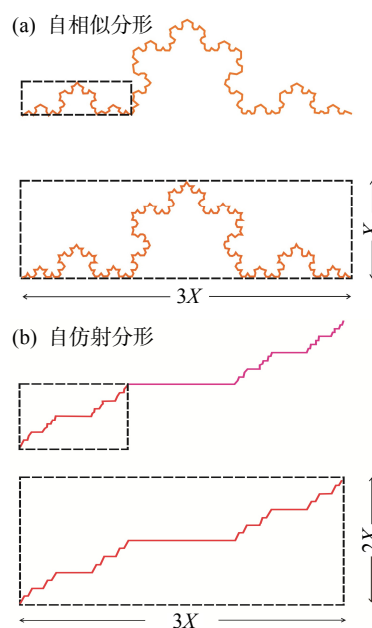
表2 JRC 与综合参数之间的回归关系式

统计参数	公式	与 JRC 的回归关系	参考文献
λ	$\lambda = \left(\frac{CLA}{L} \right)^\alpha (Z_2')^{1-\alpha}$	$JRC = \frac{40}{1 + e^{-20\lambda}} - 20(0.5 \text{ mm})$	文献[30]
$\theta_{\max}^* / (C+1)_{3D}$	$A_{\theta^*} = A_0 \left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right)^C$	$JRC = \left(\arctan \left(\tan(\varphi_b + (\theta_{\max}^* / C)^{1.18 \cos \alpha}) \right) \right) \cdot \left(1 + e^{-(\theta_{\max}^* / (9A_0 C))(\sigma_n / \sigma_1)} \right) - \varphi_b \Big) / \lg(JCS / \sigma_n)$	文献[7]
$\theta_{\max}^* / (C+1)_{2D}$	$L_{\theta^*} = L_0 \left(\frac{\theta_{\max}^* - \theta^*}{\theta_{\max}^*} \right)^C$	$JRC = 3.95 \left(\theta_{\max}^* / (C+1)_{2D} \right)^{0.7} - 7.98(0.5 \text{ mm})$ $JRC = 2.40 \left(\theta_{\max}^* / (C+1)_{2D} \right)^{0.85} - 4.42(1.0 \text{ mm})$ $JRC = 5.30 \left(\theta_{\max}^* / (C+1)_{2D} \right)^{0.605} - 9.49(0.5 \text{ mm})$	文献[34]
R_p	$R_p = \frac{1}{L} \sum \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$	$JRC = 558.68 \sqrt{R_p} - 557.13(0.25 \text{ mm})$ $JRC = 92.97 \sqrt{R_p - 1} - 5.28(0.25 \text{ mm})$ $JRC = 559.73 \sqrt{R_p} - 597.46(0.50 \text{ mm})$ $JRC = 92.07 \sqrt{R_p - 1} - 3.28(0.50 \text{ mm})$ $JRC = 702.67 \sqrt{R_p} - 699.99(1.00 \text{ mm})$ $JRC = 95.23 \sqrt{R_p - 1} - 2.62(1.00 \text{ mm})$	文献[19] 文献[24]

名高度不规则集合, 为分形应用奠定了基础. 分形主要有自相似分形和自仿射分形两种类型^[37](图9). 自相似分形是一种几何特征, 通过各种放大倍数保持其统计特性. 只有当自仿射分形在不同方向上的缩放方式不同时, 才会在统计上保持相似. 缩放行为被描述为在水平轴和垂直轴的对数空间中观察到一条线的斜率, 这条线的斜率与分形维数 D 直接或间接相关, 可描述分形的复杂性^[38]. 自相似分形和自仿射分形已被证实可用来量化岩石结构面粗糙度^[17], 但有学者表示岩石结构面是自仿射分形^[39]. 因此, 当使用自相似分形方法计算自仿射岩石结构面的分形维数时会遇到问题.

基于分形理论计算分形维数 D , 进而评价结构面粗糙度的方法较多, 比如有码尺法^[35]、变量图解法^[40]、光谱法^[41]、面积法^[42]、计盒法^[43]、直线尺寸法^[44]、粗糙度长度法^[38]、改进覆盒子法^[45]等. 众多学者采用不同方法计算了结构面的分形维数, 并且拟合得到 JRC 与 D 之间的回归关系式, 但部分学者仅基于 10 条标准剖面线进行拟合, 因此基于不同 JRC 与 D 之间回归关系式所得出的 JRC 值存在较大差异, 相关成果见表 3.

从本质上分析各表征参数, 不论是起伏幅度参数、起伏角度参数或是迹线长度参数, 都不能完

图9 分形图形示意图^[37]

全反映出结构面粗糙度的全部特性, 参数 Z_2 、SF、 JRC_v 及 SR_v 从本质上反映的都是结构面的起伏角度特征, 而且当此类参数采用不同采样间距计算时, 结果也不同. 需值得注意的是, 分形维数表征法是从空间几何表象抽象出一个特征参数来区分不同的几何体, 所以分形维数的获得不受采样间距的影响, 这也是该方法的最大优点, 但分形维数

还是无法有效表征粗糙度的各向异性特征.

表3 JRC 与分形维数 D 之间的回归关系式

回归方程	参考文献
$JRC = -1138.6 + 1141.6D$	文献[46]
$JRC = -1022.55 + 1023.92D$	文献[47]
$JRC = -0.87804 + 37.7844((D-1)/0.015) - 16.9304((D-1)/0.015)^2$	文献[48]
$JRC = \left(\frac{D-1}{4.413 \times 10^{-5}} \right)^{1/2}$	文献[49]
$JRC = 1647(D-1)$	文献[50]
$JRC = 209.75D - 204.15$	文献[51]
$JRC = 1507.054 + 1507.43D$	文献[52]
$JRC = -1022.65 + 1023.92D$	文献[53]
$JRC = 85.2671(D-1)^{0.5679}$	文献[54]
$JRC = 479.396(D-1)^{1.0566}$	文献[55]
$JRC = 56.63(D-1)^{0.4137}$	文献[56]
$JRC = -6298.61 + 6303.72D$	文献[57]
$JRC = 100(D-1)^{0.4} \left(1 - \frac{1}{\exp(300(D-1))} \right)$	文献[58]
$JRC = \frac{60(D-1)^{1.2}}{0.006 + (D-1)}$	文献[58]
$JRC = (D - 1.4733) / 0.0253 (0 \sim 14 \text{ mm})$	文献[59]
$JRC = (2.878 - D) / 0.0684 (14 \sim 20 \text{ mm})$	文献[59]
$JRC = 29.35(D-1)^{0.46}$	文献[61]
$JRC = 287.76(D-1)^2 + 126.9(D-1)$	文献[62]
$JRC = 972.41(D_z D_\theta D_K)^{-1.03} \times (A_z A_\theta A_K)^{-0.83} - 4.40$ (正向)	文献[63]
$JRC = 784.01(D_z D_\theta D_K)^{-1.03} \times (A_z A_\theta A_K)^{-0.83} - 2.27$ (反向)	文献[63]

在工程实践中, 在使用参数 MS、RMS、CLA、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、ACF、SF、 SD_i 以及分形维数表征法和直边法时, 用二维轮廓线表征结构面粗糙度较为简单, 但存在以偏概全, 用局部代替整体的缺陷, 还不能够确保粗糙度评估的准确性.

3 讨论

3.1 JRC 相关力学性质

3.1.1 尺寸效应

岩体结构面粗糙度具有尺寸效应, 而尺寸效应也影响着岩体的强度和变形能力. 从 20 世纪 70 年代至今, 在对结构面尺寸效应进行的各种试验研究中得出了不同的结论, 观察到的尺寸效应可分为 3 种类型: (1)正尺寸效应, 指岩石结构面的抗

剪强度随样本尺寸的增大而增大; (2)负尺寸效应, 指岩石结构面的抗剪强度随样本尺寸的增大而减小; (3)无尺寸效应, 指岩石结构面的抗剪强度不会随着样本尺寸的变化而变化.

众多学者在实践中发现 JRC 值与岩石结构面的规模有关, 通常具有相同结构面较大岩体的 JRC 值较低. 如图 10 所示, 对岩石结构面进行倾斜试验, 以评估从同一岩石结构面获得较大尺寸和较小尺寸样本的 JRC 值. 试验显示, 45 cm 长的岩体样本倾斜角度始终为 59° , 但将该样本锯成 18 个大小为 $4.8 \text{ cm} \times 9.8 \text{ cm}$ 的相同大小样本时, 这些小尺度样本的平均倾角为 67.2° . 根据倾斜试验反分析公式(式 6)计算 JRC 值时, 大尺寸样本预测 JRC 值为 5.2, 小尺寸样本预测 JRC 值为 8.8. 图 10 进一步显示, 较小块体具有更大自由度, 并且能感知到岩石结构面更大的起伏幅度, 因此, 较小尺寸岩体样本的 JRC 值偏大.

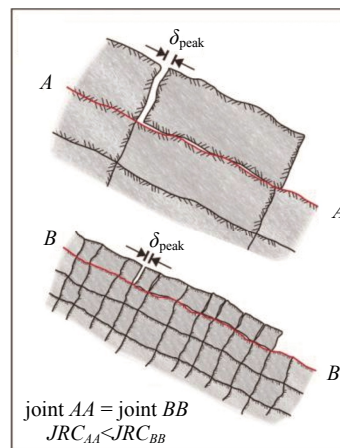
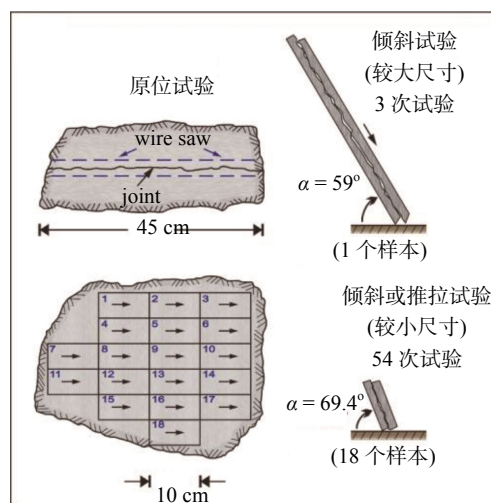


图10 岩石结构面的尺寸效应示例^[2]

对于 Barton 经验模型^[20], 由于其中 JRC 和 JCS 会随结构面尺寸的变化而变化, Barton 建议用下列两个关系式来修正尺寸效应对 JRC 和 JCS 的影响:

$$JRC = JRC_0 (L / L_0)^{-0.02JRC_0}, \quad (14)$$

$$JCS = JCS_0 (L / L_0)^{-0.03JCS_0}. \quad (15)$$

Fardin 等^[64]应用分形维数描述结构面的粗糙度, 并分析了粗糙度的尺寸效应, 结果表明随着结构面尺寸的增大, 分形维数在逐渐减小, 当尺寸增大到一定程度时, 分形维数接近一个常数. 后来一些研究人员也发现, 当岩石结构面规模达到一定值时, 表面粗糙度在统计时会逐渐趋于稳定. Jing 等^[65]将该尺寸定义为平稳性阈值(ST), 类似于裂隙岩石代表性基本体积(REV)的定义, 允许在大范围内建立裂隙表面形态的代表性几何参数.

3.1.2 各向异性

Barton 等^[66]指出, 各向异性在岩石工程中无处不在, 并且由于各向异性结构的综合效应, 其行为普遍存在. 鉴于岩石结构面是通过多种复杂断裂机制形成的, 加上岩体本身的复杂性, 导致结构面粗糙度具有明显的各向异性. 结构面粗糙度相对于不同方向上的变化被认为是岩石结构面各向异性行为的重要来源.

在过去几十年中, 国内外学者已对结构面粗糙度各向异性进行了许多研究, 在同样考虑粗糙结构面方向性的情况下, 也利用了不同参数来描述结构面粗糙度的各向异性. Yang 等^[67]提出二维参数 Hurst 指数 H_{2D} , Grasselli 等^[7]提出参数 θ_{max}^* / C , Tatone 等^[34]提出参数 $\theta_{max}^* / (C+1)$ 用来描述结构面的各向异性, Babanouri 等^[68]用分形维数 D 和标准差函数 σ 来表征结构的各向异性特征, 葛云峰等^[69]采用参数 BAP 表征结构面的各向异性, Chen 等^[70]通过变差函数表征了粗糙度的各向异性, 并基于地质统计学方法提出 JRC_v 参数法和 SR_v 参数法用于表征粗糙度各向异性特征. 图 11 显示了参数 SR_v 表征结构面粗糙度各向异性.

结构面粗糙度不仅随方向变化, 还随尺寸而变化, 而且各向异性和尺寸效应的影响是相互关联, 因此在考虑结构面尺寸效应时, 还应考虑结构面的各向异性. Tatone^[26]研究了结构面粗糙度对采样间距大小的依赖性, 结果表明随着采样间距大小的增加, 当不同方向上粗糙度参数收敛到一个

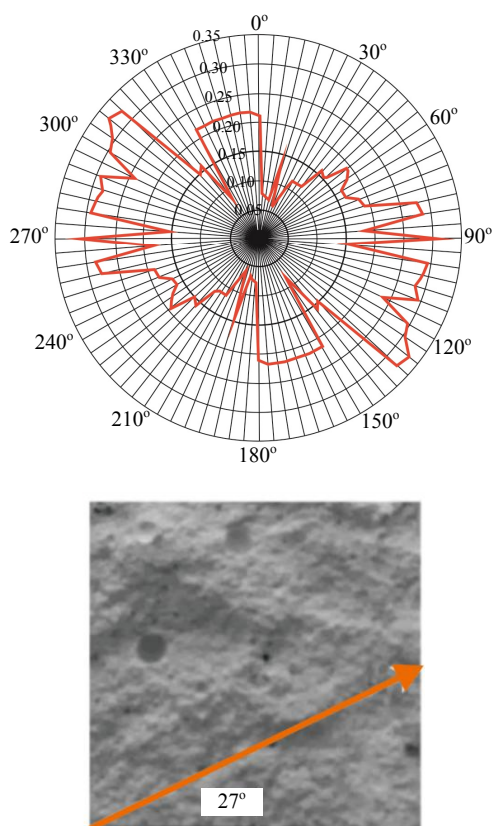
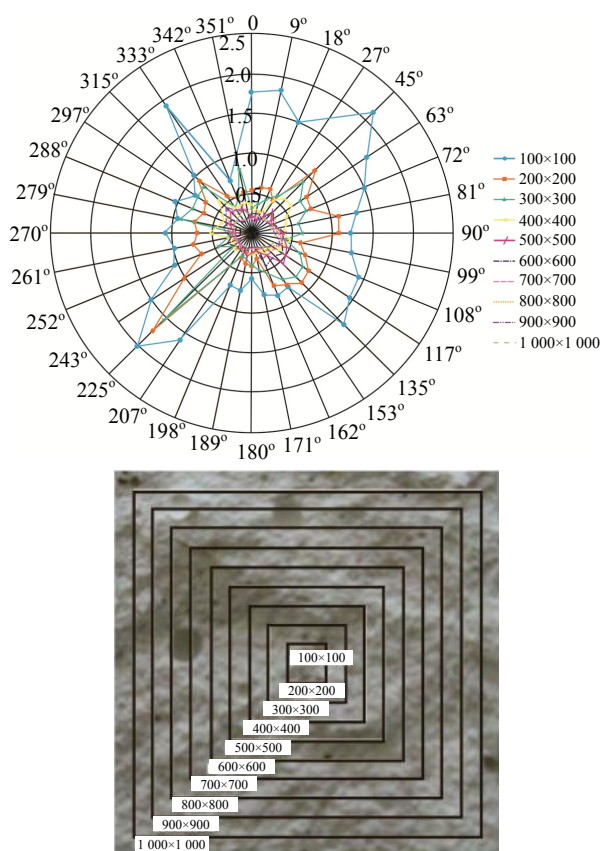


图 11 SR_v 表征结构面粗糙度各向异性^[70]

定值时, 最终导致各向异性变化的减少. Chen 等^[70]考虑了某方向正向和逆向粗糙度的不同, 采用 SR_v 法来表征结构面粗糙度各向异性, 具体如图 12 所示. 此外, Zhao 等^[71]指出结构面的各向异性会随着采样尺寸的增加而变得更加明显, 并且在 200 mm 长度时, 区域稳定.

3.2 不同采样间距对 JRC 的影响

尽管天然岩石结构面是连续的, 但数字化剖面数据仅在一定水平间隔范围内可用. 为确定粗糙度参数, 大量学者对通过各种测量方法获得的结构面离散数据点进行定量分析, 这些方法均采用了不同的采样间距. 经研究发现, 具有较大采样间距生成的轮廓线往往比具有较小采样间隔的轮廓线更平滑, 这是由于将两个相邻数据点与线性线段相连时忽略了它们之间的波动, 因此采样间距会影响 JRC 评估的准确性. 为更准确地评估 JRC, 许多研究人员通过考虑采样间距的影响提出了各种经验方程, 部分不同采样间距下 $\theta_{max}^* / (C+1)$ 与 JRC 的函数关系式已在表 2 中列出, 而表 4 列举了 Z_2 与 JRC 之间在不同采样间距下的关系式.

图 12 结构面各向异性与尺寸效应耦合特征图^[70]表 4 Z_2 与 JRC 在不同采样间距下的回归方程

参考文献	回归方程	采样间距/mm
文献[20]	$JRC = 32.2 + 32.47 \lg Z_2$	1.27
文献[24]	$JRC = 60.31Z_2 - 4.51$	0.25
文献[24]	$JRC = 61.79Z_2 - 3.47$	0.50
文献[24]	$JRC = 64.22Z_2 - 2.31$	1.00
文献[25]	$JRC = 32.69 + 32.98 \lg Z_2$	0.50
文献[25]	$JRC = 51.85Z_2^{0.60} - 10.37$	0.50
文献[26]	$JRC = 55.03Z_2^{0.74} - 6.10$	1.00

尽管上述研究已经验证了采样精度对 JRC 计算的影响,但对于确定采样间距是否影响 JRC 估值的阈值还没有足够的研究.由于 JRC 预测值没有被广泛的关系式或建议的采样间距所接受,因此学者们越来越关注对采样间距的研究. Yong 等^[72]提出一种基于傅里叶级数确定最大采样间距的方法,该研究发现在先前研究中使用的大多数采样间距都小于实验室尺寸结构面($<1 \text{ m}^2$)的最大采样间距,然而在研究现场规模的结构面($\geq 1 \text{ m}^2$)粗糙度时,所用的采样间距却通常较大.

3.3 趋势向对 JRC 的影响

由于结构面表面形貌特征通常具有相当大的随机性和不规则性,这就导致结构面不可避免地存在非平稳趋势向,其趋势向对于岩体力学行为有着很大影响,并对结构面剪切强度评估的准确性也产生了不可忽略的影响.如图 13 所示,非平稳趋势向指当岩体结构面的参考平面与剪切平面平行时,切割后的结构面试样与剪切平面存在夹角,非平稳趋势向会使作用在实际剪切面上的法向应力和剪切应力与外部施加的应力值不同,从而影响结构面抗剪强度预测的准确性.

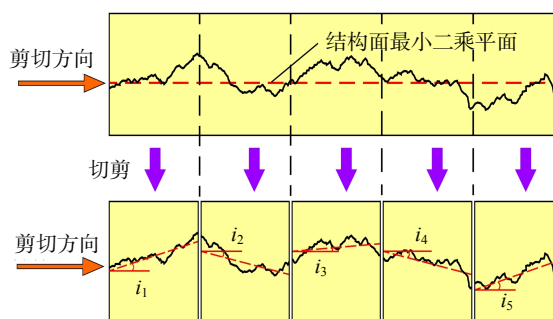


图 13 岩体结构面及结构面试样趋势向对比

Ge 等^[73]认为,当结构面存在非平稳趋势向时,粗糙度和趋势向共同决定了结构面的抗剪强度,此时通常采用结构面表面形貌的平均倾角对其趋势向进行表征,并将直剪试验数据进行拟合,以得到抗剪强度公式.雍睿等^[15]根据结构面的剪切方向与趋势向的相对位置关系,对结构面抗剪强度参数理论解析公式进行修正,并通过室内平直结构面模型试验验证了理论解析的修正方法.王昌硕^[16]通过保持水泥砂浆平面与结构面最小二乘拟合平面平行,对样本进行平稳化处理,消除了趋势向对其抗剪强度的影响.刘维明等^[74]通过结构面趋势向参数 α (结构面沿剪切方向的倾角)和 β (结构面沿垂直于剪切方向的偏转角)来定向表征结构面趋势向,并在此基础上建立了考虑非平稳趋势向影响的结构面抗剪强度模型,也通过直剪试验验证了该模型的准确性.

4 结论

自 Barton 提出 JRC 以来,许多学者开展了研究工作,也收获了大量的研究成果,该研究为非线性抗剪强度提供了解决方案.50 年来, JRC 的相关研

究经历了不同阶段: 试验研究阶段、应用探索阶段、理论研究阶段和应用研究阶段。新技术的应用也使 JRC 定量表征的方法越来越多, 准确性也得到了进一步提高, 但每种方法的适用范围各有不同。为此本文进行了总结和思考, 主要有以下几点:

(1)虽然现代测量工具(如摄影测量、三维激光扫描仪等)极大地方便了岩体结构面形貌信息的获取, 进而为量化描述其形貌特征提供了基础保障, 但表征参数的合理性仍需力学试验来验证。由于在自然界中不存在形貌特征完全相同的结构面, 而 3D 打印技术的应用可有效解决结构面不可重复试验的问题, 未来可以应用此技术进行结构面各向异性、尺寸效应的试验研究。

(2)现有粗糙度评价方法逐渐由二维尺度发展至三维尺度, 由单一类型粗糙度评价参数发展至多种参数相结合, 由单纯考虑结构面几何形态发展至同时考虑结构面表面形态与结构面剪切破坏机制, 但目前的三维粗糙度评价参数仍存在物理意义不明确, 未与结构面抗剪强度建立较强的联系等诸多不足。因此, 对三维粗糙度评价参数有待进一步研究。

(3)分形理论是定量表征 JRC 的有效方法。由于分形维数的获取是在不同间隔下, 应用最小二乘法计算其斜率, 在求解过程中更偏重解决在多大间隔范围内分形维数是定值的问题, 与其他参数的获取有本质不同。其他参数求解是在某采样间隔下获得的结果, 采用了不同间隔, 得到的结果甚至差别很大, 因此, 其他表征参数的随机性更大。但从目前研究结果来看, 有效的结构面分形维数计算方法仍值得深入研究。

(4)岩体结构面各向异性和尺寸效应特征一直都是研究焦点。结构面各向异性和尺寸效应特征相互关联, 只有在充分认识到不同尺寸下的各向异性特征后, 才能准确把握其尺寸效应; 只有在明确工程岩体结构面合理尺度的前提下, 研究其各向异性特征才更有现实意义。

(5)JRC 被国际岩石力学学会作为评估结构面粗糙度的标准方法, 是影响结构面抗剪强度的重要参数, 对研究岩体稳定性具有重要意义。量化研究 JRC 有利于分析结构面的形貌特征对其力学性质、水力学性质、宏观结构面岩体力学性能的影响,

才能使其在实际工程应用中具有更重要的意义。

参考文献:

- [1] BARTON N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanic Abstracts, 1978, 15(6):319-368.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1/2):1-54.
- [3] BANDIS S C. Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints[D]. Leeds, UK: University of Leeds, 1980.
- [4] WANG C S, YONG R, DU S G, et al. Representative sampling method for laboratory testing on shear strength of rock joints[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 974455.
- [5] DU S G. Simple longitudinal profilometer and its application to the study of roughness coefficients on structural surfaces of rock masses[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 1992(3):91-95.
- [6] 夏才初, 孙宗顺. 节理表面形貌的室内和现场量测及其应用[J]. 勘察科学技术, 1994(4):27-31.
- [7] 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.
- [8] RAHMAN Z, SLOB S, HACK R. Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data[C]//10th International congress International Association of Engineering Geology and The Environmen. Nottingham, United Kingdom, 2006.
- [9] BAKER B R, GESSNER K, HOLDEN E J, et al. Automatic detection of anisotropic features on rock surfaces[J]. Geosphere, 2008, 4(2):418-428.
- [10] HANEBERG W C. Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds[C]//Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands. Oxford, United Kingdom: Taylor & Francis, 2007:101-106.
- [11] GARCÍA-LUNA R, SENENT S, JIMENEZ R. Using telephoto lens to characterize rock surface roughness in SfM models[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(5):2369-2382.

- [12] MILNE D, HAWKES C, HAMILTON C. A new tool for the field characterization of joint surfaces[C]// Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada, 2009.
- [13] ÜNLÜSOY D, SÜZEN M L. A new method for automated estimation of joint roughness coefficient for 2D surface profiles using power spectral density[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125:104156.
- [14] WANG C S, YONG R, LUO Z Y, et al. A novel method for determining the three-dimensional roughness of rock joints based on profile slices[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56:4303-4327.
- [15] 雍睿, 胡新丽, 唐辉明, 等. 岩体结构面直剪试验制样误差效应研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11):4643-4651.
- [16] 王昌硕. 岩体结构面粗糙度与峰值剪切强度定量评价方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [17] KRAHN J, MORGENSTERN N R. The ultimate frictional resistance of rock discontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2):127-133.
- [18] SAYLES R S, THOMAS T R. The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: a practical alternative to correlation[J]. Wear, 1977, 42(2): 263-276.
- [19] MYERS N O. Characterization of surface roughness[J]. Wear, 1962, 5(3):182-189.
- [20] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5):303-307.
- [21] BARTON N, BANDIS S. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock[C]//Proceedings of the 23rd US Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, California, US, 1982.
- [22] 郭志. 岩体工程地质力学问题(四)[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [23] 杜时贵, 陈禹, 樊良本. JRC修正直边法的数学表达[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2):36-43.
- [24] YU X B, VAYSSADE B. Joint profiles and their roughness parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4):333-336.
- [25] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3):243-251.
- [26] TATONE B S A. Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory [D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2009.
- [27] REEVES M J. Rock surface roughness and frictional strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(6): 429-442.
- [28] 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.
- [29] EL-SOUDANI S M. Profilometric analysis of fractures[J]. Metallography, 1978, 11(3):247-336.
- [30] ZHANG G C, KARAKUS M, TANG H M, et al. A new method estimating the 2D joint roughness coefficient for discontinuity surfaces in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 72:191-198.
- [31] ZHANG G C, KARAKUS M, TANG H M, et al. Estimation of joint roughness coefficient from three-dimensional discontinuity surface[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(9):2535-2546.
- [32] GRASSELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6):789-800.
- [33] COTTRELL B. Updates to the GG-shear strength criterion[D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2009.
- [34] 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.
- [35] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775):636-638.
- [36] MANDELBROT B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman, 1983.
- [37] MARSCH K, FERNANDEZ-STEEGER T M. Comparative evaluation of statistical and fractal approaches for JRC calculation based on a large dataset of natural rock traces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4):1897-1917.
- [38] MALINVERNO A. A simple method to estimate the fractal dimension of a self-affine series[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(11):1953-1956.
- [39] WANG C S, WANG L Q, DU S G, et al. Investigation on

- the indeterminate information of rock joint roughness through a neutrosophic number approach[J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2021, 129(2): 973-991.
- [40] BERRY M V, LEWIS Z V. On the Weierstrass-Mandelbort fractal function[C]//*Proceedings of the Royal Society of London, London*, 1980:459-484.
- [41] CLARKE K C. Computation of the fractal dimension of topographic surface using the triangular prism surface area method[J]. *Computers & Geosciences*, 1986, 12(5): 713-722.
- [42] FEDER J. *Fractal*[M]. New York: Plenum Press, 1988.
- [43] MATSUSHITA M, OUCHI S. On the self-affinity of various curves[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1989, 38(1/2/3):246-251.
- [44] 张亚衡, 周宏伟, 谢和平. 粗糙表面分形维数估算的改进立方体覆盖法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3192-3196.
- [45] TURK N, GREIG M, DEARMAN W R, et al. Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension[C]//*28th US Symposium on Rock Mechanics*, University of Arizona, 1987:1223-1236.
- [46] CARR J R, WARRINER J B. Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1989(2):253-263.
- [47] LEE Y H, CARR J R, BARR D J, et al. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(6):453-464.
- [48] WAKABAYASHI N, FUKUSHIGE I. Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength[C]//*Proceedings conference on Fractured and Jointed Rock Masses*. Lake Tahoe: Lawrence Berkeley Laboratory, 1992:101-110.
- [49] 刘松玉. 节理粗糙度的分维测定法[J]. *勘察科学技术*, 1993(6):26-29.
- [50] 秦四清, 张倬元, 王士天, 等. 节理粗糙度曲线的分维特征[J]. *成都地质学院学报*, 1993, 20(4):109-113.
- [51] 杨更社. 岩体节理面的分形与分维研究[J]. *西安矿业学院学报*, 1993(3):212-217.
- [52] 祝玉学. 岩石节理表面粗糙度的分形表征[J]. *中国矿业*, 1994, 3(5):51-56.
- [53] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(1):18-23.
- [54] 周创兵, 熊文林. 不连续面的分形维数及其在渗流分析中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 1996(6):1-6.
- [55] 冯夏庭, 王泳嘉. 岩石节理力学参数的非线性估计[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(3):268-272.
- [56] 张林洪. 结构面抗剪强度的一种确定方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1):114-117.
- [57] 许宏发, 李艳茹, 刘新宇, 等. 节理面分形模拟及 JRC 与分维的关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(11): 1663-1666.
- [58] 朱珍德, 邢福东, 渠文平, 等. 岩石-混凝土两相介质胶结面粗糙系数的分形描述[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(1): 20-25.
- [59] 朱珍德, 邢福东, 渠文平, 等. 岩石-混凝土两相介质胶结面抗剪强度分形描述[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增刊 1):2910-2917.
- [60] 曹平, 贾洪强, 刘涛影, 等. 岩石节理表面三维形貌特征的分形分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊 2):3839-3843.
- [61] 游志诚, 王亮清, 杨艳霞, 等. 基于三维激光扫描技术的结构面抗剪强度参数各向异性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊 1):3003-3008.
- [62] 张传庆, 郭宇航, 徐金顺, 等. 基于功率谱密度的评估岩石节理粗糙度新方法[J]. *岩土力学*, 2022, 43(11): 3135-3143.
- [63] FARDIN N, STEPHANSSON O, JING L R. The scale dependence of rock joint surface roughness[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(5):659-669.
- [64] FARDIN N, FENG Q, STEPHANSSON O. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2):329-335.
- [65] JING L, HUDSON J A. Fundamentals of the hydro-mechanical behaviour of rock fractures: roughness characterization and experimental aspects[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(1):157-162.
- [66] BARTON N, DE QUADROS E F. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4):252.e1-252.e14.
- [67] YANG Z Y, DI C C, LO S C. Two-dimensional Hurst index of joint surfaces[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(4):323-345.
- [68] BABANOURI N, KARIMI N S, SARAFRAZI S. A hybrid particle swarm optimization and multi-layer perceptron algorithm for bivariate fractal analysis of rock

- fractures roughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60:66-74.
- [69] 葛云峰, 唐辉明, 黄磊, 等. 岩体结构面三维粗糙度系数表征新方法. 岩石力学与工程学报[J]. 2012, 31(12): 2508-2515.
- [70] CHEN S J, ZHU W C, YU Q L, et al. Characterization of anisotropy of joint surface roughness and aperture by variogram approach based on digital image processing technique[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3):855-876.
- [71] ZHAO L H, YU C H, CHENG X, et al. A method for seismic stability analysis of jointed rock slopes using Barton-Bandis failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 136: 104487.
- [72] YONG R, YE J, LI B, et al. Determining the maximum sampling interval in rock joint roughness measurements using Fourier series[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101:78-88.
- [73] GE Y F, TANG H M, ELDIN M A M E, et al. A description for rock joint roughness based on terrestrial laser scanner and image analysis[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):1-10.
- [74] 刘维明, 王昌硕, 张希巍, 等. 考虑非平稳趋势向影响的结构面抗剪强度模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2):378-390.

Current status of research on methods for determining joint roughness coefficients

ZHU Wanwan, WANG Changshuo, YONG Rui

(Rock Mechanics Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The Joint Roughness Coefficient (JRC) of a rock mass is an important parameter that affects the shear strength of the structural face of rock mass, whereas the shear strength of the structural face is an important factor affecting the stability of the rock mass. In the past 50 years, researchers have proposed various methods to quantify nodal roughness, but so far, among all the roughness parameters proposed in the research, the JRC is the most widely used one in practice. JRC has the advantages of being simple in form, easy to estimate, and explicitly accounting for dimensional effects, which have made it the most widely used parameter for quantifying the roughness of structural surfaces since it was proposed. As a result, JRC has attracted the attention of many scholars, and there are related methods being developed for quantitatively characterizing JRC in many fields. Due to this development trend, an overview of the methods for determining structural surface roughness coefficients is presented in this paper, focusing on methods for obtaining the surface morphology of rock structural surfaces, the intrinsic properties and applicability of the quantitative roughness characterization parameter, and the description of the size effect and anisotropy of rock structural surfaces. In addition, the effects of sampling spacing and structural surface trend direction on JRC are discussed, and the prospects of future improvement and extension of the existing JRC-related methods in rock engineering are also elaborated.

Key words: rock structure surface; roughness; research status; Joint Roughness Coefficient (JRC)

(责任编辑 章践立)