



考虑采样间距的岩石节理面粗糙度表征 与强度预测方法

史振宁^{a,b}, 包德伟^a, 王子航^a, 朱健^a, 曾诗阳^a

(长沙理工大学 a. 交通运输工程学院; b. 公路养护技术国家工程研究中心, 长沙 410114)

摘要: 岩石节理面粗糙程度是决定其抗剪强度的最主要因素, 当前岩石节理面粗糙度多采用起伏体斜率均方根(Z_2)表达, 该参数与节理面数值化过程中的采样间距密切相关。为了进一步提高岩石节理面粗糙度的计算精度, 根据不同采样间距对岩石节理面进行重构, 计算节理面 Z_2 值, 开展节理面直剪试验并根据结果反推JRC值, 建立JRC与采样间距和 Z_2 值的函数关系, 提出考虑采样间距的节理面粗糙度表征方法。结果表明: 不同类型岩石劈裂后节理面粗糙度不同, 花岗岩节理面粗糙度最大, 石英岩次之, 最后为红砂岩和泥岩; 不同节理面轮廓线的 Z_2 值均随着采样间距的增大呈线性下降的规律, 且节理面的起伏程度越大, 采样间距对 Z_2 值的影响越为明显。基于对数函数建立考虑采样间距的节理面粗糙度系数计算公式, 该式较原有JRC预测模型的物理意义更加明晰且预测精度更高。

关键词: 岩石节理面; 节理面粗糙度; 采样间距; 抗剪强度

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Characterization of rock joint surface roughness and strength prediction method considering sampling interval

SHI Zhenning^{a,b}, BAO Dewei^a, WANG Zihang^a, ZHU Jian^a, ZENG Shiyang^a

(a. School of Transportation Engineering; b. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: The roughness of rock joint surfaces is the most important factor in determining their shear strength. Currently, the roughness of rock joint surfaces is mostly expressed using the root mean square slope (Z_2) value, which is closely related to the sampling interval in the process of digitizing joint surfaces. To further improve the calculation accuracy of rock joint surface roughness, this study reconstructs rock joint surfaces based on different sampling intervals, calculates the Z_2 values of the joint surfaces, conducts direct shear tests on the joint surfaces, and inversely derives the JRC values based on the test results. A functional relationship between JRC, sampling interval, and Z_2 values is established, proposing a joint surface roughness characterization method that considers sampling intervals. The main research results are as follows: First, the roughness of joint surfaces varies among different types of rocks after splitting, with granite exhibiting the highest roughness, followed by

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 湖南省自然科学基金(2025JJ50248); 湖南省教育厅青年基金(22B0295)

作者简介: 史振宁(1990-), 男, 副教授, 主要从事边坡稳定性研究, E-mail: shizhenning@126.com。

Received: 2024-10-09

Foundation items: Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2025JJ50248); Youth Fund Project of Hunan Provincial Department of Education (No. 22B0295)

Author brief: SHI Zhenning (1990-), associate professor, main research interest: slope stability, E-mail: shizhenning@126.com.

quartzite, and then red sandstone and mudstone. Second, the Z_2 values of different joint surface contour lines show a linear decrease with the increase of sampling interval. And the greater the fluctuation of the joint surface, the more obvious the influence of sampling interval on Z_2 value. A calculation formula for the joint surface roughness coefficient, which considers the sampling interval, was established based on a logarithmic function. This new formula offers clearer physical meaning and higher prediction accuracy compared to the original JRC prediction model.

Keywords: rock joint surface; roughness of joint surface; sampling interval; shear strength

岩体受到地质作用、外界环境变化以及人工开挖等多种因素的综合作用,其内部极易形成贯通性节理面,这些节理面对于路堑边坡、隧道等工程结构的安全性和稳定性会产生重要影响^[1-2]。节理面的粗糙程度是影响岩体节理面抗剪强度的关键因素之一,因此,如何准确描述节理面的粗糙度,对于深入分析岩体力学特性以及提高岩土工程安全性具有极其重要的意义。

为了更好地量化节理面粗糙度对岩体力学性质的影响,不同时期的学者们进行了大量的研究和探索。20世纪70年代,Barton等^[3-4]提出采用节理面粗糙度系数(JRC)来表征节理面的粗糙形貌,同时引入节理面岩壁的单轴抗压强度(JCS),通过试验总结得出JRC-JCS模型,并提出可采用10条标准剖面线来对比估算其他轮廓线的JRC值。为了避免通过视觉对比估算轮廓线JRC值的主观性,从20世纪70年代至今,学者们提出了众多节理面粗糙度表征的有效方法,其中以统计参数法和分形维数法为主。在统计参数方面,Tse等^[5]、Tatone等^[6]、王昌硕等^[7]分别提出了利用 Z_2 、 $\theta_{\max}^*/(C+1)^{2D}$ 和 I_{ave} 等统计参数来估算JRC值的关系模型;陈世江等^[8]通过10条标准轮廓线来分析 Z_2 与结构函数SF分别与采样间距(SI)之间的规律,提出了在一定采样间距范围内估算JRC值的公式。在节理面分形理论方面,孙盛玥等^[9]运用谱分析方法,计算节理面一阶大起伏和二阶小凸起的分形维度及均方根表征的粗糙度,优化了节理面三维表征方法,有助于进一步分析节理面剪切过程;许丹等^[10]利用钻孔摄像技术获取岩石节理全景图,将提取出的节理轮廓线与Barton提出的10条标准剖面曲线对比得到轮廓线的JRC值,并计算其分形维数,利用最小二乘法拟合出JRC与分形维数之间的关系,结果表明二者呈现二次函数的关系。

尽管这些方法在一定程度上提高了节理面粗糙度的表征精度,但在实际应用中,采样间距仍很大程度上影响了轮廓线的形貌,从而影响JRC的计算结果。为了研究采样间距对节理轮廓线形貌统计参数的影响,Hu等^[11]利用3个统计参数 Z_2 、SF和

R_p 来分别分析节理轮廓线在不同采样间距下的敏感性,结果显示SF对不同采样间距最敏感,而 Z_2 和 R_p 对不同的采样间距的响应较小;为了确定合适的采样间距,Ge等^[12]通过激光扫描获取岩石节理面,并利用 Z_2 和 SD_i 参数与采样间距呈幂函数分布的关系曲线上的拐点来确定轮廓线合适的采样间距;Yan等^[13]提出了一种新的粗糙度参数 A_{AHD} (平均等效高度差)来分析花岗岩节理形貌,发现采样间距固定时,新参数随剪切方向变化而表现出各向异性。孙辅庭等^[14]利用10条标准剖面线来分析 Z_2 、 R_p 、SF、 I_{ave} 与采样间距的关系,并建立了标准轮廓粗糙度参数与JRC间的经验公式。

由于原岩节理无法重复剪切,限制了同一节理面的强度测试。因此,利用岩石相似材料制作相同节理试样开展剪切试验成为一种有效且经济的方案,近年来被众多学者广泛研究。刘晓冀等^[15]通过压汞试验和电镜扫描试验,研究了不同荷载下炭质泥岩粗粒土的微观结构变化,认为利用原岩开展的试验结果代表性较为有限。相比之下,金磊磊等^[16]利用水泥砂浆制作人工相同节理试件,开展不同法向应力状态下的直剪试验,研究发现,节理剪切破坏以张拉破坏为主,而不是单纯的压缩破坏;Ban等^[17]利用水泥砂浆制作花岗岩节理特征的试样并开展恒法向荷载下的直剪试验,引入新参数 A_{HD0} 和 D_{AHD} 表征粗糙度,结果发现等效高差的分布特征与磨损面积的分布规律一致;付宏渊等^[18]利用粉砂质泥岩相似材料试样开展不同围压下蠕变试验,结果发现随着偏应力增加,试样稳态蠕变速率与偏应力呈现指数关系。

综上所述,尽管当前在节理面轮廓线粗糙度研究方面已经取得了诸多成果,但是关于采样间距对节理面粗糙度影响的定量研究仍不够全面。为此,笔者利用岩石相似材料开展节理面剪切试验,反算节理面二维轮廓线的JRC值,并基于Tse^[5]等提出的 Z_2 与JRC之间的关系方程,引入采样间距,构建节理面JRC预测新模型。该模型综合考虑采样间距和 Z_2 对JRC值的影响,旨在提高节理面粗糙度的计算精度,为岩石节理面力学性质的分析提供更可靠

的理论支持。

1 不同类型岩石节理制备

1.1 劈裂实验

在自然环境以及施工扰动的双重作用下,边坡表层岩体多呈现张拉破坏的形式,为了探究不同类型岩石受张拉破坏所产生的不同粗糙度节理面,选取泥岩、红砂岩、花岗岩和石英岩 4 种代表性岩石,每种岩石分别取 4 个尺寸为 $\varphi 50\text{ mm}\times h 50\text{ mm}$ 试样开展平行试验(图 1)。采用巴西劈裂法对圆柱形岩石试样进行劈裂试验。



图 1 不同类型岩石
Fig. 1 Different types of rocks

通过劈裂试验,每个试样可获得尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的典型节理面,劈裂过程如图 2 所示。为便于表述,将泥岩、红砂岩、石英岩、花岗岩分别命名为 A、B、C、D,每种岩石的 4 个平行试样分别用 1~4 表示。

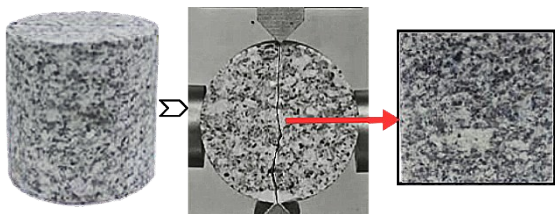


图 2 岩石劈裂形成节理面
Fig. 2 Rock splitting forms joint surfaces

1.2 节理面剪切试样的制备

为了深入研究不同类型岩石劈裂破坏后形成的节理面形貌特征,利用巨影 MAX3D 扫描仪(图 3)将劈裂得到的岩石节理面(图 4(a))进行高精度扫描,获取节理面的数字化模型(图 4(b))。该设备扫描的精度可达 0.05 mm ,能够精确地再现岩石劈裂面形貌特征。然后利用 Geomagic 软件对节理面数字化模型进行截面切割,提取二维轮廓线(图 4(c)),选择节理面中线轮廓线导入 CAD 软件进行重构。最后利用 3D 打印技术打印出厚度为 2.5 mm 的节理面树脂模板(图 4(d)),用于制作人工节理面模型。

在 JRC-JCS 理论中,岩石节理面抗剪强度与



图 3 3D 扫描仪
Fig. 3 3D scanner

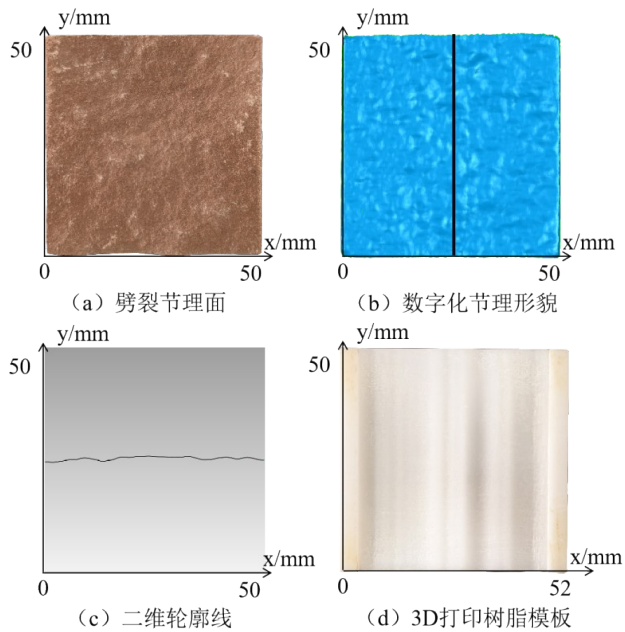


图 4 节理树脂模具制备
Fig. 4 Preparation of Jointed Resin Mold

JRC 和 JCS 两参数相关,为控制不同岩石节理面 JCS 保持一致,采用 Fu^[19]等提出的相似材料制备方法制备直剪试验所需的节理面试样,具体材料配比和力学性质如表 1、表 2 所示。

表 1 粉砂质泥岩相似材料试样配比(质量分数)

Table 1 Proportion of similar material samples of silty mudstone (mass fraction)					
石膏	重晶石粉	蒙脱石	伊利石	绿泥石	水
27.46	51.14	0.68	2.05	0.68	17.99

表 2 粉砂质泥岩相似材料试样物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of similar material samples of silty mudstone					
密度/ (g/cm ³)	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	
1.98	12.04	2.68	1.50	0.27	

在制作人工节理面试样时,首先将节理面树脂模板放置在模具中间,并在模具内壁均匀涂抹脱模剂。随后将相似材料浆液缓慢注入模具中,将模具

置于振动台上振捣 10 min,静置 5 min 使相似材料凝固。脱模后,即可得到含节理面的相似材料试样(图 5)。在进行试验之前,对制备的石膏试件进行为期 7 d 的养护,确保其达到足够的强度,以满足后续试验要求。

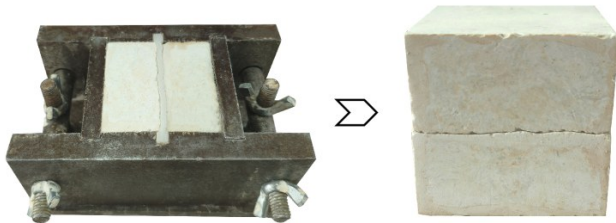


图 5 粉砂质泥岩相似材料试样制作

Fig.5 Preparation of similar material samples for silty mudstone

1.3 节理面直剪试验设备与方法

由于路堑边坡失稳通常发生在较浅的深度,且节理面上覆岩层厚度较薄,而大型直剪设备在施加荷载时存在荷载大、精度低的问题,因此自主设计了专用于较低应力状态下的高精度节理面直剪设备,用于开展节理面直剪试验。该设备由卧式手摇底座、ZP-500 数显推拉力计(最大量程 0.5 kN,精度

0.5%F.S.)、百分表、数据采集电脑以及铅制砝码组成,如图 6 所示。

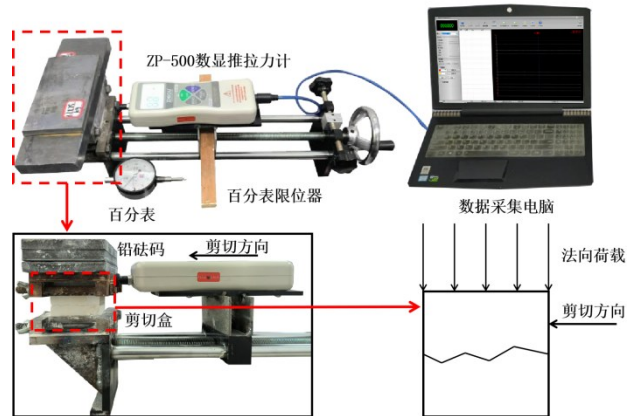


图 6 直接剪切-数据采集装置

Fig. 6 Direct cutting - data acquisition device

在开展节理面剪切试验前,先将试样放入剪切盒中,通过逐步增加铅砝码质量的方式施加不同等级的法向应力,然后摇动手柄对剪切盒施加水平方向剪切力。试验设计 25、50、75、100、125 kPa 共 5 个等级的法向应力,以模拟上覆岩层在 1、2、3、4、5 m 条件下的剪切破坏情况。节理面轮廓线以及剪切方向如表 3 所示。

表 3 节理面轮廓线剪切方向

Table 3 Cutting direction of contour lines

序号	剪切方向	序号	剪切方向
A1		C1	
A2		C2	
A3		C3	
A4		C4	
B1		D1	
B2		D2	
B3		D3	
B4		D4	
长度/cm		长度/cm	

2 节理面直剪试验与 JRC 值反算结果

2.1 节理面直剪试验结果

图 7 为 4 种不同粗糙度节理面在不同法向应力状态下的剪应力与剪切位移曲线。从图 7 可以看出,试样在剪切初期,剪应力随着剪切位移的增加而逐步上升,此时节理面处于弹性阶段。随着剪切位移的持续增加,当剪应力达到峰值后迅速回落,

此时试样发生破坏。在剪切后期,剪应力随着剪切位移的增加而趋于稳定,此时节理面的起伏地貌已经发生显著破坏,但破坏后的节理面仍保持一定的残余强度。此外,节理面剪切过程中的应力-位移曲线的弹性阶段并非标准直线,而存在一些波动,这是因为剪切过程中,节理面部分斜率较大的凸起会首先发生破坏,导致剪应力下降。随后剪应力会重新分布至节理面上其他起伏区域,导致剪应力再次

上升,以此往复,直至节理面完全破坏。

对比4种不同岩石节理面的抗剪强度可以发现,在法向应力为125 kPa时,泥岩、红砂岩、石英岩、花岗岩的峰值抗剪强度分别为95.6、110.12、133.2、153.6 kPa,在其他应力状态下也存在相似规律,即节理面抗剪强度排序为花岗岩>石英岩>红

砂岩>泥岩。由于采用相同的相似材料制作不同岩石节理面试样,因此,节理面的峰值抗剪强度一定程度上反映了不同岩石的节理粗糙特征。通过比较不同岩石的平均峰值抗剪强度,可以推导出对应岩石劈裂后所得节理面的粗糙度大小顺序为:花岗岩最大,其次是石英岩,最后是红砂岩和泥岩。

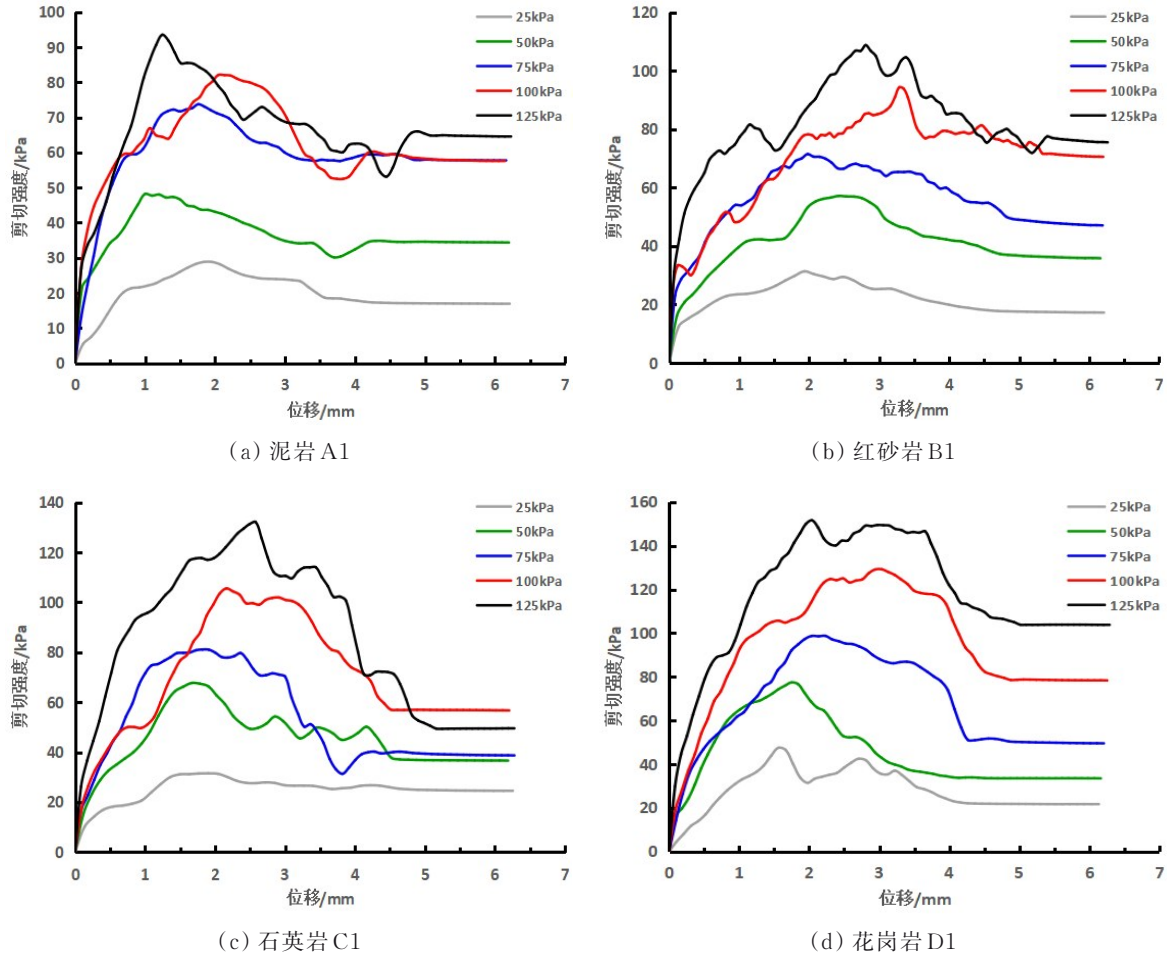


图7 剪切应力-位移曲线

Fig. 7 Shear stress shear displacement curve

2.2 节理面JRC值反算结果

在节理面粗糙度与抗剪强度研究领域,Barton^[3]等于1977年提出的JRC-JCS理论是目前应用最为广泛的分析方法,该理论在经典的Mohr-Coulomb理论基础上,引入JRC和JCS两个关键参数,从而能够更准确地计算节理面的抗剪强度,如式(1)所示。

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中:JRC为节理面粗糙度系数,是无量纲参数,可描述岩石节理表面的粗糙程度。JRC越大,表示节理面的粗糙度越大,岩石节理面的抗剪强度也越大。JCS是岩石节理面位置单轴抗压强度,是衡量岩石在单轴压缩试验中能够承受的最大应力的指

标,反映了岩石节理面在垂直于节理面方向上的抗压能力; φ_b 是岩石表面在完全光滑时的摩擦角,即基本摩擦角,反映了岩石材料本身的摩擦特性,不受表面粗糙度的影响, σ_n 为正应力, τ 为节理面抗剪强度。在前期研究中,通过对平整表面的相似材料试样进行倾斜试验得出其基本摩擦角为 31.6° ,通过单轴抗压强度试验得到JCS为12.04 MPa。因此可将式(1)改写为式(2)并代入各参数值,即可根据抗剪强度反算出JRC值。

$$\text{JRC} = \frac{\arctan \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) - \varphi_b}{\lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right)} \quad (2)$$

已有研究指出,在较大法向荷载条件下,JRC值

存在应力相关性^[20]。由于试验过程中施加的法向应力较低,试样在不同应力下反算得出的 JRC 值受应力状态影响较小,为了定量表征每个节理面的粗糙度,对每个节理面对应的不同应力状态下的 JRC 反算值取平均值,具体数值如表 4 所示。

表 4 16 条轮廓线 JRC 反算值

Table 4 16 contour lines JRC

试样	不同荷载下的 JRC 反算值					JRC 均值
	25 kPa	50 kPa	75 kPa	100 kPa	125 kPa	
A1	6.34	5.01	5.09	4.15	3.29	4.78
A2	6.03	7.13	7.78	5.33	5.89	6.43
A3	6.78	4.37	4.51	2.80	4.23	4.54
A4	4.61	4.78	4.02	5.35	4.72	4.70
B1	6.97	7.24	5.11	4.73	5.09	5.83
B2	6.85	7.55	6.80	7.45	6.79	7.09
B3	6.35	8.92	6.10	6.87	5.75	6.80
B4	6.84	6.71	6.40	5.58	6.54	6.41
C1	9.81	9.50	8.76	9.76	8.21	9.21
C2	12.85	10.22	13.07	6.74	4.42	9.46
C3	10.64	12.30	11.51	8.11	4.62	9.44
C4	9.92	8.60	8.45	8.41	9.84	9.04
D1	11.85	10.86	9.85	6.51	9.32	9.68
D2	15.07	13.22	13.13	9.37	7.81	11.72
D3	10.22	10.42	10.78	10.83	9.09	10.27
D4	12.89	12.36	7.53	12.11	6.60	10.30

3 考虑采样间距的节理面 JRC 表达式

3.1 Z_2 与采样间距关系

节理面二维轮廓起伏体斜率均方根(Z_2)是用于描述岩石节理表面形貌特征的一个参数,广泛用于定量表征节理面粗糙度。 Z_2 越大,表示节理表面剪切方向起伏体倾角越大,粗糙度越高。该参数易通过节理面轮廓线获取,具有显著物理意义,计算式为

$$Z_2 = \left[\frac{1}{(M-1)(SI)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: $M-1$ 为轮廓线采样总段数; y 为轮廓线起伏高度; SI 为采样间距。在本研究中对同一条轮廓线设置 20 个不同的采样间距,最大的采样间距为 1 mm,最小的采样间距为 0.05 mm。图 8 为不同类型岩石轮廓线的 Z_2 值随 SI 的变化情况,从图 8 可以看出,4 种岩石轮廓线 Z_2 值均随着采样间距的增大而逐渐减小。通过对 4 类岩石的 16 条节理面二维轮廓线的 Z_2 值与对应的采样间距进行拟合分析发现,二者间呈现显著的线性变化趋势。具体而言,随着采样间距的增加, Z_2 值呈现下降趋势。在不同类型的岩石节理面中,泥岩节理面的 Z_2 值随采样间距的增加

平均下降幅度为 4.85%,相比其他类型岩石节理面而言较小,花岗岩的平均下降幅度为 7.06%,仅次于泥岩,而红砂岩和石英岩的平均下降幅度最大,分别为 9.09% 和 10.94%。这表明,节理面的起伏程度越大, Z_2 值受采样间距的影响越显著。

图 9 表示了采样间距大小对节理面轮廓形貌的影响,揭示了 Z_2 值随着采样间距的增大而逐渐减小的内在机理。以泥岩 A1 的原轮廓线为例,其采样间距为 0.05 mm,而当采样间距增加至 2 mm 时,斜率主要分布在 -0.13~0.13 范围内。而当采样间距为 10 mm 时,斜率范围缩小至 -0.05~0.08,而当采样间距达到 25 mm 时,斜率仅为 -0.04。这表明,随着采样间距的增加,计算斜率坐标的横向间距大幅增加,而纵向的高差基本保持不变,导致 Z_2 值不断减小。反之,对节理面的数值化精度越低,即采样间距越大, Z_2 值也随之下降。当采样间距等于节理面长度时, Z_2 值达到最小值。这说明,采样间距对节理面粗糙度的表征具有重要影响,合理选择采样间距对于准确描述节理面粗糙度至关重要。

3.2 考虑采样间距的节理面 JRC 值与 Z_2 值关系式

为了更好地利用节理面轮廓形貌估测其粗糙度系数, Tse 等^[5]选取了多种轮廓线形貌表征参数,并对大量试验数据进行拟合发现,利用 Z_2 值计算 JRC 较其他轮廓形貌参数更为准确,其给出的计算方法如式 4 所示。该方法也得到了后续研究的一致认可^[21-23]。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \lg(Z_2) \quad (4)$$

该方法采用的轮廓采样间距为 1.27 mm,但没有说明采样间距是否影响计算结果。并且式(4)在 Z_2 值为 0,即节理面为水平状态时,JRC 值不为零,有悖于其物理意义。因此,基于该方法提出了考虑采样间距的节理面 JRC 预测方法,并且为了考虑 Z_2 为 0 时,JRC 值也为 0 的情况,对自变量进行了真数加 1 处理,且拟合时固定截距为 0,然后在一定的采样间距范围内,对 JRC 值和 $\lg(Z_2+1)$ 进行拟合。鉴于试验中试样尺寸较小,且较大的采样间距会对轮廓线的细节特征产生显著影响,因此根据目前最常选用的 0.05 mm 至 1 mm 采样间距开展研究^[24-25],以确保对节理面粗糙度的精确表征。以采样间距为 0.05、0.35、0.7、1 mm 情况下的拟合结果为例开展分析,如图 10 所示。

由图 10 可见,在相同采样间距下,自变量 $\lg(Z_2+1)$ 与 JRC 值呈线性关系,随着 $\lg(Z_2+1)$ 的增大,JRC 值也呈现上升趋势,拟合方差均为 0.98,拟合结果可得到二者的关系见式(5)。

$$JRC = a \lg(Z_2 + 1) \quad (5)$$

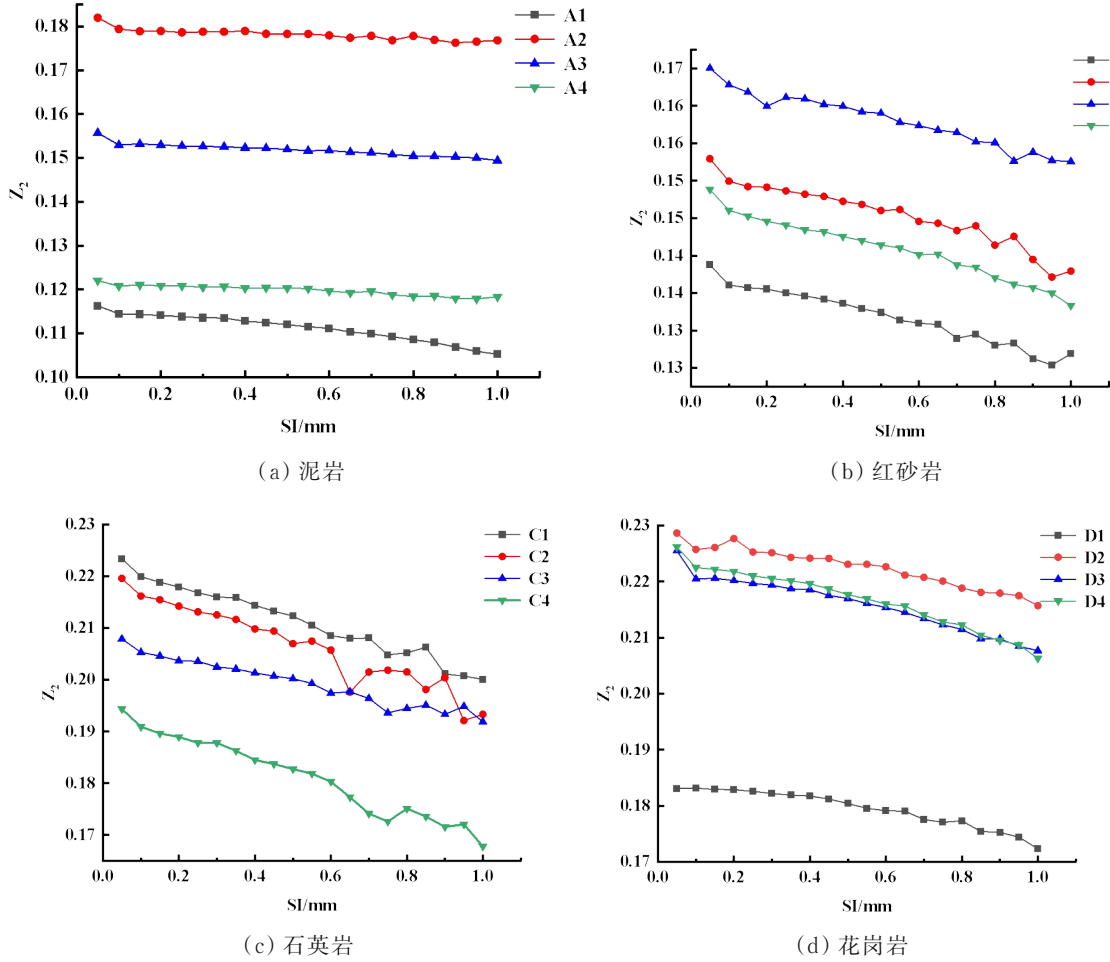
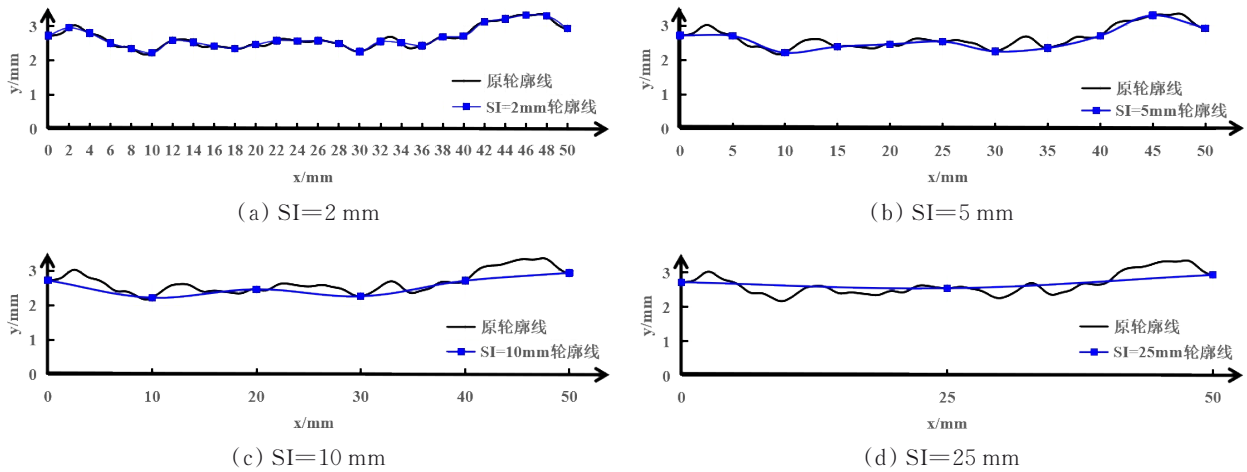
图8 均方根 Z_2 与采样间距的关系Fig 8 The relationship between root mean square Z_2 and sampling interval

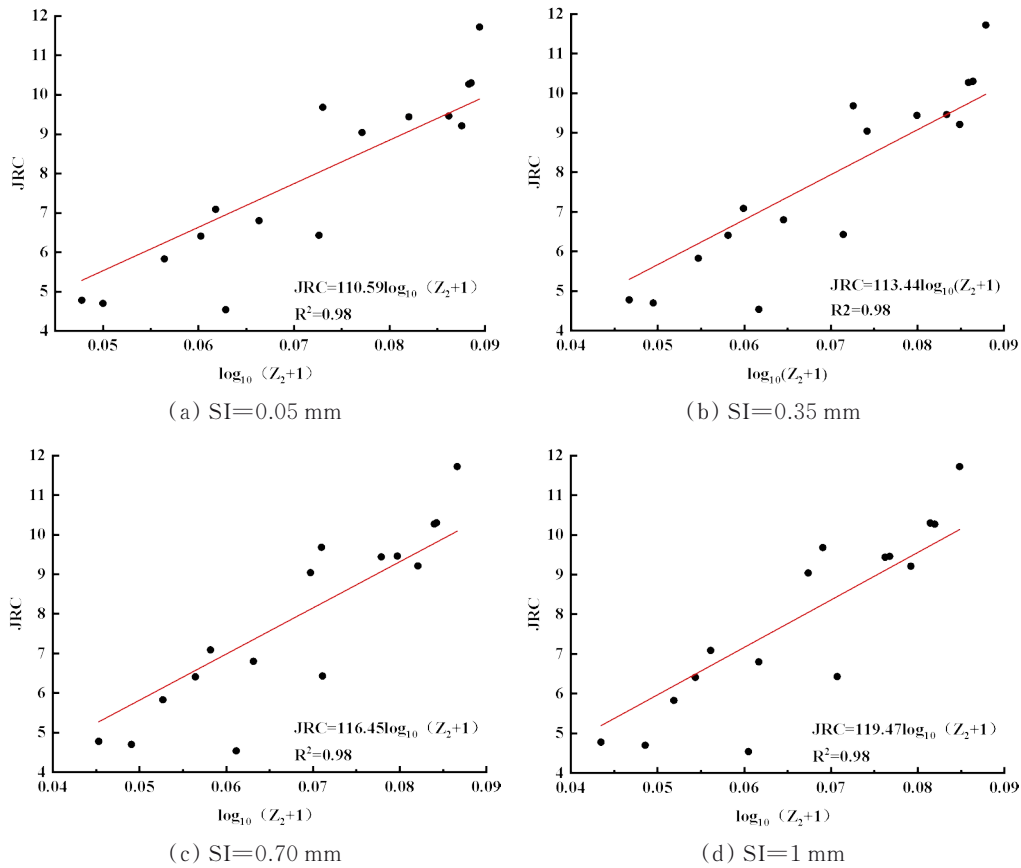
图9 采样间距大小对轮廓线的影响

Fig 9 The influence of sampling interval on contour lines

式中: a 为拟合直线的斜率。综合对比不同采样间距条件下的线性拟合斜率可知,随着采样间距增加,斜率也随之增加。因此综合不同采样间距条件下的斜率(表5)可以得到其二者呈显著的线性变化规律,如图11所示。这是由于在相同的JRC值条件下, Z_2 值会随着采样间距的增加而不断减小,在图

像中表现为数据向左侧偏移,并且 Z_2 值越大,其受采样间距的影响越为明显, Z_2 值越小,影响则越小。例如当 Z_2 值为0时,采样间距的变化不再对 Z_2 值产生影响,而节理面轮廓起伏较大时,采样间距对 Z_2 的影响最为明显。

根据试验结果可以建立采样间距与斜率 a 的关

图 10 不同采样间距下 $\lg(Z_2+1)$ 与 JRC 的拟合曲线Fig.10 Fitting curves of $\log_{10}(Z_2+1)$ and JRC at different sampling intervals表 5 不同采样间距对应的斜率 a Table 5 Slope a corresponding to different SI

SI/mm	斜率 a	SI/mm	斜率 a
0.05	110.59	0.55	114.91
0.10	112.17	0.60	115.45
0.15	112.41	0.65	116.13
0.20	112.66	0.70	116.45
0.25	113.04	0.75	117.03
0.30	113.27	0.80	117.18
0.35	113.44	0.85	117.69
0.40	113.81	0.90	118.26
0.45	114.15	0.95	118.91
0.50	114.57	1.00	119.47

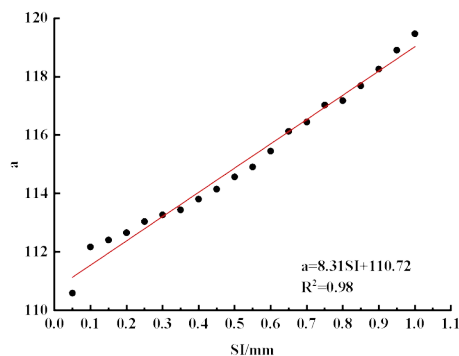
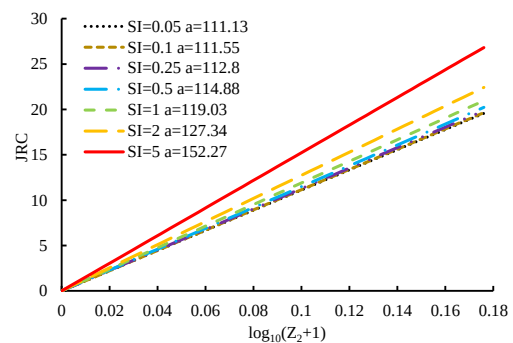
系式,见式 6。

$$a = 8.31SI + 110.72 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中可得到考虑采样间隔的 JRC 计算式,见式(7)。

$$JRC = (8.31SI + 110.72) \lg(Z_2 + 1) \quad (7)$$

图 12 表示了不同 SI 条件下 JRC 值与 $\lg(Z_2+1)$ 的关系,从图 12 可以看出,随着 SI 的增加,斜率 a 也逐渐增加。并且从图 12 也可以看出,在相同 Z_2 值条件下,若采样间距较大,JRC 值也相应较大。可见,本研究所提出的 JRC 值计算方法不仅考虑了 Z_2 对 JRC 值的影响,还考虑了采样间距对 JRC 值的影响

图 11 采样间距与斜率 a 的关系曲线Fig.11 The relationship curve between SI and slope a 图 12 不同采样间距条件下 JRC 值与 $\lg(Z_2+1)$ 的关系Fig.12 Relationship between JRC values and $\lg(Z_2+1)$ under different SI conditions

以及 Z_2 为 0 时的情况。试验结果表明,新方法在预测精度方面优于 Tse 等^[5]提出的传统 JRC 值预测模型。

4 结论

1)不同岩石劈裂后形成的节理面抗剪强度存在显著差别,强度排序为:花岗岩>石英岩>红砂岩>泥岩。通过反算得到节理面粗糙度系数也表明花岗岩节理面粗糙度最大,石英岩次之,红砂岩和泥岩则相对较小。

2)不同岩石节理面轮廓线的 Z_2 值均随着采样间距的增大而呈现下降的规律,节理面的起伏程度越大,采样间距对 Z_2 值的影响越明显。

3)基于对数函数建立了考虑采样间距的节理面粗糙度系数计算公式,式中斜率参数 a 与采样间距呈线性关系,且当 Z_2 值为 0 时,JRC 值也相应为 0。与早期提出的 JRC 值预测模型相比,该公式的物理意义更加明晰且预测精度更高。此外,通过 Barton 提出的 JRC-JCS 模型,可以进一步推测出节理面的峰值抗剪强度。

参考文献

- [1] 陈曦. 基于方向性粗糙度参数的节理峰值抗剪强度理论模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1075-1088.
CHEN X. A new theoretical peak shear strength criterion of rock joint based on the directional roughness parameter [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1075-1088. (in Chinese)
- [2] 甘磊, 马洪影, 沈振中. 混凝土粗糙面形貌特征参数与节理粗糙度系数关系研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 57-65.
GAN L, MA H Y, SHEN Z Z. Relationship between characteristic parameters of concrete rough surface morphology and joint roughness coefficient [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 57-65. (in Chinese)
- [3] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54.
- [4] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 C S, WANG L Q, GE Y F, 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)
- [8] 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 S J, CHANG J P, JI C X, 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)
- [9] 孙盛玥, 李迎春, 唐春安, 等. 天然岩石节理双阶粗糙度分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2502-2511.
SUN S Y, LI Y C, TANG C A, et al. Dual fractal features of the surface roughness of natural rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2502-2511. (in Chinese)
- [10] 许丹, 陈瑞生, 李慧, 等. 基于孔内影像的岩石节理粗糙度特征研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 918-923.
XU D, CHEN R S, LI H, et al. Study for roughness of rock joints in fractal research based on panoramic borehole images [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 918-923. (in Chinese)
- [11] HU S M, HUANG L, CHEN Z J, et al. Effect of sampling interval and anisotropy on laser scanning accuracy in rock material surface roughness measurements [J]. Strength of Materials, 2019, 51(4): 678-687.
- [12] GE Y F, LIN Z S, TANG H M, et al. Estimation of the appropriate sampling interval for rock joints roughness using laser scanning [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 3569-3588.
- [13] YAN F Y, BAN L R, QI C Z, et al. Research on the anisotropy, size effect, and sampling interval effect of joint surface roughness [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(11): 399.
- [14] 孙辅庭, 余成学, 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(Sup 2): 3539-3544.
SUN F T, SHE C X, WAN L T. 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)
- [15] 刘晓隼, 何忠明, 卢逸恒, 等. 考虑应力变化的炭质泥岩粗粒土微观结构特征研究[J]. 交通科学与工程,

- 2023, 39(2): 16-22.
- LIU X Q, HE Z M, LU Y H, et al. Study on micro-structure characteristics of coarse-grained carbonaceous mudstone soil considering stress change [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(2): 16-22. (in Chinese)
- [16] 金磊磊, 魏玉峰, 黄鑫, 等. 基于节理面三维形貌的岩石节理抗剪强度计算模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3355-3364.
- JIN L L, WEI Y F, HUANG X, et al. Shear strength calculation model of rock joints based on three-dimensional morphology of joint surface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3355-3364. (in Chinese)
- [17] BAN L R, QI C Z, CHEN H X, et al. A new criterion for peak shear strength of rock joints with a 3D roughness parameter [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(4): 1755-1775.
- [18] 付宏渊, 戚双星, 史振宁, 等. 粉砂质泥岩蠕变特性与非线性黏弹塑性本构模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 1-8.
- FU H Y, QI S X, SHI Z N, et al. Creep characteristics of silty mudstone and nonlinear viscoelastic-plasticity constitutive model [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- [19] FU H Y, QI S X, SHI Z N, et al. Mixing ratios and cementing mechanism of similar silty mudstone materials for model tests [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 2426130.
- [20] 吴俊哲, 史振宁, 魏笑. 考虑方向性与应力状态的粉砂质泥岩节理面粗糙度系数研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 82-90.
- WU J Z, SHI Z N, WEI X. Investigation on roughness coefficient of silty mudstone joint surfaces considering direction and stress state [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2025, 22(1): 82-90. (in Chinese)
- [21] ZHAO L H, ZHANG S H, HUANG D L, et al. Quantitative characterization of joint roughness based on semivariogram parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109: 1-8.
- [22] 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.
- [23] LI Y R, ZHANG Y B. Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 27-35.
- [24] 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 L R, QI C Z, YAN F Y, 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)
- [25] 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, 1147.
- SONG L B, JIANG Q, LI Y H, et al. Stability of statistical parameters of discontinuities morphology and anisotropy based on different sampling intervals [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1121-1132, 1147. (in Chinese)

(编辑 XXX)