#### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-07

胡康,任光明,常文娟,等.基于节理不确定性的可靠度分析——以西藏某岩质边坡为例——以西藏某岩质边坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):53-60.

HU Kang, REN Guangming, CHANG Wenjuan, *et al.* Reliability analysis based on joint uncertainty: A case study of a rock slope in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 53-60.

# 基于节理不确定性的可靠度分析

——以西藏某岩质边坡为例

胡康1,任光明1,常文娟2,李征征2,邹林志1

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),四川成都 610059;2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西西安 710065)

**摘要:**边坡稳定性一直是边坡安全的重点研究对象,针对边坡评价中常见的不确定性因素,可靠度分析是值得利用的方法。为评价某节理发育的岩质岸坡稳定性,通过有限元计算软件,结合现场勘探测绘数据,建立以边坡节理强度参数 c、 φ 为输入变量,安全系数为输出变量的点估计(PEM)计算概率模型,计算结果表明:节理发育对该边坡变形具有明显控制 作用;边坡整体可靠性较好,破坏概率极低。最后,通过蒙托卡罗法对可靠度结果进行验证,结果表明两种方法的计算结 果不存在显著性差异。研究结果表明节理对岩质边坡稳定具有良好的敏感性,基于节理不确定性的点估计法分析边坡 可靠度是一种有效的方法。

# Reliability analysis based on joint uncertainty: A case study of a rock slope in Tibet

HU Kang<sup>1</sup>, REN Guangming<sup>1</sup>, CHANG Wenjuan<sup>2</sup>, LI Zhengzheng<sup>2</sup>, ZOU Linzhi<sup>1</sup>

 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Environment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** Slope stability has always been the key research object of slope safety. In view of the common uncertain factors in slope evaluation, reliability analysis is a valuable method. To evaluate the stability of a jointed rock slope, a point estimation (PEM) calculation probability model is established by using the finite element analysis software and the field survey data, The PEM method takes the joint strength parameters c,  $\varphi$  and the safety factor as input and output variables. The results suggest that, the joints have a significant control effect on the deformation of the slope; The overall reliability of slope is great, and the failure probability is extremely low. Finally, the reliability results are verified by Monte Carlo method, and the results show that there is no significant difference between the two methods. The results indicate that the joints have good sensitivity to the stability of rock slope, and the point estimation method based on joint uncertainty is an effective method to analyze the slope reliability.

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-07-30 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/ 第一作者: 胡 康(1996-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 环境地质专业。E-mail: 898863062@qq.com 通讯作者: 任光明(1964-), 男, 四川南充人, 教授, 研究领域为岩土体工程特性及稳定性与环境效应、地质灾害评价等。 E-mail: 635863163@qq.com Keywords: Jointed rock slope; reliability; baecher model; point estimate; Monte carlo

# 0 引言

随着对边坡研究的深入,可靠度分析已成为结构和 岩土工程师日渐关注的课题[1]。在边坡参数的不确定 性和变异性影响下,传统的单一安全系数并不能很好地 解决工程实际问题,其中边坡功能函数形式的高度非线 性以及隐含性是时常遇到的难题。对此,学者们研究使 用了可以表达明确物理意义的失效概率的可靠度分析 方法<sup>[2-5]</sup>。节理发育是岩质边坡工程上的难题,岩体中 的节理分布对岩石边坡稳定性有着重要影响,国内外学 者在节理边坡稳定性评价上取得了不少成果[6-9]。陈国 良等[10]介绍节理现场测量方法和常见的节理分布统计 概型,并基于蒙托卡罗法进行三维节理网络计算机模 拟;王宏等[11]对岩石中节理的生成技术进行探讨,并证 明岩石力学网络技术前景广阔;严豪等<sup>[12]</sup>基于 Voronoi 模型对碎裂岩质边坡进行了节理有限元分析;李源亮 等[13]简要介绍节理网络模型原理及方法,并以实际案例 进行稳定性评价。节理网络模型为研究节理边坡提供 了有效方法,在此基础上,肖术等[14]通过赞比亚某边坡 将节理网络与点估计法结合起来,以岩体强度参数为输 入参数进行了稳定性评价;张宜杰等[15]利用 Baecher 模 型对 JEF-PEM 方法进一步研究,评估边坡的失稳概率 与破坏机理;国外学者 Przewlocki 等<sup>[16]</sup>也通过点估计 法,以边坡材料强度指标为输入变量,对某海崖边坡进 行了可靠度分析。

部分学者对边坡节理发育带来的不确定性影响进行相应研究。许湘华等<sup>[17]</sup>建立以节理倾向、倾角和间距为随机变量的边坡可靠性模型,采用蒙托卡罗法产生符合随机变量分布类型的随机数,进行边坡可靠度分析; 王双等<sup>[18]</sup>用蒙托卡罗法对服从 Fisher 分布的节理产状进行模拟,得到安全系数的分布规律和边坡可靠度; 王双<sup>[19]</sup>针对产状分组和边坡不确定性分析,提出了新的产状椭圆对称分布概率模型并结合到 EM 算法; 申矫健<sup>[20]</sup>在广义 Hoek-Brown 理论基础上,通过区间理论与敏感性分析理论对岩体参数的区间取值,得出更好地反映工程实际的安全系数区间值。

综合学者们的研究成果,作者发现节理带来的不确定性对边坡工程影响重大,具有研究意义,而采用 PEM法评估可靠度,并不局限于边坡自身强度参数作 为输入变量,节理强度参数同样对边坡稳定性具有较 高敏感性。因此,文章基于节理的不确定性,提出了 以节理强度参数为输入变量的节理边坡可靠度分析 方法。

#### 1 基本原理及模拟步骤

# **1.1** Baecher 节理网络模型

Baecher 模型是 1978年由 Baecher<sup>[21]</sup>提出,具有操 作简单快捷、算法灵活、与研究区实际情况相似度高的 特点。模型中假设节理具有有限的迹长,迹长、产状、 密度等遵循一定的统计规律,且结构面每一个中心点在 空间上以泊松点过程分布<sup>[22]</sup>。为了避免模型区域的边 界效应,Baecher 算法通过扩大区域,再生成节点,最后 用原边界区域对网络进行剪切生成模型(图1)。该模 型主要通过两种方法来定义:一种是 Fisher 函数分布 法;另一种是指定 Dip/Direction 的方法。一般来说,Fisher 分布更适合定义节理网络,因为无论节理空间分布情况 如何,通过平均倾角/倾向、费舍尔常数 K 和标准偏差 都能准确定义。而 Dip/Direction 法,当平均倾角/倾向 接近象限临界值时,便不能正确地定义所需的方向分布。



图 1 Baecher 节理网络模型 Fig. 1 Baecher joint network model

Cacas 等<sup>[23]</sup>、Dershowitz 等<sup>[24]</sup>提出 Fisher 分布具有 较好的拟合性。在空间上,其裂隙面的倾角用法线的方 向表示,而一组裂隙面的法向量将围绕其代表法线和向 量呈现 Fisher 概率函数分布,即

$$f(\theta) = \frac{K(\sin\theta)e^{\kappa\cos\theta}}{e^{\kappa} - e^{-\kappa}}$$
(1)

式中:f(θ)——概率密度函数;

θ——均值向量的角标准偏差;

- *K*——Fisher 常数,又称散度因子,代表结构面产状的离散程度,*K* 值越小,则结构面产状越离散。
- 1.2 PEM 方法原理

PEM 方法是基于 Rosenbluth<sup>[25]</sup>提出的一种统计矩

方法,又称点估计法。该方法利用随机变量的平均值和 方差计算功能函数的有限估计点函数值及其相应加权 值,再求和得出状态函数的一阶矩、二阶矩等,进而评 价边坡的可靠度。

对于一般的边坡稳定性问题,其状态函数可定义为  $Z = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (2)

*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>,…,*x*<sub>n</sub>——容重、泊松比、黏聚力、内摩擦角等 随机变量。

在已知 n 个随机变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的平均值 $\mu_{xi}$ 和标 准差 $\sigma_{xi}$ ,且不清楚随机变量 $x_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ )的分布函数 的条件下,则在区间 $(x_{\min}, x_{\max})$ 上分别对称地选择 2 个取 值点,一般按均值 $\mu_{xi}$ 的一个正负标准差 $\sigma_{xi}$ 取值,即:

$$\begin{cases} x_{i1} = \mu_{xi} + \mu_{xi} \\ x_{i2} = \mu_{xi} - \mu_{xi} \end{cases}$$
(3)

对于影响节理岩体稳定性的 n个变量,当在均 值±o 对称取值时,有 2n个取值点,所有可能的组合有 2<sup>n</sup>个。可根据相关程序计算出 2<sup>n</sup>个稳定系数,并可计 算出稳定性系数 Z 的平均值和标准差。

若输入随机变量彼此独立,且各组合发生的概率相等,那么Z的均值点估计为:

$$u_{z} = \frac{1}{2^{n}} \sum_{j=1}^{2^{n}} Z_{j}$$
(4)

标准差的点估计为:

$$\sigma_{z} = \sqrt{\frac{1}{2^{n}} \left( \sum_{i=1}^{2^{n}} Z_{i}^{2} - \mu_{z}^{2} \right)}$$
(5)

在假定输入随机变量符合正态分布的基础上,可靠 性指标 β 可表示为:

$$\beta = (\mu_z - 1)/\sigma_z \tag{6}$$

最终可得到边坡破坏概率为:

$$P_{\rm f} = 1 - \phi(\beta) \tag{7}$$

#### 2 边坡工程地质条件及参数取值

#### 2.1 边坡基本特征

文章研究边坡属于易贡藏布干流某拟建水电站的 库区边坡,河谷狭窄,岸坡陡峻,平均海拔约3150m,上 下游宽约1285m,前缘河流流向约NE68°,河水位高程 约3085m。该边坡呈整体上略向河床突出的弧形坡 体,坡向约NE64°,横向平均宽度约1200m,轴线方向 长约1920m,出露面积约3.1km<sup>2</sup>。模拟选取剖面位于 边坡中部轴线附近,分布高程3085~4680m,前、后缘 高差约1595 m,总体上坡度较陡,变化范围不大,约42°,靠近顶部分水岭分布平均坡度约18°的缓坡带。该边坡属于大型工程边坡,对库区下游居民安全和水电站正常运行至关重要。

2.2 边坡结构特征及参数取值

库区岩石组成主要为白垩系细粒二长花岗岩,钻孔 揭露深度约 85~90 m,为弱风化花岗岩,深于 90 m 为 正常花岗岩。据平硐统计资料,边坡深部基岩的中、缓 倾结构面发育较少,而陡倾结构面发育较多。

统计数据表明,边坡平硐内共统计有结构面裂隙 444条,按走向其优势结构面分为:①NNW组,所占比 例为36.94%;②NNE组,所占比例为15.32%;③NE组, 所占比例为13.06%,为缓倾结构面;④NW组,所占比 例为10.36%,典型出露节理如图2所示,节理极点等密 度图如图3所示。根据统计的结构面倾向和倾角,易知 该岩质边坡节理发育,按风化程度和结构面分布情况, 将边坡分为强风化层、弱风化层和微新岩层(图4)。



图 2 边坡出露典型节理 Fig. 2 Exposed typical joints of slope



对取回试样进行室内试验,并结合部分相似花岗岩 边坡的参数取值,确定了该边坡各结构区的力学和强度 参数,以及结构面的特征值如表1—表3所示。



#### 3 边坡可靠度分析

#### 3.1 敏感性分析

为证明节理发育岩质边坡中节理对边坡稳定性状态有显著影响,对边坡进行敏感性分析,为简化流程,仅选取节理 J1 与弱风化层作为对象,以其黏聚力(c)和内摩擦角( $\varphi$ )强度参数作为随机变量。计算方法与 PEM 法相似,对每个变量按平均值( $x_i = \mu_i$ )与标准差( $x_i = \mu_i \pm 3\sigma_i$ )取 3 个值,每次变化单个变量其余变量取平均值。

据表 1—表 3 提供的参数,采用 Phase2 软件,初步 建立节理边坡有限元数值模型,在有限元强度折减法的 基础上,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,应力条件设定 为仅自重应力,约束条件为底部全约束,侧面法向约束,

表 1 岩体参数取值 Table 1 Parameter values of rock mass

材料	弹性模量/MPa	泊松比 -	<i>φ</i> /(°)		c/MPa		皮手/4 い う
			均值	标准差	均值	标准差	谷 <u>里</u> /(KN·m <sup>*</sup> )
强风化花岗岩	10 000	0.28	38	2	0.12	0.01	23.5
弱风化花岗岩	13 000	0.26	42	2	0.15	0.02	25.0
微新花岗岩	20 000	0.25	49	3	0.50	0.04	27.0

#### 表 2 结构面几何特征值

 Table 2
 Geometric characteristc values of structural plane

边坡分层 节	井田畑	产状				迹长		☆ 庄 <i>( 々 −</i> 2 )
	卫理组	平均倾向/(°)	平均倾角/(°)	分布类型	Fisher常数	均值/m	分布类型	密度/(余·m )
强风化层	J1	235	67	E' 1	95	8	负指数分布	0.20
	J2	125	45	Fisher	45	5.5		0.25
弱风化层	J1	245	74	Fisher	50	15	负指数分布	0.06
	J2	125	58		40	5		0.03
	J3	105	30		90	5		0.05
微新基岩	J1	236	78	Fisher	30	6	负指数分布	0.02
	J2	135	55		110	4		0.01

# 表 3 结构面强度特征值 Table 3 Strength characteristic values of structural plane

	q	$\varphi/(^{\circ})$		MPa			长长担应。
卫埋组兮	均值	标准差	均值	标准差	- 法问例度/(MPa·m <sup>-</sup> )	切问刚度/(MPa·m <sup>*</sup> )	机拉强度/MPa
J1	30	2	0.04	0.002	8 000	2 500	0
J2	33	2	0.08	0.003	10 000	3 000	0
J3	38	3	0.10	0.005	13 000	3 800	0

节理末端条件设为在地表"端部张开",其余设为"端部闭合",计算结果如表4。

以平均值作为计算参数,计算得到边坡稳定性系数 为1.35。

将基于每个随机变量取值 $\mu_i$ 、 $\mu_i+3\sigma_i$  和 $\mu_i-3\sigma_i$ 计算的稳定性系数分别表示为 FS<sub>0</sub>、FS<sub>1</sub>、FS<sub>2</sub>,并按式  $\alpha=$ 

(*FS*<sub>1</sub>-*FS*<sub>2</sub>)/*FS*<sub>0</sub> 计算作为该参数敏感性指标, α 越大, 表明该参数对边坡影响越大, 计算结果见表 5。

计算结果表明,该节理岩质边坡的敏感性:节理强 度参数>岩体强度参数,内摩擦角>黏聚力,节理敏感性 甚至略大于岩体自身强度因子,证明节理对边坡稳定性 具有显著影响。因此下文以节理强度参数 c、q 作为边

	Table 4	Sensitivity cal	culation res	sults
节理强	度参数	岩体强	拉户业石砦	
c/MP	φ/(°)	c/MPa	φ/(°)	- 梞疋性杀奴
0.04	30	0.15	42	1.35
0.034	30	0.15	42	1.33
0.046	30	0.15	42	1.38
0.04	24	0.15	42	1.23
0.04	36	0.15	42	1.45
0.04	30	0.144	42	1.34
0.04	30	0.156	42	1.37
0.04	30	0.150	36	1.27
0.04	30	0.150	48	1.44

表 4 敏感性计算结果

表 5 敏感性指标计算结果 Table 5 Sensitivity index calculation results

节理强	度参数	岩体强度参数		
c/MP	φ/(°)	c/MP	<i>φ</i> /(°)	
0.037 0	0.163 0	0.022 2	0.125 9	

坡可靠度分析输入变量的思路具有可行性。

3.2 PEM 法可靠度计算结果

建立边坡节理有限元模型如图 5,根据 PEM 方法 的计算步骤,首先需要确定作为输入变量的特征参数。 为研究岩质边坡节理强度参数的不确定性,将内摩擦角 和黏聚力作为输入变量构建点估计概率模型,考虑该边 坡中存在的主要节理组(表 2),共需要分析 3 组节理组 6 个随机变量,分别在±σ处取值,组成 2<sup>6</sup> 总共 64 种组 合模式,然后计算它们的稳定性系数,最后根据式(4)、 式(5)得出其平均值和标准差,据式(6)、式(7)得出其 可靠性指标和破坏概率。



计算结果表明,天然状态下的 64 组边坡模型基本 符合正态分布(图 6),稳定性平均值为 1.344,最大值为 1.48,最小值为 1.23,相比不添加节理的边坡稳定性计

算结果 1.7,降低了 19.7%,说明节理发育对边坡稳定性 影响较大。通过点估计法相关计算公式,求得该岩质边 坡稳定性系数标准差为 0.057 3,变异系数为 0.042 6,可 靠性指标为 6.007,破坏概率为 0.001%,表明该边坡可 靠度较高,发生失稳破坏的概率极低。



# 3.3 节理有限元法计算结果

由图 7、图 8 可看出,未考虑节理时该边坡在临界 状态时产生剪应变较小,主要集中于弱风化带底部以及 边坡后缘拉裂区,而考虑节理情况下边坡变形程度相对 较大,最大剪应变为 0.004,且由于边坡节理在靠坡面发 育更为密集的特点,剪应变主要集中在后缘靠坡面的剪 切变形区域。



图 9、图 10 对应边坡在添加节理与不添加下的位 移矢量图,由图可见,在不添加节理条件下,边坡位移相 对较小,且位移矢量分布较分散,顺坡向滑移和竖直方 向沉降变形突出,而考虑节理条件下,边坡会产生更大 的变形,最大位移量达到 5 cm,且在缓倾坡外节理的影 响下,顺坡向位移矢量更加突出,表现出更强烈的滑移 变形,证明了节理发育对边坡变形破坏的控制性作用。



图 8 最大剪应变云图(不添加节理)

Fig. 8 Nephogram of maximum shear strain (without joints)



图 9 边坡位移矢量图(添加节理) Fig. 9 Slope displacement vector diagram (add joints)



Fig. 10 Slope displacement vector diagram (without joints)

图 11 是对应边坡发生的剪切变形模式,可看出边 坡的变形受到节理控制,红色箭头为错动方向,灰线为 滑移后坡面线,沿结构面方向边坡发生剪切错动,并在 坡面产生锯齿状拉裂逢。推测该边坡变形机理为:在自 重作用下,边坡有向临空方向发生悬臂梁倾倒的趋势, 并沿陡倾坡内节理发生剪切滑移,同时在层间岩体中产 生拉张效应,而岩体又发育缓倾坡外节理,因此岩体顺 势沿缓倾节理发生剪切错动,产生相应屈服(图 12)。

综上所述,该节理岩质边坡可能发生以倾倒-滑移 为主的变形。因该工程后续施工中仍有开挖过程,形成



Fig. 11 Shear deformation of slope along joints



新的临空条件,所以对该边坡进行研究是有必要的。

3.4 蒙托卡罗法验证结果

蒙特卡罗模拟 (MCS) 是一种强大的统计分析方法,已成功应用与可靠性分析和风险评估之中,同时也 一直被认为是所有方法中最精确的方法<sup>[26]</sup>。通过具有 随机不确定性参数描述的响应函数的概率分布,利用计 算机生成假定的概率分布的随机变量来完成,是一种生 成重复多次模型,并计算特定条件发生的次数来评价其 概率的方法。总而言之,该方法是在统计分析的基础 上,得出了模型输出的结论。因此该方法的关键问题是 模拟要达到满意的概率精度所需的仿真次数。

利用边坡极限平衡软件 Slide,应用 MCS 法对边坡 可靠性进行验证。采用常规岩体强度参数 c、φ 值,根 据边坡结构分 3 层共 6 个随机变量进行评价,计算参数 见表 1,计算次数为 10 000 次。计算结果见表 6。

可见两种方法计算结果存在一定差异,但不具有显 著性,传统不考虑节理分布的蒙托卡罗法,得到边坡稳 定性系数更大为1.590,边坡可靠性指数稍大,边坡破坏 概率更小,也表明了节理发育对边坡稳定性有不可忽视 的影响。文章采用的以节理强度参数作为输入变量的

Table 6	Results of reliability comp	oarison analysis
稳定性参数	JEF-PEM点估计	MCS蒙托卡罗
平均值	1.344	1.590
标准差	0.057 3	0.085 4
可靠性指数	6.007	6.907
破坏概率	0.001	< 0.001

表 6 可靠度对比分析结果

PEM 法,充分考虑了节理参数的不确定性,对研究该类型的节理边坡有一定的参考价值。

#### 4 结论

(1)节理对该岩质边坡有较高敏感性,节理发育情况直接影响到边坡变形模式及稳定性状况。Baecher 网络模型可以灵活模拟边坡节理,是一种有效的分析方法。基于节理参数的不确定性,以节理参数为输入变量 的 PEM 法评估边坡可靠度是一种可行的方法。

(2)该工程边坡在节理影响下,发生以倾倒-滑移为 主的变形,且在后续施工中仍有开挖过程,可能造成边 坡稳定性降低,应开展边坡进行位移监测。

(3)PEM 是概率岩土工程应用的有效工具,与 MCS 相比,它所需要的模拟仿真次数更少,因单次边坡稳定 性计算耗时不短,所以较少的仿真次数直接提高了计算 的效率。点估计法还有一个重要优点是在可靠性分析 中可以忽略特定随机变量的概率密度函数,因此该方法 适用于分析各种工程问题。

(4)在天然工况下,两种可靠度评价方法结果具有 一致性,该边坡可靠度较高,PEM法得到边坡可靠性指 标为 6.007,失稳破坏概率 0.001%。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈祖煜,陈立宏,王玉杰,等.滑坡和建筑物抗滑稳定分析中的可靠度分析和分项系数设计方法[C]//陈祖煜.水利水电工程风险分析及可靠度设计技术进展.北京:中国水利水电出版社,2010:27-39.[CHEN Zuyu, CHEN Lihong, WANG Yujie, et al. Reliability analysis and partial factor design methods for slope stability [C]// CHEN Zuyu. Proceedings of the symposium on risk analysis and reliability based design for water resources and hydropower projects. Beijing: China Water Power Press, 2010: 27-39. (in Chinese)]
- [2] 刘超,袁颖,左朝晖,等.考虑土参数自相关距离影响的 单桩可靠性设计方法[J].水文地质工程地质,2020,47
  (3):122-127. [LIU Chao, YUAN Ying, ZUO Zhaohui, et al. Pile reliability design considering the influence of soil auto-

correlation distance [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 122 – 127. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 李涛,刘国栋,王聪.基于可靠度理论的尾矿坝失稳概率及敏感性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):81-86. [LI Tao, LIU Guodong, WANG Cong. Instability probability and sensitivity analysis of tailings dam based on reliability theory [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3):81-86. (in Chinese with English abstract)]
- [4] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 120 – 128.
- LI Y J, HICKS M A, NUTTALL J D. Comparative analyses of slope reliability in 3D [J]. Engineering Geology, 2015, 196: 12 – 23.
- [6] 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.
- LU R L, WEI W, SHANG K W, et al. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction technique considering ubiquitous joint model [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8862243.
- [8] 冯开帅,姜谙男,吴洪涛,等.顺层非贯通节理边坡稳定 性及破坏模式研究[J].公路工程,2020,45(6):52-58. [FENG Kaishuai, JIANG Annan, WU Hongtao, et al. Study on failure mode and stability of slope based on intermittent joints [J]. Highway Engineering, 2020, 45(6):52-58. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CHANG Y, CHANG L S, REN F Q. Strength anisotropy of jointed rock slope considering mining damage: A numerical analysis method [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2587 - 2614.
- [10] 陈国良,廖国华.岩体节理网络的计算机模拟[J].有色金属(矿山部分), 1989, 41(6):23-28. [CHEN Guoliang, LIAO Guohua. Computer simulation of rock mass joint network [J]. Nonferrous Metals (Mining), 1989, 41(6):23-28. (in Chinese)]
- [11] 王宏,陶振宇.边坡稳定分析的节理网络模拟原理及工程应用[J].水利学报,1993,24(10):20-27.[WANG Hong, TAO Zhenyu. The principle of joint network simulation in the stability analysis of rock slope and its engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 24(10):20-27. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 严豪,宋彦辉,陈子玉.基于Voronoi节理模型的碎裂岩边 坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29

(1): 34-39. [YAN Hao, SONG Yanhui, CHEN Ziyu. Stability analysis of broken rock slope based on Voronoi joint net model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 李源亮,任光明,刘艳领,等.基于节理网络有限元的岩质边坡稳定性分析[J].长江科学院院报,2019,36(1):78-83.
  [LI Yuanliang, REN Guangming, LIU Yanling, et al. Stability analysis of rock slope based on finite elements with joint network [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1):78-83. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 肖术,吴顺川,高永涛,等.基于PEM-JFEM方法的节理岩质边坡稳定性评价[J].工程科学学报,2015,37(7):844-850.[XIAO Shu, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Jointed rock slope stability evaluation based on PEM-JFEM method[J]. Chinese Journal of Engineering,2015,37(7):844-850.(in Chinese with English abstract)]
- [15] 张宜杰,任光明,常文娟,等.节理岩质边坡稳定性概率 分析[J].成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 235-241. [ZHANG Yijie, REN Guangming, CHANG Wenjuan, et al. Probabilistic analysis of stability of jointed rock slope [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(2): 235-241. (in Chinese with English abstract)]
- [16] PRZEWLOCKI J, ZABUSKI L, WINKELMANN K. Reliability analysis of sea cliff slope stability by point estimate method [J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2019, 471: 042003.
- [17] 许湘华,曲广琇,方理刚.基于节理几何参数不确定性的 边坡可靠度分析 [J].中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3):1139-1145. [XU Xianghua, QU Guangxiu, FANG Ligang. Reliability analysis of rock slope based on uncertainty of joint geometric parameters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1139-1145. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王双,陈征宙,吴强,等.基于节理产状不确定性的边坡 稳定性及敏感度分析[J].岩土工程学报,2013,35(2): 348-354.[WANG Shuang, CHEN Zhengzhou, WU Qiang, et al. Stability and sensitivity analysis of slopes based on uncertainty

of joint orientations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 348 – 354. (in Chinese with English abstract)

- [19] 王双.节理产状概率模型研究及其在产状分组和岩坡不确定分析中的应用[D].南京:南京大学,2013.[WANG Shuang. Research on distribution model of joint orientations and its application to joint set clustering and rock slope uncertainty analysis [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 申矫健.基于参数不确定性的岩质边坡稳定性分析方法 研究[D].赣州:江西理工大学,2014. [SHEN Jiaojian. Study on stability analysis method of rock slope based on parameter uncertainty [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [21] BAECHER G B, LANNEY N A, EINSTEIN H H. Statistical description of rock properties and sampling [J]. 18th U S Symposium on Rock Mechanics, USRMS 1977, 1977; 5 – 8.
- [22] 王宇,李晓,刘帅,等. 岩体离散裂隙网络稳定性计算的 节理有限元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 刊 2): 3337-3345. [WANG Yu, LI Xiao, LIU Shuai, et al. Stability calculation for discrete fracture network of rock masses based on joint finite element method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3337-3345. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CACAS M C, LEDOUX E, DE MARSILY G, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model [J]. Water Resources Research, 1990, 26(3): 479 – 489.
- [24] DERSHOWITZ W S, EINSTEIN H H. Characterizing rock joint geometry with joint system models [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(1): 21 – 51.
- [25] ROSENBLUETH E. Point estimates for probability moments
   [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1975, 72(10): 3812 3814.
- [26] 李侃,巨能攀.基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):23-27.[LI Kan, JU Nengpan. Integrated application of Monte-Carlo simulation for landslide reliability analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2014,25(1):23-27. (in Chinese with English abstract)]