DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20251117

考虑裂隙空间不确定性的裂隙岩体边坡稳定性分析

李 伟[1],景明明[1],曹有财[1],黄林柯[1],杨宇航[2],程志和[2]

(1. 国网甘肃省电力公司,甘肃 兰州 730046;2. 哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了解裂隙分布的随机性及结构面力学性质的差异对边坡稳定性与安全性评价的影响,基于岩体裂隙网络分布理论,提出一种考虑裂隙空间不确定性的边坡稳定性分析方法,并将其应用于裂隙岩体边坡稳定性分析中。结果表明,对比坡面裂隙密集与稀疏模型的安全系数的统计分布,裂隙空间分布的随机性使边坡失稳概率产生非常大的波动,其影响权重较岩体强度参数更高,裂隙空间分布的不确定性为准确分析岩质边坡可靠度的关键,融合随机节理分布与裂隙参数不确定性的稳定性分析方法使岩质边坡可靠度评价结果更加准确、合理。

关键词: 离散裂隙网络;裂隙岩体边坡;动力响应;稳定性;概率分布

中图分类号: TV223;TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)11-0087-05

1 概况

西南地区怒江沿线区域内为典型高山峡谷区,存在活动断层且地震频发。由于河流切割,峡谷两侧碎裂岩质高陡边坡广泛分布。某边坡工程(图1)高程3 350 m,河流高程3 037 m。右岸斜坡走向N65°W/NE,山顶高程4 866 m,高差1 829 m,坡度41°,坡面形态不规则。山顶小范围内可见积雪及植被覆盖。其余均为基岩出露,岩性为侏罗系二长花岗岩,岩石呈浅灰、灰白色,部分区域风化严重。边坡上发育有冲沟,冲沟中可见堆积物。3 073 m高程以下发育崩塌堆积物,块石岩性为花岗闪长岩,块体平均粒径约为40~60 cm,磨圆度及分选性差、无分层结构。边坡底部近公路测窗位于麦牙断裂的下盘,距断层直线距离733 m,由于公路开挖等工程活动影响,岩体破碎程度明显,卸荷作用强烈,易形成局部块石掉落。岩体主要结构面发育情况见表1。受构造断裂及表生卸荷作用控制,研究区斜坡岩体发育3组优势结构面(表2),其中,J1结构面产状平均值为298°∠71.6°,与斜坡走向呈斜交关系,呈外倾陡倾角特征,迹线可见长度达5 m,裂隙闭合且未发育充填物,具备形成岩体失稳后缘拉裂边界的工程地质条件;J2结构面产状196.3°∠67.4°,与坡面呈斜交展布,表现为内倾陡倾角形

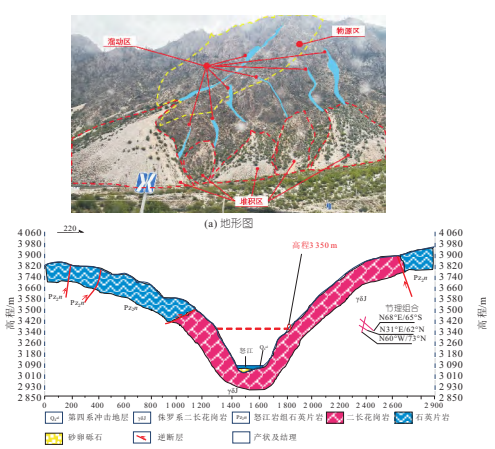


图1 工程地形图及地质剖面图

Fig. 1 Project topographic and geological section map

表1 岩体主要结构面发育情况

Tab. 1 Development of main structural surface of rock mass

编号	产状	迹长/m	间距/m	张开度/mm	充填
J1	78°~87°∠45°~87°	2.1	0.15	5~50	无充填
J2	300°~332°∠20°~46°	0.3~1.0	0.1~0.3	大于50	无充填
J3	301°~303°∠78°~86°	0.5	1.0~2.0	5~50	无充填
J4	114°~118°∠76°~84°	0.5~1.5	0.3~0.5	5~30	无充填
J5	150°~179°∠42°~67°	0.5	0.5	5~50	无充填
J6	209°~256°∠60°~80°	0.5	0.5	5~50	无充填

表2 边坡结构面发育特征

Tab. 2 Development features of structural surface of slope

编号	产状	迹长/m	间距/m	充填	描述
J1	298°∠71.6°	3.86	6.08	少量砂质	陡倾向外
J2	196.3°∠67.4°	4.38	1.69	无充填	陡倾向内
J3	36.9°∠52.0°	5.06	1.00~2.00	无充填	陡倾向外

收稿日期: 2025-06-22,**修回日期:** 2025-06-29

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目(2023ZX01A10)

作者简介: 李伟(1986-),男,硕士、高级工程师,研究方向为基础设施防灾减灾等,E-mail:liwei_gwgs730046@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

态，出露迹长 3 m，发育 0.5 mm 级张开度并存在局部砂质充填现象，可能构成潜在侧向滑移边界；J3 结构面产状 36.9°∠52.0°，走向与坡面近平行，呈外倾陡倾角特性，地表出露延伸长度 2 m，其空间展布特征对斜坡变形具有控制作用。右岸斜坡的变形破坏主要表现为坡表崩塌碎屑堆积。该崩塌体由 3 组结构面组合切割形成楔形体：后缘切割面产状为 N68°E/65°S，底面产状为 N31°E/62°N，侧缘边界产状为 N60°W/73°W。崩塌后缘形成宽度约 5～10 m、高＞25 m 的后壁，总体积约 480 m^3。崩落碎屑堆积于高程 3 037～3 125 m 范围内，平均堆积厚度约 12 m。裂隙岩体边坡存在大量断层、软弱夹层、节理等不连续结构面，裂隙分布的随机性及结构面力学性质的差异，使得岩体强度、变形特性存在明显不同，直接影响边坡稳定性与安全性评价[1-9]，亟待针对裂隙岩体边坡裂隙几何参数和裂隙位置分布的不确定性，建立考虑边坡裂隙空间不确定性的稳定性分析方法。本文在合理模拟岩体裂隙网络分布的基础上，提出一种考虑裂隙空间不确定性的边坡稳定性分析方法，通过引入裂隙位置分布相关的随机变量，结合三维离散裂隙网络模型表征裂隙产状的概率分布特征，将拉丁超立方抽样随机生成所有变量参数组合，输入三维离散元法软件 3DEC 进行建模（简称 3DEC），最后利用强度折减法计算边坡模型的安全系数，统计分析安全系数得到边坡的失稳概率，继而提高裂隙岩体边坡稳定性分析的准确性和客观性。

2 理论方法

2.1 拉丁超立方抽样

相较于蒙特卡罗模拟，拉丁超立方抽样能以更少的样本数量获得较为准确的统计特性。由于裂隙空间分布的不确定性无法精确定量描述，本文通过拉丁超立方抽样方法进行稳定性分析。拉丁超立方抽样将每个不确定参数的取值范围均匀分成若干份，然后在每一份中随机挑一个值作为代表，简单来说，通过“等概率分区、每区必采”的方式，既保证小概率事件被捕捉，又大幅减少计算量，见图 2。

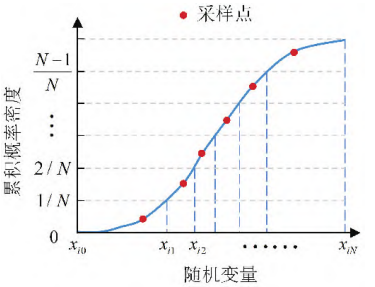


图 2 拉丁超立方抽样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Latin hypercube sampling

2.2 强度折减法

强度折减法不需要预设边坡可能破坏形式，适用于完整岩体和预前存在裂隙的岩体。可变性块体和裂隙均服从摩尔库伦强度准则，3DEC 中通过逐步降低岩体和裂隙的强度参数使斜坡达到极限平衡状态计算边坡安全系数。引入强度折减系数 F_s，粘聚力 c、内摩擦角 φ、节理粘聚力 J_c、节理内摩擦角 J_φ 的折减方程为：

$$\begin{cases} c' = c/F_s \\ \varphi' = \tan^{-1}\left(\dfrac{\tan\varphi}{F_s}\right) \\ J_c' = J_c/F_s \\ J_\varphi' = \tan^{-1}(J_\varphi/F_s) \end{cases} \tag{1}$$

式中，c'、φ'、J_c'、J_φ'分别为折减后的粘聚力、内摩擦角、节理粘聚力、节理内摩擦角。

在 3DEC 中考虑到抗拉强度 σ_t 对边坡稳定性的影响，也将抗拉强度进行折减，抗拉强度的折减方程为：

$$\sigma_t' = \sigma_t/F_s \tag{2}$$

式中，σ_t' 为折减后的抗拉强度。

关于失稳状态的判定标准，有限元分析常用数值发散、塑性区贯通、塑性应变过大和位移突变 4 种方法。但对于 3DEC 离散元模型，局部石块脱落导致数值不收敛时，边坡整体仍处于稳定状态，直接判定为失稳会导致误判。此外，岩体的破坏表现为岩块沿裂隙滑动或分离，这与有限元中材料进入塑性阶段的破坏机制不同，故选择位移突变作为失稳判定依据。

3 考虑裂隙空间不确定性的裂隙岩体边坡稳定性分析

3.1 失稳概率计算分析流程

为更准确地评估节理岩质边坡稳定性，在离散裂隙网络模型的基础上，引入节理位置随机变量，结合拉丁超立方抽样和强度折减法，提出一种融合随机节理分布与裂隙参数不确定性的稳定性分析方法，见图 3。

为验证考虑裂隙空间分布不确定性的边坡可靠性分析方法的可行性，将边坡模型坡面简化，模型包含完整的几何与力学参数，岩体物理力学参数取值见表3。通过3DEC建立裂隙岩体边坡离

中国知网 https://www.cnki.net

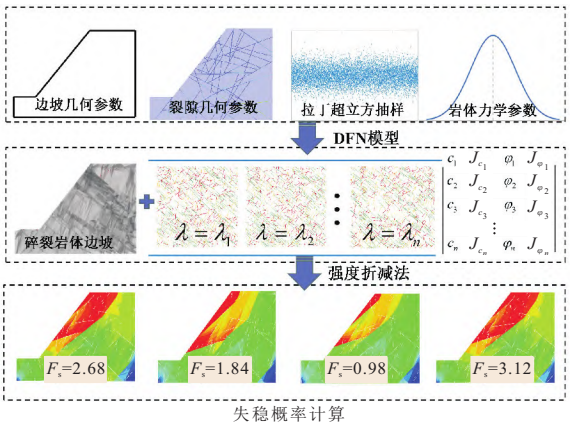


图 3　考虑裂隙分布不确定性的稳定性分析方法

Fig. 3　Stability analysis method considering uncertainty in fracture distribution

表 3　各级代表性体积单元力学性质

Tab. 3　Mechanical properties of representative volume units at all levels

性质	单轴抗压强度/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)
完整岩石	120.0	30.0	0.25	30.0	41.0
体积单元 S1	34.8	21.5	0.30	12.5	35.5
体积单元 S2	16.0	12.5	0.28	10.0	35.5
体积单元 S3	18.2	20.1	0.32	11.0	34.0

散元数值模型，裂隙位置随机变量 λ 定义为 3DEC 软件中离散裂隙网络模型的随机种子数，λ 的范围为随机数区间[100，20 250]中的整数。基于拉丁超立方抽样技术完成 500 组参数空间的概率抽样后，通过随机定位种子参数 λ 的调控，构建具有空间异质特征的三维离散裂隙网络模型。在此基础上，融合岩体力学本构关系与结构面物理特性，建立离散元边坡稳定性分析模型，采用双重强度折减算法同步弱化岩体与结构面抗剪参数，非线性迭代计算获取各模型稳定性系数 F_s。

3.2　结果与分析

对裂隙岩体边坡模型中的节理粘聚力、内摩擦角、位置变量进行 500 组参数空间的拉丁超立方采样，3 个不确定性变量分布特征见图 4。由图 4 可知，节理面粘聚强度与内摩擦角参数呈现典型正态分布特征，而节理空间定位参数则严格遵循均匀分布规律，抽样数据与预设概率模型形态上保持高度一致性。说明拉丁超立方抽样方法在岩体多参数联合分析中的双重优势——既实现多维空间的全覆盖采样，又精准维持各参数的固有统计特征，也为后续边坡可靠性评估奠定了可信的数值分析基础。

通过数值模拟揭示了裂隙空间分布对岩质边坡稳定性的控制作用，稳定性计算结果见图 5。

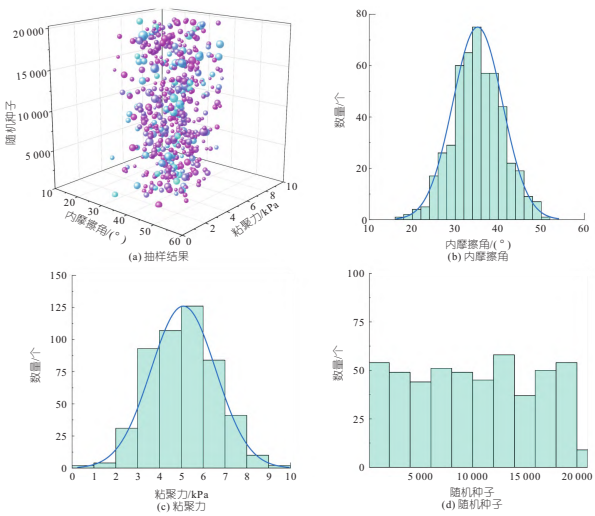


图 4　3 个不确定性变量分布特征

Fig. 4　Characterization of distribution of three uncertainty variables

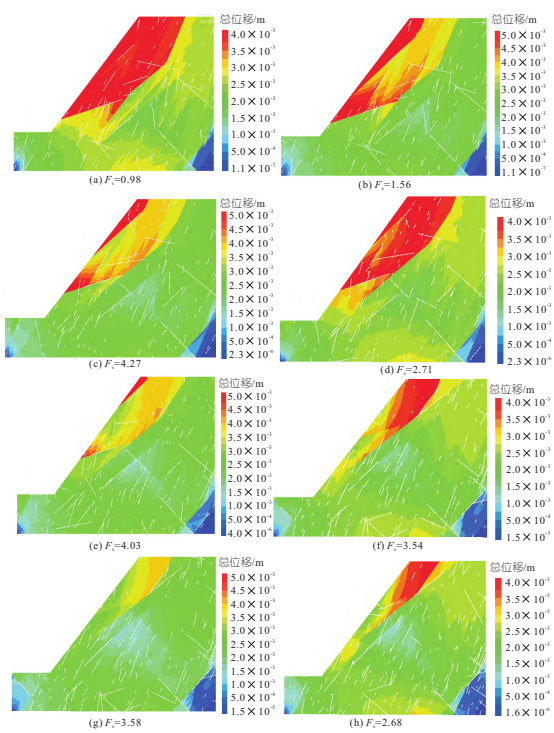


图 5　稳定性计算结果

Fig. 5　Stability calculation results

由图 5 可知，当优势节理倾向与坡面走向一致且倾角小于坡面角时，边坡呈现阶梯状复合破坏特征，表现为沿节理面滑移与岩桥剪切破坏的协同作用。裂隙岩体边坡中三维离散裂隙网络的空间结构往往成为失稳的主导因素。在抗剪强度参数及节理统计特征相同条件下，仅通过改变节理位置参数 λ 值，其安全系数最小值、最大值分别为 0.98、4.27。此外，F_s=0.98 时虽具有更高的节理抗剪强度，但由于优势节理群在坡脚形成贯通性剪切带，导致其安全系数 0.98 反而低于其他情

中国知网　https://www.cnki.net

况。上述现象表明裂隙空间分布的随机性通过改变岩体结构的各向异性特征，直接影响边坡破坏机理和稳定性状态，其控制作用可能超过材料强度参数的单一影响。

图 6 为安全系数的计算结果，通过频率分布直方图与非参数核密度估计曲线联合揭示了安全系数的概率特征。结果表明，模型安全系数呈现宽幅离散特征(0.58～4.27)，其统计分布近似服从高斯分布规律。通过数值积分计算概率密度曲线覆盖面积，确定安全系数小于临界阈值的累积概率为 3.90%。分析认为在现有地质条件下裂隙岩体边坡具有一定的稳定性，其失稳概率处于低风险等级范围。验证了基于拉丁超立方抽样的概率分析方法在岩体工程风险评估中的适用性。

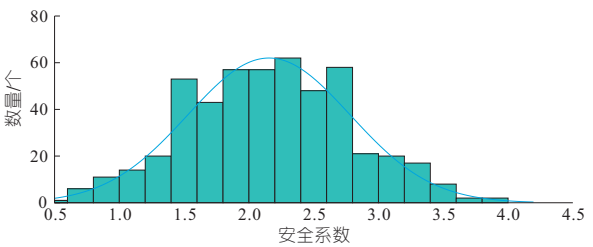


图 6 安全系数计算结果

Fig. 6 Calculation results of coefficient of safety

岩质边坡的破坏路径主要受坡面裂隙连通性的控制。在系统分析裂隙空间分布对边坡稳定性影响的基础上，进一步探究了节理位置分布对岩体破坏模式与承载能力的作用机制，并借助 Fish 语言调整裂隙圆盘中心的空间分布，分别构建了坡面裂隙密集与稀疏 2 种典型的离散裂隙网络模型，见图 7。由图 7 可知，岩质边坡的破坏路径主要由裂隙连通性决定。当裂隙位置分布相同时，即便调整岩石抗剪强度参数，边坡的滑动面形态仍基本保持一致。值得注意的是，虽然三维裂隙网络模型的裂隙统计规律相同，但具体裂隙位置的变化会导致边坡稳定性出现显著差异。

在张化进[10]所建立的坡面裂隙均匀分布离散裂隙网络模型及相关可靠度分析方法的基础上，进一步系统开展了坡面裂隙均匀、密集、稀疏 3 种分布型式下的模型安全系数计算与统计分析，计算结果见图 8。由图 8 可知，在相同岩石参数条件下，裂隙稀疏的边坡模型平均安全系数达 3.01，比裂隙密集模型(均值 1.64)高出 83%。安全系数甚至接近后者的 2 倍。密集裂隙模型安全系数在 1.27～4.48 之间波动，失稳概率仅 0.01%，而稀疏模型安全系数跨度达 0.42～2.86，失稳概率飙升至 7.16%。说明裂隙位置的随机分布对稳定性影响极大。若仅采用单一裂隙

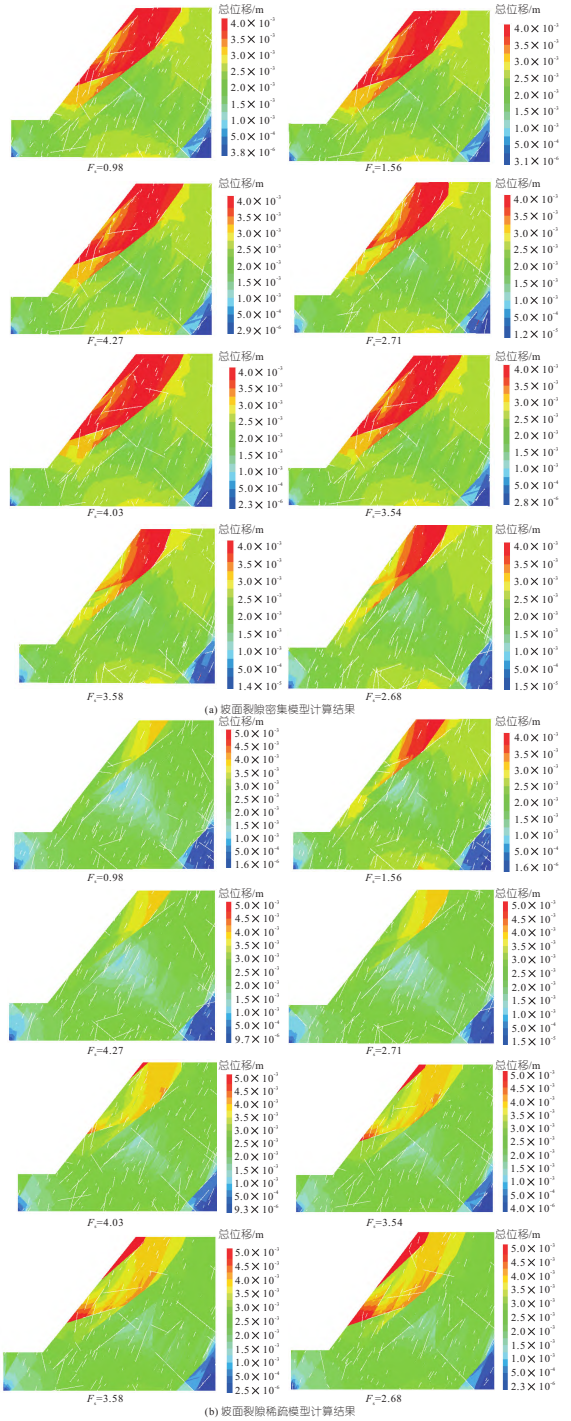


图 7 2 种情况稳定性计算结果

Fig. 7 Stability calculations results of both cases

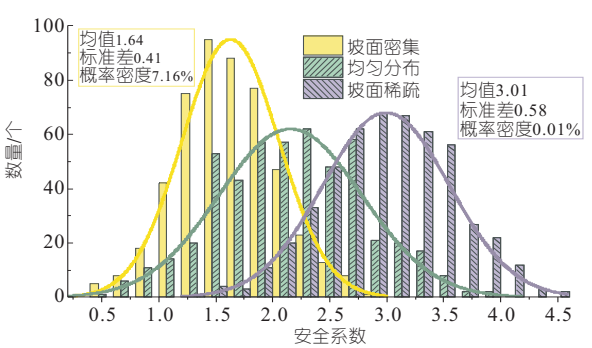


图 8 稳定性计算结果对比

Fig. 8 Comparison of calculation results of stability

中国知网 https://www.cnki.net

布局进行分析,可能使评估结果出现极端偏差。因此,实际工程必须充分考虑裂隙空间分布的多变性对计算结果的影响,如果仅仅采用某一节理位置随机变量进行可靠度分析,可能严重高估或低估岩质边坡的可靠度。

4　结论

a. 裂隙空间分布的随机性通过改变岩体结构的各向异性特征,直接影响边坡破坏机理和稳定性状态,其控制作用可能超过材料强度参数的单一影响。

b. 岩质边坡的破坏路径主要由裂隙连通性决定。当裂隙位置分布相同时,即便调整岩石抗剪强度参数,边坡的滑动面形态仍基本保持一致。虽然三维裂隙网络模型的裂隙统计规律相同,但具体裂隙位置的变化会导致边坡稳定性出现显著差异。

c. 裂隙空间分布的随机性使边坡失稳概率产生非常大的波动,其影响权重较岩体强度参数更高,裂隙空间分布的不确定性为准确分析岩质边坡可靠度的关键。融合随机节理分布与裂隙参数不确定性的稳定性分析方法使岩质边坡可靠度评价结果更加准确、合理。

参考文献:

[1] VARKEY D, HICKS M A, VARDON P J. Influence of spatial variability of shear strength parameters on 3D slope reliability and comparison of analysis methods[C]//Geo-Risk 2017, Denver, Colorado. 2017:400-409.

[2] RAFIEI RENANI H, MARTIN C D, VARONA P, et al. Stability analysis of slopes with spatially variable strength properties[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2019, 52(10):3791-3808.

[3] AZARAFZA M, AKGÜN H, FEIZI-DERAKHSHI M R, et al. Discontinuous rock slope stability analysis under blocky structural sliding by fuzzy key-block analysis method[J]. Heliyon, 2020, 6(5):e03907.

[4] KUMAR A, PANDIT B, TIWARI G. Reliability-based stability analysis of large rock slopes with different failure mechanisms using response surface methodology[J]. Environmental earth sciences, 2022, 81(21):511.

[5] LI X S, WANG Y M, LIU Z F, et al. Catastrophic mechanism analysis of deformation and instability of the layered rock slope[J]. IOP conference series: Earth and environmental science, 2021, 634(1):012031.

[6] 高玉峰, 万愉快, 张飞. 三维非对称边坡稳定性分析极限平衡法[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(12):1819-1830.

[7] 邓东平, 彭一航, 王翊民. 节理岩质边坡稳定性分析改进 Sarma 法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12):2957-2981.

[8] 蒋青江, 邓亚虹, 杨楠, 等. 基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(3):716-723.

[9] ZHANG H J, WU S C, ZHANG Z X, et al. Reliability analysis of rock slopes considering the uncertainty of joint spatial distributions[J]. Computers and geotechnics, 2023, 161:105566.

[10] 张化进. 基于数据驱动的岩质边坡稳定性分析方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.

Slope Stability Analysis of Rift Rock Body Considering Rift Space Uncertainty

LI Wei[1], JING Ming-ming[1], CAO You-cai[1], HUANG Lin-ke[1], YANG Yu-hang[2], CHENG Zhi-he[2]

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730046, China;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To understand the impact of the randomness of fracture distribution and the differences in mechanical properties of structural planes on the stability and safety evaluation of slopes, based on the theory of rock mass fracture network distribution, a slope stability analysis method considering the spatial uncertainty of fractures is proposed and applied to the stability analysis of fractured rock mass slopes. Compared the statistical distributions of safety factors between models with densely and sparsely fractured failure surfaces, the results demonstrate that that the randomness of fracture spatial distribution causes substantial fluctuations in the probability of slope instability. Its influence weight is higher than that of rock mass strength parameters, indicating that the uncertainty in fracture spatial distribution is crucial for accurately analyzing the reliability of rock slopes. Therefore, the stability analysis method integrating the randomness of joint distribution and the uncertainty of fracture parameters yields more accurate and rational reliability assessment results for rock slopes.

Key words: DFN; fragmented rock slope; dynamic response; stability; probability distribution

中国知网　https://www.cnki.net