

基于微动频谱形态的拉裂型危岩体稳定性识别试验研究

高强¹, 彭涛¹, 郭家成¹, 刘贺¹, 谭义波¹, 赵冰², 卢晓莹², 王家伟², 贺铮²

(1.国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610093; 2.北京中关村智连安全科学研究院有限公司, 北京 100176)

摘要:【目的】为揭示危岩体在不同稳定状态下的微动频域响应特征, 构建基于频谱形态多参量指标的稳定性识别方法。【方法】以拉裂型危岩体为对象设计物理模型试验, 开展不同裂隙损伤程度下的微动响应监测, 通过傅里叶变换获取微动频谱, 提取重心频率、标准差频率和均值频率等描述频谱形态特征的指标, 并利用偏最小二乘回归构建稳定系数反演模型。【结果】①危岩体微动频谱呈稳定双峰特征, 随裂隙加深主频带左移、双峰间距缩小、幅值增大, 所提出的3种指标能够有效刻画频谱形态的演化规律。②在自变量高度相关、小样本条件下, 偏最小二乘回归反演模型稳定性与准确性良好, 成功构建了频域多参量指标与稳定系数的定量映射关系。③崩塌前, 反演的稳定系数呈现从“缓变”到“突变”的过渡特征, 在崩塌前约95 min出现加速下降, 而传统裂隙张开度指标仅在崩塌前1 s突增, 表明频域指标在崩塌前兆识别时效上具有显著优势。【结论】基于微动频谱形态响应的多参量频域指标能有效表征拉裂型危岩体稳定性演化过程, 可为危岩体早期预警提供新的技术支持。未来应进一步开展不同裂隙倾角、裂隙非连续特征及现场复杂环境下的验证研究, 推动该方法向工程应用转化。

关键词:拉裂型危岩体; 稳定性监测; 频谱形态; 微动响应; 损伤识别; 崩塌前兆

中图分类号: TU45

文献标识码: A

中国地域辽阔, 地质条件复杂, 崩塌隐患分布广泛, 这对水利水电工程、交通干线及城镇公共安全构成严重威胁^[1]。拉裂型危岩体是崩塌隐患中极具代表性的类型^[2], 其典型构造如图1所示, 多发育于高陡边坡, 具有后缘拉裂、前缘悬空的结构特征^[3], 是监测预警的重点对象。

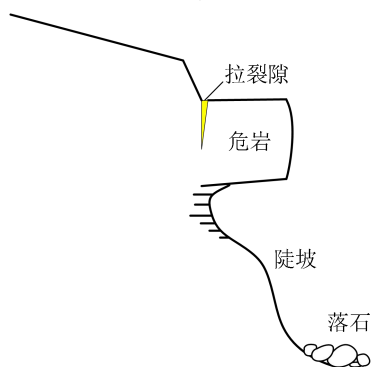


图1 拉裂型危岩体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of tension-splitting rock mass

拉裂型危岩体表现出显著的脆性破坏特征, 长期变形不显著, 而失稳演化极为迅速^[4]。传统位移指标难以表征早期稳定性恶化趋势, 因此, 识别对内部损伤更为敏感的监测指标成为当前研究的重要方向。危岩体崩塌本质上是一种动力失稳过程。随着主控结构面逐步扩展与贯通, 岩体刚度逐渐劣化, 其振动响应特性亦发生相应改变^[5]。基于这一机理, 学者们围绕振动频率参数开展了系统的稳定性评估研究。

在理论方面, 杜岩等^[6]基于滑移型块体模型试验, 量化了固有频率与粘结力之间的关系。贾艳昌等^[7]将危岩振动模式归纳为弹簧质子型与摆振型, 并推导了典型危岩体的稳定系数表达式。刘卫南与宋红克^[8]结合断裂力学理论, 给出了悬臂式危岩体稳定系数与其固有频率的关系式; 张晓勇等^[9]提出了弹性半空间-地基振动模型, 获得了固有频率的

收稿日期/Received: 2026-01-20

修回日期/Revised: 2026-04-20

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY-DDH-2023-013); 国家重点研发计划项目(2023YFC3081400)。

第一作者: 高强(1993—), 男, 工程师, 硕士, 从事水电工程安全方面的研究。E-mail: 12091545@ceic.com。

通信作者: 贺铮(1995—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事崩塌灾害机理方面的研究。E-mail: hezheng_ustb@126.com。

解析解及稳定性动力学判据。上述理论成果表明,危岩体主控裂隙的扩展会直接引起其固有频率的下降。

在试验研究方面,有关学者施加外部激励监测危岩体主导频率的变化,探究危岩体不同稳定性状态下固有频率的变化特征。Ma Guichen 等^[10-11]针对不同坡度、质量和粘结面积的混凝土试块开展试验,发现试块尺寸与主频呈负相关,且稳定性降低伴随主频显著下降。Du Yan 等^[12]基于滑移型块体模型试验指出,主频指标的预警时效性明显优于位移参数。He Zheng 等^[13]通过主成分分析提取多频域特征,发现合成的特征因子能够有效反映危岩稳定性退化和崩塌前兆信息。王通等^[14]综合振幅比、功率谱密度、傅里叶频谱比、主导频率及阻尼系数,构建了多参数融合的评价体系。吴志祥等^[15]提出了一种在常时微动条件下识别单结构面危岩体一阶固有频率的方法。

与此同时,现场微动观测也取得了积极成果。Burjáněk J 等^[16-17]在阿尔卑斯山的环境振动监测中发现,不稳定岩体区域的频谱比存在明显放大现象,且最大放大方向与裂隙走向垂直。Kleinbrod U 等^[18-19]指出,振动放大系数可作为评价危岩稳定性的有效指标。Bottelin P 和 Baillet L^[20]对一处不稳定斜坡进行了长达十年的微动跟踪监测,结果显示在崩塌发生前六个月内,其主频下降了约 24%,说明微动监测能够揭示传统位移手段难以捕捉的岩体内部损伤过程。上述工作初步验证了现场微动条件下频率特征与危岩状态之间的关联性,展现出较好的应用前景。

综上,已有研究基本形成共识:危岩体主控裂隙的损伤扩展是导致危岩体失稳破坏根本原因,基于振动频率参数的损伤识别方法在预警时效上优于传统变形监测。然而,目前尚缺乏针对微动条件下多参量频域指标稳定性识别能力研究。为此,本研究以拉裂型危岩体为对象,设计微动响应物理模型试验,探讨基于频谱形态特征的稳定性识别方法,以期对危岩体稳定性监测预警提供依据。

1 原理

将母岩对危岩的约束视为弹簧-质子系统,结构面损伤弱化对应弹簧刚度减弱。拉裂型危岩体可视为均质质点,将其自由振动过程简化为单自由度摆型振动,竖直摆振的动力学简化模型如图 2 所示。

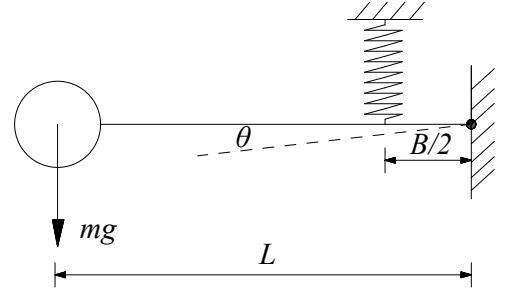


图 2 拉裂型危岩体振动力学模型

Fig.2 Schematic diagram of vibration dynamics model for tension-splitting rock mass

由图 2 可知,危岩体单自由度竖向自由振动时的振动力学方程如下:

$$mL^2\ddot{\theta} + \frac{EB^3}{3d}\theta = 0。 \quad (1)$$

式中: m 为危岩体质量, kg; g 为重力加速度, N/kg; L 为危岩体形心到结构面形心距离, m; E 为弹性模量, Pa; B 为结构面长度, m; d 为结构面厚度, m; θ 为转角, (°)。

依据振动力学原理,可推导危岩体平面竖向摆振固有频率和最大振幅分别为:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EB^3}{3dmL^2}}, \quad (2)$$

$$A = x_0^2 + \frac{\dot{x}_0^2 3dmL^2}{EB^3}。 \quad (3)$$

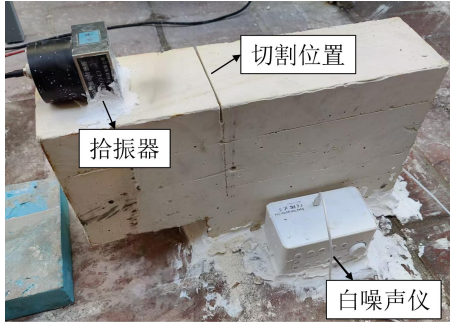
式中: ω 为固有频率, Hz; A 为最大振幅, m; x_0 为初始位移。

危岩体损伤演化过程的实质是结构面强度的弱化与有效承载面积的减小。假设结构面强度参数不变,则危岩体的最大振幅与固有频率主要受结构面形态控制。当裂隙扩展导致结构面长度 B 减小时,结构面刚度随之降低,表现为 f 减小、 A 增大。因此,理论上可通过频域参数(如频带位置、能量分布等)评估危岩体稳定性的劣化程度。然而,实际三维状态下危岩体的振动特性更为复杂,需通过试验进一步分析验证。

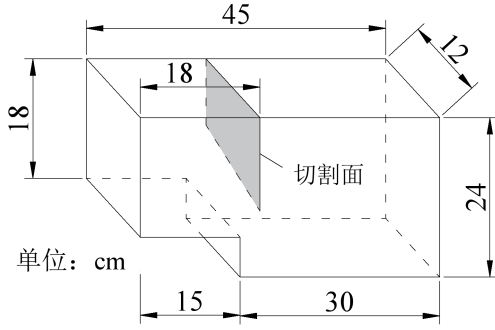
2 试验设计

2.1 拉裂型危岩体物理模型设计

考虑到自然环境下拉裂型危岩体与边坡母岩体通常具有相同的材料属性,且其破坏由后缘裂隙的损伤扩展与断裂主导^[21],本试验采用统一材料浇筑整体模型,并通过预制前缘底部悬空段模拟典型结构。模型照片及尺寸示意如图 3 所示。模型整体尺寸为 45 × 12 × 24 cm,总重量约为 36 kg,危岩体高度 18 cm,宽度为 12 cm,悬空段长度为 15 cm。



(a) 模型照片



(b) 模型结构尺寸

图3 典型危岩体物理模型

Fig.3 Photograph of the physical model

物理模型相似材料以典型灰岩的力学参数为参考,按照原岩与相似材料密度比 1:1、应力比及几何尺寸比 100:1 的原则进行配比设计。具体材料配比与力学参数分别见表 1 和表 2。

表 1 相似材料配合表

Tab. 1 Mix proportions of similar materials

材料 比例	石英砂	重晶石粉	石膏	水	甘油	缓凝剂
质量比	6	4	1	2	0.3	0.002

表 2 相似材料力学参数表

Tab. 2 Mechanical properties of similar materials

物理量	原岩平均值	相似材料平均值
密度/(g/cm ³)	2.846	2.829
抗拉强度/MPa	7.79	0.12
抗压强度/MPa	89.89	1.01
弹性模量/GPa	33.07	0.28
泊松比	0.17	0.26
粘聚力/MPa	23.187	0.19
内摩擦角/(°)	40.68	50.00

2.2 不同切割工况

为了模拟危岩体的不同稳定状态,在后缘开展逐级裂隙切割,切割面保持竖直。预试验表明,临界切割深度约为 14 cm,即临界贯通比约 0.78。试验共设置 8 个不同的切割状态,对应危岩体的 8 级稳定程度,每次切割深度递增 2 cm。前 5 次采用水平切割方式,后 2 次采用斜向切割,斜向裂隙深度取两侧切割深度的平均值。切割示意图如图

4 所示,各稳定状态对应的裂隙特征参数见表 3。

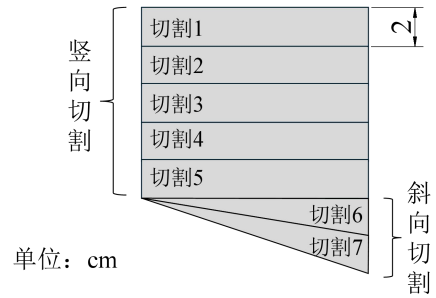


图 4 裂隙切割状态示意图

Fig.4 Schematic diagram of fracture cutting states

表 3 不同裂隙状态特征表

Tab. 3 Characteristics of different fracture states

状态	两侧裂隙长度/cm	裂隙贯通比
1	0	0
2	2	0.11
3	4	0.22
4	6	0.33
5	8	0.44
6	10	0.55
7	10、12	0.61
8	10、14	0.67

2.3 微动监测设计

本次试验以白噪音仪产生的微弱白噪声为激励源,模拟自然界随机环境振动,并选用 941B 型拾振器采集微动响应。试验中,白噪音仪布设于地面,拾振器用石膏固定于危岩体顶部。鉴于危岩体在环境振动下的最大放大方向与表面裂隙方向近乎垂直^[17],拾振器沿裂隙张开方向布置(图 3(a))。白噪声功率谱密度在频域内近似恒定,当岩体受宽频激励时,其固有频率附近频段将产生显著响应。天然微动幅值常在亚微米至数微米之间^[15]。为确保试验条件与实际相符,通过调节输出强度,使危岩体模型的振动幅值不超过 1 μm,同时设定采样频率为 800 Hz。综上,频谱特征分析可有效反映主控裂隙深度增加引起的边界条件变化。

3 多频域特征提取分析

3.1 模态特征分析

为深入解析拉裂型危岩体的频域响应特性,首先基于有限元方法对其完整状态进行了模态分析,如图 5 所示,前 3 阶振型分别对应水平摆振、竖直摆振与扭转振动,相应的固有频率依次约为 184、276 和 373 Hz。该结果为后续试验数据的频域分析提供了理论参考。

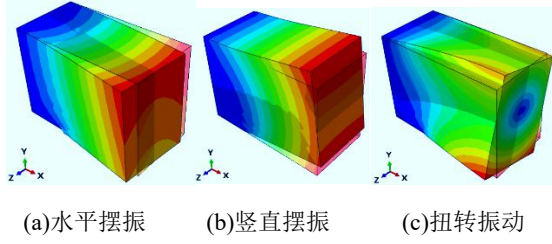


图 5 完整岩体的前 3 阶振型示意图

Fig.5 The first three vibration modes of intact rock mass

由于拉裂型危岩体试验模型的固有频率在 150 Hz 以上, 而试验场地环境振动噪声的主频范围经实测主要分布于 50 Hz 以下。基于二者频带的显著分离, 本研究采用截止频率为 50 Hz 的高通滤波以有效抑制低频环境噪声, 并通过傅里叶变换获取不同稳定状态下的频谱堆积图, 如图 6 所示。结果表明, 在轻微白噪声激励下, 频谱图呈现双峰形态, 能够有效激发危岩体的前两阶模态振型。此外, 随

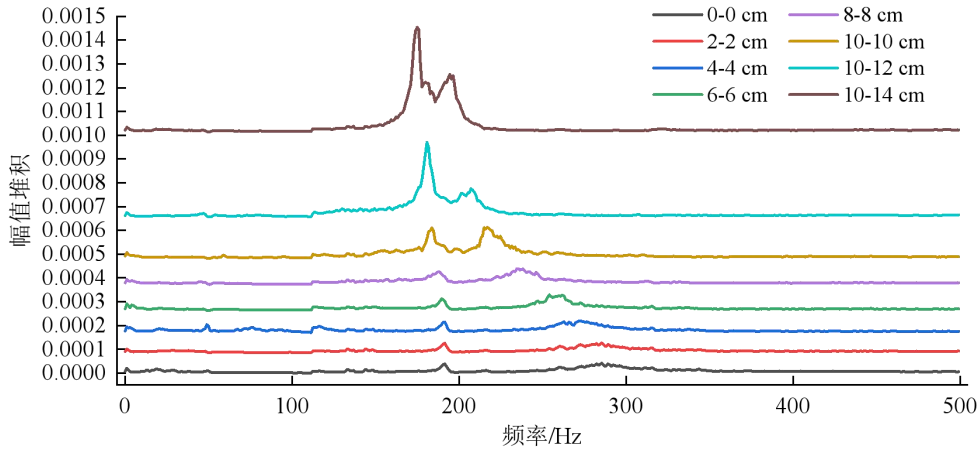


图 6 振动频谱堆积图

Fig.6 Stacked vibration spectra

3.2 频谱形态特征参量分析

针对频谱偏移位置、离散程度及幅值大小 3 种特征, 本研究选取 3 种具有明确统计意义的频域指标用于危岩体稳定性评价, 分别为: 重心频率、标准差频率与均值频率幅值。其数学含义如图 7 所示, 具体释意如下。

1) 重心频率。重心频率反映了信号能量在频域中的加权平均位置。从能量角度理解, 在给定频带范围内, 低于重心频率的频率区间所包含的能量占总能量的一半。从数学形式上看, 重心频率是以频谱幅值为权重的加权平均频率。

2) 标准差频率。将频谱曲线所包围的区域类比为平面, 标准差频率相当于以重心频率为转动中心的惯性半径。当重心附近的频谱幅值较大时, 频率标准差较小, 表明能量分布较为集中, 反之则

着裂隙逐渐加深, 频谱形态发生明显变化: ①主频带持续向左偏移, 由于固有频率与抗弯刚度呈正比关系, 因而主频带随裂隙加深持续降低; ②双峰逐渐靠近, 反映结构面损伤导致各向刚度衰减趋于一致; ③频谱幅值逐步增大, 源于结构面约束弱化后振动响应放大。由于传感器布设方向更易于捕捉沿裂隙张开方向的竖直摆振频率(即二阶固有频率), 初始状态下峰值频率位于 250~300 Hz 的高频带。随着裂隙不断切割, 岩石截面的抗弯刚度持续下降; 当裂隙深度超过 10 cm (进入斜向切割阶段) 后, 由于斜向切割导致水平向约束刚度相对弱化, 模态振型发生转向, 水平摆振(一阶)优先被激发, 峰值频率移至 180~200 Hz 的低频带。由于主控裂隙的损伤方向难以精确监测, 仅依赖峰值频率反演危岩体稳定性可能导致误判^[23]。为此, 本研究进一步针对频谱偏移位置、离散程度及幅值大小 3 种特征开展多指标分析。

分布更为分散。该指标用于定量描述频谱谱能量分布的离散程度。

3) 均值频率幅值。均值频率幅值定义为信号在频域内各频率分量所对应幅值的算术平均值, 代表振动能量大小。

3 种指标的计算公式如下所示:

$$F_C = \frac{\int_0^{+\infty} fP(f)df}{\int_0^{+\infty} P(f)df} \quad (4)$$

$$F_{RV} = \sqrt{\frac{\int_0^{+\infty} (f - F_C)^2 P(f)df}{\int_0^{+\infty} P(f)df}} \quad (5)$$

$$F_M = \text{avg} \left\{ \int_0^{+\infty} P(f)df \right\} \quad (6)$$

式中: F_C 为重心频率; F_{RV} 为标准差频率; F_M 为均值频率幅值; f 为振动频率, Hz; $P(f)$ 为振动信号

幅频谱。

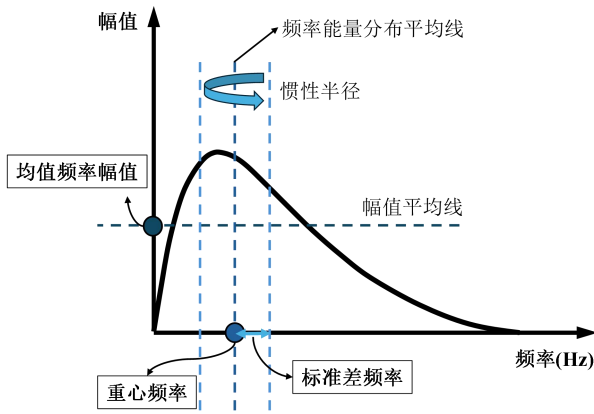


图7 频域指标数学解释

Fig.7 Mathematical explanation of frequency-domain indices

图8展示了不同稳定状态下3种频域指标的变化趋势。由图可知,随着主控裂隙不断加深,重心频率与标准差频率均呈逐渐下降趋势,重心频率由约270 Hz降至约190 Hz,标准差频率由约50 Hz降至约35 Hz。这一变化准确地反映了危岩体频谱主频带整体向左偏移(频率降低)、且能量分布离散程度逐渐减小的特征。与此同时,均值频率幅值整体呈增大趋势,正确体现了危岩体振动响应能量逐渐增强的特征,并且越接近失稳后期,幅值变化的敏感性越高。综上所述,3种指标与危岩体稳定性恶化趋势具有良好的一致性。后续将进一步联合3种指标,对危岩体稳定系数进行反演分析。

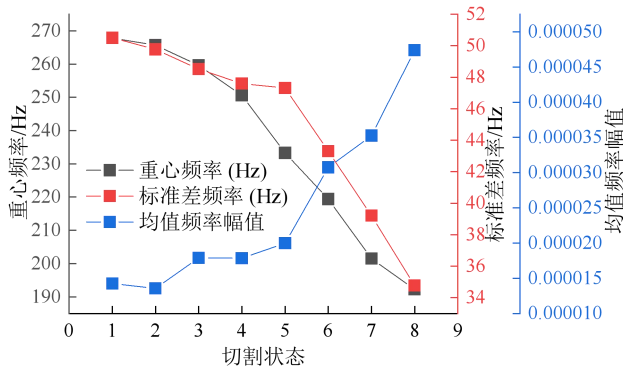


图8 频域指标变化趋势图

Fig.8 Variation trends of frequency-domain indices

4 频域特征权重分析

4.1 稳定系数计算

在实际的工程应用中,对危岩体稳定性评价通常是基于岩石材料力学的定量分析,将拉裂型危岩体概化为悬臂弯曲结构,拉应力作用在悬臂截面的上半部分,则岩桥段的最大正应力公式为:

$$\sigma_M = \frac{M}{Z} = \frac{3\rho gl^2}{h(1-\lambda)^2} \quad (7)$$

式中: σ_M 为岩桥截面最大正应力, Pa; Z 为抗弯截面模量, m^3 ; M 为自重岩桥截面产生的弯矩, $N \cdot m$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 , h 为岩体高度, m ; l 为岩体厚度, m ; λ 为裂隙贯通比。

由于岩石抗拉强度通常为抗压强度的 2% ~ 16%, 截面的上半部分拉伸区控制着拉裂型危岩体的稳定性, 当截面最大拉应力 σ_M 超过岩石抗拉强度 σ_t 时岩体将发生破坏, 故依据材料力学分析, 拉裂型危岩体稳定系数可定义为岩石抗拉强度与岩桥截面上的最大拉应力的比值^[24], 计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sigma_t}{\sigma_M} = \frac{(1-\lambda)^2}{(1-\lambda_{\max})^2} \quad (8)$$

式中: F_s 为岩石材料力学稳定系数; $\lambda_{\max}$ 为裂隙临界贯通比。

根据式(8)计算的危岩体稳定系数计算趋势如图19所示, 可以发现, 随着裂隙的切割危岩体稳定系数逐渐减小, 由初始约2.54逐渐降低至约1.38, 接近欠稳定状态(依据《崩塌防治工程勘察规范》^[24], 稳定系数<1.35为欠稳定)。为了能够利用频谱形态指标对稳定系数进行表征, 下面进行权重计算分析。

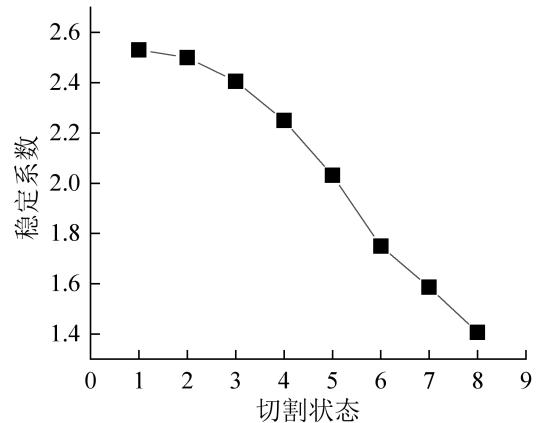


图9 稳定系数变化趋势图

Fig.9 Stability coefficient variation trend chart

4.2 基于偏最小二乘回归的权重计算

在构建多指标综合反演模型时, 由于3频域指标之间存在较强的多重共线性, 且样本量相对较小, 传统的多元线性回归方法容易因共线性问题导致回归系数不稳定, 甚至出现符号异常。为此, 本研究采用偏最小二乘回归(Partial Least Squares

Regression, PLS) 进行指标权重计算。PLS 通过提取对因变量解释能力最强的正交潜变量, 能够有效克服共线性干扰, 并适用于样本数少于变量数的情形。其基本原理如下:

设自变量矩阵 $\mathbf{X}$ ($n \times p$, 本试验 $n=8$, $p=3$) 已按列标准化, 因变量向量 $\mathbf{y}$ ($n \times 1$) 已中心化。PLS 的基本思路是依次提取潜变量 $\mathbf{t}_k = \mathbf{X}_k \mathbf{w}_k$, 使该潜变量与 $\mathbf{y}_k$ 的协方差达到最大。第 k 个成分的权重向量 $\mathbf{w}_k$ 由下式求得:

$$\mathbf{w}_k = \arg \max_{\|\mathbf{w}\|=1} \text{Cov}^2(\mathbf{X}_k \mathbf{w}, \mathbf{y}_k) \quad (9)$$

得到 $\mathbf{t}_k$ 后, 计算 $\mathbf{X}$ 的载荷向量 $\mathbf{p}_k$ 和 $\mathbf{y}$ 的内部回归系数 b_k :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_k &= \frac{\mathbf{X}_k^\top \mathbf{t}_k}{\mathbf{t}_k^\top \mathbf{t}_k}, \\ b_k &= \frac{\mathbf{y}_k^\top \mathbf{t}_k}{\mathbf{t}_k^\top \mathbf{t}_k}. \end{aligned} \quad (10)$$

随后对 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{y}$ 进行缩减:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \mathbf{X}_k - \mathbf{t}_k \mathbf{p}_k^\top, \\ \mathbf{y}_{k+1} &= \mathbf{y}_k - b_k \mathbf{t}_k. \end{aligned} \quad (11)$$

在残差矩阵上重复上述过程, 直至提取的潜变量个数 K 达到预设值。最优 K 由留一交叉验证的预测残差平方和 PRESS 最小化准则确定。

将全部 K 个潜变量的权重 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K]$ 、载荷 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_K]$ 及内部回归系数 $b_1, \dots, b_K$ 反算至原始尺度, 即可得到直接用于危岩体稳定系数反演的线性方程:

$$F_s = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3. \quad (12)$$

式中 X_1 、 X_2 、 X_3 为经趋势翻转后与 F_s 正相关的原始监测指标, 系数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 由 PLS 全部成分信息综合得到。此方程综合了全部潜变量信息, 兼具统计稳健性与物理可解释性。

4.3 权重结果计算分析

利用 MATLAB 平台编制 PLS 算法程序, 经过计算后得到稳定系数反演方程为:

$$F_s = -1.3132 + 0.0144 F_C - 0.0004 F_{RV} + 946.3426 F_M \quad (13)$$

模型以开挖过程中重心频率、标准差频率、均值频率幅值作为输入变量, 经留一交叉验证确定最

优潜变量数为 2, 训练集决定系数 $R^2=0.996$, 均方根误差 $\text{RMSE}=0.027$ 。图 10 为稳定系数映射效果。由图可知, 所有 8 次开挖工况的拟合点均紧密分布在 1:1 对角线附近, 表明模型能够高精度地复现已知稳定系数的变化趋势, 同时保持了良好的泛化能力。这证明所建综合指标与稳定系数之间存在的映射关系可靠, 可为后续监测反演提供定量依据。

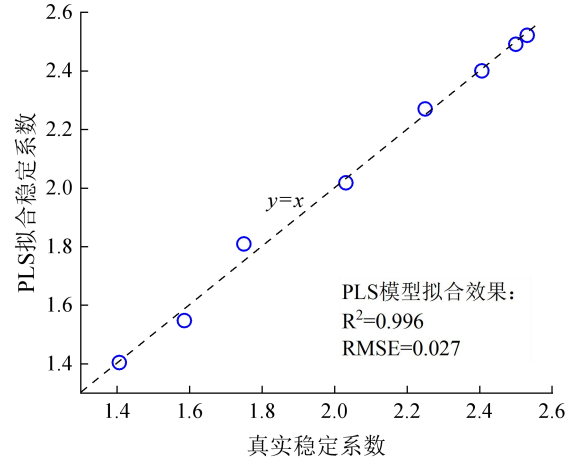


图 10 稳定系数映射效果示意图

Fig.10 Performance of stability coefficient inversion

5 临崩稳定性演化分析

为了进一步验证基于多参量频域指标的稳定系数反演方法的有效性, 并揭示崩塌前兆阶段的稳定性演化特征, 本研究采用水致弱化方法, 利用 5 支医用针头持续向裂隙端部滴水 (平均每支每分钟 20 滴), 以加速裂纹尖端的应力腐蚀速率, 从而诱发裂隙的亚临界扩展直至最终断裂^[25]。在此过程中, 持续监测危岩体的微动响应特征, 利用拉绳位移计 (精度 0.01 mm) 同步监测裂隙张开度, 并利用式 (13) 反演其损伤演化过程中的稳定系数变化, 整个崩塌演化过程历时约 7 h。图 11 为崩塌前反演的稳定系数时变演化图, 可以发现, 稳定系数在演化过程中呈现出从“缓变”到“突变”的过渡特征, 在崩塌前约 95 min 开始出现明显的加速下降, 在崩塌前降至约 1.06。而裂隙张开度在崩塌前几乎未发生明显变化, 仅在崩塌前 1 秒由约 0.78 mm 突增至 110 mm。这一现象表明, 危岩体的损伤演化过程具有较强的隐蔽性, 失稳前兆难以通过传统位移监测有效捕捉, 体现了其破坏的突发性特点。相比之下, 基于频率指标的监测方法能够在变形尚未明显发展的早期阶段, 有效识别稳定性恶化的趋势, 具有显著的前兆识别优势。

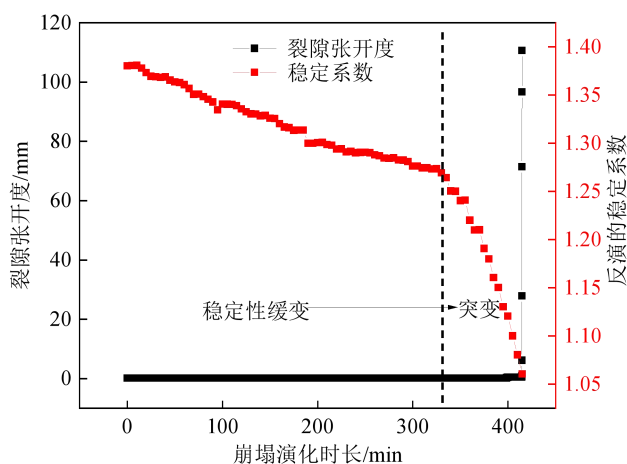


图 11 稳定系数时变演化图

Fig.11 Time-dependent evolution of stability coefficient

6 结论与展望

本研究通过微动响应物理模型试验,研究了拉裂型危岩体在不同稳定状态下的频域响应特征,提出了3种频谱形态指标,并建立了基于偏最小二乘回归的稳定系数反演模型。主要结论如下:

1)拉裂型危岩体在微动激励试验下可激发稳定的双峰频谱,随裂隙深度增加,主频带逐渐左移(频率降低),双峰间距缩小,频谱幅值增大,表明频谱形态与裂隙扩展程度具有明确的对应关系。

2)重心频率、标准差频率与均值频率幅值3种指标能够描述频谱形态特征变化,且随裂隙加深呈规律性演变,重心频率与标准差频率逐渐下降,均值频率幅值整体上升。3种指标与稳定系数之间具有良好的相关性,克服了单一峰值频率易误判的局限。

3)基于偏最小二乘回归构建的稳定系数反演模型在自变量高度相关、小样本条件下保持稳定,拟合精度高。崩塌前,稳定系数呈现从“缓变”到“突变”的过渡特征,在崩塌前约95 min出现加速下降,而裂隙张开度仅在崩塌前1 s突增,表明频域指标具有稳定性恶化前兆识别优势。

本试验仅考虑了单一竖直后缘裂隙、均质完整模型,所得结论的普适性有待拓展。未来研究应考虑:增加不同裂隙倾角、裂隙连续特征、多裂隙组合及软弱夹层等复杂地质工况,探究频域响应的普适性规律;结合现场环境振动,发展适用于野外的微动监测与频域分析技术;开展长期现场跟踪试验,建立基于频域多指标的时间序列预警模型,推动该方法向工程实用转化。

参考文献

- [1] 王忠福,罗干,杨晓洁.基于RocPro3D的大华桥水电站危岩体数值模拟研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):152-160.[WANG Zhongfu,LUO Gan,YANG Xiaojie.Rockfall Numerical Simulation at Dahuaqiao Hydropower Station Using RocPro3D[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(1):152-160.]
- [2] 胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989.[Hu Houtian.Collapse and rockfall[M].Beijing:China Railway Press,1989.]
- [3] 贺铮,谢谟文,吴志祥,等.应用微芯桩传感器的拉裂型边坡危岩体临崩倾斜变形特征现场实测研究[J].岩土力学,2024,45(11):3399-3415.[He Zheng,Xie Mowen,Wu Zhixiang,et al.Field measurement study on the pre-collapse inclination deformation characteristics of tension-cracking slope rock mass using micro-core-pile sensor[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(11):3399-3415.]
- [4] 贺铮,谢谟文,赵晨等.基于共振频率时变特征的拉裂型危岩体崩塌预测方程及试验研究[J/OL].工程力学,2025.[2025-03-21].10.6052/j.issn.1000-4750.2024.10.0799.[HE Zheng, XIE Mowen, ZHAO Chen, et al. Construction and Experimental Verification of Collapse Time Prediction Model for Tension-Splitting Rock Mass on Slopes Based on Natural Frequency[J/OL]. Engineering Mechanics,2025.[2025-03-21]. 10.6052/j.issn.1000-4750.2024.10.0799]
- [5] 姜彤,万里,黄坤等.基于固有频率的岩石压剪断裂演化过程试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):901-914.[Jiang Tong,Wan Li,Huang Kun,et al.Experimental investigation on the evolution of rock compression-shear fracture using the natural frequency[J].Journal of China University of Mining and Technology,2024,53(5):901-914.]
- [6] 杜岩,谢谟文,吕夫侠等.基于模态参量变化的边坡动态稳定分析新方法[J].岩土工程学报,2015,37(7):1334-1339.[Du Yan,Xie Mowen,Lü Fuxia,et al.New method for dynamic analysis of rock slope stability based on modal parameters[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1334-1339.]
- [7] 贾艳昌,谢谟文,昌圣翔等.基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究[J].岩土力学,2017,38(7):2149-2156.[Jia Yanchang,Xie Mowen,Chang Shengxiang,et al.A model for evaluation of stability of sliding- and falling-type dangerous rock blocks

- based on natural vibration frequency[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,38(7):2149-2156.]
- [8] 刘卫南,宋红克.基于固有频率的悬臂式危岩稳定性评价模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(1):68-74.[LIU Weinan,SONG Hongke.Stability evaluation model of cantilevered dangerous rock based on natural frequency[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2025,44(1):68-74.]
- [9] 张晓勇,谢谟文,张磊等.基于固有振动频率的坠落危岩体稳定系数计算模型研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3):585-593.[Zhang Xiaoyong,Xie Mowen,Zhang Lei.Study on calculation model of stability coefficient of falling dangerous rock mass based on natural frequency[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(3):585-593.]
- [10] Ma Guichen,Sawada K,Saito H.Study on evaluating rock block stability by using a remotely positioned laser Doppler vibrometer[J].International Journal of Geomate,2012,2(2):247-252.
- [11] Ma Guichen,Sawada K,Yashima A,et al.Experimental study of the applicability of the remotely positioned laser doppler vibrometer to rock-block stability assessment[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(2):787-802.
- [12] Du Yan,Xie Mowen,Jiang Yujing,et al.Experimental rock stability assessment using the Frozen-Tawing test[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2017,50(4):1049-1053.
- [13] He Zheng,Xie Mowen,Huang Zhengjun,et al.Experimental hazardous rock block stability assessment based on vibration feature parameters[J].Advances in Civil Engineering,2020,2020(7):1-11.
- [14] 王通,刘先峰,邱睿哲,等.基于微振动的铁路高位危岩崩塌前兆监测及预警研究[J/OL].铁道标准设计,2026.[2026-04-08].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202510090007>. [WANG Tong,LIU Xianfeng,QIU Ruizhe,et al.Research on monitoring and early warning of railway high dangerous rock collapse precursor based on micro vibration[J/OL].Railway Standard Design,2026.[2026-04-08].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202510090007>.]
- [15] 吴志祥,谢谟文,张晓勇等.基于常时微动的单结构面危岩体损伤识别实验[J].工程科学学报,2024,46(4):589-599.[Wu Zhixiang,Xie Mowen,Zhang Xiaoyong, et al.Experimental study on damage identification of single structure plane dangerous rock masses based on constant micromotion [J].Chinese Journal of Engineering,2024,46(4):589-599.]
- [16] Burjáněk J,Gassner-Stamm G,Poggi V,et al.Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope[J].Geophysical journal international,2010,180(2):820-828.
- [17] Burjáněk J,Moore J R,Yugsi Molina F X,et al.Instrumental evidence of normal mode rock slope vibration[J].Geophysical Journal International,2012,188(2):559-569.
- [18] Kleinbrod U,Burjáněk J,Fäh D.Ambient vibration classification of unstable rock slopes:a systematic approach[J].Engineering Geology,2019,249:198-217.
- [19] Kleinbrod U,Burjáněk J,Fäh D.On the seismic response of instable rock slopes based on ambient vibration recordings[J].Earth,Planets and Space,2017,69(1):1-9.
- [20] Bottelin P,Baillet L.Original Insights Into Rock Slope Damage Processes Until Collapse From Passive Seismic Monitoring[J].Geophysical Research Letters,2024,51(13):1-10.
- [21] 刘汉东,赵亚文.边坡失稳岩体结构控制论[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(6):51-59.[LIU Handong,ZHAO Yawen.Rockmass structural control theory of slope instability[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2022,43(6):51-59.]
- [22] 赵晨,谢谟文,杜岩等.倾倒型危岩体空间振动特征及损伤识别[J].工程科学与技术,2024,56(5):48-59.[ZHAO Chen,XIE Mowen,DU Yan,et al.Spatial vibration characteristics and damage identification of toppling dangerous rock mass [J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(5):48-59.]
- [23] 王根龙,伍法权,祁生文.悬臂-拉裂式崩塌破坏机制研究[J].岩土力学,2012,33(S2):269-274.[WANG Genlong,WU Faquan,QI Shengwen.Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(S2):269-274.]
- [24] T/CAGHP011-2018 崩塌防治工程勘察规范(试行)[S]. [T/CAGHP 011-2018 Specification for Engineering Investigation of Rock Falls and Collapses[S].]
- [25] 贺铮,谢谟文,赵晨.重力主导作用下拉裂型边坡危岩体临崩微倾斜变形规律研究[J].岩石力学与工程学报,2026,45(2):449-465.[HE Zheng,XIE Mowen,ZHAO Chen.Micro-tilting deformation behavior of tension-fractured hazardous rock mass preceding collapse under gravity [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2026,45(2):449-465.]

Experimental study on stability identification of tension-splitting hazardous rock mass based on microtremor spectral morphology

Gao Qiang¹, Peng Tao¹, Guo Jiacheng¹, Liu He¹, Tan Yibo¹, Zhao Bing², Lu Xiaoying², Wang Jiawei², He Zheng²

(1.Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610093, China; 2.Beijing Zhongguancun Institute of Safety Science Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: **【Objective】** To reveal the microtremor frequency-domain response characteristics of hazardous rock masses under different stability states and establish a stability identification method based on multi-parameter spectral morphology indices. **【Methods】** Taking tension-splitting hazardous rock masses as the research object, physical model tests were designed to collect microtremor responses under different fracture damage degrees. Fourier transform was adopted to obtain microtremor spectra, from which three spectral morphology indices including centroid frequency, standard deviation frequency and mean frequency were extracted. A partial least squares regression model was built for stability coefficient inversion. **【Results】** ① The microtremor spectra of hazardous rock masses show stable bimodal characteristics. With the deepening of fractures, the dominant frequency band shifts leftward (frequency decreases), the bimodal spacing narrows and the spectral amplitude increases. The three frequency indices can effectively characterize the evolution of spectral morphology. ② Under high multicollinearity and small sample size, the partial least squares regression inversion model presents good stability and accuracy. ③ Before collapse, the inverted stability coefficient changes from slow variation to abrupt variation, with an accelerated decrease starting about 95 minutes before failure. By contrast, the traditional fracture opening displacement rises sharply only 1 second before collapse, indicating that frequency-domain indices have obvious advantages in identifying early collapse precursors. **【Conclusion】** The multi-parameter frequency-domain indices based on microtremor spectral morphology can effectively characterize the stability evolution of tension-splitting hazardous rock masses and provide new technical support for early warning of rockfall hazards. Further verification under different fracture dip angles, discontinuous fracture characteristics and complex field conditions shall be conducted in future studies to promote the engineering application of this method.

Keywords: tension-splitting hazardous rock mass; stability monitoring; spectral morphology; microtremor response; damage identification; collapse precursor