基于声像监测边坡危岩崩塌启动机制与前兆特征室内试验

张信贵[1a]，蒋振炎[1a]，蓝日彦[2a]，范立峰[3]，严利娥[1a*]，韩伟[1b]，唐正辉[2b]，张懿丹[1b]，田佳男[1a]

1. 广西大学 a. 土木建筑工程学院；b. 设计院有限公司，南宁 530004；
2. 广西北部湾投资集团有限公司 a. 广西新发展交通集团有限公司；b. 广西交通设计集团有限公司，南宁 530029；
3. 北京工业大学城市建设学部，北京 100124

第一作者，E-mail：124700708@qq.com

* 通信作者，E-mail：30781844@qq.com

2024-10-25 收稿；2024-11-28 修回；2025-01-11 接受

基金项目：广西交通运输行业重点科技项目(桂交便函〔2020〕150 号)；广西重点研发计划项目(桂科 AB22035011)；广西科技重大专项(桂科 AA23073005)；水利工程边坡支护成套技术项目(23KC01)；广西壮族自治区住房和城乡建设厅资助项目(桂建科〔2022〕1 号)；中化地质矿山总局项目(ZHTD202101)；广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2024088)

中图分类号：P642.21　　文章编号：2096-8523(2025)03-0212-16　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240632

摘　要：为有效预测和防范危岩崩塌，保障公路交通运输的安全，通过声发射和视频联合监测的方法，开展了风化因素、坡度因素、外部荷载因素和振动因素 4 个不同工况下危岩崩塌启动的室内模型试验，结合声发射信号在时域、频域、时频域的演化特征，以及视频图像的时空变化特征，对多种不同影响因素下危岩崩塌孕育过程的启动机制与前兆特征进行了研究与分析。研究结果表明，在启动机制方面，危岩崩塌的主控因素包括危岩重心偏移、危岩与坡面间的黏结力下降和边坡危岩整体下滑力增大且超过抗滑力极限。其中危岩与坡面(或母岩)间的黏结力下降为滑移式与倾倒式崩塌的共有启动机制，危岩重心偏移主要为倾倒式崩塌的启动机制，危岩整体下滑力增大且超过抗滑力极限主要为滑移式崩塌的启动机制。可将这 3 类主控因素作为实际边坡危岩崩塌启动机制的判断标准之一。在前兆特征方面，危岩崩塌前，宏观上出现局部掉块与小型岩崩等前兆现象，声发射信号多出现于中低频带中，且主频带较宽，同时中高幅值、高能量信号占比较多。因此当综合前兆特征中多个单一前兆特征同时出现时，可作为实际边坡危岩发生崩塌的判断标准之一。本研究可为公路边坡危岩崩塌的监测预警提供科学依据和技术支持，有助于提高危岩崩塌灾害防治的有效性和可靠性。

关键词：声像监测；危岩崩塌；启动机制；前兆特征；室内试验；边坡

我国地形地貌多样、地质活动频繁，山地占国土面积的 69%，是全球地质灾害最为频发的国家之一。特别是滑坡、崩塌和泥石流等灾害，在我国分布广泛。随着广西交通行业的快速发展，在公路修筑过程中深挖高填形成了大量人工和改造后的路域高陡边坡危岩体，打破了岩土体原有的地质环境平衡，在自然风化条件、气候与环境运营的影响下，边坡危岩失稳崩塌破坏的现象日益增多，尤其是强降雨、台风、地震等特殊的影响因素，极易诱发危岩崩塌等地质灾害，给公路交通运输带来了重大安全隐患，且严重危害了人民的生命财产安全。

根据国家统计局中国统计年签 2023 年发布的

著录信息：张信贵，蒋振炎，蓝日彦，等. 基于声像监测边坡危岩崩塌启动机制与前兆特征室内试验 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：212-227.
ZHANG Xingui, JIANG Zhenyan, LAN Riyan, et al. An indoor test on the initiation mechanism and precursor characteristics of dangerous rock collapse on slopes based on acoustic-visual monitoring[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 212-227.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

《地质灾害及防治情况》[1]，统计了近 10 年(2013—2023 年)全国发生的地质灾害、崩塌灾害、崩塌占比等数据和实际崩塌灾害的案例情况，如表 1，2 所示。

表 1　全国近 10 年地质灾害及崩塌灾害统计

Table 1　National geological disasters and collapse disaster statistics in the past 10 years

年份	地质灾害总数/起	崩塌/起	崩塌占比/%
2013	15374	3288	21.39
2014	10937	1860	17.01
2015	8355	1870	22.38
2016	10997	1905	17.32
2017	7521	1356	18.03
2018	2966	858	28.93
2019	6181	1238	20.03
2020	7840	1797	22.92
2021	4761	1746	36.67
2022	5659	1366	24.14
总计	80591	17284	21.45

据表 1 数据统计显示，近 10 年地质灾害总数共计 80591 起，崩塌灾害总计 17284 起，崩塌灾害占地质灾害总数的占比为 21.45%；2014 年地质灾害总数共计 10937 起，崩塌灾害总计 1860 起，崩塌灾害占地质灾害总数的占比最低，为 17.01%；2021 年地质灾害总数共计 4761 起，崩塌灾害总计 1746 起，崩塌灾害占地质灾害总数的占比最高，为 36.67%。据表 2 部分案例调查表明，危岩崩塌体积方量大，易受强降雨等自然环境因素影响，具有突发性强、分布范围广、危害性高、致灾后果严重等特点[2-4]。此外，部分灾情统计情况表明山体危岩崩塌灾害每年都会造成重大的人员伤亡和经济损失，这愈发说明了危岩崩塌的危害性高、致灾性强，因此只有开展危岩崩塌监测的前兆特征分析、早期识别与风险预警，方能更科学地实现危岩崩塌灾害的预测和预防。

危岩崩塌的触发条件和影响因素复杂多样，主要受岩体内部主控因素和外部致灾诱发因素影响[2]。为此，学者们进行了广泛研究，揭示了危岩崩塌的多种成因和破坏模式，如：任恩[5] 基于某山体危岩的稳定性分析与计算提出单体危岩发生较大规模的整体变形以倾倒式和滑移式崩塌为主；熊良文[6] 通过遥感解译、无人机摄影测量与实地调查分析指出工程中人类活动为集安市南部鸭绿江沿岸危岩崩塌的主要成因，并以滑移式、倾倒式、坠落式 3 种主要破坏模式为主；郭炳跃等[7] 通过实地调查认为在风化剥蚀以及强降雨影响下，极易发生拉裂–滑移式崩塌破坏；宋子贺等[8] 认为在重力、风化、长期降雨等条件影响下产生滑移式崩塌；周阳[9] 认为在地质构造条件、风化、地震、降雨等多种因素影响下板裂千枚岩将发生拉裂–倾倒式、滑移式、错断式和溃散式崩塌；陈洪凯等[10] 研究认为砂岩底部泥岩发育形成岩腔是群发性危岩崩塌的主控因素；柳万里等[11] 从时空分布、规模特征、发育层位、破坏模式及构造部位等角度分析了碳酸盐岩崩塌基本特征。

随着科技的创新与进步，危岩崩塌监测技术不断向智能化、数字化、自动化和多维化发展[12-13]，例如三维激光扫描(TLS)[14-15]、无人机摄影测量(UAV)[16-17]、声发射(AE)–微震(MS)[18]、光纤传感[19-20]、机器学习[21-22] 等技术在边坡危岩崩塌变形综合监测中逐渐成为一种新的趋势，进而实现了从岩体表面变形位移监测到岩体内部破裂产生的微小声震信号监测、从早期人工监测和现场巡检到自动化和智能化监测、从近距离监测到远程非接触式监测、从单一监测到

表 2　典型崩塌灾害案例

Table 2　Typical cases of collapse disasters

序号	灾害名称	发生时间	事件详细描述	灾情统计
1	贵州凯里龙场镇山体崩塌	2013-02-18	崩塌体积约5400 m^3，有6个工棚被埋压	5人死亡
2	广西桂林叠彩山景区山体崩塌	2015-03-19	崩塌体积约60 m^3，崩落后岩石破碎分解四处散落	7人死亡，25人受伤
3	陕西安康紫阳县山体崩塌	2017-06-13	一处公路发生山体岩石崩塌，一辆乘坐有3人的小轿车被落石掩埋	3人死亡
4	湖北襄阳南漳县山体崩塌	2017-01-20	某酒店后山发生山体崩塌，体积约3000 m^3	12人死亡
5	“8·28”贵州纳雍县山体崩塌	2017-08-28	整面山体崩塌下冲，淹没山脚下的普洒社区，民房倒塌34户，覆盖面积5～6 km^2	17人死亡，8人受伤，18人失联
6	“8·14”成昆铁路山体崩塌	2019-08-14	受持续强降雨影响，成昆铁路凉红站至埃岱站间，数万方高位岩体突然崩塌，致现场24名抢险清淤工作人员遇险	12人死亡，12人失联
7	陕西榆林麻兴庄村山体崩塌	2021-11-11	泽林石油工程公司所在井场旁侧山体发生崩塌	2人死亡
8	广西北流多地山体崩塌	2022-06-09	多地遭遇暴雨袭击，引发山体崩塌灾害	7人死亡，1人失联
9	贵州织金县白岩村山体崩塌	2022-05-08	突发山体崩塌，体积约25000 m^3	3人死亡
10	山西柳林县山体崩塌	2023-01-28	山西吕梁市柳林县穆村镇康家沟村发生山体崩塌	4人死亡

多维融合监测的转变。目前，已有相关学者利用先进技术开展了对危岩崩塌监测方面的研究，如：PAGANO 等[23] 和 ROBIATI 等[24] 结合三维激光扫描与无人机摄影测量技术监测岩质边坡变形位移特征，对边坡整个区域进行地质结构表征和稳定性分析，并对边坡潜在破坏面的机制进行反分析，以确定潜在的破裂面，有助于边坡危岩崩塌灾害概率的统计分析，且能够解决传统监测调查方法精确性不足的问题。ABELLÁN 等[25] 比较了三维激光扫描仪监测岩质边坡长期采集的序列数据集，分析了岩石表面裂纹裂隙扩展、体积变化和落石频率等方面的地貌演化规律，并将岩体破坏前的变形特征作为前兆指标对危岩崩塌灾害进行了空间预测。同时将时间和空间预测相结合，即 TLS 与神经网络平均算法有效结合的监测手段，可以清晰监测到边坡危岩变形失稳达到 mm 级精度的前兆位移特征[26]，未来 TLS 技术将与高精度 3D 传感设备、智能机器人和 3D 计算机视觉系统有效结合，并联合应用于岩质边坡稳定性分析和监测预警的研究中，进一步为危岩崩塌灾害早期预测预警提供合理的判断依据[27-28]。目前，声发射技术在地下工程中也是预测预报岩体稳定性的重要手段，REN 等[29] 基于声发射对脆性岩石破坏的前兆特征进行了研究，提出了以相关维数作为破坏前兆的主要指标，以 b 值（b 值为描述声发射事件振幅分布特征的重要参数，用于评估岩石的破裂过程和稳定性）作为次要指标的岩石破坏预测方法。于家烁等[30] 利用泥石流次声综合考虑时频域的多个特征，发现随机森林模型能够较为准确地甄别泥石流次声信号，为其他区域的泥石流次声预警研究提供了参考。赵志强等[31] 基于声发射监测对大尺度岩体原位直剪试验的信号特征进行了分析，发现岩体破坏过程可分为：①裂纹萌生阶段，其声发射信号微弱或几乎不存在；②裂纹扩展阶段，累计声发射信号较少；③破坏阶段，声发射信号显著增加。陈结等[32] 基于水饱和砂岩破坏的室内声发射试验，探究降雨作用对露天岩质边坡稳定性的影响，发现降雨作用对声发射信号的衰减明显，且信号呈现偶发集中的现象，进而可为降雨影响下岩质边坡失稳提供合理的前兆特征，确保了声发射技术在边坡稳定性监测中的适用性。CODEGLIA 等[33-34] 通过声发射监测岩质边坡内部微小变形位移数据与传统监测手段的结果数据进行比较，验证了声发射监测系统的高精度与合理性；通过长期连续实时监测与识别边坡失稳破坏的前兆变形特征，进而推导出边坡失稳崩塌前预警阈值设置的标准参量。张凯等[35] 开展了损伤岩样轴压破坏过程的声发射试验，得到了不同损伤程度岩石的声发射特征参数，揭示了岩石破裂过程中的关键参数响应特征。不同的声发射和微震源对应不同的频率特征，图 1 为不同声发射/微震研究的频率范围，可知不同尺度破坏的声发射/微震信号具有不同的频率范围。对于天然地震，大范围岩体在地质构造作用下发生大尺度的变形破坏，其地震信号频率分布在较低频段，而在试验室条件下岩石试件致密、均匀，以小尺度微裂纹为主，其声发射频率分布在较高频段。大尺度的裂纹扩展将产生低频声发射信号。OHNAKA 等[37] 对 2 种岩石单轴压缩过程中产生的声发射的频率特征进行统计分析发现，当岩石临近破坏时，监测到的低频声发射信号比重明显增大，并认为这与岩体在临近破坏时其内部形成的较大裂缝产生低频信号有关。在许多岩石[38-40] 与混凝土室内试验中也发现了类似的声发射规律[36]。以上研究为危岩崩塌灾害的早期预测预警提供了科学依据。

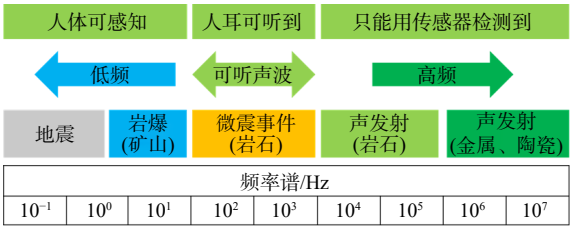


图 1　声发射–微震研究频率范围[36]

Fig. 1　Acoustic emission-microseismic research frequency range

然而，危岩崩塌的触发条件和影响因素复杂多样，不同触发条件下的成因机制和破坏模式也有所差异。目前关于在不同触发条件下对危岩崩塌的前兆特征识别和启动机制的研究较少。传统的变形位移监测技术在反映危岩崩塌孕育过程中的特征信息方面存在局限，单一的监测手段和人工监测方法难以实现危岩崩塌风险的全面有效判识。基于此，笔者开展不同影响因素工况下危岩崩塌的室内模型试验，通过声发射与视频监测技术相结合，实现多维度监测技术的融合，提高危岩崩塌风险性判识的准确率。

1　试验设计

1.1　危岩试块选取与制作

本模型试验采用灰岩相似材料现浇混凝土试块作为试验危岩体，制作强度等级为 C60 的混凝土试

块，其抗压强度标准值为 60 MPa，与中风化灰岩强度接近，共制备 4 块混凝土标准试块，其尺寸均为 10 cm×10 cm×10 cm，为了提前预制成为组合体危岩试块，对混凝土试块进行切割，切割小块的作用视为触发启动装置，通过设置小块的脱落，引发大块危岩发生崩塌，每个混凝土试块分成 1 个大块危岩和多个(3～4 个)小块危岩，同时将每 1 个小块危岩用细长线绑扎好用以试验操作，最后给每个危岩试块做好标记并编号。灰岩相似材料混凝土试块模型如图 2 所示。

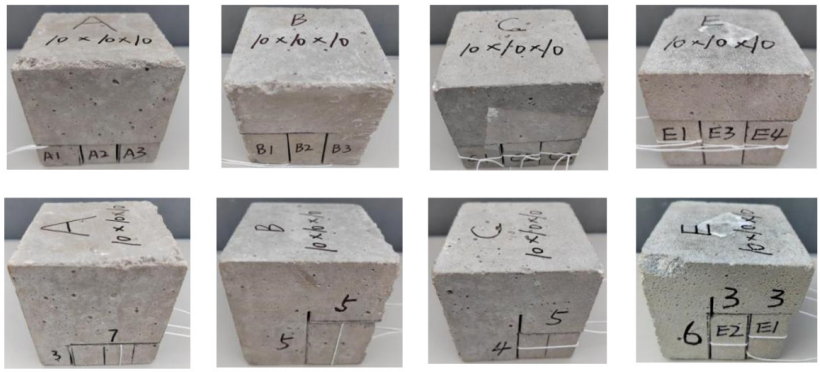


图 2　灰岩相似材料混凝土试块模型图

Fig. 2　Limestone similar material concrete test block model

1.2　模型检测系统

边坡危岩崩塌启动模型试验在木模板坡面上进行，试验所采用的声发射与视频监测设备分别为 Picoscope4000 系列声发射系统与工业相机。声发射监测技术指标如表 3 所示。

表 3　声发射监测技术指标

Table 3　Acoustic emission monitoring technical indicators

名称	电压范围/V	频率范围/Hz	采样间隔/ms
参数设置	±2	(25000，5000)	0.02

试验平台搭建位置和声视监测设备的布置方式如图 3 所示：模型试验边坡平台为木板坡面，边坡升降装置用来调节边坡坡度，工业相机(高速摄像机)正对边坡危岩试验平台用以采集视频图像信息，间隔布设双通道声发射传感器通道 1 和通道 2，分别位于木板坡面上部和下部(由于本试验通道 1 与通道 2 试验结果类似，故仅对通道 1 试验结果进行分析)，在传感器与木板间涂凡士林以增强耦合性，并采用胶带使其固定于木板坡体背面，结合声发射示波器可将采集到的波形数据转换为数字信号，最后通过采集控制平台进行仪器的操作控制与数据的采集存贮。

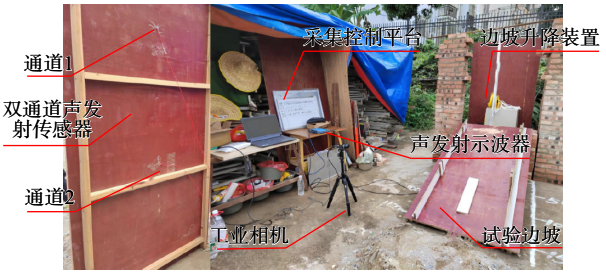


图 3　试验平台与声像监测设备的布置方式

Fig. 3　Arrangement of test platform and acoustic-visual monitoring equipment

1.3　试验方案

危岩崩塌受岩体内部主控因素和外部自然环境等诱发影响因素控制，其中地质构造、地形地貌条件和岩性特征是内部主控因素，风化、降雨、地震、人类工程活动等是外部影响因素。本试验通过人为控制不同的外部影响因素来模拟不同工况下边坡危岩崩塌启动的触发机制试验。

1.3.1　模拟风化因素工况

自然环境中岩石受长期风化作用的影响，岩体节理裂隙发育加快、结构破碎程度变强，进而导致边坡母岩与危岩的结构面强度降低，当结构面强度降低至不足以牵制危岩体时，边坡危岩便会脱离母体，发生崩塌破坏。设计风化工况，通过人为控制岩体底部风化来模拟边坡危岩受风化作用造成岩体质量损失并发生重心偏移，进而导致边坡危岩结构面强度降低，最终发生崩塌破坏。

1.3.2　模拟坡度因素工况

危岩崩塌多易形成并发生在高陡边坡或直立的山体，因此边坡坡度大小对危岩崩塌起着影响与控制作用。在相同条件下，边坡危岩所处的位置越高、边坡坡度越大、坡体越陡峭甚至接近直立时，边坡危岩体潜在的重力势能作用发挥效果越好，其主要会加大边坡危岩的下滑力，并加速边坡危岩与母岩间

裂隙的发育和贯通，最终导致边坡危岩与母岩间的黏结力不断下降，当黏结作用失效时，边坡危岩的下滑力远超其抗滑力，边坡危岩便会失稳发生崩塌破坏。设计可人为调节坡度的边坡工况，通过抬升边坡来增大坡度并使危岩重心升高，当边坡抬到一定高度时，危岩的下滑力超过其抗滑力的极限值，处于稳定状态的危岩产生一系列前兆现象并开始发生崩塌，此时的坡度达到危岩崩塌破坏的最大临界坡度。

1.3.3　模拟外部荷载因素工况

自然环境中，危岩崩塌是一个渐进损伤破坏的过程，边坡危岩发生崩塌破坏的快慢受到节理裂隙发育、裂隙水压力、降雨冲刷、植物根劈等长期作用影响。设计能够加快危岩失稳崩塌破坏进程的荷载工况，通过人为施加重物的方式来模拟外加荷载条件，进而增大边坡危岩的下滑力，以此改变危岩处于稳定的平衡条件。

1.3.4　模拟振动因素工况

自然环境中，危岩会受地震烈度诱发影响发生崩塌破坏，然而更多的是受人类工程活动和施工振动的影响，例如：矿山采场边坡，山区公路、隧道边坡等开挖卸荷改变边坡危岩原始平衡状态，弱化坡体强度，降低边坡危岩稳定性，进而导致危岩失稳崩塌。设计振动工况，通过人为锤击边坡坡体表面，引发坡体振动，打破边坡危岩原始平衡状态，进而诱发危岩失稳崩塌。

2　试验过程与结果分析

2.1　模拟风化因素

2.1.1　木板边坡 A 号混凝土（危岩）试块模拟底部风化因素试验

试验前需做好的准备工作：对完整的 A 号混凝土（危岩）试块采用人工切割的方法来预制危岩底部的软弱基座。在保证切割面光滑平整的前提下，切取出 3 个小块危岩试块作为可使 A 号危岩发生崩塌的主要控制因素，3 个小块危岩编号分别为 A1，A2，A3，同时将 3 个小块危岩分别绑好合适长度细线，便于人为抽出小块的基座危岩。最终能够达到模拟边坡危岩底部软弱基座开始风化，进而发生岩体开裂、破碎、局部掉块等前兆现象，最终导致岩体强度降低，并发生崩塌破坏过程的试验效果。

试验开始，提前开启声发射和视频监测系统，通过人为依次抽出作为支撑基座的小块危岩，抽出顺序为 A3→A2→A1，每次只需抽出 1 块小危岩即可，且要避免将其他小块危岩连带抽出。当抽出 A3 并等其完全崩落停止后，若 A 发生崩塌破坏，则停止抽出后续的小块危岩，结束试验；若抽出 A3 后 A 未发生崩塌破坏，此时继续抽出 A2，若 A2 抽出后 A 发生崩塌，则停止试验；若 A2 抽出后 A 仍未能发生崩塌，则继续抽出 A1，直至 A 发生崩塌破坏，且崩落完全停止后，结束试验。

将得到的声视监测数据进行处理，对声发射监测信号采取时域、频域、时频域变换处理，对视频数据采取抽帧处理，以获取边坡危岩崩塌全过程的特征信息。PyCharm 软件是一种常用的 Python 集成开发环境（IDE），可以提高处理效率。本次风化工况试验的视频监测采用高速摄像机，其中视频采集时长为 8 s，视频帧率为 37 FPS，视频帧数为 312，利用 PyCharm 软件编译和调试代码，设置抽取帧数间隔为 10，对视频监测数据进行图像抽帧处理，最终得到 32 张图像。通过提取抽帧处理后的图像信息，并结合完整的视频数据对每帧的图像进行特征识别与提取。根据试验中边坡危岩崩塌出现明显的特征状态与对应发生的时间信息，对图像进行拼接处理，最终得到一幅兼具时间与空间状态特征信息的危岩崩塌全过程图像，如图 4 所示。

2.1.2　风化工况试验结果分析

（1）时域波形演化特征

利用 Matlab 处理声发射信号并进行时域波形绘制，如图 5a1 所示。将危岩 A 崩塌全过程基于幅值变化分为 3 个区域，其中 a 区为早期危岩风化剥落区，b 区为中期危岩风化剥落与其致危岩倾倒式崩塌启动的结合区，c 区为后期危岩崩落滑移区。

结合图 4 可得试验的时空变化特征，如表 4 所示。

基于上述分析表明，小块危岩 A2 的风化崩落造成了危岩 A 底部支撑基座强度降低、整体重心发生偏移，进而导致危岩 A 发生倾倒式崩塌，因此 A2 风化崩落即为 A 发生崩塌的主要控制因素。同时，时域图中（0 ~ 4.8）s A1，A2 风化崩落产生的中高幅值信号及波形变化可作为危岩 A 崩塌的前兆现象，并将主控因素 A2 风化崩落产生信号的最大幅值 0.19 作为危岩 A 发生倾倒崩塌的临界阈值。

通过识别危岩崩塌全局时域特征信息可知：高幅值阶段出现在（4，6）s 之间，即 b 区，最大幅值 0.19 为 A2 风化崩落产生的，且幅值强度衰减较快、持续时间短，每个明显振幅的持续时间约为 0.05 s。由于危岩崩塌破坏过程迅速，并且声发射信号在传播过程中受到衰减以及其他信号的叠加与干扰，导致时

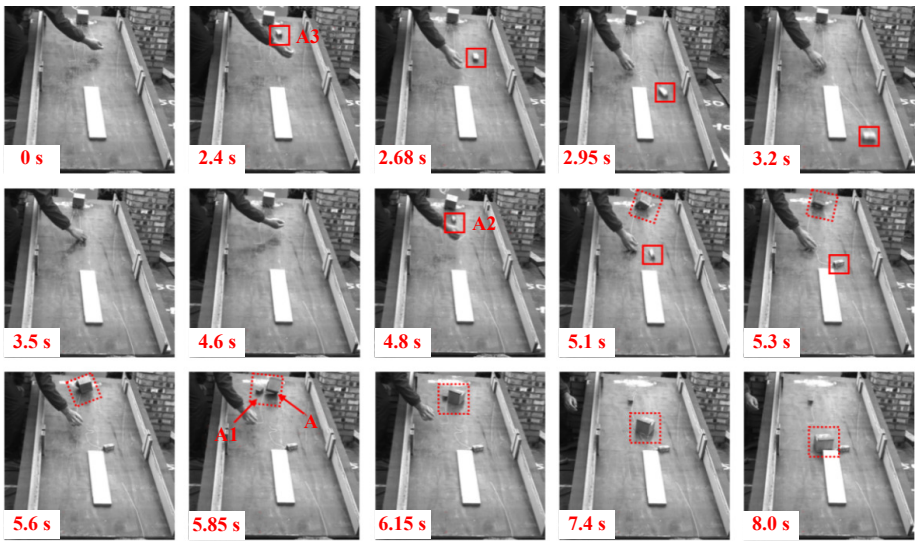
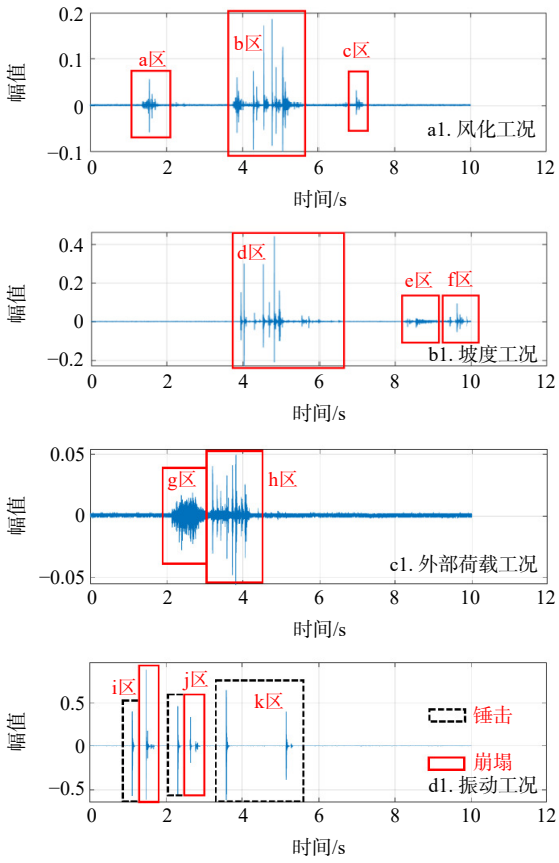


图 4　风化工况下崩塌全过程典型时–空变化特征

Fig. 4　Typical time-space variation characteristics of the whole process of collapse under weathering conditions



a ~ k 为危岩崩塌过程中的不同分区，具体含义见正文

图 5　崩塌全过程信号时域波形特征

Fig. 5　Waveform characteristics of the whole process of collapse signal in time domain

域波形特征存在不确定性，因此继续开展危岩崩塌破坏过程的频域特征分析。

（2）频域演化特征

通过快速傅里叶变换（FFT）得到声发射信号的频谱图，其中声发射监测设置的采样频率为 50 000 Hz，由于 FFT 计算是对周期性信号进行离散化处理，故经频域转换后的结果具有对称性，一般只取小于或等于采样频率一半的结果进行分析，本研究中所采用的数据为前半部分，即 0 ~ 25 000 Hz。由于采样频率设置较高导致频域转换后信号的有效频带较窄，有效频带范围在 2 000 Hz 以内，超过 2 000 Hz 后的频带范围信号幅值无明显变化，幅值大小基本一致，通过计算得到该频段标准差较小，属于高频噪声信号。为清晰展现信号的频谱特征，通过调整伸缩和平移因子，将信号经过平移拉伸后分解至 0 ~ 5 000 Hz 之间的频带范围，得到放大后的频谱图如图 6a 所示。经过信号处理可得频谱图，通过对不同频率范围进行划分，可将频带分为：[0, 500）Hz 的低频带区，[500, 1 000]Hz 的中频带区，>1 000 Hz 的高频带区，声发射波形信号频谱图中最大幅值对应的频率即为主频频率，本试验信号主频为 322.50 Hz，属于低频信号。后续所有频谱图的有效频带以及频率范围划分均与此处相同。

表 4　风化工况下崩塌的时空变化特征

Table 4　Characteristics of time-space variation of the collapse under weathering conditions

时间区间/s	试块变化	幅值	分区
0 ~ 3.5	抽动A3	1.6 s幅值最大0.055	a区
4.6 ~ 6.15	抽动A2，A1	4.8 s幅值最大0.186	b区
7.4 ~ 8	A滑移	7.0 s幅值最大0.031	c区

（3）时频域特征

通过连续小波变换（CWT）得到声发射信号的时频图如图 7a 所示。由时频图（图 7a）中可以观察到

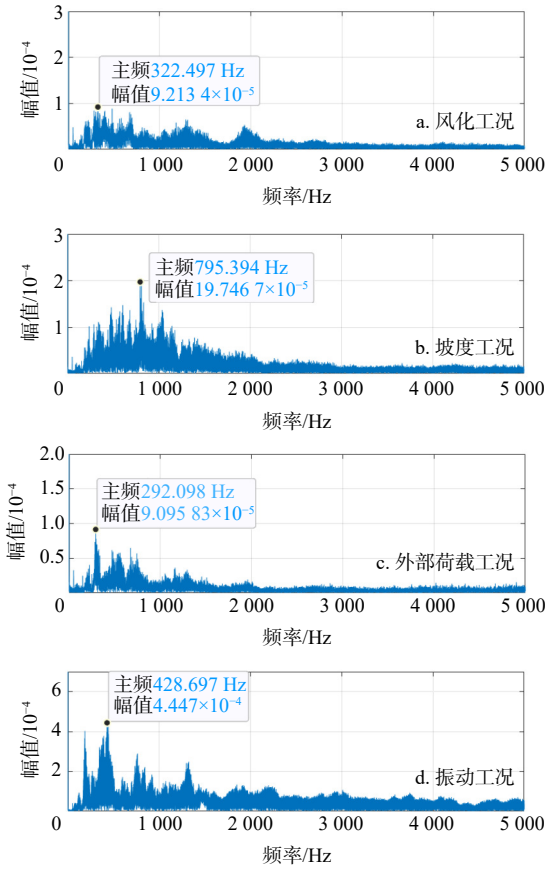


图 6　崩塌信号频域波形特征

Fig. 6　Waveform characteristics of collapse signal in frequency domain

频率随时间的分布特征，也可看到幅值随时间、频率的变化规律，右侧颜色栏代表幅值（能量）的大小。由于时频分析中信号的频率变量范围尺度较大，需对其进行对数变换，将线性频率轴转换为对数频率轴，把频率坐标尺度相对缩小，可突出显示信号频率剧烈变化的趋势，并能更清晰表示出频率随时间的变化规律。

（4）频域演化特征和时频域特征综合分析

对危岩崩塌信号的主频特征进行分析：频谱图中信号的振幅出现多次峰值，其中高幅值频带集中分布在 [200, 800)Hz 之间，频带分布较窄，中低幅值频带分布在 [800, 2 000)Hz 与 [0, 200)Hz 之间，频带分布较宽。由于主频能量主要集中分布在(300, 500)Hz 的低频带之间，表明危岩临近崩塌破坏前声发射信号出现一系列明显的低频高幅值信号特征。

对时频特征进行分析：频率变化区域分布在(0, 2)，(4, 6)，(6, 8)s 的时间范围，与时域图中产生明显的波形变化区域相对应，说明危岩风化和崩塌破坏过程中产生的声发射信号具有不同的频率特征，其中分布在(4, 6)s 之间的频率变化显著。大部分的能量信号分布在(200, 1 000)Hz 之间，同时优势频率分布在(300, 500)Hz 的低频带之间，且能量呈现较高水平，表明危岩崩塌前的主控风化过程会产生大量的低频高能声发射信号。

因此可将危岩临近崩塌破坏前产生低频（频率范围(300, 500)Hz）、高幅值（幅值范围(0, 0.921×10⁻⁴)）、宽频带和低频（频率范围(300, 500)Hz）高能信号特征作为边坡危岩发生倾倒式崩塌的频域、时频域的前兆特征。

2.2　模拟坡度因素

2.2.1　木板边坡 E 号混凝土（危岩）试块模拟坡度因素试验

试验前准备：对完整的 E 号混凝土（危岩）试块进行人工切割分为大小块危岩组合体，切割预制的小块危岩体编号依次为 E1 ~ E4，同时切割面光滑平整，保证了小块危岩作为松散体可以与危岩 E 完整地组合为一个整体。将危岩 E 组合体放置于边坡表面，小块危岩处在危岩 E 面向正前方临空面一侧的顶部，需保持危岩 E 整体的初始稳定状态。在试验开始前，需测量并记录好边坡危岩所在位置的初始高度以及边坡长度。危岩所在位置的初始坡长为 170 cm，初始坡高为 60 cm，通过计算得到边坡危岩的初始坡度约为 20.6°。同时需将尺寸测量标尺一直固定于边坡坡体旁侧，以便后续及时测量抬升高度，保证记录人员准确读数。

试验中通过人为匀速抬升边坡来实现坡度改变，坡度随着抬升高度而不断变大，同时危岩 E 整体的重心也随之升高，因此重力所产生的下滑力分量亦将增大。由于危岩组合体中的小块危岩存在预制的裂缝，故其可能会先于危岩 E 发生崩落，当边坡抬到一定高度时，危岩 E 整体的下滑力超过其抗滑力的极限值，处于稳定状态的危岩开始崩塌，记录此时的抬升高度，并将边坡固定保持高度不再变化，待危岩 E 完全崩落停止后，关闭声发射与视频监测系统，保存采集数据，结束试验，清理场地并为下一组试验做准备。

木板边坡 E 号混凝土（危岩）试块试验过程中时间与空间状态特征信息的危岩崩塌全过程图像如图 8 所示。

2.2.2　调节坡度工况试验结果分析

（1）时域波形演化特征

如图 5b1 所示为崩塌全过程信号时域波形特征，可将危岩 E 崩塌全过程出现明显幅值变化分为 3 个区域，其中 d 区为早期小块危岩崩落区，e 区为中期

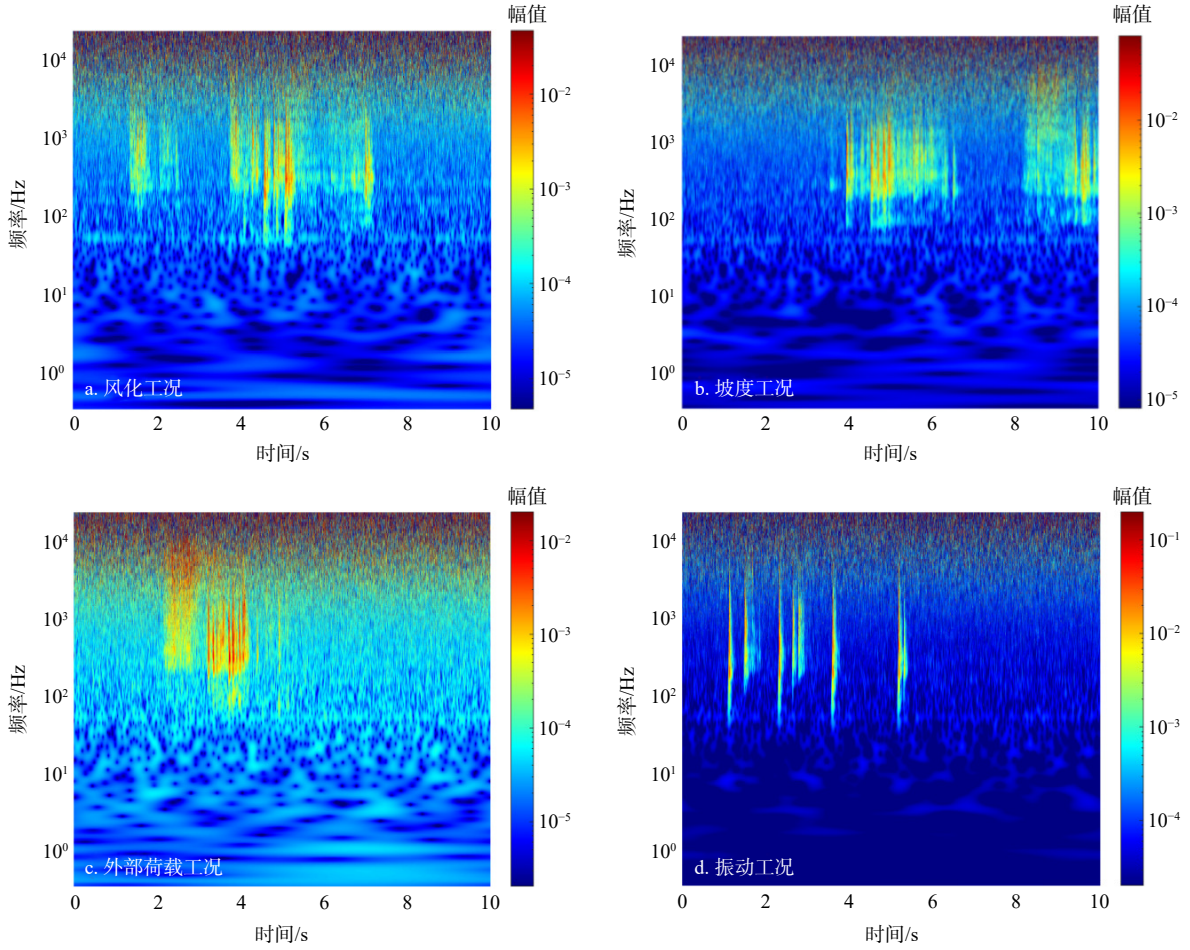


图 7　崩塌信号时频域波形特征

Fig. 7　Waveform characteristics of collapse signal in time-frequency domain

危岩滑移式崩塌启动区，f 区为后期危岩崩落滑移区。

结合图 8 进行时空变化特征分析，如表 5 所示。

由表 5 得，将小块危岩 E1 ~ E2 早期先开始失稳崩塌并与其对应于时域图中 3.9 ~ 6.5 s 之间产生的多次高幅值声发射信号作为危岩 E 崩塌的前兆现象。其中 E1，E2 早期崩塌产生声发射信号的高幅值峰值在(0.152, 0.442)之间，即为危岩 E 崩塌在时域分析中的前兆特征值。边坡达到最大临界坡度与在时域图中 8.32 ~ 9 s 之间产生的一系列连续低幅值声发射信号，可作为危岩 E 崩塌启动的前兆特征。其中最大临界坡度 40.3°与时域图中 8.32 ~ 9 s 之间的低幅值峰值 0.031，即为危岩 E 滑移式崩塌启动的临界阈值。

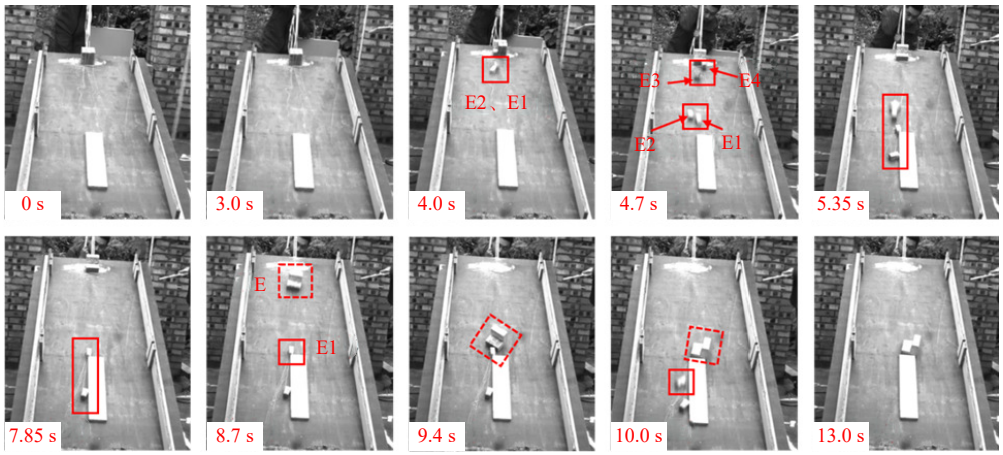


图 8　坡度工况下崩塌全过程典型时–空变化特征

Fig. 8　Typical time-space variation characteristics of the whole process of collapse under slope conditions

表 5　坡度工况下崩塌的时空变化特征

Table 5　Characteristics of time-space variation of collapse under slope conditions

时间区间/s	试块变化	幅值	分区
3.9 ~ 6.5	E1，E2碰撞；E3，E4滑落	4.83 s幅值最大0.442	d区
8.3 ~ 9	E崩塌	8.53 s幅值最大0.031	e区
9.43 ~ 10	E、E1碰撞滑动	9.63 s幅值最大0.094	f区

(2)对声发射信号进行频域特征分析所得的频谱图如图 6b 所示。

(3)声发射信号的时频图如图 7b 所示，可以看出，频率变化区域分布在 4 ~ 6, 8 ~ 9, 9 ~ 10 s 的时间范围，与时域图中产生明显的波形变化区域相对应，说明边坡危岩随坡度增大的过程中，早期小块危岩 E1 ~ E4 崩塌与中期危岩 E 发生滑移式崩塌所产生的声发射信号具有不同的频率特征。其中分布在 4 ~ 6 s 之间的频率变化更显著，且大部分的能量信号分布在 200 ~ 1 200 Hz 之间。同时优势频率分布在 200 ~ 500 Hz 的低频带之间，该阶段主要为小块危岩 E1 ~ E4 崩落产生的较高能量变化，而其余频带的高能量信号是由小块危岩崩落后滑移产生。这表明危岩 E 在崩塌前，小块危岩崩落过程会呈现大量显著的低频高能声发射信号，并衍生出一系列崩滑、碰撞现象和中高频的高幅值信号。对应时域图中危岩 E 发生滑移式崩塌的时间在 8 ~ 9 s，在时频图中该时刻却呈现为高频低能信号。这是由于危岩 E 在发生滑移式崩塌前与小块危岩完全崩落停止后出现了一段平静期，该阶段未产生声发射信号，导致危岩 E 临近崩塌启动的前兆现象不明显。因而此刻的高频低能信号更像是危岩 E 与边坡坡面发生滑动产生的摩擦信号，故该阶段的高频低能量变化不作为危岩 E 崩塌启动的前兆特征。

故可将低频(频率范围 200 ~ 500 Hz)高幅值(幅值范围 0 ~ 1.975×10^{-4})和低频(频率范围 200 ~ 500)高能信号特征视为危岩 E 滑移式崩塌启动前在频域和时频域中的前兆特征。

2.3　模拟外部荷载因素

2.3.1　木板边坡 B 号混凝土（危岩）试块模拟外部荷载因素试验

试验前准备：对完整的 B 号混凝土(危岩)试块进行人工切割分为大小块危岩组合体，切割预制的小块危岩体编号依次为 B1 ~ B3，同时切割面光滑平整，保证了小块危岩作为松散体可以与危岩 B 完整地组合为一个整体。将危岩 B 组合体放置于边坡表面，小块危岩 B1 ~ B3 处在危岩 B 面向正前方临空面一侧的顶部，需保持危岩 B 整体的初始稳定状态。采用装满水并绑扎封口的水袋作为重物，并将其放置于边坡危岩 B 的后方施加均匀分布的推力来模拟施加荷载工况，同时确保水袋滚动不会影响危岩崩塌的声发射信号，进而研究边坡危岩 B 受荷载推力作用而发生崩塌破坏的前兆特征。

试验中人为将水袋无初速度释放于边坡危岩后方任其自由滚动，随着水袋不断下滑并与危岩 B 完全接触时，危岩 B 整体受其推力作用致使下滑力随之升高，当下滑力增大到超过极限抗滑力时，处于稳定状态的危岩开始发生滑移式崩塌。危岩 B 在初始崩塌启动时，小块危岩 B1 ~ B2 并未产生崩落现象，而是在危岩 B 发生滑移式崩塌的过程中受到惯性作用才发生的崩落。待危岩 B 完全崩落停止后，关闭声发射与视频监测系统，保存采集数据，结束试验。试验过程如图 9 所示。

2.3.2　施加荷载工况试验结果分析

(1)施加荷载工况的声发射信号时域波形特征

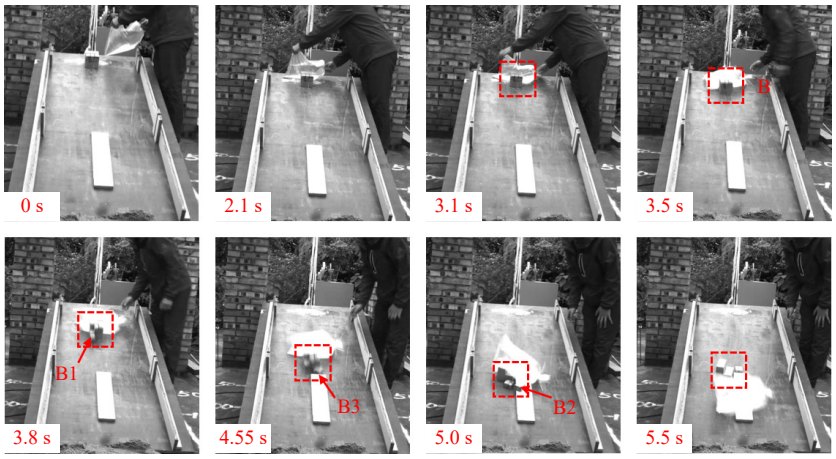


图 9　外部荷载工况下崩塌全过程典型时空变化特征

Fig. 9　Typical time-space variation characteristics of the whole process of collapse under external load conditions

如图 5c1 所示，对图 5c1 中声发射信号展开全局时域波形分析与特征识别：可将危岩 B 崩塌全过程出现明显幅值变化分为两个区域，其中 g 区为早期危岩 B 受力抗滑摩擦区，h 区为中后期危岩 B 滑移式崩塌和小块危岩 B1 ~ B3 崩落的结合区，其中危岩 B 滑移式崩塌启动出现在 h 区的初始阶段。

结合图 9 进行时空变化特征分析，可得到表 6。

表 6　外部载荷工况下崩塌的时空变化特征

Table 6　Characteristics of time-space variation of collapse under external load conditions

时间区间/s	试块变化	幅值	分区
2.1 ~ 3.1	危岩摩擦产生信号	2.69 s幅值最大0.019	g区
3.1 ~ 3.5	崩塌启动产生临界滑动信号	3.22 s幅值最大0.04	h区
3.5 ~ 4.1	多次离散的高幅值离散声发射信号	3.82 s幅值最大0.05	h区

由表 6 可知，将 2.1 ~ 3.1 s 时间段产生的先增大后减小且连续密集的小幅值抗滑摩擦信号作为边坡危岩 B 发生滑移式崩塌的早期前兆特征，即为 g 区早期危岩 B 受力抗滑摩擦区。而于 2.69 s 产生的峰值幅值 0.019 亦可作为边坡危岩 B 发生滑移式崩塌的临界阈值指标。将 h 区初始阶段 3.1 ~ 3.5 s 之间产生的由峰值幅值开始衰减至最低的临界滑动高幅值信号作为边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的前兆特征，并将在 3.22 s 的首波峰值幅值 0.04 作为判定边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的临界阈值指标。在时域图 3.5 ~ 4.1 s 之间。全局最大幅值 0.05 在 3.82 s 由 B1 崩落产生。该阶段属于危岩 B 崩塌滑移过程中的现象，故不作为边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的前兆特征。

基于上述分析表明，在只受荷载因素产生的推力作用影响时，边坡危岩 B 发生滑移式崩塌的前兆特征为 g 区中产生的连续密集的小幅值抗滑摩擦信号。而边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的前兆特征为 h 区初始阶段中产生的高幅值临界滑动信号。

(2)图 6c 所示为崩塌信号频域波形特征图，图 7c 为崩塌信号时频域波形特征图。

(3)频域演化特征和时频域特征综合分析

危岩崩塌信号的主频演化规律：频谱图中信号连续出现多次峰值振幅，高幅值频带集中在 280 ~ 750 Hz 之间，频带较宽且频率呈现较密集的状态，同时主频 292.10 Hz 对应于低频带区。故表明危岩 B 在崩塌滑动前产生的高幅值信号在低、中频带都有分布。其中 280 ~ 500 Hz 频带间的低频高幅值信号为边坡危岩 B 崩塌启动时产生的临界滑动信号，同时处在低频带间的主频 292.1 Hz 和其对应的最大幅值 9.1×10^{-5} 即为危岩 B 滑移式崩塌的启动点。故该阶段可作为边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的频域前兆特征，而 500 ~ 750 Hz 频带间的中频高幅值信号则为边坡危岩 B 早期受荷载推力作用产生的抗滑摩擦信号。

以小波时频图为例进行时频特征分析：频率变化区域分布在 2.1 ~ 3.1，3.1 ~ 4.1 s 的时间范围，与时域图中产生明显的波形变化区域相对应。由时频特征分析可知，边坡危岩 B 在受到荷载推力作用时，早期危岩 B 抵抗下滑力作用并产生抗滑摩擦信号，且信号能量的变化范围较大，其中显著的能量变化出现在 2.1 ~ 3.1 s 之间的高频带区，表明危岩 B 在崩塌前，其抵抗下滑力作用的过程会呈现大量的高频高能抗滑摩擦信号。而在 3.1 ~ 4.1 s 的时间段中，即 h 区中后期危岩 B 滑移式崩塌和小块危岩 B1 ~ B3 崩落的结合区。该阶段主要分为危岩 B 初始滑移式崩塌启动阶段，对应 3.1 ~ 3.5 s 产生的高能量变化。而其余的高能量信号是由危岩 B 崩塌滑移与小块危岩崩落后一起产生的滑动信号，对应 3.5 ~ 4.1 s。其中优势频率分布在 280 ~ 500 Hz 的低频带之间，因此可将 h 区初始阶段，即 3.1 ~ 3.5 s 产生的低频高能临界滑动信号作为边坡危岩 B 滑移式崩塌启动的前兆特征。而在 h 区中后阶段，即 3.5 ~ 4.1 s 产生的低频高能声发射信号则为边坡危岩 B 崩塌滑移与小块危岩崩落后一起滑动的信号，故该阶段不作为前兆特征。

故可将出现低频(频率范围 280 ~ 500 Hz)高幅值(幅值范围 0 ~ 0.910×10^{-4})和低频(频率范围 280 ~ 500 Hz)高能临界滑动信号与中频(频率范围 500 ~ 750 Hz)高幅值和高能抗滑摩擦信号视为边坡危岩 B 滑移式崩塌前在频域、时频域中的前兆特征。

2.4　模拟振动因素

2.4.1　木板边坡 C 号混凝土（危岩）试块模拟振动因素试验

试验前准备：将完整的 C 号混凝土(危岩)试块人工切割成大小块危岩组合体，切割预制的小块危岩体编号依次为 C1 ~ C3，同时使切割面光滑平整，以保证小块危岩作为松散体可以与危岩 C 完整的组合为一个整体。将危岩 C 组合体放置于边坡表面，小块危岩作为危岩 C 面向正前方临空面一侧顶部的松散组合体，需保持危岩 C 整体的初始稳定状态。采用橡胶锤锤击边坡坡面来模拟振动工况试验，同时确保每次锤击振动的信号能够明显区别于危岩崩塌产生的信号，且不会与危岩崩塌信号相互叠加干扰，进而研究边坡危岩 C 受锤击振动作用影响而发生崩塌破坏的前兆特征。

试验中人为采用橡胶锤锤击边坡坡面，总共锤击 4 次，确保每次锤击留有一定的时间间隔，以便区分锤击和危岩崩塌产生的声发射信号。锤击产生的振动波会使边坡危岩 C 与坡体受到振动惯性力作用，同时产生共振效应，该过程会不断弱化边坡危岩的强度，并降低边坡危岩的稳定性。位于危岩 C 顶部临空面的小块危岩 C1 ~ C3，由于存在预制裂缝，属于潜在崩塌体。小块危岩 C1 ~ C3 作为边坡危岩 C 的松散组合体，在受到振动惯性力作用时会引起小块危岩拉张倾倒破坏，并开始产生崩落现象，同时处于稳定状态的危岩 C 开始产生轻微的滑移式崩塌破坏现象。当第 1 次锤击的振动惯性力发挥作用时，危岩 C 在初始滑移式崩塌启动前，小块危岩 C3 与 C2 先发生崩落，而后危岩 C 开始轻微的滑移式崩塌。在第 2 次锤击坡面时，小块危岩 C1 发生崩落的过程中危岩 C 再次发生微小的崩塌滑移，此时小块危岩已全部崩落。而在第 3 次、第 4 次锤击坡面时，危岩 C 与小块危岩 C1 ~ C3 只发生了轻微的滑动。待 4 次锤击结束，并且危岩 C 完全崩落停止后，关闭声发射与视频监测系统，保存采集数据，结束试验。利用 PyCharm 对振动工况试验的视频监测数据进行图像抽帧处理，得到危岩 C 崩塌全过程的时空变化特征，如图 10 所示。

2.4.2　模拟振动工况试验结果分析

（1）时域波形演化特征

图 5d1 为声发射信号时域波形特征图。结合图 10 进行时空变化特征分析，如表 7 所示。

表 7　振动工况下危岩崩塌的时空变化特征

Table 7　Characteristics of time-space variation of collapse under vibration conditions

时间区间/s	试块变化	幅值	分区
0 ~ 1.2	C3，C2崩落；C轻微滑移	1.12 s幅值最大0.405	i区
1.4 ~ 2.05	C3崩落	1.49 s幅值最大0.883	—
2.3	C1，C崩塌滑移	2.65 s幅值最大0.335	j区
2.6 ~ 3.2	C崩塌滑移	—	—
3.6	—	3.59 s幅值最大0.648	k区
5.2	—	5.17 s幅值最大0.401	k区

基于上述分析表明，综合 4 次锤击振动信号的规律与特征，能够有效区别于危岩崩塌信号。在只受锤击产生的振动惯性力影响时，边坡危岩 C 滑移式崩塌启动的前兆特征为 i 区初始阶段由小块危岩 C3 与 C2 崩落产生的高幅值信号，同时小块危岩 C3 崩落产生的最大幅值 0.883 可作为判断边坡危岩 C 发生滑移式崩塌的临界阈值。并且首次锤击振动即为边坡危岩 C 滑移式崩塌启动的主控因素和触发机制。

（2）图 6d 为崩塌信号频域波形特征图，图 7d 为声发射信号的时频图。

（3）频域演化特征和时频域特征综合分析

危岩崩塌信号的主频演化规律：频谱图中信号连续出现多次峰值振幅，高幅值频带集中在 180 ~ 450 Hz 之间，频带较窄且频率呈现较密集的状态，同时主频 428.70 Hz 对应于低频带区，故表明在首次锤

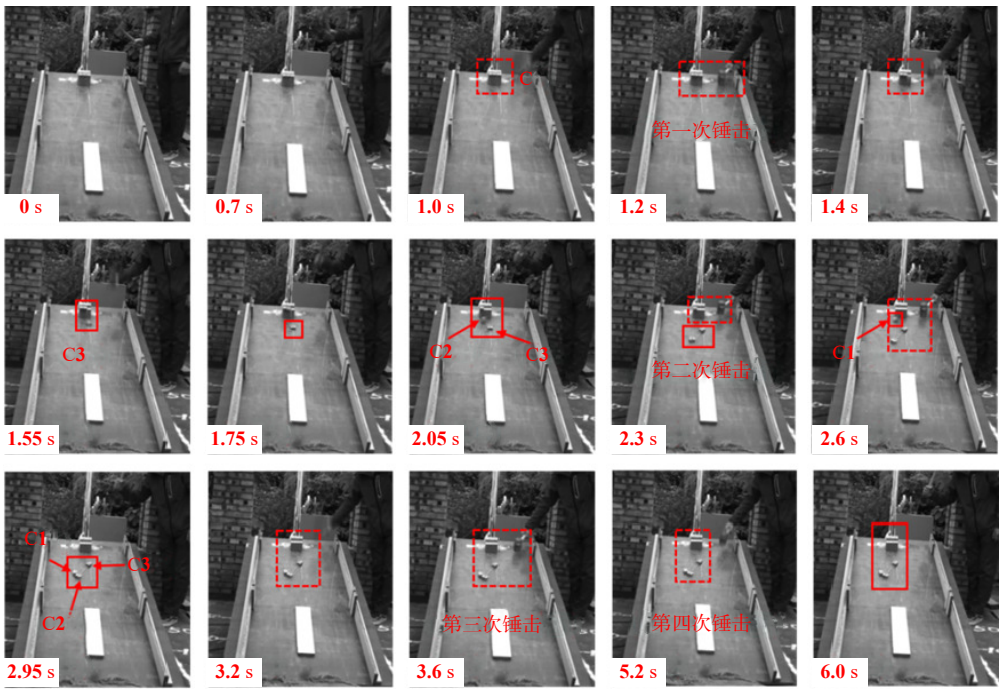


图 10　振动工况下崩塌全过程典型时−空变化特征

Fig. 10　Typical time-space variation characteristics of the whole process of collapse under vibration conditions

击后，边坡危岩 C 在崩塌前产生的高幅值信号主要分布在低频带。其中 180 ~ 450 Hz 频带间的低频高幅值信号主要为小块危岩崩落产生的。故该阶段可作为边坡危岩 C 发生滑移式崩塌的频域前兆特征。同时处在低频带间的主频 428.70 Hz 和其对应的最大幅值 0.000 4 即为小块危岩 C3 崩落产生。而 700 ~ 800 Hz 频带间的中频高幅值信号为边坡危岩 C 与小块危岩崩落后共同产生的滑动信号，因此该阶段不作为边坡危岩 C 滑移式崩塌的频域前兆特征。

以小波时频图为例进行时频特征分析：其中频率和能量发生变化的区域与时域图中产生明显的波形变化区域相对应，因此可将时频图中 4 次锤击产生的频率和能量变化分别对应 1.12, 2.32, 3.59, 5.17 s 的时间点，而危岩崩落产生的频率和能量变化对应时频图中 1.49, 2.65 s 的时间点。可根据时间节点区分振动信号和小块危岩崩落信号。由时频特征分析可知，边坡危岩 C 在每次受到锤击振动惯性力作用时，首先产生具有明显规律的振动信号，且能量变化的频带较宽。而锤击振动后便开始产生小块危岩崩落信号，能量变化的频带较窄。

首次锤击振动结束后，对应 1.49 s 时刻产生的能量变化，主要为早期小块危岩 C3 受振动惯性力作用产生的崩落信号。该信号能量的变化范围较大，优势频率分布在 180 ~ 450 Hz 的低频带之间，表明危岩 C 在发生滑移式崩塌前，主要的低频高能信号是由小块危岩 C3 崩落产生。而对应 2.65 s 时刻产生的低频高能信号发生在第 2 次锤击后，为小块危岩 C1 崩落产生的，该阶段危岩 C 再次发生滑移式崩塌，但由于危岩 C 崩塌滑移与小块危岩 C1 崩落同时发生，故该阶段的低频高能信号不作为边坡危岩 C 滑移式崩塌启动的前兆特征。最后阶段的能量变化出现在 3.59 s 和 5.17 s 时刻，仅为第 3、第 4 次锤击产生的高能振动声发射信号。而危岩 C 与全部崩落的小块危岩 C1 ~ C3 共同发生的微小滑动过程并未产生明显的能量变化。

因此可将早块危岩崩落产生的低频(频率范围 180 ~ 450 Hz)高幅值(幅值范围 0 ~ 4.287×10^{-4})和低频(频率范围 180 ~ 450 Hz)高能信号特征作为边坡危岩 C 滑移式崩塌前的频域、时频域中的前兆特征。

2.5 综合分析

基于 4 个不同工况下边坡危岩崩塌室内模型试验，对比声发射信号时域波形、频域、时频域特征以及视频图像的时空变化特征进行综合分析，可以得到室内模型试验危岩崩塌的综合启动机制，如表 8 所示。

总结室内模型试验危岩崩塌的综合前兆特征如表 9 所示。

表 8 危岩崩塌综合启动机制

Table 8 Comprehensive initiation mechanism of dangerous rock collapse

危岩崩塌影响因素	启动机制	破坏模式
风化	边坡危岩底部软弱支撑基座风化崩落，危岩重心发生偏移	倾倒式崩塌
坡度	边坡坡度增大，危岩重心升高，下滑力不断增大且超过抗滑力	滑移式崩塌
外部荷载	受推力作用，边坡危岩整体下滑力增大且超过抗滑摩擦力极限	滑移式崩塌
振动	受锤击振动惯性力作用产生的共振效应，边坡危岩强度降低且与坡面的黏结力下降	滑移式崩塌

表 9 危岩崩塌综合前兆特征

Table 9 Comprehensive precursor characteristics of dangerous rock collapse

危岩崩塌影响因素	前兆特征		
	时域	频域	时频域
风化	出现突发型中高幅值声发射信号	出现多次低频(频率范围300 ~ 500 Hz)高幅值(幅值范围0 ~ 0.921×10^{-4})信号	出现大量低频(频率范围300 ~ 500 Hz)高能信号
坡度	先出现多次高幅值声发射信号，随后出现连续低幅值声发射信号	主频带较宽，出现低(频率范围200 ~ 500 Hz)频中高频(频率范围500 ~ 1 200 Hz)混合的高幅值(幅值范围0 ~ $0.1.975\times10^{-4}$)信号	出现大量低频(频率范围200 ~ 500 Hz)并混合少量中高频(频率范围500 ~ 1 200 Hz)的高能信号
外部荷载	出现连续密集的低幅值抗滑摩擦信号与高幅值临界滑动信号	出现低频(频率范围280 ~ 500Hz)高幅值(幅值范围0 ~ 0.910×10^{-4})临界滑动信号与中频(频率范围500 ~ 750 Hz)高幅值抗滑摩擦信号	出现大量低频(频率范围280 ~ 500 Hz)高能抗滑摩擦信号与较少中频(频率范围500 ~ 750 Hz)高能临界滑动信号
振动	小块危岩崩落产生的高幅值信号	小块危岩崩落产生在低频(频率范围180 ~ 450 Hz)高幅值(幅值范围0 ~ 4.287×10^{-4})信号	小块危岩崩落产生的低频(频率范围180 ~ 450 Hz)高能信号

3 结 语

结合多个影响因素可将危岩崩塌过程分为5个阶段,即危岩裂隙发育扩展阶段、局部掉块或小型岩崩阶段、危岩裂隙面加速扩展贯通阶段、危岩临近崩塌阶段与危岩崩塌阶段。同时对应各阶段的声发射信号特征规律表现为:首先出现连续密集的低幅值信号,其次出现集中突发型的高幅值信号,随后再出现连续密集的中高幅值信号,最后出现一段平静期后信号发生突增现象。

启动机制:危岩崩塌在不同触发影响因素条件下的破坏模式主要为滑移式和倾倒式。而危岩崩塌启动机制的主控因素在于危岩重心发生偏移、危岩与坡面(或母岩)间的黏结力下降,边坡危岩整体下滑力增大且超过抗滑力极限。其中危岩与坡面(或母岩)间的黏结力下降为滑移式与倾倒式崩塌的共有启动机制,危岩重心发生偏移主要为倾倒式崩塌的启动机制,危岩整体下滑力增大且超过抗滑力极限主要为滑移式崩塌的启动机制。因此可以确定不同触发影响因素下危岩崩塌的启动机制具有一定的相似性和规律性,同时可以进一步将这3类主控因素作为实际边坡危岩崩塌启动机制的判断标准之一。

前兆特征:综合对比分析在不同触发影响因素条件下危岩崩塌声发射信号的时域、频域以及时频域特征规律。基于时域前兆特征,危岩崩塌前出现中高幅值信号占比较多;基于频域前兆特征,危岩崩塌前出现低频高幅值信号占比较多,且主频带较宽;基于时频域前兆特征,危岩崩塌前出现低频高能信号占比较多。进而可将这3类单一前兆特征总结为综合前兆特征,危岩崩塌前,声发射信号多出现于低频带中,且主频带较宽,同时中高幅值、高能量信号占比较多。因此可以确定不同触发影响因素下危岩崩塌的前兆特征具有一定的相似性和规律性。前兆特征是判断危岩是否发生崩塌的有效方法之一,在实际监测中,某种前兆信号的出现可能受多种因素影响,仅用出现单一前兆特征作为判断依据存在较大局限性,从而存在误判风险。例如:若单一出现某种特征时,危岩并未发生崩塌,结合多次试验总结得出需综合多参数多种前兆特征,如低频、中高幅值和宽频带信号等,通过对综合特征的多角度分析来提高判断准确性。

研究结果可将声发射信号的综合前兆特征作为灰岩区等脆性岩质边坡危岩发生崩塌的判断标准之一,为危岩崩塌的监测预警提供了科学的判断标准和方法,对提高地质灾害防治能力具有重要意义。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年签2023:地质灾害及防治情况 [M]. 北京:中国统计出版社,2023.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2023: Geological disasters and prevention [M]. Beijing : China Statistical Press, 2023. (in Chinese)

[2] 杜岩,谢谟文,蒋宇静,等. 岩体崩塌灾害成因机制与早期预警研究综述 [J]. 金属矿山,2021(1):106-119.
DU Y, XIE M W, JIANG Y J, et al. Review on the formation mechanism and early warning of rock collapse[J]. Metal Mine, 2021(1): 106-119. (in Chinese with English abstract)

[3] 陈洪凯,董平,唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(6):53-60.
CHEN H K, DONG P, TANG H M. The status quo and trends of perilous rock and collapse disaster[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(6): 53-60. (in Chinese with English abstract)

[4] 陈洪凯,秦鑫. 危岩稳定性分析研究现状及趋势 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(10):49-60.
CHEN H K, QIN X. Status quo and trend of unstable rock stability analysis[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(10): 49-60. (in Chinese with English abstract)

[5] 任恩. 雷波县莫红集镇后山危岩的成因机制及稳定性分析 [J]. 四川地质学报,2023,43(4):667-673.
REN E. Genetic mechanism and stability analysis of Houshan dangerous rock in Mohongji Town, Leibo County[J]. Acta Geologica Sichuan, 2023, 43(4): 667-673. (in Chinese with English abstract)

[6] 熊良文. 集安市南部鸭绿江沿岸边坡崩塌落石运动特性及风险评估研究 [D]. 长春:吉林大学,2023.
XIONG L W. tudy on the characteristics of rockfall movement and risk assessment along the Yalu River in the south of Ji'an City[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[7] 郭炳跃,咸玉建,梁聪,等. 无锡市鼋头渚景区岩质边坡崩塌形成机制及防治对策研究 [J]. 地质灾害与环境保护,2020,31(1):63-69.
GUO B Y, XIAN Y J, LIANG C, et al. Research on mechanism and prevention countermeasures of rock slope collapse in Wuxi Yuantouzhu scenic area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(1): 63-69. (in Chinese with English abstract)

[8] 宋子贺,李学锋,齐发富,等. 露天矿山危岩崩塌事故成因分析 [J]. 广西大学学报(自然科学版),2021,46(1):159-165.
SONG Z H, LI X F, QI F F, et al. Analysis of thetriggering factors for dangerous rockfall accident in open pit mine[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(1): 159-165. (in Chinese with English abstract)

[9] 周阳. 板裂千枚岩力学特性及崩塌灾害成因机制研究：以汶(川)–马(尔康)高速公路边坡为例 [D]. 西安：长安大学, 2021.
ZHOU Y. Study on mechanical properties of foliated phyllite and the mechanism of collapse disaster: Taking the slope of Wen (Chuan)-Ma (Erkang) Expressway as an example[D]. Xi'an: Changan University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[10] 陈洪凯, 唐红梅. 长江三峡水库区危岩分类及宏观判据研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4)：53-57.
CHEN H K, TANG H M. Classification and identify of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 53-57. (in Chinese with English abstract)

[11] 柳万里, 晏鄂川, 戴航, 等. 南漳保康两县碳酸盐岩崩塌发育特征及影响程度分区 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(2)：104-112.
LIU W L, YAN E C, DAI H, et al. Development characteristics and influence degree zoning of carbonate rock collapse in Nanzhang and Baokang Counties[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 104-112. (in Chinese with English abstract)

[12] 张志希, 陈克勋, 侯均洪, 等. 危岩变形自动化监测预警技术与应用：以重庆市江北区唐郭路为例 [J]. 自然资源信息化, 2024(1)：35-41.
ZHANG Z X, CHEN K X, HOU J H, et al. Application of intelligent monitoring and early warning technology mode of geological disaster: A case study of Tangguo Road in Jiangbei District of Chongqing[J]. Natural Resources Informatization, 2024(1): 35-41. (in Chinese with English abstract)

[13] 凌建明, 张玉, 满立, 等. 公路边坡智能化监测体系研究进展 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7)：2118-2136.
LING J M, ZHANG Y, MAN L, et al. Research progress of intelligent monitoring system for highway slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2118-2136. (in Chinese with English abstract)

[14] 王梓龙, 裴向军, 董秀军, 等. 三维激光扫描技术在危岩监测中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1)：124-129.
WANG Z L, PEI X J, DONG X J, et al. Application of a terrestrial laser scanner to the study of rockfall monitoring[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 124-129. (in Chinese with English abstract)

[15] 张森桂, 胡艺. 三维激光扫描技术在景区危岩扫描监测中的应用 [J]. 科技创新与生产力, 2023(5)：128-130.
ZHANG S G, HU Y. Application of 3D laser scanning technology in scanning and monitoring of dangerous rock in scenic areas[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2023(5): 128-130. (in Chinese with English abstract)

[16] 邹杨, 刘毅, 李建强, 等. 基于无人机模型的危岩运动模拟及风险区划 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(2)：6-11.
ZOU Y, LIU Y, LI J Q, et al. Simulation of dangerous rock movement and risk zoning based on UAV model[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(2): 6-11. (in Chinese with English abstract)

[17] 廖昕. 基于无人机影像匹配点云数据的危岩监测应用研究 [D]. 拉萨：西藏大学, 2023.
LIAO X. Application research on dangerous rock monitoring based on UAV image matching point cloud data [D]. Lasa: Tibet University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[18] 廖之恋, 陈世万, 杨贵, 等. 拉裂—坠落式岩质崩塌失稳过程声信号特征模拟试验研究 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(6)：58-73.
LIAO Z L, CHEN S W, YANG G, et al. Acoustic signal characteristics during the crack-toppling rock collapse developing process based on a simulation experiment[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(6): 58-73. (in Chinese with English abstract)

[19] MINARDO A, ZENI L, COSCETTA A, et al. Distributed optical fiber sensor applications in geotechnical monitoring[J]. Sensors, 2021, 21(22): 7514.

[20] 庞伟军, 邓清禄, 熊建, 等. 基于 BOTDA 的光纤传感技术在边坡变形监测中的应用研究 [J]. 安全与环境工程, 2012, 19(6)：28-33.
PANG W J, DENG Q L, XIONG J, et al. Application study of optical fiber sensing technology to slope deformation monitoring based on BOTDA[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(6): 28-33. (in Chinese with English abstract)

[21] 邓日朗, 张庆华, 刘伟, 等. 基于改进两步法采样策略和卷积神经网络的崩塌易发性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2)：186-200.
DENG R L, ZHANG Q H, LIU W, et al. Collapse susceptibility evaluation based on an improved two-step sampling strategy and a convolutional neural network[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 186-200. (in Chinese with English abstract)

[22] 黄发明, 胡松雁, 闫学涯, 等. 基于机器学习的滑坡易发性预测建模及其主控因子识别 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2)：79-90.
HUANG F M, HU S Y, YAN X Y, et al. Landslide susceptibility prediction and identification of its main environmental factors based on machine learning models[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 79-90. (in Chinese with English abstract)

[23] PAGANO M, PALMA B, RUOCCO A, et al. Discontinuity characterization of rock masses through terrestrial laser scanner and unmanned aerial vehicle techniques aimed at slope stability assessment[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2960.

[24] ROBIATI C, EYRE M, VANNESCHI C, et al. Application of remote sensing data for evaluation of rockfall potential within a quarry slope[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(9): 367.

[25] ABELLÁN A, CALVET J, VILAPLANA J M, et al. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring[J]. Geomorphology, 2010, 119(3/4): 162-171.

[26] ABELLÁN A, JABOYEDOFF M, OPPIKOFER T, et al. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9(2): 365-372.

[27] ABELLAN A, OPPIKOFER T, JABOYEDOFF M, et al. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(1): 80-97.

[28] ABELLÁN A, VILAPLANA J M, CALVET J, et al. Rockfall monitoring by terrestrial laser scanning: Case study of the basaltic

rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(3): 829-841.

[29] REN W, WANG C, ZHAO Y, et al. Research on precursor information of brittle rock failure through acoustic emission[J]. Mathematics, 2023, 11(19): 4210.

[30] 于家烁, 翟淑花, 徐尚智, 等. 北京山区典型流域泥石流次声预警模型 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 144-151.
YU J S, ZHAI S H, XU S Z, et al. Infrasound early warning model for debris flow in a typical drainage basin in Beijing mountainous area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 144-151. (in Chinese with English abstract)

[31] 赵志强, 吴顺川, 张小强, 等. 岩体原位直剪试验声发射特征及破坏机理研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1901-1909.
ZHAO Z Q, WU S C, ZHANG X Q, et al. Acoustic emission characteristics and failure mechanism of rock mass with in situ direct shear test[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1901-1909. (in Chinese with English abstract)

[32] 陈结, 孟历德仁, 蒲源源, 等. 降雨作用下露天矿山岩质边坡稳定性与声–力学特征研究 [J]. 金属矿山, 2024(5): 161-168.
CHEN J, MENG L D R, PU Y Y, et al. Study on the stability and acoustic-mechanical characteristics of rock slopes in open-pit mines under the influence of rainfall[J]. Metal Mine, 2024(5): 161-168. (in Chinese with English abstract)

[33] CODEGLIA D, DIXON N, FOWMES G J, et al. Analysis of acoustic emission patterns for monitoring of rock slope deformation mechanisms[J]. Engineering Geology, 2017, 219: 21-31.

[34] CODEGLIA D, DIXON N, FOWMES G J, et al. Strategies for rock slope failure early warning using acoustic emission monitoring[J]. IOP Conference Series(Earth and Environmental Science), 2015, 26: 012028.

[35] 张凯, 张东晓, 赵勇强, 等. 损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 96-106.
ZHANG K, ZHANG D X, ZHAO Y Q, et al. Experimental study on acoustic emission evolution characteristics and response mechanism of damaged rocks[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 96-106. (in Chinese with English abstract)

[36] 姜鹏, 戴峰, 徐奴文, 等. 岩体破裂尺度与频率特征关系及其工程实证研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 483-492.
JIANG P, DAI F, XU N W, et al. Analysis of correlation between fracture scale and frequency characteristic of rock mass and its engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 483-492. (in Chinese)

[37] OHNAKA M, MOGI K. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 1982, 87(B5): 3873-3884.

[38] 何满潮, 赵菲, 张昱, 等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 1-8.
HE M C, ZHAO F, ZHANG Y, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[39] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 286-298.

[40] 许峻, 杨润海, 张建国, 等. 脆性材料强破裂前兆的初步研究 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2283-2292.
XU J, YANG R H, ZHANG J G, et al. A preliminary study on precursors of strong fracture in brittle material specimens[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2283-2292. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于声像监测边坡危岩崩塌启动机制与前兆特征室内试验”

An indoor test on the initiation mechanism and precursor characteristics of dangerous rock collapse on slopes based on acoustic-visual monitoring

ZHANG Xingui[1a]，JIANG Zhenyan[1a]，LAN Riyan[2a]，FAN Lifeng[3]，YAN Li'e[1a*]，HAN Wei[1b]，TANG Zhenghui[2b]，ZHANG Yidan[1b]，TIAN Jianan[1a]

1a. College of Civil Engineering Architecture；1b. Design Institute Co., Ltd., Guangxi University, Nanning 530004, China；

2a. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd.；2b. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Guangxi Beibu Gulf Investment Group Co., Ltd., Nanning 530029, China；

3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

First author，E-mail：124700708@qq.com

* Corresponding author， E-mail：30781844@qq.com

Abstract：[**Objective**] In order to effectively predict and prevent hazardous rock failure and ensure highway transportation safety, [**Methods**] this paper carries out indoor modeling tests on the initiation of dangerous rock collapse under four different operational conditions by means of joint monitoring of acoustic emission and video, and combines the evolution characteristics of acoustic emission signals in the time, frequency, and time-frequency domains, as well as the time-space characteristics of video images, to investigate the initiation mechanism and precursor characteristics of the process of dangerous rock collapse under a variety of different influencing factors. [**Results**] The study and analysis of the initiation mechanism and precursor characteristics of the process of dangerous rock collapse under a variety of different influencing factors were carried out，and the results showed that，in terms of the initiation mechanism，the main controlling factors of dangerous rock collapse include the shift of the center of gravity of dangerous rock，the decrease of the adhesion between dangerous rock and slope surface，and the increase of the overall downward sliding force of the dangerous rock of the slope and the increase of the limit of the anti-sliding force. Among them，the decrease of bonding force between hazardous rock and slope surface (or mother rock) is the common initiating mechanism of slip type and tipping type collapse，the shift of center of gravity of hazardous rock is mainly the initiating mechanism of tipping type collapse，and the increase of overall downward sliding force of hazardous rock exceeding the limit of sliding resistance is mainly the initiating mechanism of slip type collapse. These three types of main control factors can be used as one of the judgment criteria for the initiation mechanism of actual slope failure. In terms of precursor characteristics，before the collapse of dangerous rocks，there are precursor phenomena such as localized falling blocks and small rock avalanches on the macro level，and the acoustic emission signals mostly appear in the middle and low frequency bands and the main frequency band is wide，and at the same time，the middle and high amplitude and energy signals account for a large number of the signals. Therefore，when multiple single precursor features appear simultaneously in the comprehensive precursor features，it can be used as one of the judgment criteria for the occurrence of actual slope collapse. [**Conclusion**] The research can provide scientific basis and technical support for the monitoring and early warning of highway slope dangerous rock failure，which can help to improve the effectiveness and reliability of the prevention and control of dangerous rock collapse disaster.

Key words: acoustic-visual monitoring；dangerous rock collapse；triggering mechanism；precursor characteristic；indoor test；slope

Received：2024-10-25；Revised：2024-11-28；Accepted：2025-01-11

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240632