文章编号:1005-0523(2022)01-0012-07

危岩集合体激振特性试验研究

王春华[1],陈洪凯[2]

(1. 深圳市深水兆业工程顾问有限公司,广东 深圳 518001;2. 枣庄学院城市与建筑工程学院,山东 枣庄 277160)

摘要:危岩集合体是产生大型特大型崩塌灾害的物理基础,其破坏机制是崩塌灾害监测预警的重大科学问题。构建了危岩集合体激振试验模型,据此开展危岩破坏模型试验,获得了约27万个激振信号测试数据。试验表明,危岩块之间界面的完整性对激振信号在危岩集合体内的传播影响明显,完整性越好,越容易传递激振信号。同时,激振信号存在主振和次振两部分,其中主振发生在第20~50 ms,次振发生在第90~100 ms,且危岩块之间完整性越差,次振分散性越显著。危岩集合体内危岩块的破坏有随机性,但是危岩破坏产生激振作用则有必然性,主振可能是引发大型特大型崩塌灾害的激发因子,次振可能是危岩集合体发生链式崩落的内在动力机制。研究成果为深入开展危岩集合体破坏力学机制研究提供了科学借鉴。

关键词:振动力学;危岩破坏;激振信号;模型试验;危岩集合体

中图分类号:U416;P642.21 **文献标志码**:A

本文引用格式:王春华,陈洪凯. 危岩集合体激振特性试验研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):12-18.

Experimental Study on Exciting Vibration of Overhanging Rock Aggregate

Wang Chunhua[1], Chen Hongkai[2]

(1. Shenzhen Shenshui Zhaoye Engineering Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518001, China;
2. School of City and Architectural Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: Overhanging rock aggregates are the physical basis to trigger large-scale collapse disaster, and it is a major scientific problem in geological disaster monitoring and early warning for overhanging rock aggregates to rupture. This paper established an experimental model to explore exciting vibration of overhanging rock aggregate, and carried out an experiment, which produced about 270 000 pieces of excitation signal data characterized by acceleration. Experiments show that interface integrity between overhanging rock attenuates the transfer efficiency of excitation signal in the aggregates. Meanwhile, main excitation and secondary excitation consist in exciting signal. In the experiment, main excitation appears from 20 ms to 50 ms, and secondary excitation occurs at the 90~100 ms. Especially, dispersivity of secondary excitation is negatively correlated with interface integrity on overhanging rock. The failure of overhanging rock in overhanging rock aggregate is random, however, exciting action is inevitable in aggregate when overhanging rock failure occurs. Model test implies that the main excitation may be the excitation factor of the large-scale and super-large-scale collapse disaster, while the secondary excitation is the pacemaker to trigger avalanche failure of overhanging rock aggregate. The research results pro-

收稿日期:2021-05-20
基金项目:国家自然科学基金项目(11272185)

vide scientific reference for further study on failure mechanism of overhanging rock aggregate.

Key words: vibration mechanics; failure of overhanging rock; exciting signal; model experiment; overhanging rock aggregates

Citation format: WANG C H, CHEN H K. Experimental study on exciting vibration of overhanging rock aggregate[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 12–18.

危岩崩塌灾害严重威胁着山区公路、铁路、城镇、矿山等基础设施及其营运安全。迄今，国内外众多学者致力于崩塌灾害成灾机制研究，如刘传正认为武隆鸡尾山地形高陡临空，山下铁矿大面积采空形成的“悬板张拉效应”是山体拉裂形成大规模危岩崩塌灾害的动力机制[1]；何思明等认为地震和暴雨是诱发危岩崩塌灾害的两个最关键因素[2]；程宇等认为暴雨引发了贵州纳雍骂岭特大型崩塌灾害[3]；Sobolev 基于学者提出的崩塌不稳定断裂模型提出了高陡岩石边坡雁式裂缝系统的形成机制[4]；Chen 等提出了危岩主控结构面损伤模型[5]，并基于 Paris 方程建立了危岩疲劳寿命估算方法[6]；崔宏环等采用材料力学方法提出了悬挑式危岩稳定性分析方法[7]。危岩破坏存在结构振动问题，Zhang 等提出了一种结构损伤振动分析法[8]；刘学等提出一种基于双数复小波的多尺度噪声调节随机共振分析方法[9]；刘义佳等发现爆破振动中接近结构自振频率的优势频率使结构产生较大振动响应[10]；Bhowmik 等分析了基桩谐振频率和振幅变化问题，发现基桩在周围土体中的滑移影响了土–桩基础系统的共振频率和振幅[11]。

然而，前述研究并未找到大型特大型崩塌灾害成灾动力学机制。近十年来，陈洪凯等基于对三峡库区崩塌灾害的深入调查和现场观测，发现大型特大型崩塌灾害源头均存在危岩集合体。危岩集合体中任何单一危岩体的失稳破坏均会突然释放应变能，形成激振，推断激振作用可能是引发大型特大型崩塌灾害的内在动力机制[12]。推导建立了危岩集合体破坏振动方程[13]，并通过初步模型试验探讨了平面条件下危岩破坏激振信号的概率统计特征[14]、频域特征[15]、局部与细节信息特征[16]。而实际工程中，危岩集合体都属于三维组合体，其中任一危岩体破坏产生的激振作用都不是平面问题。通过危岩集合体三维激振试验，并对激振信号进行小波消噪[17-18]处理，分析激振信号在危岩集合体内的传播特性，可为深入研究大型特大型崩塌灾害爆发机制提供科学借鉴。

1　模型试验

1.1　试验模型设计

根据三峡库区羊叉河陡崖危岩集合体发育情况，提取危岩集合体模拟对象，据此制作 M20 砂浆试验模型（图 1）。试验模型尺寸 600 mm（长）×1 800 mm（宽）×1 400 mm（高），其中长度是指沿陡崖方向危岩体的长度，宽度是指与陡崖垂直危岩体的宽度。危岩集合体尺寸为 600 mm（长）×1 200 mm（宽）×800 mm（高），由下到上分为 4 层，层与层之间采用低标号砂浆填充饱满，危岩集合体下部为岩腔，最大深度 500 mm。危岩集合体由 48 个危岩块（单体危岩）组成，编号如图 1 所示，其中 511# 危岩块定义为起崩危岩块。危岩块为立方体，边长 200 mm，其在 yz 平面和 zx 平面设置两个主控结构面，贯通段率均为 50%。

在试验模型的危岩集合体表层布置 9 个加速度传感器测点，布置方案如图 2 所示。9 个测点中，1#~5# 测点位于第 1 层危岩体，6# 和 7# 测点位于第 2 层危岩体，8# 测点位于第 3 层危岩体，9# 测点位于第 4 层危岩体，危岩层之间填充低标号砂浆。1#~3# 测定位于 511# 起崩危岩块的 x 方向，4# 和 5# 测点位于 511# 起崩危岩块的 y 方向，6#、8# 和 9# 测点位于 511# 起崩危岩块的 z 方向。每个测点均位于相关危岩块测面中央，每个测点布置的加速度传感器为 DH311E 型压电式加速度传感器，可同时测量 x，y，z 3 个方向的激振加速度。测点与动态频谱测试仪（DH5922 型）连接，并在试验模型前方安设两台高速摄像仪（FASTCAM MiniUX），记录危岩块破坏情况。测试内容包括起崩危岩块破坏瞬间各个测点记录的不同方向的加速度变化数据，以及由高速摄像仪记录的起崩危岩块破坏过程中所表现出来的物理变化过程。

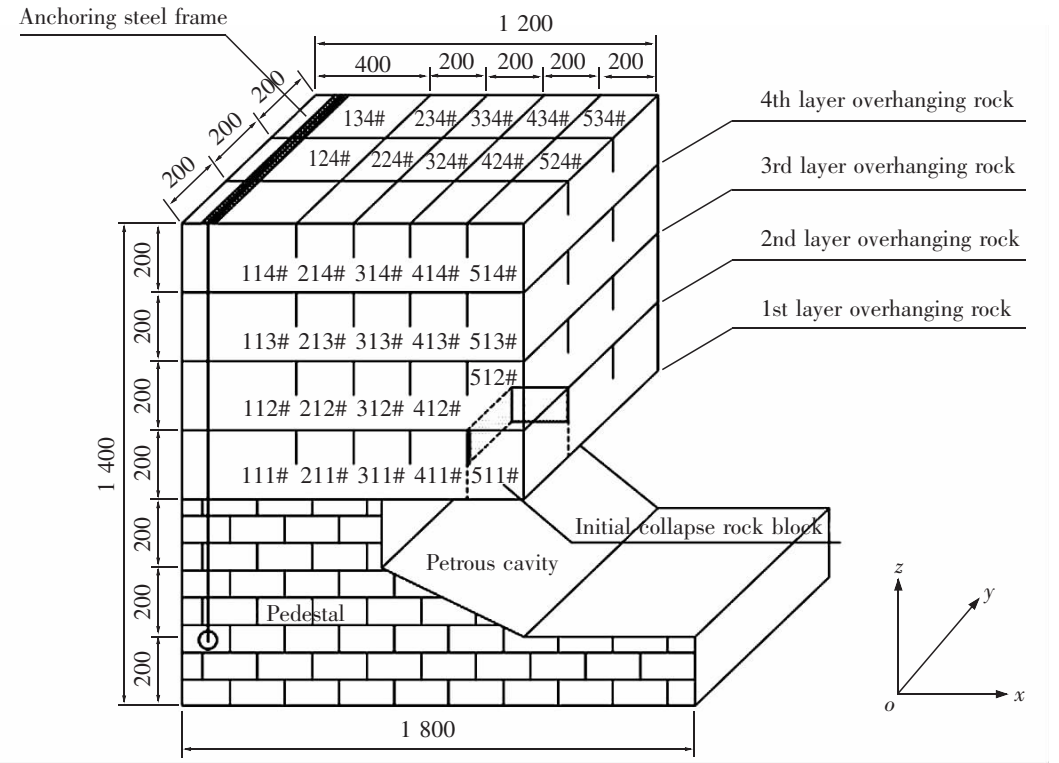


图 1　危岩集合体激振试验模型(单位:mm)

Fig.1　Exciting experimental model of overhanging rock aggregate(Unit:mm)

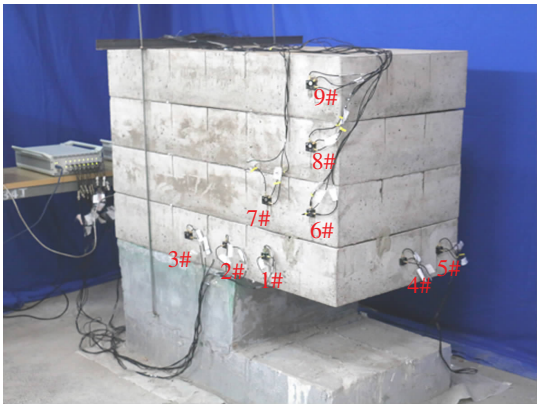


图 2　试验模型测点

Fig.2　Measuring points in experiment model

1.2　危岩破坏加荷方式

由于采用直接加荷方式迫使危岩集合体内的起崩危岩块发生破坏,并且在加荷过程中不影响危岩集合体内其他危岩块的物理力学行为,目前具有极大难度。参照文献[9]进行平面激振试验的加荷方式,研究在起崩危岩块 511# 的 yz 平面和 zx 平面两个主控结构面贯通段内充填Ⅰ型静态爆破剂(在 20~40 ℃环境温度范围内,15 min 内可达到最大膨胀力)。通过给静态爆破剂注入蒸馏水,使静态爆破剂逐渐膨胀并产生膨胀力,引发主控结构面贯通段断裂、扩展,直到 511# 危岩块破坏。

1.3　试验过程

① 建造试验模型; ② 在设定位置安设加速度传感器并连接到动态频谱测试仪→在起崩危岩块 511# 的 yz 平面和 zx 平面两个主控结构面贯通段内充填Ⅰ型静态爆破剂;③ 开启动态频谱测试仪和高速摄像仪;④ 给静态爆破剂注入蒸馏水;⑤ 动态频谱测试仪连续记录各个测点 x,y,z 3 个方向的激振加速度。高速摄像仪连续记录起崩危岩块主控结构面的断裂扩展过程及起崩危岩块的崩落过程,获得了约 27 万个测试数据即为激振加速度, 单位为重力加速度 g。

2　试验结果分析

不同测点模型试验结果如图 3 所示,各个测点激振信号峰值加速度见图 4,其激振特性有如下特征:

1) 危岩集合体内 511# 危岩块破坏对邻近危岩块产生的激振作用历时 199 ms,而文献[13-15]仅获得了 30 ms 的二维激振测试数据,说明危岩集合体激振特性更为复杂,激振信号富含更多动力学信息。

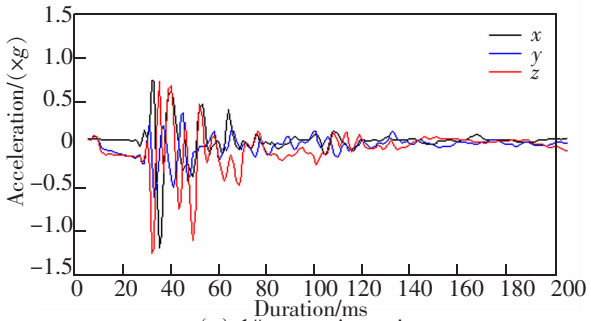
2) 各测点几乎都是从第 19~20 ms 开始进入强烈激振期,称为主振,但不同测点主振历时存在差

异，1#~9# 测点历时分别为 39，41，44，42，52，45，45，47 ms 和 49 ms，而二维激振历时仅在 18 ms 左右[9]。危岩体之间界面的完整性对主振历时有一定影响，如水平方向从 1# 测点到 3# 测点，激振历时从 39 ms 增长到 44 ms，而竖直方向从 6# 测点到 8#、9# 测点的激振历时从 45 ms 增长到 49 ms。

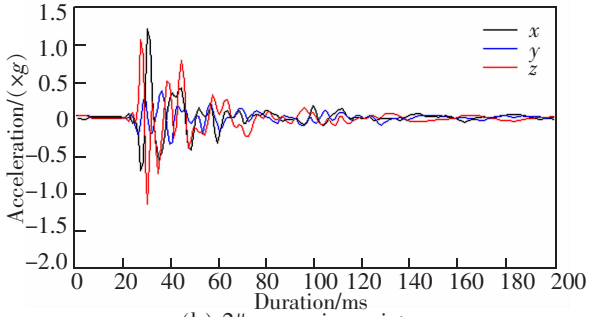
3）三维激振信号存在次振作用，发生在第 90~100 ms 附近。距离激振源越远，次振历时增长，振幅减小，如次振历时在 6# 测点为 10 ms，8# 测点为 25 ms，9# 测点为 29 ms。

4）每个测点激振信号峰值强度存在显著差异，位于激振源 y 方向的 4# 测点和 5# 测点的峰值最大，如 5# 测点 z 方向可达到 2.88g。危岩块之间界面的完整性对激振信号峰值强度影响较大，如激振信号从 1# 测点传递到 2# 测点峰值强度降低 8.24%，但从 6# 测点传递到 8# 测点降幅达到 20.21%。

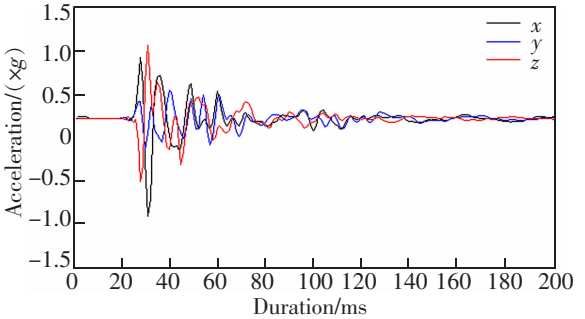
5）危岩块的悬空度对激振信号的影响也是明显的，悬空度越大，主振及次振越强烈。如 4# 测点所处的 521# 危岩块和 5# 测点所处的 531# 危岩块悬空度最大，5# 测点 z 方向的激振信号峰值最大，达到 2.88g，y 方向也可达到 1.51g。况且，悬空度越大，次振越典型，这也是 4#、5# 测点次振比 6#、8#、9# 测点次振作用强烈的原因。可以推断，主振作用可能是危岩集合体引发大型特大型崩塌灾害的激发因子[12]，次振作用应该是陡崖上危岩体易于从岩腔顶部逐渐向上呈链式崩落[19-20]的内在动力机制。



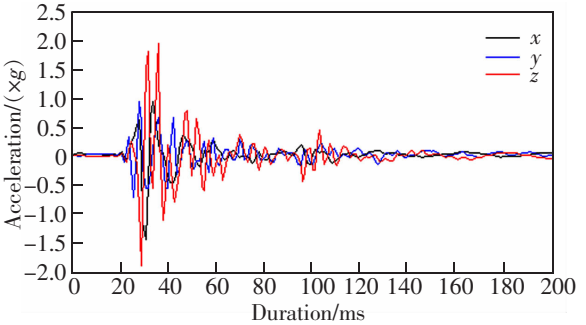
(a) 1# measuring point



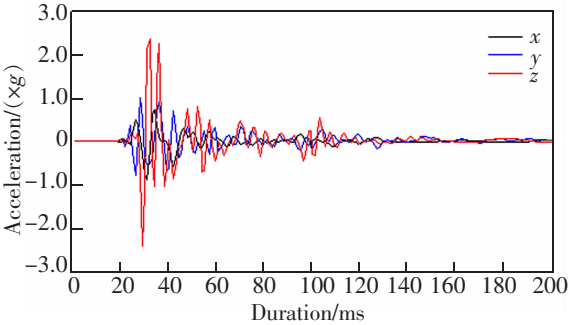
(b) 2# measuring point



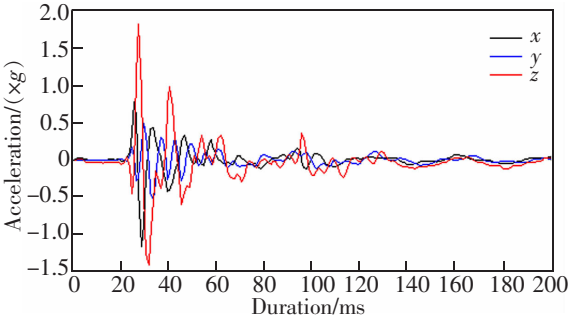
(c) 3# measuring point



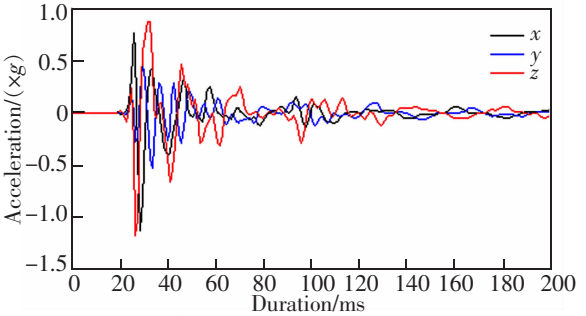
(d) 4# measuring point



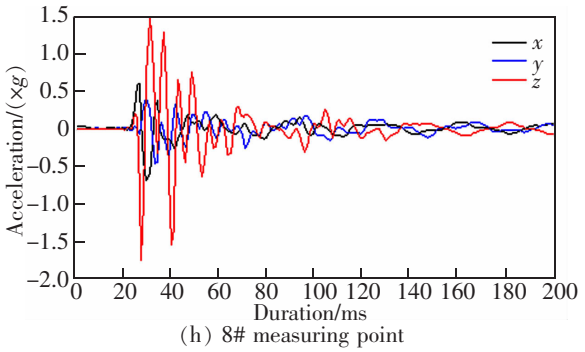
(e) 5# measuring point



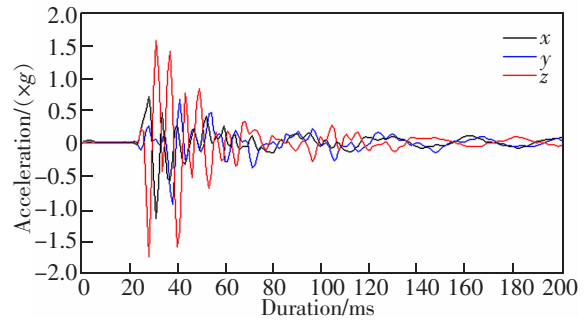
(f) 6# measuring point



(g) 7# measuring point



(h) 8# measuring point



(i) 9# measuring point

图 3 不同测点激振加速度时程曲线

Fig.3 Time-history curves of excitation acceleration at various measuring points

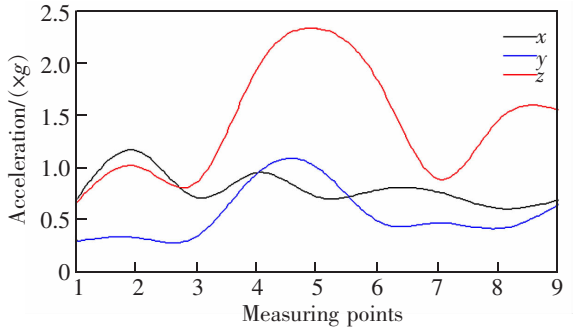


图 4 不同测点峰值加速度

Fig.4 Peak acceleration at various measuring points

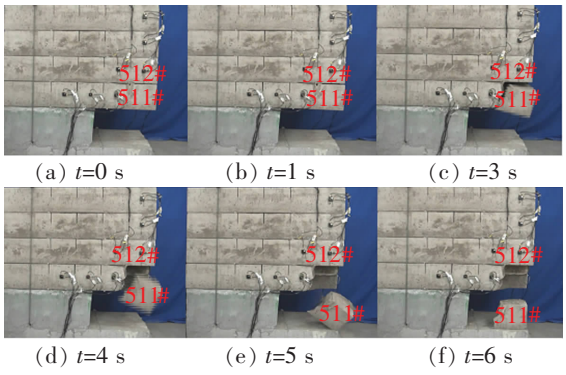
3 危岩破坏崩落机理探讨

任何动力灾害的产生均需要有激发因素或激发动力,这已在学术界形成共识。如在分析采煤引发动力灾害中,窦林名等提出了动静载叠加诱发高静载、强动载和低临界应力3种类型动力灾害原理[21];来兴平等认为急倾斜煤层浅转深开采诱发实质为水平分段多阶段重复扰动下覆层结构失稳产生循环性动力冲击[22]。对于崩塌灾害的诱发机制,多年来一直困扰着地质减灾科技工作者。何思明等强调地震和强降雨是产生崩塌灾害的关键动力因素[2],认为地震作为一种强烈的动荷载,作用在危岩体上必然会导致危岩破坏,进而引发崩塌灾害,强降雨则通过对危岩快速增大裂隙水压力引发危岩破坏。可是,研究表明,大约60%~70%的大型及特大型崩塌灾害与地震无关,雨季发生的崩塌灾害也只有52%[23],如重庆武隆鸡尾山崩塌,贵州纳雍山体崩塌,茂县6·24特大型山体崩塌都与地震无关。这说明大型特大型崩塌灾害的产生必然存在其内在科学原理。

激振作用可能是引发大型特大型崩塌灾害的内在动力机制。模型试验中,起崩危岩块511#破坏及其崩落过程如图5所示。按照自由落体理论,起崩危岩块的崩落速度应为2.8 m/s,而实际只有0.13 m/s,约为理论速度的5%,说明危岩崩落不是自由落体,而是主控结构面贯通段快速延伸的过程。试验模型主控结构面初始贯通率为50%,全部贯通用时不到3 ms,这说明危岩破坏属于脆性破坏,积聚在危岩体内的应变能释放具有突发性[24],这种能量释放形式是产生激振作用的根本原因。

危岩集合体内起崩危岩块积聚的应变能越大,造成的激振作用越强烈。试验模型危岩块边长仅为20 cm,产生的最大激振加速度可达2.88g,实际工程如甄子崖危岩体的边长30~50 m,产生的激振加速度势必会超过100g,如此巨大的激振荷载足可以引发危岩集合体发生连锁崩塌。危岩集合体中单体危岩所处临空状态越大时,强烈的主振和次振作用易使危岩集合体底部受到约束较少的危岩体率先破坏崩落。崩落后该危岩体顶部的危岩体(如512#)底部约束被快速解除而临空,进而产生破坏崩落,该过程快速连续激发。

试验表明,危岩集合体是产生大型特大型崩塌灾害的物理基础[12],危岩集合体内危岩块的破坏有随机性,但危岩破坏产生激振作用则是必然的,危岩块突发性破坏引发的激振作用应该是引发大型特大型崩塌灾害的动力机制。



(a) t=0 s (b) t=1 s (c) t=3 s

(d) t=4 s (e) t=5 s (f) t=6 s

图 5 危岩集合体中起崩危岩块511#破坏与崩落过程

Fig.5 Failure and falling process of initial rock block 511# in overhanging rock aggregate

4　结论

构建了危岩集合体三维激振试验模型,并开展了危岩破坏模型试验,获得了丰富的危岩集合体三维激振测试数据。

1) 危岩集合体是产生大型特大型崩塌灾害的物理基础, 危岩集合体内危岩块的破坏有随机性,但危岩块破坏产生激振作用则具有必然性。

2) 与激振源距离越大, 激振信号峰值强度越小,危岩体之间界面的完整性影响着激振信号在危岩集合体内的传递效率。

3) 激振信号存在主振和次振,危岩体之间界面的完整性影响着主振的峰值大小和次振分散性,界面越完整,主振峰值越大,界面完整性较差时,次振分散性越显著。

4) 危岩破坏属于脆性破坏,应变能释放有突发性,突发性释放的应变能是产生激振作用的物理机制。主振可能是引发大型特大型崩塌灾害的激发因子,而危岩链式崩落则主要受控于次振作用。

参考文献:

[1] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报,2010,18(3):297-304.
LIU C Z. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong,Chongqing[J]. Journal of Engineering Geology,2010,18(3):297-304.

[2] 何思明,王东坡,吴永,等. 崩塌滚石灾害的力学机理与防治技术[J]. 自然杂志,2014,36(5):336-345.
HE S M,WANG D P,WU Y,et al. Formation mechanism and key prevention technology of rockfalls[J]. Chinese Journal of Nature,2014,36(5):336-345.

[3] 程宇,张健,陈进,等. 贵州纳雍骂岭镇危岩带稳定性及危害范围分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2019,30(4):9-15.
CHENG Y,ZHANG J,CHEN J,et al. Analysis on stability and hazard zone of dangerous rock mass in Zongling Town,Nayong of Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2019,30(4):9-15.

[4] SOBOLEV G A. Avalanche unstable fracturing formation model[J]. Physics of the Solid Earth, 2019, 55(1):138-151.

[5] CHEN H K,TANG H M,YE S Q. Damage model of control fissure in overhanging rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2006,27(7):967-974.

[6] CHEN H K,TANG H M. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in overhanging rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2007,28(5):643-649.

[7] 崔宏环,刘建坤,张立群,等. 含纵向裂隙的悬挑式危岩稳定性分析方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016(1):11-15.
CUI H H,LIU J K,ZHANG L Q,et al. A stability analysis method of the overhanging crag with longitudinal cracks[J]. Journal of Railway Engineering Society,2016(1):11-15.

[8] ZHANG C,CHENG L,QIU J H,et al. Structural damage detections based on a general vibration model identification approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,123:316-332.

[9] 刘学,孙翱,李冬. 基于双树复小波的遥测振动信号多尺度噪声调节随机共振分析[J]. 振动与冲击,2019,38(20):18-24.
LIU X,SUN A,LI D. Multi-scale noise tuning stochastic resonance analysis of telemetry vibration signal based on double tree complex wavelet[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(20):18-24.

[10] 刘义佳,卢文波,陈明. 结构爆破振动响应的频率与持续时间依赖性分析[J]. 爆炸与冲击,2019,39(8):1-11.
LIU Y J,LU W B,CHEN M. Analysis of frequency and duration dependence of structural blasting vibration response[J]. Explosion and Shock Waves,2019,39(8):1-11.

[11] BHOWMIK D,BAIDYA D K,DASGUPTA S P. A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to vertical dynamic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2016,85:161-165.

[12] 陈洪凯. 重力地貌过程力学描述与减灾(岩石崩塌)[M]. 北京:科学出版社,2019.
CHEN H K. Mechanical Description and Disaster Mitigation of Geomorphology Process(Rock Collapse)[M]. Beijing: Science Press,2019.

[13] 陈洪凯,吴亚华,王圣娟. 危岩聚集体破坏振动方程研究[J]. 振动与冲击,2018,37(12):60-66.
CHEN H K,WU Y H,WANG S J. A study on the vibration equation of the rupture of perilous rock aggregate[J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(12):60-66.

[14] 陈洪凯,杨铭,唐红梅,等. 危岩破坏激振信号概率统计特征研究[J]. 振动与冲击,2015,34(8):139-143.
CHEN H K,YANG M,TANG H M,et al. Probabilistic and statistic characteristics of excitation signals during rupture of perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock,2015, 34(8):139-143.

[15] 陈洪凯,唐红梅,王智,等. 危岩破坏激振信号频域特征研究[J]. 振动与冲击,2014,33(19):64-68.

CHEN H K,TANG H M,WANG Z,et al. Frequency domain characteristics of excitation signals for rupture of perilous rocks[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(19):64-68.

[16] 陈洪凯,杨铭,唐红梅,等. 危岩破坏激振信号局部和细节信息特征[J]. 振动与冲击,2014,33(24):15-18.
CHEN H K,YANG M,TANG H M,et al. Local and minutiae characteristics of excitation signals during perilous rock rupture[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(24):15-18.

[17] 刘立君,沈秀强,王晓陆,等. 模具修复锤击力信号的dbN小波阈值降噪方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(4):99-104.
LIU L J,SHEN X Q,WANG X L,et al. Denoising method of dbN wavelet threshold for die repair hammer force signals[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology,2019,24(4):99-104.

[18] NASEER M T,ASIM S. Detection of cretaceous incised-valley shale for resource play,Miano gas field,SW Pakistan: Spectral decomposition using continuous wavelet transform[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2017,147:358-377.

[19] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福. 缓倾角层状岩体边坡链式演化规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(1):20-25.
CHEN H K,TANG H M,XIAN X F. Chained developing pattern for rock slopes with gentle dip strata[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2009,45(1):20-25.

[20] 陈洪凯,张金浩,杨志永. 灰岩岸坡危岩体链式演化特征分析——以三峡库区羊叉河岸坡为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2019,36(2):37-44.
CHEN H K,ZHANG J H,YANG Z Y. Analysis of chain evolution characteristics of perilous rock body on limestone bank slope:Taking Yangcha River slope Three Gorges Reservoir Area an example[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science),2019,36(2):37-44.

[21] 窦林名,何学秋,REN T,等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(1): 48-59.
DOU L M,HE X Q,REN T,et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Ming&Technology,2018,47(1):48-59.

[22] 来兴平,孙欢,蔡明,等. 急斜煤层浅转深综放开采煤岩动力灾害诱发机理[J]. 西安科技大学学报,2017,37(3):305-311.
LAI X P,SUN H ,CAI M,et al. Mechanism of dynamic hazards due to coal and rock mass instability in extremely steep coal seams with the deepening mining[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2017,37(3):305-311.

[23] 陈洪凯,王圣娟,陈君. 危岩崩塌灾害物理演进理论框架与灾害爆发时间[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(5):121-128.
CHEN H K,WANG S J,CHEN J. Theoretical framework of physical development and outbreak time of perilous rock and collapse disaster[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science),2020,37(5):121-128.

[24] 陈洪凯,张瑞刚,唐红梅,等. 压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究[J]. 振动与冲击,2012,31(24):30-33.
CHEN H K,ZHANG R Q,TANG H M,et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(24):30-33.



第一作者:王春华(1968—),男,高级工程师。获"深圳市杰出工程师"称号,广东省水利学会水利科学技术奖、广东省市政行业协会科学技术奖、BIM"科创杯"一等奖。研究方向为工程管理与土木工程减灾。E-mail:412038269@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)