危岩破坏激振效应试验研究

唐红梅[1]，陈洪凯[1, 2]，王　智[1]，何晓英[1]，朱绣竹[1]

（1. 重庆交通大学岩土工程研究所，重庆 400074；2. 三峡大学水利与环境工程学院，湖北 宜昌 443002）

摘　要：危岩破坏瞬间存在能量突然释放问题，对相邻危岩体产生明显的激振作用，可采用激振加速度、峰值速度及激振位移表征。以坠落式危岩为例，进行危岩破坏激振效应模型试验，获得了 13 万多个危岩破坏激振加速度测试数据。试验结果表明，实验条件下危岩破坏激振作用持续时间 30 ms 左右，激振加速度、峰值速度及激振位移均是竖直方向大于水平方向，存在约 2 倍关系，竖向激振加速度最大可及 48.7979 m/s^2，竖向激振峰值速度达 27.2 mm/s，竖向激振位移可及 0.0560 mm。基于试验现象，分析了危岩破坏机理进一步研究中应高度重视的两个重要科学问题，即危岩破坏过程中主控结构面端部遵循纯拉状态→弱剪强拉状态→强剪弱拉状态→纯剪状态的演变规律，科学描述各阶段的力学演绎过程，危岩稳定性分析中应考虑危岩破坏激振效应，科学表征危岩破坏瞬间相邻危岩体的瞬时稳定性态。研究成果为进一步分析危岩破坏机制及致灾效应具有一定参考借鉴作用。

关键词：岩石力学；激振效应；破坏过程；危岩；模型试验

中图分类号：TU457；P642.21；P642.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－4548(2013)11－2117－06

作者简介：唐红梅（1968－ ），女，重庆人，博士，研究员，硕士生导师，主要从事地质灾害减灾理论与减灾技术研究。E-mail: hmtang6778@sina.com。

Experimental study on excitation effect for unstable rock

TANG Hong-mei[1], CHEN Hong-kai[1, 2], WANG Zhi[1], HE Xiao-ying[1], ZHU Xiu-zhu[1]

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The unstable rock has a sudden falling feature, which is a dynamic process to release energy speedily, and will put an evident excitation effect on the rocks around it. The excitation effect can be expressed by the excitation acceleration, peak velocity and excitation displacement. Focusing on the falling unstable rock, an experimental model of excitation effect is proposed. More than 130 thousands acceleration test data are obtained. The test results show that the duration of excitation effect of unstable rock can last about 30 ms; and the values of the excitation acceleration, peak velocity and excitation displacement in vertical direction are about double times larger than the ones horizontal direction; and the excitation acceleration in vertical direction can reach 48.7979 m/s^2; the peak velocity is 27.2 mm/s; and the excitation displacement can reach 0.0560 mm. Based on those experimental phenomena, two important issues which must be highlighted for the damage mechanism of unstable rock are analyzed. The first issue is that the stress on the end of dominant fissure in the damage process will evolve from pure tension state to weak shear-strong tension state to strong shear-weak tension state and pure shear state, and the other issue is to describe the mechanical evolution processes for various states, to consider the excitation effect on the damage process of unstable rock, and to analyze the stability of the rock around the damaging moment of the unstable rock. The results may provide a scientific basis for further studies on the collapse mechanism and disaster effect of unstable rock.

Key words: rock mechanics; excitation effect; damage process; unstable rock block; model test

0　引　　言

三峡库区的南川金佛山甄子岩、武隆鸡尾山、合川三汇煤矿磨子岩、江津四面山红岩山、重庆城区佛图关、万州城区太白岩、首立山、天生城、枇杷坪、华蓥山老岩、巫溪南门山以及四川省汶川地震区国道 213 线等，大量危岩崩塌灾害事件均表明，特大型与大型危岩破坏具有群发性，连锁激振效应显著，探索危岩崩塌连锁效应是揭示危岩群发性破坏的关键环节

基金项目：国家自然科学基金项目（11272185，50678182）；重庆市自然科学基金重点项目（cstc2013jjB005）；重庆市高校创新团队建设计划资助项目（KJTD201305）

收稿日期：2013－03－04

之一。

迄今，国外学者高度重视危岩破坏后的崩塌问题研究，如 Strom 等[1]认为危岩破坏失稳及其运动致灾过程是岩石边坡演化的动力学过程。在崩塌源危岩破坏机理方面，许强等[2]认为重庆武隆鸡尾山特大型山体崩塌在陡崖上存在关键块；王家臣等[3]提出了边坡渐进性破坏的三维随机分析模型；张永兴等[4]分析了边坡内张性地应力和岩腔发育深度对差异风化型危岩形成与破坏的影响；Frayssines 等[5]分析了灰岩陡高边坡的破坏机制；针对砂岩和泥岩交互沉积地区的危岩崩塌灾害，陈洪凯等[6]探讨了崩塌灾害形成机制，基于损伤力学和断裂力学探讨了危岩主控结构面端部损伤特性[7]和裂隙水压力作用下的疲劳断裂特性[8]，提出了危岩断裂稳定性分析方法[9]及危岩块弹冲动力参数[10]，并对拉剪型危岩发育过程进行了试验研究[11]，危岩破坏具有链式效应，这种链式效应导致危岩破坏通常具有群发性，出现链式效应的动力因素应该与危岩破坏激振效应有关[12]；唐红梅等[13]初步揭示了陡崖上群发性危岩块的崩落序列，对危岩剧落式崩落瞬间可能出现的激振效应进行了初步的理论推导[14]。岩体与应力波的相互作用及危岩崩落力学机制国内外学者做了相应研究，茹忠亮等用 UDEC 软件模拟一维弹性波入射问题，针对弹性波在不同粗糙程度节理面的传播性质对弹性波的波速降低的影响进行了研究[15]。前述研究基本考虑的静力学范畴，而针对危岩崩落产生的连锁激振效应量化问题基本未涉及。为了适应山区公路、矿山及城镇危岩崩塌减灾防灾迫切需求，本文通过模型试验探索危岩块崩落对相邻危岩块产生的激振效应，获取急振荷载作用时间，在不同方向上急振波传播的衰减差异。对于深入研究群发性危岩破坏机制具有积极意义。

1 危岩破坏激振效应模型试验设计

（1）试验模型设计

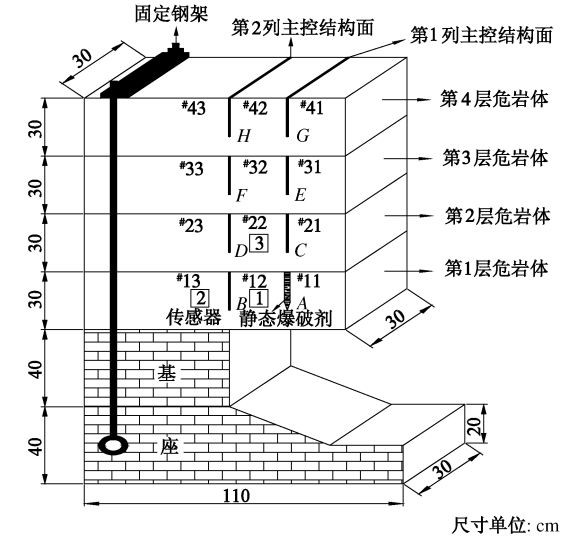
针对坠落式危岩发育具有链式规律，概化出危岩破坏激振效应试验模型（图 1（a）），尺寸 30 cm（长）×110 cm（宽）×200 cm（高），由基座和危岩体两部分组成，岩腔高 40 cm。危岩体由 4 块尺寸为 90 cm（长）×30 cm（宽）×30 cm（厚）的危岩体叠置而成；自岩腔顶部向上，标注第 1 层、第 2 层、第 3 层及第 4 层危岩体，每层危岩体设置两列主控结构面，自临空面向后分别标注为第 1 列主控结构面和第 2 列主控结构面，危岩体层共设置 8 个主控结构面（用 A～H 表示），贯穿率为 54.5%，第 1 层危岩体主控结构面 A 开度取 0.8 cm，其内填充静态爆破剂，主控结构面 B～H 均设置为闭合状，整个危岩体层用可调钢架与基座固定，以形成整体；所分割危岩块组合编号为#11～#43。

（2）试验模型制作与实验参数

试验模型如图 1（b），危岩体用 M20 水泥砂浆预制，配合比为水泥：砂：水=1：3.25：0.65，其抗压强度为 15.81 MPa，抗拉强度为 0.77 MPa，重度 19.92 kN/m^3，弹性模量 3.02 GPa，泊松比 0.18。基座软岩部分用普通砂砖浆砌模拟，材料为砂砖、#32.5 硅酸盐水泥、粒径为 0.12～0.21 mm 纯净砂和水现场搅拌浇筑而成。

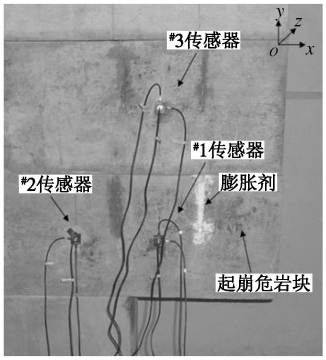
（3）试验设备

本试验仪器设备为 DH311E 压电式加速度传感器、DH5922 动态频谱测试仪、pco.1200hs 型高速摄像仪、计算机，试验药剂为静态爆破剂。本文采用在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），缓慢注入蒸馏水，静态爆破剂逐渐膨胀，产生膨胀力，导致主控结构面端部断裂、扩展、延伸。



（a）模型立体图

（b）试验模型



（c）试验模型上传感器布置

图 1 激振效应试验模型

Fig. 1 Experimental model for excitation effect

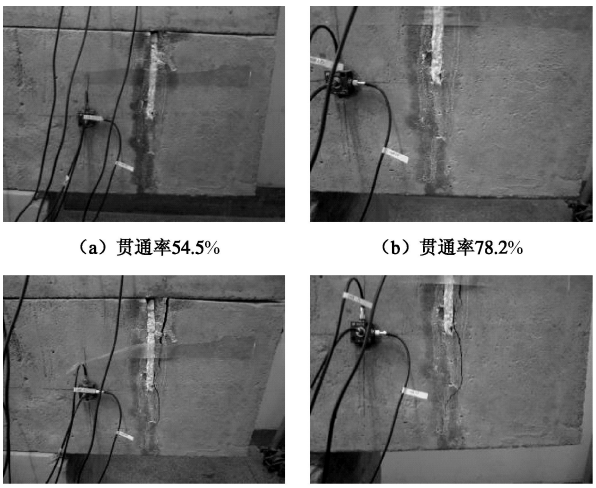
2　测试过程与内容

建造试验模型并安装完成，围绕#11 危岩块，在#12，#13 和#22 危岩块侧面正中心粘贴 DH311E（图 1（c））；连接到动态频谱测试仪，采用 DH5922 型动态频谱测试仪，采样频率为 0.01 Hz，频带内平坦度±0.05 dB，阻带衰减大于−150 dB/oct；在 *A* 主控结构面贯通段内装入静态爆破剂，然后向 *A* 主控结构面注入蒸馏水，连续量测#11 危岩块破坏瞬间每个传感器记录的激振信号，即振动加速度；采用 pco.1200hs 型高速摄像仪连续记录静态爆破剂膨胀过程中主控结构面端部扩展过程。由动态频谱测试仪连续记录 *A* 主控结构面扩展及危岩突发性破坏瞬间#1，#2，#3 加速度传感器表征的激振加速度，获得了 13 万多个危岩破坏激振加速度测试数据。

3　危岩破坏激振效应试验结果分析

（1）危岩块破坏过程

随着主控结构面内静态爆破剂吸水膨胀，所产生的膨胀力使主控结构面贯通率逐渐增大（图 2），但主控结构面沿着偏离主控结构面轴线方向约 23°方向扩展，此时主控结构面贯通率增加到 78.2%（图 2(b)）。随着主控结构面尖端应力调整，裂纹扩展，其端部裂纹扩展方向逐渐趋与主控结构面轴线方向一致，其贯通率增加到 93.2%（图 2（c））；当主控结构面贯通率达到 97.3%时（图 2（d）），危岩体突发性破坏。危岩破坏过程中，危岩体后壁面倾角由直立逐渐转为倾斜（图 3），在危岩体突发性破坏瞬间，其后壁面倾角在 85°左右，完全脱离母岩时后壁面倾角约 58°。表明，坠落式危岩破坏过程中，主控结构面端部应力场极其复杂，遵循纯拉状态→弱剪强拉状态→强剪弱拉状态→纯剪状态的演变规律。



（a）贯通率54.5%　（b）贯通率78.2%

（c）贯通率93.2%　（d）贯通率97.3%

图 2 主控结构面端部扩展过程

Fig. 2 Propagation process at tip of dominant fissure

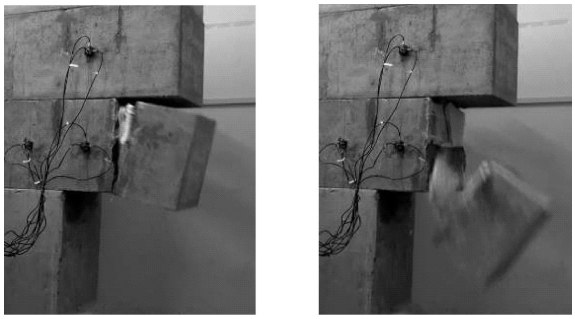
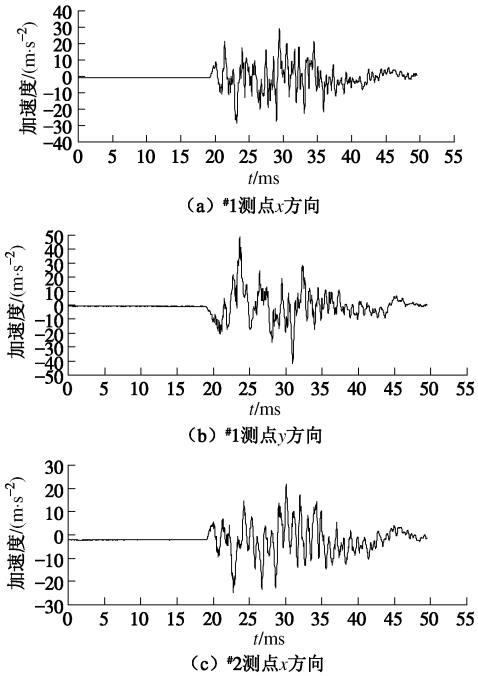


图 3 危岩破坏过程

Fig. 3 Damaging process of unstable rock

（2）危岩破坏激振加速度

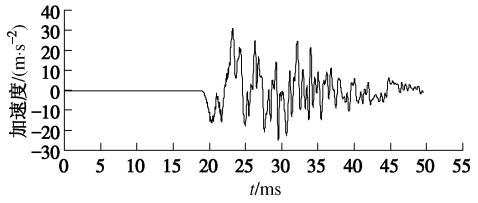
试验模型各测点 *x* 方向和 *y* 方向的加速度－时程曲线见图 4，各测点信号的峰值加速度见表 1，可见：①#11 危岩块破坏对相邻危岩块产生的激振效应历时约为 30 ms；②距离激振源（#11 危岩块）越近，激振加速度峰值越大、频谱密度越大，如位于#12 危岩块的#1 测点 *x* 方向的激振加速度为 29.0833 m/s^2，*y* 方向的激振加速度为 48.7979 m/s^2，位于#13 危岩块的#2 测点 *x* 方向的激振加速度为 24.6807 m/s^2，*y* 方向的激振加速度为 32.9535 m/s^2；③3 个测点中，位于#22 危岩块表面的#3 测点的峰值加速度峰值最小，*x* 方向的激振加速度为 11.0835 m/s^2，*y* 方向的激振加速度为 28.8391 m/s^2，加速度频率密度最小，这可能与#22 危岩块和激振源之间存在水平不连续面有关，即危岩块之间越紧密，越易于激振波的传递，激振作用影响范围越大；④试验条件下，坠落式危岩体破坏产生的激振能量，竖直方向（*y* 方向）的激振加速度明显大于水平方向（*x* 方向）的激振加速度（图 5），如#1 测点，*x* 方向的激振加速度峰值为 29.0833 m/s^2，*y* 方向的激振加速度峰值为 48.7979 m/s^2，是 *x* 方向的 1.68 倍。



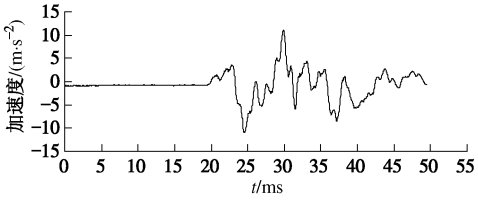
（a）#1测点*x*方向

（b）#1测点*y*方向

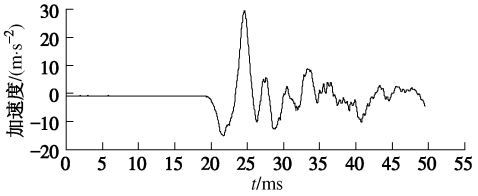
（c）#2测点*x*方向



（d）#2测点y方向



（e）#3测点x方向



（f）#3测点y方向

图 4 试验模型各测点加速度－时程曲线

Fig. 4 Acceleration-schedule curves for signals at measuring point

表 1 各测点信号的峰值加速度

Table 1 Peak accelerations at various measuring points (m/s²)

#1 测点		#2 测点		#3 测点	
x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
29.0833	48.7979	24.6807	32.9535	11.0835	28.8391

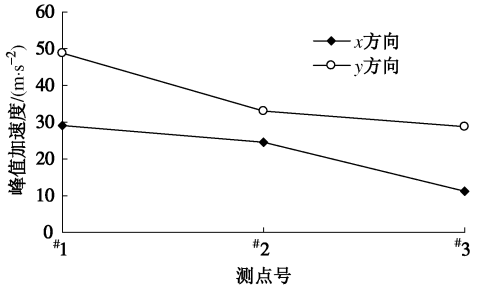


图 5 试验模型各测点的峰值加速度

Fig. 5 Peak accelerations for signals at measuring point

（3）危岩破坏激振峰值速度

将其急振信号的加速度－时程曲线进行一次积分变化获得相应的激振信号的速度－时程曲线，#11 岩块崩落所诱发的激振波在不同危岩块中将引起不同的质点振动速度见表 2。

表 2 各测点信号的峰值速度

Table 2 Peak velocities at various measuring points (mm·s⁻¹)

#1 测点		#2 测点		#3 测点	
x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
15.5	27.2	14.7	24.8	11.6	25.4

#11 岩块崩落所诱发的激振信号在各岩块中所引起总的质点振动速度的分布特征，可以确定激振波的主振方向。由图 6 可知#11 危岩崩落所诱发的激振波在测点#1，#2，#3 传播过程中引起的质点峰值振动速度，在 y 方向（竖直方向）远大于在 x 方向（水平方向）。测点#1 竖直方向峰值速度达 27.2 mm/s，最小值为测点#3 的水平向 11.6 mm/s。危岩崩落所诱发激振波在竖直方向上具有更强的激振效应。

x 方向的质点峰值振动速度#3 测点衰减量较大，主要是#1 测点与#3 测点间隔完全贯通岩层层面致使激振信号的大量衰减。y 方向的质点峰值振动速度#2 测点衰减量较大，其主要是#11，#12 岩块底部临空，形成一个腔体，#13 岩块下部与基座相连，上部受荷于第 2～4 层危岩体层，激振波 y 方向振动信号从#12 危岩块传至#13 危岩块时，由于受外荷载影响较大，从而 y 方向质点峰值振动速度变化量较大；而激振波 y 方向振动信号从#12 危岩块传至#22 危岩块时，由于受外荷载影响较小，因而 y 方向质点峰值振动速度变化量较小。

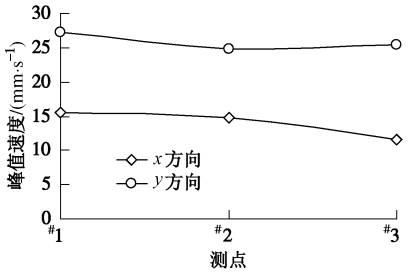
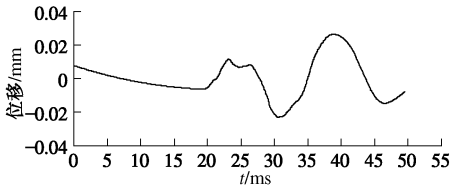


图 6 各测点信号的峰值速度分布

Fig. 6 Distribution of peak velocities at measuring points

（4）危岩破坏激振位移

将试验模型各测点的加速度－时程曲线进行二次积分，便可获取相应测点 x 方向和 y 方向的位移－时程曲线（图 7），可见：①每个测点 y 方向的峰值位移均大于 x 方向的峰值位移，如位于#12 危岩块的#1 测点 x 方向为 0.0271 mm，y 方向位移为 0.0560 mm，是 x 方向位移的 2.07 倍。位移值的大小是激振波能量的体现，即危岩崩落所诱发的激振波在竖直方向具有更强的激振效应。②每个测点 x 方向及 y 方向的位移均具有振动特性，可正可负，正负交替，对于危岩块而言，在激振时程内，激振范围内危岩块主控结构面在 x 方向受到周期性拉张与压缩，y 方向受到周期性向上剪切和向下剪切，这些作用是危岩体承受着复杂疲劳荷载。



（a）#1测点x方向

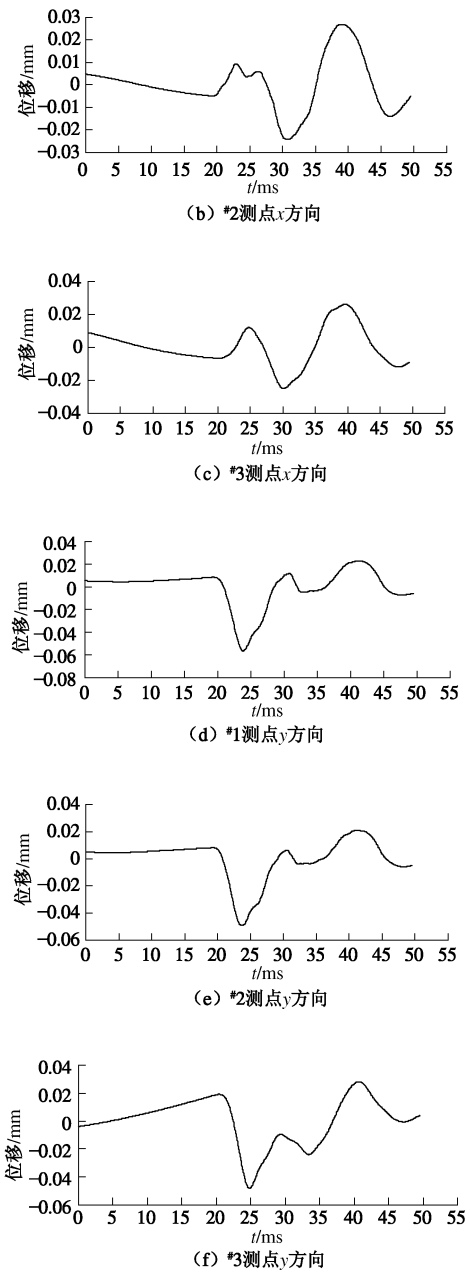


图 7 各测点信号的位移－时程曲线

Fig. 7 Displacement-schedule curves for signals at measuring points

4 讨　　论

试验表明，主控结构面贯通率达到 97.3%时，危岩发生突发性破坏。从能量角度，主控结构面从贯通率 54.5%增大到 97.3%过程中，危岩均会缓慢释放能量，而危岩突发性破坏瞬间释放的能量会产生显著的激振作用。图 4 揭示了#11 危岩块突发性破坏瞬间在相邻的#12，#13 和#22 危岩块量测到的激振加速度变化过程，激振历时约 30 ms，激振波呈非线性变化。三峡库区武隆鸡尾山特大型山体崩塌、重庆市南川金佛山国家级风景名胜区内甄子岩危岩破坏实例均表明，陡崖或陡坡上危岩体广泛分布，并具有显著的成生关系，危岩破坏具有链式效应[12]，导致危岩破坏通常具有群发性，出现链式效应的动力因素应该与危岩破坏激振效应有关。在危岩稳定性分析中考虑危岩破坏激振效应，可能是破解危岩链式崩塌的关键环节之一。可见，构建危岩破坏激振能量计算方法，科学揭示激振能量向周围危岩体传递规律，量化不同部位可能出现的激振能量大小；提出激振能量与应力之间的转换式，据此修正危岩稳定系数计算方法，进而实现考虑激振效应的危岩稳定性态科学判别。

5 结　　论

（1）根据坠落式危岩破坏具有链式规律，设计了危岩破坏激振效应试验模型，拟定试验方案，通过激振模型试验，共获取了 3 个测试点 x，y 两个方向的 6 组加速度－时程曲线，并将其加速度－时程曲线进行一次和二次积分变换分别获取了相应激振信号的速度－时程曲线和位移时程曲线,为实施危岩崩落激振效应分析提供了重要试验数据。

（2）试验结果分析表明，试验条件下危岩块破坏瞬间存在能量突发性释放问题，该能量对相邻危岩块产生显著的激振效应，激振作用持续时间 30 ms 左右，激振加速度最大可及 48.7979 m/s^2，竖直方向的激振加速度明显大于水平方向的激振加速度，相差 2 倍左右。

（3）危岩破坏激振效应的速度－时程表明，#1，#2，#3 测点的峰值速度在 y 方向（竖直方向）所引起的质点峰值振动速度远大于在 x 方向（水平方向）所引起的质点峰值振动速度。#1 测点竖直方向峰值速度达 27.2 mm/s，最小值为#3 测点的水平向 11.6 mm/s。位移的振动频率明显慢于激振加速度，且竖直方向产生的激振位移是水平方向激振位移的 2 倍左右，崩塌源后部相邻危岩块最大竖向激振位移为 0.0560 mm。危岩崩落所诱发的激振波在竖直方向上具有更强的激振效应。

（4）危岩破坏特性极具复杂性，坠落式危岩破坏过程中，主控结构面端部遵循纯拉状态→弱剪强拉状态→强剪弱拉状态→纯剪状态的演变规律，危岩稳定性分析中应引入危岩破坏激振效应，科学表征危岩破坏瞬间相邻危岩体的瞬时稳定性态，这些科学问题在危岩破坏机理进一步研究中应予以高度重视。

参考文献：

[1] STROM A L, KORUP O. Extremely large rockslides and rock avalanches in the Tien Shan mountains[J]. Kyrgyzstan

Landslides, 2006, **3**(2): 125－136.

[2] 许 强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6.5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J].工程地质学报, 2009, **17**(4): 433－444. (XU Qiang, HUANG Run-qiu, YIN Yue-ping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong of Chongqing: Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(4): 433－444. (in Chinese))

[3] 王家臣, 谭文辉. 边坡渐进破坏三维随机分析[J]. 煤炭学报, 1997, 2**2**(1): 27－31. (WANG Jia-cheng, TAN Wen-hui. Three dimensional stochastic analysis of slope progressive failure[J]. Journal of China Coal Society, 1997, **22**(1): 27－31. (in Chinese))

[4] 张永兴, 卢 黎, 张四平, 等. 差异风化型危岩形成和破坏机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, **32**(2): 1－6. (ZHANG Yong-xing, LU Li, ZHANG Si-ping, et al. Development and failure principle of differential weathering overhanging rock[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2010, **32**(2): 1－6. (in Chinese))

[5] FRAYSSINES M, HANTZ D. Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(7): 1115－1123.

[6] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 石质山区崩塌灾害形成机制[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(3): 1－6. (CHEN Hong-kai, XIAN Xue-fu, TANG Hong-mei. Developing mechanism for collapse disaster in rocky mountain area[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(3): 1－6. (in Chinese))

[7] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, YE Si-qiao. Damage model of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, **27**(7): 967－974.

[8] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, **28**(5): 643－649.

[9] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法[J]. 重庆大学学报, 2009, **32**(4): 434－437. (CHEN Hong-kai, XIAN Xue-fu, TANG Hong-mei. Stability analysis method for perilous rock by fracture mechanics[J]. Journal of Chongqing University, 2009, **32**(4): 434－437. (in Chinese))

[10] 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): 33－36. (CHEN Hong-kai, ZHANG Rui-gang, TANG Hong-mei, et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, **31**(24): 33－36. (in Chinese))

[11] 陈洪凯, 唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验[J]. 重庆大学学报, 2006, **29**(6): 115－119. (CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Testing research on development of perilous rock in tension-shear fracture[J]. Journal of Chongqing University, 2006, **29**(6): 115－119. (in Chinese))

[12] 陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解译[J]. 重庆交通大学学报, 2008, **27**(1): 91－95. (CHEN Hong-kai. Geomorphology research on chained regularity of perilous rock in the area of the three gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2008, **27**(1): 91－95. (in Chinese))

[13] 唐红梅, 王林峰, 陈洪凯, 等. 软弱基座陡崖上危岩崩落序列[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(2): 205－210. (TANG Hong-mei, WANG Lin-feng, CHEN Hong-kai, et al. Collapse sequence of perilous rock on cliffs with soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(2): 205－210. (in Chinese))

[14] 唐红梅, 王 智, 鲜学福, 等. 坠落式危岩剧动式崩落与激振效应[J]. 重庆大学学报, 2011, **34**(10): 39－45. (TANG Hong-mei, WANG Zhi, XIAN Xue-fu, et al. Violent- slide rock avalanche and excitation effect of perilous rock[J]. Journal of Chongqing University, 2011, **34**(10): 39－45. (in Chinese))

[15] 茹忠亮, 蒋宇静. 弹性纵波入射粗糙节理面透射性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2535－2539. (RU Zhong-liang, JIANG Yu-jing. Research on transmission behaviors of rough joint surfaces with elastic *P*-wave incidence[J]. 2008, **27**(12): 2535－2539. (in Chinese))