

DOI: 10.11779/CJGE2023S10042

冰岩碎屑流崩滑地震动信号测试与分析

林子钰¹, 范 刚^{*1,2}, 刘大瑞¹, 吕 霞¹, 周家文^{1,2}

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 随着西部大开发的战略部署及全球气温的持续升高, 冰-岩碎屑流滑坡因其超强的运动性和破坏力而引起了业内学者的广泛关注。通过开展大型斜槽试验来模拟高寒山区特有的冰-岩碎屑流崩滑, 利用现场布设的高精度传感器获取冰-岩碎屑流激发出的地震动信号, 并基于 Hilbert-Huang 变换方法对比分析了 5 种工况下信号的时频特征, 探究了含冰率和冰所处位置两个相关变量与冰-岩碎屑流的冲击力间的相关性。根据分析结果: 冰-岩碎屑流中含冰率越大、冰与滑脱面的接触面越大, 其激发的地震动信号振幅越大、时间越短、峰值更集中; 信号频率主要分布在 0.06~45 Hz 范围内, 以低频振动为主, 高频信号集中出现在冰-岩碎屑流与缓坡段及河道两岸发生强烈冲击碰撞时期。

关键词: 冰-岩碎屑流; 斜槽试验; HHT 法; 地震动信号

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S1-0162-04

作者简介: 林子钰(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事滑坡等地质灾害产生的地震动信号方面的研究工作。E-mail: Linziyu@stu.scu.edu.cn。

Tests and analysis of ground motion signals of ice-rock avalanches

LIN Ziyu¹, FAN Gang^{1,2}, LIU Darui¹, LÜ Xia¹, ZHOU Jiawen^{1,2}

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract: With the strategic deployment of western development and the continuous rise of global temperature, the ice-rock avalanches have attracted the wide attention of scholars in the industry because of their high mobility and destructive power. The large-scale flume tests are carried out to simulate the ice-rock avalanches. The seismic signals generated by the ice-rock avalanches are obtained by using the high-precision sensors in the field, and the time-frequency characteristics of signals under 5 working conditions are compared and analyzed based on the Hilbert-Huang transform method. The correlation between ice content and ice location and the impact force of ice-rock avalanches are investigated. According to the analysis results, the larger the ice content and the larger the contact surface between the ice and the detachment surface, the larger the amplitude, the shorter the time and the more concentrated the peak value of the induced seismic signals. The frequency of signals is mainly distributed in the range of 0.06~45 Hz. The low-frequency vibration is dominant, while the high-frequency ones are concentrated in the period of strong impact and collision between the ice-rock avalanches and the gentle slope section and the river banks.

Key words: ice-rock avalanches; flume test; HHT method; seismic signal

0 引 言

冰-岩碎屑流是一种在启动时携带或在运动时铲刮裹挟冰屑的特殊碎屑流, 相较于一般碎屑流拥有更快的运动速度与更长的冲出距离, 因而其发生往往具有巨大的致灾力^[1]。近年来, 随着岩土体性质受冻融循环及温度变化的影响日益显著以及青藏高原独特的地形地貌特征和发育的活动断裂带, 在地震和冰川侵蚀作用下产生了大量的松散固体物质, 为冰-岩碎屑流的发生提供了丰富的物源条件。例如 2000 年的西藏易贡崩滑体导致下游 450 km 范围内受灾^[2-3]; 位于雅

鲁藏布江左岸的色东普沟自 2014 年起共发生 8 次冰-岩碎屑流事件, 导致雅鲁藏布江 4 次大规模堵塞^[4]。然而冰-岩碎屑流往往发生在人烟稀少的山区, 精确识别和定位此类灾害具有重要的科学价值和实际防灾减灾需求。

近年来, 对高寒山区的冰-岩碎屑流的研究逐渐吸

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20111); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2021YFB0178)

收稿日期: 2023-07-05

***通信作者** (E-mail: fangang@scu.edu.cn)

引了众多学者的目光,研究大多侧重于冰-岩碎屑流的运动特征、堆积形态及动力学参数等,如杨情情等^[5-6]基于 2000 年易贡滑坡的灾史资料和斜槽试验,分析了冰-岩碎屑流的运动特性并进一步揭示了其运动机理;李昆仲等^[7]利用 DAN3D 软件对 2018 年色东普沟冰-岩碎屑流建立三维数值模型,通过反演得到了碎屑流的堆积特征、滑体运动速度和铲刮深度等动力特征参数;师璐璐等^[8]则以云南玉龙雪山南坡一起较大规模的冰-岩碎屑流型高速远程滑坡为例,通过遥感影像和现场调查阐释了冰-岩碎屑流的成因机制和运动过程。尽管目前针对冰-岩碎屑流的研究已取得一些阶段性成果,但研究始终存在对灾害过程的直接观测数据不足的困扰。

随着环境地震学的发展,基于地震动信号对冰-岩碎屑流进行精准识别成为一种新兴的研究方向,灾害过程中激发的地震动信号能够直观反映冰-岩碎屑流在运动中的相关信息。此外,由 Huang 等^[9-11]提出的 Hilbert-Huang 变换方法在分析和处理瞬态信号方面展现出了极大的优越性,如 Fan 等^[12-13]则通过 HHT 方法对地震作用下含软弱夹层岩质边坡的震损过程进行了精准识别。HHT 作为一种新兴的时频分析方法,是目前对冰岩崩灾害产生的地震动信号分析效果最好的技术手段。

对此,本研究共设计了 5 组大型斜槽试验来模拟不同工况下的冰-岩碎屑流运动过程,通过现场布设的动态信号采集仪实时获取地震动信号,基于 HHT 方法对比分析了 5 种工况下冰-岩碎屑流运动过程中激发的信号的频谱特征,对含冰率和冰所处位置与冰-岩碎屑流冲击力的相关性进行了论证,研究可为此类灾害的精准识别和远程监测提供技术参考。

1 试验方案

1.1 试验装置

为探究坡度变化对冰-岩碎屑流冲击力的影响,试验中布设有两段式斜槽,加速段为 38°,缓坡段为 15°。斜槽横截面为等腰梯形,底宽 50 cm,顶宽 120 cm,腰长 50 cm。斜槽右侧布设钢化玻璃,以便观察冰-岩碎屑流的滑动状态。在滑槽下方支架上布设 3 个传感器,采集频率为 500 Hz。试验安排在 11 月下旬进行,试验时现场气温为 10° 左右,以阴天为主,较低的气温与较弱的光照尽可能地减小了冰块因外界因素而产生的损耗。具体试验装置如图 1 所示。

1.2 试验材料

以青藏高原地区采集的土壤为样本,按筛分出的颗粒级配进行本试验所用材料的物料配比,配比参数见表 1。试验中采用粒径为 1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm 的

方形冰块,所用物料如图 2 所示。

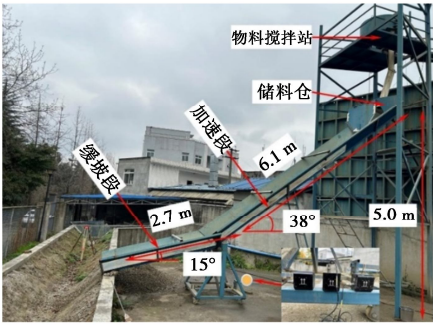


图 1 试验装置及参数

Fig. 1 Flume test devices and parameters

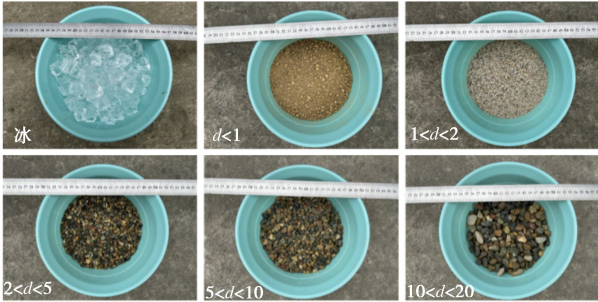


图 2 试验用料

Fig. 2 Test materials

1.3 试验工况

本试验以含冰率和冰所在位置两个因素为变量,共设置 5 种工况(表 1),每次试验的物料总质量均为 100 kg。受冰块融化及块体间相互摩擦的影响,试验结束后岩冰质量有所减小,耗损程度大致为 2%~3%。试验过程如图 3 所示。

表 1 物料组成

Table 1 Material compositions

物质	冰	砾粒		砂粒		黏土	状态	
粒径/mm	10~20	10~ 20	5~10	2~5	1~2	—		
百分比/%	/	54	49	32	9	10		
质量/ kg	1	25	40.35	16.92	11.19	3.00	3.54	混合
	2	50	26.90	11.28	7.46	2.00	2.36	
	3	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	4	25	40.35	16.92	11.19	3.00	3.54	冰在 上
	5	50	26.90	11.28	7.46	2.00	2.36	



(a) 工况 3

(b) 工况 4

图 3 试验过程

Fig. 3 Test process

2 地震动信号频谱分析

试验共截取 8 s 的数据,对采集的原始地震动信号进行无限脉冲带通滤波,滤波范围为 0.01~200 Hz,选择该滤波范围能够保留试验产生的绝大部分有效信号,且能在一定程度上降低噪音的干扰。以垂向地震动信号为例,经预处理后 5 种工况下的信号如图 4 所示。

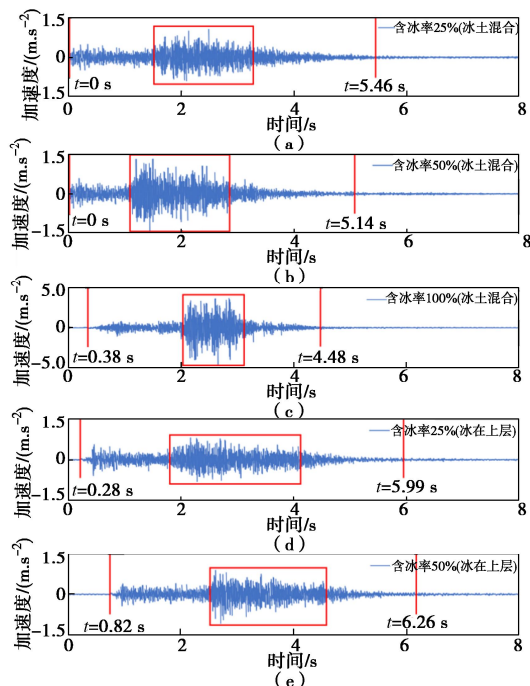


图 4 5 种工况下记录的冰岩崩激发的垂向地震动信号

Fig. 4 Vertical ground motion signals induced by ice-rock avalanches recorded under 5 conditions

以信号振幅的突然增大和趋近于噪音为节点,可以大致划分出试验过程中冰-岩碎屑流激发的地震动信号的持续时程。从图 4 可以看出,5 种工况下的地震动信号特征基本一致,信号振幅均先在噪音基础上明显增大,以较为平稳的振动持续一段时间后再次突增至峰值状态,此时信号振幅为前期的 2~3 倍,此后信号开始逐渐衰减,振幅缓慢恢复至噪音水平。为便于各个工况间的对比分析,本研究将信号的整个持续时程划分成 3 个阶段:平稳期、峰值期和衰弱期,其中峰值期采用红色矩形框在图中标出。在信号平稳区冰-岩碎屑流处于加速下滑状态,与加速段滑槽发生摩擦碰撞从而激发明显的地震动信号。在物料由加速段进入缓坡段时,由于坡度改变,碎屑流对缓坡面造成巨大冲击,信号进入峰值区。当物料冲出滑槽末端与河岸发生冲击碰撞时,持续激发强烈的地震动信号。此后冰-岩碎屑流逐渐沿河道上下游堆积,信号不断衰减直至恢复噪音水平,试验停止。

通过图 4 (a)~(c) 对比发现,当冰土混合时,随着含冰率的增加,信号的整个持续时间不断减小,峰值区域更加集中,且信号振幅更大。这是由于冰与

滑脱面间的摩擦系数明显比土与滑脱面的摩擦系数小,随着冰-岩碎屑流中冰含量的不断提高,滑体整体的摩擦系数将不断减小,冰-岩碎屑流会受到更大的下滑力,以更快的速度冲下滑槽,冲击状态更加倾向于整体运动而非被滑道拉长截留。在极端工况即含冰率 100% 的纯冰状态下,激发的信号峰值振幅显著高于其余四种工况,且激发信号的峰值区间最为集中,峰值不再缓慢减低,而是平稳维持在较高振幅一段时间后突然下降,这与纯冰的下滑速度更快且冰体难以被滑道截留拉长,以整体形态迅速撞击滑槽并散落堆积在河道中的情况相符。

通过图 4 (a), (d) 和图 4 (b), (e) 两组对照试验,可以看出冰在土体上层时冰岩崩激发的地震动信号的持续时间均略大于冰土混合时的工况,且工况 4 和工况 5 的信号峰值区间更长而振幅更低。造成这一现象的原因是当冰在上层时,冰-岩混合物开始下滑时与滑道间的摩擦基本由下层土体承担,由于土体摩擦系数较大,在下滑过程中冰-岩混合物速度较低且滑动形态被逐渐拉长,位于上层的冰体先于土体冲击缓坡段,下层土体再陆续到达缓坡段并发生碰撞,在试验结束后仍有小部分土体残留在滑道中。

在从信号的时域角度进行初步分析后,采用 Huang 等^[9-11]提出的 HHT 方法进一步对地震动信号进行处理,得到的 Hilbert 时频谱如图 5 所示。由于工况 3 的振幅较为特殊,仅对其余 4 种工况的时频谱在时间轴上进行积分,获得的 Hilbert 边际谱如图 6 所示。

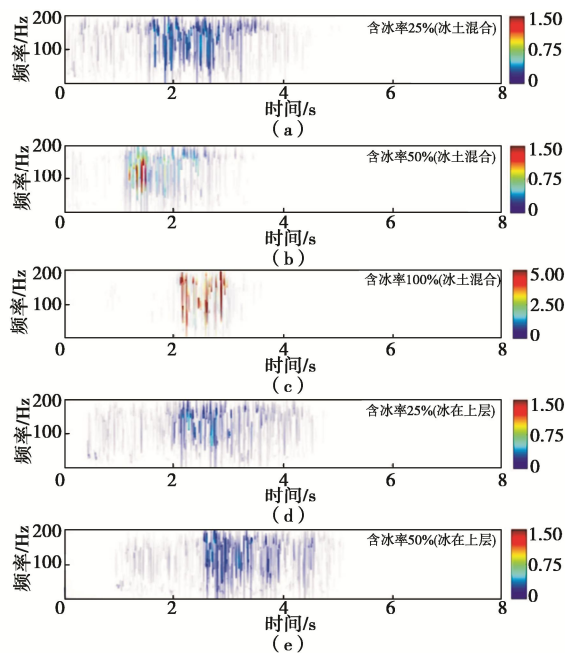


图 5 不同工况下冰岩崩激发的垂向地震动信号 Hilbert 时频谱

Fig. 5 Hilbert-spectra of vertical ground motion signals excited by rock-ice avalanches recorded under different working conditions

4 种工况下冰-岩碎屑流产生的地震动信号的频谱特征基本一致,信号频率主要分布在 0.06~45 Hz

范围内,以低频振动为主,峰值均出现在 0.8~0.9 Hz,高频成分集中出现在信号的峰值期,即冰-岩碎屑流与缓坡段及河道两岸发生强烈冲击碰撞时期。

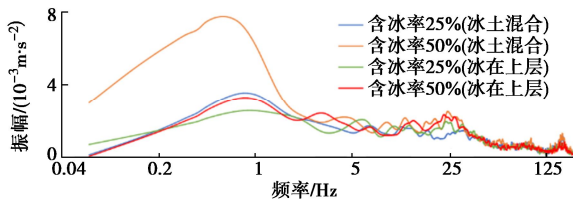


图 6 不同工况下的 Hilbert 边际谱

Fig. 6 Hilbert marginal spectra under different working conditions

3 结 论

本文通过开展 5 次模型试验,基于地震动信号分析了高寒山区冰-岩碎屑流在不同工况下的运动特性,得到如下结论:

(1) 信号的整个持续时程可划分为 3 个阶段:平稳期、峰值期和衰弱期,随着含冰率的增加以及冰与滑脱面的接触面积增大,信号的持续时间不断减小,峰值区域更加集中,且信号振幅更大。

(2) 冰-岩碎屑流激发的地震动信号以低频为主,信号频率主要分布在 0.06~45 Hz,峰值出现在 0.8~0.9 Hz,高频成分集中出现在冰-岩碎屑流与缓坡段及河道两岸发生强烈冲击碰撞时期。

(3) 基于连续波形数据可以较为准确地识别冰-岩碎屑流运动过程中的一些动态信息,研究可为此类灾害的远程监测和灾后救援工作提供参考,也可为后续冰-岩碎屑流的动力学特征参数反演奠定基础。

参考文献:

- [1] EVANS S G, CLAGUE J J. Catastrophic rock avalanches in glacial environment, landslides[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides. Lausanne, 1988.
- [2] 刘 伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, **13**(3): 9-18. (LIU Wei. Study on the characteristics of huge scale-super highspeed-long distance landslide cain in Yigong, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, **13**(3): 9-18. (in Chinese))
- [3] 邢爱国, 徐娜娜, 宋新远. 易贡滑坡堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 78-83. (XING Aiguo, XU Nana, SONG Xinyuan. Numerical simulation of lake water down-stream flooding due to sudden breakage of yigong landslide dam in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 78-83. (in Chinese))
- [4] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. 中国地质, 2019, **46**(2): 219-234. (LIU Chuanzheng, LÜ Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. Geology in China, 2019, **46**(2): 219-234. (in Chinese))
- [5] 杨情情, 苏志满, 陈锣增, 等. 冰屑对冰-岩碎屑流运动特性影响作用的初步分析[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(6): 1117-1126. (YANG Qingqing, SU Zhiman, CHEN Luozen, et al. Flume tests on influence of ice to mobility of rock-ice avalanches[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(6): 1117-1126. (in Chinese))
- [6] 杨情情, 郑欣玉, 苏志满, 等. 高速远程冰-岩碎屑流研究进展[J]. 地球科学, 2022, **47**(3): 935-949. (YANG Qingqing, ZHENG Xinyu, SU Zhiman, et al. Review on rock-ice avalanches[J]. Earth Science, 2022, **47**(3): 935-949. (in Chinese))
- [7] 李昆仲, 张明哲, 邢爱国. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, **32**(1): 18-27. (LI Kunzhong, ZHANG Mingzhe, XING Aiguo. Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, **32**(1): 18-27. (in Chinese))
- [8] 师璐璐, 陈 剑, 陈瑞琛, 等. 丽江干河坝冰-岩碎屑流地貌、沉积特征与成因机制分析[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(4): 1382-1394. (SHI Lulu, CHEN Jian, CHEN Ruichen, et al. Geomorphological characteristics and failure mechanism of Ganheba rock-ice avalanche in Lijiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, **44**(4): 1382-1394. (in Chinese))
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, **454**(1971): 903-995.
- [10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, **31**: 417-457.
- [11] HUANG N E, SHEN S S P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications[M]. Singapore: World Scientific, 2005.
- [12] FAN G, ZHANG L M, ZHANG J J, et al. Energy-based analysis of mechanisms of earthquake-induced landslide using Hilbert-Huang transform and marginal spectrum[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(9): 2425-2441.
- [13] FAN G, ZHANG L M, ZHANG J J, et al. Analysis of seismic stability of an obsequent rock slope using time-frequency method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, **52**(10): 3809-3823.

(编校: 孙振远)