

砖砌体建筑在泥石流冲击力作用下动态响应实验

张 宇¹, 韦方强¹, 贾松伟¹, 刘 兵²

(¹ 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

² 中科动态仪器公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 我国山地泥石流活动频繁, 建筑物防护是山区城镇建设及泥石流堆积扇开发利用中必须解决的问题, 有效模拟泥石流冲击力, 研究建筑物在泥石流冲击力作用下的动态响应有助于防灾工程设计。以云南东川蒋家沟为研究区域, 利用实际观测数据和对泥石流破坏现场调查分析的结果, 对粘性泥石流冲击力进行理论模拟, 研究砖砌体建筑在受到泥石流冲击力作用下的受力形式及破坏形态; 在此基础上, 进行了砖砌体结构墙体模型试件的破坏性实验, 现场观测试件在冲击力作用下的破坏形态和历程, 采集其动态位移及主振频率数据, 得出结构开裂冲量。

关键词: 泥石流; 冲击力; 砖砌体结构; 模拟

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流是山区特有的一种突发性自然灾害, 具有发生突然、历时短暂、来势凶猛、大冲大淤、破坏力极强的特点^[1]。一般地, 泥石流冲击力是由泥石流浆体动压力和石块撞击力两部分构成, 这两部分往往又相互叠加, 即在浆体动压力上叠加着大小不同的石块作用力, 其破坏作用就更大^[2]。近年来, 泥石流灾害频繁暴发, 而山区建设发展迅速, 山区城镇建设及泥石流堆积扇开发利用中的泥石流防治问题愈显突出。

中国科学院东川泥石流观测研究站自 1965 年以来, 对著名的“泥石流的天然博物馆”蒋家沟进行了多年的观测和研究, 积累了几千个单次泥石流的实测资料。从观测资料看, 蒋家沟粘性泥石流阵流最为活跃, 活动历时占整个过程的 70% 左右。粘性泥石流阵流, 阵与阵之间有明显的断流时间, 而每阵的流动历时从几秒钟到数十秒钟不等, 文献^[2]根据东川泥石流观测站实测的资料, 把粘性泥石流冲击荷载概化成三类脉冲形式: 锯齿型、矩形和尖峰型, 而锯齿型波是流体均匀的动压力和不均匀的动

压力, 以及大小石块撞击力相互叠加的结果, 是典型的泥石流冲击力波形。该波形可以说明泥石流阵流的动力学特性, 在流动中, 冲击力表现为若干个三角形脉冲, 而在断流时, 呈平滑的矩形形状。砖砌体结构建筑是中国山区城镇较为普遍采用的一种建筑形式, 在泥石流作用下的一般破坏形式为, 底层面对泥石流方向的承重墙体在平面外作用的冲击力作用下发生弯曲破坏, 其上部结构失去支撑而垮塌。由于大石块的作用有偶然性, 本文仅对浆体动压力部分对砖混结构建筑墙体作用进行模拟计算和试验。

1 试验方法

1.1 参数选择

根据实际观测研究, 阵流具有明显的头部、身部和尾部, 俗称为“龙头”、“龙身”和“龙尾”, 而泥石流龙头冲击建筑物造成的危害是非常突出的。根据魏鸿的试验研究, 龙头开始冲击坝体时, 龙头冲击力在沿坝高分布的每一相对高度区域, 从下至上出现, 历

收稿日期 (Received date): 2005-10-22 回收日期 (Accepted): 2006-01-11

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40201009), 国家自然科学基金重大项目 (90202007), 中国科学院成都山地灾害与环境研究所引进人才资助项目 [National natural science foundation of China No. 40201009; National natural science foundation of China No. 90202007; Science foundation of MHE CAS]

作者简介 (Biography): 张宇 (1970-), 女, 汉族, 副研究员, 博士, 从事泥石流运动力学与山地灾害防治工程研究 [Zhang Yu (1970-), associate professor, doctor specialized in dynamics of debris flow and mountain hazards controlling engineering]

时极短^[3]。目前泥石流的流速分布问题尚未得到解决, 在实际观测中, 把龙头看成整体的运动, 测得的流速作为断面平均流速。因此, 假定泥石流龙头以同一速度均匀作用在建筑物上, 即泥石流流体对建筑物的冲击力是均匀的。

根据中国科学院东川泥石流观测站的实际观测资料, 蒋家沟粘性泥石流泥深一般在 3.5 m 以下, 其中, 泥深在 2 m 以下的居多, 流速一般在 5~10 m/s, 而流速与泥深一般正相关。

根据蒋家沟阵性泥石流的运动特征和动力学特性, 本试验选取研究参数为作用区域在 2 m 高度以下, 不包含巨大石块的泥石流体的冲击力。计划对建筑模型施加一系列呈三角形脉冲形式冲击力, 研究结构从弹性阶段到弹塑性阶段, 直到破坏阶段全过程的动态响应历程和破坏形态, 通过其动力特性的变化, 获得其极限承载力。根据技术、经济及试验设备等条件, 综合确定了模型的几何比尺为 1:2。

1.2 试验场设计

试验在中国科学院东川泥石流观测站进行。根据现场条件, 设计了试验场地。如图 1 所示, 利用撞击物从高处滚落时所产生冲力的水平方向分力施加集中冲击力。因为模型的比尺为 1:2, 冲击力作用高度在 1.0 m 以内, 所以在试件表面安装了一块 1.35 m 宽, 1.0 m 高, 8 mm 厚的钢板, 当撞击物沿轨道滚落, 通过撞击钢板, 将作用的集中冲击力转化为均布力。图 1 中所示, H 为平台到试验台座的垂直高度, h 为平台到试件冲击力作用点的垂直高度, 撞击物的半径为 r 。在本次试验中, $\beta = 37^\circ$, $H = 4.5$ m。

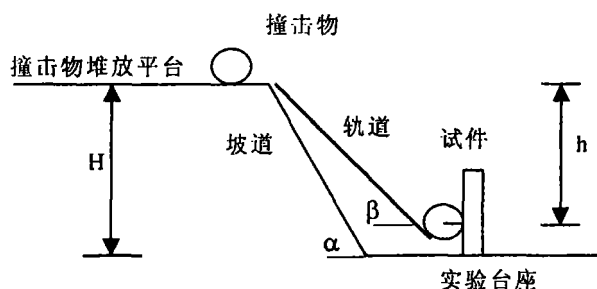


图 1 试验场示意图

Fig 1 Sketch map of proving ground

为了保证撞击均匀性以及分级良好, 定做了一系列铁球作为撞击物, 目的在于产生三角形脉冲形式冲击力, 并实现比例加载 (图 2)。

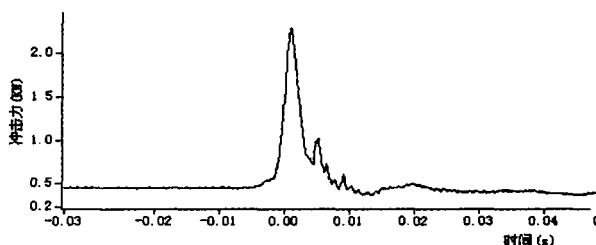


图 2 撞击物产生的三角脉冲形式冲击力

Fig 2 A delta impulse of steel ball

冲击力传感器紧固在一块 20 cm × 20 cm 的钢板和传力钢板之间, 为了延长冲击力的作用时间, 使其尽可能与实际泥石流作用相似, 在力传感器前的钢板上安装一块 35 mm 厚胶皮, 起到缓冲作用。

1.3 数据采集

为了在模拟试验中, 准确地进行冲击数据采集, 并进行数据处理, 采用中国科学院成都山地灾害与环境研究所和成都中科动态仪器有限公司共同研制的冲击测量数据采集系统 (MHE IMPACT DATA-COLLECTING SYSTEM, 简称 MHE IDCS)。该系统可以在试验场对建筑结构及其模型 (砖墙、混凝土构件) 实施人为撞击的同时, 测量墙体的振动位移与绝对位移, 获得墙体在不同外力作用下的冲击响应情况 (图 3)。

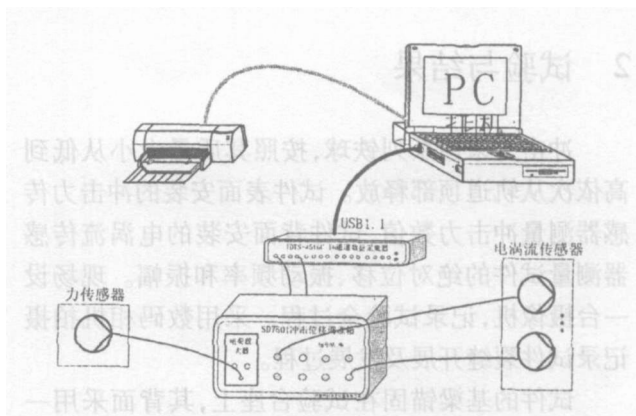


图 3 冲击测量数据采集系统连接示意图

Fig 3 Sketch map of impact data collecting system

1.4 模型设计

本试验拟模拟一个云南东川地区典型一层砖砌体结构的受力状况。该建筑根据现行建筑规范——砌体结构设计规范 (GB50003-2001)^[4], 建筑结构荷载规范 (GB50009-2001)^[5] 设计, 抗震设防烈度 9 度, 层高 3.0 m (墙体净高 2.7 m), 横墙间距为 2.7 m, 纵横墙混合承重, 墙体厚度为 240 mm。选择其面向泥石流作用的墙体作为模拟对象, 试件尺寸见图 4。

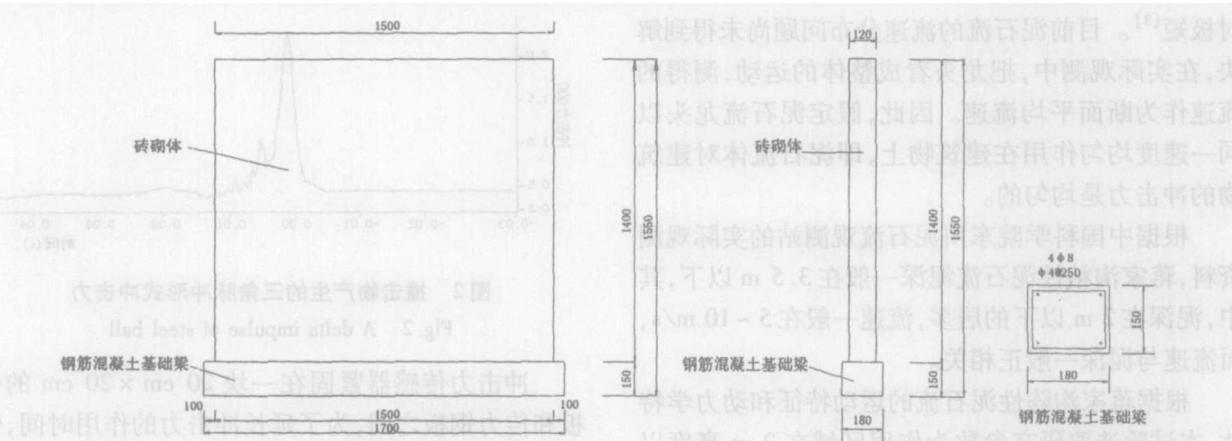


图 4 砖砌体模型示意图

Fig 4 Sketch map of masonry wall model

本次试验加工了两个砖砌体试件, 试件设计砂浆强度为: M7.5 砖为标准尺寸, 240 mm × 115 mm × 53 mm, 等级为 MU 10 的机制红砖, 混凝土梁强度等级为 C20, 试件的表面采用 20 mm 厚水泥砂浆抹平抹光, 以确保分配力钢板与试件之间接触面平整, 背面刷白色涂料。与试件同条件养护的砂浆试块在 45 d 龄期时, 平均极限强度为 11.4 MPa, 混凝土试件平均极限强度为 34.4 MPa, 均符合设计要求。

2 试验与结果

冲击力采用系列铁球, 按照其质量大小从低到高依次从轨道顶部释放。试件表面安装的冲击力传感器测量冲击力数值, 试件背面安装的电涡流传感器测量试件的绝对位移、振动频率和振幅。现场设一台摄像机, 记录试验全过程。采用数码相机拍摄记录试件裂缝开展及发展过程。

试件的基梁锚固在试验台座上, 其背面采用一个钢制的门架固定, 门架与试件采用金属膨胀螺栓固定。墙体试件的受力面安装分配力钢板, 钢板的两侧采用 $\Phi 10$ 的金属膨胀螺栓固定在墙体上, 见图 5。墙后面设置了 7 个电涡流传感器, 其编号为, 竖向中心处从上至下, 依次为 1 至 5 号, 水平方向, 左侧为 6 号, 右侧为 7 号, 其具体位置见图 6。

2005-03-03 对 A1 和 A2 试件进行试验, 两试件破坏特征及历程基本一致。两试件均为在采用 $M = 27.4$ kg 铁球撞击后, 在墙后面首次发现横向裂缝, 裂缝高度为距离基梁上表面 0.50 m 左右。竖向裂缝也是先在横向裂缝上部的墙竖向中心处出现,

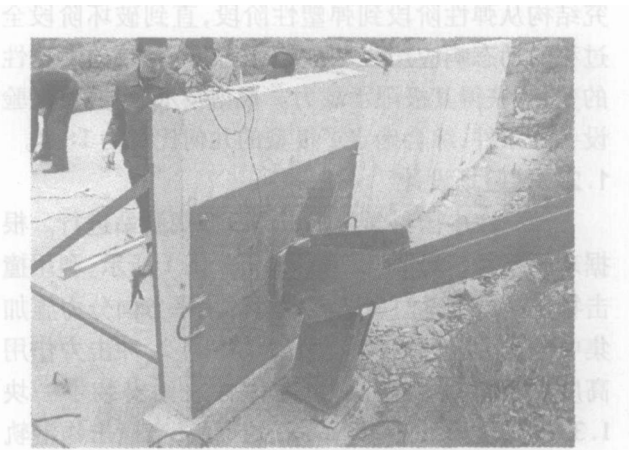


图 5 试件前受荷面布置

Fig 5 Layout before wall model

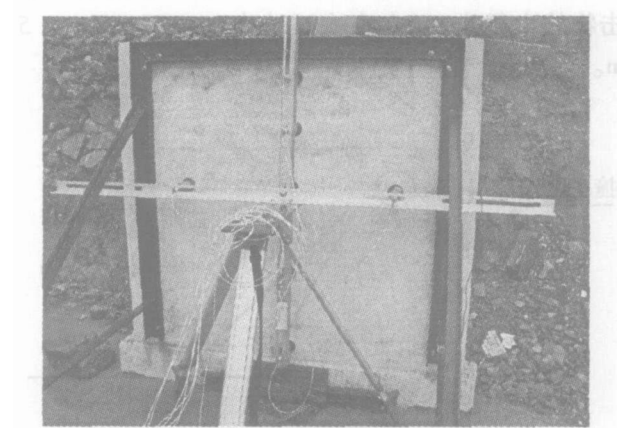


图 6 试件背面传感器布置

Fig 6 Transducers layout behind wall model

然后再在横向裂缝下部的墙竖向中心处出现, 但出现竖向裂缝的时间有些差别, A1 试件是在 $M =$

41.4 kg的铁球撞击后出现竖向裂缝,而 A2试件是在 $M = 36.5$ kg铁球撞击后出现。图 7和图 8为采用由中国科学院成都山地灾害与环境研究所和中科动态仪器公司共同研制的结构试验裂缝识别与处理系统 (MHE CRACK IDENTIFYING AND PROCESSING SYSTEM, 简称为 MHE CIPS) 计算处理后的净化裂缝二值图。从裂缝二值图可见,两个试件的破坏形态非常相似,说明该组试件是均匀的。

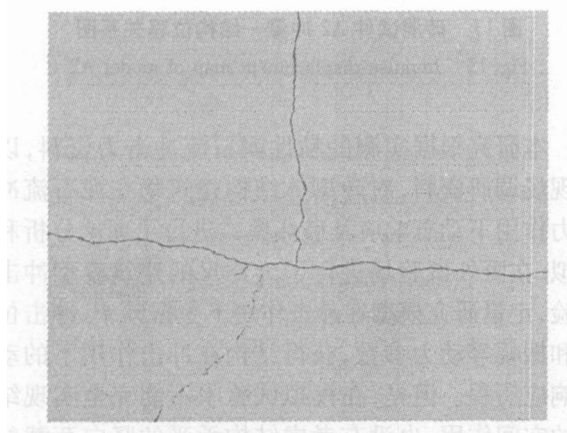


图 7 A1裂缝分布图

Fig 7 Crack layout of A1 model

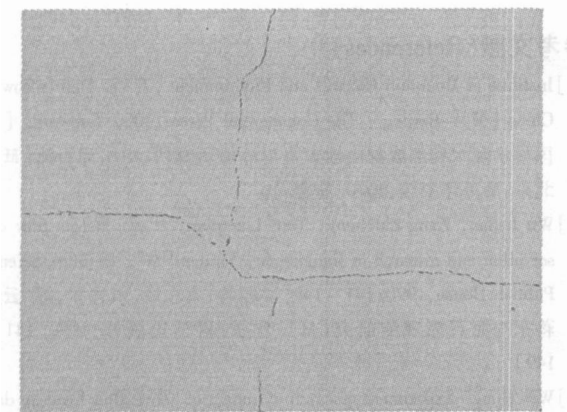


图 8 A2裂缝分布图

Fig 8 Crack layout of A2 model

3 信号分析与处理

3.1 振动幅值 A

结构冲击振动的测试结果是反映各种振动信息的曲线,即振动波形图。它包含着与冲击振动有关的信息和无关的信息。需要通过数学方法进行信号分析和数据处理,突出与冲击振动有关的信息,压缩无关的信息^[6]。如图 9 为一个典型的衰减振动波形

图:

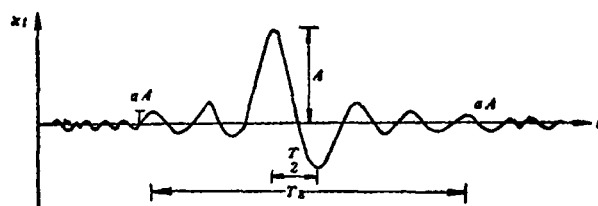


图 9 典型衰减振动波型图

Fig 9 Typical damped vibration wave

在一个完整的波形图上,波的振幅是不相同的,它随时间变化,是时间的函数。但从波形图上可以看出,在波的主振相处振幅大,而且,还存在着波型图在基线两侧很不对称的情况,本研究中试件的动态响应是外力冲击后的自由振动,在结构阻尼、空气阻尼等的作用下属于衰减振动,所以,本研究只读取峰值,即读取最大幅值 A 作为结构在冲击作用下动态响应振幅。

3.2 衰减振动的振动频率 (周期)

实测的试件的振动波形的频率比较复杂,不是单一的简谐波,取最大振幅相邻的两个波峰或波谷之间的时间为周期 T ,其倒数即为振动波形的主频率, $f = 1/T$,此频率为该振动波形中占优势的主要频率,由于此振动为试件受到冲击后的自由振动,因此该频率也可看作为试件的一阶模态频率。

3.3 冲击力持续时间

指外部冲击力作用到试件上所持续的时间。由于实测冲击力波型图上冲击力开始和停止的时间不易确定,一般做如下规定:若记录中最大振幅为 A ,则从振幅 αA 开始到波型衰减到 αA 为止的一段时间作为振动持续时间,通常取 $\alpha = \frac{1}{5} \sim \frac{1}{3}$ ^[6],本文取 $\alpha = \frac{1}{5}$,如图 10所示,在这段信号范围内对冲击力信号做积分,就可以得到冲量值。

4 数据分析与结论

图 11~13展示了一个砖混砌体试件的动态响应参数的变化过程。可以看出,在冲击作用下结构振幅和位移随着冲量的增加,呈现出指数形式变化趋势。也就是在作用冲量较小的情况下,振幅与位移随着冲量增加而出现增长趋势,对应的主振频率则集中于某一区间,可以认为此时结构处于弹性工

作状态;当冲击作用的冲量超过该分界点以后,冲量增幅不大的情况下,这两个参数的变化速率逐渐增大,而主振频率则迅速下降,说明结构已进入非线性工作阶段。

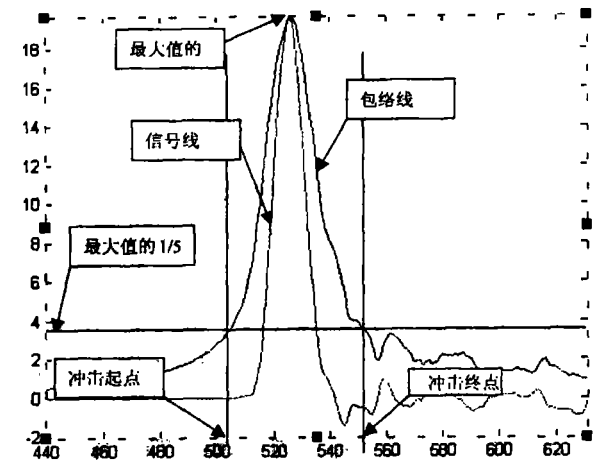


图 10 冲击力持续时间
Fig 10 Duration of impact load

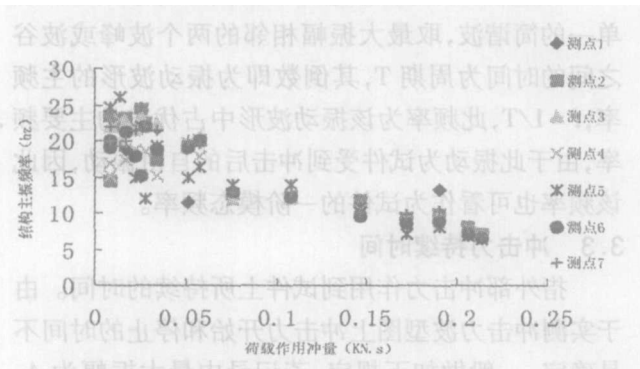


图 11 砖混试件 A2 冲量—主振频率关系图
Fig 11 Impulse-main natural frequency map of model A2

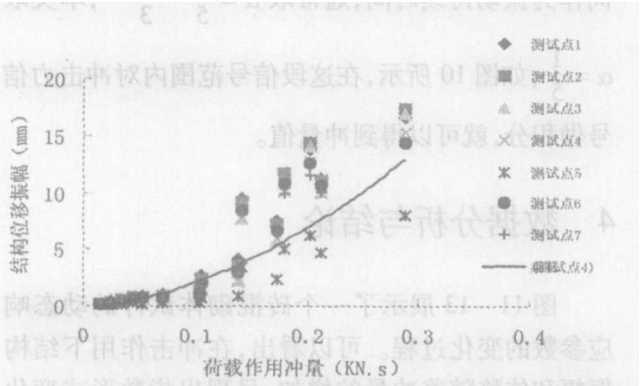


图 12 砖混试件 A2 冲量—振幅关系图
Fig 12 Impulse-amplitude map of model A2

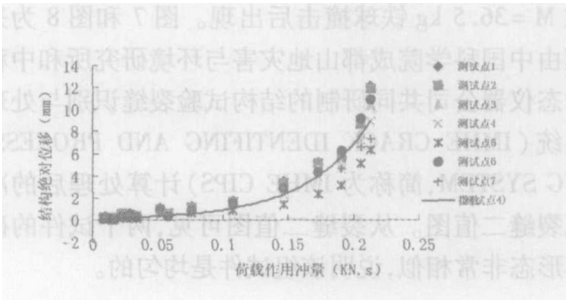


图 13 砖混试件 A2 冲量—结构位移关系图
Fig 13 Impulse-displacement map of model A2

本研究根据实测的粘性泥石流冲击力资料,以及现场调研资料,对砖砌体结构建筑物在泥石流冲击力作用下动态响应及破坏模式进行了理论分析和模拟,在野外试验场进行了大比尺的建筑模型冲击试验,定量研究模型在冲击作用下主振频率、冲击位移和振幅等动力参数,获得结构在冲击作用下的动态响应历程。但是,在模拟试验中不能完全实现结构的空间作用,也没有考虑结构承受的竖向荷载的作用,还不能完全代表结构实际工作状态,有待于在以后的工作中进一步完善。

参考文献 (References)

[1] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS Debris flow in China [M]. Beijing: The Commercial Press 2000 foreword [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流 [M]. 北京: 商务印书馆, 2000 前言.]

[2] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al Debris flow observation and research in Jiangjiaogou, Yunnan [M]. Beijing: Science Publish House 1990. 141~ 149 [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990 141 ~ 149]

[3] Wei Hong Experiment research of impact of debris flow head on dam [J]. China Railway Science, 1996, 17(3): 50~ 62 [魏鸿. 泥石流龙头对坝体冲击力的实验研究 [J]. 中国铁道科学, 1996, 17(3): 50 ~ 62]

[4] Design Criterion of Masonry Building (GB50003— 2001) [S]. Beijing: Chinese Architectural Industry Press 2002 (Ch). 10~ 43 [中华人民共和国国家标准. 砌体结构设计规范 (GB50003— 2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002 10~ 43]

[5] Design Criterion of Structure Loading (GB500009— 2001) [S]. Beijing: Chinese Architectural Industry Press 2002 (Ch). 6~ 12 [中华人民共和国国家标准. 建筑结构荷载规范 (GB500009— 2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002 6~ 12]

[6] Meng Jifu, Hui Hongbin Test technology of blast [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press 1992 120~ 121 [孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992 120~ 121]

Experimental Research of Unreinforced Masonry Wall under Dynamic Impact of Debris Flow

ZHANG Yu¹, WEI Fangqiang¹, JIA Songwei¹, LU Bing²

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2 Chengdu VIDS Dynamic Instrument Co., Ltd, Chengdu 610041, China)

Abstract In recent years, ruinous debris flow disasters erupted frequently in Chinese mountain areas. How to prevent and control debris flow has become more and more important in the construction of mountain town and the development and planning of deposit span of debris flow. It's very important to simulate impact load of debris flow effectively and to investigate dynamic response of architectures under dynamic impact of debris flow, all of these research are necessary to anti-disaster construction design. This paper chose Jiangjiagou of Yunnan province in China as research region. Utilizing based data from fieldwork and survey, this paper simulated and calculated theoretically the bearing load style and the destructed shape of unreinforced masonry construction impacted by debris flow. Secondly, the authors fulfilled a destructed impactive test of a set of unreinforced masonry wall model. During experiment, the destructed shape and course of model were observed and the dynamic displacement datas and main natural frequency datas of model were collected using MHE Impact Data Collecting System (MHE DCS). According to failure criterion and experiment data, the impact resistance of researched architecture was deducted.

Key words debris flow, impact load, unreinforced construction, simulation

欢 迎 来 稿

《山地学报》由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所和中国地理学会主办, 是山地研究领域唯一的核心学术期刊, 是专门报道山地科学研究理论与山区开发、整治、建设实践相结合的综合性科技期刊。内容涵盖自然科学与人文科学两大门类中与山地研究、开发有关的多学科知识, 重点报道山地资源开发与山地生态环境演变、山区工程建设与山地灾害防治(滑坡、泥石流、水土流失、山洪等)、山区社会发展与城镇规划、山区可持续发展与产业结构调整等领域的理论文章、应用技术、研究和实验方法等。同时也设有学术动态、新书介绍和书评等不固定栏目, 近年来还特别开辟青藏高原、黄土高原、黄河流域等专题研究的专栏。

《山地学报》是中文核心期刊, 中国科技论文统计源期刊, 中国科学引文数据库源刊, 被多种文摘收录。《山地学报》为双月刊, 对国家自然科学基金资助研究成果、开放实验室、研究成果等首发稿将优先选择安排。