

文章编号: 1008 - 2786 - ( 2012 ) 4 - 484 - 07

## 舟曲“8.8”特大泥石流对建筑物的破坏方式

胡凯衡<sup>1,2</sup> 崔鹏<sup>1,2</sup> 葛永刚<sup>1,2</sup>

( 1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 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 )

**摘 要:** 2010 - 08 - 07—08 发生的甘肃舟曲特大泥石流造成了 1 765 人死亡和失踪, 33 幢面积共 11. 472 km<sup>2</sup> 的建筑物被直接冲毁, 有 20 幢面积约 69 km<sup>2</sup> 建筑被部分损坏。现场的调查表明, 泥石流破坏建筑物主要有冲击、淤埋和摩擦三种方式。通过对 8 座破坏建筑物的具体分析, 发现泥石流破坏建筑物有正向以撞击为主、侧向以淤埋和摩擦为主, 沿流向呈现波浪式变化以及遮蔽效应等特点。根据泥石流的破坏方式、特点和建筑物类型, 初步提出了我国山区居民住宅两种常见结构的泥石流破坏分级标准。最后提出了几条能有效减轻泥石流对建筑物破坏的具体措施, 可供坐落于泥石流危险区的山城镇借鉴。

**关键词:** 泥石流; 建筑物破坏; 舟曲; 三眼峪; 破坏等级

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

泥石流的危害对象是多种多样的, 比如公路和铁路、矿山、农田、水电工程和城镇等。历史上, 因为泥石流冲断桥墩或者冲毁建筑而造成人员死亡的危害事件屡见不鲜。譬如, 1981 - 07 - 09, 大渡河的一条支沟利子依达沟突发大型泥石流, 将成昆铁路的一座铁路桥冲毁, 致使一辆正在行驶的列车翻入河中, 死亡 275 人。事故中, 泥石流强大的冲击力将铁路的桥墩自基底沿主河方向朝下游移动了 2. 1 m。整个直径 4 ~ 5. 6 m 阶梯变截面圆柱形桥墩裂为三段<sup>[1]</sup>。相比高标准和高结构强度的铁路桥墩, 一般的民用建筑更容易被泥石流摧毁。1999 年委内瑞拉特大泥石流灾害中, 泥石流曾连续将两座 10 多层钢筋混凝土框架结构的楼房切掉一半<sup>[2]</sup>。

在我国的西部山区, 因受地形条件的限制, 许多城镇往往选在地势平坦开阔的老泥石流堆积扇上。据学者统计, 受泥石流危害与威胁的县级及以上城

镇就有 150 余个, 分布在 20 个省级行政区及特别行政区内<sup>[3]</sup>。一旦发生较大规模的泥石流, 就会给人口密度大、建筑物多和财产集中的城镇造成严重的危害。比如 2010 - 08 - 07—08 发生的甘肃舟曲泥石流( 简称“8. 8”泥石流) 致使三分之一的城区受损。其中, 最主要的人员伤亡和财产损失来自泥石流对居民建筑物的破坏。因此, 为了减轻泥石流对建筑物的破坏作用, 减少因泥石流破坏建筑物而导致的人员伤亡和财产损失, 需要合理规划城镇建筑物的布局、研究有效的建筑物抗冲结构。

目前, 国内外对泥石流破坏建筑物的研究不多。Toyos 等曾考察 1998 年意大利南部泥石流灾害中建筑物损坏的情况, 提出了一个简单的泥石流对建筑物损坏的评估分类体系<sup>[4]</sup>。Zanchetta 等在详细考察意大利南部 Sarno 地区火山泥石流对建筑物结构破坏的基础上, 根据估算的泥石流流速和重度, 分析

收稿日期( Received date): 2011 - 09 - 15; 改回日期( Accepted): 2012 - 02 - 18。

基金项目( Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向项目( KZCX2 - YW - Q03 - 5)、国家重点基础研究发展计划资助( 2011CB409902) 和中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目。[This research is supported by Project of Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences ( Grant No. KZCX2 - YW - Q03 - 5), the National Program on Key Basic Research Project ( 973 Program) ( Grant No. 2011CB409902), and the Hundred Young Talents Program of Institute of Mountain Hazards and Environment. ]

作者简介( Biography): 胡凯衡( 1975 - ), 男, 江西瑞金人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事泥石流研究。[Hu Kaiheng ( 1975 - ), M, Born in Ruijin County of Jiangxi Province, Major in debris flows. ] E-mail: khhu@imde. ac. cn

了泥石流冲击力与建筑物受损之间的关系。他们发现,当泥石流的冲压强  $> 35 \text{ kPa}$  时,绝大部分的建筑物被摧毁或严重受损;而  $< 35 \text{ kPa}$  时,建筑物的破坏比较小<sup>[5]</sup>。一般来说,泥石流的巨大破坏力集中体现在其冲击力上。冲击力是评估建筑物抵御泥石流破坏的最重要指标<sup>[6]</sup>。有些研究者在建筑物的冲击破坏方面做了一些研究。如,张宇等分析了砖混结构在泥石流作用下的3种破坏形式,对砖混建筑在受到泥石流冲击力作用下的受力形式及破坏形态进行了理论模拟和计算,并进行了墙体的破坏性试验<sup>[7]</sup>。他们还用实验研究了钢筋混凝土结构的建筑物遭受泥石流冲击的过程<sup>[8]</sup>。韦方强等通过框架和砖混结构建筑物的泥石流冲击实验,确定了这两类建筑物的极限承压能力分别为  $110.56 \text{ kPa}$  和  $18.22 \text{ kPa}$ <sup>[9]</sup>。但是,因为泥石流的组成复杂,难以估计不同类型泥石流所能搬运的固体颗粒粒径上限。因此,泥石流冲击力的上限也难以给出一个合理的估计和计算方法。目前并没有一个建筑物抵抗泥石流破坏的上限标准。

2010年舟曲特大泥石流主要危害的是村庄和城镇。灾害现场建筑物破坏的类型和方式多种多样。本文通过对舟曲泥石流的现场调查,分析总结了泥石流破坏建筑物的方式、特点,并针对砖混和混凝土框架两种常见的建筑结构初步提出了破坏分级标准。这些对今后泥石流危险区域建筑物的结构设计、合理布局等都具有指导意义。

## 2 “8.8”泥石流概述

### 2.1 泥石流过程简况

2010-08-07 T22:00许,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县县城北面的罗家峪、三眼峪上游地区突降强暴雨,40 min降雨量达  $77.3 \text{ mm}$ 。23:05左右,一场特大的山洪泥石流从罗家峪和三眼峪奔涌而出,席卷了舟曲县城关镇的月圆村、北关村、北街村、东街村、南门村、春场村、罗家村、瓦厂村和部分城区,然后冲入白龙江,在三眼峪入江口以下至瓦厂桥长约  $700 \text{ m}$ 河道内,形成最大厚度  $9 \text{ m}$ ,宽  $80 \sim 120 \text{ m}$ 堰塞体,阻断白龙江。堰塞湖回水  $2.6 \text{ km}$ ,水面宽  $100 \sim 120 \text{ m}$ ,蓄水量约  $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。白龙江舟曲县城段水位升高约  $10 \text{ m}$ ,将大半个县城淹没在水中。整个泥石流表现为山洪-泥石流-堰塞湖的灾害链形式。

三眼峪和罗家峪的流域面积分别为  $25.75$  和  $13.17 \text{ km}^2$ ,主沟长度分别为  $6.8$  和  $8.7 \text{ km}$ ,相对高度分别为  $2488$  和  $2380 \text{ m}$ 。两条沟泥石流共冲出固体物质达  $220 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。三眼峪泥石流出山口后,形成长约  $2 \text{ km}$ ,宽约  $170 \sim 270 \text{ m}$ (最宽  $350 \text{ m}$ ,城区  $80 \text{ m}$ )、平均宽  $200 \text{ m}$ 左右的堆积区,淤积厚度  $2 \sim 7 \text{ m}$ ,平均约  $4 \text{ m}$ ;罗家峪泥石流出山后,形成长约  $2.5 \text{ km}$ ,平均宽度约  $70 \text{ m}$ 的堆积区,平均堆积厚度  $2 \text{ m}$ 。据现场调查数据,三眼峪和罗家峪在出山口处的峰值流量分别为  $1485 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $391 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最大流速分别为  $9.9 \text{ m/s}$  和  $5.5 \text{ m/s}$ <sup>[10]</sup>。丰富的松散固体物质、陡峻的地形、局地高强度降雨是发生此次泥石流的主要因素。

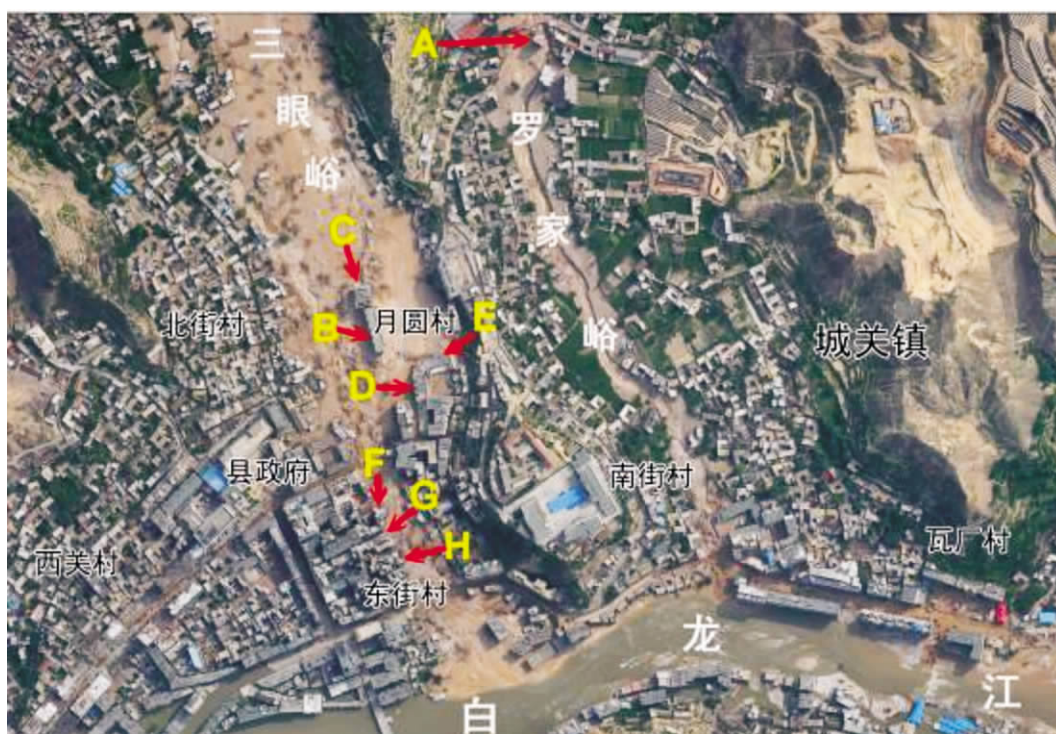
### 2.2 建筑物损坏情况

此次特大泥石流共造成  $4496$  户、 $20227$  人受灾,水毁农田  $1417 \text{ hm}^2$ ,房屋  $5508$  间。截止9月1日,有  $1471$  人遇难,  $294$  人失踪,是新中国成立以来受灾最严重的泥石流灾害事件。由于泥石流直接穿过舟曲县城。所以,大量的基础设施和楼房民居被摧毁。据有关部门统计,泥石流毁坏县城供水水源取水枢纽  $2$  处、蓄水池  $2$  座、供水主管道  $12 \text{ km}$ ;毁坏防洪堤  $23 \text{ km}$ 、备用水源提水泵站  $1$  座、农田灌溉工程  $2$  处、灌溉水渠  $21 \text{ km}$ 。三眼峪内多个村庄被毁,掩埋、冲毁平房  $105$  座、楼房  $12$  座,掩埋、冲毁城区面积  $3 \text{ hm}^2$ 。罗家峪泥石流规模相对较小,冲毁平房  $15$  座、平房、楼房  $1$  座,毁路  $1.5 \text{ km}$ 。据兰州晨报2010-08-30的报道,此次泥石流灾害共损毁建筑物  $8$  万余  $\text{m}^2$ ,其中直接冲毁建筑物  $33$  幢,面积达  $11472 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;受泥石流冲击损坏建筑物  $20$  幢,面积约  $6.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。此外,白龙江两岸还有  $205$  幢建筑物遭受水浸,受损面积为  $64.178 \times 10^4 \text{ m}^2$ (图1)。

## 3 建筑物的破坏和分级

### 3.1 破坏方式

灾害对建筑物的破坏方式和其运动方式与物理性质是密切相关的。比如,地震中建筑物主要是受地震波的作用。地震波的传播方式有纵波、横波、面波,对应的建筑物破坏方式有上下颠簸、水平摇摆和左右扭转。滑坡主要是由于坡体失稳或变形,而推挤、倾倒、压覆或拉裂建筑物。泥石流是一种快速流动的高浓度固液两相体。它既像水流一样在遇到障碍物时在物体表面产生动水压力,又像固体颗粒一



(底图为国家测绘局 2010-08-10 的 1:1250 无人机航拍图; 建筑物 A 为罗家峪一栋 7 层楼高的居民楼, B 为城关一小的老教学楼, C 为紧挨着老教学楼的红色居民楼, D 为县公安局家属楼, E 为城关一小的新教学楼, F 为一座 4 层楼高的居民楼, G 为一座 2 层高的老房子, H 为三栋并排的家属楼)

图 1 舟曲县城泥石流下游建筑物破坏图

Fig. 1 Aerial photo of construction damages in the city of Zhouqu on August 10, 2010

样,在物体接触面发生碰撞和摩擦。另外,由于泥石流具有比较大的屈服应力,在坡度较缓的条件下,很容易淤积。所以,泥石流对建筑物的破坏方式主要有冲击、淤埋和摩擦三种。其中,冲击是最强的破坏方式,淤埋次之,摩擦最次。当然,这三种方式并不一定是单独起作用的。很多情况下,它们是交织发生,共同产生破坏作用。在舟曲泥石流灾害现场,可以看到这三类破坏的典型实例。比如,图 1 中的建筑 A 为一栋 7 层楼高的居民楼,罗家峪的泥石流将该建筑的最下面 2 层对半冲开;随后,上面的 5 层楼在自重的作用下,垮塌了一半(图 2a)。建筑 B 为城关一小的老教学楼,整整被三眼峪泥石流淤埋了 1 层(图 2b)。建筑 C 为紧挨着老教学楼的一栋居民楼,正面和两个侧面都遭受了泥石流的破坏,正面 1~3 楼的墙体被泥石流打穿,泥石流的刮擦将楼体侧面的门窗和墙面破坏(图 2c)。

另外,也还存在一种间接破坏的方式。比如图 1 中的建筑物 D,为县公安局家属楼,共 6 层楼高,位于城关一小一座教学楼的后面。教学楼被泥石流推倒后,直接撞向家属楼。因为家属楼不是框架结

构,整体受剪,整栋楼像水平叠放的多米诺骨牌一样,第 2 层到第 4 层被水平推垮,墙体完全消失,每层依次错位 2 m 左右,建筑只余最上面完整的 2 层(图 3)。

### 3.2 破坏特点

通过分析此次灾害事件中建筑物破坏的情况,发现泥石流破坏建筑物有正向以撞击为主、侧向以淤埋和摩擦为主,沿流向呈现波浪式变化以及遮蔽效应等特点。

#### 3.2.1 正向撞击

泥石流的主流线方向与建筑物的作用面垂直或接近 90°时为正向撞击。比如,图 1 中的建筑 E 为城关一小新教学楼,共 6 层楼高。泥石流首先将教学楼的基础破坏,之后整栋楼被泥石流向下游推动了约 18 m。楼整体倒塌后将图 3 中的家属楼撞塌。建筑 E 正好处于泥石流的主流线上,相当于一座拦挡坝,阻挡了很大一部分的泥石流物质。其长轴方向与泥石流的来流方向垂直(图 4a)。这种与泥石流流向正交的建筑布局,一是增加了受泥石流撞击的面积,二是减小了建筑物的重力力矩,大大降低了





(a)



(b)



(c)

a. 撞击破坏; b. 淤埋破坏; c. 刮擦破坏

a. impact, b. deposition, c. abrasion

图2 舟曲泥石流的三种破坏作用

Fig. 2 Three kinds of construction damages by debris flows

建筑物的抗倾覆能力。

建筑物C在新教学楼北面60 m。虽然楼体迎流面的墙体被打穿,但因为基础牢固,整体为钢筋混凝土结构,加之长轴方向与泥石流流向平行,撞击面积小。所以在泥石流的强烈撞击下仍然屹立不倒。泥石流的流深大约3层楼高,冲起约2层楼高。根据水头与流速的关系,如果是洪水的话,估算流速为



图3 泥石流对建筑物的间接破坏

Fig. 3 Indirect damage of construction by debris flows

10.84 m/s(楼高按3 m计)。一般情况下,泥石流的冲起高要大于洪水,也就是说实际的泥石流流速要小于10.84 m/s。假设泥石流流速10 m/s,流深9 m,重度 $20.58 \text{ kN/m}^3$ ,楼面宽15 m,估计当时这栋居民楼承受的泥石流冲击力最大约为 $1.23 \times 10^4 \text{ t}$ 力。

### 3.2.2 侧向淤埋和摩擦

泥石流的主流线方向与建筑物的作用面平行或接近 $0^\circ$ 时为侧向破坏。泥石流的速度和能量主要集中在主流线方向,沿侧向即与主流线垂直的方向速度分量小,多表现为淤埋和摩擦作用。比如,图1中建筑物G,为一座砖混结构的两层老楼房(图5)。泥石流将它前面的建筑物F(一座4层高的居民楼)摧毁3层后,断面突然变宽。部分泥石流沿侧向流动,冲向建筑物G。尽管该建筑物不是框架结构。但是在侧向运动的作用下仍然保持完整,只是部分被淤埋。

由此看来,为了减小建筑物受到的破坏,可以有两种方法:一是修建排导槽,让泥石流束流,快速通过,不与建筑物发生接触;二是尽量让泥石流沿侧向铺开而不束流,减小泥石流的流深和流速。

### 3.2.3 波浪式变化

泥石流的破坏作用沿流向呈现“强→弱→强”的波浪式变化特点。比如,图1中3栋并排的家属楼H。第1栋被泥石流撞毁3层楼,第2栋被撞坏2层楼,第3栋只有1层楼被淤埋,结构没有受到破坏。这说明泥石流的破坏作用在沿程递减。3栋楼的总长大约为24 m。也就是说隔8 m左右,泥石流受到建筑物阻拦之后,破坏作用降低1/3。但是,经



图 4 正向撞击破坏( a. 建筑 E; b. 建筑 C)

Fig. 4 Constructions impacted face-to-face by debris flow ( a. Building E , b. Building C)

过一段距离的加速和后续来流的补充后,泥石流又重新获得能量,把建筑物 H 下游 20 m 远的一栋建筑冲塌。



图 5 泥石流的侧向淤埋破坏

Fig. 4 Transverse deposition of construction by debris flow



图 6 破坏作用沿纵向递减

Fig. 6 Decreasing damage along flow direction

### 3.2.4 遮蔽效应

遮蔽效应是指不同建筑物之间的相互遮挡,而使得受遮挡的建筑物未被泥石流损坏或者损坏较小。泥石流流过某一建筑物时,会发生绕流,在该建筑物背流面形成一定面积的尾流区。尾流区泥石流的流速和流深小得多。因而,位于尾流区的建筑物往往可以保存下来。比如,城关一小的老教学楼 B,位于建筑物 C 的背后。C 损坏严重,但是建筑物 B 整体完好,只是被淤埋了一层。当然,遮蔽效应也取决于遮挡建筑物的质量。如果建筑物的质量不好,反而可能造成间接破坏。比如,新教学楼 E 虽然阻挡了泥石流,但因为基础不牢,倒塌后反而撞毁了后面的两栋家属楼。与遮蔽效应相反,如果建筑物有突出部位。那么,突出部位非常容易被破坏,比如图 5 中的建筑物 F。

### 3.3 建筑物破坏分级

为了评价建筑物受泥石流破坏的情况,参照中华人民共和国建设部(1990)建抗字第 377 号《建筑地震破坏等级划分标准》,根据泥石流的破坏方式和建筑物的类型,我们初步提出一个建筑物的泥石流破坏分级标准(表 1)。破坏等级一共分为完全破坏、严重破坏、中等破坏、轻微损坏和基本完好 5 个级别。

## 4 结论和讨论

泥石流破坏建筑物主要有冲击、淤埋和摩擦三种方式。本文通过对“8.8”舟曲泥石流建筑物破坏情况的调查和具体分析,考察了这次灾害中三种破坏方式的典型实例,并发现泥石流破坏建筑物有正向以撞击为主、侧向以淤埋和摩擦为主,沿流向呈现

表 1 建筑物泥石流破坏分级标准  
Table 1 Classification of construction damages by debris flow

等级	砖混结构	钢筋混凝土框架结构
完全破坏	房屋残留部分不足 50% ,或者淤埋厚度 $\geq 2$ 层楼	房屋框架残留部分不足 50% ,或者淤埋厚度 $\geq 2$ 层楼
严重破坏	多数承重墙撞塌 ,大部分墙体打穿 ,部分楼屋盖塌落 ,或淤埋厚度 $>1$ 层楼 $<2$ 层楼	多数框架柱和梁撞断 ,大部分墙体打穿 ,部分楼屋盖塌落 ,或淤埋厚度 $>1$ 层楼 $<2$ 层楼
中等破坏	少数承重墙撞塌 ,部分墙体打穿 ,或淤埋厚度 $<1$ 层楼	少数框架柱和梁撞断 ,部分墙体打穿 ,或淤埋厚度 $<1$ 层楼
轻微损坏	承重墙完好 ,非承重墙有部分破损 ,或淤埋厚度 $<$ 半层楼	框架柱和梁完好 ,墙体部分破损 ,或淤埋厚度 $<$ 半层楼
基本完好	承重墙和非承重墙完好 ,仅门窗和墙面部分受损 ,底楼地面有部分淤积	框架柱和梁、墙体完好 ,仅门窗和墙面部分受损 ,底楼地面有部分淤积

波浪式变化以及遮蔽效应等特点。然后,根据泥石流的破坏方式和建筑物的类型,参照中华人民共和国建设部(1990)建抗字第 377 号《建筑地震破坏等级划分标准》,初步提出了我国山区居民住宅两种常见结构的泥石流破坏分级标准。

为了避免建筑物遭受泥石流的破坏,最有效的方法就是不要将房子修在泥石流的必经通道。不过,在目前仍然有许多山区城镇位于泥石流堆积扇的情况下,通过合理的建筑布局、加强建筑的结构,也可以在一定程度上有效减少泥石流对建筑物的破坏。根据建筑物受破坏的特点,主要有 5 条具体措施: 1. 建筑物的长轴方向应该平行于主沟的流向,以降低建筑物的迎流面面积,增强建筑物的抗倾覆能力; 2. 建筑物应该采用钢筋混凝土的框架式结构,可以有效抵抗泥石流的撞击和剪切; 3. 建筑物的突出部位最容易被破坏,所以建筑物的外形应尽量平整; 4. 建筑物之间应该保证足够的间距; 5. 建筑物的底楼是最容易遭遇危害的地方,所以在泥石流危险区,比如舟曲三眼峪入江口附近,修建高层建筑时,底楼采用架空的支柱结构,不作为住宅或商铺。

参考文献(References)

[1] Wu Jishan , Tian Lianquan , Kang Zhicheng et al. Debris Flow and Its Comprehensive Control [M]. Beijing: Science Press , 1993 [吴积善,田连权,康志成等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993]

[2] Wei Fangqiang , Xie Hong , Jose L Lopez. Extraordinarily serious debris flow disasters in Venezuelain 1999 [J]. Journal of Mountain Science , 2000 , 18( 6) : 580 - 582 [韦方强, 谢洪, Jose L Lopez 等. 委内瑞拉 1999 年特大泥石流灾害[J]. 山地学报, 2000 , 18( 6) : 580 - 582]

[3] Xie Hong , Zhong Dunlun , Wei Fangqiang. Debris flow hazards and

their formation causes in mountain urban area of China[J]. Journal of Mountain Science , 2006 , 24( 1) : 79 - 87 [谢洪, 钟敦伦, 韦方强. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因[J]. 山地学报, 2006 , 24( 1) : 79 - 87]

[4] Toyos G , Oppenheimer C , Pareschi MT , et al. Building damage by debris flows in the Sarno area , Southern Italy [C] // Proceedings of the Third International Conference on Debris - Flow Hazards Mitigation: Mechanics , Prediction and Assessment , 2003 , Rickenmann D , Cheng - Lung C ( eds) . Millpress: Rotterdam , Netherlands: 1209 - 1220

[5] Zanchetta G , Sulpizio R , Pareschi MT , et al. Characteristics of May 5 - 6 , 1998 volcanoclastic debris-flows in the Sarno area of Campania , Southern Italy: relationships to structural damage and hazard zonation [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research , 2004 , 133: 377 - 393

[6] Hu Kaiheng , Wei Fangqiang , Hong Yong , et al. Field measurement of impact force of debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25( S1) : 2813 - 2819 [胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006 , 25( S1) : 2813 - 2819]

[7] Zhang Yu , Wei Fangqiang , Cui Peng. Destruction mode simulation of reinforced masonry structure under impact of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters , 2005 , 14( 5) : 61 - 67 [张宇, 韦方强, 崔鹏. 砖混建筑在泥石流冲击作用下的破坏形态模拟[J]. 自然灾害学报, 2005 , 14( 5) : 61 - 67]

[8] Yu Zhang , Wei Fangqiang , Wang Qing. Experimental research of reinforced concrete buildings struck by debris flow in mountain areas of western China [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences , 2007 , 12( 4) : 645 - 650

[9] Wei Fangqiang , Zhang Yu , Hu Kaiheng , et al. Model and method of debris flow risk zoning based on momentum analysis [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences , 2006 , 11( 4) : 835 - 839

[10] Hu Kaiheng , Ge Yonggang , Cui Peng , et al. Preliminary analysis of extra-large-scale debris flow disaster in Zhouqu County of Gansu Province [J]. Journal of Mountain Science , 2010 , 28( 5) : 628 - 634 [胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J]. 山地学报, 2010 , 28( 5) : 628 - 634]

## Building Destruction Patterns by August 8 , 2010 Debris Flow in Zhouqu , Western China

HU Kaiheng<sup>1 2</sup> , Cui Peng<sup>1 2</sup> , Ge Yonggang<sup>1 2</sup>

( 1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy , Chengdu 610041 , China)

**Abstract:** A destructive debris-flow calamity hit the city of Zhouqu , Gansu Province , western China at midnight on August 7th , 2010 , following a local intensive rainfall of 77.3 mm/( 40 min) in Sanyanyu and Luojiayu ravines which are located in the north of the urban area. As of September 1st , the disaster claimed 1471 fatalities , and 294 missing persons. Nearly one-third of the town was inundated by the debris-flow dammed lake. 33 buildings with 11 472 m<sup>2</sup> area were completely destroyed by the debris flow , and 20 were partially damaged. Eight damaged buildings were investigated in details to study the ways or patterns of building destruction by debris flows. The damage patterns of debris flow can be classified into impact , deposition and abrasion. The destructive power decreased initially after impacting an array of buildings , but can increase again by gaining power from gravitational energy and central flow kinetic energy when the flow kept moving a distance. It is termed as the longitudinal fluctuation of debris-flow destruction. The orthogonal impact was the most destructive pattern whereas the transverse impact caused sediment accumulation. The damage depended on not only flow's property such as density , velocity and depth , but also building's orientation , structural strength and regularity. Comparing with nonresistant and collapsed buildings with brick-concrete structure , the reinforced concrete structure can resist effectively debris-flow impact. A classification scheme to assess building damage by debris flows was proposed with reference to the Classification System of earthquake damage to buildings. According to the on-spot investigation , five effective countermeasures for mitigating the building's damage are proposed: 1. to reduce the surface normal to the flow direction , 2. to use reinforced concrete structure , 3. to design no protruding part as far as possible , 4. to keep enough room between buildings , and 5. to prevent the first floor of high buildings from living or business.

**Key words:** debris flow; building damage; Zhouqu county; Sanyanyu ravine; damage classification