

文章编号:1672-6561(2014)02-0081-11

投稿网址<http://jese.chd.edu.cn/>

## 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏 建筑物的特征与力学模型

曾 超<sup>1,2,3</sup>, 崔 鹏<sup>1,2</sup>, 葛永刚<sup>1,2</sup>, 张建强<sup>1,2</sup>, 雷 雨<sup>1,2,3</sup>, 严 炎<sup>1,2,3</sup>

(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. 中国科学院山地灾害与  
地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**2013 年 7 月 11 日, 四川省汶川县威州镇七盘沟暴发大规模泥石流。通过实地调查和测量, 获取了 98 份建筑物破坏样本。泥石流中大石块、漂木和生活废弃物是参与破坏的主要介质; 建筑物长轴方向与流向垂直时, 更易遭受破坏; 而长轴方向与流向平行且规则分布时, 首个遭遇泥石流的建筑物会严重破坏, 但也起到阻挡泥石流和耗能的作用, 较好地保护了其后的建筑物; 当建筑物分布不规则时, 首个和凸出的建筑物均遭受冲击破坏; 距泥石流出口和主流线越近, 建筑物破坏越严重。分析建筑物破坏特征发现: 受损建筑物表现的破坏模式因结构类型不同而异; 若以梁和柱为承重构件, 其破坏主要因柱体受冲后产生塑性铰或被剪断, 致建筑物倾斜或倒塌, 而以砌体为承重构件者, 其破坏表现为承重墙体产生裂缝或垮塌致建筑物整体倒塌。参照建筑物破坏模式, 以静力学极限平衡理论为基础, 提出建筑物柱体和墙体破坏的临界条件计算公式。最后, 依据泥石流的破坏方式和建筑物受损模式, 将七盘沟建筑物的破坏划分为 5 个等级, 并讨论了甘肃舟曲泥石流和本次灾害期间建筑物破坏特征的异同。本研究从案例分析的角度, 为泥石流危险区域城镇及居民点建筑物规划布局 and 结构设计提供参考。

**关键词:**泥石流; 建筑物; 破坏特征; 力学模型; 极限平衡理论; 临界条件; 汶川; 四川

**中图分类号:**P642.23

**文献标志码:**A

### Characteristics and Mechanism of Buildings Damaged by Debris Flows on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan

ZENG Chao<sup>1,2,3</sup>, CUI Peng<sup>1,2</sup>, GE Yong-gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-qiang<sup>1,2</sup>, LEI Yu<sup>1,2,3</sup>, YAN Yan<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A destructive debris flow hazard occurred in Qipangou of Wenchuan county, Sichuan province on July 11, 2013. The debris flow resulted in 350 buildings destroyed, more than 2 000 buildings buried or flooded and 15 people dead or missing. 98 damaged buildings were investigated and measured in details to study the characteristic and patterns of buildings damaged by debris flow. Big boulder, drift logs and waste mixed in debris flow are the mainly contribute to the destruction of building; buildings are more vulnerable when the longitudinal axis (major axis) of them is perpendicular to the flow direction of debris flow; if the longitudinal axis is parallel to the flow direction, the first exposed building is damaged severely, but the building

收稿日期:2013-09-11

基金项目:中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01);国家自然科学基金项目(41030742,41190084)

作者简介:曾 超(1986-),男,重庆市人,中国科学院大学理学博士研究生,E-mail:zeng3chao@163.com.

blocks debris flow with a lot of energy, so as to protect the subsequent buildings from the direct impact of debris flow; for some buildings with irregular distribution, both the first building and protruding part are damaged; the closer the buildings locate to the mainstream and outlet of debris flow, the more serious the buildings are damaged. The characteristics of buildings damaged show that the patterns of debris flow damaging buildings are not the same because of the different structures; if the load-bearing elements of buildings are beams and columns, the collapses of buildings are mainly due to the destruction of columns by the formation of plastic hinges or clipping, while the cracks or collapses of bearing walls are responsible for the collapse of buildings with masonry structure. According to the patterns of buildings damaged, the formulas to calculate the critical condition of building damaged by debris flow were proposed based on the limit equilibrium theory. Finally, the destruction of buildings in Qipangou could be classified into five levels based on the characteristics and collapse patterns of building damaged, and the characteristics of buildings managed by debris flow in Qipangou were compared with that in Zhouqu of Gansu. The case study will improve the land use planning for debris flow prone area in mountain towns, and provide some critical parameters for structural designing.

**Key words:** debris flow; building; failure characteristic; mechanical model; limit equilibrium theory; critical condition; Wenchuan; Sichuan

## 0 引言

2008 年汶川地震形成的沟道堆积物为泥石流提供了丰富物源,震后暴雨往往会诱发大规模甚至群发性泥石流灾害,其持续活跃时间将达 5~10 年<sup>[1-2]</sup>,特别是流域面积较大的低频泥石流沟,一旦暴发泥石流,其规模可超过多数高频泥石流,导致巨大的经济损失和人员伤亡。通过灾害案例深入分析居民点建筑物受泥石流破坏特征,可以为居民点建设的规划布局与抗灾结构设计提供参考和借鉴,服务山区居民点减灾和风险管理。

泥石流损毁建筑物的研究最初多以定性描述为主<sup>[3-4]</sup>,旨在了解建筑物受泥石流作用后的响应<sup>[5]</sup>,评估其损坏等级<sup>[6]</sup>;随着建筑物破坏样本的积累,在一些灾史记录较全或灾害保险体系完备的国家,建立了以流深和建筑物损失为指标的易损性曲线<sup>[7-11]</sup>;并初步确定了泥石流冲击力与建筑物破坏的关系<sup>[12-14]</sup>,使研究结果具有一定的物理意义。模型试验和力学计算可较好地反映建筑物破坏的动力过程和临界条件<sup>[15-18]</sup>,但试验中泥石流的动力条件较难还原,动力相似条件较难满足,同时,动力学计算所需输入参数(如泥石流冲击力时域过程、建筑物弹性变化特征等)较难测定。目前,以野外调查为基础的定量描述和统计分析并结合静力学手段开展建筑物破坏研究仍为主要方法,同时为进一步的模型试验和动力学反演提供原型和参考。

笔者以 2013 年四川汶川七盘沟“7·11”泥石流对建筑物破坏的调查数据为基础,归纳了此次泥石流对建筑物的破坏方式,并从建筑结构出发,分析了不同类型建筑物的破坏模式,提出不同模式中建筑物柱体和墙体破坏的临界条件计算公式,并对建筑物破坏程度进行了等级划分,为居民点建筑物规划设计提供参考。

## 1 七盘沟泥石流概况

七盘沟位于四川省汶川县西南约 5 km 处,为岷江左岸以及支沟,流域面积 52.4 km<sup>2</sup>,沟口海拔 1 320 m,流域最高海拔 4 360 m,高差达 3 040 m,主沟长 15.8 km,沟内多跌水,沟床纵坡较陡,平均沟床比降  $170 \times 10^{-3}$ ,共有 18 条超过 1 km 长的支沟,沟谷切割密度为每平方千米范围内 1.11 km (图 1)。沟内地形陡峻,物源区平均坡度超过 40°。

流域内震旦系白云岩呈狭窄带状出露,元古代闪长岩和花岗岩成片分布。岩体节理裂隙发育,岩石破碎,容易风化为较细颗粒的坡积物,在流域内形成大量松散固体物质。1985 年以前七盘沟内的松散物质总量就达  $3\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[19]</sup>。受 2008 年汶川地震的影响,沟内岩体崩解,坡积物滑落,产生多处滑坡和崩塌,进一步增加了沟道流域内的松散堆积物量。其中,崩塌滑坡在沟道内形成 2 个小型堰塞湖,在极端降雨洪水作用下易溃决。

据汶川气象站 1961~2007 年气象数据,该地区

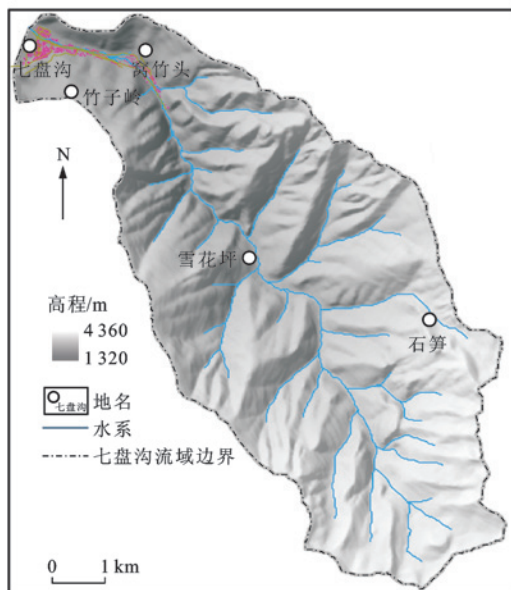
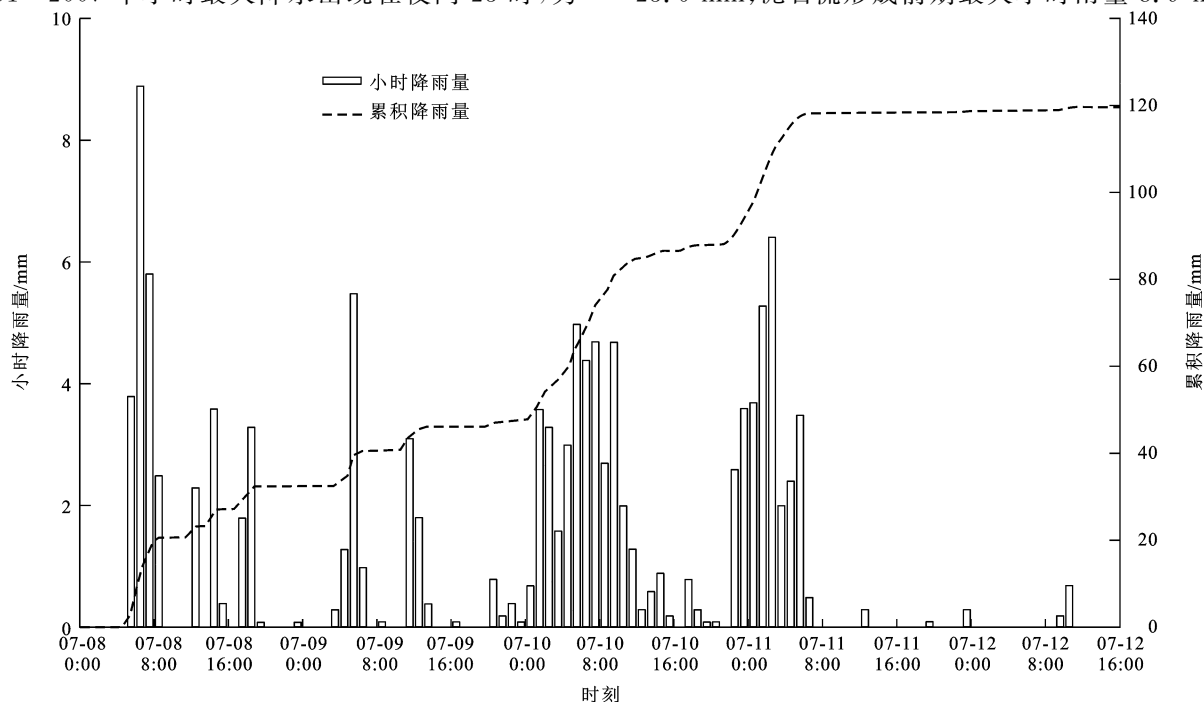


图 1 四川省汶川县七盘沟流域地形

Fig. 1 Topography of Qipangou Ravine in Wenchuan County of Sichuan Province

年平均降水量约 500 mm,汛期(5月至9月)降水占全年的 74.5%。最大月降水量出现在 7 月,均小于 85 mm;逐月最长降水时间达 27 d,10 d 内累积最大降水量 120.2 mm(出现在 1981 年 8 月),最大日降水量约 50 mm;降水日变化为白天少、夜间多,2001~2007 年小时最大降水出现在夜间 23 时,为



数据来源于四川省气象局汶川县七盘沟气象站点

图 2 七盘沟泥石流前后降雨量

Fig. 2 Rainfalls Before and After the Debris Flow in Qipangou

$0.29 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  [20]。

陡峭的地形、持续降水事件、风化作用和地震形成的大量松散固体物质为泥石流形成提供良好的水动力和物源条件。据徐忠信的研究[19],1979 年以前七盘沟发生泥石流约 9 次,其中 1933 年叠溪地震后不久曾发生一次流量约为  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的泥石流,此后 1961~1979 年间发生约 8 次泥石流,平均周期约为 3 年,性质从黏性到稀性交替出现,其中黏性泥石流发生时固体物质冲出总量相对较大,最大冲出总量为  $13.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,出现在 1961 年和 1978 年。1980 年阿坝州对该沟进行治理后至 2013 年 7 月,尚未见到发生泥石流的报道。

2013 年 7 月 8 日至 12 日,都汶公路沿线普降暴雨,激发了大量泥石流。七盘沟于 7 月 11 日凌晨 3 时暴发大规模泥石流灾害。泥石流冲毁七盘沟大部分民房和工厂,造成约 15 人死亡或失踪[21],泥石流进入岷江后,堵江形成堰塞湖,淹没上游新桥村。据七盘沟气象站点记录的 7 月 8 日至 12 日降水数据显示(图 2):从 7 月 8 日开始降水至 7 月 11 日 8 时山洪泥石流完全停止,该地累积降水量达 118 mm,接近历史 10 d 累积降水量最大值;从降水开始至 7 月 10 日 22 时泥石流形成前期累积降水量为 88 mm,7 月 10 日 22 时至 11 日 3 时泥石流激发累积雨量为 23.6 mm;泥石流形成前期最大小时雨量 8.9 mm,



激发过程最大小时雨量 6.4 mm。持续降水使土体充分饱和,失稳破坏汇入到山洪中形成泥石流,泥石流在运动中不断有支沟泥石流汇入,加之上游堰塞湖部分溃决,最终形成具有强大破坏力的大规模泥石流。此次泥石流性质为黏性,调查测得危险区最大石块体积为  $15\text{ m} \times 8\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,以岩石密度按  $2.6\text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  计算,其质量超过 1 800 t,具有极大的破坏力。据当晚参与灾害监测的人员和当地居民描述:泥石流持续时间约 30 min,冲出沟口后其龙头高度超过 10 m,沟岸屋内可感受到运动中石块碰撞产生的震动。据此可推测其流速较快,破坏能力很大。

## 2 受损建筑物破坏方式

### 2.1 受损建筑物概况

通过实地调查和测量,获取了 98 份建筑物破坏样本。据初步统计,此次泥石流共冲毁房屋 350 户,被淹 2 000 余户<sup>[21]</sup>。其中,位于窝竹头的七盘沟五组损失最为严重,该组 90% 以上的房屋被泥石流冲毁或完全淤埋(图 3 中 C 区)。由于沟内部分房屋直接被泥石流冲毁或掩埋,无建筑物痕迹,又因灾后救援清理了部分残留被毁建筑,此次调查共取得了 98 份泥石流破坏建筑物的样本。据建造材料和结

构类型,此次破坏的房屋可分为 6 类,分别为木结构、砖木结构、砌体结构(含石砌体和砖混结构)、框架-砖混结构、框架结构和钢结构。其中:砌体结构建筑物 62 户;框架-砖混结构 13 户,分别为底层框架上层砖混或一侧框架另外一侧砖混两种;框架结构 16 户,多为震后新建的小区房,如阳光家园小区和岷山机械公司的佳家园小区;其他类型房屋仅 7 户。

受损房屋形状可分为 3 种(图 3),其中第 1 种矩形房屋所占比例最大,常沿河道纵向分布或在较宽阔的河漫滩上横向展布,整体较为规则,第 2、3 种形状房屋常呈现不规则分布,在沿河道分布时凸出部位较多,这种参差分布将为房屋破坏带来更高的风险。

损坏的房屋中,除金刚砂厂、碳化硅厂、火炮厂及岷山机械公司的少数厂房外,其余房屋均为 2008 年汶川地震后重建房。建筑物用途多为居民住宅,包括独户住宅和小区集合住宅,大量厂房和职工住宅,政府公共设施(如变电站、垃圾场等),少量旅游设施和商业店铺。

### 2.2 泥石流破坏建筑物的方式

冲击和淤埋是此次泥石流对建筑物的主要破坏方式,其中以冲击作用为主。冲击作用导致结构破



底图为“7·11”泥石流后航空影像,来源于四川省基础地理信息中心

图 3 七盘沟建筑物分布

Fig. 3 Distribution of Buildings in Qipangou

坏的房屋共42户,泥石流物质进入室内导致淤埋破坏的有52户,另有4户为少量泥沙淤积。泥石流破坏建筑物是物质和能量转移的过程。当冲击动能高于建筑物抵抗能力时,泥石流将摧毁建筑物,同时将部分动能转化为建筑物形变所消耗的能量;当泥石流动能不足以破坏建筑物结构时,泥石流物质会进入室内导致淤埋破坏,即物质积聚的过程;在实际中,上述两种情况常同时发生,且受冲击作用为主的建筑物破坏程度较受淤积作用导致的破坏更为严重。

建筑物的破坏方式因泥石流物质组成和两者接触方式的不同而不同。此次泥石流性质为黏性,沿途携带大量巨砾、漂木和人类活动废弃物,使得建筑物受多种介质的危害:①泥石流中的大石块多聚集于龙头,在龙头瞬间冲击过程中,直接摧毁建筑物,或撞坏其主体支撑结构,导致其结构完全破坏或失效[图4(a)、(b)];②流体中沿程携带的废弃物、漂木等也是危害建筑物重要介质。图4(c)中建筑物底部受到流体及大石块冲击破坏,中部被直径约为20 cm的自来水钢管撞击并缠绕,这不仅使建筑物受持续挤压,还会导致泥石流物质在建筑物受冲面堆积,造成更为严重的淤积破坏,漂木和生活废弃物则因泥石流浮托作用而集中于表面,危害房屋高层,此次泥石流将位于沟道上游的汶川县垃圾场中1/3的垃圾冲到下游,许多漂浮废弃物堆积于受损建筑

物高处,给清淤工作造成诸多不便,同时给居民健康带来一定危害;③当高速运动的泥石流受建筑物阻挡,会产生壅高和飞溅,壅高的泥石流体将其携带的动能充分转化为对建筑物的破坏能,且由于泥位升高,建筑物受冲面积增大,泥石流静压力增加,导致更为严重的破坏。同时,飞溅的石块和浆体常击碎高层窗户玻璃,造成窗户损坏。从图4(d)可以看出,泥石流流体的泥位为2.5 m,泥浆爬高超过7 m,壅起的石块撞坏第2层的墙体。

泥石流物质组成反映了其自身破坏能力的大小,建筑物通过与泥石流的接触方式而影响其被破坏的形式。调查资料显示:①当建筑物长轴方向与泥石流流向垂直,即在沟道两岸横向展布时,建筑物部分结构体被泥石流冲毁,或穿过建筑物内部继续运动威胁其后的房屋[图5(a)、(b)];②当建筑物沿河道纵向规则分布,即长轴方向与河道平行时,首先受到泥石流冲击作用的建筑物会遭受严重破坏,而此时泥石流动能也随之逐渐消耗,较好地保护了其后的建筑物[图5(c)];③当纵向建筑物分布不规则时,不仅面对泥石流的首个建筑物受冲击破坏,而且位于凸出位置的建筑物也会遭受泥石流直接冲击,从而形成严重破坏,图5(d)中建筑物A~D为一列沿河道纵向分布的建筑物,A首先受到泥石流冲击致完全损毁,B受到A的保护而较为完好,但C和



图4 七盘沟泥石流破坏建筑物的方式

Fig. 4 Modes of Debris Flow Damaging Buildings in Qipangou





图5 七盘沟建筑物分布与泥石流破坏的关系

Fig. 5 Effects of Buildings Distribution on Damage Level of Debris Flow in Qipangou

D向河道一侧延伸出部分,而未能得到保护,遭受直接冲击,C完全破坏,D的部分墙体受损;④距离泥石流出口和主流线越近,建筑物破坏更严重。图3中B区和C区(最下游距出口约2.2 km),建筑物完全冲毁的比例超过80%,其中,泥石流之前,C区建筑物约120户,灾害发生后仅保存有11户在原地,完全冲毁超过90%,B区建筑物仅在两侧山脚保存了约20户房屋。图3中A区(距出口约2.8 km)建筑物完全损毁比例迅速降至约20%,建筑物以结构性破坏为主。从A区到沟口(距出口约3.2 km)基本无完全被冲毁的建筑物,多表现为淤埋破坏。

在相同泥石流作用强度条件下,图5(a)、(b)中的接触方式破坏程度明显高于图5(c)中的接触方式。一方面,由于长轴垂直流向使其受冲面积大,且建筑物整体惯性矩较小,抗弯性能较弱,导致整体或部分结构容易被冲毁;另外,因纵深小,泥石流更容易洞穿建筑物,冲击破坏其后面的建筑物,不能起到较好的保护作用。建筑物短轴方向与泥石流流向垂直时,由于受冲面积小,抗弯性能较强,且纵深相对较大,泥石流较难直接洞穿,可保护后面的建筑物。建筑物不规则分布形成的凸起部位最易受到破坏。

### 3 建筑物破坏模式

在6种不同结构类型的建筑物中,木结构、砖

木、框架-砖混、框架和钢结构5种主要承重构件均为柱体和梁,因建筑材料不同使其具有不同的强度。砌体结构的支撑构件为砖砌块或石块,其强度取决于砂浆和砌块的强度。因此,前5种建筑物的破坏主要体现在梁或柱的倒塌或损坏,而后一种则为承重墙体的破坏。从结构的破坏程度考虑,将建筑物破坏模式划分为以梁和柱为承重构件和以砌体为承重构件的建筑物破坏模式。

#### 3.1 以梁和柱为承重构件的建筑物破坏模式

##### 3.1.1 墙体破坏导致的非结构性损伤

建筑物外墙受泥石流冲击后倒塌,泥石流从倒塌的墙体或门窗等开口处冲入屋内,导致淤埋破坏,而主体结构支撑柱体或梁并无损伤。对砖木结构,其外墙多为砖砌体,由于木质柱体与砖砌体间黏结性能很差,较易产生裂缝,受泥石流作用后极易垮塌[图6(a)];框架结构墙体与柱间虽然黏结性较好,但其强度仍远低于混凝土柱体,易产生剪切和弯曲破坏。

##### 3.1.2 柱梁损伤、倒塌导致的结构性破坏

建筑物支撑柱或梁受冲击后,其固端、跨中产生塑性铰或被直接剪断,建筑物部分结构体或整体因失去支撑而发生严重倾斜或完全倒塌,其破坏程度取决于损坏柱体或梁的数量和位置。七盘沟泥石流建筑破坏实例表明:破坏柱体数量超过总数的40%时,建筑物将失稳完全倒塌;若破坏柱体为侧面支撑



图6 七盘沟泥石流对不同结构建筑物的破坏模式

Fig. 6 Patterns of Debris Flow Damaging Buildings with Different Structures in Qipangou

构件,其比例小于20%时,建筑物表现为部分结构性损伤;如果破坏柱体为中央支撑构件,其比例超过25%后,建筑物便完全倒塌。

柱体或梁的破坏主要发生在其端部或连接部位。木质柱体破坏表现在榫头(柱体与木梁的连接部位)被折断引起整体垮塌,或柱体完好但受冲击后底部发生较大位移导致楼板垮塌;混凝土框架结构则表现为柱体与基础或梁的连接部位被直接剪断或塑性破坏。框架结构建筑物受泥石流冲击后,柱体与梁的连接部位产生塑性铰,此后该建筑物整体向泥石流运动方向倾倒,建筑物主体被随后的泥石流冲走,致其完全破坏[图6(c)、(d)]。

### 3.1.3 上层承重墙体破坏导致的部分结构性损伤

框架-砖混结构建筑物的底层完好,但上层砌体结构体被泥石流冲毁,或在泥石流壅高、飞溅石块及

漂浮物的作用下损坏[图4(d)以及图5(d)中建筑物D];框架结构的一侧完好,而砌体结构的一侧遭受严重破坏[图6(b)]。

### 3.2 以砌体为承重构件的建筑物破坏模式

以砌体为承重构件的建筑物破坏模式主要由承重墙体裂缝或倒塌引起,其破坏程度因损坏墙体的位置和面积大小而有所差异。①部分建筑物底层的承重墙体受泥石流作用产生裂缝或部分倒塌,但建筑物整体结构良好。此类破坏模式多出现于相对的两面墙体为泥石流破坏,而两侧墙体因平行于泥石流流向而未遭受严重损伤,使得两侧墙体仍然可以支撑整个建筑物不致倒塌[图6(e)]。②建筑物底层的承重墙体大面积产生裂缝或倒塌,致使建筑物整体倾斜并倒塌。此破坏模式多出现在相邻两面墙体或更多面墙体被泥石流破坏,建筑物失去支撑而倒塌[图6(f)]。



## 4 建筑物支撑构件破坏的力学模型

建筑物支撑构件的损毁是导致其结构性破坏甚至倒塌的主要原因,参照七盘沟建筑物的破坏模式和详细测量结果,将建筑物支撑构件的破坏归纳为柱和梁的塑性铰破坏[图 4(c),图 6(c)、(d)]和剪切破坏[图 5(c)]、支撑墙体的弧形拉裂破坏[图 6(e)]。由于柱体的两端固定于基础、梁和楼板处,故

可将其视作两端固定的简支梁。当泥石流作用产生的弯矩或剪力超过柱体的极限弯矩( $M_u$ )和极限剪力( $T_u$ ),便导致塑性铰或剪切破坏。墙体的开裂和变形沿屈服线(Yield Line)展开[图 6(e)],取单位宽度墙体作为研究对象,其固端或中部的屈服变形量即可反映墙体的破坏程度。可依据静力学中力和力矩的平衡原理,利用柱体极限弯矩和剪力值得得柱和墙破坏时泥石流的临界条件(图 7)。

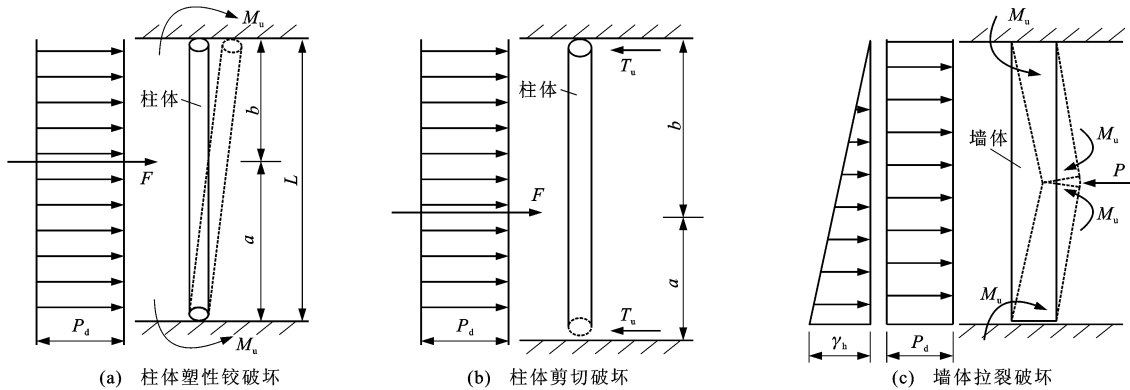


图 7 建筑物柱体和墙体破坏的力学模型

Fig. 7 Damage Mechanism of Column and Wall of Buildings

### 4.1 底层柱体的塑性铰破坏

令泥石流作用产生弯矩与柱体极限弯矩相等,可以得到以下表达式

$$1/2Fa + 1/4P_dL^2 = M_u \quad (1)$$

式中: $M_u$  为柱体极限弯矩; $P_d$  为泥石流浆体动压力; $F$  为大石块冲击力,采用文献[22]中据野外观测资料修正后的公式; $L$  为柱体高度, $L=a+b$ ; $a$ 、 $b$  分别为大石块作用点离固端的距离。

泥石流浆体动压力和大石块冲击力表达式为

$$P_d = k\rho v^2 D \quad (2)$$

$$F = 48\,200v^{1.2}R^2g \quad (3)$$

式中: $k$  为泥石流不均匀系数; $\rho$  为泥石流密度; $v$  为泥石流和大石块流速; $R$  为大石块半径; $g$  为重力加速度( $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ); $D$  为泥石流与柱体接触尺寸的特征参数,在本文中为柱体宽度。

将式(2)、(3)代入式(1)可得柱体弯曲破坏对应的泥石流流速和大石块粒径的关系

$$944\,720v^{1.2}R^2a + k\rho v^2 \cos^2\theta DL^2 - 4M_u = 0 \quad (4)$$

### 4.2 底层柱体的剪切破坏

流体中的大石块撞击柱体会直接导致其剪切破坏。令柱体的极限剪力  $T_u$  与泥石流产生剪力相等,当大石块粒径较小时,柱体剪切破坏点位于固端,此时剪力为泥石流浆体和大石块共同作用力;反之破坏点位于大石块作用点,剪力主要由大石块提

供。其表达式为

$$\left. \begin{aligned} 1/2P_dL + b^2/L^2(1 + 2a/L)F - T_u &= 0 \\ T_u - F &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(2)、(3)代入式(5),可得柱体剪切破坏对应的泥石流流速和大石块粒径关系

$$\left. \begin{aligned} k\rho DL^3v^2 + 944\,720b^2(1 + \frac{2a}{L}) \cdot \\ R^2v^{1.2} - 2L^2T_u &= 0 & R \leq R' \\ 472\,360R^2v^{1.2} - T_u &= 0 & R > R' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $R'$  为大石块临界粒径; $R \leq R'$  表示破坏点位于柱体固端, $R > R'$  表示大石块作用点破坏。

### 4.3 墙体的拉裂破坏

令泥石流浆体静压力和动压力产生的弯矩与墙体抵抗变形的极限弯矩相等,需根据墙体变形的几何参量和轴向应力求得墙体切向极限应力  $P$ ,其表达式为

$$1/2(P_dL + 1/2\rho gL^2)L = PL \quad (7)$$

将式(2)代入式(7),可得墙体破坏时泥石流的临界流速计算式

$$v = \frac{1}{\sqrt{30}} \sqrt{\frac{20P - 49\rho L^2}{D\rho L}} \quad (8)$$

## 5 建筑物破坏等级划分

砌体结构和框架结构建筑物是七盘沟泥石流灾



害中主要的被破坏对象。为评价两者破坏程度,笔者以野外调查和测量数据为基础,参照 Jakob 等的研究结果<sup>[23-25]</sup>,以半定量方式给出此次泥石流对建筑物破坏等级的划分标准,即微小损坏、轻度损坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 5 级(表 1)。

表 1 七盘沟建筑物破坏等级划分  
Tab. 1 Classification of Building Damaged by  
Debris Flow in Qipangou

破坏等级	破坏描述		破坏尺度	破坏形式
	砌体结构	框架结构		
完全破坏	房屋承重墙体受损比例超过 40%	房屋柱体和梁的破坏比例超过 40%,或超过 25% 的中央支撑柱体破坏	主体结构破坏或功能丧失	冲击
严重破坏	部分承重墙、屋顶垮塌,受损比例超过 20%	部分柱体、梁倒塌或损坏及部分墙体、屋顶倒塌,受损比例超过 20%		
中等破坏	少数承重墙体损坏,部分非承重墙损坏	少数柱体、梁倒塌或损坏,部分墙体倒塌	部分结构性损坏或功能降低	淤埋
轻度损坏	承重墙体完好,部分非承重墙体损坏	柱体和梁完好,部分墙体损坏	无结构性损坏,易修复	淤积或水淹
微小损坏	墙体完好,部分门窗受损	柱、梁和墙完好,部分门窗受损		

6 讨 论

四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的数量略高于 2010 年甘肃舟曲“8·8”泥石流灾害,后者造成约 307 户房屋受损<sup>[24]</sup>,此次泥石流仅冲毁房屋就达 350 户<sup>[21]</sup>,而两次泥石流对建筑物的破坏特征表现出不同特点。

(1)Hu 等将舟曲泥石流对建筑物的危害方式归纳为冲击、侧向淤埋和刮擦 3 种<sup>[14]</sup>,七盘沟泥石流危害主要为冲击和淤埋两种,笔者认为刮擦破坏的原因因为泥石流正面冲击和侧向压力的合力造成,应包含在冲击破坏内。两次泥石流灾害均反映出建筑物结构类型和分布对其破坏方式影响较大,建筑物长轴方向与泥石流流向垂直及凸出部位更易遭受破坏,图 4(a)与图 8 中六层砌体结构建筑均被泥石流切掉约 1/6。

(2)学者虽尚未就舟曲泥石流对建筑物破坏模式做出论述,但根据胡凯衡等的相关报道<sup>[24-25]</sup>,笔者认为除因周围建筑物倒塌导致间接破坏模式外(城关一小的教学楼和家属楼),本文对建筑物的破坏模式划分已基本反映了舟曲泥石流和其他地区泥石流对建筑物的破坏特征。

(3)Hu 等通过总结前人对建筑物破坏的试验



图片由葛永刚摄

图 8 甘肃舟曲泥石流破坏砌体结构建筑物  
Fig. 8 Brick Masonry Building Damaged by Debris  
Flow in Zhouqu of Gansu

结果<sup>[14]</sup>,提出砖混和框架结构建筑物破坏时的临界压力,但未给出计算表达式。本文以静力学极限平衡理论为基础,提出了建筑物主要支撑构件(柱体、墙体)破坏的临界条件计算模型。计算中考虑到此次泥石流龙头多高于建筑物底层,故设定泥石流冲击构件时流深与底层高度一致,而将泥石流流动压力视作均布荷载则未能反映动压力垂向差异,与真实情况存在一定差异。

(4)泥石流沿程破坏的特征有所差异。舟曲三眼峪泥石流冲出沟口后流速骤降形成漫流,此段建筑物破坏并不严重,到达县城时,由于建筑物阻挡导致过流不畅,产生壅高使流速增大,此后连续冲毁途经的建筑物最终进入白龙江<sup>[26]</sup>,其破坏表现为轻度→严重→轻度的过程;而七盘沟泥石流在出沟口后,仍保持较高流速,流体携带巨石摧毁了距沟口约 600 m 的七盘沟 5 组约 120 户建筑物,此后泥石流能量有所降低,流体中大颗粒逐渐减少,沿程冲击破坏原沟道两岸的建筑物,后继续向下游运动并淤埋沟口的阳光家园小区,最后冲入岷江,其破坏表现为从严重到轻度破坏的连续减弱过程。此外,建筑物距离泥石流主流线越近,其破坏越严重(图 3 中 B 区),其原因为主流线受两侧边界阻力影响小,流速相对较快,携带能量较高,且大石块也多分布于主流线上,使其破坏能力较两侧大,导致建筑物破坏程度和损坏比例相对较大。

对建筑物破坏方式和模式的归纳及不同破坏模式的静力学计算,可为城镇建筑物的空间规划提供一定参考。然而欲实现泥石流危险区建筑物合理布局 and 建筑物结构的防灾设计,还需要进一步从动力学角度研究七盘沟泥石流对建筑物的破坏过程,提出可以为规划设计直接服务的泥石流危险区建筑物抗灾设计技术依据。

## 7 结 语

(1) 泥石流快速运动形成的冲击作用是四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的主要方式, 流体中大石块、漂木及生活废弃物在龙头中位置的差异使得建筑物在不同高度均受危害, 其中大石块对房屋底层结构的破坏极大, 测得危险区最大石块体积为  $15\text{ m} \times 8\text{ m} \times 6\text{ m}$ , 其质量超过  $1\ 800\text{ t}$ 。由于泥石流向下游和两侧运动中能量逐渐消耗, 沿程分布的建筑物距泥石流出口和主流线越近, 越易遭受破坏。当建筑物长轴方向与泥石流流向垂直时, 因整体惯性矩小且受冲面积较大, 其更易遭受破坏; 而长轴方向与流向平行且规则分布时, 首个遭遇泥石流的建筑物会严重破坏, 但也起到阻挡泥石流和耗能的作用, 较好地保护了其后的建筑物; 当建筑物分布不规则时, 首个和凸出的建筑物均将遭受冲击破坏。

(2) 以梁和柱为承重构件的建筑物表现出 3 种破坏模式: 非承重墙体破坏导致的非结构性损伤; 柱梁损伤、倒塌导致的结构性破坏, 多因柱体受冲击后产生塑性铰或被剪断, 致建筑物倾斜或倒塌; 上层承重墙体破坏导致的部分结构性损伤(框架-砌体结构)。以砌体为承重构件者表现为承重墙体损伤、倒塌导致的结构性破坏。参照建筑物破坏模式, 考虑泥石流浆体和大石块的共同冲击作用, 以静力学极限平衡理论为基础, 提出了建筑物柱体和墙体破坏的临界条件计算公式。

(3) 七盘沟建筑物的破坏等级可划分为微小损坏、轻度损坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 5 个等级。框架结构柱体和砌体结构墙体的破坏比例和位置决定其损坏程度。当柱体破坏数量超过总数的 40%, 建筑物将失稳倒塌。若破坏柱体为侧面支撑构件, 其比例小于 20% 时, 建筑物部分出现结构性损伤; 如柱体为中央支撑构件, 其破坏比例超过 25% 便倒塌。砌体结构中相邻两面墙体或更多面墙体被泥石流破坏, 建筑物更易失去支撑而倒塌。

(4) 山区地形狭窄, 缺乏适宜建设的平坦土地, 具有较大流域面积的泥石流沟, 一般会在下游和堆积扇形成较为开阔的地形, 这里往往成为山区居民点和经济开发用地。在植被较好的地区, 较大流域面积的泥石流沟由于有地形和植被调节地表水-土耦合动力过程, 泥石流暴发频度较低, 从而增加了灾害的隐蔽性, 使得许多居民点依旧建于危险区内, 有时甚至忽略了应有的防灾工程。应吸取七盘沟特大泥石流灾害的教训, 注重对流域面积较大的低频泥石流风险的防范。

## 参考文献:

## References:

- [1] CUI P, CHEN X Q, ZHU Y Y, et al. The Wenchuan Earthquake(May 12, 2008), Sichuan Province, China, and Resulting Geohazards[J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(1): 19-36.
- [2] 崔 鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(2): 145-152.  
CUI Peng. Progress and Prospects in Research on Mountain Hazards in China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152.
- [3] 谢 洪, 刘维明, 赵晋恒, 等. 四川石棉 2012 年“7·14”唐家沟泥石流特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2013, 35(4): 90-97.  
XIE Hong, LIU Wei-ming, ZHAO Jin-heng, et al. Characteristics of Tangjiagou Debris Flow in Shimian of Sichuan in July 14, 2012[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(4): 90-97.
- [4] 许 强, 张一凡, 陈 伟. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法——以四川省丹巴县城为例[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 729-738.  
XU Qiang, ZHANG Yi-fan, CHEN Wei. Vulnerability Assessment of Geo-hazards in Southwest Mountainous Area—Danba County, Sichuan, China as an Example[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5): 729-738.
- [5] MILETI D S, BOLTON P A, FERNANDEZ G, et al. The Eruption of Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia, South America, November 13, 1985[M]. Washington DC: National Academies Press, 1991.
- [6] TOYOS G, OPPENHEIMER C, PARESCHI M T, et al. Building Damage by Debris Flows in the Sarno Area, Southern Italy[C]// RICKENMANN D, CHEN C L. Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2003: 1209-1220.
- [7] FUCHS S, HEISS K, HUBL J. Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(5): 495-506.
- [8] AKBAS S O, BLAHUT J, STERLACCHINI S. Critical Assessment of Existing Physical Vulnerability Estimation Approaches for Debris Flows[C]// MALET J, REMAITRE A, BOGAARD T, et al. Proceedings of Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling. Strasbourg: EOST, 2009: 229-233.
- [9] TOTSCHNIG R, SEDLACEK W, FUCHS S. A Qu-



- antitative Vulnerability Function for Fluvial Sediment Transport[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(2): 681-703.
- [10] LO W C, TSAO T C, HSU C H. Building Vulnerability to Debris Flows in Taiwan: A Preliminary Study[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(3): 2107-2128.
- [11] PAPATHOMA-KOHLE M, KEILER M, TOTSCHNIG R, et al. Improvement of Vulnerability Curves Using Data from Extreme Events: Debris Flow Event in South Tyrol[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(3): 2083-2105.
- [12] ZANCHETTA G, SULPIZIO R, PARESCHI M T, et al. Characteristics of May 5-6, 1998 Volcaniclastic Debris Flows in the Sarno Area (Campania, Southern Italy): Relationships to Structural Damage and Hazard Zonation[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 133(1/2/3/4): 377-393.
- [13] SPENCE R J S, BAXTER P J, ZUCCARO G. Building Vulnerability and Human Casualty Estimation for a Pyroclastic Flow: A Model and Its Application to Vesuvius[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 133(1/2/3/4): 321-343.
- [14] HU K H, CUI P, ZHANG J Q. Characteristics of Damage to Buildings by Debris Flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(7): 2209-2217.
- [15] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Experimental Analysis of the Impact of Dry Avalanches on Structures and Implication for Debris Flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(4): 522-534.
- [16] ZHANG Y, WEI F Q, WANG Q. 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.
- [17] KIYONO J J, SPENCE R J S, NAKASHIMA T. Dynamic Behavior of Masonry Structures Under Pyroclastic Flows[J]. *Journal of Natural Disaster Science*, 2006, 28(2): 73-83.
- [18] 曾超, 贺拿, 宋国虎. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法分析与评价[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1211-1220.
- ZENG Chao, HE Na, SONG Guo-Hu. Analysis and Assessment of Methods to Assess Vulnerability of Building in Debris Flow Hazard[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1211-1220.
- [19] 许忠信. 四川省汶川县七盘沟泥石流治理[J]. *山地研究*, 1985, 3(3): 166-172.
- XU Zhong-xin. The Prevention and Control of Debris Flow of Qipan Gully in Wenchuan County, Sichuan Province[J]. *Mountain Research*, 1985, 3(3): 166-172.
- [20] 何光碧, 屠妮妮, 张平, 等. “5·12”汶川特大地震重灾区降水气候特征分析[J]. *高原山地气象研究*, 2008, 28(2): 47-54.
- HE Guang-bi, TU Ni-ni, ZHANG Ping, et al. Characteristic Analysis of Precipitation in Severe Earthquake Disaster Area on May 12th in Sichuan Province[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2008, 28(2): 47-54.
- [21] 中新网. 直击四川汶川威州镇七盘沟泥石流[EB/OL]. (2013-07-11) [2013-09-10]. <http://www.chinanews.com/tp/hd2011/2013/07-11/223517.shtml>. Chinanews. Showing Qipangou Debris Flow in Weizhou Town of Wenchuan, Sichuan[EB/OL]. (2013-07-11) [2013-09-10]. <http://www.chinanews.com/tp/hd2011/2013/07-11/223517.shtml>.
- [22] MIZUYAMA T. Computational Method and Some Considerations on Impulsive Force of Debris Flow Acting on Sabo Dams[J]. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 1979, 11(2): 40-43.
- [23] JAKOB M, STEIN D, ULM M. Vulnerability of Buildings to Debris Flow Impact[J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 241-261.
- [24] 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.
- HU Kai-heng, GE Yong-gang, 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.
- [25] 胡凯衡, 崔鹏, 葛永刚. 舟曲“8·8”特大泥石流对建筑物的破坏方式[J]. *山地学报*, 2012, 30(4): 484-490.
- HU Kai-heng, CUI Peng, GE Yong-gang. Building Destruction Patterns by August 8, 2010 Debris Flow in Zhouqu, Western China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(4): 484-490.
- [26] 黎志恒, 朱立峰, 胡向德, 等. 三眼峪特大泥石流沟流域分区特征[J]. *西北地质*, 2011, 44(3): 38-43.
- LI Zhi-heng, ZHU Li-feng, HU Xiang-de, et al. Basin Zoning Characteristics of Sanyanyu Extremely Big Debris Flow Gully[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(3): 38-43.