

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.200201103001

泥石流作用下夯土建筑灾变响应特征研究*

李 聪^{1,2}, 邹 强¹, 蒋 虎^{1,3}, 周 斌¹, 谭 庄⁴

(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. 中国科学院大学, 北京 100000; 3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 4. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 探究泥石流对夯土房屋的破坏模式及其动力致灾特征, 有利于推进研究山区房屋承灾体对泥石流的灾变机制, 对提高灾害风险管理水平、指导山区防灾减灾工作具有重要意义。通过实地调研凉山喜德县基恩德沟火后泥石流, 总结了泥石流对夯土房屋的破坏模式, 分析了泥石流动力学特征, 根据现场受损房屋实测数据进行三维建模, 利用有限元分析方法, 获取了夯土建筑的位移时程响应和应力时程响应, 反演了夯土建筑承灾破坏过程, 探讨了泥石流作用下夯土建筑灾变响应特征。结果表明: (1) 泥石流对夯土房屋的破坏模式表现为: 通过墙体干缩裂缝渗入室内淤埋房屋; 冲刷墙体基础导致墙体倒塌; 携带大石块冲毁建筑; (2) 墙体受泥石流冲击破坏表现为冲击点压碎破坏、墙体内侧受拉破坏和墙角剪切破坏; 纵墙损伤为泥石流冲毁山墙后进入室内沿门洞冲出时导致的第二次破坏; (3) 夯土房屋整体性较差, 裂缝的发展切断了应力的传递路径, 有效保护了其他墙体; (4) 夯土房屋在泥石流作用下率先破坏的区域为大石块撞击点、墙基和墙角等形状突变位置。为此, 夯土房屋防护, 可首先考虑加固墙基和墙体转角等应力突变位置。

关键词: 泥石流; 夯土建筑; 灾变响应; 破坏模式; 有限元模型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0042-09

Disaster Response Characteristics of Rammed Earth Buildings to Debris Flow

LI Cong^{1,2}, ZOU Qiang¹, JIANG Hu^{1,3}, ZHOU Bin¹, TAN Zhuang⁴

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China; 3. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: It is of great significance for improving disaster risk management and guiding disaster prevention work to study the failure modes and dynamic response characteristics of rammed earth buildings subject to debris flow disasters in mountainous areas. Based on the field investigation of the Liangshan Jiendian debris flow incident, the paper summarized the failure modes of rammed-earth houses under the impact of the debris flow. By establishing an equal-scale rammed earth building model, the paper used the finite element method to obtain the displacement time history response and stress time history response of the structure and simulate the process of debris flow destroying the building. The

* 收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41790432)、四川省应用基础研究项目(2019YJ0006)、中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA23090303)资助

作者简介: 李聪(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事泥石流方面的研究。E-mail: 1176048272@qq.com

results show: ① The damage modes of rammed earth houses subject to debris flow are erosion, siltation and impact. Debris flow infiltrates into the room through the shrinkage cracks of the wall, causing the house to be buried, scours the foundation of the wall resulting in the collapse of the wall, and washing away the wall by carrying rocks. ② The impact failure of the wall by debris flow is characterized by crushing failure at the impact point, tensile failure at the inner side of the wall and shear failure at the corner of the wall; the damage of the longitudinal wall is the second failure caused by the debris flow when it destroyed the gable wall, rushed into the room and broke the doorway. ③ Moreover, the integrity of rammed earth buildings is poor, and the cracks cut off the propagation path of stress, which effectively protects other walls. ④ Under the impact of debris flow, the first damaged area of the rammed earth house is the wall base, corner and impact point of big stones. Therefore, to protect rammed earth buildings, the stress mutation positions such as wall foundation and corner should be reinforced first.

Keywords: debris flow; rammed earth building; disaster response; failure mode; finite element model

引言

2020年5月7日,凉山州喜德县鲁基乡中坝村与冕宁县泸沽镇大坪村交界处木的日格日山发生森林火灾,过火面积达102.7 hm²。6月4日,受强降雨激发,位于中坝村的基恩德沟暴发泥石流,堆积区的6间房屋遭到不同程度的损坏,共有164名村民被转移到临时避难所。通过现场调查取样,该泥石流符合火后泥石流特征,具有沟道下切侧蚀严重、堆积物富含木屑灰烬等特征。

鉴于泥石流对建筑物的破坏为泥石流灾害中主要的损害方式^[1],众多国内外学者开展了泥石流对建筑物的冲击过程研究。张宇等^[2]率先在国内开展了铁球撞击砖混墙体的模型实验,通过钢板分散铁球的撞击来模拟泥石流冲击墙体过程。C. Zeng等^[3]通过静力学分析,选取山区三种常用不同强度的钢混柱体进行破坏分析,分别推导了框架结构柱体塑性铰破坏模式和剪切破坏模式。雷雨等^[4]提出砌体结构房屋承重墙构的破坏模式,以墙体弯曲应力破坏准则为基础,结合泥石流冲击力与流速流深的定量关系,建立临界流速流深的破坏曲线。H. Soleimankhani等^[5]依据水动力学经验公式计算泥石流冲击力,对砖混建筑进行建模分析并将模拟结果与现场调查结果进行比较,以反演意大利 Scaletta Zanclea 泥石流事件对砖混建筑破坏过程。X.S. Cheng等^[6]采用有限元分析方法,探究了在不同流速、流宽的泥石流作用下对不同高度和长宽比的砌体房屋的流固耦合动力特征。Z. Lu等^[7]

以铁球撞击框架柱模拟泥石流冲击过程,通过记录结构应变、位移和加速度来分析普通框架与泡沫铝加固框架在不同冲击能量下的破坏效应。但以上研究多针对泥石流对砌体结构或框架结构的冲击机理研究,很少针对上世纪八九十年代建造的夯土房屋,而在泥石流频发的山区,生土房屋以其造价低廉、就地取材的特点,仍为山区主要建筑。

以2020年6月4日四川喜德基恩德沟火后泥石流对夯土房屋破坏的调查数据为基础,归纳了此次泥石流对夯土房屋的破坏方式,并通过有限元方法对现场夯土房屋建模,分析了墙体破坏原因和倒塌过程,在一定程度上对防灾工程的设计起指导作用。

1 夯土房破坏形式

通过实地调查与测量,获取基恩德沟夯土房屋及夯土篱笆损坏样本共8处(图1)。其中堆积区6处房屋受淤埋和冲刷作用明显,1处房屋完全破坏。研究区房屋多建于2000~2005年,为典型南方夯土建筑,建筑基础为毛石基础,墙体采用当地黏土伴有细碎石子夯砌而成。

泥石流破坏建筑物是物质和能量转移的过程^[8],破坏方式主要表现为淤埋破坏、冲刷破坏和冲击破坏。当建筑物抵抗能力低于泥石流冲击动能,建筑物结构破坏,同时泥石流部分冲击动能转化为建筑破坏时的变形能。当建筑物抵抗能力高于泥石流冲击动能时,泥石流不足以破坏建筑,常冲破

房屋孔洞淤埋房屋或是冲刷墙体减少房屋耐久性。

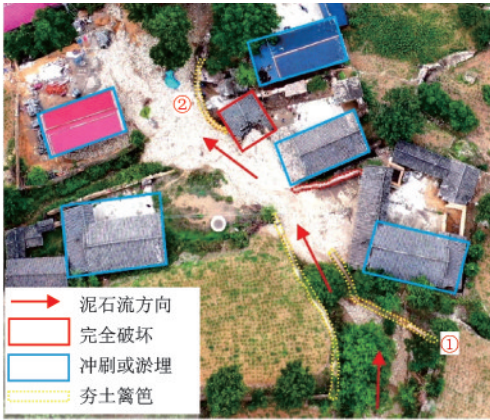


图1 基恩德沟建筑物分布

Fig.1 Distribution map of the buildings in Jiende Valley

1.1 淤埋破坏

由于墙体夯砌过程不易控制伴制土料的含水率常导致墙体过湿,土墙受高温作用,水分蒸发导致墙体体积收缩,内部应力释放^[9]。墙体表面干燥收缩速度明显快于内部,致使应力内外不一致产生干缩裂缝。部分夯土建筑抗冲击能力较强,外墙未被泥石流冲击破坏,冲积物被墙体阻挡堆积成两米高的堆积物,泥石流浆体通过墙体裂缝或是屋顶空隙渗入墙内,淤埋房屋造成建筑功能丧失(图2)。

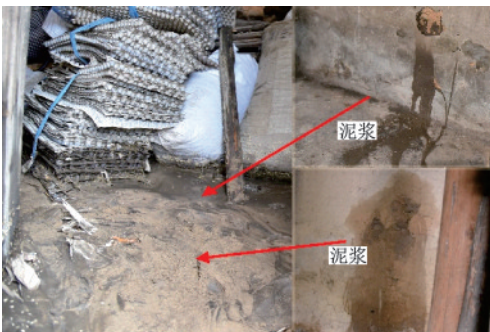


图2 泥石流通过墙体孔洞渗入室内

Fig.2 Debris flow seeps into the room through holes

1.2 冲刷破坏

夯土墙体由土壤黏粒作为胶结材料,生土浆体与骨料黏结力远小于混凝土黏结力,因此墙体

平行于泥石流流动方向时,墙体受冲刷剥蚀强烈,内部骨料裸露于表面。由于泥石流对墙基的剥蚀作用大于上部墙体,残余墙基受重力作用偏心受压,致使墙体拉伸破坏直至倒塌,如图3所示。



图3 冲刷倒塌的墙体

Fig.3 Erosion of the wall that caused the collapse

1.3 冲击破坏

冲击破坏是泥石流对建筑物造成的最主要的破坏形式。夯土房屋山墙受泥石流冲击作用沿墙体转角处发生倒塌,泥石流冲入室内,并冲毁房门沿门洞流出。除直接撞击山墙倒塌外,其他墙体虽伴有裂缝产生,但并未整体倒塌。上部房梁由于失去一侧山墙支撑致使向下坍塌,坍塌部位次梁于纵墙处被折断(图4(a))。纵墙门洞开口处为建筑薄弱位置,泥石流沿门洞流出过程中,冲毁门口部分墙体。由于横梁贯穿于墙体破坏了墙体的整体性,易在此位置产生破坏,当泥石流作用较小时,裂缝沿横梁位置发展轻微并产生细小裂缝,当冲击作用较大时,裂缝沿横梁位置发散贯穿于墙体形成沟壑,如图4(b)所示。

当地夯土篱笆施工工艺和建筑材料与房屋墙体一致,因此篱笆墙的破坏模式对房屋墙体研究具有借鉴意义。图1沟口处①号篱笆垂直于沟口,受泥石流冲击作用强烈,约3.5 m墙体被冲毁,但篱笆墙后房屋除轻微冲刷外无结构破坏,说明篱笆墙体消除了泥石流冲击能量,有效保护了房屋(图4(c))。泥石流堆积区篱笆平行于泥石流冲击方向,泥石流石块堆积于篱笆墙外侧,墙体受侧向压力作用变形明显,但由于篱笆墙体转角搭接于建筑墙体,使得篱笆未在堆积物作用下发生倒塌,如图4(d)所示。

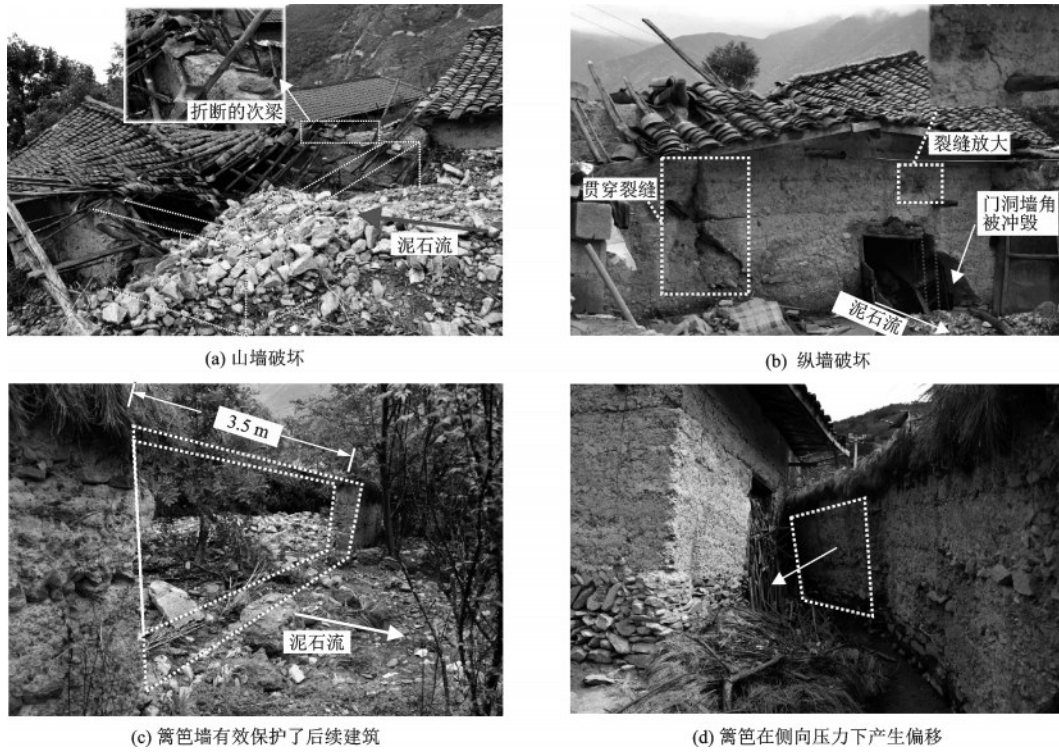


图4 夯土结构受泥石流冲击破坏

Fig.4 Damage of the rammed earth structure by debris flow

2 泥石流冲击模拟

2.1 泥石流冲击荷载计算

通过实地调查发现,冲击破坏是泥石流对建筑物破坏中最主要的破坏方式,为探明破坏机理,采用有限元方法分析夯土建筑动力响应。泥石流冲击荷载为泥石流冲击夯土房屋模拟的外部荷载,通过泥浆冲击力计算和大石块接触模拟进行叠加。泥浆冲击荷载依据水动力学计算视为均布荷载,大石块冲击依据有限元接触分析进行模拟。

2.1.1 泥浆冲击力

由于泥浆静水压力很小,因此可忽略泥浆静水压力采用动水压力公式(1)计算泥浆冲击力。为简化泥石流冲击力计算,基于如下假设:

(1)泥石流为连续不可压缩流体,流速在水平和垂直方向无变化,且流体密度在空间和时间上均匀分布,泥浆冲击力作用于墙体为均布荷载。

(2)泥浆对墙体冲击方向垂直于墙体,并以现场泥痕2 m高计算。

鉴于动水压力计算公式(1)中经验系数 α 的确定具有主观性,P.Cui等^[10]对水动力计算公式做出了改

进公式,引入浆体弗劳德数 Fr 计算经验系数 α ,并通过多组数据拟合获取泥浆水动力计算公式(2):

$$P = \alpha \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

$$P = 5.3 \cdot Fr^{-1.5} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

式中, P 为泥石流流动压力(Pa); ρ 为泥石流密度(kg/m^3); v 为流速(m/s); α 为经验系数反应不同泥石流沟的差异性; Fr 为浆体弗劳德数,以公式(3)计算:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

综合公式(2)、(3),为计算泥浆冲击力需计算参数泥石流流速和密度。依据《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[11]中西南山区泥石流流速计算公式(4),计算黏性泥石流流速:

$$v_c = 1/n_c \cdot H_c^{2/3} \cdot I_c^{1/2} \quad (4)$$

式中, H_c 为流深(m),由现场泥痕判断 $H_c=2\text{ m}$; n_c 为沟道糙率,由 $2.0\text{ m} \leq H_c < 4.0\text{ m}$ 取 n_c 为0.1; I_c 为沟道比降,现场实测为0.31。

将计算参数代入上式,可得泥石流流速为8.8 m/s(表1)。

泥石流密度依据泥石流容重公式(5)^[12]计算:

$$\gamma = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55 \quad (5)$$

式中, x 为泥石流沉积物中黏土含量的百分比,依据

表 1 泥石流流速计算

Table 1 Calculation of velocity of debris flow

H_c/m	n_c	I_c	$v_c/(m \cdot s^{-1})$
2.0	0.1	0.31	8.8

颗分实验测得黏土含量百分比为 1.79%，如图 5 所示。计算得泥石流密度为 $1.75 t/m^3$ ，依据《中国泥石流》^[13]判定该泥石流属黏性泥石流。

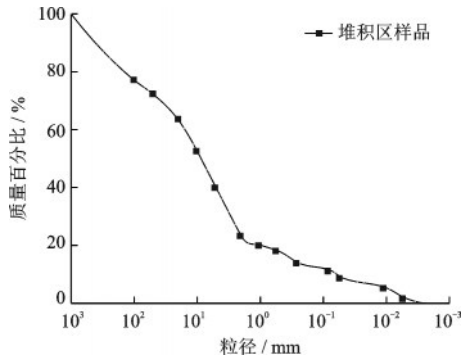


图 5 泥石流堆积物的粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of debris flow deposits

将泥石流流速、密度代入式(2)，可得泥浆冲击力为 255.9 kPa(表 2)。

表 2 泥浆冲击力计算

Table 2 Calculation of slurry impact force

$\rho/(t \cdot m^{-3})$	$v_c/(m \cdot s^{-1})$	Fr	P/kPa
1.75	8.8	1.99	255.9

2.1.2 大石块冲击力

现有计算泥石流大石块冲击力的方法大多基于弹性球体碰撞理论(Hertz 接触理论)推导获得^[14-17]，再通过野外观测和室内实验对数据进行修正，但有些方法忽略了冲击时间对建筑的影响。现有有限元软件具有强大的接触分析能力，能很好地计算随时间变化的接触—撞击问题。本文依据现场调查的大石块尺寸建立模型(图 6)，输入石块初始速度和岩石—结构的接触类型，模拟岩石撞击结构的过程。

石块的冲击位置会对墙体的内力变化产生重要影响。通过野外观测，费祥俊等^[18]发现稀性泥石流石块常在水底移动，而在黏性泥石流中石块常悬浮于泥浆中。对于蒋家沟黏性泥石流，石块常悬浮于泥浆中间或表面^[19]。杨红娟等^[20]提出，颗粒撞击频率最高的地方可能是泥石流最大深度的 1/5 到 3/5 处。H.P.Huang 等^[15]认为在稀性泥石流中，石块最大

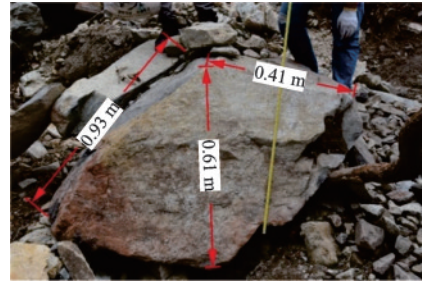


图 6 现场大石块

Fig.6 Large rocks at the site

冲击力常出现在最大泥深的 1/3 处。D.Proske 等^[21]建议：泥石流最大冲击力出现在泥石流深度的 1/5 到 1/3 处。Ch.Zeng 等^[3]认为对于稀性泥石流，石块冲击力可取泥石流流深的 1/5 到 1/3 处，对于黏性泥石流，石块集中于泥石流流深的 1/2 到 3/5 处。

综合上述研究结果，本研究认为：大石块速度和泥石流速度一致。依据泥浆密度确定现场泥石流为黏性泥石流，取最大泥深的 2/5 作为冲击位置。

2.2 建筑模型构建

2.2.1 土坯建筑模型

本文选用的计算模型参数为基恩德沟夯土房屋实测数据，山墙长 4.6 m，高 3.8 m，纵墙长 7.4 m，高 2.5 m，墙厚均为 40 cm，横梁直径为 10 cm。为简化计算，忽略大石块形状对撞击的影响，并通过等体积换算，将现场石块换算为半径为 0.5 m 的球体。忽略屋顶冷摊瓦自重，墙体与基础连接为固定支座，并将墙体作为连续体考虑。综合泥浆冲击作用和大石块撞击位置获得外部荷载示意图(图 7)，并

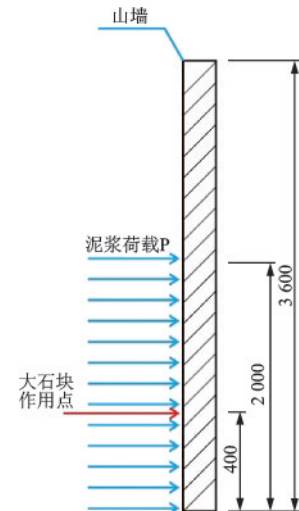


图 7 荷载示意

Fig.7 Load diagram

综合外部荷载和实测数据建立三维模型,并对墙体和节点编号(图8)。

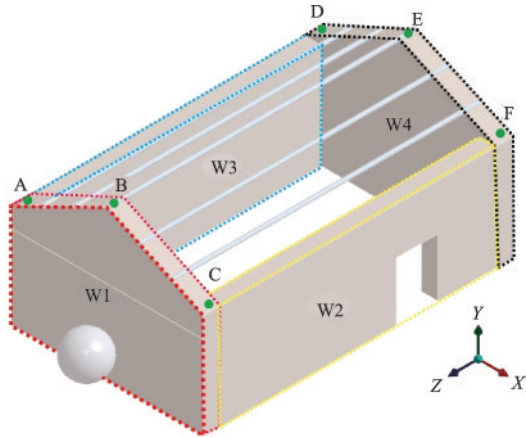


图8有限元模型及其编号
Fig.8 Finite element model

2.2.2 材料模型

夯土材料与混凝土材料类似,具有脆性破坏的特点,由于夯土在弹性状态结束后产生小变形后发生破坏^[22](图9),因此本文对塑性变形这一小变形阶段进行忽略,采用弹性极限等效为夯土材料破坏极限状态。假设墙体材料为均匀、连续和各向同性。依据该地区夯土墙的立方体实验和棱柱体试验获取了试件的抗压强度、弹性模量和泊松比,其基本参数见表3^[23-24]。横梁采用TC11木材参数,见表4。大石块属于流纹岩,密度取 3 g/cm^3 。

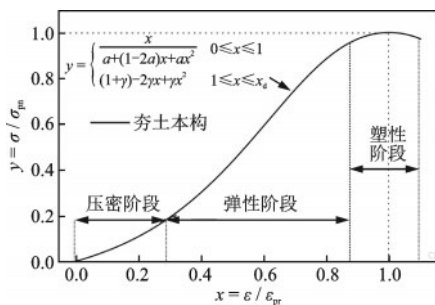


图9 夯土材料本构

Fig.9 Constitutive relationship for the earth material

表3 夯土墙体材料基本参数

Table 3 Basic parameters of rammed earth wall materials

参数	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	极限应变
取值	276	0.341	2.074×10^3	0.05

表4 木材TC11基本参数

Table 4 Basic parameters of wood TC11

参数	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
取值	9 000	0.3	5.0×10^2

3 夯土结构动力响应分析

对模型采用四面体单元划分网格,使用针对接触问题的非线性有限元方法,获得米泽斯应力分布和结构位移时程曲线。

3.1 应力时程响应

石块与墙体在5 ms时发生碰撞,接触位置被压碎,撞击山墙(W1)内外均产生最大应力,并自撞击点呈圆形向四周扩散,接触位置下方墙基产生较小应力并向两侧扩散(图10(a))。随着应力扩散至整个山墙,梁与墙体接触位置开始出现滑移,墙基由于应力集中受剪切破坏出现裂缝,并沿两侧发展(图10(b))。在大石块冲击作用下,被撞山墙内侧受拉破坏,裂缝发展明显快于墙外,而山墙受纵墙(W1,W2)支撑作用,使得墙角受集中荷载产生剪切破坏,因此山墙墙体破坏为冲击点压碎破坏、墙体内侧受拉破坏和墙角与墙基剪切破坏共同作用的结果。

当冲击点应力波传递至整个山墙时,应力开始向其他构件传递,一方面通过房梁向山墙(W4)传递,一方面通过墙体转角向纵墙(W2,W3)传递(图10(b))。而墙基受应力集中作用,在撞击作用下率先产生轻微裂缝,但出现裂缝位置又会产生应力集中,使得裂缝发展加剧。此后墙基裂缝快速发展至墙角,并沿着墙角向上发展,这是因为墙角处应力集中使得应力远大于其他位置。随着墙角裂缝的发展,应力的传播路径被切断,因此纵墙应力随裂缝产生呈骤减趋势(图10(c))。而当裂缝完全贯穿时,山墙脱落于建筑主体,其他墙体不再受大石块冲击作用,因此应力逐渐减少至0(图10(d))。房屋在撞击过程中,纵墙最大应力出现在墙体转角位置,但其他部位应力远小于极限强度,这与现场纵墙(W3)和山墙(W4)无明显破坏一致,但现场纵墙(W2)门洞处局部损坏,墙体有裂缝生成,可以推测开洞纵墙的破坏为泥石流冲毁山墙后进入室内,沿门洞冲出的过程中对纵墙造成损坏。

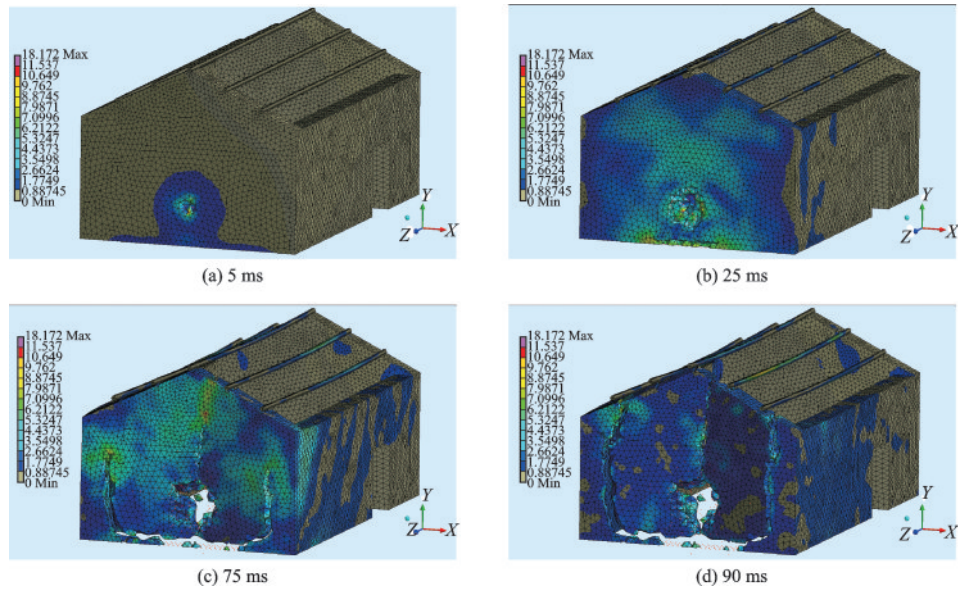


图10 等效应力分布

Fig.10 Equivalent stress distribution

3.2 位移时程响应

选取6个关键节点分析结构整体位移:山墙 W1 屋顶两个角点和中间点,山墙 W4 两个角点和中间点,具体节点编号如图8所示。关键点位移时程如图11所示。总位移为 X, Y, Z 方向位移的矢量和,

其结果不考虑方向故值恒为正。

由图11可得 A、B、C 点总位移远大于 E、F、G 点位移,说明泥石流在对墙体(W1)的破坏作用远大于对纵墙(W2,W3)和山墙(W4)。A 点和 C 点总位移与 X 轴方向基本一致,而 B 点位移主要集中于负 Z 方向,说明由于泥石流冲击作用使得山墙撞击

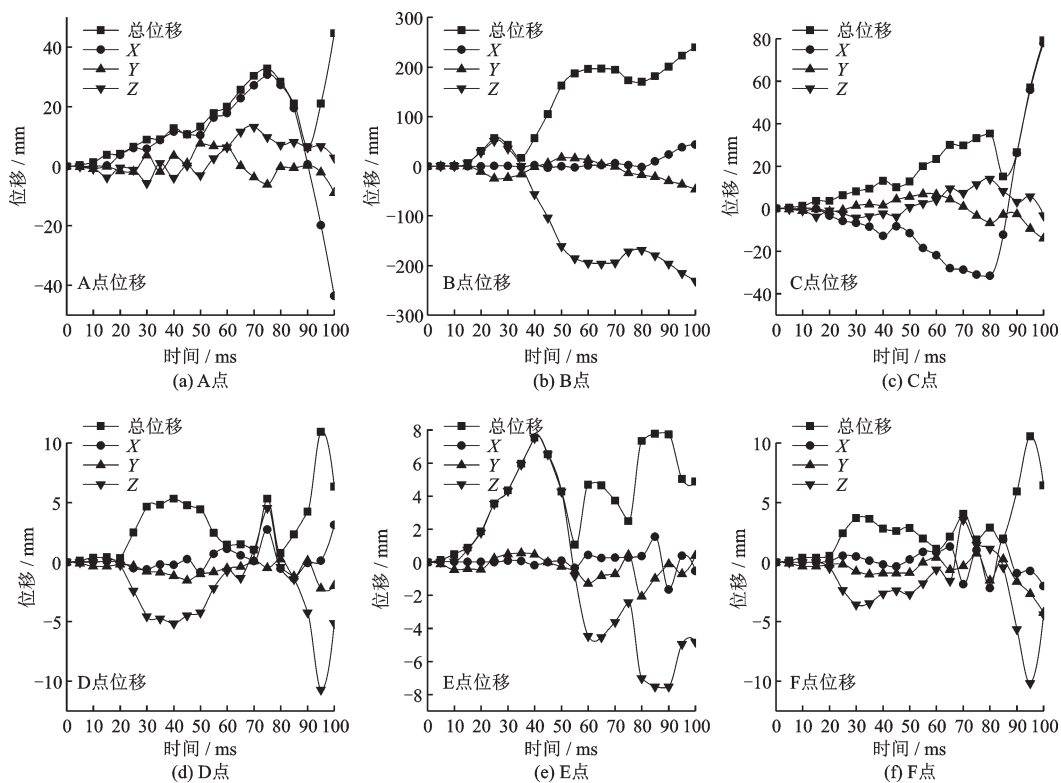


图11 关键点位移时程

Fig.11 Time-history curves of typical node displacements

点向内凹陷,两侧纵墙受山墙拉伸作用朝内变形产生X方向位移,而在 $t=80\text{ ms}$ 时,由于裂缝贯穿整个墙体,拉伸作用消失致使纵墙转角位移回弹,因此A、C点位移反向增加。而B点由于墙体与结构在80 ms时分离,墙体失去结构约束向室内坍塌,使得Z向位移继续增加。从结构位移时程响应可以看出,夯土房屋整体性较差,泥石流对山墙的作用只有很少部分传递至其他墙体。

4 结 论

本文总结了夯土房屋受泥石流破坏的主要形式,建立了灾点夯土房屋三维有限元模型,通过有限元方法分析结构应力响应和位移时程响应反演房屋的破坏过程,主要结论如下:

(1)泥石流破坏夯土房屋主要有:淤埋、冲刷和冲击破坏。与其他结构相比,夯土房屋强度低,受冲击作用更为明显;墙体多裂缝,泥石流易通过裂缝渗入室内淤埋房屋;墙体黏结力较低,受泥石流冲刷强烈易导致结构破坏。

(2)山墙破坏为冲击点处压碎破坏、墙体内侧受拉破坏和墙角剪切破坏的结果,纵墙损伤为泥石流冲毁山墙后进入室内沿门洞冲出时导致的第二次破坏。

(3)夯土房屋在泥石流冲击下整体性较差,冲击侧山墙位移远大于其他墙体,裂缝的发展切断了应力的传递路径,有效保护了其他墙体。

(4)夯土房屋在泥石流作用下率先破坏的区域为大石块撞击点、墙基和墙角等形状突变位置。对于夯土房屋的防护工作,可围绕加固墙基和墙体转角等应力集中位置开展。

参考文献:

- [1] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等.汶川震区桃关沟2013-07-10泥石流成灾机理[J].西南交通大学学报,2015,50(2):286-293.
Hu X W, Han M, Liang J X, et al. Hazard mechanism analysis of taoguan giant debris flow in wenchuan earthquake area on july 10th, 2013[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 286-293. (in Chinese)
- [2] 张宇,韦方强,贾松伟,等.砖砌体建筑在泥石流冲击力作用下动态响应实验[J].山地学报,2006,24(3):340-345.
- [3] Zhang Y, Wei F Q, Jia S W, et al. Experimental research of unreinforced masonry wall under dynamic impact of debris flow [J]. Journal of Mountain Science, 2006,24(3): 340-345.(in Chinese)
- [4] Zeng Ch, Cui P, Su Z, et al. Failure modes of reinforced concrete columns of buildings under debris flow impact[J]. Landslides, 2014, 12: 561-571.
- [5] 雷雨,崔鹏,蒋先刚.泥石流作用下砌体房屋破坏机理与结构优化[J].工程科学与技术,2016,48(4):61-69.
Lei Y, Cui P, Jiang X G. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact[J]. Advanced Engineering Sciences, 2016, 48(4): 61-69.(in Chinese)
- [6] Soleimankhani H, Carozza S, Aronica G T, et al. Analytic back calculation of debris flow damage incurred to a masonry building: the case of Scaletta Zanclea 2009 event[C]//E3S Web of Conferences. Lyon: European Conference on Flood Risk Management, 2016, 7: 04007.
- [7] Cheng X S, Wang J L, Ren Y. Fluid-solid interaction dynamic response of masonry structures under debris flow action[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17(9): 841-859.
- [8] Lu Z, Rong K J, Zhou Z G, et al. Experimental study on performance of frame structure strengthened with foamed aluminum under debris flow impact[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(2): 120-132.
- [9] 曾超,崔鹏,葛永刚,等.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[J].地球科学与环境学报,2014,36(2):81-91.
Zeng C, Cui P, Ge Y G, et al. Characteristics and mechanism of buildings damaged by debris flows on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 81-91.(in Chinese)
- [10] 周健.现代夯土建筑构造关键技术案例研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
Zhou J. Case study on the crucial construction of modern rammed-earth architecture [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.(in Chinese)
- [11] Cui P, Zeng Ch, Lei Y. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(12): 1644-1655.
- [12] 泥石流灾害防治工程勘察规范:T/CAGHP 006—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

- [12] Chen N, Cui P, Liu Z, et al. Calculation of the debris flow concentration based on clay content[J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2003, (Sup1): 163-174.
- [13] 唐邦兴,周必凡,吴积善. 中国泥石流研究[M]. 北京: 商务印书馆,2000.
Tang B X, Zhou B F, Wu J S. Study on debris flow in china[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000. (in Chinese)
- [14] Yamaguchi I. Erosion Control Engineering [M]. Tokyo: Japan Society of Erosion Control Engineering, 1985.
- [15] Huang H P, Yang K C, Lai S W. Impact force of debris flow on filter dam [M]. Vienna: European Geosciences Union, 2007.
- [16] Hungr O, Morgan G C, Kellerhals R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21 (4): 663-677.
- [17] 何思明,李新坡,吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(8): 1664-1669.
He S M, Li X P, Wu Y. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (8) : 1664-1669. (in Chinese)
- [18] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社,2004.
Fei F X, Shu A P. Movement mechanism and disaster control for debris flow[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.(in Chinese)
- [19] Hu K, Wei F, Li Y. Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Jiangjia Ravine, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(9): 1268-1278.
- [20] 杨红娟,韦方强,胡凯衡,等. 利用冲击力信号判断泥石流颗粒垂向分选的试验研究[J]. 灾害学,2011,26 (4):29-34.
Yang H J, Wei F Q, Hu K H, et al. Experimental study on vertical sorting of particles in debris flow with impact signals [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 29-34.(in Chinese)
- [21] Proske D, Suda J, Hübl J. Debris flow impact estimation for breakers[J]. Georisk, 2011, 5: 143-155.
- [22] 仲继清. 生土基材料和生土砖砌体单轴受压本构关系研究及应用[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Zhong J Q. Study and application on constitutive relationship for earth material and mechanical compressed earth brick masonry [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.(in Chinese)
- [23] 孟耀杰. 现代夯土结构民居振动台试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2014.
Meng Y J. Experimental study on shaking table test of the modern rammed earth dwellings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [24] 杨华. 灾后重建背景下夯土墙结构民居抗震试验研究与示范[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2010.
Yang H. Seismic test of rammed earth wall and reconstruction of demonstrate residence after Panzhuhua earthquake [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.(in Chinese)

(本文责编:池营营)