

引用格式:刘欢,樊晓一,夏贵平,姜元俊,宋嘉麒,邓鑫. 积石山地震触发中川乡液化滑坡—泥流及建筑损毁特征[J]. 山地学报, 2024, 42(4): 546-556.

LIU Huan, FAN Xiaoyi, XIA Guiping, JIANG Yuanjun, SONG Jiaqi, DENG Xin. Liquefaction flowslide and damage characteristics of buildings in Zhongchuan Town triggered by the Jishishan earthquake [J]. Mountain Research, 2024, 42(4): 546-556.

积石山地震触发中川乡液化滑坡—泥流及建筑损毁特征

刘欢^{1a,1b,2},樊晓一^{1b,1c*},夏贵平^{1b},姜元俊³,宋嘉麒^{1b},邓鑫^{1b}

(1. 西南石油大学 a. 机电工程学院; b. 土木工程与测绘学院; c. 工程安全评估与防护研究院, 成都 610500;

2. 雅安市名山区住房和城乡建设局, 四川 雅安 625100; 3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299)

摘要: 2023年12月18日23时59分, 甘肃省临夏州积石山县发生 $M_s6.2$ 级地震。地震在邻近的民和县中川乡草滩、金田村诱发滑坡—泥流链式灾害, 导致20人死亡、19条道路被阻断、65栋居民房屋被冲毁掩埋。本研究采用无人机摄影测量、野外实地调查访问、现场采样分析测试等研究方法, 探讨地震滑坡—泥流的基本特征和成因机理; 通过对65份建筑物破坏样本的分析, 研究泥流对建筑物的破坏特征和破坏方式。结果表明: (1) 该同震地质灾害具有完整的“地震—液化—滑坡—泥流”链式灾害过程, 链式末端沟谷型黏性泥流的物源主要为滑源区液化层砂质黄土。(2) 地震诱发的地下饱和黄土层液化是滑坡—泥流发生的主要原因, 强地震动、饱和黄土层和沟谷地形是发生的主要条件; 填沟造地、农田灌溉、低温冻结导致底部地下水位抬升和下部土体饱和, 增加了黄土层液化的可能性。震后, 静态液化型滑坡可能持续发生, 导致滑坡—泥流面积不断增大。(3) 泥流对房屋的动力作用主要表现为冲击和淤埋, 并以淤埋作用为主。房屋距泥流主流线越近, 其破坏越严重。该区域新建房屋应选择自震周期短、结构整体性好的砖混或框架结构。研究结果可为类似地震次生链式地质灾害的形成机理和防控提供参考。

关键词: 地震滑坡—泥流; 建筑损伤; 饱和黄土; 冲击; 淤埋

中图分类号: P642; TU43

文献标志码: A

2023年12月18日23时59分, 甘肃省临夏州积石山县发生 $M_s6.2$ 级地震, 震源深度约10 km, 最大烈度达Ⅷ度, 造成151人死亡、979人受伤及15万余间房屋损毁^[1]。本次地震属于逆冲型浅源地震, 由于其高海拔和地表土层较厚, 地震动能放大效应明显, 造成广泛的破坏和严重的地表影响。与国内以往同等级地震相比, 如2017年九寨沟 $M_s7.0$ 级地震、2022年芦山 $M_s6.1$ 级地震、2022年泸定

$M_s6.8$ 级地震, 本次地震表现了明显的“同震重灾”特征^[2]。在Ⅶ及以上烈度区, 地震触发1535处同震地质灾害, 尤其在青海省民和县中川乡金田、草滩村诱发了同震滑坡—泥流链式灾害。

同震链式地质灾害通常比单一地质灾害具有更强破坏力和更严重的生命财产损失, 一直是防灾减灾领域研究的热点和难点。地震引发黄土液化形成滑坡—泥流灾害链在国内外均有发生, 例如, 1920

收稿日期 (Received date): 2024-05-23; **改回日期** (Accepted date): 2024-08-19

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(41877524, 42172320, 41971214)。[National Nature Science Foundation of China (41877524, 42172320, 41971214)]

作者简介 (Biography): 刘欢(1990-), 男, 四川都江堰人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 防灾减灾工程。[LIU Huan (1990-), male, born in Dujiangyan, Sichuan province, Ph. D. candidate, senior engineer, research on disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: 202113000012@stu.swpu.edu.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 樊晓一(1974-), 男, 四川双流人, 博士, 教授, 主要研究方向: 防灾减灾工程。[FAN Xiaoyi (1974-), male, born in Shuangliu, Sichuan province, Ph. D., professor, research on disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: fxy@swpu.edu.cn

年海原 8.5 级地震引发党家岔滑坡和石碑塬滑坡^[3-4],2013 年甘肃岷县 6.6 级地震诱发永光村黄土液化泥流^[5]。2018 年印度尼西亚帕卢 7.5 级地震和日本北海道 6.6 级地震同样引发大规模土壤液化滑坡—泥流^[6-7]。此次同震滑坡—泥流灾害引起了广泛关注,国内科研人员开展了大量现场调查和分析研究^[8-10]。

泥流的基本特征、致灾成因和房屋建筑的破坏特征是正确评价滑坡—泥流灾害链风险的基础,也是科学构建泥流作用下房屋建筑易损性模型的依据。本研究于灾后通过无人机摄影测量、野外实地调查访问、现场采样测试等手段,探讨了本次地震触发液化型滑坡—泥流的基本特征和成因机理,分析总结了泥流破坏房屋建筑的特点和方式。研究成果可为地震次生链式地质灾害的形成机理和防控提供科学依据。

1 滑坡—泥流基本特征

积石山地震震中位于拉脊山北缘断裂南东段(图 1),该断裂是青藏高原东北缘一条区域性的全新世活动断裂,以挤压逆冲活动为主,在晚更新世和全新世时期活动频繁^[8]。官亭盆地西北部为拉脊山,南部被积石山包围,盆地区域新构造运动强烈,地处积石山地震Ⅷ度烈度区^[15]。黄河自西向东穿过盆地,黄河两岸发育多级河流阶地或新老洪积扇,其中以二级、三级阶地为主,阶地表面覆盖有不同厚

度的红土和黄土。滑坡—泥流研究区周边发生过多起类似液化型滑黄土灾害,如甘肃永靖县黑方台黄土滑坡、青海省民和县喇家黄土灾害(喇家遗址)等。

该液化滑坡—泥流位于青海省民和县官亭盆地中川乡金田—草滩村,距离震中约 20 km,自北向南沿着黄河阶地面流动。泥流总长约 3.2 km,受灾区域面积约 0.47 km²,前、后缘高程差约 85 m,纵坡降为 0.028,滑源区、流通区及堆积区平面形态可明显区分(图 2)。发生的过程主要是在积石山 6.2 级地震作用下,滑源区地下一定深度的饱和黄土层发生大范围液化,上覆土体随液化土体一起沿着液化层带顺着沟道方向流滑。前缘部分发生溃散性失稳破坏,同时前缘液化黄土层的流动,使后面的土体临空而失去支撑,牵引带动相继产生位移滑动,出现多级张拉裂缝和台坎现象,并持续不断补充泥流物源,大量土体和地下水汇集在三级阶地前缘下的沟道内,迅速演变为大规模泥流,并沿着结有冰的沟床快速流动。泥流沿途侵蚀裹挟沟床物质,经历三次明显的偏转、侧壁铲刮和局部堆积,冲毁拦洪土坝后沿着主冲沟快速流向下部草滩、金田村,最终停积在两村动力灌渠南侧的农田里,沿途冲毁或掩埋房屋 95 间,阻断道路 19 条,破坏农田近 200 亩,堵塞水渠约 1.4 km,共造成 20 人死亡。

1.1 滑源区

整个滑源区位于三级阶地的台塬上,整体近似呈“漏斗状”,总面积约 $11.40 \times 10^4 \text{ m}^2$,沿缓坡角流滑方向长约 400 m,垂直方向宽约 450 m,平均下错厚度约 4.5 m,后缘呈“圈椅状”,后壁高度约 2~9 m。其中西侧滑源区为主滑区,面积约 $9.70 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑动方向为近正南向;东侧滑源区面积约 $1.70 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑动方向为近东向。在滑源区现场(图 3)可以观察到一座输电塔倒塌破坏,灌渠、渡槽和水泥道路被冲断带走,大量树木被推倒,周边农田地表处于高度饱水状态。滑源区表面土体表现出牵引式滑坡土体特征,横向张性裂缝发育,表面多呈波浪形台坎或陡坎状。

根据有关文献和当地村民口述,该区域自 1969 年修建了引水灌溉工程,通过水泵将黄河的水提灌到阶地台塬农田里。2017 年以来,台塬修建了灌溉系统和交通道路设施。台塬上主要种植玉米、小麦等作物,每年在冬、春、夏进行大规模灌溉,其中冬灌主要在 11 月下旬至 12 月中旬。在本次地震发生

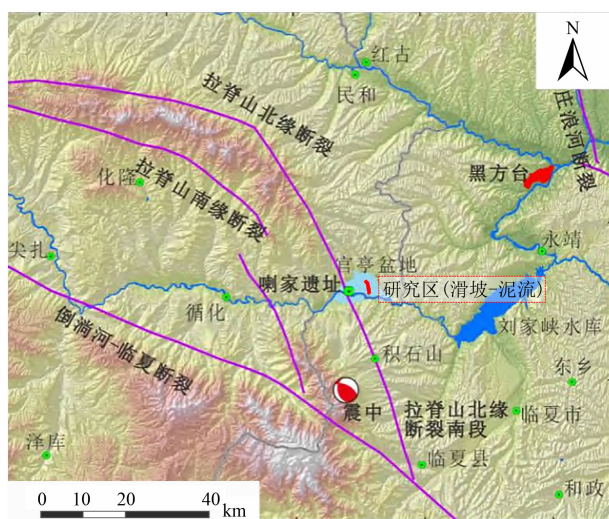


图 1 研究区概况^[15]

Fig.1 Overview of study area

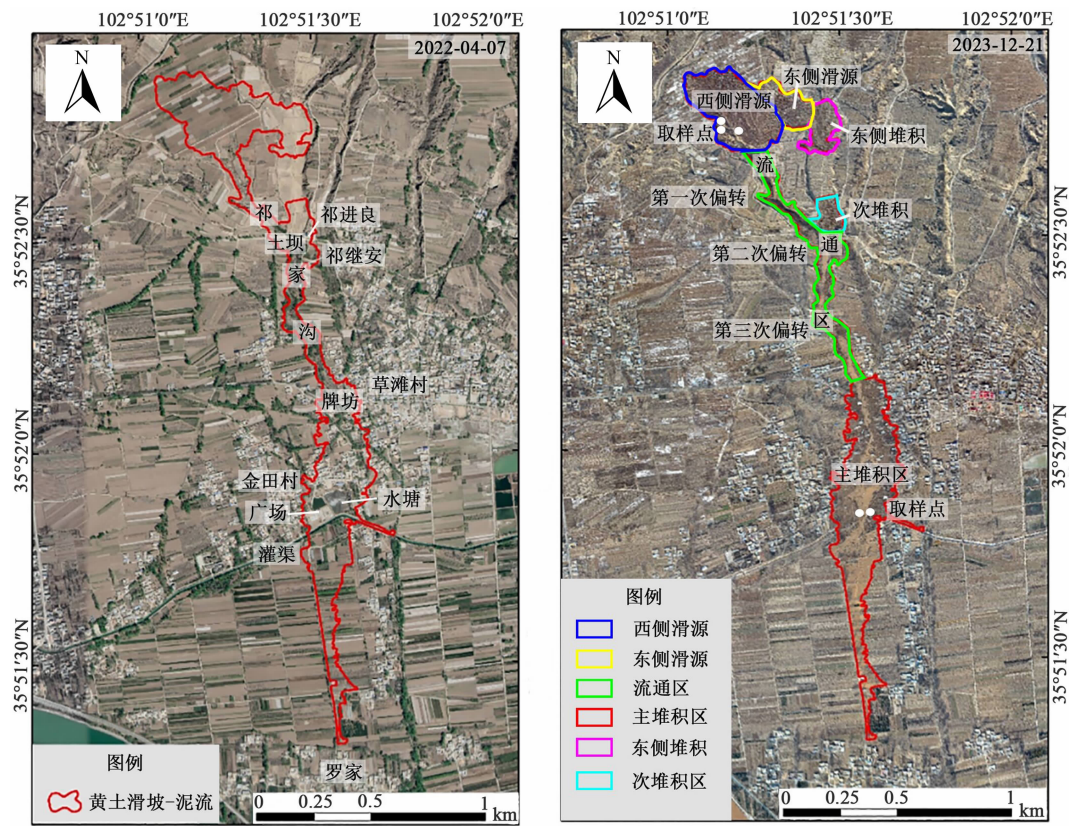


图 2 中川乡滑坡—泥流灾前、灾后对比

Fig. 2 Comparison of flowslide before and after disaster in Zhongchuan town

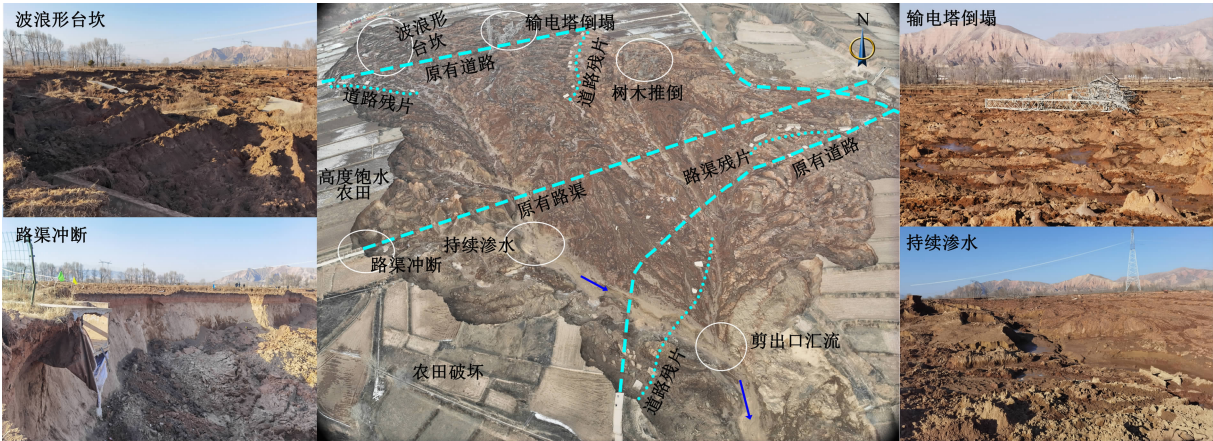


图 3 滑源区整体特征

Fig. 3 Overall characteristics of the sliding source area

前,正好进行了高强度的灌溉。滑源区底部黄土含水量很高,持续有水渗出,沿着主滑动方向顺流而下(图3)。该区域高扬程引水灌溉工程连续多年的漫灌,导致大量水分渗透到干燥的黄土层中,从而形成不断上升的地下水位面,为本次地震触发液化型滑坡—泥流提供了水动力条件。地震前的高强度灌溉导致农田土体高度饱水,已超出土壤的含蓄能力,过

度灌溉活动可能是地震液化诱发本次滑坡—泥流灾害的重要原因。

根据滑源区现场钻孔勘探和后壁剖面测量(图4),该液化区域的地层结构从上到下分别为:(1)耕作土层,0~0.6 m,深棕色,中砂质地,土质中植物根系发育明显;(2)红黏土层,0.6~2.1 m,该层从上往下局部呈现灰褐色—肉红色—灰褐色的层理变

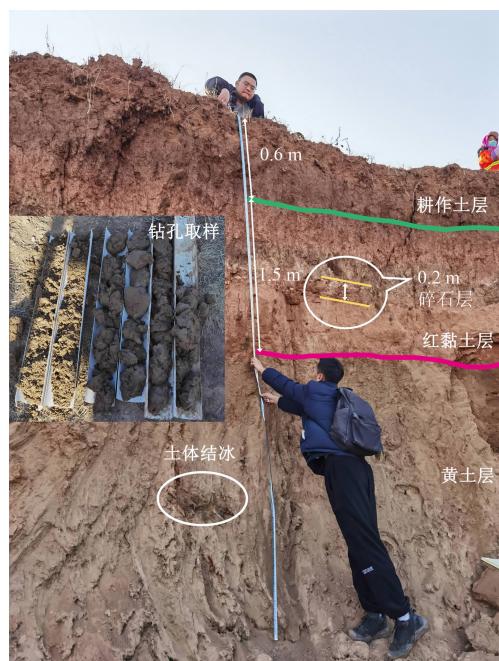


图4 后壁剖面土体测量和钻孔土样

Fig. 4 Back wall profile soil survey and borehole soil sample

化,中间夹层深约 20 cm 含粒径大小 20 ~ 40 mm 的碎石层;(3)黄土层,2.1 ~ 23 m,黄灰色,中砂质地。从现场采集该层土体样品,土体含水率约 9.5%,现场观察到有部分土体结冰现象;(4)砂卵石层,23 m 及以下。

1.2 流通区

剪出口至草滩村牌坊为流通区,该段主要为祁家沟沟道,长约 1.3 km,总面积约 $9.20 \times 10^4 \text{ m}^2$,如图 5(a) 所示。泥石流物质从滑坡剪出口流入下方祁家沟沟道,在运动过程中遇到陡壁和狭窄沟床约束,

泥石流具有强烈的冲刷、侵蚀作用,沿岸呈现出明显的破碎坡和擦痕,不断加深和拓宽原有沟道,增加沟道宽度甚至达到原来的 1 ~ 2 倍,进一步补充泥石流物质。尤其是沿程经历了三次明显的流向偏转,加重侧壁铲刮和局部堆积。

在图 5(b) 中,进入祁家沟约 500 m,在流通区第二次偏转处有一东西走向的拦洪土坝(坝顶为路渠),造成泥石流爬高、回淤,泥石流物质逐渐向东侧另一条缓坡冲沟回淤堆积,形成南北长约 150 m、宽约 80 m 的次堆积区。受地形阻挡作用,泥石流在土坝后不断叠覆堆积,当堆积厚度超过土坝高度,泥石流漫溢到沟道两岸,形成一定范围的岸坡爬高溢出堆积。由于偏转离心作用,流体在漫溢左岸处出现弯道超高现象。如图 5(a),祁进良家一栋 2 层的砖混结构房屋侧墙可见泥石流痕迹高约 4 m,可推测泥石流从沟道阻挡产生爬高约 9 m。同时由于泥石流持续强大的动力冲击和侵蚀作用,最终将拦洪土坝冲毁溃决,形成约 50 m 的溃决缺口。泥石流物质因溃决再次加速流动,快速冲向下游祁家沟左岸祁继安家,在弯道岸边形成宽约 100 m 爬高破碎堆积坡,掩埋岸边农田。该沟段呈现出泥石流“铲刮—偏转—堵塞—爬高—溃决—回淤(堆积)”现象。

1.3 堆积区

草滩村牌坊至动力灌渠以南罗家区段为主堆积区,总面积约 $20 \times 10^4 \text{ m}^2$,沟道长约 1.5 km。其中牌坊北侧至动力灌渠为草滩、金田村所在地,该区域建筑物分布密集、人口集中,长约 600 m,最大宽度约 470 m,属于堆积核心区。当泥石流沿着沟道流向



图5 流通区整体特征:(a)流通区沿程偏转和局部点位特征;(b)流通区第二次偏转处特征

Fig. 5 Overall characteristics of the circulation area;

(a) characteristics of the deflection and local section of the circulation area; (b) characteristics of the second deflection of the circulation area

金田、草滩村,尤其到草滩村牌坊处,沟道变得非常狭窄,且村庄附近地形平缓,导致泥向两侧扩散并包围掩埋村庄。根据牌坊和建筑物掩埋高度,泥流厚度约 3 m。泥流掩埋大量建筑物、道路、广场、水塘、灌渠和农田等(图 6),泥流动能得以减小,最终停积在动力灌渠南侧约 900 m 的农田周围。



注:图中数字为房屋栋号。

图 6 堆积区整体特征

Fig. 6 Overall characteristics of the accumulation area

2 滑坡—泥流成因分析

中川乡地震液化滑坡—泥流发生具有突发性、隐蔽性,致灾作用呈现远程性和破坏性,整体上表现出高浓度、低坡降和较高流速等特征,其发生的成因机理引起了广泛关注。相关学者^[10-11]通过对地震触发滑坡的研究,总结出发生类似地震黄土液化的基本条件:一定坡度的地形、丰富的松散土体、足够的水动力以及超过一定强度的地震。其中,一定坡

度的沟床条件和松散土体物源在一定时间内是相对稳定的,而水动力因素和地震强度相对变化较大。因此,水动力条件和地震强度是决定泥流发生和规模大小的关键因素。

一定坡度的地形为泥流物质运动提供所需的势能,包括沟床的坡度、滑源区汇水面积和沟谷的形态等。从相关研究可知^[12],物源区到金田村的地形高程差仅约 85 m,坡降约 0.028,属缓坡地形。该缓坡地形虽不具备发生泥流灾害的有利地形条件,但依然可使泥流顺坡向低处滑动。本次滑源区所在三级阶地台塬上,覆盖黄土层约 20 m,为更新世和晚更新世以来的完整马兰黄土层^[9],这为滑坡—泥流提供了丰富的物源条件。在滑源区、堆积区分别提取土样 1~土样 6(图 2、图 4),检测分析结果见表 1。滑源区土样 1~4 的含水率变化差异明显,整体趋势为先减小后增大,该变化趋势与图 4 中源区后壁土体剖面表观现象一致。表层、耕作层及黄土层土体因受高强度灌溉、低温冻结等,其含水率较高,为黄土层液化提供了水动力条件。滑源区和堆积区土体黏度大、容重高,整体土多水少呈稠泥状等特点,主要成分均以砂质黄土为主。两个区土样几乎同源,进一步佐证泥流物源主要为滑源区液化层砂质黄土。

已有钻孔勘探结果^[10]揭示,液化区地下水位为 11 m。同时,上游距离 1.5 km 的二级阶地农场村,水井的地下水位为 12~13 m,考虑坡降等因素,与液化区三级阶地钻孔结果基本接近。同时,填沟造地、农田灌溉、低温冻结导致底部地下水位抬升和下部土体饱和,液化区地表田地土体含水率非常高,局部高达 80%,滑源区后壁底部土体含水率同样高

表 1 土样的主要物理指标

Tab. 1 Main physical properties of the soil samples

土样 编号	取样位置	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性 指数	颗粒级配/mm			土样 类别
							0.075~0.25	0.25~2	2~5	
TY-1	滑源区表层土	1.95	25.7	30.4	22.0	8.4	29.4	37.3	33.3	砾砂
TY-2	滑源区后壁耕作土层	1.95	11.2	32.6	22.9	9.7	13.6	70.5	15.9	中砂
TY-3	滑源区后壁红黏土层	1.95	6.3	36.9	21.5	15.4	9.3	62.6	28.1	砾砂
TY-4	滑源区后壁黄土层	1.96	9.5	31.9	18.8	13.1	15.3	66.2	18.5	中砂
TY-5	堆积区稠状土	1.95	14.3	30.6	21.5	9.1	41.2	58.5	—	中砂
TY-6	堆积区湿土	1.94	25.1	35.4	18.8	16.6	16.7	83.3	—	中砂

达约 10%。由此表明,较浅的地下水位和高含水率的地表黄土层为滑坡—泥流提供了充足的水动力条件。根据积石山地震烈度图和强震记录数据,中川乡滑坡—泥流处于地震烈度Ⅷ度极震区域,地震动背景最大值接近 0.5 g,同时黄土覆盖层具有 1.5 ~ 3 倍的放大效应^[9]。在此规模较大的突发性动荷载,且具有叠加放大作用,足以引起瞬时附加孔隙水压力的增加,加剧黄土层发生液化,引起碎屑土体突发崩解滑动进而发展至泥流。

值得注意的是,即使在非地震条件下,地下水位埋深较浅的黄土台塬在一定条件下也可发生液化型滑坡,这种非地震型液化被称为静态液化,如甘肃黑方台近年就屡次发生过静态液化型滑坡—泥流现象^[13]。积石山 6.2 级地震过程持续仅 8 s,但中川乡滑坡源区面积巨大,约 11 万 m²,且呈明显的分级渐进后退式特征。因此可以推测,除地震过程中的振动液化型滑坡外,地震后的一段时间内可能还发生过静态液化型滑坡,并使滑坡区域不断后退,滑坡—泥流面积持续增大,直至最终停止。震后次日,当地村民讲述滑源区附近部分农田坍塌后退十多

米,这同样可以说明可能还发生过静态液化型滑坡。

从整体上看,中川乡地震液化滑坡—泥流是一个完整的“地震—液化—滑坡—泥流”灾害链过程。黄土层中不同部位的高含水率饱和黄土在强地震动作用下,孔隙水压力显著上升,有效应力降低导致发生液化,液化土层形成滑动面,导致上覆非饱和土体滑移。同时,随着孔隙水压朝上部消散,地下水向上渗流,且液化土地中持续不断有水流出,流出的水与土体混合流入冲沟,进而形成泥流灾害链。

3 泥流作用下建筑物破坏特征

3.1 泥流作用下建筑物受损形态

根据应急管理部大数据中心 12 月 20 日 15 时灾后无人机遥感影像显示(图 7),中川乡泥流冲毁掩埋金田、草滩核心区域建筑物 65 栋。根据灾后调查、无人机影像等相关资料获取了 65 栋建筑损毁的资料,样本统计情况见表 2,位置分布见图 6、图 7。从整体来看,破坏的建筑物主要为村民住宅,层高 1~2 层。根据建筑物建筑材料和结构类型,破坏建



注:图中数字为房屋栋号。

图 7 灾后无人机遥感影像图

Fig. 7 Remote sensing image of UAV after disaster

筑物主要为砌体结构、砖混结构、砖木结构。所有受损样本中,冲击作用直接导致建筑物结构破坏而冲毁的建筑物有 29 栋,泥流物质进入室内导致严重淤埋破坏的有 17 栋,存在一般淤积或轻微淤积(侧边擦刮)破坏的有 18 栋,因地震作用导致 1 栋砖木结构附属建筑物墙体破坏。

泥流最显著、典型的特点是泥流物质淤积沟道和抬高沟床,导致沟道、河流附近建筑被整体或局部淤埋^[14]。现有文献表明,泥流平均流速约 3.3 m/s ^[15],

泥流到达草滩村牌坊的流深约 3 m ^[16]。此后区域内无明显的沟道,地形开阔且平缓,泥流沿侧向铺开而不束流,前行阻力增大,泥流流深和流速逐渐降低,进入堆积过程。从图 7 中可以看出,受损建筑物主要分布在泥流主流线方向上,距离泥流主流线越近,建筑物破坏越严重。泥流速度和能量主要集中在主流线方向,沿侧向速度分量减小,最终大量 1 层建筑物被泥流直接冲毁,其余建筑物受淤埋破坏。图 8(a)、8(b)中,两栋一层砖木结构房屋(栋号

表 2 泥流破坏建筑物样本统计
Tab. 2 Sample statistics of the flowslide damaged buildings

房屋栋号	所在位置	房屋层数	结构类型	掩埋深度/m	主要作用方式	破坏情况
FW-1	主流路径右侧	1	砖木	—	地震震害	局部墙体倒塌
FW-2	主流路径左侧	1	砖木	—	侧边擦刮	墙边少量泥流淤积
FW-3	主流路径左侧	1	砖混	2.8	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-4	主流路径左侧	1	砌体	1.8	冲击和淤埋	门窗、雨棚架破坏
FW-5	主流路径左侧	1	砌体	1.7	冲击和淤埋	门窗、雨棚架破坏
FW-6	主流路径右侧	2	结构不详	1.5	冲击和淤埋	严重淤埋破坏
FW-7	主流路径右侧	1	砌体	1.2	淤埋	围墙、门窗局部破坏,墙体产生裂缝
FW-8	主流路径上	2	砖混	3.0	冲击和淤埋	房屋一层几乎完全掩埋
FW-9	主流路径上	1	结构不详	3.0	冲击	房屋被冲坏和完全掩埋
FW-10	主流路径上	2	砖混	2.5	冲击和淤埋	门窗破坏,左侧附属房屋冲坏
FW-11	主流路径上	1	砖木	2.5	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-12	主流路径上	1	结构不详	2.5	冲击	房屋被冲坏和掩埋
FW-13	主流路径上	2	砖混	2.5	冲击和淤埋	房屋一层几乎完全掩埋,右侧附属房屋冲坏
FW14-16	主流路径左侧	1	结构不详	2.8	冲击	房屋被冲坏
FW-17	主流路径左侧	1	砌体	2.5	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-18	主流路径左侧	1	砖木	2.5	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-19	主流路径左侧	1	砖混	2.5	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-20	主流路径左侧	1	砖木	1.2	淤埋	墙体局部破坏
FW-21	主流路径左侧	1	砖木	1.0	淤埋	墙体局部破坏
FW-22	主流路径右侧	1	砖木	1.0	淤埋	附属房屋墙体破坏
FW-23	主流路径上	1	砌体	2.5	冲击	房屋被冲坏
FW-24	主流路径上	2	砖混	2.5	冲击和淤埋	门窗破坏,右侧附属房屋冲坏
FW-25	主流路径右侧	1	砖木	1.5	冲击和淤埋	门窗和墙体部分破坏
FW-26	主流路径右侧	1	结构不详	2.5	冲击和淤埋	房屋几乎被完全掩埋
FW-27	主流路径右侧	2	砖混	2.0	冲击和淤埋	门窗部分破坏
FW-28	主流路径右侧	1	砖木	1.8	冲击和淤埋	围墙和门窗破坏
FW-29	主流路径右侧	1	砖木	1.5	冲击和淤埋	围墙和门窗破坏
FW30-52	主流路径上	1~2	砖木、砌体、砖混	2.5~3.0	冲击	房屋被冲坏或整体掩埋
FW53-60	主流路径左侧	1	砖木、砌体、砖混	0.5~1.0	淤埋	围墙和门窗部分破坏
FW61-65	主流路径左侧	1	砌体、砖混	0.5~1.0	淤埋和侧边擦刮	围墙和门窗部分破坏



图8 建筑物的破坏形态: (a)房屋 FW-11; (b)房屋 FW-18; (c)房屋 FW-10; (d)房屋 FW-13;
(e)房屋 FW-24 的正面; (f)房屋 FW-24 的侧面; (g)房屋 FW-7; (h)房屋 FW-22; (i)房屋 FW-60

Fig. 8 Damage patterns of buildings;

(a) building FW-11; (b) building FW-18; (c) building FW-10; (d) building FW-13; (e) the front view of the building FW-24;
(f) the side view of the building FW-24; (g) building FW-7; (h) building FW-22; (i) building FW-60

FW-11、FW-18)位于泥流主流线附近,房屋门窗、墙体遭受严重破坏,泥流物质几乎淤埋整个建筑物。图8(g)、8(h)、8(i)中,房屋(栋号FW-7、FW-22、FW-60)距离泥流主流线较远,仅出现围墙、门窗附属构件破坏和少量泥流物质淤积,建筑物整体结构保持完好。同时由于不同建筑物自身内在结构特征等原因,相较于结构整体性较好的砖混、框架结构,砖木结构、纯砌体结构房屋梁、柱等受力构件连接较弱,导致其整体稳定性较差。如在图8(c)、8(d)、8(e)、8(f)中,三栋主流线上的两层砖混结构建筑物(栋号FW-10、FW-13、FW-24),其一层门窗受泥流冲击后破坏,泥流物质冲入结构内导致较严重淤埋,而承重构件柱或墙体无结构性损伤,结构整体保持稳定。而其一侧或两侧的纯砌体附属房屋遭受结构性严重破坏,甚至完全倒塌。

3.2 泥流对建筑物的动力作用

中川乡泥流具有搬运力、夹带能力强和速度较快等运动特征,致灾方面表现出冲击碰撞、冲刷摩擦、爬高和淤埋能力强。由于当时气温较低,地表处于冻结状态,且泥流含水充足,使泥流与地面的摩擦阻力降低。该泥流是一种流动的高浓度固液两相体,它像水流一样在遇到障碍物时,在物体表面产生水压力。同时又像固体颗粒,在物体接触面产生碰撞和摩擦^[17]。此外,泥流具有较大的屈服应力,容

易发生淤积。因此,泥流对建筑物的动力作用主要表现为冲击、淤埋两种形式,其中以淤埋作用为主。

淤埋作用表现为泥流搬运的大量物质以低流速经过建筑物,或通过门窗、开口位置进入建筑物内部,淤积在建筑物周围或其内部。在流速较小的情况,泥流淤积作用强度主要取决于流深,当淤埋深度较小,一般不超过1 m,这种情况下的淤埋作用不会对结构部件(柱、梁)造成重大损坏,主要破坏模式为仅门窗、(围)墙体破坏的非结构性破坏。浅层次的淤积会使室内物品受损,造成一定经济损失。但当堆积物过多时可能会使房屋建筑地基基础或构件产生超载,进而产生变形破坏。当建筑物完全被淤埋时,已丧失修复价值,造成严重损失。此外,淤积过程中受到泥流浸泡的建筑物,会出现钢筋锈蚀和建筑材料的受水侵蚀等影响结构耐久性的破坏,建筑物地基土的承载力也会受到一定影响^[14]。第二种为冲击作用。这种冲击作用主要作用于建筑的迎流面,单个结构构件(通常是墙面、柱和梁)可能发生严重损坏或失效,但整个结构不会倒塌。可是随着破坏面的增大,多个承重构件破坏,甚至整个结构失稳倒塌,主要破坏模式承载墙体、柱和梁损伤、倒塌导致的结构性破坏。一般地,冲击、淤埋两种方式往往交织发生,联合作用于房屋建筑,并非单独出现^[14]。

泥石流与建筑的相互作用本质上是泥流动能与建筑物形变内能、摩擦耗能之间的转换,泥石流破坏建筑是物质和能量转移的过程^[18-19]。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。现实中,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比受淤积作用导致的破坏更为严重^[20]。

结合以上建筑物破坏特征以及区域地形地貌、地震效应等,该区域在后期乡镇、村庄规划建设中,首先在场地选址时,要与近断层场地和潜在滑坡、泥石流等地质灾害保持一定的安全距离,不宜在降雨汇流通道低洼区域(尤其是主流线上)修建房屋。同时,结合不同结构形式房屋的震害受损特点^[9],地震中因叠加覆盖层放大效应及共振效应,表现为土木结构房屋最为严重,其次是砖木结构,框架结构影响相对较轻。所以,该区域新建房屋建议选择自震周期短、结构整体性好的砖混、框架结构。

4 结论

(1)此次次生地质灾害具有完整的“地震—液化—滑坡—泥石流”链式灾害过程,属于典型沟谷型黏性泥石流,其滑源区、流通区和堆积区分界明显,物源主要为滑源区液化层砂质黄土。

(2)地震诱发地下饱和黄土层液化是滑坡—泥石流发生的主要原因,强地震动、饱和黄土层和沟谷地形是发生的主要条件;填沟造地、农田灌溉、低温冻结导致底部地下水位抬升和下部土体饱和,增加了黄土层液化的可能性。而地震后的一段时间内可能还发生静态液化型滑坡,促使滑坡—泥石流面积不断增大。

(3)本次泥石流对建筑物的动力作用主要表现为冲击和淤埋,并以淤埋作用为主。建筑物距泥石流主流线越近,其破坏越严重。该区域新建房屋选址要与近断层场地和潜在滑坡、泥石流等地质灾害保持一定的安全距离,不宜在降雨汇流通道低洼区域(尤其是主流线上)修建房屋。建议选择自震周期短、结构整体性好的砖混、框架结构。

参考文献(References)

- [1] 王立朝, 侯圣山, 董英, 等. 甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, **35**(3): 108 - 118. [WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan $M_s6.2$ earthquake and suggestions for their risk control [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, **35**(3): 108 - 118] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312026
- [2] 李为乐, 许强, 李雨森, 等. 2023 年积石山 $M_s6.2$ 级地震同震地质灾害初步分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, **51**(1): 33 - 45. [LI Weile, XU Qiang, LI Yusen, et al. Preliminary analysis of coseismic geohazards induced by the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2024, **51**(1): 33 - 45] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2024.01.04
- [3] 张晓超, 裴向军, 张茂省, 等. 强震触发黄土滑坡流滑机理的试验研究——以宁夏党家岔滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(5): 1219 - 1226. [ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, ZHANG Maosheng, et al. Experimental study on mechanism of flow slide of loess landslides triggered by strong earthquake: A case study in Dangjiacha, Ningxia Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(5): 1219 - 1226] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018224
- [4] WANG Gonghui, ZHANG Dexuan, FURUYA G, et al. Pore-pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: A case study [J]. Engineering Geology, 2014, **174**: 36 - 45. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.006
- [5] 王国亚, 任路滨, 吴玮江, 等. 甘肃岷县永光村滑坡特征及其成因研究[J]. 冰川冻土, 2019, **41**(2): 392 - 399. [WANG Guoya, REN Lubin, WU Weijiang, et al. Characteristics and causes of the landslide outbreaking in Yongguangcun, Minxian County, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41**(2): 392 - 399] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0110
- [6] WATKINSON I M, HALL R. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides [J]. Nature Geoscience, 2019, **12**: 940 - 945. DOI: 10.1038/s41561-019-0448-x
- [7] WANG Fengrui, FAN Xuanmei, YUNUS A P, et al. Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), earthquake: Spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism [J]. Landslides, 2019, **16**(8): 1551 - 1566. DOI: 10.1007/s10346-019-01187-7
- [8] 李亚军, 岳东霞, 陈冠, 等. 积石山地震诱发金田-草滩村滑坡-泥石流灾害链过程与成因[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, **60**(1): 1 - 5. [LI Yajun, YUE Dongxia, CHEN Guan, et al. A preliminary analysis of the process and cause of the Jintian-Caotan

- landslide-mudflow hazard chain induced by the Jishishan earthquake [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024, **60** (1): 1–5] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2024.01.001
- [9] 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023 年甘肃积石山 $M_s 6.2$ 级地震灾害异常的启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, **51**(1): 1–8. [WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary insights into some hazards triggered by the 2023 Jishishan $M_s 6.2$ earthquake, Gansu Province [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). 2024, **51**(1): 1–8] DOI: 10.3969/j.issn.1671–9727.2024.01.01
- [10] 王兰民, 许世阳, 王平, 等. 2023 年积石山 $6 \cdot 2$ 级地震诱发大规模黄土液化流滑的特征与启示[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(2): 235–243. [WANG Lanmin, XU Shiyang, WANG Ping, et al. Characteristics and lessons of liquefaction-triggered large-scale flow slide in loess deposit during Jishishan $M_s 6.2$ earthquake in 2023 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(2): 235–243] DOI: 10.11779/CJGE20240038
- [11] 陈文化. 地震液化流滑震害[J]. 自然灾害学报, 2001, **10**(4): 88–93. [CHEN Wenhua. Slipping disaster induced by seismic liquefaction [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, **10**(4): 88–93] DOI: 10.13577/j.jnd.2001.0416
- [12] 蒋伟, 王永志, 袁晓铭, 等. 2023 年甘肃积石山 $M_s 6.2$ 级地震宏观灾害特征与若干思考[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 2024, **44**(1): 1–11. [JIANG Wei, WANG Yongzhi, YUAN Xiaoming, et al. Macroscopic hazard characteristics of the 2023 Gansu Jishishan $M_s 6.2$ earthquake and some proposals [J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, **44**(1): 1–11] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20240114002
- [13] 许强, 彭大雷, 亓星, 等. 2015 年 $4 \cdot 29$ 甘肃黑方台党川 2# 滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(2): 167–180. [XU Qiang, PENG Dalei, QI Xing, et al. Dangchuan 2# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu Province: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(2): 167–180] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.02.001
- [14] 李碧雄, 赵开鹏, 王甜恬. 西部山区泥石流灾害下建筑物破坏特征与破坏等级划分[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, **43**(3): 484–493. [LI Bixiong, ZHAO Kaipeng, WANG Tiantian. Damage form and vulnerability analysis of buildings under debris flow impact [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, **43**(3): 484–493] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20210522002
- [15] 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山 6.2 级地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1–18. [XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary study on the characteristics and initiation mechanism of Zhongchuan Town flowslide triggered by Jishishan $M_s 6.2$ earthquake in Gansu Province [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024: 1–18] DOI: 10.13203/J.whugis20240007
- [16] 宿星, 魏万鸿, 张满银, 等. 甘肃积石山强震诱发同震滑坡-泥流灾害链联动耦合致灾效应[J]. 冰川冻土, 2024, **46**(3): 1–17. [SU Xing, WEI Wanhong, ZHANG Manyin, et al. The coupling effect of coseismic landslide-mudflow disaster chain induced by Jishishan strong earthquake in Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, **46**(3): 1–17]
- [17] 胡凯衡, 崔鹏, 葛永刚. 舟曲“ $8 \cdot 8$ ”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 Kaiheng, CUI Peng, GE Yonggang. Building destruction patterns by August 8, 2010 debris flow in Zhouqu, western China [J]. Mountain Research, 2012, **30**(4): 484–490] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2012.04.020
- [18] 雷雨, 崔鹏, 蒋先刚. 泥石流作用下砌体房屋破坏机理和结构优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(4): 61–69. [LEI Yu, CUI Peng, JIANG Xiangang. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(4): 61–69] DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.04.009
- [19] FENG Shijin, GAO Hongyu, GAO L, et al. Numerical modeling of interactions between a flow slide and buildings considering the destruction process [J]. Landslides, 2019, **16**(10): 1903–1919. DOI: 10.1007/s10346–019–01220–9
- [20] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“ $7 \cdot 11$ ”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 Chao, CUI Peng, GE Yonggang, 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] DOI: 10.1672–6561(2014)02–0081–11

Liquefaction Flowslide and Damage Characteristics of Buildings in Zhongchuan Town Triggered by the Jishishan Earthquake

LIU Huan^{1a,1b,2}, FAN Xiaoyi^{1b,1c*}, XIA Guiping^{1b}, JIANG Yuanjun³, SONG Jiaqi^{1b}, DENG Xin^{1b}

(1. a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. School of Civil Engineering and Geomatics;

c. Institute of Engineering Safety Assessment and Protection, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Mingshan District, Ya'an 625100, Sichuan China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China)

Abstract: On December 18, 2023, at 23:59, an $M_s 6.2$ earthquake struck Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province, China. At 20 kilometer from the epicenter, this earthquake triggered a chain of landslide-mudflow in the neighboring Caotan and Jintian Villages of Zhongchuan Town, in Minhe County of Qinghai Province, resulting in 20 fatalities, 19 roads blocked, and 65 residential buildings destroyed and buried.

A team of scientists was promptly assembled and dispatched to the earthquake-affected areas immediately following the tremor. Utilizing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry, comprehensive field surveys, and rigorous on-site sampling, the team investigated the underlying causes of the earthquake-induced landslide-mudflow. Additionally, 65 samples of building damages were meticulously collected and analyzed to determine the specific patterns of destruction inflicted by the mudflow.

(1) This secondary geological disaster exemplified a complete chain disaster process: earthquake-liquefaction-landslide-mudflow, featuring a characteristic gully-type viscous mudflow. The primary source of this mudflow stemmed from the liquefied sandy loess within the sliding source area.

(2) The liquefaction of saturated loess triggered by the earthquake served as the primary catalyst for the landslide-mudflow. The interaction of strong seismic shaking, saturated loess conditions, and gully topography created an ideal setting for this geohazard. Furthermore, factors such as land reclamation, farmland irrigation, and low-temperature freezing elevated groundwater levels and saturate the lower soil layers, heightening the likelihood of loess liquefaction. It was possible that static liquefaction-induced landslides might kept in the aftermath of the earthquake, potentially leading to a continued expansion of the affected landslide-mudflow area.

(3) The dynamic impact of the landslide-mudflow on buildings was primarily manifested through both impact and silting, with silting being the dominant factor. The closer a building was situated to the main flowslide line, the more severe the damage it was likely to incur. Therefore, it is recommended that new buildings in this region adopt brick-concrete or frame structures, which offer shorter self-seismic periods and superior structural integrity.

These findings provide insights into the formation mechanisms and prevention strategies for similar secondary chain geological disasters induced by earthquakes.

Key words: earthquake-induced landslide-mudflow; building damage; saturated loess; impact; silting

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)