

• 滑坡堰塞湖灾害机理与防控 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202201236



本刊网刊

泸定地震诱发灾害特征分析

邓建辉¹, 韦晓^{2,3}, 戴仕贵^{2*}, 邓辉⁴

(1.四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室 地质工程与地质灾害研究所, 四川 成都 610065; 2.四川省地震局, 四川 成都 610041; 3.上海市地震局, 上海 200062; 4.成都理工大学 地质科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 2022年9月5日, 四川省泸定县海螺沟景区发生6.8级地震, 震中烈度IX度。相较于2008年汶川8级地震和2013年芦山7级地震, 此次地震震级要小, 但是地震区为山区, 地质灾害发育, 造成交通中断、118人死亡或失踪。为探究泸定地震损失情况, 作者对泸定县和石棉县的主要地震影响区进行了为期5 d的考察。基于考察成果和区域地质资料, 对地质灾害孕育、建筑结构震损和人员伤亡情况进行了分析, 以期灾后重建提供参考。主要结论如下: 1) 地质灾害的上盘效应不突出, 灾害主要分布于烈度VII度及其以上地区, 规模小, 以崩塌或落石和浅层滑坡为主, 偶见基岩平面滑动和土体圆弧形滑动。2) 地质灾害形式受地质条件控制。泸定县得妥镇以上为干热河谷, 山坡卸荷较强, 风化程度低, 主要灾害形式为落石; 得妥镇以下降雨量相对较大, 山坡卸荷、风化严重, 主要灾害形式为浅层滑坡。3) 地质灾害主要出现在山脊、陡缓坡交接部位、侵蚀沟槽两壁, 以及公路沿线。工程扰动是地质灾害密集分布和人员伤亡的促发因素。4) 建筑结构震损主要出现在IX度烈度区, 以磨西镇的震损最为严重。农村自建房屋和老旧建筑施工质量是影响结构抗震能力的主要问题, 灾后重建房屋选址需要考虑场地效应影响。5) 在高山峡谷地区, 公路边坡加固和建筑结构避开落石影响区是降低地震伤亡率的有效措施。

关键词: 泸定地震; 地质灾害; 结构震损; 地质条件; 场地效应; 防控措施

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)01-0117-10

2022年9月5日中午12时58分, 四川省泸定县海螺沟景区发生6.8级地震, 震中坐标为29.59°N、102.08°E, 震源深度16 km, 震中烈度9度^[1]。截至9月11日17时, 该次地震共造成93人死亡, 25人失踪^[2]。

21世纪以来, 沿川西“Y”形构造带出现了多次破坏性地震, 受到了广泛的关注。如: 2008年汶川8级地震^[3-13]、2013年芦山7级地震^[14-18]等。虽然本次地震震级有所降低, 但由于震中位于高山峡谷区, 损失仍然较为严重。地震发生后, 灾区交通阻断, 借力于遥感技术与无人机技术的快速发展, 滑坡灾害的数量与分布情况等资料得到快速掌握^[19-20]。王欣等^[19]遥感解译了地震诱发的3 633处滑坡, 总面积13.78 km²。铁永波等^[20]结合现场调查给出有威胁对象的地质灾害隐患点565处, 包括崩塌331处、滑坡234处。李

为乐等^[21]采用了InSAR分析了地震对海螺沟冰川的影响, 认为地震未造成海螺沟冰川运动速度大范围显著增大, 但对冰瀑布前缘区域扰动明显, 从其提供的海螺沟景区一号营地附近同震滑坡分布图来看, 震中附近滑坡灾害的分布密度和规模均较大。韩炳权等^[22]采用InSAR技术确定了本次地震的同震形变场, 并利用位错模型确定了发震断层的几何参数和滑动分布; 虽然震级相对官方数据有所减小, 但是断层破裂深度也减小很多; 研究也给出了余震的演变特征, 为理解同震滑坡的分布特征提供了基础。

同震地质灾害不仅与地震参数、断层活动方式等有关, 也与地震影响区的地质环境条件有关。为深刻理解泸定地震灾害特征, 2022年9月21—25日, 作者对泸定县和石棉县的主要灾区进行了实地考察。

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U22A20601); 第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0905)

作者简介: 邓建辉(1965—), 男, 教授, 博士。研究方向: 岩石工程与地质灾害。E-mail: jhdeng@scu.edu.cn

*通信作者: 戴仕贵, E-mail: Daishigui2022@126.com

网络出版时间: 2023-02-27 07:11:36

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20230224.1601.003>

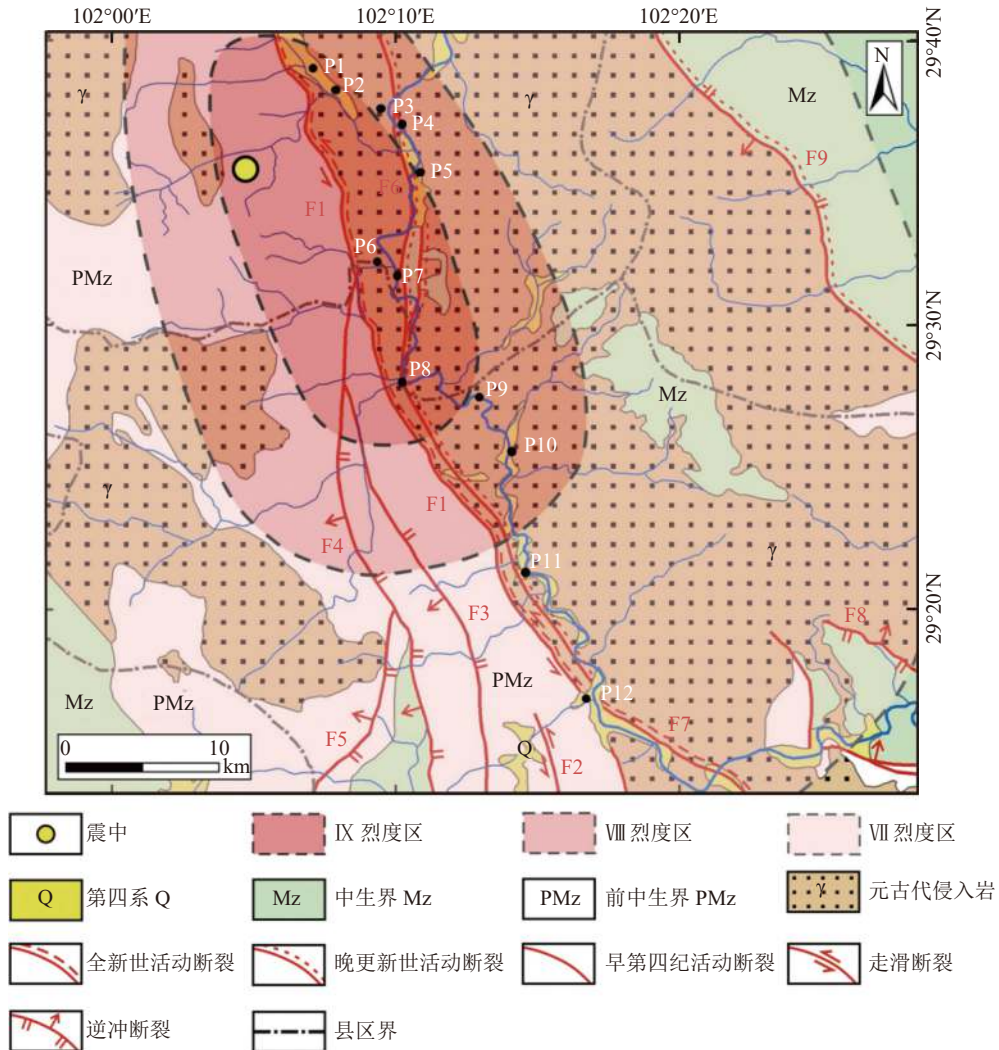
限于交通问题,考察范围主要集中在鲜水河断裂下盘(东侧),包括大渡河沿线、磨西镇、燕子沟镇、右岸支流湾东河与田湾河等地,未能全面覆盖整个灾区,但是考察成果也基本能够涵盖泸定、石棉两地的地质灾害发育与建筑结构震损特点。本文结合区域地质条件,对地质灾害的孕育特征与建筑结构震损原因进行分析,为灾后重建,以及条件类似地区防灾减灾提供参考。

1 地质环境条件

泸定县、石棉县地处青藏高原东南的川西北丘状高原东南缘向四川盆地过渡地带,山势展布与主要构造线走向基本一致。东部为邛崃山脉,海拔3 000~4 500 m;西部为大雪山山脉,海拔4 500~5 500 m,最

高峰贡嘎山海拔7 556 m。大渡河夹持于两山之间,自北向南流淌;两岸海拔3 600 m以上,特别是4 200 m以上的高山区常见冰斗、刃脊、角峰、冰川槽谷(悬谷)等冰蚀地貌遗迹及高山“海子”(古冰川、冰斗、冰湖的残余)。泸定县城至石棉县城的大渡河谷为深切曲流河谷地貌,泸定县城至得妥镇河段和大岗山坝址至石棉县城河段总体为宽谷,得妥镇至大岗山坝址河段为峡谷。

地震区位于康滇地轴北部,如图1所示。岩性主要为康定杂岩,包括晋宁-澄江期二长花岗岩、花岗岩、闪长岩,澄江期以后侵入活动相对微弱,以辉绿岩、伟晶岩、花岗岩和石英脉等岩脉活动为主要特色,岩脉形态各异,大小不等,呈脉状贯入节理、裂隙之中。前中生界地层(PMz)主要出露于鲜水河断裂以



主要断裂: F1鲜水河断裂; F2安宁河断裂; F3庙子坎断裂; F4西油房断裂; F5滨东断裂; F6大渡河断裂; F7大凉山断裂; F8美罗断裂; F9金坪断裂。
主要考察点: P1燕子沟镇; P2磨西镇; P3磨岗岭; P4硬梁包厂房出口; P5得妥镇; P6湾东村; P7联合村大渡河大桥; P8田湾河; P9大岗山大坝; P10王岗坪乡; P11龙头石大坝; P12石棉县城。

图 1 区域地质背景与主要考察点(根据中国电建成都勘测设计研究院报告改编)

Fig. 1 Regional geological background and major reconnaissance sites (Revised after the report of CHIDI)

西的变质岩区,包括泥盆系和二叠系结晶灰岩,以及少量板岩、千枚岩、变质砂岩、石英岩等。中生界地层(Mz)在鲜水河断裂以东主要为三叠系上统和侏罗系砂页岩,以西为板岩、变质灰岩、大理岩等变质岩类。

构造上地震区位于四川“Y”字形构造结合部位,其南为川滇南北向构造带,东为东北向龙门山断褶带,西为北向西向鲜水河断褶带和金汤弧形构造带。其中,鲜水河断裂带是四川境内最强烈的活动断裂带^[23],历史记录5.0级及以上地震共10次,其中最大地震是1786年四川泸定7 $\frac{1}{4}$ 级地震^[24]。徐锡伟等^[25]2017年预测该断裂的色拉哈段和磨西段离逝时间可能接近复发间隔。

考察地点包括大渡河沿岸自泸定县至石棉县的省道S211,以及磨西镇、湾东村和田湾河等地区,其中大岗山库区段采用冲锋舟进行考察。参考中国地震局9月11日发布的地震烈度图(图1),燕子沟镇、磨

西镇和大岗山库区基本位于IX度区内;泸定县磨西河口至硬梁包地下厂房为VIII度区,再往上游至泸定县城为VII度区;大岗山坝址至下游勤劳村为VIII度区,再往下游至石棉县城为VII度区。

地震区气候受地形地貌的影响较大,具有明显的垂直带谱特征,从河谷到山脊构成了从热带到寒带完整的生物气候垂直分带特征。泸定县东侧的邛崃山脉阻挡了东南季风携带的水汽运移,在山脊两侧形成完全不同的植被景观。东侧的雅安地区是四川省降雨量最大的地区,植被茂盛;而西侧的大渡河谷降雨量稀少,呈现出干热河谷特点(图2)。石棉县东侧的大相岭海拔相对较低,而西侧大雪山山脉的贡嘎山高耸,干热河谷特征不突出。大致以泸定县得妥镇为界,大渡河谷在得妥镇以下较为湿润,得妥镇以上则呈现出干热河谷特点。地震区的气候特征对谷坡的卸荷和风化特征影响较大,进而影响同震地质灾害特点。

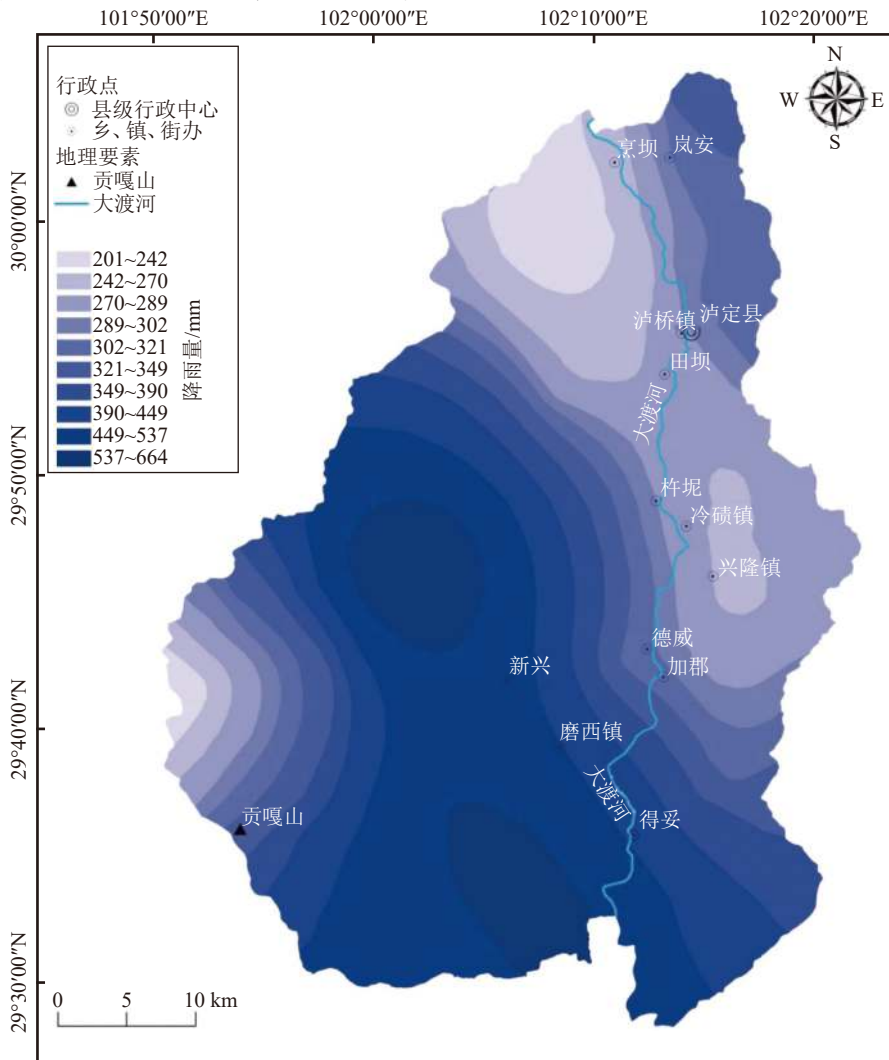


图2 泸定县年降雨等值线图

Fig. 2 Isogram of yearly rainfall in Luding County

2 地质灾害发育特征

参照Hunggr等^[26]修订的Varnes滑坡分类方案讨论同震地质灾害的孕育特点。与国内普遍采用的“崩滑流”分类方案不同,该方案将“崩滑流”统一为滑坡,



(a) 落石(点位 P6)

(b) 浅层滑坡(点位 P7)

(c) 湾东河左岸(点位 P6)

(d) 圆弧滑动(点位 P8)

图 3 地质灾害的主要形式

Fig. 3 Major types of geological disasters

落石较常见,发生在陡峻的基岩山坡;浅层滑坡出现在胶结的冰碛物(图4(a))、崩坡积层(图4(b))或全强风化层(图4(c)),总体特点是层厚不大,滑体存在卸荷与风化,完整性差;滑床完整性较好。大渡

河河谷的基岩为块状结构的康定杂岩,基岩平面滑动仅沿卸荷裂隙发育(图3(c)),在图1右侧荣经县境内的中生代地层区则相对发育。圆弧滑动仅见于鲜水河断裂带,岩体全风化,且风化深度大(图3(d))。



(a) 冰碛物(点位 P2)

(b) 坡积物(点位 P9)

(c) 全强风化层(点位 P2)

图 4 浅层滑坡的主要类型

Fig. 4 Main types of shallow landslides

滑坡主要出现在Ⅶ及以上烈度区,地质条件对滑坡类型存在重要影响。大渡河谷泸定县城至得妥镇段基本上为干热河谷和宽谷,岸坡陡峻,卸荷强烈,但是以弱风化为主,强风化仅零星分布。硬梁包水电站勘探成果揭示左岸强卸荷水平深度为47.5~67.5 m,右岸强卸荷浅,水平深度约25.7 m,因此该段的滑坡形式基本为崩塌或落石(图3(a))。得妥镇至石棉县城段为峡谷,气候湿润,岸坡强风化水平深度较大,例如大岗山坝顶高程的强风化带水平深度约为

20~30 m。因此,此段的滑坡基本上以强风化层或局部坡积层的浅层滑坡为主(图3(b))。

从滑坡分布的密度上来看,相对于汶川地震和芦山地震,泸定地震滑坡灾害的“上盘效应”并不突出,反映了鲜水河断裂的左旋走滑特点;但是离断层越近,滑坡密度越大的特点是相同的。按烈度分析,同一烈度不同区域的滑坡密度有差异。得妥镇以下滑坡的分布密度远大于其以上河段,泸定县的Ⅶ烈度区落石仅零星分布,石棉县的Ⅶ烈度区浅层滑坡

普遍存在。除地质条件与工程扰动外,该现象可能与断层破裂南向传播有关。

地形对滑坡孕育也存在影响。滑坡最易发生在山脊部位(图5(a))或近山脊缓坡向陡坡的过渡部

位(图5(b));其次是沟槽两侧的陡坡(图5(c))。沟槽的孕育部位一般都与较弱的岩土体有关,且往往就是灾害的孕育部位。摩岗岭和田湾河口左岸(图5(d))在地震前就有滑坡孕育,地震仅加速了这一过程。



图 5 滑坡分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of landslide

工程扰动也是滑坡孕育的促进因素。地震区的公路等级不高,路面基本采用半挖半填的方法修建,路基特别是公路内侧边坡往往是滑坡的高发区。最典型的是省道S211大岗山库区段,该段是在2010年以后新修或扩建的,公路等级低,仅偶见简易支护措施,如喷混凝土或浆砌石挡墙等;地震前,局部滑塌现象在雨季很常见,沿线浅层滑坡在本次地震更是密集分布(图5(e))。其他线路情况类似,如大岗山坝址至雨洒坪的简易公路垮塌更为严重(图5(f))。

应该指出的是,经过系统设计与治理的工程边坡在本次地震中表现良好(图6)。硬梁包和大岗山坝



图 6 支护和未支护边坡对比(点位 P9)

Fig. 6 Comparison of supported and unsupported slopes (Position P9)

区的工程边坡无一破坏,大岗山库区的郑家坪滑坡在治理后也仅存在轻微变形。古、老滑坡堆积体在地震中仅存在轻微变形,这与汶川地震、芦山地震的规律一致(图5(e))。

3 建筑结构的损毁特征

建筑结构的损毁既与地震烈度、建筑结构型式、地基型式和施工质量有关,也与场地条件有关。山区建筑结构损毁还受地质灾害影响。

主要建筑结构的震损基本上出现在IX烈度区,如磨西镇、得妥镇等,其中以离震中较近的磨西镇最为严重。具体的建筑震损情况又与结构型式与施工质量密切相关,屋面溜瓦(图7(a))、与地震波传播方

向垂直的女儿墙倒塌是普遍现象;砖混或砌体建筑物损坏较为常见,如燕子沟的药王庙(图7(b))。这些破坏形式主要体现在农村自建房屋和老旧建筑上;正常设计、施工的框架结构总体表现良好,仅存在砌体填充墙损坏与墙皮剥落现象(图7(c))。个别私营酒店的损坏主要是施工质量或非经严格设计导致,如图7(d)中柱体强度不足,钢筋锈蚀,混凝土用手都可以掰碎。山体滚石砸坏位于山坡或山脚的建筑物也较普遍,这是山坡建筑物损坏的主要原因(图7(e))。大岗山水库库区的联合村大渡河大桥和什月河大桥均有轻微损坏,从破坏形态来看,震动过程中构件的相互挤压、碰撞是破损的主要原因(图7(f));从外观上看,桥梁主体结构未见破坏,可修复使用。



图 7 震中区主要结构损坏形式

Fig. 7 Major types of building damage near the epicenter

此外,中国科学院贡嘎山生态高山生态系统观测站大楼(图8(a)、(b))的损坏存在多种原因。观测站大楼早年为两层,砖混结构,带构造柱和圈梁。大楼于1989年开始修建,1993年启用,2003年增加了一层。地震后,第1层完全坍塌。该大楼的损坏可从3个

方面进行分析:1)加层引起的荷载增加;2)施工质量(图8(b));3)基础条件。相对于碎石骨料的穿碎石破坏(图8(c)),卵石的表面光滑,破坏往往沿卵石与砂浆界面发生,影响混凝土强度(图8(d))。虽然《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)等规范未限制卵

石的使用,但是过粗的卵石骨料是导致圈梁与构造柱交接部位破坏的原因之一;汶川地震中也存在卵石骨料过粗引起的挡墙破坏现象(图8(e))。建筑物位于

磨西台地突出的侵蚀残留部位,间冰期右侧冲沟强烈下切形成高度大于100 m、近70°的陡坡,三面临空和松软地基形成的场地效应不利于建筑物抗震(图8(f))。



图8 中国科学院贡嘎山生态高山生态系统观测站大楼损坏分析(点位P2)

Fig. 8 Damage analysis of the office building, Alpine Ecosystem Observation and Experiment Station of Gongga Mountain, Chinese Academic of Sciences

该大楼增加一层是经过技术论证的。因此,粗卵石骨料的使用和不利的场地条件是其震损的主要原因。

王岗坪乡政府大楼(图9)的损坏也与地基条件有关。该楼于2009年修建,5层框架结构,独立基础,位于Ⅷ烈度区,周边结构类似的房屋结构均无损坏。该大楼理论上应该是完好的,其2楼以上梁、柱也的

确完好无损,但是大楼整体轻微倾斜,一楼填充墙也形成了“X”形剪切缝(图9(a)),底层个别柱体混凝土保护层剥落形成开裂现象(图9(b))。该楼的地基为大岗山水电站修建时的施工弃渣,且东侧存在高约5 m的陡坎。地形条件比中国科学院观测站大楼好,但地基条件差,损毁也与场地效应密切相关。



图9 王岗坪乡政府大楼损坏特征

Fig. 9 Damage characteristics of the office building, Wanggangping town

4 灾害特点与防治策略

汶川地震震级大,不但产生规模庞大的地质灾害与堰塞湖^[3-9],形成地表破裂带^[10],而且损毁各种类型的工业与民用结构^[11-13]。相对而言,泸定地震与

芦山地震的震级相当,灾害存在一定类似性,地质灾害以小规模崩塌和浅层滑坡为主^[14-17],没有形成地表破裂带,也没有一定规模的堰塞湖。本次地震中,仅在湾东河支流(大沟,鲜水河断裂通过部位)形成一小型堰塞湖,但是很快溃决,溃决洪水也仅损坏河

口滩地上的建筑物。

相对于芦山地震, 泸定地震区的地形特点是平地资源少、山高坡陡、河谷狭窄, 很多建筑物均位于山坡中部或者狭窄的河滩上。加之本次地震发生在

中午, 因此因落石或浅层滑坡导致的死亡案例占比很大。根据四川省地震局统计(表1), 93名死亡人员中有76名因地灾致死, 其中, 泸定县41名, 石棉县35名, 占比高达81.7%^[2]。

表 1 不同地质灾害类型死亡人数统计

Tab. 1 Statistics of fatalities by various landslide types

地灾致死类型	泸定县		石棉县		合计	
	人数	占比/%	人数	占比/%	人数	占比/%
落石击垮房屋致屋内人员死亡	8	19.5	0	0	8	10.5
落石飞石击伤致死	27	65.9	19	54.3	46	60.5
山体滑坡掩埋致死	6	14.6	15	42.9	21	27.6
山体滑坡掩埋房屋致人死亡	0	0	1	2.9	1	1.3
合计人数	41	100	35	100	76	100

注: 修改自文献[2]。

76名死亡案例中, 与落石有关的占71%, 而与滑坡有关的仅占29%。落石是灾区死亡的主要因素。泸定和石棉两县的灾害死亡各具特点, 泸定县落石死亡案例占绝大多数, 共计35人, 占比85.4%; 石棉县落石致死19人, 占比54.3%。这与前述的地质分析结论一致。泸定县在室内因落石致死高达8人, 石棉县未出现这类案例; 相反, 石棉县位于室内因滑坡致死1人, 而泸定县未出现此类案例。总之, 地质分析结论与死亡案例完全一致。

落石问题是山区地质灾害防控难题, “避”是最经济的防控措施; 公路等级不高是沿线浅层滑坡集中发育的首要原因, 从规范层面提高边坡防护等级是必要的。因此, 对于这类高山峡谷地区, 灾后重建工程中的地震地质灾害防控工作应重点考虑两个方面: 一是, 提高公路边坡的防护等级, 做到逢坡必护, 减少施工扰动; 二是, 房屋选址应力求避开潜在的落石影响区。

5 结 论

基于现场考察, 结合区域地质条件, 对泸定地震灾区的地质灾害孕育、建筑结构损毁和人员伤亡等进行了分析。主要结论如下:

1) 同震地质灾害的上盘效应不突出, 主要分布于烈度Ⅶ度及其以上地区。同震地质灾害规模较小, 以崩塌或落石和浅层滑坡为主, 偶见基岩平面滑动和土体圆弧形滑动。

2) 同震地质灾害形式受地质环境条件控制。泸定县得妥镇以上为干热河谷, 山坡卸荷较强, 风化程度低, 主要灾害形式为落石; 得妥镇以下降雨量相对较大, 山坡卸荷、风化严重, 主要灾害形式为浅层滑坡。

3) 同震地质灾害主要出现在山脊、陡缓坡交接部位或侵蚀沟槽两壁, 以及公路沿线。工程扰动是地质灾害密集分布的促发因素。

4) 建筑结构震损主要出现在Ⅸ度烈度区, 其中磨西镇的震损最为严重。农村自建房屋和老旧建筑施工质量是影响结构抗震能力的主要问题, 同时灾后重建房屋选址需要考虑场地效应影响。

5) 在高山峡谷地区, 公路边坡加固和建筑结构避开落石影响区是降低地震伤亡率的有效措施。

参考文献:

- [1] 四川省地震局. 四川泸定6.8级地震灾害快速评估专报[R]. 成都: 四川省地震局, 2022.
- [2] 四川省地震局. 四川泸定6.8级地震人员伤亡情况初步分析[R]. 成都: 四川省地震局, 2022.
- [3] Xie Heping, Deng Jianhui, Tai Jiajia, et al. Wenchuan large earthquake and post-earthquake reconstruction-related geotechnical problems[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1781-1791. [谢和平, 邓建辉, 台佳佳, 等. 汶川大地震灾害与灾区重建的岩土工程问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1781-1791.]
- [4] Zhao Boming, Xu Xiwei. An analysis on Ms 8.0 Wenchuan earthquake fault and seismic disaster[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 839-854. [赵伯明, 徐锡伟. 汶川 Ms 8.0 地震断层与地震灾害初步分析[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 839-854.]
- [5] Gao Mengtan, Zhou Bengang, Pan Hua. Damage characteristics and enlightenment of disaster prevention of “5·12” Wenchuan earthquake[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2008, 3(3): 209-215. [高孟潭, 周本刚, 潘华. “5·12” 汶川特大地震灾害特点及其防灾启示[J]. *震灾防御技术*, 2008, 3(3): 209-215.]
- [6] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J].

- Journal of Asian Earth Sciences*,2011,40(4):883–895.
- [7] Dai F C,Tu X B,Xu C,et al.Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake,China[J].*Geomorphology*,2011,132(3/4):300–318.
- [8] Xu Chong,Dai Fuchu,Yao Xin.Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides[J].*Science & Technology Review*,2009,27(11):79–81.[许冲,戴福初,姚鑫.汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积[J].*科技导报*,2009,27(11):79–81.]
- [9] Xu Chong,Dai Fuchu,Xu Xiwei.Wenchuan earthquake-induced landslides:An overview[J].*Geological Review*,2010,56(6):860–874.[许冲,戴福初,徐锡伟.汶川地震滑坡灾害研究综述[J].*地质论评*,2010,56(6):860–874.]
- [10] Tai Jijia,Deng Jianhui,Xie Heping,et al.Surface ruptures induced by associated Wenchuan earthquake in Yingxiu and Hongkou area[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(3):109–118.[台佳佳,邓建辉,谢和平,等.汶川大地震中映秀-虹口地区的地表破裂[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(3):109–118.]
- [11] Xie Heping,Tai Jijia,Deng Jianhui,et al.Analysis of damage mechanism of Gaoyuan bridge in Hongkou[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(3):51–55.[谢和平,台佳佳,邓建辉,等.虹口高原大桥的破坏机制分析[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(3):51–55.]
- [12] Li Bixiong,Lei Tao,Deng Jianhui,et al.Investigation on the damage of school buildings during Wenchuan earthquake[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(3):172–179.[李碧雄,雷涛,邓建辉,等.汶川地震中学校建筑震害研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(3):172–179.]
- [13] Li Bixiong,Xie Heping,Wang Zhe,et al.Wenchuan earthquake field reconnaissance and analysis on multi-story masonry structure buildings[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2009,41(4):19–25.[李碧雄,谢和平,王哲,等.汶川地震后多层砌体结构震害调查及分析[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(4):19–25.]
- [14] Xie Heping,Deng Jianhui,Li Bixiong.Investigation of Lushan earthquake disasters and analysis of related problems during post-quake reconstruction in Sichuan[J].*Journal of Earth Sciences and Environment*,2013,35(2):1–7.[谢和平,邓建辉,李碧雄.四川芦山地震灾害调查与灾后重建的相关问题分析[J].*地球科学与环境学报*,2013,35(2):1–7.]
- [15] Zhou Qing,Jiang Yafeng,Wu Guo,et al.Distribution of coseismic landslides in Lushan earthquake and discussion on related problems[J].*Seismology and Geology*,2014,36(2):344–357.[周庆,江亚风,吴果,等.芦山地震崩塌灾害空间分布及相关问题探讨[J].*地震地质*,2014,36(2):344–357.]
- [16] Gao Yanchao,Nan Shuai,Xu Ruge.Classification and study of slope collapse induced by Lushan earthquake[J].*Highway*,2014,59(2):71–76.[高延超,南帅,徐如阁.芦山地震中公路边坡崩塌形成机理分类研究[J].*公路*,2014,59(2):71–76.]
- [17] Zhang Jijia,Li Haibing,Zhao Guohua,et al.Features of secondary mountain hazards triggered by the 2013 Lushan earthquake,Sichuan Province[J].*Geological Bulletin of China*,2015,34(5):898–907.[张佳佳,李海兵,赵国华,等.2013年四川芦山地震次生山地灾害发育规律[J].*地质通报*,2015,34(5):898–907.]
- [18] Cai Xiaoguang,Sun Youwei,Guo Xiaoyun.Statistical analysis of building damage in Ms 7.0 Lushan earthquake[J].*Journal of Natural Disasters*,2015,24(6):112–119.[蔡晓光,孙有为,郭晓云.芦山地震建筑震害统计分析[J].*自然灾害学报*,2015,24(6):112–119.]
- [19] Wang Xin,Fang Chengyong,Tang Xiaochuan,et al.Research on emergency evaluation of landslides induced by the Luding Ms 6.8 earthquake[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2023,48(1):25–35.[王欣,方成勇,唐小川,等.泸定 Ms 6.8地震诱发滑坡应急评价研究[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2023,48(1):25–35.]
- [20] Tie Yongbo,Zhang Xianzheng,Lu Jiayan,et al.Characteristics of geological hazards and its mitigations of the Ms 6.8 earthquake in Luding County,Sichuan Province[J].*Hydrogeology & Engineering Geology*,2022,49(6):1–12.[铁永波,张宪政,卢佳燕,等.四川省泸定县 Ms 6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策[J].*水文地质工程地质*,2022,49(6):1–12.]
- [21] Li Weile,Chen Junyi,Lu Huiyan,et al.Emergency analysis of the impact of the Luding Ms 6.8 earthquake on Hailuoguo Glacier[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2023,48(1):47–57.[李为乐,陈俊伊,陆会燕,等.泸定 Ms 6.8地震对海螺沟冰川的影响应急分析[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2023,48(1):47–57.]
- [22] Han Bingquan,Liu Zhenjiang,Chen Bo,et al.Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding Mw 6.6 earthquake revealed by InSAR observations[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2023,48(1):36–46.[韩炳权,刘振江,陈博,等.2022年泸定 Mw 6.6地震 InSAR同震形变与滑动分布[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2023,48(1):36–46.]
- [23] 唐荣昌,韩渭宾.四川活动断裂与地震[M].北京:地震出版社,1993.
- [24] Dai F C, Lee C F, Deng J H, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China[J]. *Geomorphology*, 2005,65(3/4):205–221.
- [25] Xu Xiwei, Wu Xiyan, Yu Guihua, et al. Seismo-geological signatures for identifying $M \geq 7.0$ earthquake risk areas and

their preliminary application in mainland China[J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(2): 219–275. [徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学

标志及其应用[J]. *地震地质*, 2017, 39(2): 219–275.]

[26] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update[J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167–194.

Characterization Analysis of Triggered Disasters in the Luding Earthquake

DENG Jianhui¹, WEI Xiao^{2,3}, DAI Shigui^{2*}, DENG Hui⁴

(1. Inst. of Geo-Eng and Geohazards, State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610041, China; 3. Shanghai Earthquake Agency, Shanghai 200062, China;

4. College of Earth Sci., Chengdu Univ. of Technol., Chengdu 610059, China)

Abstract: In September 5th 2022, an earthquake measured Ms 6.8 occurred in Hailuoguo scenic spot, Luding County, Sichuan Province, and its intensity at epicenter is IX. Compared with Wenchuan earthquake (Ms 8.0) in 2008 and Lushan earthquake (Ms 7.0) in 2013, its magnitude is smaller. However due to the mountainous topography, the earthquake-triggered geological disasters are highly developed, obstructed traffic lines and caused 118 persons dead or missing. In order to investigate the earthquake-triggered disasters and loss, a 5-days field visit is taken to the affected area of Luding County and Shimian County. Based on the collected data and regional geological information, the analysis is conducted to formulate the development of geological disaster, the damage of civil structures and human fatalities. The major findings can be summarized as follow. 1) The hanging-wall effects of geological disasters are not obvious, which mainly occur in the areas with earthquake intensity of more than VII, and are small in volume and can be categorized mainly as rock fall and gravel/sand/debris slide. The rock planar slide and soil slump can be occasionally witnessed. 2) The landslide types are controlled by geological conditions. The upstream Detuo town in Luding County belongs to the Dadu river valley which is hot and arid, where the slope mass is highly loosened but slightly weathered, and the disaster type is mainly rock fall. However, downstream of the town, the valley is humid, the slope mass is both highly loosened and weathered, and gravel/sand/debris slide is the major failure type. 3) Geological disasters appear mainly in the areas of mountain ridge, intersection of gentle and steep slope, the walls of an erosion gully and highway lines. Engineering disturbance is an enhancing factor for the dense distribution of disasters and human fatalities. 4) Damage of civil structures mainly occurred in the areas with intensity of IX and is most serious in Moxi town. The construction quality of rural self-built houses and old buildings is the main problem affecting the anti-seismic capacity of the structures. The seismic site effect should be considered during post-quake reconstruction. 5) In the region of alpine and deep valley, it is effective to reinforce highway slope and to keep a building site away from the affected zone of possible rock falls, thus to reduce disasters and human fatality.

Key words: Luding earthquake; geological disaster; structure damage; geological condition; site effect; control measure

(编辑 李轶楠)

引用格式: Deng Jianhui, Wei Xiao, Dai Shigui, et al. Characterization analysis of triggered disasters in the luding earthquake[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(1): 117–126. [邓建辉, 韦晓, 戴仕贵, 等. 泸定地震诱发灾害特征分析[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(1): 117–126.]