

文章编号: 1006-6616 (2010) 02-0146-13

都江堰 – 汶川公路汶川地震次生 地质灾害主要特征和形成机理

甘建军^{1,2}, 黄润秋¹, 李前银², 叶晓华², 高文军²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川省地质矿产勘查开发局, 四川 成都 610081)

摘 要: 汶川特大地震发生后, 都江堰至汶川公路两旁次生地质灾害尤为严重, 先后多次完全中断震中交通生命线, 严重地影响了公路的安全运行和灾后重建。通过对汶川地震前后都江堰 – 汶川公路边坡现场调查资料对比分析, 研究了该地段边坡的主要次生地质灾害类型及其破坏模式、形成机制和时空分布特点。破坏类型主要为碎屑流式、碎裂滑移式崩塌和碎裂 – 俯冲式、振荡 – 高速滑移式泥石流等, 造成沿线边坡发生大面积浅表生改造破坏。此类灾害具有丛集性、相关性、分段性的明显特点。成因复杂的高陡岩土体是次生地质灾害的主要物质基础; 强烈的场地地震效应和内外动力耦合作用是该地区地质灾害成生的主要因素。

关键词: 汶川地震; 地质灾害; 都汶公路; 形成机制; 内外动力耦合

中图分类号: P694

文献标识码: A

0 前言

5.12 汶川地震后, 我国学者进行了多方位的研究, 取得了丰硕成果^[1~8]。都江堰至汶川公路 (以下简称都汶公路) 是国道 213 线的一部分, 南起都江堰市, 北至汶川县, 全长 90km, 是国家西部大开发省际通道兰州至磨憨公路的重要组成部分, 是《四川省高速公路网布局规划》中成都至马尔康、成都至兰州高速公路的共用段, 同时也是汶川地震极重灾区的“生命通道”。全线沿岷江河谷展布, 处于川西北盆地与青藏高原的过渡地带, 历史上地震频发, 是全国公路边坡地质灾害最密集、最严重的路段之一。研究震后该路的次生地质灾害可以为其他相似地质背景下的次生地质灾害防治提供借鉴。

1 地质背景

收稿日期: 2010-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 课题“强震作用下斜坡失稳机理及分布规律” (2008CB4 25901) 及国土资源部地灾应急调排查都汶路项目 (20080629) 资助。

作者简介: 甘建军 (1975-), 男, 博士研究生, 现就读于成都理工大学, 主要从事地质灾害防治的研究和实践工作。

E-mail: Sedkj2006@126.com

都汶公路地处著名的 NE~SW 龙门山构造带上,大地构造上属青藏高原东南缘与川西盆地过渡带,地势自东南向西北逐渐升高,由中低山向高山过渡。区内最高点为尖尖山山顶 3370m,最低点为都汶公路与成灌公路接点 721m,地形地貌复杂,山高坡陡,河谷深切,相对高差在 300~2500m 不等。公路以 NE 向映秀-北川断裂西南端和 NNE~NE 向茂汶断裂西南端为界,分为三段:北段汶川县城至绵虬镇羊店间的 18km 为构造侵蚀深切切割的高中山地貌,中段绵虬镇羊店至映秀镇倒流坡间的 47km 为构造侵蚀中山地貌,南段映秀镇倒流坡至都江堰市间的 35km 主要为中低山地貌类型。区内地震断裂带极为发育,龙门山三大主断裂带^[9]都发育其中,茂汶断裂与都汶公路北段相伴而行,走向基本一致;彭灌复背斜构造、中央断裂带(映秀-北川断裂)与公路中段交叉;南段彭灌断裂与公路相交。

区内山势陡峭,植被较少,谷坡呈陡缓交替的阶梯状。岷江是研究区内的主要水系,该江流河谷深切,水流湍急,支沟纵横,大体呈“之”字型分布,两岸分布 II~III 级堆积侵蚀阶地平台,缓坡及斜坡,地势略开阔、宽缓,局部为陡崖。区内地下水主要为构造裂隙水。

沿线出露的地层除奥陶系、志留系大部缺失外,其余比较完整。沿都汶路由北向南地层出露依次是:汶川-绵虬镇羊店段的泥盆系月里寨群(D_{2y})和元古宇黄水河群(Pt_{hn})的千枚岩、石英砂岩夹结晶灰岩;绵虬镇羊店-映秀镇倒流坡段的元古宙晋宁-一激江期的黑云母花岗岩、斜长花岗岩等侵入岩;映秀镇-都江堰段的三叠系须家河组(T_{3x})的岩屑、石英砂岩与泥页岩互层。沿线出露的新生界有中更新统(Q_2)和全新统(Q_4),主要分布于都江堰市附近沿线的岷江河谷两岸,构成多级河漫滩阶地,不整合于下伏基岩之上,河谷两岸大致分为五级阶地,多为砂砾石、亚粘土、亚砂土、块石土构成(图 1)。

2 震前边坡主要破坏类型及形成机制

四川省地矿局 909 水文地质工程地质队、四川省地矿局广汉勘察院、四川省地质调查院在震前先后对汶川县、都江堰市进行了地质灾害调查与区划工作,根据震前调查,都汶公路两侧边坡主要的破坏类型有泥石流(40 处)、滑坡(26 处)和崩塌(8 处)^{①②③}。

2.1 泥石流

震前都汶公路沿线泥石流数量占地质灾害总数的 54.1%。主要发育于岷江紫坪铺至汶川段两旁及其支沟处。山高、坡陡、谷深、沟床纵坡大,是区内产生泥石流的地形因素。狭小地域暴雨频繁,雨量集中,是泥石流产生的水动力条件。崩塌、滑坡产生破碎岩石,沟谷中堆积的洪积物和坡积物,公路、矿山的废弃土石是泥石流的重要物源。据调查^{②③},震前泥石流主要为沟谷型稀性泥石流,分布频率达 1 处/2km。磨子沟泥石流、一碗水沟泥石流、红椿沟泥石流、刘家沟泥石流、安甲沟泥石流、登溪沟泥石流、新桥沟泥石流、郭竹铺泥石流、三官庙泥石流、千金沟泥石流等处于发育期,受降雨、人类工程活动等外因影响,边坡内部失稳,松散物质以泥石流方式滑向沟谷,多呈扇状分布(图 2)。

① 四川省地矿局 909 水文地质工程地质队、四川省阿坝州区域环境地质调查报告 [R]. 1999.

② 广汉市地质工程勘察院. 汶川县地质灾害调查与区划 [R]. 成都. 2004.

③ 四川省地质调查院. 《四川省都江堰市地质灾害(补充)调查与区划报告》[R]. 2007.

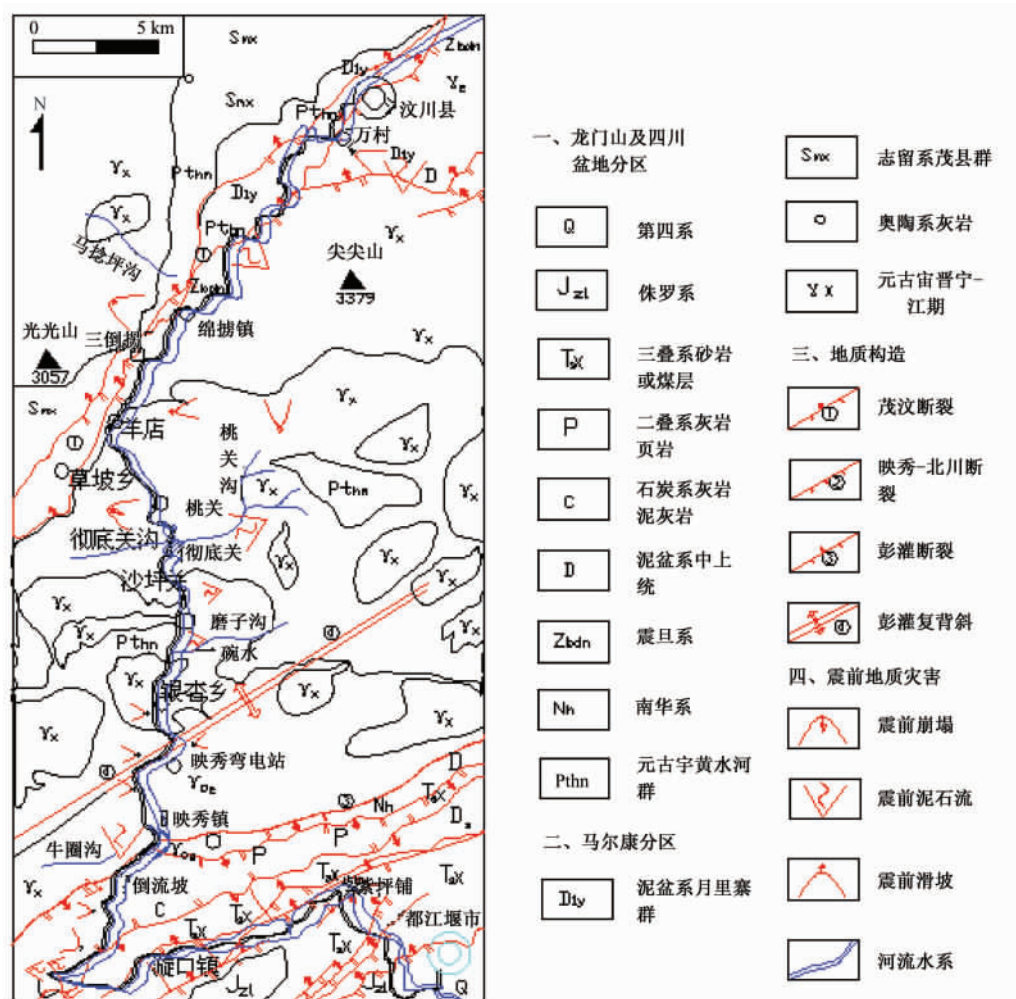


图1 都汶公路地质构造略图

Fig. 1 A map showing the regional geology along the Dujiangyan-Wenchuan highway

2.2 滑坡

研究区内震前滑坡占整个地质灾害的 35.1%，分布频率为约为 3 处/10km。主要发育于公路两侧的河谷岸坡的下段或缓坡地段，据现场调查^{②③}，滑坡多发育于崩坡积体中，破坏模式为以牵引式滑坡为主，其特点是边坡在自身重力的带动下，滑坡后缘拉裂出现了张性裂缝；推移式滑坡次之，主要特点是滑坡后缘裂缝呈压性或有鼓丘。按物质组成划分以土质滑坡为主，仅有少量岩质滑坡和碎块石滑坡。按厚度分，以浅层小于 10m 的滑坡为主，深层滑坡较少。在天然状态下，大多数滑坡为稳定状态。其中万村滑坡、三倒拐滑坡、埃都滑坡、赵家坪滑坡、怀抱石滑坡、南沟左岸滑坡、绵鹿桥头危岩、龙口不稳定斜坡、纸厂沟 1 号滑坡、青土山滑坡等 10 处震前稳定性较差，危害性较强。其余滑坡规模较小，或处于衰退期，只有在人类工程活动影响下，才可能诱发滑坡活动（图 3）。

2.3 崩塌

都汶公路沿线震前崩塌数量不多，多为小型土质崩塌，分布于映秀镇-绵鹿镇公路段附近的陡地段高陡临空面。斜坡坡度一般在 60°以上，以陡壁、陡坎为主，岩体裂隙发育，抗



图2 磨子沟典型沟谷型稀性泥石流

Fig. 2 Typical valley-shape diluted debris flow in Mozigou



图3 纸厂沟典型牵引式土质滑坡

Fig. 3 Typical slumping mud slides in Zichanggou

风化能力弱,岩体破碎,完整性较差,岩性以闪长岩、花岗岩为主。主要是由于修筑公路、采矿和房屋建筑场平削坡形成,其中边坡后缘临空面所夹块石经重力卸荷成为危岩,当受暴雨作用或受风化作用,土体以崩落的形式变形破坏。破坏的典型形式是撒落式崩塌,其特点是,边坡坡度较陡,后缘临空,在风化作用或重力因素影响下,后缘岩土体拉裂,边坡中上部岩土体自由撒落到坡底。

3 震后边坡主要破坏类型及分布特征

根据震后次生地质灾害调查^④,都汶公路次生地质灾害 134 处,主要类型为崩塌,其次是滑坡和泥石流。

3.1 崩塌

震后都汶公路崩塌 112 处,占总数的 83.58%,沿线平均分布超过 1 处/km,其中映秀镇倒流坡至绵虬镇羊店沿线分布最高,达 5 处/2km。崩塌绝大多数为基岩崩塌,所在斜坡坡度一般 45°以上,占总数的 97.32%,碎屑流式崩塌为主,占总数的 75.0%;其次是碎裂滑移式崩塌,占总数的 22.32%。特大型、大型、中型和小型的崩塌分别占总数的 0.9%、12.5%、34.8% 和 51.8%。基本稳定的占总数的 0.9%、不稳定的崩塌占总数的 99.1%。

(1) 碎屑流式崩塌。斜坡上的松散碎屑物质在地震作用下松动失稳,在重力作用下沿斜坡崩塌下滑。其特点是:一般发育于坡陡(45°以上),规模大的斜坡,出露基岩闪长岩、花岗岩,表层覆盖 2~10m 的第四系碎裂松散堆积物;往往是崩塌成群发育,碎屑物均匀度高,以土体为主,崩积体呈锥形分布,坡底有少量碎块石,碎屑物下滑时伴随大量粉尘起扬(图 4)。

(2) 碎裂滑移式崩塌。斜坡上的浅表岩土体在地震作用下碎裂失稳,在重力作用下沿斜坡崩塌下滑。其特点是:崩积体多不规则形,一般发育在坡体中下部,在斜坡中上部往往

^④ 四川省地质矿产勘查开发局,成都理工大学,四川省地质环境监测总站,四川省国土资源厅. 国道 213 线都江堰至汶川公路抢通保通工程地质灾害应急调查报告 [R]. 2008.

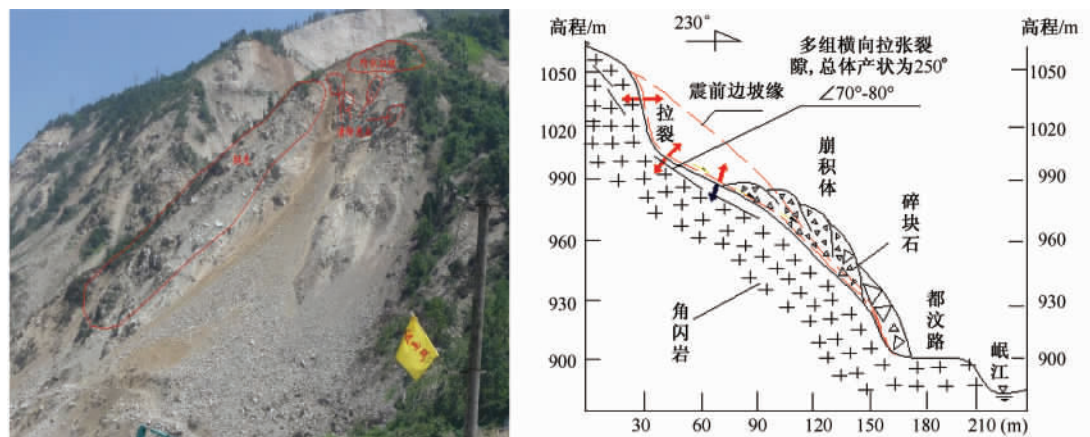


图4 茅草坡碎屑流式崩塌及其剖面示意图

Fig. 4 Typical debris flow to collapse and its sketch profile in Maocaopo

有残留体, 坡的后缘有3组以上拉裂的贯通裂隙, 崩塌斜坡后缘多形成临空面; 在地震或降雨作用下, 极易崩落; 崩塌体夹杂大量的碎块石, 大多以滚落、抛射的方式散堆在坡底, 或堆积在公路面, 坡面夹杂少量碎屑物质呈锥体状堆积 (图5)。



图5 响水岩碎裂滑移式崩塌

Fig. 5 Typical cataclastic rocks to collapse in Xiangshuiyan

3.2 滑坡

震后滑坡12处, 占总数的8.9%, 全为浅表土体滑坡, 受地震影响, 滑坡均为不稳定斜坡, 牵引式滑坡和推移式滑坡分别占滑坡总数的83.33%和16.67%, 小型滑坡占滑坡总数83.33%, 中型滑坡占总数的16.67%, 无大型 (体积大于100万 m^3) 和特大型滑坡 (体积大于1000万 m^3)。发生滑坡的坡度一般为 $35^\circ \sim 45^\circ$, 后缘相对平缓, 出露基岩砂岩、灰岩或泥岩, 坡体前缘较陡, 滑层土为砂岩形成的块石夹杂大量的碎屑土, 滑坡平面呈舌状^[10]。

3.3 泥石流

由于研究区地形地貌复杂, 山高坡陡, 河谷深切, 人类工程活动强烈, 地震使斜坡浅表

岩土体结构松散，使震后进入雨季后泥石流大量发育。主要有两种破坏类型：

(1) 碎裂－俯冲式泥石流。主要特征是斜坡高陡，岩土体受地震作用影响碎裂，崩塌体在暴雨后受重力影响，在物源丰富、沟谷平直地区，直接以俯冲形式冲到坡底，淹没公路，堵塞岷江。如磨子沟流域为高山峡谷地貌，沟底与沟旁山顶相对高差最大达 2579m，两岸斜坡坡度在 45° 以上，岩石裸露，生态脆弱，沟床坡度也在 25° 以上，在 2008 年 7 月 14～15 日和 7 月 20～21 日以及 8 月 6～7 日的强降雨后暴发的泥石流，多次中断都汶高速公路并冲入岷江（图 6）。

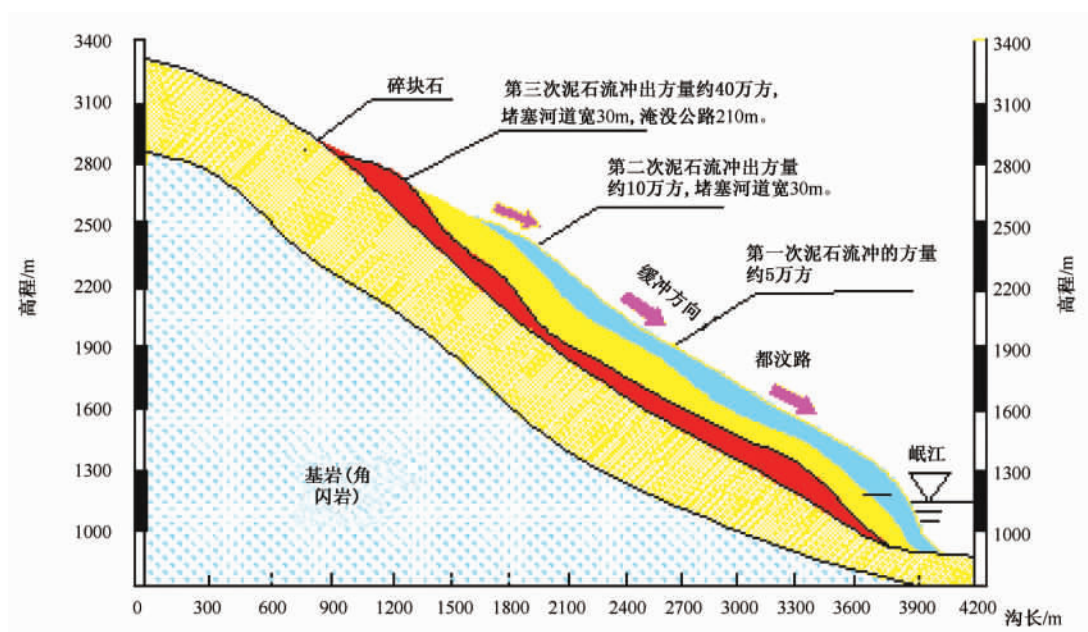


图 6 磨子沟典型碎裂－俯冲式破坏模型

Fig. 6 Failure mode for cataclasite-subduction type debris flow in Mozigou

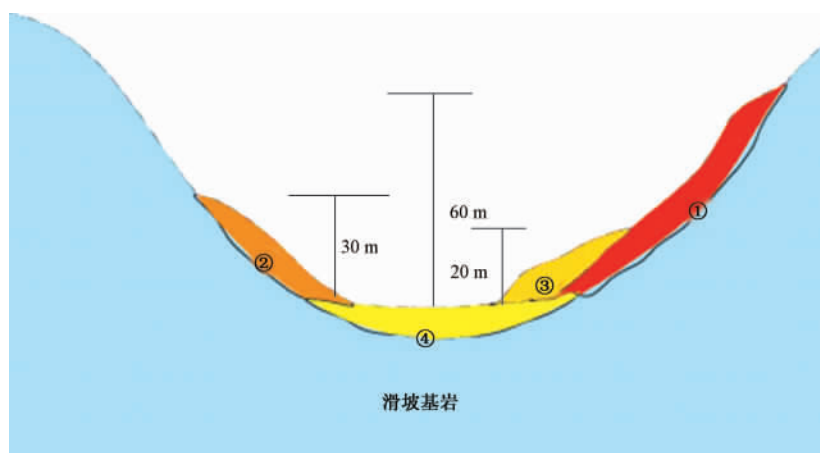


图 7 牛圈沟上游何家山振荡－高速滑移式泥石流模型

Fig. 7 A oscillations high speed slippage model for mudslides in Niuquangou

①第一个弯道碎屑流爬坡区；②第二个弯道碎屑流爬坡区；③第三个弯道碎屑流爬坡区；④冲积物滑床。

(2) 振荡-高速滑移式泥石流。其特点是斜坡浅表层岩土体在地震作用下呈碎屑化,并在强烈地震力的作用下高速下滑,当遇到沟谷弯道时,碎石发生反复爬坡振荡的现象。主要发育于边坡坡度在 45° 以上,支沟较长,弯道3个以上,距震中较近的沟谷地带。崩塌体在地震强烈作用下,碎屑流高速下滑,在沟谷反复冲高震荡,破坏力极强,所到之处植被悉数卷走,坡的中下部地表严重破坏。如牛圈沟上游何家山地带在地震时山体发生强烈破坏,大量岩体突然爆出形成高速运动的滑坡和碎屑流,伴生了骇人的巨大声响和遮天避日的大量尘土,其物质在2~3秒钟后冲出莲花芯支沟,时速高达 10m/s ,滑移距离为 2.5km 左右,碎屑流首先冲向右岸第一弯道爬坡区,爬高约 60m ,然后转向冲向左岸第二个弯道爬坡区,爬高约 30m ,又转向冲向右岸第三个弯道爬坡区,爬高约 20m ,再以冲积物滑床形式,顺沟谷冲到沟口,形成堰塞湖^④(图7)。

4 都汶公路地震次生地质灾害形成的时空分析

4.1 都汶公路次生地质灾害的空间分布特征

震前次生地质灾害主要分布在海拔 $1000\sim 1800\text{m}$ 之间,坡度 $25\sim 30^{\circ}$ 的斜坡上,尤其是复杂的地质构造、断层、褶皱附近,人类工程活动剧烈的威州镇(13处)、绵虬镇(12处)、漩口镇(7处)、草坡乡(5处)、银杏乡(5处)、映秀镇(2处)等公路段沿线地质灾害发育较多。

震后,都汶公路次生地质灾害在局部平面分布上具有丛集性、相关性、分段性的显著特点。

丛集性:都汶公路全长 90km ,发育各类次生地质灾害134处,即相当于每 2km 就有3处崩、滑、流次生地质灾害点(群)。其中,映秀镇倒流坡至绵虬镇羊店地段分布最为集中,公路段长度仅 28km ,次生地质灾害却达93处,相当于公路每 2km 就有6处,其密集性在全国高速公路中都极为罕见。

相关性:都汶公路次生地质灾害在垂直空间分布上与地形地貌、地层岩性、地质构造、地震烈度、降雨、人类工程活动程度和次生地质灾害发育历史有对应关系。坡高 50m 以上,坡度 60° 以上,出露岩层为闪长岩、角闪岩或泥岩,处于茂汶断裂、映秀-北川断裂带、彭灌覆背斜两旁 5km 范围内,地震烈度 IX 度区域以上,人类工程活动剧烈的区域,次生地质灾害发育较多。北段汶川县城附近因人类工程活动强烈,次生地质灾害发育较多,中段高中山地貌发育极多,而南段中低山地貌区,次生地质灾害发育较少。

分段性:本次研究采用模糊综合评判法,对区内次生地质灾害易发性综合评判,选择了基本因素、控制因素、诱发因素3个层面的8个二级因子,13个三级因子构成的综合评价指标体系,使用专家确定各指标的权重,即:1)地形地貌(0.2);2)地层岩性(0.15);3)构造与地震(0.2);4)大气降雨(0.2);5)不合理人类工程活动(0.1);6)次生地质灾害数量比(0.05);7)次生地质灾害面积模比(0.05);8)次生地质灾害体积模比(0.05)。在1:5万数字化地图上进行 $500\text{m}\times 500\text{m}$ 单元划分计算,评出极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区4个区段。 I_1 区:次生地质灾害极高易发区段,位于映秀镇倒流坡-绵虬镇羊店之间。全长约 31km ,发育崩塌群79处,滑坡群5处,泥石流9条。该区段各种类型次生地质灾害极为发育,所有特大型次生地质灾害、大部分大型次生地质灾害此区发育。 I_2 区:次生地质灾害高易发区段,位于汶川-绵虬镇羊店之间。全长约 28km ,



图8 都江堰－汶川公路次生地质灾害分布图

Fig. 8 A map showing distribution of geo-hazards along the section from Dujiangyan-Wengchuan Highway

发育崩塌群 20 处, 滑坡群 3 处, 泥石流 1 条。该区段以大中型次生地质灾害为主。I₃ 区: 次生地质灾害中易发区段, 位于紫坪铺—映秀倒流坡之间。全长约 27km, 发育小崩塌 13 处, 小滑坡 4 处。I₄ 区: 次生地质灾害低易发区段, 位于都江堰—紫平铺之间。全长约 4km, 丘陵平坝地形, 次生地质灾害不发育 (图 8)。

4.2 都汶公路次生地质灾害的时间分布特征

降雨是诱发次生地质灾害的主要因素, 区内降雨呈集中分布, 主要分布在每年的 5~10 月, 占年降雨量的 80% 以上。在此期间, 暴雨日数明显增多, 洪水期与雨季同步, 大量的降雨入渗、浸润, 软化岩土体, 降低斜坡的稳定性。根据近 10 年野外调查和统计分析可以看出, 几乎所有的泥石流暴发均与暴雨及长时间降水有关, 崩塌、滑坡等地质灾害也多集中在 5~11 月 (图 9)。

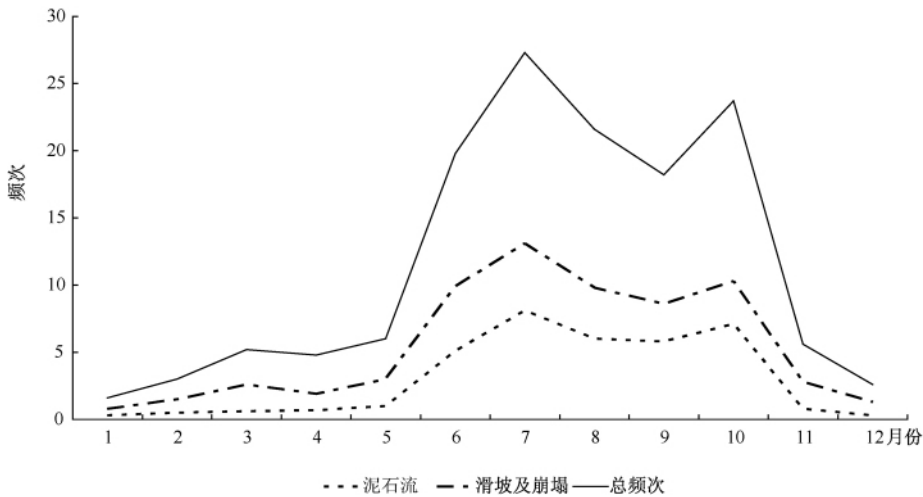


图 9 都汶路次生地质灾害年内分布曲线图

Fig. 9 Distribution curve of geo-hazards along the Dujiangyan-Wenchuan Highway in the year

都汶公路沿线次生地质灾害最早记录出现在《直隶理书厅志》中, 1858 年, 秋午夜, 汶川山洪水发, 对岸岩山亦崩险, 江流由此至灌县 (今都江堰市), 浑浊数年。1933 年 8 月 25 日, 岷江叠溪地震山崩, 壅江, 形成大小海子 (堰塞湖), 坝高百余米, 10 月 9 日夜小海子溃坝, 沿江民田、房屋漂没无存, 都江堰堰首工程全毁。1958 年~1962 年, 汶川草坡滑坡中断公路交通。1961 年 7 月 6 日, 暴雨后的七盘沟泥石流冲毁公路 150m, 桥梁 1 座, 断道 15 天; 1978 年 7 月 15 日七盘沟泥石流再次复发, 冲毁林区公路 4km, 桥 5 座。1963 年, 杂谷脑滑坡将公路中断。1982 年 5 月, 汶川周仓坪滑坡中断公路。1984 年 7 月 12 日, 汶川草地坡泥石流死 3 人, 冲毁 17 座便桥、1 座小水电站和耕地 480 亩。1987 年 7 月、都汶公路因为崩塌中断公路 40 天, 1990 年 8 月和 9 月, 暴雨型泥石流中断公路, 死 10 人, 冲毁民房 125 间, 作物受灾面积 2300 亩^[11]。

1990 年, 由于汶川县城附近工程建设力度加大, 都汶公路次生地质灾害发育有 46 处, 主要在威州镇附近。2000 年, 人类工程活动较少, 都汶路沿线发育次生地质灾害 18 处, 主要在草坡村附近的地段。2005 年, 由于新修成都汶高速公路, 加上汛期降雨量增大, 次生地质灾害发育又增长到 40 处。到 2008 年地震后, 次生地质灾害猛增到 134 处, 其中崩塌成为了主要次生地质灾害。到 2010 年, 略有下降 (图 10)。

5 都汶公路次生地质灾害的动力成因

都汶公路所处区域经历了碰撞造山、褶皱造山和推覆构造山 3 个发展阶段，它的演变是扬子地台与青藏高原演化过程的综合产物。从地貌上看，由南向北由川西盆地、中低山、高中山到高山地貌演变。从构造上看，区内不仅有茂汶、映秀－北川、彭灌等 3 大断裂，而且伴随发育有 NE-SW 向正河推覆褶皱构造带、NE 向茂汶－耿达韧性褶皱推覆构造带、NE 和 SW 向延伸映秀－白水河韧性冲断推覆构造带、NE-SW 向彭灌脆性冲断推覆构造带，以上 4 大推覆构造带组成一个大的叠瓦构造带^[12]。（图 11A）

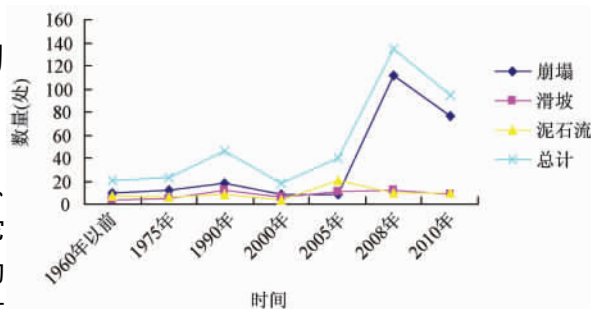


图 10 都汶路次生地质灾害发育时间图

Fig. 10 Temporal distribution of geological hazards in Dujiangyan-Wenchuan Highway

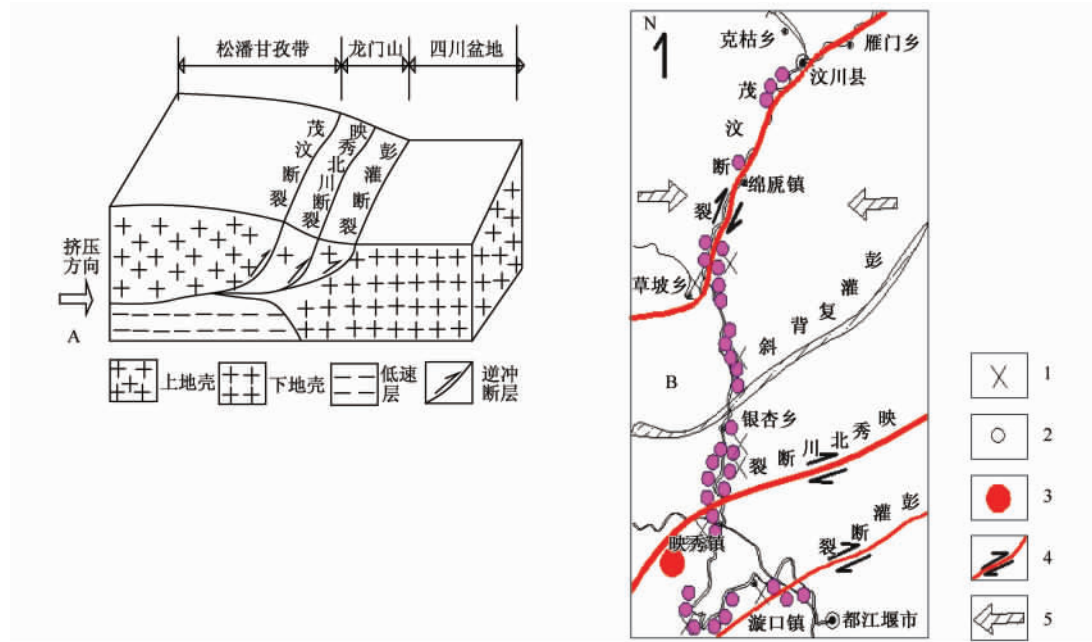


图 11 都汶公路构造力作用示意图

Fig. 11 A diagram of geodynamic cause of Wenchuan earthquake along Dujiangyan-Wenchuan Highway

A 图：叠瓦状剖面示意图 B 图：次生地质灾害与活动断裂关系图

1. 地表破裂缝；2. 都汶公路次生地质灾害点；3. 汶川特大地震震中；
4. 东西向挤压导致的剪切力偶及断层走向；5. 汶川特大地震东西向挤压

“5.12”汶川地震中，都汶公路次生地质灾害的广泛发育与区内地震构造活动紧密相关。次生地质灾害分别受彭灌断裂（前山断裂）、映秀－北川断裂（中央断裂）、茂汶断裂（后山断裂）3 条主断裂控制。汶川地震为典型的构造地震，震中映秀镇位于龙门山构造中央断裂映秀－北川断裂与都汶公路交汇点附近^[13]。地震不仅新增次生地质灾害，而且使原有次生地质灾害点出现复活。“5.12”汶川地震使都汶公路地质灾害比震前（2005 年）新

增 56 处, 复活 28 处 (图 11B)。

内动力和外动力是都汶公路次生地质灾害形成过程中不可或缺的两类作用的耦合, 其表现形式主要包括地质构造与造山运动的耦合、活动断裂与地震力作用的耦合、地形地貌与地震力的耦合、岩土体结构与斜坡变形破坏模式的耦合等。根据野外实地观测、DEM 数据和卫星遥感影像的分析^[14], 发现都汶公路汶川特大地震次生地质灾害受以上耦合作用影响, 表现如下几个不同的明显特征:

(1) 地震裂度效应。将都汶公路的次生地质灾害密度图与地震烈度分区图进行叠加 (图 8) 可见, 总的来说裂度越高地质灾害点分布密度也越大。次生地质灾害极高易发区集中分布在 X 度、XI 度裂度区。3 处特大型和 16 处大型次生地质灾害点均发生在 X 度、XI 度烈度区, 其次生地质灾害数量占沿线次生地质灾害总量的 69.4%, 表明地震裂度区越大, 地震波对坡体的冲击作用越为强烈, 就越容易触发大型以上的次生地质灾害。

(2) 错列和转折部位效应。将都汶公路的次生地质灾害分布图与地层断裂、公路走向、河流走向相叠加 (图 8、图 11B), 可见, 研究区域内地质灾害集中分布不仅与地层断裂和地震裂度有关, 而且在断裂带与公路线、河道相交或转折部位密切相关, 尤其在茂汶断裂与公路羊店段转折处、彭灌复背斜与公路银杏段错列处、映秀-北川断裂与公路映秀镇段错列处、岷江漩口拐弯段与彭灌断裂错列处, 次生地质灾害尤为集中, 更是对应了内动力和外动力耦合作用在这些“锁固段”的强烈表现, 这些断裂与地形地貌的错列和转折部位在地震过程中, 由于断层整体的错动而被进一步的剪断、破裂, 从而释放出更多的能量, 产生局部更为强烈的震动, 形成次生地质灾害的集中发育区。

(3) 岩性与坡高效应。研究区岩性可以概括为覆盖层、千枚岩夹结晶灰岩、闪长岩和角闪岩、砂砾岩和泥岩等 4 大类, 将次生地质灾害类型与岩性图层进行空间统计分析 (表 1), 可见地震次生地质灾害在各类岩层中均有发育, 但角闪岩和闪长岩等硬岩地层中次生地质灾害更为发育, 砂板岩和泥页岩、千枚岩夹结晶灰岩等软岩次之。都汶公路岩性地层中通常发生的是崩塌, 而滑坡全部发生在覆盖土层中。主要由于硬岩受地震力作用更易于碎裂, 引起崩塌, 而软岩有一定的“减压”作用。

表 1 次生地质灾害分布与地层岩性的关系

Table 1 Relation between geo-hazard distribution and formation lithology

地层岩性	崩塌 (处)	滑坡 (处)	合计 (处)
覆盖土层	2	12	14
千枚岩夹结晶灰岩	8	0	8
闪长岩、角闪岩	81	0	81
砂板岩、泥页岩	21	0	21
合 计	112	12	124

6 结论

本文对都汶公路沿线地震次生地质灾害的变形机制和动力特征进行了初步研究, 对地震诱发次生地质灾害及隐患进行了系统分析, 认为都汶公路沿线次生地质灾害点共有 134 处, 严重威胁公路的正常运行, 并提出了 4 点认识供借鉴。

(1) 区内地震次生地质灾害具有区域上的差异性, 形成空间分布上的丛集性、相关性和分段性特征, 这些特征是地质灾害形成条件和影响因素控制或影响的结果。

(2) 影响和控制次生地质灾害发育的因素是多方面的, 而成因复杂的岩土体是次生地质灾害的物质基础, 这与地形地貌、地质构造、地层岩性、人类工程活动等自然和人为因素密切相关。

(3) 内动力(地震等)和外动力(降雨、人类工程活动等)的耦合作用是地震次生地质灾害的动力来源, 二者交叉反复作用于岩土体, 使次生地质灾害表现了碎屑流式崩塌、碎裂滑移式崩塌和碎裂-俯冲式泥石流、振荡-高速滑移式泥石流等显著特点。

(4) 受耦合作用影响, 都汶公路地震次生地质灾害表现出地震烈度效应、错位与转折点效应、岩性与坡高效应。次生灾害点主要发育于受力明显的上盘(或下盘)、X度和XI度烈度区和地层断裂与公路走向、河流走向相错列或转折部位, 在硬岩、坡高50~200m、坡度50~80°的斜坡上地震次生地质灾害发育较为集中。

参 考 文 献

- [1] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 97~108.
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress Monitoring Station [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 97~108.
- [2] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川5.12地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 109~116.
ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geo-hazards in Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 109~116.
- [3] 王连捷, 周春景, 孙东生, 等. 汶川5.12地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (3): 193~200.
WANG Lian-jie, ZHOU Chun-jing, SUN Dong-sheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (3): 193~200.
- [4] 王连捷, 崔军文, 周春景, 等. 汶川5.12地震发震机理的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 105~113.
WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHOU Chun-jing, et al. Numerical modeling for Wenchuan earthquake mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 105~113.
- [5] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 114~130.
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 114~130.
- [6] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 131~141.
ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 131~141.
- [7] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5.12”汶川 M_s 8.0大地震后我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 142~150.
TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WU Shu-ren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after M_s 8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 142~150.
- [8] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 151~161.
YAO Xin, ZHANG Yong-shuang. Co-seismic deformation of 5.12 Wenchuan earthquake based on D-INSAR [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 151~161.

- [9] Masami SAITO; Tohru ARAYA and Futoshi NAKAMURA. Sediment Production and Storage Processes Associated with Earthquake-induced Landslides in Okushiri Island, 1993. *Sabo Gakkaishi*-47 (6).
- [10] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (1): 19 ~ 28.
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17 (1): 19 ~ 28.
- [11] 四川省地方志编纂委员会. 四川省志·地质志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
The Editorial Committee of annals of local history of Sichuan Province. *Local History and Geology of Sichuan Province* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998.
- [12] 四川省地矿局. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. *Regional geology of Sichuan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [13] 许强, 黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (6): 721 ~ 729.
XU Qiang, HUANG Run-qiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16 (6): 721 ~ 729.
- [14] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
HUANG Run-qiu. *Study on geological Hazards in Wenchuan earthquake* [M]. Beijing: Science Press, 2009.

FORMATION MECHANISM OF GEO-HAZARDS TRIGGERED BY WENCHUA $M_s8.0$ EARTHQUAKE ALONG DUJIANGYAN-WENCHUAN HIGHWAY

GAN Jian-jun^{1,2}, HUANG Run-qiu¹, LI Qian-yin², YE Xiao-hua², GAO Wen-jun²

(1. State key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: The geological hazards induced by the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake along the Dujiangyan-Wenchuan Highway are especially severe and have seriously affected the safe riding along the highway and the reconstructions. In order to prevent and reduce disasters effectively, main geo-hazard type, slope failure modes and its formation mechanism, and the tempo-spatial distribution in the area have been studied on the basis of the field investigations and statistic analysis of available data. The main damage types include debris flow to collapse, cataclastic rocks to collapse, and shatter-subduction type mudslides, oscillation high-speed sliding debris flows along the slope area. Born transformation induced by such disasters have intensive, systematic and subsection characteristic. Thegeologic hazards have many types and are notably divided into sectors; the high and steep rock deposits of complex origin become the main materials of geological hazards; intense earthquake effect and coupling of endogenic and exogenic forces are important factors for formation and occurrence of geological hazards in the area.

Key words: Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; geological hazard; Dujiangyan to Wenchuan Highway; formation mechanism; coupling of endogenic and exogenic dynamic force