

# 芦山地震中 G318 线天全段崩塌发育规律

高延超<sup>1,2</sup> 陈宁生<sup>2</sup> 徐如阁<sup>1</sup> 巴仁基<sup>1</sup> 南 帅<sup>3</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 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;  
3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘 要:** G318 线天全段处于深切峡谷区, 在“4·20”芦山地震中共发生 26 处崩塌。该段崩塌仅有 2 处为地震中新增点, 其余 24 处均为原崩塌点在地震中重新崩落。通过对崩塌的空间分布、与地震烈度、发震断裂、岩性及坡度的关系等方面的分析, 总结芦山地震公路边坡崩塌的发育规律如下: 1. 崩塌规模以中小型为主; 2. 由Ⅶ度带到非地震影响区, 随着地震烈度的降低, 崩塌的规模减小、密度降低; 3. 崩塌分布表现出明显的“上下盘效应”, 双石-大川断裂上盘的崩塌分布密度约为下盘的 2 倍; 4. 崩塌在花岗岩及砂岩中多发; 5. 地貌及人类工程活动是崩塌发育的主控因素, 地震是其重要诱发因素。震后崩塌具有隐蔽性及滞后性, 在余震及强降雨条件下, 区内“震裂岩体”变形加剧, 公路沿线崩塌将进入高发期。

**关键词:** 崩塌; 芦山地震; G318 线; 天全

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

据中国地震台网测定, 北京时间 2013-04-20T08:02 四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)发生了 Ms7.0 级强烈地震(简称“4·20”芦山地震)。这次地震是继 2008-05-12 汶川 Ms8.0 级强烈地震之后在龙门山断裂带上发生的又一次灾害性地震事件<sup>[1-2]</sup>。本次地震震源深度 12.3 km, 震中烈度达Ⅸ度<sup>[3]</sup>。截至 2013-04-24T18:00, 地震共造成四川省 200 多万人受灾, 196 人遇难, 21 人失踪, 13 484 人受伤<sup>[4]</sup>。

地震对影响区内的交通干线破坏尤其严重, 地震诱发的次生山地灾害在震后的几年之内仍会不断的给交通带来威胁。“5·12”汶川地震中仅在四川省就有 21 条高速公路、16 条国道省干线公路等结构物遭到不同程度损毁<sup>[5]</sup>, 主要包括桥梁被掩埋、梁体塌落、移位和损毁、墩柱损毁、隧道洞口被埋没、洞门结构被击损、砸坏, 路基被堵塞、掩埋, 路面被砸坏, 挡墙(护面墙)被冲击砸坏等<sup>[6]</sup>。

国内外关于地震诱发崩塌的研究较多<sup>[7-8]</sup>。汶

川地震后, 成良霞、苏生瑞等学者以映秀至卧龙公路沿线震后公路边坡崩塌为研究对象, 分析震后公路边坡崩塌的形成机理, 通过空间分布、崩塌与物质组成、岩性、失稳斜坡坡度、坡高、坡形、坡向等方面的分析, 得到了汶川地震震后崩塌灾害的发育规律<sup>[9-10]</sup>。谢洪等指出汶川地震次生山地灾害主要沿龙门山地震断裂带集中分布和沿河谷两岸山坡分布, 并全面分析了次生山地灾害特点<sup>[11]</sup>。庄建琦等以都江堰至汶川公路沿线为研究对象, 利用遥感影像解译和野外调查数据, 探讨了都汶公路沿线地震崩塌滑坡分布规律, 指出坡度和坡面粗糙度是影响地震崩塌滑坡的关键因子, 其次是距主断层距离和土地利用, 坡向和地层岩性对地震崩塌滑坡的贡献程度较小<sup>[12]</sup>。

G318 线是通往西藏的咽喉要道, 在政治、军事上具有极其重要的战略地位, 也是“4·20”芦山地震重灾区中等级最高的公路。在天全县内全线为山岭重丘区二级公路, 交通量约为 8 000 辆/d, 路线全

收稿日期(Received date): 2013-06-28; 改回日期(Accepted): 2013-07-22。

基金项目(Foundation item): 科技部基础研究专项(2011FY110100)。[This research is supported by the Basic Research Project from Ministry of Science and Technology(2011FY110100).]

作者简介(Biography): 高延超(1981-), 男, 河北保定人, 在职博士, 工程师, 主要从事滑坡泥石流防治研究和工程勘查设计。[Gao Yanchao (1981-), male, engineer, majoring in the research about the mountain hazards and their prevention.] E-mail: gaoyc@imde.ac.cn

长 91.194 km。该段为崩塌高易发区,据不完全统计,仅 2009—2013 年 5 月间国家级媒体报道的因塌方导致 G318 线中断就达 14 次,如冒水孔、风吹林等地均是多次堵断交通。

笔者于 2013-04-21—05-01,按中国地质调查局统一部署,对 G318 线天全段地质灾害进行了详细调查。该段地质灾害隐患点共 31 处,其中 26 处为崩塌。本文通过分析崩塌特征及其对“4·20”芦山地震的响应,来判别公路沿线崩塌多发的控制及影响因素,预测震后崩塌的发展趋势,以期为后续的工程建设提供依据。

## 1 研究区概括

### 1.1 地貌

G318 线天全段地势西高东低,总体沿天全河的河谷展布。最高点二郎山隧道口海拔 2 182 m,最低点多功坝海拔 634 m,线路平均比降 17‰。区内山顶较平坦,两翼陡峭,冲沟切割较深。公路沿线斜坡高程 700~3 500 m,相对高度 800~1 200 m,坡度 25°~60°,人工开挖岩质边坡的坡度近乎直立。沿线地貌可分为低山平坝区及中山峡谷区。在城厢镇及始阳镇、多功乡一带为低山平坝区,主要是由河流冲积形成的河漫滩或山前洪积扇堆积而成,占线路全长的 22%;其余线路均位于中山峡谷区,占全长的 78%。

### 1.2 地质构造

G318 线天全段主要受两组断裂的影响,分别为北东向的双石—大川断裂及北西向的青龙断裂。双石—大川断裂为“4·20”芦山地震的发震断裂,属于龙门山断裂带中彭县—灌县断裂的西南段,经大川、太平、双石至天全县小河乡一带。该断裂呈北东向,压扭性,断裂倾角多在 60°~70°,断距大,挤压紧密、强烈,构造裂隙较发育。青龙断裂走向为北西 20°~25°,断面倾向南西,倾角 58°~75°。北东向的宝兴背斜轴向 45°,组成地层包括震旦系至三叠系,两翼产状不对称,北西翼倾角 40°~60°,南东翼因断裂影响,倾角达 70°。背斜核部与 G318 线在天全县紫石乡段交汇。沿线小褶皱主要受背斜影响,岩体破碎,揉皱强烈。

公路沿线炭质页岩产状为 295°∠54°,属顺向坡或斜向坡;灰岩产状为 273°∠14°,平缓层状,属斜向坡;砂岩产状为 320°∠15°,平缓层状,属顺向

坡。受断裂及褶皱影响,沿线地层主要发育两类裂隙,一类与层面垂直,一类与层面相交。垂直层面的又分纵张、横张和扭裂三种。受构造部位控制,褶皱核部、构造高点及不同构造交汇部位最发育;断裂影响带较发育;脆性岩层较发育,同一岩性,薄层比厚层发育。

### 1.3 地层岩性

区内地层较为复杂,从元古代到第四纪均有出露。公路沿线出露的岩性包括有元古代( $\gamma_2$ )的花岗岩;志留系下统龙马溪组( $S_{1l}$ )的黑色炭质页岩;二叠系下统西霞组、茅口组( $P_{1q+m}$ )的深灰色薄—中厚层状石灰岩;三叠系上统须家河组( $T_{3x}$ )黑色岩屑石英砂岩、粉砂岩夹少量泥岩;侏罗系上统蓬莱镇组( $J_{3p}$ )的紫红色钙质砂岩、泥质粉砂岩夹泥岩及棕红色钙质泥岩,裂隙发育;白垩系上统灌口组( $K_{2g}$ )的棕红色钙质粉砂岩、细砂岩及泥岩互层;第四系全新统,崩坡堆积物( $Q_4^{col+dl}$ )主要分布于低山、高山的坡麓及切割较深的河谷岸坡,冲洪积物( $Q_4^{al+pl}$ )主要分布于河谷平坝区。

### 1.4 气象特征

天全县属亚热带季风气候为基带的山地气候区,雨日在 200 d/a 以上,素有“天漏”之称。常年降雨量在 1 158~2 163 mm,日最大降雨量达 163 mm,小时最大降雨量为 75.1 mm。降雨由东向西随高度递增,从线路起点(始阳站)的 1 398 mm 逐渐过渡到线路终点(二郎山站)的 2 342 mm。

### 1.5 G318 线天全段与发震断裂的位置关系

地震震中位于芦山县龙门乡(图 1),距 G318 线的最短直线距离为 27.6 km,最长直线距离 82.2 km。双石—大川断裂与 G318 线在小河乡境内的 K2674 处交汇,震中沿双石—大川断裂方向至 G318 线的距离为 32.7 km。地震对 G318 线的影响自东向西逐渐减弱。

## 2 崩塌数据获取方式

本文数据调查时间为“4·20”芦山地震后 10 d 内。灾害点调查均按照中国地质调查局《滑坡崩塌泥石流灾害详细调查规范(1:5 万)》要求进行,内容包括崩塌体的位置、范围、规模、地质环境条件、岩体特征、影响因素、灾害历史及在地震中的崩塌情况。其中崩塌的规模由现场实测获得,本次地震中的崩落方量由养路段工人提供(铲车装载翻运为依

据) 地震前的崩塌及人员财产损失数据由天全县养路段提供。

3 崩塌发育规律

3.1 崩塌发育概况

公路沿线共有崩塌点 26 处 ,其中 24 处威胁公路 ,另外 2 处在河流对岸 ,对公路无威胁( 表 1) 。其中 4 处崩塌点在芦山地震中没有崩落; 崩落方量  $\leq 100\text{ m}^3$  的崩塌共计 16 处 ,占总数的 61.5%;  $100\text{ m}^3 \sim 1\,000\text{ m}^3$  的共有 2 处 ,占总数的 7.7%;  $\geq 1\,000$

$\text{m}^3$  的 4 处 ,占总数的 15.38%。崩塌中仅有 3 处为有确切记录的地震诱发 ,其中 2008 年“5·12”汶川地震诱发 1 处 ,“4·20”芦山地震诱发 2 处 ,均为浅表层剥落 ,即汶川地震中多见的山坡表层垮塌现象。其余灾害点为老崩塌点 ,平日均会有飞石崩落 ,路面被砸成坑坑洼洼的“麻子脸”。据不完全统计 ,最近 10 a 该段公路上有 7 人因崩塌死亡 ,过往车辆受损较多。

崩塌点间有方量  $<5\text{ m}^3$  的坡面滚石共计 28 处散落于路面 ,本文只进行现象描述 ,不进行统计规律分析。

表 1 G318 线天全段崩塌基本特征  
Table 1 Characteristics of the collapses along Tianquan section of national highway 318

序号	崩落方量* / $\text{m}^3$	坡面 滚石*	平时崩塌	灾害体规模		备注
				$\text{m}^3$	分级	
1	50		平日有飞石	10 000	小型	2011 年砸毁 1 辆货车
2	100		平日有飞石	7 000	小型	
3	5		平日有飞石	9 000	小型	
4	10	2 处	平日有飞石	22 000	中型	
5	/		2012 年有上百方	3 000	小型	
6	10	5 处	2012 年出现	6 000	小型	
7	100			8 000	小型	
8	10	5 处	雨季崩落	3 000	小型	
9	/		平日有飞石	20 000	中型	
10	10		平日有飞石	2 000	小型	2006-10-01 造成 1 人死亡
11	10	6 处	平日有飞石	3 000	小型	
12	100			9 000	小型	
13	100			5 000	小型	“4·20”芦山地震诱发
14	/		偶有飞石	7 000	小型	
15	3 000( 700)	2 处	雨季崩落	15 000	中型	
16	/			5 000	小型	2012 年被动网防护
17	50( 50)	5 处	雨季崩落	8 000	小型	
18	200	3 处		1 500	小型	
19	2 000		2010 年 $1000\text{m}^3$	9 000	小型	2010 年死亡 1 人
20	100			6 000	小型	
21	5 000			20 000	中型	
22	100( 2 000)		每年都有	12 000	中型	10 a 前死亡 1 人
23	1 000			15 000	中型	
24	100( 500)		雨季崩落	15 000	中型	
25	100		雨季崩落	6 000	小型	砸毁 1 辆客车
26	500		雨季崩落	9 000	小型	

注: \* 崩落方量指“4·20”芦山地震崩落, 括号内为“5·12”汶川地震崩落; 坡面滚石代表调查地震时当前点至下一点间公路小于  $5\text{ m}^3$  的滚石数量。

3.2 崩塌与地震烈度关系

按中国地震局发布的地震烈度图<sup>[3]</sup>,G318 线天全段可分为Ⅷ、Ⅶ及Ⅵ带三种烈度区,公路沿线不同烈度带的崩塌特征见表 2。

自 K2660 以东至天全县界为Ⅷ度带,位于始阳镇、多功乡境内,全长 12.6 km,无崩塌点。K2660 向西至 K2676 为Ⅶ度带,长 16 km,共有 9 个崩塌点,崩塌线密度 0.56 处/km;9 处崩塌中包括 4 处中型及 5 处小型崩塌,崩落方量全部≥100 m<sup>3</sup>;该段分布有 3 处坡面滚石。K2676 至 K2731 为Ⅵ度带,长 55 km,共分布有 16 处崩塌点,崩塌线密度 0.29 点/km;16 处崩塌点中 3 处中型,13 处小型崩塌;地震中有 4 处无崩落,崩塌方量 <100 m<sup>3</sup> 共有 7 处,≥100 m<sup>3</sup> 有 5 处;该段分布有 25 处坡面滚石,表明该

段坡面欠稳定滚石较多。K2731 以西至二郎山隧道段总计 7.5 km,几乎不受地震影响,据居住在该地超过 20 a 的养蜂老人王宪林描述,震感很弱。该段发育有 1 处小型崩塌,崩塌线密度为 0.13 点/km;地震中崩塌方量 <100 m<sup>3</sup>。

通过对于不同烈度带发育的崩塌对比可以发现,从Ⅶ带到Ⅵ带,再到二郎山隧道处的非地震影响区,崩塌的规模及密度都在缩小,表征地震烈度对于崩塌的发育及规模具有较为明显的影响。而Ⅷ度区内地势平坦,故无崩塌发育。

3.3 崩塌与断裂关系

Abrahamson、俞言祥等学者先后提出了断层的“上下盘效应”,即上盘的加速度峰值系统地高于下盘的加速度峰值,且加速度峰值上盘衰减较慢而下盘

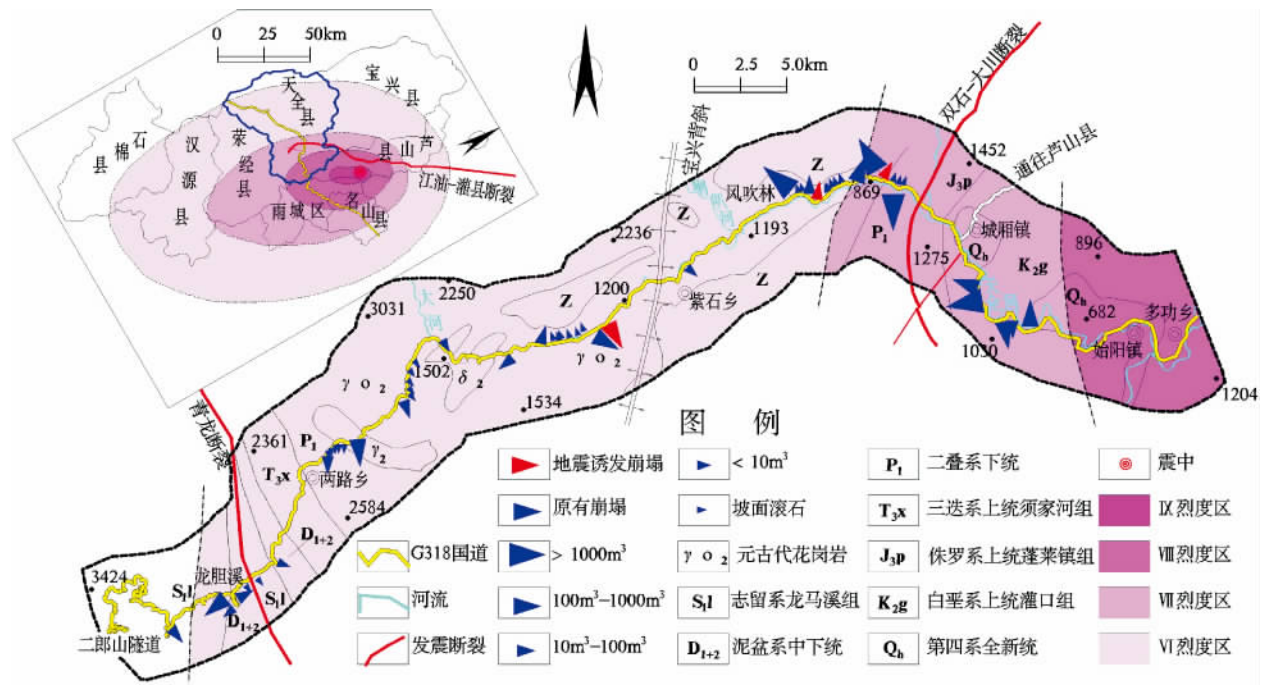


图 1 G318 线天全段崩塌分布图  
(图中烈度图根据中国地震局发布烈度图编制<sup>[3]</sup>)

Fig. 1 Geology and distribution of collapses along Tianquan section of national highway 318

表 2 G318 线天全段不同烈度区崩塌特征表

Table 2 the collapses concentration in different seismic intensity zone

烈度区	公路长度 km	崩塌点/处				坡面滚石 /处	崩塌线密度 /(处/km)	地貌类型
		≥100 m <sup>3</sup>	<100 m <sup>3</sup>	无崩落	总数			
Ⅷ	12.6	/	/	/	/	/	/	低山平坦区
Ⅶ	16	9	/	/	9	3	0.56	峡谷-平坝
Ⅵ	55	5	7	4	16	25	0.29	中山峡谷区
无影响区	7.5	/	1	/	1	/	0.13	中山峡谷区

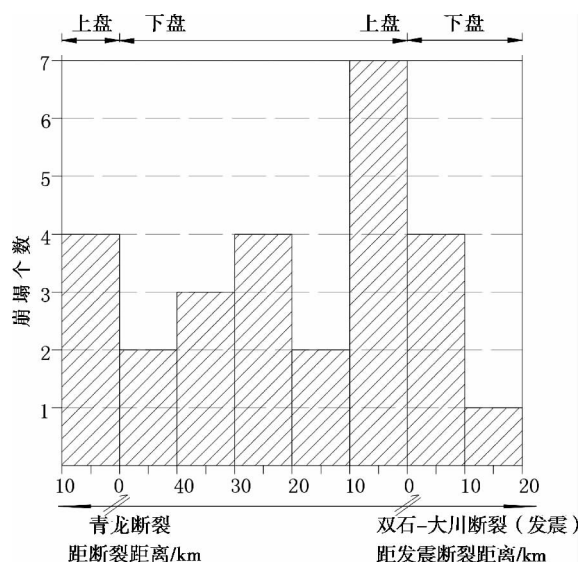


图2 崩塌分布与断裂距离关系图

(图中烈度图根据中国地震局发布烈度图编制<sup>[3]</sup>)

Fig. 2 Difference of collapses development in the hanging wall and footwall along Tianquan section of national highway 318

衰减较快<sup>[13-14]</sup>。黄润秋等在汶川地震中总结出发震断层上盘较下盘地质灾害分布密度高、范围广、规模大,并且断层上盘0~7 km范围为地质灾害强发育区,断层上盘7~11 km范围和下盘0~5 km范围地质灾害中等发育<sup>[15]</sup>。

双石-大川为本次发震断裂,断裂带距离与崩塌分布的关系见图2。在其上盘的0~10 km范围内,共发育有7处崩塌;10~20 km,发育有2处崩塌;20~30 km,发育有4处崩塌;30~40 km,分布有3处崩塌。其中10~20 km的密度小于20~40 km范围内的原因在于10~20 km位于紫石乡与脚基坪间,公路沿山前缓坡通过,受地形控制崩塌发育较少。在双石-大川断裂下盘0~10 km范围内,发育有4处崩塌,而10~20 km范围内,发育仅1处崩塌。并且G318线全段地震诱发的2处崩塌均位于双石-大川断裂上盘。可以看出“4·20”芦山地震的上盘灾害分布密度近乎下盘的2倍,并且随与发震断裂的距离增大,其密度具有明显降低的特征。青龙断裂不是本次发震断裂,但是由于构造控制了岩层的破碎及风化程度,所以上下盘之间表现出同样的差异特征。

### 3.4 崩塌与岩性关系

按物理力学性质,G318线全段岩性可大致分为炭质页岩、灰岩(含白云岩)、砂岩(局部夹泥岩)、花岗岩(含正长花岗岩、斜长花岗岩)等四类。公路

沿线发生崩塌最多的岩性是花岗岩,共15处;其次为砂岩,共5处;灰岩4处及炭质泥岩2处(图3)。公路沿线的砂岩为侏罗系蓬莱镇组及白垩系灌口组的厚层砂岩夹泥岩,属于软硬相间地层构成的坡体,由于差异风化会造成硬质岩层凸出而成“探头”岩块,多形成凹岩腔,容易发生崩塌(图4)。砂岩切割块体较大,常形成规模较大的错断式崩塌。灰岩致密坚硬,风化较弱,崩塌数量较少。炭质页岩分布范围在发震断裂影响范围外,形成的崩塌多为滑移式崩塌,规模较小。通过对比可以发现,公路沿线以花岗岩崩塌为主。

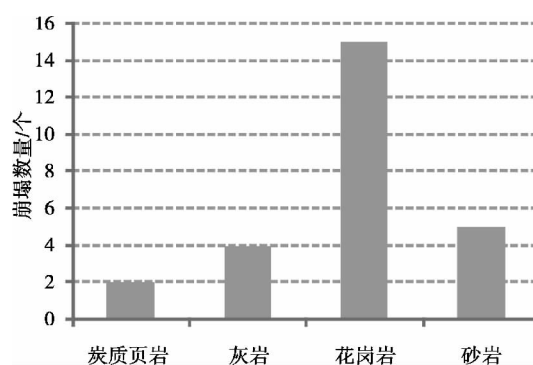


图3 不同岩性崩塌发育柱状图

(图中烈度图根据中国地震局发布烈度图编制<sup>[3]</sup>)

Fig. 3 Statistical histogram of collapses lithology



图4 砂岩区凹岩腔地段崩塌

Fig. 4 The cavity of the sandstone collapse

地震诱发的2处崩塌均为花岗岩浅表层崩滑(图5)。花岗岩主要分布在G318线的K2675~K2716之间,长度约41 km。花岗岩风化强烈,据现场调查全风化层厚约13 m,强风化层厚约10 m。该类崩塌危岩带位于斜坡中上部,主要是顶部的全风化层以及一定厚度的强风化层。这部分岩土体是斜





图 5 地震诱发的浅表层崩塌  
Fig. 5 Collapse induced by Lushan Earthquake



图 6 典型花岗岩崩塌特征  
Fig. 6 Mantle rock and weathering residues of granite collapse

坡的薄弱部分,受到震动及降雨的作用发生崩塌(图 6)。而底部的弱风化及新鲜岩层较坚硬,发生崩塌较少。

受风化及构造影响,花岗岩的裂隙发育。对该段花岗岩裂隙共测量 39 组,做出产状玫瑰花图及直方图(图 7、8),可以看出花岗岩并无明显的优势结构面,裂隙方向较为零散,倾角以陡立倾角为主,大于  $80^{\circ}$  占总数的 50% 以上,导致花岗岩类崩塌多以错断式为主。

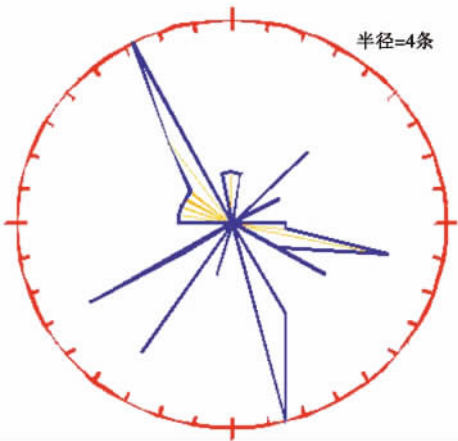


图 7 花岗岩裂隙倾向玫瑰花图  
Fig. 7 Rose diagram of joint in the granite collapses

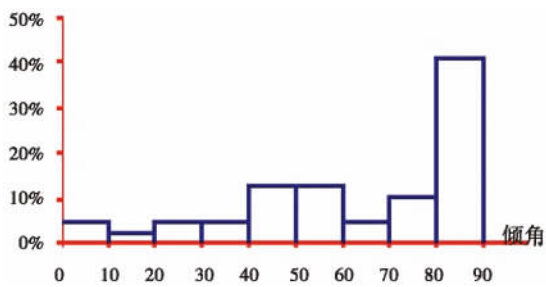


图 8 花岗岩裂隙倾角直方图  
Fig. 8 Histogram of the dip angle of the rock structure in the granite collapses

### 3.5 崩塌与地形坡度的关系

崩塌与地形坡度相关性较高。图 9 显示 G318 线天全段崩塌体坡度普遍大于  $41^{\circ}$ ,在  $41^{\circ} \sim 90^{\circ}$  间零散分布,没有明显的规律性。造成这种现象的原因在于公路沿线多为深切峡谷区,公路修建过程中普遍采用挖方的方式进行,人为制造岩质的陡峻斜坡,破坏了斜坡的稳定性。不同构造单元由于岩性的不同,发生崩塌的坡度具有差异性,如砂岩崩塌的坡度普遍大于  $80^{\circ}$ ,近乎直立,而花岗岩崩塌由于底部直立段较稳定,崩塌区位置在斜坡中上部,所以其坡度较砂岩略缓和。

平缓地段崩塌较少或无崩塌。紫石乡-脚基坪

段的公路主要沿山前缓坡展布,地势平缓,10 km 范围内仅有 1 处小型的崩塌。在城厢镇、始阳镇—多功乡段低山平坝区,无崩塌灾害点。

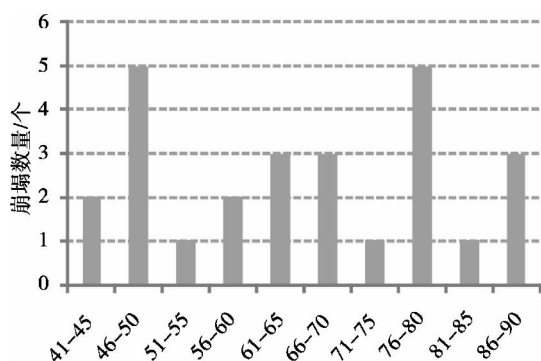


图9 崩塌与地形坡度关系图

Fig. 9 The distribution characteristics of collapses in slope

#### 4 崩塌控制及影响因素

按前节所述,“4·20”芦山地震中 G318 线全段的崩塌点仅有 2 处为本次地震诱发,并且都是花岗岩的浅表层全风化层及强风化层的局部垮塌滑落。未见如在汶川地震中诱发新增大规模、厚层岩质崩塌点。该段 92% 灾害点都是在以前存在的老崩塌,在本次地震中有了新的变形迹象。造成这种差异的原因在于“5·12”汶川地震为 Ms8.0 级强震,其地震能量比“4·20”芦山 7.0 级强震的能量大 33 倍,最大地震烈度相差两级,最大地震动加速度 PGA 也从  $13 \text{ m/s}^2$  降到  $6 \text{ m/s}^2$ 。在 G318 线全段,地震因素仅是崩塌多发的诱发因素,而不是主控因素。地震在一定程度上导致了危岩带及坡面滚石处在一种欠稳定状态,裂缝加大、坡体松散,在强降雨及余震诱发下可能成灾。

而崩塌的分布特征揭示其集中分布在公路沿线地貌陡峻段及挖方爆破的区域,平缓地形段无崩塌发育,地貌及人类工程活动是崩塌的控制因素。断裂通过的地段因为地层挤压及风化作用,岩层破碎,是崩塌多发的重要原因。不同的岩性其物理力学特性不同,崩塌的方式及规模不同,也是影响因素之一。天全气候湿润多雨,植被发达的根系对岩层形成劈裂作用,岩体随根系的生长裂缝加大,风化加速,在水压力的作用下形成块石坠落,威胁过往车辆(见图 6)。

对 G318 线全段的崩塌而言,地貌和人类工程活动是主控因素,而地质构造、地层岩性、地震及

水文气象等都属于影响或诱发因素。

#### 5 崩塌发展趋势预测

从已有崩塌发育规律及影响控制因素分析,地震后 G318 线全段会进入崩塌高发期。芦山地震以后,按四川省交通规划 G318 线将改建扩容,路面加宽,局部地段因削坡会更加陡峻,人类工程活动进一步加剧。地震作用使山体松动,变形加大,裂缝加宽,造成了很多“松而未动”震裂山体。震后的余震也是崩塌发生的重要诱因之一。2010-05-26 在都江堰 5.0 级余震时, G318 线全段 K2681+700 处即发生崩塌堵断线路。芦山“4·20”7.0 级强烈地震后余震会持续很长时间,截至 5 月 12 日 16 时,共记录到余震 8 791 次,其中 3.0 级以上余震 130 次,包括 5.0~5.9 级 4 次,4.0~4.9 级 22 次,3.0~3.9 级 104 次<sup>[16]</sup>。

汶川地震后的研究表明,地震时易发生崩塌的地段也是在地震后易发生崩塌的地段<sup>[10]</sup>。“震裂山体”在余震、降雨等条件的诱发下,坡体变形不断发展,会产生新的震后崩塌,给灾后重建及公路安全运营带来严重威胁。“4·20”芦山地震以后,从 5 月 9 日至 5 月 30 日之间,共有 7 次崩塌堵断 G318 线的事件发生。最大的规模为 2013-05-21 发生在 K2682+800 处的风吹林崩塌,崩塌方量  $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,至 6 月 2 日才抢通公路,恢复单边通行,对 G318 线交通造成了巨大影响。通过表 1 中可以看出,“4·20”芦山地震中单次崩塌方量仅占危岩体总量的 1%~20%,大部分欠稳定岩体处于临界状态。随着雨季的到来,该段崩塌将进入高发期。

#### 6 结论

G318 线全段处于深切峡谷区,在“4·20”芦山地震中共发生 26 处崩塌灾害。该段崩塌仅有 2 处为地震中新增长点,其余 24 处均为原崩塌点在地震重新崩落。通过对崩塌的空间分布、与地震烈度、发震断裂、岩性及坡度的关系等方面的分析,总结芦山地震公路边坡崩塌的发育规律: 1. 崩塌规模以中小型为主。2. 由Ⅶ度带到非地震影响区,随着地震烈度的降低,崩塌的规模减小、密度降低。3. 崩塌分布表现出明显的“上下盘效应”,双石—大川断裂上盘的崩塌分布密度约为下盘的 2 倍。4. 崩塌在花岗岩

及砂岩中多发。5.地貌及人类工程活动是崩塌发育的主控因素。地震是其重要诱发因素。震后崩塌具有隐蔽性及滞后性,在余震及强降雨条件下,区内“震裂岩体”变形加剧,公路沿线崩塌将进入高发期,威胁G318线的安全行车。

致谢:本文在野外调查及资料收集过程中,得到天全县交通运输局副局长高啸、养路段职工涂文康的倾力相助,对他们在灾区的辛勤工作与无私奉献,一并致以感谢!

## 参考文献(References)

- [1] Ying Danlin, Li Zhongquan, Zeng Qing, et al. Preliminary analysis of causative faults of Lushan earthquake and Wenchuan earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition 2013, 40(3): 250–256 [应丹琳, 李忠权, 曾庆, 等. “4·20”芦山地震与“5·12”汶川地震震源断裂分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 250–256]
- [2] Liu J, Yi G X, Zhang Z W, et al. Introduction to the Lushan Sichuan Ms7.0 earthquake on 20 April 2013 [J]. Chinese J. Geophys., 2013, 56(4): 1404–1407 [刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013年4月20日四川芦山M7.0级地震介绍[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1404–1407]
- [3] China Seismological Bureau. The seismic intensity map of the Apr. 20 2013 Lushan Earthquake [EB/OL]. (2013–04–25). <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20130426185746117952058/index.html> [中国地震局. 中国地震局发布四川省芦山“4·20”7.0级强烈地震烈度图 [EB/OL]. (2013–04–25). <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20130426185746117952058/index.html>.]
- [4] Chinese Information Office of the State Council. The press conference of 4.20 Ms7.0 Lushan Earthquake held by Chinese Information Office of the State Council [EB/OL]. (2013–04–26). [http://www.eqsc.gov.cn/zxxw/201304/t20130426\\_26026.html](http://www.eqsc.gov.cn/zxxw/201304/t20130426_26026.html). [国务院新闻办公室. 国新办举行四川芦山“4·20”7.0级强烈地震灾情及抗震救灾情况新闻发布会 [EB/OL]. (2013–04–26). [http://www.eqsc.gov.cn/zxxw/201304/t20130426\\_26026.html](http://www.eqsc.gov.cn/zxxw/201304/t20130426_26026.html).]
- [5] Wu Zhenhan, Zhang Zuochen. Types of seismic and geological hazards caused by the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(12): 1747–1757 [吴珍汉, 张作辰. 汶川8级地震地质灾害的类型及实例[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1747–1757]
- [6] Tang Yongjian, Zhuang Weilin, Ji Suiwang. Emergency investigation and open of Sichuan roads in the disaster area under “5·12” Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. [唐永建, 庄卫林, 吉随旺. “5·12”汶川大地震四川灾区公路应急调查与抢通 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.]
- [7] Keefer D V. Landslides Caused by Earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406–421
- [8] Abrahamson N A, Silva W J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1997, 68(1): 94–109
- [9] Cheng Liangxia, Su Shengrui, Li Song, et al. Analysis of formation mechanisms on highway slope collapse after Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 249–258 [成良霞, 苏生瑞, 李松, 等. 震后公路边坡崩塌地质灾害形成机理分析 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 249–258]
- [10] Su Shengrui, Li Song, Cheng Qiang. Characteristics of the post-earthquake rockfalls of highway slopes in Wenchuan-earthquake-stricken areas [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(3): 321–327 [苏生瑞, 李松, 程强. 汶川地震后公路边坡崩塌灾害发育规律 [J]. 山地学报, 2012, 30(3): 321–327]
- [11] Xie Hong, Wang Shige, Kong Jiming. Distribution and characteristics of mountain hazards induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan, China [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(4): 396–401 [谢洪, 王士革, 孔纪名. “5·12”汶川地震次生山地灾害的分布与特点 [J]. 山地学报, 2008, 26(4): 396–401]
- [12] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. Distribution characteristics and impact factors assessment of collapses and landslides caused by 5.12 Wenchuan Earthquake: Taking Dujiangyan–Wenchuan Highway as a sample [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(2): 16–22 [庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 5.12汶川地震崩塌滑坡分布特征及影响因子评价——以都江堰至汶川公路沿线为例 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 16–22.]
- [13] Abrahamson N A, Somerville P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake [J]. Bull Seism Soc Amer, 1996, 86(1B): S93–S99
- [14] Yu Yanxing, Gao Mengtan. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Chi–Chi earthquake, Taiwan [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(6): 615–621 [俞言祥, 高孟潭. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应 [J]. 地震学报, 2001, 23(6): 615–621.]
- [15] Huang Runqiu, Li Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19–28 [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]
- [16] China Seismological Bureau. There are 8 791 recorded aftershocks after the Apr. 20, 2013, Ms7.0 Lushan Earthquake. [EB/OL]. (2013–05–12). <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100346/20130514144155934317645/index.html> [中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0级强烈地震共记录到余震8791次. [EB/OL]. (2013–05–12). <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100346/20130514144155934317645/index.html>]



## Development and Distribution of Collapses Induced by “4 • 20” Lushan Earthquake: Taking Tianquan Section of China National Highway 318 as a Sample

GAO Yanchao<sup>1 2</sup>, CHEN Ningsheng<sup>2</sup>, XU Ruge<sup>1</sup>, BA Renji<sup>1</sup>, NAN Shuai<sup>3</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. China Southwest Architectural Design Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Tianquan section of China national highway 318 is located in the incised valley. During the Lushan Earthquake on April 20, 2013, there were 26 collapses accounted along the 91 km highway. Only 2 collapses are new while the other 24 which are exist before the Lushan Earthquake fallen again this time. The development and distribution rules of collapses are obtained as follow through analyzing the positions and the relationship between collapses and seismic intensity, coseismic fault, lithology and gradient. 1. The scales of the collapses are small ( $\leq 10\,000\text{ m}^3$ ) or Medium ( $10\,000 \sim 100\,000\text{ m}^3$ ). 2. From VII zone to un-stricken area, the scale of collapses turn smaller and the concentration of collapses turn lower with the attenuation of seismic intensity. 3. The distribution of earthquake-induced collapses has marked hangingwall effect, for the collapses concentration in the hangingwall of coseismic fault which named Shuangshi – Dachuan Fault nearly twice that in the footwall. 4. The collapses mostly formed in granite and sandstone. 5. The terrain and engineering activities are main factors which control the development of collapses while the earthquake is an inducing factor. The post-earthquake collapses is hysteretic and covert. They will occur along the highway in a very long time under the influence of rainfall and aftershock.

**Key words:** collapse; Lushan earthquake; China national highway 318; Tianquan County