

# 汶川地震震后降雨滑坡的类型、活动特征及发展趋势

裴来政<sup>1,2</sup>, 周小军<sup>1,2</sup>, 方华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 山地灾害与地表过程重点实验室,  
四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 汶川地震造成许多山体的整体性破坏, 部分山体后缘出现裂缝, 岩土体在主震作用下产生损伤, 边坡稳定性大大降低, 在降雨激发作用下极易产生新的滑坡灾害。在分析汶川震后滑坡发育条件变化和降雨滑坡现场调查的基础上, 将震后降雨诱发滑坡分为 5 种类型。震后降雨滑坡的活动特征主要体现在以小型的塌滑最为典型且数量多, 沿河道两岸广泛发育, 且震区滑坡发生与降雨在时间上具有较强的对应关系, 滑坡发生滞后时间短, 在强暴雨条件下多为群发型滑坡。从震后降雨滑坡发展趋势来看, 初期主要以中小型的塌滑为主, 随着时间的推移, 小型塌滑数量将逐渐减少, 大型、特大型滑坡发生的数量可能会有一定程度的增加。

**关键词:** 汶川地震; 降雨滑坡; 活动特征; 发展趋势

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0113-04

中图分类号: U416.1

## Types, Active Characteristics and Development Trend of Rainfall-induced Landslides After Wenchuan Earthquake

PEI Lai-zheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-jun<sup>1,2</sup>, FANG Hua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Under the action of the Wenchuan earthquake, the integrity of some mountains was destroyed and some slits appeared on the mountains. Main shocks caused soils and rocks damaged and its self-strength declined. The quantity of rainfall-induced landslides after the Wenchuan earthquake was much more than that before the earthquake. Five types of the landslides caused by the earthquake were classified based on the investigation of rainfall-induced landslides after the Wenchuan earthquake. Active characteristics of rainfall-induced landslides were mainly embodied in the small and tremendous landslides widely developed along rivers and roads. Landslides and rainfall in the area had a better relationship and the delayed-time for the occurrence of landslides was very short. Massive landslides were developed under the condition of intensive rainstorms. In view of the development trend of rainfall-induced landslides, the small and medium landslides are dominant in the early time. However, the number of the small landslides will decrease but large or huge landslides will increase with increasing time.

**Keywords:** Wenchuan earthquake; rainfall-induced landslide; activity characteristics; development trend

汶川地震在直接诱发大量崩塌、滑坡的同时, 也使许多山体遭到整体性破坏, 山体后缘出现裂缝, 一些古滑坡在地震动荷载作用下被激活, 滑坡位移有明显增加的趋势。同时, 岩土体自身在地震动荷载作用下产生损伤, 结构破坏, 强度下降, 使得边坡整体稳定性下降, 成为潜在的滑坡隐患点。这些潜在的滑坡隐

患点在强余震的不停作用和降雨等外界条件激发的作用下, 会形成新的滑坡灾害。以往的事实表明, 地震后滑坡灾害会在很长一段时间内处于活跃期, 例如 1976 年 5 月发生在云南省的龙陵地震, 地震发生时的同震型滑坡很少, 而震后雨季发生了大量的滞后降雨型滑坡, 造成的人员死亡与财产损失比当时地震滑

收稿日期: 2011-11-13

修回日期: 2012-04-10

资助项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(973)“中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析”(2011CB409902); 国家重点基础研究发展计划资助项目(973)“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(2008CB425802)

作者简介: 裴来政(1979—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 博士, 研究方向为山地灾害。E-mail: plz\_2000@163.com。

坡造成的损失还要严重。台湾“集集地震”后地震区产生新滑坡的数量明显比地震前增多这一事实也说明,震后滑坡(特别是降雨型滑坡)将会在震后一定时间内处于活跃期<sup>[1-3]</sup>。

汶川地震主震后,地震灾区时有崩塌、滑坡产生,特别是在雨季,降雨激发大量新的崩塌滑、坡灾害,造成较大的人员伤亡和财产损失。2009年7月25日凌晨4时40分,由于连续降雨,都汶路44 km+200 m处彻底关大桥,由汶川至都江堰方向右侧距彻底关隧道洞口60 m处,高约500 m的山体突然发生崩塌,垮塌方量高达 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,垮塌的山体夹带大量巨石,其中一重达200 t左右的巨石击断彻底关大桥第3根桥墩,导致2跨60 m桥面坍塌,使正行驶在桥面上的6辆车(货车5辆,微型面包车1辆)坠落桥底,1辆车悬挂在桥面断裂处。此次灾害共导致6人死亡,12人受伤。对于震后降雨滑坡的研究,唐川等<sup>[4]</sup>以汶川地震高烈度区的北川县城及岷江河谷为研究区,分析地震后该区域内2008年9月24日暴雨过程诱发的滑坡和泥石流,基于SPOT 5遥感影像解译,共发现新增的暴雨滑坡823处。同时,根据“9·24”暴雨前后的遥感解译结果对比,研究区暴雨诱发的滑坡数量增加了68%,滑坡面积扩大了46.6%。乔建平等<sup>[5]</sup>,Yang等<sup>[6]</sup>以“5·12”地震极震区彭州市为例,分析地震后滑坡在降雨作用下的发育情况。研究发现,地震之后,经过2008年和2009年2个雨季后,区域内新发生降雨型滑坡、崩塌70处,滑坡规模以中、小型为主,占滑坡灾害总数的95.7%,大型滑坡( $V > 10^6 \text{ m}^3$ )极少,仅为4.3%,无特大型滑坡( $V > 10^7 \text{ m}^3$ )发生。但总体来说,目前对汶川地震震后降雨作用下滑坡的文献资料偏少,研究需进一步加强。本文初步对震后降雨滑坡的类型、活动特征和发展趋势进行了分析,希望可以在震后降雨滑坡研究方面起到抛砖引玉的作用。

## 1 震后滑坡发育条件变化

通过对历史上多次大地震研究发现,主震后地震区滑坡活动比震前明显增加,且滑坡灾害在震后较长时间内处于活跃期。要分析滑坡震后降雨滑坡的类型和活动特征,首先需分析震前与震后滑坡发育条件的变化与差异。

### 1.1 坡体上松散堆积土体急剧增加

在汶川地震的直接作用下,汶川地震灾区诱发了数以万计的崩塌、滑坡灾害,产生了大量的松散物质,根据调查,仅都汶公路映秀段至威州镇段由崩塌、滑坡产生的松散物质达 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些由崩塌、滑

坡产生的松散物体,除一部分直接脱离坡体堆积于坡角或者进入河(沟)道外,大量松散物质堆积在坡体表面,从而使得震后坡体上堆积的松散物质比震前急剧增加。这些堆积在坡体上的松散物质,其结构已完全破坏,力学强度极低,且处于即将失稳的临界状态。

### 1.2 坡体上出现大量裂缝

汶川主震之后,地震灾区山坡上广泛分布着规模较大的潜在灾害体——震裂变形山体。其基本特征是斜坡表面发育有大量由地震动荷载造成的裂缝,一般顺坡走向延伸,张开度大小不一,延伸一般都较长,其中裂隙在斜坡陡缓转折部位、不同岩性的接触部位等分布密度较大。这些裂缝在余震的作用下会有进一步扩展的可能,同时在雨季时降雨沿着裂缝迅速下渗,降低边坡的稳定性从而产生新的滑坡灾害。青川县城西北的狮子梁,在汶川地震后其坡体上出现了长约1500 m,宽约50 cm的裂缝带,山体出现严重变形,拉动县城北面山体整体下滑约1 m,潜在滑坡体规模达 $1.88 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,直接威胁青川县近9000名群众的人生安全(图1)。汶川县城后山姜维城山体上的裂缝宽度最大达2.5 m,最大可见深度达3.7 m,上下错动达1.2 m(图2)。



图1 青川县城西北狮子梁震裂山体



图2 汶川县姜维城山体裂缝

### 1.3 地震动荷载使岩土体产生损伤,强度降低

一般来说,地震动力作用造成的岩土体破坏分为

宏观结构破坏和微观结构损伤。前者包括具有显著破坏特征和大变形、大位移的滑坡、崩塌、倾倒、塌陷等,是地震时产生严重震害的直接表现;后者的宏观表象特征虽然不明显,但实际上其结构在一定程度上遭到了破坏,完整性降低,岩土体质量和力学参数下降,岩体经受了地震动力的松动作用改造,形成了一种具有特殊结构和工程地质性质的岩土体——地震损伤岩土体。

相比地震前,汶川地震强烈的地震力的作用,使地震区的岩土体内部结构破坏,强度降低,产生一定程度的损伤。根据岩土体所处的地震烈度的不同,所在区域内岩体的损伤程度也不同。岩土体在结构受到损伤后,其强度降低,坡体的稳定性相比震前大大降低,震后边坡更易失稳。

#### 1.4 汶川地震诱发了古滑坡的复活

在汶川地震前一些古滑坡已处于稳定状态,但在汶川地震的强烈动力作用下,这些古滑坡被激活,位移明显加剧。如 G213 汶川县漩口镇寿江大桥处集中村老滑坡,在汶川地震前该古滑坡基本处于稳定状态,在汶川地震的直接作用下,该老滑坡整体向寿江方向滑移了 30 cm 左右。

## 2 震后降雨滑坡的类型

经现场调查,汶川地震过后的近 3 a 时间内,在降雨作用的激发下,地震灾区发生大大小小的滑坡近万处。通过现场调查和分析,可将震后降雨型滑坡分为如下几类。

#### 2.1 坡体上堆积松散物质在降雨作用下再次启动引起的滑坡

汶川地震直接激发的大小崩塌、滑坡数万处,同时也产生了大量的松散物质,一部分松散物质直接进入沟道或河床,而大量松散物质堆积在边坡的坡体上。这些堆积在坡体上的物质成为潜在的滑坡灾害体,在震后降雨或余震的作用下,会再次启动产生新有滑塌,并最终多以泥石流灾害的形式出现。此类型的滑塌在山区道路或河流沿线两岸分布非常广泛(图 3)。

2008 年 9 月 24 日凌晨,由于连续的强降雨,使北川县西山坡原堆积在坡体上和沟道内的滑坡松散物质再次产生滑坡,并形成泥石流。经过初步调查,滑坡、泥石流灾害造成北川县任家坪村 44 人死亡,数十间民房被滑坡、泥石流所掩埋。

#### 2.2 同震滑坡体上震裂或松动部位在降雨作用下再次启动引起的滑坡

在汶川地震直接作用下产生的滑坡有数万处,这

些的滑坡在汶川地震主震时,其滑坡的主体已经滑落,但同时又在已滑落体的后部岩土体出现震裂或震松,并未随滑坡主体一起滑落。滑坡主体的滑动,为这些松散部位的岩体提供了下滑的空间,在震后降雨作用下启动形成滑坡。此类滑坡在汶川地震中一些大型滑坡中常有出现,如东河口滑坡、唐家山滑坡、文家沟滑坡等。



图 3 岷江一侧坡体上堆积的松散物质

#### 2.3 裂隙山体在降雨激发下引起的滑坡

在汶川地震作用下诱发大量滑坡的同时,也产生了许多震裂山体,在坡体上出现裂隙,成为震后不稳定斜坡(或称为潜在滑坡体)。经过调查发现,有些山体出现的裂缝延伸有几公里,裂缝深度有的达到数米。这些裂缝在震后余震、降雨作用下不断扩大,直至最后整体失稳形成滑坡。此类滑坡一般规模较大,形成的危害也较大,是震后需重点加强监测和防治的滑坡类型。

在汶川地震作用下,理县上孟乡木尼村刮托组山坡体上出现多条裂缝,其中最长一条裂缝达 30 m。2010 年 6 月 27 日下午 4 点 40 分,由于近期连续强降雨,该处发生山体滑坡,约  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$  滑坡体倾泻而下,掩埋了山脚下 200 m 余道路,途经此地的一名护林员和外地 2 名养蜂人员被埋。

#### 2.4 坡体表层震松土体在降雨作用下引起的滑坡

在汶川地震作用下,部分边坡表层的土体处于震松而未滑的状态,在降雨等外力作用下,这些震松土体会沿某一界面(如土质和岩石界面)产生滑坡。此类滑坡一般规模比较小,难造成大的灾害,但在震后此类滑坡分布相当普遍,数量多,防治有一定难度。

图 4—5 为表层震松土体在降雨量作用下的滑动。

#### 2.5 古滑坡的复活和加剧以及古滑坡局部滑动

汶川地震不仅产生大量新的滑坡,而且使一些古滑坡被激活或滑动加剧。在震后降雨作用下古滑坡整体滑动进一步加剧,一些滑动剧烈的部位在降雨激发下形成局部范围的小型滑坡。



图 4 都江堰虹口乡深溪沟右岸坡体上松散体在降雨作用下的滑动



图 5 G213 一侧坡体的表层堆积体在降雨作用下的滑动

都江堰拉法基水泥有限公司所处的二坪滑坡体,主体呈“圈椅状”地形,后缘呈弧形,根据钻孔揭示,该滑体前缘厚度为 14.5 m,后部厚度为 29.0 m,体积约为  $2.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,属于大型土质古滑坡。地震前修建拉法基水泥原料传送带而在矿山公路右侧坡底设置了 19 根抗滑桩,使该滑坡体变形得到明显控制,坡体也处于稳定状态。受“5·12”汶川特大地震影响,该滑动被激活,滑坡堆积体在不同部位出现了拉裂缝、局部滑塌。震后在持续降雨的影响下,其活动进一步加剧,出现了多处新的局部滑塌。

### 3 震后降雨滑坡的活动特征

震后降雨作用下滑坡的活动特征主要表现在:

(1) 特大型滑坡较少,以中小型滑坡为主,尤其是小型的塌滑最为典型且数量多,沿河道两岸广泛发育,对河道两岸的道路通行构成相当大的威胁。(2) 震区滑坡发生与降雨在时间上具有较强的对应关系,滑坡发生滞后时间短,而且在强暴雨条件下多为群发型滑坡,其规模较小,多为表层或浅层滑坡。(3) 从震后的滑坡类型来看,表层堆积层或土质类滑坡占大多数,而岩质滑坡相对较少。岩质滑坡主要分布在千枚岩、板岩和砂板岩、泥灰岩等强度低、易风化的软岩区。(4) 汶川地震时发生的大多数大型滑坡在震后

降雨作用下发生了多次的局部滑坡,并且最后都以泥石流或泥石流的灾害形式出现。

### 4 震后降雨滑动发展趋势分析

从历史上多次地震来看,地震后滑坡、泥石流灾害活动将会明显增加,且会在很长一段时间都处于活跃期<sup>[7-9]</sup>。汶川地震已过去 3 a 多,从 3 a 多滑坡、泥石流的活动特征来看,相比震前,滑坡、泥石流不论从规模、数量还是危害上,都比震前大大增加。

从震后 3 a 多地震区降雨滑坡活动特点来看,大型、特大型滑坡较少,多为中小型的崩滑灾害。较典型的大型震后降雨滑坡为汉源县万工乡二蛮山滑坡,其造成的人员伤亡和财产损失也最严重。分析其原因,由于汶川地震震级高,能量大,地震灾区一些规模较大的不稳定的斜坡体在地震时已发生了滑动,能量得到了释放,而未发生滑动的斜坡体具有一定的稳定性。汶川地震虽然直接对边坡岩土体造成一定损伤,但在降雨直接激发作用下要产生大型、特大型滑坡是需要一个累积的过程,这一过程可能需要 5, 10 a 甚至更长时间,一旦条件成熟即可发生大型、特大型滑坡灾害,造成不可估算的经济损失。

关于震后降雨滑坡的发展趋势,我们认为汶川地震发生后前 5 a 左右内,主要表现为一些震松坡体和一些裂隙坡体在降雨作用下产生的中小型滑塌灾害,大型、特大型滑坡则较少,但此阶段大型、特大型滑坡处于酝酿期。约 5 a 之后,由于坡体上一些松散土体已在期间发生滑动,且由于岩土体的自然固结作用,一些边坡的稳定性也逐渐增大,因而中小型的滑塌将会随之减小,但大型、特大型滑坡发生的数量,相比震后的前几年,可能会有一定程度的增加。分析其原因,由于震后在主震作用下产生了大量规模较大的不稳定的斜坡,这些规模较大的不稳定斜坡的滑动趋势确立到最后成灾一般需要经过几个发展阶段且历时较长,虽然震后岩土体在自然固结作用下,随着时间的延长,其自身强度有所增加,但其改变不了大型滑坡滑动的总趋势,在较长时间外力的不断作用下,最终会成灾。大型滑坡增加的数量程度与直接诱发的降雨作用有着直接的关系,暴雨、特大暴雨次数多,雨量大,持续时间长,则出现大型滑坡的概率也相应增加。

### 5 结论

(1) 相比震前,震后滑坡发育条件发生很大改变,如震后坡体出现大量裂缝及岩土体力学强度大大降低等,与震前相比,震后的环境与条件更有利于滑坡的发生。

(下转第 121 页)

长不断减小,可用指数方程很好地描述,各坡度下变化趋势一致,整个径流过程中流速减低速率也基本一致,各坡度下流速差异较小。

(3) 不同坡度下细沟径流流速变化过程与不同雨强下具有很大相似性,流速都随径流过程的进行而减小。主要差异在于,不同雨强下流速随径流过程的减小速率在产流后的 6 min 内较大,以后减小,而不同坡度下的减小速率基本一致。

(4) 同坡度下,细沟水流平均流速随雨强增大而增大,可用对数方程描述。同雨强下,细沟水流平均流速随坡度的增大而增大,可用幂函数方程很好地描述。细沟径流平均流速随雨强及坡度的变化可用二元对数方程描述。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998(1):52-59.
- [2] 夏卫生,雷廷武,赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨[J]. 中国水土保持科学,2003,4(1):16-19.
- [3] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rain fall and runoff in the sediment transport capacity of inter rillflow[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1378-1387.
- [4] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics I: Velocity relationships [J]. Transactions of ASAE, 1984,27(3):790-796.
- [5] Govers R. Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding in loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992,17(5):515-528.
- [6] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research, 2001,37(3):791-799.
- [7] 徐在庸,胡玉山. 坡面径流的试验研究[J]. 水利学报, 1962(4):1-7.
- [8] 江忠善,宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1986(1):46-52.
- [9] 张科利,张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数估算探讨[J]. 地理科学,2000,4(20):326-330.
- [10] 吴普特. 动力蚀能实验研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [11] 田凯,李小青,鲁帆,等. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. 中国水土保持,2010(4):44-46.
- [12] 魏霞,李勋贵,李占斌,等. 黄土高原坡沟系统径流动力学特性试验[J]. 农业工程学报,2009,25(10):19-23.
- [13] 谭贞学,王占礼,谭晓,等. 黄土坡面细沟径流过程试验研究[J]. 中国水土保持科学,2010,8(5):24-29.
- [14] 于朋,雷孝章,陈平安,等. 坡面流水力特性研究的进展[J]. 四川水利,2009(4):40-43.
- [15] 张科利,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报,2000,37(1):9-15.

(上接第 116 页)

(2) 从震后约 3 a 的降雨滑坡活动特征来看,特大型滑坡较少,以中小型滑坡为主,尤其是小型的塌滑最为典型且数量多,以表层堆积层或土质类滑坡为主,而岩质滑坡相对较少。

(3) 从震后滑坡的发展趋势来看,汶川地震发生后的前期,主要表现为一些震松坡体和一些裂隙坡体在降雨作用下产生的中小型滑塌灾害,大型、特大型滑坡则较少,后期中小型滑塌灾害会逐渐减少,但大型或特大型滑坡则可能有增加的趋势。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈晓利,叶洪,程菊红. GIS技术在区域地震滑坡危险性预测中的应用:以龙陵地震滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2006,14(03):333-336.
- [2] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. Nat Hazards. 2011,56:19-36.
- [3] 崔鹏,陈树群,苏凤环,等. 台湾“莫拉克”台风诱发山地灾害成因与启示[J]. 山地学报,2010,28(1):103-115.
- [4] 唐川,齐信,丁军,等. 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2010,35(2):317-323.
- [5] 乔建平,杨宗信,田宏岭,等. 汶川“5·12”大地震后降雨对滑坡的影响[OL]. (2009-09-25). [http://www.sc.gov.cn/zw/gk/zwdt/bmdt/201009/t20100922\\_1032110.shtml](http://www.sc.gov.cn/zw/gk/zwdt/bmdt/201009/t20100922_1032110.shtml).
- [6] Yang Zongji, Qiao Jian ping, Tian Hongling, et al. Epicentral distance and impacts of rainfall on geohazards after the "5·12" Wenchuan earthquake[J]. China. Disaster Advances,2010,3(4):151-156.
- [7] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.
- [8] 崔鹏,韦方强,何思明,等. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008,26(3):280-282.
- [9] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.