

# 强震触发横向坡失稳的力学模式研究

裴 钻, 黄润秋, 许 强, 裴向军

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 横向坡是岩层走向与坡面走向垂直, 天然状态下整体稳定性较好的一种坡型, 通过汶川大地震灾区大型滑坡调查发现在强震作用下横向坡失稳模式为拉裂—溃滑型。研究结果表明, 以平武县新坪村滑坡为例, 横向坡在强震作用下, 斜坡后缘界面处出现拉应力, 拉裂缝不断加深, 坡体下部也因垂向和水平震动出现张剪性破坏, 从而形成统一滑面, 溃裂的坡体随之似“散粒体”溃散、滑动下来, 冲过坡体前缘农家, 造成 9 名村民死亡, 进入郑家沟受到对面山体阻挡后震荡堆积形成堰塞湖。本研究在一定意义上更新了对横向坡稳定性评价的传统观念。

**关键词:** 横向坡; 强震; 拉裂—溃滑型; 散粒体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0117-04

中图分类号: P642

## Mechanical Modes of Instability Horizon Slope Triggered by Intensive Earthquake

PEI Zuan, HUANG Run-qiu, XU Qiang, PEI Xiang-jun

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Horizon slope is strata towards the slope strike vertical which is a good overall stability slope under natural state, In large-scale earthquake disaster areas of Wenchun County, it could found that instability model of horizontal slope under intensive earthquake are tension-crushing by large landslide survey. Instability mode is tension—trushing slippery under intensive earthquake. Based on Xinping village, Pingwu County landslide as an example, slope edge at the interface between tensile stress appears under the intensive earthquake, and the cracks apper unceasingly deepened, lower slope body appears stretch shear destruction because of the vertical and horizontal vibration, thus forming a uniform sliding surface, the crushing slippery slope body then cracks and slides down as "granular mixture" which rushes to slope bottom margin of peasant caused 9 villagers deaths, and it enters Zhengjia ditch blocked by the opposite mountain, then it moves like post-concussion and forms a barrier lake. These achievements are update in a certain sense to the traditional concept of stability evaluation of the horizontal slope.

**Keywords:** horizon slope; intensive earthquake; tension—crushing; granular mixture

横向坡是岩层走向与坡面走向垂直, 天然状态下整体稳定性较好的一种坡型, 强震作用下坡体稳定性及破坏模式如何, 通过汶川大地震震后形成 1:1 比例尺天然试验场, 殷跃平<sup>[1]</sup>把汶川大地震触发的大型滑坡概括为阶型滑坡, 凸型滑坡, 勺型滑坡, 座落型滑坡及巨大滚石等类型; 黄润秋<sup>[2]</sup>通过地震触发地质灾害成因机制将地震滑坡分为溃滑型、溃崩型、抛射型、剥皮型、震裂型等 5 种地震触发滑坡类型, 其中大光包滑坡、王家岩滑坡、老鹰岩滑坡都为典型溃滑型特征, 牛圈沟滑坡具有典型的溃崩型特征。

本研究通过震后对地震滑坡的调查和力学模式分析, 发现横向坡在强震作用下横向坡多处出现大规模的溃滑其失稳模式为拉裂—溃滑型, 通过对地震滑坡调查发现新坪村滑坡坡向为 EW 向, 岩层走向为 SN 向, 典型的横向坡, 在地震作用下, 该坡近  $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$  的岩体冲下新坪村, 进入沟底形成小型堰塞湖, 并造成 9 人死亡。

为了加深对横向坡的稳定性和失稳模式的认识, 应该从其模式和机理入手, 分析横向坡在强震作用下的力学模式。

## 1 滑坡区自然地质条件

### 1.1 地形地貌概况

新坪村滑坡位于四川省北部山区,处于青藏高原东部边缘,即四川盆地向青藏高原过渡地带,地形起伏大,北高南低,高差悬殊;沟谷纵横,切割强烈,属于高山峡谷地貌。滑坡坡向为 EW 向,岩层走向为 SN 向,为典型的横向坡,后缘高程为 1 225~1 475 m,前缘高程为 1 030~1 090 m,相对高差 300~475 m;地表总体坡度为 20°~40°,局部达 70°,横向地形为“三沟一脊”地形(图 1)。

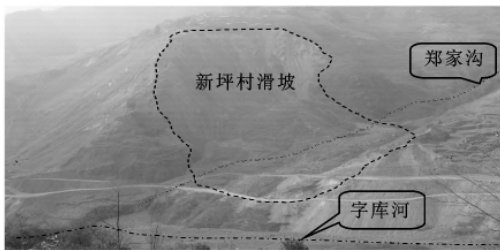


图 1 新坪村滑坡区地形地貌

### 1.2 地层岩性

研究区主要地层为第四系滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ ),残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ ),冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ ),下伏寒武系下统邱家河组黄灰质页岩( $\epsilon_9$ )。

### 1.3 地质构造

平武县位于扬子准地台、西秦岭褶皱带、松潘—甘孜褶皱带三大一级大地构造单元的结合部位。跨属后龙门山推覆构造和龙门山前陆推覆—逆冲带。研究区位于水观岩片,岩片由蜈蚣口组、水晶组、邱家河组和油房组组成,前缘推覆断层为南坝断裂,南坝断裂属北川—映秀断裂的一部份,区内经过南坝—走向约 48°,全长 21 km,倾角 30°~40°,上盘为油房组地层,下盘为韩家店组地层。断裂带宽 200~500 m,主要由黏滞性石英脉布丁体、应变滑劈理和构造透镜体组成,局部见 S—C 组构造糜棱岩,本断层早期为韧性,见布丁体尚残存有拉张性质;晚期活动为脆性,大部分被改造的布丁体排列显逆冲性质。岩片内部断层为石坎断层,分布于南坝石坎一带,向北东经箭竹埡延入雁门坝幅,南端与关帝坪断的归并长约 21 km。断层由两条次级断层分支复合而成,断面总体呈北东走向,倾向北西,倾角大于 60°。北西上盘为水晶组、邱家河组,南东下盘组要为油房组,少量邱家河组,分支断层之间夹邱家河组,根据地层、构造透镜体的叠置关系,以及牵引褶皱的特征判别,本断层为顺扭走滑—逆冲断层。研究区位于石坎断层两条

分支断裂之间,距断层 SE 侧分支较远约 100 m。

### 1.4 地震发生概况

据不完全统计 1550 年至今,平武县发生 4.0 级以上地震共计 55 次。其中,6 级以上 4 次,2.0~3.9 级超过 4 200 次;震中位置在东经 104°~104°2′和北纬 32°~33°9′之间,多位于平武与松潘两县之间,县境东南、西北、西南部都曾是震中所在地。震源大都在 10~20 km 范围内,属浅源地震。2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒,汶川县映秀附近发生 8 级地震,震中位置在北纬 31.0°,东经 103.4°。汶川“5·12”地震为汶川县有历史记载以来震级最高,破坏强度最大的一次地震,其震级达 8 级,地震烈度达 XI 度。

## 2 滑坡发育特征

### 2.1 新坪村滑坡形态

为了便于整体把握新坪村滑坡边界、堆积体及其运动特征,对新坪村滑坡分为滑源区、堆积区、碎屑流区 3 个区进行描述。受地形条件影响,滑坡滑源区和堆积区部分重合

新坪村滑坡平面形态呈不规则形,滑坡由滑源区、堆积区、碎屑流区组成;滑源区由滑床陡壁(后缘拉裂面和 N 侧上游拉裂面)和 S 侧下游拉裂面组成,长约 212 m,宽约 217 m,堆积区长度约 155 m,宽度 220 m,碎屑流流距约 200 m。

**2.1.1 滑源区** 新坪村滑坡滑源区主要由滑床陡壁和下游侧边界组成(图 2),滑床陡壁边界十分明显,呈弧形,主要由滑坡后缘陡壁和上游拉裂面组成。滑坡后缘陡壁长约 100 m,最大高差 60 m,高程范围在 1 165~1 225 m 之间,坡度约 50°~60°,后缘陡壁粗糙呈锯齿状、断口新鲜,无擦痕(图 2)。后缘陡壁不仅地形高陡,而且呈现出显著的张拉特征,是坡体在强震长时间作用下,震动溃裂的结果。在极震区,首先到达的 P 波形成强大竖向作用力,使山体震裂松动乃至溃裂,并在山体内部(后缘)产生长大竖向拉裂缝。S 波达到后,已被震裂松动的山体在强地震水平力作用下产生强烈破坏,后缘竖向裂缝被进一步拉张,向深部扩展,形成滑坡发生的后缘边界。

上游侧拉裂面受地形和岩体结构的影响,和后缘陡壁一样呈现出高陡、粗糙显张性性质,不易区分,划分为后缘陡壁。下游侧(S 侧)拉裂面走向为 NW 向,壁长约 150 m,最大高差约 40 m,高程范围在 1 145~1 185 m 之间,坡度约 30°~40°(图 2)。滑坡下游侧为硅质板岩,岩体较为破碎,结构面发育,岩体被切割成碎裂及次块状结构。极震区地震作用下首先到达的 P 波形成强大竖向作用力,并在下游侧边界沿

结构面产生深拉裂缝。S波达到后,已被后缘松动的山体沿潜在滑移面向下滑动,下游侧边界受滑体高速滑移作用的影响,沿边界张拉裂缝溃滑,下游侧边界呈现出平直、局部有擦痕现象(图2)。

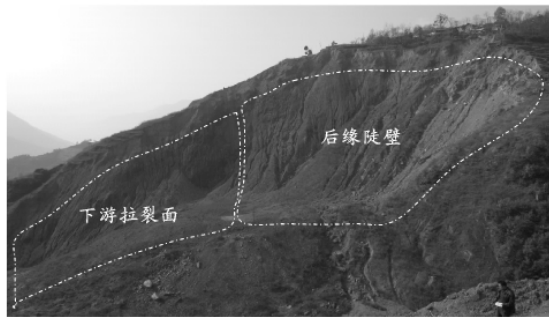


图2 新坪村滑源区全景

2.1.2 堆积区 新坪村滑坡发生后,快速溃崩下来,在SE方向形成了长155 m,宽220 m,最大厚度约达50 m,体积约达 $1.10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堆积体。滑体受到地震力作用后,后缘坡体拉开后剪断前缘锁固段后,以惯性作用下快速冲向沟底,受到迎面山体的强力阻挡,逆冲爬高后,在堆积体中后部形成滑坡洼地,前缘形成爬坡体。表部惯性极大的松散岩土体快速折返并震动堆积、荡平,余势不减的碎屑流汇入滑坡扩容抛撒体,向字库河下游流动约200 m,受到下游滑坡堆积体的阻挡,止于下游滑坡堆积体。

总体上,滑坡堆积体表面地形起伏不大,呈舒缓波状,似地震波传播所导致。根据滑坡的破裂现象,不同部位物质运动及堆积特征,以滑坡现场调查为基础,可将滑坡区分为4个区。

(1) 1区。典型倒石锥区,为地震滑坡后山顶拉裂缝随在自重和雨水软化和塑变作用下部分岩土体产生滑塌形成的倒石锥,填于滑坡洼地,碎块石岩性为硅质板岩和第四系的堆积物,与后缘物质性质一致,碎块石直径0.20~0.50 cm,沿坡面走向整体呈上细下粗的崩塌堆积特征,前缘覆盖在1区上。

(2) 2区。为典型的滑坡洼地负地形,堆积体岩性为灰褐岩、黄灰岩硅质板岩夹少量灰黑色炭质板岩,块石直径大于0.5 m的占40%,堆积体中混杂有少量来自山顶植物,表层盖有5~10 cm的滑坡扬尘。

(3) 3区。堆积爬坡体区以硅岩为主,灰褐、灰黄色夹少量灰黑炭质板岩,滑坡溃崩后以惯性冲向对郑家沟,由于沟的左岸山体的阻挡作用,溃崩体向坡体上部运动,形成爬坡堆积体堆积体。由于地震的震动和荡平作用,爬坡堆积体地形较为平缓,局部有块石堆积,块石直径约2~3 m。

(4) 4区。碎块石为硅岩为主,灰褐、灰黄色夹

少量灰黑炭质板岩,主要为地震过程中震荡、折返过程中形成的高速碎块石流,向地势低凹的地方运动堆积形成,由灰色、灰黑色,块石直径大部分小于1 m,尺寸小于30 cm的碎块超过50%。

总体上来看滑坡堆积物是沿主滑方向溃崩堆积而成,以对郑家沟左岸山脊为界,堆积体分为4个区,1和2区为滑源区和堆积区公共区,滑坡物质由1区向3区,块体大小逐渐增加,在4区未见直径超过1 m块石,均为碎屑堆积体。根据现场调查的物质组成情况,可以推测滑坡堆积的过程为:在地震动力作用下斜坡后缘形成拉裂面,前缘剪断锁固段,主滑体高速向前倾泻,由于时间短促,并受空间限制,主滑体在惯性作用下继续向沟底运动,向郑家沟左岸强力逆冲,在“爬坡”过程形成许多“推覆”反坡台坎后骤停,主滑体顶部强风化带以上岩土体一部分向前甩出,一部分受阻折返、震动堆积、荡平,主滑体顶部强风化带以上岩土体一部分向前甩出,一部分受阻折返、震动堆积、荡平形成高速碎屑流,并产生气垫效应,沿字库河下游方向流动而下,遇到下游滑坡堆积停止运动。

### 3 滑坡成因机制分析

滑坡区地形总体上为“三沟一脊”地形,坡体为三面临空,为孤立的单薄山脊,总体较为陡峭,坡度为 $30^\circ \sim 50^\circ$ ,这种高陡突兀地形对地震波放大效应较为明显。坡体结构比较简单主要由第四系残坡积物和硅质、炭质板岩组成,岩层产状为 $193^\circ \angle 30^\circ \sim 40^\circ$ 。新坪村滑坡位于石坎断层两条分支断层之间受构造运动的影响,岩体较为破碎,结构面发育,NW向结构面发育,连通性较好,坡体结构为碎裂一次块状结构。新坪村滑坡岩层走向和坡体走向近垂直,横向坡,NW向结构面为后缘潜在破裂面。针对于滑坡的两个滑坡不同坡体结构、地形地貌进行对照分析,确定其成因机制及主控因素。

新坪村滑坡在“5·12”大地震中属于“拉裂—溃滑”型的高速滑坡。它的形成机制可以分为这3个阶段。

(1) 震动拉裂阶段。在强震的长持时作用下,坡体产生震动溃裂,表现为沿NW向结构面松弛张开,由于突兀山顶对地震动力有放大效应,后缘界面处的“拉应力效应”增强,拉裂缝不断加深加宽,在坡体后部形成陡峻、贯通的后缘拉裂面(震裂面)。

(2) 岩体碎裂溃滑阶段。在地震震裂山体同时,坡体内部岩体抗剪强度迅速降低,地震波不断在岩体结构面处发生反射和折射,动力累积效应增大导致岩体被碎裂化和散体化,坡体下部也因垂向和水平向的震动而产生张剪性破坏,从而形成统一滑面,溃裂的

坡体随之似“散粒体”一样溃散、滑动下来,形成滑坡。

(3) 溃滑—震动堆积阶段。滑体冲过郑家沟,受到迎面山体的强力阻挡,逆冲爬高约 50 m 后,表部惯性极大的松散岩土体快速折返并震动堆积、荡平,余势不减的碎屑流汇入字库河,向下游流动,受到下部滑坡堆积体停留下来形成碎屑流堆积区。

## 4 结论

(1) 通过对新坪村滑坡现场的调查,对强震作用下横向坡失稳模式及溃滑运动、碎屑流堆积有了初步认识,研究认为横向坡失稳与滑坡堆积是在地震过程中的极短时间内一次性完成的。

(2) 新坪村横向坡坡体为结构面发育,岩体破碎,三面临空孤立单薄山脊,距发震断层仅 700 m,在地震过程中突兀山体对地震波有放大作用,碎裂岩体在地震波的作用下极易震裂、松弛、摩阻力急剧降低导致山体大规模失稳。

(3) 新坪村滑坡为破碎散体结构,失稳模式为拉裂溃滑型,形成动力过程可概括为:强震长持时作用下,坡体的振动溃裂,在坡体后部形成陡峻、贯通的后缘拉裂面,同时,坡体下部也因垂向和水平向的震动而产生张剪性破坏,从而形成统一滑面,溃裂的坡体随之似“散粒体”一样高速溃散、滑动下来。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡触发特征研究[J]. 工程地质学报, 2009, 16(4): 433-444.
- [2] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [3] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741.
- [4] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 725-736.
- [5] 黄润秋. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 131-132.
- [6] 四川省地质矿产局 川西北地质大队九队. 中华人民共和国地质图说明书(比例尺: 1: 50 000)(南坝幅)[R]. 四川 成都: 四川省矿产资源开发局, 1993.
- [7] 张倬元 王士天 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [8] 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.
- [9] 李秀珍, 孔纪名, 邓红艳, 等. “5·12”汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 72-77.
- [10] 孙萍, 汪发武, 殷跃平, 等. 汶川地震高速远程滑坡机制实验研究[J]. 地震地质, 2010 32(1): 98-105.
- [11] Delfine S, Alvino A, Zacchini M, et al. Consequences of salt stress on conductance to CO<sub>2</sub> diffusion, Rubisco characteristics and anatomy of spinach leaves[J]. Aust. J. Plant Physiol., 1998, 25: 395-402.
- [12] Penuelas J, Isla R, Filella I, et al. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley[J]. Crop Sci., 1997, 37: 198-202.
- [13] Lee G, Robert N, Carrow R R D. Photosynthetic responses to salinity stress of halophytic sea shore paspalum ecotypes[J]. Plant Science, 2004, 166: 1417-1425.
- [14] Fernandez B N, Siebea C, Cramb S, et al. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 644-667.
- [15] 扶卿华, 倪绍祥, 王世新, 等. 土壤盐分含量的遥感反演研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 48-54.
- [16] 李民赞. 基于可见光光谱分析的土壤参数分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 36-41.
- [17] 许迪, 王少丽. 利用 NDVI 指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. Remote Sens. Envir., 2002, 80: 406-417.
- [20] Leone A P, Menenti M, Buondonno A, et al. A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89: 39-48.
- [21] Farifteh J, Meer F, Meijde M A. Spectral characteristics of salt-affected soils: A laboratory experiment[J]. Geoderma, 2008, 145: 196-206.

(上接第 117 页)