

文章编号: 1008-2786-(2016)6-530-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000159

云南鲁甸地震甘家寨滑坡基本特征及失稳机制

郭亚永^{1 2} 葛永刚^{1*} 陈兴长³ 江兴元^{1 2} 刘传正^{1 2} 贾莉蓉³

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/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;

2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 西南科技大学 环境与资源学院 四川 绵阳 621010)

摘 要: 甘家寨滑坡是云南鲁甸 6.5 级地震诱发的特大型滑坡, 规模达到 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡堵塞沙坝河, 形成堰塞湖, 中断交通, 造成 32 户民房掩埋、55 人死亡与失踪, 是鲁甸地震区规模最大、灾损最严重的滑坡之一。该滑坡是地震诱发陡峻山体上的石灰岩强风化堆积体滑动而形成的特大型岩土质滑坡, 表层为 10 ~ 20 m 固结良好的白云质灰岩结构体, 中下层为 50 ~ 60 m 具空隙结构的深厚灰岩风化堆积物。滑坡主要的触发因素有: 断层滑动方向性效应、地形放大效应、近断层地震动作用、背坡面效应。滑动过程分为坡体震裂松动、后缘拉裂、整体下滑、减速堆积 4 个阶段, 受滑坡体原有地形影响及滑坡动力过程控制, 滑坡堆积体形成 4 级台坎, 其中第二级台坎形成高差约 2 m 的反向堆积。结合野外实际调查数据与滑坡运动力学模型, 估算滑体水平滑动至 350 m 左右处, 速度达到最大 4.4 m/s, 滑动至沙坝河时滑坡前缘速度减至 3.6 m/min, 堆积于河道, 形成堰塞湖。甘家寨滑坡堆积体地形陡峻、堆积物裂缝密集分布, 强降雨条件下, 容易再次滑动并成灾, 建议进行滑坡体的综合治理, 控制后缘地表径流、减轻坡体下渗、强化滑坡前缘工程治理, 保障交通顺畅, 减轻灾害损失。

关键词: 岩土质滑坡; 触发因素; 形成过程; 动力机制; 鲁甸地震

中图分类号:

文献标志码: A

2014-08-03T16:30, 云南省昭通市鲁甸县发生 Ms 6.5 级强烈地震, 震中位于 $103^{\circ}21'18''\text{E}$, $27^{\circ}06'00''\text{N}$, 震源深度 12 km。据民政部统计数据^[1], 截至 2014-08-08T15:00, 地震造成昭通市鲁甸县、巧家县、昭阳区、永善县和曲靖市会泽县 108.84 万人受灾, 617 人死亡, 3 143 人受伤, 22.97 万人紧急转移安置, 2.58 万户 8.09 万间房屋倒塌, 4.06 万户 12.91 万间严重损坏, 15.12 万户 46.61 万间一般损坏。地震引发大量崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害^[2], 经排查震区共发现滑坡 1 050 处、崩塌 459 处、泥石流 108 条、不稳定斜坡 68 处、危岩体 5 处、地裂缝 13 条、地面塌陷 15 处、地面沉降 1 处。龙头山镇甘家寨滑坡方量达到了 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$, 掩埋

32 户村民房屋, 造成 55 名村民死亡或失踪, 20 余辆过往车辆被埋, 近 500 m 公路路基完全损毁, 滑坡堵塞沙坝河, 形成壅水, 是震区规模最大、灾损最严重的特大型滑坡灾害。

本文在现场考察和数据测量的基础上, 分析滑坡滑动前坡体结构及主控面、堆积体特征、触发机制和滑坡形成及运动过程, 为强震地震滑坡的预防和滑坡体的综合治理提供支撑。

1 研究区概况

甘家寨滑坡($103^{\circ}22'51''\text{E}$, $27^{\circ}4'8''\text{N}$) 发生在云南省鲁甸县沙坝河右岸甘家寨村, 地处龙头山镇南

收稿日期(Received date): 2014-12-23; 修回日期(Accepted): 2015-04-01。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41171012)和国家科技支撑计划(2012BAC06B02)。[National Natural Science Foundation(41171012) and National Key Technology Support Program(2012BAC06B02)]

作者简介(Biography): 郭亚永(1989-), 男, 汉族, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事土动力学和地震岩土质滑坡研究工作。[Guo Yayong (1989-), male, Cangzhou, Hebei, M. Sc. candidate, research on soil dynamics and seismic landslide.] E-mail: gyy0621@gmail.com

* 通信作者(Corresponding author): 葛永刚(1974-), 男, 汉族, 陕西凤翔人, 副研究员, 主要从事山地灾害与泥石流研究工作。[Ge Yonggang (1974-), male, Fengxiang, Shanxi, associate professor, research on mountain hazards and debris flow.] E-mail: gyg@imde.ac.cn

约5 km处,距离震中4.4 km。滑坡区位于骡马口构造带^[3](103°08′~103°43′E, 26°50′~27°20′N)内(图1),该构造带为北东向构造,主干断裂之力学性质显示压扭性特征,由一系列规模及发育程度相当的断裂和褶曲组成,其中昭通-鲁甸断裂和骡马口背斜是典型代表。诱发甘家寨滑坡的震源断层在包谷垭-小河断裂断层总体走向的延长线上,走向为318°,性质为兼具张扭性质的右旋走滑断层,该断层整体与昭通-鲁甸断裂近似垂直。甘家寨滑坡处于沙坝河西岸,西岸主要出露基岩为二叠系中统栖霞-茅口组浅灰、深灰色灰岩夹白云质灰岩(P_1m),沙坝河东岸主要出露二叠系上统峨眉山玄武岩组第二段斑状玄武岩($P_2\beta^2$),两套岩层为平行不整合接触(图2)。甘家寨背依赵丕山南段,地貌为中切中山区,滑坡体原地形整体平均坡度为40°,大致可分为两个平台:后缘平台长近90 m,海拔1 420~1 450 m,坡度<20°;前端平台长近200 m,海拔1 240~1 250 m,坡度<10°,甘家寨村民房屋集中建于此平

台上。研究区属低纬山地季风气候,四季温差不大,年平均气温12.1℃,年平均降雨量923.5 mm,降雨的70%~80%发生于5—10月,受河谷地形条件影响,气候垂直差异明显,海拔越高,降雨量越大。沙坝河流经甘家寨,年平均流量1.45 m³/s,在甘家寨河段坡降10.6%,河床宽33 m,河底至河岸垂直高度达60 m。

昭(通)巧(家)公路沿沙坝河河岸通过甘家寨坡积体前缘,公路与河道间形成高差30~40 m的陡坡。昭巧公路系连接昭阳区、鲁甸县、巧家县3个区县和11个乡镇的交通要道,为震后救灾抢险的生命通道。甘家寨滑坡堰塞湖形成后成为昭巧公路中断、影响抗震救灾的最主要的灾点。

2 滑坡特征

甘家寨滑坡后缘海拔高度为1 450 m,距离砂坝河道650 m,堆积体沿河长度500 m,面积约为188 000

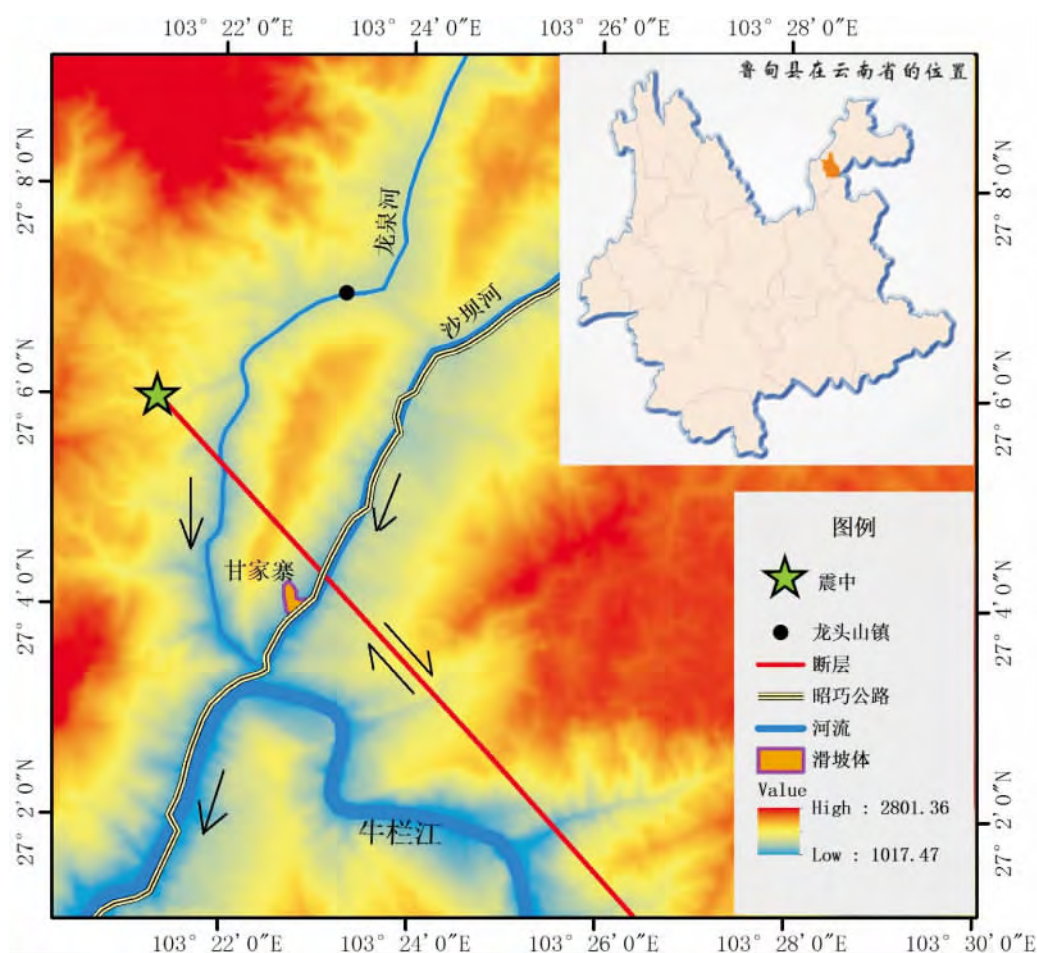


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

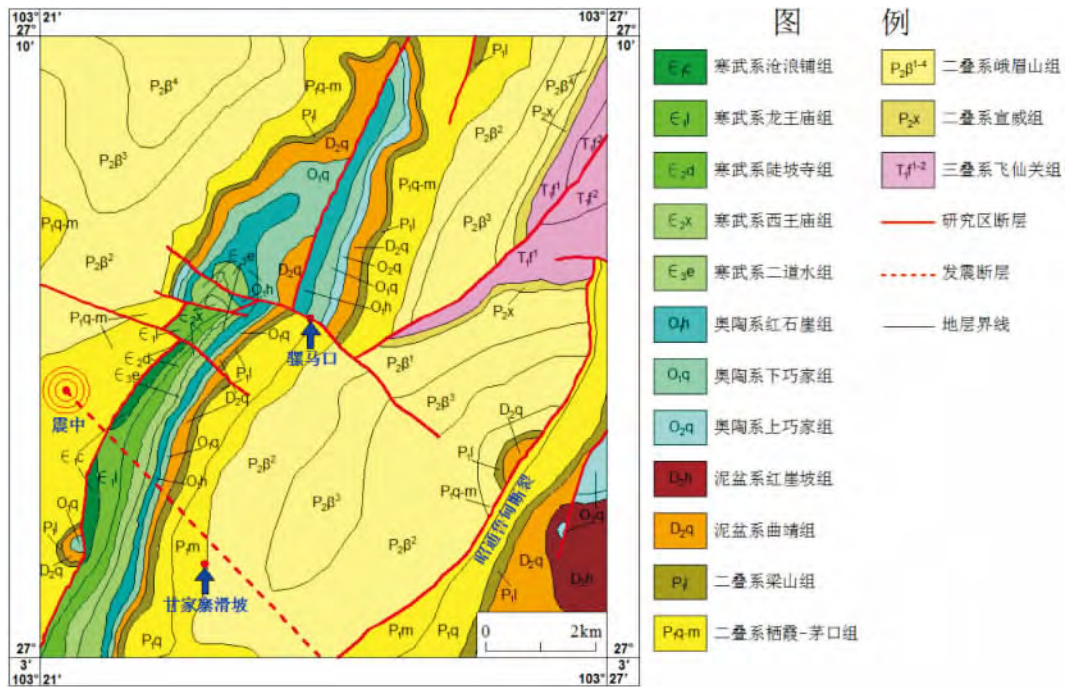


图 2 区域地质图

Fig. 2 Regional geological map

m^2 厚度 50 ~ 70 m 滑体表面平均坡度约 24.2° ,规模约 $1 \times 10^7 m^3$ 。其主滑方向为 145° ,与断层走向一致 ,与岩层倾斜方向不一致。滑坡体表层为 10 ~ 20 m 固结程度较高的白云质灰岩结构体 ,白云质灰岩碎石被乳白色胶结物包裹 ,形成类岩石块体 ,硬度较高;中下层为具空隙结构的灰岩风化堆积物 ,其碎、砾石含量在 50% ~ 70% ,主要包括残坡积物、崩坡积物 ,物质成份以土夹碎石或碎块石、碎石或碎块石夹土等土石混合物为主 ,物质结构杂乱无章、分选性差、粒间结合力差、透水性强 ,属于软弱层;滑体下伏二叠系二统栖霞 - 茅口组浅灰、深灰色灰岩夹白云质灰岩 ,倾向为 44° ,倾角为 12° (图 3) 。由以上堆积体特征可知 ,滑坡主控界面为灰岩风化堆积物与基岩的接触面。

甘家寨主滑坡体后缘是约 128 m 的近直立断壁 (图 4) ,整体呈圈椅状。后缘表层为白云质灰岩结构体 ,厚度为 35 m ,断面呈不规则锯齿状 ,坡度近 90° ;下层为灰岩 ,厚度为 93 m ,断面较为光滑 ,坡度约 70° 。后壁特征显示其受滑坡体前端拉力和强烈地震惯性力的作用而破坏 ,形成高陡断壁 ,并呈现粗糙锯齿状。

野外调查发现滑坡侧壁表面光滑 ,滑坡左侧壁倾角 80° ,垂直高度近 47 m (图 5A) ,表面划痕与水平面呈 45° 夹角 ,说明其受到前端岩土体的拉力以

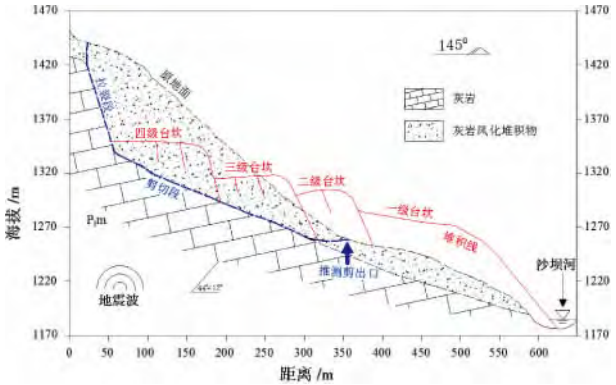


图 3 滑坡剖面图

Fig. 3 Sectional drawing of landslide

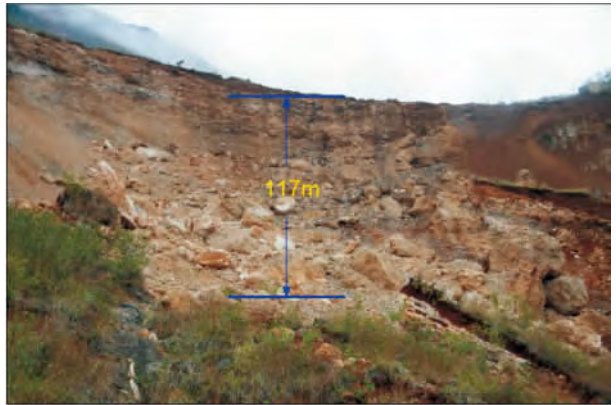


图 4 滑坡后壁

Fig. 4 Back scarp of landslide

及后缘岩土体的推力作用,具有明显的剪切破坏特征;滑坡右侧壁倾角 50° ,垂直高度近25 m(图5B),表面残留土体滑动痕迹与基岩山体方向保持一致,显示其左侧山体沿主滑方向滑动后,带动侧壁残坡积物顺坡面滑落。

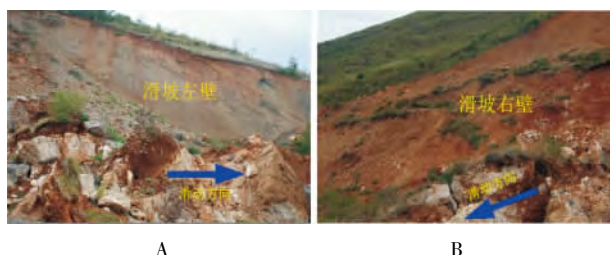


图5 滑坡侧壁

Fig.5 Side walls of landslide

受坡体形态和地形的影响,滑坡整体运动过程中各段滑块的能量和速度存在差异,导致滑坡体解体,沿纵向剖面形成4个滑坡台坎(图6)。如图所示4个台坎水平距离分别为170 m、80 m、125 m、195 m,第三级台坎和第四级台坎之间的落差达70 m,台坎内部发育有若干与滑动方向近似垂直的裂缝,第二级台坎形成高差为2 m的反坡堆积,说明滑坡为典型的牵引式滑坡,坡体前缘最先启动并带动后缘残坡积体滑动。



图6 滑坡台坎

Fig.6 Berms of landslide

受地形条件影响,滑坡运动过程中前端不断展宽,从后缘的280 m宽扩大到滑坡前缘的约500 m宽,整体形状呈扇形,堆积至沙坝河(图7A),形成堰塞湖。坡体主要为松散堆积体,夹杂有巨大砾石,滑坡表层砾石最大粒径为 $7.8 \times 7.4 \times 5.6$ m。堆积物将大部分甘家寨房屋掩埋,部分房屋被推至滑坡

前缘(图7B),并形成高陡边坡,在降雨或者其他扰动作用下极易发生二次坍塌。

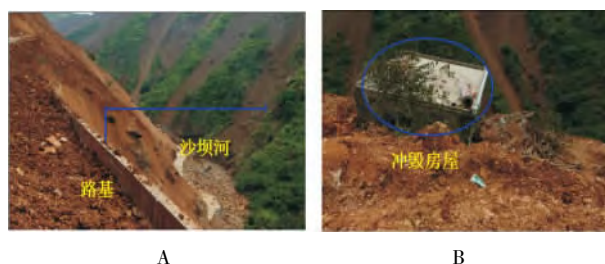


图7 滑坡前端堆积物及冲毁房屋

Fig.7 Deposits of landslide and the damaged house

3 斜坡失稳机制与滑坡形成

3.1 触发因素

3.1.1 近断层强震动作用

实地调查分析显示^[4],此区域产生了4个较大规模的滑坡(甘家寨滑坡、光明村滑坡、红石岩滑坡和王家寨滑坡),四个滑坡均位于断层上(或附近),且沿断层走向展布,其中甘家寨滑坡距离断层仅400 m(图8)。地震发生释放出巨大能量,能量以地震波的形式向各个方向传播,随着距离断层越来越远,能量逐渐衰减,滑坡数量与规模也明显减少。距离甘家寨滑坡仅5 km处的龙头山地震站记录的加速度反应谱显示其水平峰值加速度达到近1 g,垂直峰值加速度达到0.5 g。同时中国地震局地球物理研究所震后公布的地震强度预测图显示,甘家寨滑坡位于IX度区内,地震发生时坡体受到强烈扰动,稳定性受到很大影响。

3.1.2 断层错动方向性效应^[5]

据现场考证,鲁甸地震发震断层为兼具张扭性质的右旋走滑断层。甘家寨滑坡位于断层下盘,另有一个与甘家寨相距较近的光明村滑坡群位于断层

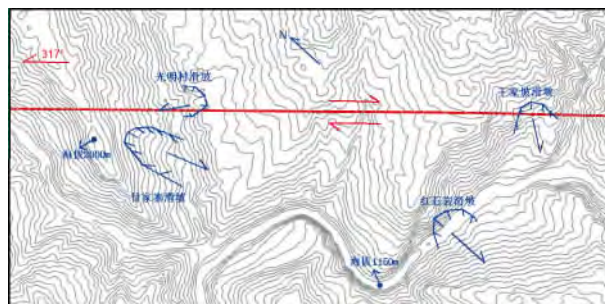


图8 强震诱发的大规模滑坡

Fig.8 Mega landslide induced by strong earthquake

上盘,两滑坡滑动方向完全相反,但均与断层走向基本相同,与所处盘错动方向相反(图8)。断层快速水平错动,产生强大的水平惯性力,导致坡体沿软弱面拉剪错动,后缘拉裂破坏,然后整体失稳滑动。这是甘家寨滑坡发生的重要诱因。

3.1.3 背坡面效应^[5]

背坡面效应,是指在与发震断裂带近于垂直的沟谷斜坡中,在地震波传播的背坡面一侧的滑坡发育密度明显大于迎坡面一侧,这一现象可能与压缩波在遇到斜坡自由面时生成倍增的反射拉伸波而导致的散裂或层裂有关。赵丕山与发震断层走向近似垂直,甘家寨位于地震波传播的背坡面方向(图9),背坡面效应对边坡失稳也有一定程度的影响。



图9 背坡面效应示意图(据 Google earth)

Fig. 9 Back slope effect(from Google earth)

3.1.4 界面动应力效应^[6]

由于上覆残坡积物和下伏基岩介质性质的差异,地震波在斜坡表层和中下层所引起的动力响应不同,尤其是在接触面处。根据应力波的反射机制,当地震波从相对坚硬的岩体传入较软弱的残坡积体中时,将在两者接触面处产生拉伸波,两种介质弹性模量差距越大,所产生的拉应力越大(图10),这一点对斜坡的稳定性极为不利。

3.2 滑坡形成过程

据目击者描述,坡体前缘首先失稳发生滑动,引发上方几百米的山体拉裂与整体滑落,滑坡体快速运动过程中瞬间将甘家寨整个村子掩埋,滑坡运动过程产生的灰尘,弥漫近1h。根据野外调查与分析,甘家寨滑坡的动力过程分为以下4个阶段(图

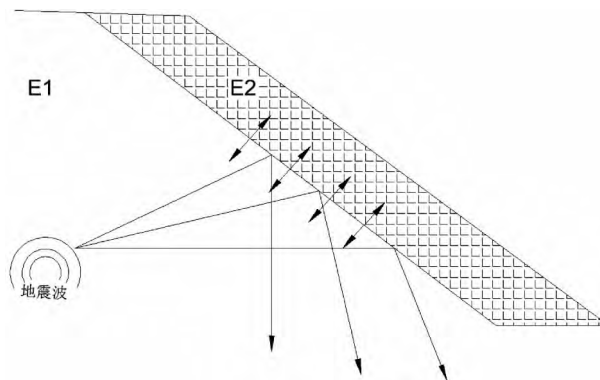


图10 地震波反射及产生的拉应力

Fig. 10 Tensile stress created by seismic reflection

11)。

3.2.1 震裂松动

斜坡体中下层为深厚的灰岩风化堆积物,与下伏基岩接触面为软弱面。随着地震的反复震荡,接触面逐渐松动,上覆残坡积层相对于基岩面剪切错动,坡体下滑力超过软弱面的实际抗剪阻力,并在前缘地形陡缓交界处形成潜在剪出口。

3.2.2 后缘拉裂

在前缘坡体牵引以及水平地震惯性力作用下,加剧了坡体顶部的拉裂错动,顶部的薄层白云质灰岩结构体无法承受逐渐加剧的拉剪错动而产生向深部贯通的错断,形成深大的后缘陡壁。

3.2.3 整体下滑

斜坡以灰岩风化堆积物与下伏基岩接触面为滑面,以前缘地形突变点为剪出口,以后缘拉裂形成的深大陡壁为边界,在滑坡前端运动牵引作用下,整体向下位移。

3.2.4 减速堆积

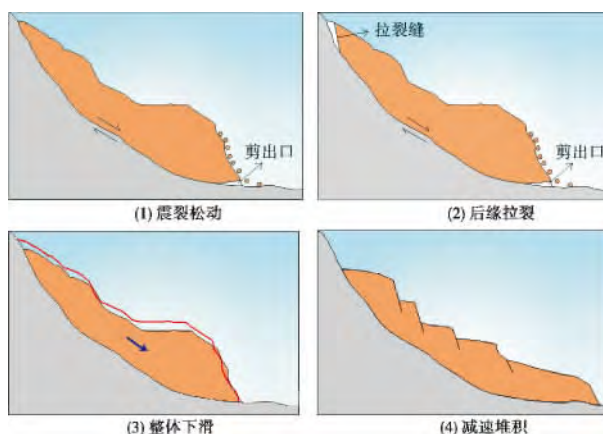


图11 滑坡形成过程示意图

Fig. 11 Sliding processes

滑坡运动过程中,滑面坡度逐渐变缓,堆积空间增加,阻力增大,滑坡整体逐渐减速,堆积到沙坝河中,掩埋了部分河床。由于地形和阻力的不同,滑体后缘部分先减速堆积,前端继续向前滑移,最终整个滑体被拉裂为 4 级台坎。

3.3 滑坡动力参数估算

甘家寨滑坡是在地震作用下失稳破坏,整体“缩”下去,运动过程较为简单,整体性较好,我们在此选用谢德格儿法对滑坡速度进行估算。

谢德格尔法考虑了滑坡体积效应,根据统计 33 个滑坡资料,得到滑坡体积和等价摩擦系数之间的经验公式^[7-9]

$$\lg F_e = a \lg V + b \tag{1}$$

式中 F 表示等价摩擦系数,即滑坡断壁冠与趾尖连线的斜率; V 表示滑坡体体积; $a = -0.15666$; $b = 0.62219$ 。据 V 求出 F 后,按下式计算滑速

$$V_s = \sqrt{2g(H - FL)} \tag{2}$$

由已知运动总的水平距离和总的垂直距离,根据等价摩擦系数的定义,可得出 $F = 0.2436$ 。然后根据(2)式,计算得到滑坡滑动过程中各个点处的速度。计算结果如表 1,滑体最大速度 4.4 m/s。当滑体到达沙坝河岸边时,其速度减小到 3.6 m/min,速度已经相当小,因此滑体在冲出岸边之后没有在对岸形成爬坡现象,仅堵塞沙坝河部分河床。通过动力学分析可知,尽管滑坡体整体方量很大,但由于滑动面坡度较缓,在滑动过程中减速较快,大部分堆积于沙坝河岸边及斜坡上,并没有将沙坝河完全堵死。

表 1 不同滑程处滑体速度

Tab.1 The velocity of landslide at different sliding distances

距离/m	350	400	450	500	550	578(岸边)	583
速度/(m/s)	4.4	3.3	2.7	1.9	0.6	0.06	0

4 结 论

通过现场调查分析,得到如下结论:

1. 甘家寨滑坡为上覆残坡积物岩土质滑坡,滑坡特征与重力作用下滑坡有较为相似的地方,如滑坡后壁、滑坡侧壁、反坡台坎和滑坡舌等,为典型的牵引式滑坡。
2. 甘家寨滑坡是在云南鲁甸地震近断层强地震动作用下,受断层滑动方向性效应、地形放大效应和背坡面效应的影响,直接触发的特大型次生滑坡灾

害。

3. 滑体运动过程可分为:震裂松动、后缘拉裂、整体下滑和减速堆积 4 个阶段,经计算滑体在 350 m 处达到最大速度 4.4 m/s,按 LAEG 滑坡委员会的分类为快速滑坡,到达沙坝河岸边时速度减到 3.6 m/min,速度较小,没有足够的动量在对岸形成爬高,完全堵塞沙坝河。

由于甘家寨滑坡堆积体坡度大、裂缝密集、滑动面未完全稳固,强降雨条件下,容易再次发生滑动成灾,建议加强滑坡监测预警,开展滑坡体综合治理,控制后缘地表径流、减轻坡体下渗、进行滑坡前缘工程加固治理,保障昭巧公路安全,减少灾害损失。

参考文献(References)

[1] The death toll of Ludian earthquake, Yunnan, increase to 617 [EB/OL]. [2014-10-30]. <http://www.mca.gov.cn/article/zwgk/mzyw/201408/20140800678456.shtml> [云南鲁甸地震遇难人数增至 617 人[EB/OL]. [2014-10-30]. <http://www.mca.gov.cn/article/zwgk/mzyw/2014080140800678456.shtml>]

[2] The progress of “8.03” Ludian earthquake relief work [EB/OL]. [2014-10-30]. http://www.mlr.gov.cn/dzhj/dzzh/zqxqbg/201408/t20140825_1327963.htm [第 53 期: 云南鲁甸“8.03”地震抗震救灾工作进展[EB/OL]. [2014-10-30]. http://www.mlr.gov.cn/dzhj/dzzh/zqxqbg/201408/t20140825_1327963.htm]

[3] Tang Limei. Geology hazard investigation and preventing and curing project of Ludian [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007. [唐立梅. 鲁甸县地质灾害特征、成因及防治区划研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.]

[4] Chen Xingchang, Hu Kaiheng, Ge Yonggang, et al. Surface Ruptures and Large-scale Landslides Caused by “8·03” Ludian Earthquake in Yunnan, China [J]. Mountain Research, 2015, 33(1): 65-71 [陈兴长, 胡凯衡, 葛永刚, 等. 云南鲁甸“8·03”地震地表破裂与大型地震滑坡[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 65-71]

[5] Xu Qiang, Li Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(5): 7-14 [许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 7-14]

[6] Feng Wenkai, Huang Runqiu, Xu qiang. In-depth Analysis of the Seismic Wave Effect and Slope Shattered Mechanism [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 20-25 [冯文凯, 黄润秋, 许强. 地震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 20-25]

[7] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231-236

[8] Tang Minggao, Xu Qiang, Zhang Wei, et al. Discuss on failure mechanism and geologic characteristic of Woqian landslide triggered

by Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl. 2): 3491 – 3502 [汤明高, 许强, 张伟, 等. 汶川地震触发窝前滑坡特征及失稳机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 2): 3491 – 3502]

[9] Zhang Zhaoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principle of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 308 – 381 [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, 1993: 308 – 381]

Basic Characteristics and Failure Mechanism of the Ganjiazhai Landslide Triggered by the Ludian Earthquake, Yunnan

GUO Yayong^{1 2}, GE Yonggang¹, CHEN Xingchang³, JIANG Xingyuan^{1 2},
LIU Chuazheng^{1 2}, JIA Lirong³

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards / Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: The Ganjiazhai mega landslide, of which the deposition volume is up to $1 \times 10^7 \text{ m}^3$, is the most serious landslide disaster triggered by Ludian earthquake (Ms = 6.5) in Yunnan of China. And it dams the river of Shaba, forms a barrier lake, interrupts the traffic, buries 32 houses and kills 55 persons. The investigation indicates that the Ganjiazhai slope consisted of strongly weathered limestone accumulation collapses by intense seismic disturbance and forms a mega rock-soil landslide. The main triggering factors of the landslide include fault dislocation effect, near-fault ground motion, interface dynamic stress effect and back slope effect. The sliding processes of the landslide could be divided into 4 stages as follows: hill-slope loosening, rear edge cracking, hill-slope overall sliding, slowing down and depositing. Combined with the data of field survey and dynamic model, it is estimated that the velocity of landslide reaches 4.4 m/s at the distance of 350 m and decelerates to 3.6 m/min near the river bank of Shaba, and finally the landslide accumulates in the river and forms a barrier lake. This landslide could easily re-slide under the condition of heavy rainfall, because of the steep terrain of landslide body and the massive loose deposits with dense cracks. The comprehensive mitigating measures, including draining surface runoff of rear edge, reducing infiltration of landslide accumulation and strengthening engineering control of landslide front, are strongly suggested to ensure the traffic moving smoothly and reduce disaster losses.

Key words: Ganjiazhai Landslide; triggering factors; forming process; dynamic mechanism; Ludian earthquake