

川西高原冻融型高速滑坡特征与成因分析

李鹏岳, 铁永波, 王东辉, 唐业旗

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 对于川西高原这类特殊环境下发育的滑坡, 因其发生前无明显的滑动迹象, 滑坡隐蔽性强, 其危害性极大。这类滑坡在无地震和降雨作用情况下, 因冻融作用使得上部岩体突然溃滑, 继而转化为碎屑流, 并沿途携卷铲刮坡体表层松散物质而产生高速运动, 表现出与一般重力条件下滑坡不同的运动和堆积特征。以四川省德格县中扎科乡赵玛滑坡为例, 对其发育特征及失稳过程进行了论述。根据滑坡的分区及动力学特征, 将其失稳过程概括为孕育阶段, 高速运动—碎屑化阶段和堆积阶段。结果表明, 赵玛滑坡的运动速度最大可达 75 m/s, 强烈的冻融作用以及滑坡区特有的地质构造是引起该滑坡高速远程运动的根本原因。研究结果可为川西高原冻融过程诱发的滑坡灾害的防灾减灾提供理论依据。

关键词: 高速滑坡—碎屑流; 冻融作用; 成因分析; 川西高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0173-05

中图分类号: P642.22

Characteristics and Cause Analysis of Freeze—Thaw Landslide on Western Sichuan Plateau

LI Peng-yue, TIE Yong-bo, WANG Dong-hui, TANG Ye-qi

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Landslide developed under the unique environment of Western Sichuan Plateau is characterized by strong concealment and hence is a kind of extremely serious disaster because of its less evident sliding indication before occurrence. This kind of landslide often occurs suddenly due to freeze—thaw action, even in the absence of earthquake and rainfall, and then is transformed into debris flow. During its high speed movement, the landslide is capable of transporting and stripping loose materials on slope and therefore shows some movement and accumulation characteristics differing from common landslide by gravity. By taking the Zhaoma landslide in Zhongzhake Town, Dege County, for an example, development characteristics and failure process of the landslide are analyzed. According to the division and dynamic characteristics of landslide, its failure process is generalized as the three stages of gestation, high-speed movement and debris flow, and accumulation. Results show that the maximum movement speed of the Zhaoma landslide is as high as 75 m/s and intensive freeze—thaw action and the unique geological structure of the study area are the primary causes for its high-speed remote movement. Result from the study may provide a theoretical base for prevention and reduction of the landslide disaster induced by freeze—thaw action on the Western Sichuan Plateau.

Keywords: high speed landslide—debris flow; freeze—thaw action; cause analysis; Western Sichuan Plateau

高速滑坡的研究始于 20 世纪 30 年代, 首先是 1932 年著名地质学家海姆对 1881 年瑞士埃尔姆滑坡的研究。海姆在其著作中, 详细地描述了埃尔姆岩崩—碎屑流的运动学现象。但真正引起世界范围内的重视, 是在 1963 年意大利瓦依昂发生灾难性滑坡后才开始的。高速远程滑坡动力学机理的研究, 一直是国内外工程地质领域与山地灾害领域崩塌、滑坡灾

害研究的前沿热点问题, 在理论方面无论是在基础研究还是在应用基础研究领域均具有重要的科学意义^[1]。

目前的研究显示, 影响高速远程滑坡—碎屑流的运动机制及位移的因素很多, 而且不同地质条件下, 主控因素及各个因素之间的影响权重又有所不同^[2]。研究发现, 地震、降雨以及人类工程活动是高速滑坡

收稿日期: 2013-03-22

修回日期: 2013-04-03

资助项目: 公益性地质调查项目“西南山区地质灾害详细调查”(1212011140006); 国家自然科学基金项目“冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集机制研究”(41101086)

作者简介: 李鹏岳(1987—), 男(汉族), 河南省禹州市人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为地质灾害防治的研究。E-mail: 283932524@qq.com。

最常见也是最主要的诱发因素,地震诱发高速滑坡成为近年来,特别是“5·12”汶川大地震后中国学者们争相研究的话题^[3-8]。在自然状态下突发的高速滑坡因工程实例少而研究较少。本文着重研究了在无地震,无降雨,无人工程活动影响下产生的高速远程滑坡。分析认为,川西高原强烈的冻融作用及滑坡区特有的地质构造是产生高速远程滑坡的根本原因,此类滑坡隐蔽性极强,在没有任何预兆的情况下突然溃滑,高速运动,其危害性不容小觑,值得深入研究。

1 滑坡区地质环境条件

2010年3月20日凌晨,四川省甘孜州德格县中扎科乡村科村赵玛山发生山体滑坡,约 $5.25 \times 10^5 \text{ m}^3$ 山体在无降雨及无地震的情况下突然下滑,迅即解体转化为碎屑流,在巨大的重力势能驱动下高速滑动,沿途不断携卷和铲刮山坡表层松散物质,到达沟谷谷底后向对岸山坡爬高近百米,随后转向 90° 向沟谷下游继续高速运动,最终运动距离达1.9 km,滑坡物质直接堆积于沟道内,将沟底通村公路直接掩埋,并在堆积体上游侧形成一小型堰塞湖。如果区域内发生持续强降雨,会产生次生灾害,形成泥石流,将危及下游约18户居民的生命财产安全。

1.1 地形地貌

滑坡区地处横断山系沙鲁里山脉北部金沙江峡谷地带,属构造侵蚀中切割高山。赵玛山总体走向呈北西—南东,山脊两侧均有季节性水沟。赵玛滑坡位于赵玛山北东侧沟谷上段。

赵玛山山顶海拔高程4 765 m,滑坡滑源区顶部高程约4 690 m,滑坡前缘高程约4 230 m,堆积物前缘高程4 080 m,滑坡相对高差610 m,平均坡度 30° 。滑源区后缘和前缘高程分别为4 690 m和4 640 m,相对高差50 m。携卷铲刮区长约650 m,宽约160 m,出露高程4 230~4 640 m,高差410 m,地形坡度 40° 。主堆积区出露高程4 230~4 080 m。堆积体长1.3 km,高差150 m,堆积体平均坡度仅 6.5° 。

1.2 地层岩性

赵玛山山体出露三叠系下统两河口组中段(T^3lh^2)地层,坡体浅表层覆盖第四系松散崩积层(Q^{col+dl})。

(1) 两河口组地层(T^3lh^2)主要为灰色薄至厚层长石石英粉砂岩或绿灰色中层至块状长石岩屑砂岩,凝灰质长石岩屑砂岩与灰黑色粉砂质绢云板岩互层,滑坡区岩性主要为板岩。

(2) 第四系主要分布于坡体浅表层,厚度0.5~1 m不等,由碎块石组成,块石粒径0.3~0.5 m。

1.3 地质构造

滑坡区位于木同一产科沟背斜轴部,该背斜属于瓦须褶皱束的一个褶皱,褶皱轴向 305° ,延长35 km,背斜核部为两河口组中段砂岩、板岩组成,翼部为两河口组上段,岩层倾角较陡,该背斜轴部从滑坡体中下段通过,背斜两翼不对称,南西翼倾角 40° ,北东翼倾角 62° 。

1.4 降雨情况

根据德格县气象局1971—2010年观测资料统计,多年平均降雨量为624.6 mm,每年降雨集中在6—9月,其降雨量达500.9 mm,占全年降雨量的80.0%,月平均降雨量最多为133.9 mm(7月),最少为1.6 mm(12月);最大24 h降雨量为40.8 mm,最大30 min降雨量为19.3 mm,最大10 min降雨量为17.3 mm。

2 滑坡的基本特征

2.1 滑坡分区

根据滑坡发生的地形、地貌特征及滑坡的运动和堆积特征,结合现场调查、室内资料整理,沿主滑方向可将赵玛滑坡分为滑源区(I),流通铲刮区(II),堆积区(III)。其中流通铲刮区又进一步细分为主滑流通区(II_1),两侧铲刮携卷区(II_2)和对岸携卷滑塌区(II_3)(图1)。



图1 赵玛滑坡区遥感影像

2.2 滑源区特征

滑源区后缘高程4 690 m,前缘高程4 640 m,高差50 m。山体发生滑坡后,形成近50 m的陡壁(图2)。受构造及风化作用的影响,滑源区岩体风化卸荷强烈,坡体内发育多组结构面,其中对关键块体起控制性作用的结构面有两组:一组产状 $19^\circ \angle 50^\circ \sim 55^\circ$,其走向与坡面近乎一致,陡倾坡外,结构面长且贯通性较好,较平直粗糙,滑坡后壁面即由该组结构面形成,亦是控制滑坡滑动的关键结构面。另一组结构面产状 $35^\circ \angle 30^\circ$,倾坡外和沟谷下游,滑坡的底滑面就

是沿此结构面形成的。根据滑坡前后的坡体形态推测滑坡岩体主滑方向长约 70 m, 底面平均宽度 150 m, 据滑坡后壁高度推测岩体平均高度约 50 m, 估算滑源区岩体体积约 $5.25 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。



图 2 赵玛滑坡滑源区和流通区特征

2.3 流通铲刮区

滑坡的铲刮区位于滑坡体两侧及对岸山体, 根据滑坡流通区特征, 可以将其分为 3 个亚区, 即主滑流通区, 两侧铲刮携卷区和对岸携卷滑塌区。

2.3.1 主滑流通区特征 该区主要表现出沿流通区中轴线呈上大, 中小, 下大沙漏状展布, 处于整个携卷铲刮区中部, 其长约 620 m, 最大宽度 320 m, 最小宽度 70 m, 为碎屑流高速运动主要流经区域。主滑区在剖面上为槽状地形, 为碎屑流高速运动铲刮所致。但在该区底部残留了部分堆积物, 厚度一般数米不等, 在高程 1 213~1 312 m 区域, 横剖面上呈现出中间低两边高的地形, 中间低为高速运动碎屑流冲击铲刮形成, 两侧高的地形为滑坡残留物提供了堆积的平台, 此区域残留了厚度较大的堆积物, 主要受滑坡地形的控制, 堆积物估算方量 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.3.2 两侧铲刮携卷区特征 该区贯穿于整个流通区, 为高速碎屑流沿途铲刮沟谷两侧山坡形成, 在滑坡中部左侧斜坡上留下了明显的表层松散物质被铲刮的壁面(图 2)。根据擦痕分析认为, 下部的运动痕迹为碎屑流高速运动所致, 主要为大致平行于坡面地形, 中上部运动痕迹倾角较下部陡, 分析认为是斜坡浅表层松散物质局部滑塌所致。

2.3.3 对岸冲击滑塌区特征 由于该滑坡滑源区位置较高, 加之滑坡前缘沟谷较窄, 滑坡产生的高速碎屑流直接冲击到对岸山坡(图 3), 随之铲刮坡体, 坡体物质在强大的能量下, 并未完全堆积, 大部分岩土体沿沟谷下游方向继续运动。坡体上擦痕明显(图 4), 擦痕的迹线清楚地表明, 在紧邻坡体剪出口前缘, 擦痕倾向于坡体下游, 倾角约 45° , 随后擦痕迅速变缓, 倾角仅 10° 左右, 基本与沟谷谷底倾角相当。

该区域在平面上呈矩形, 高约 100 m, 宽度约 500 m, 被铲刮厚度 0.5~1 m 不等, 估算铲刮方量 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。铲刮上部停留堆积的物质以大块石为主, 粒径 20~80 cm 的物质占 70%, 下部物质以块碎石土为主, 颗粒粒径明显变小, 在立面图上表现出从上到下颗粒逐渐变小的反堆积特点^[9-11]。



图 3 赵玛滑坡对岸冲击滑塌区



图 4 赵玛滑坡冲击滑塌区擦痕

2.4 堆积区特征

由于赵玛滑坡高度近 500 m, 巨大的势能使得滑坡体物质高速运动到对岸坡体后并未完全堆积, 而是在携卷对岸坡体物质转向近 90° 后向沟谷下游继续运动, 如水流似的在沟谷左右岸各爬高一次后逐渐堆积于沟道内。其中右岸携卷铲刮高度约 30 m, 宽度 150 m, 铲刮的过程中坡体物质滑塌, 擦痕清晰, 擦痕上陡下缓, 倾向沟谷下游。左岸携卷铲刮区的高度约 15 m, 宽度约 80 m。

堆积区在平面上呈现为上宽下窄的形态, 上游最大宽度 160 m, 下游宽度 50 m, 长度 1.3 km。该区堆积物厚度分布具有越向堆积物前缘越薄, 且堆积物粒径具有从后向前减小的趋势。在纵向上, 堆积区中上段堆积厚度一般为 15~20 m, 物质组成为碎块石土, 其中碎石成分为灰黑色砂板岩, 最大粒径 2.5 m, 平均粒径约 0.8 m; 而在堆积体前缘, 其厚度约 1~2 m, 物质组成为碎块石土, 土体含量明显变少, 最大粒径为 1.0 m, 平均粒径 0.3 m, 粒径统计结果见图

5—6。由图 5—6 可以看出,总的来说,堆积物平均粒径从堆积区后缘向前缘变小,且堆积物前缘粒径较均一,大多集中在 0.5~1 m,细粒物质明显减少。

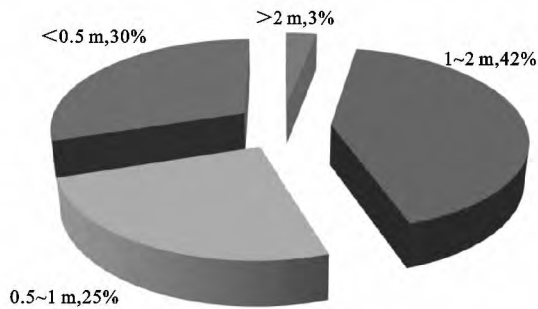


图 5 堆积体后缘粒径统计结果

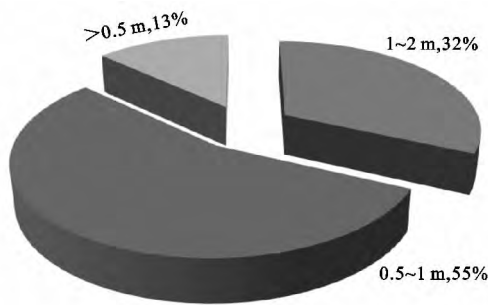


图 6 堆积体前缘粒径统计结果

3 滑坡失稳过程

(1) 孕育阶段。滑坡所处位置构造作用强烈,褶皱发育,岩体节理裂隙发育;滑坡后缘山坡常年积雪,冰雪融水通过裂隙入渗坡体,使滑体的岩土体软化,降低了岩土体的抗剪强度,增加了滑体的容重和下滑推力。由于冻融作用的影响,加剧了裂缝的发育,同时冻胀力使得锁固段岩体范围不断缩小。

(2) 高速运动—碎屑化阶段。岩体锁固段消失后,在巨大的势能条件下,滑坡体在启动后沿 NE20° 方向运动,势能不断转化为动能,块体的运动速度越来越快,在主滑方向上遇陡坡加速,溃滑解体,形成碎屑流。并且沿途不断携卷铲刮,随后与谷底碰撞,并向对岸山坡爬高约 100 m,之后转向近 90° 向沟谷下游运动。

通过现场调查及遥感影像分析,赵玛滑坡启动后水平运动约 1 900 m,滑动高差 610 m 左右。根据碎屑流的特征对其沿途速度进行估算,采用 Scheidegger 提出的计算公式^[12]:

$$V = \sqrt{2g(H - f \cdot L)}$$

式中: V ——估算点滑体速度(m/s); g ——重力加速度值(m/s²); H ——滑坡后缘顶点至估算点高程差

(m); f ——等效摩擦系数,其计算公式为滑坡最大高程差与最大水平距离的比值; L ——滑坡后缘点至估算点水平距离(m)。

对于赵玛滑坡,其 $f = 610 / 1\,900 = 0.321$ 。根据滑坡的剖面形态特征及计算公式,可以得出赵玛滑坡碎屑流沿其运动轨迹铲刮堆积的速度(图 7)。计算结果显示,滑坡运动经历一个先加速后减速的过程,最大速度达到了 75 m/s,为一高速滑坡。

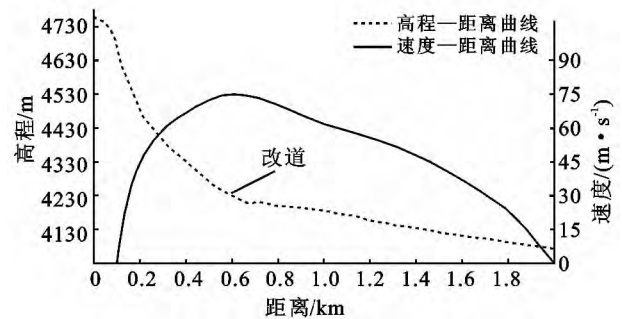


图 7 赵玛滑坡碎屑流运动速度随水平距离的变化

(3) 堆积阶段。碎屑流高速运动到谷底,碰撞后爬高到对岸形成一定规模的反堆积,之后在剩余能量的驱动下,向地势较低的沟谷下游运动堆积,运动过程中分别于左右岸各爬高铲刮一次。整个堆积区高程差仅 150 m,但水平距离却达到 1 300 m,可见,碎屑流运动到谷底转向后其速度仍非常快。

4 滑坡成因分析

4.1 地形地貌因素

赵玛山所处地貌为中切割高山区,山高坡陡,相对高差 600 m,最大坡度达 40°,滑源区部位山体突出,滑体前缘临空条件好,为滑源区岩体的失稳破坏提供了较好的地形地貌条件。

4.2 地质构造因素

滑坡区位于瓦须褶皱束中木同一产科沟背斜的轴部,构造作用一方面使得岩体节理裂隙发育,便于受到风化作用的影响,另一方面,褶皱的核部沿轴线方向发育拉张裂缝,这些拉张裂缝切割岩体,构成了滑坡的控滑结构面。

4.3 冻融作用因素

滑坡区位于川西高原上,昼夜温差大,冻融作用强烈。从遥感影像上可以看出,滑坡滑源区上部有常年积雪,这些积雪为冻融作用提供了源源不断的水力条件。冻融作用对滑坡的影响有两方面,一方面冻融作用使整个滑坡区岩体碎裂化,另一方面冻融作用加速了滑坡锁固段的断裂。

综合分析,滑坡区构造及冻融作用强烈,使得滑坡岩体碎裂化,构造作用使褶皱核部沿轴线方向发育拉张裂缝。由于赵玛滑坡坡面走向与褶皱轴线方向一致,且褶皱核部从滑坡体下部通过,因此,褶皱核部产生的拉张裂缝构成了滑坡失稳破坏的一条控制性结构面。加之滑坡后缘常年积雪,雪水融化入渗坡体,这些雪水在水状态下,主要表现为软化结构面,降低结构面抗剪强度,且存在一定的静水压力。在气温较低时,水转化为冰,产生“冰劈”作用,直接作用于节理岩体,加速锁固段破裂^[13-15]。当锁固段消失后,滑体沿剪出口向临空方向滑出,滑体铲刮遭受强烈风化作用的坡体继而碎屑化,强大的势能使得碎屑流高速运动。

5 结论

(1) 赵玛滑坡是在无降雨,无地震的情况下发生的一个高位高速岩质滑坡,其高差 610 m,最大滑动距离 1 900 m,最大滑速达到 75 m/s。

(2) 滑坡区位于褶皱轴部,构造作用强烈,节理裂隙发育,加之其位于川西高原上,强烈的冻融作用是诱发滑坡失稳破坏的一个主要原因。

(3) 根据滑坡发生的地形、地貌特征及滑坡的运动和堆积特征,结合现场调查、室内资料整理,可将赵玛滑坡划分为滑源区、流通铲刮区和堆积区,其中流通铲刮区可细化为主滑流通区、两侧铲刮携卷区和对岸携卷滑塌区。

(4) 滑坡的失稳过程可分为 3 个阶段:孕育阶段、高速运动并碎屑化阶段和堆积阶段,高位重力势能及碎屑化是该滑坡高速远程运动的一个重要原因。

[参 考 文 献]

- [1] 程谦恭,张倬元,黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 72-84.
- [2] 张明,殷跃平,吴树仁,等. 高速远程滑坡—碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805-817.
- [3] 苟富刚,王运生,吴俊峰,等. 都江堰庙坝地震高位滑坡特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 21-29.
- [4] 许强,董秀军,邓茂林,等. 2010 年“7·27”四川汉源二蛮山滑坡—碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 609-622.
- [5] 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.
- [6] 赵宇,崔鹏,王成华,等. 重庆万盛煤矸石自然爆炸型滑坡碎屑流成因探讨[J]. 山地学报, 2005, 23(2): 169-173.
- [7] 程谦恭,王玉峰,朱圻,等. 高速远程滑坡超前冲击气液动力学机理[J]. 山地学报, 2011, 29(1): 70-80.
- [8] 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(2): 3491-3502.
- [9] Strom A. Morphology and internal structure of rock-slides and rock avalanches grounds and constraints for their modeling [M] // Landslides from Massive Rock Slope Failure, 2006: 305-326.
- [10] Hewitt K. Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya[J]. Science, 1988, 242(4875): 64-67.
- [11] Yarnold J C. Rock-avalanche characteristics in dry climates and the effect of flow into lakes: Insights from mid-Tertiary sedimentary breccias near Artillery Peak, Arizona[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105(3): 345-360.
- [12] Scheidegger A E. On the prediction of the reaching and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231-236.
- [13] 陈天城,魏炳乾. 冻结融解作用对岩石边坡稳定的影响[J]. 西北水力水电, 2003, 19(3): 5-8.
- [14] 徐光苗,刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [15] 荆继红,韩双平,王新忠,等. 冻结—冻融过程中水分运移机理[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 50-54.