

DOI:10.11918/202009039

“10·10”西藏白格滑坡运动特征反演分析

王 塞¹, 邓建辉¹, 陈 菲^{2,3}, 高云建¹, 姚依凡¹

(1. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学), 成都 610065;

2. 成都大学 建筑与土木工程学院, 成都 610106; 3. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610042)

摘 要: 为获取“10·10”白格滑坡运动规律与特征, 基于“10·10”白格滑坡发育的3大区(启动区、堆积区、冲击区)和6个运动阶段(主体失稳破坏、牵引区启动、高速临空滑跃、冲击对岸、折返相撞及水砂射流、堆积坝次级滑移), 对滑坡碎屑体堆积状态及其在四川岸的冲击形态进行分析。采用谢德格尔法及能量转化计算方法, 选取滑坡体冲击高度的5个特征点, 计算滑坡碎屑体在各运动阶段的运动速度。结果表明: 主滑区阻滑区滑体以2.2 m/s的初速度启动, 从启动区至剪出口, 速度不断增大, 5个特征点达到最大速度, 分别为 H_1 67.0 m/s、 H_2 73.0 m/s、 H_3 73.7 m/s、 H_4 73.2 m/s、 H_5 68.3 m/s; 牵引区滑体到达剪出口时, 速度为70.2 m/s; 主滑区阻滑区滑体的滑动速度具有从中间向两端递减的态势, 其中滑坡主滑方向的中间位置速度最高, 达73.7 m/s; 滑体整体剧动时所释放的能量 E 至少为 $10^{10.8}$ J, 引起震动相当于4.0~4.7级的表层基岩地震。通过滑坡冲击地貌参数反演“10·10”白格滑坡运动特征, 将有助于加深对白格滑坡动力学机制的认识, 为该类高速岩质滑坡的预测和防治提供理论依据。

关键词: 白格滑坡; 滑速; 冲起高度; 运动特性; 能量

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)02-0162-09

Inverse analysis on motion characteristics of "10·10" Baige landslide in Tibet

WANG Sai¹, DENG Jianhui¹, CHEN Fei^{2,3}, GAO Yunjian¹, YAO Yifan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering (Sichuan University), Chengdu 610065, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

3 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610042, China)

Abstract: In order to obtain the movement law and characteristics of the "10·10" Baige landslide, based on the three zones (initiation zone, accumulation zone, and impact zone) and six stages of motion (instability and failure of the main body, initiation of traction zone, high-speeding slide in the air, impact on the opposite shore, turn-backing collision and jet of water and sand, and secondary slip of the pileup dam) of the Baige landslide, the accumulation state of landslide debris body and its impact shape in the other side of the river (in Sichuan Province) were analyzed. Adopting the calculation method proposed by Sheidegger and the energy transformation calculation method, five characteristic points considering impact height were selected to calculate the velocity of landslide debris body during each motion stage. Results show that the landslide initiated with a velocity of 2.2 m/s, and the velocity of the landslide body increased constantly from the initiation zone to the shear outlet. The maximum velocities of the five characteristic points were H_1 67.0 m/s, H_2 73.0 m/s, H_3 73.7 m/s, H_4 73.2 m/s, and H_5 68.3 m/s, respectively. When the sliding body in the traction zone reached the shear outlet, the velocity was 70.2 m/s. The velocities in main slide zone and resistance zone gradually decreased from the middle to both ends, and the velocity was the highest in the main sliding direction of the landslide, up to 73.7 m/s. The energy released at least $10^{10.8}$ J when the whole sliding body moved, causing vibration equivalent to the surface bedrock earthquakes of 4.0 to 4.7 magnitudes. The study of the motion characteristics of "10·10" Baige landslide on the basis of the geomorphic features of landslide impact will deepen the understanding of the kinetic mechanism of Baige landslide and provide reference for the prediction, mitigation, and prevention of similar geohazards.

Keywords: Baige landslide; sliding speed; flushing height; motion characteristics; energy

青藏高原因其复杂的地质构造背景、陡峭的地

形地貌条件, 高速岩质滑坡广泛发育于区内的高山峡谷中, 且往往具有高位、高剪出口等特性^[1]。在地形陡峭的峡谷地区, 高速岩质滑坡因其势能大、运动速度快的特点, 还易造成堵江事件以及对上下游的淹没、洪水灾害^[1-5]。近年来, 由于降雨、地震等原因, 此类高速岩质滑坡频发, 给社会带来了巨大的

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505006-03)

作者简介: 王 塞(1993—), 男, 硕士研究生;

邓建辉(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师

通信作者: 邓建辉, jhdeng@scu.edu.cn

损失。由于高速岩质滑坡特殊复杂的发育条件和运动特征,无论是滑坡本身还是其引发的灾害链均严重威胁山区居民的生命财产安全,而目前对于该类滑坡运动特性并没有统一明确的分析方法,因此,急需开展高速岩质滑坡运动特性的深入研究。

2018年10月10日(“10·10”滑坡)和11月3日(“11·3”滑坡)西藏自治区江达县白格村在一个月内连续两次发生高位山体滑坡,滑坡碎屑体堵塞金沙江,形成堰塞湖。目前已有不少学者针对白格滑坡开展了研究工作^[6-18],然而这些研究多集中于白格滑坡地质条件和形成机制的分析,或集中于白格滑坡的运动、堵江过程模拟,白格滑坡在各运动阶段的不同运动速度及状态尚未查清。

“10·10”白格滑坡先后经历了主体失稳破坏、牵引区启动、高速临空滑跃、冲击对岸、折返相撞及水砂射流、堆积坝次级滑移6个运动阶段,并于高速运动后在金沙江对岸造成严重冲击和水砂射流破坏,形成高达176 m的明显冲击痕迹。因此,依据对白格滑坡的现场调查,提取和量测滑坡运动参数、冲击区几何参数、滑坡体积等关键数据,基于滑坡碎屑体冲击高度,反演和计算“10·10”白格滑坡在各阶段的运动速度。研究结果有助于加深高速岩质滑坡运动特性的认识,可为该类滑坡的预测和防治提

供理论依据。

1 研究区概况

1.1 地质条件

白格滑坡(31.078887°N,98.698023°E)位于中国西藏自治区江达县波罗乡白格村,距波罗乡20 km,发生于金沙江右岸。滑坡所在区位于金沙江缝合带,区内主要断裂总体走向为NNW-SSE,波罗-木协断裂是距离白格滑坡后缘最近的断裂(如图1)。滑坡周边区域出露的地层岩性按昌都-江达地层分区主要有三叠系金古组(T_3jn)灰岩带,元古界雄松群(P_1xn^a)斜长片麻岩组,燕山期戈坡超单元($\eta\gamma_5^{2b}$)和则巴超单元($\gamma\delta_5^{2a}$)的花岗岩组,三叠系下逆松多组(T_3x)的碳酸岩盐和碎屑岩段(按义敦-巴塘地层分区),并在白格滑坡后缘的波罗-木协断裂发育有华里西期金沙江超镁铁质和蛇纹岩带($\phi_{\omega 4}$)^[19],燕山期的花岗闪长岩($\gamma\delta_5^{2a}$)也出露于滑坡南侧,该酸性岩石也存在局部侵入。在滑动区左侧边界的局部地层中也发现可能为燕山期的花岗岩斑岩。研究区上下部岩性及风化程度不一,滑坡主要发生于上部全风化蚀变片麻岩带,中部以强风化片麻岩夹炭质板岩为主,下部以中风化的片麻岩为主,如图1所示。

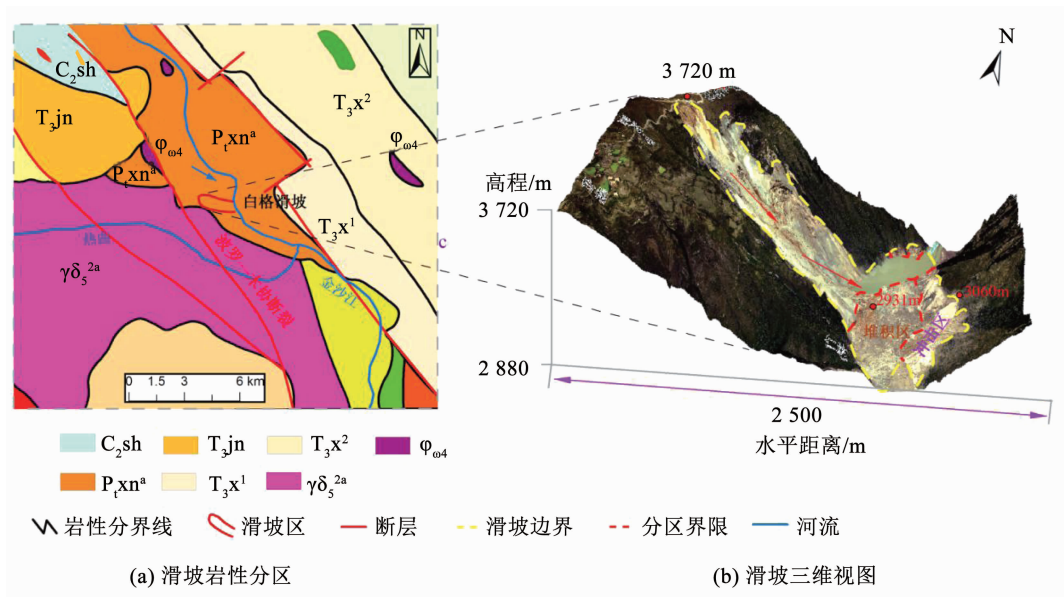


图1 白格滑坡基本概况
Fig.1 Overview of Baige landslide

1.2 地形地貌条件

研究区为强烈侵蚀区,海拔差异超过1720 m (2880~4600 m)。受河流的强烈侵蚀影响,金沙江以V形河谷为主。滑坡区地处金沙江河谷右岸,河道高程为2880 m,滑坡后缘顶部高程3720 m,相对高差840 m。滑坡区岸坡较为陡峻,平均坡度

30°。滑坡表面由上到下发育3级平台:一级平台范围最广,包含白格村等区域,海拔高程3450~3550 m;二级平台次之,海拔高程3100~3200 m;三级平台靠近金沙江,位于滑坡剪出口右侧,形态特征不明显,海拔高程2940~2970 m。

1.3 气候条件

研究区气温在-15~28℃变化,年平均温度为4.5℃。据江达县气象站资料,该县多年平均降水量650 mm,最大年降水量1 067.7 mm,最大月降水量229.5 mm。年内降水分布不均,干湿季节分明。10月—次年5月为旱季,降水稀少,降雨量约占全年降雨量的12.8%。6—9月为雨季,降雨量约占全年降水量的87.2%。该县总体上雨量较为贫乏,但由于降水量时空分布不均匀,局地暴雨现象时有发生,成为泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害的重要诱发因素。2018年滑坡区邻近3个乡镇降雨量显示,6—9月当地降雨量明显增加(如图2)。因此,推断降雨对“10·10”白格滑坡的发育和前置斜坡变形应有一定贡献作用。

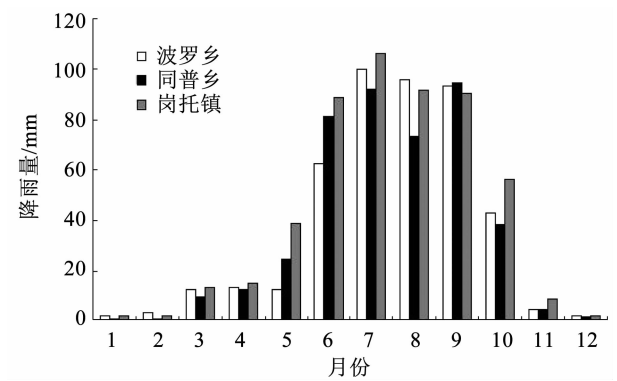


图2 2018年3个乡镇降雨数据

Fig. 2 Rainfall data of three towns in 2018

2 滑坡运动特征

2.1 滑坡运动分区

“10·10”白格滑坡主要分为启动区、堆积区、冲击区3区。“10·10”白格滑坡启动区沿坡面纵向距离较长,海拔高度分布于2 980~3 720 m。如图3、5所示,滑坡启动区可进一步细分为3个亚区:1)牵引区(1-1)。位于一级平台之上,海拔为3 500~3 720 m,体积458万m³。该区靠近波罗-木协断层,且风化非常严重,岩性主要以强蚀变片麻岩为主,性状近似为土体,滑坡体非常松散;2)主滑区(1-2)。该区主要分布于一、二级平台之间,海拔为3 100~3 500 m,体积1 328万m³。主滑区主要夹于两侧基岩区之间,形成楔形体构造,岩体主要以片麻岩夹炭质板岩为主,风化程度相对弱于牵引区;3)锁固段(1-3)。主要位于白格滑坡三级平台区,海拔为2 980~3 100 m,体积80万m³。该区岩体主要由相对完整的片麻岩组成,结构面不发育。因此,在主滑区重力压力的作用下,锁固段首先发生失稳破坏,并诱导主滑区松散滑坡体一起向下滑动。

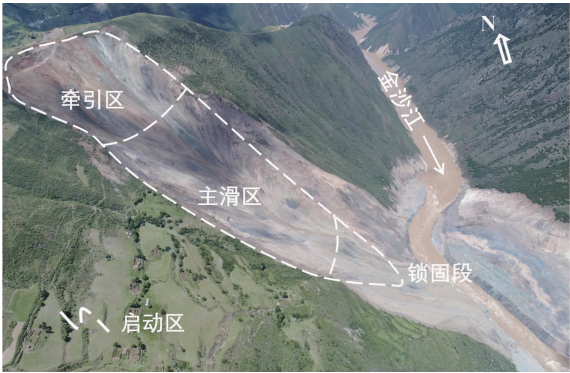


图3 “10·10”白格滑坡启动区

Fig. 3 "10·10" Baige landslide initiation zone

“10·10”白格滑坡堆积区具有左岸高、右岸低的堆积形态。左岸堆积体部分主要由两部分滑体组成,岩性分别为弱风化片麻岩块和碳质板岩细颗粒,对应着锁固段和主滑区的滑体;右岸堆积体部分由强蚀变片麻岩蛇纹岩颗粒组成,对应着牵引区滑体,在堆积区形成之初,其内部持续发生着次级滑移。根据现场精细调查,堆积区堰塞坝坝体长1 200 m,平均宽380 m,总面积38万m²。坝体溃口点海拔2 931 m,厚度47 m,最高点海拔为3 005 m,最高厚度为80 m,平均厚度32 m,堆积区滑坡方量达1 866万m³。

“10·10”白格滑坡冲击区主要影响金沙江左岸(四川侧),如图4、5所示,分为碎屑流冲击区(3-1)、水砂射流区(3-2)、淤泥污染区(3-3)3个亚区。碎屑流冲击区位于金沙江左岸上游段,金沙江左岸(四川侧)为碎屑体主要冲击区,其面积达到8.4万m²,分布形态为中间冲击高度向两侧递减,在冲击坡面上,残存有非常明显的滑坡碎屑物;金沙江右岸(西藏侧)为折返次级冲击区,面积仅为2.1万m²。水砂射流区位于金沙江左岸下游段,为碎屑体撞击激起的水砂造成的冲击破坏。

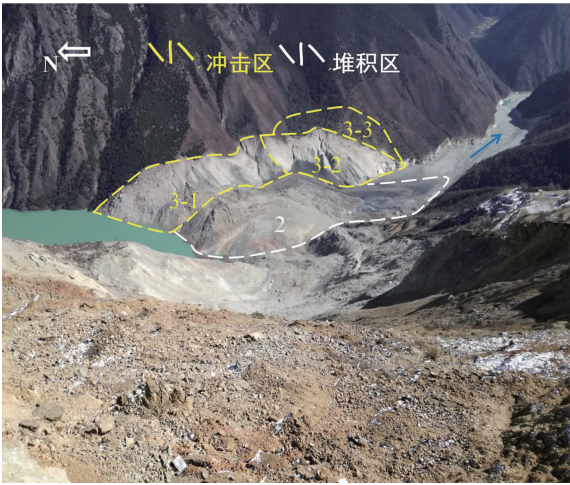


图4 “10·10”白格滑坡冲击区和堆积区

Fig. 4 "10·10" Baige landslide impact zone and accumulation zone

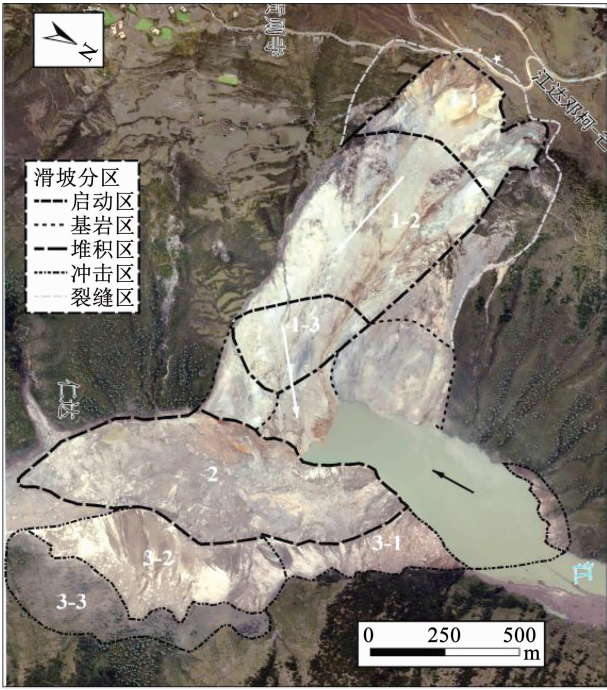


图5 “10·10”白格滑坡分区

Fig.5 "10·10" Baige landslide zoning

2.2 滑坡运动过程

基于现场调查,白格滑坡运动过程可分为主体失稳破坏、牵引区启动、高速临空滑跃、冲击对岸、折返相撞及水砂射流、堆积坝次级滑移6个阶段:1)主体失稳破坏,滑坡启动区锁固段在重力作用下重压失稳,诱导上部主滑区整体启动发生滑移;2)牵引区启动,主滑区滑移,牵引区下部临空面形成,由于失去主滑区滑体的支撑作用,最终失稳破坏;3)高速临空滑跃,邻近江边,滑体于拔河高度约100 m处剪出飞跃河道;4)冲击对岸阶段,滑坡体冲击金沙江对岸四川侧,沿坡面爬升到海拔3 056 m;5)折返相撞及水砂射流,滑体折返,与牵引区碎屑体对撞于金沙江上,激起水浪发生水砂射流;6)堆积坝次级滑移,堆积坝形成后,由于高度差,堆积坝再次发生次级滑移。

3 滑坡运动速度计算

3.1 滑坡运动基本特征

滑坡体在高速运动的过程中,由于方量大、运动速度快,滑坡体在对岸山体坡面上留下明显的冲击痕迹。滑坡冲高在对面山体上留下长约943 m的弧形痕迹(碎屑流冲击区),弧形最高处位于滑坡中部,冲起高度176 m(海拔3 056 m),往冲击区两端走,冲起高度逐步降低,到两端时,冲起高度为0。另外,部分滑体滑入金沙江,造成高速水砂射流,在对岸(四川岸)也留下了明显痕迹。

3.2 滑坡启动速度计算

由于锁固段岩体主要由相对完整的片麻岩组

成,结构面不发育。经现场调查发现该区滑床基本未残留碎屑,但是新鲜擦痕和基岩剪断破坏特征显著,呈现出较强的应力集中和剪切特征,并且发现剪出口下部存在未扰动区,见图6。因此,推断锁固段以脆性剪断方式启动,和主滑区岩土体以一定初速度抛射而出,并且在重力作用下加速,高速与左岸(四川岸)相撞后逆坡爬行至顶部,随后折返与牵引区岩土体相撞于金沙江上。因此,白格滑坡速度计算必须考虑初速度。



图6 剪出口及其下部未扰动区保存良好的杂草

Fig.6 Well-preserved weeds in the shear outlet and its lower undisturbed area

为便于研究滑坡体启动机制,对白格滑坡的几何条件及边界条件进行简化(如图7),可见在重力及其他外力的长期作用下,滑坡体产生拉裂缝CD,AB段为锁固段,处于滑体剪出口。由主滑区DA段和阻滑区AB段构成的滑面,即将来产生的滑床面位置。白格滑坡在临界启动状态时,AB锁固段部位应力小于或接近该处岩石抗剪强度,此时AB锁固段存在变形但未剪滑,由AB段起到锁固作用。因此,在白格滑坡启动之前,边坡内的岩体应力逐渐增加,能量逐渐聚集。当锁固段AB段应力大于该处岩石抗剪强度的瞬间,抗剪应力骤然按该处岩体“峰残强降率”降低了50%~60%(有时甚至更大),锁固段脆性剪断,释放出的巨大应力使滑坡体由静态转为动态,在滑体启动开始的瞬间出现相当高的“启程剧发速度”,向斜坡重力方向迅猛下滑,而使岩体获得初始速度,即为白格滑坡锁固段和主滑区的“启动速度”,这就是启程剧动的临床峰残强降加速机制^[20]。

根据临床峰残强降加速机制,应用断裂力学原理,分析斜坡累进性破坏过程中锁固段岩体的剪断释能效应,导出平面应力状态下峰残强降剧动速度公式^[20]为

$$v_0 = \sqrt{\frac{\pi g G_v \gamma}{2E}} \cos \alpha (\tan \varphi_p - \tan \varphi_r) \quad (1)$$

式中:根据白格滑坡工程地质特征及室内岩石力学试

验结果, G_V 为单位宽度滑体体积, 此处取 $1\,408\text{ 万 m}^3$; α 为滑动面倾角, 此处取 28° ; E 为岩石弹性模量, 取 24 GPa ; φ_p 、 φ_r 分别为启动区片麻岩峰值抗剪强度和残余抗剪强度, 取为 36.7° 和 30° ; γ 为岩石容重, 取 24.1 kg/m^3 。可得白格滑坡启动初速度为 2.2 m/s 。

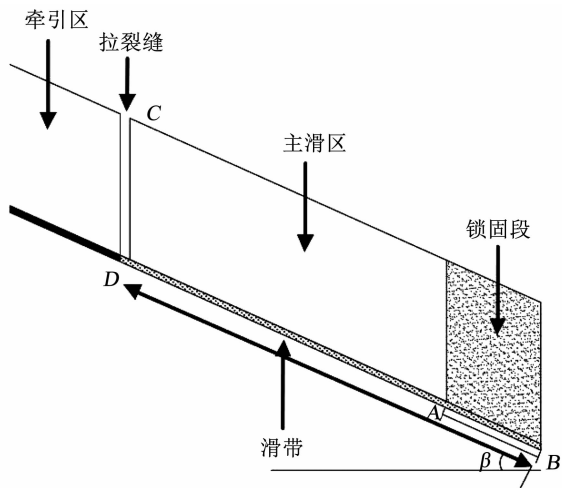


图7 白格滑坡简化模型示意

Fig. 7 Simplified model of Baige landslide

3.3 滑坡撞击对岸高程计算

当主滑区和阻滑区滑体启动后, 该部分滑体以一定速度从高程点 $2\,980\text{ m}$ 处飞跃河岸, 撞击四川岸后逆坡爬行至高程点 $3\,056\text{ m}$ 后滑下。因此, 要利用四川岸滑坡冲击高度计算滑坡行程速度, 必须知道滑坡撞击四川岸高程。

目前, 对于体积为百万至千万立方米巨型滑坡的速度估算, 国际上普遍采用 Scheidegger^[21] 提出的一种滑坡计算公式:

$$v = \sqrt{2g(\Delta h - f\Delta x)} \quad (2)$$

式中: v 为滑坡速率, Δh 为滑坡的垂直高度, Δx 为滑坡的水平距离, f 为等效摩擦因数, g 为重力加速度, 一般取 9.8 m/s^2 。

殷跃平^[22]、许强^[23]、郭长宝等^[1] 分别采用式(2)对贵州关岭滑坡、四川茂县新磨村滑坡、理塘乱石包滑坡的滑动速率进行了计算。

式(2)为最后应用公式, 未考虑初速度。其推导原理依据能量守恒定律, 将全程的摩擦损失均匀化, 定义为等效摩擦因数, 即摩擦力和重力做功转化为动能的变化:

$$\Delta\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = mg\Delta s \sin \beta - \Delta smgf \cos \beta \quad (3)$$

式中: Δs 为滑坡斜距, β 为西藏岸坡角。

如将 $\Delta s \sin \beta = \Delta h$, $\Delta s \cos \beta = \Delta x$ 代入式(3), 可得

$$\frac{1}{g}\Delta\left(\frac{1}{2}v^2\right) = \Delta h - f\Delta x \quad (4)$$

再经过变形, 考虑初速度, 可得滑体任意时刻所具有的瞬时速度:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g\Delta h(1 - f \cot \beta)} \quad (5)$$

如果滑坡发生在 V 型河谷, 那么滑坡在对岸会有一定的冲起高度。如果考虑滑体在四川岸爬升过程, 分析原理同上, 那么滑坡冲起高度最顶点速度为 0, 则可利用滑坡冲起高度计算滑体爬升过程中任一高程点速度。

将滑坡末速度设为 0, 根据功能转化原理可得

$$0 - \frac{1}{2}mv^2 = -mg\Delta h - mgf\Delta x \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg\Delta h + mgf\Delta x \quad (7)$$

$$v = \sqrt{2g\Delta h\left(1 + \frac{f}{\tan \alpha}\right)} \quad (8)$$

如果已知滑体撞击四川岸时的速度, 可以根据爬升顶点高程得出撞击点的高程:

$$\Delta h = \frac{\frac{v^2}{2g}}{1 + \frac{f}{\tan \alpha}} \quad (9)$$

式中: Δh 为滑体爬升高度; α 为四川岸坡角, 取 26° ; f 为等效摩擦因数。由于谢德格尔假设滑体初速度为 0 时, $f = h/x$ 在白格滑坡不满足条件, 选用经验公式^[24] $\lg f = a \lg V + b$, $a = -0.156\,66$, $b = 0.622\,19$, V 为滑体体积, 取 $1\,408\text{ 万 m}^3$, 可得 $f = 0.32$ 。

已知白格滑坡主滑区和阻滑区滑体启动初速度为 2.2 m/s , 利用式(5), Δh 取为 520 m (主滑区阻滑区滑体运动到海拔 $2\,980\text{ m}$), β 取为 28° , $f = 0.32$, 可得

$$v = \sqrt{2.2^2 + 2 \times 9.8 \times 520 \times (1 - 0.32 \times \cot 28^\circ)} = 63.8\text{ m/s}$$

因此, 得到滑体运动到剪出口位置速度为 63.8 m/s , 由于滑体从剪出口飞出时速度极大, 飞跃时间极短, 与四川岸坡碰撞时能量损失只是很少一部分, 此处不进行考虑, 将 63.8 m/s 记为滑体与四川岸坡撞击后的速度。代入式(9)可得

$$\Delta h = \frac{\frac{63.8^2}{2 \times 9.8}}{1 + \frac{0.32}{\tan 26^\circ}} = 125\text{ m}$$

将滑体冲击海拔高度取为 $3\,050\text{ m}$, 则大致得出主滑区和阻滑区滑体飞跃河岸撞击四川岸坡体海拔高度为 $2\,925\text{ m}$ 。

3.4 滑坡运动速度计算

3.4.1 主滑区及阻滑区滑坡运动速度计算

滑坡启动后, 以一定初速度沿滑面下滑到海拔

2 980 m 时,从剪出口滑出,飞跃河岸撞击于四川岸海拔 2 925 m 处,滑坡碎屑体沿四川岸坡面向上爬高,而后回落堆积于河道之中,形成堰塞坝。通过现场调查,结合地形数据和遥感技术,获取滑坡的基本参数,可得滑坡冲击对岸(四川岸)痕迹弧上的 5 个特征点 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 (如图 8),其冲击高度分别为 130、170、176、172、139 m(相对金沙江河床最低海拔 2 880 m)。因为已知滑体撞击四川岸海拔高度为 2 925 m,则 5 个特征点 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 对应的滑体爬升高度分别为 85、125、131、127、94 m。

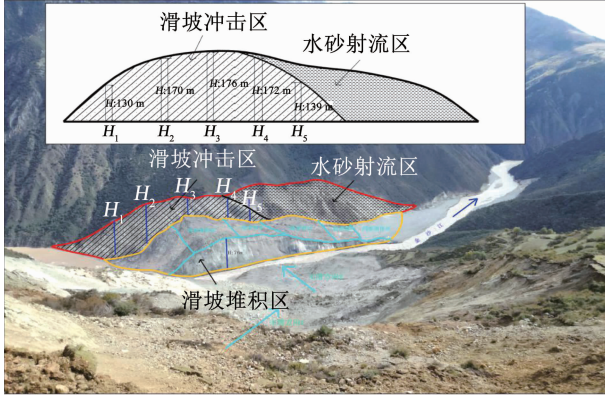


图 8 滑体冲刷及水砂射流区

Fig. 8 Sliding body scouring and water-sand jetting area

Francis 等^[25-26]针对岩质滑坡滑下并冲起的情况,提出了以下公式:

下降过程

$$\frac{1}{2}mv^2 - mgH = -\frac{F_1}{100}mgH \quad (10)$$

上升过程

$$mgh - \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{F_2}{100}mgH \quad (11)$$

$$F_1 + F_2 = F_T \quad (12)$$

式中: m 为滑体质量,kg; v 为滑体速度,m/s; H 为滑体下滑时下降的高度,m; h 为滑体爬升时增加的高度,m; F_1 、 F_2 分别为滑体下降和上升过程中因摩擦而损失的能量百分比; g 为重力加速度,一般取 9.8 m/s^2 。

为了估算滑动过程中的速度,将滑动路径分为 N 段,建立以下联立方程:

$$\left(\frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_{i-1}^2 \right) + (mgh_i - mgh_{i-1}) = -\frac{F_i}{100}mgH, i = 1, \dots, N \quad (13)$$

$$\frac{F_i}{W_i} = \frac{F_T}{W_T} \quad (14)$$

$$W_i = -\mu mg \Delta l_i \quad (15)$$

$$W_T = -\mu mgL \quad (16)$$

式中: H 为滑坡原始高度, h_i 为第 i 点高度, v_i 为第 i 点速度, F_i 为第 i 段的摩擦损失百分比, W_i 为第 i 段损失的能量, F_T 总摩擦损失百分比, W_T 为总损失能量, μ 为滑坡平均摩擦因数, Δl_i 为滑坡体运动路径的水平距离,其余符号同上。

综合式(3)~(7),可得滑坡路径中任一点速度计算公式:

$$v_j = \sqrt{2g \left[H - h_j - (H - h) \frac{l_j}{L} \right]} \quad (17)$$

其中 $l_j = \sum_{i=1}^j \Delta l_i, 1 \leq j \leq N$ 。

Oscar^[26]利用能量转化原理推导出的该速度计算公式,利用滑体产生的冲击高度计算滑体的速度,但是没有考虑初速度,必须在其基础上进行修改:

下降过程

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 - mgH = -\frac{F_1}{100}mgH \quad (18)$$

上升过程

$$mgh - \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{F_2}{100}mgH \quad (19)$$

将滑动路径分为 N 段,仍有式(12),取 $v_{i-1} = v_0, h_{i-1} = H$,按以上方法联立(18)、(19)、(14)~(16),可得

$$v_j = \sqrt{v_0^2 + 2g(H - h_j) - \frac{(2gH + v_0^2 - 2gh)l_j}{L}} \quad (20)$$

其中 $l_j = \sum_{i=1}^j \Delta l_i, 1 \leq j \leq N$ 。

将 5 个特征点 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 对应的滑体爬升高度 85、125、131、127、94 m,分别代入式(20),在主滑区至对岸冲击区滑坡滑动方向上,选取 7 个滑坡高程点计算滑坡的滑动速度。由于对岸 5 个特征点高度不同,利用上述公式将滑坡体近似分为 5 部分在 6 个滑坡高程点进行计算。根据计算结果,白格滑坡从启动阶段开始,其滑动速度不断上升,在到达剪出口时达到顶值,为 73.7 m/s,在四川岸撞击后其滑动速度为 65.8 m/s,逆冲爬坡后滑动速度减小,直到停止。计算结果如表 1 所示,滑坡主滑方向滑动速度特征如图 9 所示。

Francis 等^[25-26]结合滑坡运动的下降高度和上升高度,将摩擦损失的能量分散到运动全过程,在本研究计算滑体飞跃河岸过程中,同样计算了摩擦能量损失,由于滑体下降高差小于河床水平距离,速度有一定减少。实际上,滑体飞跃河岸过程中,会受到空气摩擦阻力而速度减小,更重要的是,滑体与四川岸撞击后,速度会进行衰减。在高速岩质滑坡动力学中,认为岩体材料性质在很大程度上决定了滑坡

土石体与对岸陡壁撞击后能量的衰减系数,在数值上表现为恢复系数 R 。即用恢复系数来简化计算碰撞后岩体介质的速度^[27]:

$$R = \frac{v_1}{v}$$

(21)

一般由坚硬完整基岩构成的岩坡表面具有较高的恢复系数,而软弱堆积物覆盖层覆盖的斜坡表面

恢复系数较低。根据国内外主要斜坡岩体碰撞恢复系数的经验取值 $R = 0.8$ ^[27],可计算得到白格滑坡主滑区阻滑区 5 部分滑体碰撞后速度分别为 53.6、58.4、59.0、58.6、54.6 m/s,对应上述方法速度为 54.3、54.6、65.8、65.0、56.5 m/s,计算结果相差不大,可认为合理。

表 1 白格滑坡主滑区及阻滑区滑体滑动速度计算

Tab. 1 Calculation of sliding velocity of Baige landslide in main slide zone and resistance zone

滑坡高程点/m	高差/m	水平距离/m	坡角/(°)	H_1 滑速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	H_2 滑速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	H_3 滑速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	H_4 滑速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	H_5 滑速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
3 500	575	0	28	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
3 355	430	200	28	40.7	42.8	43.1	42.9	41.1
3 235	310	400	28	53.1	56.3	56.7	56.4	53.7
3 153	228	600	28	56.9	61.3	61.8	61.5	57.8
3 053	128	800	28	63.3	68.6	69.2	68.8	64.4
2 980	55	958	28	67.0	73.0	73.7	73.2	68.3
2 925	0	1 398	26	54.3	54.6	65.8	65.0	56.5
冲击顶点	—	—	—	0	0	0	0	0
冲击顶点高程/m	—	—	—	3 010	3 050	3 056	3 052	3 019
相对撞击点高差/m	—	—	—	85	125	131	127	94

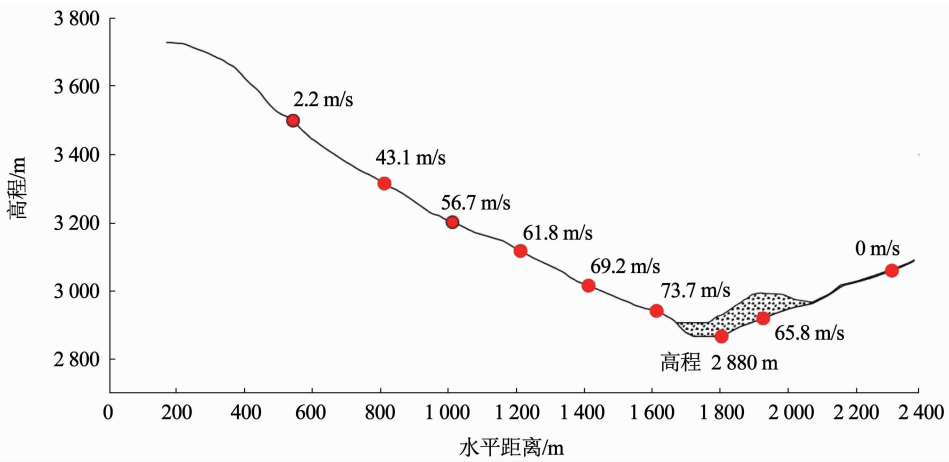


图 9 “10·10”白格滑坡主滑方向滑体运动速度

Fig. 9 Velocity of sliding body in the main sliding direction of "10 · 10" Baige landslide

3.4.2 牵引区滑坡运动速度计算

经现场调查,牵引区主要以强蚀变片麻岩为主,性状近似为土体,而且来自牵引区的滑坡碎屑堆积于堆积区靠右岸一侧,因此,推断当锁固段脆性剪断后,主滑区阻滑区滑体以一定初速度先启动,牵引区后无初速度启动,主滑区阻滑区滑体高速飞跃河岸之后,逆冲到达冲击顶点,随后折返与牵引区岩土体相撞于金沙江上,堆积在金沙江右岸一侧。

已知牵引区体积为 458 万 m^3 ,按经验公式 $\lg f = a \lg V + b$ 可得 $f = 0.38$, β 取 30° , $h = 740 \text{ m}$,据式(5)可得

$$v = \sqrt{2gh(1 - f \cot \beta)} =$$
$$\sqrt{2 \times 9.8 \times 740 \times (1 - 0.38 \cot 30^\circ)} = 70.2 \text{ m/s}$$

可知,牵引区土体在到达剪出口与返回的主滑区阻滑区滑体相撞时,速度极大,碰撞后的碎屑垂直向下运动,撞击河水,激起高速水砂射流与水雾,随后堆积于金沙江的右岸。

3.5 滑坡剧动时的能量计算

滑体在整体运动中,由于剪出口以上约 790 m 段内的滑面,相对上段较平缓,宽约 500 m,构成了具有抗滑效应的锁固段,而滑体剧动正是由于克服

了此段阻力,使之剪切破坏,相当于一次断裂破坏。在破坏的瞬间,滑坡体使长期积蓄的能量以应变弹性波的形式释放,从而产生震动效应。根据文献[28],震级与破裂面积 $A(\text{km}^2)$ 之间关系为 $M = 0.93\log A + 4.38$;震级 M 与破裂长度 $L(\text{km})$ 经验公式为

$$M = (\log L + 2.9)/0.6 \tag{22}$$

该滑坡破裂面长度为0.79 km,面积为0.395 km^2 ,代入上述公式计算其震级分别为4.0和4.7。根据计算震级结果,利用 Gutenberg 等^[29-30]经验公式 $\lg E = 1.5M + 4.8$,计算滑体整体滑动时所释放的能量 E 至少为 $10^{10.8}$ J。因此,白格滑坡时引起的震动相当于4.0~4.7级表层基岩地震。

3.6 四川岸滑坡运动速度验证分析

根据以上分析可知,主滑区阻滑区滑体启动之后,是在高程2 980 m处剪出口滑出,在重力作用下滑体到达四川岸时,撞击点高程必然低于2 980 m,并且高于河床最低处高程2 880 m,若取滑体冲击高程为3 050 m,可得到滑体爬升高差最小为70 m,最大为170 m。利用上述公式得

$$v = \sqrt{2g\Delta h \left(1 + \frac{f}{\tan \alpha}\right)}$$

经过计算可知,代入高差 $\Delta h_1 = 70$ m时,得出 $v_1 = 47.7$ m/s;代入高差 $\Delta h_1 = 170$ m时,得出 $v_1 = 74.3$ m/s。因此,主滑区阻滑区滑体在到达四川岸时,速度必然在47.7~74.3 m/s,这与本研究上述计算结果相符。

3.7 滑坡运动特征分析

“10·10”白格滑坡滑动运动过程具有如下特征:1)主滑区阻滑区滑体的主滑方向运动速度从2.2 m/s增加到65.8 m/s,变化极大,并且峰值速度较大,原因在于一方面,“10·10”白格滑坡相对高差巨大,从滑坡启动区到四川岸撞击点,高差达575 m,平均坡度为28°,地形陡峭,具有巨大的势能利于滑坡动能的释放;另一方面,白格滑坡的启动物质以岩体为主,并且以崩滑的形式启动,滑动速度快。2)根据滑坡冲击对岸的冲起高度,滑坡的滑动速度由中部向两端递减,原因在于滑坡的主滑方向滑动量大,运动距离最短,摩擦因数相对较小,其动能最大,冲起高度最大。3)牵引区岩土体由于依附于主滑区土体之上,主滑区和阻滑区启动之后,牵引区岩土体在重力作用下,无初速度下滑至金沙江之上。

4 结 论

1)白格滑坡锁固段脆性剪断,导致主滑区和锁

固段滑体以2.2 m/s的初速度启动,高速飞跃河岸,逆冲到冲击顶点,随即折返与牵引区土体相撞于金沙江上。

2)滑坡属高位高速岩质滑坡,由于本次滑坡动能巨大,在对岸留下明显的冲击痕迹,根据其两岸冲起高度,计算得到滑速在水平方向上的差异变化特性,即以主滑方向为中心,向两端延伸其滑速不断降低,其中主滑方向的速度最大,为73.7 m/s。牵引区无初速度启动,在到达剪出口时,速度为70.2 m/s。

3)白格滑坡具有锁固段,剪切破坏瞬间,滑体整体滑动时所释放的能量 E 至少为 $10^{10.8}$ J,引起的震动相当于4.0~4.7级的表层基岩地震。

参考文献

[1]郭长宝,杜宇本,佟元清,等.青藏高原东缘理塘乱石包高速远程滑坡发育特征与形成机理[J].地质通报,2016,35(8):1332
GUO Changbao, DU Yuben, TONG Yuanqing, et al. Huge long-runout landslide characteristics and formation mechanism: a case study of the Luanshibao landslide, Litang County, Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(8): 1332. DOI:10.3969/j. issn. 1671 - 2552. 2016. 08. 014

[2]刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(3): 11
LIU Wei. Study on the characteristics of huge scale-super highspeed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(3): 11. DOI: 10.3969/j. issn. 1003 - 8035. 2002. 03. 002

[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
HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslides at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730. DOI:10.3969/j. issn. 1004 - 9665. 2008. 06. 002

[4]殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 153
YIN Yueping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 153. DOI: 10.3969/j. issn. 1004 - 9665. 2009. 02. 002

[5]FAN Xuanmei, XU Qiang, GIANVITO S, et al. Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China [J]. Landslides, 2017, 14: 2129. DOI: 10.1007/s10346 - 017 - 0907 - 7

[6]LIANG Guilin, WANG Zhen, ZHANG Guowei, et al. Two huge landslides that took place in quick succession within a month at the same location of Jinsha River [J]. Landslides, 2019, 16(5): 1059. DOI:10.1007/s10346 - 019 - 01165 - z

[7]ZHANG Limin, XIAO Te, HE Jian, et al. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018 [J]. Landslides, 2019, 16(10): 1965. DOI: 10.1007/s10346 - 019 - 01247 - y

[8]唐尧,王立娟,马国超,等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 252

- TANG Yao, WANG Lijuan, MA Guochao, et al. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 252. DOI: 10.11834/jrs.20198405
- [9] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1
WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1. DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.01
- [10] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9
DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 9. DOI:10.15961/j.jsuese.201801438
- [11] 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 415
FENG Wenkai, ZHANG Guoqiang, BAI Huilin, et al. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha River on October 11, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 415. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-392
- [12] OUYANG Chaojun, AN Huicong, ZHOU Shu, et al. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. Landslides, 2019, 16(7): 1397. DOI:10.1007/s10346-019-01177-9
- [13] TIAN Shufang, CHEN Ningsheng, WU Hua, et al. New insights into the occurrence of the Baige landslide along the Jinsha River in Tibet[J]. Landslides, 2020, 17, 1207. DOI:10.1007/s10346-020-01351-4
- [14] FAN Xuanmei, YANG Fan, SUBRAMANIAN S S, et al. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China[J]. Landslides, 2020, 17: 147. DOI:10.1007/s10346-019-01313-5
- [15] WU Yongbo, NIU Ruiqing, LU Zhen. A fast monitor and real time early warning system for landslides in the Baige landslide damming event, Tibet, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2019, 48, 1. DOI:10.5194/nhess-2019-48
- [16] 周礼, 范宣梅, 许强, 等. 金沙江白格滑坡运动过程特征数值模拟与危险性预研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1395
ZHOU Li, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. Numerical simulation and hazard prediction on movement process characteristics of Baige landslide in Jinsha River[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1395. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2019-037
- [17] ZHANG Zhen, HE Siming, LIU Wei, et al. Source characteristics and dynamics of the October 2018 Baige landslide revealed by broadband seismograms[J]. Landslides, 2019, 16(4): 777. DOI: 10.1007/s10346-019-01145-3
- [18] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534
XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on October 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-406
- [19] 西藏自治区地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告(白玉县幅(8-47-9)1: 200000)[R]. 拉萨: 西藏自治区地质矿产局, 1992
- [20] 程谦恭, 胡厚田. 剧冲式高速滑坡全程动力学机理分析[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(4): 19
CHENG Qiangong, HU Houtian. Dynamical analysis on the whole process of acute colliding high speed landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 19. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.1999.04.006
- [21] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231. DOI:10.1007/BF01301796
- [22] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 153
YIN Yueping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 153. DOI:10.3969/j.issn.1004-9665.2009.02.002
- [23] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612
XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujuan, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 36(11): 2612. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [24] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009
- [25] FRANCIS P W, BAKER M C W. Mobility of pyroclastic flows[J]. Nature, 1977, 270(5633): 164. DOI:10.1038/270164a0
- [26] ZAMBRANO O M. Large rock avalanches: a kinematic model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(3): 283. DOI: 10.1007/s10706-007-9164-1
- [27] 程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999
CHENG Qiangong, PENG Jianbing, HU Guangtao, et al. Dynamics of high speed rock landslide[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999
- [28] 古宾, 松田时彦. 活断层研究[M]. 北京: 地震出版社, 1983
- [29] GUTENBERG B, RICHTER C F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1942, 32(3): 163
- [30] GUTENBERG B, RICHTER C F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1956, 46(2): 105