

基于能量守恒原理滑石板岩质边坡滑坡速度分析

郝晓平¹, 段衍伟², 唐 博²

(1. 济南市勘察测绘研究院, 济南 250000; 2. 济南岩土工程公司, 济南 250000)

摘要:针对云南省金沙江两家人水电站滑石板边坡拉裂区岩体,考虑滑坡体下滑过程中与坡下已有堆积体发生冲击碰撞的作用,基于能量守恒的原理,依据滑坡体锁固段储能方式的不同,计算了滑坡遽发时的速度,并且依次分析了滑坡下滑各阶段速度和加速度的变化,得出了滑坡体下滑的最终速度;考虑到初始启滑速度及其与坡下堆积体的冲击碰撞作用在预测滑坡的速度及堆积规模方面不可忽略,可为其他滑坡速度的预测和滑坡后减灾防灾综合分析提供参考。

关键词:滑坡参数;滑坡速度;冲击碰撞;堆积规模

中图分类号:TD12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)01-0175-04

滑坡过程速度的计算分析一直是制约滑坡灾害分析的瓶颈。许多学者对此做了探讨,并提出一系列的假说。Shreve^[1]气垫层学说,分析了滑坡速度的异常。卢万年^[2]根据空气动力学引入的机翼理论,解释了大型滑坡体飞跃的现象。程谦恭等^[3]基于断裂力学的滑坡弹冲加速动力学机理,将滑床面附近岩体锁固段所聚集赋存的应变能转变为滑坡体下滑动能,计算了滑坡体初始滑动的弹冲速度。汪洋和殷坤龙^[4]的滑坡体条块分析法,把滑坡体划分为条块,分别计算了各条块的速度来解释滑坡体的整体行为。邢爱国等^[5]从滑坡面间的孔隙水和水汽化角度,阐述了大型滑坡加速机理。对于大型高速滑坡速度的计算和理论分析中外已取得了一定的成果,但对于滑坡过程中滑坡体与坡下堆积体冲击碰撞后的速度及堆积规模的变化研究甚少。

滑坡过程中的速度及冲击碰撞引起滑坡规模的变化实质是一种能量的转化,计算滑坡速度时最常用的方法是动能定理,一般假设滑动面直线形,摩擦恒定,忽略滑动过程中的崩解碎裂耗能,以致求取滑坡体平均下滑速度偏大,且滑动后阶段不考虑与边坡下部的冲击碰撞效应,估计的滑坡规模往往偏小。而相关滑坡试验表明^[6-7],滑坡体的完整性对滑坡下滑速度及滑坡规模的大小影

响甚大。因此在滑坡分析中,对于滑动面的非直线形,考虑滑坡体下滑过程中断裂、崩解、冲击碰撞作用引起的滑坡下滑速度及堆积规模的变化是不可忽略的。

现基于能量守恒的理论,在得出滑坡临界厚度的基础上,推断出滑坡结构面的破坏形式,阐明参数的取值。基于锁固段理论计算锁固段的弯曲变形能,进而确定滑坡遽发时的速度。求解滑坡滑动过程中的速度和加速度,分析滑坡过程中速度和加速度的变化,预了滑坡体的最终速度。

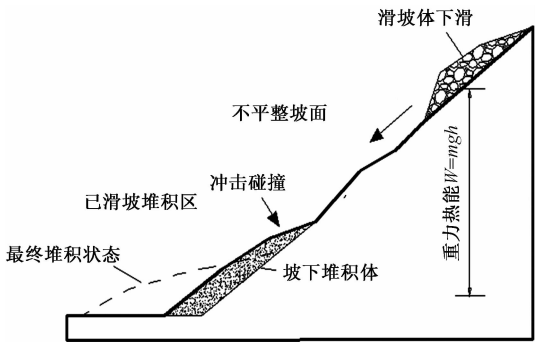


图 1 典型滑坡的速度及冲击碰撞堆积图

1 两家人滑石板顺层岩质边坡

金沙江两家人水电站位于云南省玉龙雪山与哈巴雪山之间,金沙江在此处流向 N40°~45°E,河

收稿日期:2020-08-21

作者简介:郝晓平(1977—),男,山西长治人,济南市勘察测绘研究院部门总工程师,副高级工程师,本科,研究方向:边坡变形;段衍伟(1988—),男,济南岩土工程公司,工程师,硕士,研究方向:岩土力学;唐博(1990—),男,济南岩土工程公司,工程师,本科,研究方向:岩土力学。

水面高程▽1 600 m 左右,地形坡度约 40°~45°,坡顶高程 2 600~3 000 m。滑石板区左岸总体为斜向坡,因金沙江河谷深切,引起应力释放,破坏了边坡的应力平衡,从而产生边坡向临空面方向的回弹,同时由于金沙江下切过程中在岸坡上揭露到层间错动面,受 1996 年 2 月丽江大地震的影响,边坡上切脚岩体松弛,层间错动面内聚力降低,加之后期地表水入渗浸润,层间错动面抗剪强度参数进一步降低,最终导致 1996 年 10 月 28 日滑石板区发生了高速岩体滑坡,滑坡体冲毁坡下的公路和挡墙,进入金沙江后形成滑坡堰塞湖,水位上涨 60 余米,3 h 后形成了较大的决口。滑坡发生后在坡体下部形成的堆积体的形状及地震滑坡过后岩体由于卸荷形成的拉裂区分布如图 2 所示。

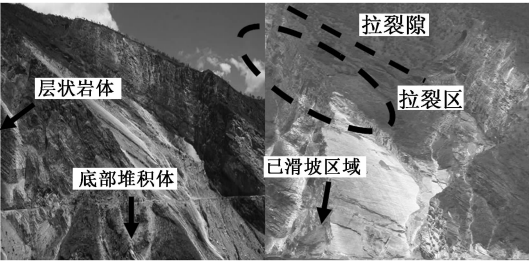


图 2 两家人滑石板边坡拉裂区及已滑坡堆积图

根据滑石板现场地质测绘成果,在上述滑坡之前,至少曾经发生过两次以上的此类岸坡变形,不能排除再次发生类似的岸坡变形。1996 年滑坡时形成的拉裂区仍然处于边坡中部,方量 70 余万方,卸荷松动岩体一旦失稳,将堵塞河道,造成河水壅高,从而对左右岸上厂址厂房安全运行构成直接威胁,故对滑石板边坡拉裂区岩体下滑速度及堆积规模的预测是有必要的。为了对滑石板边坡滑坡过程进行分析,滑石板拉裂区典型地质剖面如图 3 所示。

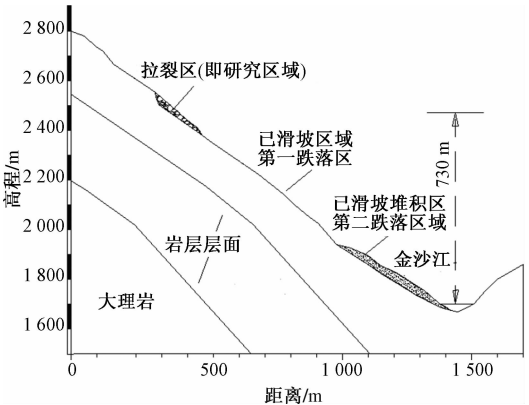


图 3 滑石板典型滑坡分析示意图

2 两家人滑石板的动力学机理分析及速度计算

滑石板拉裂区岩体底滑面为一层间错动面。其稳定性主要由岩层面间的抗剪强度决定,当层间错动带以上岩体厚度不同时,其岩层面间岩体剪切受力状态也会不同,随着层面上部的厚度不同岩层面之间的剪胀峰值抗剪强度方程^[8]为

τ=[σ(1-a_s)(v'+tanθ)+a_sτ_r]/[1-(1-a_s)v'tanθ]

v' = dv/du

式中: a_s 为被剪断的完整岩石的凸起面面积与整个结构面的面积之比; v' 为峰值抗剪强度时的剪胀率; τ_r 为完整岩石的抗剪强度。

表 1 滑石板顺层岩质边坡底滑面试验参数

抗剪(断)强度试验值					
屈服强度		峰值强度		残余强度	
f	C(MPa)	f	C(MPa)	f	C(MPa)
0.36	0.038	0.48	0.051	0.37	0.040

表 2 滑石板区岩体及主结构面力学参数

风化状态	抗剪断强度参数		饱和抗拉强度/MPa
	f	c'(MPa)	
弱风化	0.85	0.60	2.1
微风化	1.2	1.1	3.0

试验研究表明,随着岩体厚度的增加,层间岩体的剪切状态可分三种^[9]。由此,可以根据滑动带上岩体的厚度来确定层面岩体的受力状态,进而确定滑石板拉裂区的宏观抗剪强度,如图 4 所示简化的滑块模型,对单位宽度、厚度 H 的滑块进行受力分析,在自重状态下滑块安全系数可写为

F_s = (μ_s mg cosδ + c)/(mg sinδ)

mg = γH

H = C/γ(sinδ - u_s cosδ)

式中: μ_s 为滑面摩擦系数; c 为滑面黏结力; m 为滑块质量; H 为滑块的厚度; δ 为边坡倾角。当 F_s 等于 1.0 时,滑块处于受力极限平衡状态,将表 1 和表 2 中主要参数代入并结合现场地质勘探其上覆岩体厚度平均厚度约为 45 m,可以得出底滑面剪切状态处于上述的第二种状态。此时拉裂区岩体稳定主要由锁固段抗剪维持,锁固段宏观的抗剪强度的取值为 c=0.30,经计算得 H=0.30。

滑石板拉裂区岩体若发生破坏,其破坏模式与已滑坡区域相似,外部因素的作用引起滑面摩擦系数变小,应力的转移导致岩体锁固段抗滑力的增加,锁固段破坏引起滑坡的发生。根据上述分析中

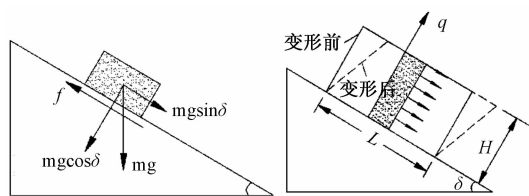


图4 锁固段体弹性应变能计算简图

锁固段综合抗剪强度,取单位宽度锁固段进行分析,受力简图如图4所示。锁固段弯曲能的计算^[10]如下,假设锁固段岩体底部固定,其上部受均布力,条块的任一截面的弯矩可表示为

$$M(x) = q/2(2hx - x^2) \quad (6)$$

对高度为 H_1 的条块,其所积累了弯曲应变能为

$$W_i = \int_0^{H_1} \frac{M^2(x)}{2EI} dx \quad (7)$$

滑坡体均匀变形则总的应变能为

$$\int_0^l \frac{q^2 H_1^5}{15EI} dl = \frac{4lq^2 H_1^5}{5E} \quad (8)$$

滑坡下滑力一定时,由于软弱结构面强度的降低,诱发锁固段破坏,聚集在锁固段的应变能释放,转化为滑坡体的动能:

$$\frac{4lq^2 H_1^5}{5E} = \frac{1}{2} \rho V v_0^2 \quad (9)$$

对于岩体锁固段处于极限状态时,

$$q = c/H_1 + rH \cos \delta \mu_s / H_1 \quad (10)$$

式中: I 为块体的惯性矩,即 $I = bh^3/12$, 其中 b, h 分别为单位截面的宽和高,此处取单位宽和高; E 为块体的弹性模量; c, μ_s 分别为拉裂区锁固段的宏观黏聚力和宏观摩擦系数; δ 为拉裂区边坡的倾角; r 为岩石的容重; l, H_1 分别为拉裂区锁固段的有效长度和高度; H 为滑坡体平均高度。

根据两家人工程地质条件,结合拉裂区滑面分布及相关文献^[10],滑石板边坡拉裂区各计算参数取值如下:拉裂区松动岩体平均厚度约为 45 m。通过滑石板区工程地质平面图提取拉裂区地形等高线,建立滑石板拉裂区三维模型,核算后的拉裂区滑坡体总滑面 $S = 2.609 \times 10^4 \text{ m}^3$,总体积 $V_{\text{总}} = 117.39 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑面长度为 435 m,宽度约为 60 m,单位宽度体积 $V = 1.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。拉裂区滑面倾角 $\delta = 42^\circ$,滑坡体岩石重度 r 取 27 kN/m^3 ,锁固段宏观黏聚力和宏观摩擦系数分别为 $c = 0.3 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0.6$,拉裂区锁固段的有效长度 l 为 160 m,有效高度 H_1 为 18 m,拉裂区总高度 H 为 45 m,拉裂区岩体弹性模量 E 为 3 GPa,可以求得此

时单宽的启动速度 $v = 1.57 \text{ m/s}$,可见刚一启动时就具有了一定的速度。

3 滑坡体运动阶段的能量转化机理及行程速度计算

滑坡体一旦启动后,其速度会增加很快,由于滑坡在滑动过程中,滑坡体位置的不断变化,滑面摩擦系数亦在不断的变化中。为了方便滑坡过程的速度计算,滑面摩擦系数折减引起的加速度的增加,可通过假设滑面摩擦系数为一定值,降低作用于滑面的法向压力来反映。滑体动摩擦系数参考谢得格尔法^[12],即通过滑坡的体积确定滑坡的摩擦系数为

$$\log f = a \log V_{\text{总}} + b \quad (11)$$

考虑滑坡滑动过程中滑面间的水汽化作用,滑坡的主要受力如下:

$$ma = mg \sin \delta - (mg \cos \delta - \sigma_f) f - cs \quad (12)$$

$$a = g \sin \delta - \frac{(mg \cos \delta - \sigma_f) f}{m} - \frac{cs}{m} \quad (13)$$

式中: a 为滑坡体的平均加速度; σ_f 为滑坡底滑面孔隙水压力和水汽化压力的共同作用值; f 为坡体摩擦系数; c, s 分别为滑面残余黏结力和滑坡体坡面下滑的距离。

滑坡体单位宽度体积 $V = 1.96 \times 10^4 \text{ m}^3$,岩石重度 r 取 27 kN/m^3 ,滑面残余黏结力为 0.04 MPa ,滑坡体坡面下滑的距离 s 为 1091 m,考虑滑坡下滑滑面位置的变化 σ_f 取值为 0.4 倍重力分量, m 为滑坡体单位宽度的质量。经计算可得滑坡体加速度 a 的值为 4.16 m/s^2 。

两家人滑石板滑坡的实际地形分布如图2所示,拉裂隙滑体下方已经发生了大面积滑坡,并在距坡脚高度为 220 m 处开始堆积。拉裂隙滑体若发生滑动,滑坡速度可分为不考虑后阶段冲击碰撞作用和考虑后阶段的冲击碰撞作用两种情况进行分析。

$$V_2^2 - V_1^2 = 2aS \quad (14)$$

$$S = h / \sin \delta \quad (15)$$

若不考虑滑坡后阶段与坡下堆积体的冲击碰撞作用, h 为拉裂隙滑坡体重心的高差约为 730 m。依据公式可以求解滑坡滑出速度 V_2 为 95.2 m/s 。与目前常用的能量法 $V = 101.7 \text{ m/s}$ 较为接近。若考虑滑坡后阶段与坡下堆积体的冲击碰撞作用, h 为拉裂隙滑坡体重心到坡下堆积体顶部的高差约为 510 m,依据公式求得此时滑坡体速度 V_2 为 79.6 m/s 。岩体的冲击碰撞后速度的确定比较复

杂。高速岩质滑坡动力学^[12]认为,可以在数值上采用恢复系数 R ,来反映滑坡土石体与边坡岩体冲击碰撞后能量速度的衰减,依据中外主要斜坡体岩体碰撞恢复系数 R 的经验取值为 $0.8^{[11]}$,则碰撞后滑坡体的速度下降为 $V_3 = RV_2 = 63.7 \text{ m/s}$,冲击碰撞完成后滑坡体与碎裂的堆积体继续下滑直至到达谷底,形成新的堆积体。

4 结论

1)滑坡下滑速度及其与坡下部堆积体作用引起滑坡堆积规模变化的研究是一个极为复杂的过程,依据两家人滑石板拉裂隙滑坡体的厚度,确定了滑坡层面间的等效抗剪强度参数,基于岩体锁固段近似悬臂梁储能的简化,推导出两家人滑石板锁固段破坏时滑坡体的启动速度,其启动速度为 1.57 m/s 。

2)对于两家人滑石板拉裂隙滑坡体速度的预测,从滑坡受力的机理出发分析了滑坡速度及加速度变化的原因,将滑坡体下滑过程分为启滑,自由滑动,冲击碰撞,减速静止四个阶段。由于滑坡滑动时滑面间的残余抗剪强度及滑坡体滑动摩擦引起的水汽压力作用,滑坡加速度呈现先增大后减小的趋势。

参考文献

- [1] SHREVE R L. Leaking and fluidization in air layer lubricated avalanches[J]. Geological Society of American Bulletin, 1968, 79(5): 653—657.
- [2] 卢万年. 用空气动力学分析坡体高速滑坡的滑行问题[J]. 地球科学与环境学报, 1991, 13(4): 77—85.
- [3] 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.

- [4] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(5): 579—582.
- [5] 邢爱国, 高广运, 陈龙珠, 等. 大型高速滑坡启程流体动力学机理研究[M]. 成都: 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 607—613.
- [6] KAYNIA A M, PARATHOMA K M, NEUHAUSER B, et al. Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany[J]. Engineering Geology, 2008, 101(1/2): 33—48.
- [7] UZIELLI M, NADIM F, LACASSE S, et al. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides[J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 251—256.
- [8] 唐建新, 蔡世明, 魏作安, 等. 万梁高速公路J合同段3#边坡滑坡机理探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 825—830.
- [9] 程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡临床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173—176.
- [10] DENLINGER R P, IVERSON R M. Flow of variably fluidized masses across three dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(B1): 553—566.
- [11] POTYONDY D, CUNDALL P. The PFC Model for Rock: Predicting Rock Mass Damage at the Underground Research Laboratory [R]. Report no. 06819-REP-01200-10061-R00. Itasca Consulting Group, MN, USA, 2001.
- [12] CHONG SHI, YU-LONG ZHANG, WEI-YA XU, QI-ZHI ZHU, SHENG-NIAN WANG. Risk analysis of building damage induced by landslide impact disaster[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013 (ahead-of-print): 1—18.

The Forecast of Landslide Velocity and Accumulation Scale for A Rock Slope-Hushiban Slope, Liangjiaren Hydropower Station

HAO Xiao-ping¹, DUAN Yan-wei², TANG Bo²

(1. Jinan Geotechnical Engineering Corporation, Jinan 250000, China; 2. Jinan Survey and Mapping Research Institute, Jinan 250000, China)

Abstract: In view of the rock mass in the split zone of the TALC SLAB slope of the Liangjiaren Hydropower Station in Jinsha River, Yunnan Province, the impact and collision between the slide mass and the accumulated mass under the slope were considered, and based on the principle of energy conservation, according to the different ways of energy storage in the locked section of the landslide, the speed of the landslide was calculated, and the change of the speed and acceleration in each stage of the landslide was analyzed in turn. Considering the initial sliding velocity and the impact and collision between the initial sliding velocity and the pile body under the slope, it can not be neglected in predicting the speed and scale of the landslide, which can provide a reference for the prediction of other landslide velocities and comprehensive analysis of disaster reduction and prevention after the landslide.

Key words: landslide parameters; landslide velocity; impact and collision; accumulation of scale