https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.960



顺层岩质滑坡渐进破坏进入加速的能量学判据

唐朝晖1,余小龙1,柴 波2*,张淑杞3,孙晓鑫1

1. 中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院,湖北武汉 430078

3. 西南能矿建设工程有限公司,贵州贵阳 550022

摘 要:顺层岩质滑坡是最常见的斜坡灾害,研究其渐进破坏过程、建立预报判据对于防灾减灾具有重要意义.以称归杉树槽滑坡为例,在野外调查和室内岩石试验的基础上,利用JRC-JCS模型及GSI法估算得出滑坡基本力学参数;通过FLAC^{3D}模拟滑坡渐进破坏过程,分析顺层岩质滑坡变形破坏的发展规律;基于能量守恒和虚功原理,提出 了顺层岩质滑坡迈入加速变形的能量学判据.研究表明:杉树槽滑坡由后缘向前渐进破坏,后缘变形累积的总位移 值不断增大,前缘切层段的锁固作用使变形迅速降低,当临近破坏时,前缘位移由前向后发展,滑面快速贯通;滑体 沿滑动方向应变曲线可近似表示为"S"型曲线,随渐进破坏该曲线向坡下发展;以滑体动能增量大于0作为滑坡迈 入加速变形的能量学判据,其结果符合滑坡地质演化观点,与FLAC^{3D}模拟结果吻合.

关键词:顺层岩质滑坡;预测预报;数值模拟;能量学判据;工程地质.

中图分类号: P64 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-4033-10

收稿日期:2019-12-01

Energetic Criterion of Entering Acceleration in Progressive Failure Process of Bedding Rockslide: A Case Study for Shanshucao Landslide

Tang Zhaohui¹, Yu Xiaolong¹, Chai Bo^{2*}, Zhang Shuqi³, Sun Xiaoxin¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

3. South West Energy & Mineral Construction Engineering Co. Ltd., Guiyang 550022, China

Abstract: Bedding rockslide is the most common slope disaster. It is of great significance to study its progressive failure process and establish prediction criteria for disaster prevention and mitigation. Taking Shanshucao landslide in Zigui as an example, on the basis of field investigation and indoor rock test, the basic mechanical parameters of landslide were estimated by JRC-JCS model and GSI method. The progressive failure process of landslide was simulated by FLAC^{3D}, and the development law of deformation and failure of bedding rockslide was analyzed. Based on the principle of energy conservation and virtual work, the energetic criterion for accelerated deformation of bedding rockslide is proposed. The results show that the landslide mass of Shanshucao is progressively destroyed from the rear edge to the front, the accumulated total displacement value of the trailing edge deformation increases continuously, the locking effect of the front cutting layer makes the deformation decrease rapidly. When approaching failure, displacement of the leading edge develops from front to back, transfixion of sliding face occurs quickly. The strain curve along the sliding direction of the landslide can be approximated as a "S" curve, which develops downhill with progressive failure. Taking the kinetic energy increment of the landslide mass greater than 0 as the energetic criterion for accelerated deformation of the landslide, the

作者简介:唐朝晖(1964-),女,教授,主要从事工程地质与环境岩土工程的教学科研工作.E-mail:zhtang@cug.edu.cn * 通讯作者:柴波,Email:chai1998@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41572256,41877253);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.CUGL160408).

引用格式:唐朝晖,余小龙,柴波,等,2021.顺层岩质滑坡渐进破坏进入加速的能量学判据.地球科学,46(11):4033-4042.

results are consistent with the geological evolution of landslides and are in good agreement with those of FLAC^{3D} simulation. **Key words:** bedding rockslide; prediction and forecast; numerical simulation; energetic criterion; engineering geology.

0 引言

顺层岩质滑坡易发、难预测、难治理,开展此类 滑坡的预测预报显得尤为重要.三峡库区顺向坡约 981.83 km,占区内岩质岸坡的46%(邹宗兴等, 2012),顺层岩质滑坡频发.顺层岩质滑坡从产生宏 观变形到失稳的时间短暂,预测预报难度极大.自 1965年,斋藤提出滑坡蠕变模型成为滑坡科学预报 的起点(Saito,1965),至今已出现了许多滑坡预测 模型,包括基于滑坡监测的经验和统计模型(郭子 正等,2020)、物理力学预测模型(缪海波等,2016; 薛雷等,2018)、非线性预测模型和综合预测模型 (谢剑明等,2003;喻孟良等,2016;黄发明等,2018).

从系统演化的角度看,滑坡位移是内部结构演 化的外在表现,而内部结构变化才是它由稳定逐渐 进入失稳的关键,这一演化本质在以往的模型中没 有充分体现.大部分的顺层岩质滑坡,中后部为主滑 段,沿软弱层面发生剪切变形,前缘为切层或缓倾的 阻滑段,内部结构变化表现为滑动面和边界的渐进 破坏(Müller et al., 1970;张年学等, 1993; Margielewski, 2006; 柴波和殷坤龙, 2009; Regenauer-Lieb et al., 2009).Tang et al.(2015)通过力学参数弱 化来表达滑动面的演化过程,并对顺层岩质滑坡的 力学模型进行了修正.滑坡预测模型同样应考虑内 部结构的演化过程,许强(2012)认为岩质滑坡通常 不遵循蠕变理论,而表现为明显的突变特征.顺层岩 质滑坡位移小,演化时间短,临滑预测难度大,早期 预警就需要拓展传统的预测判据,捕捉渐进破坏进 入加速变形阶段的标志,即加速判据.同时,辨识临 滑前的位移特征.本文以杉树槽滑坡为例,基于岩体 弹塑性力学与岩石能量学理论,利用FLAC^{3D}对滑坡 渐进破坏过程进行模拟分析,根据滑坡模拟位移曲 线,提出了滑坡渐进破坏过程的能量平衡方程,并从 能量学角度提出了杉树槽滑坡迈入加速变形的判据.

1 滑坡概况

杉树槽滑坡于2014年9月2日下午13:19, 发生于三峡库区秭归县沙镇溪镇,位于长江二 级支流锣鼓洞河的左岸,距离三峡大坝42 km, 与千将坪滑坡仅几百米之隔(Xu et al., 2015). 滑坡位于秭归向斜南西翼,为顺向斜坡.滑坡区 属构造侵蚀中低山地貌,整体地形呈上下陡、中 部缓的特点,斜坡的平均坡度为20°~30°.

滑坡分为岩质和土质两个滑动区,总面积为 3.61×10⁴ m²,体积约为 90.25×10⁴ m³,其中, 岩质滑坡区是主滑动区,土质滑坡为牵引被动 滑移区(图1).岩质滑坡滑距为 140 m,面积为 1.26×10⁴ m²,厚为 23~30 m,体积约为 51.5× 10⁴ m³,为一中型顺层岩质滑坡.

2 滑坡地质结构与演化过程

滑坡区为侏罗系千佛崖组(J_2q)地层,岩 性主要为长石石英砂岩、泥质粉砂岩及粉砂 质泥岩,地层倾向为 $113^{\circ} \sim 132^{\circ}$,倾角为 $17^{\circ} \sim$ 21°. 优势节理产状分别为 $135^{\circ} \geq 82^{\circ}$ 、 $33^{\circ} \geq 86^{\circ}$,构成滑坡后壁及侧壁,左边界为20m高临空 陡壁,前缘为受锣鼓洞河切割的陡坡.

根据现场滑面观察和钻探结果,滑坡内未发现明显泥化夹层,仅在埋深26~28 m范围内发育一段较差质量岩体(图2),滑动面为层间剪切带,滑体基本保持着原始的层序和结构.据走访调查,杉树槽滑坡从后缘出现明显变形到最终失稳整个过程持续了大约7h,结合其变形发展规律,Xu et al.(2015)认为杉树槽滑坡具有前进式破坏的特点,后缘首先拉裂,顺层滑面逐渐向前贯通,最终切层阻滑段破坏,发生滑动.

杉树槽滑坡前缘为锣鼓洞河河床,存在切层剪 出段(图3).根据滑坡发生前的气象记录,2014年9 月初,研究区经历了持续的强降雨过程,三峡水库 则正处在低水位向高水位调整的初期,基于滑坡从 后往前渐进破坏的演化特征,降雨入渗是导致滑坡 破坏的主要动力条件.在强降雨作用下,贯通的滑 动面内会形成短时饱水带,产生静水压力.参考肖 诗荣对千将坪滑坡水压力的研究(肖诗荣等, 2015),杉树槽滑坡的水力施加过程见图4.

3 滑坡渐进破坏过程的数值分析

该滑坡无监测数据,且滑坡发生前没有明显的





Fig.2 Pictures of drilling coring

变形迹象,仅在临滑前数小时宏观变形迹象才出现. 为了定量分析滑坡的渐进破坏过程,在现场滑坡结 构调查和岩石力学试验的基础上,开展数值分析.

3.1 概化滑坡模型

杉树槽滑坡滑面和边界均受结构面的控制,通

过 FLAC^{3D}模拟滑坡从后缘向前缘渐进破坏的过程,监测该过程滑体内部位移.滑坡左侧临空,由两组陡倾角结构面构成滑坡后壁及右侧壁,并且右侧壁在210 m高程处发生转折.根据走访调查,滑坡首先发生后缘的拉破坏以及侧壁的剪切破坏,形成



图 4 杉树槽滑坡渐进破坏与水力作用 Fig.4 Water pressure developing with progressive failure process of Shanshucao landslide

"无围限"的潜在滑坡模型(喻章,2018),然后沿层 间错动带发生自后向前的渐进破坏,最后沿近水平 裂隙性断层切穿前缘锁固段发展为整体滑动.

根据滑坡地质模型,按照三段建模(图5):主滑段、侧壁转折段、锁固段,其中锁固段切割层面,在 河床附近剪出,滑体平均厚度为25m,平均宽度为 50m,水平方向总长度为350m.

3.2 数值模型参数及条件

将滑坡结构面简化为平面块体,划分为后缘、 侧壁、底面及滑体层间结构面4种类型,模拟过程中 将岩体及结构面的参数弱化及塑性区发展视为滑 坡渐进破坏的力学表现.边界条件设定:滑坡上表 面为自由边界,其他边界面为固定边界,内部4类结 构面为可滑动的接触边界.在野外结构面调查和钻 孔取心的基础上,通过三轴压缩(图6)、单轴压缩和



图 5 滑坡模型示意 Fig.5 Schematic diagram of landslide model



点荷载试验确定岩石力学性质,结合岩体强度参数 GSI法估算滑体力学参数.同时,在野外对侧壁、滑 面和滑体结构面粗糙度测量的基础上,通过JRC-JCS模型估算结构面力学参数(图7).

根据前人对岩质滑坡渐变破坏过程力学模型的分析(邹宗兴等,2012;喻章,2018),结构面采用 应变软化本构模型,滑体采用Mohr-Coulomb模型 (表1).根据塑性区判别滑面的破坏位置,当滑面发 生塑性破坏时,滑面的力学参数由峰值降低至残余 值,记录破坏初期至贯通的4个阶段的塑性区发展 情况及变形数据.

3.3 滑坡渐进破坏过程分析

为了便于观察杉树槽滑坡渐进破坏过程,仅提

结构面	JRC	曲线形态
Τ0	8	
T1	7	
T2	6	
Т3	6	
T4	3	

图 7 结构面形态及产状现场测量

Fig.7 On-site measurement of structural plane shape and occurrence

表1 滑坡模拟力学参数建议

Table 1 Proposed mechanical parameters for landslide simulation

位置	$P(\text{kg-m}^{-3})$	K(GPa)	$G(\mathrm{GPa})$	φ (°)	c(Mpa)
滑床	2 550	17.14	6.7	38	4.37
滑体	2 550	11.08	4.25	33	4.2
后缘	2 500	1.27	1.27	33	0.11
后缘侧壁	2 500	1.17	1.17	33	0.23
前缘侧壁	2 500	0.87	0.87	30	0.32
顺层滑面	2 500	0.66	0.66	$25 \sim 19$	0.23~0.02
切层滑面	2 500	0.99	0.99	$30 \sim 21$	0.32~0.02

取滑体周界塑性区,见图8.根据模拟结果,滑坡首 先在后缘产生拉破坏,随后沿侧壁和滑面发生剪切 破坏,且侧壁的塑性区发展超前于滑面部位,表明





侧壁的剪切破坏要先于滑面,滑坡的稳定性主要受滑面控制,上述模拟结果与Xu et al. (2015)对滑坡破坏过程的分析一致.

以滑坡后壁与滑面相交处为原点,定义塑性区 发展前端所处水平位置平均值为滑面贯通情况表 征值,则第一阶段仅后缘拉裂,滑面无贯通,第二、 第三、第四阶段滑面分别贯通至165m、260m和 300m,其中,第三阶段切层滑面出现塑性区,原本 加速变形受前缘阻滑作用而减速.

数值模拟得到的滑体主剖面位移云图显示,滑体内部不同深度位移相差较小,且基本呈线性变化,则滑体中部位移可近似代表通过该点的截面平均位移,据此绘制各阶段滑体各位置累积水平位移曲线s(x) -x以及应变曲线△s(x) -x(图9,图10).从图9可发现滑体累积水平位移曲线大致可分为3段,后缘和前缘为近似直线段,中间为曲线段.第三、四阶段滑坡前缘位移由前向后发展,滑坡处于临滑前期.

应变曲线△s(x) -x中,只考虑压缩应变,当前 缘出现位移时压缩应变仍为0,则应变值可近似表 示为"S"型曲线,随着滑面的逐步贯通,曲线不断向 前发展.这种"S"型发展模式,符合自然界中的衰变 特征,也反映了斜坡力学参数弱化作用下的斜坡渐 进演化机制,由此引入"S"型曲线表征滑坡变形过 程滑体各部位应变状态(图11).

$$\Delta s(x) = \frac{A}{1 + e^{a(x-b)}},\tag{1}$$

式中:A为应变量幅值,x为沿主滑方向坐标空间位置,a为有关空间曲线的形态系数,b为渐进破坏发展部位的表征值.

定义"S"型曲线由一极值过渡至另一极



Fig.9 Displacement and strain curves of slide mass at different evolution stages by numerical simulation



Fig.10 Curve model for progressive evolution of strain

值,设定滑坡演化过程渐变带长度为 Δx ,则渐变长度误差限:

$$\delta(u) = \frac{1-u}{1} = 1 - \frac{1}{1+e^{-a\Delta x/2}} = \frac{e^{-a\Delta x/2}}{e^{-a\Delta x/2}+1} = \frac{1}{e^{a\Delta x/2}+1}.$$
(2)

设定滑带长度相对误差限为1%,得: $e^{a\Delta x/2} = 99$, $a\Delta x \approx 9.19$,

表 2 滑面贯通位置与参数表征值对应表

 Table 2
 Table of correspondence between location of sliding surface failure and parameter characteristic value



图 11 位移、应变曲线推导结果与模拟结果对比(第 三阶段)



根据模拟结果可知,渐变带长度△x即为滑 面的水平长度,应变幅值A为滑体最大应变,与 滑体弹性模量有关,数值上等于位移曲线直线 段斜率的绝对值,因此各项参数取值为:

 $\Delta x = 350 \text{ m}, a = 0.026, A = 4.7 \times 10^{-5} \text{ m},$ b 为渐进破坏发展的参数表征值,设滑坡渐进破坏 贯通的位置用 λ 表示,滑面贯通到不同位置对应着 不同的参数表征值,具体如表 2.

通过拟合可得*b*=0.196λ+87,则可获得滑坡不 同阶段应变状态方程如下式所示:

$$\Delta s(x) = \frac{4.7 \times 10^{-5}}{1 + e^{0.026(x - 0.196\lambda - 87)}}, \qquad (3)$$

相应地,根据曲线 $\Delta s(x) - x$ 做积分可求出位移曲线 s(x) - x的表达式如下:

 $s(x) = 1.81 \times 10^{-3} \ln \left[1 + e^{0.026(x-0.196\lambda - 87)} \right] - 4.7 \times 10^{-5} (x - 0.196\lambda - 87),$ (4)

且根据"S"型曲线的相关性质推导出的应变状态方程与位移曲线方程与数值模拟的结果也十分吻合(图12,图13),这也证明了推导的正确性.

滑坡演化过程中的"S"型应变曲线反映了其渐 进破坏过程,滑坡后缘应变主要受拉破坏控制,应变 存在一个最大值;又由于前缘阻滑段的存在,变形量 从后向前逐渐衰减;随着渐进破坏的发生,滑面变形





范围逐渐向前扩展,阻滑段的应变值也逐渐 增大,当达到一定值时则会切断锁固段,滑坡 发生整体启滑,这一应变曲线符合滑坡渐进 破坏地质力学原理.

改变滑坡模拟参数后发现,最大应变值与滑体弹性模量 E 有关,应变幅值 A 表现为随着弹性模量 的增大而减小的规律,拟合得到:A= 1.95×10^{-4} E^{-0.583 °}.

4 滑坡迈向加速变形的能量学分析

对于顺层岩质滑坡,主要发生沿层面向临 空方向的变形,滑坡重力势能和外部输入能 量,是滑坡渐进破坏过程能量耗散的主要来 源(易庆林等,2017).根据能量学原理,建立 顺层岩质滑坡渐进破坏过程的能量学分析模 型.模型遵循如下基本假设:

(1)滑坡在进入启动前,遵循静力学平衡和能量守衡;

(2)滑体内部变形连续,潜在势能减少时,转化 为滑动面剪切耗能和滑体压缩弹性能.

滑坡重力势能减少量△G、外力做功T,主要转 化为滑体动能△K、边界贯通的耗散能Q、应变储能 △P及内部结构损伤耗散能W,为使问题简化,可忽 略占比较小的滑体内部耗能W,将滑体视为弹性 体,则滑坡能量守恒表达为:

$$\Delta G + T - \Delta P - Q = \Delta K, \tag{5}$$

外部输入功是滑坡初期渐进破坏发展的主要能量, 自然环境下降雨入渗,雨水充填裂隙面并产生水压 力则是主要的外部输入功.在滑坡渐进破坏过程中 降雨作用经常被看作周期位移增大的主要因素.然 而,滑坡失稳本质应该是其趋势位移处于加速状态 (许强,2012).在此过程中当ΔK<0,表明外部输入 功和滑坡重力势能的减少量能够被完全消耗掉,无 多余能量促使滑面的贯通,而当ΔK>0,滑体动能 增加,则意味着滑坡在加速变形.当不考虑外部输 入功的作用,滑坡仅依靠其自身的能量转化,即可 使滑体动能增加时,可以看作滑坡通过自身演化进 入加速变形阶段,即趋势位移处于加速状态.因此, 滑坡渐进破坏的能量学判据可表示为:

$$\Delta G - \Delta P - Q > 0, \tag{6}$$

重力势能为状态量,以初始位置为零势能面,L₁代 表滑体平均长度,α代表滑面倾角,则滑面贯通到任 意位置λ的重力势能G可表示为:

$$G = G(\lambda) = -\int_{0}^{L_{1}} h d\gamma s(x, \lambda) \tan \alpha dx , \qquad (7)$$

根据虚功原理,当滑动面往前贯通△u,有:

$$\Delta G = G(\lambda) - G(\lambda + \Delta u) = h d\gamma s \int_{0}^{L_{1}} \left[(x, \lambda + \Delta u) - s(x, \lambda) \right] \tan \alpha dx' , \qquad (8)$$

当∆u很小时,有:

 $s(x,\lambda + \Delta u) - s(x,\lambda) = s_{\lambda}'(x,\lambda) \cdot \Delta u , \qquad (9)$ 则公G可化简为:

 $\Delta G = \Delta G(\lambda) = \int_{0}^{L_{1}} h d\gamma \Delta u s_{\lambda}'(x, \lambda) \tan \alpha dx , \quad (10)$ 将 岩 体 的 应 力 应 变 关 系 简 化 为 线 性 关 系 , 则

应变储能 ΔP 为压缩应力状态下的储能,应变 能密度为 $v_{\epsilon} = E \epsilon^2/2$,单位为J/m³,E为滑体弹 性模量,渐进破坏阶段应变能之差即为应变 储能量.则应变能P可表示为:

$$P = P(\lambda) = \int_{0}^{L_{1}} \frac{h dE \Delta s(x, \lambda)^{2}}{2} dx , \qquad (11)$$

$$\frac{hdE}{\Delta} \int_{-\infty}^{L_1} \left[\Delta s(x, \lambda + \Delta u) - \Delta s(x, \lambda)^2 \right] dx'$$
(12)

 $\frac{1}{2} \int_{0} \left[\Delta s(x, \lambda + \Delta u) - \Delta s(x, \lambda)^{-} \right] dx', \quad (12)$ 当 Δu 微小时,有:

$$\Delta s(x, \lambda + \Delta u) - \Delta s(x, \lambda) = \Delta s_{\lambda}'(x, \lambda) \bullet \Delta u , \quad (13)$$

$$\Delta s(x,\lambda + \Delta u) \approx \Delta s(x,\lambda) , \qquad (14)$$

则 ΛP 可化简为:

$$\Delta P = \Delta P(\lambda) = h dE \Delta u \int_{0}^{L_{1}} \Delta s(x,\lambda) \cdot \Delta s_{\lambda}'(x,\lambda) dx .$$
(15)

滑动面耗能按照面力功计算,λ代表滑面贯通的位置,L₂代表滑面的长度,则

$$Q = \int_{0}^{\lambda} d\tau_{\gamma} [s(x,\lambda + \Delta u) - s(x,\lambda)] dx + \int_{\lambda}^{L_{2}} dKs(x,\lambda + \Delta u) [s(x,\lambda + \Delta u) - s(x,\lambda)] dx ,$$
(16)

∆u微小时,可简化为:

$$Q = Q(\lambda) = \int_{0}^{\lambda} d\tau_{\gamma} s_{\lambda}'(x,\lambda) \Delta u dx + \int_{\lambda}^{L_{2}} dKs(x,\lambda) s_{\lambda}'(x,\lambda) \Delta u dx , \qquad (17)$$

借助 MATLAB 软件来求解,消去 Δu ,令 $H(\lambda) = h d\gamma \int_{0}^{L_{1}} s_{\lambda}'(x,\lambda) \tan \alpha dx - h dE \int_{0}^{L_{1}} \Delta s(x,\lambda) \Delta s_{\lambda}'$ $(x,\lambda) dx$, (18)

代人各个参数,通过 MATLAB 做出的函数 H (λ)曲线(图 12).该曲线的零点为170.5 m,即当 滑坡滑面贯通至170.5 m后,滑坡进入加速变形 阶段.而FLAC^{3D}模拟的结果显示滑面贯通至 165 m后,滑坡进入加速变形阶段,采用能量学 判据的计算结果与数值模拟的结果基本吻合. 并且通过该曲线可知加速变形阶段滑体动能的 增加势头明显减缓,显然是由于前缘阻滑段所 起到的减速作用,这也与实际情况相符.

将不同*E*值分别对应的应变函数 $\Delta s(x)$ 与位移 函数s(x)代入函数 $H(\lambda)$ 中发现,随着*E*值的增大, 函数 $H(\lambda)$ 逐渐无零点,即滑坡无明显加速阶段,滑 坡始终处于缓慢渐进破坏过程,滑坡发生整体失稳 时宏观变形更小,此时滑坡的破坏更具突发性.

基于大量监测和蠕变模型,滑坡的变形演化曲 线可分为初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形 阶段(罗文强等,2016),能量学判据很好地解释了 滑坡加速变形的原因(图13).在滑坡演化初期,位 移从无到有,位移曲线斜率随时间减小,呈现为减 速趋势;在滑坡等速变形阶段,在降雨等间歇性外 力作用下,变形表现为台阶式增长,滑坡位移可划 分为周期项和趋势项.其中,周期项体现为滑坡在 外力作用下的短暂加速,即动能短时增加;趋势项 则为滑面逐渐贯通,在重力作用下的滑坡以等速变 形为主,位移曲线总体趋势仍为一倾斜直线.而许 强等(2008)根据现代非线性科学理论提出,滑坡处 于不同的发展演化阶段,对外界扰动的响应不同, 越到演化的后期,对外界荷载的响应越显著和剧 烈.当滑坡临近失稳时,即使是极其微小的荷载作 用都会使系统产生剧烈的响应.因此,随着演化的 不断进行,当滑面贯通到一定程度时,即使基本无 外部输入功的作用,仅在自身重力作用下滑坡变 形也可出现加速现象.而从能量学的角度去解释 则是滑坡重力功不能完全被边界耗能和滑体应变 储能消耗掉,动能增量恒大于0,滑坡进入加速变 形阶段.同时,这也标志着滑坡进入临滑阶段.

5 结论

本文通过对杉树槽滑坡渐进破坏过程的力 学和能量学分析,提出了适合于顺层岩质滑坡 加速变形判别的能量学判据.该判据认为当无 外部输入功的作用,滑坡依靠自身重力势能的 转化,渐进破坏可持续发生时,滑坡进入加速变 形阶段.该判据符合滑坡演化的基本思想,在已 知边界处结构面力学本构模型的基础上,可通 过能量学公式确定滑坡进入加速阶段的位置, 该判据可用于新生的顺层岩质滑坡的预测.

References

- Chai, B., Yin, K.L., 2009. Influence of Intersection Angle between Trend of Slope and Strata on Stability of Bedding Slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics* and Engineering, 28(3): 628-634 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.Z., Yin, K. L., Liu, Q, L., et al., 2020. Rainfall Warning of Creeping Landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir Region Based on Displacement Ratio Model. *Earth Science*, 45(2): 672-684 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.005
- Huang, F.M., Yin, K.L., Yang, B.B., et al., 2018. Step-Like Displacement Prediction of Landslide Based on Time Series Decomposition and Multivariate Chaotic Model. *Earth Science*, 43(3):887-898 (in Chinese with

English abstract).

- Luo, W.Q., Li, F.A., Liu, X, S., et al., 2016. Evolution Stage Division of Landslide Based on Analysis of Multivariate Time Series. *Earth Science*, 41(4):711-717 (in Chinese with English abstract).
- Margielewski, W., 2006. Structural Control and Types of Movements of Rock Mass in Anisotropic Rocks: Case Studies in the Polish Flysch Carpathians. *Geomorpholo*gy, 77: 47-68. https://doi. org/10.1016/j. geomorph.2006.01.003
- Miu, H. B., Yin, K. L., Zhang, X. W., 2016. Prediction of Ground Displacement of Reservoir Ancient Landslide with Intermittent Reactivation. *Geological Science and Technology Information*, 35(5): 208-213 (in Chinese with English abstract).
- Müller, L., Buck, H., Müller, K., 1970. Structural Geology of Rocks-Rock Mechanics in Construction. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin (in German).
- Regenauer-Lieb, K., Yuen, D. A., Fusseis, F., 2009. Landslides, Ice Quakes, Earthquakes: A Thermodynamic Approach to Surface Instabilities. *Pure and Applied Geophysics*, 166(10-11): 1885-1908. https://doi.org/ 10.1007/s00024-009-0520-3
- Saito, M., 1965. Forecasting the Time of Occurrence of a Slope Failure. Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. *En*gineering, 2: 537-541.
- Tang, H.M., Zou, Z.X., Xiong, C.R., et al., 2015.An Evolution Model of Large Consequent Bedding Rockslides, with Particular Reference to the Jiweishan Rockslide in Southwest China. *Engineering Geology*, 186: 17-27. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.021
- Xiao, S.R., Liu, D.F., Zhang, G.D., 2015. Study on Landslide of Extra-Large Bedding Rocky Reservoir. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, J.M., Liu, L.L., Yin, K.L., et al., 2003. Study on the Threshold Valves of Rainfall of Landslide Hazards for Early-Warning and Prediction in Zhejiang Province. Geological Science and Technology Information, (4): 101– 105 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. L., Li, W. N., Yu, Z., et al., 2015. The 2 September 2014 Shanshucao Landslide, Three Gorges Reservoir, China. Landslides, 12(6): 1169-1178. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0652-8
- Xu, Q., 2012. Theoretical Studies on Prediction of Landslides Using Slopes Deformation Process Data. *Journal* of Engineering Geology, 20(2): 145-151 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Tang, M.G., Xu, K.X., et al., 2008. Re-

search on Space-Time Evolution Laws and Early Warning-Prediction of Landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(6):1104–1112 (in Chinese with English abstract).

- Xue, L., Qin, S.Q., Pan, X.H., et al., 2018. Mechanism and Physcial Prediction Model of Instability of the Locked-Segment Type Slopes. *Journal of Engineering Geology*, 26(1):179-192 (in Chinese with English abstract).
- Yi, Q.L., Zhao, N.H., Liu, Y.L., 2017.Model of Landslide Stability Calculation Based on Energy Conservation. *Rock and Soil Mechanics*, 38(S1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Yu, M. L., Mei, H.B., Li, J.H., et al., 2016. Landslide Displacement Prediction Based on Varying Coefficient Regression Model in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 41(9): 1593-1602 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z., 2018. Study on Strength Attenuation Characteristics of Slip Soil and Failure Mechanism of Shanshucao Landslide (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.N., Sheng, Z.P., Sun, G.Z., 1993.Study on the Bedding Bank Slope of the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zou, Z.X., Tang, H.M., Xiong, C.R., et al., 2012.Geomechanical Model of Progressive Failure for Large Consequent Bedding Rockslide and Its Stability Analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31 (11): 2222-2231 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

柴波,殷坤龙,2009.顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定

性的影响.岩石力学与工程学报,28(3):628-634.

- 郭子正,殷坤龙,刘庆丽,等,2020.基于位移比模型的三峡 库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警.地球科学,45 (2):672-684.
- 黄发明,殷坤龙,杨背背,等,2018.基于时间序列分解和多 变量混沌模型的滑坡阶跃式位移预测.地球科学,43 (3):887-898.
- 罗文强,李飞翱,刘小珊,等,2016.多元时间序列分析的滑 坡演化阶段划分.地球科学,41(4):711-717.
- 缪海波,殷坤龙,张修旺,2016.间歇复活型库岸老滑坡地表 位移预测.地质科技情报,35(5):208-213.
- 肖诗荣,刘德富,张国栋,2015.特大顺层岩质水库滑坡研究. 北京:中国水利水电出版社.
- 谢剑明,刘礼领,殷坤龙,等,2003.浙江省滑坡灾害预警预报 的降雨阀值研究.地质科技情报,(4):101-105.
- 许强,2012. 滑坡的变形破坏行为与内在机理.工程地质学 报,20(2):145-151.
- 许强,汤明高,徐开祥,等,2008.滑坡时空演化规律及预警预 报研究.岩石力学与工程学报,27(6):1104-1112.
- 薛雷,秦四清,泮晓华,等,2018.锁固型斜坡失稳机理及其物 理预测模型.工程地质学报,26(1):179-192.
- 易庆林,赵能浩,刘艺梁,2017.基于能量守恒的滑坡稳定性 计算模型.岩土力学,38(S1):1-10.
- 喻孟良,梅红波,李冀骅,等,2016.基于变系数回归模型的 三峡库区滑坡位移预测.地球科学,41(9):1593-1602.
- 喻章,2018.杉树槽滑坡滑带土强度衰减特性及失稳机理研 究(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 张年学,盛祝平,孙广忠,1993.长江三峡工程库区顺层岸坡 研究.北京:地震出版社.
- 邹宗兴,唐辉明,熊承仁,等,2012.大型顺层岩质滑坡渐进破 坏地质力学模型与稳定性分析.岩石力学与工程学报, (11):2222-2231.