

文章编号 :1007-649X(2000)01-0041-05

# 高速滑坡活动强度的动力模拟

刘忠玉<sup>1</sup>, 方 波<sup>2</sup>

(1. 郑州工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州市自来水总公司, 河南 郑州 450007)

**摘 要:**考虑到高速滑坡过程中的速度和变形的不均匀性、变形能的改变以及能量的损耗,提出一种可以模拟滑坡从失稳开始滑动到终止全过程的数值模型,可用来预测最大滑速和最大滑距及滑体形状的变化.通过对天水锻压机床厂滑坡的滑速和滑距的验证及坡体形状的计算机模拟,证明了该方法的有效性.结果表明,滑坡形成高速的根本原因在于剧滑时综合摩阻力的下降,滑体后部在滑动过程中的较大重心落差是滑体高速运动的动力来源.在滑动的中间阶段,滑体经常呈现出整体运动的特征,而中前部土体在滑坡后则易处于松弛甚至拉伸的状态.

**关键词:**高速滑坡;滑速;滑距;滑坡活动强度;模拟;块体运动理论

**中图分类号:** P 642.22 **文献标识码:** A

## 0 引言

由于高速滑坡经常剧烈而迅猛地发生,速度快,冲量大,且有些高速滑坡的滑移方量巨大,滑动距离很远,所以常常对交通、厂矿、水利、农田及城市建设等造成极大的威胁和危害.要采用安全、经济的措施,有效、合理地防范灾难性滑坡的发生,必须先了解高速滑坡的破坏范围,这就需要预测其滑距.由于滑距往往和滑速紧密联系,所以滑距和滑速这两方面都很重要,可将它们合称为滑坡活动强度<sup>[1]</sup>.为预测滑坡活动强度,近几十年来,国内外许多专家作了大量的研究与实践工作,提出了多种预测方法<sup>[2~9]</sup>,其中基于统计的经验公式<sup>[2~4]</sup>有着比较广泛的应用,但在统计分析时,往往忽略这样或那样的因素,使得结果具有一定的局限性.在实际问题中,滑体与滑床(滑道)空气的摩擦必然产生能量的耗散,这一点得到大家的共识.但是由于滑道的斜率变化和与滑体之间的摩擦性质的不均匀性、滑体内部性质的不均匀性、坡面形状的不规则性以及其它未知因素的影响,滑体内部应力必然非均匀变化,从而导致滑体不可避免地发生不均匀变形,因此肯定有变形能的积累与释放,从而显著地影响滑体内部每一点的速度,造成速度的不均匀.所以仅考虑滑体质心

运动和能量的损失<sup>[5,6]</sup>应该还是比较粗糙的估计.而基于运动过程中速度传递的分块法<sup>[8~9]</sup>,虽然考虑到运动过程中速度的不均匀性,甚至考虑了变形的不均匀性,应该说有了很大的发展,但是如果考虑其中变形能的积累和释放,也是不符合实际情况的.因此,比较合理的方法应该同时考虑滑动过程中的速度的不均匀性、变形的不均匀性、变形能的变化以及能量的损耗.基于此,本文通过对高速滑坡发生的机理分析及其堆积特征和运动特征的分析,提出一种同时考虑上述多种因素的新模型,依此来模拟滑体从失稳开始滑动到滑动终止的全过程,可以得到每块滑体在滑动过程中任一时刻的速度以及滑体形状的变化.通过对天水锻压机床厂滑坡滑速、滑距的验证以及在滑动过程中坡体形态变化的计算机模拟,证明了本方法的有效性.

## 1 模拟高速滑坡活动强度的动力模型

### 1.1 基本假定

对高速滑坡形成机理、活动演化等的研究,大多倾注于那些来势迅猛、规模大和滑速高的高速滑坡.国内外一些学者经过一系列的探索,取得了许多有价值的进展,提出了若干解释高速滑坡滑动原因的假说,文献[5,10]对此有很好的总结.从

收稿日期:1999-10-20;修订日期:1999-12-20

作者简介:刘忠玉(1968-),男,河南省延津县人,郑州工业大学讲师,兰州大学博士研究生,主要从事岩土力学方面的研究.

万方数据

中可以看出,高速滑坡得以形成,滑道上的摩擦阻力必须非常低,即克服摩擦消耗的能量必须非常少,各种假说在这一点上是没有争议的,区别仅在于对各种低摩擦形成机制的解释和假说不同.本文暂且忽略诸如“气垫效应”、“颗粒流效应”等因素,仅考虑高速滑坡在其运动过程中处于非常显著位置的“低摩擦效应”,即认为滑坡形成高速的根本原因在于剧滑时滑床的抗滑阻力出现大幅度下降(峰残效应)和滑床滑带土的液化等因素引起的综合摩擦阻力的下降.另外,滑体后部在滑动过程中有较大重心落差,给滑体剧滑提供较大势能是滑坡高速运动的动力来源.基于上述机理及文献[10]对滑坡堆积特征和运动特征的分析,本文假定:

(1) 滑体的运动具有一种连续可变的块体运动形式.这一点与连续可变块体理论<sup>[9]</sup>相同.即所谓“连续”是说在运动过程中各滑块间基本不存在宏观分离现象,普遍呈现连续接触方式;所谓“可变”是指在运动过程中各滑块在宽度及高度上具有可变的特征,可以通过宽度的缩短实现高度的伸长,也可通过高度的缩短实现宽度的伸长.

(2) 滑体的运动过程是一个变形能积累和释放的过程.在运动过程中各滑块之间由于存在条间力而产生变形从而产生变形能;反过来,变形能的变化引起条间力的变化,从而使得各滑块的加速度发生改变.实际上可以认为条间力的改变是由各滑块的变形所致.

(3) 由于剪切带较薄,忽略该部分的变形能,仅计算由条间力改变引起的变形能.

1.2 模型的建立

首先考虑平面问题.假设滑裂面已知,设滑裂面及滑道为函数  $b(x)$ ,将要失稳滑动时(即零时刻)的坡面函数为  $f_0(x)$ ,  $t$  时刻的坡面函数为  $f(x)$  如(图 1 所示).将滑体分为  $n$  块,其中  $t$  时刻任一滑块的受力情况如图 2 所示.其中:  $W_i$  表示第  $i$  个滑块重量;  $H_i, H_{i+1}, V_i, V_{i+1}$  分别表示水平和垂直条间力;  $N_i, T_i$  分别表示滑块与滑道间的法向力和切向摩擦力.设第  $i$  个滑块的原始宽度及高度分别为  $b_{0i}, h_{0i}$ ;  $t$  时刻的宽度及高度分别为  $b_i, h_i$ ,此时它具有速度  $v_i$ ,加速度  $a_i$ ,位置  $x_i$ .实际上除  $W_i, b_{0i}, h_{0i}$  外,其他各量均为时间  $t$  的函数.

1.2.1 条间力的计算

上述问题属高次超静定,为了求解,本文推广不平衡推力法的假定,即认为在整个滑坡期间,条

间力的合力的方向与上一条滑块底面相平行,且作用于块高的二分之一处.这样,可认为水平条间力沿高度均匀分布.可把它简化成图 3 所示的模型.把重量  $W_i$  聚结在刚块上,刚块与刚块之间用无质量的弹簧连接,弹簧力表示水平条间力,弹簧的变形能表示滑块水平条间力引起的变形能,弹簧的变形即为滑块的宽度改变量.那么在弹性范围内,第  $i$  和  $i-1$  个滑块之间的水平条间力  $H_i$  与第  $i$  个滑块的变形即宽度改变量  $s_i$ (以压为正)的关系为

$$H_i = k_i \cdot s_i, \tag{1}$$

式中:  $k_i$  为弹簧系数.

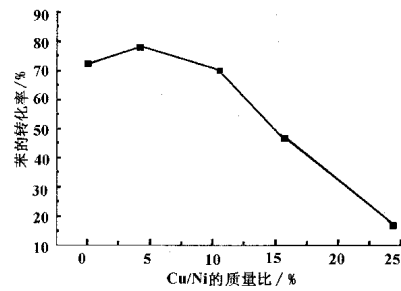


图 1 滑坡示意图

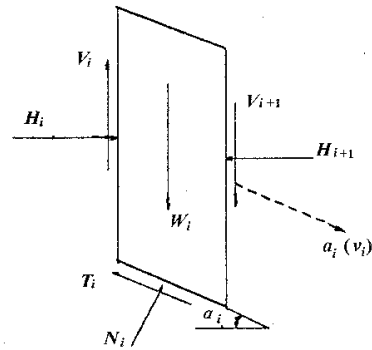


图 2 第  $i$  滑块受力及运动分析图

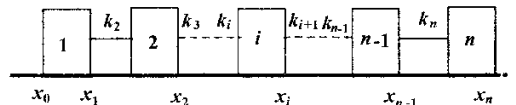


图 3 滑坡一维简化模型

下面寻找它的表达式.首先求滑块的变形能.当分块较多即滑块的宽度较小时,可视其为一个宽度为  $b_{0i}$ ,高度为  $h_{0i}$  的矩形.水平向应力为

$$\sigma = \frac{H_i}{h_{0i}}, \tag{2}$$

水平条间力引起的滑块的变形能为

$$EN_h = \frac{\sigma^2}{2E_0} \cdot b_{0i}h_{0i} = \frac{H_i^2 b_{0i}}{2E_0 h_{0i}}, \tag{3}$$

滑块的宽度改变量为

$$s_i = \frac{\sigma}{E_0} \cdot b_{0i} = \frac{H_i b_{0i}}{E_0 h_{0i}}, \quad (4)$$

式中,  $E_0$  为土体的弹性模量, 一般取为变形模量. 而等效弹簧在具有  $s_i$  的长度改变时, 所积存的变形能为

$$EN_i = \frac{1}{2} k_i s_i^2 = \frac{k_i (H_i b_{0i})^2}{(E_0 h_{0i})^2}, \quad (5)$$

令  $EN_h = EN_i$ , 可得弹簧的弹性系数为

$$k_i = E_0 \frac{h_{0i}}{b_{0i}}. \quad (6)$$

从而水平条间力可由式(1)计算. 实际上, 当滑体即将滑动时, 滑块间已存在初始水平条间力  $H_{0i}$  (后面讨论), 则水平条间力应为

$$H_i = H_{0i} + k_i \cdot s_i, \quad (7)$$

则第  $i$  和  $i-1$  个滑块之间条间力的合力为

$$P_i = \frac{H_i}{\cos \alpha_{i-1}}. \quad (8)$$

由于土体不可能被无限的压缩, 设最大压缩应变为  $\epsilon_{\max}$ , 则宽度最大的压缩量为

$$s_{i\max} = \epsilon_{\max} b_{0i}, \quad (9)$$

同时当水平条间力为拉力且大于土的抗拉强度  $\sigma_s^+$  (对应的拉应变设为  $\epsilon_s^+$ ) 时, 土体将产生拉裂缝, 其中积存的变形能将会部分或全部丧失, 条间力几乎减小到零. 由于本文前面假定滑块之间不存在宏观的分离, 那么, 尽管此时条间力为零, 但滑块的拉伸仍然继续, 没有回缩, 自然其高度减小.

### 1.2.2 滑块的运动分析

分析第  $i$  个滑块的运动 (如图 2 所示). 设在  $t$  时刻, 其速度  $v_i$ , 加速度  $a_i$  的方向平行于该滑块底部中心点下的滑道的切线方向, 由质点运动学可得

$$m_i a_i = P_i \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - P_{i+1} + W_i \sin \alpha_i - T_i, \quad (10)$$

$$m_i \frac{v_i^2}{r_i} = N_i - W_i \cos \alpha_i - P_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i), \quad (11)$$

$$T_i = N_i \cdot \tan \varphi_{di}, \quad (12)$$

式中:  $m_i$  为第  $i$  个滑块的质量;  $\varphi_{di}$  为它与滑道之间的动摩擦角, 而  $r_i$  为滑道的曲率半径. 由于滑道在大多数情况下为缓变曲线, 甚至是由折线组成, 则  $r_i \rightarrow \infty$ , 从而式(11)左边等于零.

如果在  $t$  时刻每个滑块的变形已知, 则  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  就为已知值, 那么可由以上 3 式算出  $t$  时刻

的加速度  $a_i$ .

设时间间隔  $\Delta t$  很小, 那么可认为在  $t \sim t + \Delta t$  时段内加速度不变, 则  $t + \Delta t$  时刻的速度为

$$v_{i,t+\Delta t} = v_i + a_i \Delta t, \quad (13)$$

$t + \Delta t$  时刻的位置为

$$x_{i,t+\Delta t} = x_i + \frac{1}{2} (v_i + v_{i,t+\Delta t}) \Delta t \cos \alpha_i, \quad (14)$$

此时滑块的宽度为

$$b_{i,t+\Delta t} = x_{i,t+\Delta t} - x_{i-1,t+\Delta t}, \quad (15)$$

而此时滑块的高度为

$$h_{i,t+\Delta t} = C \cdot \frac{V_{0i}}{b_{i,t+\Delta t}}, \quad (16)$$

式中:  $V_{0i} = h_{0i} b_{0i}$  为第  $i$  个滑块的体积;  $C$  为体积变化系数, 由于目前缺乏足够的统计分析与计算资料, 暂不考虑此项修正, 即取  $C = 1$ .

在由式(13)计算  $v_{i,t+\Delta t}$  时, 有可能由于加速度  $a_i$  小于零, 算得  $v_{i,t+\Delta t}$  也小于零, 即反向运动, 这在滑坡反坡时可能实际存在, 否则是不可能的, 那么此时应取  $v_{i,t+\Delta t}$  等于零. 当所有的滑块的速度都等于零时, 滑坡终止. 此时滑体前缘所走过的距离, 即为最大滑距.

### 1.2.3 初始水平条间力和初始加速度

理论上, 边坡处于临界失稳时, 边坡安全系数  $F_s = 1$ , 若  $F_s < 1$ , 边坡将发生滑坡. 因此  $F_s = 1$  所对应的条间力可作为滑坡的初始条间力. 但是由于边坡安全系数的计算方法存在各种各样的假定, 算得  $F_s = 1$  时并不严格地对应着将要滑坡. 尽管如此, 实际滑坡时,  $F_s$  应  $\approx 1$ . 所以, 首先以不平衡推力法计算  $F_s$ , 若  $F_s \approx 1$ , 则算得的条间力即可作为初始条间力  $P_{i0}$ . 利用式(8)即可反算得初始水平条间力  $H_{i0}$ . 然后, 令初始条间力不变, 而滑床上的剪切力换成动摩擦力, 则可由式(10)~(12)算得初始加速度.

## 2 实例与数值模拟

例: 该天水锻压机床厂北侧山体滑坡属一大型黄土滑坡, 1990 年 8 月 11 日, 天水市普降暴雨, 上午 11 时 45 分许, 滑坡发生. 据目击司机回忆, 滑坡经历了约 20~30 s 后停止, 滑动速度为 7.0~9.0 m/s<sup>[6]</sup>, 最大滑距 118 m<sup>[1]</sup>.

取该滑坡体主断面见图 5 中粗线所示<sup>[6]</sup>, 将滑前滑体沿滑动方向等距分为 50 块, 从坡顶向坡脚顺序编号, 变形模量取 15 MPa, 动摩擦角取值如表 1 所示.

表 1 动摩擦角取值<sup>[6]</sup>

位置	滑面				滑道
	坡顶拉裂段	后部锁固段	中部蠕滑段	前部锁固段	
动摩擦角( $^{\circ}$ )	5	19.6	13.5	12.4	4

模拟结果表明:滑块最大滑速发生在坡体前缘,为 11.63 m/s,滑动历时为 26.63 s,计算前缘滑程为 135.06 m,稍大于实际最大滑距 118 m.从图 4 所示的块体运动速度历时曲线可以看出:尽管滑体后部首先启动,但全部滑块在 1~2 s 时间内均开始滑动并加速,后部在  $t=4$  s 左右时达到其最大速度 9.95 m/s,中部(第 25 条)在  $t=8$  s 左右时获得最大速度为 5.91 m/s,且前缘在约  $t=8.49$  s 时得到全程最大速度为 11.63 m/s,然后全部块体逐渐震荡减速,中部在第 20 s 前后滑动停止,其他块体依然在运动变形,直到 26.63 s 时前缘最终停止运动,标志着整个滑坡运动的结束.另外,从图中的  $t=5$  s,  $t=10$  s,  $t=15$  s 滑块速度历时曲线可以看出:除滑坡体前缘和后部外其它各滑块的速度变化幅度都较小,并且这些块体的加速与减速基本同步,因此可以认为,在滑坡滑动的中间过程中基本呈现出整体滑动的趋势.

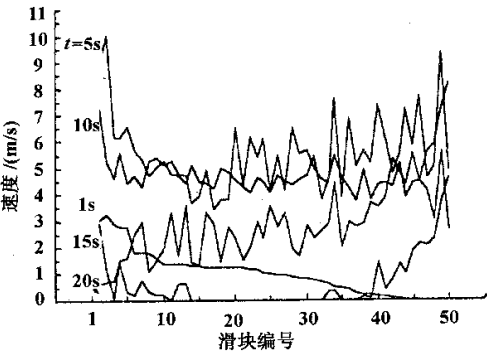


图 4 滑体运动速度历时曲线

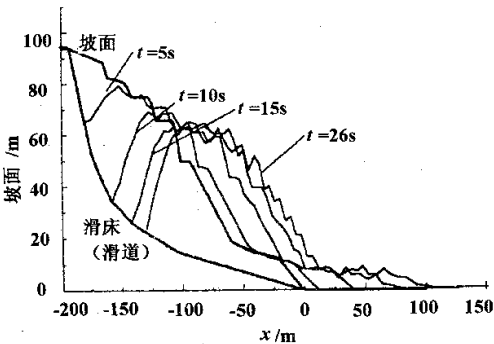


图 5 不同时刻的坡面形状

从模拟结果可以看出:所有块体在 1~2 s 内开始启动,但前缘(第 50 点)在 26.63 s 时停止运

动形成前缘滑程 135.06 m,中部(第 25 点)在 20 s 得到其最大滑程为 61.38 m,而后缘(第 0 点)在 24 s 时运动停止形成后缘滑程 59.08 m,充分体现了前缘超距和后缘失距的特征.中后部滑距接近,而中前缘滑距相差很多,这表明中前部土体在滑坡后处于松弛甚至拉伸的状态,更易呈现出颗粒流动的状态.同时,从图 5 所示的不同时刻的坡面形状图上可以看出,土体堆积形态体现出前部较薄、后部较厚的特点,并且,波浪状沟壑相间分布的形态也很突出.

3 结论

本文通过分析高速滑坡的动力来源及其运动机理,抽象和建立了此类滑坡的新的运动机理模型,即提出了一种可以同时考虑滑动过程中的速度的不均匀性、变形的不均匀性、变形能的变化以及能量的损耗的块体运动理论.利用该模型,可以模拟滑坡运动的整个过程,可以预测滑坡的最大滑程和最大滑速.通过对天水锻压机床厂滑坡运动过程的模拟,证明了该模型的合理性和有效性.

通过分析,本文认为滑坡形成高速的根本原因在于剧滑时滑床的抗滑阻力出现大幅度下降(峰残效应)和滑床滑带土的液化等因素引起的综合摩阻力的下降,滑体后部在滑动过程中的较大重心落差,给滑体剧滑提供较大势能是滑坡高速运动的动力来源.在滑坡的运动中间阶段,尽管最大速度出现于滑体的前后部,而中部各滑块的滑速却变化不大,呈现出整体滑动的特征,滑坡停止后,中后部滑距接近,而中前缘滑距相差很多,这表明中前部土体在滑坡后处于松弛甚至拉伸的状态,更易呈现出颗粒流的状态.

当然,在模拟计算中,参数的确定对模拟结果有很大影响.滑裂面和滑道的动摩擦角、滑体的变形模量需要我们慎重选用.最好有大量的实验来支持,或通过对已有条件类似的滑坡的反演得到.

上述模型中有许多地方有待改进.譬如:模拟的坡面后部形态与实际有较大的不同,滑体前缘可能存在的颗粒流效应还没有考虑等.这些将是我们今后的工作.

参考文献：

[ 1 ] 文宝萍.黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[ M ].北京:地质出版社,1997.5 – 10.

[ 2 ] SCHEIDEGER A E.On the prediction of the research and velocity of catastrophic landslide[ J ]. Rock Mechanics , 1973 3( 4 ) 231 – 236.

[ 3 ] 方玉树.大型高速滑坡运程预测的研究[ A ].崔政权.自然边坡稳定性分析暨华莹山边坡变形研讨会论文集[ C ].北京:地质出版社,1993.92 – 102.

[ 4 ] 李保雄,王得楷.黄土滑坡空间预报的一种新理论[ J ].甘肃科学学报,1998,10( 3 ) 57 – 58.

[ 5 ] 胡广韬.滑坡动力学[ M ].北京:地质出版社,1995.75 – 81.

[ 6 ] 李保雄,王得楷,冯学才.天水锻压机床厂滑坡灾害研究[ R ].兰州:甘肃省科学院地质灾害防治研究所,1996.11 – 16.

[ 7 ] HSU K J. Catastrophic debris streams ( sturdy storms ) generated by rockfalls[ J ]. Bull. Geol. Soc. Amer.,1975,8: 225 – 256.

[ 8 ] 张年学.长江三峡工程库区顺层岸坡研究[ M ].北京:地震出版社,1993.169 – 180.

[ 9 ] 廖小平,徐峻龄,郑静.高速远程滑坡的动力分析与运动模拟[ A ].滑坡文集编委会.滑坡文集(第12集)[ C ].北京:中国铁道出版社,1997.45 – 49.

[ 10 ] 徐俊龄.高速远程滑坡研究现状综述[ A ].滑坡文集编委会.滑坡文集(第12集)[ C ].北京:中国铁道出版社,1997.54 – 64.

Dynamic Simulation of the Severity of High – speed Landslides

LIU Zhong – yu<sup>1</sup>, FANG Bo<sup>2</sup>

( 1. College of Civil & Building Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002 ,China ; 2. Zhengzhou Water Company ,Zhengzhou 450007 ,China )

**Abstract** :Based on the analysis of the inhomogeneity of speed and deformation ,conversion of strain energy and dissipation of energy during high – speed and long – distance landslide ,a new method for simulating its whole advancing procedure from the onset to the end is presented in this paper. Moreover ,we can predict the maximum sliding speed ,maximum sliding distance and surface variations of sliding body by applying the method. The computer modeling of the landslide in Tianshui Forging Machine Factory illustrates its efficiency. The calculated results prove that ( 1 ) the fundamental cause of high – speed is the decline of resultant friction force during acutely sliding ,and the big fall of barycenter of tail sliding mass is its dynamic source ; ( 2 ) the sliding mass presents usually the character of the whole motion at midst stage ,and its middle and front parts show easily themselves in a laxity ,even extensile state at the end of sliding.

**Key words** :high – speed landslide ; maximum sliding speed ; maximum sliding distance ; severity of activity ; simulation ; theory of body kinematics