

## 均质黏土滑坡的运动特性研究

储浩<sup>1</sup>, 孙树林<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 丁伟<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究均质黏土滑坡的运动特性, 根据黏土滑坡特性定义圆弧形滑动面为最危险滑移面, 基于质心法的运动假设, 建立失稳后滑坡的物理运动模型, 依据滑坡运动过程中功能转换关系, 推导出滑坡滑动距离的预测公式, 通过计算获取其运动加速度、速度、滑动距离等动力学参数, 并将该方法计算得到的结果与雪橇模型结果对比。结果表明: 均质黏土滑坡运动加速度在极短的时间内达到最大, 而后逐渐降低; 滑坡的运动速度在最初阶段增加较快, 此后逐渐减小直至滑坡停止; 该方法得到的最终水平滑动距离与雪橇模型计算结果基本一致, 相对误差较小, 仅为 1.2%。

**关键词:** 滑坡; 均质黏土滑坡; 圆弧滑动; 能量守恒

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

## Study on the motion characteristic of clay landslide

CHU Hao<sup>1</sup>, SUN Shulin<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, DING Wei<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 211100; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098)

**Abstract:** In order to analyze the motion characteristic of clay landslide, the circular sliding surface is defined as the most dangerous slip plane according to clay landslide characteristic. Base on the assumption that landslide moves as a group of particles motion, the physical motion model of landslide failure is established. Base on function transformation relations, in the process of landslide movement the forecast formula of landslide distance is deduced. Kinetic parameters such as motion acceleration velocity, sliding distance are obtained by calculation. Compared with the sled model, this method can be used for landslide case. The case results show that the motion acceleration of homogeneous clay landslide approaches to its maximum immediately in a very short time, and then reduces gradually. Landslide movement speed increases rapidly in the initial stage, then slows down gradually until the landslide movement stops. The final horizontal sliding distance of this method is equal to the result calculated by the sled model approximately, and the relative error is only 1.2%, which is very small.

**Key words:** landslide; homogeneous clay landslide; sliding along circular surface; energy conservation

滑坡是一种常见的地质灾害, 中国是亚洲乃至世界上滑坡灾害最为严重的地区之一, 严重的滑坡灾害不仅给当地居民的生命财产造成极大损失, 也严重影响铁路、公路、水运及水电站等基础设施的安全运营<sup>[1-3]</sup>。在滑坡稳定性分析研究方面, 国内外学者做了大量研究工作, 形成诸多科学分析理论和方法<sup>[4-6]</sup>。但由于滑坡灾变的复杂性、作用因素的随

机性、可变性和不确定性<sup>[7]</sup>, 滑坡失稳后的运动特征研究广受限制, 滑坡预测的研究尚存诸多问题。许多学者基于滑坡体质心运动和能量转换的方法对失稳后滑坡的运动规律展开研究<sup>[8-10]</sup>。然而这些研究并未深入考虑每一微小时间段内滑坡功能转换关系, 也忽略了对某一不确定阶段滑面坡角的准确计算, 故其只能应用于滑坡运动的整体过程的分析。

**收稿日期:** 2017-04-10

**基金项目:** 国家重点实验室开放研究基金资助项目 (2005408911); 留学回国人员科研基金资助项目 (20071108); 江苏省环境保护厅项目 (201029)

**作者简介:** 储浩 (1993-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 从事地质环境保护与地质灾害防治方面的研究工作。

对于滑坡防灾减灾工作，预测潜在滑坡的危害范围是亟待解决的关键性问题，准确快捷地计算滑坡体每一运动阶段的速度和滑动距离对于灾害评估与规避具有重要意义。为此，本文以均质黏土滑坡为研究对象，选取圆弧形滑动面为最危险滑移面，基于质心法的运动假设，建立失稳后滑坡的物理运动模型，从而进行黏土滑坡的运动速度、滑动距离的预测，为滑坡灾害的危险评估和科学减灾提供理论支持。

### 1 滑坡运动物理模型的建立

Heim 于 1932 年提出“雪橇模型”来解释滑坡运动过程中的功能转换关系，该模型基于能量线的概念来计算滑坡速度和滑动距离<sup>[1]</sup>。雪橇模型简单合理，但只是粗略地考虑滑坡体整个滑动过程中的能量守恒，并未对每一微小阶段间的功能转换情况深入研究。本文建立的运动模型在“雪橇模型”的基础上，考虑圆弧形滑动面上的质心运动方程，对每一微小滑动阶段进行功能转换关系分析。将每一阶段的滑动距离进行叠加，直至滑坡运动停止，最终得到均质黏土滑坡的滑动总距离。

考虑二维平面问题，对潜在的黏土滑坡进行稳定性分析，确定其最危险滑移面分布。图 1 所示为运动分析的雪橇模型，假定滑坡运动期间所有的能量损失均起因于摩擦做功，能量线代表着滑坡运动过程的动能与势能之和，动能由能量线与运动块体重心间的高差表示。

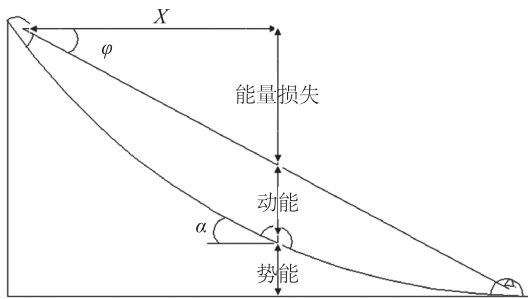


图 1 滑坡运动的雪橇模型  
Fig.1 Sled model of landslide

根据极限平衡原理，建立公式：

$$mg \sin \alpha_t - f_t = ma_t \quad (1)$$

式中， $a_t$  为  $t$  时刻滑坡体的运动加速度； $\alpha_t$  为  $t$  时刻滑坡质心所在圆弧面的切线坡角； $f_t$  为  $t$  时刻的摩擦力，由公式 (2) 所确定。

滑坡体沿着滑动面运动，其与滑动面之间的滑动摩擦力为：

$$f_t = mg \cos \alpha_t \tan \varphi_t \quad (2)$$

式中， $\varphi_t$  为滑坡体与滑动面之间的动摩擦角，假定滑坡体在任意时刻与滑动面间的动摩擦角不变，即都为  $\varphi$ 。

对滑坡在  $t \sim t + \Delta t$  时段分析， $t$  时刻速度为  $v_t$ ，加速度  $a_t$  可由 (1) 式计算，即：

$$a_t = g \sin \alpha_t - g \cos \alpha_t \tan \varphi \quad (3)$$

当时间间隔  $\Delta t$  很小，则可以事先假设在  $t \sim t + \Delta t$  时段内，滑坡的运动加速度不变，即  $t + \Delta t$  时刻滑坡体的速度为：

$$v_{t+\Delta t} = v_t + a_t \Delta t \quad (4)$$

$t \sim t + \Delta t$  时段内，滑坡运动过程的势能变化为：

$$E_h = mg \Delta h \quad (5)$$

同时因摩擦力做功造成的能量损失表达式如下：

$$E_f = \int_{\Delta x} mg \cos \alpha \tan \varphi \frac{dx}{\cos \alpha} = mg \cdot \Delta x \cdot \tan \varphi \quad (6)$$

根据  $t \sim t + \Delta t$  时段内，滑坡运动过程能量守恒，即：

$$E_h - E_f = \frac{1}{2} m (v_{t+\Delta t}^2 - v_t^2) \quad (7)$$

将 (5) 式和 (6) 式代入 (7) 式中，可求出  $\Delta x$ ，即：

$$mg \Delta h - mg \Delta x \tan \varphi = \frac{1}{2} m (v_{t+\Delta t}^2 - v_t^2) \quad (8)$$

图 2 展示了  $t \sim t + \Delta t$  时段内质点在圆弧面上运动的几何关系， $O$  为圆弧的圆心， $B$  点为  $t$  时刻质点所在的位置， $C$  点为  $t + \Delta t$  时刻质点所在的位置， $BE$  长为  $\Delta x$ ， $EC$  长为  $\Delta h$ 。

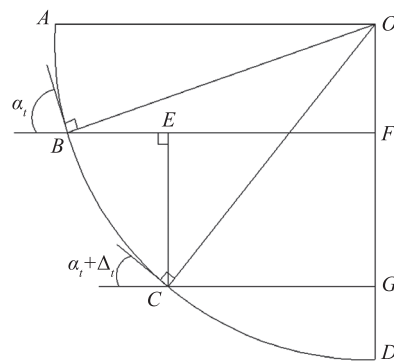


图 2  $t \sim t + \Delta t$  时段内质点运动几何关系图  
Fig.2 Geometric diagram of mass point in  $t \sim t + \Delta t$

由图 2 可得：

$$\left. \begin{aligned} \angle BOF &= \alpha_t \\ \angle COG &= \alpha_{t+\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= BF - CG = R(\sin \alpha_t - \sin \alpha_{t+\Delta t}) \\ \Delta h &= OG - OF = R(\cos \alpha_{t+\Delta t} - \cos \alpha_t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

整理 (10) 式，可得  $\Delta h$  与  $\Delta x$  关系如下：

$$\Delta h = R \cos[\arcsin(\sin \alpha_t - \frac{\Delta x}{R})] - R \cos \alpha_t \quad (11)$$

将(4)式与(11)式代入(8)式,即可求出 $t \sim t+\Delta t$ 时段内滑坡滑移的水平距离 $\Delta x$ 和垂直距离 $\Delta h$ 。

得到水平距离 $\Delta x$ 之后, $t+\Delta t$ 时刻圆弧面切线坡角可由下式求得:

$$\alpha_{t+\Delta t} = \arcsin(\sin \alpha_t - \frac{\Delta x}{R}) \quad (12)$$

同时,由图2几何关系可知,圆弧面切线坡角的变化与圆心角的变化同步,即在 $t \sim t+\Delta t$ 时段内,圆心角的变化关系如下式:

$$\Delta \theta = \angle BOF - \angle COG = \Delta \alpha = \alpha_t - \alpha_{t+N} \quad (13)$$

进而, $t \sim t+\Delta t$ 时段内,滑坡运动的弧长,即滑距为:

$$\Delta s = R \Delta \theta = R(\alpha_t - \alpha_{t+N}) \quad (14)$$

以上表达式可以计算一个时间步长 $\Delta t$ 内滑坡运动的速度、滑动距离等动力学参数,并且由(12)式可计算出 $t+\Delta t$ 时刻滑坡体所在位置的圆弧面切线坡角,从而进入下一个时间步的计算,依据(1)式确定出下一时间步的加速度。当 $\alpha_t$ 等于0时,可以计算滑坡体滑出圆弧滑面时的速度。以此计算,直到滑坡体速度为0,则运动停止,每一时间步的 $\Delta s$ 累计相加,即为该滑坡运动总的滑距。

## 2 案例分析

### 2.1 滑坡模型

以某高速公路旁黏土滑坡为例,图3为该边坡滑移面示意图。 $A-B-C-D-A$ 为滑坡体, $A-D-C$ 为最危险滑移面, $C-E$ 为边坡旁高速公路。假定土质均匀,最危险圆弧形滑移面半径为 $R=100$  m,土体容重 $\gamma=17.5$  kN/m<sup>3</sup>,内聚力 $c=63$  kPa,假定滑动摩擦角 $\varphi=21^\circ$ ,运动加速度取 $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。

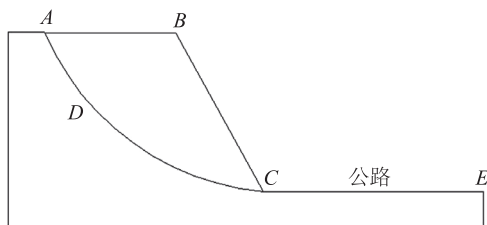


图3 边坡滑移面示意图

Fig.3 Slip surface of slope

### 2.2 计算分析

滑坡启动时刻滑坡体质心底面与水平面的夹角

$\alpha_0=76^\circ$ ,应用所建立的物理运动模型,对该黏土滑坡运动分析,计算出该滑坡的最大运动速度和运动距离,计算结果见图4和图5。

由图4可知:黏土滑坡运动加速度在极短时间内达到最大,加速度最大值为 $9.527$  m/s<sup>2</sup>,此后依次减小,在大约 $4.5$  s时加速度下降至0,之后呈负增长。说明 $4.5$  s左右滑坡由加速阶段转至减速阶段,相对于加速阶段而言,该减速阶段滑坡体因克服摩擦阻力而消耗的能量大于重力势能降低转化的能量。从图5可以看出:滑坡运动速度呈现先增大后减小的趋势,滑坡体运动速度增长较快,在极短时间内达到最大速度,此后运动速度开始减小直至运动停止,其中速度最大值为 $30.214$  m/s。

同时,滑坡体在 $6.5 \sim 7.0$  s时间段到达圆弧滑动面的最低点,在最低点的速度为 $27.825$  m/s,此后沿水平路面滑动,根据运动学公式计算出该阶段滑坡体滑行 $102.905$  m后停止。累计每一时间段滑坡体的水平位移,可以得出最终滑坡体最大水平位移

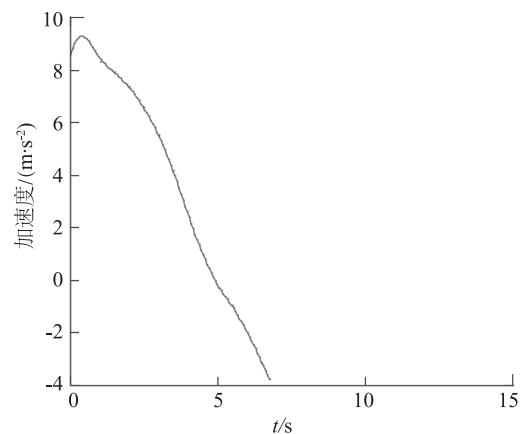


图4 滑坡加速度与运动时间关系图

Fig.4 Relationship between the accelerated velocity and time

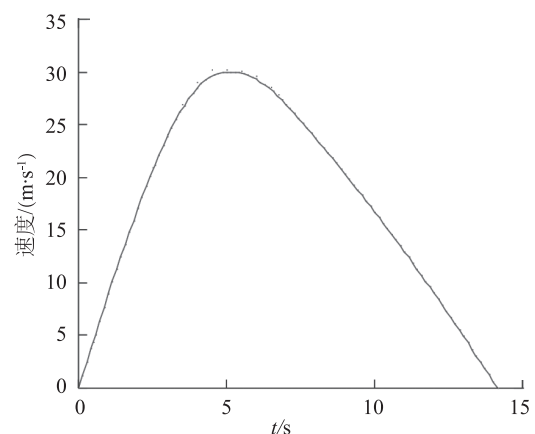


图5 滑坡速度与运动时间关系图

Fig.5 Relationship between the velocity and time

约 199.893 m。

### 2.3 结果对比

应用 Heim 雪橇模型计算该案例,对比二者结果,对所提方法的准确性进行分析。

根据上述案例条件,可知滑坡体失稳前后质心的高度差为:

$$H = 100 - 100\sin 76^\circ / \tan 76^\circ = 75.808 \text{ m} \quad (15)$$

将前后高度差  $H$  及案例参数代入 Heim 雪橇模型计算公式中,计算得到最终的水平位移为 197.486 m。本文所提模型的计算结果相对于雪橇模型得出的结果的绝对误差为 2.407 m,相对误差为 1.2%,相对误差较小,证明本文所建模型可行性和合理性。

### 3 结论

1) 以黏土滑坡运动为研究对象,以圆弧面为最危险滑移面,在雪橇模型的基础上对每一微小滑动阶段进行功能转换关系分析,建立黏土滑坡的物理运动模型,提出均质黏土滑坡运动特性研究的一种新方法。

2) 黏土滑坡的运动加速度在启动时刻极短时间内达到最大,而后依次减缓,在某一时刻减至 0 后滑坡体呈减速运动;滑坡体速度总体呈现先增大后减小的趋势,直至速度为 0 则滑坡体停止运动。同时对比雪橇模型的计算结果,二者相对误差仅为 1.2%,证明了所述方法对于均质黏土滑坡运动参数的计算是可行的。

3) 应用所述方法能够计算黏土滑坡体在圆弧滑面上最低点的运动速度,进而可计算出该点处滑坡体动量等物理量,为抗滑桩、挡土墙等工程提供数据支持。

### 参考文献:

- [1]黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- [2]王思敬. 工程地质学的任务与未来[J]. 工程地质学报, 1999(3): 195-199.
- [3]张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 89-97.
- [4]李世海, 刘天莘, 刘晓宇, 等. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(Z): 3309-3334.
- [5]孙树林, 秦鲜玮, 朱明杰, 等. 均质土坡稳定性分析的图解法研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 214-218.
- [6]毛硕, 王运生. 雅砻江中游某滑坡形成机制及稳定分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(1): 91-95.
- [7]王念秦, 王永锋, 罗东海, 等. 中国滑坡预测预报研究综述[J]. 地质评论, 2008, 54(3): 355-361.
- [8]王家鼎, 黄海国, 阮爱国, 等. 滑坡体滑动轨迹的研究[J]. 地质灾害与防治, 1991, 2(2): 1-10.
- [9]谷天峰, 王家鼎, 梁辉, 等. 均质土体滑坡运动规律分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2006, 36(3): 437-441.
- [10]董孝壁, 王兰生. 斜坡破坏后滑体的运动学研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 31-37.
- [11]HEIM A. Bergsturz and Menschenleben[M]. Zutich: Naturforschenden Geology, 1932: 218.

(责任编辑 王利君)