

On Open-pit Mine Landslide Prediction

Wang Changyi¹, Su Wei²

1. Penglai Bureau of Land And Resources, Penglai, Shandong

2. Quancheng College, Jinan University, Penglai, Shandong

Email: wyc59528@126.com

Abstract

The landslide is a dynamical problem, and it is necessary to strengthen the theory of kinetics and its application technology. This article has carried on the preliminary exploration in this aspect, for landslide forecast introduced a new concept, new theory and new methods, new parameters, widen the road for open-pit mine landslide prediction research.

Keywords

open-pit mine; landslide prediction; a new concept; the new parameters; the new theory; the new method

Subject Areas Engineering & Technology

关于露天矿滑坡预测

王昌益¹, 苏炜²

1. 中国山东省蓬莱市国土资源局, 山东 蓬莱

2. 济南大学泉城学院, 山东 蓬莱

Email: wyc59528@126.com

收稿日期: 2017年9月18日; 发布日期: 2017年9月19日

摘要

滑坡属于动力学问题, 要做好滑坡预测工作, 必须加强动力学基础理论及其应用技术研究。本文在此方面进行了初步探索, 为滑坡预测引入了新概念、新参数、新理论与新方法, 为露天矿滑坡预测研究拓宽了道路。

关键词

露天矿; 滑坡预测; 新概念; 新参数; 新理论; 新方法

1. 序言

本文涉及露天矿滑坡预测理论与方法, 其属于基础理论、岩石力学、爆破学、地质灾害预测理论及其应用技术研究领域。

滑坡是危及人类生命财产重大灾害之一，露天矿滑坡则是威胁露天矿安全生产的最重大灾害。所以，国内外对滑坡和露天矿滑坡得预测研究十分重视，在这方面都投入了大量人力和财力。然而，由于基本理论和基本法法存在缺陷，滑坡预测问题始终没有得到很好解决。

目前，国内外研究露天矿边坡稳定性、预测滑坡的方法如下主要由如下几种：一、工程地质类比法；二、结构分析法；三、极限平衡分析法；四、数值分析法、五、概率分析法。虽然这些方法应用了很长一段历史时期，但这些方法都不是定量预测露天矿滑坡的正确方法，都不能满足露天矿滑坡预测的需要，都解决不了露天矿滑坡的准确预测问题。实践证明：这些方法都不能正确说明滑坡与其控制因素之间的定量关系规律，采用这些方法进行滑坡预测，其结果一直效果不理想。

尽管当前监测技术极其先进，并且各种模拟手段都很高明，然而，由于在理论上一直不清楚滑坡与其控制因素之间的定量关系规律是怎样的，所以，很多工作都是徒劳无功的，滑坡预测结果往往不正确。尽管如此，为了减少露天矿滑坡带来的损失，各个露天矿山企业仍然投入大量人力和财力来研究预测露天矿的划破规律，希望能及时预测滑坡。笔者认为，基本理论与基本方法问题不能得到很好解决，准确预测露天矿滑坡事故是很难的，很多努力和投入都是白费的。

2.当前露天矿滑坡预测理论与方法的缺陷

当前，世界上露天矿滑坡预测方法的缺陷主要由如下几点：

一、定量预测露天矿滑坡的基本本理论不完善

就滑坡与其控制因素之间的统一关系问题而言，当前国内外的理论都不很完善，人们不清楚滑坡与各种之间的定量关系到底是怎样的，根本不能用正确的定量方法描述滑坡运动，没有用于正确度量滑坡孕育、发展与发生过程尺度，没有正确预测滑坡的计算公式，缺乏正确的指导理论。

二、对控制滑坡的因素及其与滑坡现象之间的关系缺乏正确认识

当前，国内外对控制露天矿滑坡的因素都缺乏正确认识，不明确各种因素与滑坡现象之间存在怎样的定量关系。例如，在露天矿采矿生产中的爆破与露天矿滑坡之间的关系问题上，人们往往缺乏正确认识。许多学者将露天矿爆破看作是露天矿滑坡的一种影响因素，不认为爆破是控制露天矿边坡稳定性和滑坡的作用因素，不能正确认识爆破作用与露天矿滑坡之间的定量关系规律，不能正确建立爆破与露天矿滑坡之间的定量关系方程，不清楚各种因素在滑坡事件中的客观地位。爆破构成了控制露天矿滑坡的一种重要作用，直接控制滑坡现象的孕育和发生，是控制露天矿滑坡的主导因素之一，并不是一种无足轻重的影响因素。

三、选择的露天矿滑坡预测判据不正确

许多研究者在滑坡预测中选择的、用于滑坡预测的判据不正确。例如，有的人将爆破引起的地面振动频率或加速度用作判断是否滑坡的判据，这是一种错误的选择。振动频率或振动加速度都不是度量滑坡的物理量，与滑坡之间的距离很遥远，不能判别是否会滑坡。判据选择错误的后果带来的是：后续的研究工作都是无用功，无论是观测还是分析计算都是无用的劳动，所花费的时间和资金都是白费的。判据是需要通过观测获得的数据，也适用于预测分析研究的数据，选择了没有价值的数据，并为之付出劳动，后果不言而喻。

四、当前的一些模拟实验、模型的建立往往是脱离实际的劳动

在露天矿滑坡预测研究问题上，国内外许多学者往往做一些模拟实验、建立某些模型，然后根据模拟实验或模型给出滑坡预测方法，其实这些工作往往都是脱离实际的工作。事实上，施工现场是最为实际的实验模型，完全与客观一致，并且不用人工建造构成，研究中只要仔细观察与观测、获得实际数据，然后根据实际数据进行科学分析与计算，就可以掌握滑

坡规律，就能做到准确预测滑坡事故。当然，前提是必须通过观测获得有价值的信息。如果大量的观测数据都不能用于滑坡预测，那么，不仅浪费，而且不能获得想要的滑坡预测成果。

总之，当前露天矿滑坡预测方法存在缺陷，不能满足滑坡预测的需要。

3. 滑坡运动新理论

滑坡运动新理论是在深入研究现有自然科学基本理论及其应用技术基础上产生的，构成了露天矿滑坡预测的理论基础与技术方法。这里简述其核心内容如下：

根据最近 30 多年来基础理论创新研究与实验结果，控制滑坡现象孕育、发展和发生的主导因素是主动作用现象，控制滑坡现象孕育、发展和发生的制约因素是边坡的性质因素或条件。作用现象的存在规定了滑坡现象发生的必然性，边坡条件对滑坡现象的形成与发展构成了制约。在滑坡预测研究中的主要研究任务是确定作用量和滑坡条件。

控制滑坡的作用量等于控制滑坡运动的主动作用力与作用时间之积，即

$$A = Ft.$$

式中， A 表示作用量； F 表示作用力； t 表示作用时间。

制约滑坡的边坡性质一般用两个参数来度量，这两个参数分别代表边坡物质的可滑程度和不可化程度，分别被新理论叫做虚度和实度，分别记为 E 和 T 。

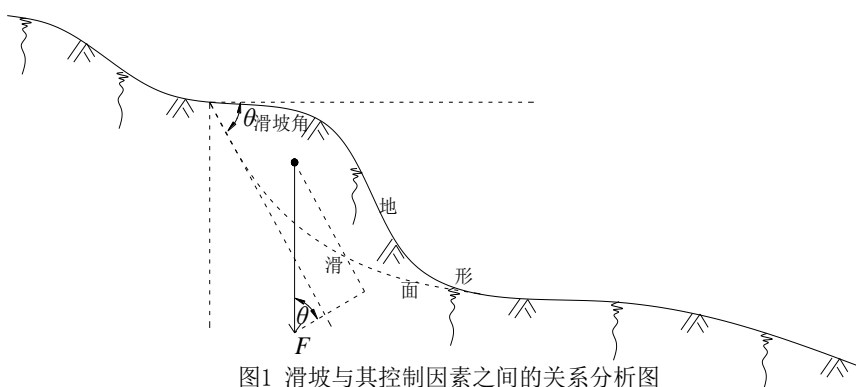
作用量被边坡物质分成两个部分：虚作用量和实作用量。虚作用量等于边坡物质实际没有接受的作用量部分；实作用量等于边坡物质实际接受的作用两部分，等于边坡物质产生的阻力与作用时间之积的负值。虚作用量和实作用量分别记为 A_F 和 A_T 。虚度和实度与作用量、虚作用量和实作用量之间的关系分别为

$$E = \frac{A_F}{A} \text{ 和 } T = \frac{A_T}{A}.$$

滑坡运动规律可用如下基本方程来描述

$$x = \begin{cases} \int_0^t \frac{EA \sin \theta}{m} dt, & \text{滑坡体的运行方程, } x \text{ 等于运行距离;} \\ \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt, & \text{滑坡体的稳定方程, } x \text{ 等于滞动距离。} \end{cases}$$

式中, m 表示滑坡体的质量; A 表示驱动滑坡体运动的主动作用量; E 表示滑坡体的可滑程度即不稳定系数; T 表示滑坡体的不可滑程度即稳定系数; θ 表示滑坡角; t 表示滑坡体存在的时间, 包括滑坡现象孕育、发展、发生时间; 如图 1 所示。该方程被叫做滑坡方程。



根据滑坡方程可知, 滑坡现象是否发生, 关键决定于作用量、边坡不稳定和不稳定系数、滑坡角、滑坡质量和时间。因此, 滑坡观测和预测研究的主要任务是搞清楚作用量、边坡不稳定和不稳定系数、滑坡角、滑坡质量和时间以及这些量与滑坡之间的关系规律。

当前在滑坡预测研究中观测的内容主要是滑坡位移, 对控制滑坡的作用和制约滑坡的边坡地层性质一般不进行系统研究, 预测研究内容不完整, 研究最终不能给出理想的预测成果。

4. 露天矿滑坡预测新方法

露天矿滑坡与地表山体滑坡存在着一定的区别: 地表山体滑坡主要在自然作用条件下自由滑坡, 露天矿滑坡则是在自然作用和采矿施工中的各种人工作用共同控制下形成滑坡, 主要区别在于露天矿滑坡体所接受的作用不同, 边坡条件不同, 但是, 滑坡现象生成与发展的基本规律两者是相同的。因此, 露天矿滑坡与地表山体滑坡可以采用相同方法进行预测研究。

根据滑坡方程, 可以归纳露天矿滑坡预测研究的工作任务和内容、方法、步骤如下:

4.1 现场观测

现场观测研究是实现露天矿滑坡预测的基础，是决定是否掌握滑坡预测基本规律和实现滑坡准确预测的关键。根据滑坡方程

$$x = \begin{cases} \int_0^t \frac{EA \sin \theta}{m} dt \\ \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt \end{cases}$$

现场观测研究的主要对象有如下几个：滑坡质量 m 、滑坡面和滑坡角即滑面倾角 θ 、控制滑坡的作用力 F 、滑坡体位移量或变形量 x 、观测时间与地点。观测研究的主要任务与内容是获得这些数据。

作用力主要包括重力、大气降雨和坡流产生的作用力、爆破产生的作用力、过往车辆与行人产生的作用力，这些力共同合成了控制滑坡体运行的驱动作用力。其中，重力的观测内容主要是质量，其主要工作是测量边坡物质密度、可能构成滑坡体的体积；大气降雨和坡流产生的作用力主要是观测降雨量、降雨时间、坡流汇聚规律，然后计算大气降雨和坡流产生的作用力，要及时获取天气预报给出的大气降雨预报数据；爆破产生的作用力观测实际上就是记录爆破位置和时间、装药量、确定单位炸药爆炸产生的冲击力；过往车辆与行人产生的作用观测实际上就是对过往车辆和行人运行路线、载重量、过往时间进行记录，为确定作用力的统计工作奠定基础。各种作用力的向量和等于滑坡体所接受的作用合力。即

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = F_1 + F_2 + \cdots + F_n.$$

在滑面生成之前，滑坡角的确定，需要根据地形和边坡物质的性质进行预测，一般不能准确确定。当滑面的一部分产生之后，滑面和滑坡角也就基本确定了。现场只要及时观测，就能及时获取有用数据。

边坡物质的变形或位移观测，其主要任务是确定滑面的变形和滑坡体沿着滑面产生的位移。由于在滑面形成前其位置不易确定，其变形特征也观测不到，所以，必须根据地面各点标高的变化来确定滑面的变形和位移及性质变化。

观测点的位置和观测时间数据只是一种记录工作，工作时多写几个字和几个数，不难做。

现场观测工作都不难做，难的只是做到及时、仔细、持久坚持做好不易。由于观测记录数据对露天矿滑坡的精准预测研究至关重要，所以，这项工作必须做细、做好。

4.2 数据分析

数据分析的任务主要是通过分析计算将不能通过观测直接获得的有用数据换算为有用数据。数据分析的主要内容如下：

作用数据大多数是不能够通过观测获得的，一般都需要通过分析计算来活的具体数字。重力需要通过观测在获得滑坡质量基础上通过计算获得，其计算公式为力学公式

$$F_1 = mg.$$

式中， F 表示滑坡受的重力； m 表示滑坡质量； g 表示重力加速度。大气降雨和坡流对滑坡体产生的作用也需要计算，其计算公式如下：

$$F_2 = \rho \left(\frac{Q^2}{S} + Qgt \sin \theta \right) L.$$

式中， F_2 表示坡流对滑坡体产生的推动力； ρ 表示坡流的密度； Q 表示通过滑坡体所在空间运行的坡流的平均流量； S 表示坡流的平均横渡面面积，等于滑坡体的平均横断面面积； θ 表示坡流方向的平均倾角； g 表示重力加速度； t 表示坡流的经过滑坡体运行的时间； L 表示滑坡体的受作用长度。

露天矿爆破对滑坡体产生的作用还需要结合实际爆破工程的位置结合工程布置图进行分析计算。炸药爆炸对爆破点产生的作用量可以根据炸药质量转化为作用量的规律来计算，也可以根据实验来计算。由炸药爆炸转化的爆炸冲击作用力为

$$P = \frac{kmc}{\Delta t}。$$

式中， P 表示炸药在爆破点产生的爆炸冲击作用力； k 表示炸药转化为作用量的转化率； m_i 表示炸药质量； c 表示光速； Δt 表示爆炸冲击作用时间。

炸药对滑坡体产生的作用力为

$$F_3 = \frac{km_i cS}{\pi r_i^2 \Delta t}。$$

式中， F_3 表示爆破点炸药爆炸对滑坡体产生的冲击作用力； V 表示冲击波对滑坡体作用的断面面积； r_i 表示爆破点与滑坡体质心之间的距离； π 表示圆周率。

过往车辆等对滑坡体产生的作用力根据以下公式计算：

$$F_4 = m_j g。$$

式中， F_4 表示任意过往车辆对滑坡体产生的作用力； m_j 表示任意过往车辆的质量； g 表示重力加速度。

滑坡体接受的作用量为

$$A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = mv_0 + mgt + \rho \left(\frac{Q^2}{S} + Qgt \sin \theta \right) Lt_1 + \frac{km_i cS}{4\pi r_i^2} + \sum_{i=1}^n m_j gt_j。$$

式中， t 表示重力作用时间； t_1 表示大气降雨坡流作用时间； t_j 表示任意车辆对滑坡体作用的时间； v_0 表示滑坡初速度。

除了作用量，进行滑坡预测还需要确定虚作用量、实作用量、虚度即不稳定系数、实度即稳定系数和虚度变化率和实度变化率。

滑坡体运动的速度与滑坡体的质量之积等于虚作用量，即

$$A_F = mv_t。$$

式中， A_F 表示虚作用量； m 表示滑坡质量； v_t 表示滑坡体的实际运动速度。

作用量与虚作用量之差等于实作用量，即

$$A_T = A - A_F。$$

式中， A_T 表示实作用量； A 表示作用量。

虚作用量与作用量之比等于虚度（不稳定性系数）。即

$$E = \frac{A_F}{A}。$$

实作用量与作用量之比等与实度。即

$$T = \frac{A_T}{A}。$$

由于通常情况下，滑坡体主要受重力作用，其它作用如爆破、大气降水坡流、过往车辆等产生的作用都是临时的，所以，控制滑坡的作用量可以简化为

$$A = mgt。$$

因此，虚度的计算公式可以简化为

$$E = \frac{a}{g}。$$

式中， a 表示滑坡运动加速度； g 表示重力加速度。相应，实度的公式简化为

$$T = \frac{g - a}{g}。$$

随着时间的推移，滑坡体的稳定性不断发生变化，即虚度和实度值不断变化，滑坡事故越来越临近。假设初始虚度和终止虚度分别为 E_0 和 E_t ，变化时间为 t ，那么，虚度变化率为

$$\beta = \frac{E_t - E_0}{t}。$$

相应，假设初始实度和终止实度分别为 T_0 和 T_t ，变化时间为 t ，那么，实度变化率为

$$\alpha = \frac{T_t - T_0}{t}。$$

总之，在滑坡观测研究中，必须根据滑坡方程及时进行数据分析，获取有用数据，并按照时间顺序记录在表格上，以便用于滑坡稳定性和不稳定性分析研究，进行滑坡预测和预报。

4.3 边坡稳定性与不稳定性分析方法

根据滑坡方程

$$x = \begin{cases} \int_0^t \frac{EA \sin \theta}{m} dt \\ \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt \end{cases}，$$

滑坡体的稳定方程为 $x_1 = \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt$ ，不稳定方程为 $x_2 = \int_0^t \frac{EA \sin \theta}{m} dt$ 。在作用控制下，如果滑坡体稳定不动，滑坡体的稳定系数 $T=1$ ，不稳定系数 $E=0$ ，滑坡体的滞动距离为 $x_1 = \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt = \int_0^t \frac{A \sin \theta}{m} dt$ ，滑坡体的位移量为 $x_2 = 0$ ，滑坡体接受的作用量全部被阻碍作用量抵消；当稳定系数小于1即 $T < 1$ 时，不稳定系数大于0即 $E > 0$ ，滑坡位移 $x_2 > 0$ ，滑坡位移速度 $v > 0$ ，滑坡体的滞动量 x_1 不能全部被阻碍作用量抵消，滞动距离 $x_1 = \int_0^t \frac{TA \sin \theta}{m} dt < \int_0^t \frac{A \sin \theta}{m} dt$ ，滑坡体处于不稳定状态。

在受自然作用和工程爆破作用条件下，露天矿滑坡与不滑坡，关键取决于边坡物质的性质，因此，滑坡预测研究的核心问题是研究滑坡条件，即滑坡预测研究的核心对象是虚度和实度两个变化的参数。当虚度 $E=0$ 、实度 $T=1$ 时，边坡处于稳定状态，不会滑坡。当虚度 E 值很小、实度 T 值很大时，滑坡现象处于孕育发展状态。因此，观测研究的关键任务在于随时确定虚实度参数值。

虚度和实度都是变化的参数，其变化式分别为

$$T_t = T_0 + \alpha t \text{ 和 } E_t = E_0 + \beta t ,$$

式中, T_0 和 T_t 分别表示初始实度和终止实度; α 表示实度变化率; t 表示变化时间。由于在露天矿开采过程中边坡物质除了接受稳定的重力作用外, 还有爆破、降雨等作用, 所以, 控制露天矿滑坡的作用力也是有变化的。为了研究方便, 将控制露天矿滑坡的作用力表述为

$$F_t = F_0 + \delta t .$$

式中, F_0 和 F_t 分别表示初始作用力和终止作用力; δ 表示作用力的变化率; t 表示变化时间。据此将滑坡方程改写为

$$x = \begin{cases} \int_0^t \frac{(E_0 + \beta t)(F_0 + \delta t)t \sin \theta}{m} dt \\ \int_0^t \frac{(T_0 + \alpha t)(F_0 + \delta t)t \sin \theta}{m} dt \end{cases} .$$

根据这个方程, 当虚度变化率等于零或近似等于零时, 滑坡位移等于零或位移很小, 滑坡体处于稳定状态; 当虚度变化率大于零时, 滑坡位移量不断增大, 滑坡体处于不稳定状态; 当虚度变化率等于某一个极限值时, 滑坡事故就开始发生了。

4.4 露天矿滑坡预测

露天矿滑坡预测关键解决的是滑坡时间问题。根据作用学新理论, 滑坡时间 t 与滑坡体接受的驱动作用力 F 、实作用力 F_T 、滑坡角 θ 、虚度变化率 β 、滑坡质量 m 之间的关系式为

$$t = \frac{T_0 - \frac{F_T}{F \sin \theta}}{\beta} .$$

由此式得知, 虚度变化率 β 值越小, 滑坡时间越长, 边坡越稳定; 初始实度值越大, 滑坡时间越长, 边坡越稳定。

相应, 滑坡时间 t 与滑坡体接受的驱动作用力 F 、虚作用力 F_F 、滑坡角 θ 、虚度变化率 β 、滑坡质量 m 之间的关系式为

$$t = \frac{\frac{F_F}{F \sin \theta} - E_0}{\beta}$$

根据此式，驱动作用力 F 越小，滑坡孕育、发展、发生所经历的时间越长，边坡越稳定；滑坡角越小，边坡越稳定。

可见，滑坡时间预测，关键在于确定作用力、滑坡角、虚实作用力、初始虚度和实度及其变化率。

露天矿爆破与滑坡之间的关系与滑坡预测研究可以单独进行，因为，爆破作用仅产生于爆破瞬间。

露天矿生产爆破对露天矿滑坡产生一种特殊的加载作用，构成了控制露天矿滑坡事故发生的直接原因之一。前面已经论述了爆破与滑坡之间的关系：爆破对滑坡体产生一种作用量，从而加速滑坡事故发生的进程。爆破对滑坡体产生的控制作用量的大小，与爆破位置（包括方位、距离、炮眼深度、）、爆破方式、装药量多少、炸药质量都有关系。爆破位置与滑坡关系十分密切。在露天矿开采生产过程中，爆破点（炮眼）常常位于滑坡体上，也有位于滑坡体之外的爆破点。无论爆破点位于滑坡体上还是位于滑坡体以外某作用点上，爆破对滑坡体产生的都是一种重要的加载作用量。

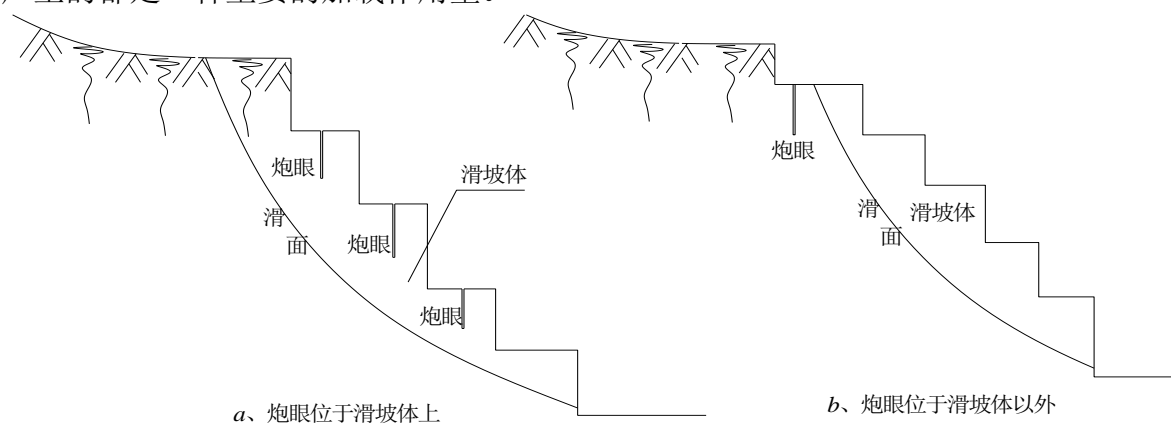


图2 爆破点与滑坡体关系示意图

如果爆破点炮眼位于滑坡体上，炸药爆炸产生的作用量直接作用于滑坡体。炸药爆炸产生的作用主要是光能和爆炸气体动能，这些能量集中作用于炮孔中较小的作用面上，以冲击爆炸作用为特征。如果单位质量炸药产生的最大冲击作用量为 I_0 ，炮孔装药质量为 m_z ，那么， m_z 产生的冲击作用量为 $A_2 = m_z I_0$ 。该作用量几乎全部用于驱动滑坡体运行。假设其它作用量的合成量为 A_1 ，那么，滑坡体接受的作用量等于 A_1 与 A_2 之合量。即

$$A = A_1 + A_2 .$$

如果爆破作用点不在滑坡体上，而位于滑坡体以外某作用点上，那么，爆破产生的作用量 A_2 就不等于爆破对滑坡体产生的作用量了。这时，爆破对滑坡体产生的作用量仅仅是爆破作用量中的一个部分，即，如图 4 所示，爆破对滑坡体产生的作用量为

$$A'_2 = A_2 \cos \varphi .$$

控制滑坡运行的作用量是爆破对滑坡体产生的作用量 A'_2 与其它控制滑坡运行的作用合量 A_1 之间的合量，即

$$A = A_1 + A_2 \cos \varphi .$$

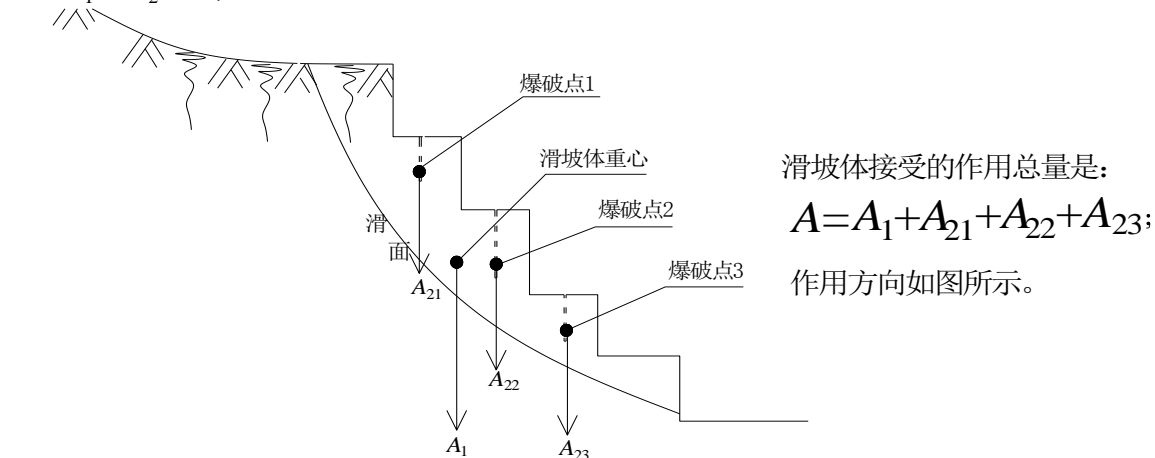


图3 爆破对滑坡体产生的作用量与其它作用量的合成示意图

在平行于滑面方向上，滑体受的的驱动作用量是

$$A_x = (A_1 + A_2 \cos \varphi) \sin \theta .$$

如果滑坡体接受滑坡体的初动量 A_0 、重力产生的作用量 A_1 、爆破产生的作用量 A_2 、大气降水产生的驱动作用量 A_3 、车辆产生的作用量 A_4 五个作用量的共同控制，那么，露天矿爆破与露天矿滑坡之间的关系方程有两种：

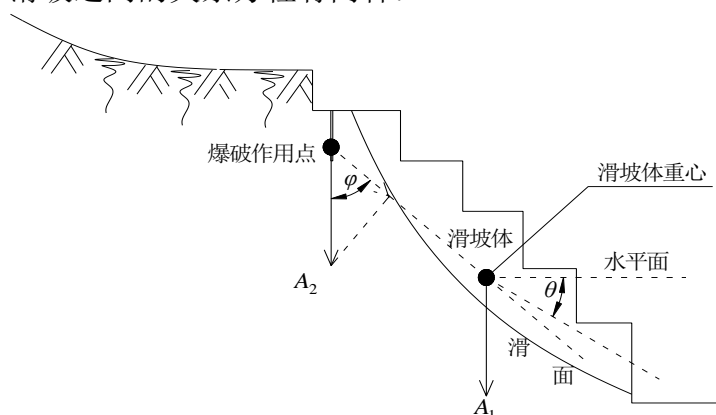


图4 滑体外爆破与其它作用关系示意图

I、作用于滑体上的爆破作用量 A_2 与露天矿滑坡之间的关系方程：

$$x = \int_0^t \frac{E(A_1 + A_2) \sin \theta}{m} dt ;$$

式中， x 表示滑坡现象的位移距离。

II、不在滑坡体上的爆破作用与滑坡之间的关系方程：

$$x = \int_0^t \frac{E(A_1 + A_2 \cos \varphi) \sin \theta}{m} dt .$$

可见，露天矿爆破与露天矿滑坡之间的关系是加载作用与滑坡之间的关系，并不是一般的干扰因素或影响因素。通过观测、分析与计算，便可以得到露天矿滑坡时间

$$t = \frac{\frac{F_F}{F \sin \theta} - E_0}{\beta} .$$

5. 露天矿滑坡防治方法的建议

根据本文的认识，露天矿滑坡的防治措施应该根据滑坡方程所揭示的规律来进行，其中最主要的办法是：减小滑坡角度即降低边坡角度、减小爆破炸药的装药量、快速剥离。如果

不能杜绝滑坡事故，那就必须及时观测，准确预测，在滑坡事故来临之前，采取撤离现场、减小损失的措施。

6. 小结

综上所述，滑坡属于动力学问题，要做好滑坡预测工作，必须加强动力学基础理论及其应用技术研究。本文在此方面进行了初步探索，为滑坡预测引入了新概念、新参数、新理论与新方法，为露天矿滑坡预测研究拓宽了道路。

参考文献

- [1] 钟阳. 露天矿高边坡滑坡预测与危害性探讨[J]. 化工矿物与加工, 2015(4).
- [2] 肖海平, 杨旺生, 肖岚,等. 基于组合预测模型的露天矿高陡边坡滑坡变形研究[J]. 金属矿山, 2014, 43(4):169-171.
- [3] 张晓东. 小龙潭布沼坝露天矿高边坡安全性和经济性分析[D]. 昆明理工大学, 2005.
- [4] 陈路良. 高陡软岩边坡滑坡预报方法的研究[D]. 昆明理工大学, 2009.
- [5] 吴西臣, 徐杨青, WUXicheng,等. 平朔露天矿某黄土高边坡滑坡成因机理分析[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(3):236-240.
- [6] 王晓婷. 露天矿边坡变形监测体系构建及滑坡预测研究[D]. 北方工业大学, 2012.
- [7] 任德帅, 马志伟. 露天矿边坡稳定和滑坡防治的技术探讨[J]. 文摘版:工程技术, 2015(55):9-9.
- [8] 王海鹏. 台阶规模边坡滑坡概率的预测方法的研究[D]. 内蒙古科技大学, 2015.
- [9] 李凡月. 露天矿边坡变形监测与预测预报系统研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2012.
- [10] WEI Zhonggen. 边坡雷达技术在露天矿滑坡预测预报中的应用[J]. 煤矿安全, 48(1).
- [11] 王晓婷. 露天矿边坡变形监测体系构建及滑坡预测研究[D]. 北方工业大学, 2012.
- [12] 薄志毅. 露天煤矿边坡滑移变形预测理论及其应用研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2009.
- [13] 申力, 纪玉石, 刘大勇,等. 采矿引起的边坡倾倒滑移变形机理与变形安全性分析研究——以抚顺西露天矿边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3):63-68.
- [14] 卢世宗, 笄益, 金世源,等. 某露天矿山边坡变形破坏机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1):22-29.
- [15] 赵静波, 李莉, 高谦. 边坡变形预测的灰色理论研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(s2):5799-5802.
- [16] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements[J]. Science, 2001, 294(5542):574-577.
- [17] 何姣云, 张世雄. 露天矿不采区边坡位移监测及滑坡预报研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(6):35-37.
- [18] 文宝萍. 滑坡预测预报研究现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 1996(1):86-92.
- [19] 张永兴. 滑坡灾变智能预测理论及其应用[M]. 科学出版社, 2005.

- [20] Wang R, Nie L. Landslide prediction in Fushun west open pit mine area with quadratic curve exponential smoothing method[C]// The, International Conference on Geoinformatics: Giscience in Change, Geoinformatics 2010, Peking University, Beijing, China, June. DBLP, 2010:1-6.
- [21] Nai L, Wang R X. GIS-based landslide monitoring and forecasting system and its application in the landslide of Fushun west open-pit[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(6):1359-1364.
- [22] Liu B H, Zhang Z W, Wang Y G. Open-pit Mine Landslide Quadratic Linear Regression Model Establishment and Applied Research[J]. Coal Technology, 2009.
- [23] Hu H, Fernandezsteeger T M, Azzam R, et al. 3D Modeling of Landslide in Open-pit Mining on Basis of Ground-based LIDAR Data[J]. Egu General Assembly, 2009, 11:5378.
- [24] Horrillo J, Wood A, Kim G B, et al. A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: Application to the Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research-space Physics, 2013, 118(12):6934-6950.