

# 斜坡演化的自组织临界性和防护系统的可靠性分析

高召宁<sup>1,2</sup>, 姚令侃<sup>1</sup>, 尹紫红<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院道路与铁道工程系, 四川 成都 610031;

2. 安徽理工大学 资源开发与管理工程系, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 在对斜坡演化全过程特点分析的基础上, 讨论了斜坡演化的自组织过程。研究表明, 斜坡演化过程是一类具有时间—空间变化的广延耗散动力学复杂系统, 与外界环境存在着物质、能量和信息的交换, 是一种远离平衡态的自组织临界现象。自组织临界性是斜坡动力学过程的吸引子, 同时为斜坡作用强度与频度之间的负幂律特征提供了证据。在此基础上, 以斜坡崩塌落石为例, 建立了斜坡防护系统的可靠性分析模型, 并对某铁路缙云至青田段危岩崩塌分布区内拦石网防护系统进行了可靠性分析。

**关键词:** 斜坡演化; 自组织临界性; 干涉模型; 可靠性

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)01—0090—05

中图分类号: N93, X43

## Self-organized Criticality of Slope Development and Reliability Analysis of Slope Flexible Safeguard System

GAO Zhaoning<sup>1,2</sup>, YAO Lingkan<sup>1</sup>, YIN Zihong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu,

Sichuan 610031, China; 2. Department of Resource Development and Management

Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** The self-organized process of slope development is discussed by the analysis of the characteristics of the whole process of slope development. Results show that the process of slope development can be considered as an extensively dissipative dynamical complex system varying in time and space and has mass, energy, and information exchanges with external environment. The process of slope development represents a self-organized criticality(SOC) phenomenon far away from the equilibrium state. SOC is a dynamical attractor in the process of slope development and provides an evidence for minus power law between frequency of slope action and its strength. Based on this understanding, an analysis model for the reliability of slope safeguard system is constructed and the reliability of rockfall protecting nets in the railway section between Jinyun and Qingtian is analyzed by taking the slope rockfall as an example.

**Keywords:** slope development; self-organized criticality(SOC); interference model; reliability

我国是一个多山的国家, 每年, 特别是雨季都要发生若干规模不同的斜坡灾害, 几乎遍及全国各个省区。1998年8月1日, 长白山天池观光长廊段边坡发生崩塌, 崩塌体积近 200 m<sup>3</sup>, 崩塌落石砸毁登山防护廓道 16 m, 造成游客 6 人死亡, 6 人重伤, 18 人轻伤的重大事故, 使天池地区旅游业遭到重创<sup>[1]</sup>。1991年9月23日, 云南省昭通市盘河乡头寨沟发生滑坡灾害, 共造成 216 人死亡, 经济损失 800 万元; 2001

年5月1日重庆市发生了震惊全国的武隆滑坡, 使得一座建筑面积为 4 061 m<sup>2</sup> 的 9 层楼房全部被滑坡体摧毁掩埋, 造成 79 人死亡, 7 人受伤<sup>[2]</sup>。从地质灾害的角度看, 斜坡灾害给人类带来的损失可能仅次于地震。随着国民经济的迅速发展, 工程规模越来越大, 斜坡失稳事故也会越来越多, 损失将会更大。因此, 近年来开展的对斜坡失稳机理的研究对防灾减灾具有重要的现实意义。

收稿日期: 2007-03-30 修回日期: 2007-04-23

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(50478085)

作者简介: 高召宁(1971—), 男(汉族), 陕西省蓝田县人, 博士生, 主要从事非线性科学在工程中的应用。E-mail: gaozn1207@sohu.com。

人们早已认识到, 斜坡演化过程就是坡体的失稳过程, 包括崩塌落石、滑坡和坡面泥石流等。自牛顿开始的近代科学, 是将系统“拆整为零”, 分析系统中组元的简单行为, 进而了解事物变化的规律, 这类传统的分析方法在斜坡演化过程中取得了巨大成果。直到 20 世纪 90 年代以来, 随着非线性科学的发展, 人们认识到斜坡失稳从本质上讲实际上是斜坡体系内各要素间通过一系列的相互作用所产生的空间、时间、功能和结构的自组织过程<sup>[3]</sup>。因此, 基于牛顿经典力学建立起来的各种斜坡演化机理模型是把各部分简单的线性叠加得出斜坡系统的整体性质, 对于这种具有自组织的系统传统的分析方法存在局限性, 因而所得出的结论与实际还不能很好吻合, 尤其是在深入分析斜坡系统连锁反应事故机理等系统动态行为方面已经暴露出了明显的局限性, 很难揭示系统整体的动态特征。

作为控制大量广延耗散动力系统的普遍组织原则, Bak 等人提出了自组织临界性 (self-organized criticality, 简称 SOC) 理论: 耗散动力学系统包含着众多的发生短程相互作用的组元, 并自发地向着临界态进化, 在临界态下所有的时空关联函数都是幂次的<sup>[4]</sup>。沙堆是自组织临界态的一个典型范例<sup>[5]</sup>。从沙堆实例可以联想到若干突然暴发或崩塌的斜坡失稳现象具有相同的机理。SOC 是一种整体理论, 不依赖于系统的初始条件和任何细节部分, 它不描绘细致的图像<sup>[6]</sup>。这意味着 SOC 能为斜坡失稳现象提供合理的解释。

本文在以上文献的基础上, 应用复杂系统理论中自组织临界性的概念, 更深入地探讨了斜坡失稳问题, 提出了斜坡失稳可以用自组织临界性的概念来加以解释的观点。并结合有关可靠性理论, 进一步就斜坡防护系统的可靠性进行探讨。

## 1 斜坡演化过程中的自组织临界性

在对地貌形态的描述和对其演化的探讨中, 传统的地貌学采用经典的动力学方程, 固然能深入揭示一些地貌过程的动力学机制, 但是微分方程线性化后求得的地貌形态, 只是一些简单的几何曲线, 描述的是一个惟一的稳定状态, 这类地貌系统将演化到一个统一的终极状态<sup>[7-8]</sup>。对于斜坡系统, 这将意味着任何条件下的坡体具有相同的演化过程。显然, 这无法解释斜坡灾害孕育过程的复杂性。从地貌过程看, 地貌普遍遵循分形统计学。这表明造成地貌演化的机理

必定是标度不变的<sup>[9]</sup>。因此, 斜坡演化系统必然是一个远离平衡态的不稳定系统。其演化特征源于系统内部的非线性耦合作用。这种非线性耦合作用具有在演化过程中存在活动性消失和活动性分叉的行为, 反映到斜坡演化系统, 就是坡体内部的阈值。所谓阈值, 就是指坡体由一个亚稳态到另一个亚稳态转化的临界值。阈值的存在, 导致斜坡系统的演化在临界态时, 微小的扰动下触发连锁反应并导致灾变现象。

斜坡在演化过程中受控于坡体内物质分布的非均匀性和结构的各向异性, 重力的不稳定性以及地下水作用过程。在自重应力场作用下, 斜坡失稳的过程也就是坡体力和阻力的耦合过程。由于重力的不稳定性而导致的位能需通过运动得到释放<sup>[10]</sup>, 于是在坡体内将产生许多局部应力集中, 当某点应力集中超过该点应力强度时, 应力将向周围释放, 造成整个坡体力和阻力的相互适应的调整。由于坡体物质组成的非均匀性和结构的各向异性, 应力的传播往往具有流变效应和粘滞效应, 同时地下水的作用不但给坡体失稳施加了一个附加力, 而且降低了坡体物质的应力强度, 弱化了斜坡抵抗失稳的阻力, 增加了坡体力和阻力的调整速度, 使其与应力变化的速度接近。此时尽管坡体仍处于不稳定状态, 但坡体力和阻力的比值将在一段时间内维持在一个变化不大的范围内<sup>[11]</sup>。宏观上这一过程表现为坡体在相当长的时间内处于亚稳定状态, 一旦遭受外界扰动就可能触发连锁反应并导致灾变。斜坡系统向临界状态演化过程与沙堆模型的形成过程类似, 正如沙堆某处坡度过陡后沙粒发生大小不等的“雪崩”一样, 进入临界状态的沙堆系统在坡度继续增长的过程中一定会发生规模不等的“雪崩”事故。

究竟斜坡演化的时空分布特征是不是 SOC。事实上 Scheidegger 早在 1973 年就提出斜坡岩崩中存在着和崩塌规模有关的幂律规律, 这种关系被认为是自组织临界特性的数学表征。Hergarten 等认为在水流侵蚀和构造运动长期渐变的条件下, 滑坡活动是一种自组织临界现象; Czriok 等通过物理实验方法模拟了山脉的空间形态特征, 并认为存在自组织临界现象, 强调坡面起伏是由符合幂律分布的滑坡活动造成的; Hovius 等人对新西兰 Southern Alps 的研究结果表明该地区的滑坡活动强度和频度呈明显的幂律关系<sup>[12-16]</sup>。

在不同应力状态下当考虑其整体行为时岩石在各个应力阶段下微裂纹的长度与频度之间具有幂律

特征, 统计结果见表 1。许多作者也在实验室中研究了岩石中的裂隙具有分形分布<sup>[17]</sup>。Barton 和 Hsieh<sup>[9]</sup>系统地研究了内华达雅卡山附近 1000 号里程碑路段的岩石露头上的破裂和节理的统计规律, 得出分维数为  $D=1.7$ 。岩石材料在不同应力状态下裂隙的演化正如斜坡在演化过程中, 坡体力和阻力的非

线性耦合作用, 伴随着坡体内岩体中裂隙的发展和传播, 使组成斜坡体系的各子系统(岩块)不但发生近邻的相互作用而且存在长程相关性, 各子系统之间开始以协同的方式发生有序运动。斜坡演化过程中岩体内裂隙的幂律特征提供了岩体累进性破坏过程中破裂事件的规模与频度的负幂律特征。

表 1 各级不同应力状态下中砂岩中不同长度微裂纹数目的统计结果

$\sigma$ /MPa	L/mm							无标度区的线性关系	相关系数
	> 0.1	> 0.2	> 0.3	> 0.4	> 0.6	> 0.8	> 1.0		
18.78	317	201	101	41	7	3	2	$\ln N = -2.4389 \ln L + 0.947$	0.924 1
28.17	341	231	121	52	12	6	3	$\ln N = -2.2022 \ln L + 1.499$	0.926 2
31.30	527	350	211	111	78	37	17	$\ln N = -1.4583 \ln L + 3.303$	0.932 8

注:  $\sigma$  为重力;  $L$  为裂纹长度;  $N$  为裂纹数目。

## 2 斜坡防灾工程的可靠性分析

作为斜坡灾害防治工程可靠性分析的依据, 在工程使用基准期内会出现的外荷载变化效应是必须考虑的。这类 SOC 系统在时间和空间上所产生的荷载的大小往往是人们无法准确预计的, 但其作用强度和频度仍具有负幂律规律。

以斜坡崩塌落石灾害的柔性被动防护结构——拦石网为例, 在可靠性物理学的基础上结合可靠性数据的统计与分析, 从工程可靠性角度出发, 建立可靠性分析的物理数学模型, 对于荷载取用的设计基准期内防护结构的可靠性进行评价。

### 2.1 基于 SOC 的斜坡崩塌规模分布计算

在呈现 SOC 的斜坡崩塌落石系统中, 崩塌落石规模(质量)  $m$  与频度  $N$  之间的幂律关系为:  $N = am^{-b}$ 。假设统计资料中, 规模的最大值和最小值为  $m_{\max}$  和  $m_{\min}$ 。设  $x = \ln m$ , 则  $N = ae^{-bx}$ 。式中:  $x \geq x_{\min}$ ,  $x_{\min} = \ln m_{\min}$ 。令  $x_{\min} = 0$ , 由频率代替概率的思想, 得出分布函数<sup>[18]</sup>

$$F(x) = P(X \leq x) \approx \frac{\text{规模对数} \leq x \text{ 累计发生次数}}{\text{所有规模对数发生总次数}} = \frac{\int_0^x ae^{-bx} dx}{\int_0^{\infty} ae^{-bx} dx} = 1 - e^{-bx} \quad (1)$$

其密度函数为

$$f(x) = be^{-bx} \quad (2)$$

根据查尔斯理论, 落石撞击能量按下式计算

$$E = 0.6 mV^2 \quad (V = \varepsilon \times \sqrt{H}) \quad (3)$$

式中:  $m$ ——落石的质量(kg);  $H$ ——落石的坠落高度(m);  $\varepsilon$ ——与落石坠落高度、边坡坡角、表面粗糙

度有关的系数。

对于一确定的斜坡,  $H$  和坡角、边坡平均倾角可认为是一定的, 公式中只有  $m$  是可变参数。那么, 对式(3)进行适当的变化, 即

$$S = \beta + X \quad (4)$$

$$S = \ln E; \beta = \ln(0.6V^2); X = \ln m$$

式中:  $E$ ——落石能量;  $V$ ——落石速度;  $s$ ——随机变量的任一实数。

那么由式(3)和(4)得

$$P(S \leq s) = P(X \leq s - \beta) = \int_0^{s-\beta} be^{-bx} dx \quad (5)$$

则其密度函数为

$$f(s) = cbe^{-bs} \quad (6)$$

式中:  $c = e^{b\beta}$ 。

### 2.2 防灾工程可靠性分析

柔性被动防护系统是一种能拦截和堆存岩崩, 以具有足够高的强度和柔性的钢绳网为主的金属栅栏式被动拦石网, 以落石所具有的冲击动能作为最主要的设计参数, 以防护能量作为其承载强度。所以在进行斜坡崩塌落石防护结构可靠性分析时, 所讨论的强度是柔性被动系统的防护能量, 而工作应力为落石的冲击能量。结构可靠性理论主要是对结构的可靠性进行研究。通常工程设计中要求结构的强度高于其工作应力, 但由于结构的强度值与应力值的离散性, 使应力—强度两概率密度函数曲线在一定的条件下可能相交, 形成干涉区<sup>[19]</sup>。结构的可靠度主要取决于应力—强度分布曲线干涉的程度。定义应力小于强度时不发生结构失效的全部概率为可靠度, 即

$$R = P(S < \delta) = P[(\delta - S) > 0] \quad (7)$$

式中:  $S$ ——工作应力;  $\delta$ ——强度。

具有这样的应力—强度模型的结构是安全的, 不

会发生事故的。令  $f(S)$  为应力分布的概率密度函数,  $g(\delta)$  为强度分布的概率密度函数, 如图 1 所示, 两者发生干涉。强度值  $\delta$  落在宽度  $d\delta$  的小区间内的概率, 即

$$P\left\{\left(\delta - \frac{d\delta}{2}\right) \leq \delta \leq \left(\delta + \frac{d\delta}{2}\right)\right\} = g(\delta) d\delta \quad (8)$$

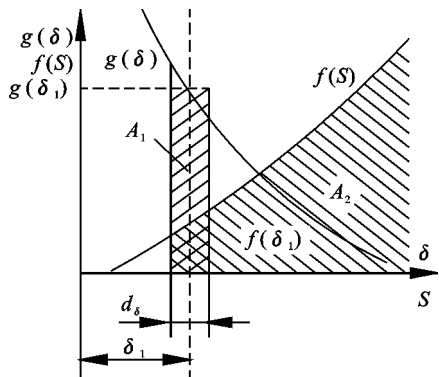


图 1 应力—强度分布干涉

而应力  $S$  小于  $\delta_1$  的概率则为

$$P(S < \delta_1) = \int_{-\infty}^{\delta_1} f(S) dS \quad (9)$$

假定  $g(\delta) d\delta$  与  $\int_{-\infty}^{\delta_1} f(S) dS$  是相互独立的随机事件, 根据两种独立事件的概率的乘法定理可知, 它们同时发生的概率等于两个事件单独发生的概率的乘积, 即

$$g(\delta_1) d\delta \int_{-\infty}^{\delta_1} f(S) dS \quad (10)$$

这个概率就是强度  $\delta$  在  $d\delta$  小区间内不会引起失效的概率, 它就是可靠度  $dR$ , 即

$$dR = g(\delta) d\delta \int_{-\infty}^{\delta} f(S) dS \quad (11)$$

如果将  $\delta$  变为随机变量  $\delta$  那么对于强度  $\delta$  的所有可能值, 零件的可靠度为

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\delta) \left[ \int_{-\infty}^{\delta} f(S) dS \right] d\delta = P(S < \delta) \quad (12)$$

设拦石网的强度  $\delta$  服从对数正态分布, 其密度函数为

$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{1}{\delta \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln \delta - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], & \delta > 0 \\ 0, & \delta \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

令  $\delta = \ln \delta$

由式(13)可得到

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\delta - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (14)$$

由可靠度公式(12)以及公式(6), (14)得

$$R = c \left\{ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) - \left[ 1 - \Phi\left(-\frac{\mu - b\sigma^2}{\sigma}\right) \right] \times \exp\left[-\frac{1}{2}(2\mu - b^2\sigma^2)\right] \right\} \quad (15)$$

### 3 实例分析

某铁路缙云至青田段崩塌落石分布区内, 山坡自然坡度  $25^\circ \sim 55^\circ$ , 地形起伏大。沿线山坡覆盖层较薄, 受大气降水作用, 细粒土多被冲走, 残积层为石块或裸露基岩, 易于风化, 堑顶山坡危石累累, 崩塌落石易发生, 对铁路线路安全影响较大。为了保证行车安全, 在崩塌落石区设置了拦石网工程(如图 2 所示), 其防护高度 5 m, 防护面积  $1\ 000\ m^2$ 。但是, 在很多情况下该段斜坡表面某些部分岩石年年都发生崩塌, 在其它情况下, 每隔几年才会出现偶然的崩塌。即使在年年发生崩塌的情况下, 其规模也是会发生很大变化的; 并且防护系统自身存在缺陷, 如大气降雨、温度变化等的影响, 防护系统的强度呈离散状, 存在着很大的风险性。然而, 铁路系统对防护系统的安全性要求很高, 是一个高可靠性的概率事件。因此, 在设计这段防护工程时, 专项对该段防护工程进行了可靠性分析。



图 2 缙云至青田某段危岩拦石网工程

在对缙云至青田段拦石网可靠性分析时, 关键是确定崩塌时间序列。但是需要足够长时间的定点观测资料的获得是比较困难的, 尤其是在该研究区地貌复杂多样。考虑到以下两点: (1) 下落岩块冲击能量的大小与岩块自身规模有直接关系; (2) 崩塌面坠落的岩块不是同一瞬间冲击到防护结构上。基于此, 笔者通过对堆积在斜坡坡角的崩塌岩块进行统计, 统计结果如表 2 所示。根据表 2 反推崩塌落石的规模分布为  $N = 3.6242 m^{-0.55}$ , 即  $b = 0.55$ 。实验获得拦石网的防护强度  $\mu = 500\ kJ$ , 标准差  $\sigma = 42\ kJ$ , 依据式(6)和(15)得出此拦石网的可靠度为 0.973 4。

由于自组织临界性这种统计理论所预期的灾害, 比普通应用的指数统计预期的灾害更加严重<sup>[9]</sup>, 因此依据 SOC 建立起来的式(15), 得出的该拦石网防护工程是偏安全可靠的。

表 2 研究区崩塌岩块体积统计

岩块体积 / m <sup>3</sup>	0.001	0.003	0.006	0.010	0.060	0.100	0.500	0.800	1.200	2.00
频 度	10	37	13	8	7	15	5	3	1	1
频 数	0.1	0.37	0.13	0.08	0.07	0.15	0.05	0.03	0.01	0.01

## 4 结 论

(1) 随着研究的深入,人们已开始认识到斜坡演化过程的本质在于坡体内部的非线性动力学特征。在时间和空间上斜坡演化过程是一个离散的过程,其作用强度和频度密切相关,只有研究强度和频度的关系,才能对斜坡演化失稳过程的活动情况作出较准确的估计。

(2) 斜坡演化过程是一类具有时间—空间变化的广延耗散动力学复杂系统,与外界环境存在着物质、能量和信息交换,是一种远离平衡态的自组织临界现象,自组织临界性是斜坡动力学过程的吸引子。

(3) 由于幂律是自组织临界性的证据,分形和  $1/f$  噪声是自组织临界性的“快照”,因而具有自组织临界性的动力学系统在几何上表现为分形结构,因此,分形方法为斜坡研究提供了一种简捷的技术手段。虽然这种方法并不总是有效,但作为一种新的统计方法,它已得到了地学工作者的肯定。

(4) 基于自组织临界性理论,以斜坡崩塌落石为例,建立了斜坡柔性防护系统——拦石网的可靠性分析模型,并以此为某铁路缙云至青田段危岩崩塌落石分布区内防护设计提供了理论依据。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘永平, 佘磊, 李广杰. 某高陡边坡崩塌落石运动特征分析及其防治[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 30-33.
- [2] 张永兴, 胡居义, 文海家. 滑坡预测预报研究现状评述[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 200-222.
- [3] 许强, 黄润秋. 斜坡演化的自组织特征初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(1): 7-11.
- [4] Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self organized Criticality[J]. Physical Review A, 1988, 1(1): 364-374.
- [5] 苏凤环, 姚令侃, 何越磊. 散粒体的自组织临界性与非均匀介质的元胞自动机模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4239-4246.
- [6] 李炜. 演化中的标度行为和雪崩动力学[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [7] 艾南山, 朱治军, 李后强. 外营力地貌作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性[J]. 地理研究, 1998, 17(1): 23-30.
- [8] Howard A D. Geomorphological systems, Equilibrium and Dynamics[J]. Am J Sci, 1965, 263: 302-312.
- [9] 特科特 D L 著. 陈颢, 季颖 译. 分形与混沌: 在地质学和地球物理学中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [10] 周萃英, 汤连生, 晏同珍. 滑坡灾害系统的自组织[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1996, 21(6): 605-607.
- [11] 高鹏. 非线性滑坡动力学特征及方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 1996, 4(3): 280-287.
- [12] Scheidegger A E. On prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973, 5: 231-236.
- [13] Hergarten S, Neugebauer H J. Self organized criticality in landslides[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(6): 801-804.
- [14] Czirik A, Somfai E, Vicsok T. Fractal scaling and power law landslide distribution in a micromodel of geomorphological evolution[J]. Geologische Rundschau, 1997, 86(3): 525-530.
- [15] Hovius N, Stark C P, Allen P A. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping[J]. Geology, 1997, 25(3): 231-234.
- [16] 王军, 倪晋仁, 杨小毛. 重力地貌过程研究的理论与方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7(3): 240-251.
- [17] 尹光志, 代高飞, 万玲, 等. 岩石微裂纹演化的分岔混沌与自组织特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 635-639.
- [18] 何越磊, 姚令侃, 苏凤环, 等. 斜坡灾害自组织临界性与极值分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 16-19.
- [19] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000: 111-142.