

斜坡失稳时间的协同预测模型*

黄润秋 许强

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

提 要 斜坡岩体由小变形到大变形乃至滑坡的发生,实质上是由组成斜坡的各子系统协同作用的结果. 将协同学引入斜坡的稳定性预测评价中,并提出了一种新的斜坡失稳时间预测模型——协同预测模型. 经实例检验,该模型预测精度较高,可用于滑坡的短期或临滑预报.

关键词 斜坡失稳 协同学 预测模型 滑坡

地壳表层岩体经河流的冲蚀、切割以及风化、卸荷等外界因素作用形成具有一定坡度的斜坡,直到最后局部坡体消亡(滑坡发生),斜坡的演化明显经历了三个阶段:平衡态→近平衡态→远离平衡态,这三个阶段也是一般具有复杂结构的开放系统应普遍遵循的演化历程.

从宏观上讲,任何斜坡都可看作为与外界不断进行着物质和能量交换的开放系统. 若把构成该系统的基元称为子系统,则斜坡体系又是由大量子系统所组成,这些子系统从微观上讲又是由大量矿物颗粒(从更微观的角度讲为分子、原子等)组成. 在斜坡体系的演化过程中,构成宏观结构的元胞(如由大量节理、裂隙切割的岩块)称为中观结构,显然,中观仍包含大量更微观的子系统. 斜坡这种三级层次结构是大量复杂体系所共同具有的结构特征. 已有研究成果表明(秦四清,1993;许强、黄润秋,1995),斜坡从出现断续的结构面到形成贯通的滑面以及最后滑坡的发生,在整个演化过程中各子系统之间的运动会表现出一种合作和协同效应,并遵从非线性系统的演化规律(如无序向有序的转化,远离平衡态的相变等). 近年发展起来的协同学理论正是以研究具复杂结构的非线性系统演化的普遍性规律以及探讨新结构形成的条件、方式等为其主要目标的^[1,2]. 将协同学的研究方法和成果引入斜坡演化规律的研究中,并据此提出了一种新的斜坡失稳时间预测模型——协同预测模型.

1 协同学的基本思想

协同学(Synergetics)是由联邦德国斯图加特大学理论物理教授赫尔曼·哈肯(Hermann Haken)创立,它是一门研究远离平衡的系统如何通过各子系统之间的自我组织产生时间、空间或功能结构的科学,其主要目标是寻找物质世界中千差万别现象的普适性规律. 协同学认为,世界的统一性不仅在于它们微观结构的单一性(都由原子、分子等基本粒子构

* 国家杰出青年科学基金资助项目(项目号:49525204)和霍英东基金 1996 年度资助项目.

收稿日期:1996-07-10,改回日期:1997-01-08.

成),而且表现在宏观结构的形成遵从某些普适性规律。

协同学认为,具复杂结构的非线性系统是一种进化的自组织系统,其有以下共同特性:

1. 系统有序结构的产生是靠系统内的各个部分(子系统)自我排列、自我组织而形成的。

2. 结构的产生或新结构的出现往往仅由少数几个序参量所主宰。一个宏观客体的变量数目往往很大甚至是无穷的,但是在结构出现相变(质变)的临界点附近,起关键作用的仅少数几个。也就是说,复杂的物质世界本质是简单的,复杂的结构本身只由少数几个序参量主宰。显然,这一发现更为重要的意义是通过简单的数学模型来描述复杂系统的演化行为。

3. 在新结构出现的临界点,涨落起着触发作用。由于这时系统处于极限平衡状态,任何微小的涨落都会被放大,从而将系统驱于与新结构相应的态。

协同学认为,影响系统演化的因素包括控制变量和状态变量两类。任何系统的演化过程中诸状态变量的变化一般均可用一组微分方程表示,微分方程中,状态变量的系数即为控制变量。即使一最简单的系统,所包含的子系统的数目也十分庞大,表征子系统的状态变量数目自然也较多,要求解这种非线性微分方程组不是不可能就是难以做到,但是,任何实际体系的演化结果一般都具有确定的结构,其演化过程应该用少数几个量便可描述。协同学的研究结果表明,出现上述现象的根本原因在于为数众多的状态变量,按其临界行为可分为慢弛豫变量(慢变量)和快弛豫变量(快变量)。快变量数目巨大,但它对系统的演化起作用不大;慢变量虽数目较少,却控制着系统的演化历程,此慢变量即通常所说的序参量。子系统的协同作用导致了序参量的产生,而所产生的序参量又反过来支配着子系统的行为,即存在“使役原则”。为了突出慢变量对系统演化的贡献,哈肯等人提出了伺服原理,并采用绝热消去法将大量快变量用慢变量予以表示,同时提出了非平衡相变的最大信息熵原理,使协同学建立了自己的数学理论,并为其实用化奠定了基础。

2 斜坡的演化方程

为简单起见,把斜坡体系的演化过程仅用两个变量(u, s)来加以描述。按照协同学理论,系统的演化方程一般都可写成如下朗之万方程形式

$$\dot{u} = K(u, s) + F(t), \quad (1)$$

式中 $K(u, s)$ 为包含快变量和慢变量的非线性函数, u 代表慢变量, s 表示快变量, $F(t)$ 为涨落力。

式(1)表明,任何非线性系统的演化一方面受系统内部因素控制(各子系统之间的非线性相互作用),其可用非线性函数 $K(u, s)$ 表示;另一方面还受外部随机因素的影响,其可用涨落项 $F(t)$ 代替。内因是系统演化的本质原因,外因的作用主要表现在促使内因发生变化和在质变的临界点起触发(诱发)作用。

由于涨落力不是影响斜坡体系演化的决定性因素,并且考虑涨落力会使数学运算变得相当复杂,故暂不考虑外界随机因素对斜坡演化的影响,即忽略式(1)中的涨落项 F

(t).

对于二维系统,式(1)中非线性函数可具体化为

$$K(u, s) = au - us. \quad (2)$$

由式(1)和(2)得

$$\dot{u} = au - us, \quad (3)$$

式中 s 一般可表示为如下形式

$$\dot{s} = -\beta s + u^2. \quad (4)$$

可以证明,式(3,4)中的 s 可用 u 来表示. 从式(3,4)中消去 s 得如下积分

$$s(t) = \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} u^2(\tau) d\tau. \quad (5)$$

用分部积分法可把式(5)中的 $s(t)$ 变换为 $u(t)$ 的函数,即

$$s(t) = \frac{1}{\beta} u^2(t) - \frac{1}{\beta} \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} 2(u\dot{u}) d\tau. \quad (6)$$

当 u 变得较慢时, u 可当作小量看待,忽略式(6)中的积分项,得到

$$s(t) \approx \frac{1}{\beta} u^2(t), \quad (7)$$

将式(7)代入式(3)得

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = au - bu^3, \quad (8)$$

式中 $b = \frac{1}{\beta}$.

式(8)表明,快变量可用慢变量表示,即快变量是随慢变量的变化而变化的,它们的行为服从于慢变量. 从式(3)到式(8)为一用慢变量表示快变量(消掉快变量)的过程,这便是有名的绝热消去法. 若将绝热消去法推广到 n 维系统,则被称为伺服原理.

式(8)也即所得到的描述斜坡体系发展演化的演化方程.

3 斜坡失稳时间的预测

式(8)中,若把其中的慢变量 u 用斜坡演化过程中所出现的位移(或其他状态变量如声发射,速率等)来代替,求解式(8)再根据斜坡的位移-时间序列资料,用最小二乘法拟合出 a, b 值,则可用于斜坡失稳时间的预测.

将式(8)与 Verhulst 模型^[3,4]对比知,式(8)的形式与 Verhulst 模型较相似,仅变量 u 的幂次有所差别. 由于在推导式(8)的过程中忽略了涨落项 $F(t)$,用式(8)表示实际斜坡演化的历时曲线必然会存在一定误差,减小该误差的补救措施是仿用灰色系统的方法对原始监测数据进行累加处理(AGO),以淡化随机因素(涨落项)对原始数据的影响. 设 $u^{(0)}$ 为原始监测非负时间序列,一次累加生成后的生成序列为 $u^{(1)}$,即

$$u^{(0)} = \{u^{(0)}(1), u^{(0)}(2), \dots, u^{(0)}(n)\} \quad (9)$$

及

$$u^{(1)} = \{u^{(1)}(1), u^{(1)}(2), \dots, u^{(1)}(n)\}. \quad (10)$$

一次累加生成的公式可表述为

$$u^{(1)}(i) = u^{(1)}(i-1) + u^{(0)}(i), \quad (11)$$

式中 n 为等时间间隔的位移数据的个数. 均值生成数据按下式计算

$$Z^{(1)}(i) = [u^{(1)}(i) + u^{(1)}(i-1)]/2, \quad (12)$$

则式(8)变为

$$\frac{du^{(1)}}{dt} = au^{(1)} - b[u^{(1)}]^3. \quad (13)$$

采用最小二乘估计法可求得式(13)的系数 a, b

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_*, \quad (14)$$

式中

$$B = \begin{bmatrix} Z(2) & -Z^3(2) \\ Z(3) & -Z^3(3) \\ \vdots & \vdots \\ Z(n) & -Z^3(n) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$$Y_* = [u^{(0)}(2), u^{(0)}(3), \dots, u^{(0)}(n)]^T. \quad (16)$$

式(13)的解为

$$u^{(1)}(t) = \sqrt{\frac{a}{1 - \left[\frac{u_0}{a-b(u_0)^2} \right] e^{2at}} + b}, \quad (17)$$

式中 u_0 为位移时序的初值. 同 Verhulst 模型一样, 式(13)也反映了斜坡从生长到衰亡的整个过程, 从式(13)可看出, 其右边项实际为斜坡的变形速率. 晏同珍等人^[3,4]的研究结果表明, 可将变形速率最大的点所对应的时间作为滑坡的预报时间, 故令

$$X = au^{(1)} - b[u^{(1)}]^3. \quad (18)$$

对上式求导得 X (速率)取极大值时所对应的位移值

$$u^{(1)}(t) = \sqrt{\frac{a}{3b}}. \quad (19)$$

于是, 由式(17,19)联立解得滑坡暴发的预报时间

$$t = \frac{1}{2a} \ln \left(\frac{a-bu_0^2}{2bu_0^2} \right) + t_0, \quad (20)$$

式中 t_0 为时序号初始数(一般恒定为 1).

4 实例检验

4.1 实例 1: 黄龙西村滑坡

天水黄龙西村滑坡发生于 1963 年 9 月 27 日 17 时, 属黄土高势能滑坡, 滑体体积为 $3.9 \times 10^5 \text{ m}^3$, 其基底为花岗闪长岩. 滑坡前缘抵达渭河, 并破坏了铁路建筑物, 覆盖了部分村舍农田. 滑坡发生前数日的位移监测数据见表 1.

用表 1 的原始监测数据, 据式(14,15,16)求得 $a=0.7883, b=7.2324 \times 10^{-6}$; 根据式

(17,18)可得斜坡的演化曲线及变形速率曲线(图1)。从图1可以看出,协同预测模型所得结果与Verhulst模型的结果有较大的相似性,演化曲线也呈“S”型,变形速率曲线为上凸型曲线,存在极大值。从式(20)可求得 $t=6.755$,换算成实际时间为1963年9月27日18时7分,比实际滑坡时间仅落后1小时左右,精度较高。

表1 1963-9 黄龙西村滑坡位移监测资料^[3]

Table 1 The monitoring data of displacement of Huanglongxi landslide

序号	监测日	累计时间(天)	测点位移(cm)
1	22	3	2.5
2	23	4	3.2
3	24	5	5.5
4	25	6	10.0
5	26	7	30.0
6	27	8	60.0

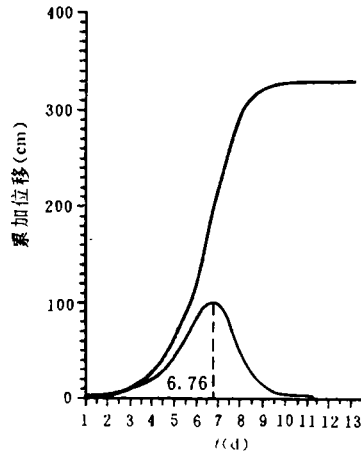


图1 黄龙西滑坡预测曲线

Fig. 1 Predictive curve of Huanglongxi landslide

4.2 实例2:意大利 Vaiont 滑坡

发生于1963年10月9日22时38分的Vaiont滑坡,属碳酸盐及粘土岩中的滑移—弯曲型滑坡,滑体体积约 $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于水库蓄水后粘土岩浸水膨胀而推动坡脚部位山体高速下滑。巨大的崩滑体不但堵塞了大部分库容使水库失效,而且强大的涌浪越过坝顶使其下游罗加隆镇2900名居民丧生。

Vaiont 滑坡滑前的变形速度监测

数据见表2(时间间隔为3日)。

表2 Vaiont 滑坡速度监测资料^[4]

Table 2 The monitoring data of velocity of Vaiont landslide

时间序号	1	2	3	4	5	6
速 度	0.07	0.11	0.165	0.225	0.30	0.50

5 结论

通过以上分析及实例检验可以看出,据协同学理论提出的斜坡失稳时间预测模型,方法简便,预测准确度较高,可用于实际的滑坡预报。但还存在以下几方面问题值得深入研究:

1. 在实际预报模型中未考虑涨落项 $F(t)$,而是采用了灰色系统方法中累加生成技术来淡化涨落项(外界随机因素)对预测模型的影响,这种做法仅是一种权宜之计,以后将进一步研究涨落项 $F(t)$ 对斜坡演化历程的影响,并加入到预测模型中去。

2. 由于本文模型与晏同珍等人提出的Verhulst模型类似,故采用了与其相同的判据(即变形速率极大值点即为失稳点)。其实,协同学的最大信息熵原理便是一种针对远离平衡系统发生非平衡相变的判据,如何将最大信息熵原理引入该预测模型也是有待深入研究的问题之一。

3. 值得一提的是,协同学主要是用于处理远离平衡系统的非平衡相变问题,其所得模型的适用条件是远离平衡系统。因此所建预测模型也仅适用于短期或临滑预报(斜坡演

化已进入远离平衡状态。实例表明, Verhulst 模型也有此限制条件), 在应用时值得注意。

参 考 文 献

- [1] H. 哈肯. 郭治安, 罗久里等译. 信息与自组织. 成都: 四川教育出版社, 1988. 302~323.
- [2] 魏宏森, 宋永华, 郭治安等编著. 开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览. 成都: 四川教育出版社, 1991.
- [3] 晏同珍, 殷坤龙, 伍法权等. 滑坡定量预测研究进展. 水文地质工程地质, 1986, 6(104): 8~14.
- [4] 晏同珍, 伍法权, 殷坤龙. 滑坡系统静态规律及斜坡不稳定性空时定量预测. 地球科学——中国地质大学学报, 1989.
- [5] 邓聚龙著. 灰色预测与决策. 武昌: 华中工学院出版社, 1986.

SYNERGETIC PREDICTION MODEL OF SLOPE INSTABILITY

Huang Runqiu Xu Qiang

(Chengdu Institute of Technology Chengdu 610059)

Abstract

From slight deformation to large deformation even to sliding, the evolution cause of slope is generally resulted by synergetic interactions of all sub-systems which consist of slopes. In this paper, according to synergetic theory, the evolution of slope systems is described in the following form:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= au - us \\ \dot{s} &= -\beta s + u^2\end{aligned}$$

in which u is called as slow variable, and s is named as fast variable. Applying method of adiabatic elimination, fast variable can be replaced with slow variable. So the following form is given by:

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = au - bu^3$$

This is evolution equation of slope systems. Solving the above equation, and using to AGO (Accumulated generating operation) of grey theory, the predictive time of landslide is obtained as following:

$$t = \frac{1}{2a} \ln \left(\frac{a - bu_0^2}{2bu_0^2} \right) + t_0$$

where t_0 is initial number of monitoring time series, $u(0)$ is the initial monitoring data.

The checked results to some landslide examples showed that its predictive accuracy is very high, and it can be applied to short-term or impending forecasting of landslides.

Key words slope instability, synergetics, predicting model, landslide