

· 学科发展 ·

非线性理论在工程地质中的应用

黄润秋 许强

(成都理工学院工程地质研究所, 成都 610059)

[摘要] 本文总结了近几年来我们用非线性理论解决工程地质问题的一些研究成果, 主要包括三部分: (1) 突变理论在工程地质中的应用; (2) 非平衡自组织理论在工程地质中的应用; (3) 神经网络理论在工程地质中的应用。

[关键词] 非线性理论, 工程地质, 突变理论, 自组织, 神经网络

工程地质学是为国家重大工程和人民生活工程修建提供依据的介于地质学与土木工程学之间的交叉学科, 属于应用地质科学的一个分支。其根本任务是评价建筑场地对工程的适宜性, 研究建筑物与地基相互作用过程中可能出现的地质问题及对这些问题的评价与预测方法, 以期既技术可行又经济合理地保证人类工程活动的正常进行。80年代以来, 随着人类工程活动范围和规模的逐渐增加, 及抵抗和改造自然能力的增强, 大型工程建设正日益向着复杂场地和复杂地质环境推进, 由此而产生了一系列复杂的工程地质及环境工程地质问题。面对这些问题, 传统的理论、研究思路 and 手段已捉襟见肘。为此, 近年来科学家们都致力于探索这种重大工程与复杂场地构成的复杂地质——工程系统的描述, 作用机理解释及问题的评价与预测, 从而奠定了以解决这类地质问题为特征的现代工程地质学的研究体系和方法手段。这其中, 非线性科学理论的引入和应用是构成这一体系的重要支柱之一。本文较系统地总结了作者与其合作者们近几年来在这一领域取得的一些成果, 其中主要包括突变理论、非平衡自组织理论以及神经网络理论在工程地质领域的应用。

1 突变理论: 新的预测观

1.1 概述

突变理论首先由托姆提出 (Thom, 1972), 主要阐述非线性系统如何从连续渐变状态走向系统性质的突变, 也即参数的连续改变如何导致不连续现象的产生。为了解释各种突变现象, 托姆共提出七种突变模型, 而常用的是尖点突变模型。

1.2 尖点突变模型在工程地质中的应用

(1) 层状结构斜坡稳定性评价

层状结构斜坡的稳定性评价问题一直是工程地质界和岩石力学界亟待解决的问题。按岩层倾角与斜坡坡角的关系, 可分为顺层斜坡、反倾岩层斜坡以及近直立岩层斜坡三类。斜坡的类型不同, 其变形破坏方式也各异。顺层斜坡主要发生滑移弯曲变形; 反倾岩层斜坡主要

本文工作获国家杰出青年科学基金资助。

本文于1996年1月11日收到。

为弯曲拉裂变形（“点头哈腰”现象）；直立岩层则多表现为崩塌破坏。针对不同的斜坡类型，需建立相应的突变理论模型。限于篇幅，现仅以反倾边坡为例进行分析。

从反倾边坡的地质模型中抽出单个板梁，建立反倾层状结构岩质斜坡变形破坏的力学模型^[2]（见图1）。用突变理论解决工程地质问题的关键步骤是：通过力学模型建立系统的势函数表达式，再对势函数作适当的变换得到平衡曲面方程（见图2），根据系统发生突变的条件和分叉集方程，进而求得系统失稳的充要条件。经分析，得到此类斜坡失稳破坏的临界失稳深度为：

$$H_{cr} \geq \sqrt[3]{\frac{E\pi^2 t^2}{48} \left/ \left\{ \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2} \right) (1 - \mu^2) r \sin \alpha \right\} \right.} \quad (1)$$

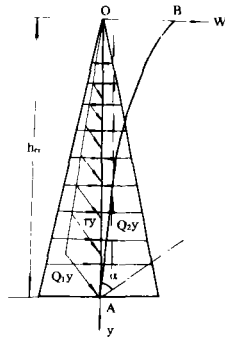


图1 反倾岩层斜坡的力学模型

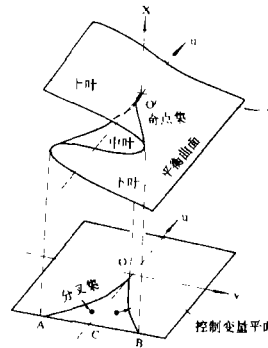


图2 平衡曲面和控制变量平面

根据（1）式，得到临界失稳深度与岩层倾角 α 的关系（图3）。从图3可看出，对于中等或中偏陡倾角岩层，曲线斜率变化最大，也即在此倾角范围内倾角效应最明显。同时，可以认为倾角在 $30^\circ - 70^\circ$ 间的反倾层状斜坡是潜在危险性最大的斜坡类型。这种观点已为大家所公认，也被野外实际所证实。

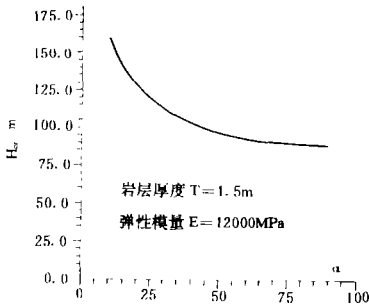


图3 临界失稳深度 H_{cr} 与岩层倾角 α 的关系

按照同样的方法，还可对由层状围岩组成的地下洞室发生顶拱塌落和弯折内鼓失稳的条件进行突变理论分析^[1]。

（2）狭窄煤柱冲击地压失稳的尖点突变模型^[1]

矿山中冲击地压有相当一部分发生在各种煤柱中，在煤层上方赋存坚硬岩层的条件下，因煤柱渐进破坏而发生冲击地压时，顶板岩层并不破坏，仅参与能量释放，在这种情况下常采用刀柱式采煤法。刀柱工作面如图4所示，由图4可建立图5所示的力学模型。按照前述方法可求得发生冲击地压的必要条件为：

$$K \leq 1 \quad (2)$$

以及充分条件：

$$2(K-1)^3 + 9(1-K\xi_1 - \xi_2)^2 = 0 \quad (3)$$

式中 K 是梁的抗弯刚度 K_2 与煤柱软化本构曲线拐点处的刚度 K_1 之比。参数 ξ_1 为与全位移

v 有关的无量纲参数。(2) 和 (3) 式表明, 峰值强度前的变形阶段, 一般煤柱的刚度小于梁的刚度 ($K > 1$), 冲击地压不可能发生。只有在峰值强度后的变形弱化阶段, 斜率变陡刚度增大的情况下, 才可能使煤柱的刚度大于梁的刚度, 而发生冲击地压。可见冲击地压的发生, 并非介质强度不够, 而是由于刚度比不够 ($K < 1$), 并在外界扰动触发下所造成的一种岩体失稳现象。

事实上, 岩爆也是一种冲击地压现象。大量实例表明, 发生岩爆的岩石的弱化段刚度一般都显著大于峰值强度前的弹性刚度。这种现象同样可用 (2) 和 (3) 式给予很好的解释。

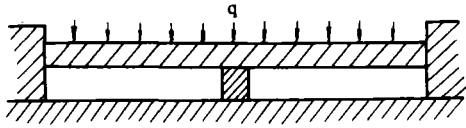


图4 冲击地压的地质模型

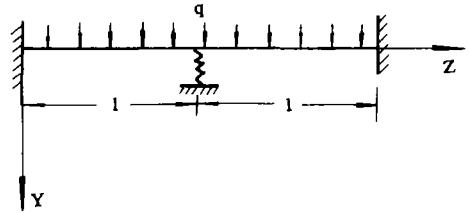


图5 冲击地压的力学模型

2 非平衡自组织理论: 对复杂地质过程的理性描述

2.1 岩石累进性破坏的自组织过程

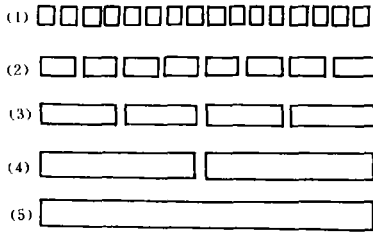
非平衡自组织理论主要阐述远离平衡的系统如何通过各子系统之间的自我组织和自我排列, 产生时间、空间和功能上的有序。研究表明, 岩石的累进性破坏过程与激光的产生和化学反应中的自催化作用类似, 都是一个自组织过程。

任何岩石试样内部都含有大量孔隙和微裂纹以及组成岩石晶粒间的接触界面, 这些相对软弱的“结构面”将岩石分成无数个“单元”。所以, 任何岩石(体)试样都可看作一个由无数子系统组成的“复杂巨系统”, 该系统可用热力学和统计力学的观点来定量描述。对于复杂体系, 在开放条件下(主要是指受外力作用)将表现出强烈的非线性性质。岩体在三轴压缩试验过程中, 当轴向压力低于岩体的长期强度时, 岩体的变形破裂呈稳定发展趋势, 此阶段对应于系统演化的非平衡线性区。若停止对岩石加载, 系统将会保持稳定状态。但当所加轴向力 F 超过岩体的长期强度时, 系统进入远离平衡区, 系统内部各子系统之间将发生长程关联的非线性相互作用。通常, 某些强度相对较低的“单元”首先破坏, 并将释放一定的表面能和引起岩体内应力重新分布。应力重分布的结果又使次一级薄弱单元发生应力集中, 于是次一级薄弱单元因应力集中和吸收以前单元破裂所释放出的能量而发生破坏, 并又释放出一定的表面能和导致更次一级薄弱单元的应力集中。这样依次下去, 系统内各岩石单元的变形破坏将表现明显的“相干效应”和“协同效应”, 从而导致岩石试样发生雪崩式的破坏。因此, 各岩石单元之间的自我组织是岩石发生累进性破坏的本质原因。

2.2 滑坡滑面形成的自组织过程

可将斜坡岩体滑动面系统看作由若干个强度较高的锁固段和由裂隙组成的蠕滑段组成, 前者为应力积累单元, 后者为应力调整单元。调整单元的蠕滑性质, 使得系统外的能量通过调整单元传递给积累单元, 在积累单元内造成应力积累。滑面的贯通正是通过应力的不断积

累和调整逐渐击破各锁固段而形成的。下面拟用重正化群方法分析滑面形成的自组织临界特征和滑面孕育的普适性^[1]。



把滑动面(带)分成 N 段, 每一段即为一个基本块体。把相邻的两个块体结合起来, 形成一个集团(如图 6 所示)。

通过一定的重正化群变换, 可得到滑面演化的重正化群方程:

$$P_{n+1} = 2P_n [1 - (1 - P_n)^4] - P_n^2 \quad (4)$$

解上述重正化群方程可得三个不动点为 $P^* = 0, 1$ 和 0.206 。依据判别准则知 $P^* = 0, 1$ 为稳定不动点, $P^* = 0.206$ 为不稳定不动点。 $P^* = 0$ 表示系统处于稳定状态; $P^* = 1$ 表示系统处于全部破裂状态; 当 $P^* = 0.206$ 时可将系统分成两个状态区域, 如果 $P^* < 0.206$, 系统将向稳定态演化, 反之向不稳定发展。进一步通过一定的数学力学分析可推得如下很有意义的式子:

$$T_c/T_f = 0.618 \quad (5)$$

式中 T_f 为斜坡失稳时的历时, T_c 为斜坡演化到达临界点的历时。此临界点实际上为线性时段与非线性时段的分界点。上式表明, 斜坡演化过程中非线性段历时长度与总的演化历程之比为黄金分割数, 这就从理论上证明了我们曾根据大量的统计资料而提出的斜坡失稳时间预报的“黄金分割数法”^[3]。国内外十余个有完整系统状态历时曲线的岩体失稳实例已证实了此结论的正确性。

2.3 斜坡演化的自组织过程

从一平坦的地面经河流的冲蚀、切割、风化及卸荷等作用, 形成具有一定坡度的斜坡, 直至最后局部坡体的消亡(滑坡)。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。任何一个斜坡体系, 都是由含有大量相互交错裂隙的岩体组成。各级结构面将斜坡岩体分成成千上万个既相互关联又相互独立的岩块, 我们可将每个岩块看成是整个斜坡系统的子系统(或组成要素)。任何斜坡无疑都处于一个开放环境, 它每时每刻都在与所处外界环境进行着物质和能量交换。这种由大量子系统组成的复杂系统, 在开放条件下, 要从平衡态向远离平衡态演化发展。

大量实例表明, 斜坡体系在其演化过程中确实表现出了一般非线性系统演化所具有的规律, 系统失稳前都表现出明显的前兆异常(如降维^[1]、减熵、加卸载响应比剧增^[4]等), 所以可借用非线性动力学方法对其演化历程作定量分析^[1]。任何一个系统一般均可用如下微分方程来近似描述:

$$\frac{dq_i}{dt} = f_i(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中 q_1, q_2, \dots, q_n 为组成系统的要素或描述系统性质的状态变量。研究表明, 对大多数斜坡体系, 一般仅需 3 个状态变量即可充分描述。选取 X, Y 及 Z 三个不同观测时序(如应力时序、位移时序、降雨时序等), (6) 式可具体化为:

$$\frac{dX}{dt} = a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5Y^2 + a_6Z^2 + a_7XY + a_8XZ + a_9YZ \quad (7)$$

$$\frac{dY}{dt} = b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^2 + b_5Y^2 + b_6Z^2 + b_7XY + b_8XZ + b_9YZ \quad (8)$$

$$\frac{dZ}{dt} = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4X^2 + c_5Y^2 + c_6Z^2 + c_7XY + c_8XZ + c_9YZ \quad (9)$$

式中: $a_1, a_2, \dots, a_9; b_1, b_2, \dots, b_9$ 及 c_1, c_2, \dots, c_9 为待反演确定的常数。

根据动力学稳定性分析理论, 系统稳定的必要条件是

$$A > 0, AB > C, C > 0 \quad (10)$$

式中,

$$A = - \left(\frac{\partial \dot{X}}{\partial X} + \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} + \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} \right) \quad (11)$$

$$B = \frac{\partial \dot{X}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} + \frac{\partial \dot{X}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} + \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} - \frac{\partial \dot{X}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial X} - \frac{\partial \dot{X}}{\partial Z} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial X} - \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Z} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Y} \quad (12)$$

$$C = \frac{\partial \dot{X}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} + \frac{\partial \dot{X}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} + \frac{\partial \dot{X}}{\partial Z} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial X} - \frac{\partial \dot{X}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z} - \frac{\partial \dot{X}}{\partial Y} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Z} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial X} - \frac{\partial \dot{X}}{\partial Z} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial X} \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Y} \quad (13)$$

若上式条件满足, 斜坡处于稳定状态, 反之则可能失稳。

用以上方程各判据对溪口滑坡进行了检验, 取得了满意的效果。

3 神经网络理论: 处理变量间非线性关系的有力工具

3.1 神经网络方法的特点

自然界的岩体结构相当复杂, 影响岩体稳定的因素也很多, 并且这些因素之间存在着复杂的交叉效应和动态效应。也即影响系统特性的各要素之间存在着复杂的非线性关系, 这种关系远非一个(一组)简单的代数方程所能描述。近几年发展起来的神经网络理论在处理上述问题时有着较强的功能和独到的优点。

神经网络的基本原理是模拟人脑功能, 先通过对已知样本的学习训练, 掌握输入与输出间复杂的非线性关系(尽管这种关系并不一定能用数学表达式写出), 对这种关系进行存储记忆, 并用此对未知样本进行预测。以下举一例, 略述如何用神经网络解决工程地质问题。

3.2 用神经网络预测水库诱发地震震级^[5]

通过对国内外百余个水库诱震资料进行统计分析, 选取了7个影响因素作用预测水库诱震的控制参数, 即: 坝高、库容、库区建库前地震概况、库区岩性特征、主要成因类型、库区内有无大的活断层通过、库区是否岩溶地区。确定参数的原则是能完全定量的尽量用定量数据表示, 不能定量的用二值模式表示, 最后得到学习样本表^[5]。

根据样本表, 建立BP算法网络, 其中输入层节点14个, 各节点取值与样本表对应; 输出层节点设定为3个, 分别对应控制最大震级的三个参数; 中间层取12个节点。经过对网络进行2万次学习训练, 误差达到精度要求(10^{-5})。根据国内外某些水库地震的资料, 利用上述网络对这些震例进行预测, 结果表明^[5], 如果以三个节点值最大者作为地震震级判断标准, 其预测精度达到80%, 可见其预测精度较高。

4 结论

非线性科学因其能揭示事物发展演化的本质而倍受各学科的青睐。上述应用实例表明,将非线性科学引入工程地质领域可加深对工程地质问题的认识,为解决工程地质问题提供许多新的思路和方法,值得深入研究和推广应用。

参 考 文 献

- [1] 秦四清, 张倬元, 王士天, 黄润秋著. 非线性工程地质学导引. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [2] 许强, 黄润秋, 王士天. 反倾岩层弯曲拉裂变的 CUSP 突变分析. 见王士天主编, 工程地质研究进展. 成都: 西南交通大学出版社, 1993; 222-228.
- [3] 黄润秋, 张倬元, 王士天著. 高边坡稳定性的系统工程地质研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1991; 184-192.
- [4] 许强, 黄润秋. 用加卸载响应比理论探索斜坡失稳前兆. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(2); 25-30.
- [5] Huang R Q, Xu Q. The Artificial Neural Network Predictive Model of Earthquake Magnitude of Reservoir-Induced Seismicity. International Symposium on Reservoir-Induced Seismicity, Beijing, 1995.

THE APPLICATION OF NONLINEAR THEORY IN ENGINEERING GEOLOGY

Huang Runqiu Xu Qiang

(Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059)

Abstract This paper summarizes the engineering geological achievements made by us in recent years by using nonlinear theory. The following three parts are involved; 1. The application of the catastrophe theory in engineering geology; 2. The application of nonequilibrium self-organization in engineering geology; 3. The application of neural network theory in engineering geology.

Key words nonlinear theory, engineering geology, catastrophe theory, self-organization, artificial neural network