

软岩遇水软化的耗散结构形成机制

朱凤贤, 周翠英*

中山大学工学院, 岩土工程与信息技术研究中心, 广东广州 510275

摘要: 针对华南“红层”软岩遇水软化的复杂系统演化问题, 从其软化过程中是否形成耗散结构的思路出发, 研究了软岩系统非线性软化特征。结果表明: 软岩与水相互作用系统是一个开放的复杂系统, 在内部非线性作用下逐渐演化至非平衡状态, 其软化过程中可以形成有序的耗散结构。在此基础上, 采用耗散结构理论系统分析了软岩软化过程中耗散结构的形成机制: 软岩软化的过程经历了近平衡态、远离平衡自组织态与远离平衡临界态 3 个阶段, 并最终通过非平衡相变形成了具有一定稳定性的耗散结构。最后基于软岩软化过程中结构分维值演化规律, 初步建立了软岩耗散结构形成的分岔演化模型, 并将模型应用于软岩饱水软化试验的临界分岔现象分析中。分析表明软岩耗散结构是在系统经历多次倍周期分岔, 通过不断地从稳定到失稳再到稳定的过程后形成的。其中 3 个月与 6 个月这两个时间点具有显著的临界特征, 这是深入研究软岩软化耗散动力学过程的切入点。

关键词: 软岩; 软化; 耗散结构; 非平衡相变; 临界分岔; 机制。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2009)03-0525-08

收稿日期: 2008-12-01

Forming Mechanism of Dissipative Structure in the Softening Process of Saturated Soft Rocks

ZHU Feng-xian, ZHOU Cui-ying*

Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology, Faculty of Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Aiming at the complex issue of system evolution in softening process of saturated red-bed soft rocks, the research on softening characteristics of soft rocks is carried out from the aspects of systemic openness, far-from equilibrium behavior and internal nonlinear mechanism to affirm the occurrence of dissipative structure in softening process. On this basis, dissipative structure theory is adopted to systematically analyze the formation mechanism of dissipative structure in softening process of saturated soft rocks. The result shows that softening process contains three stages: Near-equilibrium state, far-from-equilibrium self-organizing state and far-from-equilibrium critical state, and ultimately, the way of non-equilibrium phase transition leads to the generation of soft rock dissipative structure. Finally, based on the evolution law of structure fractal dimension, a bifurcation evolution model is preliminarily established to describe the formation process of soft rock dissipative structure. The result of applying this model to analyze the critical bifurcation phenomena occurring in softening tests of saturated soft rocks indicates that this soft rock dissipative structure is formed after experiencing the process of period-doubling bifurcation and destabilization for many times, and the times of three months and six months present obvious critical characteristics which are two breakthrough points for further study on dissipative dynamic softening process of soft rocks in future.

Key words: soft rocks; softening; dissipative structure; non-equilibrium phase transition; critical bifurcation; mechanism.

“红层”软岩是华南地区的基底岩层, 普遍存在于华南地区诸多重大工程中。其遇水软化导致的各种工程灾害时有发生, 是华南地区与重大工程相关

的典型问题之一。研究表明(李洪志和何满潮, 1995; 周翠英和张乐民, 2005): 软岩软化是水—岩之间的化学与力学耦合作用的结果, 其软化过程中高度非

基金项目: 中国高技术研究发展计划(No. 2007AA11Z112); 国家自然科学基金项目(Nos. 59809008, 40672194); 高等学校博士学科点基金项目(No. 20060558060); 广东省自然科学基金重点项目(Nos. 013188, 06104932)。

作者简介: 朱凤贤(1982—), 男, 博士生, 主要从事岩土工程与信息技术学习与研究工作。* 通讯作者: 周翠英, E-mail: ueit@mail.sysu.edu.cn

线性特征的存在,使得揭示该复杂系统的动力学演化行为变得十分困难.这成为软岩研究的难点问题.随着现代非线性系统动力学及耗散结构理论的问世,应用全新的思维观念来审视工程地质中岩土体问题成为可能(Chou, 2000; 陈剑平, 2001),也为研究软岩遇水软化问题提供了一条新途径.

耗散结构理论是比利时科学家 Prigogine 为首的 Brussels 学派于 20 世纪 60 年代创立和发展起来的一门边缘学科.它指出(蔡绍洪等, 1998):一个远离平衡态的开放系统,在与外界环境交换物质和能量的过程中,通过能量耗散和内部的非线性动力学机制及涨落的触发和推动,可能从原有的无序状态转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态,这样的宏观时空有序结构被 Prigogine 称之为“耗散结构”.由于耗散结构理论所研究的非平衡、非线性、自组织和宏观合作现象是不同领域各个学科中的共同现象,因而该理论目前已在地质、物理、化学、生物和医学等学科领域得到了广泛应用(於崇文, 2002),但在岩土力学方面的应用还刚刚起步,国内以谢和平、周翠英、唐春安、秦四清和陈剑平等(唐春安等, 1994; Chou, 2000; 秦四清, 2000; 谢和平等, 2004)为代表,主要集中于岩体失稳破坏过程的研究.基于耗散结构理论开展软岩遇水软化问题的研究尚未见报道.

考虑到耗散结构的形成和维持至少需要满足开放系统、远离热力学平衡及存在某些非线性动力学过程等条件(蔡绍洪等, 1998),本文首先从软岩软化过程中能否形成耗散结构出发,探讨了软岩系统非线性软化特征,在此基础上采用耗散结构理论深入分析了软岩软化过程中耗散结构的形成机制,并针对软岩饱水软化试验中的临界分岔现象,初步建立了软岩耗散结构形成的分岔演化模型,旨在为深入研究软岩软化耗散动力学过程奠定基础.

1 软岩系统非线性软化特征

1.1 软岩开放系统与非线性特征

所谓开放系统(李如生, 1986),是指与外界有着能量、物质和信息交换的系统.软岩遇水软化的整个演化过程都与外界有着不可分割的联系.实验研究表明:水—岩之间复杂的化学与力学耦合作用机制是软岩软化的主要原因(李洪志和何满潮, 1995; 周翠英等, 2005b).化学作用产生的化学能、热能和力

学膨胀作用产生的变形能,均是以能量的形式赋存于整个系统中,这体现了软岩与外界能量的交流;同时,在水通过岩体表面裂隙向岩体内部渗透的过程中,软岩系统以表面吸附、离子交换与解吸附 3 种反应形式,实现了对水溶液中部分离子的吸附和软岩中易溶性矿物的溶解,这也正是一个物质交换的过程;此外,软岩软化的过程受水溶液成分、pH 值以及外界环境温度的影响.降低水溶液 pH 值或提高环境温度,会在一定程度上提高水—岩相互作用的速度,加快软岩软化过程.这种反应速度的响应,也正是不同外界信息与软岩系统交流所体现的结果.可见,饱水软岩系统是一个与外界存在着广泛的能量、物质和信息交流的开放系统.

作为一个复杂的开放系统,岩体内部包含着许多子系统.从成分的角度看,一个软岩系统本身就有可能由若干种粘土矿物和有机物等物质构成,每一种物质就可以视为一个子系统;另外,软岩中不连续面群或裂隙群,自然也是软岩系统中的一个子系统,因此,软岩软化过程是在各个子系统的共同作用下所体现的一种综合现象;同时,通过开展研究软岩与水作用的微观机制研究(周翠英等, 2005b),笔者进一步从微观角度得到:软岩中粘土矿物吸水膨胀与崩解机制、离子交换吸附作用、易溶性矿物溶解与矿物生成、软岩与水作用的微观力学作用机制以及软岩软化的非线性化学动力学机制等多种机制综合作用导致软岩力学性质的降低.这些作用的综合不能简单地以线性方式描述出来,是一种非线性的耦合作用,它将始终制约着软岩软化的整个演化.

1.2 软岩系统逐渐远离平衡态

由软岩饱水试验可知(周翠英等, 2003),在软岩系统与水相互作用前 3 个月,软岩内部大孔隙充水扩张,小孔隙及连通性较差的孔隙未被充水,其微结构未发生根本变化.笔者认为系统此时处于近平衡阶段;3~6 个月期间,随着软岩—水相互作用程度的加深,软岩系统内部小孔隙及连通性较差的孔隙也开始充水,颗粒连接排列方式开始产生较大改变,并逐渐趋于有序,系统进入一个自发的动态过程,虽然此时软岩系统与外界环境之间的作用已逐渐稳定,表现为软岩的物理、力学性质以及所在水溶液浓度的变化程度逐渐平缓(周翠英等, 2004, 2005a),但此时系统内部非线性作用却十分强烈,系统结构进行自发响应调整,这是一种远离平衡态的情况.

1.3 软岩软化过程中的减熵、降维与有序性

软岩软化过程中表现出极强的非线性特征,是

一种不可逆的过程,其微观结构变化的总体趋势愈演愈烈,不可能出现逆向变化.从熵的演化特征来看,一个开放系统中熵的变化可以分为两个部分:一部分是系统内部的熵产生;另一部分由系统外部进来的熵流.根据热力学第二定律,熵产生总是为正,而熵流则可正可负(Prigogine, 1967),因而在软岩软化过程中,系统内部作用的结果是其内部熵不断增加,但软岩系统具备与外界的物质、能量和信息的交换能力,所以系统也在不断从外界引入负的熵流.这种负熵与系统内部熵增抗衡,促使系统从非平衡态走向有序的状态.此外,研究表明,软岩软化的演化过程中,普遍存在降维现象.图1反映了软岩在不同饱水时间作用后的孔隙分布分维值变化规律.可见,在软岩软化过程中,孔隙分布分维出现了不断波动的现象,但其变化的总体趋势是逐渐减小的,这也正是系统内部有序和无序相互竞争的结果.

减熵与降维的过程伴随着系统内部有序和无序的存在与竞争(李如生, 1986).结合饱水软岩微观结构试验结果,软岩内部结构在饱水1~3个月时,颗粒连接比以前松散,局部连接方式发生改变,3个月之后,随着逐渐远离平衡态,其内部小孔隙和连通性较差的孔隙开始自发饱水膨胀,小孔隙不断丛集为大孔隙,颗粒连接排列方式开始整齐,逐渐趋于有序.

系统科学理论也已证明:减熵、降维和有序的内涵是一致的(秦四清, 2000).降维和减熵过程一定程度上反映了系统从无序到有序的发展过程;而有序性往往意味着系统的不稳定性,即熵和分维值降低,则有序度大,系统的稳定性差.因此,系统在不稳定时,可能形成耗散结构.

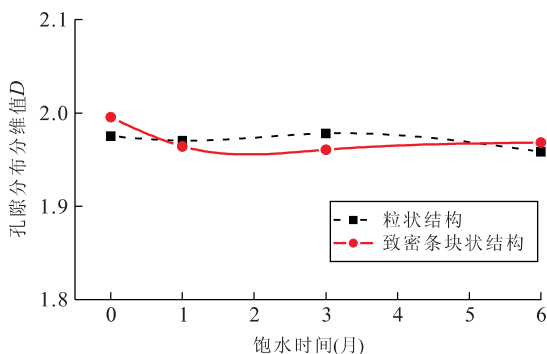


图1 软岩在不同饱水时间作用后孔隙分维变化规律

Fig. 1 Variation of pore fractal dimension with saturation times

2 软岩软化过程中耗散结构形成机制

2.1 软岩耗散结构的形成过程与非平衡相变

上述分析表明饱水软岩是一个复杂的开放系统,在与水相互作用下逐渐演化至非平衡状态,其内部的作用是非线性的.因此,在其软化过程中可以形成有序的耗散结构.下面采用耗散结构与非平衡相变原理进一步探讨软岩遇水软化中耗散结构的形成过程.

(1) 近平衡阶段.软岩系统与水相互作用初期,其物理、力学性质以及所在水溶液浓度的变化显著,反映了系统与外界作用之间的正负反馈十分强烈,但由饱水试验结果可知,该反馈仍为线性反馈,反映在软岩物理、力学性质与水溶液浓度的变化规律图中为一条直线(图2);同时软岩系统内部结构只是颗粒连接比以前松散,局部连接方式发生改变,在外界作用的驱使下,通过调整孔隙大小的方式来响应外界作用,其微结构未发生根本变化.如在此阶段停止与水作用,经过一定时间后系统将可能达到一个宏观上不随时间变化的恒定状态,即定态,但这种状态是一种近平衡态,它不会改变系统原来的空间均匀性,任何新的结构和状态都不可能产生.

(2) 远离平衡阶段.软岩系统在与水相互作用下进一步演化,系统内部的线性反馈逐渐演变为非线性反馈,此时软岩物理、力学性质以及所在水溶液浓度的变化虽不剧烈,却表现出极强的非线性(图2),系统内部小孔隙和连通性较差的孔隙自发饱水膨胀,孔隙总面积逐渐增加,颗粒连接排列方式开始产生较大改变,逐渐趋于有序.可见,外部作用已触发了系统的内部机制(蔡绍洪等, 1998),软岩系统进入

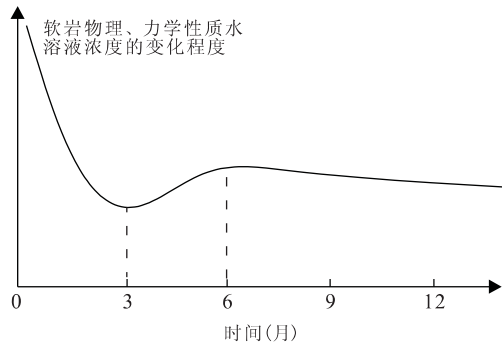


图2 软岩物理、力学性质与水溶液浓度的变化规律

Fig. 2 Variation regularity chart of physical and mechanical properties of soft rocks and concentration of aqueous solution

不稳定的软化阶段,已远离平衡态,系统内存在物质、能量的交换以及复杂的、非线性的相互作用,一方面从外界吸收能量,另一方面又因微结构的调整不断释放能量,从而驱使系统自发地朝临界状态演化,这个阶段中系统呈现出自组织临界性的特征(Nicolis and Prigogine, 1977; Haken, 1983; Bak, 1999; 梅可玉, 2004).

(3)非平衡相变与耗散结构的形成. 随着软岩—水相互作用程度的加深,当软岩系统演化至临界状态时,系统原先稳定的结构已经不能满足,一个小的扰动,其内部的涨落将达到一个宏观的量级而起着决定性作用(李如生, 1986),从而引发软岩系统内部结构的突变即非平衡相变,转换成另一种较为松散的结构类型,形成了一个新的有序的自组织结构——耗散结构,但此时的软岩耗散结构仍需要不断地消耗与耗散外界提供的能量来维持其稳定.

以上描述的非平衡相变过程可用图 3 来说明,图 3 中 X 为系统演化相关的状态变量, λ 为控制参数. 假定 X 随 λ 的依赖关系可用图 3 中的曲线(a)来描述,曲线(a)上的每一点所对应状态的行为很类似于平衡态的行为,即为笔者前面所说的近平衡态;当 $\lambda > \lambda_c$ 时,系统逐渐远离平衡,近平衡态分支(a)的延续(b)分支变得不稳定,系统开始进入自组织状态;当 $\lambda = \lambda_D$ 时,系统演化到临界态,在这种情况下,一个小的扰动便可迫使系统离开原来的分支而跳到另外某个稳定的分支(c)或(c')上,(c)分支或(c')分支上的每一个点可能对应于某种时空有序状态,这样的有序态属于耗散结构,分支(c)或(c')称为耗散结构分支. $\lambda = \lambda_c$ 这个点称为分叉点、分支点或失稳点, $\lambda = \lambda_D$ 这个点称为自组织临界点或非平衡相变突变点,而从近平衡态稳定分支在 λ_c 处状态

失稳到 λ_D 处形成有序化结构的过程即为非平衡相变.

2.2 软岩耗散结构的稳定性及进一步演化规律

研究表明(蔡绍洪等, 1998):非平衡相变所形成的耗散结构都有着一定的稳定性. 在软岩饱水软化试验中,当软岩系统经非平衡相变跃迁至松散结构类型的耗散结构状态时,软岩系统与水溶液之间依然存在着能量、物质和信息的交换,但考虑水溶液在内的整个大系统已经处于动态平衡的状态,软岩系统结构尽管仍在不断演化,但不会被一般小涨落和扰动所破坏,其松散多孔的结构类型依然维持. 宏观表现为软岩抗压、抗拉与抗剪强度基本保持稳定.

同时,这种耗散结构必须靠不断地消耗与耗散外界提供的能量来维持其稳定(蔡绍洪等, 1998),若改变外界环境,从能量意义上即为取消能量的供给或改变这种能量供给方式,系统耗散结构的稳定性将被打破,开始进入新一轮的演化过程,随着系统与当前外界环境之间进行的物质和能量交换继续持续地发展而达到另一个新的临界态时,原先的耗散结构又会突然转变为另一种新的耗散结构,只要外界条件的变化不停止,物质能量的交换不结束,这样的过程将继续发生. 因此,软岩软化过程中,在其耗散结构形成之后,笔者若改变软岩所处的外界条件,如:停止软岩与水相互作用并在常温下风干,或施工开挖揭露导致软岩受到卸荷产生的拉力作用,前者会使软岩耗散结构维持所需要的能量无法满足,导致系统必须通过自我调节以适应新的外界环境,当其演化至临界状态时,会通过突变而出现风化、崩解的现象,这也意味着一种新的耗散结构的产生;后者的作用会在软岩耗散结构与水溶液的初始能量交换中增加新的能量输入,从而引起软岩系统又必须通过持续损伤、裂纹扩展的方式来消耗与耗散这部分新的能量,同样当其演化至临界状态时,裂纹开始丛集和连通,此时,涨落起关键作用,涨落不是被衰减反而会放大,从而导致系统以变形破坏的方式产生新的稳定有序结构,即耗散结构.

3 软岩耗散结构分岔演化模型初探

3.1 软岩耗散结构形成的分岔演化模型

软岩耗散结构的形成过程实际上是一个复杂的非线性动力学过程,在这里笔者仅采用一种描述岩土体变形增长的最简单的动力方程(陈剑平, 2001),

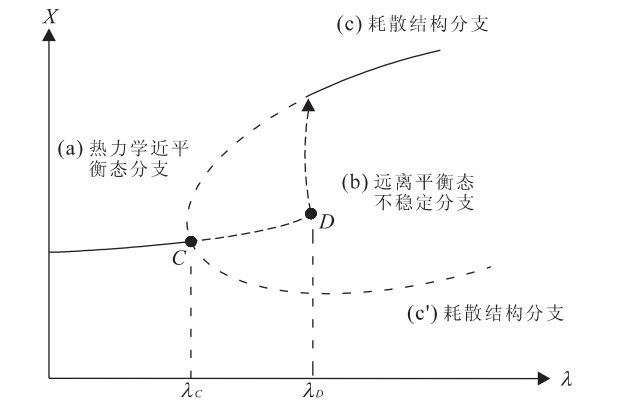


图 3 非平衡相变过程示意图

Fig. 3 Sketch map of non-equilibrium phase transition

来初步探讨软岩软化中的分岔演化行为。

假设软岩的软化程度用分数维 m 来描述,则其软化动力学方程可表示为:

$$\frac{dm}{dt} = \mu m(m_1 - m) - \alpha m, \quad (1)$$

式(1)中, m_1 表示在某种外界环境作用下,岩石结构分维值演化的极限值; α 反映周围环境阻抗岩石发生变形的作用,由于岩石岩样是在无侧限的状态的进行饱水试验的,故取 α 为 0; μ 可取为岩石材料的膨胀系数。

考虑到在软岩软化过程中,对分维值是每段时间测得一次,若用 m_n 表示第 n 个测量时间点的分维值,则原来的连续变量 $m(t)$ 就变为离散变量 ($m_0, m_1, m_2, \dots$) 和 $n=0, 1, 2, \dots$, 连续的微分方程式(1)就变为如下的差分方程:

$$m_{n+1} = f(m_n, \alpha, \mu, m_1) = (\mu m_1 - \alpha) m_n (1 - \frac{\mu}{\mu m_1 - \alpha} m_n). \quad (2)$$

式(2)是一个一维映射或离散动力系统. 各参数意义同前. 令: $x_n = \frac{\mu}{\mu m_1 - \alpha} m_n$, 则式(2)可转换为标准的 Logistic 离散系统动力学演化式:

$$x_{n+1} = \gamma x_n (1 - x_n), \quad \gamma = \mu m_1 - \alpha. \quad (3)$$

$x_n \in (0, 1]$, 式(3)是一个一维映射。

许多研究已经对(3)式做了充分的讨论(Stattinger, 1973), 并且已给出随 γ 增长的系统的各个分岔点的值. (3)式的右端是抛物线, 它的高度是 $4/\gamma$, 左端代表第一、三象限的分角线. 这两条线的交点 O, A 是系统的不动点, 可以求得:

O 点: $x=0$; A 点: $x=1-1/\gamma$.

如图 4, 若不动点是稳定的, 则如图 4 上箭头所示的迭代过程, 式(3)式将收敛于 A 点. 不动点的稳定性由如下条件给出:

$$\begin{cases} |f'(x)| < 1, \text{则不动点稳定,} \\ |f'(x)| > 1, \text{不动点不稳定.} \end{cases}$$

控制参数 γ 的变化对迭代式(3)的动态影响如下:

(1) 当 $0 < \gamma \leq 1$ 时, 只有一个不动点: $x=0$, 该不动点是稳定的, 称其为定常解。

(2) 当 $\gamma=1$ 时, 该映射在不动点处的 Jacobi 矩阵特征值 $\lambda=1$, 故在 O 点发生分岔。

(3) 当 $1 < \gamma \leq 3$ 时, 有两个不动点, O 点: $x=0$ 和 A 点: $x=1-1/\gamma$, $x_n \rightarrow 1-1/\gamma$ 为周期 1 解, 不动

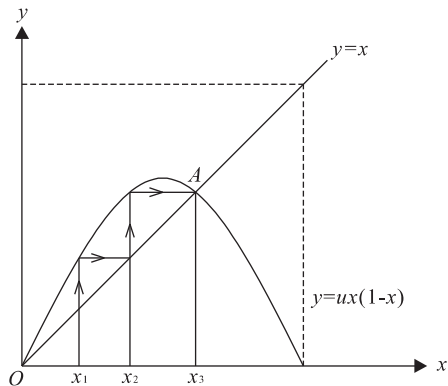


图 4 Logistic 离散动力演化系统的迭代过程(谢应齐和曹杰, 1995)

Fig. 4 Iterative process of Logistic discrete dynamic system

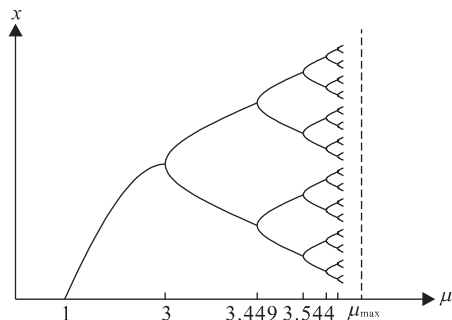


图 5 Logistic 系统演化的分岔行为(谢应齐和曹杰, 1995)

Fig. 5 Bifurcation behavior of Logistic system evolution

点 O 是不稳定的, 不动点 A 是稳定的。

(4) 当 $\gamma=3$ 时, $\lambda=2-\gamma=-1$, 故在 A 点又发生分岔。

(5) 当 $3 < \gamma \leq 1+\sqrt{6} \approx 3.449$ 时, x_n 在两个值上来回跳动, 这是周期 2 解. 此时 O 和 A 点都是不稳定的。

(6) 当 $3.449 < \gamma \leq 3.545$ 时, 相应的不动点又不稳定, x_n 在 4 个值上来回跳动, 这是周期 4 解. 此时平衡点 O 和 A 点都是不稳定的。

当 γ 再继续增大, 这样的过程将一直继续下去. 从分岔的观点来说, 就是周期 1 解不稳定分岔出周期 2 解, 周期 2 解分岔出周期 4 解, 周期 4 解分岔出周期 8 解, 如此倍周期分岔演化(图 5)。

3.2 软岩饱水软化试验中的临界分岔现象分析

将式(3)的分岔演化模型应用于软岩饱水软化试验的临界现象分析中, 取灰白色粉砂质泥岩在不同饱水时间的相关参数值如表 1。

根据岩石变形破坏过程中的最小熵产生原理, 笔者采用周翠英等提出的岩石局部熵折迭突变破坏

表 1 不同饱水时间下软岩相关参数

Table 1 Parameter table of soft rocks in different saturation times

时间 (月)	含水量 (%)	容重 (kN/m ³)	体积 膨胀比	分维值
0	5.61	22.4	1.000 0	1.965 1
1	15.63	22.0	1.394 8	1.970 4
3	18.90	21.6	1.450 2	1.978 1
6	25.04	19.2	1.550 1	1.958 4
12	29.80	19.7	1.562 3	2.311 4

表 2 Logistic 方程指标计算结果

Table 2 Calculation results of Logistic equation index

时间(月)	<i>m</i>	<i>μ</i>	<i>γ</i>	<i>α</i>
0	1.965 1	1.000 0	2.320	0
1	1.970 4	1.394 8	3.236	0
3	1.978 1	1.450 2	3.364	0
6	1.958 4	1.550 1	3.596	0
12	2.311 4	1.562 3	3.625	0

准则(周翠英和张乐民,2007)计算软岩遇水软化的结构分维值的极限值.岩石整体信息熵可定义为:

$$S=-\phi u^{-m}\left[1+\frac{1}{m}-\ln m+(m+1)\ln u\right]\bigg|_{u_{\min}}^{u_{\max}},$$

(4)

式(4)中,*u* 为岩石系统应变比能(*u*_{max}表示应变比能最大值;*u*_{min}表示应变比能最小值,这里假设为 0),*m* 为结构分维.

对(4)式求获得熵极值的充要条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial m}=0, \\ \frac{\partial S}{\partial u_{\max}}=0. \end{cases}$$

(5)

消去 *u*_{max} 得到 *m* 的平衡方程:

$$\frac{\ln m}{m}+\frac{\ln m}{m+1}-\frac{1}{m}-\frac{1}{m^2}=0.$$

(6)

对式(6)求数值解,并考虑经验得到:*m*_{*i*}=2.32. 将以上参数代入式(3)中,求得 Logistic 方程指标见表 2.

由表 2 可知,在饱水 1 个月之后,两类岩石的动力学参数才满足 *γ*>3,笔者认为在饱水开始阶段即饱水时间不到 1 个月时,会逐渐趋近于周期一解:

x_n→1-1/*γ*,虽然岩石的动力学参数 *γ* 是不断增大的,但周期一解仍然稳定,系统处于近平衡态,此时分岔演化的不动点为:*x_n*=0.666 7. 换算成软岩的结构分维值 *m*=2,比较接近于试验所得到的岩石初始饱水阶段(0~1 个月)结构分维值,说明软岩系统在饱水不到一个月的时间内系统经历一次近平衡态的分岔并达到相对稳定的状态.

随着 *γ* 值的不断增大,软岩系统在饱水 1 个月和 3 个月中间时,3<*γ*≤3.449,系统又呈现不稳定性,并发生分岔.这时 *x_n* 具有不稳定的周期 2 解,系统的不动点为:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0, \\ x_2 &= 1-\frac{1}{\gamma}, \\ x_{3,4} &= \frac{(\gamma+1)\pm\sqrt{(\gamma+1)(\gamma-3)}}{2\gamma}, \end{aligned}$$

(7)

式(7)中 *x*₁、*x*₂ 为不稳定不动点,*x*₃、*x*₄ 为稳定的不动点.代入岩石饱水 1 个月和 3 个月后的 *γ* 值,并换算出结构分维值,可知两类岩石在饱水 1 个月到 3 个月期间,均是 *x*₃ 对应的分维值 *m*₃,最接近其试验测得的结构分维值.因此,软岩结构状态演化正逐渐趋近于稳定的不动点 *x*₃,此时软岩系统仍处于近平衡态,其演化方向为逐渐远离平衡.

对岩石的动力学参数 *γ* 做线性内插得到表 3. 可见,在第 3 个月到第 6 个月期间,软岩系统经历了多次倍周期分岔,分别获得不同周期解,此时系统已远离平衡态,系统内部开始出现自组织现象,通过不断经历稳定到失稳再到稳定的过程,逐渐从无序向有序演化.

饱水 6 个月后软岩系统的动力学性质具有随机性,理论上 *x_n* 是在区间(0,1]上的随机数,可见此时原先的动力学方程已经无法描述当前的动力学行为,原有系统的结构已在涨落的触发和推动下,发生了突变即非平衡相变,形成了一个新的有序的自组织结构——耗散结构(图 6).

因此,在所研究软岩的饱水过程中,3 个月与 6 个月这两个时间点具有显著的临界特征(表 4),也正是我们深入研究软岩软化耗散动力学过程的切入点.

表 3 动力学参数随时间的内插值

Table 3 Interpolation data of dynamic parameters with time

时间(月)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>γ</i>	2.320	3.236	3.300	3.364	3.448	3.522	3.596	3.601	3.605	3.610	3.615	3.620	3.625

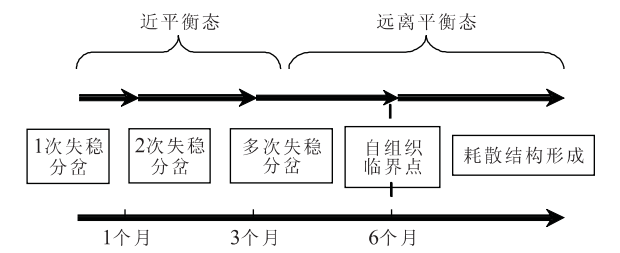


图 6 软岩饱水过程中系统分岔演化规律

Fig. 6 Evolution regularity of soft rocks-water system during saturation process

表 4 饱水 3 个月与 6 个月时间点临界特征

Table 4 Critical characteristics after 3 and 6 months saturation

临界点	3 个月	6 个月
	开始远离平衡	远离平衡
临界特征	开始出现自组织现象	自组织临界点 非平衡相变突变点
	结构无序向有序演化	有序耗散结构形成点

4 结论

(1) 饱水软岩系统是一个与外界存在着物质、能量和信息交流的开放系统,其内部存在着复杂的非线性动力学耦合作用,系统在与水相互作用下逐渐演化至非平衡状态,表现出减熵、降维与有序性的非线性特征,是一种不可逆的过程。因此,软岩系统的软化过程中可以形成有序的耗散结构。

(2) 软岩耗散结构形成过程的研究表明:软岩软化的过程经历了近平衡态、远离平衡自组织态和临界非平衡相变 3 个阶段;软岩耗散结构是软岩系统在远离平衡态达到临界状态后,由内部涨落引发系统内部结构突变而形成的新的有序的自组织结构,此突变过程即为非平衡相变;所形成的软岩耗散结构具有一定的抗干扰稳定性,但必须靠不断地消耗与耗散外界提供的能量来维持;若改变外界条件,系统又将处于新一轮的演化中。

(3) 软岩软化过程中结构分维值演化规律符合 Logistic 方程的差分形式。通过研究,初步建立了软岩耗散结构形成的分岔演化模型;将模型应用于软岩饱水软化试验的临界分岔现象分析中,结果表明:从第 3 个月到第 6 个月之后,软岩系统经历多次倍周期分岔,其内部出现了自组织现象,通过不断经历稳定到失稳再到稳定的过程,逐渐从无序向有序演化,最终形成了软岩耗散结构;3 个月与 6 个月这两个时间点具有显著的临界特征,将是笔者深入研究

软岩软化耗散动力学过程的切入点

References

Bak, P., 1999. How nature works: The science of self-organized criticality. Copernicus Press for Springer-Verlag, New York.

Cai, S. H., Peng, S. Z., Zhao, X. R., et al., 1998. Dissipation structure and non-equilibrium phase theory and application. Guiyang Science and Technology Press, Guiyang (in Chinese).

Chen, J. P., 2001. Towards understanding of dissipative structure deformation process of rock and soil mass. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 31(3): 288—293 (in Chinese with English abstract).

Chou, C. Y., 2000. Nonlinear features and prognosis of landslides, landslides in research, theory and practice. *Thomas Telford, London*, (1): 1408—1501.

Haken, H., 1983. Advanced synergetics. Springer-Verlag, Berlin.

Li, H. Z., He, M. C., 1995. Research on mechanical-chemical characteristics of expanded soft rocks. *Coal*, 4(6): 9—12 (in Chinese with English abstract).

Li, R. S., 1986. Non-equilibrium thermodynamics and dissipative structure. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).

Mei, K. Y., 2004. Self-organized criticality and evolutionary behavior of complex systems. *Studies in Dialectics of Nature*, 20(7): 6—9, 41 (in Chinese with English abstract).

Nicolis, G., Prigogine, I., 1977. Self-organization in non-equilibrium systems. J. Wiley, New York.

Prigogine, I., 1967. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. Interscience Pub., New York.

Qin, S. Q., 2000. Primary discussion on formation mechanism of dissipative structure in instability process of rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 19(3): 265—269 (in Chinese with English abstract).

Stattinger, D. H., 1973. Topics in stability and bifurcation theory. Springer, Berlin.

Tang, C. A., Fei, H. L., Xu, X. H., 1994. Application of modern system theory to rock unstable failure. *Journal of North-eastern University (Natural Science Edition)*, 15(1): 24—29 (in Chinese with English abstract).

Xie, H. P., Peng, R. D., Ju, Y., 2004. Energy dissipation of rock deformation and fracture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(21): 3565—3570 (in

Chinese with English abstract).

Xie, Y. Q., Cao, J., 2001. Nonlinear dynamic mathematic methods. Beijing Meteorology Press, Beijing (in Chinese).

Yu, C. W., 2002. Complexity of geosystem; Basic issues of geological science (I). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 509—519 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Deng, Y. M., Tan, X. S., et al., 2003. Research on the variation regularities of microstructures in the testing of interaction between soft rocks and water. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatsen*, 42(4): 98—102 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Deng, Y. M., Tan, X. S., et al., 2004. Testing study on variation regularities of solution components in saturation of soft rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(22): 3813—3817 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Deng, Y. M., Tan, X. S., et al., 2005a. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(1): 33—38 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Tan, X. S., Deng, Y. M., et al., 2005b. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(3): 394—400 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Zhang, L. M., 2005. Analysis of the nonlinear dynamic process of the interaction between soft rock and water. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(22): 4036—4041 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C. Y., Zhang, L. M., 2007. Research on entropy catastrophic regularity and failure criterion in the deformation and failure process of rocks. *Rock and Soil Mechanics*, 28(12): 2506—2510 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡绍洪, 彭仕政, 赵行如, 等, 1998. 耗散结构与非平衡相变原理及应用. 贵阳: 贵州科技出版社.

陈剑平, 2001. 岩土体变形的耗散结构认识. *长春科技大学学报*, 31(3): 288—293.

李洪志, 何满潮, 1995. 膨胀型软岩力学化学性质研究. *煤*, 4(6): 9—12.

李如生, 1986. 非平衡态热力学和耗散结构. 北京: 清华大学出版社.

梅可玉, 2004. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为. *自然辩证法研究*, 20(7): 6—9, 41.

秦四清, 2000. 初论岩体失稳过程中耗散结构的形成机制. *岩石力学与工程学报*, 19(3): 265—269.

唐春安, 费鸿禄, 徐小荷, 1994. 系统科学在岩石破裂失稳研究中的应用. *东北大学学报(自然科学版)*, 15(1): 24—29.

谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 2004. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析. *岩石力学与工程学报*, 23(21): 3565—3570.

谢应齐, 曹杰, 1995. 非线性动力学数学方法. 北京: 北京气象出版社.

於崇文, 2002. 地质系统的复杂性——地质科学的基本问题(I). *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 509—519.

周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等, 2003. 软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 42(4): 98—102.

周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等, 2004. 软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究. *岩石力学与工程学报*, 23(22): 3813—3817.

周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等, 2005a. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用. *岩石力学与工程学报*, 24(1): 33—38.

周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等, 2005b. 特殊软岩软化的微观机制研究. *岩石力学与工程学报*, 24(3): 394—400.

周翠英, 张乐民, 2005. 软岩与水相互作用的非线性动力学过程分析. *岩石力学与工程学报*, 24(22): 4036—4041.

周翠英, 张乐民, 2007. 岩石变形破坏的熵突变过程与破坏判据. *岩土力学*, 28(12): 2506—2510.