

文章编号:1005—0523(2006)01—0012—03

混凝土材料损伤协同演化及其热弹性不稳定性

余学文,包忠有

(华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌,330013)

摘要:从一种全新的角度出发,将混凝土受载破坏看成混凝土材料本身各组成部分在外界作用下的自组织行为.首先,论证了混凝土损伤演化的自组织特征;其次考虑热力学参量(温度、自由能和熵等)在混凝土损伤演化中的作用,并综合力学参量和热学参量,构造系统的动力学方程;最后从协同学观点出发,将混凝土材料的破坏过程视为非平衡相变现象,利用协同学的方法进行研究,通过线性稳定性分析,探讨从这一角度寻求混凝土材料的弹性极限的方法.通过研究得出的结论,为改善混凝土的力学性能和研制高性能混凝土材料提供理论依据.从协同学这一全新的角度对混凝土材料的损伤演化过程进行分析,具有一定的理论价值和工程实践意义.

关键词:混凝土;损伤;协同演化效应;热弹性不稳定性;自组织

中图分类号:TU311

文献标识码:A

0 引言

混凝土材料的损伤是指它在使用过程中,由于内部大量微损伤(微裂纹或孔洞)的萌生、扩展和连接,导致材料宏观力学性能的劣化乃至最终失效.材料的损伤演化是一类极为普遍的现象,似乎可以认为,它与湍流并列,堪称力学中最复杂、最困难的两大难题,也是非线性科学中两个重要范例^[1].虽然对材料损伤和破坏已进行了多年、广泛的研究,但大多数基本问题仍未找到令人满意的答案.钱学森在其“物理力学讲义”中将之归入“连基本概念也还不十分清楚的问题”.因此,要探索解决问题的途径,就要从搞清基本概念开始,从了解材料的损伤过程中的特点入手.对于混凝土损伤演化的研究方法主要有两大类:①微观(细观)方法.根据材料的微观(细观)成分单独的力学行为以及它们的相互作用来建立宏观对象损伤的本构关系,进而给出损伤力学的完整的问题提法;②宏观的以及唯象学的方

法.这一方法引入损伤变量作为本构关系中的内变量,不需要直接从微观机制导出宏观量之间的理论关系式.可以看到,传统的观点将混凝土受载破坏的过程看作外力作用的结果进行研究.然而,研究损伤演化所考察的系统,通常处于远离平衡的条件下,损伤的演化过程中一般包含互相耦合的多种非线性过程,涉及从微观到宏观各种尺度的过程,是多尺度、多层次子系统之间的相互耦合.单纯的细观理论和只涉及宏观描述的唯象理论并不能充分反映损伤演化的机理.^[2]实际上,损伤演化过程是材料内包含各种不同尺度、不同类型的复杂微结构自身演化的一种群体效应,依赖于复杂微结构的集体相互作用.从本质上来说,材料的力学性能是其微结构在自组织状态下对外界作用的一种反应.

1 混凝土损伤团体同演化的自组织特征

众所周知,混凝土是由性质各异的材料组成的复合材料.在混凝土制备过程中,还不可避免地产

收稿日期:2005—07—20

作者简介:余学文(1964—),男,江西星子人,华东交通大学高级讲师.

中国知网 <https://www.cnki.net>

生各种微裂纹、气泡等,而混凝土力学性能是各种组分集体效应的效果.在混凝土损伤演化过程中,各组分之间表现出强烈的非线性相互作用.其中的裂纹由最初的随机分布向破坏区域集中演化是从无序到有序演化所表现出来的特有现象^[3],具有明显的自组织临界特征.因此可以说,混凝土的力学性质是其内部各组分在协同合作的基础上对各种作用产生的具有自组织性反应的唯象表现.

对于这种具有临界自组织行为系统的研究,H. Haken 提供了有力的分析工具——协同学^[4,5].协同学研究的是在众多子系统之间非线性相互作用下,系统是怎样从原始的无序状态发展成为有序结构,或以一种有序结构转变为另一种有序结构的理论.利用协同学解决问题时,首先找出描述系统的相互耦合的若干个参量,通过它们之间的耦合关系得到描述系统演化的动力学方程,进而对动力学方程进行分析.本文尝试从协同学的基本理论出发,将混凝土材料的损伤演化行为看成自身微裂隙的自组织行为,并对其行为特征进行进一步的分析.

2 混凝土损伤协同演化的系统动力学方程

从混凝土材料的不可逆热力学转变过程出发,研究其材料性能时,不仅要考虑其力学参量(如应力和应变),还要考虑其热力学参量(如温度、自由能和熵)以及二者之间的非线性耦合.这里采用两种有代表性的参量,力学参量取应变,热力学参量取温度,而将自由能看成二者的函数.即令

$$F=F(T,\epsilon)$$

其中, F 为自由能, T 为系统的温度, ϵ 代表系统的应变

将该方程在平衡态($T=T_0, \epsilon=0$)做近似泰勒展开得

$$F(T,\epsilon)=F(T_0,0)-S(T_0,0)\theta-\frac{1}{2}\frac{C_v}{t}\theta-\gamma C_v\theta\epsilon+\frac{1}{2}E\epsilon^2-\frac{1}{2}\frac{\partial(rC_v)}{\partial\epsilon}|_0\theta\epsilon^2$$

结合固体的热学力学基本方程

$$F=-SdT+\sigma d\epsilon$$

即可得到系统单位体积的熵和状态方程:

$$S=-(\frac{\partial F}{\partial T})_{\epsilon}$$

$$S=S(T_0,0)-\frac{1}{T_0}\theta+\frac{1}{T_0}\gamma C_v\theta+\frac{1}{2}\frac{\partial(C_v\gamma)}{\partial\epsilon}|_0\theta\epsilon^2$$

$$\sigma_{\epsilon}=(\frac{\partial F}{\partial \epsilon})_T=E\epsilon-\gamma C_v\theta-\frac{\partial\gamma C_v}{\partial\epsilon}|_0\theta\epsilon$$

式中: S 为熵密度, σ 为系统的应力, E 为材料的弹性模量, $\theta=T-T_0$ 为温度偏差, C_v 为单位体积的热容量, $\gamma=\frac{\partial^2 F}{\partial T\partial\epsilon}/(T\frac{\partial^2 F}{\partial T^2})$.

由以上结果,利用熵平衡方程

$$\frac{\partial s}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial x}(\frac{q}{T})+P(s)$$

和动量平衡方程

$$\frac{\partial^2\sigma}{\partial x^2}=\rho\frac{\partial^2\epsilon}{\partial t^2}$$

其中 q 为热流密度, q/T 为熵流密度, $P(s)$ 为熵产生, σ 为弹性应力和耗散性应力之和,即:

其中 η 为粘滞系数.

可得系统动力学方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\theta}{\partial t}-\frac{K}{C_v}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\gamma T_0\frac{\partial\epsilon}{\partial t} &= -T_0\frac{\partial\gamma}{\partial\epsilon}|_0\frac{\partial\epsilon}{\partial t}+\frac{\eta}{C_v}(\frac{\partial\epsilon}{\partial t})^2 \\ \frac{\partial^2\epsilon}{\partial t^2}-\frac{E}{\rho}\frac{\partial^2\epsilon}{\partial x^2}+\frac{\gamma C_v}{\rho}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} &= \frac{\eta}{\rho}\frac{\partial^3\epsilon}{\partial t\partial x^2}-\frac{C_v\partial\gamma}{\rho\partial\epsilon}|_0\theta\frac{\partial^2\epsilon}{\partial t^2}+\frac{\partial\theta}{\partial x}\frac{\partial\epsilon}{\partial x}+\epsilon\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \end{aligned}$$

$$\sigma=\sigma_{\epsilon}+\eta\frac{\partial\epsilon}{\partial t}S$$

其中 K 为热传导系数.

3 系统动力学方程的线性稳定性分析

由上述可知,系统动力学方程是温度和应变的非线性耦合方程.选取

$$\frac{\partial\epsilon}{\partial x}=\frac{\partial\sigma}{\partial x}=0$$

作为参考态(其参量加下脚标 a 表示),将其代入系统动力学方程组得到参考态如下

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \frac{\partial\epsilon_a}{\partial t}t \\ \theta_a &= -\gamma T_0\frac{\partial\epsilon_0}{\partial t}t+\frac{\eta}{C_v}(\frac{\partial\epsilon_a}{\partial t})^2t-\frac{1}{2}\frac{\partial\gamma}{\partial\epsilon}|_0T_0(\frac{\partial\epsilon_a}{\partial t})^2t^2 \end{aligned}$$

这说明参考的 ϵ_a 和 θ_a 除与材料的性质及状态有关外,还与应变速率 $\partial\epsilon/\partial t$ 有关.

利用微扰法,令

$$\epsilon=\epsilon_a+\delta\epsilon,\theta=\theta_a+\delta\theta$$

代入动力学方程得到齐次方程组

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} q^1 \\ q^2 \\ q^3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K}{C_v} \frac{\partial^2}{\partial X^2} & \gamma \frac{\partial \epsilon}{\partial t} A & -\frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} \\ U & \frac{n}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial x^2} & W \\ 0 & \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q^1 \\ q^2 \\ q^3 \end{Bmatrix}$$

其中:

$$q^1 = \frac{1}{T_0} \delta \theta_1, U = -\frac{E}{\rho} \alpha \left(\frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} \right)^{-1} B \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

$$q^2 = \left(\frac{\partial}{\partial t} \epsilon_a \right)^{-1} \delta \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right)$$

$$q^3 = \delta \epsilon, W = \frac{E}{\rho} C \left(\frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} \right)^{-1} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

$$A = 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \Big|_0 \epsilon_a - \frac{2\eta}{\alpha E T_0} \left(\frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} \right)$$

$$B = 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \Big|_0 \epsilon_a$$

$$C = 1 + \alpha \frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \Big|_0 T_0 \epsilon_a - \frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \frac{\eta}{E} \epsilon_a \epsilon_a + \frac{\alpha T_0}{2\gamma} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \right)^2 \epsilon_a^2$$

设其解为:

$$\begin{Bmatrix} q^1 \\ q^2 \\ q^3 \end{Bmatrix} = \xi_k e^{\lambda_k t + i k x} \begin{Bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \end{Bmatrix}$$

其中 ξ_k 为任意常数, $\{O_1, O_2, O_3\}^T$ 为系数矩阵的特征向量。

代入即得到方程有非零解的条件是:

$$\lambda^3 + c_1(k) \lambda^2 + c_2(k) \lambda + c_3(k) = 0$$

其中:

$$c_1(k) = \left(\frac{K}{C_v} + \frac{\eta}{\rho} \right) k^2$$

$$c_2(k) = \left(\frac{\eta K}{\rho C_v} k^2 + \frac{E \alpha \gamma T_0 A B + E c}{\rho} \right) k^2$$

$$c_3(k) = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \Big|_0 T_0 \alpha B \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} + \frac{C K k^2}{C_v} \right) k^2$$

根据 Hurwitz 判据, 因为 $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $c_3 > 0$, 所以无软模不稳定现象 (即无随时间的周期失稳现象)。方程硬模的稳定性条件是:

$$H = (c_1 c_2 - c_3) > 0$$

将此判据两边同时除以 $k^2 E / \rho$, 可得到与 H 同号的判据 Φ :

$$\Phi(k, \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t}, \epsilon_a) = \frac{H \rho}{E k^2} = \left(\frac{K \eta}{E C_v} \right) \frac{K}{C_v} + \frac{\eta}{\rho} k^4 + \left[(c + \alpha \gamma T_0 A B) \left(\frac{K}{C_v} + \frac{\eta}{\rho} \right) + \frac{E \alpha \gamma T_0 A B + E c}{C_v} \right] \frac{\partial \gamma}{\partial \epsilon} \Big|_0 T_0 \alpha B \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} > 0$$

此式为 k^2 的开口向上的二次方程, 在 $\Phi - k^2$ 坐标系中, 当 k^2 较大时, 总有 $\Phi > 0$ 即 $H > 0$ 所以参考态失稳总是发生在 k^2 较小处。

Hurwitz 判据的应用: 在 $\Phi - k^2$ 坐标系中, 对于 $\Phi - k^2$ 山曲线, 根据其对称轴和极值点的位置, 可分为如图 1 四种情况。对 (a)、(b) 两种情况, 无论 k^2 如何取值, 都能保证 $\Phi > 0$, 说明这时硬模是稳定的; 对于 (c)、(d) 两种情况, 总有较小的一些 k^2 值使得 $\Phi < 0$, 此时硬模失稳。具体应用方法就是: 对于给定的应变速率 $\partial \epsilon / \partial t$ 以及混凝土材料的各种性质, 对于所有 k^2 值, 都有 $\Phi > 0$ 的 ϵ_a 的最大值, 就是在给定条件下, 保证参考态不失稳的最大应变, 即材料的弹性极限值。

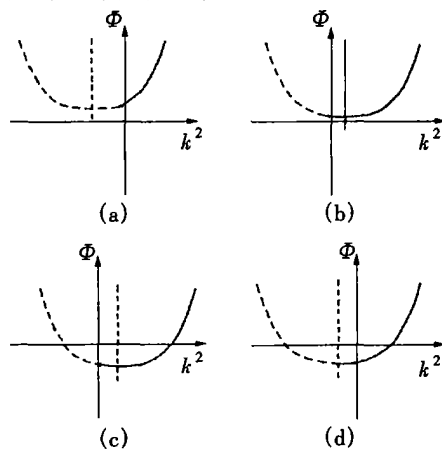


图 1 $\Phi - k^2$ 的分类

4 结束语

根据以上分析可知, 混凝土的弹性极限应变不仅与其材料性质密切相关, 还与其承受作用时的热力学性质 (温度、自由能和熵等) 有关。

混凝土在一定条件下的弹性极限应变还与应变速度有关, 这与在受载试验中混凝土等脆性材料所表现出来的动力效应是一致的。

对混凝土损伤自组织过程的研究, 可以使人们更清楚地认识混凝土破坏过程的发生机制, 为改善混凝土的力学性能和研制高性能混凝土材料提供理论依据。

参考文献:

- [1] 白以龙. 迅速发展的非线性连续介质力学研究[J]. 力学进展, 1996, 26(4): 433~436
- [2] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂—数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003

[3] 于广明,董春胜,潘永战,刘福顺. 混凝土的分形性及其单轴应力下裂纹演化的混沌效应[J]. 青岛建筑工程学院学报. 2004, 25(1):1~6.

[4] [德]赫尔曼·哈肯,著·凌复华译. 协同学大自然构成的奥秘[M]. 上海:上海译文出版社, 2001.

[5] HakenH. AdvancedSynergelice· Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1983.

[6] Bottani C. E. Thermoacoustic instabilities in strained solids: a synergetic, 1981.

[7] 东南大学等七所工科院校编· 马文蔚改物理学(上册)

[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.

[8] 匡震邦·非线性连续介质力学[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2002.

[9] 李兆霞·损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.

[10]吴大进,曹力,陈力华. 协同学原理和应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1990.

[11] 戚承志,线七虎·岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 177—181.

Synergetics Effect and Thermo Elastic Instabilities
of Evolution of Concrete Damage

YU Xue-wen, BAO Zhong-you

(School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: Destroy of concrete under loads was thought as a result of outside force in traditional views, while the author looked on it as a self-organization of components of concrete. This paper demonstrates the self-organized characteristic of the evolvement of concrete damage, then constructs the dynamic equations of the system think of the action of thermodynamic parameter such as temperature, freedom energy and entropy etc. in the evolvement of concrete damage, at last, looks on the damage course of concrete as imbalance changes in the view of synergetics, discusses the method of finding out the elastic terminal of concrete through analysis of stability, offers academic gist for improving concrete mechanic performance and the study of high performance concrete and have certain academic value and practice meaning.

Key words: concrete, damage, synergetics, thermo elastinstabilities, self-organization

(上接第 11 页)

The Application of Monitoring Ways in Slope Stability Evaluation

DU Yu-fei¹, ZHENG Ming-xin¹, ZHANG Bai-gen², ZHAO Xiao-ping¹, MA Guo-zheng¹

(1. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. Express Administration Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China)

Abstract: Monitoring methods are the important content in informational construction, which play an important part in reinforcement design and slope stability evaluation. Based on the monitoring information of the course of 211 km in Gan—Yue freeway, including surface movement, borehole inclination and water table, surface movement, borehole inclination the article analyses the trends of the reinforced slope then evaluates the slope current stability, and raises some reasonable suggestions about reinforcement and drainage structure.

Key words: monitoring ways, informational construction, slope stability evaluation