

关于“对‘准脆性材料单轴拉伸破坏全过程物理模型研究’讨论”的回复

REPLY TO “DISCUSSION ON ‘STUDY ON PHYSICAL MODEL OF COMPLETE FAILURE PROCESS OF QUASI-BRITTLE MATERIALS IN TENSION’”

白卫峰(BAI Weifeng), 陈健云(CHEN Jianyun)

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

中图分类号: TB 301

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)12 - 2589 - 04

1 引言

作者发表于《岩石力学与工程学报》2007年26卷第4期的“准脆性材料单轴拉伸破坏全过程物理模型研究”^[1](以下称原文)引起沈新普教授的讨论。非常感谢沈教授对拙作提出的宝贵意见, 现就有关问题与沈教授商榷, 并希望同各界同仁就工程材料损伤、破坏领域的问题展开积极的讨论。

混凝土材料性能在本质上具有随机性与非线性。唯象的经验统计方法建立的众多混凝土本构模型, 难以解释混凝土损伤破坏机制; 耗费大量人力、物力建立起来的经验性本构关系, 会因为混凝土中某一组分的添加或缺失而失去用处, 这不能不引起人们的警醒和深思。

混凝土材料破坏主要由细观拉伸破坏机制控制^[2]。一些学者^[2, 3]通过建立以平行杆模型(PBS)为代表的物理元件模型探讨材料破坏机制。Z. P. Bazant和S. D. Pang^[4]指出, “The parallel bundle model has historically played a useful step in development, but it represents an unacceptable model for a material that is brittle on a large scale”。此类细观模型以及基于“等效应变”假设的损伤模型的缺陷是显而易见的。

正是对于上述缺陷的深刻反思, 作者试图从损伤力学研究的基点出发, 建立能够真实反映混凝土材料破坏机制的细观物理模型, 希望从这一角度缓

解乃至摆脱混凝土本构关系研究的上述困境。

2 对混凝土单轴拉伸破坏过程的理解

单轴拉伸破坏作为基本的破坏模式, 其中蕴含和体现着材料破坏的损伤机制。以往研究中鲜有能解释材料整个拉伸过程细观破坏机制的理论和模型; 同时忽略了损伤过程的一些细节, 而正是这些细节对揭示材料的破坏实质有所帮助。

如图1所示, 典型的混凝土单轴拉伸过程存在两个特征状态: 峰值名义应力状态A和临界状态B。同时绘出假设断裂过程区(FPZ)内存在的有效应力-应变曲线以及对应的两特征点A', B'。

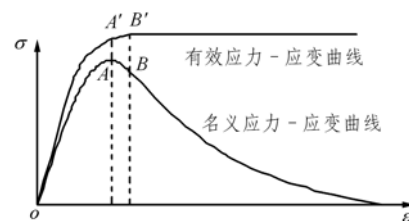


图1 典型单轴拉伸名义应力-应变全曲线与假设的断裂过程区中存在的有效应力-应变曲线

Fig.1 Nominal stress-strain curve under uniaxial tension and assumptive effective stress-strain curve in FPZ

(1) 峰值名义应力状态A

该状态对应的名义应力值即通常所谓的材料强

收稿日期: 2007 - 08 - 28; 修回日期: 2007 - 09 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90510018, 50679006); 国家教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET - 06 - 0270)

作者简介: 白卫峰(1982 -), 男, 2003年毕业于华北水利水电学院水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事混凝土材料损伤破坏机制及混凝土结构抗震分析方面的研究工作。E-mail: yf9906@163.com

度，据此状态将全曲线划分为强化段和软化段。通常的强度是针对初始受力面积而言的，此时能够承受的宏观外力最大，名义应力达到最大。在线弹性力学体系内，强度作为重要的力学指标标志着材料达到受力极限而进入破坏阶段。然而非线性科学阐明世界本质上是非线性的^[5]，以往线性化的观点可能会掩盖事物的真相。

损伤力学表明，材料受力破坏实质是一个连续的损伤演化过程。很明显，在受力过程中，细观微裂纹的不断萌生和扩展使得材料有效受力面积减小。此时，状态 A 对应于有效受力面积的有效应力是否也达到最大值值得商榷。有效应力似乎才真正代表材料本质的力学性能。

(2) 临界状态 B

根据试验结果可知，混凝土单轴拉伸破坏过程显然应划分为两个阶段：统计均匀损伤阶段和局部破坏阶段。假设存在一临界状态，标志着材料从均匀损伤向局部破坏转变。这里暂且认为此临界状态即出现宏观裂纹的状态。出现宏观裂纹之前，材料的损伤表现为在整个试件范围内微裂纹无序地萌生、扩展，微裂纹密度保持在一个较小的程度，宏观上可以看作是均匀损伤过程。当试件的 FPZ 内出现宏观裂纹之后，整个试件的破坏过程完全由宏观裂纹控制：FPZ 内伴随着裂纹的进一步扩展，表现为损伤软化现象；其他区域出现卸载回弹现象。

混凝土试验结果^[6]表明，临界状态 B 一般滞后于状态 A。但以往研究基本上均未深究且主观地将两者等同，即达到峰值状态 A 之后材料随即进入局部破坏阶段。为真正揭示材料的破坏机制，就必须区别两特征状态，解释对应的物理实质，究竟是怎样的机制使得材料从均匀损伤向局部破坏转换。

(3) 损伤的标定

损伤内变量有多种定义方法，通常采用微裂纹密度或有效面积与初始面积比值标定损伤大小。现有损伤本构一般采用单损伤变量 D ，即认为材料整个拉伸破坏过程为均匀损伤，不能区别两个损伤阶段。阈值状态对应 $D = 0$ ，最终破坏状态对应 $D = 1$ 。损伤阈值状态标定非常不统一，有的定义在峰值名义应力状态，不考虑强化阶段的损伤；有的定义在初始状态或者考虑一定的线弹性阶段。注意到损伤模型中峰值状态 A 对应 D 值很小(规范^[7]上为 $D = 1/6$)，即微裂纹密度维持在很小的程度，无法令人信服由于损伤值 D 导致材料进入局部破坏阶段。

(4) 新的准脆性材料破坏理论

基于以上思考，作者建立了完整描述准脆性材料单轴拉伸破坏过程的物理模型 IPBS 和 DCPM；

提出了全新的材料破坏理论——材料内在力学性能发挥机制(材料自我调节机制)；认为材料破坏的实质是屈服和断裂两种损伤模式连续演化累积的过程，整个过程由材料内在力学性能发挥机制驱动；有效应力作为材料内在力学性能表征；均匀损伤阶段才是材料受力的主要阶段，采用两个损伤变量 D_R ， D'_y 区分均匀损伤和局部破坏阶段。

3 局部破坏阶段卸载区域变形过程

局部破坏阶段，卸载区域将表现为卸载跃返现象，同时伴随不可恢复的变形，可由 IPBS 模型在临界状态的卸载过程模拟。下面给出试件在均匀损伤阶段任意状态循环加载过程对应的本构关系。

3.1 单轴拉伸循环加载过程

如图 2 所示，定义应力 - 应变全曲线中的卸载点为 a ，再加载点为 b 。这里考虑点 a 在临界状态之前。假设在一个完整的滞回过程中断裂损伤 $D_R(\epsilon)$ 保持不变，等于先前最大的损伤累积值 $D_R(\epsilon_a)$ ：

$$D_R(\epsilon_a) = \int_{\epsilon_{Rmin}}^{\epsilon_a} q(\epsilon_R) d\epsilon_R = c \tan t \quad (1)$$

式中： c 为常数。

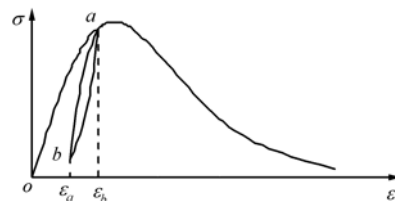


图 2 加卸载过程示意图

Fig.2 Sketch of unloading-reloading process

同时假设每个杆单元在受拉或受压状态下具有相同的屈服强度 f_{yi} 。

考虑 $u_0 < u_a \leq u_{y_{max}} (\epsilon_0 < \epsilon_a \leq \epsilon_{y_{max}})$ ，定义 $u_0 = u_{Rmin} = u_{ymin} = 0$ ， $\epsilon_0 = \epsilon_{Rmin} = \epsilon_{ymin} = 0$ 表示最小屈服、断裂强度对应的变形和应变； u 表示拉伸变形， u_a 、 u_b 分别为点 a 、 b 对应拉伸变形。当系统单调加载达到点 a 状态时，有

$$D_y(\epsilon_a) = \int_{\epsilon_{ymin}}^{\epsilon_a} q(\epsilon_y) d\epsilon_y < 1 \quad (2)$$

(1) 卸载阶段 ($\dot{u} < 0$ ， $u_b \leq u < u_a$)

因为 $0 = 2u_0 < u_a - u$ ，即 $0 = 2\epsilon_0 < \epsilon_a - \epsilon$ ，由系统的平衡方程得

$$F = -Nk \int_{u_0}^{u_a-u} p(u_y) u_y du_y -$$

$$Nk \int_{\frac{u_a-u}{2}}^{u_a-u} p(u_y) [(u_a - u) - u_y] du_y +$$

$$Nk \int_{u_a-u}^{u_a} p(u_y) [u_y - (u_a - u)] du_y + N \left[1 - \int_{u_0}^{u_a} p(u_y) du_y \right] ku \quad (3)$$

有效应力和名义应力可由原文^[1]中式(16)~(18)表达。

(2) 再加载阶段($\dot{u} > 0, u_b \leq u < u_a$)

定义 F_b, σ_{Eb} 分别为系统对应于再加载点 b 所承受的外力和有效应力, 可由卸载过程确定。由平衡条件得

$$F = F_b + 2Nk \int_{u_0}^{\frac{u-u_b}{2}} p(u_y) u_y du_y + Nk(u - u_b) - Nk(u - u_b) \int_{u_0}^{\frac{u-u_b}{2}} p(u_y) du_y \quad (4)$$

有效应力可表达为

$$\sigma_E = E_0 \varepsilon (1 - D'_y)$$

$$D'_y = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon} - \frac{2 \int_{\varepsilon_0}^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{2}} p(\varepsilon_y) \varepsilon_y d\varepsilon_y}{\varepsilon} + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_b) \int_{\varepsilon_0}^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{2}} p(\varepsilon_y) d\varepsilon_y}{\varepsilon} - \frac{\sigma_{Eb}}{E_0 \varepsilon} \quad (5)$$

名义应力表达式同上。

令 $\varepsilon_a = \varepsilon_{y\max}$, 即初始卸载对应临界状态应变, 即可得到局部破坏阶段卸载区域的卸载跃返过程相应的本构关系。

3.2 卸载区域跃返过程

采用原文^[1]中算例 2 对应参数模拟混凝土试件 FPZ 内循环拉伸加载过程中的滞回特性, 如图 3 所示。注意临界状态前对应的循环曲线同样适用于整个试件范围的均匀损伤过程。局部破坏阶段卸载区域的跃返过程可由图中临界状态对应的卸载曲线模拟。很明显该模型可以模拟循环加载过程中的滞回特性, 并且有不可恢复变形产生, 这和试验现象是一致的。

讨论中认为, “卸载区域对应的卸载过程应该发生弹性卸载, 应力点是沿原路直线返回原点的, 不产生不可恢复变形”。这种物理过程可用经典 PBS 模型模拟, 认为细观只存在断裂损伤模式, 有效受力部位对应的平行杆单元处于完全弹性状态; 对应的卸载过程为直线回弹返回原点。“等效应变”假设和 PBS 反映相同的物理本质^[1], 现有的损伤本构大多是基于“等效应变”假设建立的。此类模型代表了现实中不存在的细观非均质的纯脆性材料, 忽略了塑性损伤的影响; 而真实情况下材料卸载过程中总会出现滞回现象和不可恢复变形的。

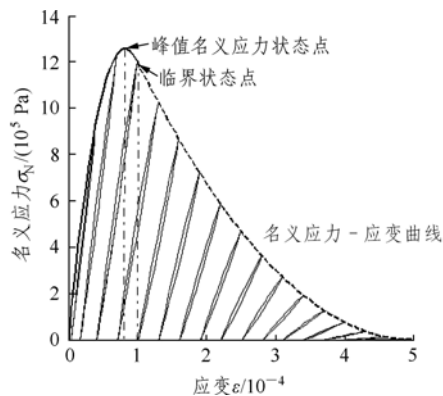


图 3 循环拉伸荷载下名义应力 - 应变曲线滞回特性
Fig.3 Hysteretic property of nominal stress-strain curve under cyclic tension

模型中强调了细观屈服损伤在材料破坏过程中的决定性作用, 导致推导的加卸载过程过于复杂。在实际的应用中, 可进一步简化, 如类似于弹塑性理论认为卸载过程中按照初始弹性模量弹性卸载。

3.3 局部破坏阶段名义应力 - 应变关系的确定

原文^[1]中图 7~10 反映了试件尺寸 L 对材料局部破坏阶段名义应力 - 应变曲线的影响。假设应变计测量范围为 L , 即整个试件长度, 布置位置如原文^[1]图 3 所示。宽度为 w_c 的断裂过程区包括在中间, 即应变计测量的为包括 FPZ 和卸载区域的平均应变。当 $L = 3w_c = 45 \text{ mm}$ 时, 测量的仅为 FPZ 中的应变。名义应力为试件两端应力, 即图中得到的为整个试件的平均名义应力 - 应变曲线。

局部破坏过程中, FPZ 内的名义应力 - 应变关系由原文^[1]中式(10)~(12)确定, 卸载区本构关系由原文^[1]中式(17), (18)确定; 再根据所满足的应力平衡条件(原文^[1]式(19))和总应变表达式(原文^[1]式(20))通过数值计算的方法模拟出对应的名义应力 - 应变曲线。

4 本构模型的最终破坏点

作者^[8]建议将临界状态作为本构模型的最终破坏点。这种做法将充分考虑材料均匀受力阶段的延性, 同时避免过多考虑局部破坏阶段本构模型尺寸效应的影响。

如图 4 所示, 采用原文^[1]模型拟合了规范^[7]推荐的不同强度混凝土单轴拉伸应力 - 应变曲线的均匀损伤阶段(这里假设临界状态对应于软化段曲线的二阶拐点位置), 细观损伤的演化过程采用图 5(b)中的三角形分布形式, 拟合效果良好。注意到: 在实际的应用当中, 为了充分考虑延性, 本构关系通

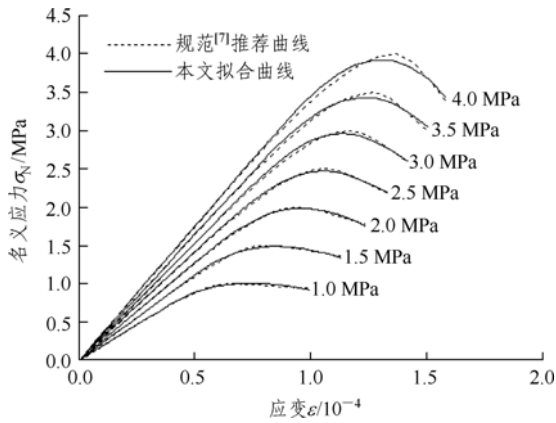


图 4 不同强度混凝土均匀损伤阶段对应名义应力 - 应变曲线

Fig.4 Nominal stress-strain curves of concrete with different strengths in uniform damage stage

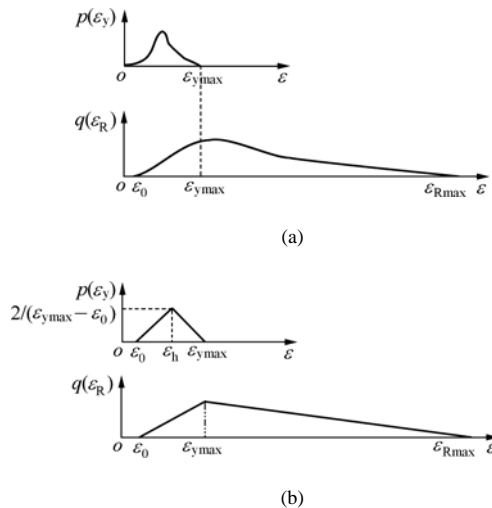


图 5 屈服应变和断裂应变对应的概率密度函数

Fig.5 Probability density functions of yield and rupture strains

常也是计算到软化段对应应力为峰值应力的 80%~90%处, 之后认为材料破坏, 这和本文的观点是一致的, 同时本文模型为这种做法提供了合理的理论依据。

5 细观损伤演化过程的描述

作者认为, 准脆性材料的破坏可以分解为细观屈服和断裂两种损伤模式的连续累积演化过程, 如图 5(a)所示, 真实情况下, 两种模式的损伤演化应该服从复杂的概率分布形式, 如 Weibull 分布或正态分布等。但通过算例表明, 通过调整简单的分布形式(如三角形分布)就可以得到较精确的应力 - 应变关系, 定量地反映出材料细观损伤的演化机制。这种描述损伤演化过程的方法可以应用到高性能混凝土的研究中, 有利于揭示材料的内在损伤机制, 寻找提高材料力学性能途径。同时该模型可以进

一步扩展, 应用到混凝土材料动态应变率效应^[8](惯性效应、孔隙水黏滞效应)和徐变的损伤机制研究当中。

反观细观数值方法的蓬勃发展^[9], 宏观本构模型的研究似乎失去了以往的活力。作者认为完整的探讨材料的损伤破坏机制必须从以下两方面综合考虑: 宏观所遵循的物理规律(热力学耗散机制以及材料内在力学性能发挥机制)是材料损伤破坏的内在驱动力; 细观非均质性起到催化和促进作用, 导致材料逐渐连续的损伤演化过程。单纯从任何一个方面考虑都是不全面的。未来研究的目标将是建立能够反映材料细观非均质损伤机制的宏观本构模型。

参考文献(References):

[1] 白卫峰, 陈健云, 胡志强, 等. 准脆性材料单轴拉伸破坏全过程物理模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 670 - 681.(BAI Weifeng, CHEN Jianyun, HU Zhiqiang, et al. Study on physical model of complete failure process of quasi-brittle materials in tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 670 - 681.(in Chinese))

[2] 李杰. 混凝土随机损伤本构关系研究新进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 750 - 755.(LI Jie. Resent research progress on the stochastic damage constitutional law of concrete[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2002, 32(5): 750 - 755.(in Chinese))

[3] KRAJICINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982, 18(7): 551 - 562.

[4] BAZANT Z P, PANG S D. Mechanics-based statistics of failure risk of quasibrittle structures and size effect on safety factors[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2006, 103(25): 9 434 - 9 439.

[5] 林夏水, 董光璧, 梁芳. 分形的哲学漫步[M]. 北京: 首都师范大学出版社, 1999.(LIN Xiashui, DONG Guangbi, LIANG Fang. Philosophical stroll of fractals[M]. Beijing: Capital Normal University Press, 1999.(in Chinese))

[6] GUO Z H, ZHANG X Q. Investigation of complete stress-deformation curves for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(4): 278 - 285.

[7] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50010 - 2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50010 - 2002 Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))

[8] 陈健云, 白卫峰. 考虑动态应变率效应的混凝土单轴拉伸统计损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1 603 - 1 611.(CHEN Jianyun, BAI Weifeng. Statistical damage model of concrete under uniaxial tension considering dynamic strain-rate effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 603 - 1 611.(in Chinese))

[9] 朱万成, 赵启林, 唐春安, 等. 混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 579 - 598.(ZHU Wancheng, ZHAO Qilin, TANG Chun'an, et al. Mechanical model and numerical simulation of fracture process of concrete[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(4): 579 - 598.(in Chinese))