

文章编号:1007-9629(2021)03-0551-11

基于统计损伤理论的混凝土应力-应变行为

白卫峰^{1,2}, 沈鋈鑫¹, 管俊峰¹, 苑晨阳^{1,2}, 徐存东^{1,2}

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046;

2. 河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 基于统计损伤理论,从有效应力的角度阐述了混凝土损伤演化累积诱致灾变的整个过程,分析了细观损伤机制与宏观力学行为之间的内在联系;建立了考虑强度等级影响的混凝土单轴拉伸、压缩统计损伤模型,该模型考虑断裂和屈服 2 种细观损伤模式,分别与微结构的“劣化”和“强化”机制相对应;同时区分峰值名义应力状态和临界状态,并将临界状态作为损伤局部化的前兆。结果表明:所建立的模型能够预测不同强度等级(C20~C80)混凝土的单轴拉伸、压缩宏观应力-应变行为,并能够反映强度等级对混凝土细观损伤演化过程的影响规律;随着强度等级的提高,表征细观断裂和屈服损伤演化过程的特征参数展现出明显规律性的变化趋势;细观损伤机制最终决定了混凝土宏观非线性的应力-应变行为,屈服损伤模式在整个过程中起决定性作用。

关键词: 混凝土; 损伤机制; 本构关系; 单轴拉伸; 单轴压缩

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.015

Stress-Strain Behavior of Concrete Based on Statistical Damage Theory

BAI Weifeng^{1,2}, SHEN Junxin¹, GUAN Junfeng¹, YUAN Chenyang^{1,2}, XU Cundong^{1,2}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Eng. Research Center, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Based on statistical damage theory, the whole process of concrete damage evolution cumulative induced catastrophe was elaborated in detail from the perspective of effective stress, the internal relation between mesoscopic damage mechanism and macro-mechanical behavior was analyzed. A statistical damage model of concrete under uniaxial tension and compression considering the influence of strength grade was established. Two mesoscopic damage models for fracture and yield were considered in the model, which was corresponded to the “deterioration” and “strengthening” mechanisms of microstructure respectively. The peak nominal stress state was distinguished from the critical state, and the critical state was used as the precursor of damage localization. The analysis results show that the model can predict the macroscopic stress-strain behavior of concrete with different strength grades(C20-C80) under uniaxial tension and compression, and can reflect the influence law of strength grade on the mesoscopic damage evolution process of concrete. With the increase of strength grade, the characteristic parameters of the evolution process of mesoscopic fracture and yield damage show significantly regular change trend. The mesoscopic damage mechanism ultimately determines the macro-nonlinear stress-strain behavior of concrete, and the yield damage mode plays a decisive role in the whole process.

收稿日期:2020-07-17; 修订日期:2020-09-23

基金项目:国家重点研发计划水资源高效开发利用专项(2018YFC0406803);国家自然科学基金资助项目(51679092,51779095);河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN030)

第一作者:白卫峰(1982—),男,河南鹤壁人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:yf9906@163.com

通讯作者:管俊峰(1980—),男,河南许昌人,华北水利水电大学教授,博士生导师,博士. E-mail:shuaipipi88@126.com

Key words: concrete; damage mechanism; constitutive relation; uniaxial tension; uniaxial compression

混凝土材料广泛应用于复杂工作环境下的各种结构,导致新的工程力学问题不断出现^[1-2]. 准确把握复杂荷载环境下混凝土材料强度与变形破坏规律,是进行混凝土结构安全性和稳定性评价的理论基础. 随着混凝土材料科学的迅速发展,各类新型混凝土不断涌现,任何一种掺和料的添加都会对混凝土力学性能产生显著影响,在逻辑上已构成组合爆炸问题. 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^[3]. 从本质上说,混凝土复杂的力学行为均由材料细观组成的异质性和细观损伤演化的非均质性所引起,该过程涉及宏-细-微观多个尺度上无序非均匀性的跨尺度耦合. 要建立科学合理的混凝土本构模型,必须深刻理解材料的细观损伤演化机制和规律,这已成为制约混凝土损伤力学进一步发展的瓶颈.

近年来,以协同学、突变论为代表的现代非线性科学为人们重新认识混凝土等准脆性材料的变形破坏过程提供了新的思路和方法. 白以龙等^[4-5]研究发现:非均质固体受载变形破坏实际上是一个损伤演化诱致灾变的过程,而灾变破坏通常由变形和损伤的局部化发展所触发;同时基于力学、统计物理学和非线性科学,进一步提出了损伤演化诱致灾变理论,并通过跨尺度分析方法将材料的微结构效应与宏观力学行为联系起来. 固体灾变破坏研究的热点一方面集中于对损伤演化过程及机理的认识和理解,另一方面在于探索诱发灾变破坏的前兆特征. 纪洪广等^[6]利用突变理论建立了声发射参数的灰色尖点突变模型,对混凝土单轴压缩过程的声发射参数进行了突变分析. 荆昱等^[7]利用协同学对混凝土损伤过程的声发射现象进行研究,并分析了声发射事件的混沌效应. 细观统计损伤力学是近年来损伤力学研究的热点^[3-5,8-12],该类模型将固体材料抽象为由细观物理元件组成的复杂系统,通过假设细观单元强度服从某种统计分布而引入材料的细观非均质性,探讨其细观损伤机制与宏观非线性力学行为之间的联系. 白卫峰等^[8-12]结合突变理论和细观统计损伤理论,建立了考虑细观断裂和屈服 2 种损伤模式的混凝土统计损伤模型,将混凝土理解为具有自组织行为的复杂系统,其变形破坏过程是该系统通过“损伤”(微裂纹萌生、扩展)方式,使混凝土的潜在承载能力进一步释放以“适应”外界荷载环境的过程.

正确理解和把握细观损伤机制是建立科学合理

的本构模型的关键,单轴拉伸、压缩是混凝土最基本的 2 种变形破坏模式. 本文基于统计损伤理论,分析了混凝土单轴变形破坏过程细观损伤机制与宏观非线性应力-应变行为之间的内在联系,建立了考虑强度等级影响的混凝土统计损伤模型,并分析强度等级对混凝土细观损伤机制的影响规律. 文中以受拉为正、受压为负.

1 理论基础

1.1 损伤演化诱致灾变理论

白以龙等^[4-5]提出了损伤演化诱致灾变理论,认为非均质固体介质的变形破坏过程实质上是一个损伤演化诱致灾变的过程,可分为整体稳定(GS)和演化诱致灾变(EIC)2 种模式,将整个过程成分布式损伤和局部灾变 2 个阶段. 在由微损伤演化累积引起固体介质最终断裂破坏的过程中,GS 模式向 EIC 模式转变的临界状态具有关键意义,存在敏感性特征. 当系统临近灾变破坏时,许多与内部损伤相关的物理信号,如变形、电信号、声发射信号、电磁信号等会呈现幂律等异常行为,进而实现从分布式损伤到局部灾变破坏的转变. 灾变前兆的研究是近年来研究者关注的热点,白以龙等^[4-5]指出临界敏感性、跨尺度涨落和损伤局部化是触发灾变破坏的共性前兆特征.

局部化是准脆性固体损伤演化诱致宏观破坏的普遍现象,初始阶段的随机损伤会逐渐集中到一个很窄区域. 破坏阶段的局部化行为加深了变形破坏问题的复杂性和预测难度,难以再用整体平均量统一表示. 郝圣旺^[13]通过微扰分析法确定了材料系统发生微扰失稳的条件:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} < 0 \quad (1)$$

式中: σ 、 ε 分别为材料的名义应力、应变.

式(1)表明,在峰值名义应力后,材料系统的均匀变形和损伤场将可能在微小扰动下发生失稳而向损伤局部化阶段转变.

1.2 损伤基本假定

混凝土等准脆性材料在受载变形破坏过程中,微结构内部存在 2 种作用机制:

(1)劣化效应. 微裂缝萌生、扩展、成核和贯通,期间伴随着微结构的声发射现象. 劣化效应被作为传统损伤力学的物理基础.

(2)强化效应. 在受力初期,材料微结构的受力

骨架并非最优.伴随着微裂纹的萌生和扩展,材料微结构中的薄弱部位陆续退出受力状态,受力骨架通过应力重分布的方式得以进一步优化调整,材料潜在的承载能力得到进一步发挥,从而能够承受更大的外界荷载(有效应力).当材料微结构的有效受力骨架调整到最优,不能再承受更大的有效应力时,随即进入局部灾变过程.该机制通常被传统损伤力学所忽视.

以往研究者对准脆性材料的局部化转变点(临界状态)讨论很多,郝圣旺^[13]、Wawersik等^[14]、张晓君^[15]指出,岩石类材料的局部化发生在峰值名义应力之后的软化段上.在混凝土材料方面,李杰等^[3]、Van Geel^[16]分别在混凝土单轴拉伸、压缩试验中观测了变形(损伤)局部化现象,发现局部化的转变点均滞后于峰值名义应力,位于应力-应变曲线的软化段上.一些研究者分别在混凝土单轴拉伸^[3,17]、单轴压缩^[6,18]试验中观测了与微裂纹扩展过程密切相关的声发射现象,发现声发射能量率的演化过程呈现典型的突变特征,且峰值突变点一般位于峰值名义应力之后.

上述现象可从有效应力的角度解释:有效应力

最大值与名义应力最大值并非同时发生,而是相对滞后;当有效应力达到最大值时,将会触发相关物理参量的临界敏感性和损伤局部化现象.有效应力 σ_E 反映了材料真实的受力状态,则式(1)可修正为如下形式:

$$\frac{d\sigma_E}{d\varepsilon} \leq 0 \quad (2)$$

2 混凝土单轴应力-应变行为

2.1 单轴拉伸

2.1.1 细观损伤机制与宏观本构行为

图1为混凝土单轴拉伸变形破坏过程,可分为均匀损伤和局部破坏2个阶段,包含A、B、C3种典型状态,其中A为比例极限状态.将拉伸方向记为1方向,对应的名义应力和有效应力分别为 $\sigma_{1,A}$ 、 $\sigma_{1,B}$ 、 $\sigma_{1,C}$ 和 $\sigma_{1E,A}$ 、 $\sigma_{1E,B}$ 、 $\sigma_{1E,C}$; $q(\varepsilon_1)$ 和 $p(\varepsilon_1)$ 分别表示与混凝土细观断裂、屈服损伤对应的概率密度函数; D_{1R} 为与细观断裂相关的损伤变量; ε_{at} 为初始损伤应变; ε_{bt} 为与 $p(\varepsilon_1)$ 峰值对应的应变; ε_{bt} 为最大屈服损伤应变,同时为与 $q(\varepsilon_1)$ 峰值对应的应变; ε_{1cr} 为临界状态应变,满足 $\varepsilon_{1cr} = \varepsilon_{bt}$.

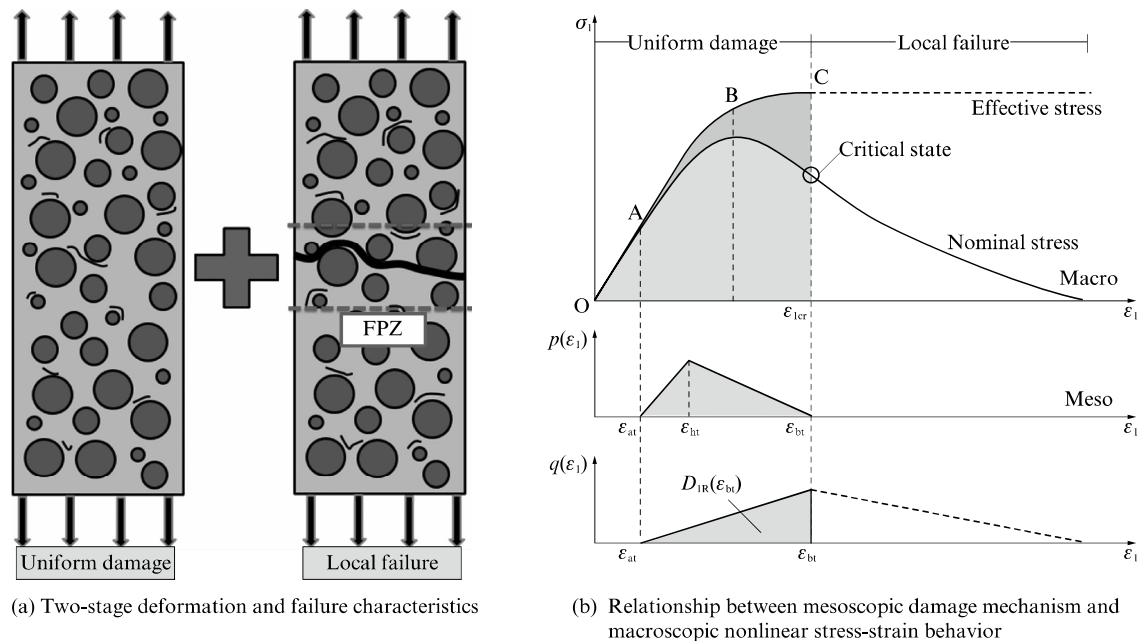


图1 混凝土单轴拉伸变形破坏过程

Fig. 1 Deformation and failure process of concrete under uniaxial tension

由于细观组成的非均质性,混凝土内部各部位受力状态是不同的.在受力初期,微结构中受力骨架并未达到最优,某些强度高的部位甚至可能没有参与受力.随着拉伸变形的增大,首先在骨料和砂浆交界面等薄弱部位随机产生一系列微裂纹,走向大致

垂直于拉力方向.在此过程中,伴随着薄弱部位逐步退出受力,应力重分布得以实现,较强的部位更多地参与受力,一些初期未参与受力的部位陆续补充到受力骨架中.通过上述方式,微结构有效受力骨架得以进一步优化调整,进而获得与每个受力状态相匹

配的承载能力。

从初始受力到加载到 C 状态的过程 (O→A→B→C) 中,一方面,微裂纹在试件内部杂乱无序地萌生和扩展,微裂纹密度逐渐增大;另一方面,微结构中受力骨架得以进一步优化调整,在每个增量状态均能处于受力平衡。 σ_{1E} 单调增大, σ_1 先增大后减小,在 B 状态达到最大值 $\sigma_{1,B}$ 。C 状态下,受力骨架调整到最优,承载能力达到极限,有效应力达到最大值 $\sigma_{1E,C}$;微裂纹在整个试件范围内随机产生,整体上处于均匀损伤变形状态。

C 状态后,材料系统无法再通过微裂纹扩展的方式来获得更大的承载能力,随即进入以损伤和变形局部化为特征的破坏阶段。在断裂过程区 (FPZ) 内,损伤进一步加剧,形成单一的宏观主裂纹,而其余部位则出现卸载回弹现象,对应的软化段曲线存在明显的尺寸效应,不能被看作是纯粹的材料属性。定义 C 状态为临界状态,B 状态为峰值名义应力状态。以 C 状态为界,均匀损伤阶段体现了损伤演化累积由量变到质变的过程;在局部破坏阶段的局部化行为不再用整体平均量统一表示。

2.1.2 统计损伤本构模型

白卫峰等^[8-9]建立了修正平行杆模型 (IPBS) 用于模拟混凝土单轴拉伸变形破坏过程。该模型考虑细观断裂和屈服 2 种损伤模式,分别与微结构的“劣化”和“强化”效应相对应,可分别用微杆件的断裂和屈服表征;通过赋予微杆件随机的断裂和屈服强度引入材料的细观非均质性。混凝土宏观非线性的应力-应变行为由细观断裂和屈服 2 种损伤模式的演化过程控制 (见图 1(b))。统计损伤本构关系可表示如下:

$$\sigma_1 = E_0 (1 - D_{1y}) (1 - D_{1R}) \epsilon_1 \quad (3)$$

$$\sigma_{1E} = E_0 (1 - D_{1y}) \epsilon_1 \quad (4)$$

$$D_{1y} = \int_0^{\epsilon_1} p(\epsilon_1) d\epsilon_1 - \frac{\int_0^{\epsilon_1} p(\epsilon_1) \epsilon_1 d\epsilon_1}{\epsilon_1} \quad (5)$$

$$D_{1R} = \int_0^{\epsilon_1} q(\epsilon_1) d\epsilon_1 \quad (6)$$

$$E_{1v} = \int_0^{\epsilon_1} p(\epsilon_1) d\epsilon_1 \quad (7)$$

$$p(\epsilon_1) = \begin{cases} 0, & (\epsilon_1 \leq \epsilon_{at}) \\ \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_{at})}{(\epsilon_{ht} - \epsilon_{at})(\epsilon_{bt} - \epsilon_{at})}, & (\epsilon_{at} < \epsilon_1 \leq \epsilon_{ht}) \\ \frac{2(\epsilon_{bt} - \epsilon_1)}{(\epsilon_{bt} - \epsilon_{ht})(\epsilon_{bt} - \epsilon_{at})}, & (\epsilon_{ht} < \epsilon_1 \leq \epsilon_{bt}) \end{cases} \quad (8)$$

$$q(\epsilon_1) = \begin{cases} 0, & (\epsilon_1 \leq \epsilon_{at}) \\ \frac{2H_t(\epsilon_1 - \epsilon_{at})}{(\epsilon_{bt} - \epsilon_{at})^2}, & (\epsilon_{at} < \epsilon_1 \leq \epsilon_{bt}) \end{cases} \quad (9)$$

上述式中: E_0 为初始弹模; D_{1y} 为与屈服损伤相关的损伤变量; E_{1v} 为与细观屈服损伤相关的强化因子,表征微结构受力骨架优化调整及潜在承载能力发挥的程度,当 $E_{1v} = 0$ 时,对应初始无损伤状态, $E_{1v} = 1$ 时,对应临界状态,此时模型中所有微杆件全部屈服,受力骨架调整至最优, σ_{1E} 达到最大值,即将进入局部破坏阶段; $H_t = D_{1R}(\epsilon_{bt})$,为与临界状态对应的断裂损伤值。

真实情况下, $p(\epsilon_1)$ 和 $q(\epsilon_1)$ 可能服从 Weibull、正态等复杂的概率分布形式。为简化分析,已有研究表明^[8-12],当其采用简单的三角形概率分布时,就能很好地拟合混凝土单轴应力-应变曲线,并能反映其细观非均质的损伤演化机制。假设 $p(\epsilon_1)$ 和 $q(\epsilon_1)$ 均服从三角形分布形式 (见图 1(b)),其中 $q(\epsilon_1)$ 的分布形态可从声发射试验结果获得依据。声发射现象与材料内部微裂纹扩展过程密切相关,反映了混凝土内部损伤演化过程。李杰等^[3]针对混凝土单轴拉伸过程开展的声发射试验结果显示,声发射能量率的演化过程具有典型的突变特征,与图中 $q(\epsilon_1)$ 的概率分布形态是相似的。对于均匀损伤阶段, $p(\epsilon_1)$ 和 $q(\epsilon_1)$ 可进一步表示为式 (8)、(9)。

2.2 单轴压缩

2.2.1 细观损伤机制与宏观本构行为

图 2 为混凝土单轴压缩变形破坏过程,可分为均匀损伤和局部破坏 2 个阶段,包含 A、B、C、D 4 种典型状态,其中 A 为比例极限状态。将压缩方向记为 3 方向,两侧向为 1、2 方向,则压缩方向对应名义应力和有效应力分别为 $\sigma_{3,A}$ 、 $\sigma_{3,B}$ 、 $\sigma_{3,C}$ 、 $\sigma_{3,D}$ 和 $\sigma_{3E,A}$ 、 $\sigma_{3E,B}$ 、 $\sigma_{3E,C}$ 、 $\sigma_{3E,D}$ 。

图 2 中其余参数的物理意义: ϵ_3^+ ($\epsilon_3^+ > 0$,与压缩方向正交) 为等效传递拉损伤应变,对于单轴压缩有 $\epsilon_3^+ = -\nu \epsilon_3$,其中 ν 为泊松比; $q(\epsilon_3^+)$ 和 $p(\epsilon_3^+)$ 分别表示与混凝土细观断裂、屈服损伤对应的概率密度函数,假设均服从三角形分布; ϵ_{ac} 、 ϵ_{hc} 和 ϵ_{bc} 均为与 ϵ_3^+ 对应的特征拉应变,其中 ϵ_{ac} 为初始损伤应变, ϵ_{hc} 为与 $p(\epsilon_3^+)$ 峰值对应的应变, ϵ_{bc} 为最大屈服损伤应变,同时为与 $q(\epsilon_3^+)$ 峰值对应的应变; ϵ_{3cr} 为临界状态应变,满足 $\epsilon_{3cr} = -\epsilon_{bc}/\nu$; D_{3R} 为与细观断裂相关的损伤变量。

由于泊松效应的影响,混凝土试件在 1、2 两侧向产生横向拉应变。当某些薄弱部位局部拉应变超过极限拉应变时将导致局部微裂纹的产生,微裂纹最先在骨料和砂浆交界部位产生和扩展,走向大致

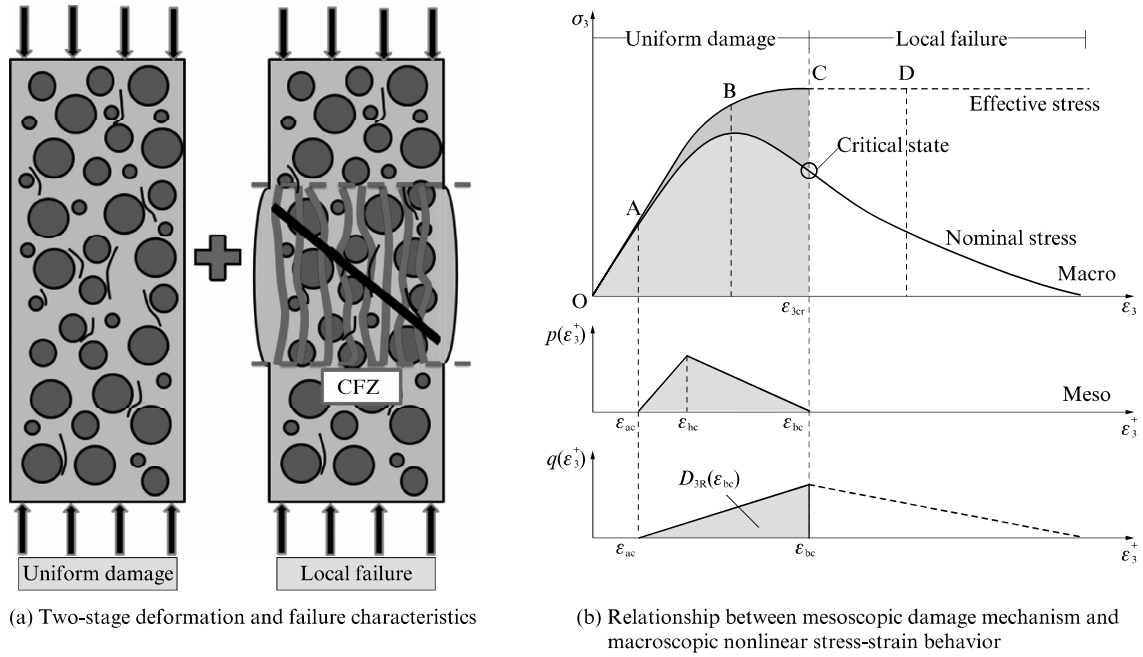


图 2 混凝土单轴压缩变形破坏过程
Fig. 2 Deformation and failure process of concrete under uniaxial compression

平行于压力方向,微裂纹密度随着压力的增大逐渐增加。

从初始受力到加载到 C 状态的整个过程 (O→A→B→C) 中,材料系统能够通过微裂纹随机萌生和扩展这种方式实现应力重分布,促进受力骨架优化调整并获得更大的承载能力,在每个变形增量状态均能够达到受力平衡。 σ_{3E} 单调增大, C 状态下受力骨架调整至最优,达到最大值 $\sigma_{3E,C}$; σ_3 先增大后减小,在 B 状态达到最大值 $\sigma_{3,B}$ 。微裂纹在整个试件范围内随机萌生和扩展,可近似地认为处于均匀损伤变形状态。

C 状态之后,材料系统达到微扰失稳的条件,将会触发变形和损伤局部化,随即进入破坏阶段。在局部压缩破坏区域 (CFZ) 内损伤进一步加剧,出现局部鼓胀并逐渐形成一系列平行于压力方向的纵向宏观裂缝;在 D 状态进一步形成倾斜剪切裂缝带;其余部位则出现卸载回弹现象。对应的名义应力-应变曲线存在明显的尺寸效应。分别定义 B 状态和 C 状态为峰值名义应力状态和临界状态。

Van Geel^[16] 在混凝土单轴压缩试验中,沿试件高度方向布置一系列应变片,同时借助高速摄像机观测了试验过程中的损伤局部化现象。试验结果明确显示,混凝土损伤局部化现象并非出现在峰值名义应力状态,而是相对滞后,位于应力-应变曲线下降段的“陡峭”段上,且该位置与混凝土强度、骨料粒径、水灰比等多种因素相关。上述现象同样可以从有

效应力的角度进行解释。

2.2.2 统计损伤本构模型

混凝土单轴压缩本质为三维空间的损伤演化过程,压缩方向损伤由泊松效应引起的侧向拉损伤过程控制,可由 IPBS 模拟^[10-11]。

如图 2(b) 所示,压缩方向宏观非线性力学行为 (名义应力/有效应力-应变曲线) 由细观断裂、屈服 2 种损伤演化过程控制。假设 $q(\epsilon_3^+)$ 和 $p(\epsilon_3^+)$ 均服从三角形分布。其中,纪洪广等^[6]、董毓利等^[18] 针对混凝土单轴压缩过程开展的声发射试验可为 $q(\epsilon_3^+)$ 的概率分布形式提供参考依据。均匀损伤阶段对应的本构关系可表示如下:

$$\sigma_3 = E_0 (1 - D_{3y}) (1 - D_{3R}) \epsilon_3 \quad (10)$$

$$\sigma_{3E} = E_0 (1 - D_{3y}) \epsilon_3 \quad (11)$$

$$D_{3y} = \int_0^{\epsilon_3^+} p(\epsilon_3^+) d\epsilon_3^+ - \frac{\int_0^{\epsilon_3^+} p(\epsilon_3^+) \epsilon_3^+ d\epsilon_3^+}{\epsilon_3^+} \quad (12)$$

$$D_{3R} = \int_0^{\epsilon_3^+} q(\epsilon_3^+) d\epsilon_3^+ \quad (13)$$

$$E_{3v} = \int_0^{\epsilon_3^+} p(\epsilon_3^+) d\epsilon_3^+ \quad (14)$$

$$p(\epsilon_3^+) = \begin{cases} 0, & (\epsilon_3^+ \leq \epsilon_{ac}) \\ \frac{2(\epsilon_3^+ - \epsilon_{ac})}{(\epsilon_{hc} - \epsilon_{ac})(\epsilon_{ec} - \epsilon_{ac})}, & (\epsilon_{ac} < \epsilon_3^+ \leq \epsilon_{hc}) \\ \frac{2(\epsilon_{hc} - \epsilon_3^+)}{(\epsilon_{hc} - \epsilon_{ac})(\epsilon_{ec} - \epsilon_{ac})}, & (\epsilon_{hc} < \epsilon_3^+ \leq \epsilon_{ec}) \end{cases} \quad (15)$$

$$q(\epsilon_3^+) = \begin{cases} 0, & (\epsilon_3^+ \leq \epsilon_{ac}) \\ \frac{2H_c(\epsilon_3^+ - \epsilon_{ac})}{(\epsilon_{bc} - \epsilon_{ac})^2}, & (\epsilon_{ac} < \epsilon_3^+ \leq \epsilon_{bc}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: D_{3y} 为与屈服损伤相关的损伤变量; E_{3v} 为强化因子, $0 \sim 1$; $H_c = D_{3R}(\epsilon_{bc})$, 为与临界状态对应的断裂损伤值。

2.3 强度等级的影响

按照统计损伤理论的观点, 混凝土材料宏观非线性应力-应变行为由细观非均质的损伤演化过程决定。不同强度等级的混凝土采用不同的配合比制备而成, 导致其微结构的组成和力学性能存在显著差异。与之相对应, 不同强度等级混凝土在受载过程中微裂纹萌生、扩展的形态及规律也存在显著不同。

以单轴拉伸为例, 上述细观层面影响可用 2 类

特征参数进行表征: (1) E_0 , 表征微结构组成对混凝土初始力学性能的影响; (2) ϵ_{at} 、 ϵ_{ht} 、 ϵ_{bt} 和 H_t , 分别表征细观屈服和断裂 2 种损伤模式演化过程对应的三角形概率分布形态, 反映微结构特征对损伤累积演化过程的影响。假设不同强度等级混凝土对应的微结构特征和细观损伤演化过程的变化服从某种规律性(见图 3), 则可将 E_0 、 ϵ_{at} 、 ϵ_{ht} 、 ϵ_{bt} 和 H_t 看作是混凝土强度等级 $f_{cu,k}$ 的函数, 即:

$$\begin{cases} E_0 = f_1(f_{cu,k}) \\ \epsilon_{at} = f_2(f_{cu,k}) \\ \epsilon_{ht} = f_3(f_{cu,k}) \\ \epsilon_{bt} = f_4(f_{cu,k}) \\ H_t = f_5(f_{cu,k}) \end{cases} \quad (17)$$

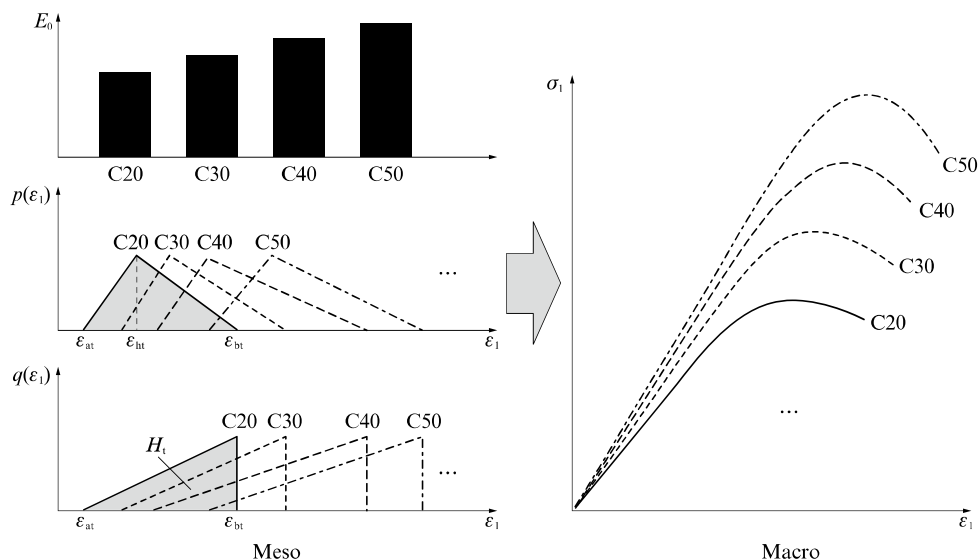


图3 混凝土强度等级对细观损伤演化机制的影响

Fig. 3 Influence of concrete strength grade on mesoscopic damage evolution mechanism

可通过上述参数变化规律来分析强度等级对混凝土单轴拉伸细观损伤演化过程的影响。单轴压缩条件下可得到类似的结论, 即将 E_0 、 ϵ_{ac} 、 ϵ_{bc} 、 ϵ_{bt} 和 H_c 看作是 $f_{cu,k}$ 的函数。

每条单轴拉伸或压缩应力-应变曲线需确定 5 个参数。其中: E_0 由试验曲线获得; ϵ_{at} 、 ϵ_{ht} 、 ϵ_{bt} 、 H_t 或 ϵ_{ac} 、 ϵ_{bc} 、 ϵ_{bt} 、 H_c 这 4 个参数可利用 Matlab 遗传算法模块通过多元回归分析确定^[12]。具体步骤为: (1) 创建包含 4 参数的适应度函数, 以应力预测值与实测值离差的最小平方和作为优化判据; (2) 初设 4 个参数取值区间; (3) 执行遗传算法, 获得本次迭代计算最优解, 再根据结果调整和缩小参数搜索区间范围; (4) 重复执行第 (3) 步, 直至获得参数最优解。

3 验证与分析

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐了混凝土单轴拉伸/压缩应力-应变全曲线本构关系式。该关系式是在总结了大量试验成果的基础上获得的经验表达式, 能够反映不同强度等级 (C20~C80) 混凝土主要的单轴受力和变形特征, 在工程实践中得到了广泛的应用。利用本文模型对 GB 50010—2010 建议的混凝土应力-应变曲线进行预测, 以验证模型的合理性和适用性, 并分析混凝土单轴拉伸/压缩过程的细观损伤演化机制。 E_0 按上述规范取值, $\nu=0.2$; 其余计算参数见表 1。

3.1 单轴拉伸

图 4 为本文模型预测的 C20~C80 混凝土单轴

表 1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

Strength grade	Uniaxial tension					Uniaxial compression				
	$\epsilon_{at} \times 10^6$	$\epsilon_{bt} \times 10^6$	$\epsilon_{lt} \times 10^6$	H_t	R^2	$\epsilon_{ac} \times 10^6$	$\epsilon_{bc} \times 10^6$	$\epsilon_{lc} \times 10^6$	H_c	R^2
C20	37.763	74.841	110.779	0.163	0.999 0	0.002	5.948	335.704	0.094	0.998 2
C25	39.448	85.162	117.534	0.170	0.998 1	3.166	10.254	392.608	0.172	0.998 2
C30	45.521	96.021	120.944	0.180	0.997 7	6.871	37.350	415.435	0.199	0.999 7
C35	48.151	99.763	126.422	0.193	0.997 5	0.794	64.393	462.614	0.273	0.999 8
C40	54.315	107.716	130.115	0.214	0.999 1	13.623	96.662	471.884	0.278	0.999 8
C45	56.280	113.568	133.542	0.225	0.998 1	10.280	131.983	495.108	0.321	0.999 7
C50	57.090	115.298	137.798	0.238	0.997 9	11.903	163.826	514.359	0.360	0.999 6
C55	57.746	123.561	141.980	0.266	0.995 6	18.003	208.429	520.184	0.382	0.999 1
C60	58.547	124.181	145.066	0.275	0.995 6	21.489	255.230	538.995	0.409	0.999 7
C65	62.526	126.552	147.099	0.288	0.996 3	33.220	294.712	546.286	0.422	0.999 8
C70	65.409	127.163	149.721	0.307	0.997 0	42.929	326.538	562.272	0.446	0.999 8
C75	67.840	131.157	151.315	0.324	0.997 8	55.194	368.404	573.840	0.476	0.999 8
C80	71.014	136.673	152.989	0.351	0.997 7	72.849	396.530	587.365	0.506	0.999 6

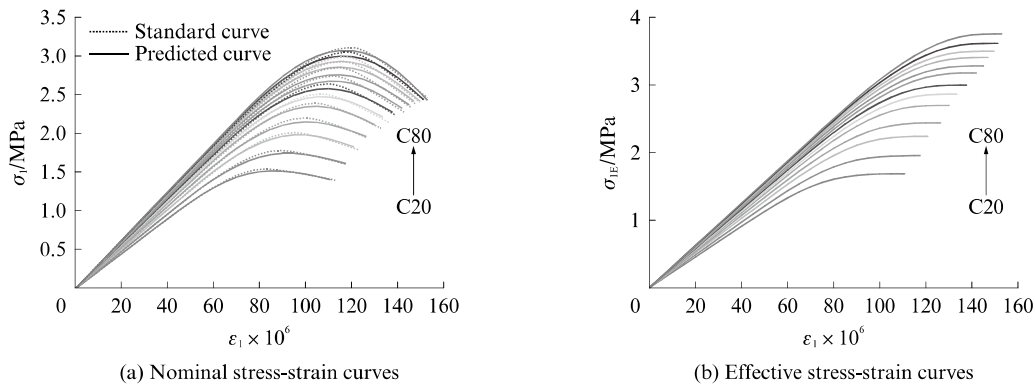


图 4 单轴拉伸应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves under uniaxial tension

拉伸均匀损伤阶段对应的名义应力-应变曲线及其有效应力-应变曲线. 由图 4 和表 1 可见, 本文模型预测曲线与规范建议曲线吻合良好, 两者之间的相关系数 R^2 均在 0.99 以上. 在均匀损伤阶段, 名义应力 σ_1 先增大后减小, 中间存在一个峰值名义应力状态(强度状态); 有效应力 σ_{1E} 单调增长, 在临界状态达到最大值; 临界状态之后, 试件随即进入以宏观裂纹扩展为特征的局部破坏阶段.

图 5 比较了 C20~C80 混凝土单轴拉伸临界状态和峰值名义应力状态的关系, 其中临界状态应力与峰值名义应力之比 $\sigma_{1,cr}/\sigma_{1,p}$ 的变化范围为 0.79~0.93, 应变比 $\epsilon_{1,cr}/\epsilon_{1,p}$ 的变化范围为 1.24~1.33; 从曲线形状看, 临界状态位于名义应力-应变曲线软化段的 2 阶拐点附近, 采用该状态能够充分考虑混凝土材料均匀损伤阶段的延性, 并能够在曲线上升段和下降段的损伤演化过程之间建立起有效的联系.

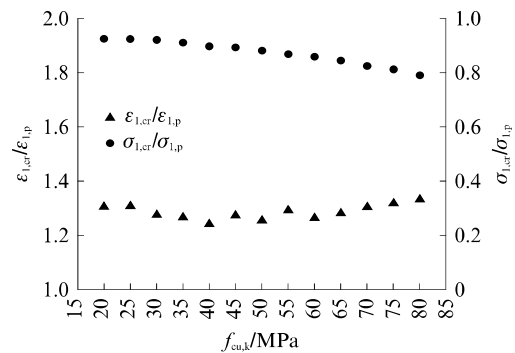


图 5 单轴拉伸临界状态与峰值名义应力状态比较
Fig. 5 Comparison between critical and peak nominal stress states under uniaxial tension

图 6 显示了 C20~C80 混凝土单轴拉伸过程中表征屈服损伤的特征参数 ϵ_{at} 、 ϵ_{bt} 和 ϵ_{lt} 随 $f_{cu,k}$ 的变化规律. 由图 6 可见, 随着混凝土强度等级的提高, 上述参数的变化表现出明显的规律性. ϵ_{at} 、 ϵ_{bt} 和 ϵ_{lt} 分

别由 C20 时对应的 37.763×10^{-6} 、 74.841×10^{-6} 和 110.779×10^{-6} 单调增大到 C80 时对应的 71.014×10^{-6} 、 136.673×10^{-6} 和 152.989×10^{-6} , 其中 ϵ_{at} 呈线性增长趋势. 根据上述 3 参数可确定函数 $p(\epsilon_1)$ 三角形概率分布形态的演化规律.

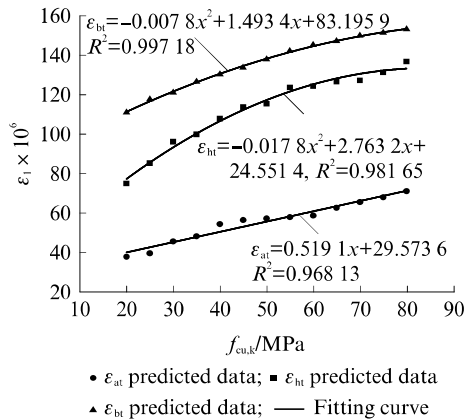


图 6 ϵ_{at} 、 ϵ_{bt} 、 ϵ_{mt} 与 $f_{cu,k}$ 的关系曲线

Fig. 6 Relation curves of ϵ_{at} , ϵ_{bt} , ϵ_{mt} and $f_{cu,k}$

图 7 显示了表征断裂损伤的特征参数 H_t 随 $f_{cu,k}$ 的变化规律. 由图 7 可见, 随着混凝土强度等级的提高, H_t 由 C20 时的 0.163 线性增大到 C80 时的 0.351. 通过回归分析, 可得到图 6、7 中 4 个参数随 $f_{cu,k}$ 变化规律的表达式, 其中 $x = f_{cu,k}$.

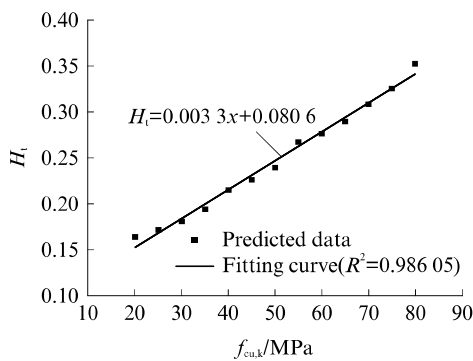


图 7 H_t 与 $f_{cu,k}$ 的关系曲线

Fig. 7 Relation curve of H_t and $f_{cu,k}$

上述特征参数具有明确的物理含义, 可用于分析不同强度等级混凝土单轴拉伸过程中细观损伤演化机制与宏观非线性力学行为之间的内在联系.

图 8 显示了强化因子 E_{1v} 的演化曲线. E_{1v} 与屈服损伤有关, 反映了混凝土微结构受力骨架优化调整的程度. 在均匀损伤阶段, E_{1v} 变化范围为 0~1, 在整个过程中起决定性作用. 由图 8 可见, 混凝土强度等级的提高显著延缓了 E_{1v} 的演化进程. 从变形的角度分析, 在相同应变情况下, 混凝土强度等级越

高, 其微结构受力骨架优化调整的程度越低. 因此, 强度等级高的混凝土临界状态相对滞后, 导致其变形能力有所提高. 当 $E_{1v} = 1$ 时达到临界状态, 意味着微结构有效受力骨架调整到最优, 材料潜在承载能力发挥到极限, 试件随即进入以损伤局部化为特征的破坏阶段.

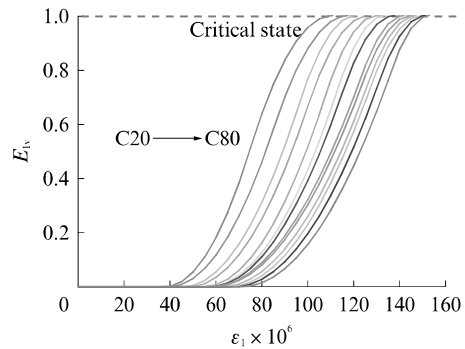


图 8 E_{1v} 演化曲线

Fig. 8 Evolution curves of E_{1v}

图 9 显示了断裂损伤变量 D_{1R} 的演化曲线. D_{1R} 与微裂纹密度相关, 反映了微裂纹萌生、扩展的过程. 由图 9 可见, 在相同应变情况下, 混凝土强度等级越高, D_{1R} 值越小, 即微裂纹密度越小. 但由于高强度混凝土的临界状态相对滞后, 导致临界状态对应的 D_{1R} 值随着强度等级的提高而增大, 由 0.163 增大到 0.351; 微裂纹密度仍然维持在较小的程度.

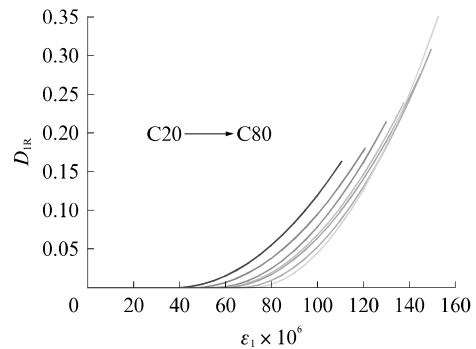


图 9 D_{1R} 演化曲线

Fig. 9 Evolution curves of D_{1R}

3.2 单轴压缩

图 10 显示了本文模型预测的 C20~C80 混凝土单轴压缩均匀损伤阶段对应的名义应力-应变曲线及其有效应力-应变曲线. 由图 10 和表 1 可见, 本文模型预测曲线与规范建议曲线吻合良好, 两者之间的相关系数 R^2 均在 0.99 以上. 在均匀损伤阶段, σ_3 先增大后减小; σ_{3E} 单调增长, 在临界状态时达到最大值.

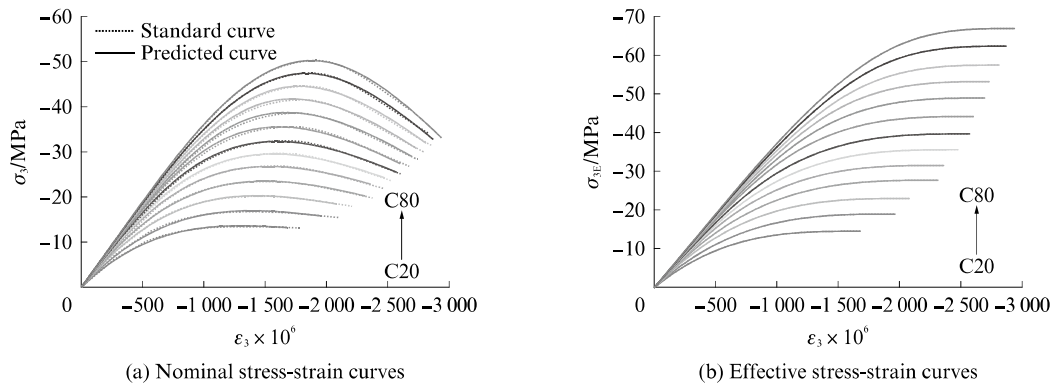


图10 单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves under uniaxial compression

图11比较了C20~C80混凝土单轴压缩临界状态和峰值名义应力状态的关系,其中应力比 $\sigma_{3,cr}/\sigma_{3,p}$ 的变化范围为0.66~0.97,应变比 $\epsilon_{3,cr}/\epsilon_{3,p}$ 的变化范围为1.29~1.63.为充分考虑混凝土材料的延性,同时避免局部破坏阶段尺寸效应的影响,Xiao等^[19]提出将单轴压缩应力-应变曲线下降段对应应力为 $0.85\sigma_{3,p}$ 的状态定义为极限状态.本文模型中的临界状态与该极限状态的定义类似.

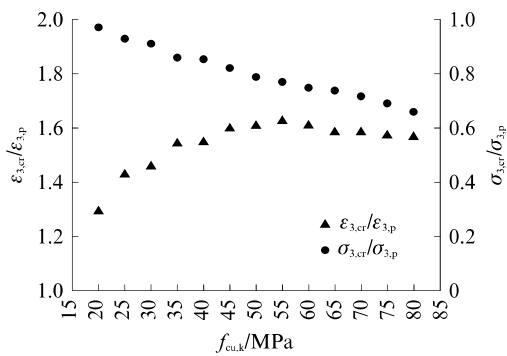


图11 单轴压缩临界状态与峰值名义应力状态比较
Fig. 11 Comparison between critical and peak nominal stress states under uniaxial compression

图12显示了C20~C80混凝土单轴压缩过程中表征屈服损伤的特征参数 ϵ_{ac} 、 ϵ_{hc} 和 ϵ_{bc} 随 $f_{cu,k}$ 的变化曲线.显然,上述参数的变化随着混凝土强度等级的提高表现出明显的规律性. ϵ_{ac} 、 ϵ_{hc} 和 ϵ_{bc} 分别由C20时对应的 0.002×10^{-6} 、 5.948×10^{-6} 和 335.704×10^{-6} 单调增大到C80时对应的 72.849×10^{-6} 、 396.530×10^{-6} 和 587.365×10^{-6} .另外, ϵ_{hc} 控制着 $p(\epsilon_3^+)$ 的三角形分布形态特征,C20时 ϵ_{hc} 与 ϵ_{ac} 几乎重合;随着强度等级的增大, ϵ_{hc} 的增长速率明显高于 ϵ_{ac} ,C80时 ϵ_{hc} 已位于 ϵ_{ac} 和 ϵ_{bc} 中间且靠近 ϵ_{bc} 一侧.

图13显示了表征断裂损伤的特征参数 H_c 随 $f_{cu,k}$ 的变化曲线.由图13可见,随着混凝土强度等

级的提高, H_c 由C20时的0.094增大到C80时的0.506.通过回归分析,可得到图12、13中4个参数随 $f_{cu,k}$ 变化规律的表达式,其中 $x=f_{cu,k}$.

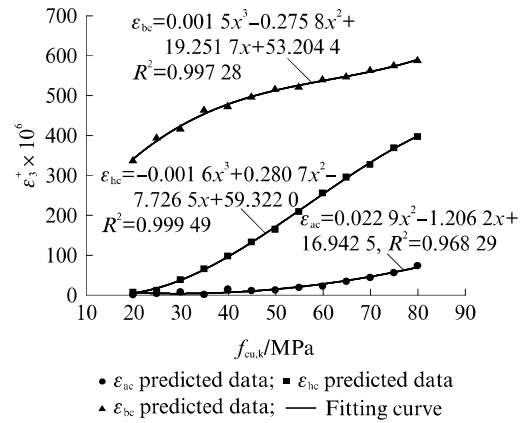


图12 ϵ_{ac} 、 ϵ_{hc} 、 ϵ_{bc} 与 $f_{cu,k}$ 的关系曲线
Fig. 12 Relation curves of ϵ_{ac} , ϵ_{hc} , ϵ_{bc} and $f_{cu,k}$

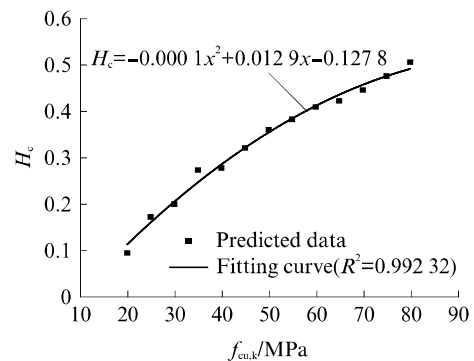


图13 H_c 与 $f_{cu,k}$ 的关系曲线
Fig. 13 Relation curve of H_c and $f_{cu,k}$

图14显示了强化因子 E_{3v} 的演化曲线.在均匀损伤阶段, E_{3v} 变化范围为0~1.由图14可见,混凝土强度等级的提高显著延缓了 E_{3v} 的演化进程,临界状态相对滞后,导致其在均匀损伤阶段的变形能

力有所提高,临界状态对应的压应变 ϵ_3 由 C20 时的 -1.679×10^{-3} 增大到 C80 时的 -2.937×10^{-3} .

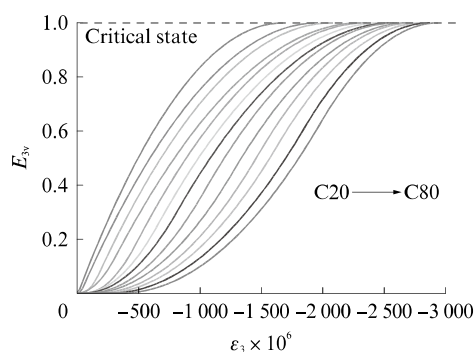


图 14 E_{3v} 演化曲线

Fig. 14 Evolution curves of E_{3v}

图 15 显示了断裂损伤变量 D_{3R} 的演化曲线. 由图 15 可见,随着强度等级的提高,混凝土的初始损伤应变逐渐增大, D_{3R} 的增长速率明显加快;同时由于均匀损伤阶段混凝土的延性逐渐增大,导致临界状态对应的 D_{3R} 值由 0.094 增大到 0.506.

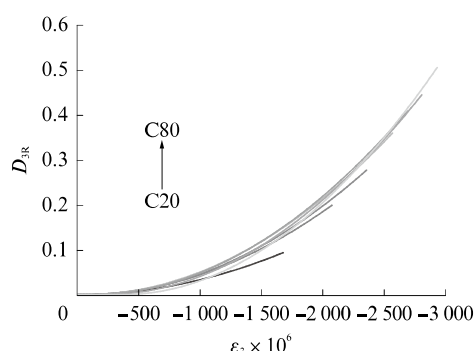


图 15 D_{3R} 演化曲线

Fig. 15 Evolution curves of D_{3R}

白卫峰等^[9,12]利用统计损伤模型对硫酸盐侵蚀环境以及动态应变率下混凝土单轴非线性应力-应变行为进行了分析,揭示了混凝土的细观损伤演化机制与宏观非线性本构行为之间的内在联系,表明了该方法的合理性和有效性.

4 结论

(1)混凝土材料变形破坏是一个损伤累积演化诱致局部灾变的 2 阶段过程. 在损伤累积阶段,微结构内部存在“劣化”和“强化”2 种作用机制;其中“强化”机制反映了应力重分布和受力骨架的优化调整,以及材料潜在承载能力的进一步释放过程. 本文详细描述了混凝土单轴拉伸、单轴压缩变形破坏过程中细观损伤机制与宏观非线性应力-应变行为之间

的内在联系,强调了细观“强化”机制在整个过程中起到关键作用.

(2)本文建立了考虑强度等级影响的混凝土单轴拉伸、压缩统计损伤模型,该模型考虑细观断裂和屈服 2 种损伤模式,分别与“劣化”和“强化”机制对应;同时利用本文模型预测规范建议的 C20~C80 混凝土单轴拉伸、单轴压缩应力-应变曲线. 结果表明:随着混凝土强度等级的提高,表征细观断裂和屈服损伤演化过程的特征参数表现出明显规律性的变化趋势;混凝土宏观非线性应力-应变行为由细观损伤演化机制决定. 区分峰值名义应力状态和临界状态,将后者作为损伤局部化和灾变破坏的前兆,能够在名义应力-应变曲线上上升段和下降段的损伤演化过程之间建立起有效的联系.

参考文献:

- [1] 张楚汉,金峰,周元德. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
ZHANG Chuhan, JIN Feng, ZHOU Yuande. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [2] FRANÇOIS D, PINEAU A, ZAOUÏ A. Mechanical behaviour of materials: volume II: Fracture mechanics and damage[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2012.
- [3] 李杰,张其云. 混凝土随机损伤本构关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10): 1135-1141.
LI Jie, ZHANG Qiyun. Study of stochastic damage constitutive relationship of concrete material[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2001, 29(10): 1135-1141. (in Chinese)
- [4] 白以龙,汪海英,夏蒙芬,等. 固体的统计细观力学—连接多个耦合的时空尺度[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 286-305.
BAI Yilong, WANG Haiying, XIA Mengfen, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 286-305. (in Chinese)
- [5] 夏蒙芬,韩闻生,柯孚久,等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(I)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1-40.
XIA Mengfen, HAN Wensheng, KE Fujiu, et al. Statistical meso-scopic damage mechanics and damage evolution induced catastrophe[J]. Advances in Mechanics, 1995, 25(1): 1-40. (in Chinese)
- [6] 纪洪广,贾立宏,李造鼎. 声发射参数的灰色尖点突变模型及其在混凝土断裂分析中的应用[J]. 声学学报, 1996, 21(6): 935-940.
JI Hongguang, JIA Lihong, LI Zaoding. Gray cusp catastrophe model of AE parameters and its application in fracture analysis of concrete material[J]. Acta Acustica, 1996, 21(6): 935-940. (in Chinese)
- [7] 荆昱,于广明,赵文彦,等. 混凝土声发射现象的协同效应及混

- 沌效应[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 80-84.
- JING Yu, YU Guangming, ZHAO Wenyan, et al. Synergistic effect and chaos effect of acoustic emission in concrete[J]. Journal of Shandong University of science and Technology (Natural Science), 2012, 31(4): 80-84. (in Chinese)
- [8] 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]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 670-681. (in Chinese)
- [9] 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): 1603-1611.
- 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): 1603-1611. (in Chinese)
- [10] BAI W F, CHEN J Y, LIN G, LIU Z G. The statistical damage constitutive model for concrete materials under uniaxial compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2010, 17(3): 338-344.
- [11] 白卫峰, 张树珺, 管俊峰, 等. 混凝土正交各向异性统计损伤本构模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 607-618.
- BAI Weifeng, ZHANG Shujun, GUAN Junfeng, et al. Orthotropic statistical damage constitutive model for concrete[J]. Shuili Xuebao, 2014, 45(5): 607-618. (in Chinese)
- [12] 白卫峰, 刘霖艾, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀混凝土本构模型研究[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 66-77.
- BAI Weifeng, LIU Linai, GUAN Junfeng, et al. Study on constitutive model of sulfate attack concrete based on statistical damage theory[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 66-77. (in Chinese)
- [13] 郝圣旺. 非均匀脆性介质损伤演化的一维准静态线性失稳及其发展[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(5): 459-464.
- HAO Shengwang. One-dimension damage evolution instability and its growth of heterogeneous brittle material under quasi-static loading[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(5): 459-464. (in Chinese)
- [14] WAWERSIK W R, BRACE W F. Post-failure behavior of a granite and diabase[J]. Rock Mech, 1971, 3(2): 61-85.
- [15] 张晓君. 岩石损伤统计本构模型参数及其临界敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 45-50.
- ZHANG Xiaojun. Parameters of statistical damage constitutive model for rocks and its critical sensibility analysis[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1): 45-50. (in Chinese)
- [16] VAN GEEL H. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1998.
- [17] LI Z J, SURENDRA P S. Localization of microcracking in concrete under uniaxial tension[J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(4): 372-381.
- [18] 董毓利, 谢和平, 李玉寿. 砼受压全过程声发射特性及其损伤本构模型[J]. 力学与实践, 1995, 17(4): 25-28.
- DONG Liuli, XIE Heping, LI Yushou. Acoustic emission characteristics and damage constitutive model of concrete under compression[J]. Mechanics in Engineering, 1995, 17(4): 25-28. (in Chinese)
- [19] XIAO J, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187-1194.