

考虑应变率效应的混凝土单轴压缩 统计损伤本构模型

白卫峰^{1,2}, 张哲¹, 管俊峰¹, 苑晨阳^{1,2}, 马颖^{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, 建立考虑应变率效应的混凝土单轴压缩统计损伤本构模型。考虑细观断裂和屈服两类损伤模式, 将临界状态作为均匀损伤阶段向局部破坏阶段过渡的转折点, 且滞后于峰值应力状态。在动态荷载作用下, 混凝土内部细观结构的力学性能发生变化, 同时微裂纹的扩展形态、路径和数量较准静态发生显著改变, 进而改变了两类细观损伤模式的演化过程, 可由 5 个特征参数来表征。开展混凝土单轴压缩动态力学性能试验, 获得了 10^{-5} ~ 10^{-2} /s 应变率范围内的应力-应变曲线。利用 6 组试验数据对模型进行验证, 结果表明: 模型预测曲线与试验曲线吻合良好, 表征细观损伤机制的特征参数随着应变率的提高显示出明显的规律性。该模型可以较好地描述混凝土的动态力学行为, 在应变率效应机理、细观损伤机制、宏观非线性本构行为之间建立起有效的联系。

关键词: 混凝土; 单轴压缩; 本构模型; 细观损伤机制; 应变率效应

中图分类号: TV331; TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1503-13

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.005

引言

混凝土在土木水利工程领域应用极其广泛。在实际工程中, 大多数混凝土结构都不可避免地要承受各种动态荷载的作用^[1], 例如机械振动、地震、台风、海啸等。动态荷载作用下, 混凝土呈现出明显的应变率效应^[2], 其力学性能受应变率影响显著。为了对混凝土结构进行可靠的设计分析与安全评价, 充分掌握混凝土的力学特性和细观机理是十分必要的。建立能够准确描述混凝土静、动态破坏机制的本构模型, 一直是混凝土理论研究的重点和热点问题。

目前, 学者们针对混凝土的动态力学特性开展了大量的试验研究^[1-7], 结果表明: 混凝土的强度与弹模随应变率的增大而增大, 而峰值应变如何随应变率变化目前还没有明确的结论。混凝土材料的率相关行为与内部细观结构的物理机制之间存在着密切的联系, Lu 等^[8]和 Jin 等^[9]将其归结为裂纹的扩展演化、黏性机制和惯性机制。在地震、冲击、爆炸等不同动态荷载作用下, 混凝土裂纹分布形态和破坏模式也会发生明显的改变。孙雪等^[10]观测了混凝土在 1×10^{-5} ~ 5×10^{-2} /s 应变率范围内单轴压缩破坏

后的形态特征。在静态加载下, 裂缝在混凝土表面竖向均匀分布; 随着应变率的增加, 试件表面减少为 2~3 条贯穿裂缝, 且大多为斜裂缝。田威等^[11]借助 CT 技术实时扫描观测了混凝土在正弦波动力压缩作用下的破坏过程; 图像显示动压作用下试件多个部位同时产生裂纹, 裂纹生成和扩展速度快, 贯通裂纹数量增多。刘练等^[12]借助落锤冲击装置, 对 C30 圆柱体试件进行了冲击试验。发现试件在 10^{-1} ~ 10^0 /s 应变率范围内破坏形态相似, 两端形成 2 个相对的圆锥, 中部破坏后存在较多的柱条状碎块, 冲击高度越高, 中部破坏越严重。刘传雄等^[13]利用高速摄影装置获得了混凝土在 30~180/s 应变率范围内冲击破坏过程中的摄影图片; 图片显示当试件达到极限强度时, 出现一条轴向可见宏观裂纹, 此后该裂纹快速扩展、变宽, 并产生多条沿试样轴向扩展的裂纹。Feng 等^[14]对泡沫混凝土开展了应变率范围为 60~250/s 的动态冲击试验, 观察了试样的破坏特征。在较低应变率下, 试样破坏呈碎块状; 随着应变率的提高, 试样损坏更加严重, 碎块变小且数量减少, 粉末状碎屑明显增多。为能准确模拟混凝土在复杂应力状态下的力学行为, 一些学者建立了相应的动态本构模型。张研等^[15]在一般弹塑性损伤模型的基础上, 建立了应变率型弹塑性损伤本构模型, 可

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679092, 52179132); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2021GGJS074)。

以预测应变率在 $10^{-7} \sim 10^2/s$ 范围内混凝土的动态强度。李杰等^[16]考虑孔隙水对混凝土应变率敏感性的影响,从 Stefan 效应出发,建立了混凝土动力随机损伤本构关系,能够描述单调与反复加载条件下的混凝土力学行为。Huang 等^[17]对碳纤维与聚丙烯纤维混凝土开展了动态压缩试验,建立了基于损伤力学的混凝土单轴压缩动态本构模型,可以很好地描述纤维混凝土的动态力学性能。张永亮等^[18]对干燥与饱和混凝土进行了一系列的动静态压缩试验,基于损伤力学建立了简化的损伤本构模型,能够反映干燥与饱和状态下混凝土的应力-应变关系。张社荣等^[19]制备了 2 种级配的碾压混凝土试样并开展了动态冲击试验,建立了碾压混凝土损伤本构模型,能够有效地模拟碾压混凝土的动态压缩特性。陈伟等^[20]开展了不同尺寸混凝土试件的单轴压缩试验,建立了考虑尺寸效应的混凝土动态本构模型,并对不同尺寸混凝土试件的应力-应变曲线进行了拟合分析。张明虎等^[21]研究了沙漠砂混凝土的动态力学性能,在非线性的热黏弹性本构模型(ZWT 模型)基础上,建立沙漠砂混凝土动态本构模型,可较好地描述沙漠砂混凝土在应变率为 $10^{-6} \sim 10^{-4}/s$ 范围内的力学行为。如上所述,现有的混凝土动态试验大多集中于对宏观力学性能的研究,很难揭示混凝土的破坏机理与细观损伤演化规律,而从细观角度描述混凝土非线性力学行为的本构模型还很少。

混凝土作为一种典型的非均质复合材料,其内部存在着大量不连续的缺陷(微裂纹和微孔洞)。混凝土变形破坏实质上是内部微裂纹、微孔洞等微缺陷成核、萌生、扩展的结果,统计损伤力学已成为模拟混凝土等准脆性材料微裂纹渐进扩展过程非线性行为的有力工具^[22-27]。该类模型将材料代表性体积单元抽象为由无数个细观单元(微弹簧、微杆件等)组成的复杂系统,通过赋予每个细观单元不同的力学参数(强度、特征应变等)并假设其服从韦伯、正态等统计分布形式,引入材料的细观非均质性,能够在细观损伤机制与宏观非线性本构行为之间建立起有效的联系。

根据采用的细观力学指标参数的不同,现有统计损伤模型可分为以下两类:①单参数模型,以 Krajcinovic 等^[22]提出的平行杆模型(PBS 模型)为代表。每个细观单元被赋予一个特征参量:断裂应变(或断裂强度);存在一种破坏模式:脆性断裂,定义为断裂损伤,表征微裂纹的萌生和扩展过程。不足之处:该类模型实质上描述的是一种理想化的细观非均质弹脆性体单一均匀损伤演化过程,无法反映微裂纹之间的相互作用,也无法有效反映真实准脆性材料变形过程中所表现出的分布式损伤累积和局部突变两

阶段特征。②双参数模型,以白卫峰等^[25]提出的修正平行杆模型(IPBS 模型)为代表。每个细观单元被赋予两个特征参量:断裂应变和屈服应变。其存在两种破坏模式:弹性断裂和屈服断裂,分别定义为断裂损伤和屈服损伤。其中屈服损伤模式表征微裂纹的相互作用以及微结构受力骨架的优化调整过程,在整个变形破坏过程中起到关键的作用。该类损伤模型将混凝土等准脆性材料变形破坏描述为一类由细观损伤累积演化驱动的量变到质变的过程,能够有效反映真实材料变形和破坏的两阶段特征。

基于统计损伤理论,本文建立了考虑应变率效应的混凝土单轴压缩统计损伤模型。通过试验获得 $10^{-5} \sim 10^{-2}/s$ 应变率范围内的混凝土单轴压缩应力-应变曲线,同时整理了文献[2-5]中的 5 组试验数据,利用试验结果验证模型的合理性与适用性,分析应变率效应对细观损伤参数的影响规律,探讨细观损伤机制与宏观非线性本构行为之间的内在关系。

1 两阶段特征

1.1 试验现象

宏观试验表明,与单轴拉伸相似,混凝土在单轴压缩下的变形和破坏也可分为分布损伤和局部破坏两个阶段^[27]。如图 1 所示,其中 L 为试件长度, σ 为压应力, ϵ_0 为极限压应变。在初始阶段,由于泊松效应,混凝土基体中会产生局部拉应力和应变。当局部拉应变超过极限时,会发生微裂纹和微缺陷的萌生、扩展,方向大致平行于压应力。在此阶段,微裂纹随机产生并分布在整个试件范围内,微裂纹密度保持较小的程度;整个试件可近似认为处于均匀损伤和变形状态。随着压力的增加,当微观损伤累积到一定阈值时,由于微裂纹的连接和扩展,就会形成宏观的纵向拉伸裂纹;同时出现损伤局部化,形成压缩破坏区(Compression Failure Zone, CFZ)。图 1 中 h 为 CFZ 的长度,在 CFZ 中,随着纵向裂纹的扩展和局部化剪切带的出现,压缩损伤将进一步加剧。与此同时,其余部位将出现卸载现象并保持连续体状态。Markeset 等^[28]和 Jansen 等^[29]建议 CFZ 长度为试件宽度(直径)的 2~2.5 倍。Nakamura 等^[30]的试验结果显示 CFZ 长度与试件的形状和尺寸无关,而与最大骨料尺寸、骨料级配和抗压强度有关。针对 CFZ 长度的影响因素还存在争议。破坏阶段的局部化行为加深了问题的复杂性,增大了预测难度,导致该阶段应力-应变行为难以再用整体平均量统一表示。

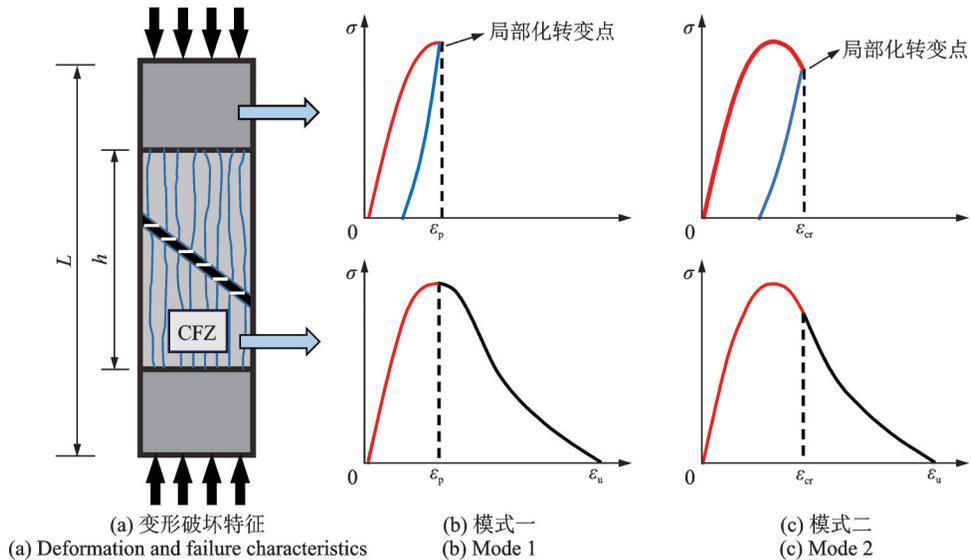


图1 两阶段特征

Fig. 1 Two stage characteristics

白以龙等^[31]和夏蒙芬等^[32]基于突变理论将岩石、混凝土等准脆性固体变形破坏过程分为分布式损伤累积和诱发局部灾变两个阶段,其中的转变点(临界状态)具有关键意义。当材料临近灾变破坏时,与内部损伤有关的物理量如变形、声发射信号、电磁信号等会出现异常现象。临界敏感性、跨尺度涨落和损伤局部化是触发固体灾变破坏的共性前兆特征。白卫峰等^[6,33]将混凝土变形破坏过程理解为材料系统能动地适应外界荷载环境变化的自组织行为,细观结构中存在2类作用机制:①劣化效应,表征微裂纹的萌生、扩展及声发射等能量耗散行为;②强化效应,表征细观结构中应力重分布及受力骨架优化调整(潜在力学性能进一步发挥)。当材料潜在力学性能发挥到极限时,将会触发局部灾变破坏。

1.2 局部化转变点

混凝土非线性的本构行为与宏观变形破坏特征、细观损伤机制之间密切相关。灾变前兆是近年来学者们关注的研究热点,关于局部化转变点(临界状态)在应力-应变曲线上的对应位置还没有明确结论,主要存在以下两种观点:

第一种,认为转变点和峰值名义应力状态为同一状态,如图1(b)所示,其中 ϵ_p 为峰值应变。在Markeset等^[28]建立的压缩损伤区模型中,考虑了损伤局部化,并将转变点视为与名义应力峰值状态相同的状态。当名义应力达到峰值时,随即发生损伤和变形局部化现象,在CFZ内损伤进一步加剧,其余区域出现卸载。CFZ内的软化行为是由于纵向拉伸裂纹的扩展和局部剪切带的形成共同作用导致的,应力-应变曲线的平均软化段分支由CFZ和卸载区的变形共同决定。

第二种,认为转变点滞后于峰值名义应力状态,如图1(c)所示,其中 ϵ_{cr} 为局部化转变点对应应变。Geel^[34]在混凝土单轴压缩试验中,沿试件高度方向布置应变片,并借助高速摄像技术重点观测了变形和损伤局部化现象。结果显示局部化转变点滞后于峰值名义应力状态,位于应力-应变曲线软化段的“陡峭”部位。CFZ以外区域在经历一定的软化变形后才出现卸载现象,即卸载部位对软化段曲线存在一定的贡献。在局部破坏阶段,对应的应力-应变曲线软化段形状存在明显的尺寸效应,与试件尺寸或位移计量程有关。随着量程的增加,软化段变得更加陡峭,甚至会出现应力跌落现象。通过具体试验得到的局部破坏阶段软化曲线不能代表纯粹的材料属性。郝圣旺^[35]、张晓君^[36]在岩石压缩试验中同样观测到局部化转变点滞后于峰值名义应力状态。纪洪广等^[37]和董毓利等^[38]在混凝土单轴压缩试验中采集了声发射信号,结果显示声发射突变点滞后于峰值名义应力状态,发生在软化阶段。

2 统计损伤模型

Bai等^[27]和白卫峰等^[39-41]建立了混凝土单轴压缩统计损伤模型,压缩方向损伤由泊松效应引起的侧向拉损伤控制。如图2所示,A,B和C分别为初始损伤状态、峰值名义应力状态和临界状态; ϵ^+ 为等效传递拉损伤应变,满足 $\epsilon^+ = -\nu\epsilon$, ν 为泊松比。将混凝土单轴压缩过程分为均匀损伤和局部破坏两个阶段,考虑断裂和屈服两类细观损伤模式(可分别由微杆件的断裂和屈服模拟),对应的概率密度函数分别为 $q(\epsilon^+)$ 和 $p(\epsilon^+)$,与细观结构中“劣化”和“强化”效应对应。模型中临界状态被赋予了特定的含义,

其不仅是混凝土宏观变形从均匀损伤阶段向局部破坏阶段转变的状态,还是细观损伤演化累积由量变到质变的标志;细观屈服损伤模式反映了细观结构中微裂纹的相互作用以及有效受力骨架优化调整的过程,在整个过程中起到核心作用。临界状态滞后于峰值状态,位于名义应力-应变曲线的峰后软化段上,这与 Geel^[34]的试验结果是一致的。如图 2 所示, ϵ_{cr} 为临界状态对应应变; ϵ_a 和 ϵ_b 与 ϵ^+ 对应, 分别表示初始损伤应变和最大屈服损伤应变, $\epsilon_b = -\nu\epsilon_{cr}$ 。

在均匀损伤阶段,本构关系表示如下:

$$\sigma = E(1 - D_y)(1 - D_R)\epsilon \quad (1)$$

$$\sigma_E = E(1 - D_y)\epsilon \quad (2)$$

$$D_y = \int_0^{\epsilon^+} p(\epsilon^+) d\epsilon^+ - \frac{\int_0^{\epsilon^+} p(\epsilon^+)\epsilon^+ d\epsilon^+}{\epsilon^+} \quad (3)$$

$$D_R = \int_0^{\epsilon^+} q(\epsilon^+) d\epsilon^+ \quad (4)$$

$$E_v = \int_0^{\epsilon^+} p(\epsilon^+) d\epsilon^+ \quad (5)$$

式中 σ 和 σ_E 分别为名义应力和有效应力; E 为弹性模量; D_R 和 D_y 分别为断裂和屈服损伤变量; E_v 为进化因子,和细观屈服损伤相关,表征材料受力骨架优化调整的程度,变化范围为 0~1。当 $E_v=1$ 时,对应临界状态,细观结构受力骨架调整至最优,有效应力达到最大值,随即触发局部突变过程。

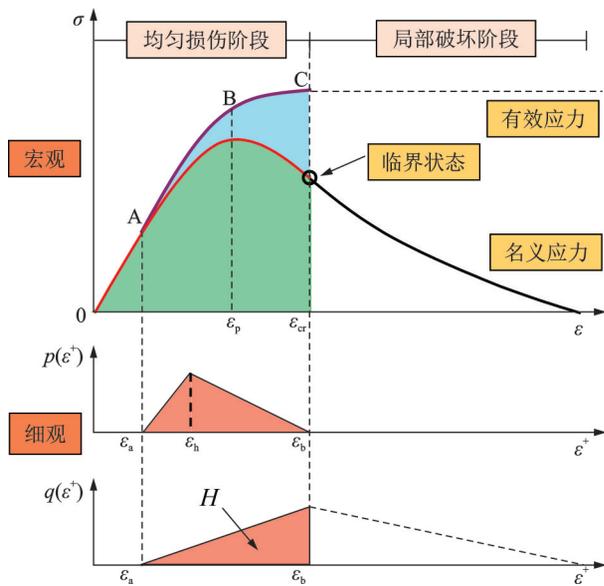


图 2 宏观本构行为与细观损伤机制的对应关系

Fig. 2 Relationship between macro constitutive behavior and meso-damage mechanism

3 动态应变率影响

目前,关于混凝土应变率效应的物理机理主要

有以下 5 种观点^[8-9,42-43]: ①黏性效应:由于混凝土基体微孔隙内部存在自由水,动态荷载作用下微孔隙内产生 Stefan 效应,即产生了阻碍微裂纹萌生、扩展的阻力,进而导致混凝土强度提高。②惯性效应:惯性力的作用限制试件的变形,在高应变率下惯性效应可以显著提高混凝土强度。③裂纹的扩展演化:与静载下裂纹大多沿细观结构薄弱界面过渡区(Interface Transition Zone, ITZ)扩展不同,动载下大部分裂纹穿过强度较高的骨料,使得强度明显提高。④断裂韧性:断裂韧性反映了材料抵抗裂纹扩展的能力,对于混凝土中的微单元,每个裂纹在动态加载下都会产生扩展阻力。应变率越高,扩展阻力越大,强度越高。⑤能量耗散:静态破坏时,混凝土内部应变能积聚与释放的速度较慢,裂纹沿着内部薄弱界面扩展;而动态破坏时,应变能积聚的速度快,需要在瞬间得到释放,裂纹沿着能量释放最短的路径扩展,即穿过强度较高的骨料,使得混凝土的动强度高于静强度。

上述观点所提出的物理机制虽然各不相同,但对混凝土动态力学性能的影响效应均可概括如下:一方面,改变了混凝土细观结构的受力性能,提高了混凝土细观结构的“刚度”,可由初始弹性模量 E 表征;另一方面,改变了混凝土细观结构中微缺陷萌生和扩展的路径、形态和数量;即改变了混凝土细观损伤机制的累积演化过程,可由统计损伤模型中的 $q(\epsilon^+)$ 和 $p(\epsilon^+)$ 进行表征。

事实上, $q(\epsilon^+)$ 和 $p(\epsilon^+)$ 可能服从韦伯、正态等复杂的统计分布规律,为便于简化分析,可假设 $q(\epsilon^+)$ 和 $p(\epsilon^+)$ 服从三角形概率分布形式(如图 2 所示)。研究表明^[25-27],当二者均采用三角形分布时就能很好地拟合混凝土试验应力-应变曲线,并能反映出细观损伤机制的演化规律,表达式如下^[33]:

$$q(\epsilon^+) = \begin{cases} 0, & \epsilon^+ \leq \epsilon_a \\ \frac{2H(\epsilon^+ - \epsilon_a)}{(\epsilon_b - \epsilon_a)^2}, & \epsilon_a < \epsilon^+ \leq \epsilon_b \end{cases} \quad (6)$$

$$p(\epsilon^+) = \begin{cases} 0, & \epsilon^+ \leq \epsilon_a \\ \frac{2(\epsilon^+ - \epsilon_a)}{(\epsilon_h - \epsilon_a)(\epsilon_b - \epsilon_a)}, & \epsilon_a < \epsilon^+ \leq \epsilon_h \\ \frac{2(\epsilon_b - \epsilon^+)}{(\epsilon_b - \epsilon_h)(\epsilon_b - \epsilon_a)}, & \epsilon_h < \epsilon^+ \leq \epsilon_b \end{cases} \quad (7)$$

式中 ϵ_b 和 ϵ_h 分别为 $q(\epsilon^+)$ 和 $p(\epsilon^+)$ 峰值对应应变; $H = D_R(\epsilon_b)$ 为临界状态对应断裂损伤值。

如图 3 所示,混凝土宏观非线性应力-应变行为由细观尺度上内部结构的“刚度”和损伤演化过程共同决定,可由 $E, \epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 和 H 共 5 个参数表征。假设在不同加载应变率下,混凝土初始“刚度”和细观损伤演化过程服从一定的规律性,上述 5 个参数可以

表示为与应变率 $\dot{\epsilon}$ 相关的函数。本文引入动态影响因子(Dynamic Impact Factor, DIF),将其定义为材料参数在动态荷载作用下与准静态荷载作用下的比值,上述 5 个特征参数对应的动态影响因子分别表示为 $DIF_E, DIF_a, DIF_h, DIF_b$ 和 DIF_H ,表达式如下:

$$\begin{cases} DIF_E = E_d/E_s = f_1(\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)) \\ DIF_a = \epsilon_{a,d}/\epsilon_{a,s} = f_2(\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)) \\ DIF_h = \epsilon_{h,d}/\epsilon_{h,s} = f_3(\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)) \\ DIF_b = \epsilon_{b,d}/\epsilon_{b,s} = f_4(\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)) \\ DIF_H = H_d/H_s = f_5(\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)) \end{cases} \quad (8)$$

式中 下标带“d”和“s”的变量分别表示混凝土在动态应变率下和准静态应变率下对应参数,通常取准静态应变率为 $\dot{\epsilon}_s=10^{-5}/s$ 。

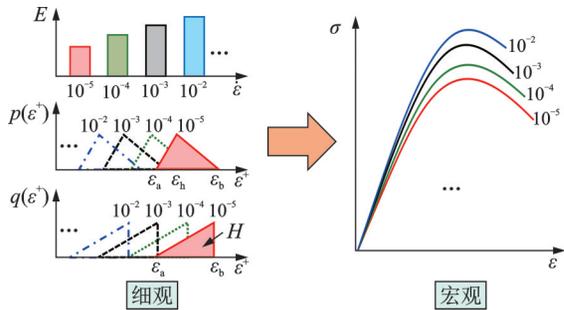


图 3 应变率对混凝土微观损伤机制的影响

Fig. 3 Effect of strain rate on meso damage mechanism of concrete

在本文建立的混凝土动态损伤本构模型中,关键工作是确定上述 5 个特征参数随应变率的演化规律,具体取值可根据不同应变率下混凝土单轴压缩应力-应变试验曲线确定。其中: E 由曲线上升段初

始切线模量确定; $\epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 和 H 利用 MATLAB 遗传算法模块通过多元回归分析确定^[40-41],具体步骤如下:①创建适应度函数,以应力预测值和实测值离差的最小平方和作为优化判据,包含 $\epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 和 H 共 4 个参数;②初设 4 参数取值区间;③执行遗传算法,获得本次迭代计算中 4 参数最优解,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。

4 试验验证与分析

本文开展了混凝土单轴动态压缩试验,配合比为 $m_{水泥}:m_{水}:m_{砂}:m_{石子}:m_{减水剂}=1:0.49:1.73:3.27:0.0025$ 。水泥为河南丰博天瑞生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径范围 5~20 mm 的碎石,细骨料为天然河砂(细度模数 2.6,中砂),水为郑州市自来水,减水剂为聚羧酸高效减水剂。试件采用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,浇筑成型 1 d 后拆模,放入标准养护室养护 28 d。单轴压缩试验在 YAW-5000 型微机控制电液伺服压力试验机上进行,试验中采用 $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}/s$ 四种应变率,本文试验记为 GP-1。文献[2-5]分别开展了混凝土动态压缩试验,获得 5 组不同应变率下混凝土单轴压缩动态应力-应变全曲线,分别记为 GP-2~GP-6。上述 6 组试验的基本信息如表 1 所示。其中 $f_{c,s}, E_s$ 和 $\epsilon_{p,s}$ 为准静态应变率下对应的抗压强度、弹性模量和峰值应变。利用本文建立的损伤本构模型对 6 组试验数据进行反演分析,确定 5 个参数随应变率的演化规律,探讨动态压缩过程中混凝土微观损伤机制与宏观非线性力学行为之间的联系。文中压缩力/应变为负,拉应力/应变为正,泊松比 $\nu=0.2$ 。

表 1 试验基本信息

Tab. 1 Basic information of tests

组别	来源	$f_{c,s}/MPa$	E_s/GPa	$\epsilon_{p,s}/(\times 10^{-4})$	试件尺寸/ mm^3	骨料粒径/mm	应变率/ s^{-1}
GP-1	本文	49.14	21.00	-30.08	100×100×100	5~20	$10^{-5}\sim 10^{-2}$
GP-2	闫东明 ^[2]	9.84	14.40	-12.00	100×100×100	最大 10	$10^{-5}\sim 10^{-2}$
GP-3	施林林等 ^[3]	24.51	27.60	-20.81	150×150×150	5~40	$2\times 10^{-5}\sim 2\times 10^{-2}$
GP-4	肖诗云等 ^[4]	25.65	25.99	-11.08	100×100×100	最大 20	$10^{-5}\sim 10^{-2}$
GP-5	刘录良 ^[5]	46.09	41.43	-13.16	70×70×200	5~20	$10^{-5}\sim 10^{-2}$
GP-6	刘录良 ^[5]	38.75	31.50	-14.67	70×70×200	5~20	$10^{-5}\sim 10^{-2}$

注:GP-1,GP-5,GP-6 组中 $f_{c,s}, E_s$ 和 $\epsilon_{p,s}$ 为典型试验曲线的抗压强度、弹性模量和峰值应变;其余组中 $f_{c,s}, E_s$ 和 $\epsilon_{p,s}$ 为文献中提供的平均抗压强度、弹性模量和峰值应变。

4.1 应力-应变曲线

图 4(a)显示了 GP-1 组试验获得的 4 条单轴压缩名义应力-应变曲线。不同应变率下对应曲线的

形状具有相似性,峰值应力、峰值应变和弹性模量随应变率的提高而增大。图 4(a)中同时显示了本文模型预测的单轴压缩均匀损伤阶段对应的名义应力-应变曲线,包含上升段和部分下降段,且下降段

随应变率的增加而变短。预测曲线与试验曲线显示出很好的相关性,吻合良好。

图 4(b)~(f)分别显示了 GP-2~GP-6 组试验获得的混凝土单轴压缩动态应力-应变曲线。其中, GP-4 组峰值应变随应变率的提高呈现明显减小的

趋势,且下降段较其他组更加陡峭。其余组应力-应变曲线与 GP-1 组具有相似的变化趋势和形态特征。图中同样显示了利用本文模型预测的均匀损伤阶段对应的名义应力-应变曲线,与试验曲线吻合良好。计算参数如表 2 所示,其中 R^2 为相关系数。

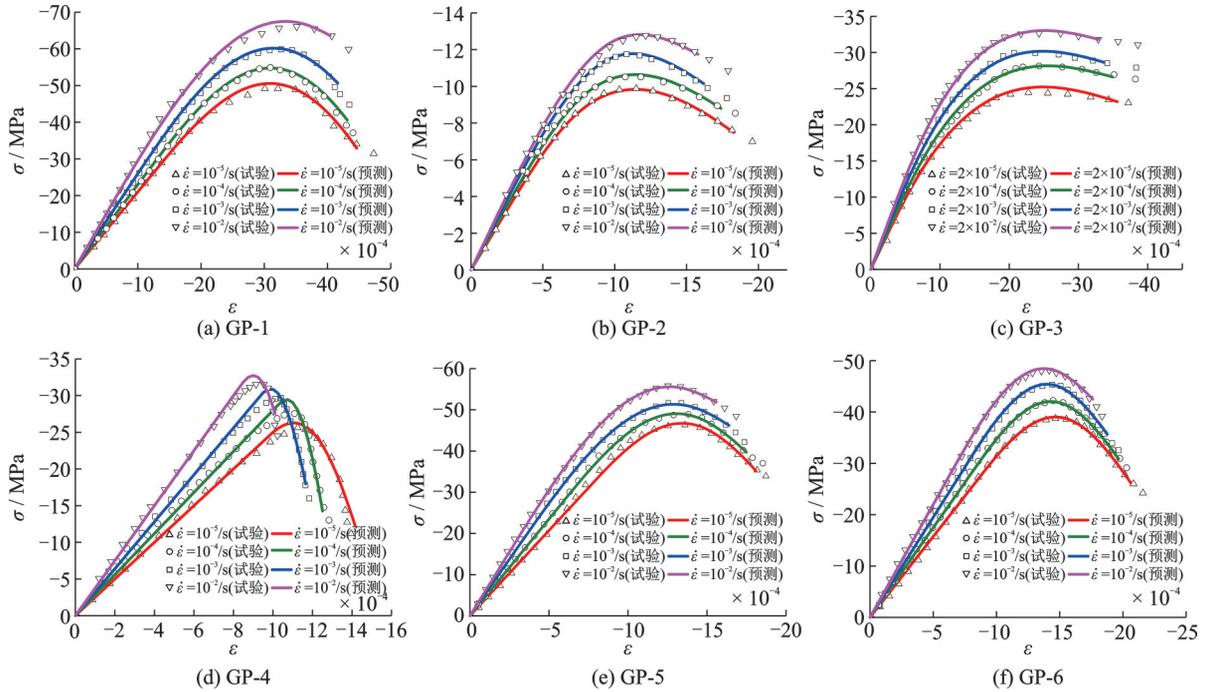


图 4 名义应力-应变曲线

Fig. 4 Nominal stress-strain curves

表 2 计算参数

Tab. 2 Calculation parameters

组名	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	E/GPa	$\epsilon_a/(\times 10^{-4})$	$\epsilon_h/(\times 10^{-4})$	$\epsilon_b/(\times 10^{-4})$	H	R^2
GP-1	10^{-5}	21.00	2.676	8.667	8.923	0.536	0.9976
	10^{-4}	23.00	2.467	8.366	8.622	0.455	0.9980
	10^{-3}	26.00	1.866	7.970	8.323	0.356	0.9988
	10^{-2}	30.00	0.667	7.467	8.084	0.216	0.9979
GP-2	10^{-5}	13.00	0.456	1.424	3.658	0.376	0.9982
	10^{-4}	14.00	0.407	1.554	3.479	0.306	0.9977
	10^{-3}	15.30	0.356	1.903	3.237	0.277	0.9967
	10^{-2}	16.30	0.255	2.035	3.158	0.206	0.9989
GP-3	2×10^{-5}	20.00	0.354	1.040	7.122	0.183	0.9991
	2×10^{-4}	21.50	0.305	1.368	6.978	0.141	0.9982
	2×10^{-3}	23.70	0.255	1.396	6.738	0.136	0.9984
	2×10^{-2}	26.00	0.228	1.427	6.601	0.111	0.9987
GP-4	10^{-5}	25.00	1.977	2.527	2.832	0.600	0.9968
	10^{-4}	28.00	2.066	2.226	2.502	0.550	0.9927
	10^{-3}	32.00	1.883	2.027	2.331	0.461	0.9964
	10^{-2}	37.50	1.682	1.957	2.020	0.222	0.9961
GP-5	10^{-5}	41.43	1.602	2.963	3.618	0.377	0.9976
	10^{-4}	47.00	1.242	2.907	3.498	0.338	0.9993
	10^{-3}	55.00	0.654	2.853	3.279	0.257	0.9992
	10^{-2}	62.00	0.503	2.703	3.118	0.207	0.9993
GP-6	10^{-5}	31.50	1.790	3.158	4.122	0.450	0.9994
	10^{-4}	35.00	1.701	3.028	3.932	0.390	0.9997
	10^{-3}	39.00	1.603	2.958	3.753	0.339	0.9988
	10^{-2}	44.00	1.301	2.899	3.521	0.250	0.9996

图 5(a)~(f)显示了本文模型预测的 6 组试验均匀损伤阶段对应的有效应力-应变曲线。该模型从有效应力角度理解混凝土单轴压缩过程:在均匀损伤阶段, σ 先增大后减小, 中间存在峰值名义应力状

态; σ_E 单调增大, 在临界状态达到最大值, 随后进入以损伤局部化为特征的破坏阶段。

定义 DIF_σ 和 DIF_ϵ 分别为动态与准静态应变率下峰值应力、峰值应变的比值。

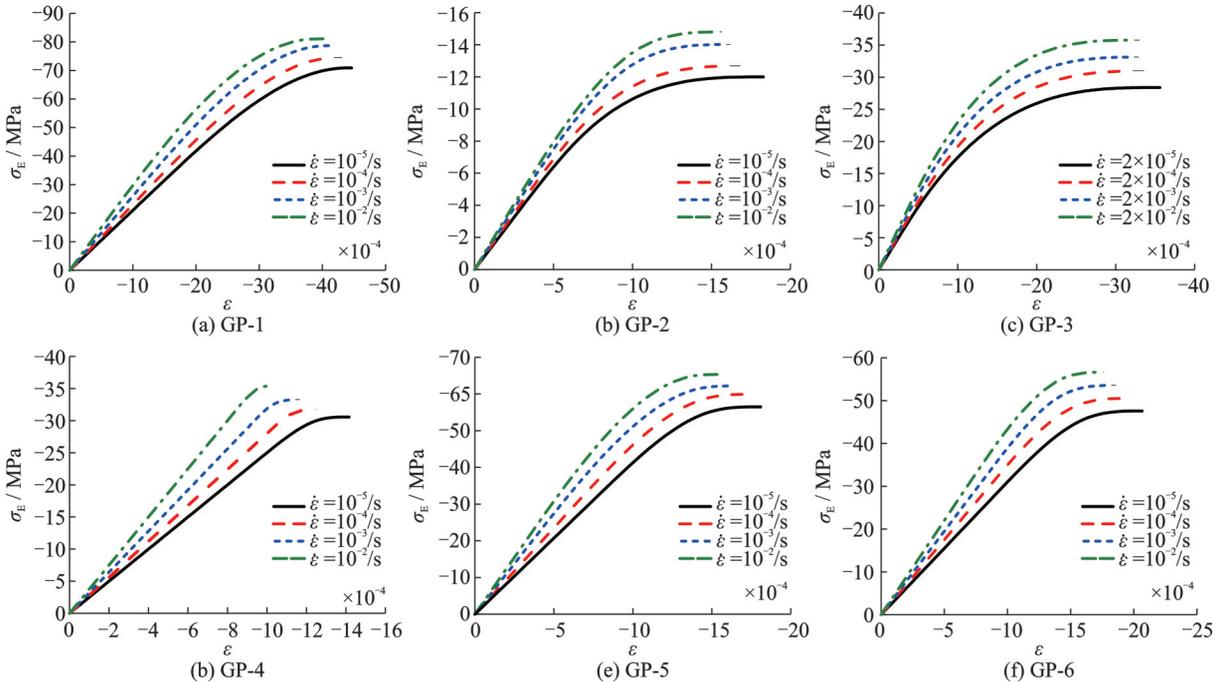


图 5 有效应力-应变曲线

Fig. 5 Effective stress-strain curves

4.1.1 峰值应力

图 6 显示了 DIF_σ 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 之间的关系。对于 GP-1, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 增大到 $10^{-2}/s$ 时, 峰值应力 σ_p 由 -49.14 MPa 线性增大到 -66.06 MPa, 提高了 34.43%。其余 5 组试验中 σ_p 与 $\dot{\epsilon}$ 之间同样呈现良好的线性增长趋势。通过回归分析获得的拟合曲线和公式如图 6 所示。其中 R^2 为相关系数, CV 为变异系数。结果显示 $\dot{\epsilon}$ 每增大 10 倍, DIF_σ 平均提高 9.02%。

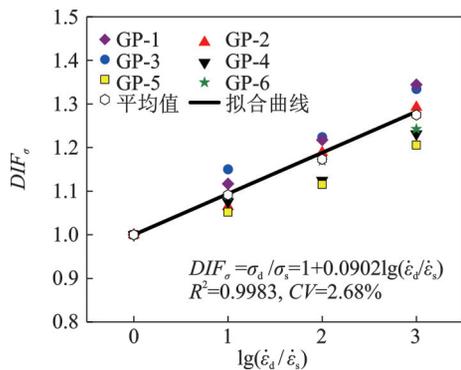


图 6 DIF_σ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 6 DIF_σ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

4.1.2 弹性模量

图 7 显示了 DIF_E 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 之间的关系。对

于 GP-1, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 增大到 $10^{-2}/s$ 时, E 由 21.00 GPa 线性增大到 30.00 GPa, 提高了 42.86%。其余 5 组试验中 E 与 $\dot{\epsilon}$ 之间同样呈现良好的线性增长趋势, 通过回归分析获得的拟合曲线和公式如图 7 所示。结果显示 $\dot{\epsilon}$ 每增大 10 倍, DIF_E 平均提高 12.66%。

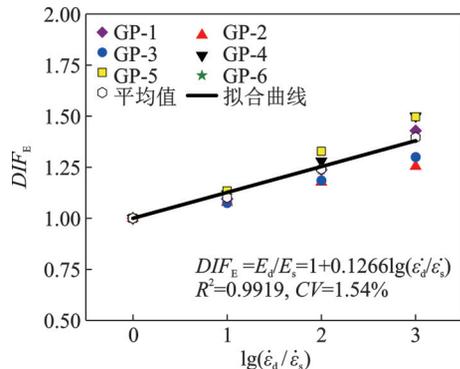


图 7 DIF_E - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 7 DIF_E - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

4.1.3 峰值应变

图 8 显示了 DIF_ϵ 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 之间的关系。对于 GP-1, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 增大到 $10^{-2}/s$ 时, 峰值应变 ϵ_p 由 -30.08×10^{-4} 增大到 -35.13×10^{-4} , 提高了 16.79%。随着 $\dot{\epsilon}$ 的提高, 6 组试验中 ϵ_p 的变化趋势并

不一致。其中,GP-1与GP-3组 DIF_ϵ 随 $\dot{\epsilon}$ 的增大呈明显增大趋势;GP-2组 DIF_ϵ 基本没有变化;GP-4, GP-5与GP-6组的 DIF_ϵ 呈近似线性减小的趋势,当 $\dot{\epsilon}$ 增大到 $10^{-2}/s$ 时GP-4组 $DIF_\epsilon = 0.81$ 。通过回归分析获得的拟合曲线如图8所示。曾莎洁等^[7]认为,峰值应变存在的这种现象主要和混凝土材料的离散性和率相关效应的耦合作用有关。

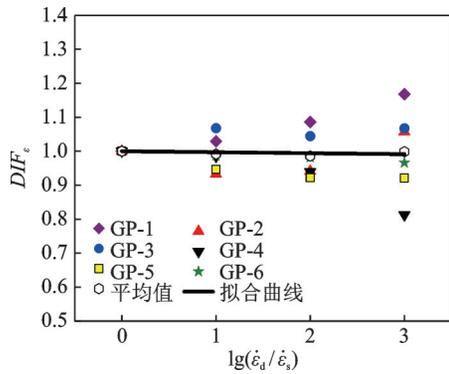


图 8 DIF_ϵ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 8 DIF_ϵ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

4.2 细观损伤参数及损伤机制分析

图9显示了GP-1组对应的屈服损伤相关参数 $\epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 随 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 的变化曲线,上述3个特征参数控制着 $\rho(\epsilon^+)$ 的三角形分布形态,根据其变化趋势即可确定动态加载应变率对混凝土细观屈服损伤演化过程的影响规律。随着应变率的增加,3个参数均呈现出线性减小的趋势。 $\epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 分别由 $\dot{\epsilon}$ 为 $10^{-5}/s$ 时的 $2.676 \times 10^{-4}, 8.667 \times 10^{-4}$ 和 8.923×10^{-4} ,减小到 $10^{-2}/s$ 时的 $0.667 \times 10^{-4}, 7.467 \times 10^{-4}$ 和 8.024×10^{-4} 。 ϵ_h 与 ϵ_b 非常接近,且减小的速率几乎一致。

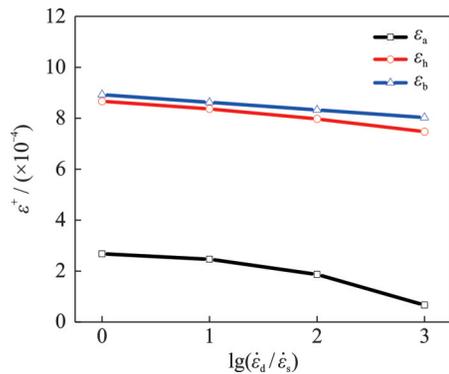


图 9 ϵ^+ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系曲线(GP-1)

Fig. 9 ϵ^+ - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation curves(GP-1)

图10显示了GP-1组对应的断裂损伤相关参数 H 随 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 的变化曲线。 H 表征临界状态对应的微裂纹密度,随着应变率的增加, H 呈现出线性减小

的趋势,由 $\dot{\epsilon}$ 为 $10^{-5}/s$ 时的 0.536 减小到 $10^{-2}/s$ 时的 0.216。 H 的变化趋势与试验现象是一致的。在高应变率加载过程中,微裂纹往往直接穿过骨料,而不是沿着骨料和砂浆交界面的薄弱部位扩展,从而导致裂纹的长度和数量均有所减少。孙雪等^[10]的试验结果显示高应变率下混凝土试件破坏前的表面裂缝数量较低应变率下明显减少。

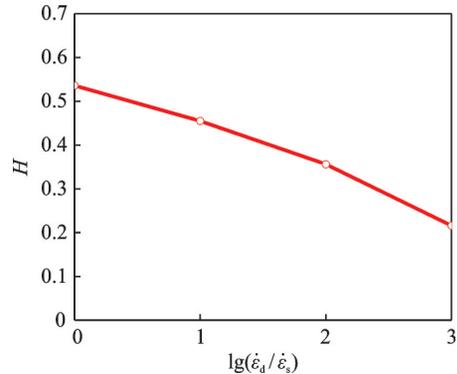


图 10 H - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系曲线(GP-1)

Fig. 10 H - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation curve(GP-1)

图11显示了GP-1组中进化因子 E_v 的演化曲线。在均匀损伤阶段, E_v 的变化范围为 0~1,在整个损伤演化过程中发挥了关键作用。结果显示,随着 $\dot{\epsilon}$ 的增大,临界应变 ϵ_{cr} 线性减小,由 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}/s$ 时的 -44.62×10^{-4} 减小到 $\dot{\epsilon} = 10^{-2}/s$ 时的 -40.42×10^{-4} ; E_v 的演化进程显著加快。从变形的角度看,在相同应变的情况下, $\dot{\epsilon}$ 越高, E_v 值越大。因此,在高应变率下混凝土更早地达到临界状态,导致变形能力降低,延性变差。当 $E_v = 1$ 时达到临界状态,意味着细观结构受力骨架已被调整至最优,材料潜在力学性能发挥到极限,试件随即进入局部破坏阶段。

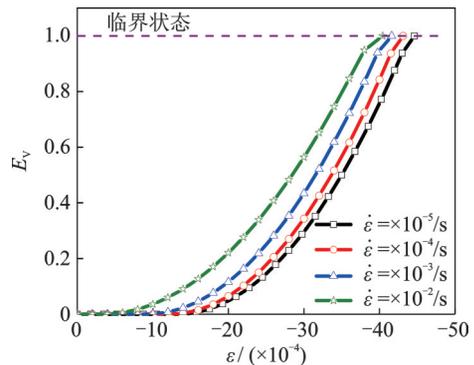


图 11 E_v 演化曲线(GP-1)

Fig. 11 E_v evolution curves(GP-1)

图12显示了GP-1组中断裂损伤 D_R 的演化曲线。 D_R 与微裂纹萌生、扩展过程相关。与 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}/s$ 的准静态加载过程相比较,随着 $\dot{\epsilon}$ 的增大, D_R 的演化

过程呈现前期加快而后期减缓的趋势。同时由于高应变率下混凝土更早地达到临界状态,导致临界状态对应的 D_R 值随应变率的增加而减小,由 $\dot{\epsilon}=10^{-5}/s$ 时的 0.536 减小到 $\dot{\epsilon}=10^{-2}/s$ 时的 0.216。在整个均匀损伤阶段,微裂纹密度仍维持在较小的范围内。

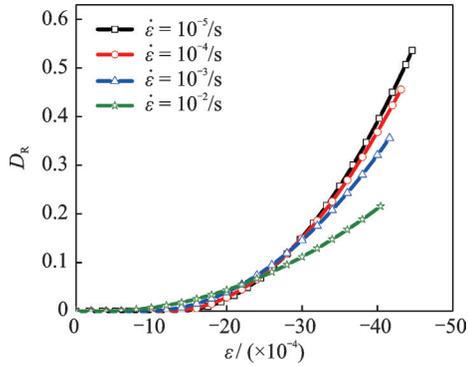


图 12 D_R 演化曲线(GP-1)
Fig. 12 D_R evolution curves(GP-1)

为使获得的细观损伤特征参数的演化规律更具代表性,本文进一步将 6 组试验数据获得的损伤参数值进行汇总。

图 13~15 中显示了屈服损伤相关参数对应动态影响因子 DIF_a , DIF_h 和 DIF_b 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 之间的关系。可以看出,对于每组试验,3 个参数与应变率之间均呈明显的线性关系;从 6 组试验数据整体来看,不同试验对应的 3 个参数随应变率的变化趋势也同样呈现较好的相关性。图 13~15 中同时显示了通过回归分析获得的线性拟合曲线,拟合公式如下:

$$DIF_a = \epsilon_{a,d}/\epsilon_{a,s} = 1 - 0.1382\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s),$$

$$R^2 = 0.9798, CV = 17.78\% \quad (9)$$

$$DIF_h = \epsilon_{h,d}/\epsilon_{h,s} = 1 + 0.0190\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s),$$

$$R^2 = 0.7627, CV = 14.57\% \quad (10)$$

$$DIF_b = \epsilon_{b,d}/\epsilon_{b,s} = 1 - 0.0492\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s),$$

$$R^2 = 0.9999, CV = 3.92\% \quad (11)$$

当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 增大至 $10^{-2}/s$ 时,对于 GP-1, DIF_a , DIF_h 和 DIF_b 的值分别变为 0.25, 0.86 和 0.91; 对于拟合曲线, DIF_a , DIF_h 和 DIF_b 的值分别变为 0.59, 1.06 和 0.85。

图 16 中显示了断裂损伤相关参数对应动态影响因子 DIF_H 与 $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 之间的关系。可以看出,6 组试验对应的 DIF_H 值均随应变率的增大呈现出良好的线性关系,线性拟合曲线和公式如图 16 和下式所示:

$$DIF_H = H_d/H_s = 1 - 0.1559\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s),$$

$$R^2 = 0.9855, CV = 7.05\% \quad (12)$$

当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 增大至 $10^{-2}/s$ 时,对于 GP-1, DIF_H 的值变为 0.40;对于拟合曲线, DIF_H 的值变为 0.53。

由上述结果可以看出,虽然 6 组试验中材料、配合比、试件尺寸、实验条件等各不相同,获得的准静态和动态情况下的混凝土单轴压缩应力-应变曲线之间存在很大的差别,但通过反演分析获得的细观损伤参数随应变率的增大呈现出明显规律性的变化趋势;说明在动态压缩情况下,应变率对不同类型和强度等级混凝土细观损伤机制的影响规律是相似的。

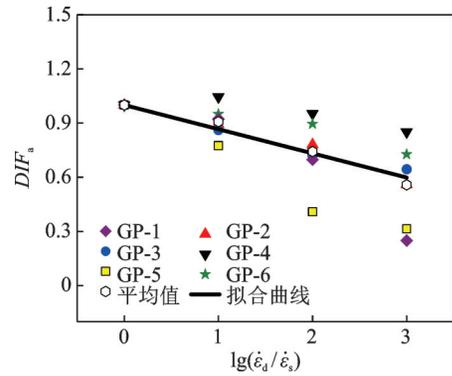


图 13 DIF_a - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 13 DIF_a - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

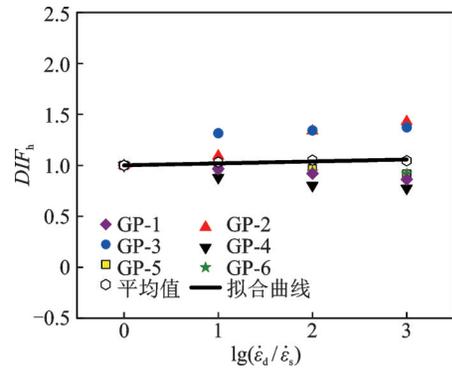


图 14 DIF_h - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 14 DIF_h - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

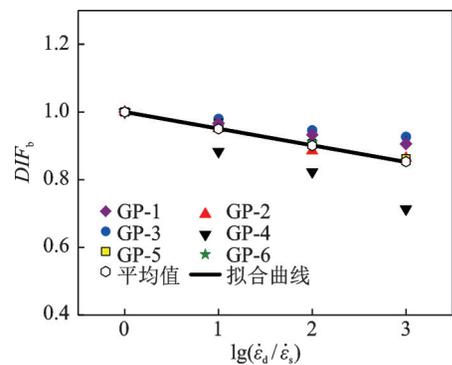


图 15 DIF_b - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 15 DIF_b - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

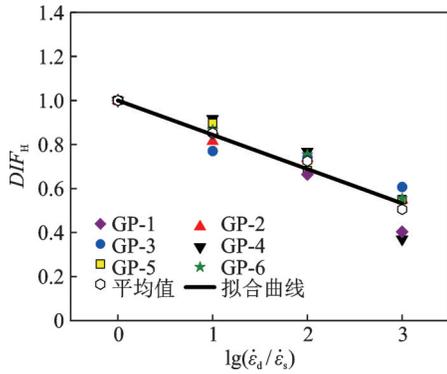


图 16 DIF_H - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 16 DIF_H - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

图 17, 18 分别比较了两个特征状态(临界状态与峰值应力状态)对应名义应力比 σ_{cr}/σ_p 与对应应变比 ϵ_{cr}/ϵ_p 随应变率的变化规律。 σ_{cr}/σ_p 的上限和下限值分别为 0.96 和 0.47, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 提高至 $10^{-2}/s$ 时, σ_{cr}/σ_p 的平均值由 0.71 增加至 0.91。 ϵ_{cr}/ϵ_p 的上限和下限值分别为 1.59 和 1.12, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 提高至 $10^{-2}/s$ 时, ϵ_{cr}/ϵ_p 的平均值由 1.41 减小到 1.25。说明随着应变率的增大, 临界状态逐渐接近峰值应力状态, 均匀损伤阶段对应的部分下降段曲线逐渐变短, 混凝土延性降低, 脆性破坏的现象更加明显。为充

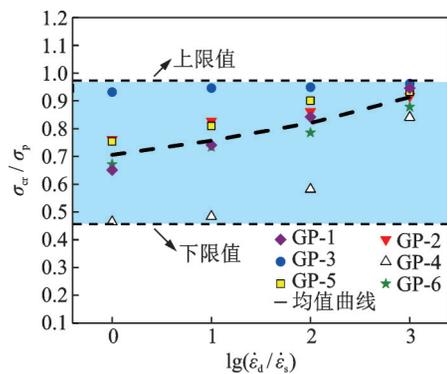


图 17 σ_{cr}/σ_p - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 17 σ_{cr}/σ_p - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

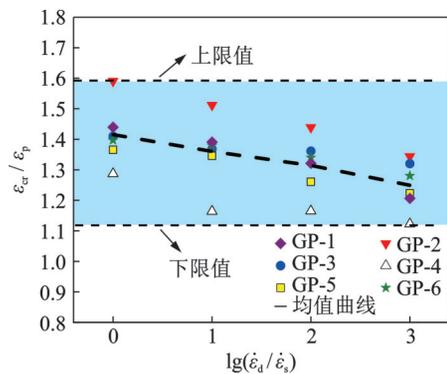


图 18 ϵ_{cr}/ϵ_p - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ 关系

Fig. 18 ϵ_{cr}/ϵ_p - $\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)$ relation

分考虑混凝土的延性, 将临界状态作为本构模型的最终破坏点。Xiao 等^[44]提出将单轴压缩曲线下降段对应应力为 $0.85\sigma_p$ 的状态定义为极限状态, 这与本文模型中临界状态的定义是类似的。

5 结论

(1) 本文建立了考虑应变率效应的混凝土单轴压缩统计损伤本构模型, 考虑了断裂和屈服两类细观损伤模式。动态荷载作用下, 混凝土细观结构的力学性能发生变化, 同时微裂纹的扩展形态、路径和数量较准静态发生显著改变; 进而改变了两类损伤模式的演化过程, 可由 $E, \epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 和 H 共 5 个特征参数进行表征。

(2) 开展了混凝土单轴压缩动态力学性能试验, 获得 $10^{-5} \sim 10^{-2}/s$ 应变率范围内的应力-应变曲线。验证了本文模型的合理性与适用性, 模型预测曲线与试验曲线吻合良好。随着应变率的提高, 5 个特征参数与应变率之间均呈现良好的线性关系; E 线性增加, 而 $\epsilon_a, \epsilon_h, \epsilon_b$ 和 H 线性减小。探讨了应变率效应机理、细观损伤机制、宏观非线性本构行为之间的内在联系。

(3) 结合 6 组试验数据, 获得损伤参数的整体演化规律。结果表明 5 个特征参数对应的动态影响因子 $DIF_E, DIF_a, DIF_h, DIF_b$ 和 DIF_H 均随应变率的增加呈现良好的线性关系, 确定了其表达式。比较了临界状态与峰值应力状态, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 $10^{-5}/s$ 提高至 $10^{-2}/s$ 时, σ_{cr}/σ_p 的平均值由 0.71 增加至 0.91, ϵ_{cr}/ϵ_p 的平均值由 1.41 减小到 1.25; 建议将临界状态作为本构模型的最终破坏点。

(4) 在试验数据分析中, 未考虑试件尺寸、材料来源、配合比和试验条件等对试验应力-应变曲线的影响。文中本构模型预测的动态应变率范围仅限于 $10^{-5} \sim 10^{-2}/s$, 未考虑冲击、爆炸等更高应变率下模型的适用性, 后续将进一步开展相关的研究工作。

参考文献:

[1] 邹笃建, 刘铁军, 滕军, 等. 混凝土柱单轴动态抗压特性的应变率效应研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 145-150.
Zou Dujian, Liu Tiejun, Teng Jun, et al. Strain rate effect on uniaxial dynamic compression behavior of concrete columns[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 145-150.

[2] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

- Yan Dongming. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [3] 施林林, 宋玉普, 沈璐. 不同应变率下大骨料及湿筛混凝土单轴受压试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(2): 270-276.
- Shi Linlin, Song Yupu, Shen Lu. Experimental study on uniaxial compression properties of large aggregate and wet-screened concrete at different strain rates[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(2): 270-276.
- [4] 肖诗云, 张剑. 不同应变率下混凝土受压损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 40-45.
- Xiao Shiyun, Zhang Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rates[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 40-45.
- [5] 刘录良. 考虑应变速率影响的混凝土试验研究与数值分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- Liu Luliang. Experimental research and numerical analysis of concrete under the strain rate[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [6] 白卫峰, 李思蕾, 管俊峰, 等. 再生混凝土的单轴压缩动态力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5): 498-508.
- Bai Weifeng, Li Silei, Guan Junfeng, et al. Dynamic mechanical properties of recycled concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 498-508.
- [7] 曾莎洁, 李杰. 混凝土单轴受压动力全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 7-10.
- Zeng Shajie, Li Jie. Experimental study on uniaxial compression behavior of concrete under dynamic loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(1): 7-10.
- [8] Lu Dechun, Wang Guosheng, Du Xiuli, et al. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 103: 124-137.
- [9] JIN Liu, YU Wenxuan, DU Xiuli, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 1-12.
- [10] 孙雪, 谢兴华. 普通混凝土与轻集料混凝土的受压动力性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 376-381.
- Sun Xue, Xie Xinghua. Compressive dynamic performance of ordinary concrete and lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 376-381.
- [11] 田威, 党发宁, 陈厚群. 动力荷载作用下混凝土破裂特征的CT试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(1): 30-34.
- Tian Wei, Dang Faning, Chen Houqun. CT experimental study on failure characteristics of concrete under dynamic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(1): 30-34.
- [12] 刘练, 霍静思, 刘艳芝, 等. 普通混凝土落锤冲击动态力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1415-1423.
- Liu Lian, Huo Jingsi, Liu Yanzhi, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of ordinary concrete under drop hammer impact loading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(6): 1415-1423.
- [13] 刘传雄, 李玉龙, 吴子燕, 等. 混凝土材料的动态压缩破坏机理及本构关系[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 1-5.
- Liu Chuanxiong, Li Yulong, Wu Ziyun, et al. Failure mechanism and constitutive model of a concrete material under dynamic compressive loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 1-5.
- [14] Feng S W, Zhou Y, Wang Y, et al. Experimental research on the dynamic mechanical properties and damage characteristics of lightweight foamed concrete under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140: 103558.
- [15] 张研, 李廷秀, 蒋林华. 混凝土应变率型弹塑性损伤本构模型[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 396-400.
- Zhang Yan, Li Tingxiu, Jiang Linhua. Strain rate-dependent elastoplastic damage model for concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 396-400.
- [16] 李杰, 曾莎洁, 任晓丹. 混凝土动力随机损伤本构关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1783-1789.
- Li Jie, Zeng Shajie, Ren Xiaodan. A stochastic rate-dependent damage model for concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1783-1789.
- [17] Huang Jie, Zhang Yi, Tian Yubin, et al. Research on the dynamic mechanical properties and constitutive models of steel fiber reinforced concrete and polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 9174692.
- [18] 张永亮, 朱大勇, 姚华彦, 等. 干燥和饱和状态下混凝土动静态压缩性能试验研究及其本构关系[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 23-27.
- Zhang Yongliang, Zhu Dayong, Yao Huayan, et al. Study on dynamic and static compression performance of concrete for dry and saturated state and its constitutive relationship[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 23-27.
- [19] 张社荣, 宋冉, 王超, 等. 碾压混凝土的动态力学特性分析及损伤演化本构模型建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 130-138.

- Zhang Sherong, Song Ran, Wang Chao, et al. Dynamic mechanical property analysis of roller-compacted concrete and damage constitutive model establishment[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(1): 130-138.
- [20] 陈伟, 彭刚, 周寒清. 不同应变速率条件下不同尺寸混凝土单轴试验应力应变分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 134-137.
- Chen Wei, Peng Gang, Zhou Hanqing. Stress and strain analysis of concrete uniaxial test under different strain rate and different size[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 134-137.
- [21] 张明虎, 刘海峰, 马映昌, 等. 低应变率下沙漠砂混凝土动态力学性能及本构模型[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2160-2166.
- Zhang Minghu, Liu Haifeng, Ma Yingchang, et al. The dynamic constitutive model and mechanical behaviors of desert sand concrete at low strain rate[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 2160-2166.
- [22] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982, 18(7): 551-562.
- [23] Li Jie, Ren Xiaodan. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(11-12): 2407-2419.
- [24] Shi Xianzeng, Zhang Cong, Zhou Xingde. The statistical damage constitutive model of the mechanical properties of alkali-resistant glass fiber reinforced concrete[J]. Symmetry, 2020, 12(7): 1139.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Bai Weifeng, Li Wenhao, Guan Junfeng, et al. Research on the mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial compression based on the statistical damage model[J]. Materials, 2020, 13(17): 3765.
- [28] Markeset G, Hillerborg A. Softening of concrete in compression—localization and size effects[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(4): 702-708.
- [29] Jansen D C, Shah S P. Effect of length on compressive strain softening of concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(1): 25-35.
- [30] Nakamura H, Higai T. Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete[M]// Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001:471-487.
- [31] 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.
- [32] 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[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.
- [33] 白卫峰, 沈懿鑫, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的混凝土应力-应变行为[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 551-561.
- Bai Weifeng, Shen Junxin, Guan Junfeng, et al. Stress-strain behavior of concrete based on statistical damage theory[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 551-561.
- [34] Geel E V. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1998.
- [35] 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-dimensional damage evolution instability and its growth of heterogeneous brittle material under quasi-static loading[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(5): 459-464.
- [36] 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 sensitivity analysis[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(1): 45-50.
- [37] 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. Grey cusp catastrophe model of AE parameters and its application in fracture analysis of concrete material[J]. Acta Acustica, 1996, 21(6): 935-940.

- [38] 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.
- [39] 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]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 607-618.
- [40] 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. The constitutive model of concrete subjected to sulfate attack based on statistical damage theory[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 66-77.
- [41] 白卫峰, 韩浩田, 管俊峰, 等. 考虑高温劣化效应的混凝土统计损伤本构模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1397-1409.
Bai Weifeng, Han Haotian, Guan Junfeng, et al. Statistical damage model of concrete considering the effect of high temperature degradation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(6): 1397-1409.
- [42] 党发宁, 潘峰, 焦凯, 等. 不均匀脆性材料动强度提高机理及破坏形态研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 111-118.
Dang Faning, Pan Feng, Jiao Kai, et al. Mechanism for enhancement of dynamic strength and failure model of nonuniform brittle materials[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3): 111-118.
- [43] Li Long, Poon Chisun, Xiao Jianzhuang, et al. Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 52-62.
- [44] Xiao Jianzhuang, Li Jiabin, Zhang Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187-1194.

Statistical damage constitutive model of concrete under uniaxial compression considering strain rate effect

BAI Wei-feng^{1,2}, ZHANG Zhe¹, GUAN Jun-feng¹, YUAN Chen-yang^{1,2}, MA Ying^{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 Engineering Research Center, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Based on the statistical damage theory, a statistical damage constitutive model of the concrete under uniaxial compression is established with considering the strain rate effect. Two meso-damage modes of fracture and yield are considered. The critical state is regarded as the transition point from uniform damage stage to local failure stage, which lags behind the peak stress state. Under dynamic loading, the mechanical performance in meso-structure of the concrete is changed, and the growth form, path and number of the microcracks are also significantly changed compared to the quasi-static state. As a result, the meso-damage evolution process is changed, which could be characterized by five characteristic parameters. The uniaxial dynamic compression test is conducted, and the stress-strain curves within the limits of $10^{-5}/s \sim 10^{-2}/s$ are obtained. The rationality of the model is verified by six groups of experimental data. It shows that the prediction curves are in good agreement with the test curves, and the characteristic parameters show obvious regularity with the strain rate. The model can well describe the dynamic mechanical behavior of the concrete, and establish an effective connection among the strain rate effect mechanism, the meso-damage mechanism, and the macro-nonlinear behavior.

Key words: concrete; uniaxial compression; constitutive model; meso-damage mechanism; strain rate effect

作者简介: 白卫峰(1982—),男,博士,教授,博士生导师。E-mail: yf9906@163.com。

通讯作者: 管俊峰(1980—),男,博士,教授,博士生导师。E-mail: shuaipipi88@126.com。