

两类混凝土动力黏损伤本构模型比较研究

魏晓丽, 任晓丹

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 在混凝土弹塑性损伤理论框架下, 为反映材料力学行为的率相关性, 对静力损伤演化进行了动力扩展。混凝土在动力加载下的损伤演化滞后于静力加载而引起强化现象, 借鉴黏塑性理论, 在损伤子空间建立了两类格式的动力黏损伤演化模型: Perzyna 模型和 Duvaut-Lions 模型。分别从本构理论和数值计算结果上对两类黏损伤演化模型进行了对比研究。从理论上来看, 两类模型具有不同的黏性化变量; 从模拟结果上来看, 两类格式的线性黏损伤模型的计算结果基本重合, 而两类非线性的黏损伤模型得到的结果存在差异。另外, 两类非线性的黏损伤模型预测的混凝土动力强度的提高与试验数据吻合较好, 说明均可反映混凝土材料的率相关性。

关键词: 混凝土; 动力本构; 率效应; 黏损伤演化

中图分类号: TU313

文献标志码: A

Comparative Studies of Two Types of Viscous Damage Models for Concrete Under Dynamic Loading

WEI Xiaoli, REN Xiaodan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to reflect the rate dependence of mechanical behavior under dynamic loading, based on the elastoplastic damage theory framework, the dynamic damage evolution is expanded from the static model. The damage evolution is delayed due to the rate effect, which leads to the strengthening phenomena. Inspired by the viscoplastic theory, two types of dynamic visco-damage evolution models are established in the damage subspace: Perzyna model and Duvaut-Lions model. The constitutive theories and the numerical results of the two kinds of viscous damage evolution models are compared respectively. In terms of constitutive theory, the two

models have different viscous variables. In the simulation results, concrete dynamic behaviors simulated by the linear visco-damage models with Perzyna format and Duvaut-Lions format are nearly consistent. In contrast, those calculated by the nonlinear visco-damage models with Perzyna format and Duvaut-Lions format differ. In addition, the improvement in dynamic strength predicted by both nonlinear models agrees well with test data, indicating that both can reflect the rate sensitivity of concrete material.

Keywords: concrete material; dynamic constitutive relationship; rate effect; visco-damage evolution

混凝土结构是民用基础设施和军事工程采用最多的结构类型, 在服役期内可能遭受爆炸、冲击等极端强动力荷载。动态试验表明, 混凝土材料具有明显的率效应。通常, 用动力提高因子 (dynamic increase factor, D_{IF} = 动力强度 f_d / 静力强度 f_s) 与应变率 ($\dot{\epsilon}$) 的关系来刻画率效应。根据大量试验数据的汇总^[1-8], 在半对数坐标系内混凝土 D_{IF} 随应变率的增长表现出先缓后急的趋势。

损伤力学作为固体力学的一个分支, 在刻画混凝土非线性特性方面的优势逐渐凸显出来。连续损伤力学理论是在 Kachanov^[9]、Hult^[10]、Lemaitre^[11] 等人早期研究的基础上形成的, 最初主要用于金属。1976 年 Dougill^[12] 运用损伤研究了混凝土材料的软化过程。针对混凝土等准脆性材料的拉、压行为具有差异性的特点, Ladevèze^[13] 和 Mazars^[14-15] 等人对应力张量进行正负分解, 提出了双标量弹性损伤模型。混凝土在进入非线性阶段后会产生明显的残余变形, 这对反映结构整体破坏行为至关重要。因此, Simo 和 Ju^[16]、Ju^[17]、Lubliner 等^[18]、Yazdani 和 Schreyer^[19]、Lee 和 Fenves^[20] 等将损伤

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52078361); 上海市教育委员会科研创新计划 (2017-01-07-11-07-E00006)

第一作者: 魏晓丽, 博士生, 主要研究方向为准脆性材料损伤理论。E-mail: 2010030@tongji.edu.cn

通信作者: 任晓丹, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土随机损伤力学。

E-mail: rxdjt@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

模型与塑性理论结合,发展了塑性-损伤耦合模型。在有效应力空间建立塑性流动可在数值求解中实现损伤与塑性的解耦^[17,21-22],基于此,吴建营^[23]、Wu等^[24]引入弹塑性Helmholtz自由能势,构建了具有热力学基础的弹塑性-双标量损伤模型。为了解决参数标定问题,Li和Ren^[25]、Ren等^[26]提出了能量等效应变的概念,将多维损伤演化函数通过一维试验加以确定。目前,混凝土损伤本构模型已经成为了混凝土工程结构非线性行为分析的有力工具。

混凝土的率效应对结构的承载力和破坏模式具有不可忽略的影响。为了能够再现混凝土的率效应,李兆霞^[27]、陈江瑛等^[28]、李庆斌等^[29]开展了试验与理论研究,发展了当控制应变率为常数时的损伤方程。Kong等^[30]基于混凝土动力塑性模型,采用 D_{ff} 对静力强度进行修正来体现率效应。仿照黏塑性理论中的Perzyna模型^[31],Simo和Ju^[16]、Ju^[17]建立了黏性的动力损伤驱动力的率形式,发展了率相关的损伤模型。受此启发,Dubé等^[32]、Cervera等^[33]、Faria等^[34]、吴建营和李杰^[35]、Ren和Li^[36]等引入了归一化的非线性Perzyna型动力损伤驱动力增长。在黏塑性理论中,Duvaut和Lions^[37]通过一种应力张量作差的方式确定黏塑性演化,而将Duvaut-Lions型黏塑性演化架构用于发展黏损伤演化模型的研究还比较少。

为了指出采用Perzyna模型和Duvaut-Lions模型的架构建立黏损伤演化的区别和优缺点,本文在弹塑性损伤模型的框架下,在损伤子空间,分别基于Perzyna模型和Duvaut-Lions模型对静力损伤演化进行黏性扩展,使损伤演化具有时间相关性特征,并从理论和数值计算结果两方面对两类模型进行了对比研究。

1 混凝土弹塑性损伤模型框架

材料在非线性受力过程中总应变张量可以分解为弹性分量 ϵ^e 和塑性分量 ϵ^p ,即

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (1)$$

在有效应力空间,材料仍然服从弹塑性应力-应变关系,那么有效应力为

$$\bar{\sigma} = E_0 : \epsilon^e = E_0 : (\epsilon - \epsilon^p) \quad (2)$$

其中: E_0 为四阶刚度张量。针对混凝土材料的拉、压差异性,对有效应力张量进行正负分解,即

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^+ + \bar{\sigma}^- \quad \bar{\sigma}^+ = P^+ : \bar{\sigma} \quad \bar{\sigma}^- = P^- : \bar{\sigma} \quad (3)$$

式中的四阶正、负投影张量 P^+ 和 P^- 分别为

$$P^+ = \sum_i H(\hat{\sigma}_i) p^{(i)} \otimes p^{(i)} \otimes p^{(i)} \otimes p^{(i)} \quad (4)$$

$$P^- = I - P^+$$

式中: $H(\cdot)$ 为Heaviside函数; $\hat{\sigma}_i$ 和 $p^{(i)}$ 分别为有效应力张量的第 i 个特征值和对应的单位特征向量; I 为四阶单位张量。

研究认为:受拉损伤由正应力引起,表示为 d^+ ;受压损伤由负应力引起,表示为 d^- 。在等温绝热状态下,如果认为材料的弹性Helmholtz自由能势和塑性Helmholtz自由能势不耦合,那么材料总的Helmholtz自由能势可以分解为弹、塑性之和,即

$$\psi(\epsilon^e, d^+, d^-, \kappa) = \psi^e(\epsilon^e, d^+, d^-) + \psi^p(d^+, d^-, \kappa) \quad (4)$$

其中, κ 为塑性内变量。根据Clausius-Duhem不等式:

$$\sigma : \dot{\epsilon} - \dot{\psi} \geq 0 \quad (5)$$

将Helmholtz自由能势的表达式(4)代入式(5),可以推导得到如下的材料弹塑性损伤本构方程^[38]:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- = (I - D) : \bar{\sigma} = (I - D) : E_0 : (\epsilon - \epsilon^p) \quad (6)$$

式(6)将材料的弹性、塑性和损伤纳入到一个统一的框架中,其中 D 为四阶损伤张量,表示为

$$D = d^+ P^+ + d^- P^- \quad (7)$$

根据双标量弹塑性损伤本构关系式(6),需要确定损伤和塑性的具体演化法则,才能构成完整的损伤力学本构关系。为了描述混凝土材料力学行为的率敏感性,在损伤子空间引入了两类格式的动力黏损伤演化模型,并对其进行了对比研究。

2 动力损伤演化模型

与准静力加载相比,动力加载使得混凝土微裂纹的扩展出现滞后效应而表现为材料强度的提高。为了反映材料动力强度的提高,需要在损伤子空间构造率相关的损伤演化过程,以此来考虑混凝土的动力非线性性质中由微裂缝引起的“软化”效应和加载速率引起的“强化”效应之间的耦合关系。建立混凝土动力率相关本构模型,可以类比黏塑性理论,构造黏损伤演化过程,再借助静力损伤演化函数求解损伤变量。构造黏损伤演化过程的格式可以分为两类:Perzyna模型和Duvaut-Lions模型。下面首先介绍率无关损伤演化模型,在此基础上分别采用两类格式对其进行了动力黏性扩展。

2.1 率无关损伤演化

在热力学框架内,利用Clausius-Duhem不等式(5),可以求解出以下的损伤耗散不等式:

$$\left(-\frac{\partial \psi}{\partial d^\pm} \right) \dot{d}^\pm = Y^\pm \dot{d}^\pm \geq 0 \quad (8)$$

其中: Y^\pm 分别为拉、压损伤能释放率。损伤能释放率

作为损伤变量的热力学共轭量,被选取为损伤演化的驱动量,所以损伤演化函数可以表示如下:

$$d^{\pm} = g^{\pm}(r^{\pm}), r^{\pm} = \max \left\{ r_0^{\pm}, \max_{\tau \in [0, t]} [Y^{\pm}(\tau)] \right\} \quad (9)$$

式中: $g^{\pm}(\cdot)$ 为拉、压损伤演化函数; r^{\pm} 为准静力加载下历史最大的受拉、受压损伤能释放率; r_0^{\pm} 为初始的损伤阈值。为简化,损伤能释放率可以等价地取为如下形式^[24]:

$$\begin{cases} Y^{+} \approx \frac{1}{2} \bar{\sigma}^{+} : E^{-1} : \bar{\sigma}^{+} \\ Y^{-} \approx \left(\alpha \bar{I}_1^{-} + \sqrt{3} \bar{J}_2^{-} \right)^2 \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\alpha = 0.1212$ 为材料参数; \bar{I}_1^{-} 、 \bar{J}_2^{-} 分别为 $\bar{\sigma}^{-}$ 的第一、第二不变量。

实际中,为了方便对其进行试验标定,损伤变量的演化通常表达成应变的函数。根据损伤一致性条件^[39](当两个受力状态的损伤能释放率相等时,两者的损伤变量也相等,与具体的应力状态无关),由式(10)可以建立多维与一维损伤演化的对等关系,进而推导出与多维应力状态等效的单轴应变:

$$\begin{cases} \epsilon_{eq}^{+} = \sqrt{2Y^{+}/E} \\ \epsilon_{eq}^{-} = \frac{1}{(\alpha - 1)E} \sqrt{Y^{-}} \end{cases} \quad (11)$$

其中,定义 ϵ_{eq}^{\pm} 为能量等效应变。

最终,多维受力下的损伤演化函数可以表示为能量等效应变的函数:

$$\begin{aligned} d^{\pm} &= g_d^{\pm}(r^{e\pm}) \\ r^{e\pm} &= \max_{\tau \in [0, t]} [\epsilon_{eq}^{\pm}(\tau)] \end{aligned} \quad (12)$$

损伤函数 g_d^{\pm} 的具体形式可通过单轴受拉和受压试验加以确定。在实验结果和经验模型的基础上,本文建议采用如下形式的损伤演化方程^[40]:

$$d^{\pm} = \begin{cases} 1 - \frac{\rho^{\pm} n^{\pm}}{n^{\pm} - 1 + (x^{\pm})^{n^{\pm}}} & x^{\pm} \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho^{\pm}}{A^{\pm} (x^{\pm} - 1)^2 + x^{\pm}} & x^{\pm} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$x^{\pm} = \frac{\epsilon_{eq}^{\pm}}{\epsilon_{c,t}}, \rho^{\pm} = \frac{f_{c,t}}{E \epsilon_{c,t}}, n^{\pm} = \frac{1}{1 - \rho^{\pm}}$$

式中: $f_{c,t}$ 为混凝土峰值强度; $\epsilon_{c,t}$ 为单轴应力峰值对应的应变; A^{\pm} 是材料参数。

2.2 Perzyna型动力损伤演化

参照Perzyna型黏塑性演化方程式, Simo和Ju^[16]、Ju^[17]拓展了静力损伤驱动力的增长率,建立了线性Perzyna型的动力损伤驱动力的演化速率如下:

$$\dot{q}_d^{\pm} = \gamma^{\pm} \langle r^{\pm} - q_d^{\pm} \rangle \quad (14)$$

其中: γ^{\pm} 代表损伤流动因子; r^{\pm} 为静力加载下历史最大的受拉、受压损伤能释放率,与2.1小节含义相同; q_d^{\pm} 为动力损伤驱动力,那么,历史最大的动力损伤驱动力表示为

$$r_d^{\pm} = \max \left\{ r_0^{\pm}, \max_{\tau \in [0, t]} [q_d^{\pm}(\tau)] \right\} \quad (15)$$

根据 r_d^{\pm} 来计算能量等效应变 ϵ_{eq}^{\pm} , 并代入到静力损伤演化函数式(12)中, 就可以得到考虑动力效应的率相关损伤演化, 通过式(6)进行最终的应力更新。分析式(14)可知, 当动力损伤驱动力的增长率 $\dot{q}_d^{\pm} = 0$, 有

$$r^{\pm} = q_d^{\pm} \quad (16)$$

说明该模型的动力损伤演化与静力损伤演化具有相容性。进一步, 对式(14)进行归一化之后, 还可以建立如下的非线性的Perzyna型黏损伤模型^[32-36]:

$$\begin{aligned} \dot{q}_d^{\pm} &= \gamma^{\pm} \phi^{\pm}(r^{\pm}, q_d^{\pm}) \\ \phi^{\pm}(r^{\pm}, q_d^{\pm}) &= r_0^{\pm} \left\langle \frac{r^{\pm}}{q_d^{\pm}} - 1 \right\rangle^{n_d^{\pm}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中: n_d^{\pm} 为非线性指数。

2.3 Duvaut-Lions型动力损伤演化

Duvaut和Lions^[37]提出了通过当前应力 σ 与其到弹性域边界的最近点投影之差来度量过应力, 从而建立了多维黏塑性应变演化模型^[41-42]。借鉴Duvaut-Lions模型, 在受拉、受压有效应力空间引入了如下的即时动力损伤驱动应力的增长率:

$$\dot{\bar{\sigma}}_d^{\pm} = \frac{\bar{\sigma}^{\pm} - \bar{\sigma}_d^{\pm}}{\tau^{\pm}} \quad (18)$$

式中: $\bar{\sigma}_d^{\pm}$ 是动力损伤驱动应力; $\bar{\sigma}^{\pm}$ 为当前的有效应力; τ^{\pm} 代表松弛时间。对比式(14)和式(18), 松弛时间 τ^{\pm} 和损伤流动因子 γ^{\pm} 的关系如下:

$$\gamma^{\pm} = \frac{1}{\tau^{\pm}} \quad (19)$$

进一步, 还可以将式(18)扩展为非线性形式, 如下:

$$\dot{\bar{\sigma}}_d^{\pm} = \Phi^{\pm} \left(\left\| \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_d^{\pm} \right\|_{E_0^{-1}} \right) \frac{\bar{\sigma}^{\pm} - \bar{\sigma}_d^{\pm}}{\tau^{\pm}} \quad (20)$$

其中: $\Phi^{\pm} \left(\left\| \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_d^{\pm} \right\|_{E_0^{-1}} \right)$ 是 $\left\| \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_d^{\pm} \right\|_{E_0^{-1}}$ 的函数; $\left\| \sigma \right\|_{E_0^{-1}}^2$ 表示能量范数, 定义为

$$\left\| \sigma \right\|_{E_0^{-1}}^2 = \sigma : E_0^{-1} : \sigma \quad (21)$$

Φ^{\pm} 函数可以取为一次函数、指数函数以及幂函数等形式, 为了和Perzyna模型在形式上保持一致, 这里将其取作幂函数, 即

$$\Phi^{\pm}(X) = (1 + X)^{\delta_d^{\pm}} \quad (22)$$

其中: δ_d^{\pm} 为材料参数。当 $\delta_d^{\pm} = 0$ 时, 式(22)退化为线

性的黏损伤模型。在率无关损伤演化中,是根据当前有效应力 $\bar{\sigma}^\pm$ 求解损伤能释放率以及损伤变量;在Duvaut-Lions型动力损伤演化中,所引入的动力损伤驱动应力 $\bar{\sigma}_d^\pm$ 的增长具有黏滞特性,将其代入到式(10)~式(13)便可获得具有率相关性的损伤演化,由式(6)进行最终的应力更新。

3 塑性流动准则

在损伤力学理论框架下,为了兼顾效率和精度,可采用经验塑性模型模拟混凝土的塑性应变。本文采用如下的经验塑性流动^[26]:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}^p &= \dot{\epsilon}^{p+} + \dot{\epsilon}^{p-} \\ \dot{\epsilon}^{p\pm} &= f_p^\pm \dot{\epsilon}^{e\pm}\end{aligned}\quad (23)$$

其中: $f_p^\pm = H(\dot{d}^\pm) \xi_p^\pm (d^\pm)^{n_p^\pm}$ 是与损伤演化有关的参数, $H(\cdot)$ 是Heaviside函数, ξ_p^\pm 和 n_p^\pm 是模型参数。表面上,该经验塑性演化属于率无关模型,其塑性发展不依赖于加载时间,而实际上,当塑性演化采用与率相关损伤耦合的方式时,在一定程度上塑性演化也会受到加载速率的影响。

4 两类动力损伤模型的理论对比

Perzyna型和Duvaut-Lions型黏损伤模型都是仿照相应的黏塑性模型而建立的,在黏塑性理论中,其实质是根据动力与静力屈服面的“差值”,也就是过应力,定义黏塑性应变演化的方向和大小,而在改进的动力损伤演化理论中,则是由动力与静力损伤面的“差值”定义动力损伤驱动力的演化速率。Perzyna模型和Duvaut-Lions模型的区别主要体现在对过应力的衡量方式上,由此所建立的黏性化变量也不一样。如果将损伤释放率相等的面称为等损伤面,那么Perzyna模型是通过静应力与动应力所在的等损伤面的函数值之差来衡量过应力,其黏性化变量为标量形式的 r_d^\pm ;Duvaut-Lions模型是通过静应力张量与其在损伤面上的投影应力之差来衡量过应力,其黏性化变量为张量形式的 $\bar{\sigma}_d^\pm$ 。

在动力加载过程中,黏性的动力损伤演化滞后于相应的静力损伤演化,同时不断向其逼近而不会超越静力损伤演化。从数值实现的角度而言,Perzyna模型的表达更简洁,采用向前欧拉算法的数值积分格式,不需要迭代,效率更高。但是非线性的Perzyna模型,即式(17),在初始计算时刻动力损伤驱动力 q_d^\pm 比较小或者参数 γ^\pm 取值过大时, q_d^\pm 的求解会溢出黏性上限(即超越静力损伤演化),导致数值不稳定现象,而 γ^\pm 取值

太小又会高估低应变率下的强度。对于Duvaut-Lions模型,在进行第 $n+1$ 步求解时,考虑时间增量步 $\Delta t = t_{n+1} - t_n$,采用后退欧拉方法写出式(20)的差分方程,可以给出损伤驱动应力的显示表达:

$$\bar{\sigma}_{n+1}^{d\pm} = \frac{1}{1 + \gamma^\pm \Phi^\pm \Delta t} \bar{\sigma}_n^{d\pm} + \frac{\gamma^\pm \Phi^\pm \Delta t}{1 + \gamma^\pm \Phi^\pm \Delta t} \bar{\sigma}_{n+1}^\pm \quad (24)$$

从式(24)可以看出,Duvaut-Lions模型中当前损伤驱动应力 $\bar{\sigma}_{n+1}^{d\pm}$ 可以看做是静力损伤应力点 $\bar{\sigma}_{n+1}^\pm$ 与其在上一步损伤面上最近点投影应力 $\bar{\sigma}_n^{d\pm}$ 的加权平均,不会出现动力加载下黏性损伤驱动应力溢出黏性上限的情况,从而保证了计算的稳定性。但是每一次增量步内都需要进行迭代来求解静力损伤应力点 $\bar{\sigma}_{n+1}^\pm$ 在上一步损伤面上最近点投影应力 $\bar{\sigma}_n^{d\pm}$,这会影响计算效率。

5 两类动力损伤模型的计算结果对比

由于显式算法具有稳定性强,求解效率高的特点,借助ABAQUS有限元软件中材料模型的二次开发功能,对所建立的两类率相关黏损伤模型进行了显式的VUMAT子程序编写。在已知第 n 步的状态变量和应变增量后,采用算子分离方法^[41]对第 $n+1$ 步的状态变量进行求解,可以实现损伤和塑性的解耦。该算法主要包含四个步骤:①弹性试算;②损伤修正;③塑性修正;④应力更新。利用所建立的算法程序,分别对Perzyna格式和Duvaut-Lions格式的线性与非线性黏损伤演化进行了不同加载速率下的数值测试计算与对比研究。

5.1 线性黏损伤模型

动力损伤演化采用线性黏损伤模型,分别计算了四种应变率下的应力—应变全曲线,静力强度为: $f_t = 2.9 \text{ MPa}$, $f_c = 32.0 \text{ MPa}$;计算所采用的材料参数为: $E = 31\,700 \text{ MPa}$, $\epsilon_t = 120 \mu\epsilon$, $\epsilon_c = 1\,850 \mu\epsilon$, $A^+ = 3.0$, $A^- = 1.2$, $\xi_p^+ = 0.001$, $\xi_p^- = 0.1$, $n_p^+ = 0.1$, $n_p^- = 0.1$, $\gamma^+ = 30\,000$, $\gamma^- = 200\,000$ 。计算结果如图1所示,当认为过应力的影响是线性时,Perzyna型和Duvaut-Lions型动力损伤模型的计算结果几乎没有差别。从图中可以看出,一方面,在准静力加载下,两类动力损伤模型仍然保有其在静力加载下的固有属性,如强度软化、拉压差异性;另一方面,Perzyna型和Duvaut-Lions型动力损伤模型均可以反映出随着加载应变率的增大,混凝土极限单轴强度提高,峰值应力对应的应变也随之有所增加,说明所建立的两类动力损伤模型均具备速率相关特性。图2给出了不同应变率下的受拉和受压损伤变量的演化, $0 \leq d^\pm \leq 1.0$ 。 $d^\pm = 0$ 代表材料未发生损伤, $d^\pm = 1.0$ 代表材料发生

完全的损坏,随着应变率的增加,损伤内变量随着应变的增长速率(斜率)变小,损伤演化被延迟,材料达到完

全破坏的临界应变增大。

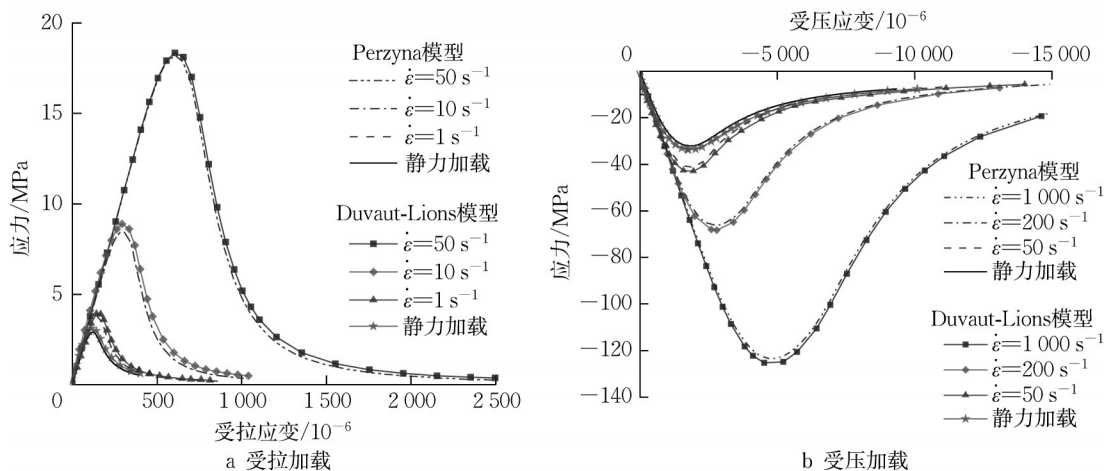


图1 采用线性的黏损伤演化时不同应变率下的单轴应力应变曲线

Fig.1 The complete tensile and compressive stress-strain curves under different strain rates using two linear visco-damage models

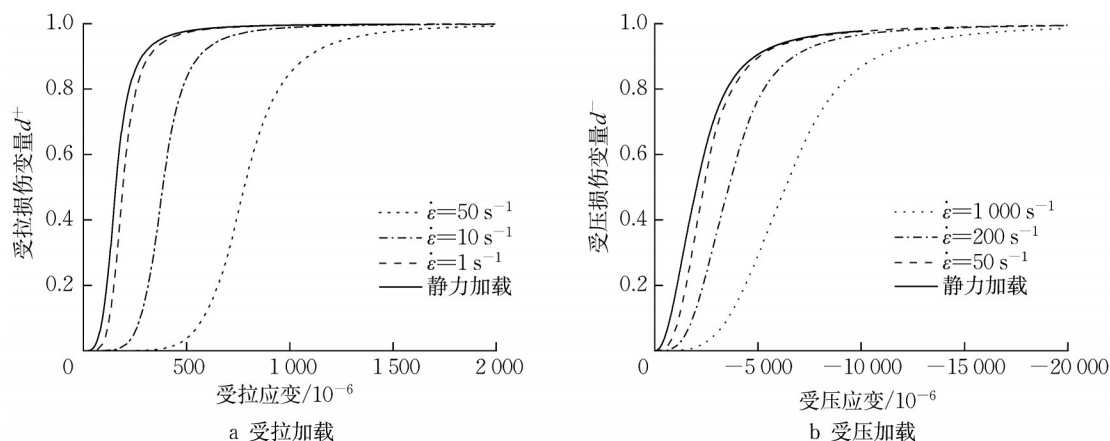


图2 采用线性的黏损伤演化时不同应变率下的损伤增长

Fig.2 The tensile and compressive damage accumulation under different strain rates using two linear visco-damage models

5.2 非线性黏损伤模型

当动力损伤演化采用非线性黏损伤模型时,意味着过应力对动力损伤增长的影响是非线性的。非线性的Perzyna动力损伤模型的参数取值为: $n_d^+ = 1.5$, $n_d^- = 1.5$, $\gamma^+ = 30000$, $\gamma^- = 750000$, $r_0^+ = 0.33f_t$, $r_0^- = 0.33f_c$ 。非线性的Duvaut-Lions动力损伤模型的参数取值为 $\gamma^+ = 30000$, $\gamma^- = 200000$, $\delta_d^+ = 1.5$, $\delta_d^- = 3.5$;其余材料参数与5.1小节中相同。计算结果如图3、图4所示。将图3、4与图1的曲线进行对比可见,采用非线性的黏损伤演化模型,可以改变材料的率敏感程度,尤其是在较高应变率加载下,非线性的黏损伤演化模型计算的受拉或受压动力强度明显低于线性

的黏损伤演化模型的计算结果;当采用上述参数时,在同一应变率下,不管是受拉加载还是受压加载,两类模型计算的峰值应力较为接近,但Perzyna模型计算的峰值应力对应的应变大于Duvaut-Lions模型,并且前者的下降段更加平缓,应力-应变曲线与坐标轴围成的面积也更大,这意味着采用Perzyna模型,在混凝土结构的动力加载模拟分析中材料会吸收更多的能量。

使用上述的参数取值又进行了在其他应变率下的材料强度计算,将两类模型计算的强度提高因子与统计的试验数据进行了对比,如图5所示。根据试验数据,尤其是在受压动力加载下,混凝土的动力强度呈现出较大的离散型。对于受拉加载,在半对数坐标系内,当应变率大于 1.0 s^{-1} 时,受拉动态强度显著增加,对于

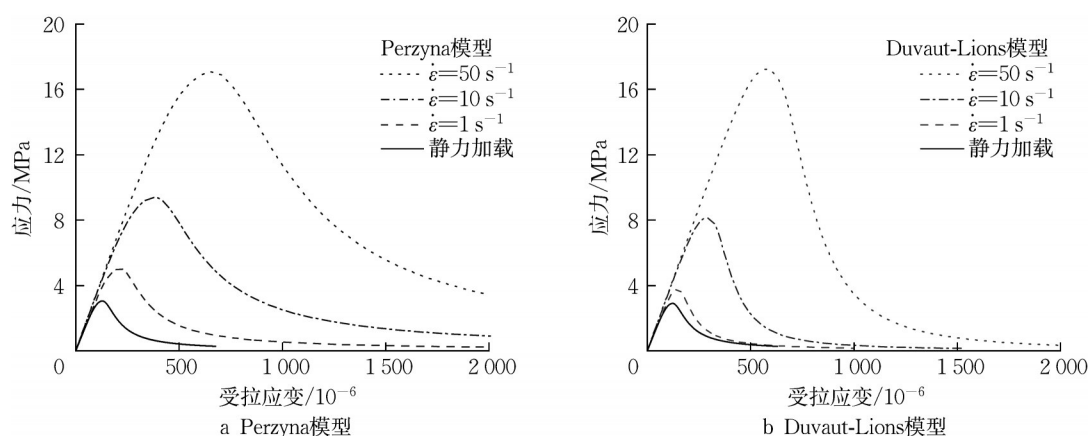


图3 采用非线性黏损伤演化时不同应变率下的单轴受拉应力应变曲线

Fig.3 The complete tensile stress-strain curves under different strain rates using two nonlinear visco-damage models

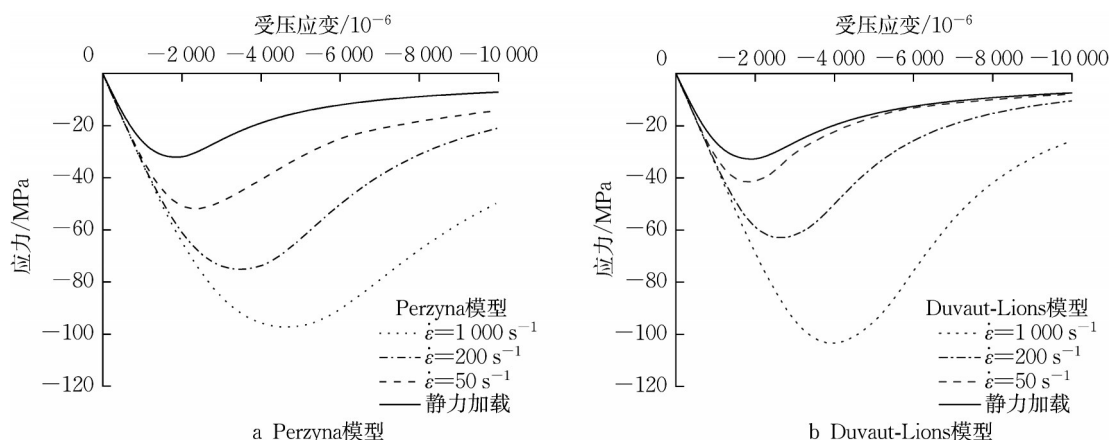


图4 采用非线性的黏损伤演化时不同应变率下的单轴受压应力—应变曲线

Fig.4 The complete compressive stress-strain curves under different strain rates using two nonlinear visco-damage models

两个模型预测的受拉 D_{IFt} , 当应变率小于 50.0 s^{-1} 时, Perzyna 模型预测的 D_{IFt} 值略高, 超过 50.0 s^{-1} 时, Duvaut-Lions 模型预测的 D_{IFt} 值反而略高; 而对于受压加载, 当应变率大于 100.0 s^{-1} 时, 不同的试验所获得的动力提高因子的上限具有较为明显的上升趋势, 而下限趋势并不明显, 利用两类非线性黏损伤模型计算得到的受压 D_{IFc} 曲线略有差别, 但都与试验数据上限的趋势吻合良好。从整体上来看, 在保证计算稳定的情况下, 当参数选取合适时, 两类非线性黏损伤模型计算得到的 D_{IF} 曲线可以十分接近, 均能够做到与试验趋势具有良好的一致性。

6 结语

建立合理的考虑动力效应的材料本构关系模型是进行强动力荷载作用下混凝土结构动力灾变问题分析

的关键。本文以经典的混凝土弹塑性损伤本构关系为基础, 通过类比黏塑性理论, 在损伤子空间采用不同的方式衡量动力加载下的“过应力”, 建立了两类格式的动力黏损伤演化方程: Perzyna 模型和 Duvaut-Lions 模型。分别从理论和计算结果上, 对两类模型进行了对比研究。从理论层面, 两者具有不同的黏性化变量, Perzyna 模型的求解更简洁高效, Duvaut-Lions 模型的计算更为稳定。而计算结果表明, 对于线性黏损伤演化, 两类模型预测的不同应变率下的应力—应变曲线十分接近; 对于非线性黏损伤演化, Perzyna 模型预测的应力—应变包络线与坐标轴所围成的面积要比 Duvaut-Lions 模型预测的应力—应变包络线与坐标轴所围成的面积更大, 说明采用 Perzyna 模型模拟动力加载过程时, 材料对能量的吸收能力更强; 通过与试验数据的对比, 两类格式的非线性黏损伤模型预测的 D_{IF} 曲线均与试验数据具有较好的一致性。

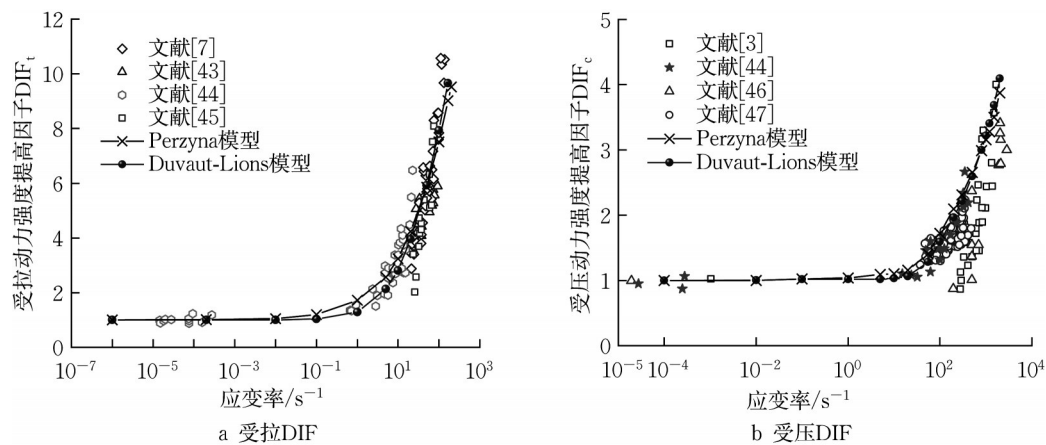


图5 两类非线性黏损伤模型计算得到的动力强度提高因子与试验的对比

Fig.5 The comparison of the tensile and compressive D_{IF} between simulation and experiment

作者贡献声明:

魏晓丽:理论研究,建模分析,数据处理,论文整体构思与撰写;

任晓丹:理论研究,思路指导,论文整体构思与修改。

参考文献:

- ABRAMS, D A. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete [C] // Proceeding of American Society of Testing Materials. [S.l.]: American Society of Testing Materials, 1917: 364 - 365.
- TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, *et al.* A strain-rate-dependent concrete material model for ADINA [J]. Computers and Structures, 1997, 64(5): 1053.
- GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(9): 869.
- GUO Y, GAO G, JING L, *et al.* Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 114.
- BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425.
- ROSS C A, JEROME D M, TEDESCO J W, *et al.* Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. American Concrete Institute Materials Journal, 1996, 93(3): 293.
- KLEPACZKO J, BRARA A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(4): 387.
- MALVAR L J, ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. American Concrete Institute Materials Journal, 1998, 95(6): 735.
- KACHANOV L M. Time of rupture process under creep conditions [J]. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk, 1958, 23: 26.
- HULT J. Creep in continua and structures [C] // Topics in Applied Continuum Mechanics. Vienna: Springer, 1974: 137-155.
- LEMAITRE J. A course on damage mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- DOUGILL J W. On stable progressively fracturing solids [J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 1976, 27: 423.
- LADEVÈZE P. Sur une théorie de l'endommagement anisotrope [R]. Cachan: Laboratoire de Mécanique et Technologie, 1983.
- MAZARS J. A description of micro- and macroscale damage of concrete structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5): 729-737.
- MAZARS J, PIAUDIER C G. Continuum damage theory—application to concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(2): 345.
- SIMO J C, JU J W. Strain- and stress-based continuum damage models—I. formulation [J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(7): 821.
- JU J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(7): 803.
- LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, *et al.* A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299.
- YAZDANI S, SCHREYER H L. Combined plasticity and damage mechanics model for plain concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(7): 1435.
- LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892.
- SIMO J C, JU J W. Strain- and stress-based continuum damage models-II. Computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(7): 841.
- FARIA R, OLIVER J. A rate dependent plastic-damage constitutive model for large scale computational in concrete structures [J]. Monographs of the International Centre for

- Numerical Methods in Engineering, 1993, (17): 9.
- [23] 吴建营. 基于损伤能释放率的混凝土弹塑性损伤本构模型及其在结构非线性分析应用 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- WU Jianying. Elastoplastic damage constitutive model for concrete based on damage energy release rate and its application in structural nonlinear analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [24] WU J Y, LI J, FARIA R. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(3): 583.
- [25] Li J, REN X. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(11): 2407.
- [26] REN X, ZENG S, LI J. A rate-dependent stochastic damage—plasticity model for quasi-brittle materials [J]. Computational Mechanics, 2015, 55: 267-285.
- [27] 李兆霞. 一个综合模糊裂纹和损伤的混凝土应变软化本构模型 [J]. 固体力学学报, 1995(1): 22.
- LI Zhaoxia. A viscoplastic model combined damage and smeared crack for softening of concrete [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 1995(1): 22.
- [28] 陈江瑛, 王礼立. 水泥砂浆的率型本构方程 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2000(2): 1.
- CHEN Jiangying, WANG Lili. Rate-dependent constitutive equation of cement mortar [J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2000(2): 1.
- [29] 李庆斌, 邓宗才, 张立翔. 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(8): 1088.
- LI Qingbin, DENG Zongcai, ZHANG Li Xiang. Dynamic damage constitutive model for concrete accounting for the difference of the initial elastic modulus [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(8): 1088.
- [30] KONG X Z, FANG Q, CHEN L, *et al.* A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 120: 60.
- [31] PERZYNA P. Fundamental problems in viscoplasticity [J]. Advances in Applied Mechanics, 1966, 9(C): 243.
- [32] DUBÉ J F, PIAUDIER C G, BORDERIE C L. Rate Dependent damage model for concrete in dynamics [J]. Journal of Engineering Mechanics. 1996, 2(10): 1.
- [33] CERVERA M, OLIVER J, MANZOLI O. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(9): 987.
- [34] FARIA J, OLIVER R, CERVERA M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 1993, 35(14): 1533.
- [35] 吴建营, 李杰. 考虑应变率效应的混凝土动力弹塑性损伤本构模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 1427.
- WU Jianying, LI Jie. Elastoplastic damage constitutive model for concrete considering strain rate effect under dynamic loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(11): 1427.
- [36] REN X, LI J. A unified dynamic model for concrete considering viscoplasticity and rate-dependent damage [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(4): 530.
- [37] DUVAUT G, LIONS J L. Les inéquations en mécanique et en physique [J]. Mathematics of Computation, 1973, 27(122): 440.
- [38] 李杰, 吴建营, 陈建兵. 混凝土随机损伤力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI Jie, WU Jianying, CHEN Jianbing. Stochastic damage mechanics of concrete structures [M]. Beijing: China Science Press, 2014.
- [39] 任晓丹. 基于多尺度分析的混凝土随机损伤本构理论研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
- REN Xiaodan. Multi-scale based stochastic damage constitutive theory for concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [40] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture Press, 2010.
- [41] SIMO J C, HUGHES T J. Computational inelasticity [M]. New York: Springer, 1998.
- [42] OTTOSEN N S, RISTINMAA M. The mechanics of constitutive modeling [M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2005.
- [43] SCHULER H, MAYRHOFFER C, THOMA K. Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1635.
- [44] ROSS C A, JEROME D M, TEDESCO J W, *et al.* Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. ACI Materials Journal. 1996; 93(3): 293.
- [45] WU H, ZHANG Q, HUANG F, *et al.* Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1/4): 605.
- [46] FISCHER I, PICHLER B, LACHE E, *et al.* Compressive strength of cement paste as a function of loading rate: Experiments and engineering mechanics analysis [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 58: 186.
- [47] ZHANG M, WU H J, LI Q M, *et al.* Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar tests. Part I: Experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1327.