

围压状态下的混凝土本构模型

张 研^{*1}, 蒋林华¹, 陈 达²

(1. 河海大学 力学与材料学院, 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098)

摘 要:利用已有不同围压下的混凝土三向压缩试验, 分析研究不同围压条件对混凝土强度和应力-应变关系的影响。试验表明, 把混凝土简单视为脆性材料的观点并不符合实际情况, 塑性特征也是混凝土材料主要力学特征。由热力学定律出发, 本文提出了多次方形式的屈服函数和与围压状态相关联的损伤标准化函数, 提出了考虑围压状态的混凝土本构模型。试验结果与数值计算比较表明, 该本构关系可以很好地描述混凝土在不同围压状态下的力学损伤发展和脆-塑性转换力学特征, 也可以描述拉伸作用下的应力-应变关系, 具有一定的普遍意义。

关键词:混凝土; 围压状态; 本构模型; 脆-塑性; 力学损伤

中图分类号:TV642.2 **文献标识码:**A

1 引 言

混凝土由于其良好的受压性能和稳定的物理特征, 被广泛运用于土木水利工程中。其力学性能被广泛研究, 其中大部分工程应用和研究将混凝土作为脆性材料, 进行其单轴压缩与拉伸作用下的强度试验及强度特征研究。随着我国工业设施和基础设施大量采用混凝土结构, 混凝土所受荷载和外界条件也越来越复杂, 如大体积混凝土结构、地下工程和钢管混凝土构件的大量出现, 使混凝土所处的应力状态更为复杂。混凝土在多向受压状态下的力学特征因此也需要得到重视。混凝土的多轴强度和本构关系是《混凝土结构设计规范》GB50010^[1]中新增的主要内容之一。三轴试验结果表明^[2,3], 混凝土在压应力状态下的力学特征很大程度上取决于围压的大小, 随着围压的增加, 混凝土存在从脆性到塑性的转变。低围压情况下, 弹性与损伤特征为混凝土的最主要变形特征; 高围压情况下, 变形特征主要表现为塑性应变。因此,

宽围压范围内的混凝土本构模型中一般包括两个非弹性力学特征^[4-7]: 塑性应变和由开裂造成的力学损伤。系统的试验分析和模型构建对混凝土结构的安全设计具有重要意义。

目前在国内, 李杰、王怀亮和杨璐等^[8-10]就混凝土弹塑性损伤本构理论等方面开展了相关研究^[3-5]。研究表明, 基于热力学定律基础上的弹塑性损伤本构模型通过材料弹塑性变形能释放的概念建立三大热力学伴随量来研究混凝土, 有助于正确理解与反映混凝土材料的塑性应变和力学损伤引起的非线性特性, 提出的双标量损伤变量能有效解决单标量损伤本构关系很难准确描述混凝土的单边效应和多轴本构关系; 同时, 损伤变量的非局部性质对于混凝土结构受力分析显得非常重要, 可以解决因为有限元网格划分对分析带来的问题。本研究在目前多轴试验研究和热力学定律的基础上, 开展混凝土围压状态的本构模型研究, 采用与围压应力相关的塑性硬化函数和力学损伤准则, 同时结合曲面形式的破坏准则和适合的流动法则, 推导增量形式的弹塑性损伤本构模型, 实现由应变控制的数值模拟, 并对比分析了相关文献^[2,11]的试验结果。

2 模型描述和理论分析

2.1 热力学框架

本文在热力学定律的基础上推导考虑弹塑性以及力学损伤的本构模型。采用小变形假定, 状态变量及内变量分别表示为总应变张量 $\underline{\epsilon}$ 、塑性应

收稿日期:2008-07-08; 修改稿收到日期:2009-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金(50808066, 50978085, 51009061); 水利部公益性行业科研专项经费(200801057); 江苏省六大人才高峰项目(2009年A类); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009B14814); 河海大学自然科学基金(2008429711)资助项目.

作者简介: 张 研*(1979-), 男, 博士, 讲师
(E-mail: hhu_zhangyan@gmail.com);
蒋林华(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师;
陈 达(1978-), 男, 博士, 副教授.

变张量 $\underline{\underline{\epsilon}}^p$ 、力学损伤标量 d 和塑性硬化标量 γ^p 的形式。根据热力学第一定律,假定热力学势能 Ψ 可以表示为弹性自由能和塑性能 Ψ^p 之和,即

$$\Psi(\underline{\underline{\epsilon}}^p, \gamma^p, d) = \frac{1}{2}(\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) : \mathbf{C}(d) : (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) + \Psi^p(\gamma^p, d) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{C}(d)$ 为有效弹性刚度四阶张量, Ψ^p 为反映塑性硬化内变量 γ^p 和力学损伤 d 的函数。式(1)右侧第一项代表在给定力学损伤和塑性应变下的弹性能。在力学损伤增加以及(或者)塑性流动发生时,材料的非线性力学行为与加载路径相关联。因此,存在关于裂缝扩展和塑性流动的能量耗散。相关的热力学伴随量由标准的热力学势能的偏导数形式给出,即

$$\underline{\underline{\sigma}} = \frac{\partial \Psi}{\partial \underline{\underline{\epsilon}}^e}, Y_d = -\frac{\partial \Psi}{\partial d}, Y_p = \frac{\partial \Psi}{\partial \gamma^p} \quad (2)$$

式中 Y_d 为对应于力学损伤变量 d 的热力学伴随量, Y_p 为对应于塑性应变 $\underline{\underline{\epsilon}}^p$ 的热力学伴随量。由热力学第二定律,塑性流动和损伤发展必须满足以下不等式。

$$\underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\epsilon}}^p + Y_d \dot{d} - Y_p \dot{\gamma}^p \geq 0 \quad (3)$$

式(2)中第一状态表达式可以表示为

$$\underline{\underline{\sigma}} = \mathbf{C}(d) : (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) \quad (4)$$

通过 Hill 引理^[12],各向同性材料的有效弹性刚度四阶张量可以被写成如下一般形式:

$$\mathbf{C}(d) = 2\mu(d)\mathbf{K} + 3k(d)\mathbf{J} \quad (5)$$

式中 k 和 μ 分别为材料的有效体积模量和剪切模量,对称四阶张量 \mathbf{K} 和 \mathbf{J} 分别定义为

$$\mathbf{J} = \frac{1}{3} \underline{\underline{\delta}} \otimes \underline{\underline{\delta}}, \mathbf{K} = \mathbf{I} - \mathbf{J} \quad (6)$$

式中 $\underline{\underline{\delta}}$ 为二阶单位张量, $\mathbf{I} = \underline{\underline{\delta}} \otimes \underline{\underline{\delta}}$ 是四阶对称单位张量,其分量表示为 $I_{ijkl} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$ 。注意到对于任意二阶张量 $\underline{\underline{E}}$,有 $\mathbf{J} : \underline{\underline{E}} = \frac{1}{3}(\text{tr } \underline{\underline{E}}) \underline{\underline{\delta}}$ 和

$\mathbf{K} : \underline{\underline{E}} = \underline{\underline{E}} - \frac{1}{3}(\text{tr } \underline{\underline{E}}) \underline{\underline{\delta}}$ 的关系,分别代表了 $\underline{\underline{E}}$ 的主量和偏量。

热力学势能对应于力学损伤变量 d 伴随量 Y_d 可以表示为

$$Y_d = -\frac{\partial \Psi}{\partial d} = -\frac{1}{2}(\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) : \mathbf{C}'(d) : (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) - \frac{\partial \Psi^p}{\partial d} \quad (7)$$

可以看到热力学伴随量 Y_d 不仅与弹性应变有关,同时取决于塑性发展的过程。偏导数 $\mathbf{C}'(d)$ 表示力学损伤对于有效刚度张量的导数:

$$\mathbf{C}'(d) = \frac{\partial \mathbf{C}(d)}{\partial d} \quad (8)$$

最终,增量形式的本构关系可以表示为

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \mathbf{C}(d) : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \mathbf{C}'(d) : \underline{\underline{\epsilon}}^e \dot{d} = \mathbf{C}(d) : (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}) + \mathbf{C}'(d) : (\underline{\underline{\epsilon}} - \underline{\underline{\epsilon}}^p) \dot{d} \quad (9)$$

2.2 力学损伤的定义

在目前的模型中,假定损伤的发展和塑性硬化过程之间不存在关联,即塑性能 Ψ^p 与力学损伤无关。模型简化为损伤的发展不直接取决于塑性应变的变化。这一选择对于准脆性材料是可行的。因为在高围压情况下,塑性应变占应变的主要部分,没有出现峰后应力软化,可认为损伤没有发生。如果采用这一假定,对于各向同性材料,热力学势能 Ψ 可以表示为

$$\Psi(\underline{\underline{\epsilon}}^p, \gamma^p, d) = \frac{1}{2} [k(d)(\epsilon_v^e)^2 + 2\mu(d) \underline{\underline{\epsilon}}^e : \underline{\underline{\epsilon}}^e] + \Psi^p(\gamma^p) \quad (10)$$

式中 $\epsilon_v^e = \text{tr}(\mathbf{J} : \underline{\underline{\epsilon}}^e)$ 为弹性体积应变, $\underline{\underline{\epsilon}}^e = \mathbf{K} : \underline{\underline{\epsilon}}^e$ 是弹性偏应变张量。为了保持材料的有效体积模量和剪切模量的宏观形式和相关微观力学假定的一致性^[13,14],其表达式为

$$k(d) = k_0(1 - \alpha_1 H(\epsilon_v^e) d) \\ \mu(d) = \mu_0(1 - \alpha_2 d) \quad (11)$$

式中 k_0 和 μ_0 分别为材料的初始体积模量和剪切模量,参数 α_1 和 α_2 决定在损伤状态下混凝土弹性特征的变化情况。引入 Heaviside 函数 $H(x)$,当 $x \leq 0$, $H(x) = 0$; 当 $x > 0$, $H(x) = 1$ 。这种基于微观力学的研究方法给出了相对于连续介质损伤力学中现象表征法更通用的表示形式。热力学势能对应于力学损伤变量 d 伴随量 Y_d 可以重新表示为

$$Y_d = -\frac{\partial \Psi}{\partial d} = -\frac{1}{2} [\alpha_1 k_0 <\epsilon_v^e >^2 + 2\mu_0 \alpha_2 \underline{\underline{\epsilon}}^e : \underline{\underline{\epsilon}}^e] \quad (12)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 是 Macaulay 符号,表示为当 $\cdot > 0$ 时, $\langle \cdot \rangle = \cdot$; 当 $\cdot \leq 0$ 时, $\langle \cdot \rangle = 0$ 。可以看出伴随量 Y_d 只与弹性体积应变和弹性偏应变相关。

在模型研究中,侧重分析了塑性与损伤对应力-应变关系的影响。如同上面提到,塑性应变是混凝土的一个重要的力学行为,特别在高围压下。因此,考虑塑性应变对损伤的影响是合理的。在热力学势能伴随量 Y_d 概念的基础上,考虑应力状态

对塑性应变的影响,对于损伤发展的等效损伤量可以表示成:

$$\xi_d = \frac{1}{2} [\alpha_1 k_0 < \epsilon_v >^2 + 2\mu_0 \alpha_2 \underline{\underline{e}} : \underline{\underline{e}}] / \chi_d \quad (13)$$

$$\chi_d = \left[\frac{P_c + f_c}{f_c} \right]^\beta \quad (14)$$

式中引入标准化函数 χ_d 考虑围压应力状态对损伤发展的影响, P_c 是围压应力,用模型参数 β 控制应力对损伤发展速度的影响, f_c 为材料抗压强度。参考 Mazars 的研究^[15],采用如下的损伤准则:

$$f_{dc}(\xi_{dc}, d) = A_{1c} - \frac{A_{1c}}{\exp[B_{1c}(\xi_{dc} - \xi_{dc}^0)]} - d \leq 0$$

$$f_{dt}(\xi_{dt}, d) = A_{1t} - \frac{A_{1t}}{\exp[B_{1t}(\xi_{dt} - \xi_{dt}^0)]} - d \leq 0 \quad (15)$$

式中下标 c 和 t 分别表示压缩和拉伸状态,参数 A_{1c} 为材料破坏时可达到的最大损伤值, B_{1c} 和 ξ_{dc}^0 分别为控制加载过程中损伤发展的速度和损伤发生阈值。因此,对于不同的拉压状态,材料参数 A_{1c} , B_{1c} 和 ξ_{dc}^0 一般是不相同的,需要通过试验得到确定。

考虑到损伤是一个不可逆过程,于是增量形式的损伤算子具有以下性质:

$$\dot{d} \geq 0 \quad (16)$$

2.3 塑性应变的定义

为了描述塑性发展的过程,需要定义塑性屈服函数、塑性流动准则和塑性强化函数。根据相关的试验数据^[3,6,16],可以看到塑性屈服和破坏面很大程度上取决于环压的大小。因此基于线性准则的 Mohr-Coulomb 或者 Drucker-Prager 准则有可能不再适合描述压力相关的情况,而曲面形式的屈服准则可以更好的反映实际情况。在 Pietruszczak^[17] 采用固定曲面形式屈服准则研究的启发下,本文提出如下破坏准则:

$$F = \left(\frac{q}{g(\theta)P_r} \right)^n + A \left(\frac{p-C}{P_r} \right) = 0 \quad (17)$$

式中 $q = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{S}}}$ 是偏应力, $\underline{\underline{S}} = (\mathbf{K} : \underline{\underline{\sigma}}) = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{1}}$, $\underline{\underline{\delta}}$ 为有效偏应力张量, θ 为洛德角,用函数 $g(\theta)$ 来考虑洛德角对加载面的影响,该函数可通过实验确定,因实验数据不足,此处取 $g(\theta) = 1$; n 和 A 是模型参数,用来决定破坏面的形式, C 反映材料受拉强度特性;参考压力 P_r , 取为 1 MPa, 以保证 A 为无量纲参数。引入塑性硬化函数 α 到式(17),得到以下塑性屈服准则:

$$f = \left(\frac{q}{g(\theta)P_r} \right)^n + \alpha A \left(\frac{p-C}{P_r} \right) = 0 \quad (18)$$

根据试验数据分析,塑性硬化函数 α 可表达为

$$\alpha = (1-d) \left[\alpha_0 + (1-\alpha_0) \frac{\gamma^p}{B_0 + \gamma^p} \right] \quad (19)$$

式中参数 α_0 和 B_0 分别为初始塑性硬化值和塑性强化参数, γ^p 为广义塑性变形表示为

$$d\gamma^p = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} d\underline{\underline{e}}^p : d\underline{\underline{e}}^p}}{A_0(I)} \quad (20)$$

$$A_0(I) = \exp \left[b_1 \frac{P_c}{P_r} \right] \quad (21)$$

式中 $A_0(I)$ 反映围压对塑性强化速率的影响, b_1 为材料参数, α 的值在 $[\alpha_0, 1]$ 区间变化,当 $\alpha = 1$ 时则屈服面 $f \rightarrow F$ 。

对于准脆性材料,三轴压缩试验结果表明,在加载过程中试样在经历体积收缩后,有一个朝塑性体积膨胀的过渡,在模型中引入流动法则来描述这个过渡,而关联流动法则不能很好地反映塑性发展的规律。本文参照 Pietruszczak 等^[17] 的塑性模型,采用以下非关联塑性势函数:

$$g = q + \eta(p-C) \ln \left(\frac{p-C}{I_0} \right) = 0 \quad (22)$$

式中 I_0 定义为在 p - q 坐标系中塑性势函数面与 p 轴交界处的值, η 定义了 p - q 坐标系中体积压缩-膨胀的转变面,当符合 $\partial g_s / \partial p = 0$ 条件时,从塑性压缩到塑性膨胀的转变就发生了。根据试验数据,可以假定这一转变面是线性函数,因此有

$$f_{c-d} = q - \eta(p-C) = 0 \quad (23)$$

塑性应变的增量形式可以被表示为

$$d\underline{\underline{\epsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (24)$$

式中 $\dot{\lambda}$ 为塑性算子。

考虑力学损伤的作用,塑性相容条件可表示为

$$df = \frac{\partial f}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + \frac{\partial f}{\partial \gamma^p} \dot{\gamma}^p + \frac{\partial f}{\partial d} \dot{d} = 0 \quad (25)$$

将式(24,25)带入增量形式的本构关系式(9),整理最终可得

$$\dot{\lambda}^s = \frac{\frac{\partial f}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \mathbf{C}(d) : \dot{\underline{\underline{\epsilon}}} + \left[\frac{\partial f}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \mathbf{C}' : \underline{\underline{\epsilon}}^e + \frac{\partial f}{\partial d} \right] \dot{d}}{\frac{\partial f}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \mathbf{C}(d) : \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} - \frac{\partial f}{\partial \gamma^p} \frac{h}{\chi_p}} \quad (26)$$

$$h = \sqrt{\frac{2}{3} \mathbf{K} : \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \right) : \mathbf{K} : \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \right)} \quad (27)$$

3 试验结果与数值计算验证

本文中选用的试验数据来源于闫东明等^[2]的研究成果,通过大连理工大学的大型静动态电液伺服试验系统,采用边长为 100 mm 的立方体试件。在忽略加载应变速率对混凝土力学性能影响的条件下,图 1 给出了不同围压情况下的应力 - 应变曲线。试验表明:随着围压的增加,混凝土的极限强度有较大幅度的增加;同时随着围压的提高,混凝土材料由脆性逐渐过渡为延性材料,应变大幅度地增加。

本模型包含 16 个模型参数,需要通过三轴压缩试验和拉伸试验确定,其中 E 和 ν 为材料弹性参数; f_c 和 C 为材料特征参数; $\alpha_1, \alpha_2, \beta, A_1, B_1$ 和 ξ_{dc}^0 是与材料损伤相关的参数; n, A, α_0, B_0, b_1 和 η 是材料塑性相关的参数。可以看出,本文提出的破坏面式(17)更具有普遍性:当 $n = 1$ 时,破坏面表现为 Mohr-Coulomb 准则类似形式;当 $n = 2$ 时,破坏面表现为 Drucker-Prager 准则类似形式。损伤标准化函数式(14)中模型参数 β 控制应力对损伤发展速度的影响。确定过程依次为(1)确定 E, ν, f_c 和 C 材料物理特征参数,在无单轴拉伸试验的情况下,取 $C = 1/10 f_c$; (2)根据不同围压下的破坏强度,用拟合的方法,找出最适合的破坏曲线,确定 n 和 A 的数值如图 2 所示,以单轴压缩试验($A_0(I) = 1$)数据处理获得塑性应变,结合式(17),绘制 $\alpha - \gamma^p$

表 1 材料和模型参数

Tab. 1 Material and modal parameters

E/MPa	ν	B_{1c}	C	α_1	α_2	β	A_{1c}
15E9	0.1	5E-6	10	1.0	1.0	2.0	0.4
f_c/MPa	ξ_{dc}^0	n	A	α_0	B_0	b_1	η
0.8	300	1.22	4	0.0	8E-5	0.23	1.0

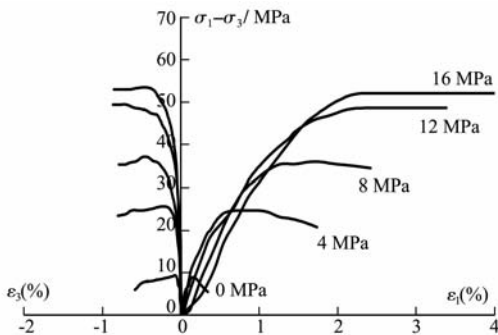


图 1 不同围压下的应力 - 应变曲线^[2]

Fig. 1 Stress-strain curves at different confining pressures

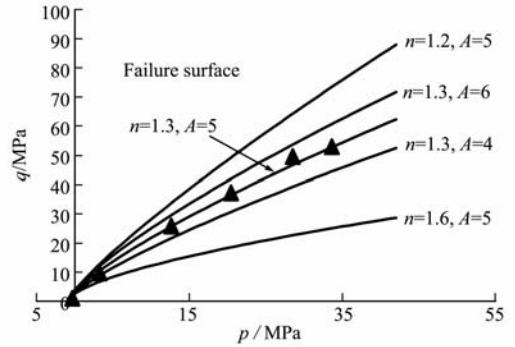


图 2 破坏曲线的确定及其参数的影响

Fig. 2 Determination of the failure surface and influence of the parameters

曲线,拟合出最适合的 α_0, B_0 如图 3 所示;根据围压试验数据和生成的 $\alpha - \gamma^p$ 获得 $A_0(I)$ 的值,从而确定 b_1 (或通过反演计算获得); (3) 记录不同围压下体积压缩到膨胀转折点时的荷载,绘制 $q - (p - C)$ 曲线,确定 η ; (4) 参数 α_1 和 α_2 反映破坏时体积模量和剪切模量与初始体积模量和剪切模量的比值,如破坏时体积模量和剪切模量为 0, 则 α_1 和 α_2 取为 1; A_{1c}, B_{1c} 和 ξ_{dc}^0 主要反映峰后下降段的变形特征,主要通过经验对比单轴压缩试验数据获得; (5) 损伤发展与应力状态相关,通过反演法确定 β 。具体确定过程可见参考文献[18]。通过第一部分给出的三轴压缩试验数据,表 1 给出了在复杂压应力状态下相应的 16 个材料和模型参数。

为了检验模型与试验数据的一致性,不同围压下的三轴数值模拟,图 4 分别表示了 3 个典型围压下应力 - 应变关系曲线。从图 4 可以看出,该模型可以较好地反映混凝土在不同应力状态下的力学特征。从单轴压缩试验结果可以看到,由于力学损伤的产生和发展,应力在峰值后有明显的软化段。在低围压状态混凝土体现了脆性特征。从围压分别在 4 MPa 和 12 MPa 情况下的力学特征可以看到,随着围压的增加,该模型可以很好地反映破坏荷载的提升,同时随着围压的增加峰后软化现象逐渐减小最终消失,说明在考虑应力状态的力学损伤准则的模型中,高围压状态的混凝土没有发生力学损伤,同时反映出材料的塑性特征。在缺少相同试件拉伸试验的情况下,根据以往的经验^[15,18],采用 $A_{1t} = 0.7, \xi_{dc}^0 = 30, B_{1t} = 8E^{-4}$ 作为材料参数,可以得到如图 5 所示的应力 - 应变关系曲线,对比文献[11]类似试验结果,可以认为此模型可以较好地反映混凝土材料在拉伸作用下的应力 - 应变关系。注意到在拉伸试验数值模拟

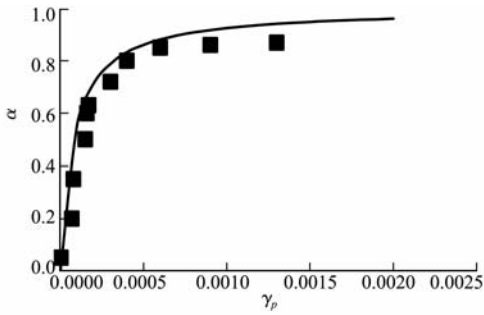


图 3 α_0 和 B_0 的确定
Fig. 3 Determination of α_0 and B_0

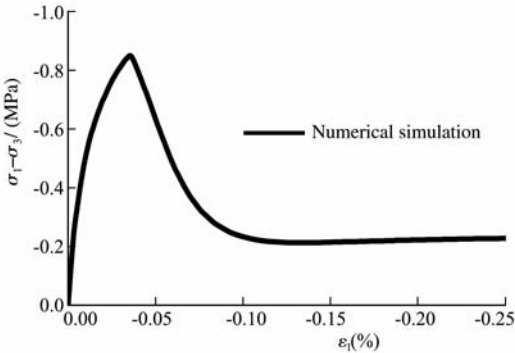


图 5 单轴拉伸试验数值模拟
Fig. 5 Simulation of uniaxial traction test

时, 峰后应力软化过程迅速, 同图 4 给出的三轴压缩试验模拟中的峰后软化趋势是有区别的。可以说明, 此模型可以同时在三轴压缩和拉伸的应力状态下运用, 模型可以进一步应用于后续的结构数值仿真。

4 结 论

本文在混凝土三轴试验研究的基础上, 建立了适应复杂应力状态的弹塑性损伤混凝土本构模型。本模型由热力学原理出发, 引入了考虑应力状态的力学损伤准则和多次方曲面形式的塑性屈服准则。尽管在模型的建立过程中有些复杂, 但是考虑了混凝土材料的主要力学特征, 如塑性应变、力学损伤、弹性特征的降低、塑性与损伤的相互作用、体积压缩到膨胀的变化, 特别是围压对材料脆塑性能的敏感性; 同时模型的参数可以通过不同围压的三轴试验得到确定。该本构充分考虑了应力状态对模型构造的影响, 因此可以较好地反映混凝土材料复杂围压状态下的力学特性。本文提出的混凝土本构模型可以通过模型参数的选择, 应用于小变形理论下的脆性, 准脆性以及塑性材料的应力-应变特征分析, 具有一定的普遍性。

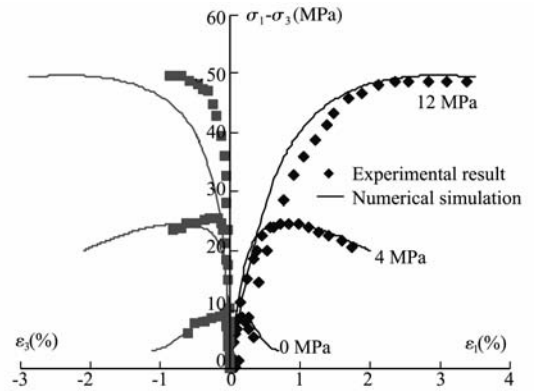


图 4 在不同围压状态下的三轴试验与数值比较
Fig. 4 Comparisons between numerical simulation and experimental data in triaxial compression test with different confining pressure

致 谢

本文研究过程中, 得到法国里尔科技大学邵建富教授的指导, 在此表示由衷感谢。

参考文献 (References):

- [1] 国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010[S].
- [2] 闫东明, 林 皋. 三向应力状态下混凝土强度和变形特性研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(6): 64-70. (YAN Dong-ming, LIN Gao. Behavior of concrete under the triaxial compression[J]. *Engineering Science*, 2007, 9(6): 64-70. (in Chinese))
- [3] Newman J B. Concrete under complex stresses [R]. Development in Concrete Technology, Lydon F D, ed., Applied Science, 1979, London.
- [4] 冷 飞, 林 皋, 杜荣强. 基于热力学定律的混凝土本构模型研究[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 144-147, 167. (LENG Fei, LIN-gao, DU Rong-qiang, Constitutive relationship of concrete based on thermodynamics [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(2): 144-147, 167. (in Chinese))
- [5] Bicanic N, Zienkiewicz O C. Constitutive model for concrete under dynamic loading[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1983, 2: 689-710.
- [6] Sfer D, Carol I, Gettu R, Etse G. Study of the behavior of concrete under triaxial compression[J]. *J Eng Mech*, 2002, 128(2): 156-163.
- [7] Dragon A, Mróz Z. A continuum model for plastic-brittle behaviour of rock and concrete[J]. *Int J Eng Sci*, 1979, 17(2): 121-137.
- [8] 李 杰, 吴建营. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I: 基本公式[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 14-20. (LI

- Jie, WU Jian-ying, Elastoplastic damage constitutive model for concrete based on damage energy release rates, part I: Basic formulations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, **38**(9):14-20. (in Chinese))
- [9] 王怀亮,宋玉普. 混凝土的弹塑性损伤双面本构模型[J]. 计算力学学报, 2008, **25**(2):218-223. (WANG Huai-liang, SONG Yu-pu, A two-surface plasticity/damage constitutive model for plain concrete[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, **25**(2):218-223. (in Chinese))
- [10] 杨 璐,沈新普,孙 光. 混凝土弹塑性损伤本构理论的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, **27**(3):321-324. (YANG Lu, SHEN Xin-pu, SUN Guang, Investigation on the constitutive models of elastoplasticity coupled with damage for concrete[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2005, **27**(3):321-324. (in Chinese))
- [11] 陈 萍,梁正平,黄书秦,等. 三峡三级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(5):38-42. (CHEN Ping, LIANG Zheng-ping, HUANG Shu-qin, et al. Complete curve of axial tensile stress-deformation of three-graded concrete in three gorges project[J]. *Journal of Hehai University* (Natural Sciences), 2001, **29**(5):38-42. (in Chinese))
- [12] Nemat-Nasser S, Hori M. *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*[M]. North-Holland, 1993.
- [13] Mura T. *Micromechanics of Defects in Solids*[M]. 2nd ed. Martinus Nijhoff Publishers, 1987 [revised].
- [14] Zaoui A. Continuum micromechanics: survey[J]. *J Eng Mech*, 2002, ASCE**128**(8):808-816.
- [15] Mazars J. Application de la mécanique de l'endommagement non linéaire et à la rupture du béton de structure[D]. Doctoral Thesis, University of Paris 6, 1984. (in French)
- [16] Ansari F, Li Q B. High-strength concrete subjected to triaxial compression[J]. *ACI Material Journal*, 1998, **95**(6):747-755.
- [17] Pietruszczak S, Jiang J, Mirza F A. An elastoplastic constitutive model for concrete[J]. *Int J Solids & Structures*, 1988, **24**(7):705-722.
- [18] Zhang Y. Modélisation du comportement élastoplastique d'une pâte de ciment soumise à ladégradation chimique[D]. University of Science and Technology of Lille, 2008.

A constitutive modelling of concrete under confining pressure condition

ZHANG Yan^{*1}, JIANG Lin-hua¹, CHEN Da²

(1, 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the present experimental result, the stress-strain relation under different confining pressures has been analyzed; based on the thermodynamics theory, a new constitutive law of concrete is established with the introduction of this modeling in detail. In this modelling, the failure function and mechanical damage criteria highly depends on the stress state. The model's parameters are determined from conventional triaxial tests. Numerical simulation shows that this elasto-plastical damage model for concrete can well explicit the main mechanical behavior of concrete for a large range of stress and it has a good agreement with the experimental data.

Key words: concrete; confining pressure state; constitutive law; fragile-plasticity; mechanical damage