

---

# 箍筋约束混凝土单轴拉压弹塑性损伤本构模型

万增勇<sup>1</sup>, 任晓丹<sup>1</sup>, 李杰<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 以混凝土规范单轴损伤本构为基础, 考虑损伤变量演化的物理意义与拉压损伤的耦合关系等因素, 提出一类新的损伤演化, 塑性应变的计算方法。建立了能综合考虑由箍筋约束效应造成的混凝土受压强度提高、延性的增强, 由纵筋造成的混凝土受拉刚化效应的损伤本构模型。结合试验数据对新的损伤本构模型进行了参数识别, 给出模型参数的计算方法。以 C++ 为开发工具, 将新的混凝土单轴拉压弹塑性损伤本构集成到 OpenSees 中, 最后通过从强度试件到构件再到结构三个尺度的算例来验证模型的实用性与可靠性。

**关键词:** 箍筋约束混凝土; 单轴损伤本构; 参数识别; OpenSees 二次开发

**中图分类号:** TU313      **文献标志码:** A

## Uniaxial elastic-plastic damage model for confined concrete

WAN Zengyong<sup>1</sup>, REN Xiaodan<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the concrete damage model in Chinese concrete structure design code, the physical meaning of damage evolution and the coupling of tension-compression damage are taken into consideration, a new way to calculate the evolution of damage and plastic strain is proposed. A new damage model in which the improvement of concrete strength and ductility due to stirrups, the tension stiffen effect due to longitudinal reinforcement are taken into consideration is established. Afterwards, the way to calculate the model parameters is proposed based on the experiment data. Finally, the modified damage model is added to OpenSees successfully and three examples are used to verify the practicality and reliability of this model.

**Key words:** confined concrete; uniaxial damage model; parameter identification; OpenSees secondary development

1

---

**基金项目:** 国家自然科学基金重大国际合作项目 (51261120374), 国家自然科学基金集成项目 (91315301)。

**作者简介,** 万增勇 (1989-), 男, 四川德阳人, 硕士研究生。E-mail: [wanzengyong@163.com](mailto:wanzengyong@163.com)

**收稿日期:** 2014 年 7 月

## 0 引言

随着对混凝土结构在安全性、适用性、经济性方面的要求日益增高，结构的非线性分析也愈加受到重视。如何准确预测建筑结构在灾害性荷载如地震、台风等作用下的非线性响应一直是结构工程研究的重点和难点之一。而这项工作的核心是混凝土本构关系的正确描述。

混凝土是一种多相复合介质材料，内部还包含有微裂缝、微孔洞等初始缺陷，在外荷载作用下损伤随机产生和发展，这些都导致了混凝土受力学性能的复杂性。对混凝土本构模型的研究与混凝土结构设计理念的发展相辅相成，在容许应力与承载力设计阶段，人们只关心混凝土的弹性性能与承载性能。在非线性全过程分析中，下降段的力学性能备受关注。因此，混凝土本构模型的发展经历了从弹性本构到弹塑性本构再到损伤本构的历程。

损伤力学是近 50 年发展起来的固体力学的分支，它的兴起和发展可追溯至 1958 年 Kachanov<sup>[1]</sup>的工作，他应用“连续性因子”和有效应力的概念，成功处理了金属蠕变的脆性断裂问题。早期对混凝土损伤本构的研究均忽略了混凝土的塑性变形，发展了混凝土弹性损伤本构，如 Loland<sup>[2]</sup>， Mazars<sup>[3]</sup>等。而试验表明，混凝土在反复加卸载过程中会有大量残余变形，而这种残余变形是弹性损伤本构无法描述的。为此，学者开始认识到塑性和损伤的耦合关系，将塑性变形的演化规则纳入损伤本构的研究当中，以期能够反应混凝土材料的残余变形，如 Lee 等<sup>[4]</sup>， Wu 等<sup>[5]</sup>。

对混凝土损伤本构的研究多集中于素混凝土，模型具有明确的物理意义，而对箍筋约束混凝土的研究多以经验事实为主。

1903 年 Considere<sup>[6]</sup>发现利用螺旋箍筋能有效提高轴心受压柱的承载力。钢筋混凝土柱在受力变形的过程中，箍筋能有效约束混凝土内部裂纹的产生与发展，从而表现为混凝土强度与延性的提高。由于箍筋约束是一种被动约束，这种强度与延性的提高作用同配筋量，配筋方式以及混凝土自身的受力变形性能等息息相关。在近百年的箍筋约束混凝土的研究中，国内外学者提出了大量的箍筋约束混凝土本构模型，如 Kent-Park 模型<sup>[7]</sup>， Mander 模型<sup>[8]</sup>， Saatcioglu-Razvi 模型<sup>[9]</sup>， 钱稼茹模型<sup>[10]</sup>等。各模型考虑的影响因素不尽相同，在实际应用中表现出的性能也各有千秋。

本质上讲，箍筋对混凝土的约束作用会导致混凝土损伤的减缓，以表现出强度和延性的提高。这种现象可通过建立损伤模型参数与约束效应之间的关系来描述。本文作者以素混凝土试块单轴受力规范本构为基础，考虑拉压损伤的耦合关系等因素，提出一类新的损伤演化、塑性应变的计算方法。结

合现有箍筋约束本构理论与箍筋约束混凝土单轴受压试验数据，将该本构模型推广到箍筋约束混凝土的应用中，给出箍筋约束混凝土损伤本构模型中各参数的计算方法。并以 C++ 为开发工具将新本构集成到 OpenSees 中，通过从素混凝土试块到构件再到结构三个尺度上的算例，验证该模型实用性与有效性。

## 1 混凝土单轴弹塑性损伤本构

根据热力学第二定律，材料的损伤和塑性流动均属于不可逆热力学过程，因此对于等温纯力学过程必须满足热力学不可逆条件，即能量耗散不等式<sup>[11]</sup>，在此基础上可以得到单轴应力应变关系为

$$\begin{aligned}\sigma &= (1-d)E_c \varepsilon = (1-d')E_c (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ &= (1-d')E_c \varepsilon_e\end{aligned}\quad (1)$$

式中， $d$  表示弹性损伤变量， $d'$  表示弹塑性损伤变量， $E_c$  为混凝土初始弹性模量， $\varepsilon$  为总应变， $\varepsilon_p$  为塑性应变， $\varepsilon_e$  为弹性应变。考虑混凝土的抗拉强度，并以拉应力为正，单轴应力-应变曲线可分为四段，如图 1 所示。

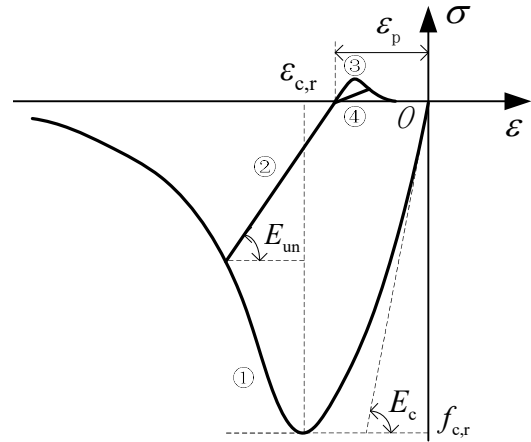


图 1 混凝土单轴弹塑性损伤本构模型  
Fig.1 Uniaxial elastic-plastic damage model for concrete

分析中取混凝土初始弹性模量认为拉、压相同。图 1 中，曲线①为受压单调加载曲线，其计算式为

$$\sigma = (1-d'_c)E_c(\varepsilon_c - \varepsilon_p) \quad (2)$$

曲线②为受压卸载、再加载曲线，其计算式为

$$\sigma = (1-d'_c)E_c(\varepsilon_c - \varepsilon_p) \quad (3)$$

曲线③为受拉单调加载曲线，其计算式为

$$\sigma = (1-d'_{tc})E_c(\varepsilon_t - \varepsilon_p) \quad (4)$$

曲线④为受拉卸载、再加载曲线，其计算式为

$$\sigma = (1 - d_{tc})E_c(\varepsilon_t - \varepsilon_p) \quad (5)$$

压应变可表示为:

$$\varepsilon_c = \varepsilon H(\varepsilon_p - \varepsilon) \quad (6)$$

拉应变可表示为:

$$\varepsilon_t = \varepsilon H(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (7)$$

式 (6), 式 (7) 中  $H(\bullet)$  为 Heaviside 函数, 可表示为:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases} \quad (8)$$

定义  $d_c$  为受压弹性损伤变量, 其表达式为<sup>[12]</sup>:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n_c}{n_c - 1 + x_c^{n_c}} & (x_c \leq 1) \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x_c - 1)^2 + x_c} & (x_c > 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$x_c = \frac{r_c}{\varepsilon_{c,r}} \quad (10a)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (10b)$$

$$n_c = \frac{1}{1 - \rho_c} \quad (10c)$$

其中,  $\alpha_c$  为混凝土受压应力应变曲线下降段参数,  $f_{c,r}$  与  $\varepsilon_{c,r}$  分别为混凝土单轴抗压强度值及其所对应的应变。另外, 受压应变代表值为:

$$r_c = \min_{[0,t]}(\varepsilon) \quad (11)$$

区间  $[0,t]$  表示到目前时刻  $t$  为止的整个加载过程, 式 (11) 表示到目前时刻  $t$  为止所有  $\varepsilon$  的最小值。

定义  $d_t$  为受拉弹性损伤变量, 其表达式为<sup>[1]</sup>:

$$d_t = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_t n_t}{n_t - 1 + x_t^{n_t}} & (x_t \leq 1) \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x_t - 1)^2 + x_t} & (x_t > 1) \end{cases} \quad (12)$$

$$x_t = \frac{r_t}{\varepsilon_{t,r}} \quad (13-a)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (13-b)$$

$$n_t = \frac{1}{1 - \rho_t} \quad (13-c)$$

其中,  $\alpha_t$  为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数,  $f_{t,r}$  与  $\varepsilon_{t,r}$  分别为混凝土单轴抗拉强度及其所对应的应变。另外, 受拉应变代表值为:

$$r_t = \max_{[0,t]}(\varepsilon_t - \varepsilon_p) \quad (14)$$

表示到目前时刻  $t$  为止的整个加载过程, 式 (14) 表示到目前时刻  $t$  为止所有  $(\varepsilon_t - \varepsilon_p)$  的最大值。考虑压碎及拉裂对材料受拉性能的影响, 受拉损伤变量取为:

$$d_{tc} = 1 - (1 - d_t)(1 - s_c d_c) \quad (15)$$

其中  $s_c$  ( $0 < s_c \leq 1$ ) 为受压损伤对受拉损伤的影响系数, 对于单轴受力情况, 可取 0.8~1.0。认为塑性应变  $\varepsilon_p$  与受拉加载无关, 只与受压加载有关, 其计算式为:

$$\varepsilon_p = \phi_p r_c \quad (16)$$

式中  $\phi_p$  为塑性应变系数。 $\phi_p$  值的确定建立在 Karsan 等<sup>[13]</sup>, Buyukoturk 等<sup>[14]</sup>, Bahn 等<sup>[15]</sup>的试验数据基础之上, 如图 2 所示。

$$\phi_p = \xi_p [\exp(\eta_p d_c) - 1] \quad (17)$$

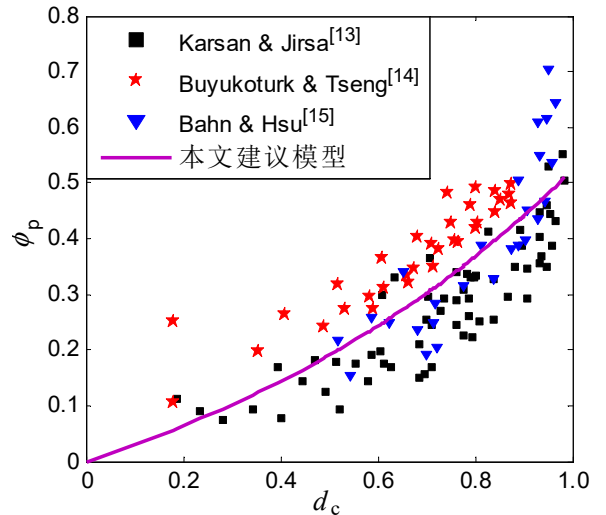


图 2 塑性应变  
Fig.2 Plastic strain

其中:  $\xi_p$ 、 $\eta_p$  为模型参数,  $\xi_p = 0.2 \sim 0.3$ ,  $\eta_p = 1.0 \sim 1.3$ 。

根据式 (1),  $d_c'$  的值取为

$$d'_c = \frac{d_c - \phi_p}{1 - \phi_p} \quad (18)$$

由于未考虑受拉加载过程引起的塑性演化，受拉损伤变量无弹性、弹塑性之分，只有弹性受拉损伤变量。混凝土受拉产生损伤后再反向受压对混凝土受压损伤的影响并不明显，因此这里不再考虑受拉损伤累积对受压损伤的影响。

## 2 箍筋约束混凝土受压损伤参数识别

箍筋的横向约束作用会限制混凝土在受压过程中的侧向变形，延缓内部裂缝的发展，从而提高混凝土强度和变形能力。而这种提高幅度与混凝土强度、箍筋强度、配筋率、配箍方式等因素有关。相比于素混凝土，约束混凝土的损伤发展更为缓慢。而在上述混凝土损伤模型中下降段参数 $\alpha_c$ 、抗压强度 $f_{c,r}$ 与其所对应的应变 $\varepsilon_{c,r}$ 直接反应损伤的发展趋势，因此需要建立箍筋约束效应与这三个模型参数的关系。

为综合考虑箍筋强度、直径、间距、配筋形式等因素的影响，Mander<sup>[8]</sup>提出了有效约束区和有效约束力的概念，如图3所示。

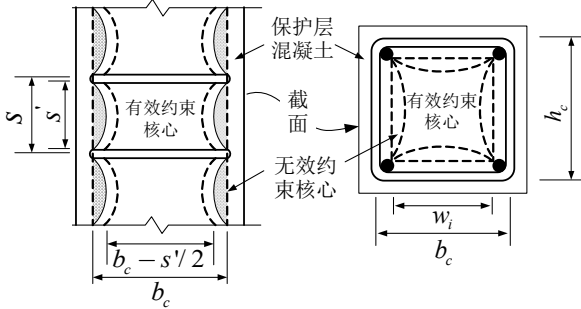


图3 箍筋约束混凝土有效约束区  
Fig.3 Effective confined region

定义箍筋的约束力为 $f_1$ ，而有效约束力为 $f'_1$ ，则：

$$f'_1 = k_c f_1 \quad (19)$$

式中， $k_c = A_c / A_{cc}$ 为有效约束系数， $A_c$ 、 $A_{cc}$ 分别为有效约束核心区 and 核心混凝土的面积，其表达式为

$$A_c = \left( b_c h_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s^2}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s^2}{2h_c} \right) \quad (20)$$

$$A_{cc} = b_c h_c (1 - \rho_{cc}) \quad (21)$$

式中， $b_c$ 、 $h_c$ 分别为截面的长、宽， $w_i$ 为纵筋的净距， $s'$ 为箍筋间的净距， $\rho_{cc}$ 为核心混凝土区的纵筋配筋率。约束力可通过平衡方程求得：

$$f_{lx} = \frac{A_{sx} f_y}{sh_c} \quad (22a)$$

$$f_{ly} = \frac{A_{sy} f_y}{sb_c} \quad (22b)$$

式中 $f_y$ 为箍筋屈服强度。

约束混凝土的强度 $f_{c,r}$ 与相应的应变 $\varepsilon_{c,r}$ 可通过有效约束力求得<sup>[8]</sup>：

$$f_{c,r} = f_{c0} \left[ -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{f_{c0}}} - 2 \frac{f'_1}{f_{c0}} \right]$$

$$\varepsilon_{c,r} = \varepsilon_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \right] \quad (23)$$

式中 $f_{c0}$ 、 $\varepsilon_{c0}$ 分别素混凝土强度及其所对应的应变。

由于箍筋约束是一种被动约束，因此约束混凝土在受压过程中损伤的发展与混凝土本身的强度等性质相关，因此提出如下关系：

$$\alpha_c = \alpha_c(f'_1, f_{c0}) \quad (24)$$

用于识别上述关系的试验数据选择见表1。根据表1的试验数据，可得出如下关系：

$$\alpha_c = a f_{c0} - b f'_1 + c \quad (25)$$

式中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别取0.013、0.24、0.47，其中 $f_{c0}$ 、 $f'_1$ 单位取MPa。式(25)表明，随着混凝土强度的提高，下降段参数增大，应力-应变曲线下降段越陡；而随着有效约束力的增大，下降段参数减小，应力-应变曲线下降趋缓。

## 3 箍筋约束混凝土受拉损伤参数识别

在单向受力状态，混凝土开裂后，钢筋和混凝土存在相互作用（黏结滑移等），混凝土所受应力向钢筋转移，从而形成所谓的混凝土受拉刚化效应，需要对混凝土受拉本构模型做出修正。由于产生混凝土非线性行为的本质在于混凝土的损伤，因此对本构模型的修正实质是对受拉损伤演化法则的修正。可以通过修正抗拉强度后的软化段应力-应变曲线来实现。Steven等<sup>[19]</sup>根据钢筋混凝土受拉试验提出刚化的应力-应变关系曲线为：

$$\frac{\sigma}{f_t} = (1 - \theta) \exp[\theta(\varepsilon_{tr} - \varepsilon_t)] + \theta \quad (26)$$

式中， $\theta$ 与纵筋配筋率 $\rho_s$ 以及直径 $d_b$ 有关，可表达为 $\theta = c \rho_s / d_b$ ， $c$ 为常数，一般可取为75mm。

$\theta$ 为反映钢筋硬化程度的系数,与钢筋配筋率有关,可取 $\theta = 270/\sqrt{\rho} \leq 1000$ 。式(26)修正限制条件是计算混凝土受拉应变不应大于裂缝张裂应变 $\varepsilon_{t,u}$ 。对于一般配筋率的混凝土,取应变 $\varepsilon_{t,u}(1.0 \times 10^{-3})$ 约为混凝土受拉线弹性极限应变( $1.0 \times 10^{-4}$ )的十倍。图4给出了不同配筋情况下归一化的混凝土受拉刚化应力-应变曲线。

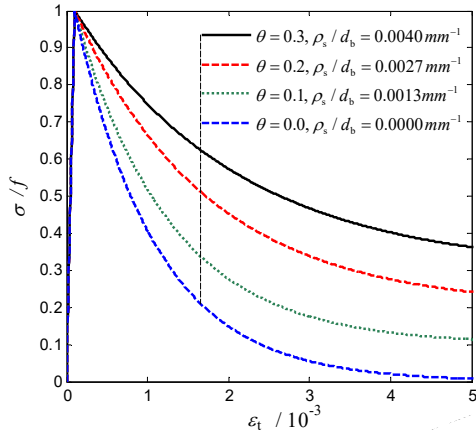


图4 不同配筋率和直径对受拉软化段的影响  
Fig.4 Effect of reinforcement ratio and diameter on softening region

以 Steven 模型为基础,以受拉弹性极限应变到开裂应变间 Steven 模型与损伤模型误差最小为目标,建立受拉损伤本构下降段参数 $\alpha_t$ 与抗拉强度 $f_t$ 以及 $\theta$ 的关系为:

$$\alpha_t = (\lambda_1 + \lambda_2 f_t) \exp(-\lambda_3 \theta) \quad (27)$$

式中 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ 分别取0.06, 0.05, 4.35。图5对比了当混凝土抗拉强度为2MPa时,不同配筋情况下的受拉损伤本构模型与 Steven 受拉刚化模型。

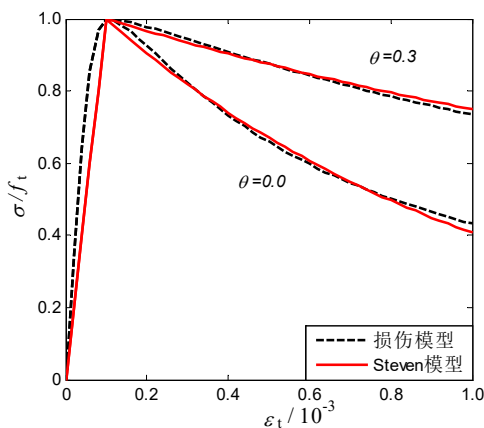


图5 受拉损伤本构与 Steven 受拉刚化模型对比  
Fig.5 Comparison between Steven model with concrete damage model

由式(27)可见,随着混凝土抗拉强度的提高,应力-应变下降段变陡,随着纵筋配筋量的增加,应

力-应变下降段趋缓。

表1 试验数据

试件名	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$\alpha_c$	试件数	来源
HJA1~5	48	2.29	0.26	5	本文
MJA1~5	48	1.34	0.63	5	
LJA1~5	48	0.78	0.82	5	
HA1	47.8	3.36	0.23	1	文献 [16]
HA2	47.8	2.21	0.39	1	
HA3	47.8	1.63	0.77	1	
HA5	47.8	2.58	0.35	1	
HA6	47.8	1.61	0.65	1	
HA7	47.8	1.06	1.60	1	
LA1	25.2	1.61	0.11	1	
LA2	25.2	1.02	0.19	1	
A1~3	25.2	1.54	0.37	3	文献 [17]
B1~3	22.7	1.74	0.39	6	
C1~3	22.7	1.74	0.39	6	
D1~3	25.4	1.51	0.27	6	
E1~3	25.4	1.51	0.27	6	
z9	37.5	0.89	1.05	1	文献 [10]
z10	37.5	1.36	0.87	1	
z11	37.5	2.75	0.59	1	
z13	37.5	4.49	0.43	1	
SC23	60	4.26	0.21	1	文献 [18]
SC24	60	3.84	0.21	1	
SC25	60	4.07	0.10	1	
SC26	60	4.18	0.21	1	

表 2 素混凝土受压本构模型参数<sup>[12]</sup>

Table2 Model parameters for plain concrete in compression

$f_{c,r}/\text{MPa}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$\varepsilon_{c,r}/10^{-3}$	1.47	1.56	1.64	1.72	1.79	1.85	1.92	1.98	2.03	2.08	2.13	2.19	2.24
$\alpha_c$	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00	3.25	3.50	3.75	3.99

表 3 素混凝土受拉本构模型参数<sup>[12]</sup>

Table.3 Model parameters for plain concrete in tension

$f_{t,r}/\text{MPa}$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{t,r}/10^{-3}$	0.065	0.081	0.095	0.107	0.118	0.128	0.137
$\alpha_t$	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

## 4 基于 OpenSees 的损伤本构二次开发与算例

OpenSees 全名地震工程模拟开体系 (Open System for Earthquake Engineering Simulation), 是由加州大学伯克利分校为主研发而成的用于结构和岩土地震响应模拟的开源软件, 可用于非线性结构的静力以及动力分析。以 C++ 语言为开发工具, 将上述损伤本构模型集成到 OpenSees 中, 并用其进行非线性分析, 以验证模型的实用性与可靠性。

### 4.1 素混凝土试块单轴往复加载

以 OpenSees 为分析工具, 建立混凝土素混凝土试块单轴受力往复加载模型,  $f_{c,r}=27.8\text{MPa}$ ,  $\varepsilon_{c,r}=0.002$ ,  $E_c=35\text{GPa}$ ,  $\alpha_c=1.2$ 。单轴往复加载试验数据来自文献[13], 计算结果与试验结果对比如图 6 所示。

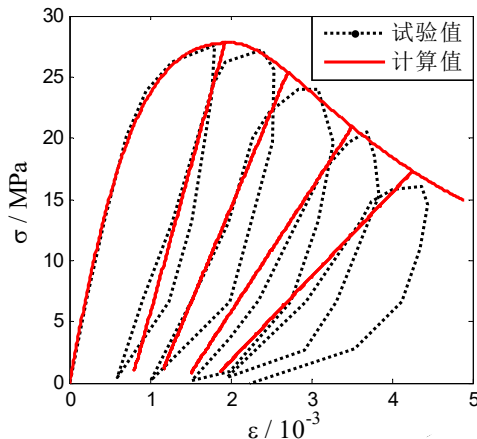


图 6 单轴滞回曲线

Fig.6 Uniaxial hysteresis curves

在单调受压加载过程中, 典型受压弹性、弹塑性损伤的演化如图 7 所示。

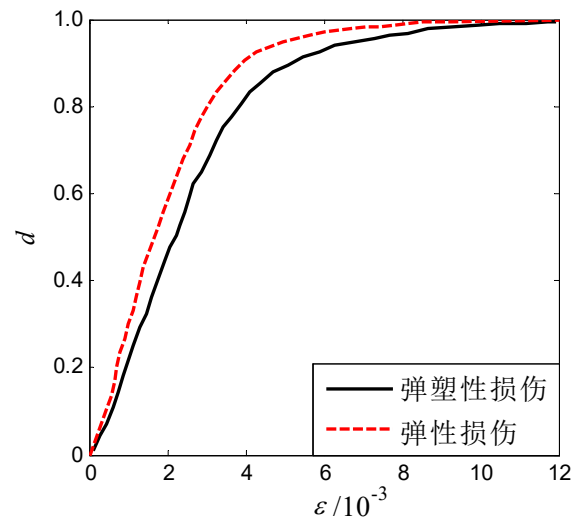


图 7 弹性、弹塑性损伤演化

Fig.7 Elastic and elastic-plastic damage evolution

通过上述分析可见: 上述模型能够较好地描述混凝土的强度退化、刚度退化, 塑性变形等非线性行为。

### 4.2 钢筋混凝土柱推覆分析

试验数据采用文献[20]的钢筋混凝土柱推覆试验 (试件 BG-8)。柱高 1.645m, 截面 350mm×350mm; 混凝土保护层厚度 29mm; 纵筋数目 12 根, 直径 19.5mm; 箍筋直径 6.6mm, 间距 76mm; 轴压比 0.231; 混凝土强度为 34MPa; 核心混凝土受压下降段参数  $\alpha_c$  计算值为 0.326, 受拉下降段参数  $\alpha_t$  计算值为 0.2; 保护层混凝土受拉下降段参数分别取 1.70、2.81 (表 2, 表 3)。采用位移加载。试验示意图见图 8。

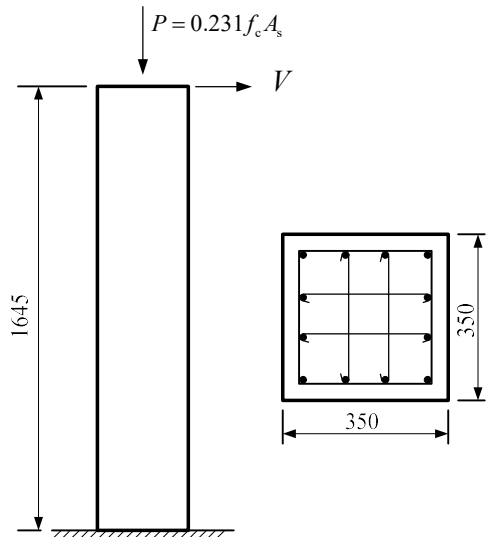


图8 试件 BG-8 (Saatcioglu & Grira)  
Fig.8 Specimen BG-8 (Saatcioglu & Grira)

用本文的损伤本构模型对该柱进行推覆分析，分析结果与试验结果对比如图9。

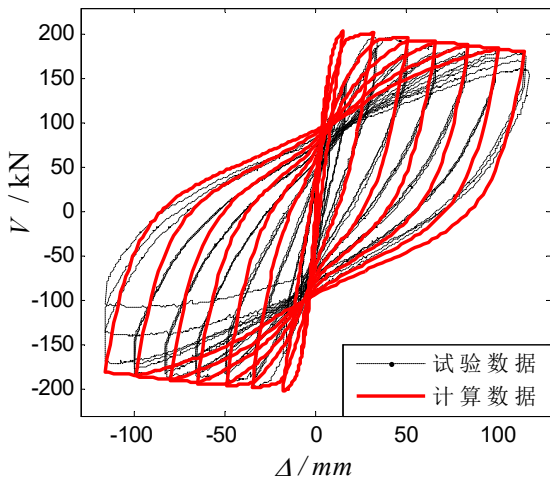


图9 柱推覆分析  
Fig.9 Pushover analysis of column

从图9中可以看出，该本构模型能有效地反应柱在推覆试验中的非线性性能。计算值的初始刚度偏大是由于在试验中柱底并非完全刚接，会有一些的滑移，而在建模计算的过程中并未考虑这些因素。

#### 4.3 钢筋混凝土三维框架地震响应分析

该算例为三层框架结构，柱截面采用非弹性纤维截面，梁截面为弹性截面，楼板采用刚性楼板。受到双向地震激励作用， $x$ 方向为 *tabasFN* 波，最大加速度为  $0.8999g$  ( $g=9.8m/s^2$ )， $y$ 方向为 *tabasFP* 波，最大加速度为  $0.9772g$ ，框架如图10所示。

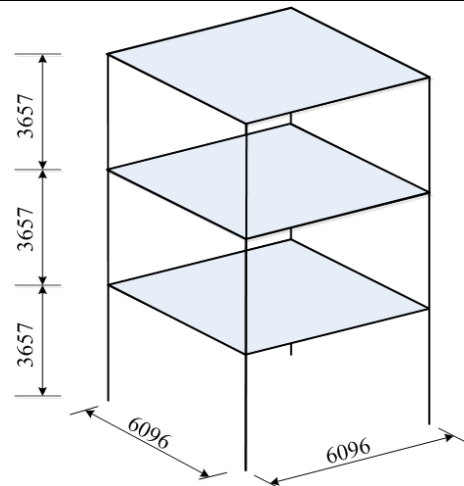


图10 三维框架模型  
Fig.103D column model

分析所得 X 和 Y 方向顶层位移时程如图11所示。

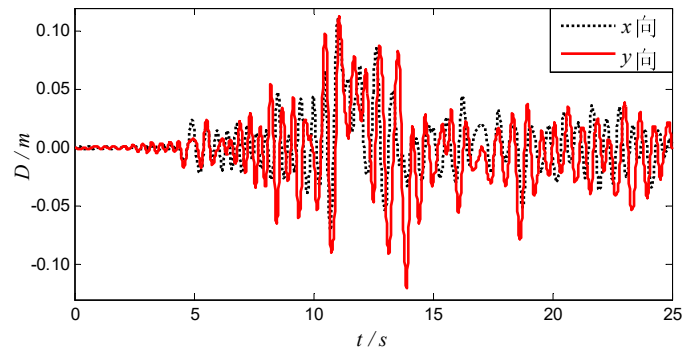


图11 顶层位移时程曲线  
Fig.11 Displacement history of the top floor

从上述分析中可以知道，该本构模型能够用于框架结构在地震作用下的非线性分析。并且对不同复杂程度的有限元模型，该本构的收敛性均较好。

## 5 结论

1) 基于混凝土结构设计规范损伤本构，提出了考虑损伤拉压耦合的损伤演化法则，给出了一类新的弹性损伤以及塑性应变的计算方法。

2) 根据现有箍筋约束本构模型，受拉刚化混凝土本构模型以及试验数据，给出了箍筋约束混凝土损伤本构模型参数的计算方法。

3) 以 C++ 为开发工具，将上述单轴损伤本构模型集成到 OpenSees 中，以推广该损伤本构的应用，并通过不同尺度的有限元模型测试了该本构模型的实用性与可靠性。

4) 箍筋约束的存在导致损伤演化的减缓，从而表现为混凝土强度与延性的提高。与传统的箍筋约束本构相比本文所提本构模型加卸载方程统一；各参数物理意义更明确；能较好地反应混凝土在反复

加载下强度退化, 刚度退化单边效应等特性; 在不同尺度的有限元分析中均有较好的收敛性。

## 参考文献

- [1]Kachanov L M. Time of the rupture process under creep conditions[J]. *Isv. Akad. Nauk. SSR. Otd Tekh. Nauk*, 1958, 8: 26-31.
- [2]Loland K E. Continuous damage model for load-response estimation of concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(3): 395-402.
- [3]Mazars J. A description of micro and macroscale damage of concrete structures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 25(5):729-737.
- [4]Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [5]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): 583-612.
- [6]Considère A. *Experimental researches on reinforced concrete*[M]. Translated and Arranged by Leon S. Moisseiff. New York: McGraw-Hill publishing Company, 1906, 100-195.
- [7]Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [8]Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [9]Saatcioglu M, Razvi S R. Strength and ductility of confined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1992, 118(6): 1590-1607.
- [10]钱稼茹, 程丽荣. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2002, 42(10): 1369-1373.(QIAN Jiaru, CHENG Lirong. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2002, 42(10): 1369-1373.(in Chinese))
- [11]李杰, 任晓丹. 混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评[J]. *力学进展*, 2010, 40(3): 284-297. (LI Jie, REN Xiaodan. A review on the constitutive model for static and dynamic damage of concrete [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(3): 284-297. (in Chinese))
- [12]曾莎洁. 混凝土随机损伤本构模型与试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2012: 2-159. (ZENG Shajie. *Dynamic experimental research and stochastic damage constitutive model for concrete* [D]. Shanghai: Tongji University, 2012: 2-159. (in Chinese))
- [13]Karsan I D, Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loadings[J]. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1969, 95(12): 2543-2563.
- [14]Buyukozturk O, Tseng T M. Concrete in biaxial cyclic compression[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1984, 110(3): 461-476.
- [15]Bahn, B.Y., Hsu, C.T. Stress-strain behaviour of concrete under cyclic loading. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(2): 178-193.
- [16]胡海涛, 叶知满. 复合箍筋约束高强混凝土应力应变性能[J]. *工业建筑*, 1997, 27(10): 24-29. (HU Haitao, YE Zhiman. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by overlapping hoops [J]. *Industrial Construction*, 1997, 27(10): 24-29. (in Chinese))
- [17]钱稼茹, 纪晓东, 乐毓敏. 拉筋复合箍约束混凝土短柱轴心受压试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(11): 61-68. (Qian Jiaru, JI Xiaodong, LE Yumin. *Experimental study on axial compressive behavior of short concrete columns confined with hoops and cross ties* [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(11): 61-68. (in Chinese))
- [18]Razvi S, Saatcioglu M. Confinement model for high-strength concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1999, 125(3): 281-289.
- [19]Stevens N J, Uzumeri S M, Will G T. Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis[J]. *ACI Structural Journal*, 1991, 88(1): 49-59.
- [20]Saatcioglu M, Grira M. Confinement of reinforced concrete columns with welded reinforced grids[J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(1): 29-39.