

文章编号: 1000-4750(2011)09-0095-08

箍筋约束混凝土单轴滞回本构实用模型

*齐 虎¹, 李云贵², 吕西林¹

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 中国建筑科学研究院建筑工程软件研究所, 北京 100013)

摘 要: 该文深入研究了箍筋约束混凝土单轴滞回本构模型, 并利用 ABAQUS 二次开发功能对 6 种典型的模型进行计算分析。通过各模型计算结果与试验结果的比较以及各模型之间的比较, 从受压骨架曲线, 受压滞回曲线, 受拉滞回曲线 3 个方面, 研究了各模型的准确性和计算效率。在对比分析的基础上, 建立了一个与实验符合较好、且考虑复杂加载路径的混凝土单轴滞回实用本构模型。该模型受压骨架曲线采用 Mander 模型, 受压滞回曲线采用本文提出的模型, 受拉滞回曲线采用滕-邹模型。

关键词: 混凝土单轴本构模型; 实用本构模型; 加载路径; 滞回曲线; 骨架曲线

中图分类号: TP375 **文献标志码:** A

A PRACTICAL CONFINED CONCRETE CONSTITUTIVE MODEL UNDER UNIAXIAL HYSTERESIS LOAD

*QI Hu¹, LI Yun-gui², LU Xi-lin¹

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Institute of Building Engineering Software, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: To develop a constitutive model for confined concrete under uniaxial hysteresis load, six kinds of typical models were studied and compared by the use of ABAQUS UMAT. Through the comparison between model calculations and experimental results of these models, the accuracy and computational efficiency of each model were investigated considering three aspects: compression skeleton curve, compression hysteresis curve, and tension hysteresis curve. Finally, a practical concrete uniaxial constitutive model for hysteretic loading was developed, which is capable of considering complex loading paths by using Mander model in compression skeleton, proposed model in compression range of hysteresis curve and Teng-Zou mode in tension range hysteresis curve.

Key words: uniaxial concrete constitutive model; practical constitutive model; loading paths; hysteresis curve; skeleton curve

混凝土的单轴本构模型是其最基本的本构关系, 又是多轴本构模型的基础。在钢筋混凝土结构的非线性分析中, 例如在构件的截面刚度、截面极限应力分布、承载力和延性, 超静定结构的内力和全过程分析等计算中, 它是不可或缺物理方程, 对计算结果的准确性起决定性作用^[1]。到目前为止, 关于单轴反复荷载作用下混凝土的力学性能, 各国

学者做了不少研究工作, 提出了多个模型, 这些模型表达式各异, 计算结果差别较大。由于现有模型都只是一定数量的试验结果的数学描述, 只是在一定条件下或某一范围内适用^[2], 所以有必要对它们进行综合对比分析。

本文通过深入研究现有约束混凝土单轴滞回本构模型, 筛选出 6 种有代表性的模型在 ABAQUS

收稿日期: 2010-01-14; 修改日期: 2010-03-22

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题项目“现代建筑设计与施工关键技术研究”(2006BAJ01B07)

作者简介: *齐 虎(1982—), 男, 湖北公安人, 博士生, 主要从事混凝土结构的研究工作(E-mail: qihu_810@163.com);

李云贵(1962—), 男, 辽宁锦州人, 研究员, 博士后, 副总工程师, 长期从事建筑结构系列 CAD 软件 PKPM 的开发及相关研究工作(E-mail: liyungui@china.com);

吕西林(1955—), 男, 陕西岐山人, 教授, 工学博士, 博导, 所长, 长期从事高层抗震和减震研究(E-mail: lxlst@mail.tongji.edu.cn).

中二次开发^[3],通过对比计算,找出各模型的优缺点,并为了工程实用的方便提出实用的箍筋约束混凝土单轴滞回本构模型。下面从受压骨架曲线、受压滞回曲线、受拉滞回曲线 3 个方面进行阐述。

1 混凝土单轴受压骨架曲线研究

1.1 模型介绍

首先对本文遴选的本构模型受压骨架曲线做

简要的介绍,如表 1。

1.2 单轴受压骨架曲线上升段研究

文献[4-5]完成了大量普通箍筋约束混凝土柱的轴心受压试验,实验结果具有代表性。图 1 是取自文献[4-5]的不同截面形式、不同配箍特征值混凝土柱轴心受压应力-应变曲线上升段试验结果。

表 1 各模型受压骨架曲线表达式

Table 1 The compression skeleton curve formula of each model			
表达式	建议者	表达式	建议者
过-张模型 ^[7] , 当 $\lambda_y < 0.32$ 时:			
朱伯龙模型 ^[6] $\sigma = \begin{cases} 2k_1 f_c \varepsilon / (\varepsilon_c + \varepsilon), & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ k_1 f_c \{1 - [200 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_c)^2]\}, & \varepsilon_{2c} \geq \varepsilon > \varepsilon_c \\ 0.3k_1 f_c, & \varepsilon > 2\varepsilon_{2c} \end{cases}$	朱伯龙	$y = \begin{cases} \alpha_{ac} x + (3 - 2\alpha_{ac}) \cdot x^2 + (\alpha_{ac} - 2) \cdot x^3 & x \leq 1.0 \\ \frac{x}{\alpha_{dc} (x - 1)^2 + x} & x > 1.0 \end{cases}$	① 过镇海 张秀琴
		当 $\lambda_y > 0.32$ 时: $y = \frac{x^{0.68} - 0.12 \cdot x}{0.37 + 0.51 \cdot x^{1.1}}$	②
Saatecioglu 模型 ^[9]			
Blakeley 模型 ^[8] $\sigma = \begin{cases} f_c [2\varepsilon / \varepsilon_{cc} - (\varepsilon / \varepsilon_{cc})^2], & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ f_c [1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_{cc})], & \varepsilon_c < \varepsilon \leq \varepsilon_{2c} \\ 0.2f_c, & \varepsilon > \varepsilon_{2c} \end{cases}$	Blakeley Park	$\sigma = \begin{cases} f_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(2+2k)}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \\ f_{cc} - (\varepsilon - \varepsilon_{cc}) \left(\frac{0.15 f_{cc}}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_{cc}} \right), & \varepsilon > \varepsilon_{cc} \end{cases}$	Saatecioglu Razvi
Mander 模型 ^[11]			
腾-邹模型 ^[10] 同过-张模型。	腾智明、 邹离湘	$\sigma = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$	Mander

注:表 1 中参数的含义请参考有关文献,本文限于篇幅无法一一给出。

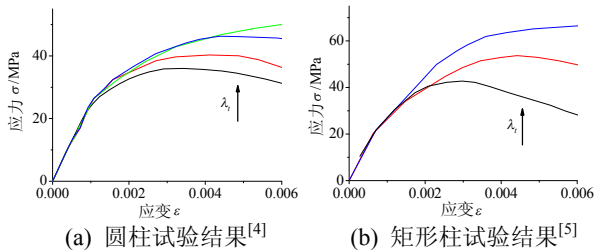


图 1 箍筋率约束混凝土轴心受压应力-应变曲线
Fig.1 The strain-stress curve of confine concrete under uniaxial load

从图 1 中可看出不同截面形式,不同配箍特征值,混凝土应力-应变曲线上上升段初期基本重合,也就是说配箍特征值对混凝土初始弹性模量影响不大。各模型在单调受压荷载作用下,配箍特征值 λ_f 取不同值时,计算结果如图 2。从图 2 可以看出,朱伯龙模型、Saatecioglu 模型随着配箍特征值的上升,骨架曲线初始斜率明显变小,而 Mander 模型、过-张模型变化不大与试验情况基本相符,但过-张模型在配箍特征值为 0.32 时,上升段有个突变。从后面的计算结果与试验结果比较可以看出,0.32 前比较符合,0.32 以后差异较大,原因是其骨架曲线

在配箍特征值小于 0.32 时用式①,大于 0.32 时用式②,对于上升段来说,本文通过计算发现式①也适用于配箍特征值大于 0.32 时的情况。

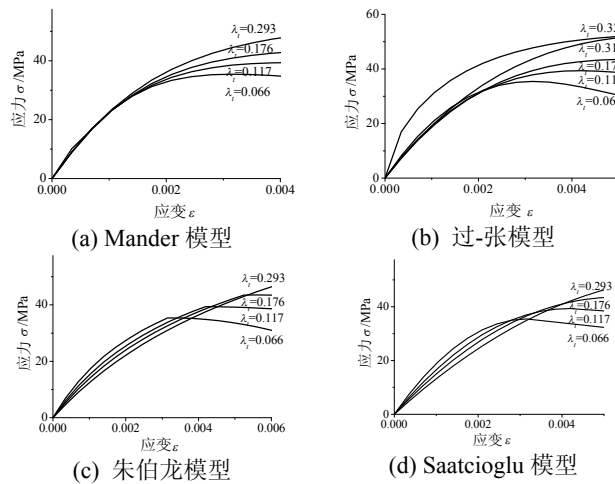


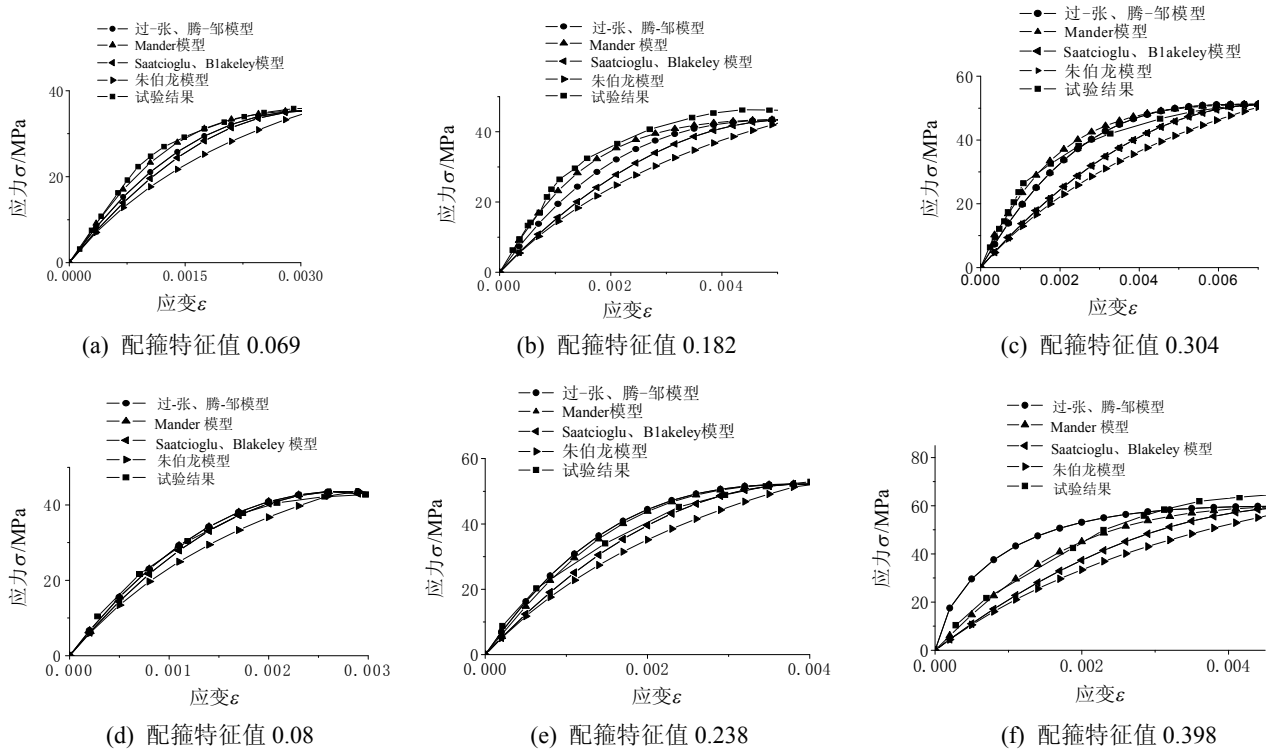
图 2 各模型计算结果

Fig.2 The calculation results of each model

将各模型计算结果与试验结果进行比较,如图 3。从图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)可以看出 Mander、过-张模型与试验结果符合较好,而其它模型随着配

箍特征值的增大与试验结果相差较大。从图 3(d)、图 3(e)、图 3(f)可以看出 Mander、过-张模型、

Saatcioglu 模型与试验结果符合的较好, 而其它模型刚度偏低。



注: (a)、(b)、(c)试验数据来自文献[4]构件为圆截面柱; (d)、(e)、(f)试验数据来自文献[5]构件为正方形截面柱。

图3 计算结果与试验结果比较

Fig.3 Comparison of calculation results and experimental results

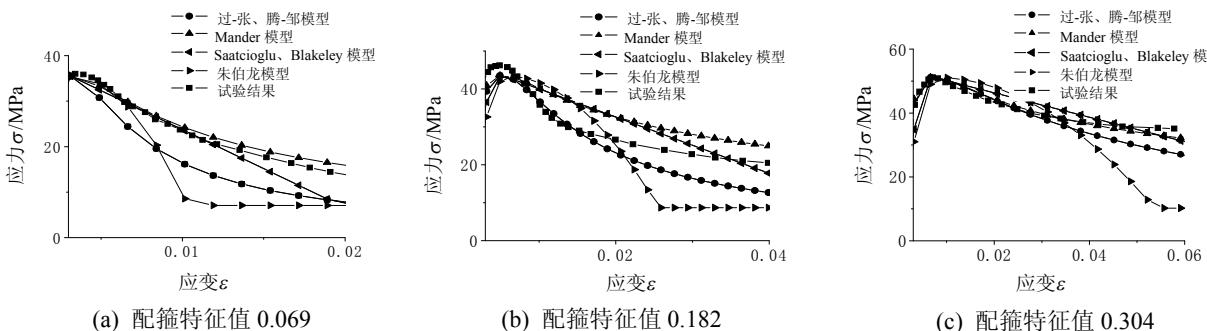
总之, 对于混凝土单轴本构模型上升段, Mander 模型、过-张模型式①计算结果和试验符合较好。

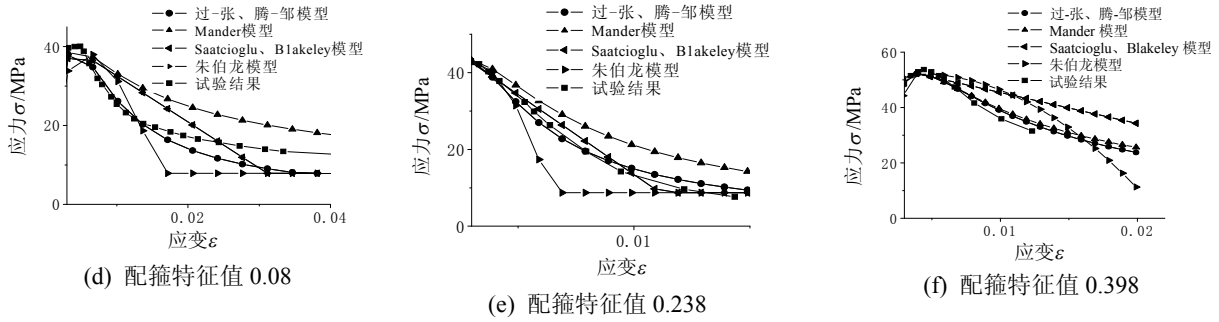
本文进一步对 Mander 模型、过-张模型式①的计算效率进行了研究, 在同一台电脑上(CPU Pentium(R)4 3.00GHz), 分别计算 Mander 模型和过-张模型式①10000000 次所需要的时间为 1.97s、3.5s, 可见 Mander 模型的计算效率更高, 因此本文建议用 Mander 模型来模拟上升段。

1.3 受压骨架曲线下下降段研究

各模型下降段计算结果与试验结果比较如图 4 所示。从图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)可以看出 Mander

模型计算结果和试验结果符合最好, Blakeley 模型、Saatcioglu 模型其次, 朱伯龙模型、过-张模型、腾-邹模型下降段与试验结果偏差较大。从图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)可以看出过-张模型计算结果和试验结果符合最好, Saatcioglu 模型其次。本文通过程序分别测定了各模型的计算效率。在同一台电脑上(CPU Pentium(R)4 3.00GHz), 分别计算 Saatcioglu 模型、Mander 模型和过-张模型下降段表达式 10000000 次所需要的时间为 0.046s、1.874s、1.671s, 可见 Saatcioglu 模型的计算效率远高于 Mander 模型和过-张模型, Mander 模型和过-张模型的计算效率差别不大, 过-张模型稍高。





注: (a)、(b)、(c)试验数据来自文献[4]构件为圆截面柱; (d)、(e)、(f)试验数据来自文献[5]构件为正方形截面柱。

图4 计算结果与试验结果比较

Fig.4 Comparison of calculation results and experimental results

总之,对于下降段,各模型有不同的适用范围, Saatioglu模型计算效率最高,但用直线段模拟与实际情况存在一定差异, Mander模型和过-张模型用曲线来模拟均在一定范围内与实际情况符合较好且计算效率相差不大。Mander模型受压骨架曲线上、下降段采用统一的表达式在数值处理上更方便,计算稳定性更高,本文建议采用Mander模型模拟下降段。在计算某些大型结构时,如果对计算精度要求不高,为提高计算效率可采用Saatioglu模型。

2 受压卸载-再加载滞回曲线研究

2.1 模型介绍

各模型加载、卸载滞回曲线简要介绍如下,因为篇幅有限具体常数含义可查阅有关文献。

过-张模型,卸载曲线:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{un}} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}} \right)^n \quad (1)$$

在加载曲线:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{re}} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{re} - \varepsilon_{pl}} \right)^T \left[1 + Q \sin \left(\pi \frac{\varepsilon - \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{re} - \varepsilon_{pl}} \right) \right] \quad (2)$$

Blakeley 模型:

当卸载点应变小于 ε_c 时,卸载和再加载曲线都为直线,其斜率取混凝土初始弹性模量。当卸载应变大于 ε_c 时,以卸载点垂直向下卸到卸载点应力的一半,然后考虑刚度退化系数 k_c 按直线进行卸载和再加载。 k_c 与卸载点坐标有关,计算公式如下:

$$k_c = 0.8 - \frac{(\varepsilon_{un} - \varepsilon_c) \times 0.7}{\varepsilon_{20} - \varepsilon_c} \geq 0.1 \quad (3)$$

朱伯龙模型,卸载曲线方程:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{(\varepsilon - 0.2\varepsilon_{un})\sigma_{un}}{1.8\varepsilon_{un} - \varepsilon}, & \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_c \\ \frac{(2\varepsilon - \varepsilon_{un})\sigma_{un}}{3\varepsilon_{un} - 2\varepsilon}, & \varepsilon_{un} > \varepsilon_c \end{cases} \quad (4)$$

再加载曲线方程:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{con} \left(1 - \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_w + \varepsilon} \right), & \varepsilon_w \leq \varepsilon < 0 \\ \sigma_{con} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c + \varepsilon}, & \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_c \text{ 且 } \varepsilon \geq 0 \\ \sigma_{con} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{un}} \right) + \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{un} + \varepsilon} \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{un} + \varepsilon_c} \right), & \varepsilon_{un} > \varepsilon_c \text{ 且 } \varepsilon < \varepsilon_{un} \text{ 且 } \varepsilon \geq 0 \\ \sigma_{un} \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{un} + \varepsilon} \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{un} + \varepsilon_c} \right), & \varepsilon_{un} > \varepsilon_c \text{ 且 } \varepsilon \geq \varepsilon_{un} \text{ 且 } \varepsilon \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Mander 模型, 卸载曲线:

$$\sigma = \sigma_{un} - \frac{\sigma_{un} x_2 r_2}{r_2 - 1 + x_2^{r_2}} \quad (6)$$

$$\text{式中: } r_2 = \frac{E_{un}}{E_{un} - E_{sec2}}, \quad E_{sec2} = \frac{\sigma_{un}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}},$$

$$x_2 = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{un}}{\varepsilon_{pl} - \varepsilon_{un}}, \quad E_{un} = E_0 \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{un}} \right)^{0.5} \max \left(\frac{\sigma_{un}}{f_c}, 1 \right), \quad E_{un}$$

为卸载点初始弹性模量。

再加载曲线:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_{ro} + E_r(\varepsilon - \varepsilon_{ro}), & \varepsilon \leq \varepsilon_{un} \\ \sigma = \sigma_{re} + E_{re}x + Ax^2, & \varepsilon > \varepsilon_{un} \end{cases} \quad (7)$$

腾-邹模型:

由于该模型公式比较多,这里从略,对该模型的详细介绍可参见文献[10]。

2.2 各模型受压卸载-再加载滞回模型比较

将各模型卸载曲线比较如图5所示。从图5中可以看出 Blakeley 模型、腾-邹模型、Mander 模型、过-张模型卸载曲线比较接近,其中 Blakeley 模型、腾-邹模型卸载曲线非常接近, Mander 模型、过-张模型卸载曲线非常接近,朱伯龙模型卸载斜率较

小,与其它模型相差较大。

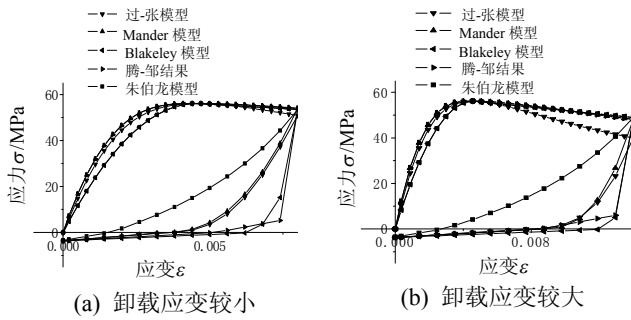


图5 各模型卸载曲线的比较

Fig.5 Comparison of unload curve

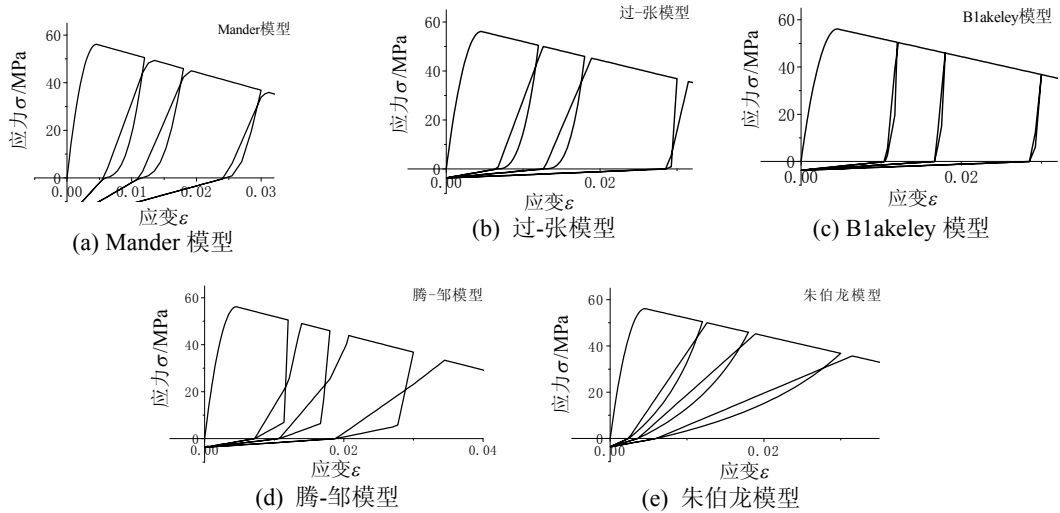


图6 采用相同骨架曲线时各模型卸载曲线比较

Fig.6 Comparison of unload curves with the same skeleton curve

2.3 残余塑性应变研究

残余塑性应变表示材料受压加载进入塑性阶段后卸载至应力为零时的应变。Mander 模型,过-张模型均提出了计算残余塑性应变的表达式,本文通过拟合文献[7]的试验数据提出了新的残余塑性应变表达式,下面对各模型进行介绍。

Mander 模型:当卸载点的应变和应力为 $(\varepsilon_{un}, \sigma_{un})$ 时,残余塑性应变表达式如下:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{un} - \frac{(\varepsilon_{un} + \varepsilon_a)\sigma_{un}}{\sigma_{un} + E_c \varepsilon_a} \quad (8)$$

$$\text{式中, } \varepsilon_a = \max\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 + \varepsilon_{un}}, \frac{0.09\varepsilon_{un}}{\varepsilon_0}\right) \cdot \sqrt{\varepsilon_{un}\varepsilon_0}。$$

过-张模型:卸载点的应变和残余塑性应变关系为:

$$\frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_0} = 0.31 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{un}}{\varepsilon_0}\right)^{1.6} \quad (9)$$

本文模型卸载点的应变和残余塑性应变关系为:

为了进一步比较各模型卸载曲线,将卸载曲线放在相同骨架曲线下如图 6 所示。

从图 6 可以看出 Mander 模型、朱伯龙模型卸载曲线刚度随卸载应变的增大而降低,能较明显的反应混凝土材料的刚度退化现象。朱伯龙模型与其它模型差别较大。Mander 模型、过-张模型当卸载应变较小时非常接近,但当卸载应变较大时,过-张模型卸载刚度甚至会大于初始弹性刚度,与实际不符。Blakeley 模型,腾-邹模型采用直线计算效率高。

$$\begin{cases} \varepsilon_{pl} = 0.1\varepsilon_{un}, & \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_0 \\ \varepsilon_{pl} = 0.93\varepsilon_{un} - 0.83\varepsilon_0, & \varepsilon_{un} > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: ε_{pl} 表示塑性应变; ε_{un} 表示卸载应变; ε_0 表示峰值应变。

Mander 模型、过-张模型、本文模型残余塑性应变与卸载应变关系如图 7 所示。从图 7 可以看出当 $\varepsilon_{un}/\varepsilon_0 < 6$ 时,各模型相差不大均与试验结果^[7]

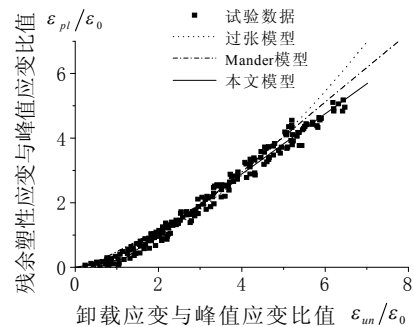


图7 卸载应变-残余塑性应变关系

Fig.7 The relationship between unloading strain and residual plastic strain

符合较好;当 $\varepsilon_{un}/\varepsilon_0 > 6$ 时本文模型与试验结果符合最好, Mander 模型次之, 过-张模型计算结果偏大。Blakeley 模型、腾-邹模型没有给出明确的残余塑性应变计算公式在这里不做探讨, 从图 6 中可以看出他们与过-张模型、Mander 模型有一定的差别。

2.4 本文模型卸载曲线

残余塑性应变确定之后卸载应力-应变曲线就比较好确定了, 为了提高计算效率, 本文用折线来模拟混凝土卸载应力-应变行为, 表达式如下:

当 $\sigma > 0.12\sigma_{un}$ 时:

$$\begin{cases} E = E_0, & \varepsilon_{un} \leq \varepsilon_0 \\ E = E_0(0.22 + 0.65\varepsilon_0/\varepsilon_{un}), & \varepsilon_{un} > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (11)$$

当 $\sigma < 0.12\sigma_{un}$ 时, 卸载曲线为点 $(\varepsilon_{pl}, 0)$ 、 $(\varepsilon_{un} - 0.88\sigma_{un}/E, 0.12\sigma_{un})$ 之间的连线。

式(11)中: E 表示卸载刚度; E_0 表示初始弹性模量; ε_0 表示最大应力对应应变; ε_{un} 表示卸载应变。

本文模型卸载曲线与 Mander 模型、过-张模型比较如图 8 所示。为了测定各模型的计算效率, 本文设定特定的卸载状态, 在同一台电脑上(CPU Pentium(R)4 3.00GHz), 分别用 Mander 模型、过-张模型和本文模型计算卸载后的材料应力和刚度 10000000 次, 所需要的时间分别为 11.22s、5.25s、0.514s。可见本文模型计算效率高于 Mander 模型和过-张模型, Mander 模型因为乘方运算较多计算效率最低。

2.5 本文模型再加载曲线

本文模型当没有卸载到零, 再加载曲线沿卸载曲线返回, 如卸载到零后再加载曲线采用如下表达式:

$$\sigma = \frac{0.92f_{un}}{\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}} \varepsilon, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{un} \quad (12)$$

当 $\varepsilon > \varepsilon_{un}$ 时, 再加载曲线为点 $(\varepsilon_{un}, 0.92f_{un})$ 、 (ε_t, f_t) 之间的连线如图 8 所示。

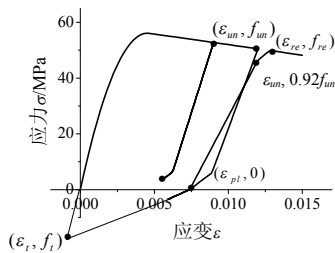


图 8 本文模型再加载曲线

Fig.8 The reload curve of the model in this paper

本文模型与 Mander 模型、过-张模型卸载-再加载曲线比较如图 9 所示(为了便于比较采用相同的骨架曲线, 且骨架曲线下降段采用直线)。

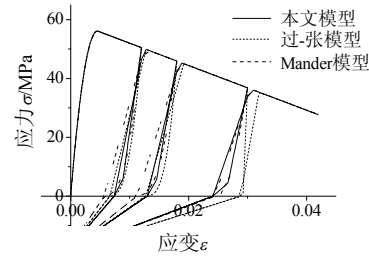


图 9 本文模型与 Mander 模型、过-张模型比较

Fig.9 Comparison between the model in this model, Mander model and Guo - Zhang model

本文提出的受压卸载-再加载滞回模型均采用直线, 通过前面的研究表明直线模型计算效率高于曲线模型, 这样处理虽然与实际情况存在一定差异, 但本文通过试验数据的拟合在一定程度上保证了模型的准确性。

3 受拉滞回模型

3.1 骨架曲线

本文遴选的 6 个模型中只有腾-邹模型给出了受拉骨架曲线, 腾-邹模型在达到极限拉应力前采用直线, 其斜率等于混凝土初始弹性模量, 达到极限拉应力后取为^[10]:

$$\sigma = f_t \cdot e^{-\beta(\varepsilon - \varepsilon_t)} \quad (13)$$

式中: f_t 、 ε_t 各为混凝土的单轴抗压强度及对应的应变; β 为材料常数, 取值为 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ 。

本文为了提高计算效率受拉骨架曲线采用折线, 在达到极限拉应力前, 斜率等于混凝土弹性模量, 达到极限拉应力后, 下降段斜率绝对值取为混凝土初始弹性模量的一半, 这样与《混凝土结构设计规范》^[12]给出的混凝土受拉骨架曲线符合较好。本文模型受拉骨架曲线如图 10 所示。

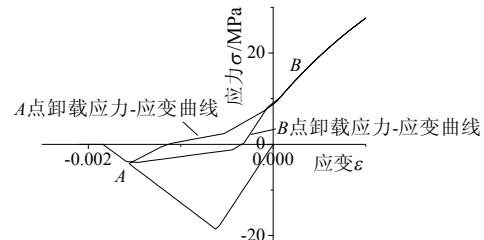


图 10 本文模型受拉滞回曲线

Fig.10 The tension hysteresis curve of this paper

3.2 受拉卸载-再加载滞回曲线

目前, 对于受拉及受拉后卸载曲线的研究不

多, 本文遴选的 6 个模型中只有朱伯龙模型和腾-邹模型包含受拉卸载-再加载滞回曲线。其中朱伯龙模型只是给出了受拉卸载曲线、腾-邹模型给出了详细受拉卸载-再加滞回曲线, 它们的受拉卸载曲线比较如图 11 所示(骨架曲线采用腾-邹模型)。这两个模型的详细描述请参考有关文献[6,10]本文限于篇幅不给出。

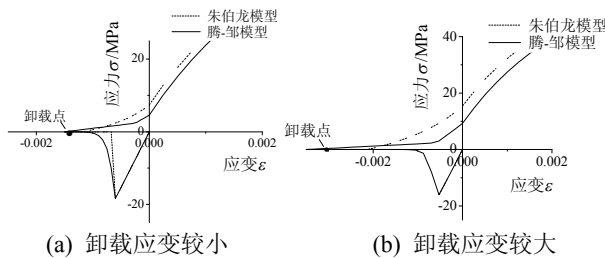


图 11 各模型受拉滞回曲线比较

Fig.11 Comparison of tension hysteresis curves

从图 11 中可以看出, 当卸载应变较小时两模型计算结果比较接近, 随着卸载应变的增大, 混凝土材料的裂面接触效应在朱伯龙模型中更为显著。因为腾-邹模型覆盖了混凝土所有的受拉应力-应变加载情况。所以本文模型受拉卸载-再加滞回曲线采用腾-邹模型, 如图 10 所示。

4 本文模型应力-应变全曲线

通过以上的研究表明, 对于混凝土本构模型受压部分, Mander 模型计算结果与试验结果符合最好, 但 Mander 模型表达式复杂, 计算效率相对较低, 本文模型受压部分在很大程度上是对 Mander 模型的继承, 计算结果也与 Mander 模型相差不大, 本文模型通过研究试验数据对 Mander 模型做了一些简化和改进, 提高了计算效率。对于受拉部分目前研究不多, 本文采用能反映所有受拉加载情况的腾-邹模型。本文模型在复杂加载路径下的滞回曲线如图 12 所示。

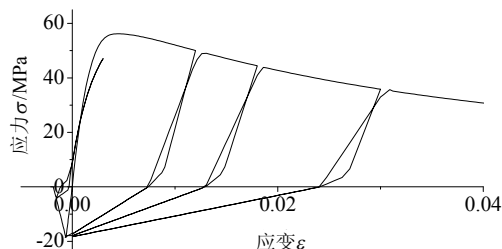


图 12 本文模型滞回加载曲线

Fig.12 The complete curve of the model in this paper under complex loading paths

5 结论

将 6 种箍筋约束混凝土单轴滞回本构模型在 ABAQUS 中二次开发, 通过各本构模型计算结果与试验结果比较得出如下结论:

(1) 对于混凝土单轴受压骨架曲线上段, 过-张模型、Mander 模型计算结果与试验结果符合最好, Mander 模型比过-张模型计算效率高, 因此本文建议用 Mander 模型。

(2) 对于混凝土单轴受压骨架曲线下段, Blakeley 模型、Saatcioglu 模型、Mander 模型比过-张模型、腾-邹模型平缓, 更适合分析约束比较均匀的圆截面构件, 而过-张模型、腾-邹模型更适合分析矩形截面构件。朱伯龙模型与试验结果差别较大。Saatcioglu 模型采用直线段计算效率最高但精度略差, Mander 模型和过-张模型计算效率相差不大。本文为了骨架曲线上段、下降段表达式的统一, 建议用 Mander 模型。

(3) 对于混凝土单轴受压卸载-再加载滞回曲线, 过-张模型、Mander 模型准确度相对较高, 本文利用试验数据拟合, 提出了形式简单且准确度较高的塑性应变计算公式和卸载-再加载滞回模型。通过计算表明本文模型计算效率高于过-张模型、Mander 模型。

(4) 对于混凝土单轴受拉滞回曲线, 骨架曲线建议采用本文提出的折线模型, 卸载-再加载滞回曲线建议采用能覆盖所有加载情况的腾-邹模型。

参考文献:

- [1] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 聂祺. 钢筋混凝土建筑结构非线性动力时程分析研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
Nie Qi. Research on nonlinear dynamic history analysis of reinforced concrete structures [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2008. (in Chinese)
- [3] 周新炜, 李志山, 李云贵. 基于 ABAQUS 纤维梁元的混凝土单轴滞回本构模型的开发与应用[C]// 第 14 届全国工程设计计算机应用学术会议论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.
Zhou Xingwei, Li Zhishan, Li Yungui. Development and application of concrete hysteretic uniaxial constitutive model Based on ABAQUS fiber beam element [C]// Proceedings of the 14th Session of the National Conference on Engineering of Computer Applications Proceedings. Beijing: China Building Material Industry

- Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [4] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Observed stress-strain behavior of confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 14(8): 1827—1849.
- [5] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 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, Zhou Dongliang. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2002, 42(10): 1369—1373. (in Chinese)
- [6] 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
Zhu Bolong, Dong Zhenxiang. Nonlinear analysis of reinforced concrete [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 过镇海, 张秀琴. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982, 3(1): 1—12.
Guo Zhenhai, Zhang Xiuqin. Experimental study on complete stress-strain curves of concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 1982, 3(1): 1—12. (in Chinese)
- [8] Blakeley R W G, Park R. Prestressed concrete sections with cyclic flexures [J]. *Journal of Structural Division, ASCE*, 1973, 99(8): 1717—1742.
- [9] Saatcioglu M, Razvi R. Strength and ductility of confined concrete [J]. *ASCE Journal of Structure Engineering*, 1992, 118(6): 1590—1607.
- [10] 滕智明, 邹离湘. 反复荷载下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析[J]. *土木工程学报*, 1996, 29(2): 19—27.
Xi Zhiming, Zou Lixiang. Nonlinear finite element analysis of RC members under reversed cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996, 29(2): 19—27. (in Chinese)
- [11] Mander J B, Priestly M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Division, ASCE*, 1988, 114(8): 1804—1826.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction P.R.China. GB50010-2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002. (in Chinese)

(上接第 94 页)

- [4] 王秀丽, 李强, 殷占忠. 圆管相贯加强环节点承载力与变形性能分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2006, 32(5): 128—132.
Wang Xiuli, Li Qiang, Yin Zhanzhong. Analysis of bearing capacity and deformation of intersecting joints of ring-stiffened circular tubes [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2006, 32(5): 128—132. (in Chinese)
- [5] 张峰, 陈扬驥, 陈以一, 林颖儒, 姚念亮. 内置加劲环的设置对钢管节点性能的影响[J]. *空间结构*, 2004, 10(1): 51—56.
Zhang Feng, Chen Yangji, Chen Yiyi, Lin Yingru, Yao Nianliang. Effects of ring-stiffeners on the behaviour steel tubular joints [J]. *Spatial Structures*, 2004, 10(1): 51—56. (in Chinese)
- [6] 王阁, 张季超. 内置加强板空间相贯圆钢管节点在广东科学中心工程中的应用研究[J]. *工业建筑*, 2007, 37(10): 93—97.
Wang Ge, Zhang Jichao. Study on application of IGP-Stiffen CHS joints in Guangdong Science Center [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(10): 93—97. (in Chinese)
- [7] Shao Y B, Zhang J C, Qiu Z H, Shang J J. Strength analysis of large-scale multiplanar tubular joints with inner-plate reinforcement [J]. *International Journal of Space Structures*, 2009, 24(3): 161—177.
- [8] 李涛, 邵永波, 张季超. 内置横向插板加强型管节点静力强度研究[J]. *钢结构*, 2009, 24(123): 25—29.
Li Tao, Shao Yongbo, Zhang Jichao. Study on static strength of tubular joints reinforced with horizontal inner plate [J]. *Steel Construction*, 2009, 24(123): 25—29. (in Chinese)
- [9] Shao Y B. Study on reinforcing methods for welded tubular joints structures [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2009, 22(4): 312—320.
- [10] van der Vegte G J, Choo Y S, Liang J X, Zettlemoyer N, Liew J Y R. Static strength of T-joints reinforced with doubler or collar plates, II: numerical simulations [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2005, 131(1): 129—139.
- [11] Choo Y S. Recent development and innovation in tubular structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2005, 8(3): 217—230.
- [12] Choo Y S, van der Vegte G J, Zettlemoyer N, Li B H. Static strength of T-joints reinforced with doubler or collar plates-part I: experimental investigations [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2005, 131(1): 119—128.
- [13] Choo Y S, Liang J X, van der Vegte, Liew J Y R. Static strength of collar plate reinforced CHS X-joints loaded by in-plane bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60: 1745—1760.
- [14] Choo Y S, Liang J X, van der Vegte G J, Liew J Y R. Static strength of doubler plate reinforced CHS X-joints loaded by in-plane bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60: 1725—1744.