

# FRP 约束混凝土柱强度和极限应变模型的比较

胡波, 王建国

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

**摘要:**收集了大量试验数据,对已有的预测 FRP 约束混凝土柱强度和极限应变模型进行了评估。在保持已有模型预测圆形截面试件准确性的基础上,考虑截面有效约束,提出了对 FRP 约束圆形截面和矩形截面混凝土柱均适用的改进的强度和极限应变模型。评估结果表明,已有模型中对强度的预测要好于对极限应变的预测。Gampione 强度模型对所有试件整体预测较准确, Lorenzis 极限应变模型对圆形截面试件预测较准确。与试验数据和已有模型的对比表明,该文模型预测更准确,且计算更简便,可用于实际工程中对强度和延性的预测。

**关键词:**FRP 约束混凝土柱;强度模型;极限应变模型;比较;改进模型

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0009-07

## Comparison of Strength and Ultimate Strain Models of Concrete Columns Confined with FRP

HU Bo, WANG Jian-guo

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China)

**Abstract:** Based on maintaining the accuracy of existing models for circular specimens, revised models were proposed for predicting strength and ultimate strain of concrete columns confined with FRP with considering the effectiveness of confinement by cross-section. An evaluation of existing strength and ultimate strain models of concrete columns confined with FRP was presented with extensive collection of experimental data. It was shown that the prediction of strength was more accurate than that of ultimate strain, among which the prediction of Gampione's strength model and Lorenzis's ultimate strain model were more accurate for all specimens and circular specimens, respectively. The comparison with experimental results and existing models showed that the proposed models were more accurate, simpler and more convenient. The proposed models can be used for the prediction of strength and ductility in practical engineering.

**Key words:** concrete columns confined with FRP; strength models; ultimate strain models; comparison; improved models

FRP(Fiber Reinforced Polymer)具有质量轻、抗拉性能强、不易被腐蚀等优点,近些年在土木工程中的结构加固、修复上的应用日益广泛。大量的试验研究<sup>[1-11]</sup>表明,使用 FRP 缠绕混凝土柱可以不同

程度地提高其强度和延性。为了进一步确定 FRP 约束对混凝土柱性能的影响,对 FRP 约束混凝土柱应力-应变关系的研究得到广泛开展。Spoelstra 等<sup>[12]</sup>、Xiao 等<sup>[13]</sup>、Lam 等<sup>[14]</sup>、Teng 等<sup>[15]</sup>提出了

收稿日期:2009-05-10

基金项目:土木工程防灾减灾安徽省工程技术研究中心项目(教秘[2007]368号)资助

作者简介:胡波(1982-),男,博士生,主要从事高层建筑结构分析与计算机辅助设计研究,(E-mail)hubo820327@sohu.com。

王建国(联系人),男,教授,博士,博士生导师,(E-mail)Jianguow@hfut.edu.cn。

FRP 约束圆形截面混凝土柱应力-应变关系模型; 吴刚等<sup>[6]</sup>提出了 FRP 约束圆形截面混凝土柱有软化段时的应力-应变关系模型; 在考虑截面有效约束的基础上, Lam 等<sup>[16]</sup>、Wu 等<sup>[17]</sup>、Youssef 等<sup>[18]</sup>提出了 FRP 约束矩形截面混凝土柱应力-应变关系模型。在这些应力-应变关系模型中, 研究者们给出了预测 FRP 约束混凝土柱强度和极限应变的计算模型。这些模型考虑 FRP 对混凝土柱约束作用的方式有所区别, 且均是对有限的试验数据分析得出的, 有的模型计算式偏多, 过于复杂, 因此通用性和实用性较差。该文在广泛收集相关试验数据的基础上, 对已有的强度和极限应变模型进行了评估, 提出了对 FRP 约束圆形截面和矩形截面混凝土柱均适用的改进的强度和极限应变模型, 计算准确且简便。

## 1 已有模型

### 1.1 主要影响参数

FRP 约束混凝土柱强度  $f_{cc}$  的提高程度主要取决于 FRP 对混凝土的侧向约束应力<sup>[10,16-18,19-22]</sup>。对圆形截面, 由力学平衡可得 FRP 对混凝土的极限侧向应力  $f_{lu}$  表达式为:

$$f_{lu} = \frac{2n_t f_{tu}}{d} \quad (1)$$

其中,  $n$  为 FRP 层数,  $t_f$  为单层 FRP 厚度,  $d$  为圆形截面直径,  $f_{tu}$  为 FRP 抗拉强度。该文在计算矩形截面时, 用截面宽度  $b$  取代  $d$ 。若 FRP 部分缠绕, 计算  $f_{lu}$  时暂定乘以  $\frac{b_f}{(b_f + s_f)}$ , 其中  $s_f$  为 FRP 间距,  $b_f$  为 FRP 缠绕宽度。对 FRP 材料, 当没有测定抗拉强度, 而已测得极限拉应变  $\epsilon_{tu}$  和弹性模量  $E_f$  时, 用  $\epsilon_{tu} E_f$  取代  $f_{tu}$ 。这里需要指出的是, 对不同的 FRP 材料, 其实际的环向断裂应变  $\epsilon_{hu}$  与  $\epsilon_{tu}$  是有差异的, 在该文分析中暂不考虑其影响。

FRP 约束混凝土柱极限应变  $\epsilon_{cu}$  除了受 FRP 对混凝土的侧向约束应力的影响之外, 还受到侧向约束刚度  $E_1$  的影响<sup>[13,24]</sup>。对圆形截面, 其计算式为:

$$\frac{E_1}{d} = \frac{2n_t E_f}{d} \quad (2)$$

在计算矩形截面时, 用截面宽度  $b$  取代  $d$ 。

以上为影响 FRP 约束混凝土柱强度和延性的主要参数及该文的定义, 若已有模型中对个别参数取值有特别规定, 该文将作补充说明, 并以已有模型规定为准, 以求对模型评估的公正。另外该文对已有模型不考虑其中关于钢筋以及 FRP 管的规定。

### 1.2 强度模型

#### 1) Mirmiran 模型<sup>[19]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 6.0 \frac{2r}{D} \frac{f_{lu}^{0.7}}{f'_c} \quad (3)$$

其中,  $f'_c$  为未约束混凝土强度,  $r$  为拐角半径,  $D$  为等效圆柱的直径, 等于方柱截面宽度  $b$  或矩形柱截面高度  $h$ , 对矩形截面, 计算  $f_{lu}$  时用  $D$  取代  $d$ 。

#### 2) Lam 模型<sup>[16]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 3.3 k_s \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (4)$$

其中,  $k_s$  为截面有效约束系数, 对矩形截面, 计算  $f_{lu}$  时用  $\sqrt{h^2 + b^2}$  取代  $d$ ,  $k_s$  按下式计算:

$$k_s = 1 - \frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2}{3[bh - (4-\pi)r^2]} \quad (5)$$

#### 3) Gampione 模型<sup>[20]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 2.0 k_s k_f \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (6)$$

其中,  $k_f$  为考虑拐角因素的降低系数,  $k_s$  和  $k_f$  分别按下式计算:

$$k_s = 1 - \frac{2\left(1 - \frac{2r}{b}\right)^2}{3\left[1 - (4-\pi)\left(\frac{r}{b}\right)^2\right]} \quad (7)$$

$$k_f = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \times 0.212\right) \frac{2r}{b} + 0.212 \times \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (8)$$

#### 4) Ilki 模型<sup>[21]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 2.4 \left(\frac{0.7 k_s f_{lu}}{f'_c}\right) \quad (9)$$

其中,  $k_s$  按下式计算:

$$k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh} - \frac{(4-\pi)r^2}{bh} \quad (10)$$

#### 5) Kumutha 模型<sup>[22]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 0.93 \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (11)$$

其中,  $f_{lu}$  按  $f_{lu} = \frac{n_t (b+h) f_{tu}}{bh}$  计算。

#### 6) Al-Salloum 模型<sup>[10]</sup>

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 3.14 k_s \frac{b}{D} \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (12)$$

其中,  $D$  为截面对角线长度  $D = \sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2} - 1)$ ,  $k_s$  按式(7)计算。

#### 7) Wu 模型<sup>[17]</sup>

定义  $\lambda$  为强弱约束界限值, 取为 0.13。当  $\frac{f_{lu}}{f'_c} \geq \lambda$

时为强约束, 当  $\frac{f_{lu}}{f'_c} < \lambda$  为弱约束。

$$\text{对强约束: } f_{cc} = k_3 f'_{cc} \quad (13)$$

其中,  $f'_{cc}$  为 FRP 约束等效圆柱的强度,  $k_3$  为降低系

数,分别按下式计算:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \begin{cases} 1 + \frac{2.0 f_{lu}}{f'_c} & E_t \leq 250 \text{ GPa} \\ 1 + \frac{2.4 f_{lu}}{f'_c} & E_t > 250 \text{ GPa} \end{cases} \quad (14)$$

$$k_3 = \begin{cases} \left(2 - \frac{30}{f'_c}\right) \frac{r}{h} + 0.5 \frac{30}{f'_c} & E_t \leq 250 \text{ GPa} \\ \left(2 - \sqrt{\frac{E_t}{250}} \frac{30}{f'_c}\right) \frac{r}{h} + 0.5 \sqrt{\frac{E_t}{250}} \frac{30}{f'_c} & E_t > 250 \text{ GPa} \end{cases} \quad (15)$$

对弱约束:  $\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 0.0008 k_1 \frac{30}{f'_c} \frac{\rho_f E_f}{\sqrt{f'_c}}$  (16)

其中,  $k_1 = \begin{cases} 1 & E_t \leq 250 \text{ GPa} \\ \sqrt{\frac{E_t}{250}} & E_t > 250 \text{ GPa} \end{cases}$  (17)

极限侧向应力  $f_{lu}$  按  $f_{lu} = 0.5 \rho_f f_{tu}$  计算,其中

$$\rho_f = \frac{2(b+h)nt_f b_f}{[bh(b_f + s_f)]}$$

8) Youssef 模型<sup>[18]</sup>

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \begin{cases} 1 + 2.25 \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{1.25} & \text{圆柱有强化段} \\ 1 + 3.0 \left(\frac{4nt_f \epsilon_{ft} E_f}{f'_c}\right)^{1.25} & \text{圆柱有软化段} \\ 0.5 + 1.225 \left(\frac{k_s f_{lu}}{f'_c}\right)^{0.6} & \text{方柱有强化段} \\ 1 + 1.135 \left(\frac{4nt_f \epsilon_{ft} E_f}{f'_c}\right)^{1.25} & \text{方柱有软化段} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\epsilon_{ft}$  为刚进入软化段时 FRP 的应变,取为 0.002,  $k_s$  按式(7)计算。

### 1.3 极限应变模型

1) Mander 模型<sup>[23]</sup>

$$\frac{f_{cu}}{f'_c} = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{lu}}{f'_c}} - 2 \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (19)$$

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1 + 5 \left(\frac{f_{cu}}{f'_c} - 1\right) \quad (20)$$

其中,  $f_{cu}$  为 FRP 约束混凝土柱极限应力,  $\epsilon'_c$  为未约束混凝土应力峰值  $f'_c$  对应的应变。

2) Spoelstra 模型<sup>[12]</sup>

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 2 + 1.25 \epsilon_{fu} \frac{E_{co}}{f'_c} \sqrt{\frac{f_{lu}}{f'_c}} \quad (21)$$

$E_{co}$  为混凝土初始弹性模量,取  $E_{co} = 5700 \sqrt{f'_c}$ ,  $f'_c$  适用范围为 30~50 MPa。

3) Xiao 模型<sup>[13]</sup>

$$\epsilon_{cu} = \frac{\epsilon_{hu} - 0.0005}{7 \left(\frac{f'_c}{E_t}\right)^{0.8}} \quad (22)$$

其中,对 CFRP,  $\epsilon_{hu}$  取  $0.5 \epsilon_{fu}$ 。

4) Lam 模型<sup>[14]</sup>

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1.75 + 12 \frac{f_{lu}}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{hu}}{\epsilon'_c}\right)^{0.45} \quad (23)$$

其中,对 CFRP,  $\epsilon_{hu}$  取  $0.586 \epsilon_{fu}$ 。

5) Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1 + 26.2 \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{0.80} E_t^{-0.148} \quad (24)$$

6) Teng 模型<sup>[15]</sup>

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1 + 17.5 \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (25)$$

7) Wu 模型<sup>[17]</sup>

$$\epsilon_{cu} = k_4 \epsilon'_{cu} \quad (26)$$

其中,  $\epsilon'_{cu}$  为 FRP 约束等效圆柱的极限应变,  $k_4$  为降低系数,对强弱约束的判别和相同参数的计算同上文强度模型中的 Wu 模型。

对强约束:  $\epsilon'_{cu} = \frac{\epsilon_{fu}}{\nu_u}$  (27)

其中,

$$\nu_u = \begin{cases} 0.56 \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{-0.66} & E_t \leq 250 \text{ GPa} \\ 0.56 \sqrt{\frac{250}{E_t}} \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{-0.66} & E_t > 250 \text{ GPa} \end{cases} \quad (28)$$

此时,  $k_4 = \left(2 - 1.6 \frac{30}{f'_c}\right) \frac{r}{h} + 0.8 \frac{30}{f'_c}$  (29)

对弱约束:  $\frac{\epsilon'_{cu}}{\epsilon_u} = 1.3 + 6.3 \frac{f_{lu}}{f'_c}$  (30)

其中,  $\epsilon_u$  为未约束混凝土极限应变,取为 0.0038,

此时,

$$k_4 = \begin{cases} \left(2 - 1.6 \frac{30}{f'_c}\right) \frac{r}{h} + 0.8 \frac{30}{f'_c} & E_t \leq 250 \text{ GPa} \\ \left(2 - 1.6 \sqrt{\frac{E_t}{250}} \frac{30}{f'_c}\right) \frac{r}{h} + 0.8 \sqrt{\frac{E_t}{250}} \frac{30}{f'_c} & E_t > 250 \text{ GPa} \end{cases} \quad (31)$$

8) Youssef 模型<sup>[18]</sup>

对圆柱:  $\epsilon_{cu} = 0.003368 + 0.259 \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right) \left(\frac{f_{lu}}{E_t}\right)^{0.5}$  (32)

对方柱:  $\epsilon_{cu} = 0.004325 + 0.2625 \frac{k_s f_{lu}}{f'_c} \left(\frac{f_{lu}}{E_t}\right)^{0.5}$  (33)

其中,  $k_s$  按式(7)计算。

## 2 对已有模型的评估

为了评估已有模型对 FRP 约束混凝土柱强度和极限应变预测的准确性,该文对公开发表的 11 个

试验<sup>[1-11]</sup>共 164 组试件的相关数据进行收集,其中圆形截面试件 101 组(86 组强约束、15 组弱约束),矩形截面试件 63 组(29 组强约束、34 组弱约束),圆形截面直径 100~160 mm,矩形截面边长 150~203 mm,拐角半径 0~80 mm,长细比 2~3.3,混凝土强度 25.0~52.0 MPa,FRP 类型包括碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)、芳纶纤维(AFRP)及高延性纤维(DFRP)。评估标准有平均绝对误差、 $\left(\frac{\text{理论值}}{\text{试验值}}\right)$  的平均值及变异系数。其中平均绝对误差定义如下:

$$\text{误差} = \frac{\sum \left| \frac{\text{理论值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \right|}{\text{试件数}} \quad (34)$$

强度理论值与试验值的对比见图 1(a)~(h),图例同图 1(a),强度模型评估值见表 1;极限应变理论值与试验值的对比见图 2(a)~(h),图例同图 2(a),极限应变模型评估值见表 2。表 1 和表 2 内“强”表示对强约束试件的评估值,“弱”表示对弱约束试件的评估值。其中部分极限应变模型是针对圆形截面试件提出的,故该文未给出其计算矩形截面试件的评估值,在表 2 中以“—”表示。总体看,已有模型对强度的预测要好于对极限应变的预测。比较已有的强度模型,从图 1 可以看出,Lam 模型<sup>[16]</sup>和

Al-Salloum 模型<sup>[10]</sup>预测值偏大,Kumutha 模型<sup>[22]</sup>、Wu 模型<sup>[17]</sup>和 Youssef 模型<sup>[18]</sup>预测较保守;从表 1 可以看出,Gampione 模型<sup>[20]</sup>对圆形截面强约束试件预测较准确,Kumutha 模型<sup>[22]</sup>对圆形截面弱约束试件预测较准确,Mirmiran 模型<sup>[19]</sup>对矩形截面强约束试件预测较准确,Youssef 模型<sup>[18]</sup>对矩形截面弱约束试件预测较准确;从图 1 和表 1 可以看出,Gampione 模型<sup>[20]</sup>对所有试件整体预测较准确。比较已有的极限应变模型,从图 2 可以看出,Spoelstra 模型<sup>[12]</sup>和 Lam 模型<sup>[14]</sup>预测值偏大,Mander 模型<sup>[23]</sup>、Xiao 模型<sup>[13]</sup>、Teng 模型<sup>[15]</sup>、Wu 模型<sup>[17]</sup>和 Youssef 模型<sup>[18]</sup>预测值离散性较大;从表 2 可以看出,Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>对圆形截面强、弱约束试件预测均较准确,Wu 模型<sup>[17]</sup>和 Youssef 模型<sup>[18]</sup>对矩形截面强、弱约束试件预测均有较大误差。另外,Wu 模型<sup>[17]</sup>和 Youssef 模型<sup>[18]</sup>计算式偏多,较为复杂,前者对弱约束试件 18 个判别正确,31 个未判别,6 个误判,对强弱约束判别的失误导致对模型选择的失误,后者没有设置强弱约束界限值,对实际工程中的构件无法判别其强弱约束,从而无法选择计算式,其强度模型将无法应用。

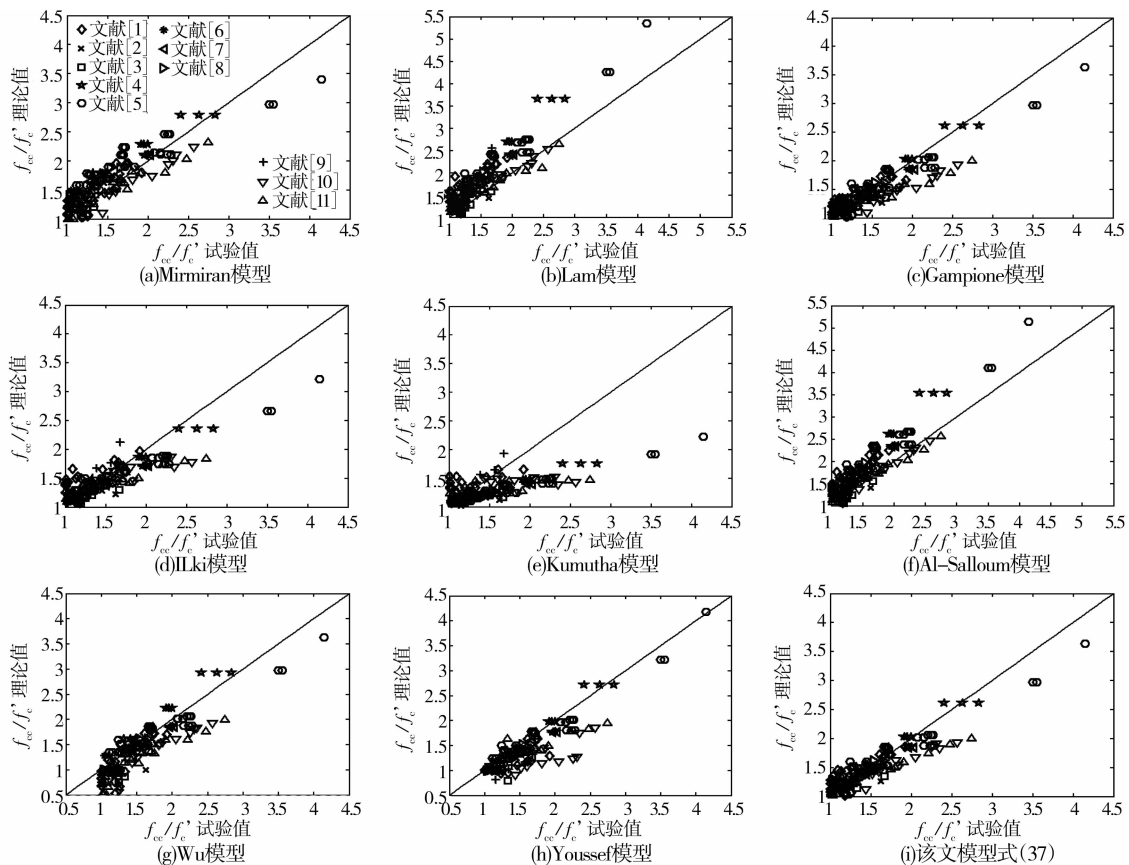


图 1 强度理论值与试验值对比

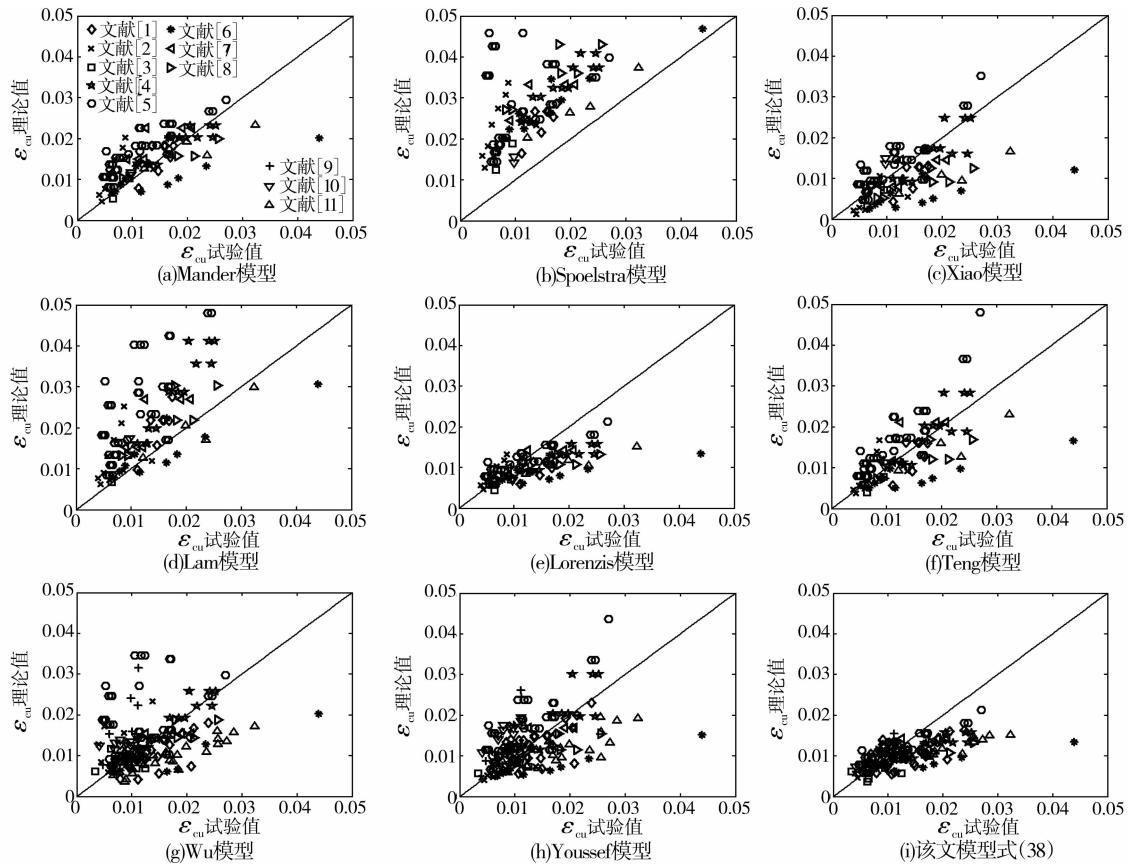


图2 极限应变理论值与试验值对比

表1 强度模型评估

模型类别	对圆形截面试件						对矩形截面试件						对所有试件		
	$f_{cc}/f'_c$		$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值				$f_{cc}/f'_c$		$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值				$f_{cc}/f'_c$	$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值	
	平均绝对误差/%		平均值		变异系数/%		平均绝对误差/%		平均值		变异系数/%		平均绝对误差/%	平均值	变异系数/%
	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱			
Mirmiran 模型	16.6	23.4	1.14	1.23	12.3	8.8	8.3	12.5	0.95	1.06	9.6	13.5	15.1	1.10	14.0
Lam 模型	23.5	18.0	1.23	1.17	11.4	10.1	16.1	26.5	1.13	1.24	13.7	18.3	22.3	1.21	13.9
Gampione 模型	8.8	10.0	0.99	1.08	11.1	7.6	14.0	10.7	0.86	1.02	9.7	12.6	10.2	0.98	12.6
Ilki 模型	10.4	8.1	0.93	1.05	11.8	7.0	11.0	18.9	0.99	1.15	13.1	15.9	12.0	1.00	15.7
Kumutha 模型	21.4	4.8	0.79	1.00	15.2	5.6	13.7	17.9	0.90	1.14	16.7	16.1	17.8	0.90	21.8
Al-Salloum 模型	20.8	16.9	1.20	1.16	11.2	9.8	11.3	20.9	1.08	1.17	10.1	16.7	18.8	1.17	12.8
Wu 模型	10.5	7.6	0.99	0.95	13.0	8.7	17.6	25.2	0.83	0.75	11.0	23.8	14.5	0.91	18.0
Youssef 模型	9.4	6.3	0.94	0.94	10.7	4.6	24.9	9.6	0.77	0.91	20.0	8.3	11.9	0.90	13.5
该文模型式(37)	8.8	10.0	0.99	1.08	11.1	7.6	8.9	12.6	0.93	1.05	9.3	13.9	9.7	1.00	12.2

表 2 极限应变模型评估

模型类别	对圆形截面试件						对矩形截面试件						对所有试件		
	$f_{cc}/f'_c$		$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值				$f_{cc}/f'_c$		$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值				$f_{cc}/f'_c$	$f_{cc}$ 理论值 / $f_{cc}$ 试验值	
	平均绝对误差/%		平均值		变异系数/%		平均绝对误差/%		平均值		变异系数/%		平均绝对误差/%	平均值	变异系数/%
	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱			
Mander 模型	45.1	32.5	1.38	1.05	35.4	39.3	—	—	—	—	—	—	43.2	1.34	37.0
Spoelstra 模型	170.5	160.8	2.71	2.61	59.9	32.5	—	—	—	—	—	—	169.1	2.69	56.9
Xiao 模型	32.3	55.8	1.01	0.44	41.7	39.0	—	—	—	—	—	—	35.8	0.92	47.8
Lam 模型	94.7	41.6	1.93	1.26	47.7	36.2	—	—	—	—	—	—	86.8	1.83	49.1
Lorenzis 模型	28.4	30.2	0.92	0.86	35.9	39.2	—	—	—	—	—	—	28.6	0.91	36.5
Teng 模型	35.8	32.7	1.20	0.77	34.7	39.3	—	—	—	—	—	—	35.3	1.13	37.8
Wu 模型	61.0	59.9	1.46	1.22	67.2	75.0	56.6	35.2	1.19	0.90	59.4	51.3	54.8	1.27	68.6
Youssef 模型	43.1	30.7	1.25	0.75	43.8	34.6	53.5	36.2	1.31	1.02	48.3	41.1	42.4	1.17	46.8
该文模型式(38)	28.4	30.2	0.92	0.86	35.9	39.2	25.9	30.4	0.91	0.98	32.5	35.9	28.5	0.93	35.8

### 3 该文模型

一般的模型提出仅是对收集到的试验数据进行直接回归分析得到的,具有一定的局限性。从对已有模型的评估可见,Gampione 模型<sup>[20]</sup>对圆形截面试件强度的预测较准确,Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>对圆形截面试件极限应变的预测较准确。Gampione 模型<sup>[20]</sup>和 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>均是在对已有模型和试验数据分析比较的基础上得出的,已经具有相当的可信度。该文提出模型的理念是对 Gampione 模型<sup>[20]</sup>和 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>进行适当的改进,使其在保持原有的对圆形截面试件准确预测的基础上,对矩形截面试件预测的准确性得到进一步提高或可用于预测矩形截面试件。即保留 Gampione 模型<sup>[20]</sup>和 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>用于预测圆形截面试件时的基本格式,对 Gampione 模型<sup>[20]</sup>中的截面影响因子  $k_s k_f$  进行修正,在 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>中引入截面影响因子,为了便于工程应用,对修正和引入的截面影响因子采用统一的形式,这样模型的可信度和通用性更高。基于此,该文建议对圆形截面和矩形截面试件统一的强度和极限应变模型格式如下:

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 2.0\gamma^{c_1} \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (35)$$

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1 + 26.2\gamma^{c_2} \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{0.80} E_l^{-0.148} \quad (36)$$

其中,  $\gamma$  为截面影响因子,  $c_1$ 、 $c_2$  为与  $\gamma$  相关的待定的常系数,  $\epsilon'_c$  在无相关试验数据时可取为 0.002,其他参数取值同 Gampione 模型<sup>[20]</sup>和 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>。从已有的模型看,Lam 模型<sup>[16]</sup>、Gampione

模型<sup>[20]</sup>、Ilki 模型<sup>[21]</sup>、Al-Salloum 模型<sup>[10]</sup>、Youssef 模型<sup>[18]</sup>均考虑了截面有效约束系数  $k_s$ 。当计算方形截面时,Lam 模型<sup>[16]</sup>、Gampione 模型<sup>[20]</sup>、Al-Salloum 模型<sup>[10]</sup>、Youssef 模型<sup>[18]</sup>中  $k_s$  的计算式是一样的,而其中 Lam 模型<sup>[16]</sup>中的  $k_s$  还可以用于计算矩形截面。因此,对  $\gamma$  采用 Lam 模型<sup>[16]</sup>中的  $k_s$ ,按式(5)计算。为了确定含待定系数  $c_1$ 、 $c_2$  的式(35)和式(36),通过对收集的试验数据<sup>[111]</sup>回归分析得到:

$$\frac{f_{cc}}{f'_c} = 1 + 2.0k_s^{2.50} \frac{f_{lu}}{f'_c} \quad (37)$$

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c} = 1 + 26.2k_s^{0.12} \left(\frac{f_{lu}}{f'_c}\right)^{0.80} E_l^{-0.148} \quad (38)$$

式(37)和式(38)预测的强度和极限应变理论值与试验值的对比见图 1(i)和图 2(i),相关的评估见表 1 和表 2。其中式(37)对所有试件的强度预测时,

$\frac{f_{cc}}{f'_c}$  平均绝对误差为 9.7%,  $\frac{f_{cc} \text{ 理论值}}{f_{cc} \text{ 试验值}}$  的平均值为 1.00,其变异系数为 12.2%,均好于其他模型;式(38)对所有试件的极限应变预测时,  $\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon'_c}$  平均绝对误差为 28.5%,  $\frac{\epsilon_{cu} \text{ 理论值}}{\epsilon_{cu} \text{ 试验值}}$  的平均值为 0.93,其变异系数为 35.8%,均好于其他模型。与试验数据和已有模型的对比表明,该文模型预测更加准确,且计算简便实用。

### 4 结论

1)对已有的强度和极限应变模型进行了评估,结果表明对强度的预测要好于对极限应变的预测。

2)已有模型中 Gampione 强度模型<sup>[20]</sup>对所有试件整体预测较好,Lorenzis 极限应变模型<sup>[24]</sup>对圆形截面试件预测较好。

3)在 Gampione 模型<sup>[20]</sup>和 Lorenzis 模型<sup>[24]</sup>基础上提出了改进的强度和极限应变模型,对圆形截面和矩形截面试件均适用,各种评估结果的对比表明本文模型预测更加准确,且简便实用。

#### 参考文献:

- [1] ROCHETTE P, LABOSSIERE P. Axial testing of rectangular column models confined with composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2000, 4(3): 129-136.
- [2] HARRIS K A, KHAREL G. Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(6): 873-880.
- [3] HARRIS K A, CAREY S A. Shape and "gap" effect on the behavior of variably confined concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(6): 881-890.
- [4] LAM L, TENG J G. Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2004, 8(6): 539-548.
- [5] BERTHET J F, FERRIER E, HAMELIN P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(3): 223-232.
- [6] 吴刚, 吴智深, 吕志涛. FRP约束混凝土圆柱有软化段时的应力-应变关系研究 [J]. *土木工程学报*, 2006, 39(11): 7-14.  
WU GANG, WU ZHI-SHEN, LÜ ZHI-TAO. Study of the stress-strain relationship of FRP-confined circular concrete column with a strain-softening response [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(11): 7-14.
- [7] LAM L, TENG J G, CHENG C H, et al. FRP-confined concrete under axial cyclic compression [J]. *Cement and Concrete composites*, 2006, 28(10): 949-958.
- [8] TENG J G, YU T, WONG Y L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 846-854.
- [9] ROUSAKIS T C, KARABINIS A I, KIOUSIS P D. FRP-confined concrete members: axial compression experiments and plasticity modeling [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(7): 1343-1353.
- [10] AL-SALLOUM Y A. Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates [J]. *Composites: Part B*, 2007, 38(5/6): 640-650.
- [11] WANG L M, WU Y F. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 493-505.
- [12] SPOELSTRA M R, MONTI G. FRP-confined concrete model [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1999, 3(3): 143-150.
- [13] XIAO Y, WU H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, 12(2): 139-146.
- [14] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6/7): 471-489.
- [15] TENG J G, HUANG Y L, Ye L P. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2007, 11(1): 201-210.
- [16] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2003, 22(13): 1149-1186.
- [17] WU G, WU Z S, LÜ Z T. Design-oriented stress-strain model for concrete prisms confined with FRP composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(5): 1107-1121.
- [18] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. *Composites: Part B*, 2007, 38(5/6): 614-628.
- [19] MIRMIRAN A, SHAHAWY M, SAMAN M, et al. Effect of column parameters on FRP-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1998, 2(4): 175-185.
- [20] GAMPIONE G, MIRAGLIA N. Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(1): 31-41.
- [21] ILII A, KUMBASAR N, KOC V. Low strength concrete members externally confined with FRP sheets [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 18(2): 167-194.
- [22] KUMUTHA R, VAIDYANATHAN R, PALANICHAMY M S. Behavior of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP [J]. *Cement and Concrete Composite*, 2007, 29(8): 609-615.
- [23] MANDER J B, PRIESTLY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [24] LORENZIS L D, TEPFERS R. Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber-reinforced polymer composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2003, 7(3): 219-237.

(编辑 胡玲)