

环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱应力-应变关系

周长东^{1,2}, 白晓彬¹, 吕西林², 张艾荣³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

摘要:环向预应力 FRP 能够对核心混凝土提供主动约束, 避免 FRP 的应力滞后问题, 增强约束效果。在设计时若采用非预应力 FRP 约束混凝土的计算模型和应力-应变关系模型, 将会造成很大的误差。引入与环向预应力大小有关的初始约束应力和有效约束应力, 并依据已有的试验数据和有限元模拟, 提出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的峰值应力和峰值应变、极限应力和极限应变的计算模型; 分析了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的初始弹模, 借鉴已有的 FRP 约束混凝土的应力-应变关系模型, 提出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的三线性应力-应变关系模型, 计算结果与试验结果吻合良好。

关键词:混凝土圆柱; 环向预应力 FRP; 计算模型; 应力-应变关系; 主动约束

中图分类号: TU311.4; TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0179-07

Stress-Strain Relationship of Circular Concrete Columns Confined with Lateral Pre-tensioned FRP

ZHOU Changdong^{1,2}, BAI Xiaobin¹, LYU Xilin², ZHANG Airong³

(1. school of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

3. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, P. R. China)

Abstract: The active confinement for the core concrete can be provided by lateral pre-tensioned FRP, the stress hysteresis of FRP can be avoided, and good confinement effect for concrete columns can be got. It must cause large error if adopt the calculated model and constitute model of concrete columns confined with non-pretensioned FRP. The initial confined stress and effective confined stress associated with the lateral pre-stress were introduced. According to the test results and finite element simulation, the calculated model on peak stress, peak strain, ultimate stress and ultimate strain of circular concrete columns confined with lateral pre-tensioned FRP were proposed, and the initial elastic modulus of circular concrete columns confined with lateral pre-tensioned FRP was analyzed. Based the existing stress-strain models of circular concrete columns confined with FRP, the three linear stress-strain model of circular concrete columns confined with lateral pre-tensioned FRP was recommended, and good agreement between theoretical and test results is achieved.

Key words: circular concrete column; lateral pre-stressed FRP; calculated model; stress-strain curve; active confinement

环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱的轴心受压试验结果表明:对 FRP 施加环向预应力,可以变 FRP 的被动约束为主动约束,避免 FRP 的应力滞后问题,充分发挥 FRP 的高强性能,增强加固效果^[1]。

目前国内外对 FRP 约束混凝土柱已经进行了大量的研究,提出了很多有代表性的 FRP 约束混凝土柱的应力-应变模型^[2-11]。但如果把这些模型应用于环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的力学性能分析,将会造成较大的误差。目前国内外对环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱的研究尚处于探索阶段,有些学者也提出了一些简单的应力-应变模型^[12-14],但这些模型都缺乏有效的试验验证,在实际工程中这些模型所依据的加固方法也缺乏可操作性。

文中在环向 FRP 约束混凝土圆柱试验研究的基础上,考虑了环向预应力等影响因素,提出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的三线性应力-应变关系模型,用来指导混凝土圆柱的加固设计和性能分析。

1 环向预应力 FRP 加固混凝土墩柱的主动约束机制

工程中最常见的约束混凝土有箍筋、钢管以及 FRP 约束混凝土,它们所提供的侧向约束应力有 2 个共同的特点:一是“被动”,二是“变值”。这 3 种约束混凝土都属于被动约束,当混凝土轴向压力低于一定值时,约束材料并未发挥作用,核心混凝土仍处于单轴压缩状态;只有当轴向压力增大

到一定值时,核心混凝土产生较大的横向膨胀,上述约束材料才开始逐渐发挥作用,使核心混凝土处于三向受压状态。

环向预应力 FRP 约束混凝土与上述 3 种约束混凝土最大的不同就是变“被动约束”为“主动约束”,对核心混凝土提供主动约束应力,约束材料可以提前发挥作用,使核心混凝土提前进入三向受压状态。随着轴向荷载的逐步增大,混凝土会逐渐膨胀,环向 FRP 随之对核心混凝土提供更大的侧向约束作用,混凝土就会处于更强的三向受压状态,从而混凝土的极限强度和极限应变得到显著提高。环向预应力 FRP 的约束机制取决于 3 个因素:外包 FRP 的环向抗拉强度、施加环向预应力的值和混凝土的横向膨胀性能。

采用如图 1 所示自行开发的高强纤维自锁式锚具^[15]对环向 FRP 施加预应力,锚具照片如图 2 所示。由于混凝土表面与 FRP 之间有摩擦,纤维布上的初始应力沿环向分布并不均匀,应力从锚具端部向中部递减,所以 FRP 对核心混凝土施加的初始约束应力沿环向也是不均匀的;随着轴向压力的不断增大,混凝土沿环向均匀膨胀,FRP 的环向拉应力不断增大,对核心混凝土的约束作用也随之增大,此时这种不均匀初始约束应力的影响会逐渐消除;当混凝土破坏时,可以认为侧向约束应力沿柱侧面分布均匀。

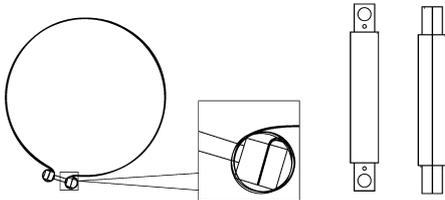


图 1 锚具示意图

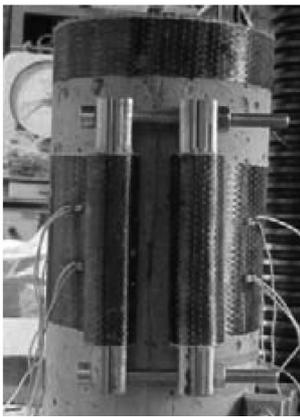


图 2 环向预应力 FRP 张拉方法

2 FRP 约束混凝土柱的应力-应变模型

FRP 所提供的侧向约束应力的大小直接影响其对核心混凝土的约束效果。FRP 约束混凝土的截面受力分析如图 3 所示,根据受力平衡可以得到侧向约束应力 f_l 的表达式为:

$$f_l = \frac{2t_f f_f}{D}, \quad (1)$$

式中: f_f 为 FRP 的极限抗拉强度; D 为混凝土柱的直径; t_f 为 FRP 的计算厚度。

由式(1)可以看出,侧约束应力主要与 FRP 的抗拉强度、

计算厚度和混凝土柱的直径有关。

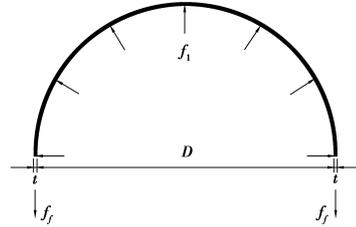


图 3 柱截面应力分析

1) Mander 模型

1988 年, Mander 提出了纵向压应力与约束混凝土的极限抗压强度之间的关系^[2]:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x}, \quad (2)$$

式中: $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_{cc}}$;

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon_{cc} + [1 + 5(f'_{cc}/f'_c) - 1];$$

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}); E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon'_{cc}.$$

2) Samaan 模型

1998 年, Samaan 提出一种 FRP 约束混凝土核心混凝土的应力-应变关系模型^[3]

$$\sigma_c = \frac{(E_1 - E_2)\epsilon_c}{[1 + (E_1 - E_2)\epsilon_c/f_o]^{1/1.5}} + E_2\epsilon_c, \quad (3)$$

式中: $E_1 = 3\ 950 \sqrt{f'_c}$;

$$E_2 = 245.61 f'_c{}^{0.2} + 1.3456 E_f t_f / D;$$

$$f_o = 6.258 + 0.872 f'_c + 0.371 f_f.$$

3) Lam and Teng 模型

2002, Lam and Teng 在总结了大量的试验数据的基础上,提出了一种简单的两段式应力-应变模型,第一段为抛物线,第二段为直线,两段之间光滑相接^[4]。

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c - (E_c - E_2)^2 \epsilon_c^2 / 4 f'_{\omega}, \quad (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t), \quad (4)$$

$$\sigma_c = f'_{\omega} + E_2 \epsilon_c, \quad (\epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}), \quad (5)$$

其中, ϵ_t 是第一阶段与第二阶段分界点处所对应的应变, $\epsilon_{cc} = \frac{2f'_{\omega}}{E_c - E_2}$; E_2 是第二阶段的斜率, $E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{\omega}}{\epsilon_{cc}}$ 。

上述应力-应变模型均为非预应力 FRP 约束混凝土的模型。文中依据课题组进行的相关试验,参照非预应力 FRP 约束混凝土的模型,提出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的应力-应变模型。

3 环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱应力和应变计算模型

3.1 基本假定

为了更准确的分析环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的受力性能,采用如下假定:

- 1) 混凝土圆柱满足平截面假定;
- 2) FRP 限制混凝土横向膨胀,不承受竖向荷载;
- 3) 混凝土与 FRP 之间无相对滑移,变形协调;
- 4) FRP 对核心混凝土提供沿柱身均匀分布的侧向约束应力。

3.2 初始约束应力

环向预应力 FRP 会对核心混凝土提供主动约束,所以核心混凝土在轴向受压之前已经受到了一定的初始约束应力,施加的环向预应力大小不同,初始约束应力就会不同。试验中沿 FRP 的环向均匀粘贴了电阻应变片,初始约束应力的大小可以通过纤维布应变的平均值来估算。根据图 3 的受力分析,可以得出初始约束应力 f_{i0} 的计算公式:

$$f_{i0} = \frac{2n_f E_f \epsilon_{if} b_f}{DH}, \quad (6)$$

式中: n_f 、 E_f 、 t_f 、 b_f 和 ϵ_{if} 分别为环向预应力 FRP 的条带数、弹性模量、厚度、宽度以及初始张拉应变; D 和 H 分别为混凝土圆柱的直径和高度。

由公式(6)可以看出,初始约束应力的大小与试件的尺寸、FRP 的材料特性和 FRP 的平均环向初始应变有关。

3.3 有效约束应力

试验发现试件的破坏都是由于 FRP 被拉断所致。分析 FRP 的应变可以发现,试件中的 FRP 极限拉应变与 FRP 拉伸试验测得的极限拉应变有较大差异。所以,之前提出的 FRP 约束混凝土计算模型中的参数可能不是真正意义上合理参数,这种参数意义的不明确性会很大程度上妨碍有效计算模型的建立。文中把环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的有效拉应变对应的侧向约束应力称为有效约束应力 f_{d0} 。而环向预应力 FRP 约束混凝土应力、应变的预测也和有效约束应力的确定有关。

FRP 约束混凝土圆柱的极限应变之所以比较低,主要有以下原因:1)试验中的 FRP 都是人工包裹,可能会使 FRP 受拉纤维的方向没有完全垂直于柱的轴线方向,这种小角度的偏差会降低 FRP 的抗拉强度^[16]。2)混凝土是一种特殊的材料,在轴向荷载下,其表面裂缝的产生具有很大的随机性。当裂缝出现时,裂缝位置的拉应力就会转移到 FRP 上,这样 FRP 上就会形成应力集中,导致 FRP 局部的提前破坏^[16]。3)混凝土圆柱上所包裹的 FRP,其受力状态与拉伸试验时的受力状态不同,圆柱体的曲率也会影响 FRP 的极限抗拉强度^[2]。4)由于锚具的制作工艺问题,锚具端部的纤维布上可能会形成应力集中,从而导致端部的纤维布提前破坏。

鉴于这种应力折减的现象,引入 FRP 的有效拉应变系数 α_h ,定义为试验中实测的 FRP 极限应变与 FRP 材性试验中测得的极限应变的比值。 α_h 的具体取值直接影响到有效约束应力的准确性。顾祥林等对现有的非预应力 FRP 有效拉应变系数进行了总结,并给出了明确的建议值^[17]。而环向预应力 FRP 的 α_h 与非预应力 FRP 肯定会有所不同,根据加固圆柱的试验结果和 FRP 的材性试验^[1],计算出试验中加固试件的 α_h 值列于表 1 中。

从表 1 可以看出, α_h 随预应力的增大而增大,随试件直径的增大而增大。这说明环向预应力 FRP 可以有效的利用 FRP 的高强性能;大尺寸试件能够减少应力的折减。

另外,试验中的 FRP 是等间距条带包裹而不是全包裹,并且 4 种尺寸试件的包裹形式也有所不同,这样 FRP 的有效约束应力相对全包裹肯定会有所降低,所以引入 FRP 的间距影响系数 β_f ,定义为有效约束面积与整个截面面积之比。当 FRP 条带包裹时,FRP 的约束力通过拱作用施加到核心混凝土上,并把拱作用假设为初始角为 45°的抛物线,以圆柱体最

薄弱的的一个截面的面积作为有效约束面积^[2]。FRP 条带包裹的有效约束示意图如图 4 所示, β_f 的计算公式见公式(7)。

表 1 环向预应力 FRP 加固试件的 α_h 值

试件编号	混凝土等级	预应力	FRP 种类	配筋	截面直径/mm	α_h
Z1	C40	0	CFRP	无	300	0.37
Z2	C40	0	CFRP	无	300	0.3
Z3	C40	0.1	CFRP	无	300	0.46
Z4	C40	0.15	CFRP	无	300	0.55
Z5	C40	0.2	CFRP	无	300	0.6
Z6	C20	0.2	CFRP	无	300	0.61
Z7	C30	0.2	CFRP	无	300	0.6
Z8	C40	0.2	BFRP	无	300	0.6
Z9	C40	0.2	CFRP	无	250	0.42
Z10	C40	0.2	CFRP	无	200	0.38
Z11	C40	0.2	CFRP	无	150	0.47
Z12	C40	0.2	CFRP	A8@120	300	0.44
Z13	C40	0.2	CFRP	A8@200	300	0.46

$$\beta_f = \left(1 - \frac{s_f}{2D}\right)^2, \quad (7)$$

式中, s_f 为相邻 FRP 条带之间的间距。

根据试验中 4 种尺寸试件的 FRP 包裹方式,可以由式(7)计算出间距影响系数的值,列于表 2。

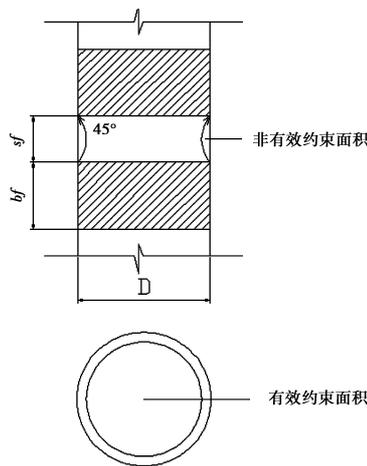


图 4 有效约束面积

表 2 4 种直径试件的 β_f 值

直径/mm	300	250	200	150
β_f	0.81	0.81	0.722 5	0.69

在引进了有效拉应变系数 α_h 和 FRP 间距影响系数 β_f 之后,可以得出环向预应力 FRP 有效约束应力的计算公式:

$$f_{d0} = \alpha_h \beta_f \frac{2t_f f_f}{D}, \quad (8)$$

式中, f_f 为 FRP 极限拉应力,其余各参数物理意义同前文所述。

3.4 峰值应力和峰值应变计算模型

基于前面介绍的非预应力 FRP 约束混凝土柱的计算模型,并引入初始约束应力后,对试验数据进行了回归分析,提出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的峰值应力和峰值应变的计算模型为式(9)和式(10),其中环向 CFRP 的预应力水平应控制在 $0 \sim 0.2$ 之间^[1]。

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_{cl} + f_{il}}{f_{co}} \right)^{0.8268}, \quad (9)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 4.2463 \left(\frac{f_{cl} + f_{il}}{f_{co}} \right), \quad (10)$$

式中, f_{cc} 、 ε_{cc} 分别为环向预应力 FRP 约束混凝土峰值强度和峰值应变; f_{co} 、 ε_{co} 分别为未约束混凝土的峰值强度和峰值应变; f_{cl} 为 FRP 的有效约束应力,见式(8); f_{il} 为预应力 FRP 的初始约束应力,见式(6),对于非预应力 FRP, $f_{il} = 0$

对于配筋试件,还需要考虑箍筋的约束作用:

$$f_r = \frac{f_y A_{s1}}{s d_{cor}}, \quad (11)$$

式中, f_y 为箍筋的抗拉强度; A_{s1} 为单根箍筋的截面积; s 为箍筋间距; d_{cor} 为核心混凝土的直径。

所以配筋试件的峰值应力和峰值应变的计算模型为:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_{cl} + f_{il} + f_r}{f'_{co}} \right)^{0.8268}, \quad (12)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 4.2463 \left(\frac{f_{cl} + f_{il} + f_r}{f'_{co}} \right), \quad (13)$$

式中, f'_{co} 为未加固配筋试件的峰值强度,其余的符号意义同上。

拟合过程见图 5 和 6,计算值与试验值的对比列于表 3 中。

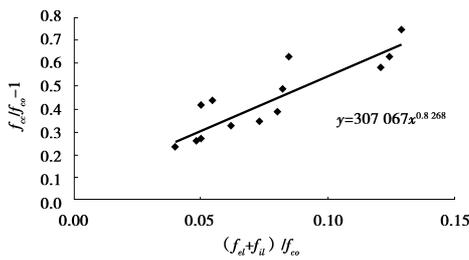


图 5 峰值应力拟合

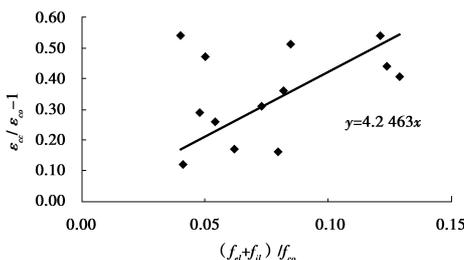


图 6 峰值应变拟合

从表 3 可以看到,峰值强度的计算值与试验值之间的误差均控制在 10% 以内,峰值应变的计算值与试验值之间的误差均控制在 20% 以内。应变主要是通过应变片来测量,应变的测量相对于强度的测量受外界的影响较大,所以会导致应

变的计算模型误差较大。但总的来说,文中提出的环向预应力 FRP 约束混凝土柱的计算模型有较高的计算精度。

表 3 计算值与试验值对比

试件 编号	峰值应力			峰值应变		
	试验值	计算值	计算值/ 试验值	试验值	计算值	计算值/ 试验值
Z1	37.75	38.56	1.02	1948	1584.91	0.81
Z2	43.48	40.18	0.92	1419	1482.87	1.05
Z3	40.69	42.04	1.03	1479.5	1595.51	1.08
Z4	41.27	43.7	1.06	1658	1654.5	1
Z5	49.64	45.41	0.91	1911	1717.25	0.9
Z6	29.55	30.27	1.02	1464	1690.2	1.15
Z7	32.51	33.84	1.04	1850	1752.97	0.95
Z8	44.11	40.88	0.93	1594	1555.27	0.98
Z9	46.16	44.72	0.97	1469	1692.02	1.15
Z10	45.36	45.02	0.99	1721	1702.74	0.99
Z11	51.55	53.36	1.04	1780	1954.79	1.1
Z12	56.05	57.97	1.03	1916	1793.67	0.94
Z13	58.38	60.59	1.04	1973	1635.39	0.83

3.5 极限应力和极限应变计算模型

根据以往的试验结果,对于 FRP 加固混凝土圆柱的应力-应变关系曲线,当超过应力峰值点后,曲线有 2 种类型发展,一种是应变随着应力的增加而继续增加,称为无软化段;另一种是应力减小而应变继续增加,称为软化段。这 2 种类型主要与混凝土的强度以及 FRP 提供的侧向约束力有关。

文中的环向预应力 FRP 加固主要针对固筒仓、水塔、储油罐等圆形结构,或受压桥墩、圆柱等大截面圆形混凝土构件,故 FRP 提供的侧向约束相对有限,应力-应变关系曲线应该出现下降段。而本文试验过程是由应力控制,且没有附加缓冲耗能装置,所以由于试验条件的限制,没有得到混凝土的下降段。

文中采用有限元软件 ABAQUS 对试验过程进行了有限元模拟,得出了环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的应力应变曲线的下降段。从模拟值中可以看出,下降段基本呈一条直线,所以只需拟合出下降段的斜率即可。下降段的斜率与预应力大小、混凝土强度等级等因素有关,经过回归分析,可以得出下降段斜率 k_2 的计算公式:

$$k_2 = 4988 \frac{f_{il}}{f_{co}} - 2672, \quad (14)$$

对于配筋试件:

$$k_2 = 4988 \frac{f_{il} + f_r}{f_{co}} - 2672, \quad (15)$$

取峰值应力的 65% 作为极限应力,可以根据下降段的斜率得出极限应变的计算公式

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} - \frac{f_{cc} - f_{cu}}{k_2}, \quad (16)$$

$$f_{cu} = 0.65 f_{cc}, \quad (17)$$

式中, ε_{cu} 、 f_{cu} 分别为环向预应力 FRP 约束混凝土的极限应变和极限应力。

4 环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱应力-应变关系模型

试验和模拟分析表明,环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱

的应力-应变关系曲线近似于 3 线性^[1],如图 7 所示。

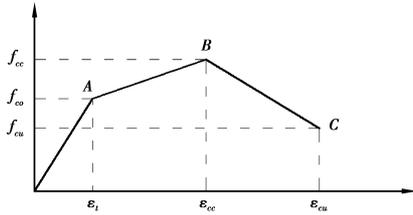


图 7 环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱应力-应变模型

由图 7 可知,只要确定点 A、B、C 的坐标,就可以得出应力-应变模型的曲线和方程。A 点的坐标为 (ϵ_t, f_ω) , B 点的坐标为 (ϵ_{cc}, f_{cc}) , C 点的坐标为 (ϵ_{cu}, f_{cu}) 。 f_ω 为未加固试件的强度, ϵ_t 为当试件强度达到 f_ω 时对应的纵向应变; ϵ_{cc}, f_{cc} 分别为试件的峰值应变和峰值强度; ϵ_{cu}, f_{cu} 分别为试件的极限应变和极限强度。第一段直线的斜率为试件的等效初始弹模 E_c ,故 $\epsilon_t = \frac{f_\omega}{E_c}$,所以只要确定了 E_c ,就可以确定 A 点坐标,进而确定整个模型。

未施加环向预应力的 FRP 加固混凝土圆柱的初始弹模与未加固柱的初始弹模相当,而环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱的初始弹模会有所提高^[1],等效初始弹模的计算公式为^[18]:

$$E_c = 5\,000 \sqrt{f_\omega (2.254 \sqrt{1 + 7.94 f_{iu}} - 2 f_{iu} - 1.254)}, \quad (18)$$

根据试验数据对式(18)中的系数进行了修正,拟合过程如图 8 所示,故式(18)变为

$$E_c = 3\,546 \sqrt{f_\omega (2.254 \sqrt{1 + 7.94 f_{iu}} - 2 f_{iu} - 1.254)}, \quad (19)$$

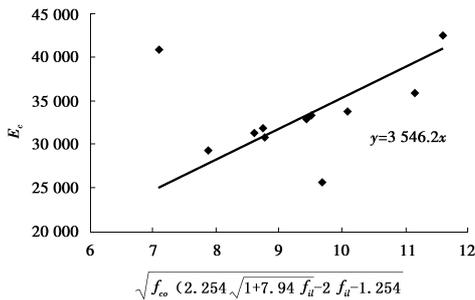


图 8 公式系数拟合

根据式(19)计算出的等效初始弹模与试验值的对比列于表 4。

由表 4 可以看出,除试件 Z6 和试件 Z10 外,其余试件等效初始弹模的计算值与试验值均吻合良好。经分析,试件 Z6 和 Z10 的计算值和试验值出现偏差的原因可能是混凝土材料本身的离散性和试验中的一些不确定因素。

确定了等效初始弹模的计算公式之后,就可以确定应力-应变曲线中的 A、B、C 点坐标,随之就可以确定环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的应力-应变全曲线的方程:

$$\sigma = E_c \times \epsilon, (\sigma < f_\omega), \quad (20)$$

$$\sigma = k_1 \epsilon + f_{cc} - k_1 \epsilon_{cc}, (f_\omega < \sigma < f_{cc}), \quad (21)$$

$$\sigma = k_2 \epsilon + f_{cc} - k_2 \epsilon_{cc}, (f_{cc} < \sigma < f_{cu}), \quad (22)$$

式中 k_1 代表第 2 段直线的斜率,见式(23)

$$k_1 = \frac{f_{cc} - f_\omega}{\epsilon_{cc} - \frac{f_\omega}{E_c}} \quad (23)$$

式中, k_2 代表下降段的斜率,见式(14)和(15)。

表 4 等效初始弹模的计算值与试验值对比

编号	试验值	计算值	计算值/试验值
Z3	31 500	30 545.24	0.97
Z4	31 900	31 016.86	0.97
Z5	33 000	33 477.79	1.01
Z6	40 800	25 165.96	0.62
Z7	29 400	27 931.84	0.95
Z8	30 800	31 077.14	1.01
Z9	33 300	33 676.36	1.01
Z10	25 700	34 296.91	1.33
Z11	33 700	35 743.68	1.06
Z12	36 000	39 552.08	1.10
Z13	42 500	41 151.33	0.97

图 9 中各曲线分别为试验得到的预应力 FRP 约束混凝土柱的应力-应变关系曲线(图 9 中简称试验值)、采用有限元软件 ABAQUS 所得到的模拟曲线(图 9 中简称模拟值)、采用上述拟合公式所得的计算曲线(图 9 中简称计算值)以及采用吴刚提出的经验公式^[18] 计算得到的未施加预应力的 FRP 约束混凝土柱有软化段的应力应变曲线(图 9 中简称吴刚值)。

从图 9 中可以看出,在上升段,除试件 Z6 和 Z10 外,计算结果和试验结果吻合较好,而试件 Z6 和 Z10 的计算结果与试验结果的偏差主要是由于等效初始弹模的偏差造成的,但曲线的走向和拐点的位置还是一致的。计算值的下降段是根据模拟值的下降段回归得到的,而模拟值和计算值、试验值的上升段吻合较好,说明采用软件 ABAQUS 进行数值模拟时所选取的有限元计算模型和计算分析过程是可取的,因此通过模拟得到的下降段也应该是比较可信的。

将试验值曲线、模拟值曲线与计算值曲线的上升段进行对比可以发现,这 3 条曲线的上升段吻合较好,临近峰值点时刚度并未有显著下降,而吴刚值曲线临近峰值点时刚度明显下降。这是因为环向 FRP 对核心混凝土所提供的主动约束应力,限制了裂缝的发生和开展,从而提高了柱的受压刚度。对比分析结果表明,文中对于环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的应力-应变关系曲线的上升段的模拟与拟合公式均是可取的。

对比试验值曲线、模拟值曲线的下降段进行对比可以发现,这 2 条曲线的下降段吻合较好,承载力均是缓慢下降,说明环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱具有较好的延性;试验值曲线、模拟值曲线的下降段与吴刚值的下降段进行对比,可以发现吴刚值的下降段斜率较小,即曲线下降更为平缓,说明环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱的延性比未施加预应力的 FRP 约束混凝土圆柱的延性略有下降;但是,考虑到文中混凝土圆柱的混凝土强度比吴刚试验中的混凝土强度高,且施加环向预应力的 FRP 约束混凝土柱的刚度和强度都会提高,而高强度混凝土的延性要低于低强度混凝土的延性,因此环向预应力 FRP 约束混凝土圆柱仍具有较好的延性,且文

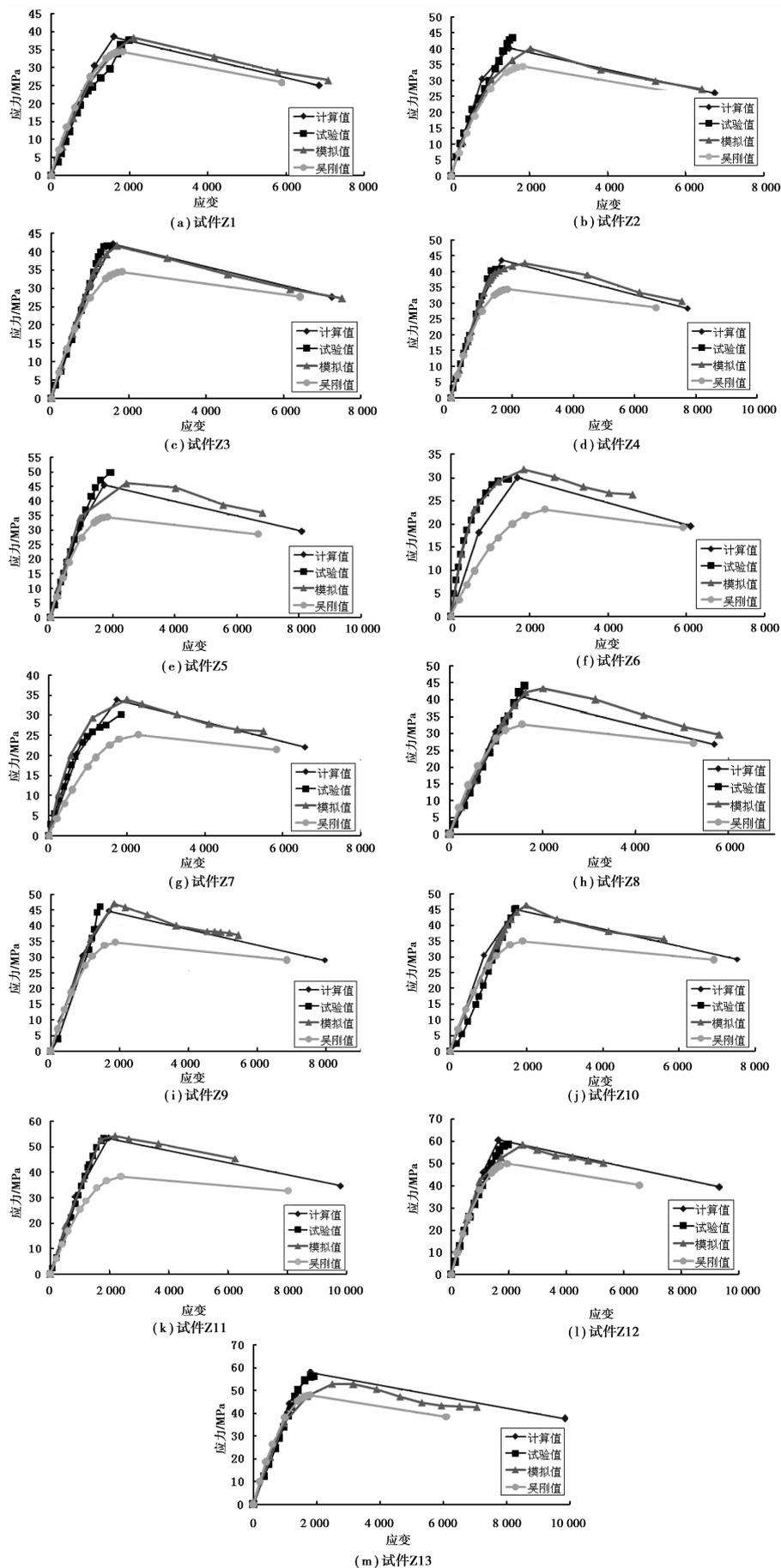


图 9 应力-应变曲线计算结果与试验结果对比

中的模拟值曲线和计算值曲线也和上述分析相吻合,进一步说明文中对于环向预应力FRP约束混凝土圆柱的应力-应变关系曲线的下降段的模拟与拟合公式也是可取的。

5 结 论

1)为了体现环向预应力FRP的主动约束作用,文中引入了与环向预应力大小有关的初始约束应力,并对非预应力FRP的有效约束应力进行了修正。在此基础上提出了环向预应力FRP约束混凝土圆柱的强度和应变的计算公式,计算结果和试验结果吻合较好,可供工程中参考使用。

2)在试验研究与有限元分析的基础上,提出了环向预应力FRP约束混凝土圆柱的三线性应力-应变关系模型,并经过对比分析,证明了模型的可靠性。

3)由于文中所提出的环向预应力约束混凝土圆柱的应力应变关系模型和计算公式所依据的试验数量有限,应进行更多的试验,对模型中的参数进行修正,以进一步提升模型精度。

参考文献:

- [1] 白晓彬. 环向预应力FRP加固混凝土圆柱轴心受压性能研究[D]. 北京:北京交通大学硕士学位论文,2011.
- [2] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. *Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1988, 114(8): 1814-1823.
- [3] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. Model of concrete confined by fiber composites[J]. *Structural Engineering*, 1998, 1025-1031.
- [4] Lam L, Teng J G. Design oriented stress-strain model for frp confined concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17: 471-489.
- [5] 王震宇,王代玉,吕大刚. FRP约束混凝土圆柱应力-应变分析模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(2): 200-206.
WANG Zhenyu, WANG Daiyu, LYU Dagang. Stress-strain analytical model for frp-confined concrete circular column[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(2): 200-206.
- [6] 刘明学,钱稼茹. FRP约束圆柱混凝土受压应力-应变关系模型[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(11): 1-6.
LIU Mingxue, QIAN Jiaru. Compressive stress-strain model for concrete of frp confined cylinders[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(11): 1-6.
- [7] 于峰,牛荻涛. 轴心受压FRP约束圆形混凝土柱应力-应变模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(10): 214-216.
YU Feng, NIU Ditao. Stress-strain model of frp-confined circular column subjected to axial compression[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(10): 214-216.
- [8] Matthys S, Toutanji H, Taerwe L. Stress-strain behavior of large-scale circular columns confined with frp composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 132(1): 123-133.
- [9] Lam L, Teng J G. Stress-strain model for frp-confined concrete under cyclic axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(2): 308-321.
- [10] Wei Y Y, Wu Y Fei. Unified stress-strain model of concrete for frp-confined columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 26(1): 381-392.
- [11] Harajli M H, Hantouche E, Soudkik. Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(5): 672-682.
- [12] Yan Z H, Pantouches C P, Reveley L D. Posttensioned frp composite shells for concrete confinement[J]. *Composites for Construction*, 2007, 11(1): 81-90.
- [13] Pantelides C P, Yan Z H. Confinement model of concrete with externally bonded frp jackets or post-tensioned frp shells[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(9): 1288-1296.
- [14] 张蝶. 预应力FRP加固钢筋混凝土柱抗震性能的有限元分析[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [15] 周长东,厉春龙,朱万旭,等. 高强度纤维材料自锁式锚固装置[P]. 中国,ZL 2011 2 0008128.4. 2011-8-17.
- [16] 敬登虎. FRP约束混凝土的应力-应变模型及其在加固中的应用研究[D]. 南京:东南大学博士学位论文,2006.
- [17] 顾祥林,李玉鹏,张伟平,等. 碳纤维布约束混凝土单轴受压时的应力-应变关系[J]. *结构工程师*, 2006, 22(2): 50-56.
GU Xianglin, LI Yupeng, ZHANG Weiping, et al. Compressive stress-strain relationship of concrete confined by carbon composite sheets[J]. *Structural Engineers*, 2006, 22(2): 50-56.
- [18] 吴刚,吕志涛. FRP约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(5): 1-9.
WU Gang, LYU Zhitao. Study on stress-strain relationship of frp-confined concrete circular columns without a strain-softening response[J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(5): 1-9.
- [19] 秦岭,刘彦青,杨庆生. FRP/RC预应力杂交柱在轴向荷载作用下的应力-应变关系分析[J]. *工业建筑*, 2002, 32(11): 16-18.
QIN Ling, LIU Yanqing, YANG Qingsheng. Stress-strain analysis of axially loaded pre-stressed frp-jacketed concrete columns[J]. *Industrial Construction*, 2002, 32(11): 16-18.

(编辑 陈移峰)