

文章编号:1673-2049(2013)04-0078-06

单调轴压荷载下考虑尺寸效应的FRP加固 混凝土圆柱应力-应变关系

王作虎¹, 刘晶波², 杜修力³

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;
3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为了研究尺寸效应对纤维增强复合材料(FRP)加固混凝土圆柱轴压性能的影响,在修正尺寸效应律公式的基础上,推导了反映尺寸效应的FRP加固混凝土圆柱的极限强度计算公式,提出了简化的应力-应变模型,并与收集到的各国试验结果进行了比较。研究表明:模型计算结果与试验结果吻合较好;该模型能够反映尺寸效应对极限强度的影响。

关键词:FRP; 混凝土圆柱; 尺寸效应; 轴压性能; 单调轴压荷载; 应力-应变关系

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Stress-strain Relation of Circular Concrete Columns Strengthened with FRP Considering Size Effect Under Monotonic Axial Loading

WANG Zuo-hu¹, LIU Jing-bo², DU Xiu-li³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study size effect on the axial compressive behavior of circular concrete columns strengthened with fiber reinforced polymer (FRP), based on the equation of modified size effect law, the ultimate strength calculation formulae of circular concrete columns strengthened with FRP were deduced, which could reflect the effect of different columns sizes. Meanwhile, the simple stress-strain model was proposed, and the comparisons of experiment results and existing model calculation results were done. The study results show that the model calculation results are coincided with the experiment results, and the model can reflect the size effect on ultimate strength.

Key words: FRP; circular concrete column; size effect; axial compressive behavior; monotonic axial loading; stress-strain relation

0 引言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer Composites, FRP)由于具有轻质、高强、耐腐蚀、抗

疲劳等许多优异的性能而逐渐得到了研究者和土木工程师们的认可与青睐。近年来,FRP在既有建筑的修复加固和新建结构中得到了越来越广泛的应用。由于受到试验研究条件和认识水平的限制,目

收稿日期:2013-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51308028);北京建筑大学科学研究基金项目(00331613014)

作者简介:王作虎(1979-),男,湖北仙桃人,讲师,工学博士,E-mail:wangzuohu@bucea.edu.cn.

前对钢筋混凝土结构和 FRP 加固混凝土结构都是基于小尺寸构件(模型试验)进行研究的,其复杂的材料非线性和非均质性使得尺寸效应问题十分复杂,小尺寸材料和构件的破坏试验及其相应的研究结论并不一定具有普遍的指导意义,即以往这些基于小尺寸构件研究结果得出的计算公式是否适用于大尺寸构件,是需要研究的重要问题。目前,各国对于 FRP 加固混凝土结构的尺寸效应研究还非常有限^[1],笔者在修正尺寸效应律计算公式的基础上,推导了反映尺寸效应的 FRP 加固混凝土圆柱的极限强度计算公式,并与收集到的大量试验数据进行了比较。

1 考虑尺寸效应的极限强度模型

Bazant^[2]分析了混凝土构件在断裂过程中的能量释放过程,并根据能量平衡原理推导了混凝土名义强度的统一尺寸效应律模型,即

$$\sigma = \frac{B_0 f_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; B_0, D_0 均为试验参数,可以通过试验数据回归得到; f_t 为标准混凝土圆柱体的抗拉强度; D 为构件特征尺寸。

式(1)是 Bazant 在试件带有预设裂缝(凹槽)工作的试验基础上提出的尺寸效应律,且凹槽的尺寸与试件的尺寸成比例。在实际工程中不规则材料的构件及没有凹槽的试件的裂纹特征尺寸是依赖裂缝扩展的,不受试件尺寸的约束,这与 Bazant 提出的尺寸效应律的前提条件不符。

试件单轴受压时受 2 种效应的影响,一种效应与尺寸有关,另一种则与尺寸无关,是否表现尺寸效应取决于哪一种效应占优。Kim 等^[3]基于这个思想提出了修正的尺寸效应律计算公式,即

$$\sigma = \alpha f_t + \frac{B f_t}{\sqrt{1 + D/(\lambda d_a)}} \quad (2)$$

式中: αf_t 为与尺寸效应无关的强度; $B f_t / \sqrt{1 + D/(\lambda d_a)}$ 为与尺寸效应相关的强度; α, λ, B 均为量纲一的经验常数; d_a 为粗骨料的最大粒径。

另外, Kim 等认为 Bazant 在提出尺寸效应律时,假定总能量释放与断裂过程区面积 $nd_a a$ 成比例,其中, n 为常数, a 为裂缝长度。然而由于开裂出现在狭长的应变集中区域,假定断裂过程区宽度与粗骨料的最大粒径 d_a 不呈线性关系更合理。换言之, n 应该是 d_a 的函数而不是常数,因此开裂区宽度可定为 $n_1 d_a^m$, n_1, m 均为常数。对于长径比

H/d 为 2 的混凝土圆柱体的单轴抗压强度,用标准混凝土圆柱体抗压强度 f_c 代替抗拉强度 f_t ,则单轴抗压强度 f_{cc} 的计算公式应为

$$f_{cc} = \alpha_1 f_c + \frac{B f_c}{\sqrt{1 + d/(\lambda_1 d_a^m)}} \quad (3)$$

式中: α_1, λ_1 均为 f_c 的函数。

对于任意长径比的圆柱体试件,为了能反映微开裂区域的宽度和主开裂区域的特征长度,必须对式(3)进行修正,由此得出

$$f_{cc} = \alpha_1 f_c + \frac{B f_c}{\sqrt{1 + [d/(\lambda_1 d_a^m)](H/d - \beta)}} \quad (4)$$

式中: β 为常数,在没有试验数据的条件下可以取值为 1。

Kim 等通过大量的试验数据统计分析得出 d_a^m 大约等于 1,另外,混凝土强度对 α_1 和 λ_1 的影响不大,可以认为是常数。

现根据式(4)来推导 FRP 约束混凝土的极限强度。因为混凝土圆柱一般在应力为 $0.7f_c \sim 0.85f_c$ 时产生主裂缝,所以与尺寸效应无关的强度项 $\alpha_1 f_c$ 可以取 $0.8f_c$,根据 Kim 等的统计结果 B 可以取 0.4,则式(4)变为

$$f_{cc} = 0.8f_c + \frac{0.4f_c}{\sqrt{1 + (H-d)/\lambda_1}} \quad (5)$$

对于 FRP 约束混凝土,考虑到 FRP 的约束作用,其极限抗压强度可以看作是混凝土抗压强度 f_c 和 FRP 有效约束力 f_{el} 的函数,则 f_{cc} 可以表示为

$$f_{cc} = k f_c + k_1 f_{el} \quad (6)$$

式中: k, k_1 均为待定系数。

本文中不考虑尺寸效应对约束力的影响,只考虑尺寸效应对混凝土强度的影响。另外, λ_1 不再是常数,而是有效约束刚度的函数,记为 λ_2 。将式(5)代入式(6),可得

$$f_{cc} = 0.8f_c + \frac{0.4f_c}{\sqrt{1 + (H-d)/\lambda_2}} + k_1 f_{el} \quad (7)$$

为了对有关参数进行统计分析,本文中收集了 193 组试验数据^[4-23],为了排除钢筋对轴压性能的影响,所统计的数据中不包含有钢筋的试件,而且不包含弱约束的试件。文献[4],[10]~[18],[20],[22]中的材料性能是根据标准试件的抗拉试验得到的,其他数据是厂家提供的。FRP 加固混凝土圆柱试验统计结果见表 1。

FRP 约束混凝土的极限强度与有效约束强度的关系见图 1。由统计结果分析可知 $k_1 = 1.97$ 。

将 $k_1 = 1.97$ 代入式(7),即可得出 $1/\lambda_2$ 的值,

表 1 FRP 加固混凝土圆柱试验统计结果

Tab. 1 Test Statistical Results of Circular Concrete Columns Strengthened with FRP

文献来源	试件数量	混凝土强度等级	直径/mm	FRP 种类
[4]	3	C45	150	CFRP,DFRP
[5]	24	C20,C40	100,150	CFRP
[6]	15	C30,C50	70,105,194	AFRP
[7]	10	C25,C40	100,200,300	BFRP
[8]	8	C35	51,152,304	CFRP,GFRP
[9]	3	C30	76	CFRP
[10]	6	C40	50,100,150	CFRP
[11]	3	C30	100,200,300	CFRP
[12]	4	C20	152	CFRP,HFRP
[13]	18	C30,C40,C50	152	CFRP
[14]	5	C30	152	CFRP
[15]	18	C30,C40	152	CFRP,GFRP
[16]	12	C40	152	CFRP
[17]	6	C40	100,150	CFRP,AFRP
[18]	8	C30,C50	150	CFRP,GFRP
[19]	17	C35	150	AFRP,GFRP
[20]	6	C30	152	CFRP,GFRP
[21]	9	C20,C50	153	CFRP
[22]	5	C35	150	CFRP,GFRP
[23]	13	C40	150	AFRP,CFRP,GFRP

注:CFRP 为碳纤维增强复合材料;DFRP 为聚乙烯纤维增强复合材料;AFRP 为芳纶纤维增强复合材料;BFRP 为玄武岩纤维增强复合材料;GFRP 为玻璃纤维增强复合材料;HFRP 为混杂纤维增强复合材料。

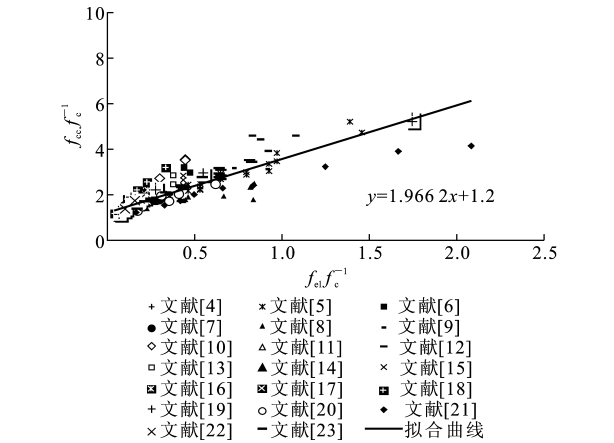


图 1 极限强度与有效约束强度的关系

Fig. 1 Relations of Ultimate Strength and Effective Confined Strength

再根据试验结果统计分析可知

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{909} (1 - 2 \frac{f_{el}}{f_c})$$

(8)

需要说明的是,式(8)是删除了 $1/\lambda_2 \geq 0.03$ 的数据统计而得到的结果。

由式(7),(8)可得

$$f_{cc} = 0.8 f_c + 0.4 f_c / \sqrt{1 + \frac{H-d}{909} (1 - 2 \frac{f_{el}}{f_c})} + 1.97 f_{el}$$

(9)

为了使式(9)有数学意义,必须满足 $f_{el}/f_c \leq 0.5$,否则根号内的数值应该取为 1。它的物理意义是如果侧向约束力过大,则混凝土表现出较强的塑性性能,其抗压强度受尺寸效应的影响很小。

采用式(9)计算得出的极限强度与试验强度的对比见图 2,其中, f_{cc1} 为单轴抗压强度计算值, f_{cc2} 为单轴抗压强度试验值。极限应力计算结果的误差见表 2。

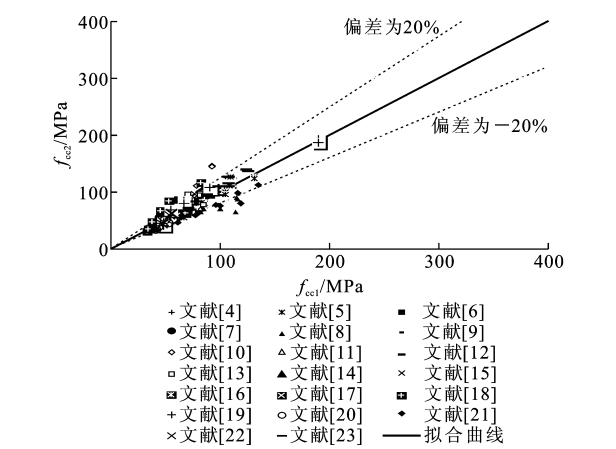


图 2 极限强度与试验强度的对比

Fig. 2 Comparisons of Ultimate Strength and Test Strength

表 2 极限应力计算结果的误差

Tab. 2 Errors of Ultimate Stress Calculation Result

参数	$f_{cc1} f_{cc2}$			平均绝对误差/10 ⁻²	绝对误差平方和
	平均值	标准差	变异系数/10 ⁻²	差/10 ⁻²	
数值	0.98	0.17	16.95	12.73	36.31

由图 2 和表 2 可知,本文中提出的 FRP 加固混凝土圆柱极限强度计算结果与试验结果偏差基本在 $-20\% \sim 20\%$ 之间。

2 极限应变模型

由于试验过程中应变主要通过应变仪或电阻应变片来测量,相对于应力测量技术,应变的测量状态受外界影响较大,导致其精度有所降低,因此得出的极限应变的准确性都比较差。另外,现在各种极限应变模型都是基于半经验、半理论的方法进行回归得出的,受统计样本数量和质量影响较大,如 Lam 等^[24]在分析极限应力模型时基本上收集了所能收集到的所有数据,而在分析极限应变模型时却只用了其中的少量数据,所以各种极限应变模型的适用

性都相对较差。FRP 加固混凝土圆柱的极限应变模型应该考虑不同的破坏形式和是否配置钢筋的影响,而大多数模型都没有区分强弱约束而对数据进行统计分析,其得出的极限应变模型的适用性必然不强^[25-26]。

另外,各国的研究结果表明,FRP 加固混凝土圆柱的延性无尺寸效应,因此极限应变模型暂且不考虑尺寸效应。

文献[24]中根据正交异性材料的本构关系应用到 FRP 加固混凝土圆柱体上,得出了混凝土极限应变 ϵ_{cc} 的计算公式,即

$$\epsilon_{cc} = -\frac{\epsilon_r}{\nu_{sec}} + \frac{1 - \nu_{sec} - 2\nu_{sec}^2}{\nu_{sec} E_{sec}} \frac{E_f t \epsilon_{rup}}{R} \quad (10)$$

式中: $\epsilon_r, \epsilon_{rup}$ 均为 FRP 侧向极限应变; ν_{sec}, E_{sec} 分别为混凝土极限强度处的泊松比和割线模量; E_f, t 分别为 FRP 的弹性模量和厚度; R 为混凝土圆柱体的半径。

由于式(10)无法进行计算,在理论分析的基础上进行参数分析,得出了极限应变的半经验、半理论计算公式,即

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{c0}} = c + k_2 \left(\frac{E_f t}{E_{sec0} R} \right)^a \left(\frac{\epsilon_{rup}}{\epsilon_{c0}} \right)^\beta \quad (11)$$

式中: ϵ_{c0} 为未加固混凝土圆柱在极限应变下的轴向应变; E_{sec0} 为未加固混凝土圆柱的割线模量; c, k_2 均为常数。

由于 FRP 的断裂应变通常无法直接得到,故应将式(11)进行适当变换,得

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{c0}} = c + k_2 \left(\frac{f_{el}}{f_c} \right)^a \left(\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{c0}} \right)^\beta \quad (12)$$

对收集的 182 个试验数据(193 个数据中有 11 个数据没有测得极限应变)进行回归分析可得

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{c0}} = 19.92 - 4.91 \left(\frac{f_{el}}{f_c} \right)^{-0.25} \left(\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{c0}} \right)^{0.31} \quad (13)$$

式(13)极限应变计算结果的误差如表 3 所示。

表 3 极限应变计算结果的误差

Tab. 3 Errors of Ultimate Strain Calculation Result

参数	$\epsilon_{cc1}, \epsilon_{cc2}$			平均绝对误差/ 10^{-2}	绝对误差平方和
	平均值	标准差	变异系数/ 10^{-2}		
数值	1.11	0.52	46.97	39.03	5 181.15

注: $\epsilon_{cc1}, \epsilon_{cc2}$ 分别为混凝土极限应变计算值和试验值。

由表 3 可以看出,本文中提出的极限应变计算公式基本上与试验结果吻合。

3 应力-应变曲线

典型轴压荷载作用下 FRP 约束混凝土的应力-应变关系曲线,在达到转折点之前与无约束混凝土

的应力-应变曲线相似,在达到转折点之后根据约束程度的不同进入强化段或软化段,且呈近似直线发展直至破坏,因此可以采用抛物线加直线的方式来简化 FRP 加固混凝土圆柱的应力-应变曲线。

FRP 加固混凝土圆柱应力-应变关系的简化模型构建原则为:

(1) FRP 加固混凝土圆柱单轴受压时应力-应变曲线的第 1 部分为抛物线。

(2) FRP 加固混凝土圆柱单轴受压时应力-应变曲线的第 2 部分为直线。

(3) 应力-应变曲线的第 1 部分和第 2 部分平滑相交。

(4) 应力-应变曲线的第 2 部分直线段在应力轴上的截距为约束混凝土抗压强度的设计强度。

(5) 应力-应变曲线的直线段在约束混凝土应变达到极限时结束。

根据上述原则,FRP 加固混凝土圆柱无软化段的应力-应变关系为

$$\sigma_c = \begin{cases} E_1 \epsilon_c - \frac{(E_1 - E_2)^2}{4f_c} \epsilon_c^2 & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t \\ f_c + E_2 \epsilon_c & \epsilon_t < \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \end{cases} \quad (14)$$

$$\epsilon_t = \frac{2f_c}{E_1 - E_2} \quad (15)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_c}{\epsilon_{cc}} \quad (16)$$

式中: σ_c, ϵ_c 分别为 FRP 加固混凝土的应力和应变; E_1 为 FRP 加固混凝土应力-应变曲线第 1 段的初始斜率,取未加固混凝土的弹性模量; E_2 为 FRP 加固混凝土应力-应变曲线第 2 段的斜率; ϵ_t 为应力-应变曲线第 1 段和第 2 段转折点的应变。

本文中提出的 FRP 加固混凝土圆柱应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线模型如图 3 所示。

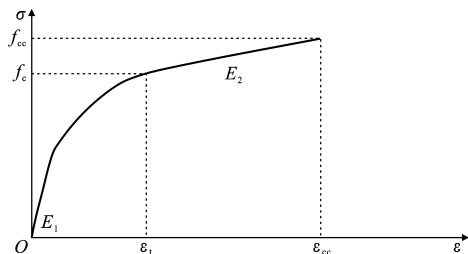


图 3 FRP 加固混凝土圆柱应力-应变曲线模型

Fig. 3 Stress-strain Curve Model of Circular Concrete Columns Strengthened with FRP

将本文中提出的应力-应变曲线模型计算结果与试验结果进行对比,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,模型计算结果与试验结果基

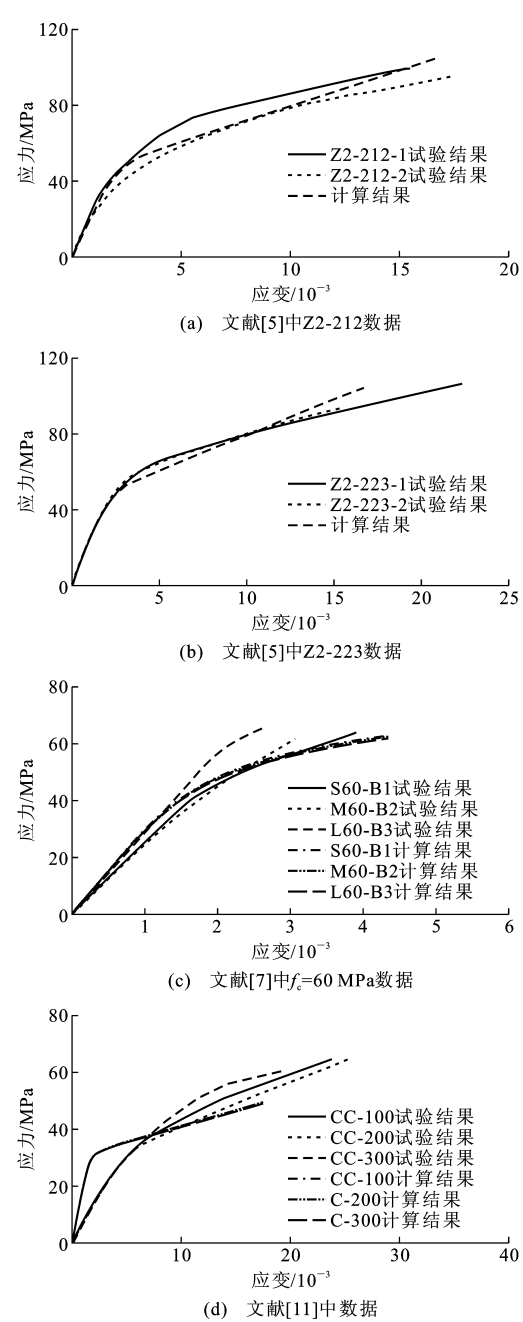


图 4 应力-应变曲线模型计算结果与试验结果的对比

Fig. 4 Comparisons of Stress-strain Curve Models Between Calculation Models and Test Results

本吻合,并且能反映尺寸效应对极限强度的影响。

4 结 语

(1)在修正尺寸效应率公式的基础上,推导了反映尺寸效应的 FRP 加固混凝土圆柱的极限强度计算公式,并根据大量试验数据统计出了极限应变计算公式,计算结果与试验结果吻合较好。

(2)由于收集到的试验构件尺寸均较小,推导的应力-应变关系是否适用于大尺寸构件,还需要进一步的试验验证。另外,FRP 加固混凝土圆柱的极限

应变是否存在尺寸效应也需要进一步的研究。

参考文献:

References:

- [1] 王作虎,刘晶波,杜修力. FRP 加固混凝土结构尺寸效应的研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(3):49-55.
WANG Zuo-hu, LIU Jing-bo, DU Xiu-li. Research Progress of Size Effect on Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2011,28(3):49-55.
- [2] BAZANT Z P. Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock, Metal[J]. Journal of Engineering Mechanics,1984,110(4):518-535.
- [3] KIM J K, YI S T, PARK C H, et al. Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced Concrete Cylinders[J]. ACI Structural Journal,1999,96(1):88-94.
- [4] 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):7-14,76.
WU Gang, WU Zhi-shen, LU 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):7-14,76.
- [5] 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 Xiang-lin, LI Yu-peng, ZHANG Wei-ping, et al. Compressive Stress-strain Relationship of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Sheets[J]. Structural Engineers,2006,22(2):50-56.
- [6] WANG Y F, WU H L. Size Effect of Concrete Short Columns Confined with Aramid FRP Jackets[J]. Journal of Composites for Construction,2011,15(4):535-544.
- [7] 齐建林. 玄武岩纤维布约束混凝土圆柱轴心抗压性能试验研究[D]. 广州:广东工业大学,2011.
QI Jian-lin. Experimental Study on the Axially Compressed Circular Concrete Column Confined by Basalt Fiber Reinforced Plastic Sheet [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2011.
- [8] THERIAULT M, NEALE K W, CLAUDE S. Fiber-reinforced Polymer-confined Circular Concrete Columns: Investigation of Size and Slenderness Effects[J]. Journal of Composites for Construction,2004,8(4):323-331.

- [9] TOUTANJI H A. Stress-strain Characteristic of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 397-404.
- [10] ELSANADEY H M, YOUSEF A A, ALSAYED S H, et al. Experimental and Numerical Investigation of Size Effects in FRP-wrapped Concrete Columns [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 56-72.
- [11] AKOGBE R K, WU Z M, LIANF M. Size Effect of Axial Compressive Strength of CFRP Confined Concrete Cylinders [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2011, 5(1): 41-47.
- [12] KARBHARI V M, GAO Y Q. Composite Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression—Verification of Simple Design Equations [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 185-193.
- [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] HARRIES K A, KHAREL G. Experimental Investigation of the Behavior of Variably Confined Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(6): 873-880.
- [15] LAM L, TENG J G. Ultimate Condition of Fiber Reinforced Polymer-confined Concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6): 539-548.
- [16] 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.
- [17] ROCHETTE P, LABOSSIERE P. Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(3): 129-136.
- [18] 金熙男, 潘景龙, 刘广义, 等. 增强纤维约束混凝土轴压应力-应变关系试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 47-53.
JIN Xi-nan, PAN Jing-long, LIU Guang-yi, et al. Research of Stress-strain Curve of Concrete Confined by Fiber Reinforced Plastics Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 47-53.
- [19] NANNI A, BRADFORD N M. FRP Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression [J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(2): 115-124.
- [20] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 237-245.
- [21] SHAHAWY M, MIRMIRAN A, BEITELMAN T. Tests and Modeling of Carbon-wrapped Concrete Columns [J]. Composite Part B: Engineering, 2000, 31(6/7): 471-480.
- [22] ZHANG S, YE L, MAI Y W. A Study on Polymer Composites Strengthening Systems for Concrete Columns [J]. Applied Composite Materials, 2000, 7(2/3): 125-138.
- [23] 贾明英, 程 华, 陈小兵, 等. 不同 FRP 约束混凝土圆柱轴心受压性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2002, 32(5): 65-67, 56.
JIA Ming-ying, CHENG Hua, CHEN Xiao-bing, et al. Experimental Research of Properties of Circular-columns in Different FRP Shells Under Axial Compression [J]. Industrial Construction, 2002, 32(5): 65-67, 56.
- [24] 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.
- [25] 周长东, 田 腾, 吕西林, 等. 预应力碳纤维条带加固混凝土圆墩抗震性能试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 57-66.
ZHOU Chang-dong, TIAN Teng, LU Xi-lin, et al. Test on Seismic Performance of RC Circular Piers Strengthened with Pre-stressed CFRP Belts [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 57-66.
- [26] 于 峰, 牛荻涛, 贺拴海. 纤维复合材料约束混凝土柱的统一强度模型 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 70-74.
YU Feng, NIU Di-tao, HE Shuan-hai. Unified Compressive Strength Model of FRP-confined Concrete Column [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 70-74.

