

文章编号: 1000-4750(2011)05-0155-06

增强纤维约束混凝土柱应力-应变模型 RBFNN 改进计算方法

*吴毅彬, 金国芳

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘 要: 为提高增强纤维约束混凝土柱应力-应变模型中特征点(峰值应力、应变)的计算精度, 针对已有文献资料提出的特征点近似计算公式的不足, 引入径向基函数, 以混凝土轴心抗压强度、FRP 抗拉强度、FRP 环向约束体积比、拐角半径与截面短边比值及截面长宽比为输入参数, 峰值应力比、峰值应变比为输出参数, 建立特征点的径向基网络模型。模型计算结果表明, 采用训练成熟的径向基网络模型具有较高的非线性映射能力, 可较大幅度提高特征点的计算精度与效率。在此基础上, 利用模型计算结果改进已有应力-应变模型, 并编制了相应的计算程序, 结果表明, 改进算法的计算结果与其他文献报道的试验结果吻合良好, 具有较广泛的适用性。

关键词: 增强纤维布; 混凝土柱; 约束; 应力-应变模型; 径向基网络

中图分类号: TU375.3; TU313 **文献标识码:** A

AN IMPROVED CALCULATION METHOD FOR STRESS-STRAIN MODEL OF FRP-CONFINED CONCRETE BY USING RBF NEURAL NETWORK

*WU Yi-bin, JIN Guo-fang

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new method based on Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) is proposed to improve the accuracy of existing calculation method for key points (ultimate stress and strain) in stress-strain model for FRP-confined concrete. In RBFNN model, concrete axial strength, tensile strength of FRP, FRP volumetric ratio, corner radius-to-section width ratio and aspect ratio were considered as input factors, and the compressive strength ratio and ultimate strain ratio were adopted as output factors. Trained by existing experimental data, RBFNN with highly non-linear reflection relationship was founded and proved to be more effective and accurate in calculating the key points in stress-strain model. Combining RBFNN method with the existing stress-strain model, an improved calculation method is put forward to predict stress-strain curves, the calculated results show reasonable agreement with other test results.

Key words: fiber reinforced polymer; concrete column; confinement; stress-strain model; RBF neural network

纤维增强复合材料(FRP)具有高强、抗腐蚀和施工方便等优点, 近年来已引起国内外工程界的广泛关注, 并开始得到应用。FRP 的一个主要应用方向是以外包的形式从环向对混凝土施加约束, 形成

FRP 约束混凝土, 从而提高混凝土构件的抗压承载力及变形能力, 国内外针对 FRP 约束混凝土已开展了大量工作, 并取得丰硕的研究成果。

FRP 约束混凝土应用中的一个关键问题是如何

收稿日期: 2009-10-16; 修改日期: 2009-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50621062)

作者简介: *吴毅彬(1982—), 男, 福建漳州人, 博士生, 主要从事工程抗震与防灾、结构鉴定与加固方向研究(E-mail: wuyibindddd@hotmail.com);

金国芳(1952—), 女, 上海人, 教授, 硕士, 博导, 结构鉴定与加固研究室主任, 从事工程抗震防灾、结构鉴定与加固方向研究(E-mail: tjinguofang@126.com).

确定其应力-应变关系模型，而约束混凝土峰值应力、应变的预测对应力-应变关系模型精度有很大影响，如图 1 所示。目前国内外已进行过大量与之相关的轴压试验研究，并在此基础上提出了十余种 FRP 约束混凝土应力-应变关系模型^[1-8]，这些模型中的大多数属于半理论、半经验的计算模型，模型精度取决于试验者测得 FRP 有效拉应变的精确程度、搜集试验数据的可靠性、选择方程形式的好坏及方程回归的准确程度，其中以测定 FRP 有效拉应变最为关键，通过对部分学者关于 FRP 有效拉应变系数 a 实测结果汇总(表 1)，可知 FRP 有效拉应变系数 a 的波动很大，这主要是由于试件破坏瞬间 FRP 拉断应变不易测准，且 FRP 拉断应变对纤维布品质、粘结树脂类型、包裹工艺质量及混凝土试件缺陷等因素十分敏感，因而导致 FRP 有效拉应变系数 a 的离散性很大，进而在很大程度上影响约束混凝土应力-应变关系模型的精度，这也给模型的选用造成很大困难。

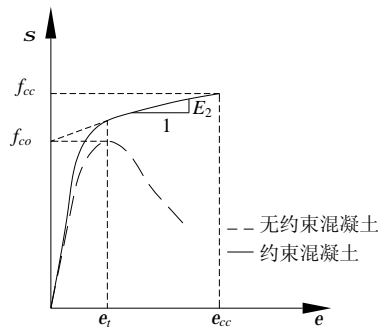


图 1 FRP 约束混凝土应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain model for FRP-confined concrete

表 1 FRP 有效拉应变系数 a

Table 1 The efficient factor a of tensile strain of FRP

研究者	a	研究者	a
赵彤 ^[9]	0.67	Toutanji ^[18]	0.78-0.83
周长东 ^[10]	0.50	Restrepol ^[19]	0.5
赵海东 ^[11]	0.31-0.45	Rochette ^[3]	0.52-0.92
金熙男 ^[12]	0.71-1.0	Micelli ^[20]	0.47-0.71
肖岩 ^[13]	0.5-0.8	Rousakis ^[21]	0.45-0.66
顾祥林 ^[8]	0.44-0.84	Lam ^[22]	0.586
Shahawy ^[14]	0.21-0.27	Ikii ^[23]	0.85
Pessiki ^[15]	0.48-0.6	ACI440 ^[24]	≤0.75
Watanabe ^[16]	0.55-0.98	GB50367 ^[25]	0.0035/ e_{frp} -0.0045/ e_{frp}
Kono ^[17]	0.38-0.59	CSA-S806 ^[26]	0.004/ e_{frp} - f_f

注： e_{frp} 为 FRP 极限拉应变， f_f 为 FRP 材料强度折减系数。

鉴于上述 FRP 约束混凝土模型研究中的不足，本文在收集国内外 362 个试验数据的基础上，通过对已有文献资料提出 FRP 约束混凝土柱特征点(峰值应力、应变)近似计算公式的对比分析，引入径向

基函数，建立特征点的径向基网络模型，减少人为因素的影响，以期获得更符合实际的特征点计算值，并以此改进现有的应力-应变模型，提高模型的计算精度与适用性。

1 现有 FRP 约束柱研究成果

在过去的 20 多年里，国内外学者通过试验等方法研究 FRP 约束混凝土柱峰值应力、应变。从收集到的大量试验数据(数据整理及分类见表 2)可较为全面的了解目前 FRP 约束混凝土柱的研究现状与成果，这些试验数据作为本文分析研究的依据。

表 2 试验数据提要

Table 2 Outline of the database

	圆柱	矩形柱	共计
试件个数	208	154	362
峰值应力点试件	208	154	362
峰值应变点试件	60	111	171
碳纤维 CFRP 加固试件	188	132	320
玻璃纤维 GFRP 加固试件	13	4	17
芳纶纤维 AFRP 加固试件	7	18	25
轴心抗压强度 f_{co} /MPa	9.2-55.2	10.75-43.9	-
截面尺寸/mm	51-250	79-300	-
截面长宽比 h/b	-	1.0-2.0	-
拐角半径 R_c /mm	-	5-75	-
FRP 强度 f_f /MPa	220-4200	230-4519	-
FRP 环向约束体积比 r_f	0-0.1389	0-0.1326	-

注：FRP 环向约束体积比 $r_f=4nt_f/D$ ；试验数据主要来源于：Xiao 和 Wu^[1]；Toutanji 等^[2]；Rochette 和 Labossiere^[3]；Karbhari 和 Gao^[4]；Samaan 等^[5]；Shehata 等^[6]；刘涛^[7]；顾祥林^[8]；Watanabe 等^[16]；Lam 和 Teng^[22]；Ikii 等^[23]；Howie 和 Karbhari^[27]；Miyachi 等^[28-29]；Demers 和 Neale^[30]；Chaallal 等^[31]；Lam 和 Teng^[32]；De Lorenzis 和 Tefpers^[33]；Aire 等^[34]；Parvin 和 Wang^[35]；Hantouch^[36]。

现有 FRP 约束混凝土柱峰值应力、应变计算公式中均考虑了混凝土强度、柱截面形状、拐角半径、FRP 抗拉强度及 FRP 环向约束体积比等因素的影响。图 2(a)-图 2(f)列出国内外较有代表性的峰值应力、应变计算公式^[22-26]计算值与试验值的对比结果，统计分析结果见表 3。

分析结果表明各公式均能在一定程度上预测 FRP 约束混凝土柱峰值应力、应变，但计算精度均不甚理想。从对比结果来看，Lam 与 Ikii 公式计算结果偏不安全，计算值与试验值偏差较大，这可能是二模型中对 FRP 有效拉应变取值过高，且二公式均基于各自试验数据回归确定分项系数，公式的适用性不强。ACI-440、GB50367 与 CSA-S806-02 三个规范公式的计算结果体现规范以设计为目的，计算值均偏于保守，除 ACI-440 的计算精度尚可外，其余二规范公式的计算精度仍存在一定偏差。

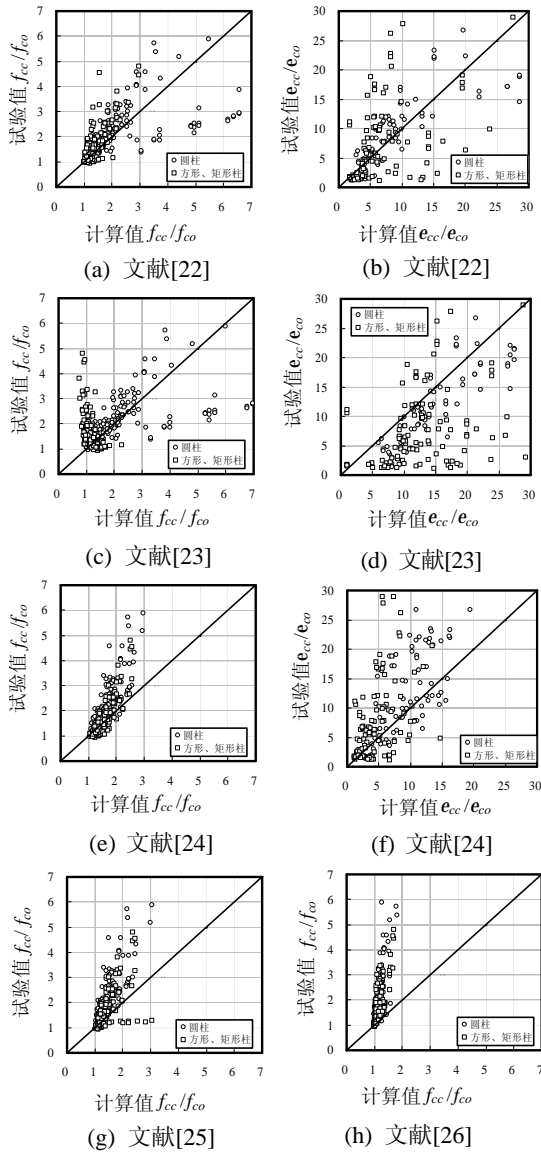


图 2 各公式计算值与试验值对比
Fig.2 Comparison between analytical and experimental results

表 3 不同公式计算值与试验值对比

Table 3 Comparison between calculations and experimental observations

文献		圆柱		矩形柱		所有柱	
		ξ_{ave}	r	ξ_{ave}	r	ξ_{ave}	r
文献[22]	f_{cc}/f_{co}	1.09	0.61	0.90	0.75	1.04	0.63
	e_{cc}/e_{co}	1.32	0.68	1.77	0.55	1.58	0.61
文献[23]	f_{cc}/f_{co}	1.10	0.61	1.13	0.89	1.11	0.66
	e_{cc}/e_{co}	1.62	0.79	2.72	0.63	2.25	0.70
文献[24]	f_{cc}/f_{co}	0.83	0.82	0.96	0.85	0.90	0.81
	e_{cc}/e_{co}	0.94	0.67	0.91	0.47	0.92	0.54
文献[25]	f_{cc}/f_{co}	0.73	0.85	0.92	0.55	0.83	0.72
文献[26]	f_{cc}/f_{co}	0.61	0.85	0.74	0.78	0.68	0.80

另外，应变计算结果的误差和离散性明显大于

应力计算结果，其原因有下述几方面：FRP 材料在破坏过程中的静应力、动应力集中；不同侧向约束下骨料咬合力的参与程度；施工工艺和胶体粘结界面的影响及试验中人为因素等，这些因素交错存在给峰值应变的精确计算带来很大困难。从总体上看，各公式的计算精度与适用性仍有待进一步提高。

2 峰值应力、应变 RBFNN 计算方法

鉴于影响约束混凝土峰值应力、应变各因素之间关系的复杂，甚至存在诸因素影响的交互作用，往往表现为非线性规律，难以准确地用数学、力学模型来描述。人工神经网络具有复杂的非线性处理能力，特别是径向基函数神经网络(RBFNN)具有较强的输入、输出映射功能，并且理论证明在前向网络中 RBFNN 是完成映射功能最优的网络，可避免如 BP 网络冗长的训练迭代计算和陷入局部极值的可能。

本文利用 RBFNN 分别建立 FRP 约束混凝土圆柱、矩形柱的网络模型，采用正交最小二乘(OLS)算法训练 RBFNN。圆柱网络模型输入参数为：混凝土轴心抗压强度 f_{co} 、FRP 抗拉强度 f_f 及 FRP 环向约束体积比 r_f ；矩形柱网络模型输入参数除上述 f_{co} 、 r_f 、 f_f 外还输入拐角半径与截面短边比值 R_c/b 及截面长宽比 h/b 。模型的输出参数均为峰值应力比 f_{cc}/f_{co} 、峰值应变比 e_{cc}/e_{co} 。RBFNN 拓扑结构如图 3 所示。采用上述 208 个圆柱样本与 154 个矩形柱样本，将样本分为学习样本与测试样本(表 4)。先将学习样本提交网络，使其按要求的算法反复学习直至系统误差满足要求。在网络模型完成学习后，将预测样本提交网络模型进行预测。

二网络模型的学习与预测结果如表 4 所示。由表 4 可知，二网络模型都能达到预期的学习效果且预测性能良好，峰值应力的预测结果略优于峰值应变的预测结果，测试样本的预测值与试验值之比误差均值 ξ_{ave} 在 8% 内，相关系数 r 基本均超过 0.90，模型预测精度较已有计算公式均有较大幅度的提高，说明二网络模型可分别用于预测 FRP 约束混凝土的峰值应力、应变。同时 RBFNN 是一个开放性的网络，随着试验所考虑的影响因素的增加，学习样本也增加，可使网络模型更准确地反映影响因素与约束效应的映射关系，计算结果将更加准确。

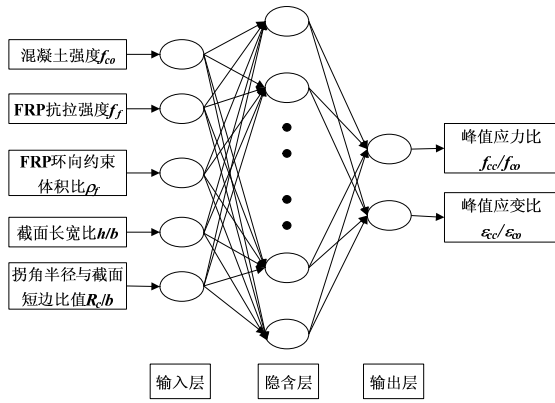


图3 RBFNN 拓扑结构

Fig.3 RBFNN structure

表4 RBFNN 学习与预测结果

Table 4 The result of study and forecast in RBFNN

		圆柱			矩形柱		
		个数	ζ_{save}	r	个数	ζ_{save}	r
学习样本	f_{cc}/f_{co}	178	1.0	0.99	130	1.0	0.99
	e_{cc}/e_{co}	50	0.99	0.975	95	0.97	0.952
预测样本	f_{cc}/f_{co}	30	1.06	0.953	24	1.04	0.964
	e_{cc}/e_{co}	10	0.947	0.912	16	0.925	0.891

3 约束混凝土应力-应变模型改进方法

Lam 和 Teng 两学者于 2003 年提出增强纤维约束混凝土柱应力-应变模型^[22]，模型的数学表达式为：

$$s_c = E_c e_c - (E_c - E_2)^2 e_c^2 / 4f_{co}, \quad 0 \leq e_c \leq e_t$$

$$s_c = f_{co} + E_2 e_c, \quad e_t \leq e_c \leq e_{cu}$$

式中： $e_t = 2f_{co} / (E_c - E_2)$ ； $E_2 = (f_{cc} - f_{co}) / e_{cu}$ ；

E_c 为未约束混凝土的弹性模量。

文献[23]对比分析表明该计算模型对圆柱、矩形柱峰值应力的计算精度一般，而对于峰值应变的计算则不甚理想，从图 2(a)、图 2(b)及表 3 的结果也可得出类似结论，但该模型计算表达式的形式较为简单，各变量和模型边界条件的意义较为清晰。因此本文将 RBFNN 计算的圆柱、矩形柱峰值应力比 f_{cc}/f_{co} 、峰值应变比 e_{cc}/e_{co} 引入该应力-应变模型中，并基于 MATLAB6.5 软件平台，编制相应的计算程序，实现基于 RBFNN 的增强纤维约束混凝土柱应力-应变曲线计算。程序计算框图如图 4 所示。

为进一步验证本文改进计算方法的准确性，对收集到的国内外 FRP 约束混凝土应力-应变试验曲线进行计算，限于篇幅本文仅给出部分曲线的对比结果，如图 5 所示。改进计算方法与 LAM 模型计算结果均与 LAM 试验曲线^[22,32]吻合较好，而计算文献[1,3,7-8,12,23]试验曲线时，LAM 模型存在一

定偏差，而本文改进方法计算结果的吻合程度总体令人满意，可见改进方法不仅计算简单、精度较好，且具有较广泛的适用性。

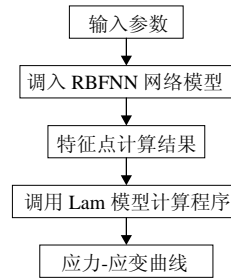


图4 应力-应变曲线计算框图

Fig.4 Flow chart for calculating stress-strain curves

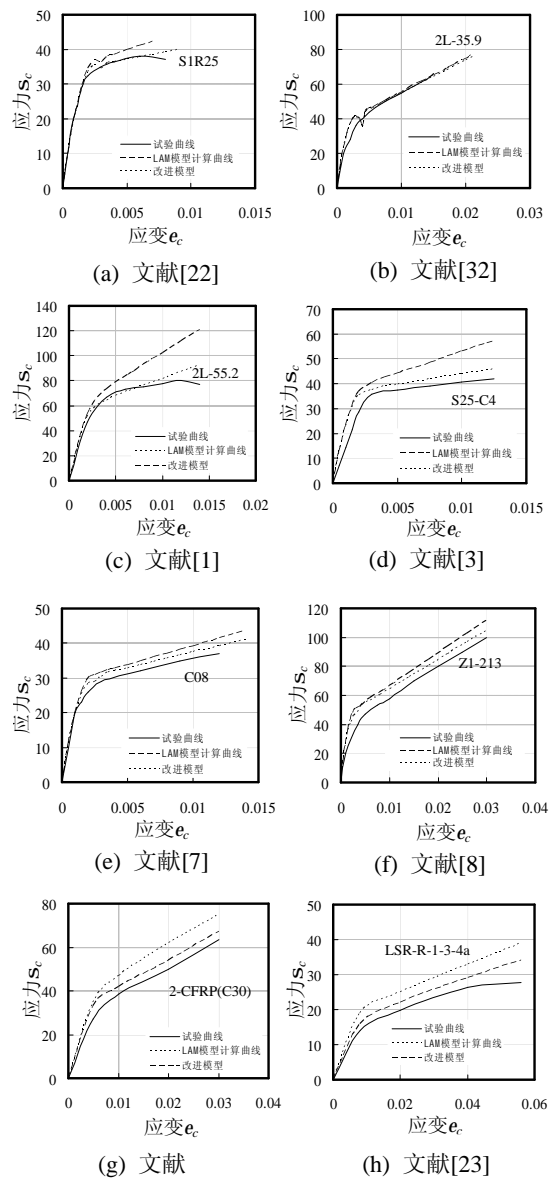


图5 各模型计算值与试验值对比

Fig.5 Comparison between analytical and experimental results

4 结论

如何确定 FRP 约束混凝土的应力-应变关系模型是 FRP 在土木工程中应用的一个重要问题。本文着眼于已有的应力-应变曲线模型特征点计算公式存在的不足,通过引入 RBFNN 模型,可明显提高特征点的计算精度与效率。采用数值方法,将径向基函数神经网络(RBFNN)与 LAM 应力-应变模型相结合改进计算方法,计算结果得到其他研究学者试验数据的验证,表明改进方法计算简单、精度较好,具有较广泛的适用性。

本文提出的改进计算方法适用于圆柱、矩形柱,同时也适用于不同类型的 FRP 材料,实现了不同截面、材料的 FRP 约束混凝土应力-应变曲线模型的统一。随着试验所考虑因素及样本点的增加,该方法的计算精度仍可进一步提高。由于 LAM 模型未考虑 FRP 弱约束情况,对于计算具有软化特征的 FRP 约束混凝土应力-应变关系的方法仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Xiao Y, Wu H. Compressive behaviour of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 2000, 12(2): 139—146.
- [2] Toutanji H, Balaguru P. Durability characteristics of concrete columns wrapped with fiber tow sheets [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 1998, 10(1): 52—57.
- [3] Rochette P, Labossiere P. Axial testing of rectangular column models confined with composites [J]. *Journal of Composite Constructure*, 2000, 4(3): 129—136.
- [4] Karbhari V M, Gao Y. Composite jacketed concrete under uniaxial compression Verification of simple design equations [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 1997, 9(4): 185—193.
- [5] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(9): 1025—1031.
- [6] Shehata IAEM, Carneiro LAV, Shehata LCD. Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets [J]. *Material and Structural*, 2002, 35(245): 50—58.
- [7] 刘涛, 冯伟, 张智梅. 碳纤维布约束混凝土矩形柱的抗压性能研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(12): 41—47. Liu Tao, Feng Wei, Zhang Zhimei. A study on the compressive performance of rectangular concrete columns confined with CFRP sheets [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2006, 39(12): 41—47. (in Chinese)
- [8] 顾祥林, 李玉鹏, 张伟平. 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. Compressive stress-strain relationship of concrete confined by carbon fiber composite sheets [J]. *Structural Engineers*, 2006, 22(2): 50—56. (in Chinese)
- [9] 赵彤, 谢剑, 戴自强. 碳纤维布约束混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构*, 2000, 30(7): 40—43. Zhao Tong, Xie Jian, Dai Ziqiang. Research on compressive stress-strain relationship of concrete confined with continuous CFS [J]. *Building Structure*, 2000, 30(7): 40—43. (in Chinese)
- [10] 周长东, 黄承逵. 玻璃纤维聚合物约束混凝土圆柱简化分析模型[J]. *大连理工大学学报*, 2004, 44(1): 96—103. Zhou Changdong, Huang Chengkui. Simplified analytic models for glass fiber-reinforced polymer-confined concrete circular columns [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(1): 96—103. (in Chinese)
- [11] 赵海东, 赵鸣, 张誉. 碳纤维布加固混凝土圆柱的轴心受压试验研究[J]. *建筑结构*, 2000 30(7): 26—30. Zhao Haidong, Zhao Ming, Zhang Yu. Experimental study on concrete circular-columns wrapped with CFRP under axial compression [J]. *Building Structure*, 2000, 30(7): 26—30. (in Chinese)
- [12] 金熙男, 潘景龙, 刘广义. 增强纤维布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 Xinan, Pan Jinglong, Liu Guangyi. Research of stress-strain curve of concrete by fiber reinforced plastics under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(4): 47—53. (in Chinese)
- [13] 肖岩, 吴徽, 陈宝春. 碳纤维套箍约束混凝土的应力-应变关系[J]. *工程力学*, 2002, 19(2): 154—159. Xiao Yan, Wu Hui, Chen Baochun. Compressive stress-strain behavior of concrete confined by carbon fiber jackets [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(2): 154—159. (in Chinese)
- [14] Shahawy M, Mirmiran A, Beitelmann T. Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns [J]. *Composites, Part B*, 2000, 31(6-7): 471—480.
- [15] Pessiki Stephen, Harries K A, Kestner J T. Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001(11): 237—245.
- [16] Watanabe K. Confinement effect of FRP sheet on strength and ductility of concrete cylinders under uniaxial compression [C]. *Proceeding of 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 1997: 233—240.
- [17] Kono S, Inazumi M, Kaku T. Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members

- [C] Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure ICCI'98, Tucson, Arizona, 1998: 343—355.
- [18] Toutanji H. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets [J]. *ACI Materials Journal*, 1999, 96(3): 397—404.
- [19] Restropol J I, DeVino B. Enhancement of the axial load carrying capacity of reinforced concrete columns by means of fiber glass-epoxy jackets [C]. *Proceedings of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. Montreal, Quebec: Canadian Society for Civil Engineers, 1996: 547—690.
- [20] Micelli F, Myers J J, Murthy S. Effect of environmental cycles on concrete cylinders confined with FRP [C]. *Proceedings of International Conference on Composites in Construction*, Porto, Portugal, 2001.
- [21] Rousakis T. Experimental investigation of concrete cylinders confined by carbon FRP sheets under monotonic and cyclic axial compressive load [R]. Research Report No 44. Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden: Division of Building Technology, 2001.
- [22] 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.
- [23] Ikii A, Onder Peker, Emre Karamuk. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 2008, 20(2): 169—188.
- [24] ACI 440. 2R-02. Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for strengthening concrete structures [R]. Detroit: American Concrete Institute, 2002.
- [25] GB50367-2006, 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
GB50367-2006, Design code for strengthening concrete structure [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [26] CSA-S806-02, Design and construction of building components with fiber reinforced polymers [S]. Toronto: Canadian Standards Association International, 2002.
- [27] Howie I, Karbhari V M. Effect of materials architecture on strengthening efficiency of composite wraps for deteriorating columns in the Northeast [C]. *Proceeding of 3rd Materials Engineering Conference on New Materials and Methods of Repair*. New York: Material Engineering Division, ASCE, 1994: 199—206.
- [28] Miyauchi K, Nishibayashi S, Inoue S. Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete columns [C]. *Proceeding of 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Sapporo, Japan: Japan Concrete Institute, 1997: 217—224.
- [29] Miyauchi K, Inoue S, Kuroda T. Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1999, 2(1): 143—150.
- [30] Demers M, Neale K W. Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets [C]. *Proceeding of 4th International Conference on Short and Medium Bridges*. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1994: 895—905.
- [31] Chaallal O, Hassan M, LeBlanc M. Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines [J]. *Journal of Composite Constructure*, 2006, 10(1): 4—12.
- [32] Lam L, Teng J G, Cheung C H. Behavior of FRP-confined concrete under cyclic axial compression [C]. *Proceeding of International Symposium on Confined Concrete*. Changsha, China, 2004.
- [33] De Lorenzis L, Tepfers R. Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber-reinforced polymer composites [J]. *Journal of Composite Constructure*, 2003, 7(3): 219—237.
- [34] Aire C, Gettu R, Casas J R. Study of the compressive behavior of concrete confined by fiber reinforced composites [C]. *Proceeding of International Conference on Composites in Construction*. Porto, Portugal, 2001: 239—243.
- [35] Parvin A, Wang W. Behaviour of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading [J]. *Journal of Composite Constructure*, 2001(5): 146—152.
- [36] Hantouch E. Axial stress-strain behavior of FRP jacketed rectangular concrete columns [D]. Lebanon: American University of Beirut, 2004.