

文章编号:1673-2049(2013)01-0025-07

预应力 CFRP 布加固低强度混凝土方柱的力学性能

程东辉,于雁南,叶 旭

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了研究预应力碳纤维增强复合材料(CFRP)布加固低强度混凝土轴心受压柱的力学性能,按截面配筋率不同设计制作了 3 组 12 根混凝土方形截面柱,混凝土强度均为 C20,每组包括 3 根利用预应力 CFRP 布加固的混凝土柱和 1 根未加固的普通混凝土柱。通过对每组柱的静载试验,得到了试验柱极限承载力、轴向位移等试验数据,并利用有限元软件 ANSYS 建立了分析模型,对预应力 CFRP 布加固低强度混凝土柱进行了研究。结果表明:预应力 CFRP 布加固的混凝土柱在纵向受力钢筋屈服后,预应力 CFRP 布对混凝土的环向预压作用能够明显提高加固柱的极限承载力,且承载力提高幅度受截面配筋率及 CFRP 布张拉控制应力影响;对于配筋率较低的混凝土柱,利用预应力 CFRP 布加固后柱的承载力提高幅度随 CFRP 布预拉应力的提高而增大;同时能够明显提高混凝土的极限压应变,增大加固柱的轴向变形;采用预应力 CFRP 布加固技术能够使 CFRP 布较早地参与受力,充分发挥其高强度特性。

关键词:预应力碳纤维增强复合材料布;加固;低强度混凝土方柱;力学性能;配筋率

中图分类号:TU398.1 **文献标志码:**A

Mechanical Properties of Low Strength Concrete Square-columns Strengthened with Prestressed CFRP Sheets

CHENG Dong-hui, YU Yan-nan, YE Xu

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of reinforced concrete columns strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets under axial compression, three groups of concrete columns, total of 12, were made according to different reinforcement ratios, and the concrete strength was C20. In each group, there were 3 reinforced concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets and 1 reinforced concrete column without being strengthened. The data such as ultimate bearing capacity and axial displacement were obtained from the static load test. The analysis model was established by using finite element software ANSYS and the low strength concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets were studied. The results show that the prestressed CFRP sheets of the reinforced concrete columns which provide the hoop stress to concrete can obviously improve the ultimate bearing capacity of reinforced columns after longitudinal reinforcements yield. Moreover, the improvement is influenced by reinforcement ratio and prestress of CFRP sheets. When reinforcement ratio of the

收稿日期:2012-11-08

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2012RFXXS111)

作者简介:程东辉(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,工学博士,E-mail:chengdonghui2000@126.com。

strengthened column is lower, the improvement of reinforced concrete columns is higher with the increasing prestress of CFRP sheets. What's more, the columns strengthened with prestressed CFRP sheets can improve the ultimate compression strain of concrete, and increase axial deformation of the strengthened column; using the prestressed CFRP strengthening technique can make that CFRP sheets participate in force earlier and make effectively use of high strength.

Key words: prestressed carbon fiber reinforced polymer sheet; strengthening; low strength concrete square-column; mechanical property; reinforcement ratio

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)布具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、施工方便、施工质量易于保证等优点,在各国广泛应用于钢筋混凝土结构加固领域^[1-13]。为充分发挥 CFRP 布高强度的特点,解决普通 CFRP 布加固混凝土构件存在的应力滞后问题,对 CFRP 布进行预张拉,然后对混凝土构件进行粘贴加固是行之有效的途径。各国对预应力 CFRP 布加固混凝土结构的研究证明:利用预应力 CFRP 布加固可以明显提高混凝土结构的开裂荷载、纵向受力钢筋屈服时的荷载和构件的极限承载力;显著提高构件的刚度,减少变形;有效抑制裂缝的形成、开展,明显改善结构的工作性能;使 CFRP 布由被动受力转变为主动受力。

为进一步研究 CFRP 布加固混凝土柱受压性能,笔者在试验的基础上利用有限元软件 ANSYS 对预应力 CFRP 布加固低强度混凝土柱的轴心受压力学性能进行了研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

根据截面配筋的不同设计制作 3 组共计 12 根方形截面柱试件,混凝土设计强度均为 C20。每组试件中选 1 根普通钢筋混凝土柱作为对比柱,其余 3 根利用预应力 CFRP 布加固。柱截面尺寸为 200 mm×200 mm,柱高 1 000 mm,试件截面尺寸及配筋如图 1 所示,试件配筋率及 CFRP 布张拉控制应力如表 1 所示。

试验中采用日本东丽(TORAYCA)公司生产的 CFRP 布,该 CFRP 布为单向纤维,由高强度 CFRP 束组成,每束碳纤维的丝数规格为 18 K; CFRP 布单位面积质量为 200 g,其力学性能指标见表 2。胶粘剂选用亨斯特先进化工材料有限公司生产的双酚 A 改性环氧树脂和配套的改性胺类固化

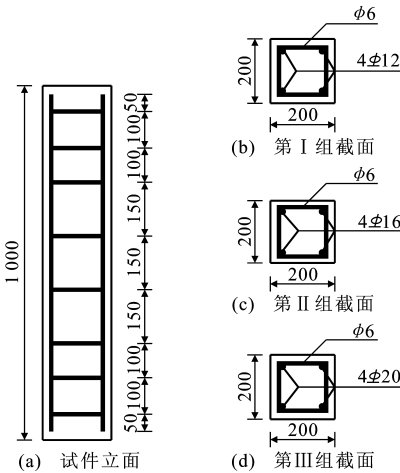


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and Reinforcements of Specimens (Unit:mm)

表 1 试件配筋率及 CFRP 布张拉控制应力

Tab. 1 Reinforcement Ratios of Specimens and Prestress of CFRP Sheets

试件分组	试件编号	配筋率/%	控制应力/MPa
第 I 组	DBZ1	1.13	0
	YJGZ1-A	1.13	200
	YJGZ1-B	1.13	500
	YJGZ1-C	1.13	800
第 II 组	DBZ2	2.01	0
	YJGZ2-A	2.01	200
	YJGZ2-B	2.01	500
	YJGZ2-C	2.01	800
第 III 组	DBZ3	3.14	0
	YJGZ3-A	3.14	200
	YJGZ3-B	3.14	500
	YJGZ3-C	3.14	800

注:DBZ 表示对比柱;YJGZ 表示预应力加固柱,其后数字、字母分别表示配筋率水平和控制应力水平,如 YJGZ1-A 表示加固柱的配筋率为第 1 级,控制应力为第 1 级。

剂,二者按 4 : 1 比例配制而成,其力学性能指标见表 3。混凝土轴心抗压强度实测值为 13.2 MPa,试验选用的钢筋力学性能指标实测值见表 4。

表 2 CFRP 布的力学性能指标

Tab. 2 Mechanical Property Indexes of CFRP Sheets			
厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
0.111	3 700	246	1.5

表 3 浸渍胶粘剂的力学性能指标

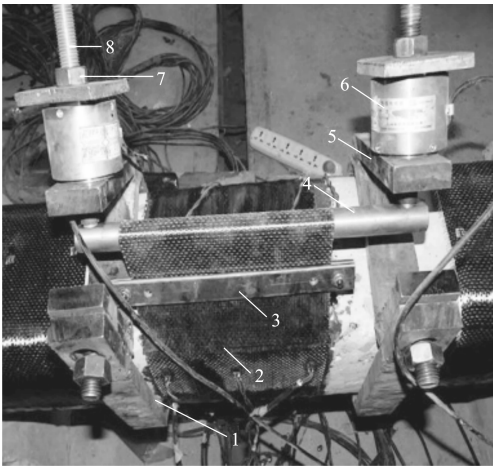
Tab. 3 Mechanical Property Indexes of Impregnated Adhesive			
			MPa
抗拉强度	弹性模量	抗压强度	剪切强度
33.83	1 897.30	71.55	5.61

表 4 钢筋力学性能指标的实测值

Tab. 4 Measured Values of Mechanical Property Indexes of Steel Bars				
钢筋种类	直径/mm	截面面积/mm ²	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB335	12	113.1	367.79	520.10
	16	201.1	397.65	572.70
	20	314.2	366.68	594.39
HPB235	6	28.3	338.04	517.01

1.2 试件的加固及测试方案

采用文献[14]中的装置对 CFRP 布进行张拉(图 2),然后进行粘贴加固。由于张拉机具对 CFRP 布张拉时需要以试件为依托,因此张拉完毕后张拉机具所留的约 20 mm 空隙用普通 CFRP 布缠绕。待环氧树脂胶固化后,对试件进行加载,加载试验在 5 000 kN 压力试验机上进行。加载初期以每级 20 kN 进行加载,加至普通混凝土对比柱极限荷载的 70%后,以每级 10 kN 进行加载。加载间隔 3 min,数据采集后进行下一级加载,直至试件破坏。试件加载及测试方案见图 3,加载试验全貌见图 4。



1—钢箍; 2—CFRP布; 3—夹片; 4—钢辊; 5—承压板; 6—压力传感器; 7—预压螺母; 8—螺杆

图 2 CFRP 布张拉过程

Fig. 2 Prestressing Process of CFRP Sheets

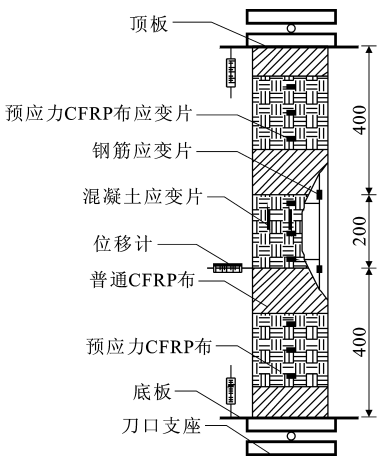


图 3 加载及测试方案(单位:mm)

Fig. 3 Scheme of Loading and Measurement (Unit:mm)



图 4 试件加载全貌

Fig. 4 Loading Panorama of Specimens

2 试验现象与试验结果

3 根普通混凝土对比柱在加载过程中呈现典型的轴心受压破坏特征:柱底在荷载作用下首先出现竖向裂缝,随着荷载增大,柱中部有纵向裂缝出现;当荷载达到极限荷载的 95%时,混凝土保护层大面积剥落,柱底产生的裂缝与柱中部裂缝贯穿导致柱破坏,如图 5(a)所示。

预应力 CFRP 布加固混凝土柱在试验过程中出现以下值得注意的现象:由于 CFRP 布的约束,加载初期试件未出现异常变化;当荷载增至极限荷载的 70%时,试件发出“噼啪”声,这是柱在轴向压力作用下产生横向变形,预应力 CFRP 布的拉力增

大,导致部分环氧树脂胶开裂发出的。加载至极限荷载时,加固柱产生 2 种破坏形态:第 1 种是在加固柱达到极限状态时 CFRP 布中处于边缘的纤维束逐渐断裂,使中部未拉断纤维束应力增大并依次被拉断,直至 CFRP 布整体拉断,丧失对混凝土的约束,导致混凝土被压碎,如图 5(b)所示;第 2 种是加固柱在轴向压力作用下产生的横向变形使预应力 CFRP 布搭接处的环氧树脂胶突然剥离,混凝土丧失环向约束而被压碎,如图 5(c)所示。这 2 种破坏都比较突然,无明显预兆,具有脆性破坏特征。

表 5 中给出了试验过程中第 I ~ III 组试件在各特征时刻的代表性数据实测值。图 6 中给出了第 I, II 组试件实测的荷载-轴向位移曲线。

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

利用有限元软件 ANSYS 对预应力 CFRP 布加固混凝土柱的力学性能开展研究^[15-17],分析过程中混凝土单元选用 Solid65,钢筋单元选用 Link8 一维链杆单元,预应力 CFRP 布选用 Shell41 膜单元。

假定 CFRP 布与混凝土之间位移变形协调,CFRP 布单元与相邻的混凝土单元通过二者间共用节点来传递力,采用升温法对 CFRP 布施加预应力,即利用 CFRP 布的温度线膨胀系数 α 为负 ($\alpha = -0.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 这一特点,对 CFRP 布进行升温,使 CFRP 布产生预拉应力,从而对被包裹其中的混凝土产生压应力作用。根据不同的预应力水平,采用 $\Delta T = \epsilon / \alpha$ 来计算温度的改变值,其中, T 为温度, ϵ 为应变。

分析求解采用完全的 Newton-Raphson 迭代法。打开自动时间步长,采用 Cnvtol 命令调整收敛精度,加速收敛,以减少计算时间。

3.2 力学性能分析

3.2.1 承载力

表 6 中给出了各试件极限承载力的有限元计算值 V_1 与实测值 V_2 的对比。由表 6 可以看出:在混凝土柱配筋率相同时,预应力 CFRP 布加固混凝土柱相对于普通混凝土对比柱的极限承载力有明显提高。这是因为加固柱在未受荷之前即已受到预应力 CFRP 布的环向压力,该变形从一开始即受到 CFRP 布的约束,从而提高了混凝土的极限压应变,使受压承载力得以提高。此外,由表 6 还可以看出:加固柱承载力提高幅度受 CFRP 布的预拉应力影响,当柱配筋率较低时,柱承载力提高幅度随 CFRP



(a) 对比柱破坏



(b) 加固柱预应力CFRP布拉断破坏



(c) 加固柱预应力CFRP布剥离破坏

图 5 柱典型破坏形态

Fig. 5 Typical Failure Modes of Columns

布的预拉应力增加而增大。

3.2.2 轴向变形

图 7 中以第 I 组试件为例,给出了轴向压力作用下试件轴向位移实测曲线与有限元计算曲线。由图 7 可以看出:普通混凝土对比柱由于未受到 CFRP 布的约束作用,轴向位移从加载开始直至破坏始终呈线性变化。而利用预应力 CFRP 布加固的混凝土柱,在荷载作用下混凝土横向变形受到约

表 5 主要试验结果

Tab.5 Main Experimental Results

试件分组	试件编号	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	承载力提高幅度/%	延性系数
第Ⅰ组	DBZ1			660	9.226		
	YJGZ1-A	720	2.778	1 080	8.001	63.636	2.880
	YJGZ1-B	700	3.169	1 060	12.219	60.606	3.856
	YJGZ1-C	880	2.631	1 120	6.474	69.697	2.461
第Ⅱ组	DBZ2			730	9.565		
	YJGZ2-A	900	3.448	1 160	11.321	58.904	3.283
	YJGZ2-B	920	2.890	1 240	11.813	69.863	4.088
	YJGZ2-C	840	3.407	1 240	11.088	69.863	3.254
第Ⅲ组	DBZ3			710	8.307		
	YJGZ3-A	960	2.282	1 360	6.500	91.549	2.848
	YJGZ3-B	920	3.341	1 280	9.699	80.282	2.903
	YJGZ3-C	980	1.536	1 320	2.058	85.915	1.340

表 6 试件极限承载力计算值与实测值对比

Tab.6 Calculated Values and Measured Values for
Ultimate Bearing Capacity of Specimens

试件编号	V_1	V_2	$V_1V_2^{-1}$
DBZ1	712.0	660	1.08
YJGZ1-A	1 148.0	1 080	1.06
YJGZ1-B	1 173.4	1 060	1.11
YJGZ1-C	1 214.0	1 120	1.08
DBZ2	748.3	730	1.02
YJGZ2-A	1 239.6	1 160	1.07
YJGZ2-B	1 293.8	1 240	1.04
YJGZ2-C	1 361.5	1 240	1.10
DBZ3	768.0	710	1.08
YJGZ3-A	1 400.8	1 360	1.03
YJGZ3-B	1 439.8	1 280	1.12
YJGZ3-C	1 467.5	1 320	1.08

服后,预应力 CFRP 布的应变显著增加,表明在纵向钢筋屈服时,外荷载的增加主要由混凝土及预应力 CFRP 布的间接作用承担,这也是加固柱承载力提高的主要原因。

4 结 语

(1)利用预应力 CFRP 布加固后的低强度混凝土柱极限承载力明显提高:CFRP 布从加载初期即参与受力,减少了应力滞后现象的发生,充分发挥了 CFRP 布的强度。

(2)利用预应力 CFRP 布加固混凝土柱,有效抑制了柱内混凝土裂缝开展,提高了柱的延性。

(3)预应力 CFRP 布加固混凝土柱极限承载力提高幅度与截面配筋率有关:当配筋率较低时,加固柱极限承载力的提高幅度随 CFRP 布预拉应力的

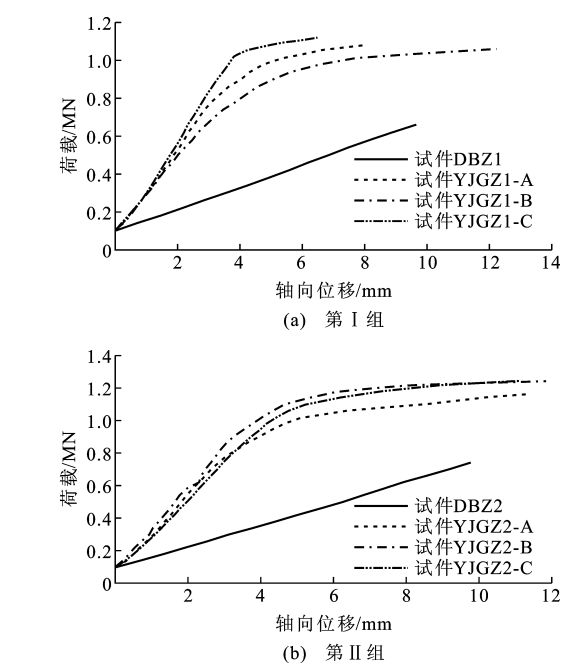


图 6 荷载-轴向位移曲线

Fig.6 Load-axial Displacement Curves

束,进而影响到轴向位移,使荷载作用下轴向位移曲线的斜率增大,相同荷载下的轴向位移减小。纵向钢筋屈服后,其轴向位移呈明显增大趋势,这是与对比柱有显著区别的,说明利用预应力 CFRP 布加固的混凝土柱的延性得到明显提高。

3.2.3 预应力 CFRP 布与纵向钢筋协同受力

为充分考察预应力 CFRP 布在受力过程中的应力变化情况,选取有代表性的 3 根加固柱,给出了其纵向受力钢筋和预应力 CFRP 布应变变化曲线,如图 8 所示。由图 8 可以看出:加载初期,柱的横向变形不大,对 CFRP 布产生的拉应力较小,纵向钢筋与混凝土承担了主要荷载;当加载至纵向钢筋屈

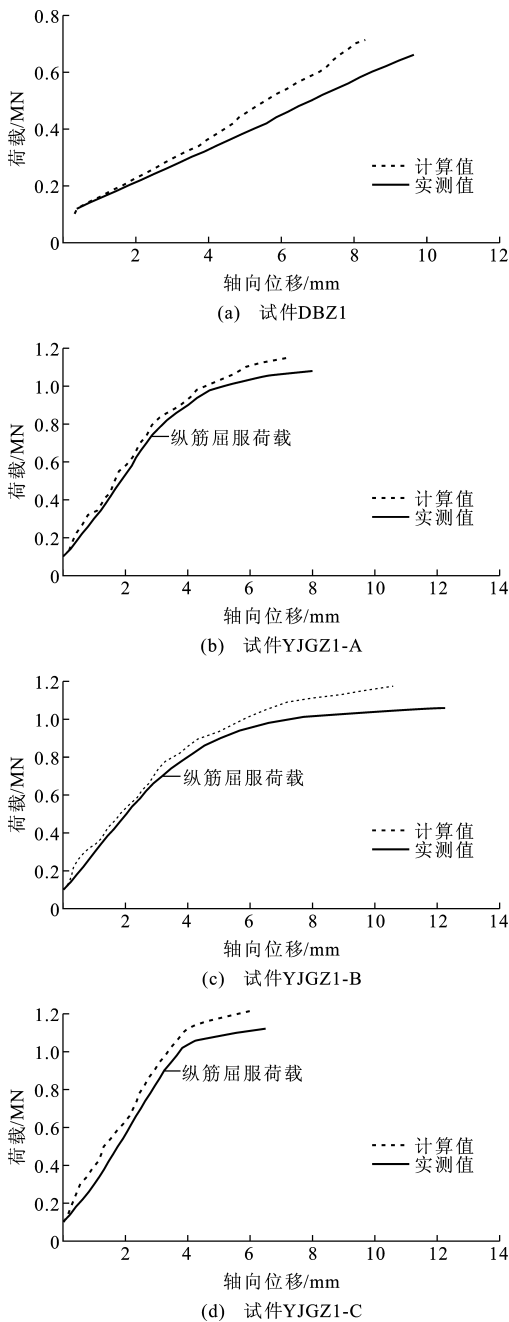


图7 荷载-轴向位移曲线的计算值与实测值对比
Fig.7 Comparisons of Calculated Values and Measured Values of Load-axial Displacement Curves

提高而增大。

(4)利用有限元软件 ANSYS 对预应力 CFRP 布加固混凝土柱的力学性能进行计算分析,计算值与实测值吻合较好。

参考文献:

References:

[1] 程东辉,荣威,周威. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁受剪性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,

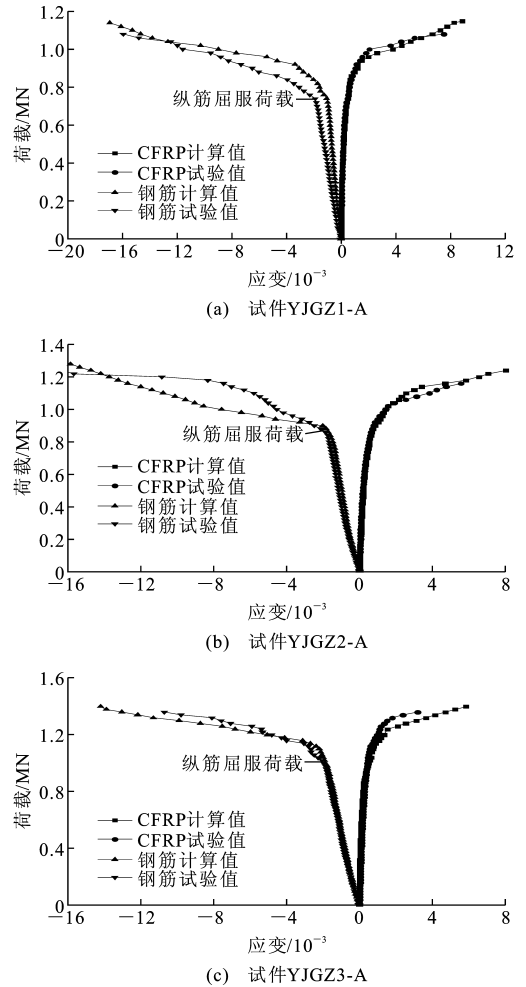


图8 预应力 CFRP 布与纵向钢筋荷载-应变曲线
Fig.8 Load-strain Curves of Prestressed CFRP Sheets and Longitudinal Reinforcements

2011,43(12):143-148.

CHENG Dong-hui, RONG Wei, ZHOU Wei. Experimental Research of Shear Resistance Performance on Loaded Concrete Beam Reinforced with Prestressed CFRP Sheet in Diagonal Section[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 143-148.

[2] 程东辉,易亚敏,王天峰. 碳纤维布加固混凝土连续梁塑性性能试验及有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 27-32.

CHENG Dong-hui, YI Ya-min, WANG Tian-feng. Plastic Performance Test and Finite Element Analysis on the Concrete Continuous Beams Strengthened with CFRP Sheets [J]. China Railway Science, 2011, 32 (3): 27-32.

[3] 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.

[4] 周长东. 玻璃纤维聚合物加固混凝土柱的力学性能研

- 究[D]. 大连:大连理工大学,2003.
- ZHOU Chang-dong, Study on Mechanical Behavior of RC Columns Strengthened with GFRP[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2003.
- [5] 王震宇,白东宁,袁杰. 外包碳纤维增强高强混凝土柱的研究趋势[J]. 混凝土,2005(1):16-19.
- WANG Zhen-yu, BAI Dong-ning, YUAN Jie. Trend of Research on High Strength Concrete Column Encased by Continuous Carbon Fiber Sheet[J]. Concrete,2005(1):16-19.
- [6] WIGHT R G, GREEN M F, ERKI M A. Prestressed FRP Sheets for Poststrengthening Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Composites for Construction,2001,5(4):214-220.
- [7] 尚守平,彭晖,童桦,等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(5):24-30.
- SHANG Shou-ping, PENG Hui, TONG Hua, et al. Study of Strengthening Reinforced Concrete Beam Using Prestressed Carbon Fiber Sheet[J]. Journal of Building Structures,2003,24(5):24-30.
- [8] TOUTANJI H A. Stress-strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets[J]. ACI Materials Journal,1999,96(3):397-404.
- [9] 韩克双. 碳纤维布加固高强混凝土柱的受力性能[D]. 大连:大连理工大学,2005.
- HAN Ke-shuang. Testing Study on the Behavior of High-strength Concrete Column Confined by Carbon Fiber Sheet[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2005.
- [10] 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.
- [11] 李炳宏,江世永,飞渭,等. 纤维增强塑料钢筋混凝土梁抗弯设计数值分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(5):50-56.
- LI Bing-hong, JIANG Shi-yong, FEI Wei, et al. Numerical Analysis of Flexural Design of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2011,31(5):50-56.
- [12] 薛伟辰,王晓辉. 有黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁试验及非线性分析[J]. 中国公路学报,2007,20(4):41-47.
- XUE Wei-chen, WANG Xiao-hui. Experiment and Nonlinear Analysis of Concrete Beams with Bonded Prestressing CFRP Tendons[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(4):41-47.
- [13] 方志,李红芳,彭波. 体外 CFRP 预应力筋混凝土梁的受力性能[J]. 中国公路学报,2008,21(3):40-47.
- FANG Zhi, LI Hong-fang, PENG Bo. Mechanical Behaviors of Concrete Beam of External Prestressed CFRP Tendons[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(3):40-47.
- [14] 程东辉. 预应力碳纤维布张拉装置:中国,20102024-0641.1[P]. 2011-01-05.
- CHENG Dong-hui. Prestressed Carbon Fiber Sheet Tensioning Device:China,201020240641.1[P]. 2011-01-05.
- [15] TENG J G, LAM L. Behavior and Modeling of Fiber Reinforced Polymer Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,2004,130(11):1713-1723.
- [16] 陆新征,冯鹏,叶列平. FRP 布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 土木工程学报,2003,36(2):46-51.
- LU Xin-zheng, FENG Peng, YE Lie-ping. Behavior of FRP-confined Concrete Square Columns Under Uniaxial Loading[J]. China Civil Engineering Journal,2003,36(2):46-51.
- [17] 赵志平,常建立,杨晓光. 利用 ANSYS 对碳纤维布加固 RC 梁的非线性有限元分析[J]. 四川建筑科学研究,2006,32(1):79-83.
- ZHAO Zhi-ping, CHANG Jian-li, YANG Xiao-guang. Analyzing the Anti-bending Function of RC Beams Strengthened with Bottom Bonded CFRP[J]. Sichuan Building Science,2006,32(1):79-83.

