

文章编号:1673-2049(2014)02-0084-06

无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁抗弯试验

王作虎¹, 詹界东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. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 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:为了研究无粘结预应力碳纤维增强复合材料(CFRP)筋锚具的锚固性能和无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的受力性能,进行了4根无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁和2根对比混凝土梁的抗弯试验。结果表明:研发的预应力 CFRP 筋锚具具有很好的可靠性,无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁具有较好的受力性能和延性,非预应力钢筋是影响预应力 CFRP 筋混凝土梁延性和极限荷载最重要的因素;推导的简化公式可以准确地计算无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的极限荷载。

关键词:碳纤维增强复合材料筋;预应力混凝土梁;极限荷载;延性系数

中图分类号:TU378.8 **文献标志码:**A

Experiment on Flexural Behavior of Prestressed Concrete Beams with Unbonded CFRP Tendons

WANG Zuo-hu¹, ZHAN Jie-dong², DU Xiu-li³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, 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 the anchoring capacities and mechanical behavior of prestressed concrete beams with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons, the flexural experiment of four prestressed concrete beams with unbonded CFRP tendons and two comparative concrete beams were carried out. The results show that the anchorage efficiency coefficients of anchor assembly are excellent, and the mechanical behavior and ductility of prestressed concrete beams with unbonded CFRP tendons are good. Non-prestressed reinforcement is the most important factor on the ductility and ultimate load of the prestressed concrete beams with CFRP tendons. The calculated results of ultimate load based on the simplified formulae for prestressed concrete beams with unbonded CFRP tendons are accurate.

Key words: CFRP tendon; prestressed concrete beam; ultimate load; ductility factor

0 引言

纤维增强复合材料(FRP)筋是一种高强度线弹

性材料,由于其优异的抗腐蚀和耐疲劳性能,已逐渐被应用到预应力混凝土领域。相对于有粘结预应力 FRP 筋混凝土结构,无粘结预应力 FRP 筋混凝土

收稿日期:2014-02-26

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);

北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室开放项目(2013)

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

结构主要依靠锚具来提供预应力,对 FRP 筋锚具的要求更高。目前,各国关于有粘结预应力 FRP 筋混凝土结构的研究较多^[1-9],但是对于无粘结预应力 FRP 筋混凝土结构极限应力的计算还没有形成统一的结论,有必要对无粘结预应力 FRP 筋混凝土结构的受力性能进行更深入的研究。本文中笔者采用预应力碳纤维增强复合材料(CFRP)筋夹片-粘结式锚具,对无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的抗弯性能进行了研究。

1 CFRP 筋锚具的研制

基于 CFRP 筋的材料特点和各种锚具的优缺点,开发了 2 种组合式锚具^[10-14]:夹片-粘结式锚具和夹片-套管式锚具。试验结果表明,这 2 种锚具都具有较好的锚固性能。试验采用的是夹片-粘结式锚具,可以利用现有钢绞线夹片式锚具及配套的张拉设备进行锚固和张拉,锚具组装件如图 1 所示。

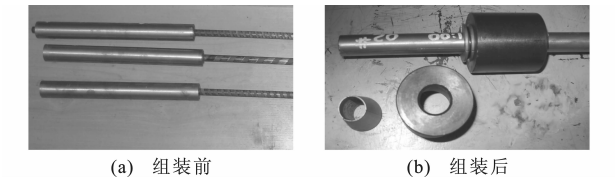


图 1 夹片-粘结式锚具
Fig. 1 Wedge-bond Anchorage

2 试验梁的设计

2.1 试验模型的设计

试验共设计了 6 个试件,试验梁的跨度为 3.2 m,截面尺寸为 200 mm×300 mm,跨高比为 10。试验参数主要有预应力筋的种类和初始张拉应力、非预应力钢筋的配筋率和混凝土强度。所有试验梁预应力 CFRP 筋均采用直线束型,预应力 CFRP 筋重心至梁底距离为 60 mm,并按适筋梁进行设计。试验梁的力学性能及配筋分别见表 1 和图 2。图 2 中, P 为荷载。试验采用的混凝土及各种筋材的实测力学性能分别如表 2,3 所示。

有效预应力的 size 是本次试验研究的一个重要参数,所以预应力 CFRP 筋的张拉控制十分重要。试验张拉 CFRP 筋采取分级、分批的张拉方法,即按照对称的原则分别张拉单根 CFRP 筋至控制应力的 50%,然后再按相反的顺序张拉到控制应力,这种张拉方法会减少由于张拉顺序不同而引起的应力损失。在张拉过程中通过布置在锚具端的传感器和 CFRP 筋上的应变片来控制张拉应力。

表 1 试验梁的力学性能					
Tab. 1 Mechanical Properties of Concrete Beams					
梁编号	预应力筋种类	受拉钢筋	初始张拉应力	张拉应力/kN	混凝土强度等级
B0		2 Φ 12, 2 Φ 16			C40
PB1	高强钢丝	2 Φ 12, 2 Φ 16	0.62 f_{pu}	53.8	C40
PB2	CFRP 筋	2 Φ 12, 2 Φ 16	0.62 f_{pu}	53.8	C40
PB3	CFRP 筋	2 Φ 12, 2 Φ 16	0.62 f_{pu}	53.8	C30
PB4	CFRP 筋	2 Φ 12, 2 Φ 14	0.62 f_{pu}	53.8	C40
PB5	CFRP 筋	2 Φ 12, 2 Φ 16	0.73 f_{pu}	62.8	C40

注: f_{pu} 为 CFRP 筋的极限应力。

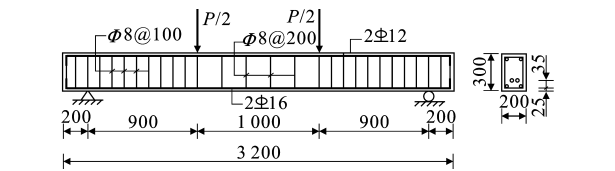


图 2 试验梁的配筋(单位:mm)
Fig. 2 Reinforcement of Test Beams (Unit:mm)

表 2 混凝土的力学性能		
Tab. 2 Mechanical Properties of Concrete		
混凝土强度等级	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
C30	36.80	31.8
C40	36.61	34.0

表 3 各种筋材的力学性能				
Tab. 3 Mechanical Properties of Reinforcements				
筋材种类	直径/mm	面积/mm ²	极限强度/MPa	屈服强度/MPa
CFRP 筋	8	50	1 730	
高强钢丝	7	38	1 720	
普通钢筋	16	201	575	368
	14	154	557	471
	12	113	491	340
	8	50	473	331

2.2 试验梁的加载及测试方案

试验在 500 t 的试验台上进行,试验梁均采用分配梁来进行三分点加载,加载点的距离为 1 m,加载点距支座距离为 900 mm,试验加载方案见图 2。在试验梁跨中位置的普通钢筋、CFRP 筋和混凝土均布置了应变片,以测量其在试验过程中的应变变化。另外,还在试验梁顶部跨中位置布置了位移计,加载千斤顶的端部连接了力传感器,所有测点都连接到数据采集系统上进行采集,试验梁测点布置如图 3 所示。

3 试验结果分析

3.1 试验现象

由于试验梁预应力 CFRP 筋的种类不同,试验现象和破坏形态也不相同。在混凝土梁开裂前,试

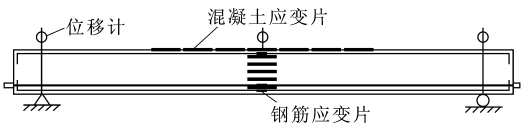


图 3 试验梁测点布置

Fig. 3 Arrangement of Measuring Points of Test Beams

验现象基本相同,开裂前荷载和位移之间呈线性变化。在混凝土开裂后,混凝土梁的荷载-位移曲线出现第 1 次偏折,位移随着荷载的增长较之前有所加快,梁不断出现新裂缝并且裂缝逐渐开展,预应力 CFRP 筋和非预应力钢筋的应力逐渐增大。非预应力钢筋屈服之后,混凝土梁的荷载-位移曲线出现第 2 次偏折,在梁的纯弯区段基本不再出现新裂缝,而已有的裂缝则不断向上延伸并加宽,此时荷载增长缓慢,CFRP 筋的应力增量较大,梁顶部混凝土的压应变和跨中位移迅速增大,最后梁顶部混凝土压应变增大至极限压应变,为 $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$,混凝土被压碎,试件破坏。对于高强钢丝预应力梁 PB1,在试件屈服后由于锚具突然发生滑移,混凝土梁承载力立即下降,梁迅速被压坏。对于预应力 CFRP 筋混凝土梁,试验过程中均没有发生 CFRP 筋锚具滑移的现象,也没有发生 CFRP 筋拉断的现象,混凝土梁的破坏形态都是受压区混凝土被压碎。梁破坏后,缓慢卸载,梁的残余变形较小,裂缝尚可部分闭合。

3.2 试验结果

预应力 CFRP 筋混凝土梁典型的破坏形态和荷载-挠度曲线分别见图 4、5。

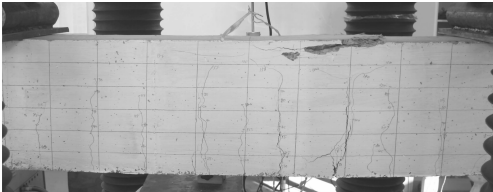


图 4 梁典型的破坏形态

Fig. 4 Typical Damage Modes of Beams

试验结果如表 4 所示。表 4 中的延性系数采用冯鹏等^[15]提出的综合指标系数,开裂荷载是通过试验过程中观测所得数据,极限荷载和极限挠度取荷载-挠度曲线上的峰值荷载和对应的挠度。

3.3 结果分析

3.3.1 开裂荷载

标准混凝土梁 B0 和预应力混凝土梁 PB2, PB5 只有预应力 CFRP 筋的初始张拉应力不同,配筋和混凝土强度完全一样。图 6 为初始张拉应力对混凝土梁开裂荷载的影响,其中, σ_0 为初始张拉应力。

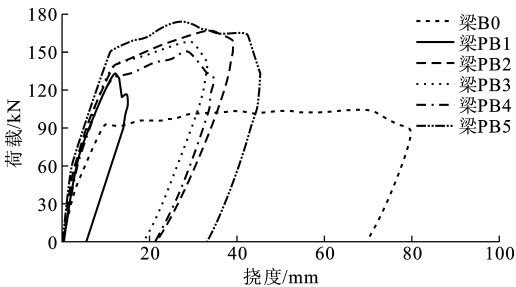


图 5 梁荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection Curves of Beams

表 4 试验结果

Tab. 4 Experiment Results

梁编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	极限荷载/kN	极限挠度/mm	延性系数	破坏形态
B0	15.00	93.00	10.07	104.01	69.93	7.77	混凝土压碎
PB1	17.00	127.04	10.87	129.95	12.96	1.22	锚具滑移
PB2	30.00	132.86	11.28	167.44	35.73	3.99	混凝土压碎
PB3	25.00	141.14	12.46	158.52	19.92	1.80	混凝土压碎
PB4	20.00	131.22	12.20	150.15	29.33	2.75	混凝土压碎
PB5	45.00	151.15	11.28	172.90	29.03	2.94	混凝土压碎

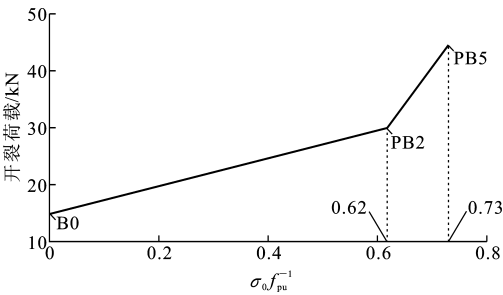


图 6 初始张拉应力对开裂荷载的影响

Fig. 6 Influence of Initial Pretension

Stress on Cracking Load

土梁开裂荷载的影响,其中, σ_0 为初始张拉应力。由表 4 和图 6 可以看出,预应力 CFRP 筋混凝土梁的开裂荷载主要与预应力的大小有关,而与混凝土强度和非预应力钢筋的配筋关系不太大。

3.3.2 延性系数

图 7 为初始张拉应力对延性系数的影响。由图 7 可以看出,预应力混凝土梁的综合延性系数要比对应标准混凝土梁的小。预应力混凝土梁 PB5 的初始张拉应力最大,其极限荷载和开裂荷载也最大,但是其综合延性系数却不是最大的,所以要提高预应力 FRP 筋混凝土梁的综合延性系数还需综合考虑其受力性能。

图 8、9 分别为受拉区配筋率和混凝土强度对延性系数的影响。由表 4 和图 8、9 可以看出,受拉区配筋率和混凝土强度对延性系数的影响较大,增加

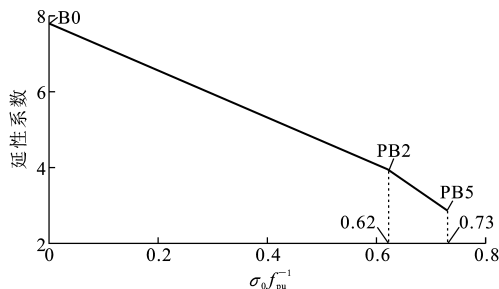


图 7 初始张拉应力对延性系数的影响

Fig. 7 Influence of Initial Pretension Stress on Ductility Factor

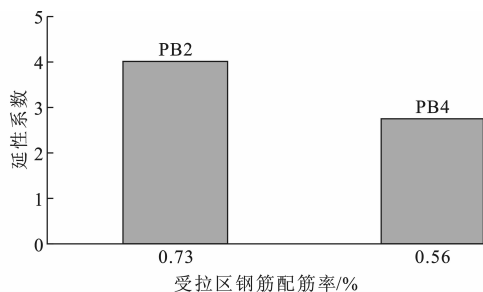


图 8 受拉区配筋率对延性系数的影响

Fig. 8 Influence of Reinforcement Ratio of Tensile on Ductility Factor

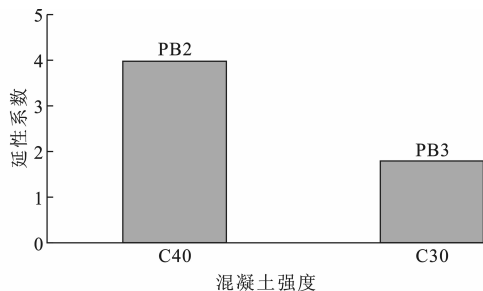


图 9 混凝土强度对延性系数的影响

Fig. 9 Influence of Concrete Strength on Ductility Factor

受拉区钢筋的配筋率,可以增加预应力混凝土梁的延性。由于混凝土材料的离散性及梁 PB3 强度较低,混凝土强度对预应力 CFRP 筋混凝土梁延性系数的影响还需进一步研究。

3.3.3 极限荷载

图 10 为初始张拉应力对极限承载力的影响。由图 10 可以看出,初始张拉应力由 $0.62f_{pu}$ 提高到 $0.73f_{pu}$,极限承载力只提高了 3.26%,影响效果不太明显。图 11,12 分别为受拉区配筋率和混凝土强度对极限荷载的影响。由图 11,12 可以看出,混凝土强度对预应力 CFRP 筋混凝土梁极限荷载的影响不太明显,而非预应力钢筋对极限荷载的影响较大。

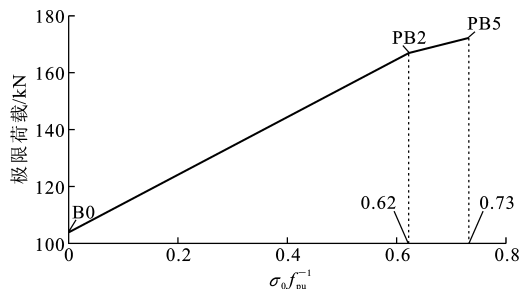


图 10 初始张拉应力对极限荷载的影响

Fig. 10 Influence of Initial Pretension Stress on Ultimate Load

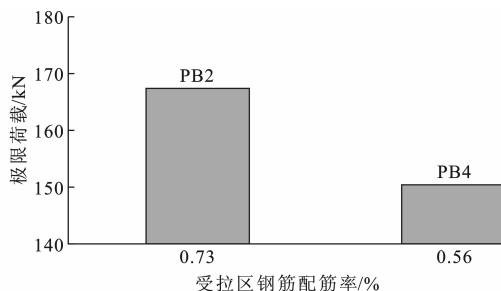


图 11 受拉区配筋率对极限荷载的影响

Fig. 11 Influence of Reinforcement Ratio of Tensile on Ultimate Load

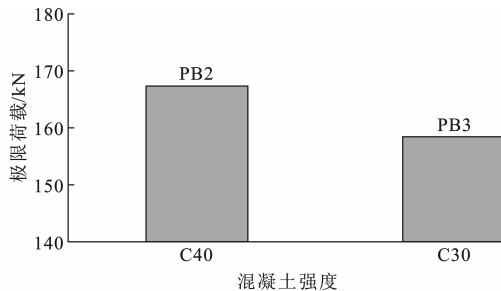


图 12 混凝土强度对极限荷载的影响

Fig. 12 Influence of Concrete Strength on Ultimate Load

4 承载力计算

目前关于无粘结预应力 FRP 筋混凝土结构极限应力的计算还没有形成统一的结论,笔者基于预应力 FRP 筋的应力增量与构件跨中挠度之间接近直线关系,推导了体内无粘结预应力 FRP 筋极限应力的简化计算方法^[16],计算模型如图 13 所示,其中, L 为跨径, e_p 为预应力 FRP 筋在跨中截面偏心距, Δ 为跨中挠度, θ 为角度。

无粘结预应力 FRP 筋的极限应力计算公式为

$$f_{pu} = f_{pe} + \frac{4E_p e_p \Delta}{LL_0} \approx f_{pe} + \frac{4E_p e_p k \epsilon_{cu}}{q_0 h_p} \quad (1)$$

式中: L_0 为相邻锚具间距; E_p 为预应力 FRP 筋的

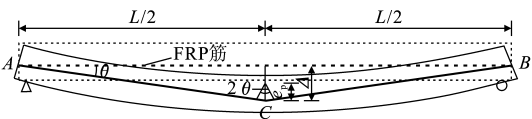


图 13 计算模型

Fig. 13 Calculation Model

弹性模量; f_{pe} 为有效预应力; h_p 为预应力 FRP 筋合力点至截面受压边缘的距离; ϵ_{cu} 为混凝土极限抗压应变,计算中取 $\epsilon_{cu}=0.003$; k 为荷载形式及支座约束情况的系数,可以从设计手册中查得,简支梁三分点对称加载取 $k=0.106\ 5$,简支梁跨中一点加载取 $k=0.083\ 3$,两跨连续梁对称跨中加载取 $k=0.058\ 1$; q_0 为混凝土受压区高度 c 与 h_p 的比值。

q_0 的计算公式为

$$q_0=\frac{f_{pe}A_p+f_yA_s}{0.8\times0.85f_cbh_p}\tag{2}$$

式中: A_p 、 A_s 分别为预应力 CFRP 筋和受拉钢筋的面积; f_y 为受拉钢筋的屈服强度; b 为混凝土梁截面宽度; f_c 为混凝土圆柱体的抗压强度。

下面分别采用中国《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92—2004)公式^[17]、美国规范 ACI 440.4R-04 公式^[18]和文献[16]中的简化公式对试验梁的承载力进行计算,各公式计算结果的比较如表 5 所示。由表 5 可知,采用文献[16]中的公式计算无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁极限荷载,其计算值与实测值比值的平均值为 0.947,标准差为 0.013,与实际结果较为接近。计算结果虽然没有美国规范公式准确,但是计算过程却更简单。

表 5 各公式计算结果的比较

Tab. 5 Comparison of Different Calculation Formulae

梁编号	P_1/kN	JGJ 92—2004 公式结果		ACI 440.4R-04 公式结果		文献[16]中的 简化公式结果	
		P_2/kN	$\frac{P_2}{P_1}$	P_3/kN	$\frac{P_3}{P_1}$	P_4/kN	$\frac{P_4}{P_1}$
PB2	167.44	150.25	0.90	168.84	1.01	156.12	0.93
PB3	158.52	149.56	0.94	163.15	1.03	152.93	0.96
PB4	150.15	134.43	0.90	156.19	1.04	141.87	0.94
PB5	172.90	158.68	0.92	175.53	1.02	163.77	0.95
均值			0.913		1.023		0.947
标准差			0.022		0.014		0.013

注: P_1 为极限荷载实测值; P_2 为 JGJ 92—2004 公式荷载计算值;
 P_3 为 ACI 440.4R-04 公式荷载计算值; P_4 为文献[16]中的
简化公式荷载计算值。

5 结 语

通过 4 根无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的抗

弯极限破坏试验,验证了研发的预应力 CFRP 筋锚具的可靠性。通过与非预应力钢筋混凝土梁和钢绞线预应力混凝土梁进行比较可知:预应力 CFRP 筋混凝土梁具有较好的受力性能和延性;非预应力钢筋对预应力 CFRP 筋混凝土梁的延性和极限承载力有很大的影响;另外,文献[16]中推导的简化公式可以准确地计算无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的极限荷载。目前关于体内无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的试验成果还较少,今后应该进行大量的试验研究工作,采用不同的加载形式和截面形式,对文献[16]中的简化公式进行验证。

参考文献:

References:

[1] BURKE C R,DOLAN C W. Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons[J]. PCI Journal,2001,46(2):76-87.

[2] STOLL F,SALIBA J E,CASPER L E. Experimental Study of CFRP-prestressed High-strength Concrete Bridge Beams[J]. Composite Structures,2000,49(2):191-200.

[3] 孟履祥,陶学康,关建光,等. 芳纶纤维筋有黏结部分预应力混凝土梁受弯性能研究[J]. 土木工程学报,2006,39(3):10-18,36.
MENG Lu-xiang, TAO Xue-kang, GUAN Jian-guang, et al. Experimental Study on Flexural Behavior of Partially Prestressed Concrete Beams with Bonded AFRP Tendons[J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(3):10-18,36.

[4] 蒋田勇,方 志. CFRP 筋在活性粉末混凝土中的粘结应力分布[J]. 中国公路学报,2010,23(1):49-57.
JIANG Tian-yong, FANG Zhi. Bond Stress Distribution of CFRP Tendon in Reactive Powder Concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1):49-57.

[5] 薛伟辰,钱 卫. 部分预应力 CFRP 筋混凝土梁疲劳性能研究[J]. 中国公路学报,2008,21(2):43-48.
XUE Wei-chen, QIAN Wei. Study of Fatigue Behaviors of Partially Prestressed Concrete Beams with CFRP Tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008,21(2):43-48.

[6] 刘荣桂,周士金,许 飞,等. CFRP 索斜拉试验桥动态测试与地震响应分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(6):47-53.
LIU Rong-gui,ZHOU Shi-jin,XU Fei,et al. Dynamic Test and Seismic Response Analysis of Testing Cable-stayed Bridge with CFRP Cables [J]. Journal of

- Chang'an University; Natural Science Edition, 2009, 29(6):47-53.
- [7] 程永春,李春良,刘寒冰,等.碳纤维与混凝土界面粘结应力计算方法[J].交通运输工程学报,2007,7(2):46-49,54.
- CHENG Yong-chun, LI Chun-liang, LIU Han-bing, et al. Computation Method of Interfacial Stresses Between CFRP and Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2):46-49, 54.
- [8] 蒋田勇,方志. CFRP 筋粘结式锚具锚固性能试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1):68-77.
- JIANG Tian-yong, FANG Zhi. Experiment on Anchorage Performance of Bond-type Anchorage for CFRP Tendon[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1):68-77.
- [9] 周士金,刘荣桂,蔡东升,等. CFRP 索大跨斜拉桥的非线性地震响应控制分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3):64-71.
- ZHOU Shi-jin, LIU Rong-gui, CAI Dong-sheng, et al. Nonlinear Seismic Response Control Analysis of Long-span Cable-stayed Bridge with CFRP Cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3):64-71.
- [10] 詹界东. 纤维筋(FRP 筋)组合式锚具的试验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2009.
- ZHAN Jie-dong. Experimental Research of Combined Anchorage for FRP Tendons[D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2009.
- [11] 詹界东,杜修力,王作虎. CFRP 筋夹片-套筒型锚具的研发[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增1):339-343.
- ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, WANG Zuo-hu. Research on Wedge-sleeve Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S1):339-343.
- [12] 詹界东,杜修力,王作虎. CFRP 筋夹片-黏结型锚具的研制[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3):418-424.
- ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, WANG Zuo-hu. Wedge-bond Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(3):418-424.
- [13] 詹界东,杜修力,王作虎. 预应力 CFRP 筋夹片-粘结型锚具的试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2010, 26(1):31-35.
- ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, WANG Zuo-hu. Experimental Study on the Wedge-bond Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(1):31-35.
- [14] 詹界东,杜修力,王作虎. 预应力 CFRP 筋夹片-套筒型锚具的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(5):713-717.
- ZHAN Jie-dong, DU Xiu-li, WANG Zuo-hu. Experimental Study of the Wedge-sleeve Anchorage of CFRP Tendons[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(5):713-717.
- [15] 冯鹏,叶列平,黄羽立. 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6):28-36.
- FENG Peng, YE Lie-ping, HUANG Yu-li. Deformability and New Performance Indices of Flexural Members[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6):28-36.
- [16] 杜修力,王作虎,邓宗才,等. 无粘结预应力 FRP 筋的极限应力研究[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(7):914-919.
- DU Xiu-li, WANG Zuo-hu, DENG Zong-cai, et al. Research on the Ultimate Stress of Unbonded Prestressed FRP Tendons[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7):914-919.
- [17] JGJ 92—2004, 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S].
- JGJ 92—2004, Technical Specification for Concrete Structures Prestressed with Unbonded Tendons[S].
- [18] ACI 440.4R-04, Prestressing Concrete with FRP Tendons[S].