

文章编号: 1673-2049(2011)01-0020-07

CFRP 布持载加固高强混凝土偏压柱受力性能

王吉忠, 赵玉杰

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了检验碳纤维增强复合材料(CFRP)布持载加固高强混凝土偏压柱的有效性, 对 8 根 CFRP 布加固高强混凝土方柱进行了持载偏心受压试验, 研究了持载加固后高强混凝土方柱在不同偏心距、加固方式及持载水平作用下的破坏特征和受力性能, 并对外包 CFRP 布的横向应变、柱截面应变、侧向挠度以及极限承载力进行了分析。结果表明: CFRP 布持载加固高强混凝土偏压柱是有明显效果的, 其承载力和延性都有了一定程度的提高; 随着偏心距和持载值的增大, 加固效果逐渐减弱, CFRP 布用量的减小也会使加固效果减弱。

关键词: 高强混凝土柱; 碳纤维增强复合材料布; 偏心受压; 承载力; 延性

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A

Mechanical Behaviors of High-strength Concrete Columns Strengthened with CFRP Sheets Under Sustained Eccentric

WANG Ji-zhong, ZHAO Yu-jie

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: An experimental study of eight sustained loaded eccentric high-strength concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets was carried out for testing the efficiency of the reinforcement approach. The failure characteristics and mechanical behaviors were investigated in the test of eight high-strength concrete square columns strengthened with CFRP sheets under different eccentricities, strengthening modes and sustained loaded levels. Finally, transverse strain, sectional strain distribution of concrete column, lateral deflection, as well as ultimate load bearing capacity in the CFRP sheets were analyzed. The results indicate that the effect of sustained loaded eccentric high-strength concrete columns strengthened with CFRP sheets is obvious, the ultimate load bearing capacity of concrete columns is enhanced and the ductility of concrete columns is improved. The efficiency of reinforcement decreases when the eccentricity and the sustained loaded value increase. Decreasing the usage amount of CFRP sheets also decreases the efficiency of reinforcement.

Key words: high-strength concrete column; carbon fiber reinforced polymer sheet; eccentric compression; load bearing capacity; ductility

0 引言

随着经济发展和建筑行业技术的进步, 世界各

国在工程中所用混凝土的强度等级不断地在提高, 高强混凝土在许多高层建筑和桥梁工程中得到越来越广泛的应用。然而, 高强混凝土的破坏呈明显的

脆性,这对于工程结构的抗震是十分不利的,并且高强混凝土结构的加固维修问题也日益地凸显出来,这就迫切需要一套有效的加固技术对高强混凝土结构进行修复和加固。碳纤维材料具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀以及便于施工、施工质量有保证等优点^[1],利用 CFRP 布横向包裹高强混凝土柱,通过约束柱的横向变形对混凝土柱起到加固的作用,从而有效地改善高强混凝土脆性大、变形能力差、破坏较突然的缺点,柱的延性、抗剪能力和抗震性能也可以得到明显的提高^[2-5]。

目前各国关于这方面的研究已经取得了一些成果,但是还主要集中在轴心受压状态下约束柱的受力性能和本构关系等方面^[6-8],对于偏心受压和持载状态下 CFRP 包裹高强混凝土柱的研究相对而言还很少^[9-16]。然而,CFRP 约束混凝土为被动约束,只有在混凝土膨胀变形到一定程度才能有效“激活”CFRP 的约束作用,而偏心受压截面混凝土的不均匀膨胀使得纤维增强材料(FRP)的应变发展存在应变梯度。根据文献^[17]可知,偏心受压下 FRP 的应变梯度对试验结果的影响是不可忽略的,而且在实际工程中,真正意义上处于均匀受压的可能性是极小的,即使理论上的轴心受压柱也可能因为施工工艺误差等原因造成一定的偏心,因此偏心受压才是最常见混凝土柱受力形式。由于实际工程中绝大多数的被加固柱是处于负荷状态下的,混凝土已经存在初始侧向膨胀变形,此时采用 FRP 约束加固,外包 FRP 就存在一定的拉应变滞后,其约束效果将受到影响,而且 FRP 拉应变滞后对试验结果的影响是不可忽视的^[18]。

采用单向 CFRP 布约束高强混凝土持载偏心受压柱是否能有效地改善加固柱的延性、承载力等受力性能,是工程界关心的问题,本文中笔者通过试验对这一问题进行了研究。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验共设计了 8 个试件,分为小偏压柱和大偏压柱 2 组,每组各有 3 个试件外包 CFRP 布。小偏压柱试件初始偏心距为 50 mm,大偏压柱试件初始偏心距为 150 mm。试件的截面尺寸为 200 mm×150 mm,为了减小长细比对柱承载力和稳定性的影响,试件设计时取长细比 $l_0/b=8$, l_0 为柱高, b 为柱宽,柱高为 1 200 mm。小偏压柱和大偏压柱试件编号分别为 SD-1、SD-2、SD-3、SD-4 和 BD-1、BD-2、

BD-3、BD-4。试件主筋采用 HRB335 螺纹钢筋,直径为 14 mm,箍筋采用 HPB235 圆钢筋,直径为 6 mm,试件截面尺寸及配筋如图 1 所示。试件制作时,为了防止端部出现局部受压破坏,两端牛腿上外包 2 层 CFRP 布,并且设置对拉钢板。CFRP 布的搭接长度为 150 mm,混凝土柱的 4 个拐角处均打磨成半径为 20 mm 的圆角。试件加固方案如图 2 所示,试件主要参数见表 1。

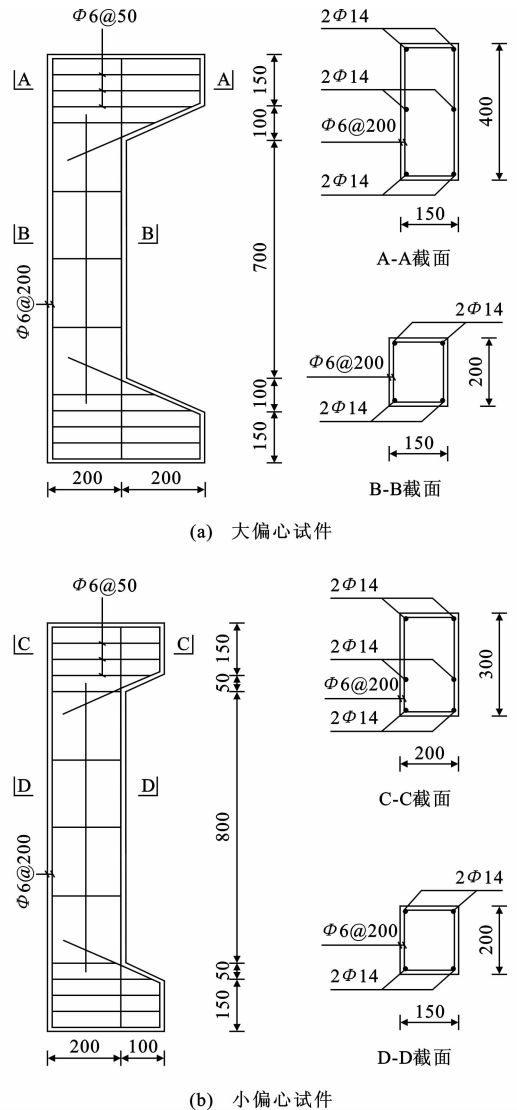


图 1 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

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

1.2 材料力学性能

材料试验结果显示,HRB335 钢筋和 HPB235 钢筋的屈服抗拉强度分别为 402.8、367.3 MPa。混凝土为 C60 商品混凝土,预留的一组标准试块(150 mm×150 mm×150 mm)28 d 龄期的立方体抗压强度 f_{cu} 平均值为 61.3 MPa。采用广州得力佳

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimens

试件编号	$f_{cu}/$ MPa	偏心距/mm	持载值/kN	加固形式	备注
SD-1	61.3	50			对比试件
SD-2		50	500	条带 2 层	条带及间距为 100 mm
SD-3		50	300	条带 2 层	条带及间距为 100 mm
SD-4		50	300	全包 2 层	
BD-1		150			对比试件
BD-2		150	200	条带 2 层	条带及间距为 100 mm
BD-3		150	100	条二纵一	条带及间距为 100 mm
BD-4		150	100	条二纵二	条带及间距为 100 mm

粘结剂的主要性能指标如表 2、3 所示。

表 2 CFRP 布主要性能指标

Tab. 2 Main Property Indices of CFRP Sheets

型号	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	计算厚度/mm	单位质量/($g \cdot m^{-2}$)	拉伸断裂伸长率/%
L300-C	3 750	252	0.167	300	2.0

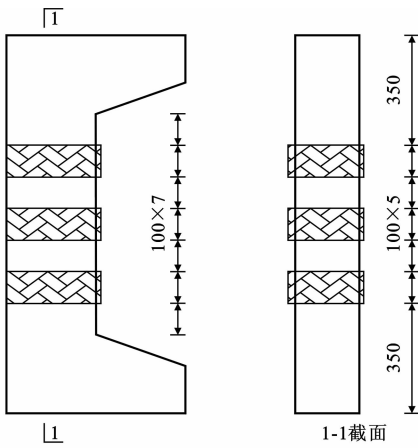
表 3 环氧树脂粘结剂主要性能指标

Tab. 3 Main Property Indices of Epoxy Resin Adhesive

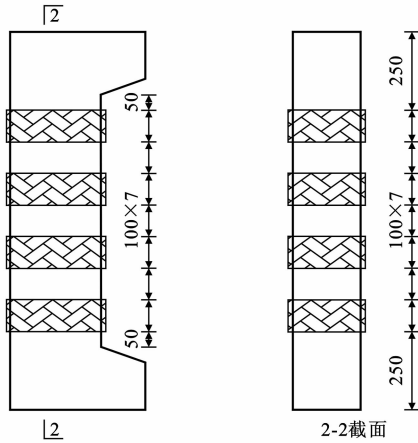
型号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	正拉粘结强度/MPa	弹性模量/MPa	拉伸断裂伸长率/%
XH180A/B	95	53	66	3.54	3 100	1.7

1.3 试验方法

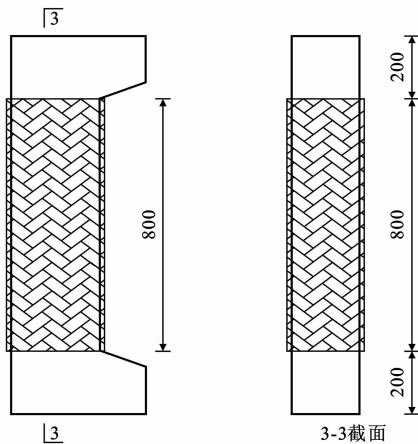
该试验是持载加固试验,试件在持载的情况下加固,因此专门设计了一套如图 3 所示的加载装置。实际施加到试件上的荷载值由 1 个液压千斤顶、2 个机械千斤顶与钢垫板之间的 1 个压力传感器进行控制和测量,并结合手持应变仪进行复核。首先用千斤顶预加荷载至名义持载水平,然后拧紧螺母及机械千斤顶进行持载;持载 24 h 后,开始包裹 CFRP 布,CFRP 布的搭接长度为 150 mm;待结构胶完全结硬后,用液压千斤顶继续加载至试件破坏。为了保证试件能自由转动,在试件的上下端部均设置了



(a) 试件BD-2、BD-3、BD-4



(b) 试件SD-2、SD-3



(c) 试件SD-4

图 2 试件加固方案(单位:mm)

Fig. 2 Strengthening Schemes of Specimens (Unit:mm)

复合材料有限公司生产的 L300-C 型 CFRP 布,名义厚度为 0.167 mm,实测抗拉强度平均值为 3 750 MPa,弹性模量平均值为 252 GPa,与之配套使用的环氧树脂粘结剂为亨斯迈先进化工材料(广东)有限公司的 Araldite XH180A/B 室温固化双组分环氧树脂粘结剂。CFRP 布及与之配套使用的环氧树脂

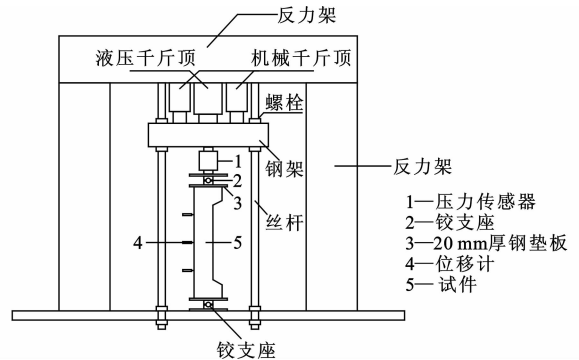


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test Loading Device

固定铰支座。按照中国《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)的规定进行试验。正式加载采用单调分级加载,每级荷载不超过极限荷载的 10%,加载达到承载力计算值的 90%以后,按小于极限荷载的 5%递增,每级加载完毕后持载 10 min 且试验仪器读数稳定后再记录相关试验值。

主要测量内容包括沿柱中部一周 CFRP 布横向拉应变、混凝土的纵向应变、纵筋和箍筋的纵向应变、柱中部的侧向挠度以及竖向荷载等。

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象

偏心距为 50 mm 的小偏心对比试件 SD-1 随着荷载的不断增大,内侧混凝土首先出现部分竖向裂缝,随后裂缝不断扩展直到混凝土被压碎剥落,同时外侧混凝土因受拉产生横向裂缝。柱破坏时受压区混凝土大块剥离且破坏区段较长,破坏表现出一定的脆性性质。持载至 300 kN 和 500 kN 的试件 SD-2、SD-3、SD-4 在中点处都出现了一些极其细小的横向裂缝和轻微的弯曲变形。采用 CFRP 布条带加固后,随着荷载的增大,内侧 CFRP 布条带之间的混凝土率先开始出现竖向裂缝并不断扩展;随后受拉侧 CFRP 布条带之间的混凝土和试件中部 CFRP 布上出现了多条宽度不等的横向裂缝,最后内侧条带间混凝土被压碎并严重剥落,受拉区出现多条大裂缝,柱承载力下降并逐渐丧失。对于全包加固试件,牛腿处

裸露的受压区混凝土率先开始产生细微的纵向裂缝并不断扩展,最后牛腿处的 CFRP 布在角部被拉断。

偏心距为 150 mm 的大偏心对比试件 BD-1 随着荷载的逐渐增大,受拉区混凝土首先出现细微的横向弯曲裂缝并不断发展,此后受压区混凝土开始出现竖向裂缝并逐渐扩展,最后钢筋受拉屈服,混凝土被压碎而破坏。试件 BD-2、BD-3、BD-4 先进行预加载,加载至持载值(持载值分别为 100 kN 和 200 kN),然后再进行 CFRP 布的横向和纵向混合粘贴加固。在预加载过程中,偏压柱受拉区就已经出现了多条微小的横向弯曲裂缝,裂缝分布比较均匀,数量多且裂缝宽度较小。经过 CFRP 布加固后的试件,在荷载达到极限荷载的 70%左右时,可明显听到间断的 CFRP 丝拉断的脆响声,一直持续至极限荷载。随着荷载的增大,受拉区混凝土出现的横向弯曲裂缝不断发展,受压侧混凝土开始产生竖向裂缝,横、竖向裂缝的扩展较对比试件都缓慢,柱的挠度和变形的增加也有所减缓。当荷载接近极限值时,部分纵向 CFRP 布剥离或被拉断,同时伴随有“劈啪”的剥离和断裂响声;当达到极限荷载时,受拉钢筋屈服,混凝土被压碎,纵向 CFRP 布剥离或被拉断,并伴有巨大的爆裂声,但横向 CFRP 布没有严重剥离或被拉断的情况出现。试件的典型破坏形态如图 4 所示。

2.2 试验结果分析

表 4 中列出了试验的主要实测结果。

表 4 试验结果

Tab. 4 Test Results

试件编号	柱中部挠度/mm	混凝土最大压应变/ 10^{-6}	CFRP 布最大拉应变/ 10^{-6}	破坏特征	破坏位置	偏心距/mm	持载值/kN	加固形式	极限荷载/kN	承载力提高幅度/%
SD-1	3.50	-1 913		受压区混凝土压碎	中部附近	50			732.53	
SD-2	4.17	-3 059	697	混凝土横向开裂拉断	中部附近	50	500	条带 2 层	838.20	14.4
SD-3	3.97	-2 578	875	混凝土斜向断裂	上部柱角处	50	300	条带 2 层	1 028.80	40.4
SD-4	6.83	-2 786	1 005	混凝土斜向断裂	下部柱角处	50	300	全包 2 层	1 062.17	45.0
BD-1	8.65	-1 844			中部附近	150			280.71	
BD-2	10.54	-3 572	8 099	纵向 CFRP 布拉断	中部偏上约 115 mm	150	200	条二纵一	322.18	14.8
BD-3	11.30	-5 394	6 943	纵向 CFRP 布剥离	中部偏上约 225 mm	150	100	条二纵一	354.89	26.4
BD-4	12.92	-2 478	6 499	纵向 CFRP 布剥离	中部偏上约 250 mm	150	100	条二纵二	374.18	33.3

2.2.1 承载力分析

试件在加固前后承载力的变化情况是衡量 CFRP 布对偏压高强混凝土柱加固效果的一个重要指标,也是加固的主要目的。从表 4 可以看出,采用 CFRP 布持载加固后,大、小偏心试件的承载力与非加固柱相比都有一定程度的提高,小偏心试件的承

载力提高幅度在 14.4%~45%之间,大偏心试件的提高幅度在 14.8%~33.3%之间,随着 CFRP 布用量的增加,承载力也相应地提高。总的来看,小偏心受压试件的承载力提高幅度比大偏心受压试件的提高幅度要大一些,在 CFRP 布用量相同的情况下,持载值越小加固效果越好。

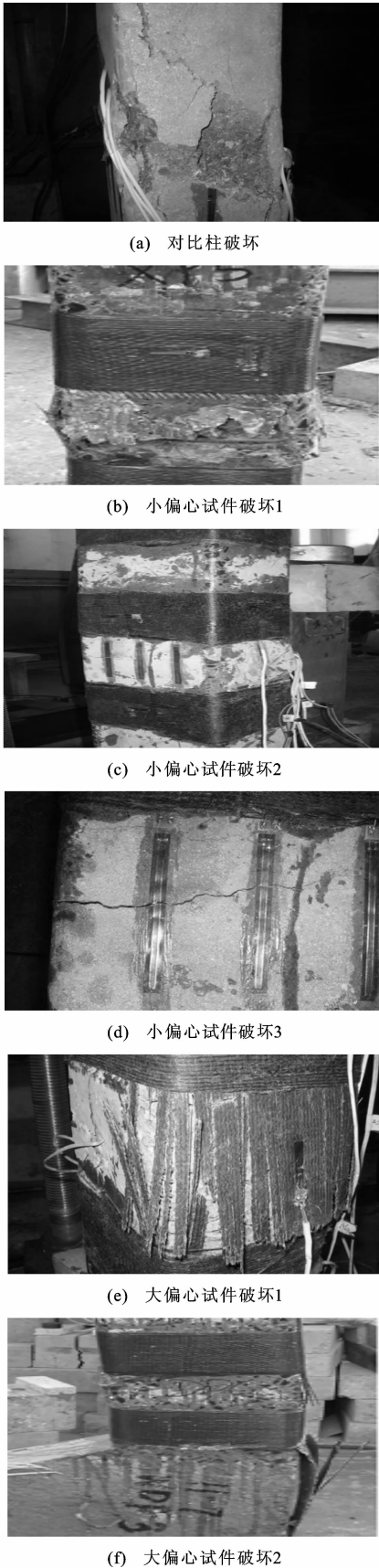


图 4 试件的典型破坏形态

Fig. 4 Typical Failure Modes of Specimens

2.2.2 荷载-挠度曲线

图 5 给出了实测的各个试件的竖向荷载与柱中部侧向挠度之间的关系曲线。

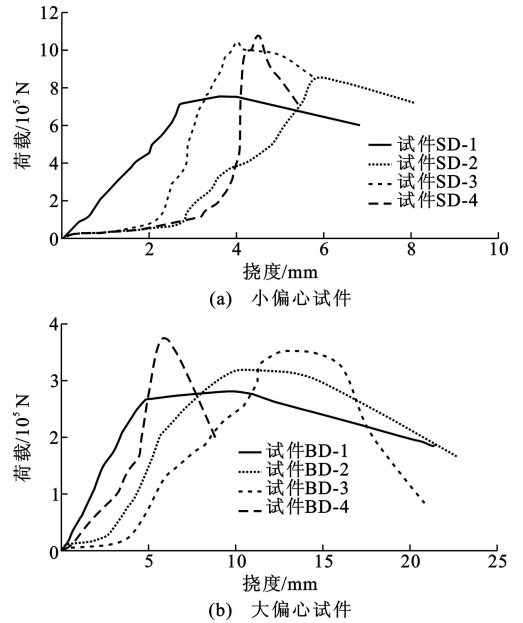


图 5 荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection Curves

从图 5 可以看出,持载对荷载-挠度曲线是有影响的。从非持载试件的曲线发展形态可以看出,当荷载小于 70% 极限荷载时,荷载与挠度近似呈线性关系;超过 70% 极限荷载后,荷载-挠度曲线开始呈非线性发展,曲线斜率逐渐降低至某一稳定值,直至整个试件丧失继续承载的能力。而持载的试件从一开始就呈现显著的非线性发展,变形增加很快而承载力提高不多,直到荷载及侧向变形达到一定程度,激活 CFRP 布发挥作用,曲线才逐渐呈线性发展,之后直至破坏的发展过程与非持载柱相似,在接近极限荷载时又呈非线性发展,曲线斜率逐渐降低至某一稳定值,直至整个试件丧失承载力而破坏。

2.2.3 延性分析

延性是结构设计中表征变形能力的一个重要的参数,是指结构、构件或试件截面在承载力没有显著下降的情况下承受变形的能力,试件延性的逐渐增大,在数值上表现为柱中部的挠度、混凝土的应变、纵向钢筋和箍筋的应变及外包 CFRP 布的应变不断增加,且由于 CFRP 布的粘贴方式及用量、偏心距的大小、持载方式的不同,这些数值变化的过程和趋势是不同的。试件荷载-应变曲线如图 6 所示。通过分析荷载-应变曲线和荷载-挠度曲线可以看

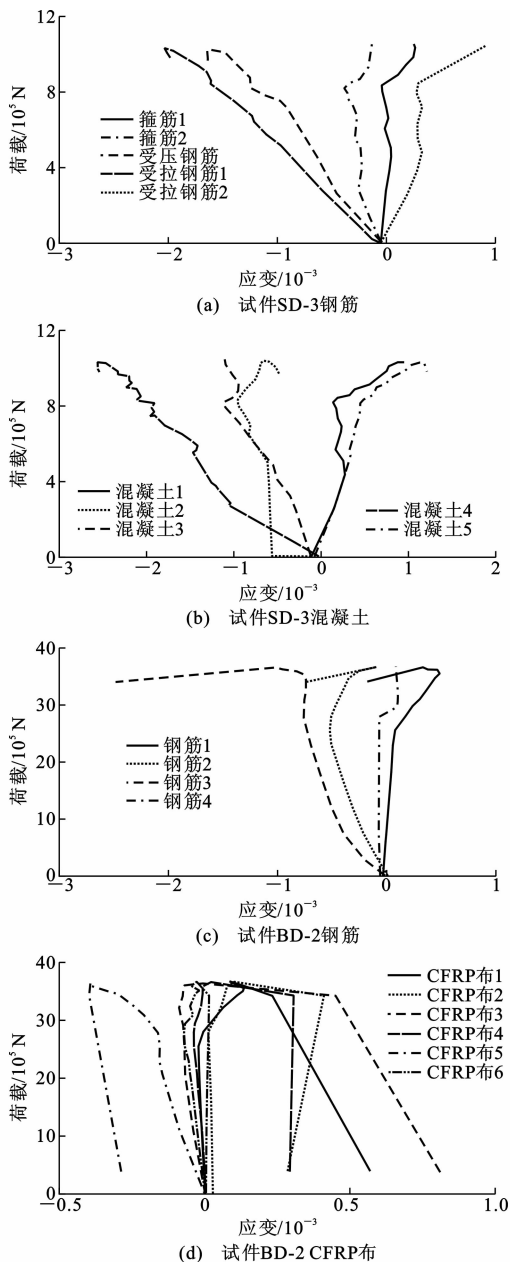


图 6 荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain Curves

出,偏心受压柱采用 CFRP 布加固后,对于不同偏心距和加固方式,柱的延性和整体变形能力都有不同程度的提高,这也可以由表 4 中的挠度和应变试验结果证实。

2.2.4 持载值的影响

总体来看,对于持载值较低的试件,其试验现象与非持载的试件基本相同,但从荷载-应变曲线看,其转折点的荷载和强化段的斜率都较非持载试件有降低的趋势。对持载值较高的试件,加固前试件表面就有不同程度的裂缝,纵向变形和横向变形都有较明显的发展,混凝土内部已有一定程度的损伤,与

非持载或低持载值的试件相比,高持载值试件在二次加载时,混凝土的纵向应变和环向应变发展较快,破坏荷载也较低。采用 CFRP 布加固后,各试件的峰值荷载和峰值应变都较非加固试件有很大提高,但增加幅度随着持载水平的提高而逐渐降低。

3 结语

(1) CFRP 布加固方法在提高持载偏心受压柱的承载力和延性上是有效的,但是随着偏心距增大,其效果逐渐降低。当截面由原来的小偏心受压转变为大偏心受压时,承载力提高幅度显著下降,但是延性的提高并不因偏心距增大而降低。

(2) 持载值对于 CFRP 布约束混凝土柱的极限荷载和应变是有影响的,随着持载水平的提高,其极限荷载和应变降低。

(3) CFRP 布的粘贴形式和用量对加固效果影响显著。随着 CFRP 布用量的增加,柱的承载力相应提高,变形能力也随之增强。不论是 CFRP 布条带包裹,还是 CFRP 布完全包裹的试件,加固后高强混凝土柱体的抗压强度都有一定的提高;其中 CFRP 布用量增大时,抗压强度增强;全包试件比条带式包裹承载力增强效果显著。加固后试件的荷载-应变曲线的下降段趋于平缓,说明延性有所提高,但破坏时仍具有较大的脆性。

(4) 对于大偏心受压试件,柱牛腿部分的纵向 CFRP 布在柱的破坏过程中剥离,使 CFRP 布不能充分发挥其应有的作用,牛腿处成了试件破坏的薄弱点,在以后的加固中应加强对牛腿处 CFRP 布的锚固。

参考文献:

References:

- [1] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T. FRP Strengthened RC Structures [M]. London: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] 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.
- [3] 张 轲, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土柱改善延性的试验研究 [J]. 工业建筑, 2000, 30 (2): 16-19.
ZHANG Ke, YUE Qing-rui, YE Lie-ping, et al. Experimental Research on Ductility Improvement of Concrete Column Strengthened with CFS [J]. Indus-

- trial Construction, 2000, 30(2):16-19.
- [4] 赵彤, 谢剑, 刘明国, 等. 碳纤维布改善高强混凝土性能的研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(3):42-44, 25.
ZHAO Tong, XIE Jian, LIU Ming-guo, et al. Research on New Method of Improving Properties of High Strength Concrete by Using Continuous Carbon Fiber Sheet[J]. Industrial Construction, 2001, 31(3):42-44, 25.
- [5] 韩克爽. 碳纤维布加固高强混凝土柱的受力性能试验研究[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.
- [6] 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, 64.
ZHAO Tong, XIE Jian, DAI Zi-qiang. Research on Compressive Stress-strain Relationship of Concrete Confined with Continuous CFS[J]. Building Structure, 2000, 30(7):40-43, 64.
- [7] 敬登虎, 曹双寅. 方形截面混凝土柱 FRP 约束下的轴向应力-应变曲线计算模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12):32-37.
JING Deng-hu, CAO Shuang-yin. A Model for Calculating the Axial Stress-strain Curve of Square-section Concrete Column Confined by FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12):32-37.
- [8] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):18-23.
LU Yi-yan, SHI Jian-yong, ZHAO Guo-fan. Experimental Research on Concrete Columns Strengthened with the Combination of CFRP and Angle Steel[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):18-23.
- [9] 刘涛, 冯伟, 张智梅, 等. 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 Zhi-mei, et al. A Study on the Compressive Performance of Rectangular Concrete Columns Confined with CFRP Sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12):41-47.
- [10] FAM A, RIZKALLA S. Large Scale Testing and Analysis of Hybrid Concrete/Composite Tubes for Circular Beam-column Applications[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7):507-516.
- [11] TENG J G, LAM L. Behavior and Modeling of Fiber Reinforced Polymer-confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11):1713-1723.
- [12] FAM A, SCHNERCH D, RIZKALLA S. Rectangular Filament Wound Glass Fiber Reinforced Polymer Tubes Filled with Concrete Under Flexural and Axial Loading: Experimental Investigation [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1):25-33.
- [13] FAM A, SCHNERCH D, RIZKALLA S. Rectangular Filament Wound Glass Fiber Reinforced Polymer Tubes Filled with Concrete Under Flexural and Axial Loading: Analytical Modeling[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1):34-43.
- [14] NANNI A, NORRIS M S. FRP Jacketed Concrete Under Flexure and Combined Flexure-compression [J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(5):273-281.
- [15] CHAALLAL O, SHAHAWY M. Performance of Fiber-reinforced Polymer-wrapped Reinforced Concrete Column Under Combined Axial-flexural Loading[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4):659-668.
- [16] LI J, HADI M N S. Behaviour of Externally Confined High-strength Concrete Columns Under Eccentric Loading[J]. Composites Structures, 2003, 62(2):145-153.
- [17] PARVIN A, WANG W. Behavior of FRP Jacketed Concrete Columns Under Eccentric Loading [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3):146-152.
- [18] 敬登虎. GFRP 加固 RC 柱应变滞后试验分析[J]. 特种结构, 2003, 20(3):74-76.
JING Deng-hu. Testing Analysis of the Strain-lag Between GFRP and Concrete of RC Column [J]. Special Structures, 2003, 20(3):74-76.