

文章编号:1673-2049(2012)02-0021-09

# CFRP 加固高强混凝土方柱的延性性能 试验分析与计算

王苏岩<sup>1</sup>, 余文华<sup>2</sup>, 曹怀超<sup>1</sup>, 刘毅<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100053)

**摘要:**为了研究碳纤维增强复合材料(CFRP)加固高强混凝土方柱的抗震性能,对 13 个高强混凝土方柱进行低周反复荷载试验,研究了试件破坏形态、滞回特性、骨架曲线、耗能能力和延性等抗震性能,探讨了轴压比、剪跨比、CFRP 加固量对高强混凝土方柱延性性能的影响,给出了计算 CFRP 布有效约束系数和位移延性系数的公式。结果表明:随着轴压比增大、剪跨比减小,试件耗能能力和延性降低;横向包裹 CFRP 布可以显著改善高强混凝土方柱耗能能力和延性;与未加固试件相比,横向包裹 CFRP 布对轴压比较大或剪跨比较小试件的延性提高效果更为显著;随着加固量的增加,试件的耗能能力和延性增大,但增加幅度逐渐降低。

**关键词:**CFRP; 高强混凝土方柱; 加固; 延性; 低周反复荷载; 抗震性能

**中图分类号:**TU375.3

**文献标志码:**A

## Experiment Analysis and Calculation on Ductility Behaviors of High-strength RC Square Columns Strengthened with CFRP

WANG Su-yan<sup>1</sup>, YU Wen-hua<sup>2</sup>, CAO Huai-chao<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. CERi Engineering Technology Co., Ltd, Beijing 100053, China)

**Abstract:** To investigate the seismic behaviors of high-strength reinforced concrete (RC) square columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), the low cyclic loading test of thirteen high-strength RC square columns was conducted. The seismic behaviors of columns, such as failure patterns, hysteresis behaviors, skeleton curves, energy dissipation capacity and ductility were studied, and the influences of axial load ratio, shear span ratio and CFRP strengthening volume on the ductility of high-strength RC square columns were discussed. The calculation formulae of CFRP effective constraint coefficient and displacement ductility coefficient were proposed. Results show that the ductility and energy dissipation capacity can be significantly reduced as the increase of axial load ratios or the decrease of shear span ratios; CFRP can observably improve the ductility and energy dissipation capacity of high-strength RC square columns; compared with the columns without CFRP, the seismic behaviors of columns with high axial load ratio or low shear span ratio are improved more obviously after being strengthened with CFRP in transverse; and the ductility, energy dissipation capacity increase with the increases of strengthening volume, but the improvement extent reduces gradually.

收稿日期:2012-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50878035)

作者简介:王苏岩(1958-),女,辽宁沈阳人,教授,E-mail:suyanwang1958@yahoo.com.cn。

**Key words:** CFRP; high-strength reinforced concrete square column; strengthening; ductility; low cyclic loading; seismic behavior

0 引言

随着结构向大跨、重载、高层、超高层体系的发展,高强混凝土在土木工程中的应用也越来越多。然而,随着混凝土强度等级的提高,混凝土的脆性越来越显著,构件的延性也越来越差,对结构抗震十分不利。混凝土构件用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,FRP)加固在改善混凝土结构抗震性能方面效果十分明显<sup>[1-7]</sup>,外部粘贴 FRP 加固高强混凝土柱能有效地改善高强混凝土脆性大、变形能力差、破坏较突然的不足,从而提高高强混凝土柱的延性及抗震性能,并且由于其具有轻质高强、抗腐蚀、耐疲劳、温度稳定性好、施工便捷且不改变结构刚度等优点,受到了土木工程界普遍关注。对于 FRP 加固高强混凝土性能方面虽然做了不少研究,但专门针对 FRP 改善高强混凝土柱延性方面的研究却不多,或考虑因素相对较少,或不够系统。本文中笔者从影响 FRP 加固混凝土柱延性性能的众多因素中,选取了最为重要的 3 个因素(轴压比、剪跨比、加固量)进行低周反复荷载试验,探讨碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)对高强混凝土柱抗震性能的改善情况。

1 试验方法

1.1 试件设计及加固方式

试件设计为倒 T 型悬臂柱,截面尺寸 200 mm×200 mm,用长度为 400,700,1 000 mm 的 3 种柱来模拟实际工程中的短柱、普通柱和长柱,共 13 个。柱子配筋为每侧 2 根直径 16 mm 的Ⅱ级热轧钢筋,箍筋采用直径 6.5 mm 的Ⅰ级热轧圆钢,间距 100 mm,为了防止局压破坏,在柱顶 150 mm 范围将箍筋间距设为 50 mm,混凝土采用强度等级为 C60 的商品混凝土,卧式一次性浇注而成,混凝土的保护层厚度为 25 mm,具体情况见表 1,2 和图 1。

由于正方形截面角部突变,易造成应力集中而导致纤维布不能充分发挥效能。为了不使纤维在受力过程中因提前断裂而退出工作,所有试件在其截面的 4 个直角均进行了倒角处理,倒角半径为 20 mm。在距柱底 500 mm 高度范围内采用横向全包加固,FRP 搭接长度取 150 mm。柱试件的编号及主要参数见表 3,编号的第 1 个字母为柱的类型:

表 1 钢筋的力学性能  
Tab. 1 Mechanical Properties of Steel Bars

直径/mm	种类	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
8	HPB235	396	572	196
16	HRB335	365	525	191

表 2 混凝土的力学性能  
Tab. 2 Mechanical Properties of Concrete

强度等级	立方体抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
C60	61.6	31.6	0.191

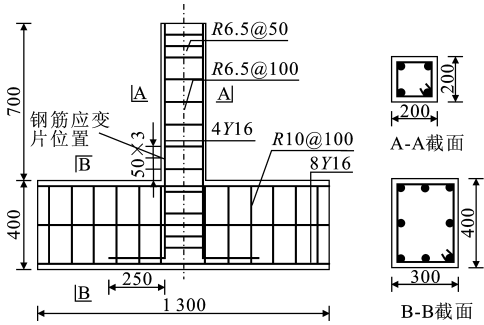


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)  
Fig. 1 Dimensions and Reinforcements of Specimens (Unit:mm)

表 3 试件编号及主要参数

Tab. 3 Numbers and Main Parameters of Specimens

试件编号	轴压比	剪跨比	加固层数
S7N	0.417	1.74	0
S7R-UD-3	0.417	1.74	3
N5N	0.298	3.53	0
N5R-UD-2	0.298	3.53	2
N6N	0.357	3.53	0
N6R-UD-3	0.357	3.53	3
N7N	0.417	3.53	0
N7R-UD-2	0.417	3.53	2
N7R-UD-3	0.417	3.53	3
N7R-UD-4	0.417	3.53	4
N8R-UD-3	0.476	3.53	3
L7N	0.417	5.45	0
L7R-UD-3	0.417	5.45	3

S 表示短柱、N 表示常规柱、L 表示长柱;第 1 个数字为计算轴压比:5 表示 0.5,6 表示 0.6,7 表示 0.7,8 表示 0.8;第 2 个字母为加固形式:N 表示未加固、R 表示加固;第 3,4 个字母为 CFRP 的种类:UD 表示单向;第 2 个数字为加固层数:2 表示 2 层、3 表示 3 层、4 表示 4 层。

CFRP 布实测力学性能见表 4。

表 4 CFRP 布实测力学性能

Tab. 4 Measured Mechanical Properties of CFRP Sheets

名义厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
0.167	3 988	242	1.70

1.2 试验装置与加载制度

试验在大连理工大学结构实验室进行,试验水平荷载控制方式为荷载和位移双控制,试验加载装置见图 2。试验开始时先施加竖向荷载到预设数值,并保持一段时间恒定,待试件水平位移恒定时开始施加水平荷载。水平荷载先用力控制,分两级加载,每级循环 1 次;试件屈服后采用位移控制模式加载,每级加载循环 3 次。当水平荷载下降到最大承载力的 85% 以下时,试验结束。

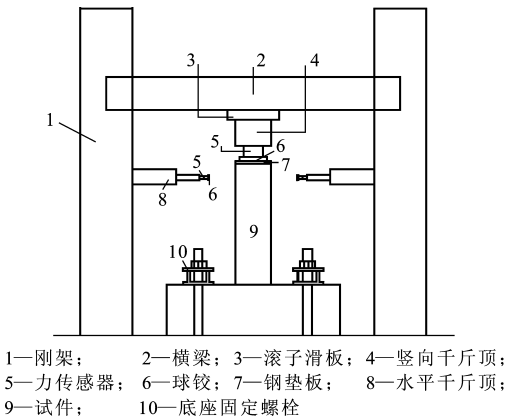


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test Loading Setup

2 试验现象及试验曲线分析

2.1 破坏形态及裂缝分布

按照剪跨比大小,将柱子分为短柱、普通柱和长柱 3 种,分别采用剪跨比为 1.74,3.53,5.45 的柱来模拟实际中柱的 3 种常见形式。为了充分分析剪跨比的影响,3 种类型的柱子均采用统一的配筋形式。

2.1.1 短柱

短柱由于多数表现为剪切破坏,位移控制取为刚出现裂缝时对应位移的整数倍,这区别于其他类型的柱。对比柱 S7N 在初始力控制阶段成弹性状态,当力达到最大水平力的 0.74 倍时出现第 1 条斜裂缝,随着加载级数的增加,不断出现新的斜裂缝和部分水平裂缝,裂缝宽度增加,斜裂缝不断往上下方向发展,主斜裂缝延伸至柱根部,且与推拉形成的斜裂缝相交。当水平位移达到 4.6 mm 时,柱突然破坏且伴有巨大的响声,位移急速增大。柱最终破坏

表现为典型的剪切破坏,破坏时具有很大的突然性,且形成了贯穿整个截面的大斜裂缝。

采用 CFRP 横向包裹加固后的柱 S7R-UD-3,加载初始阶段为弹性阶段,和柱 S7N 的现象基本一样;继续加载至屈服位移  $\Delta_y$  时,侧面 CFRP 上出现了水平白线,与柱 S7N 相比裂缝形式由斜裂缝变成了水平裂缝;随着加载级数的不断增加,CFRP 上的水平白线发展为水平裂缝,且宽度不断增加,与此同时,柱根部水平裂缝不断向正面中间发展,根部及柱身水平裂缝宽度不断加宽及发展导致了柱的最终破坏,基础上也出现了一些斜裂缝,但并不是很明显,期间还不断出现“噼啪”的脱胶声。相对对比柱而言,抗震性能得到了明显的改善,延性大幅度提高,最终破坏形态由未加固时的剪切脆性破坏变为延性较好的弯曲破坏。短柱破坏形态如图 3 所示。

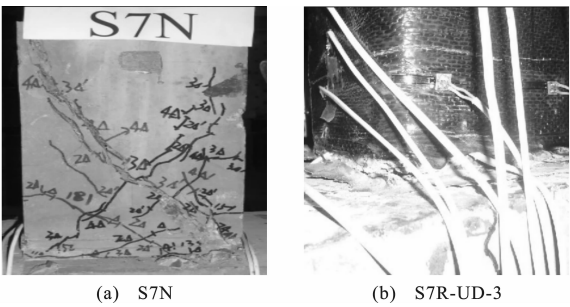


图 3 短柱破坏形态

Fig. 3 Failure Patterns of Short Columns

2.1.2 普通柱

对比柱 N5N,N6N,N7N 加载初始阶段以水平裂缝为主并附带 1 或 2 条斜裂缝,随着加载级数的增加,在距柱根部 32 mm 范围内水平裂缝逐渐向斜裂缝发展,同时新的斜裂缝不断出现,原有裂缝不断发展且裂缝宽度加大;受压侧出现竖向裂缝,混凝土压碎剥离,最终由水平裂缝和斜裂缝宽度增大与混凝土剥离脱落共同作用导致承载力下降,试验停止。试验结果表明,随着轴压比的增大,压碎破坏特征越来越明显,混凝土脱落高度越来越大,为 9.5 ~ 15 cm,裂缝数量也越来越少,脆性逐渐增大。

加固处理后的柱最终破坏均为由水平裂缝过大导致的弯曲破坏。加载初期均和对比柱一样,柱 N5R-UD-2 位移为  $\Delta_y$  时,混凝土出现裂缝并响起噼啪声,随着加载级数的不断增加,CFRP 布上出现白色线,且水平裂缝不断发展贯通并向受剪面发展,受压区角部局部混凝土压酥,基础出现 2 条长斜裂缝并向上下发展,期间不时有噼啪声,继续加载,纤维布上和柱底裂缝宽度明显加大,承载力降低,表现为

弯曲破坏。除基础部分外,其余柱破坏现象和柱 N5R-UD-2 大致相同。不同之处在于,柱 N6R-UD-3 和柱 N5R-UD-2 相似,基础出现斜裂缝但数量相对较少,其余柱基础部分没有裂缝。导致这种现象

的原因可能是因为轴压比的增加对抗剪有利,导致轴压比较低时柱基础出现剪切斜裂缝而轴压比较高时基础上没有出现斜裂缝。普通柱裂缝及破坏形态如图 4 所示。

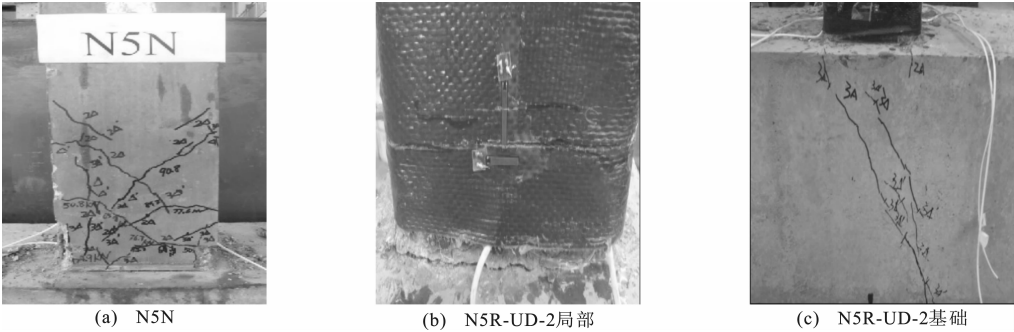


图 4 普通柱破坏形态  
Fig. 4 Failure Patterns of Normal Columns

2.1.3 长 柱

为了更全面地分析 CFRP 加固高强混凝土方柱延性性能的影响,本文中进行了 CFRP 增强高混凝土长柱的低周反复荷载试验。对比柱 L7N 初始阶段为弹性阶段,基本无变化,随着荷载的增加,侧面从下往上出现水平贯通裂缝;继续加载,水平裂缝继续发展加宽,最低处水平裂缝宽度超过 2.5 mm,受压侧出现竖向裂缝、混凝土压酥剥离,保护层脱落露出箍筋,残余变形增大,导致承载力明显下降,表现为弯曲破坏。

加固柱 L7R-UD-3 相比未加固柱而言,裂缝的数量减少,出现的范围降低,整体变形能力得到了大幅提高,屈服后残余变形增大,抗震性能得到了明显改善;水平侧移过大和水平裂缝过宽导致承载力下降,表现为弯曲破坏。长柱破坏形态如图 5 所示。

2.2 滞回特性分析

CFRP 加固高强钢筋混凝土柱在水平反复荷载作用下的荷载-位移滞回曲线是其抗震性能的综合体现,也是对结构或构件进行弹塑性地震反应分析

时确定恢复力特性的主要依据之一,它能反映出刚度退化、强度衰减、耗能能力及延性等特性,滞回曲线越饱满,表明构件消耗地震能量的能力越强,抗震性能越好(图 6)<sup>[8]</sup>。

从图 6 可以看出:

(1)高强混凝土柱加固后其滞回曲线均变得更加饱满、位移量增大,表明加固后柱均具有较好的抗震耗能能力。但加固后柱均呈现出一定的捏缩现象,经分析认为是柱根部钢筋滑移所导致的。

(2)剪跨比、加固形式及加固量一定时,随着轴压比的增加,对比柱和加固柱循环次数和位移量减少,且承载力下降变快,抗震性能变差;但加固改善延性效果随着轴压比的增加更趋明显。

(3)剪跨比和轴压比一定时,加固柱滞回曲线较对比柱更加饱满,随着加固层数的增加,循环次数基本上没有变化,但滞回曲线变得饱满,耗能能力增加,表明加固层数达到一定程度时继续增加层数对抗震性能的改善并不会起到什么作用,2 层时加固效果最为显著。

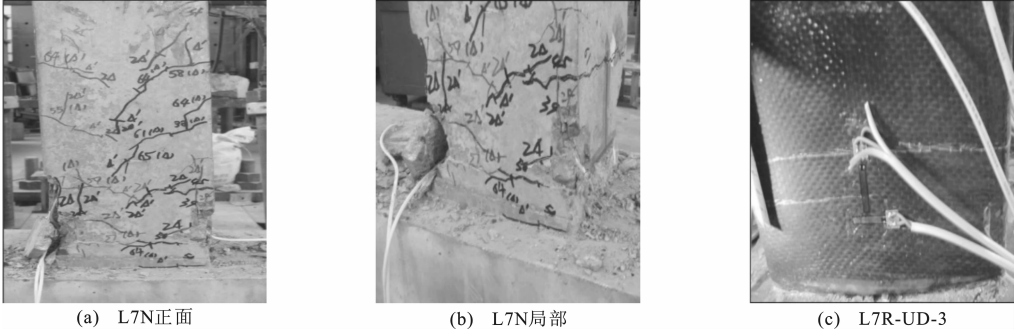


图 5 长柱破坏形态  
Fig. 5 Failure Patterns of Long Columns

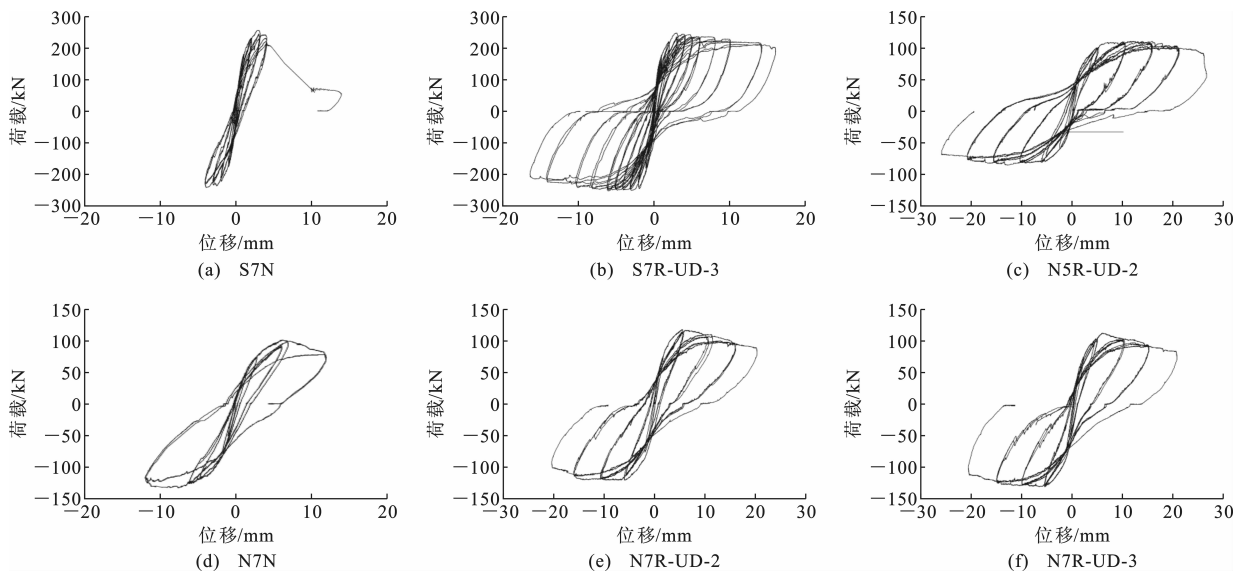


图 6 试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement Hysteretic Curves of Specimens

(4)剪跨比一定而轴压比和加固量变化时,轴压比大、加固层数少的柱较轴压比小、加固层数多的柱滞回曲线改善效果更为明显,表明轴压比对抗震性能的影响比加固量的影响更为显著。

(5)剪跨比对滞回曲线的影响十分显著。对于未加固柱,随着剪跨比的增大,滞回曲线越来越饱满,变形比也越来越大,循环次数也呈增加趋势,抗震性能越来越好;对于加固柱,滞回曲线都十分饱满,且随着循环次数的增加均呈现一定程度的捏缩现象,但相对对比柱而言,剪跨比越小,加固柱滞回特性改善效果越显著,表明采用横向包裹 CFRP 布加固高强混凝土柱其加固效果与剪跨比呈一定的反比关系。

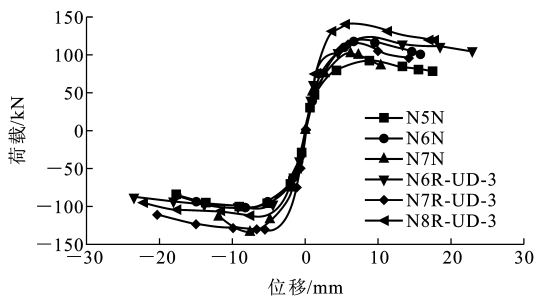
### 2.3 骨架曲线分析

从图 7 可以看出:

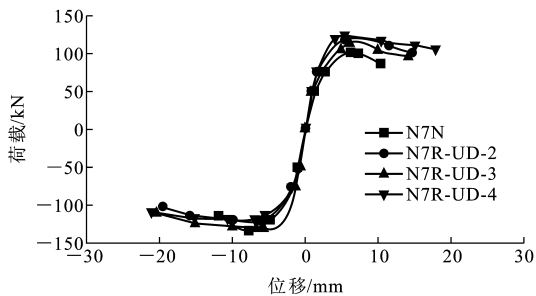
(1)试件的骨架曲线初始上升阶段基本上重合,说明横向包裹 CFRP 布加固高强混凝土柱对其初始刚度没有影响。

(2)总体上来看,加固柱较对比柱而言强度退化减缓,极限变形能力增加,骨架曲线下降段变的平缓,表明抗震延性得到了极大的改善。

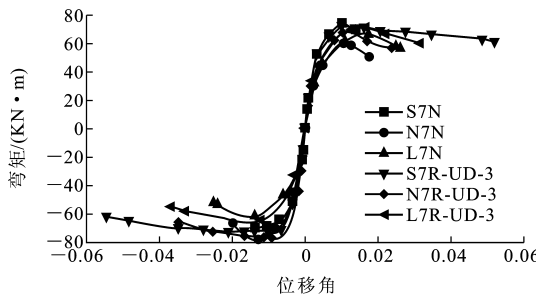
(3)剪跨比和 FRP 加固量相同时,随着轴压比的增大,试件最大承载力增大;达到峰值荷载后,强度退化加快,极限变形能力降低,骨架曲线下降段变陡。轴压比较大的加固柱 N8R-UD-3 骨架曲线和轴压比较小的未加固柱 N5N 的骨架曲线除了承载力大之外,下降段延伸长度差不多,说明横向包裹 CFRP 布能显著改善高轴压比柱的抗震性能;从另



(a) 轴压比对荷载-位移骨架曲线的影响



(b) FRP 加固量对荷载-位移骨架曲线的影响



(c) 剪跨比对弯矩-位移角骨架曲线的影响

图 7 试件的骨架曲线

Fig. 7 Skeleton Curves of Specimens

一方面来看,横向包裹 CFRP 布能提高约束混凝土

柱的强度,相当于减少了轴压比,继而改善其延性。

(4)从计算轴压比为 0.7 的常规柱骨架曲线比较图可以得出,当剪跨比和轴压比相同时,采用横向包裹 CFRP 布后的柱强度退化现象明显减缓,抗震性能得到显著的改善。当加固层数从 2 层增加到 4 层时,虽然骨架曲线下降段有所延伸,但加固效果不明显,可见,2 层时加固效果最佳。

(5)考虑到剪跨比不同时水平荷载和相应位移值的差异性,为了比较剪跨比影响,本文中将荷载-位移骨架曲线转换为弯矩-位移角骨架曲线。从弯矩-位移角骨架曲线比较图可以看出,剪跨比和轴压比均对骨架曲线特性影响十分显著。小剪跨比柱的骨架曲线甚至不会出现下降段,表现为突然的脆性破坏,随着剪跨比的增大,直线段后的斜率减小,峰值过后下降段变得平缓了许多,但未加固柱下降都十分陡峭,强度退化十分明显。与未加固柱相比,加固柱的骨架曲线强度退化和变形能力都得到了极大的改善,下降段变得十分平缓。特别是小剪跨比的柱,从未加固前变形能力最差变为加固后变形能力最好,由此可见,剪跨比越小,其抗震性能越差,但经加固后其抗震延性改善效果最为显著,甚至会超过剪跨比较大的柱。此外,还可以得出,和加固量相比,轴压比对抗震性能影响更加显著,其原因是加固层数达到一定程度后柱表现为弯曲破坏,继续增加不会改变柱的破坏特性,而轴压比的增大会延缓水平裂缝出现及发展,直接影响柱的破坏形态,由弯曲破坏变为弯剪破坏甚至剪切破坏,从而使 CFRP 布能最大程度地发挥功效。

### 3 延性计算

#### 3.1 耗能能力

图 8 为等效粘滞阻尼系数计算简图,其中  $P$  为荷载,  $\Delta$  为位移。本文中用等效粘滞阻尼系数  $h_e$  [9] 来衡量试件的耗能能力,其定义如下

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABCDEA}}{S_{\triangle ODN} + S_{\triangle OBM}} \quad (1)$$

式中:  $S_{ABCDEA}$  为一个滞回环所围成的面积;  $S_{\triangle ODN}$ ,  $S_{\triangle OBM}$  分别为  $\triangle ODN$ ,  $\triangle OBM$  的面积,见图 8。

表 5 为试件延性计算结果。从表 5 可以看出,对比柱的等效粘滞阻尼系数  $h_e = 0.120 \sim 0.232$ ,而加固后的试件等效粘滞阻尼系数  $h_e = 0.255 \sim 0.311$ ,说明经横向包裹 CFRP 布加固处理后,高强混凝土柱的  $h_e$  相对对比柱而言都增大了,表明横向包裹 CFRP 布能提高高强混凝土柱的耗能能力;剪

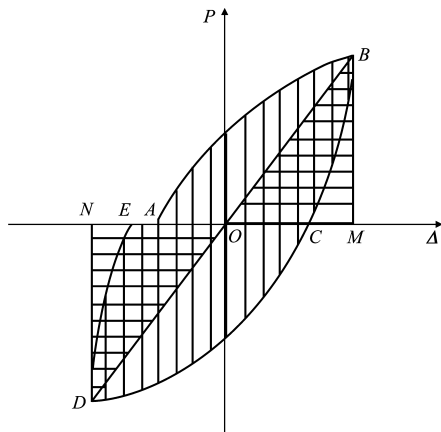


图 8 等效粘滞阻尼系数计算简图

Fig. 8 Calculation Sketch for Equivalent Sluggish Damping Factor

跨比和加固层数相同时,随着轴压比的增大,高强混凝土柱的  $h_e$  呈减少趋势,表明高强混凝土柱的耗能能力随轴压比的增大而有所降低;剪跨比和轴压比相同时,随着加固层数的增加,试件的  $h_e$  呈增大趋势,但  $h_e$  增大幅度随加固层数的增加而呈下降趋势,表明高强混凝土柱的耗能能力随横向包裹 CFRP 层数的增加而有所增大,但增大程度逐渐降低;此外,剪跨比对试件的  $h_e$  变化影响也十分明显,当轴压比一定时,对于对比柱而言,剪跨比越小,其  $h_e$  也越小,但经横向包裹 CFRP 布加固后,其  $h_e$  提高程度最大,加固后和加固前的比值达到 2.292 倍,表明高强混凝土柱的耗能能力随着剪跨比的增大而有所增大,但横向包裹 CFRP 布加固方式对剪跨比小的试件其效果更为显著。

#### 3.2 延性

延性是评估结构抗震性能的一个重要指标。结构的延性越大,则其消耗和吸收地震的能量就越大,结构自身的抗震能力就越强。对于低周反复荷载作用下的压弯构件,位移延性系数取滞回环骨架曲线上正、反 2 个方向的位移平均值,即  $\mu = (|\Delta_u| + |\Delta_{-u}|) / (|\Delta_y| + |\Delta_{-y}|)$  [10], 其中,  $\Delta_u$ ,  $\Delta_{-u}$  分别为水平荷载下降到最大荷载 85% 时柱试件推拉两侧所对应的位移,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_{-y}$  分别为通过等能量法得到的柱试件推拉两侧的计算屈服位移。

从表 5 还可以看出,利用 FRP 加固后柱的延性与承载力提高十分显著。从轴压比和位移延性系数的关系可以看出,高强混凝土柱的位移延性系数随轴压比的增大而降低;且经横向包裹 CFRP 布加固后,高强混凝土柱的延性得到了明显提高;随着加固层数的增大而增加,轴压比和位移延性系数连线倾

表 5 试件延性计算结果  
Tab. 5 Ductility Calculation Results of Specimens

试件编号	立方体强度 $f_{cu}/\text{MPa}$	试验轴压比 $n$	最大荷载/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性系数 $\mu$	等效粘滞阻尼系数 $h_e$
S7N	61.6	0.417	250.18	1.555	3.968	2.55	0.120
S7R-UD-3	61.6	0.417	249.95	1.420	15.408	10.85	0.275
N5N	61.6	0.298	96.03	3.364	17.580	5.23	0.260
N5R-UD-2	61.6	0.298	96.26	3.528	25.204	7.15	0.311
N6N	61.6	0.357	109.88	3.957	16.719	4.23	0.247
N6R-UD-3	61.6	0.357	106.93	3.200	23.244	7.27	0.262
N7N	61.6	0.417	117.60	3.345	11.064	3.31	0.212
N7R-UD-2	61.6	0.417	119.87	3.272	17.127	5.23	0.255
N7R-UD-3	61.6	0.417	122.14	3.263	17.237	5.28	0.265
N7R-UD-4	61.6	0.417	121.00	3.216	19.450	6.05	0.271
N8R-UD-3	61.6	0.476	126.23	3.415	19.979	5.85	0.257
L7N	61.6	0.417	70.61	6.748	23.244	3.45	0.232
L7R-UD-3	61.6	0.417	74.46	5.628	31.187	5.54	0.292

斜程度变缓,表明在剪跨比和加固层数相同的情况下,横向包裹 CFRP 布对大轴压比的高强混凝土柱延性提高效果更为显著。从受约束机理上来分析,轴压比大的柱其横向膨胀大,经加固处理后 CFRP 布提供的侧向有效约束增大,混凝土变形能力加强,所以横向包裹 CFRP 布加固高强混凝土柱后,轴压比大的柱比小的延性提高很多。

从剪跨比和位移延性系数的关系可以看出,未加固高强混凝土柱的位移延性系数随着剪跨比的增大而增大,但增大的幅度越来越小;而加固处理后高强混凝土柱的位移延性系数则呈现相反趋势,即小剪跨比柱的位移延性系数反而大,说明采用横向包裹 CFRP 布加固高强混凝土柱,对于小剪跨比柱,其延性提高更为显著。

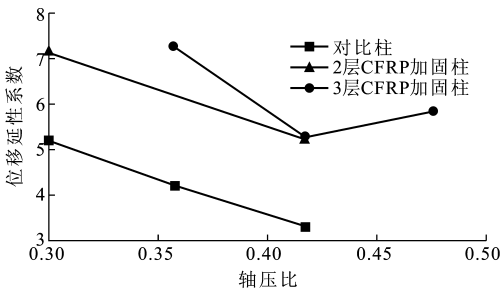
从加固量和位移延性系数的关系可以看出,高强混凝土柱的位移延性系数随加固层数的增加而增大,但连线的斜率逐渐降低,说明延性改善效果随着加固量的增加趋于不明显,即加固层数达到一定程度后,继续增加对于延性的提高无作用。

根据试验参数和位移延性系数之间的关系,参考钢纤维高强混凝土柱位移延性的经验公式<sup>[11]</sup>,对试验数据进行回归,得出位移延性系数的计算公式

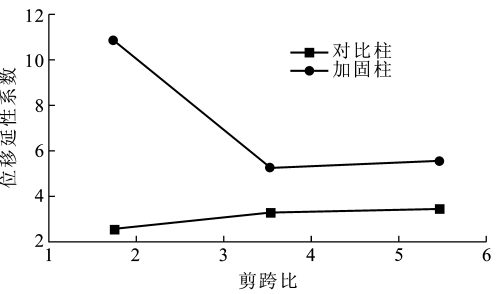
$$\mu_{\Delta} = [-0.59 + 0.22(15 + \lambda) \sqrt{\alpha \lambda_v} + 25.24 \beta_i \lambda_f / (0.65 + \lambda)] / (n - 0.19) \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为含箍特征值修正系数,采用矩形箍时  $\alpha$  值取为 1,螺旋箍和复合箍时  $\alpha$  值分别近似地取为 2 和 3; $\beta_i$  为 CFRP 布的有效约束系数; $\lambda_v, \lambda_f$  分别为箍筋和 CFRP 布的体积配箍特征值。

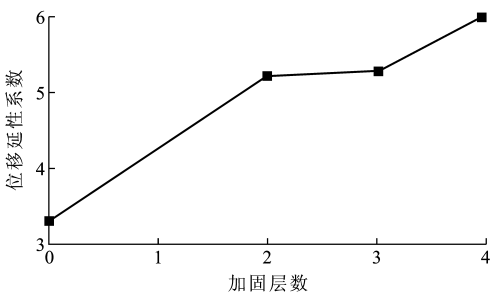
试验表明, $\beta_i$  随着轴压比的增大及加固量的减



(a) 轴压比与位移延性系数关系



(b) 剪跨比与位移延性系数关系



(c) 加固层数与位移延性系数关系

图 9 影响因素与位移延性系数关系  
Fig. 9 Relations Between Influence Factors and Displacement Ductility Coefficients

少而增大,和剪跨比关系不大,参考 CFRP 布强度发挥系数公式<sup>[12-19]</sup>,通过回归统计拟合,得出有效约

束系数的计算公式

$$\beta_f = \frac{1.18n - 0.21}{\sqrt{\lambda_f} + 1.2} \tag{3}$$

式(3)适用于计算轴压比为 0.5~0.8 的情况。

$\lambda_v, \lambda_f$  分别按式(4),(5)计算

$$\lambda_v = \rho_v \frac{f_{yv}}{f_c} = \frac{A_{sv} l_g}{l_1 l_2 s_g} \frac{f_{yv}}{f_c} \tag{4}$$

$$\lambda_f = \rho_f \frac{f_f}{f_c} = \frac{t_f l_f}{bh} \frac{f_{yu}}{f_c} \tag{5}$$

式中: $\rho_v$  为箍筋配箍率; $A_{sv}$  为配置在同一截面内箍筋各肋的全部截面面积; $l_g$  为 1 道箍筋的周长; $l_1, l_2$  均为矩形箍筋的 2 个边长; $s_g$  为箍筋间距; $\rho_f$  为 FRP 和混凝土体积比; $t_f, l_f$  分别为 FRP 布截面厚度和总周长; $f_{yv}$  为箍筋屈服强度; $f_{yu}$  为 FRP 布极限抗拉强度; $f_c$  为混凝土轴心抗压强度。

位移延性系数的试验值与计算值的比较见表 6。从表 6 可以看出,试验值和计算值吻合良好。

表 6 位移延性系数试验值与计算值比较

Tab. 6 Comparisons of Displacement Ductility Coefficients Between Experiment Results and Calculated Results

试件编号	位移延性系数 试验值 $\mu_{\Delta e}$	位移延性系数 计算值 $\mu_{\Delta c}$	$\mu_{\Delta c} \mu_{\Delta e}^{-1}$
S7N	2.55	2.17	0.85
S7R-UD-3	10.85	8.80	0.81
N5N	5.23	5.10	0.98
N5R-UD-2	7.15	7.17	1.00
N6N	4.23	3.73	0.88
N6R-UD-3	7.27	6.78	0.93
N7N	3.31	2.77	0.84
N7R-UD-2	5.23	4.86	0.93
N7R-UD-3	5.28	5.30	1.00
N7R-UD-4	6.05	6.03	1.00
N8R-UD-3	5.85	5.23	0.89
L7N	3.45	3.11	0.90
L7R-UD-3	5.54	5.18	0.94

4 结 语

(1)横向包裹 CFRP 布可以改变高强混凝土柱的破坏形态(对于剪切破坏的短柱其效果特别显著),延缓混凝土裂缝开展及压碎脱落程度,保持柱身的完整性;此外,加固轴压比相对较低的柱时要注意加固量的问题,否则会导致基础优先破坏。

(2)横向包裹 CFRP 布虽然对水平承载力的提高十分有限,但能显著改善高强混凝土柱变形能力和滞回特性、提高试件的延性和耗能能力。而且对于高强混凝土柱初始刚度几乎没有影响,经 CFRP

加固处理后不会改变原始结构中力的分配关系和传播路径。

(3)轴压比、剪跨比和加固量对高强混凝土柱延性、耗能能力与强度退化影响较明显。相同试验参数条件下,轴压比越大或剪跨比越小,试件延性越差,耗能越少,强度退化越快,但经横向包裹 CFRP 布加固后,轴压比较大或剪跨比较小试件的延性提高效果更为显著。随着加固量的增加,试件延性和耗能能力都增大,但幅度在逐渐降低。

(4)本文中给出了 CFRP 布有效约束系数计算公式和位移延性系数计算公式,充分考虑剪跨比、轴压比、箍筋体积配箍特征值、碳纤维体积配箍特征值、箍筋形式及纤维有效约束性能的影响,计算值和试验值基本吻合,并且分析结果略趋于保守,证明这种方法可用于工程实际,且偏于安全。

参考文献:

References:

[ 1 ] BINICI B, MOSALAM K M. Analysis of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with Fiber Reinforced Polymer Lamina[J]. Composites Part B:Engineering, 2007,38(2):265-276.

[ 2 ] ANGGAWIDJAJA D, UEDA T, DAI J, et al. Deformation Capacity of RC Piers Wrapped by New Fiber-reinforced Polymer with Large Fracture Strain[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(10): 914-927.

[ 3 ] WU G, LU Z T, WU Z S. Strength and Ductility of Concrete Cylinders Confined with FRP Composites [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(3):134-148.

[ 4 ] 王吉忠,王苏岩,黄承逵. CFRP 加固高强混凝土柱抗震性能和延性研究[J]. 大连理工大学学报,2008,48(5):708-714.

WANG Ji-zhong, WANG Su-yan, HUANG Cheng-kui, Research on Ductility and Earthquake-resistance of High Strength Concrete Column Confined by CFRP[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,48(5):708-714.

[ 5 ] 王苏岩,韩克双,曲秀华. CFRP 加固高强混凝土柱改善延性的试验研究[J]. 世界地震工程,2005,21(3):7-10.

WANG Su-yan, HAN Ke-shuang, QU Xiu-hua. Experimental Research on Ductility Behavior of High-strength Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon Fiber Sheets[J]. World Earthquake Engineering, 2005,21(3):7-10.



- [6] SEIBLE F, PRIESTLEY M J N, HEGEMIER G A, et al. Seismic Retrofit of RC Columns with Continuous Carbon Fiber Jackets[J]. Journal of Composite for Construction, 1997, 1(2): 52-62.
- [7] XIAO Y, MA R. Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing[J]. Journal of Structure Engineering, 1997, 123(10): 1357-1364.
- [8] 闫长旺. 钢骨超高强混凝土框架节点抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
YAN Chang-wang. Study on Seismic Performance of Steel Reinforced Ultra High Strength Concrete Frame Connection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [9] 刘伯权, 白国良, 张国军. 高轴压比高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 45-50.  
LIU Bo-quan, BAI Guo-liang, ZHANG Guo-jun. An Experimental Study on the Seismic Behavior of High Strength Reinforced Concrete Frame Columns with High Axial Compression Ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 45-50.
- [10] 赵鹏展. GFRP管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
ZHAO Peng-zhan. Study on Seismic Performance of Concrete-filled GFRP Tubes Column-reinforced Concrete Beam Joint [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [11] 李凤兰, 黄承逵, 温世臣, 等. 低周反复荷载下钢纤维高强混凝土柱延性试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 159-164.  
LI Feng-lan, HUANG Cheng-kui, WEN Shi-chen, et al. Ductility of Steel Fiber Reinforced High-strength Concrete Columns Under Cycle Loading[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 159-164.
- [12] 张 轲, 岳清瑞, 叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱滞回耗能分析及目标延性系数确定[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 5-8.  
ZHANG Ke, YUE Qing-rui, YE Lie-ping. Analysis of Hysteresis Energy Dissipation and Acceptable Ductility Factor for Concrete Column Strengthened with CFS [J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 5-8.
- [13] 叶列平, 赵树红, 李全旺, 等. 碳纤维布加固混凝土柱受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 59-67.  
YE Lie-ping, ZHAO Shu-hong, LI Quan-wang, et al. Calculation of Shear Strength of Concrete Column Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheet[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(2): 59-67.
- [14] 李春良, 程永春, 何 峰. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的经典层合理力学解析[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 60-65.  
LI Chun-liang, CHENG Yong-chun, HE Feng. Theoretical Study of RC Beam Strengthened with Prestressed CFRP Sheet Based on Classical Laminate Theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 60-65.
- [15] 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.
- [16] 方 志, 李红芳, 彭 波. 体外 CFRP 预应力钢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.
- [17] 邬晓光, 张柳煜, 郝 毅, 等. 碳纤维加固钢筋混凝土梁的受弯全过程分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 53-57.  
WU Xiao-guang, ZHANG Liu-yu, HAO Yi, et al. Flexural-tensile Strength of Concrete Beams in Complete Course of Reinforcement with Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 53-57.
- [18] 张柳煜, 邬晓光, 李启乾. 粘贴加固材料厚度与钢筋混凝土 T 梁极限承载力分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(7): 67-69.  
ZHANG Liu-yu, WU Xiao-guang, LI Qi-qian. Analysis on Thickness of Reinforcement Material and Ultimate Bearing Capacity of RC T-section Beams Strengthened with Steel Plate and CFRP [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(7): 67-69.
- [19] 陈小英, 李唐宁, 黄 音, 等. CFRP 体外预应力加固钢筋混凝土 T 型梁试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 56-63.  
CHEN Xiao-ying, LI Tang-ning, HUANG Yin, et al. Experiment on Reinforced Concrete T-beams Strengthened with External Prestressed CFRP Sheets [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 56-63.