

# HFRP 布约束混凝土圆柱体轴压力学性能试验

邓宗才<sup>1</sup>, 阙德新<sup>2</sup>, 翟胭脂<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国寰球工程公司 土建室, 北京 100029;  
3. 北京市建设工程质量第一检测所, 北京 100039)

**摘 要:** 通过碳纤维布、芳纶纤维布、玻璃纤维布和玄武岩纤维布混杂约束混凝土圆柱体的轴心抗压性能试验, 研究了 HFRP 布约束混凝土柱的破坏形式、抗压强度、峰值应变和应力-应变全曲线。试验结果表明: 1) 相比未约束混凝土试件, 1C/1G、1C/1B 和 1A/1B 混杂约束试件的抗压强度分别提高了 154%、134% 和 140%, 峰值应变分别提高了 393%、363% 和 476%; 2) 1C/2G、1C/2B 和 1A/2B 混杂约束试件的抗压强度分别提高了 187%、190% 和 170%, 峰值应变分别提高了 567%、511% 和 574%; 3) 2C/1G、1C/1A/1G 和 1C/1B/1G 混杂约束试件的抗压强度分别提高了 245%、233% 和 157%, 峰值应变分别提高了 649%、581% 和 426%; 4) 基于试验数据拟合 HFRP 约束混凝土圆柱体的强度约束系数为 3.1。最后建立了 HFRP 约束混凝土圆柱体的 3 段式应力-应变曲线模型, 与试验曲线良好吻合。

**关键词:** HFRP; 玄武岩纤维布; 力学性能; 约束系数

**中图分类号:** TU 375.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2009)02-0197-09

纤维增强复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀、施工方便等优点, 在加固领域得到广泛应用。目前加固中常用碳纤维(CFRP)布、芳纶纤维(AFRP)布和玻璃纤维(GFRP)布, 但 CFRP 延伸率低, GFRP 弹性模量低。单一 FRP 变形能力不足或强度低制约了 FRP 的广泛应用, 混杂 FRP(HFRP)能充分发挥不同纤维的优势, 改善结构变形能力和抗震性能<sup>[1-2]</sup>。

国内外对 HFRP 进行了一系列研究, 但 HFRP 的材料大都为 CFRP 与 GFRP 布的混杂, 且多用于加固梁<sup>[3-6]</sup>, 对 HFRP 加固混凝土柱力学性能的研究甚少, HFRP 约束混凝土柱强度计算模型及本构关系未见报道。作者在以往研究的基础上通过 CFRP、AFRP、GFRP 和玄武岩纤维复合材料(basalt fiber reinforced polymer, 简称 BFRP)层间混杂约束混凝土圆柱体的轴压性能试验, 研究了约束柱的破坏形态、抗压强度、峰值应变和应力-应变全曲线, 并提出了 HFRP 约束混凝土圆柱体的强度和应力-应变模型。

## 1 试验方法

### 1.1 混凝土柱试件

#### 1.1.1 纤维布材性

试验共用 4 种纤维布, 分别为碳纤维布(CFRP)、芳纶纤维布(AFRP)、玻璃纤维布(GFRP)和玄武岩纤维布(BFRP)。表 1 为各种纤维布的材料力学指标, 由材料供应商提供。

#### 1.1.2 混凝土圆柱体试件

水泥采用普通硅酸盐 P.O. 32.5, 碎石最大粒

表 1 纤维布材料力学指标

Table 1 Mechanical properties of FRP sheets

名称	厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
碳纤维布	0.167	4 420	260
芳纶纤维布	0.193	2 060	118
玄武岩纤维布	0.170	4 100	93
玻璃纤维布	0.172	3 000	73

收稿日期: 2007-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678011); 北京市自然科学基金资助项目(8082002).

作者简介: 邓宗才(1961—), 男, 陕西扶风人, 教授.

径为 20 mm, 混凝土配合比为水:水泥:砂:石子 = 170:360:647:1 100.

试件直径为 150 mm, 高度为 300 mm, 浇注 24 h 后脱模, 在 25 °C 养护室养护 28 d 后粘贴纤维布. 纤维布粘贴完毕 7 d 后进行试验. 混凝土立方体抗压强度为 29.6 MPa.

### 1.1.3 加固方案

纤维布粘贴采用湿粘法, 纤维布宽度为 300 mm, 经树脂浸润后粘贴包裹于柱表面. 为防止试件端部提前破坏, 试件两端加缠 2 层宽度为 50 mm 的碳纤维条. 纤维布搭接长度 150 mm, 且搭接缝相互错开, 粘贴完毕后常温下养护 8 d, 待环氧树脂胶固化后进行试验. 试件编号及外包 FRP 类型见表 2, P0 为未约束混凝土试件.

表 2 圆柱体试件编号

Table 2 Serial number of cylinder specimens

试件编号	混杂纤维布	粘贴次序(由内到外)	加固方式	试件数量
P0	无	无	无	2
B2	2B	2B	全包	2
C1B1	1C/1B	1C/1B	全包	2
C1B2	1C/2B	1C/2B	全包	2
C1G1	1C/1G	1C/1G	全包	2
C1G2	1C/2G	1C/2G	全包	2
C2G1	2C/1G	2C/1G	全包	2
A1B1	1A/1B	1A/1B	全包	2
A1B2	1A/2B	1A/2B	全包	2
C1B1G1	1C/1B/1G	1C/1B/1G	全包	2
C1A1G1	1C/1A/1G	1C/1A/1G	全包	2

注: 试件编号中字母 A、B、C 和 G 分别代表芳纶纤维布、玄武岩纤维布、碳纤维布和玻璃纤维布, 数字表示它左侧纤维布的层数, 如 C1B1 表示 1 层碳纤维布与 1 层玄武岩纤维布混杂加固试件.

## 1.2 试验方法

试验在清华大学高坝国家专业重点实验室完成, 用 INSTRON-8506 四立柱真三轴液压伺服试验系统进行试验, 加载采用位移控制, 加载速度为 0.2 mm/min. 加载时先预压至 100 kN, 然后卸载到 0, 再加载至试件破坏. 试件两端加垫减摩层(3 层聚四氟乙烯薄膜), 以减小上下钢板对混凝土柱的摩擦约束, 提高混凝土柱承载力的测试精度<sup>[2]</sup>

## 2 破坏形态

加载初期纤维布对混凝土柱的环向约束很小, 加载至混凝土极限荷载的 80% 以后, 可间歇听到纤维的断裂声. 随着荷载的增大, 纤维断裂逐渐增多, 纤维断裂区混凝土外鼓, 达到极限荷载时, 中部纤维被拉断, 试件破坏. 试件的破坏形态见图 1.

HFRP 布的断裂形态有 4 种: 1) 断口齐整但无纤维拔出, 如试件 C2G1, 见图 1(a); 2) 断口齐整且有纤维拔出, 如试件 C1B1、C1B2、A1B1 和 A1B2, 见图 1(b); 3) 断口参差不齐, 如试件 C1G1、C1G2、CBG 和 C1A1G1, 见图 1(c); 4) 纤维断裂为窄条状, 如试件 B2, 见图 1(d).

剥开外粘纤维布看出核心混凝土的破坏有 2 种模式: 1) 劈拉破坏, 试件产生竖向裂缝, 如试件 B2; 2) 成锥形破坏, 见图 1(e), 除试件 B2 外其余试件均为该破坏模式. 劈拉破坏原因为: 试件承受轴向压力时,

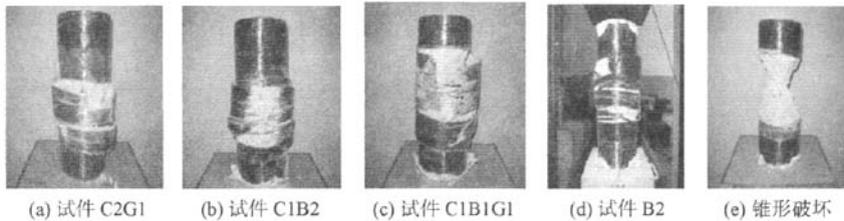


图1 试件破坏形态

Fig.1 Failure configuration of specimens

产生垂直于试件轴线方向的拉应变,当拉应变超过混凝土的极限拉应变后形成平行于轴线的裂缝面,裂缝贯通后试件形成短柱群而破坏.锥形破坏的原因:试件加载后,竖向发生压缩变形,水平向为横向变形.由于纤维布提供的侧向约束力足够大,且试件端部经过加强,试件端部横向变形小而中部的横向变形大.形成的八字形裂缝从表面向内部扩展,纤维布断裂后形成锥形.

### 3 强度模型

#### 3.1 抗压强度

试验测得了 HFRP 约束混凝土圆柱体的抗压强度,见表 3. 由表 3 可知,3 层纤维布约束试件的抗压强度均高于 2 层纤维布约束试件,随着纤维布加固量的增加,HFRP 约束柱抗压强度明显提高.

表3 HFRP 约束混凝土圆柱轴心抗压强度

Table 3 Bearing capacity of circular columns confined by HFRP

试件编号	P0	B2	C1B1	C1G1	A1B1	C1B2	C1G2	C2G1	A1B2	C1B1G1	C1A1G1
抗压强度/MPa	35.0	70.5	81.8	88.8	83.9	101.4	100.4	120.9	94.4	90.0	116.4
相对值	1.00	2.01	2.34	2.54	2.40	2.90	2.87	3.45	2.70	2.57	3.33

纤维布为 2 层时,相比标准试件 P0,试件 C1G1、A1B1、C1B1 和 B2 抗压强度分别提高了 154%、140%、134% 和 101%. CFRP 与 GFRP 布、CFRP 与 BFRP 布、AFRP 与 BFRP 布混杂约束中,试件 C1G1 的抗压强度最大,表明 1C/1G 增强约束效果最好.

纤维布为 3 层时,相比标准试件 P0,试件 C1B2、C1G2、C1B1G1 和 A1B2 抗压强度分别提高了 190%、187%、157% 和 170%,表明 1C/2B、1C/2G、1A/2B 的增强约束效果优于 1C/1B/1G.

相比标准试件 P0,试件 C2G1 和 C1A1G1 抗压强度分别提高了 235% 和 233%,且明显大于试件 C1B2、C1G2、C1B1G1 和 A1B2 抗压强度.表明碳纤维体积分数增大时,增强约束效果明显.

#### 3.2 HFRP 强度计算<sup>[7]</sup>

##### 3.2.1 弹性模量

HFRP 弹性模量较好地符合混合定律关系,如 I、II、III 3 种纤维混杂的弹性模量

$$E = E_I V_I + E_{II} V_{II} + E_{III} V_{III} \quad (1)$$

式中, $E$  为弹性模量; $V$  为纤维相对体积分数,下脚标表示纤维种类.据式(1)计算的各混杂纤维布弹性模量见表 4.

##### 3.2.2 破坏强度

一般采用混杂效应系数  $R_e$  定量描述混杂效应

$$R_e = K^2 \varphi (1 - V_{LE}) \quad (2)$$

式中, $\varphi$  为分散度系数; $K$  为铺层方式参数(层间混杂时  $K = 1$ ); $V_{LE}$  为低延伸率纤维布体积分数,本试验中 HFRP 混杂效应系数见表 5.

表4 HFRP弹性模量、侧向约束应力

Table 4 Elastic modulus and restraints stress of HFRP

试件编号	弹性模量/GPa	约束应力/MPa
B2	93.000	18.686 7
C1B1	175.757	17.967 5
C1G1	165.121	17.000 2
A1B1	106.292	11.846 2
C1B2	148.008	22.241 6
C1G2	134.116	20.326 9
C2G1	196.435	26.806 7
A1B2	102.053	22.163 5
C1B1G1	141.034	19.865 6
C1A1G1	148.026	23.439 6

表5 试件混杂效应系数  $R_e$  及破坏强度

Table 5 Hybrid effect coefficient  $R_e$  and bearing capacity of specimens

试件编号	$\varphi$	$V_{LE}$	$R_e$	$f_t$
B2	—	—	—	4 100
C1B1	0.5	0.495 5	0.252 2	2 666
C1G1	0.5	0.492 6	0.253 7	2 507
A1B1	0.5	0.531 7	0.234 2	1 632
C1B2	0.333 3	0.329 4	0.223 5	2 193
C1G2	0.333 3	0.326 8	0.224 4	1 989
C2G1	0.333 3	0.660 1	0.113 3	2 649
A1B2	0.333 3	0.362 1	0.212 6	2 079
C1B1G1	0.333 3	0.328 1	0.223 9	1 951
C1A1G1	0.333 3	0.313 9	0.228 7	2 203

发生多级破坏是 HFRP 区别于单一 FRP 的一个重要破坏特征。低延性纤维首先断裂,之后荷载由高延伸率纤维承受,直至整个试件破坏,HFRP 破坏强度为

$$f_t = [E_I V_I S_I + E_{II} V_{II} S_{II} + E_{III} V_{III} S_{III}] V_f \epsilon_{LE} (1 + R_e) \quad (3)$$

式中,  $V_f$  为纤维体积分数,本试验中取 0.75;  $S$  为修正系数,它考虑了纤维与基体的匹配、界面及复合工艺的影响,修正试验值与理论值的偏差,本试验中取 0.80。

### 3.2.3 HFRP 侧向约束应力

HFRP 约束柱承受轴向压力时,混凝土发生横向膨胀,其膨胀受到 HFRP 的约束。当 HFRP 达到抗拉强度时,混凝土柱破坏,此时 HFRP 对混凝土提供的最大侧向约束应力为

$$f_1 = \frac{2f_{t1}t_1}{D} \quad (4)$$

式中,  $f_{t1}$  为 HFRP 抗拉强度,由式(3)求得,见表 5;  $t_1$  为混杂纤维总厚度;  $D$  为圆柱体直径。

图 2 为 HFRP 约束混凝土柱抗压强度与最大侧向约束力关系图。可知,随着最大侧向约束应力的增大,约束混凝土柱的抗压强度随之增大,两者之间近似线性关系。

### 3.3 HFRP 约束混凝土强度模型

目前单一 FRP 约束混凝土强度模型大都采用下述形式

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (5)$$

式中,  $f'_{co}$  和  $f'_{cc}$  分别为无约束和约束混凝土的抗压强度;  $k_1$  为强度约束系数;  $f_1$  为 FRP 侧向约束应力。

许多学者针对单一 FRP 试验结果提出了  $k_1$  的不同表达式。表 6 将作者测得的强度值与已有强度模型计算值进行了对比。表 7 为 HFRP 约束混凝土强度模型的统计分析指标。

由表 6~7 可知,对于 HFRP 约束试件, Lem and Teng 模型的强度计算值明显小于试验值,试验值与计算值之比的平均值为 1.29; Toutanji 模型建立在 CFRP 约束混凝土的基础上,强度计算值明显大于试验值,试验值与计算值之比的平均值为 0.88; Karbhari & Gao 模型的试验值与计算值之比的平均值为 1.21。这说明单一 FRP 约束混凝土的强度模型不能很好地反映 HFRP 约束混凝土的强度,需要建立 HFRP 约束混凝土的强度模型。

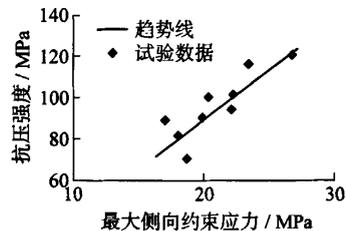


图2 约束柱抗压强度与最大侧向约束应力的关系  
Fig.2 Relationship between compressive strength and maximum restraints stress

表 6 已有模型计算值与试验值的对比

Table 6 Comparison between calculating results and experimental results

试件编号	承载力 试验值/ MPa	计算值 $f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$			
		Karbhari&Gao 模型 <sup>[8]</sup> $k_1 = 2.1 \left(\frac{f_1}{f'_{co}}\right)^{-0.13}$	Toutanji 模型 <sup>[9]</sup> $k_1 = 3.5 \left(\frac{f_1}{f'_{co}}\right)^{-0.15}$	Lem and Teng 模型 <sup>[10]</sup> $k_1 = 2$	本文拟合模型 $k_1 = 3.1$
P0	35.0	—	—	—	—
B2	70.5	77.4	106.5	72.2	90.8
C1B1	81.8	76.1	104.5	70.9	90.7
C1G1	88.8	74.2	101.3	69	87.7
A1B1	83.9	63.6	83.78	58.7	71.7
C1B2	101.4	84.5	118.3	79.5	104.0
C1G2	100.4	80.8	112.2	75.7	98.0
C2G1	120.9	93.3	132.7	88.6	118.1
A1B2	94.4	84.4	118.1	79.3	103.7
C1B1G1	90.0	79.9	110.7	74.7	96.6
C1A1G1	116.4	86.9	122.1	81.9	107.7

根据试验数据, 本文采用最小二乘法进行线性回归, 拟合 HFRP 约束混凝土圆柱的强度计算公式如下, 并将理论计算值列于表 6.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.1 \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (6)$$

由表 7 知, 试验值与式(6)计算所得强度值吻合良好, 相关系数为 0.932 3, 其比值的平均值为 1.00, 标准差为 0.08, 变异系数为 8.1%.

### 4 变形性能

HFRP 约束改善了试件变形能力, 提高了极限压应变, 用  $\mu_\Delta$  表示 HFRP 的变形约束效果.

$$\mu_\Delta = \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} \quad (7)$$

式中,  $\epsilon_{cc}$  为 HFRP 约束混凝土柱峰值应变;  $\epsilon_{co}$  为未约束混凝土柱峰值应变.

表 8 为 HFRP 约束混凝土柱的  $\mu_\Delta$  值. 可以看出, 相对未约束混凝土柱, HFRP 约束混凝土圆柱体的峰值应变显著提高. 2 层纤维布约束时, 试件 C1B1、C1G1 和 A1B1 的  $\mu_\Delta$  值分别为 4.63、4.93 和 5.76. 从极限应变考虑, 1A1B 增韧效果良好. 3 层布约束时, 试件 C1B2、C1G2、A1B2 和 C2G1 的  $\mu_\Delta$  值分别为 6.11、6.67、6.74 和 7.49, 2C/1G 增韧效果最好.

表 8 HFRP 约束混凝土圆柱  $\mu_\Delta$  值

Table 8  $\mu_\Delta$  of circular columns confined by HFRP

试件编号	$\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\mu_\Delta$	试件编号	$\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\mu_\Delta$
P0	0.003 21	0.017 193	5.36	C1G2	0.003 21	0.021 405	6.67
C1B1	0.003 21	0.014 876	4.63	C2G1	0.003 21	0.024 044	7.49
C1G1	0.003 21	0.015 833	4.93	A1B2	0.003 21	0.021 642	6.74
A1B1	0.003 21	0.018 486	5.76	C1B1G1	0.003 21	0.016 887	5.26
C1B2	0.003 21	0.019 604	6.11	C1A1G1	0.003 21	0.021 850	6.81

表 7 HFRP 约束混凝土强度模型的统计指标

Table 7 Statistic indexes of strength models with concrete confined by HFRP

模型	$f'_{cc}$ 试验值与计算值之比		
	平均值	标准差	变异系数/%
Karbhari&Gao 模型	1.21	0.09	7.3
Toutanji 模型	0.88	0.07	7.8
Lem and Teng 模型	1.29	0.09	7.2
本文拟合模型	1.00	0.08	8.1

基于试验数据,作者采用最小二乘法进行线性回归,当 HFRP 充分发挥其侧向约束作用,所提供的侧向约束应力最大时,约束混凝土圆柱体的峰值应变计算公式为

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{\infty}} = 2.9 + 5.45 \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (8)$$

## 5 应力-应变曲线及其数学模型

### 5.1 应力-应变全曲线

本试验成功测得了试件的应力-应变全过程曲线。

图 3(a)为试件 P0 及 2 层布约束试件 B2、A1B1、C1B1、C1G1 的应力-应变全曲线。试件 B2、A1B1、C1B1 和 C1G1 的应力-应变全曲线分为上升段、强化段、下降段。

加载初期, HFRP 对混凝土约束作用很小,约束柱的变形与未约束柱相近;随着荷载的增大,混凝土的侧向变形增大, HFRP 的约束作用增大,使得 HFRP 约束试件上升段第 1 个拐点的荷载值明显高于试件 P0 极限荷载,但两者刚度相近。

达到上升段第 1 拐点荷载时,混凝土裂缝发展充分,侧向变形明显,由于 FRP 的约束,试件进入应变强化阶段,荷载继续增大,变形增大较快,试件刚度相比上升段明显降低。试件 C1G1 的刚度最大,其次为试件 C1B1、A1B1,试件 B2 刚度最小,这与 FRP 的约束刚度相对应,说明 HFRP 约束刚度对试件的刚度有显著影响。

达到极限承载力后, HFRP 发生不同程度的破坏,承载力下降较快。试件 C1G1 发生多级破坏,低延伸率 CFRP 断裂后应力传递给高延伸率 GFRP,变形继续增加。GFRP 断裂后,试件迅速压溃。试件 C1B1 同样发生多级破坏,但承载力下降快;试件 B2 断裂级数较多,但变形能力较差;而试件 A1B1 多级破坏不明显,达到极限承载力后突降至极限承载力的 30% 附近,之后未断裂的纤维和混凝土共同作用,荷载下降缓慢,变形明显增加。

图 3(b)为试件 P0 及 2 种布 3 层约束试件 A1B2、C1B2、C1G2、C2G1 应力-应变全曲线,可看出, HFRP 约束混凝土柱的上升段刚度与未约束试件相近。

由于试件 A1B2、C1B2、C1G2、C2G1 的 HFRP 约束刚度不同,强化段各试件的刚度明显不同,且均小于上升段刚度,从大到小排序为 C2G1 > C1B2 > C1G2 > A1B2。试件 C1B2、C1G2 和 A1B2 为低延伸率纤维与高延伸率纤维布 1:2 混杂约束,其中 1C/2B 增强效果较好,1A/2B 增韧效果较好。试件 C2G1 为低延伸率碳纤维与高延伸率玻璃纤维布 2:1 混杂,其承载力、峰值应变明显大于 1:2 混杂约束试件。

试件 C2G1 达到极限承载力后突降至零,变形基本无增长,为脆性破坏;试件 C1B2、C1G2 和 A1B2 达到极限承载力后突降至无约束混凝土承载力附近,之后承载力缓慢降低,变形继续增长。

图 3(c)为试件 P0 及 3 种布 3 层约束试件 C1A1G1、C1B1G1 应力-应变全曲线,试件 C1A1G1 强化段刚度、峰值应变、极限承载力均大于试件 C1B1G1。试件 C1B1G1 达到极限承载力后突降至无约束混凝土的承载力附近,而后承载力缓慢降低,变形不断增大;试件 C1A1G1 达到极限承载力后突降至零,变形增加

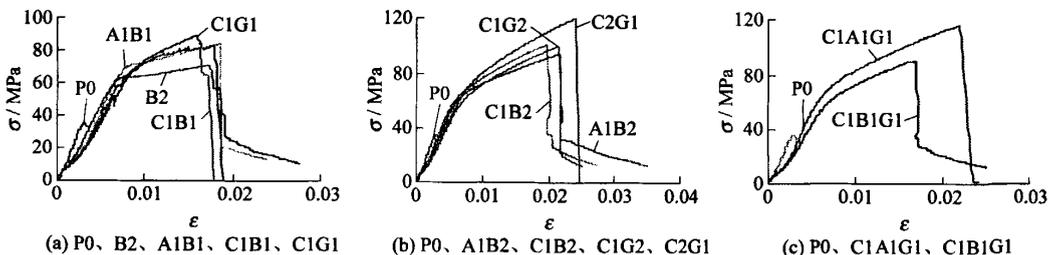


图 3 试件应力-应变全曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens

很小.

### 5.2 第3段直线段与应力轴的交点

分析由试验测得的应力-应变曲线后发现, 上升曲线由3部分组成, 2个直线段加中间的抛物线段, 见图4. 基于本试验数据, 拟合第3段直线段与应力轴的交点  $f'_o$  的计算公式为

$$f'_o = f'_{co} + f_1 \quad (9)$$

### 5.3 应力-应变模型

基于试验结果, 提出了 HFRP 约束混凝土圆柱体的应力-应变曲线数学表达式. 假设: 1) 应力-应变曲线的第1段为直线, 斜率为无约束混凝土弹性模量  $E_c$ ; 2) 应力-应变曲线第2段为抛物线; 3) 应力-应变曲线的第3段为直线, 斜率为  $E_2$ ; 4) 第2段与第1段、第3段光滑连接, 相交点处轴向应变分别为  $\epsilon_{co}$ 、 $\epsilon_t$ , 斜率分别为  $E_c$ 、 $E_2$ ; 5) 第3段直线段的延长线与应力轴的交点为  $f'_o$ ; 6) 第3段直线段终点即为极限承载力点, 见图4.

HFRP 约束混凝土的应力-应变模型为

$$\text{当 } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{co}, \sigma_c = E_c \epsilon_c \quad (10a)$$

$$\text{当 } \epsilon_{co} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t, \sigma_c = \lambda_1 (\epsilon_c^2 + \epsilon_{co}^2) + \lambda_2 \epsilon_c \quad (10b)$$

$$\text{当 } \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}, \sigma_c = f'_o + E_2 \epsilon_c \quad (10c)$$

公式(10b)中

$$\lambda_1 = \frac{(E_c - E_2)^2}{4[(E_c - E_2)\epsilon_{co} - f'_o]} \quad (11)$$

$$\lambda_2 = \frac{(E_c^2 - E_2^2)\epsilon_{co} - 2E_c f'_o}{2[(E_c - E_2)\epsilon_{co} - f'_o]} \quad (12)$$

公式(10c)中

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_o}{\epsilon_{cc}} \quad (13)$$

$$\epsilon_t = \frac{2f'_o}{E_c - E_2} - 2\epsilon_{co} \quad (14)$$

图5为试件 C1B1、C2G1、C1A1G1 和 C1B2 的试验曲线与拟合曲线的比较, 图中实线与虚线分别为试验曲线与拟合曲线, 可见试验曲线与拟合曲线吻合较好.

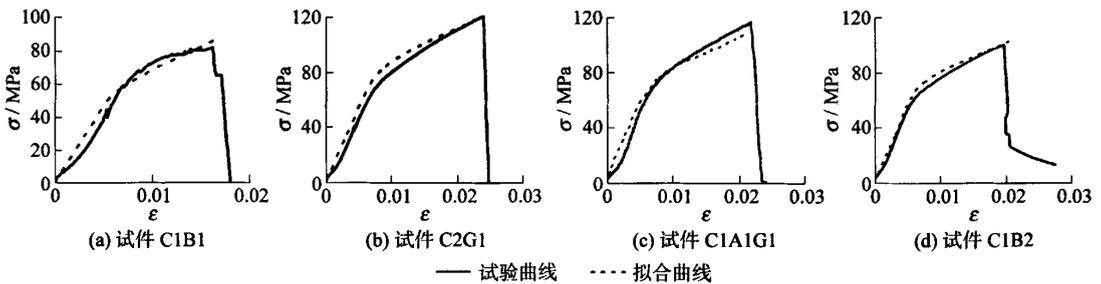


图5 试件拟合曲线与试验曲线的比较

Fig. 5 Comparison between calculated curve and experimental curve of specimen

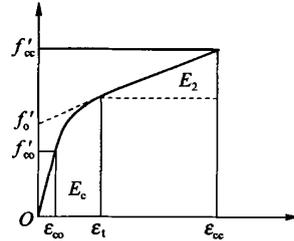


图4 HFRP 约束混凝土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of concrete confined by HFRP

## 6 结论

1)相比未约束混凝土试件,1C/1G、1C/1B和1A/1B混杂约束试件的抗压强度分别提高了154%、134%和140%,峰值应变分别提高了393%、363%和476%。低延伸率与高延伸率纤维布1:1混杂,1C/1G增强效果良好,1A/1B增韧效果良好。

2)相比未约束混凝土试件,1C/2G、1C/2B和1A/2B混杂约束试件的抗压强度分别提高了187%、190%和170%,峰值应变分别提高了567%、511%和574%。低延伸率与高延伸率纤维布1:2混杂,1C/2B增强效果良好,1A/2B增韧效果良好。

3)相比未约束混凝土试件,2C/1G、1C/1A/1G和1C/1B/1G混杂约束试件的抗压强度分别提高了245%、233%和157%,峰值应变分别提高了649%、581%和426%。C2G1、C1A1G1的抗压强度、峰值应变提高明显,但多级破坏不明显,延性较差。

4)HFRP约束混凝土圆柱体的强度约束系数为3.1。

5)提出了HFRP约束混凝土圆柱体应力-应变曲线的3段式模型,模型与试验曲线良好吻合。

### 参考文献:

- [1] 邓宗才,李建辉,杜修力. 混杂FRP及其加固混凝土结构的性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, 30(4): 50-54.  
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, DU Xiu-li. Hybrid fiber reinforced plastics and properties for strengthening concrete structures [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006, 30(4): 50-54. (in Chinese)
- [2] 邓宗才, 阚德新, 杜修力. 聚乙烯纤维布约束混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(10): 69-72.  
DENG Zong-cai, KAN De-xin, DU Xiu-li. Experimental study on behavior of concrete short columns confined by polyethylene fiber sheet under axial compression[J]. Industrial Construction, 2007, 37(10): 69-72. (in Chinese)
- [3] SAMAAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1025-1031.
- [4] LI Jian-chun, BIJIAN S, LIN Ye, et al. Behavior of concrete beam-column connections reinforced with hybrid FRP sheet [J]. Composites Structures, 2002, 57(1-4): 357-365.
- [5] HAKAN N, BJORN T. Testing of hybrid FRP composites beams in bending[J]. Composites Part B, 2004, 35(8): 27-33.
- [6] 熊光晶, 姜浩, 杨建中, 等. 混杂纤维复合材料及其在混凝土梁柱加固中的应用研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(9): 11-13.  
XIONG Guang-jing, JIANG Hao, YANG Jian-zhong, et al. Hybrid fiber composite and its application research in strengthening concrete beams and columns[J]. Industrial Construction, 2001, 31(9): 11-13. (in Chinese)
- [7] 杨建中. 混杂纤维复合材料的匹配及其在混凝土结构加固中的应用研究[D]. 广东: 汕头大学工学院, 2001.  
YANG Jian-zhong. Matching of hybrid fiber composites and their applied research in strengthening concrete structures[D]. Guangdong: Engineering school of Shantou University, 2001. (in Chinese)
- [8] KARBHARI V M, GAO Y. Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 185-193.
- [9] TOUTANJI H A. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets [J]. Materials Journal, 1996, 96(3): 397-404.
- [10] 滕锦光, 陈建飞, SMITH S T, 等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 144-185.

## Experimental Study on Mechanical Property of Concrete Circular Columns Confined by HFRP Under Axial Compression

DENG Zong-cai<sup>1</sup>, KAN De-xin<sup>2</sup>, ZHAI Yan-zhi<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Civil Department, China Huan Qiu Contracting & Engineering Corp, Beijing 100029, China;

3. Beijing 1st Quality Inspection Institute of Construction Engineering, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on the experiment of concrete circular columns confined by hybrid fiber sheets of carbon FRP (CFRP) sheet, aramid FRP (AFRP) sheet, glass FRP (GFRP) sheet, fiber reinforced Basalt polymer (BFRP) sheet under axial compression, this paper analyzes failure configuration, bearing capacity, peak strain and stress-strain curve. Experimental results show that: 1) Comparing with the specimen without being confined, bearing capacity of specimens confined by 1C/1G, 1C/1B and 1A/1B improves 154%, 134% and 140% respectively, peak strain improves 393%, 363% and 476% respectively; 2) Bearing capacity of specimens confined by 1C/2G, 1C/2B and 1A/2B improves 187%, 190% and 170% respectively, peak strain is improving 567%, 511% and 574% respectively; 3) Bearing capacity of specimens confined by 2C/1G, 1C/1A/1G and 1C/1B/1G improves 245%, 233% and 157% respectively, peak strain improves 649%, 581% and 426% respectively; 4) Based on experimental data, confining coefficient is presented to be 3.1; 5) A tri-linear model is presented to predict the stress-strain response of concrete circular columns confined by HFRP. The theoretical curves agree well with the experimental data.

**Key words:** HFRP; Basalt Fiber Reinforced Polymer; mechanical property; confining coefficient

(责任编辑 郑筱梅)