

HFRP 约束混凝土圆柱应力-应变关系

邓宗才, 李建辉, 董宏英, 曹 炜

(北京工业大学 城市与工程防灾减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 试验研究了碳纤维布、芳纶纤维布、玻璃纤维布和玄武岩纤维布层间混杂约束混凝土圆柱体的应力-应变关系。结果表明, 混杂纤维增强聚合物(hybrid fiber reinforced polymer, HFRP)可明显提高圆柱体的强度, 尤其能显著改善其延性。对试验结果与国内外大量研究成果进行对比分析, 建立了 HFRP 约束混凝土圆柱体的应力-应变曲线模型。该模型使用轴向、横向和体积应变来衡量约束混凝土的内部损伤, 以体现 HFRP 变约束力对被约束混凝土微观损伤的影响, 使模型简化且具有明确的物理含义; 该模型采用了更能真实体现约束效应的割线模量, 并引入了依赖于混凝土本身特性的割线模量软化系数进行计算。与试验曲线的比较表明, 该理论模型与试验曲线吻合良好。

关键词: 纤维增强聚合物; 混杂; 混凝土柱; 约束; 应力-应变关系

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)11-1706-07

纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)约束混凝土的应力-应变关系是材料内部微观机理的宏观表现, 更是 FRP 加固混凝土柱抗震设计的基础。国内外学者对此进行了大量的试验和理论研究, 并提出一些理论模型, 它们可分为 3 类, 第 1 类是基于箍筋明显不同^[1]; 第 2 类是采用瞬变的弹性模量筋约束混凝土应力-应变关系而得出, 它采用常约束, 精度高, 但是计算繁琐, 不利于实际使用^[2]; 第 3 类是通过大量试验数据确定特殊点(转折点、破坏点等), 从而建立分段模型, 它回避了 FRP 约束力的变化过程, 但是它在两段连接处的精度较差, 且没有明确的物理含义^[3]。因此, 本文在试验研究的基础上, 分析了混杂纤维增强聚合物(hybrid fiber reinforced polymer, HFRP)的特性以及侧向约束应力、约束刚度等参数对 HFRP 约束混凝土性能的影响, 基于第 3 类的应力-应变模型, 从混凝土内部损伤的角度建立了简单准确且具有明确物理含义的 HFRP 约束混凝土应力-应变模型。

1 试验研究

1.1 材料性能

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

表 1 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	延伸率/%
碳纤维布	0.167	4 420	200	1.6
芳纶纤维布	0.193	2 060	85	>1.5
玄武岩纤维布	0.170	4 100	67	2.9
玻璃纤维布	0.172	3 000	51	3.0

收稿日期: 2009-06-30.

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

作者简介: 邓宗才(1961—), 男, 陕西扶风人, 教授.

1.2 试件

水泥采用普通硅酸盐 P. O. 32. 5, 碎石最大粒径为 20 mm, 混凝土配合比水: 水泥: 砂: 石子 = 170: 360: 647: 1 100.

混凝土圆柱试件直径 $D = 150$ mm, 高度 $H = 300$ mm, 浇注 24 h 后脱模, 在 25 °C 养护室养护 28 d 后开始粘贴纤维布. 实测立方体抗压强度为 36. 6 MPa.

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. 试件编号及加固参数详见表 2. 表中字母 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, 字母后面的数值代表纤维布的层数, 如 C1G1 表示 1 层碳纤维布与 1 层玻璃纤维布混杂加固.

表 2 圆柱试件加固参数
Table 2 Details of column specimens

试件编号	加固类型	粘贴次序(由内到外)	片材/层	加固方式
P0	未加固	0	0	无
C1G1	CFRP、GFRP 布各 1 层	1C/1G	2	全包
C1B1	CFRP、BFRP 布各 1 层	1C/1B	2	全包
C1B2	1 层 CFRP 布和 2 层 BFRP 布	1C/2B	3	全包
C1G2	1 层 CFRP 布和 2 层 GFRP 布	1C/2G	3	全包
C2G1	2 层 CFRP 布和 1 层 GFRP 布	2C/1G	3	全包
C1B1G1	CFRP、BFRP、GFRP 布各 1 层	1C/1B /1G	3	全包
C1A1G1	CFRP、AFRP、GFRP 布各 1 层	1C/1 A /1G	3	全包

1.4 加载方案

试验用 INSTRON-8506 四立柱真三轴液压伺服试验机, 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.

1.5 试验现象与结果

1.5.1 破坏形态

典型试件的破坏形态见图 1. HFRP 布的断裂形态有 3 种: 1) 断口齐整但无纤维拔出, 如试件 C2G1 (图 1(a)); 2) 断口齐整且有纤维拔出, 如试件 C1B1、C1B2 (图 1(b)); 3) 断口参差不齐, 如试件 C1G1、C1G2、C1B1G1 和 C1A1G1 (图 1(c)). 将外粘纤维布剥开后, 发现核心混凝土均成锥形破坏, 如图 1(d).

1.5.2 试验结果

试验结果列于表 3, 极限状态是指试件达到峰值荷载时的状态, 各试件的应力-应变全曲线见图 2.

由表 3 可知: 1) 随着纤维布加固量的增加, HFRP 约束混凝土圆柱的抗压强度增大. 与标准试件 P0 相比, 2 层纤维布加固试件的抗压强度提高约 130% ~ 150%; 而 3 层纤维布加固试件的抗压强度提高高达 160% ~ 250%. 2) 随着碳纤维体积分数增大, HFRP 的增强效果越明显. 试件 C2G1 的抗压强度最大, 达 120. 9 MPa, 明显高于其他 3 层纤维布加固试件 C1B2、C1G2、C1B1G1 和 C1A1G1. 3) HFRP 约束混凝土圆柱的极限应变显著提高. 与标准试件 P0 相比, HFRP 约束圆柱的极限轴向应变提高高达 2. 5 ~ 5. 6 倍.

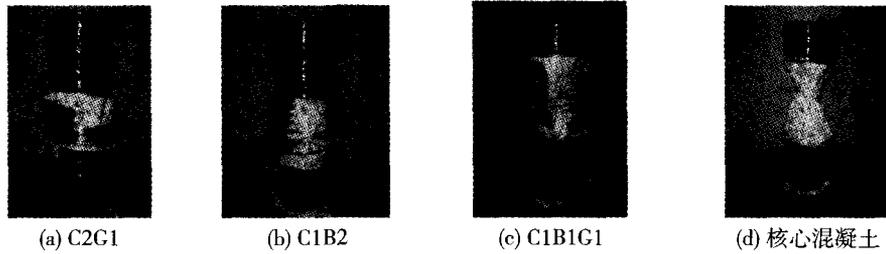


图1 典型试件破坏形态

Fig.1 Failure configuration of typical specimens

表3 HFRP约束混凝土圆柱体试验结果

Table 3 Experimental results of HFRP-confined concrete circular columns

试件编号	抗压强度			极限轴向应变		
	试验值/MPa	计算值/MPa	比值	试验值/ $\mu\epsilon$	计算值/ $\mu\epsilon$	比值
P0	35.0			3 210		
C1G1	88.8	90.7	0.98	11 533	14 011	0.82
C1B1	81.8	92.5	0.88	11 076	14 519	0.76
C1B2	101.4	100.0	1.01	17 254	16 853	1.02
C1G2	100.4	96.8	1.04	18 105	15 916	1.14
C2G1	120.9	106.7	1.13	21 044	20 118	1.05
C1B1G1	90.0	98.4	0.91	14 137	16 388	0.86
C1A1G1	116.4	101.9	1.14	19 350	17 373	1.11
均值			1.01			0.97

由图2可知,在加载初期,HFRP对混凝土约束作用很小,约束柱的变形与标准柱基本相近,即初始刚度基本相同;随着荷载的增大,混凝土的侧向变形增大,HFRP的约束作用随之增大,从而使HFRP约束柱的刚度增大,随着纤维布层数的增多,柱的刚度增大.当HFRP布达到低延性纤维的断裂延伸率时,HFRP布发生破坏,试件承载力迅速下降,应力-应变曲线出现陡降.除试件C2G1以外,HFRP约束混凝土圆柱均表现为良好的延性破坏.

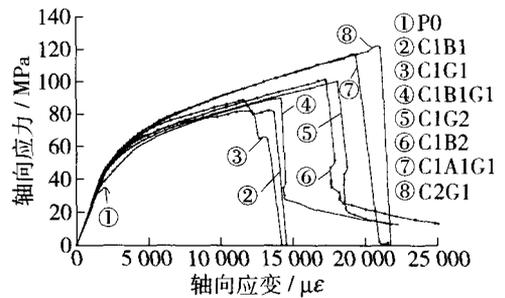


图2 应力-应变全曲线

Fig.2 Stress-strain curves of specimens

2 强度模型

HFRP弹性模量、抗拉强度和侧向约束刚度与侧向约束应力(f_1)的计算结果列于表4^[1].由图3可知,随着 f_1 的增大,约束混凝土柱的抗压强度随之增大,两者之间近似呈线性关系.

文献[2]采用了Richart等人提出的钢材约束混凝土强度计算公式

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_1}{f'_{co}} \tag{1}$$

式中, f'_{co} 和 f'_{cc} 分别为无约束和约束混凝土抗压强度; k_1 为约束有效性系数,Richart认为 $k_1 = 4.1$.

表 4 HFRP 弹性模量、抗拉强度、侧向约束刚度、约束应力

试件编号	弹性模量	抗拉强度	侧向约束刚度	f_l
C1G1	165 121	2 428	995	14.6
C1B1	175 757	2 582	1 053	15.5
C1B2	148 008	2 124	1 334	19.1
C1G2	134 114	1 926	1 218	17.5
C2G1	196 435	2 565	1 767	23.1
C1B1G1	141 033	2 025	1 276	18.3
C1A1G1	148 026	2 133	1 400	20.2

近来研究表明, 针对钢材约束混凝土的轴压强度模型不能直接用于 FRP 约束混凝土, 其计算结果对 FRP 约束混凝土是不安全的. 所以目前建立了一些针对 FRP 约束混凝土的强度模型, 这些模型大多采用式(1)的形式, 对式中 k_1 值加以修改^[4-9]. k_1 值利用各自试验数据, 通过线性回归求得, 无明确的物理、力学含义.

Mander 模型、Guralnick 模型分别基于混凝土多轴破坏强度、莫尔强度理论^[10-11]. 各模型的理论值与本文试验值的比较列于表 5. 由表 5 可知, Mander 模型与本试验数据吻合良好, 采用该模型计算 HFRP 约束混凝土强度, 结果见表 3.

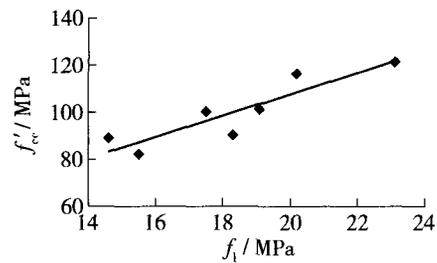


图 3 约束柱抗压强度与侧向约束应力的关系
Fig. 3 Relationship between the compressive strength and the lateral confined stress for confined concrete columns

表 5 本文试验结果与约束混凝土强度模型的比较

Table 5 Comparison of confined concrete strength models with experimental results

模型	计算公式	f'_{cc} 试验值与计算值之比		
		平均值	标准差	变异系数/%
Karbhari	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 2.1(f_l/f'_{co})^{0.87}$	1.30	0.11	8.5
Samaan	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 6(f_l^{0.7}/f'_{co})$	1.23	0.11	9.3
Miyauchi	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 2.98(f_l/f'_{co})$	1.11	0.08	7.3
Spoelstra	$f'_{cc}/f'_{co} = 0.2 + 3(f_l/f'_{co})^{0.5}$	1.20	0.10	8.7
Saafi	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 2.2(f_l/f'_{co})^{0.84}$	1.25	0.11	8.5
Lam	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 2(f_l/f'_{co})$	1.39	0.11	8.1
Toutanji	$f'_{cc}/f'_{co} = 1 + 2.3(f_l/f'_{co})^{0.85}$	1.22	0.10	8.4
Mander	$f'_{cc}/f'_{co} = -1.25 - 2(f_l/f'_{co}) + 2.25(1 + 7.94f_l/f'_{co})^{0.5}$	1.01	0.10	9.8
Guralnick	$f'_{cc}/f'_{co} = 0.616 + (f_l/f'_{co}) + 1.57(f_l/f'_{co} + 0.06)^{0.5}$	1.22	0.11	8.7

3 HFRP 约束混凝土极限应变

已有研究表明, FRP 约束混凝土在极限状态时的横向应变 ϵ_{lu} 与轴向应变 ϵ_{cu} 的比值趋于稳定, 该值主要与 FRP 的形式 (FRP 布、FRP 管等形式) 和侧向约束刚度有关^[12]. 极限横向应变与轴向应变比值 μ_p 为

$$\mu_p = -\frac{\epsilon_{lu}}{\epsilon_{cu}} = C_1 K_{le}^{-C_2} \tag{2}$$

式中, C_1 、 C_2 为参数, 分别取 6.21 和 0.63^[13]; K_{le} 为 FRP 侧向有效约束刚度, 且有

$$K_{le} = \frac{2E_f t_f}{Df'_{co}} \tag{3}$$

式中, E_f, t_f 分别为纤维材料的弹性模量、厚度.

HFRP 约束混凝土的 ϵ_{lu} 小于低延性纤维的极限断裂应变 ϵ_{fu} , 主要原因是: 1) 混凝土横向急剧膨胀, HFRP 与混凝土之间存在摩擦; 2) 由于混凝土的刚度软化, 导致 HFRP 处于横向和竖向压力的二维受力状态; 3) HFRP 中各纤维材料之间的层铺方式、界面粘结对横向应变有影响. 因此 ϵ_{lu} 可用下式计算

$$\epsilon_{lu} = \xi_f \epsilon_{fu} \quad (0 \leq \xi_f \leq 1.0) \tag{4}$$

式中 ξ_f 为 HFRP 的有效系数, 对于环氧树脂基体, $\xi_f = 0.66^{[13]}$. 根据本文符号使用规定, 压应变为正, 拉应变或者膨胀应变为负, 故 ϵ_{lu} 为负值. ϵ_{cu} 的计算结果列于表 3, 可知, 计算结果与实测值吻合良好.

4 新 HFRP 约束混凝土应力-应变曲线模型

Pantazopoulou 等^[14-15] 研究表明, 混凝土的体积应变可用来衡量约束混凝土的内部损伤. 因此, 将 HFRP 约束混凝土应力-应变曲线分为 3 阶段: 线弹性变形阶段、过渡阶段和线性强化阶段^[16], 见图 4. $\epsilon_{c,cr}$ 与 $\epsilon_{c,v0}$ 分别是混凝土开裂与体应变为 0 时的应变.

体应变 ϵ_v 按下式计算

$$\epsilon_v = \epsilon_c + \epsilon_1 + \epsilon_\theta = \epsilon_c + 2\epsilon_1 \tag{5}$$

式中 $\epsilon_c, \epsilon_1, \epsilon_\theta$ 分别为轴向应力、横向应变和环向应变, 对于圆柱体, $\epsilon_1 = \epsilon_\theta$.

1) 线弹性变形阶段的应力-应变曲线关系为

$$f_c = E_c \epsilon_c \quad (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c,cr}) \tag{6}$$

式中, f_c 为轴向压应力; E_c 为混凝土初始弹性模量, 可取试验值.

2) 过渡阶段的应力-应变曲线关系为

$$f_c = E_{sec} \epsilon_c \quad (\epsilon_{c,cr} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c,v0}) \tag{7}$$

式中割线模量 $E_{sec} = E_c \frac{1}{1 + \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_{1,cr})}{\beta}}$, β 为常数, 取 0.007 845 4.

3) 线性强化阶段的应力-应变曲线关系为

$$f_c = f_{c,v0} + E_{ct}(\epsilon_c - \epsilon_{c,v0}) \quad (\epsilon_{c,v0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \tag{8}$$

式中, $f_{c,v0}$ 为体积应变为 0 时的轴向压应力; 第 3 阶段直线段斜率 $E_{ct} = \frac{f_{cc} - f_{c,v0}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{c,v0}}$, 对于普通混凝土, $\epsilon_{c,v0} = 3\ 300 \mu\epsilon$.

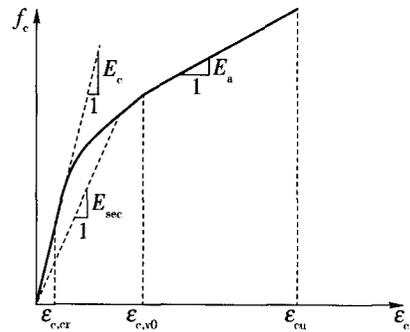


图 4 典型的应力-应变曲线

Fig. 4 Typical stress-strain curves for FRP-confined concrete

5 新模型的验证

为验证本文建立的新模型, 将理论曲线与试验曲线进行了比较, 详见图 5. 由图 5 看出, 理论曲线与试验曲线吻合良好, 试件 C1G1、C2G1、C1A1G1 在第 3 阶段的直线段吻合不太好, 主要与极限点的应力、应变的计算值不太准确有关, 因此本文提出的 HFRP 约束混凝土圆柱体应力-应变曲线模型简单准确, 且具有明确的物理含义.

6 结论

1) HFRP 约束混凝土圆柱体可明显提高柱的强度, 特别是显著改善其延性. 与标准试件相比, HFRP

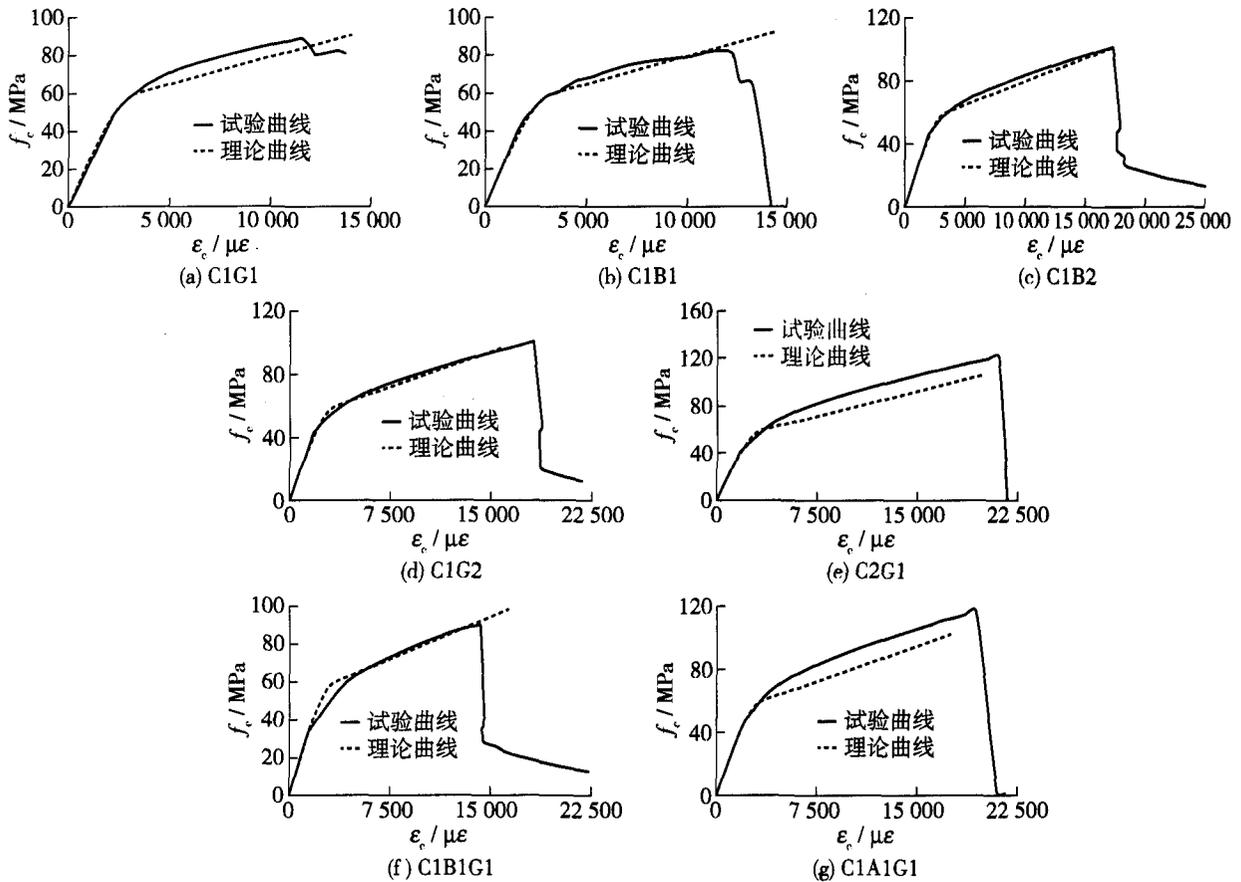


图 5 理论曲线与试验曲线对比

Fig. 5 Comparison of model with test results

约束混凝土的强度约提高 130% ~ 150%, 极限轴向压应变提高 2.5 ~ 5.6 倍。

2) 由于 FRP 是线弹性材料, 其约束性能与钢材约束有明显区别, 针对钢材约束混凝土建立的强度模型不能直接用于 FRP 约束混凝土, 其计算结果对 FRP 约束混凝土是不安全的。

3) FRP 约束混凝土圆柱在极限阶段的横向应变与轴向应变的比值趋于稳定, 该值主要与 FRP 的形式及侧向约束刚度有关。

4) 建立 HFRP 约束混凝土应力-应变曲线模型时, 以体积应变为切入点, 建立了混凝土内部损伤与 HFRP 变约束力之间的关系。从初始加载到约束混凝土内部出现微裂缝阶段, 体积应变逐渐增加, 混凝土被压缩, 但 HFRP 未发挥约束作用; 随着裂缝稳定发展, 体积应变达到正峰值之后逐渐降低为 0, 即混凝土从体积压缩过渡到体积膨胀, 该阶段 HFRP 开始发挥一定的作用, 但作用较小, 未能制约混凝土的刚度退化; 随后裂缝失稳扩展、贯通, HFRP 完全被激活, 约束混凝土的横向应变由 HFRP 横向变约束控制, 直到约束混凝土破坏为止。

5) 建立的 HFRP 约束混凝土圆柱体 3 阶段应力-应变曲线模型简单、物理意义明确, 且与试验曲线吻合良好。

参考文献:

[1] 邓宗才, 李建辉. 混杂 FRP 复合材料及其加固混凝土结构性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (4): 50-54.
 DENG Zong-cai, LI Jian-hui. Hybrid fiber reinforced plastics and properties for strengthening concrete structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006, (4): 50-54. (in Chinese)

[2] TENG J G, HUANG Y L, LAM L. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete[J]. ASCE, Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 201-210.

[3] KARBHARI V M, GAO Y. Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations

- [J]. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 185-193.
- [4] SAMAAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 1998, 126(9): 1025-1031.
- [5] MIYAUCHI K, INOUE S, KURODA T, et al. Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1999, 21: 143-150.
- [6] SPOELSTRA M R, MONTI G. FRP-confined concrete model [J]. ASCE, Journal of Composites for Construction, 1999, 3(3): 143-149.
- [7] SAAFI M, TOUTANJI, H A, LI Z. Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes [J]. ACI, Materials Journal, 1999, 96(4): 500-509.
- [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] LAM L, TENG J G. Strength models for fiber-reinforced plastic confined concrete [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 2002, 128(5): 612-623.
- [10] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [11] GURALNICK S A, GUNAWAN L. Strengthening of reinforced concrete bridge columns with FRP wrap [J]. ASCE, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2006, 11(4): 218-228.
- [12] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Behavior of concrete columns confined by fiber composite [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 1997, 123(5): 583-590.
- [13] NICOLAS S, CHRIS P P. Strain-based confinement model for FRP-confined concrete [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 825-833.
- [14] PANTAZOPOULOU S J. Role of expansion on mechanical behavior of concrete [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 1995, 89(12): 1795-1805.
- [15] PANTAZOPOULOU S J, MILLS R H. Microstructural aspects of the mechanical response of plain concrete [J]. ACI, Materials Journal, 1996, 93(5): 1-11.
- [16] 邓宗才, 李建辉. FRP约束混凝土应力-应变曲线模型研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3): 461-471. DENG Zong-cai, LI Jian-hui. Research on confinement model for FRP-confined concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(3): 461-471. (in Chinese)

Stress-strain Relationship of HFRP-confined Concrete Circular Columns

DENG Zong-cai, LI Jian-hui, DONG Hong-ying, CAO Wei

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Stress-strain relationships of concrete circular columns confined by interlaminated hybrid fiber sheets of carbon fiber, aramid fiber, glass fiber, and basalt fiber are experimentally researched in this paper. Results show that HFRP can evidently increase the strength of circular columns, and significantly improve the ductility. Based on the experimental data and analysis on the research production, a constitutive confinement model is developed for concrete circular columns confined with HFRP. The feature of the model includes the effects of HFRP confinement on the concrete microstructure by evaluating the internal concrete damage using the axial, lateral, and volumetric strains, which introduces that the confinement model is simple and has a physical and fundamental interpretation with the mechanical behavior of concrete. Meantime, the secant concrete modulus is used in the model and expressed as a function of the secant modulus softening coefficient. The HFRP-confined concrete model accurately predicts the stress-strain relationship of concrete circular columns confined with HFRP as verified in comparison with experiments.

Key words: fiber reinforced polymers; hybrid; concrete columns; confinement; stress-strain relations

(责任编辑 张苏苹)