

FRP 加固混凝土柱研究综述

黄学杰¹ 童谷生¹ 梁进修²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院 江西 南昌 330013; 2. 桂林工学院 广西 桂林 541004)

摘要: 纤维增强塑料(FRP)以其抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、易于加工等特点而倍受土木工程界的关注,在工程中有着广泛的应用。在阅读大量国内外相关文献的基础上,首先简要介绍了FRP发展的历史,着重从加固机理、应力-应变关系曲线、强度模型、偏心受压、抗震、耐久性等方面阐述了FRP约束混凝土柱的发展现状。最后指出在FRP约束混凝土柱中存在尺寸效应。讨论了在FRP加固混凝土柱的研究中还没有解决的尺寸效应问题。

关键词: FRP; 混凝土柱; 加固

中图分类号: T0375

文献标识码: A

20世纪90年代以前工程对混凝土柱的加固一般是采用加大截面法和外包钢法,这是两种比较有效的加固方法。但是它们自身都存在一些无法克服的缺点,如加大截面法会使截面的尺寸有所增加,从而减小了原建筑物的使用空间,增加了构件的自重。外包钢法需要在混凝土构件的表面贴一层钢板,由于钢板需要切割成适合截面的形状,这使得施工比较困难。此外构件的外包钢板还不耐腐蚀,需要对其进行防腐处理。

FRP(Fiber Reinforced Plastics)是一种以碳、玻璃、芳纶等纤维与环氧树脂等基体材料按一定比例拌合、加工而成的高性能复合材料。由于FRP具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、易于加工、耐久性及抗疲劳性能好的特点,将该材料用于混凝土柱加固中可以克服传统加固方法中增加构件自重、施工不便、施工周期长等诸多的缺点。目前FRP在工程中的应用已经成为工程界研究的一个热点。本文就FRP加固轴压混凝土柱的研究进展以及研究中存在的不足展开讨论。

1 FRP 发展的历史

FRP最早应用于飞机制造及航天工业。随后瑞士的Meier首先尝试采用粘贴FRP的方法对桥梁结构进行加固。后来在1994年美国洛杉矶、1995年日本神户发生大地震之后,FRP加固技术开始大规模的在日本和美国应用。我国对FRP的研究始于20世纪90年代末^[1],现在已制定了《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》2006年颁布的《混凝土结构加固设计规范》中已经包括FRP加固的技术规程^[2]。目前对FRP加固技术的研究及应用已经成为全国工程界高度重视的一项课题^[3]。

2 FRP 约束混凝土柱的理论研究

到目前为止,许多学者对FRP约束混凝土柱进行了大量的研究,取得了丰硕的成果,其研究内容主要集中在应力-应变关系曲线、强度模型以及偏心受压、抗震、耐久性等方面。

收稿日期: 2008-06-19

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(0650015)

作者简介: 黄学杰(1981-),男,山东日照人,硕士,研究方向为结构加固。

2.1 加固机理

在对 FRP 加固轴压混凝土柱的研究^[4~6]中发现,在加载的初期构件的应力-应变曲线和未加固柱的类似.这说明在加载初期,混凝土柱的性能受 FRP 约束的影响很小.随着混凝土内部裂缝发展,混凝土柱的体积开始增大,使外包的 FRP 环向受拉,反过来环向受拉的 FRP 又限制混凝土柱的增大,对混凝土柱起到一个约束的作用,从而使柱处于三向受压的状态,混凝土柱的承载能力得到提高,同时延性也可以有所增加.一般来说混凝土柱的截面形状对加固效果影响很大.如在矩形柱当中 FRP 的约束应力是分布不均匀的,只有中间核心部分受到有效的约束,其加固效果要差一点.在圆柱当中,FRP 可以对全截面都形成有效的约束,其加固效果最好.椭圆形截面柱的加固效果介于圆形柱与矩形柱之间.一般在加固矩形柱时为了更好的让 FRP 更好的发挥作用,要将矩形柱进行倒角处理^[7].

2.2 应力—应变关系模型

在对 FRP 加固混凝土柱的设计中,尤其是抗震设计,需要可靠的应力-应变关系模型.目前研究最多的是圆柱的应力-应变关系.最早研究 FRP 应力应变关系曲线的是 Fardis and Khalili^[8],他们首先建立了这样的假定:(1) FRP 只承受拉力,不承受压力;(2) FRP 变形和混凝土的变形相同.在这两个假定条件下,他们在 1982 年提出了如下公式:

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_c \left(\frac{E_c}{f'_{cc}} - \frac{1}{\varepsilon_{cc}} \right)} \quad (1)$$

式中: σ_c —混凝土的压应力

E_c —混凝土的弹性模量

ε_c —混凝土的应变

ε_{cc} —混凝土峰值应力对应的应变

f'_{cc} —约束混凝土的强度

这是第一个应力-应变关系模型.后来许多学者为了准确的拟合 FRP 约束混凝土的应力-应变关系曲线,提出了多种数学模型^[8~16].但是由于不同学者试验时所采用的纤维种类、纤维布厚度、粘结剂种类、构件截面形状以及混凝土的性能、试件的尺寸等参数不同,而且试验结果本身存在很大的离散性,导致了不同的模型计算出的结果相差很大. Lam and Teng^[17]在 2002 年收集了大量学者的数据,建立了一个应变数据库,并结合自己的实验拟合出一个模型.认为 FRP 约束混凝土的应力-应变曲线应该分为两个阶段

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}} \varepsilon_c^2, & \text{当 } 50 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \text{ 时} \\ f'_{co} + E_2 \varepsilon_c, & \text{当 } \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_2 —应力-应变曲线第二直线段的曲率

ε_t —应力-应变曲线转折点的应变

f'_{co} —无约束混凝土的抗压强度

该模型得到许多学者的认可,腾锦光在文献[18]中推荐设计时使用该模型.

2.3 强度模型

在对 FRP 加固混凝土柱的设计当中还需要考虑 FRP 外包柱的强度提高程度,这就需要建立它的强度模型^[19~24].最初这些模型是参考钢约束混凝土的强度模型,但后来经试验研究发现这些参考钢约束混凝土而建立的强度模型,其结果是不安全的,因为 FRP 材料没有屈服阶段,而且弹性模量比钢材的低,变形比钢材的要大.因此一些学者提出了针对 FRP 约束混凝土柱的强度模型,一般是都是采用如下形式:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3)$$

式中: f'_{co} —混凝土柱加固前的强度

f'_{cc} —混凝土柱加固后的强度

f_l —侧向约束应力

k_1 —强度提高系数,关于 k_1 的建议^[18]取值见表 1

表 1 FRP 加固混凝土柱计算公式 k_1 的建议取值

来源	Karbhari and Gao (1997)	Samaan et al. (1998)	Miyauchi et al. (1999)	Saafi et al. (1999)	Toutanji (1999)	Lam and Teng
k_1	$2.1(\frac{f_l}{f_{co}})^{-0.13}$	$6.0f_l^{-0.3}$	2.98	$2.2(\frac{f_l}{f_{co}})^{-0.16}$	$3.5(\frac{f_l}{f_{co}})^{-0.15}$	2

周长东^[6]在 2003 年通过试验验证认为 Lam and Teng 模型和试验吻合程度很高。

2.4 偏心受压、抗震性能、耐久性的研究

目前已经有一些学者针对 FRP 约束偏心受压混凝土柱进行了研究^[25,26],但是这些研究中所采用的应力-应变关系均是基于轴压作用下 FRP 约束圆形截面混凝土柱的实验结果. 这种理论等同于事先假设在偏心受压柱中, 约束应力分布是不均匀的, 它从横截面中的竖向应力为零的中和轴处为零然后逐渐增大到受压边缘处的最大值. 因此, 可以说目前对 FRP 约束偏心受压柱的理论研究还不是很成熟.

FRP 约束混凝土具有良好的抗震约束性能^[27-29]. 许多学者通过实验研究和理论分析证明用 FRP 加固后混凝土柱的延性和抗剪能力都可以大幅度提高, 其荷载-位移曲线, 弯矩-曲率曲线的滞回圈圆润饱满.

由于 FRP 耐久性问题提出得比较晚, 同时由于耐久性研究的周期比较长, 虽然目前研究也取得了一定的进展^[30-33], 但是还停留在实验阶段. 天津大学^[34]做了 CFRP 在海水侵蚀环境中的侵蚀性试验. 以浸泡 12 小时再烘温 12 小时为一个循环. 试验结果显示在酸碱盐的侵蚀下 FRP 组合构件的破坏始自 FRP 与混凝土界面的粘结破坏. 随着循环次数的增加, FRP 约束构件与未约束构件的强度均随循环次数增加呈先降后升再降的变化过程, FRP 加固构件耐海水腐蚀的性能明显优于未加固的构件.

3 有待研究的问题

3.1 尺寸效应问题

材料的尺寸效应是指在脆性和准脆性材料当中, 材料的力学性能不是一个常数, 而是随着尺寸变化而变化的一个变量. 如混凝土强度等级是根据直径 150 mm 的立方体试件的抗压强度标准值确定的, 如果采用边长 100 mm 的立方体试件或 200 mm 的立方体试件的抗压强度标准值则分别要乘以 1.05 和 0.95 的系数, 这是由于考虑了尺寸效应的影响. 不可否认, 在一切准脆性和脆性的材料当中都存在尺寸效应^[35].

目前对 FRP 约束混凝土柱已经进行了大量的试验, 取得丰硕的成果, 力学性能基本已经确定. 但是在实验室中, 由于试验条件的限制, 试验用的构件通常是把实际构件按比例调整的模式, 这种小尺寸构件的试验数据对实际构件设计的指导意义如何, 还需要进行进一步的研究, 目前缺乏关于这方面的数据.

3.2 FRP 预应力问题

在研究中发现如果加固过程中对 FRP 施加预应力, 则其加固效果会大大提高, 但是由于施工不便, 该方法仅限于研究, 不能应用到实际当中去, 如何研究找到一种新的加固方法来提高 FRP 的加固效果, 也是目前研究者面临的一项挑战.

4 结语

FRP 加固混凝土结构在土木工程领域中有着广阔的应用前景. 但是由于土木工程界对 FRP 的研究开始得比较晚, 理论尚不成熟, 许多方面需要进一步的研究. 目前 FRP 仍然是工程界研究的一个热点. 用 FRP 加固混凝土构件不但可以达到理想的加固效果, 还可以节省成本. 相信随着研究的深入, FRP 会在加固领域获得更为广阔的应用空间.

参考文献:

- [1] 岳清瑞. 我国碳纤维 CFRP 加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23-26.
- [2] GB 50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S].
- [3] 卢亦焱. FRP 加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 34-41.
- [4] 赵海生, 赵 鸣. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱的轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 26-30.
- [5] 赵 彤, 谢 剑. 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.
- [6] 周长东. 玻璃纤维聚合物加固混凝土柱的力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [7] 郭光玲. 柱截面形状对纤维布约束混凝土柱加固效果的影响[J]. 陕西理工学院学报, 2006, 22(4): 24-27.

- [8] Fardis, M. N. and Khalili, H. FRP – encased concrete as a structural material [J]. magazine of concrete research, 1989, 34: 197 – 202.
- [9] 敬登虎. 纤维增强复合材料约束下圆形混凝土柱应力 – 应变全曲线简化模型 [J]. 建筑科学, 2005, 21(2): 8 – 11.
- [10] 肖 岩. 碳纤维套箍约束混凝土的应力 – 应变关系 [J]. 工程力学, 2002, 19(2): 154 – 159.
- [11] 陈世欣. 纤维包裹素混凝土柱试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2001, (6): 36 – 39.
- [12] 金熙男. 增强纤维约束混凝土轴压应力 – 应变关系实验研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 47 – 53.
- [13] 吴 刚. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力 – 应变关系研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 1 – 9.
- [14] 于 清. FRP 约束混凝土柱力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [15] 朱 毅. FRP 约束混凝土方柱应力 – 应变关系模型分析 [J]. 甘肃科技, 2008, 24(1): 117 – 118.
- [16] 梁启雄. 混凝土结构加固材料 FRP 的应用 [J]. 技术园地, 2008, (1): 59 – 60.
- [17] Lam, L. and Teng, J. G. . StressStrain Models for FRP – confined Concrete [J]. Reaserch Centre for Advanced Technology in structural Engineering, 2002(5): 37.
- [18] 腾锦光. FRP 加固混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [19] Teng, J. G. and Lam, L. Behavior and Modeling of Fiber Reinforced Polyme Confined Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(11): 1713 – 1723.
- [20] Chen, C. T. Strength of concrete column confined by Composite Materials Department of Naval Architecture and Ocean Engineering [D]. Taiwan: National Taiwan University thesis, 1999.
- [21] 黄 艳. FRP 布约束混凝土圆柱轴心受压性能非线性有限元分析 [J]. 中国道铁科学, 2008, 29(1): 46 – 50.
- [22] 杨志刚. FRP 加固圆形混凝土桥柱的轴压强度模型研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, (1): 30 – 34.
- [23] Hwei – Jeng Lin, Chin – I Liao. Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material [J]. Journal of Composite Structures, 2003: 239 – 250.
- [24] J Michel Samaan, Amir Mirmiran and Mohsen Shahawy. Model of concrete confined by fiber composites [J]. Journal of Structure Engineering, 1998, 124(9): 1025 – 1031.
- [25] 陶 忠. FRP 约束方形截面钢筋混凝土偏压长柱的试验研究 [J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 5 – 7.
- [26] 冼巧玲. 粘贴碳纤维布 (CFRP) 钢筋混凝土偏压柱试验研究 [J]. 工业建筑, 2004, 34(11): 78 – 81.
- [27] 王苏岩, 韩克双. 纤维增强复合材料 FRP 加固混凝土柱的性能研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 97 – 104.
- [28] 于 清. 纤维塑料约束混凝土柱抗震性能研究综述 [J]. 地震工程与工程振, 2002, 22(2): 66 – 72.
- [29] 赵 彤, 刘明国, 等. 碳纤维布用于改善斜向受力高强混凝土柱抗震性能的研究 [J]. 土木工程学报, 2002, (6): 13 – 19.
- [30] 邓宗才. FRP 加固混凝土结构耐久性研究 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 133 – 137.
- [31] 肖建庄. 复合材料加固混凝土结构耐久性研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, (2): 16 – 21.
- [32] 肖建庄. 纤维布与混凝土间的粘结耐久性实验研究 [J]. 同济大学学报, 2005, 33(3): 291 – 296.
- [33] 祁德庆. 土木工程用 FRP 筋的耐久性研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, (2): 47 – 50.
- [34] 毕永清. 碳纤维梁、柱抗海水腐蚀的试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [35] 王文标. 结构破坏的尺度律 [J]. 1999, 3(29): 383 – 433.

A Review on Research of FRP Reinforce Concrete Column

HUANG Xue – jie¹, TONG Gu – sheng¹, LIANG Jin – xiu²

(1. School of Civil and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;

2. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The Fiber Reinforced Plastics (FRP) has aroused concern for its property of good strength, small density, anti – corrosion and easiness to processing etc. It has been widely used in civil engineering. Based on a large amount of literature in the relevant field at home and abroad, the paper introduces the history of FRP development simply, and puts the emphasis on describing the development status of FRP reinforced concrete column in terms of reinforce mechanism, stress – strain curve, intensity model, eccentric compression, seismic fortification and durability. Finally, the author puts forward that there is a size effect in the FRP reinforced column and discusses the size effect which has not been solved during the research of FRP reinforced concrete column.

Key words: FRP; concrete column; reinforce

(责任编辑: 王建华)