

文章编号:1673-2049(2011)03-0049-07

FRP 加固钢筋混凝土结构尺寸效应的研究进展

王作虎^{1,2}, 刘晶波¹, 杜修力²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;

2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为提高纤维增强复合材料(FRP)加固大尺寸钢筋混凝土构件设计的合理性,对 FRP 加固钢筋混凝土构件尺寸效应的研究现状进行了综述和分析,重点介绍了 FRP 材料、FRP 和混凝土之间的粘结强度、FRP 加固钢筋混凝土梁和 FRP 加固钢筋混凝土柱的尺寸效应研究成果;在归纳总结的基础上,对 FRP 加固钢筋混凝土结构尺寸效应的研究提出了建议。

关键词:FRP;钢筋混凝土构件;尺寸效应;粘结性能;综述

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Research Progress of Size Effect on Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP

WANG Zuo-hu^{1,2}, LIU Jing-bo¹, DU Xiu-li²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

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

Abstract: In order to improve the rationality of design of large size reinforced concrete members strengthened with fiber reinforced polymer (FRP), the size effect covering large size of reinforced concrete structures strengthened with FRP should be considered. The state-of-the-art of studies on size effect of reinforced concrete structures strengthened with FRP was summarized and analyzed. The study results of size effect on FRP materials, bonding strength of FRP and concrete, concrete beams strengthened with FRP and reinforced concrete columns strengthened with FRP were introduced emphatically. Based on the summaries of previous research, advices for advanced research on size effect on FRP reinforced concrete structures were provided.

Key words: fiber reinforced polymer; reinforced concrete member; size effect; bonding property; summary

0 引言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)由于具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳等许多优异的性能而逐渐得到了研究者和土木工程师们的认可与青睐。近年来,FRP 在既有建筑的修复加固和

新建结构中得到了越来越广泛的应用^[1-2],如美国 Texas Hamilton 饭店,部分柱子采用了 FRP 进行了维修加固,在日本利用 FRP 对一般建筑物和桥梁进行加固分别占到了总加固量的 45%和 40%;在各种新建结构中,FRP 的应用形式主要以 FRP 筋、各种类型的型材及混凝土添加料为主。FRP 混凝土

收稿日期:2011-04-09

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838001)

作者简介:王作虎(1979-),男,湖北仙桃人,工学博士,博士后,E-mail:wangzuohu@emails.bjut.edu.cn。

结构是由 FRP、混凝土和钢筋组成,它的力学性能直接取决于其组成材料的力学性能。相对于混凝土材料,FRP 和钢材具有较好的均质性,而混凝土是一种由粗骨料、细骨料及硬化水泥基体组成的多相混合材料,其显著特点之一是其内部的非均质构造,存在着明显的尺寸效应^[3-5],混凝土材料的尺寸效应必然会直接反映到 FRP 混凝土结构的力学性能中。另外,FRP 混凝土结构中 FRP 和混凝土共同作用的基础是它们之间的粘结力,而混凝土构件的尺寸变化也会影响到粘结力的变化,进而影响到结构的力学性能。由于受到试验研究条件和认识水平的限制,目前对钢筋混凝土结构构件和 FRP 混凝土结构构件的研究都是基于小尺寸构件(模型试验)进行研究的,其复杂的材料非线性和非均质性使得尺寸效应问题也十分复杂,小尺寸的材料和构件破坏试验及其相应的研究结论并不一定具有普遍的指导意义,即以以往这些基于小尺寸试件研究结果得出的计算公式是否适用于大尺寸构件,是需要研究的重要问题。目前各国研究者已经开始对钢筋混凝土构件的尺寸效应开展了一些研究^[6-7],但是对于 FRP 混凝土结构的尺寸效应研究还非常有限,本文中主要介绍这方面的一些研究进展。

1 FRP 材料性能的尺寸效应

FRP 是一种线弹性材料,破坏过程是一种脆性破坏,而尺寸效应是脆性材料本身固有的一种特性,所以 FRP 的材料性能会受到尺寸效应的影响。FRP 材料性能的确定是工程应用和科学研究的一个基础,如何将实验室中小尺寸材料的试验结果应用到实际工程中,是非常重要的研究内容。

目前关于尺寸效应的研究主要有 7 种理论:Weibull 尺寸效应统计理论;能量释放引起的尺寸效应理论;裂纹的分形特征引起的尺寸效应理论;材料的非均匀性和泊松效应引起的边界层尺寸效应理论;裂纹尖端的三维应力奇异性引起的尺寸效应理论;扩散现象引起的时间依赖性尺寸效应理论;材料本构关系的时间依赖性引起的尺寸效应理论。Sutherland 等^[8]对复合材料中的尺寸效应进行了综述,总结概括了各种尺寸效应理论在复合材料中的应用以及 FRP 材料强度尺寸效应研究的现状。

岳清瑞等^[9]通过大量的材料检测试验着重研究了标准试件的长度、宽度以及厚度等尺寸对 FRP 材料性能的影响,试验结果表明:随着试件宽度和长度的变化,试验所测得的强度和离散率在不断变化;1

层纤维布所测得的强度要明显高于 2 层,伸长率相差不大,而弹性模量也是 1 层要大于 2 层;当试件尺寸在长 230 mm、宽 15 mm、纤维布为 1 层时可以保证性能指标具有最好的稳定性和最小的离散性,并建议此值作为标准试件的尺寸。岳清瑞等还分析了 FRP 材料性能受尺寸效应影响的原因:一方面,FRP 试件的断裂方式都是局部几束纤维丝先断裂,然后引起剩余纤维丝承受的荷载剧增,导致整体断裂,试件宽度越宽,长度越长,试件截面上存在缺陷的概率越大,即局部破坏的概率越大,试件就越容易破坏;另一方面,FRP 层数不同,用胶量也会不同,2 层纤维布的用胶量要小于 1 层,而且也增加了截面上缺陷发生的概率,因此强度也会发生变化。

2 FRP-混凝土粘结性能的尺寸效应

FRP-混凝土的界面粘结是确保 FRP 和混凝土共同作用、充分发挥 FRP 强度的前提。目前关于 FRP-混凝土粘结性能的研究大多是通过试验来研究粘结强度的影响因素^[10],或者通过有限元计算来模拟界面粘结的性能^[11-12],但是关于尺寸效应方面的研究还非常有限。虽然没有学者对 FRP 与混凝土粘结性能的尺寸效应做专门的研究,但是从一些试验结果中可以发现尺寸效应的影响。

2001 年杨勇新等^[13]完成了 208 个试件在不同受力状态下 CFRP 布与混凝土粘结性能的试验,统计分析了 CFRP 布与混凝土粘结性能的变化规律。从试验数据中可以发现,CFRP 布与混凝土粘结性能存在着尺寸效应:在正拉粘结试验中,受力面积尺寸大于 40 mm×40 mm 时的正拉粘结强度值与受力面积尺寸为 40 mm×40 mm 时的正拉粘结强度值相比提高 10%~40%;在推剪粘结试验中,当设计受力面积尺寸较小(50 mm×50 mm)时的推剪粘结强度比设计受力面积尺寸较大(50 mm×100 mm)时的推剪粘结强度要低。Chajes 等^[14]用一个单面搭接剪切试验来研究 FRP 与混凝土之间的传力机理和粘结强度,试验结果表明:FRP 与混凝土粘结截面之间的荷载只在某一固定长度即有效粘结长度内传递,粘结长度小于有效粘结长度时,粘结强度随粘结长度的增加而增加;当粘结长度大于有效粘结长度时,随着粘结长度的增加,粘结强度基本上不增加。Bizindavyi 等^[15]研究了 FRP 层数、粘结长度和粘结宽度对粘结强度的影响,研究发现,FRP 宽度对 FRP 的应变和粘结剪应力的分布没有明显的影响,有效粘结长度随着 FRP 层数的增加而增加。

Lee等^[16]研究了胶层厚度对粘结性能的影响,研究发现,胶层厚度是影响FRP与混凝土粘结性能的主要因素,随着胶层厚度的增加,滑移模量不断减小。De Lorenzis等^[17]采用修正梁试验来研究FRP和混凝土之间的粘结性能,研究了粘结长度、混凝土强度和FRP层数、FRP宽度对粘结性能的影响。试验结果表明:粘结长度超过一定值后,粘结破坏荷载基本不再增加;FRP宽度对粘结性能的影响不明显;FRP层数会对粘结极限荷载产生影响;FRP刚度是影响粘结破坏荷载的主要因素,随着FRP刚度的增加,粘结应力最大值增加。Harmon等^[18]研究了粘结胶层对粘结强度的影响,发现粘结传力长度和极限荷载都随着粘结胶层的增加而增加。Wu等^[19]研发了一种特殊的装置来研究FRP布和混凝土粘结性能的尺寸效应,这种装置可以试验宽度为350 mm的FRP布的粘结强度,试验结果表明,有效粘结长度不受FRP宽度的影响。

综合上面的研究可以看出,FRP与混凝土之间的粘结强度受很多因素的影响,但是有效粘结长度是影响尺寸效应的根本原因,当FRP布的粘结长度小于有效粘结长度时,粘结强度随粘结长度的增加而增加;而当FRP布的粘结长度大于有效粘结长度时,随着粘结长度的增加,粘结强度基本上不增加,尺寸效应也不会产生。

3 FRP加固钢筋混凝土梁的尺寸效应

FRP布可以在混凝土梁的底部纵向粘贴对混凝土梁进行抗弯加固,也可以在混凝土梁的侧面横向粘贴对混凝土梁进行抗剪加固,抗剪加固的方式可以是单面粘贴、U型条箍或者全缠绕。各国已做过大量的FRP布加固混凝土梁的抗弯试验和抗剪试验,考虑到试验设备和试验经费的条件,试件截面尺寸大多较小,一般梁高都不大于500 mm,得出的结论是否可用于较大截面的梁还没有得到验证。

2006年陈忠范等^[20]进行了20根CFRP片材加固混凝土的抗弯试验,通过改变混凝土梁的尺寸以及不同加固方式来研究CFRP布加固梁是否具有尺寸效应。研究结果表明,在相同配筋率和CFRP加固率的情况下,CFRP布的加固效果并没有随梁尺寸的增加而有所减小,即CFRP加固梁的抗弯强度没有尺寸效应。Maalej等^[21]为了研究混凝土梁的尺寸和FRP的加固层数对加固效果以及FRP与混凝土之间的界面粘结力的影响,进行了17根不同尺寸混凝土梁的抗弯试验研究,试验结果表明:梁的

尺寸不会对加固效果以及混凝土梁的挠度和延性产生很大的影响;随着混凝土梁尺寸和FRP层数的增加,FRP布端部的界面剪切应力会增加,但这个峰值应力还不足以改变加固梁的破坏形态。

Deniaud等^[22]对混凝土梁FRP布抗剪加固的方法进行了综述,并收集了16根足尺寸的T型混凝土梁抗剪加固的试验数据,通过分析试验结果发现,混凝土梁的尺寸对FRP加固构件的抗剪承载力有很大的影响,并建议开展这方面的研究。Leung等^[23]对FRP加固混凝土梁抗剪性能的尺寸效应进行了研究,混凝土梁的高度分别为180、360、720 mm,FRP抗剪加固的方式有2种:U型条箍和全缠绕。试验结果表明:对于U型条箍加固的混凝土梁,随着混凝土梁尺寸的增加,加固效果明显降低,并且规范ACI 2002、FIB 2001和JCI 2001的公式都不能提供合理的设计值;对于全缠绕的加固梁,抗剪加固不存在尺寸效应,并且FIB 2001的计算值与实测值较接近。Godat等^[24]也对FRP加固混凝土梁抗剪性能的尺寸效应进行了试验研究和有限元分析,试验也是采用U型CFRP布对混凝土梁的剪跨区进行加固,研究结果表明,随着混凝土梁尺寸的增加,加固梁的抗剪承载力也增加,但是CFRP布的有效应变逐渐减小,即随着混凝土梁尺寸的增加,FRP布的抗剪贡献逐渐降低。Matta等^[25]通过4根足尺寸的GFRP筋混凝土梁的弯剪试验来研究尺寸效应的影响,试验结果表明,混凝土的剪切强度明显受到混凝土梁尺寸大小的影响。

虽然到目前为止各国关于FRP加固混凝土梁尺寸效应的研究成果非常有限,但是从以上的研究结果还是可以得出一些结论:在相同条件下,FRP加固混凝土梁的抗弯强度没有尺寸效应,但是FRP加固混凝土梁的抗剪强度是受混凝土梁尺寸影响的,并且对FRP的有效应变有显著的影响。

4 FRP加固钢筋混凝土柱的尺寸效应

将FRP沿混凝土柱环向粘贴对混凝土柱进行加固,可以对混凝土柱起到约束的作用,使混凝土处于三向受压的状态,从而混凝土柱的承载力得到提高,同时延性也有所增加。根据混凝土柱的截面形状可以分为矩形、椭圆形和圆形。一般来说,混凝土柱的截面形状对加固效果影响很大。下面分别从圆形截面和矩形截面来讨论FRP加固混凝土柱的尺寸效应。

4.1 FRP加固圆形截面柱

用FRP加固圆形截面混凝土柱,由于不需要进

行倒角处理,而且约束效果均匀,所以在相同条件下 FRP 加固圆形截面混凝土柱的效果一般比加固矩形截面柱的效果要好。目前各国对 FRP 布加固圆形截面混凝土柱进行了较多的研究,但是关于尺寸效应的影响却存在着很大的分歧。

宋功河等^[26]对玄武岩纤维(BFRP)素混凝土圆柱的轴压性能和尺寸效应进行了研究,研究结果表明,BFRP 加固不同尺寸的混凝土圆柱存在尺寸效应,采用相同 BFRP 加固圆柱时,试件直径越小,约束效果越好,混凝土柱极限强度越高,延性越好。黄学杰^[27]通过试验研究了 BFRP 加固钢筋混凝土圆柱轴压力学性能的尺寸效应,经过对试验结果的拟合,还建立了强度和尺寸之间的关系,研究表明,在 BFRP 体积配置率相同的情况下,小尺寸钢筋混凝土圆柱的强度提高量比大尺寸试件要大,但是提高程度要小一些;童谷生等^[28-29]开展了 3 种不同尺寸几何相似 BFRP 布约束钢筋混凝土圆柱的轴压试验,试验结果表明,试件破坏时的名义应力随着试件尺寸的增大而降低,即试件强度具有尺寸效应,且几何相似圆柱强度的尺寸效应遵循 Bazant 的尺寸效应规律。贾明英等^[30]通过试验研究了 CFRP 布加固混凝土圆柱的尺寸效应,也得出了 CFRP 布加固圆柱存在尺寸效应的结论。

2004 年 Theriault 等^[31]也对 FRP 约束混凝土圆柱轴压性能的尺寸效应进行了研究,通过试验和收集的数据分析得出:尺寸效应对于圆形 FRP 混凝土短柱轴压性能的影响不是很明显,但是对于小尺寸(圆柱直径约为 50 mm)的试件存在着明显的尺寸效应。2005 年 Matthys 等^[32]和 Carey 等^[33]分别进行了不同尺寸圆形 FRP 混凝土短柱的轴压性能试验来研究尺寸效应的影响和验证各种轴压模型的正确性,研究结果表明,尺寸效应对圆形 FRP 混凝土短柱轴压性能的影响不大,各种计算模型^[34-37]的计算结果与试验结果比较接近。Zhu 等^[38]通过试验研究了 CFRP 约束钢筋混凝土圆柱的轴压性能,试验结果表明,混凝土圆柱尺寸的改变对约束效果和轴压性能的影响不太明显。Matthys 等^[39]通过大尺寸 FRP 混凝土圆柱的试验研究,也得出了尺寸效应对轴压性能的影响不大的结论。Silva 等^[40]研究了尺寸效应和相对刚度对 GFRP 混凝土圆柱轴压性能的影响,却得出了部分不同的结论:在相同条件下圆柱直径从 150 mm 增加到 250 mm 时,轴压强度逐渐降低,存在部分尺寸效应。为了考虑钢筋的影响,2005 年 Zhu 等还研究了 FRP 约束钢筋混

凝土圆柱的轴压性能,试验结果表明,圆柱尺寸的大小对轴压性能的影响不大。Yeh 等^[41]通过有限元分析了 FRP 约束混凝土圆柱轴压性能的尺寸效应,研究结果表明,构件的延性主要受 FRP 体积分量的影响,尺寸效应不太明显。

4.2 FRP 加固矩形截面柱

在 FRP 加固矩形截面混凝土柱中,倒角因素对加固的效果影响较大,小模型混凝土矩形柱经过倒角后接近圆柱,而大尺寸构件不可能做同比例大的倒角半径,所以尺寸效应一般会更加明显。矩形截面柱由于要考虑的因素较多,目前各国关于 FRP 加固矩形截面柱尺寸效应的研究还不多。

童谷生等^[42]开展了不同尺寸几何形状相似的 BFRP 约束素混凝土方柱的抗压试验,试验结果表明,BFRP 加固方柱的轴压性能存在着明显的尺寸效应,且随着纤维约束层数的增加,尺寸效应愈明显。马立伟等^[43]用有限元软件 ANSYS 研究了 CFRP 加固混凝土方柱轴压性能的尺寸效应,主要是倒角尺寸对加固效果的影响,得出了 CFRP 布对小模型的加固效果更明显,达到 30%,随着尺寸的增加,加固效果逐渐减小。

关于约束方形混凝土试件的尺寸效应研究,Masia 等^[44]对 CFRP 布约束素混凝土方形截面试件的尺寸效应进行了试验研究,结果表明,试件的轴向峰值应力和轴向峰值应变随试件尺寸的增加而减小。2007 年 Rocca 等^[45]研究了圆形和矩形 FRP 混凝土柱轴压性能的尺寸效应,研究结果表明,圆形截面构件的尺寸效应不明显,但是由于数据的离散性,矩形截面的尺寸效应还有待进一步的研究。Tou-tanji 等^[46]对 FRP 约束钢筋混凝土矩形柱轴压性能的尺寸效应进行了研究,通过 3 个大尺寸试件的试验研究发现:随着截面高宽比的增加,FRP 约束混凝土矩形柱的强度逐渐降低;随着倒角半径的增加,约束效果越明显;另外还提出了基于约束效率系数、截面高宽比和倒角半径的简单设计模型,模型也适合于小尺寸的 FRP 约束混凝土矩形柱。

5 结 语

(1)FRP 与混凝土之间的粘结性能是保证 FRP 与混凝土共同作用的关键,开展界面粘结性能尺寸效应的试验和理论研究,对工程实际应用具有非常重要的意义。

(2)FRP 加固混凝土梁的抗剪性能和 FRP 加固矩形截面混凝土柱的轴压性能都明显地受到尺寸

效应的影响,应深入开展这方面大尺寸的试验研究和理论分析。

(3)FRP加固混凝土构件(梁、柱、节点)受到低周反复荷载下的承载力、变形、滞回性能以及尺寸效应的影响,特别是针对大尺寸钢筋混凝土构件,应对其开展系统的试验研究。

(4)FRP钢筋混凝土结构是一种新的组合结构,是一种造价合理且性能优异的构件形式,具有很好的工程应用前景,应对其抗压、抗弯和抗震性能的尺寸效应进行系统研究。

(5)大尺寸构件破坏试验不单纯是有了设备加载能力就能解决问题的,保持设备加载刚度、加载控制技术、量测技术、边界条件的模拟等都有很大的难度;另外考虑混凝土界面特征、大尺寸混凝土本构模型以及各种界面特征的数值模拟技术也有很大的难度,因此,应对大尺寸FRP混凝土构件破坏试验的试验技术及其数值模拟技术进行深入研究。

(6)在考虑大尺寸FRP混凝土构件破坏机理和力学性能的基础上,将尺寸因素引入基于小尺寸构件研究结果的设计理论和计算公式,建立覆盖大尺寸的考虑尺寸效应的FRP混凝土结构设计理论与方法。

参考文献:

References:

[1] 王作虎,邓宗才,杜修力,等. 预应力FRP筋混凝土梁的研究进展[J]. 工业建筑,2008,38(增1):777-782.
WANG Zuo-hu, DENG Zong-cai, DU Xiu-li, et al. Progress in Studies on Behaviors of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons[J]. Industrial Construction,2008,38(S1):777-782.

[2] 叶列平,冯 鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.
YE Lie-ping, FENG Peng. Applications and Development of Fiber-reinforced Polymer in Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(3):24-36.

[3] 黄海燕,张子明. 混凝土的统计尺寸效应[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(3):291-294.
HUANG Hai-yan, ZHANG Zi-ming. Statistical Size Effect of Concrete[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2004,32(3):291-294.

[4] BAZANT Z, CHEN E P. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展,1999,29(3):383-433.
BAZANT Z, CHEN E P. Scaling of Structural Failure[J]. Advances in Mechanics,1999,29(3):383-433.

[5] 杜修力,张建伟,符 佳,等. 钢筋混凝土构件的尺寸效应研究进展及展望[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(3):14-19.
DU Xiu-li, ZHANG Jian-wei, FU Jia, et al. Research Progress and Prospect of Size Effect on Reinforced Concrete Members[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2009,26(3):14-19.

[6] 杜修力,符 佳,张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(增2):1-8.
DU Xiu-li, FU Jia, ZHANG Jian-wei. The Experimental Study on Size Effect of the Large-size Reinforced Concrete Column Under Axial Loading[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(S2):1-8.

[7] RIOS R D, RIERA J D. Size Effects in the Analysis of Reinforced Concrete Structures[J]. Engineering Structures,2004,26(8):1115-1125.

[8] SUTHERLAND L S, SHENOI R A, LEWIS S M. Size and Scale Effects in Composites:I. Literature Review[J]. Composites Science and Technology,1999,59(2):209-220.

[9] 岳清瑞,曹劲松,杨勇新,等. 碳纤维布标准检测方法中试件尺寸影响的试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(8):1-4.
YUE Qing-rui, CAO Jin-song, YANG Yong-xin, et al. Normative Specimen of Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Checking Property[J]. Industrial Construction,2005,35(8):1-4.

[10] 郭樟根,曹双寅. FRP与混凝土的粘结性能研究进展[J]. 特种结构,2005,22(2):70-74.
GUO Zhang-gen, CAO Shuang-yin. Research Advance on Bond Behavior Between FRP and Concrete[J]. Special Structures,2005,22(2):70-74.

[11] 陆新征,谭 壮,叶列平,等. FRP布-混凝土界面粘结性能的有限元分析[J]. 工程力学,2004,21(6):45-50.
LU Xin-zheng, TAN Zhuang, YE Lie-ping, et al. Finite Element Analysis of Debonding at the Interface Between FRP Sheet and Concrete[J]. Engineering Mechanics,2004,21(6):45-50.

[12] 陆新征,叶列平,滕锦光,等. FRP片材与混凝土粘结性能的精细有限元分析[J]. 工程力学,2006,23(5):74-82.
LU Xin-zheng, YE Lie-ping, TENG Jin-guang, et al. Meso-scale Finite Element Analysis of FRP-to-concrete Bond Behavior[J]. Engineering Mechanics,2006,23(5):74-82.

[13] 杨勇新,岳清瑞,胡云昌. 碳纤维布与混凝土粘结性能

- 的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 36-42.
- YANG Yong-xin, YUE Qing-rui, HU Yun-chang. Experimental Study on Bond Performance Between Carbon Fiber Sheets and Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 36-42.
- [14] CHAJES M J, FINCH W W, JANUSZKA T F, et al. Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 208-217.
- [15] BIZINDAVYI L, NEALE K W. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(4): 153-160.
- [16] LEE Y J, BOOTHBY T E, BAKIS C E, et al. Slip Modulus of FRP Sheets Bonded to Concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(4): 161-167.
- [17] DE LORENZIS L, MILLER B, NANNI A. Bond of Fiber-reinforced Polymer Laminates to Concrete[J]. ACI Material Journal, 2001, 98(3): 256-264.
- [18] HARMON T G, KIM Y J, KARDOS J, et al. Bond of Surface-mounted Fiber-reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5): 557-564.
- [19] WU Z, IWASHITA K. Size Effect on Bond Properties of Interface Between FRP Sheets and Concrete[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2008, 57(3): 269-276.
- [20] 陈忠范, 徐 明. 碳纤维片材抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 47-51.
- CHEN Zhong-fan, XU Ming. Experimental Research on RC Beams Reinforced with CFRP[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(4): 47-51.
- [21] MAALEJ M, LEONG K S. Effect of Beam Size and FRP Thickness on Interfacial Shear Stress Concentration and Failure Mode of FRP-strengthened Beams [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(7/8): 1148-1158.
- [22] DENIAUD C, CHENG J J R. Review of Shear Design Methods for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Sheets[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(2): 271-281.
- [23] LEUNG C K Y, CHEN Z F, LEE S, et al. Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(5): 487-496.
- [24] GODAT A, QU Z, LU X Z, et al. Size Effects for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with CFRP Strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(3): 260-271.
- [25] MATTA F, NANNI A, GALATI N, et al. Size Effect on Shear Strength of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[C]//CARDINTERI A, FERRO G, GAMBAROVA P G, et al. Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. London: Taylor & Francis, 2007: 1077-1084.
- [26] 宋功河, 张海昆. BFRP 约束素混凝土圆柱强度及尺寸效应的试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4): 3-5.
- SONG Gong-he, ZHANG Hai-kun. Experimental Research on Strength and Size Effect of Circular Concrete Columns Reinforced by BFRP [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(4): 3-5.
- [27] 黄学杰. BFRP 加固钢筋混凝土圆柱轴压力学性能尺寸效应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
- HUANG Xue-jie. The Study on Size Effect of Mechanical Behavior of BFRP Reinforced Concrete Column [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2008.
- [28] 童谷生, 刘永胜, 邱 虎, 等. BFRP 约束钢筋混凝土轴压圆柱的尺寸效应研究[J]. 功能材料, 2009, 40(12): 2044-2046.
- TONG Gu-sheng, LIU Yong-sheng, QIU Hu, et al. Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns Confined by BFRP Sheets [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(12): 2044-2046.
- [29] 童谷生, 刘永胜. BFRP 约束几何相似钢筋混凝土圆柱的性能研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 83-86.
- TONG Gu-sheng, LIU Yong-sheng. Research on the Performance of Geometrically Similar Reinforced Concrete Column Restricted by BFRP[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2011, 35(1): 83-86.
- [30] 贾明英, 程 华. 碳纤维布(CFRP)加固混凝土圆柱约束效应的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(1): 35-36.
- JIA Ming-ying, CHENG Hua. Experimental Research of Size Effect of RC Circular Columns Reinforced by CFRP[J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(1): 35-36.
- [31] THERIAULT M, NEALE K W, CLAUDE S. Fiber-

- reinforced Polymer-confined Circular Concrete Columns; Investigation of Size and Slenderness Effects [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(4): 323-331.
- [32] MATTHYS S, TOUTANJI H, AUDENAERT K, et al. Axial Load Behavior of Large-scale Columns Confined with Fiber-reinforced Polymer Composites [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(2): 258-267.
- [33] CAREY S A, HARRIES K A. Axial Behavior and Modeling of Confined Small-, Medium-, and Large-scale Circular Sections with Carbon Fiber-reinforced Polymer Jackets [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4): 596-604.
- [34] 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, 2(1): 143-150.
- [35] 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.
- [36] SAMAAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1025-1031.
- [37] TOUTANJI H A. Stress-strain Characteristic of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 397-404.
- [38] ZHU Z Y, AHMAD I, MIRMIRAN A. Effect of Column Parameters on Axial Compression Behavior of Concrete-filled FRP Tubes [J]. Advances in Structural Engineering, 2005, 8(4): 443-449.
- [39] MATTHYS S, TOUTANJI H, TAERWE L. Stress-strain Behavior of Large-scale Circular Columns Confined with FRP Composites [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(1): 123-133.
- [40] SILVA M A G, RODRIGUEZ C C. Size and Relative Stiffness Effects on Compressive Failure of Concrete Columns Wrapped with Glass FRP [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(3): 334-342.
- [41] YEH F Y, CHANG K C. Confinement Efficiency and Size Effect of FRP Confined Circular Concrete Columns [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 26(2): 127-150.
- [42] 童谷生, 刘永胜, 吴秋兰. 玄武岩纤维布约束混凝土方柱的尺寸效应研究 [J]. 混凝土, 2009(3): 6-8.
TONG Gu-sheng, LIU Yong-sheng, WU Qiu-lan. Size Effect on Square Section Column Concrete Confined with Basalt Fiber Sheets [J]. Concrete, 2009(3): 6-8.
- [43] 马立伟, 刘 铮, 祝 夏. 尺寸效应对碳纤维加固轴心受压柱的影响 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(23): 7218-7221.
MA Li-wei, LIU Zheng, ZHU Xia. The Size Effect of Axial Compressive Column Strengthened by CFRP [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(23): 7218-7221.
- [44] MASIA M J, GALE T N, SHIVE N G. Size Effect in Axially Loaded Square-section Concrete Prisms Strengthened Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Wrapping [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 1-13.
- [45] ROCCA S, GALATI N, NANNI A. Experimental Evaluation of Noncircular Reinforced Concrete Columns Strengthened with CFRP [C]// ALKHRDAHI T, SILVA P. Seismic Strengthening of Concrete Buildings Using FRP Composites. New York: ACI, 2007: 37-56.
- [46] TOUTANJI H, HAN M, GILBERT J, et al. Behavior of Large-scale Rectangular Columns Confined with FRP Composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(1): 62-71.