

文章编号:1673-2049(2008)02-0024-12

# 纤维增强复合材料加固混凝土柱的研究进展

吴智敏, 郭 夏, 魏 华

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**基于纤维增强复合材料(FRP)约束混凝土柱的相关研究,从 FRP 约束混凝土柱的应力-应变关系、轴心受压和偏心受压力学性能、抗震性能以及有限元数值模拟等几个方面,对 FRP 约束混凝土柱的研究现状和各方面的相关控制因素进行了系统阐述,重点分析了 FRP 侧向约束强度、刚度、FRP 类型、柱截面形状、未约束混凝土强度、倒角半径、截面长宽比等因素对约束效果的影响,为 FRP 加固混凝土柱的进一步研究提供了参考。

**关键词:**混凝土柱;纤维增强复合材料;力学性能;综述

**中图分类号:**TU375.3 **文献标志码:**A

## Research Advances in Fiber Reinforced Polymer Retrofitting Concrete Columns

WU Zhi-min, GUO Xia, WEI Hua

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Based on the related research on fiber reinforced polymer (FRP) confined concrete column, authors presented the state-of-the-art review of FRP confined concrete column and gave a comment on some related factors from the following aspects: the relations of stress and strain, the axial compression, mechanics behavior of eccentric compression, seismic performance as well as finite element numerical simulations of FRP reinforced columns. Several key parameters impacting on FRP strengthening effect were discussed, such as lateral confinement strength, stiffness, the type of FRP, section shape of column, unconfined concrete strength, corner radius, length-width ratio of section, etc. The results provide reference to further research of FRP retrofitting concrete columns.

**Key words:** concrete column; FRP; mechanics behavior; review

## 0 引 言

混凝土结构由于其受力性能好、造价低而在土木工程中被广泛采用。然而,目前有相当一部分的混凝土结构由于超期服役,或长期暴露于侵蚀环境,或由于施工缺陷等原因给建筑物的使用造成了严重的安全隐患,亟须对其进行补强或加固。纤维增强

复合材料(FRP)在土木工程中的应用始于 20 世纪 70 年代,目前用于结构加固的 FRP 形式有多种,可分为片材、棒材、型材等<sup>[1-4]</sup>。近年来,在实际工程中对 FRP 的应用主要分 2 种:①对已有建筑物的修复和加固<sup>[5]</sup>,主要是利用 FRP 对混凝土进行侧向约束,使其形成约束混凝土;②应用于新建建筑中<sup>[6]</sup>,如将其制成 FRP 筋,用以实现恶劣环境下代替普通

收稿日期:2008-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50578025)

作者简介:吴智敏(1963-),男,浙江仙居人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhiminwu2002@yahoo.com.cn。

钢筋,或预应力钢筋的作用,或形成 FRP 管,然后在其内浇筑混凝土。

笔者着重对各国关于 FRP 加固混凝土柱的研究现状加以总结,主要涉及 FRP 约束混凝土的应力-应变关系、FRP 约束混凝土柱的轴心受压性能、偏心受压性能、抗震性能以及有限元模拟的研究。

## 1 FRP 加固混凝土结构的优势

传统的加固混凝土结构的方法主要有<sup>[7-9]</sup>:增大截面法、外包钢加固法、预应力加固法、黏钢加固法等。传统的加固方法由于自身局限性,使其应用受到限制。20 世纪末,随着国际市场纤维价格的大幅度降低,FRP 加固混凝土结构的方法逐渐引起土木工程界的关注。与传统的加固方法相比,FRP 具有以下优点<sup>[10-13]</sup>:①高强高效,加固修补混凝土结构时可以利用其高强度、高弹性模量的特点来提高结构及构件的承载力和延性,达到高效加固的目的;②施工方便、快捷,黏贴 FRP 加固时现场施工没有湿作业,无需大型施工器械,占用施工场地少,且施工质量容易保证;③耐腐蚀及耐久性好,FRP 化学性质稳定,不与酸碱盐等化学物质发生反应,因而用 FRP 加固后的混凝土构件耐腐蚀性及耐久性能良好;④适用面广,FRP 布是一种柔性材料,可以广泛地应用于各种类型和形状结构的修复和加固,且不影响原结构外观;⑤对结构的影响小,FRP 轻薄,加固修补后基本上不增加原结构的自重及截面尺寸。

由于具有以上优点,FRP 被广泛应用于土木工程各领域,目前,FRP 应用范围包括桥梁、民用建筑、地下工程、航空航天工程等工程结构中。

## 2 FRP 约束混凝土应力-应变模型

起初在对 FRP 加固、修复构件进行分析时大多依据相关的试验数据、借鉴钢管约束混凝土和箍筋约束混凝土的机理以及相关的经验,往往导致过高估计了 FRP 的约束性能,存在一定的安全隐患。其主要原因是:钢约束混凝土和 FRP 约束混凝土虽然都是被动约束,但钢材约束混凝土柱时,当达到钢材的屈服强度后其侧向约束力为定值,而 FRP 是线弹性材料,其侧向约束力随混凝土的侧向膨胀而增加直至 FRP 被拉断或混凝土自身被压坏。因此,对 FRP 约束混凝土构件的破坏机理及本构模型的研究是非常必要的。在对 FRP 约束混凝土进行设计(特别是对偏心受压柱、抗震加固)以及进行数值模拟时,均需要有可靠的 FRP 约束混凝土的本构关系

作为理论研究的基础。

由于本构关系是进行结构强度和变形计算的理论依据,因此各国很多学者对 FRP 约束混凝土的应力-应变关系进行了大量研究,所建立的分析模型为混凝土柱加固提供了理论基础。现有约束混凝土本构关系计算模型主要有 3 类<sup>[14]</sup>:以反映主要物理参数为基础的 Richart 统计分析模型;基于多轴混凝土强度理论的 Ahmand 和 Shah 计算模型;以能量守恒原理为基础的 Mander、Priestley and Park (MPP)计算模型。

Richart 等<sup>[15]</sup>基于 Mohr-Coulomb 破坏准则,给出了受主动静水压力约束作用下的混凝土的抗压强度以及对应的纵向应变表达式分别为

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

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + k_2 \frac{f_1}{f'_{co}}) \quad (2)$$

式中: $f'_{cc}$ 、 $\epsilon_{cc}$ 分别为受约束混凝土峰值应力及对应的应变; $f'_{co}$ 、 $\epsilon_{co}$ 分别为未约束混凝土极限抗压强度及对应的应变; $f_1$ 为混凝土受到的侧向压力; $k_1$ 为约束效应系数,与约束材料本身特性有关; $k_2$ 为与混凝土混合物特性及侧压相关的函数。当混凝土受到间距很小的螺旋箍筋的被动约束时所产生的等效侧向约束力与主动约束产生的侧向应力大致相等。

Mander 等<sup>[16-17]</sup>提出了适用于圆形、方形截面构件的箍筋约束混凝土的应力-应变关系。此后很多学者在 Mander 等模型的基础上,提出了 FRP 约束混凝土的应力-应变模型。如 Marijn 等<sup>[18]</sup>、Saadatmanesh 等<sup>[19]</sup>在 Mander 等研究的基础上分析了混凝土的强度、FRP 的厚度和间距、FRP 材料的类型等因素对参数的影响,提出了适用于 FRP 约束混凝土圆柱和方柱的应力-应变模型。

刘明学等<sup>[20]</sup>在各国学者对 305 个轴心受压 FRP 约束混凝土圆柱的试验结果上,通过分析提出了一个改进的 FRP 约束圆柱混凝土受压应力-应变关系模型,该模型考虑了纤维特征值、FRP 缠绕方式和加载方式这 3 个因素对约束效果的影响。于清<sup>[21]</sup>、陶忠等<sup>[22]</sup>基于试验和理论研究,引入约束效应系数,建议了形同 Saaman 等<sup>[23]</sup>的 FRP 约束混凝土应力-应变模型,但模型中都采用了常约束力。敬登虎等<sup>[24-25]</sup>、吴刚等<sup>[26]</sup>、Youssef 等<sup>[27]</sup>对在 FRP 约束下的混凝土柱轴心受压应力-应变曲线进行了研究,发现 FRP 约束存在强、弱之分,并基于各自的试验给出了强、弱约束临界点的判断公式。当混凝土柱受到强约束时,其强度和延性均有较大幅度的提

高;当混凝土柱受到弱约束时,其强度提高幅度非常小,但其极限应变相对未约束混凝土柱有大幅度的提高,并依据强、弱约束 2 种情况,分别给出了应力-应变曲线计算模型。文献[27]中提出的模型不仅能较好地预测 FRP 约束混凝土的极限强度、极限应变,同时能较好地预测出 FRP 约束混凝土的应力-应变全曲线形状,并给出了通用的 FRP 约束混凝土柱约束模型。Lam 等<sup>[28]</sup>在基于以往大量试验结果的基础上,对现有的约束混凝土应力-应变曲线进行了评估,并考虑 FRP 类型的影响,提出了两段式(抛物线加直线)的 FRP 约束混凝土的应力-应变模型,但该模型仅含有上升段,即仅适用于强约束的情况。另外,还有很多学者对约束混凝土的应力-应变关系进行了研究,Saafi 等<sup>[29]</sup>、Toutanji<sup>[30]</sup>、Xiao 等<sup>[31]</sup>、Lam 等将以往学者提出的 FRP 约束混凝土应力-应变模型分为 2 类:用于分析和用于设计。

### 3 FRP 约束混凝土柱轴心受压性能

各国学者对 FRP 约束混凝土柱的轴压性能进行了大量的研究,总结已有研究成果可知,影响 FRP 约束混凝土柱的轴压性能主要有 2 个方面:① FRP 约束材料特性,FRP 材料类型、层数、缠绕角度与分条包裹时 FRP 的幅宽以及间距等;②混凝土柱本身的几何和材料特性,材料特性(混凝土抗压强度)、几何特性(柱截面形状、矩形截面长宽比、倒角半径及柱子长细比)等。

文献[32]中重点研究了不同 FRP 类型、不同 FRP 刚度、不同截面形状、不同缠绕角度等对约束混凝土柱轴压性能的影响。结果表明:FRP 可显著提高混凝土的强度和延性;当其他条件一定时,约束程度跟 FRP 刚度有关;增加 FRP 层数即增加材料刚度,混凝土柱强度略增大,但延性提高显著;约束效应与截面形状直接相关且随倒角半径增加而增加;当截面倒角尖锐时,采用不同的包裹角度能够限制角隅处裂缝的出现和发展,但能否增加尖锐倒角柱体的强度和延性,有待进一步证实。

Parvin 等<sup>[33-34]</sup>重点研究了 FRP 缠绕方式对约束效果的影响,文献[33]中以 FRP 厚度和缠绕方式为变量,采用“箍-角-箍”和“角-箍-角”2 种不同的缠绕方式,其中“箍”表示该层 FRP 采用  $0^\circ$  缠绕,缠绕方向与轴向垂直,“角”表示缠绕方向与混凝土轴线方向呈  $45^\circ$ ,主要对比先  $0^\circ$  缠绕还是先非  $0^\circ$  缠绕对约束有效;文献[34]中所选的控制参数为:FRP 材料厚度、包裹角度及混凝土强度,其中包裹角度分别

为环向  $0^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$  以及  $0^\circ$  和  $\pm 15^\circ$  相结合。结果表明:① FRP 约束混凝土柱的强度和延性与未约束混凝土柱相比有了显著提高,当混凝土强度和包裹角度一定时,约束混凝土柱的轴向应力与 FRP 材料厚度成比例增长;②当混凝土强度和 FRP 材料厚度一定时, $0^\circ$  缠绕的约束混凝土柱比非  $0^\circ$  缠绕表现出更强的承受轴压的能力,但是轴向压应变低于非  $0^\circ$  缠绕方式;③当缠绕方式和 FRP 材料厚度一定时,随着混凝土抗压强度的增加,约束混凝土柱的轴心抗压强度有所提高,但是提高幅度随着混凝土强度的增加而降低。

不同的纤维化学成分不同,其力学性能也有较大的差别,相应 FRP 的力学性能差异也较大。贾明英等<sup>[35]</sup>以 15 根外包碳纤维布、玻璃纤维布、芳纶纤维布的混凝土圆柱轴心受压试验为基础,着重研究了不同材料对加固效果的影响。结果表明:①混凝土强度和尺寸均相同而外包纤维材料不同的组合柱承载力,取决于纤维材料的强度和厚度的乘积;芳纶纤维补强试件的承载力提高幅度最大;碳纤维次之;玻璃纤维最差;②3 种材料加固柱的破坏形态不同,芳纶纤维和碳纤维的弹性模量较高,组合柱呈脆性破坏,玻璃纤维弹性模量较小,变形较大,试件发生延性破坏。

混杂纤维优于单一纤维的原因在于<sup>[36]</sup>:2 种纤维混合使用时,高延伸率纤维可承受由于低延伸率纤维断裂而引起的额外荷载,延缓从微观到宏观的破坏过程,从而使混杂纤维复合材料的平均断裂应变明显提高;低延伸率纤维在混杂复合材料中发挥的抗拉强度也高于其在单一复合材料中的抗拉强度,且低延伸率纤维断裂后,仍能以短纤维的形式与高延伸率纤维共同工作。杨建中等<sup>[37]</sup>进行了素混凝土柱、CFRP 加固混凝土柱、GFRP 加固混凝土柱和 2 种纤维混杂加固混凝土柱的对比试验研究。结果表明:纤维材料混杂使用可以使 2 种材料扬长避短,有效地提高加固效率。

混凝土柱在纤维布全包的情况下,其强度和延性都有较大程度的提高。然而,对于大多数加固后的构件来说,其所承受的荷载远远达不到加固后的抗力水平,全包必然会导致材料的浪费。为了合理地利用材料,提出了条带加固法。大量试验结果表明<sup>[38-42]</sup>,在分条加固中,约束效果随纤维布净间距的减小而增大,随纤维布幅宽的增大而增大,即随纤维布用量的增大而增加,但增强效果并非呈线性关系。文献[42]中指出:分条包裹时存在一个使加固

效率最高和破坏形态最合理的加固间距,即能最大程度地发挥纤维布的作用和构件的塑性性能。

目前,大部分研究主要针对混凝土短柱,尽管选取的控制参数不同,但 FRP 能显著提高 FRP 约束混凝土的强度和延性已被专家们广泛认可。事实上,长细比也是影响约束混凝土柱力学性能的重要因素。Pan 等<sup>[43]</sup>对 6 根 FRP 约束的混凝土矩形细长柱进行了轴心受压试验,并采用有限元进行了模拟,主要研究长细比对 FRP 约束效果的影响,以长细比、截面类型、配筋率以及约束率为控制参数。结果表明:在长细比相同的情况下,纵筋配筋率影响较小,截面类型和约束率是主要影响参数,FRP 约束混凝土柱的稳定系数低于未约束混凝土柱;FRP 对混凝土柱强度的增强效果随长细比的增大而降低。

大量试验结果表明<sup>[44]</sup>,截面形状对 FRP 约束混凝土柱的性能起着决定性作用。FRP 约束混凝土圆柱时,可提供连续的、均匀的侧向约束力,而约束矩形柱时,由于 FRP 抗弯刚度较小,因此在力的相互作用下会使 FRP 向外弯曲,形成拱效应,仅使角部及核心混凝土受到较好的约束作用,即与圆柱相比存在一个有效约束面积的问题。Pessiki 等<sup>[45]</sup>发现 FRP 对方柱的约束作用没有对圆柱的约束作用有效,引入的尺寸效应系数  $k_s$  用来表征对方形截面的非有效约束区的影响,其表达式为

$$k_s = [1 - \frac{(b-2r)^2 + (d-2r)^2}{3bd} - \rho] / (1 - \rho) \quad (3)$$

式中: $b$  为截面宽度; $d$  为截面高度; $r$  为截面倒角半径; $\rho$  为纵向钢筋配筋率。

潘景龙等<sup>[46-47]</sup>通过对不同约束比情况下的圆形、方形倒圆角及方形改椭圆的混凝土柱的轴压短柱试验研究发现:圆形与椭圆形截面柱能够较好地利用 FRP 的抗拉性能,获得良好的加固效果。就加固效果来说:圆形截面最好,其次是椭圆形截面,再次是矩形截面。肖建庄等<sup>[48]</sup>对方形、圆形、八边形、直边加圆弧形和空心配筋混凝土柱进行了试验研究。结果表明:在其他条件相同的情况下,约束性能按照圆形、八边形、直边加圆弧形、方形、空心断面形的顺序递减。

另外,倒角半径及矩形截面长宽比对约束效果也是非常重要的影响因素,Wang<sup>[49]</sup>重点研究了倒角半径对约束效果的影响。结果表明:随倒角半径的增加,约束混凝土的抗压强度明显提高,倒角半径越大,约束效果越好。但是对于钢筋混凝土柱而言,倒角半径受到保护层厚度的限制。Kumutha 等<sup>[50]</sup>

研究了截面长宽比对约束混凝土极限承载力和延性的影响。结果表明:长宽比对约束效果的影响较大,比值越大,柱承载力越小。

以往的试验或理论分析一直将着眼点放在 FRP 约束素混凝土柱上,对于钢筋混凝土柱在 FRP 约束下的性能涉及很少,Demers 等<sup>[51]</sup>对 16 根全尺寸钢筋混凝土柱进行 FRP 约束,选取混凝土强度、纵筋配筋率、箍筋配筋率、钢筋锈蚀程度以及混凝土是否预先破坏等控制因素,并结合实际工程实践中已有结构出现钢筋锈蚀或已经出现裂缝的情况,采用减小纵筋和箍筋直径来模拟钢筋锈蚀,对柱预裂后再缠绕 FRP 布,通过这种方法模拟已发生破坏的混凝土柱受约束性能。结果表明:减小纵筋和箍筋的直径对约束混凝土强度没有直接影响,并指出受 FRP 约束混凝土柱本身的性能不会因为内部配有钢筋而有所改变。事实上,对钢筋锈蚀的模拟仅靠减小钢筋直径并不能体现钢筋锈蚀的实际情况,钢筋发生锈蚀的程度不同,产生的锈胀力不同,而且钢筋锈蚀对混凝土结构的影响不是直径减小的表观现象,而是因为结构保护层剥落、氯离子侵入、锈胀力使混凝土产生微观裂缝,微观裂缝的发展和贯通导致混凝土结构承载力不足而产生破坏。

实际工程中,一般都是在持续荷载情况下对柱进行加固,而目前的试验和研究大都针对未承载或预裂卸载后的混凝土柱进行加固试验。文献[42]中,惠军民对纤维布加固钢筋混凝土柱进行了轴心受压试验研究,分析了纤维布加固层数、加固间距、柱截面形状、纤维布的混合使用及加固前钢筋混凝土柱的应力水平等因素对加固效果的影响。结果表明:纤维布加固钢筋混凝土柱,可明显提高它的承载力和延性;其轴心抗压承载力随加固层数的增加或纤维布净间距的减小而增大;但加固前混凝土柱的应力水平对加固效果影响不大。

## 4 FRP 约束混凝土柱偏心受压性能

各国对 FRP 约束混凝土柱的研究大部分集中于轴压状态下约束混凝土柱的受力性能及应力-应变计算模型等方面,相对而言,对 FRP 约束混凝土柱偏心荷载作用下的力学性能研究较少。然而偏心受压混凝土柱是最常见的受力形式,实际工程中的混凝土柱以承受轴力和弯矩复合作用为主,尤其是建筑物的角柱和边柱。因此对 FRP 约束偏心受压混凝土柱力学性能的研究是非常必要的。目前工程中已有 FRP 加固偏心受压混凝土柱的实例,为了推

广 FRP 加固技术的应用,各国学者对 FRP 加固混凝土柱偏心受压进行了研究。试验中考虑的主要因素有:纤维布的种类、偏心距大小、包裹方式和包裹层数、混凝土强度、长细比等。

Hadi 等<sup>[52-57]</sup>进行了一系列偏压荷载作用下受约束混凝土柱的力学性能研究。所选的控制因素有:混凝土强度、FRP 材料类型、层数、偏心距。结果表明:FRP 约束的混凝土柱有较高的强度、延性和能量吸收能力,FRP 使构件的轴向和侧向变形能力均得以提高;CFRP 的约束效果好于 GFRP,且 CFRP 约束的钢筋混凝土柱的破坏主要是由于钢筋屈服引起的,GFRP 加固的钢筋混凝土柱的破坏通常是由 GFRP 被拉断引起的;约束混凝土柱的极限承载能力随包裹层数的增加而提高,但是,在偏心荷载作用下 FRP 层数改变所引起的约束效应改变没有轴心荷载作用明显;约束效果随偏心率的增大而降低,混凝土柱的最大承载力依赖于偏心率的大小,但混凝土柱的侧向变形与偏心率没有直接联系。

Parvin 等<sup>[58]</sup>对偏压荷载下 FRP 加固混凝土方柱进行了研究,在试验和数值模拟的基础上探讨了应力梯度对约束效果的影响,同时研究了 FRP 厚度以及偏心率的影响。结果表明:在偏心荷载作用下 FRP 约束能显著提高混凝土柱的强度和延性,但即使在偏心率极小的情况下应变梯度的存在也使加固效果降低;对于偏心荷载作用下的混凝土方柱而言,约束效果与 FRP 刚度成比例;而约束层数相同时,约束效果随偏心率的增加而降低,随着偏心率的增加,破坏呈脆性。

唐爱华等<sup>[59]</sup>对 CFRP 横向约束的混凝土矩形偏心受压柱进行了试验。结果表明,外贴 CFRP 能有效地提高小偏心受压混凝土柱的极限承载力,且提高幅度随偏心距的减小而增大。因为偏心距越大,受压混凝土面积越小,在同等荷载作用下应力提高越快,应变增加也越大,故压区混凝土很快达到极限压应变;同时远离加载端的混凝土受压很小甚至受拉,CFRP 的约束作用很小,最后对外贴 CFRP 的小偏心受压混凝土柱的抗压极限承载力提出了实用的计算公式。

对于 FRP 加固偏心受压混凝土柱而言,采用纵、横向混合包裹的方式比较有效<sup>[60-63]</sup>,因为纵向纤维布可以提高柱的抗弯承载力,而横向纤维布通过对混凝土的约束来提高柱的抗压承载力。洗巧玲对 23 根 CFRP 约束下的钢筋混凝土偏心受压柱进行了试验研究,考虑了加固方式、荷载偏心率、柱子

配筋率以及混凝土强度这 4 个因素对 CFRP 加固柱的承载力和变形性能的影响。结果表明:①受拉面纵向黏贴 CFRP 可较大幅度地提高偏心受压柱的承载力,横向黏贴 CFRP 条形箍的加固方法虽然对提高混凝土柱的承载力有限,但能够显著地改善混凝土柱的延性,使加固混凝土柱的变形和耗能能力大大提高,而纵、横向混合黏贴 CFRP 混凝土柱的承载力和延性均有较大提高;②CFRP 对于低配筋率的混凝土偏压柱的加固效果要好于较高配筋率混凝土偏压柱的加固效果;对于混凝土强度过低的混凝土偏压柱的加固效果较差。

对于 FRP 约束混凝土柱的研究大多针对混凝土短柱而言,陶忠等<sup>[64-65]</sup>、姜安庆等<sup>[66]</sup>对偏心受压混凝土长柱进行了研究,文献<sup>[64]</sup>、文献<sup>[65]</sup>中以偏心率和长细比为变化参数,分别对 FRP 约束圆形、方形截面钢筋混凝土偏心受压柱进行了研究。通过试验:①证实了长细比对 FRP 约束混凝土柱的承载力影响较大,现有的普通混凝土柱的稳定系数计算公式已不再适用,FRP 约束钢筋混凝土柱的极限承载力和延性的提高幅度随构件长细比和偏心率的增大而呈现降低的趋势;②在长细比较大的情况下,FRP 约束虽没有明显提高方形偏压混凝土柱的承载力,但在一定程度上改善了构件的延性,尤其是对偏心距较小的构件。当需要同时提高方形截面混凝土长柱的承载力及延性时,建议采用双向 FRP 对构件进行包裹,或采取其他有效措施。

曹双寅等<sup>[67]</sup>进行了 5 根 CFRP 约束混凝土柱的偏心受压试验。结果表明:①CFRP 布加固方法对小偏心受压混凝土柱来说是有效的,但随着偏心距的增大,其加固效果逐渐降低,当接近未加固混凝土柱的大、小偏压界限偏心距时,承载力提高幅度急剧下降,而延性的提高并不因偏心距增大而降低,此时截面由原来的小偏心受压转变为大偏心受压;②在偏心受压荷载作用下,因截面混凝土不均匀膨胀,导致外包纤维布具有明显的应变梯度;③提出了 FRP 加固偏心受压混凝土柱的承载力计算公式,通过与试验数据的比较分析可知,该公式具备较高的精度,可为工程应用提供参考。

## 5 FRP 约束混凝土柱抗震性能

研究 FRP 约束混凝土柱的抗震性能,就是研究其在模拟地震荷载作用下的强度、刚度和延性等力学性能指标的变化规律。相对于钢筋混凝土柱而言,FRP 约束混凝土柱具有良好的动力反应性能、

较高的承载力、良好的延性和耗能能力。目前,各国学者已对 FRP 约束混凝土构件在静力和动力荷载作用下的力学性能进行了研究。大量研究表明,FRP 加固能有效提高钢筋混凝土柱的抗震性能。

Ye 等<sup>[68]</sup>研究了在轴压和循环侧压作用下,FRP 约束钢筋混凝土柱的抗震性能,试验共 8 个试件,其中 2 个试件加载至钢筋屈服程度以模拟某些已经破坏的构件的补强,1 个试件受持续轴力作用用以模拟正常使用状态下混凝土结构的补强。通过研究 CFRP 加固混凝土柱的柱中应变发展和分布,分析 CFRP 对混凝土柱延性的改善。

Nanni 等<sup>[69]</sup>进行了 26 个纯弯和压弯构件的往复荷载试验,截面形式包括圆形和方形 2 种。结果表明:未加固构件的破坏形态均为剪切破坏,而加固构件的破坏则表现为弯曲破坏;圆形截面的构件加固效果优于方形截面构件。

Priestley 等<sup>[70]</sup>进行了圆形截面大尺寸混凝土柱的往复荷载试验,为模拟桥墩的实际构造情况,在制作试件时钢筋在试件底部的塑性铰区均采用了搭接的形式。试验结果表明,采用 FRP 加固后的混凝土柱在往复荷载作用下均表现出良好的抗震性能。由于 FRP 的约束作用使得构件一方面避免了钢筋搭接部位的接头破坏,另一方面提高了构件的延性和抗剪能力,使得构件的破坏形式由剪切破坏转变为弯曲破坏。Xiao 等<sup>[71]</sup>分析了 4 个相似比为 1:2 的 FRP 加固钢筋混凝土柱的滞回性能试验,结论与文献<sup>[70]</sup>类似。

杨勇新等<sup>[72]</sup>、张轲等<sup>[73-76]</sup>、赵树红等<sup>[77]</sup>对 CFRP 加固混凝土柱进行了较为全面的试验研究,试验研究的主要参数为碳纤维加固量、剪跨比和轴压比。结果表明:①采用碳纤维布加固混凝土柱,可防止斜裂缝出现或限制斜裂缝开展,显著提高柱的受剪承载力,实现强剪弱弯的抗震要求;②随着碳纤维加固量的增加,试件由延性较差的压剪破坏逐渐转变为延性较好的正截面压弯破坏;③位移延性系数随总配箍特征值和强剪弱弯系数的增加基本呈线性增大,根据混凝土结构的抗震性能要求,强剪弱弯系数可取与混凝土规范相同的数值,但考虑到碳纤维最终拉断时具有明显的突然性,强剪弱弯系数宜比混凝土规范适当取大一些。

于清等<sup>[78-79]</sup>基于试验研究和理论分析结果,对 FRP 约束混凝土柱抗震性能研究中存在的若干关键问题进行了探讨,包括 FRP 约束混凝土构件在往复荷载作用下的受力特点、破坏特征、荷载-位移关

系、弯矩-曲率关系、耗能及延性变化规律等,重点探讨了 FRP 约束混凝土柱在往复荷载作用下的刚度特性。结果表明:随着轴压比的增大,相对于 FRP 约束混凝土柱,钢筋混凝土试件的荷载-位移滞回曲线会出现较严重的捏拢现象,且延性较差;含 FRP 率、钢筋屈服强度、纵向配筋率、混凝土抗压强度、轴压比是影响 FRP 约束混凝土柱荷载-位移和弯矩-转角滞回性能的重要参数;随着轴压比的增大,往复荷载作用下的构件刚度退化现象趋缓,FRP 约束混凝土构件的刚度退化略慢于其对应的钢筋混凝土构件。

吴刚等<sup>[80]</sup>对 CFRP 加固的钢筋混凝土工字形矩形截面柱进行了试验,研究了在低周反复荷载作用下加固前后混凝土柱的破坏形态、极限承载力、滞回曲线和延性系数,并对影响 CFRP 加固效果的因素(柱轴压比、配箍率、CFRP 黏贴方式和层数)进行了研究。结果表明:原有柱的轴压比和配箍率对加固效果影响很大;CFRP 的黏贴方式取决于抗剪补强还是延性补强;CFRP 的黏贴层数对构件的受剪承载力影响不大,但对构件的延性却影响很大。

赵彤等<sup>[81]</sup>、谢剑等<sup>[82]</sup>进行了 8 根高强混凝土柱在低周反复荷载作用下的试验,研究了碳纤维布横向包裹高强混凝土柱来提高其延性的有效性。分析了加荷角度、碳纤维布拉伸强度以及包裹层数等因素对混凝土柱加固效果的影响,并且对碳纤维布加固高强混凝土柱使其延性提高的机理进行了探讨。

赵颖华等<sup>[83]</sup>为了研究多维地震作用下钢筋混凝土柱的 CFRP 加固效果,对 6 个矩形截面钢筋混凝土柱进行了拟静力试验。荷载采用轴压、双向弯曲、扭转组合或共同作用不同荷载模式,以模拟多维地震。结果表明:尽管构件的力学响应与加固方式、荷载作用方式有着密切的关系,但 CFRP 加固能有效提高试件的延性和承载力,对于多维地震下的结构是一种理想的加固方法;在特定的荷载模式下,其提高的幅度与 CFRP 的厚度和黏贴方向有关。

到目前为止,各国学者对 FRP 约束混凝土结构和构件的抗震性能已进行了大量的试验研究<sup>[84]</sup>,但相关的理论研究尚不充分。目前研究者主要是通过试验获得构件水平力与侧移之间的滞回曲线,然后采用钢筋混凝土的基本理论,提出位移延性系数和剪切强度的计算公式,并和试验结果进行对比。

## 6 FRP 约束混凝土结构数值模拟

随着各国对 FRP 加固混凝土构件研究工作的

开展和有限元理论的发展成熟,有限元分析作为一种强有力的研究工具,近年来取得了长足的进展。

Montoya 等<sup>[85]</sup>提出了用于 FRP 加固混凝土结构的新的本构模型,该模型包括非线性弹性阶段和塑性阶段。模型预估结果与试验结果吻合良好。

Parvin 等应用非线性有限元法,选取合理的本构模型对 FRP 加固混凝土圆柱和方柱受轴心和偏心荷载作用下的受力性能进行了模拟,考虑了混凝土强度、柱截面形状、长细比、约束材料厚度等几个因素的影响。模型预测结果与试验结果吻合良好,这说明有限元分析法可以为今后 FRP 约束混凝土柱研究提供参考,然而,关于如何选取合理的本构关系,有待于进一步探讨。

陆新征等<sup>[86]</sup>采用有限元方法对 FRP 约束混凝土方柱的轴心受压性能进行了分析,并与试验结果进行了比较。结果表明,通过合理选择有限元模型,可较好地预测 FRP 约束混凝土柱的轴心受压性能。并根据数值分析结果对其受力机理进行了探讨,揭示了 FRP 与混凝土在轴压下的相互作用,为今后进行数值试验和影响因素分析奠定了基础。

肖建庄等<sup>[87]</sup>通过 3 个高轴压混凝土柱的低周反复对比试验,并结合有限元分析,对其进行了全过程仿真模拟,研究了纤维布加固对其抗震性能的改善情况。研究表明:①加固量越大,约束效果越好;②在加载初期,混凝土裂缝较少时,纤维布的约束作用不明显,但随着裂缝的不断增多,纤维对混凝土的约束能力逐渐增大,试件抗震性能的改善程度更加明显;③纤维布加固法对试件的刚度影响不大,比其他加固方式更适合于试件的抗震性能的改善;④由 ANSYS 有限元软件得到的试件骨架曲线与实测结果比较可知,在考虑纤维约束混凝土本构关系的前提下,可以采用一般有限元分析方法进行纤维布加固高轴压柱的计算机仿真分析。

王东等<sup>[88]</sup>介绍了 FRP 对混凝土柱进行抗震加固的机理,利用 ANSYS 软件模拟了轴向压力与单向及双向地震往复荷载耦合作用下 FRP 加固混凝土柱的力学响应,并与对比柱进行比较,验证了此种抗震加固方法的有效性,为试验及加固工程施工提供了有效的分析方法。同时笔者认为,目前的有限元软件如 ANSYS、ABAQUS 等,由于本身求解稳定性的要求,单元开裂达到一定比例后,易出现求解不收敛的情况,此时所承受荷载一般小于构件实际破坏荷载,需采取促进收敛的措施,但对于工程实际来说,此种结果趋于安全。

张大长等<sup>[89]</sup>为了建立统一的 CFRP 布加固钢筋混凝土柱的抗震性能的评价手段,基于二维有限元对 3 个 CFRP 布加固钢筋混凝土柱进行了 2D-FEA 参数模拟分析,考察了现存的裂缝模型、材料本构关系、混凝土的压缩模型对分析结果的影响。

赵彤等<sup>[90]</sup>基于 CFRP 加固的 8 根钢筋混凝土柱在周期反复荷载作用下受力性能的试验,编制了矩形截面钢筋混凝土双向压弯构件全过程受力分析计算机程序,对影响抗震加固效果的因素进行了分析,理论计算与试验结果吻合较好。在此基础上,进一步分析了斜向受力情况下 CFRP 的包裹层数、轴压比、加荷角度、混凝土强度等因素对抗震加固效果的影响,为更加深入的研究提供了理论依据。

## 7 结 语

近 10 余年来,纤维复合材料加固混凝土结构得到突飞猛进的发展。相应地,世界许多国家对这种应用的研究工作也日益重视,先后建立了相关的组织并投入大量的人力、物力进行了广泛的研究。本文中笔者较为详细地综述了 FRP 约束混凝土柱的本构关系、轴压、偏压力学性能、抗震性能以及数值模拟的研究状况,但是由于 FRP 加固理论、试验技术及工程应用的迅猛发展,FRP 作为一种新型的、有发展潜力的建筑材料与技术,还有很多方面有待于进一步研究。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 冯 鹏,叶列平. FRP 结构和 FRP 组合结构在结构工程中的应用与发展[C]//岳清瑞. 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会论文集. 北京:清华大学出版社,2002:51-63.  
FENG Peng, YE Lie-ping. The Application of FRP Structure and FRP Composite Structures in Structural Engineering[C]//YUE Qing-rui. Proceedings of the Second National Conference on FRP Composites Applications in Civil Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 51-63.
- [2] 蔡国宏. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景[R]. 北京:交通部科学研究院,2006.  
CAI Guo-hong. The Application Status and Development Tendency of Advanced Composite Materials in Bridge Structures [R]. Beijing: China Academy of Transportation Sciences, 2006.
- [3] 薛元德,胡 培. 纤维复合材料应用于基础设施工程——面向 21 世纪的机遇和挑战[J]. 高科技纤维与



- 应用,2000,25(2):9-13.
- XUE Yuan-de, HU Pei. Fibrous Composite in Infrastructure Engineering—Opportunity and Challenge in 21st Century[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2000, 25(2):9-13.
- [4] HOLLAWAY L C. The Evolution of and the Way Forward for Advanced Polymer Composites in the Civil Infrastructure[C]//CICE. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001: 27-40.
- [5] TRIANTAFILLOU T C. Strengthening of Structures with Advanced FRP[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998, 1(2):126-134.
- [6] SOUDKE K A. FRP Reinforcement for Prestressed Concrete Structures[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998, 1(2):135-142.
- [7] JOSE L R. Ten Concrete Column Repair Methods[J]. Construction and Building Materials, 1995, 10(3): 195-202.
- [8] 于清, 陶忠. 纤维塑料约束混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 66-72.
- YU Qing, TAO Zhong. Dynamic Behavior of FRP-confined Concrete Columns—State of the Art[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2):66-72.
- [9] 张有才, 段敬民. 建筑物的检测、鉴定、加固与改造[M]. 北京:冶金工业出版社, 1997.
- ZHANG You-cai, DUAN Jing-min. Building Detection Identification Reinforcement and Transformation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [10] BROWN V L, BARTHOLOMEW C L. FRP Reinforced Concrete Members[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(1):34-39.
- [11] 赵彤, 谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津:天津人民出版社, 2001.
- ZHAO Tong, XIE Jian. The New Technology of CFRP Strengthening Concrete Structures[M]. Tianjin: Tianjin People's Publishing House, 2001.
- [12] SAADATMANESH H. Fiber Composite for New and Existing Structures[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(3):346-354.
- [13] 岳清瑞, 陈小兵. 碳纤维材料(CFRP)加固修补混凝土结构新技术[J]. 工业建筑, 1998, 28(11):1-5.
- YUE Qing-rui, CHEN Xiao-bing. New Technology of Carbon Fiber Reinforced Plastics on Strengthening & Repairing Concrete Structures[J]. Industrial Construction, 1998, 28(11):1-5.
- [14] 胡芳芳. 纤维(FRP)约束混凝土柱力学性能研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
- HU Fang-fang. The Mechanical Properties of FRP-confined Concrete Columns[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [15] RICHART F E, BRANDTZAEG A, BROWN R L. A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses[R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-champaign, 1928.
- [16] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed Stress-strain Behaviour of Confined Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1827-1849.
- [18] MARIJN R, GIORGIO M. FRP-confined Concrete Model[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(3):143-150.
- [19] SAADATMANESH H, EHSANI M R. Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Straps[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(4):500-509.
- [20] 刘明学, 钱稼茹. FRP约束圆柱混凝土受压应力-应变关系模型[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11):1-6.
- LIU Ming-xue, QIAN Jia-ru. Compressive Stress-strain Model for Concrete of FRP Confined Cylinders [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 1-6.
- [21] 于清. 轴心受压FRP约束混凝土的应力-应变关系研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4):5-8.
- YU Qing. Stress-strain Relationship of FRP-confined Concrete Subjected to Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2001, 31(4):5-8.
- [22] 陶忠, 高献. FRP约束混凝土的应力-应变关系[J]. 工程力学, 2005, 22(4):187-195.
- TAO Zhong, GAO Xian. Stress-strain Relation of FRP-confined Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4):187-195.
- [23] SAAMAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(9): 1025-1031.
- [24] 敬登虎, 曹双寅. 纤维增强复合材料约束下方形混凝土柱的轴向应力-应变模型[J]. 建筑科学, 2005, 21(2):12-16.
- JING Deng-hu, CAO Shuang-yin. Model of Axial



- Stress-strain of Square Concrete Column Confined by FRP Wraps[J]. Building Science, 2005, 21(2): 12-16.
- [25] 敬登虎, 曹双寅. 方形截面混凝土柱 FRP 约束下的轴向应力-应变曲线计算模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 32-37.
- JING Deng-hu, CAO Shuang-yin. A Model for Calculating the Axial Stress-strain Curve of Square-section Concrete Column Confined by FRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 32-37.
- [26] 吴 刚, 吕志涛. 纤维增强复合材料(FRP)约束混凝土矩形柱应力-应变关系的研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 99-106.
- WU Gang, LU Zhi-tao. Study on the Stress-strain Relationship of FRP-confined Concrete Rectangular Columns[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(3): 99-106.
- [27] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain Model for Concrete Confined by FRP Composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(5/6): 614-628.
- [28] LAM L, TENG J G. Design-oriented Stress-strain Model for FRP-confined Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 471-489.
- [29] SAAFI M, TOUTANJI H A, LI Z J. Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4): 500-509.
- [30] 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.
- [31] XIAO Y, WU H. Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 139-146.
- [32] ROCHETTE P, LABOSSIÈRE P. Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites[J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(3): 129-136.
- [33] PARVIN A, JAMWAL A S. Effects of Wrap Thickness and Ply Configuration on Composite-confined Concrete Cylinders[J]. Composite Structures, 2005, 67(4): 437-442.
- [34] PARVIN A, JAMWAL A S. Performance of Externally FRP Reinforced Columns for Changes in Angle and Thickness of the Wrap and Concrete Strength [J]. Composite Structures, 2006, 73(4): 451-457.
- [35] 贾明英, 程 华, 陈小兵, 等. 不同 FRP 约束混凝土圆柱轴心受压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(5): 65-67.
- JIA Ming-ying, Cheng Hua, CHEN Xiao-bing, et al. Experimental Research of Properties of Circular-columns in Different FRP Shells Under Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2002, 32(5): 65-67.
- [36] 乔生儒. 复合材料细观力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.
- QIAO Sheng-ru. Composite Micro-mechanical Properties[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1997.
- [37] 杨建中, 熊光晶, 岑杰熊, 等. 混杂纤维加固混凝土方柱的轴心受压试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(5): 59-61.
- YANG Jian-zhong, XIONG Guang-jing, CEN Jie-xiong, et al. Experimental Study of Axially Loaded Concrete Rectangular Columns Strengthened with Hybrid FRP Sheets[J]. Building Structure, 2003, 33(5): 59-61.
- [38] 唐爱华, 张 敏, 聂 祺. 国产碳纤维布加固钢筋混凝土方柱受力试验[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(4): 469-472.
- TANG Ai-hua, ZHANG Min, NIE Qi. Strengthening Reinforced Concrete Square Columns Wrapped with Domestic Carbon Fiber Sheets[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2005, 25(4): 469-472.
- [39] 陈 春, 钱春香. 纤维增强树脂基复合材料包覆高强混凝土的轴心抗压性能研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 23-26.
- CHEN Chun, QIAN Chun-xiang. The Research on Compression Properties of High-strength Concrete Wrapped with FRP Composite [J]. Industrial Construction, 2001, 31(4): 23-26.
- [40] 黄龙男, 赵景海, 沈 军, 等. 纤维增强塑料补强混凝土柱的研究[J]. 混凝土, 2000(9): 8-10.
- HUANG Long-nan, ZHAO Jing-hai, SHEN Jun, et al. Research on Concrete Columns Reinforced with FRP[J]. Concrete, 2000(9): 8-10.
- [41] 程亚鹏, 邹超英. 碳纤维条带加固混凝土短柱的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2005(5): 44-45.
- CHENG Ya-peng, ZOU Chao-ying. Experimental Research of Concrete Short Columns Reinforced with CFRP Strips [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005(5): 44-45.
- [42] 惠军民. 纤维布包裹加固钢筋混凝土柱的轴心受压试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- HUI Jun-min. Experimental Study of the Axial-compression Reinforced Concrete Columns Wrapped with

- Fiber Reinforced Plastics[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003.
- [43] PAN J L, XU T, HU Z J. Experimental Investigation of Load Carrying Capacity of the Slender Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP[J]. Construction and Building Materials, 2007, 22(11): 1991-1996.
- [44] DEMERS M, NEALE K W. Strengthening of Concrete Columns with Unidirectional Composite Sheets [J]. The Canadian Society for Civil Engineering, 1994, 20(S): 895-950.
- [45] PESSIKI S, HARRIES K A, KESTNER J T, et al. Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 237-245.
- [46] 潘景龙, 王雨光, 来文汇. 混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 17-19.
- PAN Jing-long, WANG Yu-guang, LAI Wen-hui. Effect of Sectional Shape of Concrete Column on the Bearing Capacity of Short Columns Wrapped with FRP[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 17-19.
- [47] 潘景龙, 金熙南, 王凤来, 等. 钢筋混凝土轴压短柱包裹纤维材料后的承载性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(3): 14-19.
- PAN Jing-long, JIN Xi-nan, WANG Feng-lai, et al. Behavior of Short Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP Under Axial Compression[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(3): 14-19.
- [48] 肖建庄, 龙海燕, 石雪飞, 等. GFRP 对不同断面形状混凝土柱约束性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(4): 21-26.
- XIAO Jian-zhuang, LONG Hai-yan, SHI Xue-fei, et al. Experimental Study on Confinement Behavior of Concrete Columns with Various Section Shapes by GFRP[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2003(4): 21-26.
- [49] WANG Lei-ming. Effect of Conner Radius on the Performance of Carbon FRP-confined Rectangular Columns[D]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2007.
- [50] KUMUTHA R, PALANICHAMY M S. Investigation of Reinforced Concrete Columns Confined Using Glass Fiber-reinforced Polymers[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006, 25(16): 1669-1678.
- [51] DEMERS M, NEALE K W. Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre-reinforced Composite Sheets—an Experimental Study[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1999, 26(2): 226-241.
- [52] HADI M N S, LI J. External Reinforcement of High Strength Concrete Columns [J]. Composite Structures, 2004, 65(3/4): 279-287.
- [53] HADI M N S. Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns Under Eccentric Loading [J]. Composite Structures, 2006, 72(4): 503-511.
- [54] HADI M N S. The Behaviour of FRP Wrapped HSC Columns Under Different Eccentric Loads[J]. Composite Structures, 2007, 78(4): 560-566.
- [55] HADI M N S. Comparative Study of Eccentrically Loaded FRP Wrapped Columns[J]. Composite Structures, 2006, 74(2): 127-135.
- [56] HADI M N S. Behaviour of FRP Strengthened Concrete Columns Under Eccentric Compression Loading [J]. Composite Structures, 2007, 77(1): 92-96.
- [57] LI J, HADI M N S. Behaviour of Externally Confined High-strength Concrete Columns Under Eccentric Loading[J]. Composite Structures, 2003, 62(2): 145-153.
- [58] PARVIN A, WANG W. Behavior of FRP Jacketed Concrete Columns Under Eccentric Loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3): 146-152.
- [59] 唐爱华, 张敏. 碳纤维布(CFRP)加固钢筋混凝土偏心受压柱的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(增): 954-957.
- TANG Ai-hua, ZHANG Min. Experiment on Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Covered With Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. Industrial Construction, 2005, 35(S): 954-957.
- [60] CHAALLAL O, SHAHAWY M. Performance of Fiber-reinforced Polymer-wrapped Reinforced Concrete Column Under Combined Axial-flexural Loading [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 659-668.
- [61] 代云秀. 纤维布加固钢筋混凝土偏心受压柱的试验研究与理论分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- DAI Yun-xiu. Experiment Research and Theory Analysis on Reinforced Concrete Columns Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Under Eccentric Loading[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [62] 冼巧玲, 易伟建, 丁洪涛. 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): 79-81.
- XIAN Qiao-ling, YI Wei-jian, DING Hong-tao. Experiment and Research of Reinforced Concrete Column Externally Bonded with CFRP Sheets Under Eccen-

- tric Load[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11): 79-81.
- [63] 洗巧玲, 易伟建, 丁洪涛. 外贴碳纤维布钢筋混凝土偏压柱强度和延性的影响因素分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 101-103.
- XIAN Qiao-ling, YI Wei-jian, DING Hong-tao. The Influence Factors on the Strength and Ductility of the Reinforced Concrete Columns Externally Bonded with CFRP[J]. Industrial Construction, 2005, 35(5): 101-103.
- [64] 陶忠, 于清, 韩林海, 等. FRP 约束钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 75-82.
- TAO Zhong, YU Qing, HAN Lin-hai, et al. Experimental Behavior of FRP-confined Circular RC Columns[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 75-82.
- [65] 陶忠, 于清, 藤锦光. 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(9): 5-7.
- TAO Zhong, YU Qing, TENG Jin-guang. Experimental Behavior of FRP-confined Square RC Long Columns Under Eccentric Loading[J]. Industrial Construction, 2005, 35(9): 5-7.
- [66] 姜安庆, 苏旭霖, 陆洲导. 碳纤维布加固小偏压钢筋混凝土柱承载力分析[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(3): 53-55.
- JIANG An-qing, SU Xu-lin, LU Zhou-dao. Capacity Analysis of Little Eccentricity Beam-columns Strengthened with CFRP[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(3): 53-55.
- [67] 曹双寅, 敬登虎, 孙宁. 碳纤维布约束加固混凝土偏压柱的试验研究与分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 26-33.
- CAO Shuang-yin, JING Deng-hu, SUN Ning. Behaviors of Concrete Columns Strengthened by CFRP Sheets Under Eccentric Compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(8): 26-33.
- [68] YE L P, ZHAO S H, ZHANG K. Experimental Study on Seismic Strengthening of RC Columns with Wrapped CFRP Sheets[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 499-506.
- [69] NANNI A, NORRIS M S. FRP Jacketed Concrete Under Flexure and Combined Flexure-compression[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(5): 273-281.
- [70] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, FYFE E. Column Seismic Retrofit Using Fibreglass/Epoxy Jackets [C]//NEALE K W, LABOSSIERE P. Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Sherbrooke: CSCE, 1992: 247-251.
- [71] XIAO Y, WU H, MA R. Seismic Retrofit of Existing RC Columns Using Multi-layer Fiber-reinforced Composite Jackets[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(3): 139-146.
- [72] 杨勇新, 岳清瑞. 碳纤维布加固混凝土结构性能评价模型[C]//张轲, 叶列平. 第五届全国建筑物鉴定与加固改造学术研讨会论文集: 上册. 汕头: 汕头大学出版社, 2000: 142-147.
- YANG Yong-xin, YUE Qing-rui. The Evaluation Model of CFRP-Reinforced Concrete Structures[C]//ZHANG Ke, YE Lie-ping. Proceedings of the Fifth National Conference on Building Identification and Reinforcement; Volume One. Shantou: Shantou University Press, 2000: 142-147.
- [73] 张轲, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土柱改善延性的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 16-19.
- ZHANG Ke, YUE Qing-rui, YE Lie-ping, et al. Experimental Research on Ductility Improvement of Concrete Column Strengthened with CFS[J]. Industrial Construction, 2000, 30(2): 16-19.
- [74] 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.
- [75] 张轲, 叶列平, 岳清瑞, 等. 混凝土柱破坏后碳纤维布加固试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 76-78.
- ZHANG Ke, YE Lie-ping, YUE Qing-rui, et al. Experimental Research on Ductility Improvement of Concrete Column with Cracks Strengthened with CFS[J]. Industrial Construction, 2001, 31(12): 76-78.
- [76] 张轲, 岳清瑞, 付常武, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱后弯矩-曲率关系分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 20-23.
- ZHANG Ke, YUE Qing-rui, FU Chang-wu, et al. Moment and Curvature Relation Analysis of RC Concrete Column Strengthened with CFS[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 20-23.
- [77] 赵树红, 李全旺, 叶列平, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱受剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 12-15.
- ZHAO Shu-hong, LI Quan-wang, YE Lie-ping, et al. Experimental Research on Shear Behaviors for Con-

- crete Column Strengthened with CFS[J]. Industrial Construction, 2000, 30(2): 12-15.
- [78] 于清, 陶忠, 高献. FRP约束混凝土柱抗震性能若干问题的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 75-82.
- YU Qing, TAO Zhong, GAO Xian. Several Problems in Seismic Behavior of FRP-confined Concrete Columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 75-82.
- [79] 陶忠, 高献, 于清. FRP约束圆钢筋混凝土柱滞回性能的理论分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(9): 15-19.
- TAO Zhong, GAO Xian, YU Qing. Theoretical Analysis of Hysteretic Behavior of FRP-confined RC Columns[J]. Industrial Construction, 2005, 35(9): 15-19.
- [80] 吴刚, 吕志涛, 蒋剑彪. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 42-45.
- WU Gang, LU Zhi-tao, JIANG Jian-biao. Experimental Study on the Seismic Behavior of RC Columns Strengthened with Carbon Fiber Sheet[J]. Building Structure, 2002, 32(10): 42-45.
- [81] 赵彤, 刘明国, 谢剑, 等. 碳纤维布改善高强混凝土柱延性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 46-52.
- ZHAO Tong, LIU Ming-guo, XIE Jian, et al. Experimental Study on the Application of Continuous Carbon Fiber Sheet to Improve the Ductility of High-strength Concrete Columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 46-52.
- [82] 谢剑, 刘明学, 赵彤. 碳纤维布提高高强混凝土柱抗震能力评估方法[J]. 天津大学学报, 2005, 38(2): 109-113.
- XIE Jian, LIU Ming-xue, ZHAO Tong. Anti-seismic Performance Evaluating Method of High Strength Concrete Columns Retrofitted with CFRP Fabric[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(2): 109-113.
- [83] 赵颖华, 王东. CFRP加固钢筋混凝土柱的多维拟静力试验研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(1): 53-58.
- ZHAO Ying-hua, WANG Dong. A Quasi-static Test on CFRP Strengthened RC Columns Under Combined Seismic Loading[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(1): 53-58.
- [84] 倪永军, 朱晞, 魏庆朝, 等. 纤维增强聚合物抗震加固混凝土柱研究综述[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(4): 21-26.
- NI Yong-jun, ZHU Xi, WEI Qing-chao, et al. Seismic Retrofit of Concrete Columns with Fiber Reinforced Polymer (FRP)—a State-of-the-art [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(4): 21-26.
- [85] MONTOYA E, VECCHIO F J, SHEIKH S A. Numerical Evaluation of the Behaviour of Steel and FRP-confined Concrete Columns Using Compression Field Modelling[J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1535-1545.
- [86] 陆新征, 冯鹏, 叶列平. FRP布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 46-51.
- LU Xin-zheng, FENG Peng, YE Lie-ping. Behavior of FRP-confined Concrete Square Columns Under Uniaxial Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 46-51.
- [87] 肖建庄, 龙海燕, 石雪飞. 纤维布加固高轴压混凝土柱抗震性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(8): 990-995.
- XIAO Jian-zhuang, LONG Hai-yan, SHI Xue-fei. Study on Seismic Behavior of High-level Axial Compression Concrete Columns Strengthened with FRP [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(8): 990-995.
- [88] 王东, 赵颖华, 于哲夫. 混凝土柱FRP抗震加固的有限元分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2001, 17(4): 259-261.
- WANG Dong, ZHAO Ying-hua, YU Zhe-fu. FEA of Concrete Column Reinforced with FRP Against Seism [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University: Natural Science, 2001, 17(4): 259-261.
- [89] 张大长, 吴智深. CFRP纤维布加固RC柱的有限元分析模型[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 156-164.
- ZHANG Da-chang, WU Zhi-shen. Finite Element Analytical Models for Reinforced Concrete Columns Reinforced with CFRP Sheets [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 156-164.
- [90] 赵彤, 刘明国, 谢剑. 碳纤维布抗震加固斜向受力钢筋混凝土柱的非线性分析[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 53-59.
- ZHAO Tong, LIU Ming-guo, XIE Jian. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet Subjected to Axial Compression and Biaxial Bending[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 53-59.