

基于纤维模型的 CFRP 布加固混凝土柱有限元分析

陈学伟¹ 韩小雷^{1,2} 季静¹ 郑宜²

(1. 华南理工大学建筑学院 广州 510640;

2. 华南理工大学建筑学院高层建筑结构研究所 广州 510640)

摘要: 在新型加固技术中, 利用纤维增强复合材料(FRP)布横向包裹钢筋混凝土柱可以改善其抗震性能。对 CFRP 布加固的混凝土柱进行的有限元分析可以对加固后的柱子进行承载力与抗震性能的评估。本文采用基于纤维模型的 OpenSees 非线性有限元软件, 对 CFRP 加固的矩形柱试件进行模拟分析, 并与文献中的试验结果进行对比。对比结果表明用 OpenSees 的纤维模型可以有效地对构件和结构进行加固后的承载力及抗震性能分析。

关键词: 纤维增强复合材料布 加固结构 非线性有限元 纤维模型

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONCRETE COLUMN RETROFITTED WITH HYBRIDIZED CFRP METHOD

Chen Xuewei¹ Han Xiaolei^{1,2} Ji Jing¹ Zheng Yi²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology Guangzhou 510640.

2. Tall Building Structure Research Institute, College of Architecture and Civil Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A new retrofit method for improving the seismic behavior of reinforced concrete columns is developed in which the fiber-reinforced-plastics(FRP) sheets are used in the retrofitted area. The analysis of concrete column retrofitted with transverse CFRP is useful for evaluating the capacity and seismic performance of the column. The nonlinear finite element analysis software OpenSees is used to analyze the retrofitted specimen. The analysis results are compared with the reference experiment results. It has been found out that fiber element in OpenSees can analyze the capacity and seismic performance of the component and structure retrofitted with hybridized CFRP effectively.

Keywords: Fiber-Reinforced-Plastics (FRP) Retrofitted Structure Nonlinear Finite Element Fiber Element Model

我国有大量的建筑物因种种原因需要维修加固, 许多钢筋混凝土柱由于设计时没有采用现代抗震设计标准, 而不能满足抗震要求, 需要采取措施来对混凝土柱进行加固处理。常用的加固方法有: 粘钢、外包钢、扩大柱截面、后张拉预应力技术、包裹/粘贴 FRP 材料等。其中, 外部粘贴 FRP 材料加固技术因具有重量轻、安装方便、施工速度快、维护费用低、强度高、耐疲劳、耐久性好等优点而受到各国学者的广泛关注, 并进行了大量的试验研究工作。

1 CFRP 布加固混凝土柱原理

FRP 是一中正交各向异性的线弹性材料, 具有以下特点: (1) FRP 抗拉强度高于普通钢筋, 在达到抗拉强度之前, 几乎没有塑性变形产生。(2) 抗剪强度低。FRP 的抗拉强度虽然很高, 但抗剪强度比钢筋低^[1]。

当采用外部粘贴 FRP 材料来加固混凝土柱, 提高其在地震中发生弯曲破坏的延性能力, 主要是

通过对混凝土的横向约束来提高柱的抗震性能。对于矩形柱, 外部 FRP 材料对柱的约束作用及约束区大小如图 1 所示。利用横向包裹 FRP 布增强对柱截面角部区域混凝土的约束, 提高混凝土的极限变形能力, 进一步改善混凝土柱的抗震性能。

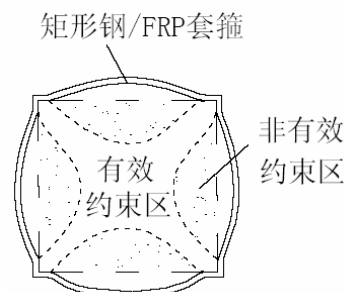


图 1 FRP 布加固矩形柱的约束区

2 CFRP 布加固混凝土柱有限元分析方法

国内外利用通用非线性有限元软件如 ANSYS, ABAQUS 等对 FRP 加固混凝土结构的分析取得研究进展, 分析的理论渐渐成熟。常用方法是用实体

单元模拟混凝土，用实体或壳单元模拟 FRP 加固材料，材料之间的界面通过接触单元去模拟^[2]。基于实体单元和壳单元的有限元分析方法，由于自由度数量大，难以应用于整体 FRP 加固结构的受力分析。相对于实体有限元模型而言，纤维模型既能在一定精度下模拟 FRP 加固混凝土构件的力学性能又具备比较小的自由度数。纤维模型单元可应用于加固结构的受力分析。

3 基于纤维模型的 OpenSees 软件简介

OpenSees 全称 Open System For Earthquake Engineering Simulation，开源的地震工程模拟系统。其程序代码是公开的，用户可以通过编程手段为系统增加新的材料本构和单元类型。程序主要用于分析结构在地震作用下的反应。其功能包括线性分析，静力和动力非线性分析，特征值计算等功能。程序的有限元单元类型丰富，结构非线性分析中主要使用非线性梁柱单元 nonlinear beam column。此单元是基于纤维模型的非线性单元，可应用于杆系结构的静力与动力非线性分析并考虑 P-Delta 效应。

OpenSees 程序自带多种的混凝土与钢筋的材料本构，如本文应用的 Kent-Scott-Park 混凝土本构模型与 Giuffrè-Menegotto-Pinto 钢筋本构模型。对于新型的 FRP 材料，OpenSees 提供多折线带滞回参数的材料本构 Hysteretic，可以反映加固材料特别的非线性特征。

在 OpenSees 程序中，加固混凝土构件截面可划分为若干个混凝土纤维，钢筋纤维以及 CFRP 材料纤维，如图 2 所示。用户可以分析定义每个纤维的位置，截面面积和本构关系。程序自动根据平截面假定得到每个纤维的应变，并迭代计算确保截面受力平衡。混凝土和钢筋的本构关系如图 3(a-b)所示。

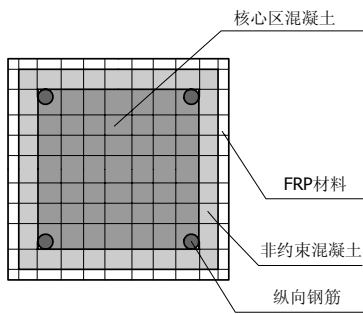
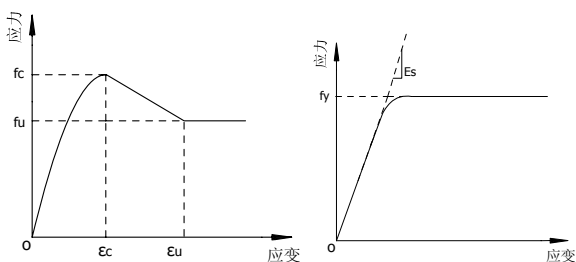


图 2 FRP 布加固混凝土矩形柱纤维截面



(a) Kent-Scott-Park 混凝土模型 (b) Giuffrè-Menegotto-Pinto 钢筋模型
图 3 混凝土与钢筋本构关系

在本文中采用的混凝土本构不考虑受拉部分，Kent-Scott-Park 模型由上升段的曲线和下降段的二折线组成。^[3]假设约束混凝土的抗压强度和峰值应变都与素混凝土相等，上升段曲线也相同，采用 Hognestad 的二次式 $y=2x-x^2$ 。下降段的斜线是由应力 $\sigma_c=0.5f_c'$ 处的应变确定：

$$\varepsilon_{0.5} = \left(\frac{20.67 + 2f_c'}{f_c' - 6.89} + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s}} \right) \times 10^{-3} \quad (1)$$

f_c' ——混凝土的圆柱体抗压强度，N/mm²；
 ρ_s ——横向箍筋对核心混凝土（取箍筋外皮以内）的体积率；
 b'' ——从箍筋外皮量测的约束核心宽度；
 s ——箍筋间距。

其中， b'' 是取 X 形核芯区的等效后的矩形边长。X 形核芯区的面积计算公式可参考文献[7]所提出的式(2)。

$$A_e = \frac{3A_c [(b-2r)^2 + (d-2r)b(2-b/d)]}{3} \quad (2)$$

4 试验介绍

本文列举出文献^[4]中的 CFRP 布加固矩形混凝土柱试验情况，并将与算例的有限元计算进行对比。

试件设计为倒 T 型悬臂受力构件，采用商品混凝土，试验测得混凝土圆柱体试件（100mm×200mm）的抗压强度为 44MPa。混凝土保护层厚度为 25mm，柱内纵筋直径为 16mm，试验测得屈服强度为 507MPa；箍筋直径 6mm，间距 100mm，试验测得屈服强度为 419MPa。整个构件一次浇注，详细尺寸如图 4 所示。^[4]

CFRP 布加固区高度为 250mm；加固区与基础顶面留有 15mm 的间隙；本文列出试件 S2 与 S5 的详细参数，如表 1 所示。

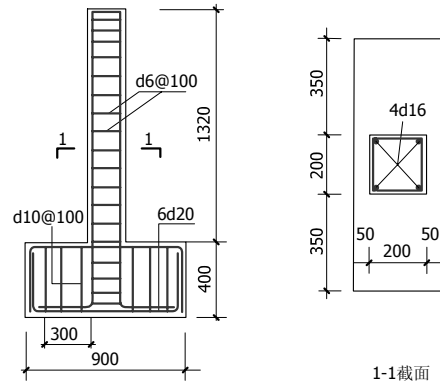


图 4 CFRP 布加固矩形柱设计图

表 1 试件参数表

试件	纵筋+箍筋	加载形式	加固方法
S2	4d16+d6@100	循环加载	参考柱
S5	4d16+d6@100	循环加载	CFRP 布

试件 S5 采用两层 CFRP 布横向包裹加固区，CFRP 布的厚度为 0.165mm，其性能指标见表 2。粘贴前对混凝土柱截面进行倒角处理，倒角半径 16mm。每层 CFRP 布均设一个搭接接头，搭接长度 110mm。

表 3 CFRP 布的性能指标

公称厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
0.165	4085	230	1.78

加载装置如图 5 所示, 分别采用 500kN 和 100kN 量程的 MTS 伺服千斤顶施加轴力与侧向力。试验先施加轴力至 440kN, 然后施加侧向荷载。对试件 S2 与试件 S5 按照 $\pm 13\text{mm}$, $\pm 26\text{mm}$, $\pm 39\text{mm}$, $\pm 52\text{mm}$, $\pm 65\text{mm}$, $\pm 78\text{mm}$, $\pm 91\text{mm}$, $\pm 100\text{mm}$ 的顺序, 按位移控制模式加卸侧向力, 每级荷载循环两次, 至试件破坏或试验设备的最大测试范围停止试验。

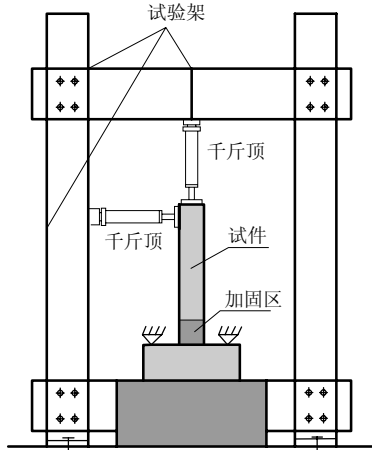


图 5 试验加载装置图

5 OpenSees 有限元分析

试件有限元模型中, 采用 nonlinear beam column 单元模拟矩形柱, 柱底设为固定端。模型不考虑柱的扭转变形。模型及其单元划分如图 6 所示。

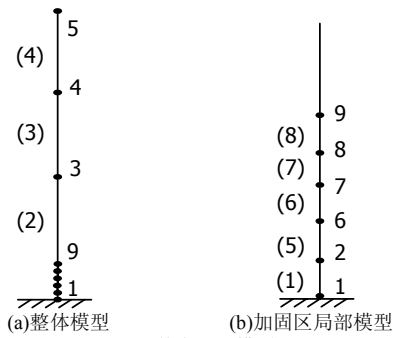


图 6 试件有限元模型

纤维截面如图 2 所示, 核芯区实际形状是 X 形, 为了便于建模计算, 核心区简化为矩形, 核心区混凝土强度与延性再作调整。材料参数按试验实测参数输入。CFRP 布由于抗拉强度, 假设整个试验过程中处于弹性状态, 本构选择线弹性本构, 弹性模量取 230GPa。假定 CFRP 布与混凝土柱的粘结紧密, 符合平截面假定。

箍筋提高了混凝土核心区的延性, 通过式(1)计算后取 $\epsilon_{0.2}=0.0035$ 。由于箍筋间距 $s \approx b$, 箍筋有一点的约束作用。

考虑 CFRP 布对混凝土横向变形的约束作用,

从而提高混凝土的强度与延性, 在 OpenSees 模型中通过混凝土的材料本构考虑。加固区的混凝土的抗压强度提高 0.5 倍, 极限应变提高 1 倍。本构不考虑受拉区的贡献。

6 有限元分析结果分析

试件 S2 加载至侧移 $\pm 52\text{mm}$, 构件发生破坏停止加载。试件 S5 加载至试验装置限值 $\pm 100\text{mm}$ 为止。有限元分析迭代算法采用 Newton 迭代法, 收敛准则采用能量准则, 竖向重力荷载取 440kN, 分 10 步加载, 水平方向按位移模式加载, 每次循环加载取 100 步。纤维单元积分点分段为 3 段。

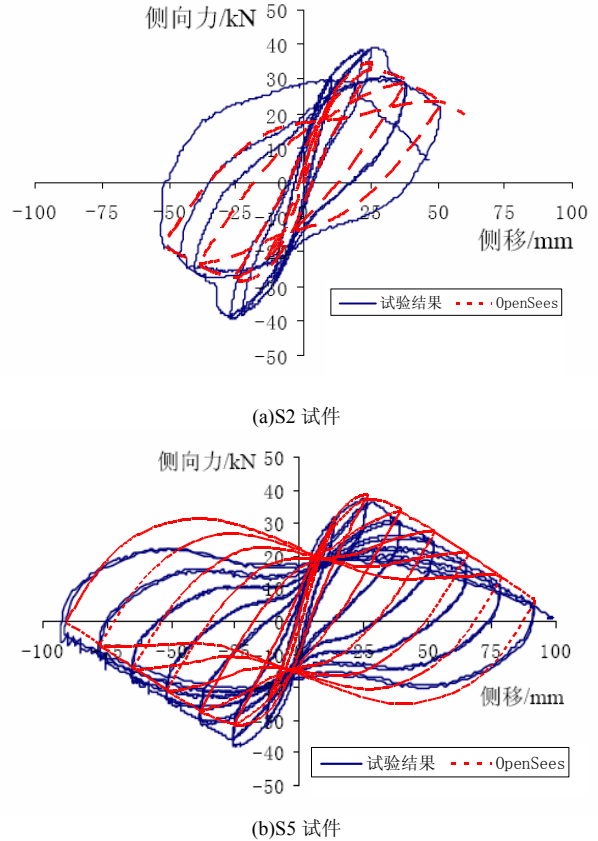


图 7 有限元计算与试验 P-Δ 曲线图

有限元计算的结果与文献中试验结果的 P-Δ 曲线如图 7 所示。

从试验结果与 OpenSees 有限元计算结果的对比图可得知, 在未加固的混凝土柱, 电算中混凝土破坏前的 P-Δ 曲线与试验结果基本吻合。电算结果的极限强度比试验的稍低。用 CFRP 布加固端部后的混凝土柱, CFRP 布的约束效应提高了混凝土的强度与延性。试验结果中, 强度提高不明显, 延性提高明显。通过调整 CFRP 布的约束后混凝土强度与延性的提高参数后, 电算结果的骨架曲线与试验结果非常吻合, 只是在卸载区侧向水平力及卸载路径有所偏差。总体而言, 通过纤维模型非线性有限元的方法可以宏观地反映加固后混凝土构件的承载力及延性, 可以在工程应用程度上对构件及结构进行加固后非线性的分析。

7 总结

本文通过非线性有限元软件 OpenSees 对 CFRP 布横向包裹加固的混凝土矩形柱进行低周往复加载分析,并与参考文献的试验结果进行对比。通过对比得到以下结论:

(1) OpenSees 的纤维单元模型可以宏观的反映加固层与混凝土共同作用的非线性力学特征;

(2) OpenSees 的纤维单元是基于平截面假定的,对于加固层与混凝土表层产生滑移、脱开的情况,纤维单元并不能真实的模拟,此情况需要在以后的研究中深化;

(3) 纤维单元模型比起实体或壳单元模型具有自由度少、易收敛及计算速度快的特征。纤维单元可以通过比较少的自由度建立整体结构模型,可以通过静力动力分析得出整体结构在加固后的抗震性能。

(4) 加固后混凝土的约束加强,混凝土的单轴本构发生变化,强度与延性得到提高。混凝土的强度与延性的提高的参数是有限元分析的关键。参数的计算可以通过大量的加固混凝土的试验分析得到。这对评估与计算加固后混凝土结构的承载力具有重要意义。

参考文献

- 1 郭樟根等,FRP 与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究,土木工程学报,2007,40(3):1~5
- 2 司炳君, Solid65 单元在混凝土结构有限元分析中的应用,工业建筑 2007,37(1): 87~92
- 3 Kent D C, Park R. Flexural Members with Confined Concrete. ASCE,1971.97(ST7):1969~1990
- 4 刘涛等,组合 FRP 技术加固混凝土矩形柱的抗震性能试验研究,工程力学,2007, 24(6):128~132
- 5 史庆轩等,FRP 约束混凝土柱的研究和应用简述, 2006, 工程抗震与加固改造, 28(6)
- 6 Zhenyu Zhu,Joint Construction and Seismic Performance of Concrete-Filed Fiber Reinforced Polymer Tubes, , North Carolina State University,2004
- 7 刘涛等,碳纤维布约束混凝土矩形柱的抗压性能研究,2006,土木工程学报,39(12)