

考虑损伤程度的 CFRP 加固 RC 框架 Pushover 分析

孙莉萍¹, 王新玲², 邹旭岩³, 钱 辉²

(1. 河南交通职业技术学院, 河南 郑州 450000; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 中州大学 工程技术学院, 河南 郑州 450044)

摘 要: 基于前期 RC 框架及 CFRP 布加固完好 RC 框架的水平低周反复荷载试验研究, 采用有限元软件 SAP2000 对该试验进行 Pushover 分析, 结果表明模拟结果与试验值基本相符. 以此为基础, 通过定义材料的弹性模量(刚度)变化, 来表达 RC 框架的损伤程度, 从而建立 CFRP 布加固损伤钢筋混凝土框架结构的有限元分析模型, 继而对该模型进行了 Pushover 分析, 研究考虑损伤参数的 CFRP 布加固 RC 框架结构抗震性能, 计算结果表明, 损伤程度既大幅度减小加固框架的延性, 也降低加固框架的极限承载力, 验证了笔者分析方法的可行性与合理性.

关键词: CFRP 布加固; 损伤框架; Pushover 分析; 抗震性能

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.013

0 引言

碳纤维复合材料(简称 CFRP)以其高强、耐腐蚀、施工方便、不占用空间等优点, 近年来被广泛用于混凝土结构加固中^[1-2]. 国内外学者已对 CFRP 加固混凝土结构进行了大量的相关试验及研究. 早在 1989 年, 日本土木学会已设立了纤维增强混凝土委员会, 并召开了“混凝土结构的 FRP 加固材料的应用”学术会议^[3-4]. 从此 CFRP 用于加固混凝土各类构件的研究方兴未艾, 文献[5-7]分别对 CFRP 布加固 RC 梁的受弯性能、受剪性能及 RC 框架节点的抗震性能进行了试验研究, 并分析了相应的加固机理; 文献[8]对 CFRP 布加固完好 RC 框架结构进行了相关试验, 研究了 CFRP 加固 RC 框架结构的抗震性能. 然而, 限于试验设备、场地以及经费等诸多条件, 完全或结合试验方法研究 CFRP 加固混凝土结构各种性能是比较困难的, 也是不合理的. 另外, 借助相关抗震分析软件, 如 SAP2000 中的 Pushover 分析功能, 即可以得到框架的基底剪力和顶点位移, 还能得到所有梁柱塑性铰及产生的先后顺序、所

处状态, 利用该软件对已有试验进行仿真模拟验证, 同时可以实现不同工况下的结构性能分析, 节约资源. 因此, 笔者结合课题组前期的 CFRP 布加固 RC 框架试验研究, 采用 SAP2000 对试验框架进行 Pushover 分析, 通过试验与仿真结果比较, 验证有限元分析的合理性, 并以此为基础, 开展 CFRP 加固损伤 RC 框架抗震性能的研究.

1 RC 框架试验及 Pushover 分析

1.1 单层单跨 RC 框架水平低周反复试验概况^[8]

RC 框架试件原型为一两层工业厂房, 框架柱网尺寸为 6 m × 6 m, 层高为 5.1 m, 梁截面尺寸为 600 mm × 350 mm, 柱截面尺寸为 500 mm × 400 mm, 按 9 度抗震设防烈度、二类场地设计框架截面和配筋. 然后采用 1:3 进行缩尺, 模型编号为 KJ-1(截面和配筋如图 1 所示). 对该 KJ-1 进行水平低周反复荷载试验, 试验结果如表 1 所示.

1.2 单层单跨 RC 框架模型建立及 Pushover 分析

对 KJ-1 试验进行仿真分析. 采用 SAP2000, 建立有限元计算模型. 其中, 构件材料强度、截面

收稿日期:2014-10-26; 修订日期:2014-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478438); 河南省重点科技攻关项目(132102310277)

作者简介:孙莉萍(1979-), 女, 河南郑州人, 河南交通职业技术学院讲师, 硕士, E-mail: sunmolly@163.com.

通讯作者:王新玲(1963-), 女, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构工程方向的教学和研究工作, E-mail: wxlwzn@126.com.

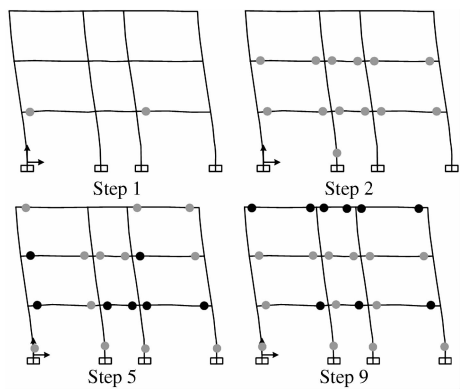


图 4 KJ-2 Pushover 分析结果
Fig.4 The Pushover results of KJ-2

2 CFRP 布加固完好 RC 框架试验及 Pushover 分析

2.1 CFRP 加固完好单层单跨 RC 框架试验^[9]

对文献[8]所设计的 KJ-1 进行 CFRP 布加固(RC 框架试件为未损伤框架). 加固用 CFRP 布为 FAW200 型,厚度为 0.1 mm/层,其抗拉强度为 3 200 MPa,弹性模量为 290 GPa. 加固后框架试件编号为 KJ-1A,其加固情况如图 5 所示. KJ-1A 的水平低周反复荷载试验结果如表 3 所示.

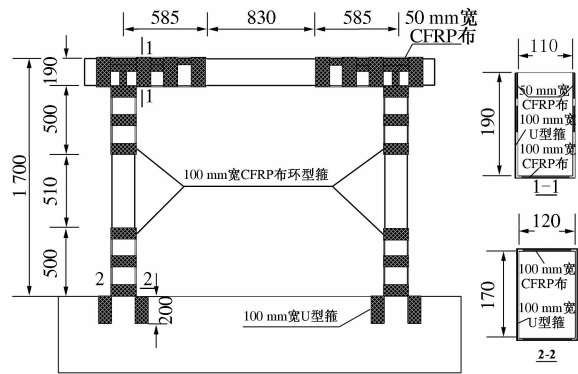


图 5 KJ-1A 详图
Fig.5 The details of KJ-1A

表 3 KJ-1A 试验结果

Tab.3 Test results of KJ-1A				
KJ-1A	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm
试验值	18	6.57	52	34.57

2.2 KJ-1A 模型建立及 Pushover 分析

在 1.2 建立模型的基础上,建立 KJ-1A 分析模型,其中假定 CFRP 布和混凝土间没有滑移.

图 6 为 KJ-1A 的 Pushover 分析结果,其塑性铰形成与发展,类似于 KJ-1. 首先在梁左端出现塑性铰,在 Step3 时梁端和柱端均出现塑性铰框架形成机构体系,至 Step5 后梁两端塑性铰达到

“生命安全”状态,Step8 时梁两端和右柱下端塑性铰达到极限状态,表明 KJ-1A 即将倒塌.

表 4 列出了 KJ-1A 的模拟计算结果,其分析结果与 KJ-1 类似,模拟分析结果的屈服荷载和屈服位移与试验值有较大差别,分析原因同 KJ-1.

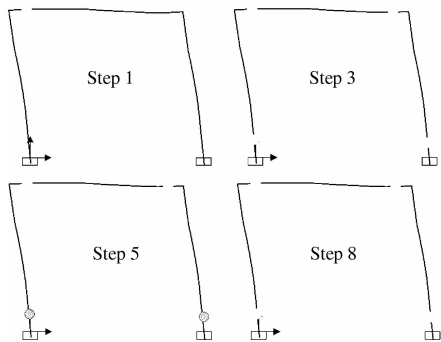


图 6 KJ-1A Pushover 分析结果
Fig.6 The Pushover results of KJ-1A

表 4 KJ-1A 模拟结果

Tab.4 The simulate results of KJ-1A				
	屈服荷载/ kN	屈服位移/ mm	极限荷载/ kN	极限位移/ mm
KJ-1A	24	3.14	43	31.05

3 CFRP 加固损伤 RC 框架 Pushover 分析

上述分析结果表明,利用 SAP2000 进行 RC 框架结果加固的抗震性能分析方法是可行的,其模拟结果较为理想. 实际工程中,需要加固的结构大部分处于不同损伤状态,相关研究表明损伤程度对加固后框架的性能有明显影响,因此,笔者针对已损伤 RC 框架结果,采用 SAP2000 对 CFRP 布损伤 RC 框架进行 Pushover 分析,以研究 CFRP 布加固损伤 RC 框架的抗震性能.

3.1 RC 框架结构损伤程度分析

将 RC 框架按照不同损伤程度,分为轻度损伤、中度损伤和严重损伤 3 个阶段^[10]. 其中:微度损伤定义为框架受力至截面开裂;轻中度损伤定义为截面开裂至一个框架柱截面屈服形成塑性铰;严重损伤定义为框架柱截面屈服至框架破坏.

文献[9]给出了中度损伤时相对刚度与相对荷载关系的公式

$$\Delta K_2 = -0.91\Delta F + 0.918, \tag{1}$$

式中: ΔK_2 为开裂到屈服阶段的相对刚度,即绝对刚对与初始刚度之比; ΔF 为相对荷载,定义当前荷载与屈服荷载之比.

在用 SAP2000 对框架进行 Pushover 分析时,从出现塑性铰开始,保存框架顶点位移和基底剪

力,并以此作为损伤加固状态,即中度损伤阶段末阶段.

3.2 CFRP 加固单层单跨损伤 RC 框架 Pushover 分析

在 KJ-1 的基础上,定义框架结构损伤,然后按 KJ-1A 处理方式,建立 CFRP 布加固损伤 RC 框架结构模型 KJ-1B,并进行 Pushover 分析.图 7 为 KJ-1B 的 Pushover 分析结果.

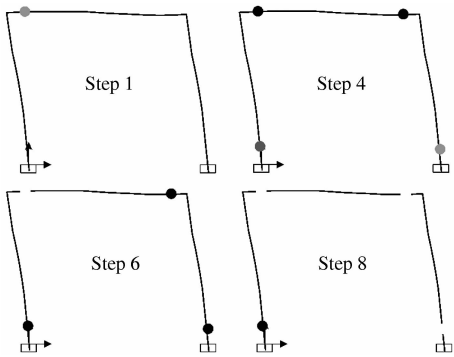


图 7 KJ-1B Pushover 分析结果
Fig.7 The Pushover results of KJ-1B

从图 7 可以看出,与 KJ-1A 类似,塑性铰首先在梁左端出现,继而(Step4)梁端和柱端均出现塑性铰,框架形成机构体系;进入 Step6 后梁左端塑性铰达到“生命安全”状态,Step8 时梁两端塑性铰达到极限状态.

3.3 CFRP 加固损伤 RC 框架与加固完好框架结果比较分析

表 5 给出了 KJ-1 (未加固框架)、KJ-1A (CFRP 布加固完好 RC 框架)和 KJ-1B(CFRP 布加固损伤 RC 框架)的模拟计算结果.由表 5 可以看出,与 KJ-1 相比,KJ-1A 的屈服荷载和极限荷载均有所提高,这表明即使框架损伤,采用 CFRP 布加固后,其屈服荷载和极限荷载仍然可以提高,尤其是相应的位移增大较多,但延性系数基本相同,即延性未降低.对于加固前已损伤框架,再采用 CFRP 布加固,与 CFRP 布加固完好状态的框架结构相比,其屈服荷载基本相同,但对应的屈服位移增加(增大 82.48%);且极限荷载明显减小,极限位移稍有增大,延性系数大幅度降低.这表明,损伤程度既降低 CFRP 布加固混凝土框架结构的极限承载力,又降低其延性.

3.4 CFRP 布加固多层多跨损伤框架 Pushover 分析

假定 KJ-2 处于图 4 中 Step1 状态时(框架屈服状态)进行 CFRP 布加固,采用公式(1)计算出

损伤后的相对刚度(0.51),采取与 KJ-1B 相同方法,建立 KJ-2A 分析模型.

表 5 KJ-1、KJ-1A 和 KJ-1B 模拟结果

Tab.5 The simulate results of KJ-1, KJ-1A and KJ-1B

	屈服荷载/ kN	屈服位移/ mm	极限荷载/ kN	极限位移/ mm	延性 系数
KJ-1	20	2.77	33	27.19	9.1
KJ-1A	24	3.14	43	31.05	9.9
KJ-1B	24	5.73	35	33.11	5.8

图 9 为 KJ-2A 的 Pushover 分析结果,其塑性铰形成与发展,类似于 KJ-2.在 Step1 阶段一层左跨梁和右跨梁左端先出现塑性铰,符合抗震设计“强柱弱梁”的基本要求;梁端出现第一个塑性铰时,框架基底剪力为 512.7 kN,对应顶点位移为 85.5 mm.在 Step7 时达到极限承载力,此时基底剪力为 758.6 kN,顶点位移为 260.9 mm.

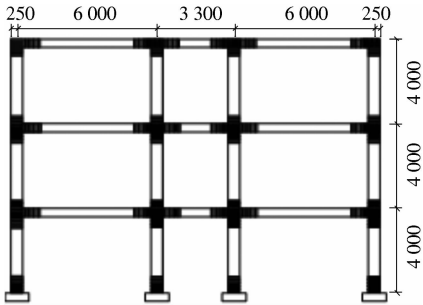


图 8 KJ-2A 详图
Fig.8 The details of KJ-2A

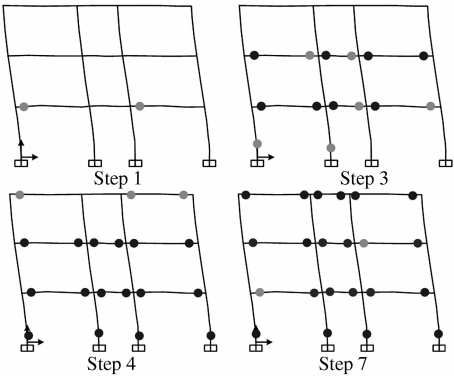


图 9 KJ-2A Pushover 分析结果
Fig.9 The Pushover results of KJ-2A

表 6 列出了 KJ-2 和 KJ-2A 的模拟计算结果,其表明:加固后框架的极限承载力和位移分别约增加了 10% 和 30%,但是,由于损伤致使构件刚度降低,导致其延性明显降低,和单层单跨框架结果一致.

表 6 KJ-2 和 KJ-2A 模拟结果
Tab.6 The simulate results of KJ-2 and KJ-2A

	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	延性 系数
KJ-2	498.5	37.1	699.5	206.6	5.56
KJ-2A	515.7	76.8	760.3	240.1	3.12

4 结论

采用 SAP2000 分别对 RC 框架、CFRP 布加固完好、损伤单层 RC 框架及 CFRP 布加固、角钢加固损伤多层多跨 RC 框架进行 Pushover 分析。

(1)Pushover 分析结果显示出梁端先出现塑性铰,符合抗震“强柱弱梁”的基本要求;分析得到结构达到极限状态时的基底剪力和顶点位移与试验结果基本相符。

(2)与加固完好 RC 框架结构相比,CFRP 布加固损伤 RC 框架结构的屈服荷载基本不变,对应的屈服位移增加较大;极限荷载减小,极限位移略有增大。

(3)将损伤参数引入有限元分析中,计算结果表明:与未加固框架比,CFRP 布加固与角钢加固损伤 RC 框架的屈服荷载和极限荷载均有所增大,且其对应位移增大较多,但由于损伤使构件刚度减小,导致加固后结构延性有所降低。

参考文献:

[1] HOLLAWAY L C, HEAD P R. Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure

[M]. Amsterdam, 2001.

[2] ALECCI V, BATI S B, RANOCCHIAI G. Concrete columns confined with CFRP wraps [J]. Materials and Structures, 2014, 47(3): 397-410.

[3] BINICI B, OZCEBE G, OZCELIK R. Analysis and design of FRP composites for seismic retrofit of infill walls in reinforced concrete frames [J]. Composites: Part B: Engineering, 2007, 38(5/6): 575-583.

[4] QUIERTANT M, CLEMENT J L. Behavior of RC columns strengthened with different CFRP systems under eccentric loading [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 452-460.

[5] 张继文,岳丽婕,吕志涛,等. 混凝土梁侧面粘贴 CFRP 布的结构加固性能的试验研究[J]. 东南大学学报, 2002, 9(5): 760-765.

[6] 王新玲,赵更岐,吕林,等. 碳纤维布加固震后严重损伤混凝土框架的抗震试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 50-53.

[7] 王新玲,范建伟,姚章堂,等. 损伤程度对碳纤维布加固混凝土框架结构抗震性能影响的研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 94-97.

[8] 吴波,王维俊. 碳纤维布加固钢筋混凝土框架节点的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(4): 60-66.

[9] 王新玲,朱俊涛,吕林,等. 碳纤维布加固完好混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2008, 29(4): 81-85.

[10] 王新玲,张龙,白晓康. 钢筋混凝土框架结构屈服前阶段损伤程度模型分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 11-18.

Pushover Analysis of RC Frame Structure Strengthened with CFRP Sheets Based on Damage Degree

SUN Li-ping¹, WANG Xin-ling², ZOU Xu-yan³, QIAN Hui²

(1. Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Engineering and Technology, Zhongzhou University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Based on the previous work of the horizontal low cyclic test study on RC frame and RC frame reinforced with CFRP sheets, the Pushover analysis about these tests is carried out by using the FEA software SAP2000, and the analysis result shows a good consistency with the test result. On this basis, the FEA model of the damaged RC frame reinforced with CFRP sheets is established, where the damage degree of RC frame can be expressed by defining the material modulus. Then, the Pushover analysis is carried out to study the seismic performance of the RC frame strengthened with CFRP sheet. The results show that the ductility and bear capacity of the frame will decrease with the increment of the damage degree. The feasibility and the rationality of the proposed analysis method are verified in this paper.

Key words: CFRP sheets reinforcement; damage frame; Pushover analysis; seismic performance