

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.03.004

高性能水泥复合砂浆钢筋网加固震损 RC 框架 节点抗震性能试验研究

龚鑫, 蒋隆敏, 李鹤, 朱杰

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对1个对比框架节点和4个HPFL (high performance ferrocement laminates) 加固法加固的震损程度不同的钢筋混凝土框架节点进行了拟静力加载试验, 同时利用 ANSYS 进行有限元数值模拟分析, 研究了HPFL 对不同震损情况下的钢筋混凝土框架节点进行加固后抗震性能的改善情况, 如破坏形式、耗能能力、承载能力、延性、刚度退化情况等。结果表明, 加固后震损框架节点的抗震性能得到了有效改善, 且加固效果随着震损程度的增大而被削弱。

关键词: HPFL 加固; 震损框架节点; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)03-0025-09

引文格式: 龚鑫, 蒋隆敏, 李鹤, 等. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固震损 RC 框架节点抗震性能试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 25-33.

An Experimental Study on the Seismic Performance of RC Frame Joints Strengthened with High Performance Ferrocement Laminates

GONG Xin, JIANG Longmin, LI He, ZHU Jie

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A quasi-static loading test has been carried out on one RC frame joint with different seismic damage degrees strengthened by HPFL (high performance ferrocement laminates) and a comparative frame joint; meanwhile, a finite element numerical simulation analysis has been carried out by using the ANSYS finite element numerical simulation analysis, followed by a research conducted on the improvement of seismic performance of reinforced concrete frame joints strengthened by HPFL under such different earthquake damage conditions as failure mode, energy dissipation capacity, bearing capacity, ductility, stiffness degradation, etc.

Keywords: HPFL reinforcement; seismic damage frame node; seismic performance; finite element analysis

收稿日期: 2020-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51741804); 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2016JJ5037); 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ4268)

作者简介: 龚鑫 (1996-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用, E-mail: 1258072149@qq.com

通信作者: 蒋隆敏 (1963-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事结构加固方面的教学与研究, E-mail: 527943658@qq.com

0 引言

钢筋混凝土框架结构的抗震性能良好,因而被大量应用于我国建筑结构中。框架结构节点不仅承担着传递和分配内力的重要作用,更是保障框架结构整体性和稳定性的重要组成部分^[1]。

国内外发生过的众多地震破坏调查结果表明:在地震作用下,钢筋混凝土框架结构受到强烈的冲击时会发生损坏,甚至倒塌。受损建筑大多是因节点核心区发生了较为严重的破坏而导致的结构整体稳定性丧失^[2]。因此,探讨建筑震损后框架节点的加固修复工作,显得十分必要。20世纪80年代的房屋大多未考虑抗震设防,这使得框架结构的梁柱节点区箍筋配置过少或者是箍筋锚固不良,构造和设计上存在缺陷,未能满足“强节点、弱构件”的抗震设计原则,对框架结构的抗震性能造成不利影响。除了地震作用下节点受损需要加固修复外,还有一些建筑物是因为抗震设防调整、使用功能改变等原因,需要对结构进行加固。

由于高性能水泥复合砂浆属于无机胶凝材料,其与混凝土材料的性质相似,所以两种材料的相容性较好;而且由于高性能水泥复合砂浆耐高温、耐久、抗老化性能较好,因而能被作为防护材料,有效地保护钢筋网。高性能水泥复合砂浆钢筋网(high performance ferrocement laminates, HPFL)加固法,采用钢筋网以提高结构的承载能力,其中的高性能水泥复合砂浆主要起锚固作用和防护作用^[3]。已有众多研究表明,高性能水泥复合砂浆和钢筋网结合形成的复合加固层,对钢筋混凝土构件具有良好的加固效果^[4-6]。因此,本研究拟对加固后的框架节点在相同轴压比下进行抗震性能研究,并且与不同震损程度的节点进行对比研究,以期为后续相关研究与工程实际应用提供一定的参考依据。

1 试验设计

1.1 试验模型设计

本研究共制作了5个尺寸和配筋均相同的节点试件,各试件来源于多层框架结构,采用的缩尺比例为1:2。框架梁的截面尺寸为150 mm×300 mm,柱截面的尺寸为250 mm×250 mm,梁、柱的长度取反弯点之间的距离。为了能更好地反映模型加固后的抗震性能,试件设计按照“弱节点、强构件”的非抗震节点配制钢筋,混凝土强度设计等级为C20,试件的具体尺寸及配筋情况详见图1。

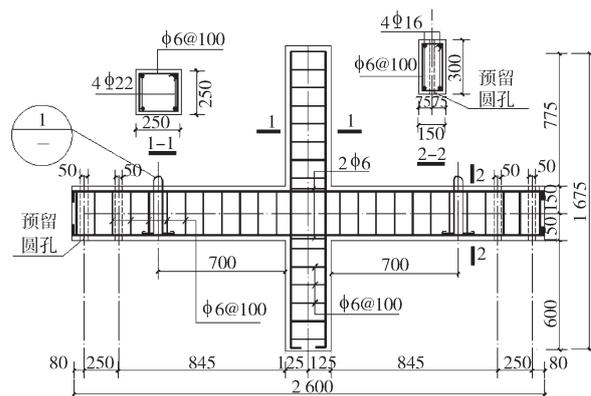


图1 试件几何尺寸及配筋

Fig. 1 Geometric and stirrup details of joints

1.2 加固方案

根据试验目的,本文选取5个试件,分别命名为J0、J1、J2、J3、J4,其中,J0为对比试件,其未经加固直接加载至破坏;J1为未经过预损处理的试件,而J2、J3、J4分别经受了不同程度的预损处理,均在不卸载压力情况下,利用HPFL进行修复与加固,加固后的试件编号为JR1、JR2、JR3和JR4,5个试件的制作与加固试验全过程均在相同的试验条件下进行,试件具体的加固方案见表1。

表1 试件加固方案

Table 1 Strengthening method of the specimen

试件编号	试件加固情况
J0	对比试件,未预损未加固
J1	未预损,直接加固
J2	轻度预损,直至混凝土出现裂缝;HPFL法加固
J3	中度预损,直至梁内纵筋屈服;HPFL法加固
J4	重度预损,直至纵筋屈服、核心区混凝土裂缝呈“X”型;HPFL法加固

试件的加固方式如图2所示。

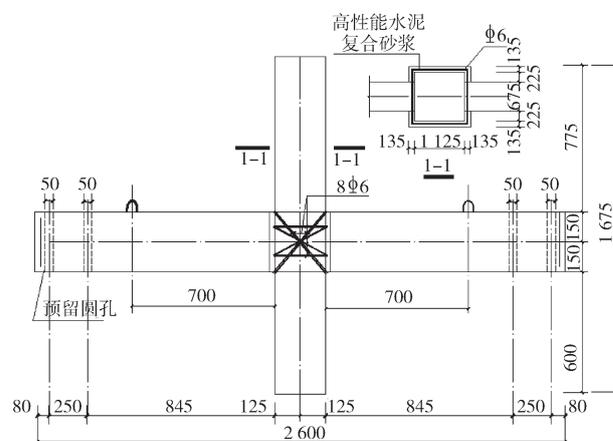


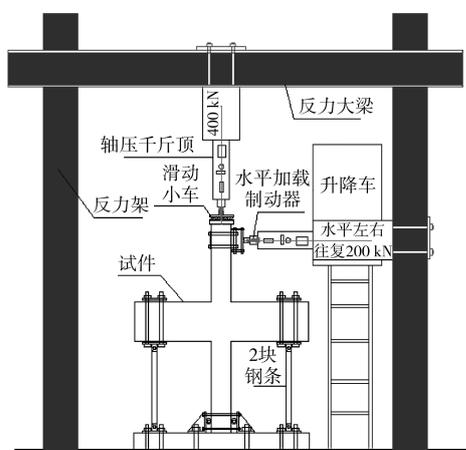
图2 试件加固方式

Fig. 2 Reinforcement method

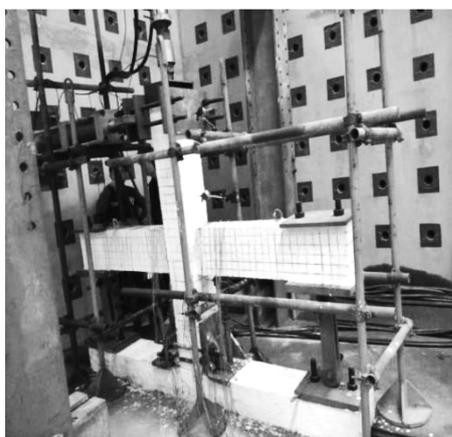
参考相关文献^[7-8]、混凝土加固结构技术规程及施工指南^[9-10], 设定本研究中加固的具体施工工序如下: 首先, 通过人工凿毛法除去核心区疏松的混凝土和污染物, 使黏结面干净、坚固并且完整; 然后, 确定销钉植入的位置, 并在确定位置处钻孔、清洗、注胶、植筋; 接下来, 焊接安装钢筋网; 最后, 涂界面剂、抹高性能水泥复合砂浆。

1.3 试件装置及加载制度

先用竖向千斤顶按轴压比为0.15施加竖向荷载, 试验全程控制竖向荷载不变, 然后采用单悬臂形式施加水平往复力, 水平低周反复荷载利用微机控制电液伺服多点协调加载系统进行施加。具体的试验装置如图3所示。



a) 结构示意图



b) 实物图

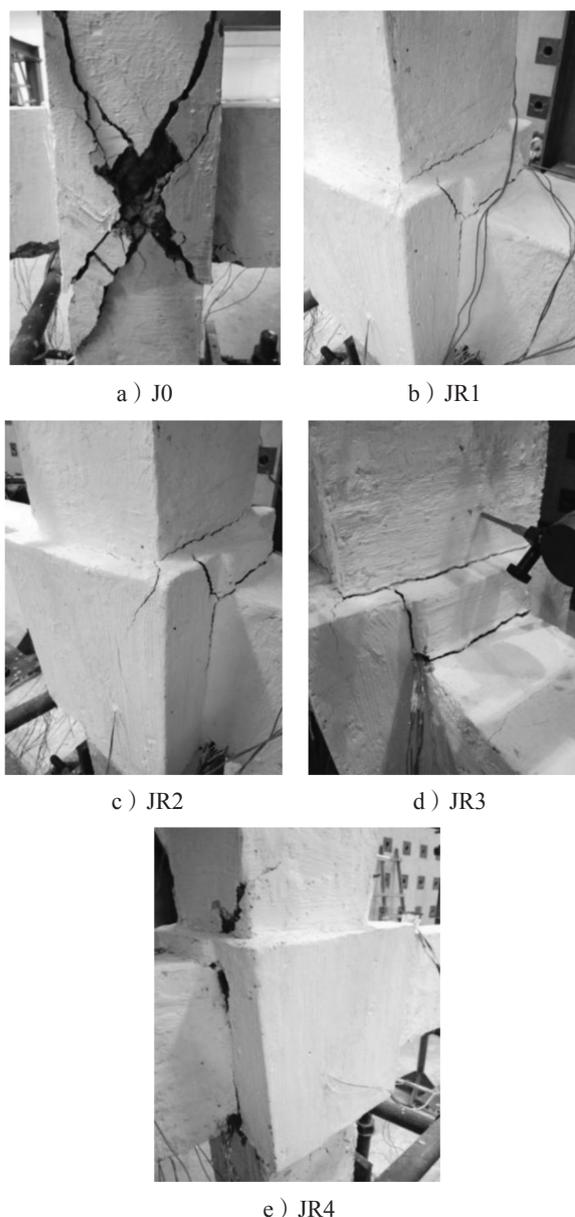
图3 试验装置图

Fig. 3 Test device diagram

根据试验要求, 采用荷载-位移加载方式, 先采用荷载控制, 逐级循环加载至纵向钢筋屈服, 各级加载5 kN, 且循环2次; 再以屈服时对应的柱顶水平位移为基数, 逐级成倍进行位移控制加载, 每级循环3次, 直至试件的承载力下降到其极限荷载的85%, 即试件完全破坏为止。

2 试验结果与分析

图4为各试件的破坏形态图。



e) JR4

图4 各试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of individual test piece

试件破坏试验过程中发现, 各试件的破坏态不同, 具体表现如下。

1) 未加固对比试件J0。试验过程中, 当其水平荷载增加至20 kN时, 可观察到梁和柱交接处的上部初现微小裂缝; 当位移加载至约12 mm时, 能观察到45°的斜向交叉较浅裂缝出现在节点的核心区域表面, 继续增大加载位移, 发现其表面裂纹也随之加宽延展; 当加载位移约28 mm时, 核心区裂缝延伸至柱端, 以至于柱端和核心区的混凝土碎裂, 露出里面的粗骨料; 当位移继续加载至38 mm时, 柱端和核心区混凝土发生了压溃脱落, 纵筋、端部箍

筋均明显暴露在外,如图4a所示。据此可以判断试件J0的破坏形态为节点核心区域的受剪破坏。

2) 未预损直接加固试件JR1。当其水平荷载为26 kN时,梁柱上端交汇处表面初现裂纹;继续加载至位移为15 mm时,原有裂缝持续发展,当位移加载至30 mm时,梁侧表面亦可以观察到裂缝,梁与柱交界部位的裂缝贯穿;当位移加载到55 mm时,梁侧面的混凝土开始剥落;试件承载力在加载至64 mm时,下降到不足极限荷载的85%。试件最终的破坏形态如图4b所示。

3) 经不同程度预损后的加固试件JR2、JR3、JR4。试验过程中发现,这些试件的裂缝出现和发展情况基本上类似于试件JR1的,其最终的破坏形态如图4c~e所示。通过观察到的试验现象,可知试件经过HPFL加固后,其破坏形态中能看出明显的改善效果,表现为较为理想的梁端弯曲延性破坏。

2.1 滞回曲线分析

对各试件进行滞回曲线分析,所得结果见图5。

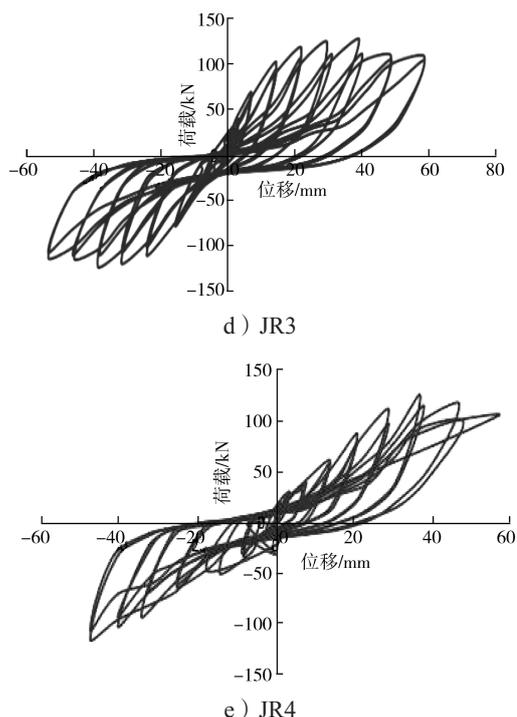
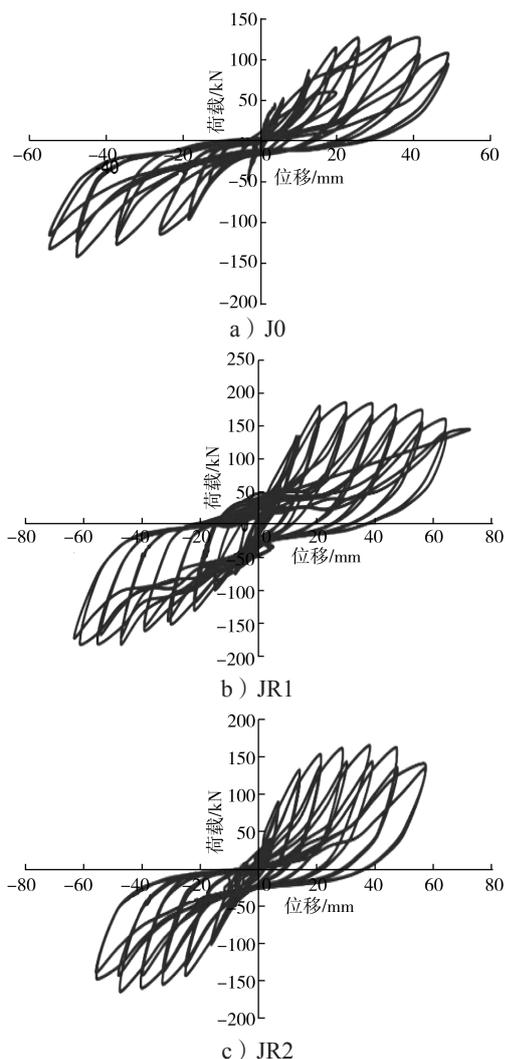


图5 各试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves of individual test pieces

观察各试件的滞回曲线,可以得知:

1) 在加载前期,各个试件的滞回曲线近似表现为线性发展,J0~JR4分别在位移为6,14,14,8,4 mm后不再保持良好的线弹性,随着水平荷载的增加,试件出现残余位移,随后进入屈服阶段,滞回曲线所包围的区域也一同呈现出增大的变化趋势,分别在位移加载至20,20,15,15,12 mm时,曲线中部出现捏缩现象;在位移分别为26,32,28,26,22 mm时,表现出零滑移现象,滞回曲线呈反S形,这可能是由于试件混凝土内部变形以及钢筋黏结滑移现象所导致的。除试件J0表现为剪切破坏外,其它试件均表现为延性破坏。

2) 观察加固试件JR1~JR4的滞回曲线,可发现其捏缩效应与滑移现象表现出了较为显著的改善,滞回环面积也得到了提升,表明HPFL加固法能有效地提高其耗能能力。

3) 对比各试件滞回曲线,可以发现,经过加固后的JR1、JR2和JR3试件的承载力和延性比未加固试件J0的有一定程度的提高,并且随着震损程度增大,其提高程度减弱;而试件JR4的承载性能提高得相对不是很明显,这可能是因其所受的震损程度较为严重造成的。

2.2 骨架曲线分析

本研究所得各试件的骨架曲线如图6所示。

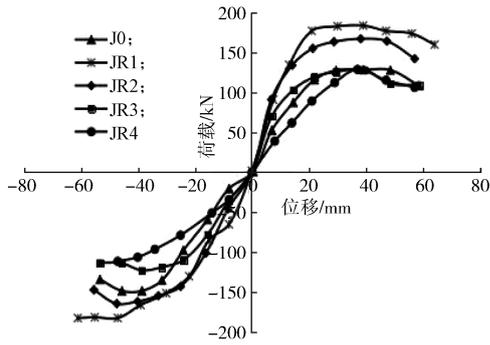


图6 各试件的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of individual test pieces

分析图6所示的各试件骨架曲线, 可以得知:

1) 加固后的试件 JR1~JR3 的极限承载力都比未经加固的 J0 试件的高, 表明试件经 HPFL 加固后, 其承载力明显提高, 加固层对试件表面裂缝的产生起到有效的约束作用。

2) 承载力提高程度最明显的是 JR1, 最弱的是 JR4, 可能的原因是 JR4 的预损程度最大, 纵筋发生了屈服, 核心区混凝土被压溃脱落破坏, 表明受损愈严重, 承载力提高程度愈低。

3) 从图中不难观察到, 加固后试件的骨架曲线

有较明显的水平段, 说明加固后的试件表现出较好的塑性变形能力。

2.3 承载力及延性分析

延性能够反应结构或构件变形的能力, 较大的延性能够增大结构的安全储备, 防止建筑物发生脆性破坏。因此, 本研究对各试件的承载力和延性进行了分析。

试件的屈服值、最大值和极限值的确定如图7所示, 位移延性采用公式 $\mu = \Delta_u / \Delta_y^{[11]}$ 进行计算, 表2为各试件的荷载、位移值以及延性系数。

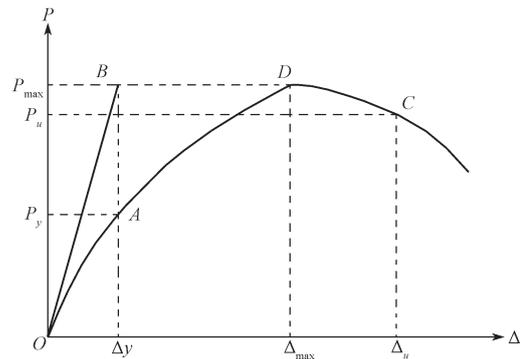


图7 试件屈服点的确定

Fig. 7 Determination of the yield point of the specimen

表2 试件的荷载、位移值及其延性系数

Table 2 Specimen load and displacement value with its ductility coefficient

试件编号	开裂荷载 / kN	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	极限荷载 / kN	提高程度 / %	极限位移 / mm	提高程度 / %	延性系数
J0	20.00	114.00	19.60	127.00	-	48.50	-	2.47
JR1	26.00	170.00	21.00	183.00	44.09	72.10	48.66	3.43
JR2	25.01	159.60	20.92	175.27	38.01	68.21	40.64	3.26
JR3	23.48	134.21	20.07	165.39	30.23	58.43	20.47	2.91
JR4	21.10	121.44	19.87	129.17	1.71	49.87	2.82	2.51

注: 极限位移为当荷载降到极限承载力 85% 时所对应的位移。

分析表2中荷载、位移和延性系数的数据, 可以得出如下结论:

1) 采用 HPFL 加固后试件的承载力表现为较显著地提升, 其延性改善程度也比较可观。其中 JR1 的极限荷载和极限位移提高幅度最大, 分别提高了 44.09% 和 48.66%; 表明 HPFL 加固层对试件裂缝的形成与发展的抑制作用是显而易见的, 因此该加固方法对提高试件的承载力是有效的。

2) 试件 JR2、JR3 和 JR4 的极限荷载与位移虽也有提高, 但均不如 JR1 的明显, 提高最少的为 JR4, 仅分别提高了 1.71% 和 2.82%。且能明显观察到, 各试件的极限荷载与位移提高程度和延性系数从大到小依次为 JR1、JR2、JR3、JR4, 主要是由于试件 JR4 受到震损最严重, 导致其混凝土内部的裂缝也较多, 难以通过加固来完全修复所受损伤; 表明 HPFL

加固法对试件的承载力和延性提高效果随预损程度的增大而减弱。

2.4 刚度退化曲线分析

用等效刚度法对刚度的退化规律进行分析, 以各试件滞回曲线为依据, 得到了如图8所示的刚度退化曲线。由图8可得:

1) 试件 J0 的刚度退化曲线走势相对于 JR1 和 JR2 的较为陡峭, 且其初期的刚度明显小于试件 JR1 和 JR2 的, 说明加固层充分发挥了作用, 分担了荷载, 从而有效延缓了刚度退化速率;

2) 试件 J0 初始刚度比震损程度更严重的试件 JR3 和试件 JR4 的都要大一些, 表明试件的预震损程度削弱了加固层对其刚度退化速率的改善效果, 试件的预损愈严重, 刚度退化更为迅速。

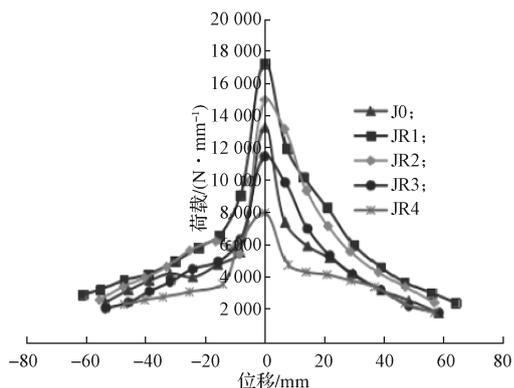


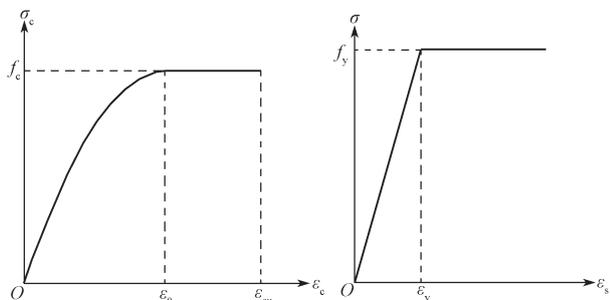
图8 试件的刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curves of individual test piece

3 有限元分析

3.1 本构关系

本研究中混凝土的本构关系，采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[12]中给定的曲线，钢筋的应力-应变关系采用理想的弹塑性模型，而对于 HPFL 加固层，考虑到其基体材料和界面剂均为水泥基的无机高性能复合材料，与混凝土材料性能非常相似，因此本研究在进行有限元分析时，采用与混凝土相同的本构模型。材料的应力-应变关系曲线如图 9 所示。混凝土的破坏准则采用 Willian-Warnker 5 参数强度破坏准则。



a) 混凝土、高性能水泥复合砂浆 b) 钢筋

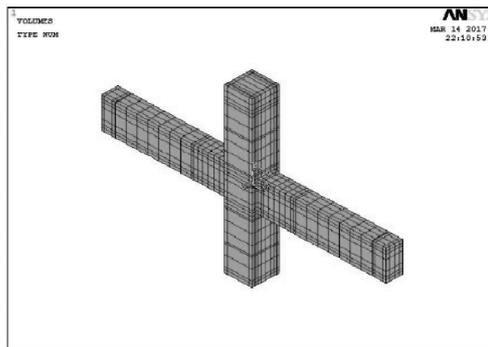
图9 材料的应力-应变关系曲线

Fig. 9 Material stress-strain relationship curves

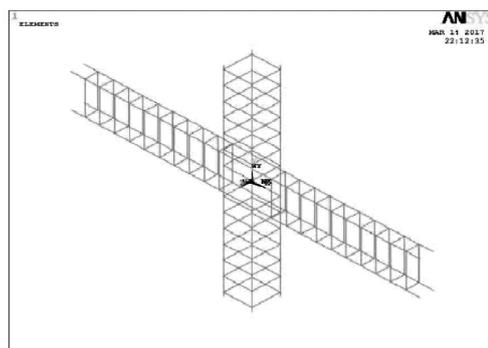
3.2 模型的建立

为了更好地模拟实际中钢筋与混凝土之间的黏结滑移作用，采用分离式建模方法，即在建模时把钢筋和混凝土作为不同的单元类型进行处理。混凝土、高性能水泥复合砂浆选用 SOLID65 单元，采用了 LINK8 单元模拟钢筋。对于材料的具体参数按实际值输入。

图 10~11 所示为各试件的钢筋混凝土单元模型网格划分情况。



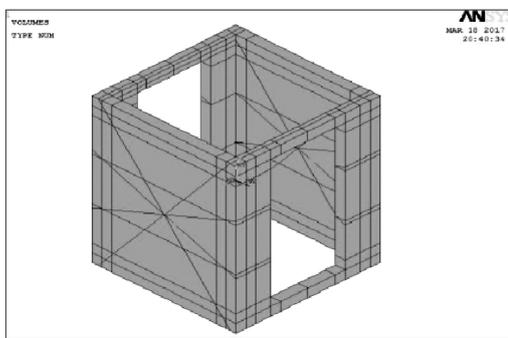
a) 原试件网格划分



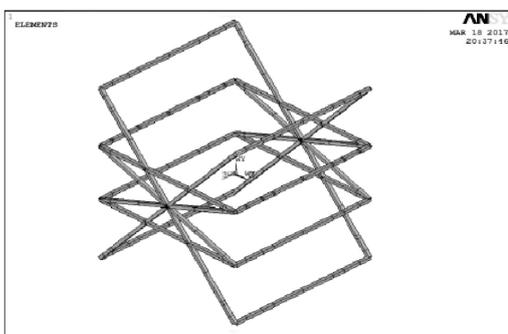
b) 钢筋单元模型

图10 原试件的有限元模型网格划分

Fig. 10 Mesh division of the finite element model of individual test piece



a) 加固层网格划分



b) 碳纤维网束单元模型

图11 加固层的有限元模型网格划分

Fig. 11 Mesh division of the finite element model of individual test piece

3.3 模型的加载和求解

为了模拟对震损加固的 RC 框架节点施加荷载的过程, 模拟时首先在震损加载至预设荷载时, 对 HPFL 加固层进行“杀死”处理, 当达到预设目标进行二次加载破坏时, 再次重新激活加固层。试件的边界约束与加载模型如图 12 所示。

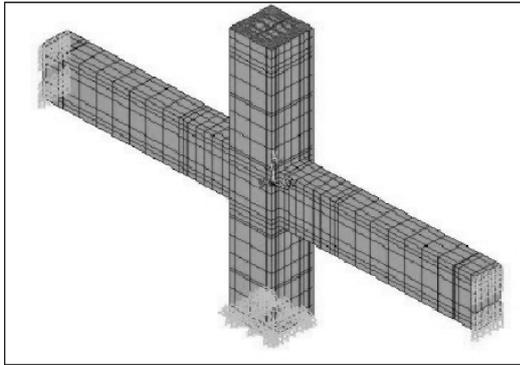


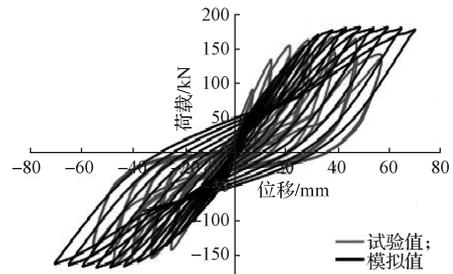
图 12 试件的边界约束与加载模型

Fig. 12 Boundary constraints and loading models

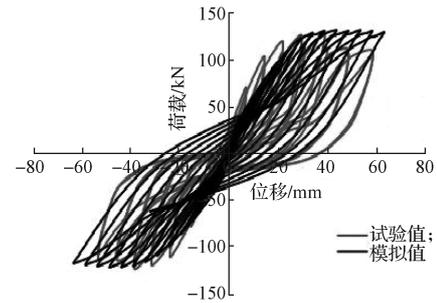
3.4 有限元模拟结果分析

根据试件的尺寸和相关参数对试件进行建模和加载后, 对试件进行有限元分析, 经过模拟得出在加载历程中试件的滞回曲线以及骨架曲线, 图 13 和 14 分别为各试件试验与模拟的滞回曲线对比和骨架曲线对比图。

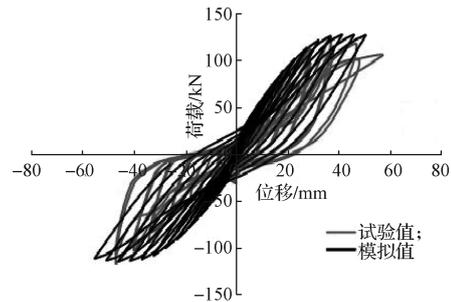
观察图 13 可以得出: 各试件滞回曲线的试验值与模拟值形态吻合度较好, 模拟曲线和试验曲线的斜率、拐点大致相同, 这说明所建立的有限元模型具有很好的可靠度。



c) JR2



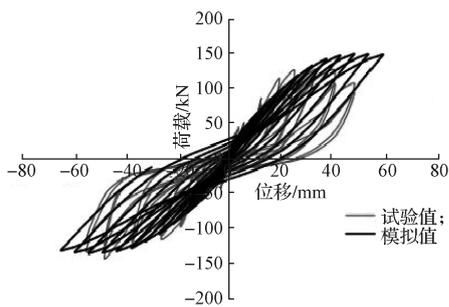
d) JR3



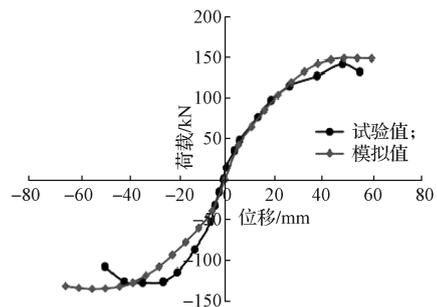
e) JR4

图 13 试件的滞回曲线对比图

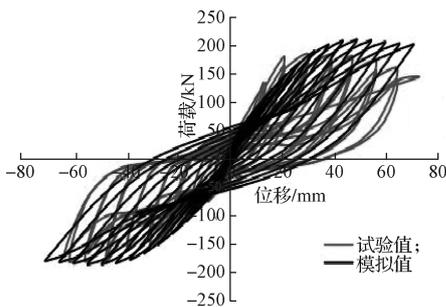
Fig. 13 Comparison of hysteresis curves



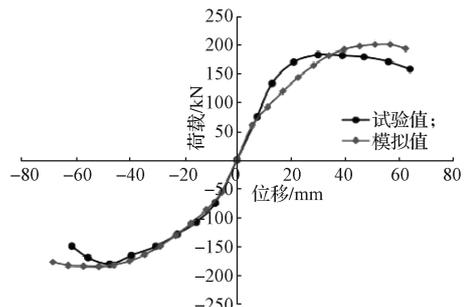
a) J0



a) J0



b) JR1



b) JR1

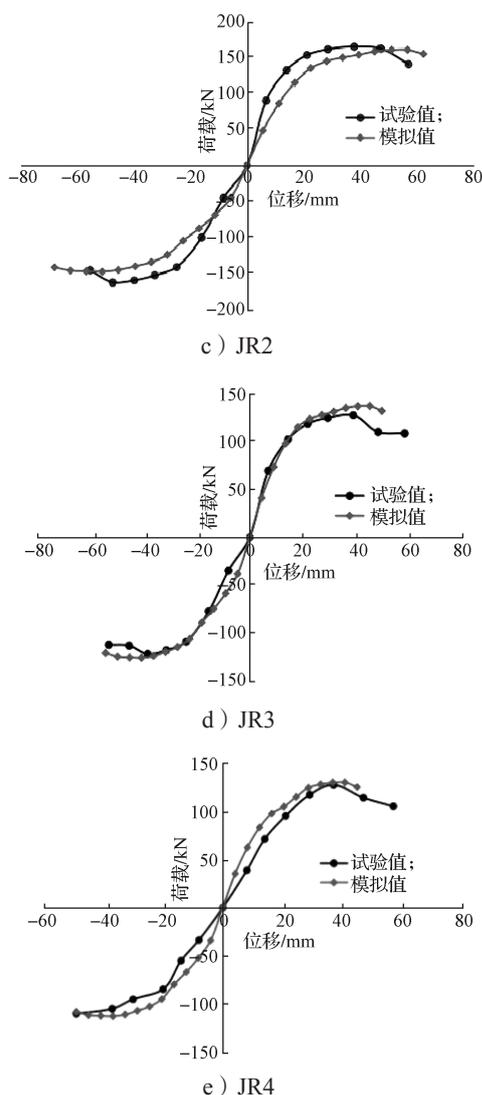


图 14 试件的骨架曲线对比图

Fig. 14 Skeleton curve comparison chart

仔细观察图 14 可以看出：各试件骨架曲线的试验值与模拟值都呈现出明显的上升段、平缓段和下降段，都有明显的屈服点。从开始加载到位移控制前，试验值与模拟值的骨架曲线基本呈线性增长，斜率较大，即初始刚度较大，试验值与模拟值较为接近，斜率基本相同。由此说明了有限元计算出的模拟值与试验值契合度较好，可以互为验证。

4 结论

本研究通过对 1 个对比框架节点和 4 个 HPFL 加固法加固的震损程度不同的钢筋混凝土框架节点的拟静力加载试验，并利用 ANSYS 进行有限元数值模拟分析，研究了 HPFL 对加固框架节点的抗震性能的改善情况，可得出如下结论：

1) HPFL 加固法对有震损框架节点的修复和加固起到了较为理想的效果。高性能复合砂浆与受损伤

的混凝土相互连通渗透，能使界面自愈合，同时又可以作为防护层保护钢筋网；而钢筋网能有效地抗拉，从而约束试件变形，能较好地达到“强节点、弱构件”的设计目标。

2) 震损的 RC 框架节点在经过 HPFL 加固后，其破坏形态得到明显的改善，表现出良好的塑性变形能力，由脆性破坏变为理想的延性破坏；其耗能能力、试件承载力及延性也得到了较好的提升；刚度和强度退化情况得以改善，退化速率相对于未加固试件均较明显减缓。

3) 加固后试件的各项抗震性能都得到了很好的提升，但震损程度对加固效果影响较为明显，震损愈严重时，其加固效果愈不理想。

4) 利用 ANSYS 软件进行有限元数值模拟分析，得到了各个试件的滞回曲线、骨架曲线图；同时在通过对试验结果的进一步分析整理的基础上，经对比分析，发现模拟值与试验值的吻合情况较为理想，以此验证了模拟结果、计算结果和试验结果具有一定的可靠性和合理性。

以上结论为后续相关研究与工程实际应用提供了一定的参考。

参考文献：

- [1] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震 [M]. 南京：东南大学出版社，1989：1-4.
TANG Jiuru. Seismic Behavior of R. C. Frame Joints[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989: 1-4.
- [2] 冯远, 刘兰花, 易勇, 等. 多层钢筋混凝土框架柱震害调查分析与启示 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 63-72.
FENG Yuan, LIU Lanhua, YI Yong, et al. Seismic Damages of Frame Columns in Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings: Investigation and Learning[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 63-72.
- [3] 汤繁华, 蒋隆敏. 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层加固钢筋混凝土结构的技术研究进展 [J]. 工业建筑, 2011, 41(12): 106-110.
TANG Fanhua, JIANG Longmin. Technology Research Work on HPFL Strengthened RC Structure[J]. Industrial Construction, 2011, 41(12): 106-110.
- [4] 尚守平, 杨芳, 张照, 等. 预制空心楼板采用高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层的整体化技术 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 114-119.
SHANG Shouping, YANG Fang, ZHANG Zhao, et al. High Performance Ferrocement Laminates Integrity Technique for Precast Hollow Floor[J]. Journal of

- Building Structures, 2016, 37(12): 114-119.
- [5] 文学章, 王智, 尚守平. 高性能复合砂浆钢筋网薄层加固预制空心板抗弯性能试验及数值模拟[J]. 工业建筑, 2016, 46(2): 169-175.
WEN Xuezhang, WANG Zhi, SHANG Shouping. Flexural Behavior Test and Numerical Simulation of Precast Hollow-Core Slabs Strengthened with High Performance Ferrocement Layer[J]. Industrial Construction, 2016, 46(2): 169-175.
- [6] 曾令宏, 晋东亮. HPFL 加固受火 RC 梁抗剪性能研究[J]. 工程设计学报, 2014, 21(2): 172-179.
ZENG Linghong, JIN Dongliang. Study on RC Beams' Shear Behavior Strengthened with HPFL[J]. Journal of Engineering Design, 2014, 21(2): 172-179.
- [7] 贺晶方. HPFL 加固开洞短肢抗震墙结构抗震性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
HE Jingfang. Research on the Seismic Performance of HPFL Reinforced Short-Limb Seismic Wall Structure[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [8] 谈俊宇. HPFL 加固有震损开洞短肢剪力墙抗震性能试验研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
TAN Junyu. Experimental Study on Seismic Performance of HPFL Reinforced Short-Leg Shear Wall with Seismic Damage[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [9] 中国工程建设标准化协会. 中华人民共和国工程建设标准化协会标准: 水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程: CECS 242—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 32-35.
China Association for Engineering Construction Standardization. Construction Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Grid Rebar and Mortar: CECS 242—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 32-35.
- [10] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 39-46.
SHANG Shouping. Design and Construction Guide of Reinforced Concrete Structure for High Performance Cement Composite Mortar Reinforcement[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2008: 39-46.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 2016年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 43-47.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB50011—2010[S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 43-47.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2015年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 34-35.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. 2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 34-35.

(责任编辑: 廖友媛)