

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.03.005

CFRP网增强复合砂浆加固不同轴压比 框架节点的抗震性能研究

蒋隆敏, 王 球, 孙雪阳

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用4个1:2缩尺比例的十字型RC框架节点试件, 1个为对比试件、3个为加固试件, 在不卸轴压力情况下采用CFRP网增强的高性能复合砂浆对试件进行加固。通过试验研究与数值模拟相结合的方法, 探索了该加固法加固框架节点的效果, 重点研究了轴压比变化对加固效果的影响, 包括加固试件的破坏形式、承载力和延性、滞回曲线、骨架曲线、耗能能力等。研究表明: 采用CFRP网增强的高性能复合砂浆加固框架节点是一种有效加固方法, 且在一定的轴压比范围内, 加固试件耗能能力、极限承载力随轴压比的增大而提高, 但其极限位移、延性性能随轴压比的增大而降低。加固节点抗剪承载力的数值模拟结果同实验结果符合度较高, 验证了此次建模具有较好的可靠性。

关键词: CFRP网; 高性能复合砂浆; 轴压比; 抗震性能; 数值模拟

中图分类号: TU398⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)03-0027-08

引文格式: 蒋隆敏, 王 球, 孙雪阳. CFRP网增强复合砂浆加固不同轴压比框架节点的抗震性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 27-34.

Study on Seismic Behavior of RC Joints with Different Axial Compression Ratios Strengthened by CFRP Net Reinforced Composite Mortar

JIANG Longmin, WANG Qiu, SUN Xueyang

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

Abstract: By using four cross-type RC frame joint models with a 1:2 scale ratio, with one comparative test piece and three reinforced test pieces, a reinforcement can be achieved of the test piece under the secondary force by CFRP net reinforced high performance composite mortar. By adopting a combined method of both experimental research and numerical simulation, an exploration has been made into the effect of strengthening frame joints based on this method, followed by a research conducted on the influence of the change of axial compression ratio on the strengthening effect, including the failure form, bearing capacity and ductility, hysteretic curve, skeleton curve and energy dissipation capacity of the strengthened specimens. The results show that CFRP net has reinforced high-performance composite mortar is an effective reinforcement method for frame joints in that within a certain range of axial compression ratio, the energy dissipation capacity and ultimate bearing capacity of reinforced specimens increase with the increase of axial compression ratio, while their ultimate displacement and ductility performance decrease with the increase of axial compression ratio. The numerical simulation results of shear capacity of reinforced joints are in good agreement with the experimental results, which verifies the reliability of the model.

收稿日期: 2018-12-12

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(2016JJ503)

作者简介: 蒋隆敏(1963-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事结构加固方面的教学与研究,

E-mail: 527943658@qq.com

Keywords: CFRP net; high performance composite mortar; axial compression ratio; seismic performance; numerical simulation

0 引言

碳纤维增强复合材料 (carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP) 作为一种新型材料, 具有轻质、高强度、高模量、柔软易施工、耐腐蚀等特点, 现已被广泛地应用到工程加固领域中, 且碳纤维的理论研究在国内外已得到了深入探索^[1-4]。周朝阳等^[5]采用纯粘贴及混锚的 U 型 FRP 条带对简支梁进行了抗剪加固试验, 其实验结果表明, 混锚预应力加固法可有效防止 FRP 条带端剥离, 对提升碳纤维条带的利用率十分有利, 承载力提高幅度高达 92%; 碳纤维复合材料不仅可被应用于混凝土结构加固, 同样适用于钢结构加固。王海涛等^[6]通过在含有初始裂纹的钢板外贴碳纤维来研究 CFRP 对钢板疲劳性能的影响, 结果表明, 外贴 CFRP 可延缓裂纹的扩展, 提高构件疲劳寿命, 且 CFRP 板材加固效果最优。相对于碳纤维布的研究, CFRP 网的研究文献^[7-8]相对较少, 尤其是 CFRP 网加固钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 节点的运用至今尚未见相关报道。

本文采用 CFRP 网增强的高性能复合砂浆对配箍不足的平面节点进行加固处理, 分析了参数轴压比对加固效果的影响, 并在试验研究的基础上进行了数值模拟, 以期能对框架节点加固法提供一新方法, 并为后续研究及工程应用提供有用参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本研究将平面梁柱节点作为研究对象, 按“强构件弱节点”及“强柱弱梁”的原则设计试件, 试件尺寸及具体配筋见图 1。

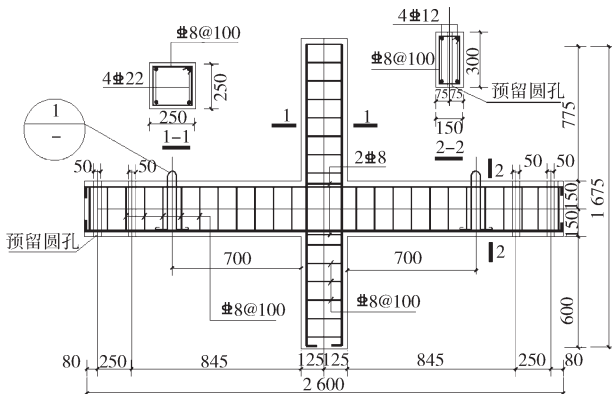


图 1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Test piece sizes with the reinforcement drawing

共制作 4 个 1:2 缩尺比例、配筋参数完全相同的梁柱节点原试件, 其轴压比为 0.3 (ZY0), 作为对比试件的编号依次为 ZY1~ZY3。在二次受力状态下, 对比试件加固时对应的轴压比分别为 0.2, 0.3, 0.4, 各试件设计参数见表 1。

表 1 各试件设计参数表

Table 1 Table of design parameters of each test piece

试件	设计轴压比	试验轴压比	轴向压力 /kN	备注
ZY0	0.3	0.29	180	不做加固
ZY1	0.2	0.19	120	二次受力 加固
ZY2	0.3	0.29	180	
ZY3	0.4	0.38	240	

1.2 试件加固方案

本研究主要是对梁柱节点的核心区进行加固。考虑到加固层同原试件存在锚固作用, 故将 CFRP 网格加固区延伸至梁端和柱端, 具体的加固方案见图 2。

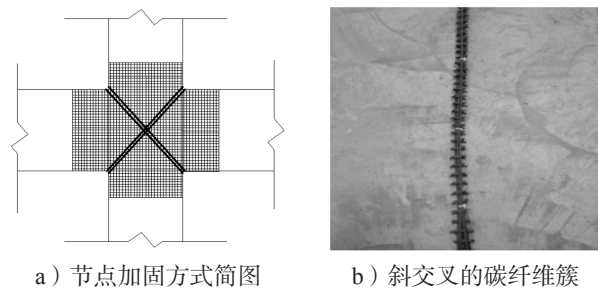


图 2 加固方案

Fig. 2 Reinforcement scheme

1.3 试件加固施工工艺要点

本次试验在不卸载轴力的情况下对试件进行二次加固, 并通过查阅结构技术规程^[9]和施工指南^[10], 总结出如下具体的施工工艺流程:

1) 表面凿毛。首先, 定位好加固区范围, 然后开始凿毛。凿毛过程中若发现暴露出的钢筋出现锈蚀状况, 还需要对钢筋进行除锈处理。

2) 倒角处理。用砂轮在梁、柱棱角处打磨出 $R=20$ mm 的圆角, 剔除内部松动的石子砂浆, 并用高性能复合砂浆补出 $R=20$ mm 的回角。

3) 冲洗。用钢刷剔除凿毛面松动的石子、砂砾, 再用高压水枪反复冲洗凿毛区, 将浮灰杂质冲洗干净。

4) 布置碳纤维网。根据预先设计好的加固方案, 对节点区进行加固。

5) 洒水润湿、涂抹界面剂。所用界面剂由长沙

磊鑫土木技术工程有限公司提供, 界面剂的质量配比按添加剂:水泥:水为1.0:5.3:1.6, 且在涂抹界面剂之前, 对凿毛区进行洒水润湿。

6) 抹水泥。高性能复合砂浆的拌制, 按各成分质量比进行配置中水泥:砂:水:添加剂 Lx-3 为2.20:1.00:0.32:0.175, 分3批次对加固区进行涂抹。第一次涂抹时需将CFRP网与需加固部位孔洞缝隙填紧压实, 以保证加固层与原试件协同工作; 第二次涂抹至CFRP表层, 以使其与高性能复合砂浆形成良好的有机整体; 第三次涂抹到设计厚度, 并平整表面。

7) 浇水养护。自然环境下浇水养护14 d。

1.4 试验加载装置

在试件上柱端施加竖向轴力、水平方向施加低周期往复荷载, 模拟地震工况, 实验加载装置见图3。



图3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading device

1.5 试验加载制度

本研究采用力-位移混合加载制度, 即先力控制后位移控制。力控制阶段: 荷载以5 kN/级逐级循环加载, 直至纵筋出现屈服。位移控制阶段: 以纵筋屈服时对应的柱顶位移 Δ 为基底位移, 按 1Δ , 2Δ , 3Δ 逐级循环加载, 各级循环2次, 直至承载力降至极限承载力的85%时停止加载。试验加载制度见图4。

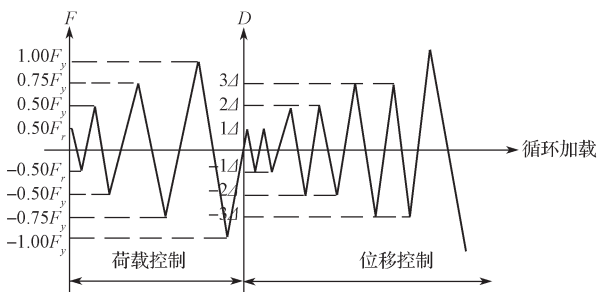


图4 试验加载制度

Fig. 4 Test loading system

2 试验现象及结果分析

2.1 试件破坏形式分析

试件在低周反复荷载作用下, 从开始受力到试验

结束可分为开裂阶段、屈服阶段与破坏阶段。

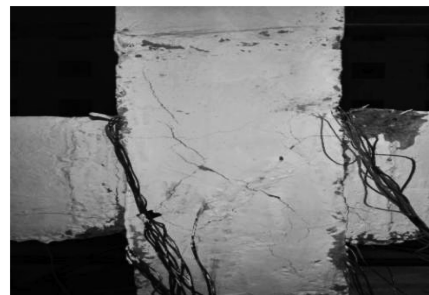
1) 试件ZY0。当荷载为25 kN左右时, 试件ZY0的核心区部位出现一条45°斜向的明显短裂缝, 继续加载, 至95 kN左右时, 试件梁内纵向钢筋达到屈服状态, 为位移控制。当加载至 5Δ 时, 原有核心区斜裂缝变长、变宽, 梁柱节点试件混凝土掉落明显, 试件呈现为剪切破坏。

2) 加固试件ZY1。当荷载为60 kN左右时, 在试件梁端加固层的外侧发现第一条裂缝。此后, 改为位移控制, 在位移正向加载至 9Δ 时, 节点右侧梁端混凝土被压碎, 梁、柱棱角处都出现明显裂缝, 梁端呈现出以弯曲破坏为主的弯剪破坏。

3) 加固试件ZY2。当荷载约为75 kN时, 试件左侧梁柱交界处出现第一条裂缝。此后改为位移控制, 当位移加载至 3Δ 时, 节点右侧梁端出现细小裂缝, 原裂缝延伸变长; 当位移加载至 7Δ 时, 核心区斜向裂缝变长, 此时承载力降到极限承载力的85%, 停止加载。加固试件由原剪切破坏改为弯曲破坏。

4) 加固试件ZY3。当荷载为90 kN左右时, 梁柱交界处出现第一条裂缝, 改为位移控制, 当位移加载至 4Δ 时, 节点两侧梁柱交界处裂缝明显加宽, 核心区混凝土沿节点对角出现一条斜向裂缝; 当位移加载至 6Δ 时, 核心区的斜向裂缝几乎斜向贯通整个核心区, 右侧加固区域梁端部裂缝在棱角处斜向贯通, 核心区有若干条裂缝, 试件呈现出以弯曲破坏为主的弯剪破坏。

各试件的最终破坏形式如图5所示。



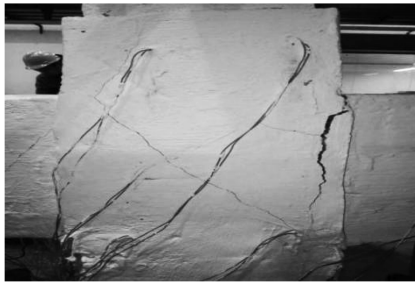
a) ZY0 试件



b) ZY1 试件



c) ZY2 试件



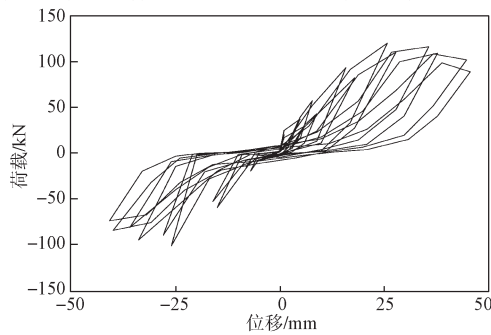
d) ZY3 试件

图5 试件破坏形式

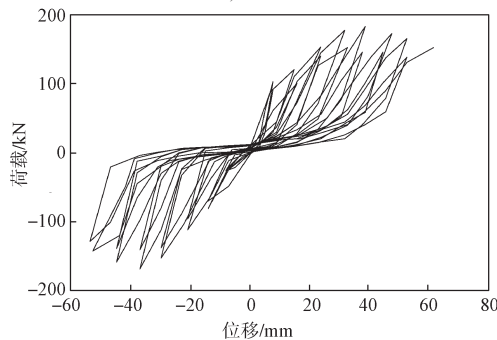
Fig. 5 Test piece failure mode

2.2 试件耗能性能分析

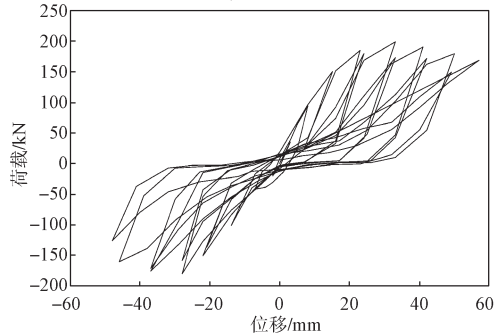
各试件试验数据绘成的荷载-位移滞回曲线见6。



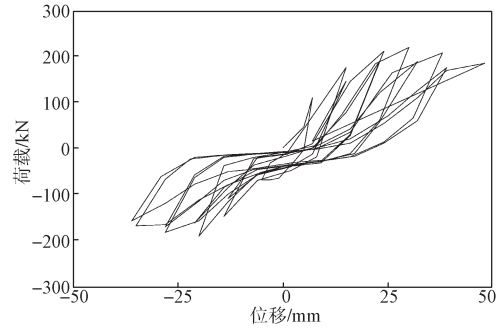
a) ZY0



b) ZY1



c) ZY2



d) ZY3

图6 各试件的滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of each test piece
由图6可知:

1) 加载初期, 各试件都处于弹性阶段, 加固层没有发挥明显作用, 滞回环紧靠在一起, 残余变形和刚度变化都较小, 滞回环包围的面积也相似。

2) 同一轴压比作用下, 试件 ZY0 和 ZY2 的滞回曲线都呈现出不同程度的“捏缩”现象, 但试件 ZY2 滞回曲线的饱满度好于试件 ZY0, 且试件 ZY2 的极限承载力、极限位移相对于试件 ZY0 都有明显的提高。出现这一情况的原因在于, 由 CFRP 网增强的复合砂浆加固层同由两条碳纤维簇组成的“剪刀叉”结构一定程度上抑制了节点核心区斜向的剪切变形, 很好地改善了试件承载力及其抗震性能。

3) 试件 ZY2 和 ZY3 的滞回曲线饱满度好于试件 ZY1, 且试件最大承载力按从大到小依次为 ZY3、ZY2、ZY1, 试件极限位移按从大到小依次为 ZY1、ZY2、ZY3。这可能是因一定范围内竖向轴力增大可抑制梁柱节点核心区裂缝的产生和发展, 且轴力增大可增大梁筋贯穿段的黏结性能, 减小钢筋与混凝土间的滑移, 也就减小了节点开裂导致的剪切变形。往复荷载作用在试件水平方向时, 节点核心区有斜向桁架作用, 可抵抗部分水平剪力。

依据《建筑抗震试验规程》^[11], 引入能量耗散系数 E 反映结构的耗能能力, 其计算示意简图见图7。

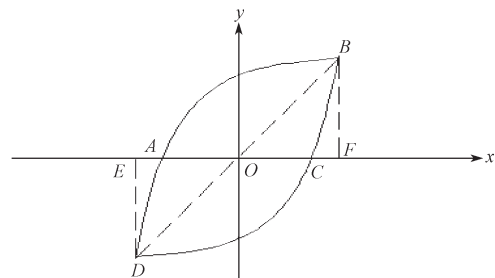


图7 耗能系数计算示意简图

Fig. 7 Schematic diagram of calculation of dissipation coefficient

耗能系数 E 的计算公式如下:

$$E = S_{ABCD} / (S_{OBF} + S_{ODE}) \quad (1)$$

等式右边的分子表示滞回环的面积, 可由 Origin 软件中 Mathematics 命令求得; 分母表示最大荷载循环时假想等效弹性体产生相同位移时吸收的能量。

根据式(1)计算得各试件的耗散系数, 见表2。

表2 各试件耗散系数值

Table 2 Dissipation coefficient values of each test piece

试件编号	ZY0	ZY1	ZY2	ZY3
耗散系数 E	0.492	0.520	0.578	0.661

由表2可知: 在同轴压比作用下, 试件 ZY2 的耗散系数值比试件 ZY0 增加 17.50%, 按轴压比从小到大排列依次为 ZY1、ZY2、ZY3。轴压比增大梯度为 0.1, 耗散系数仅依次增大 11.2%, 14.4%, 说明轴压比增大相同梯度的耗能性能提高不够明显。

2.3 骨架曲线分析

各试件的骨架曲线见图8。

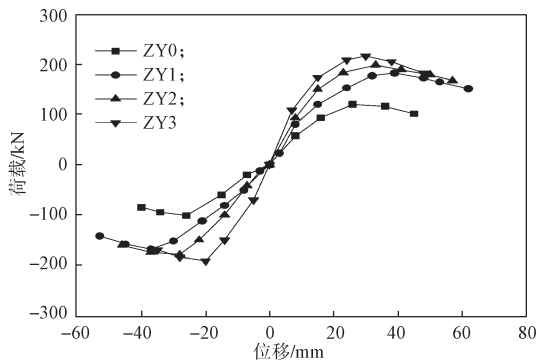


图8 各试件的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of each test piece

由图8可知: 加载初期各试件变化趋势相近, 都

处于弹性阶段; 随着荷载的增大, 各试件骨架曲线出现差异。同一轴压比下, 试件 ZY2 的最大承载力和最大位移都明显比试件 ZY0 的大很多; 不同轴压比作用下, 随着轴压比增大, 试件的承载力有所增大 (ZY3 大于 ZY2、ZY2 大于 ZY1)、试件的延性有所降低 (ZY3 小于 ZY2、ZY2 小于 ZY1)。综合看, 通过增大轴压比提高加固试件的最大承载力, 还应兼顾试件延性性能。

2.4 承载力及延性分析

结构延性作为衡量结构或构件抗震性能好坏的指标之一, 能清晰地反映结构抗震性能的优劣, 其常采用延性系数作为量化指标, 位移延性系数 μ 的计算公式为

$$\mu = \Delta u / \Delta y. \quad (2)$$

式中: Δu 为试件极限破坏时的极限位移;

Δy 为试件屈服位移。

试验所得开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、极限位移、延性系数等见表3。分析表3中数据可以得知, 同一轴压比作用下, 加固试件 ZY2 相较于试件 ZY0 的承载力提高了 65%, 屈服荷载提高了 72.7%、延性提高了 26.6%。这一结果说明, 采用 CFRP 网增强的复合砂浆加固层对节点进行加固是一种新型且加固效果显著的加固方法; 轴压比由 0.2 增大到 0.3 时, 极限承载力提高了 7.1%、屈服荷载提高了 19.6%、延性降低了 10.5%; 轴压比由 0.3 增加到 0.4 时, 试件的极限承载力提高了 9.2%、屈服荷载提高了 15.7%、延性降低了 2.9%。

表3 梁柱节点试件特征荷载及位移

Table 3 Characteristic load and displacement of beam-column joint specimens

试件编号	开裂荷载 P_c/kN	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 $\Delta y/mm$	极限荷载 P_u/kN	极限位移 $\Delta u/mm$	延性系数	轴压比
ZY0	25.12	95.33	16.71	120.74	44	2.68	0.3
ZY1	62.22	137.82	20.11	183.32	61	3.45	0.2
ZY2	77.42	164.74	19.14	199.24	58	3.07	0.3
ZY3	90.70	190.61	16.21	217.61	47	2.98	0.4

3 有限元模拟与试验结果对比分析

3.1 单元的选取及材料本构模型

混凝土和高性能复合砂浆选用 Solide65 单元, 钢筋和碳纤维采用 Link8 单元, 柱顶刚性垫板采用 Solide45 单元。碳纤维网屈服强度为 5.3×10^3 MPa, 泊松比为 0.3, 弹性模量为 2.1×10^5 MPa; 混凝土弹性模量为 2.55×10^4 MPa, 高性能复合砂浆弹性模量为 3.2×10^4 MPa, 二者泊松比均为 0.3。

3.1.1 复合砂浆及混凝土本构关系

当 $\varepsilon_c \ll \varepsilon_0$ 时,

$$\sigma_c = f_c [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_0)^n]; \quad (3)$$

当 $\varepsilon_c \ll \varepsilon_0 \ll \varepsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma_c = f_c. \quad (4)$$

式(3)(4)中: σ_c 为当混凝土压应变为 ε_c 时的压应力; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; ε_0 为混凝土压应力大小等于 f_c 时的应变, 本研究取 0.002; ε_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变, 本研究取 0.0033; n 为系数, 本研究取 $n=2$ 。

混凝土的单轴应力-应变关系曲线见图9a。

3.1.2 钢筋本构关系

钢筋应力-应变关系本构模型采用理想的双线

性 Bios 弹塑性模型，对应的应力 - 应变关系曲线见图 9b。

当 $\epsilon_s \ll \epsilon_y$ 时，

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s; \tag{5}$$

当 $\epsilon_y \ll \epsilon_s$ 时，

$$\sigma_s = f_y \tag{6}$$

式 (5) (6) 中： σ_s 为钢筋的拉应力； ϵ_y 为钢筋屈服应变值； E_s 为钢筋线弹性模量； f_y 为钢筋屈服应力。

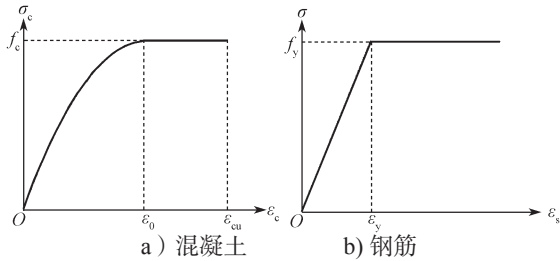


图 9 材料应力 - 应变曲线

Fig. 9 Material stress-strain curve

3.2 有限元模型的建立

采用整体式建模，未考虑钢筋与混凝土之间的滑移，共建立 2 种梁柱节点有限元模型（一个原试件模型，3 个加固试件模型），各模型见图 10。

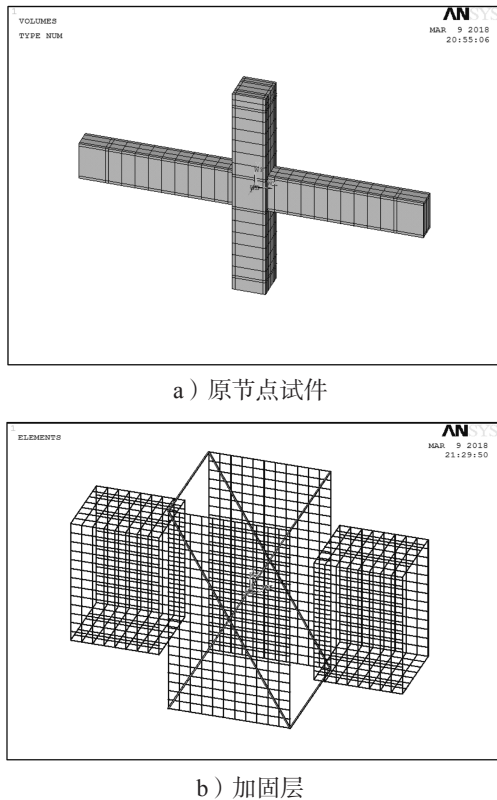


图 10 原节点试件与加固层模型
Fig. 10 Original node test piece and reinforcement layer model

3.3 模型边界条件与求解

试件的梁端和柱端为反弯点，模型边界条件为对梁端 Y、Z 方向进行约束，可平动和转动；柱底端 X、Y、

Z 方向约束，可以转动。并对柱顶施加水平荷载，模型边界条件及加载方式见图 11。采用静态分析，打开大变形设置，所选算法为牛顿 - 拉普森 (Newton-Raphson, NR) 算法，选用 CNVTOL 收敛准则，最后对其求解。

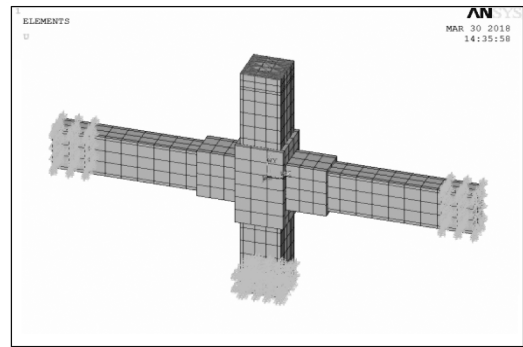
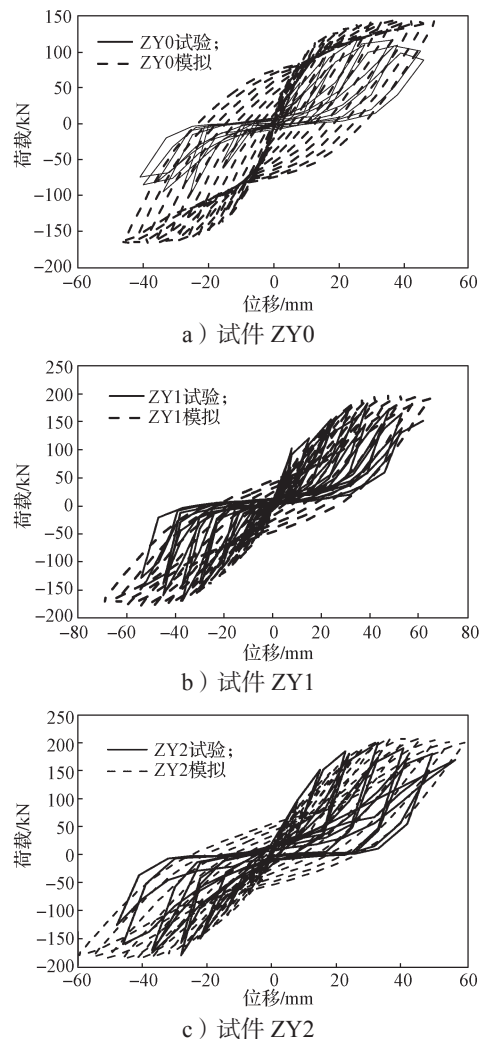


图 11 试件边界加载模型

Fig. 11 Sample boundary loading model

3.4 滞回曲线对比分析

将各试件实验及模拟所得的荷载 - 位移数据共同整理到 Origin9 中，以验证建模的可靠性。所得各试件与试验滞回曲线对比情况见图 12。



a) 试件 ZY0

b) 试件 ZY1

c) 试件 ZY2

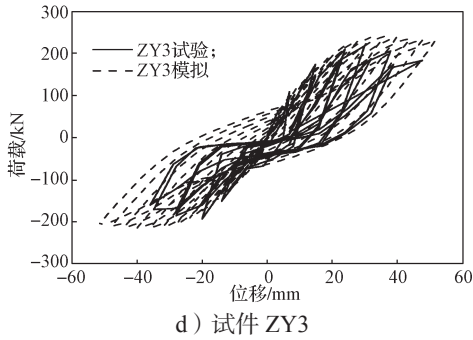


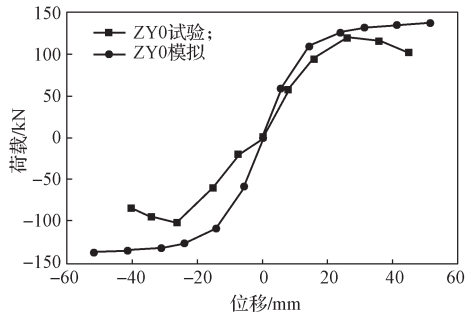
图 12 各试件模拟与试验滞回曲线对比图

Fig. 12 Comparison of test and test hysteresis curves of each test piece

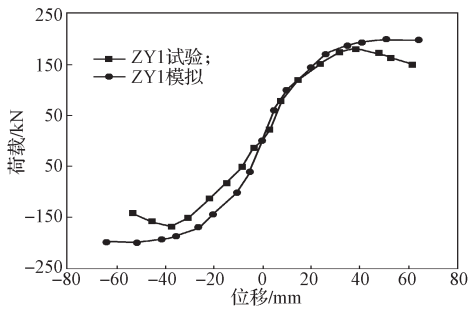
由图 12 可知, 弹性阶段各试件滞回曲线无差别; 弹塑性与塑性阶段试验滞回环出现弯曲, 残余变形较大, 滞回环较饱满, 而模拟极限承载力与位移都较试验值略大。其原因为数值模拟为理想条件, 而试验中的摩擦会损耗能量, 同时数值分析忽略了钢筋与混凝土间黏结滑移的影响。总体来说, 实验、模拟滞回曲线基本吻合, 可在一定程度上互相验证其可靠性。

3.5 骨架曲线对比分析

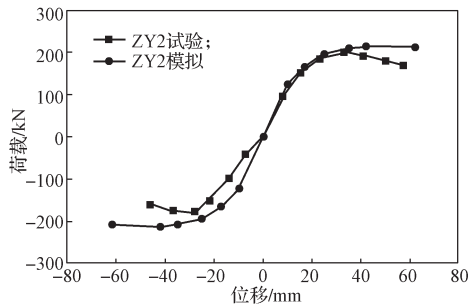
各试件的骨架曲线对比如图 13 所示。



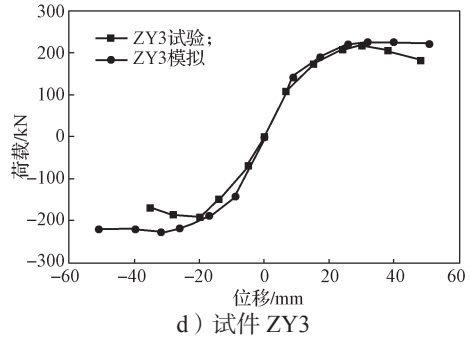
a) 试件 ZY0



b) 试件 ZY1



c) 试件 ZY2



d) 试件 ZY3

图 13 各试件试验与模拟骨架曲线对比

Fig. 13 Comparison of test and simulation skeleton curves of each test piece

通过分析图 13 中各骨架曲线可知, 正向加载弹性阶段: 试件的实验与模拟骨架曲线变化较为吻合; 负向加载骨架曲线略有差别, 主要由于钢筋和混凝土正向受拉损伤较大所致。整体而言, 模拟骨架曲线的极限承载力与极限位移都略大于试验骨架曲线, 很大程度上由试件施工质量及人为因素影响所致, 且加固层没能得到充分利用。总体上试验所得骨架曲线同模拟所得骨架曲线基本一致。

4 节点抗剪承载力试验值与模拟值比较分析

记录本研究中各试件的最大抗剪承载力试验值、模拟值等, 见表 4。

表 4 各试件的抗剪承载力试验值、模拟值

Table 4 Test values and simulation values of shear capacity of each test piece

试件编号	试验值 /kN	模拟值 /kN	破坏类型
ZY0	368.14	374.43	剪切破坏
ZY1	558.85	564.12	弯曲破坏
ZY2	607.68	623.41	弯曲破坏
ZY3	663.59	675.46	弯曲破坏

由表 4 可知, 各试件的最大抗剪承载力试验值均小于其模拟值, 原因在于模拟中采用简化的模型, 试件与装置的摩擦也会抵消一部分水平剪力。试件 ZY0、ZY1、ZY2、ZY3 的试验值与模拟值之间的误差分别为 1.71%, 0.94%, 2.59%, 1.79%, 各试件抗剪承载力的试验值、模拟值具有一定的误差, 且均在合理的误差范围内, 表明了此次建模的准确性。

5 结论

本研究基于 4 个 1:2 缩尺比例的十字型框架节点模型, 在不卸轴压力情况下采用 CFRP 网增强的高性能复合砂浆对其中的 3 个进行了二次受力加固。通过试验研究与数值模拟结合的研究方法, 重点研究了轴

压比变化对加固效果的影响,得到以下结论:

1) 采用 CFRP 网增强的复合砂浆加固层加固 RC 节点是一种新型且效果显著的加固法,试件加固后的破坏形式由原先的脆性破坏转变为延性破坏。在相同轴压比下,加固试件相比未加固的原试件,在承载力、延性、耗能性能上都有了明显的增强和提高,充分说明加固后的抗震性能有了较大的改善。

2) 在一定轴压比范围内,加固试件的耗能性能与极限承载力随轴压比的增大而提高,但极限位移和延性随轴压比的增大而减小;竖向轴力的增大可增强节点核心区斜向桁架作用,并提高水平方向的抗剪承载力;竖向轴力的增大不仅可增强加固层对核心区的约束作用,还可提高试件内钢筋与混凝土间的黏结力和握裹力,减小试件被拉坏时的剪切变形。

3) 对比模拟结果与实验结果所得滞回曲线和骨架曲线得知,模拟所得滞回曲线更加饱满、极限荷载与极限位移也较试验值偏大。其最根本的原因,在于模拟中忽略了钢筋混凝土间的相对滑移,也未考虑 CFRP 网与原试件剥离对模拟结果的影响。在一定误差范围内,两结果基本吻合,从而验证了此次建模的可靠性。

参考文献:

- [1] PROTAA, NANNIA, MANFREDI G, et al. Selective Upgrade of Underdesigned Reinforced Concrete Beam-Column Joints Using Carbon Fiber-Reinforced Polymers[J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(5): 699-707.
- [2] GERGELY J, PANTELIDES C P, REAVELEY L D. Shear Strengthening of RCT-Joints Using CFRP Composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(2): 56-64.
- [3] GRANATA P J, PARVIN A. An Experimental Study on Kevlar Strengthening of Beam: Column Connections[J]. *Composite Structures*, 2001, 53(2): 163-167.
- [4] 魏洋, 纪军, 张敏, 等. FRP 网拉伸性能及加固水下混凝土试验研究 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(7): 10-15.
WEI Yang, JI Jun, ZHANG Min, et al. Experimental Investigation on Tensile Performance of Frp Grids and Its Application as Strengthening Materials for Underwater Concrete[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(7): 10-15.
- [5] 周朝阳, 刘君, 吴中会. 混锚预应力 U 形碳纤维条带抗剪加固混凝土梁试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2018, 51(10): 1-10.
ZHOU Chaoyang, LIU Jun, WU Zhonghui. Experimental Study on Shear Performance of RC Beams Strengthened with Hybrid-Anchored and Prestressed CFRP U-Strips[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(10): 1-10.
- [6] 王海涛, 张磊, 吴刚. CFRP 加固含单边裂纹钢板疲劳性能研究 [J]. *建筑结构*, 2018, 48(增刊 2): 750-753.
WANG Haitao, ZHANG Lei, WU Gang. Study on the Fatigue Behavior of Single-Edged Cracked Steel Plates Strengthened with CFRP[J]. *Building Structure*, 2018, 48(S2): 750-753.
- [7] 张智梅, 王卓, 陈刚. 表层嵌贴 CFRP 板条加固 RC 梁刚度性能研究 [J]. *结构工程师*, 2018, 34(6): 135-142.
ZHANG Zhimei, WANG Zhuo, CHEN Gang. Study on Stiffness Behaviour of RC Beams Strengthened by NSM CFRP Strips[J]. *Structural Engineers*, 2018, 34(6): 135-142.
- [8] ZHANG B, MASMOUDI R, BENMOKRANE B. Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with CFRP Grid Reinforcements[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(8): 625-635.
- [9] 湖南大学. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程: CECS 242—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016: 32-35.
Hunan University. Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Grid Rebar and Mortar: CECS 242—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016: 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及施工指南 [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. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 26-27.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Building: JGJ/T101—2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 26-27.

(责任编辑:廖友媛)