

局部采用纤维增强混凝土梁柱节点 抗震性能的数值分析¹

梁兴文, 邢朋涛, 王英俊

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 运用有限元软件 OpenSees 建立了框架结构梁柱节点数值分析模型, 对 2 个梁柱节点试件在低周反复荷载作用下的抗震性能进行了数值模拟, 模拟结果与试验结果比较吻合, 表明所选择的材料本构关系及相关材料参数取值, 对于模拟钢筋混凝土框架结构的抗震性能具有较好的适用性和合理性. 利用所建立的模型, 分析了在框架结构梁柱节点一定尺寸范围内使用纤维增强混凝土 (FRC) 的新型框架结构梁柱节点的抗震性能. 结果表明, 使用 FRC 的新型框架结构梁柱节点具有较高的承载能力和耗能能力; 随着 FRC 使用范围的增大, 相应梁柱节点的承载能力和耗能能力提高不大.

关键词: 纤维增强混凝土; 新型框架结构; 梁柱节点; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)02-0187-07

震害和试验研究结果表明, 混凝土框架结构的破坏多集中于节点及其附近区域, 节点破坏的主要形式是节点核心区剪切破坏和钢筋锚固破坏, 且节点破坏后很难加固修复. 为了改善梁柱节点的抗震性能, 相关学者提出了一些较为有效的措施, 例如在节点核心区配置较多的箍筋来保证其抗震承载力和延性, 但箍筋配置过多会使节点区钢筋拥挤, 影响节点处混凝土的浇筑质量.

纤维增强混凝土 (FRC) 与普通混凝土 (RC) 相比, 克服了传统材料的抗拉强度低、变形能力和粘结性能差等缺点, 是一种力学性能良好的绿色建筑材料; 其在拉伸、弯曲等荷载作用下具有准应变硬化和多裂缝开展的特性, 可以有效地防止外界有害物质的侵入, 提高结构的耐久性. 由于荷载作用下大量细密裂缝的产生使它同时具有高延性、高韧性和高能量吸收能力, 解决了混凝土本身固有的脆性, 目前这种材料已经在日本、美国、韩国、瑞士和澳大利亚投入使用^[1-2]. 由于它在提高结构的裂缝控制能力、增加结构的延性、耗能能力、抗侵蚀性、抗冲击性和耐磨性等方面具有显著的效果, 所以可广泛应用于各种建筑和结构中.

将 FRC 用于钢筋混凝土框架结构的节点区及其附近, 取代或部分取代箍筋, 可将传统混凝土材料的脆性破坏转变为 FRC 的延性破坏, 为提高框架结构的抗震性能开辟了新的方向, 具有良好的社会效益. 李静等^[3]对高强混凝土新型框架节点进行了试验研究以及有限元分析, 验证了所取模型的正确性; 程彩霞^[4]通过低周反复荷载试验和非线性有限元分析, 对 PVA 纤维水泥基复合材料增强框架节点的抗震性能进行了相关研究; 苏骏等^[5-6]通过超高韧性水泥基复合材料新型梁柱节点的低周反复荷载试验, 分析了高轴压比下节点的抗震性能以及抗裂性能. 目前已有的纤维增强混凝土新型框架梁柱节点的相关研究较少. 基于此, 本文在钢筋混凝土框架的中间节点梁、柱组合体部位选择性地使用 FRC 材料, 根据已有 FRC 基本力学性能的研究结果, 通过选取合适的单元几何模型和材料参数, 采用有限元分析软件 OpenSees 建立使用 FRC 材料的钢筋混凝土框架节点数值模拟分析模型, 进而研究这种新型框架节点的抗震性能, 为实际工程的设计和施工提供理论支持与依据.

1 OpenSees 数值模型

1.1 混凝土本构模型

本文混凝土本构模型采用 Concrete02 Material 关系模型, 它是基于 Kent-Park 的单轴混凝土模型, 该模型考虑了混凝土的拉伸强化, 把达到峰值拉应力后的受拉软化段处理为线性变化. 混凝土受压时的骨架曲线采用 Scott 等人扩展后的 Kent-Park 模型, 该模型在简化与精确之间达到一种较好的平衡, 其受压

收稿日期: 2013-10-08

修改稿日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278402, 51078305); 长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)

作者简介: 梁兴文(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程及工程结构抗震方面的研究. E-mail: liangxingwen2000@163.com

骨架曲线如下:

$$\sigma_c = K f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right] \quad (\varepsilon_c \leq 0.002K) \quad (1)$$

$$\sigma_c = K f'_c [1 - Z_m(\varepsilon_c - 0.002K)] \geq 0.2K f'_c \quad (\varepsilon_c > 0.002K) \quad (2)$$

其中:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (3)$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29 f'_c}{145 f'_c - 1000} + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{h''}{s_h}} - 0.002K} \quad (4)$$

式中: K 表示考虑约束所引起的混凝土强度增大系数; $0.002K$ 是相应的峰值应变; Z_m 是应变软化段斜率; f'_c 是混凝土圆柱体抗压强度 (MPa); f_{yh} 是箍筋的屈服强度 (MPa); ρ_s 是体积配箍率; h'' 是从箍筋外边缘算起的核心混凝土宽度 (mm); s_h 是箍筋间距 (mm).

对混凝土受箍筋加拉筋约束的情况, 极限压应变 ε_{cu} 按式(5)确定, 考虑到试验研究中存在的混凝土保护层的压碎和剥落现象, 在有限元分析时, 一旦保护层的混凝土受压应变超过 ε_{cu} 后, 其应力值取为 0.

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + 0.9 \rho_s (f_{yh} / 300) \quad (5)$$

混凝土峰值应变 ε_0 由式(6)确定, 其中 E_0 是初始弹性模量, 由规范或实测值确定; 卸载刚度取为 $0.1 E_0$, 峰值拉应力之后的受拉软化段刚度 E_{ts} , 取为 $0.125 E_0$.

$$\varepsilon_0 = 2 f'_c / E_0 \quad (6)$$

1.2 钢筋本构模型

本文分析所采用钢筋本构关系模型为 Steel02 Material, 它是考虑了等向应变硬化影响的本构关系模型^[7]. 在本文的分析中, 对于钢筋本构关系模型中控制钢筋从弹性阶段到硬化阶段过渡的三个参数, 按照 OpenSees 程序的建议分别取为 18.5、0.925 和 0.15; 把与之相关的其他参数依次设为 0、1、0、1. 钢筋的硬化率 (即硬化阶段与弹性阶段的斜率之比) 取为 0.01.

1.3 梁柱节点模型

本文梁柱节点采用适用于结构非线性分析的二维节点模型, 如图1所示. 该模型通过以下三个分量模型来表现节点的三种主要的受力破坏机制: ①通过8个钢筋滑移分量, 模拟随着节点核心区的梁柱纵筋的粘结退化引起的节点刚度和强度的退化; ②通过4个交界面剪切分量, 模拟在大震作用下节点周边交界面传递剪力能力的退化; ③通过1个剪块分量, 模拟由节点核心区剪块失效引起的节点刚度和强度的退化. 上述三个分量模型均采用了一个广义一维荷载—变形滞回反应材料 (Pinching4 Material) 来模拟其在循环加载下的滞回性能.

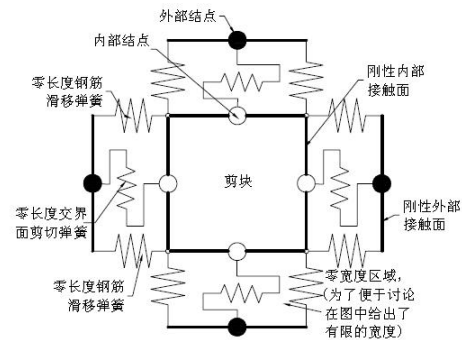


图1 梁-柱节点模型

Fig.1 Beam-column joint element

2 数值模型验证

2.1 算例1-RC框架梁柱组合件

算例1采用的试件 ZHJ2 是由同济大学吕西林完成的 RC 框架梁柱组合件^[8], 柱的设计轴压比为 0.33, 柱及梁抗弯承载力按照 $M_c/M_b > 1.3$ 设计. 梁截面尺寸为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 柱截面尺寸为 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. 实测混凝土立方体抗压强度为 35.7 MPa, 弹性模量为 $3.05 \times 10^4 \text{ MPa}$. 实测的钢筋屈服强度为 360.2 MPa, 极限抗拉强度为 528.2 MPa, 弹性模量为 $1.70 \times 10^5 \text{ MPa}$. 试验时首先施加竖向荷载至试件的预定轴压力并使其保持恒定, 然后施加水平荷载.

利用 OpenSees 进行有限元模拟得到 ZHJ2 试件的滞回曲线如图2(a)所示, 试验结果如图2(b)所示, 相应

的骨架曲线如图3所示。

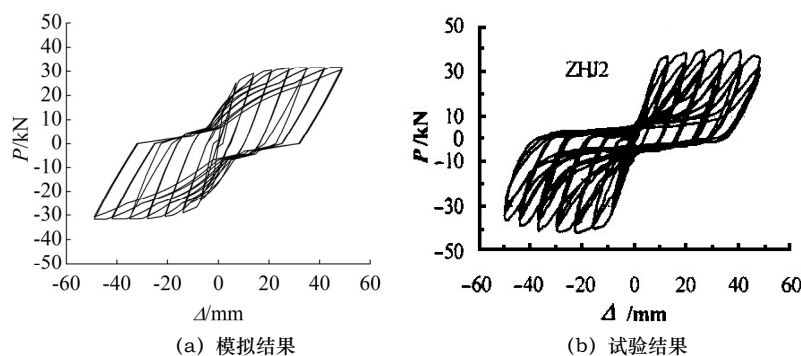


图2 试件 ZHJ2 滞回曲线
Fig.2 Hysteretic curves of ZHJ2

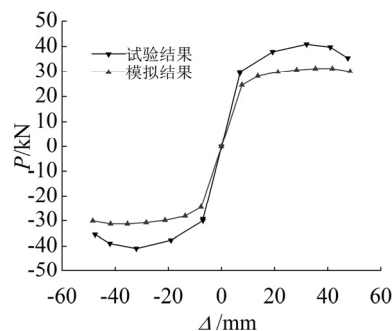


图3 试件 ZHJ2 骨架曲线
Fig.3 Skeleton curves of ZHJ2

从图2及图3可以看出,试件 ZHJ2 模拟和试验得到的滞回曲线形状比较接近。在试件开裂前曲线基本呈直线。屈服前,滞回环狭长,滞回环面积很小,试件基本处于弹性阶段,刚度退化不明显。达到屈服强度后,滞回环面积逐渐增大,耗能能力提高,试件的加载刚度和卸载刚度逐渐降低。但随着位移幅值的增大,试件刚度退化越来越快,钢筋产生粘结滑移,滞回环逐渐形成弓形。

从以上模拟分析结果来看,基于 OpenSees 梁柱节点模型能够较好地模拟试验构件在低周反复荷载作用下的基本反应特性。但是模拟得到的最大柱端水平剪力比试验得到的最大值偏小,由文献[9]分析可知,这可能是由于 OpenSees 程序中对非线性梁柱单元的塑性铰的弯矩—转角骨架曲线的双线型简化引起的,也可能是对剪块分量和钢筋滑移分量的屈服后刚度定义过小引起的,即该节点模型没有充分考虑钢筋屈服后由于内力重分布引起的附加节点刚度。

2.2 算例2-PVA纤维水泥基复合材料增强框架节点

算例2模拟的试件来自于文献[4]中的HTCCJ-35-1.17高韧性PVA纤维水泥基复合材料节点试件。梁截面尺寸为 $b \times h = 150\text{mm} \times 300\text{mm}$,柱截面尺寸为 $b \times h = 200\text{mm} \times 250\text{mm}$,柱的剪跨比 $\lambda = 2$,梁纵筋配筋率 $\rho = 1.4\%$,柱全部纵筋配筋率为 $\rho = 2.41\%$,梁、柱混凝土强度等级分别为C30、C40,柱箍筋为 $\phi 8@75$,节点核心区箍筋体积配箍率为 1.17% ,轴压比为 0.35 ,梁加密区和非加密区箍筋分别为 $\phi 6@50$ 、 $\phi 6@100$,PVA纤维水泥基材料的浇注范围为节点核心区和梁柱两端(梁端 300mm ,柱端 200mm)。

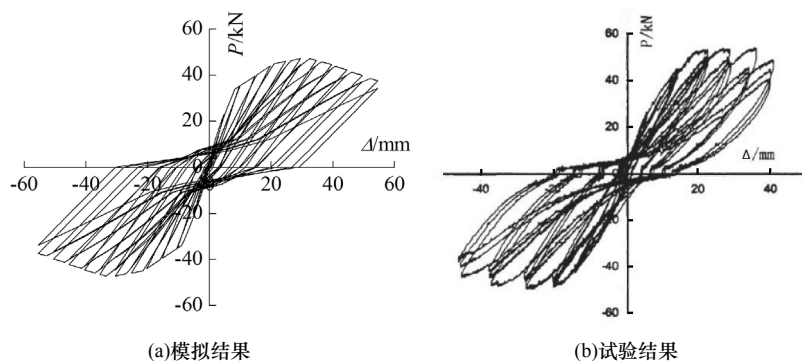


图4 试件 HTCCJ-35-1.17 滞回曲线
Fig.4 Hysteretic curves of HTCCJ-35-1.17

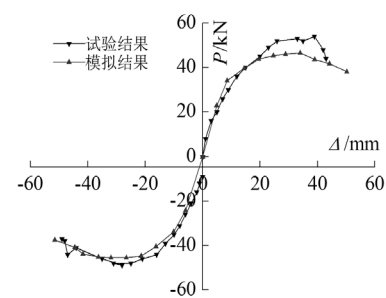


图5 试件 HTCCJ-35-1.17 骨架曲线
Fig.5 Skeleton curves of HTCCJ-35-1.17

利用OpenSees建立有限元模型,进行有限元分析,得到试件HTCCJ-35-1.17梁端荷载—位移的滞回曲线,如图4(a)所示,图4(b)为试验结果,相应的骨架曲线如图5所示。

由试验结果和有限元模拟结果可知,试验得到的极限荷载和最大位移分别为 53.33 kN 、 40.65 mm ,有限元模拟结果为 47.18 kN 、 41.83 mm ,二者误差分别为 11.53% 和 2.9% ,从荷载和变形方面对比分析,有限元分析结果和试验结果吻合较好。

从以上两个框架节点的OpenSees模拟分析结果来看,总体而言,本文的有限元模型能够较好地模拟试验构件在低周反复荷载作用下的基本反应特性,模拟结果与试验结果较为接近。表明所选择的材料本构关系模型及相关材料参数取值,对于模拟框架节点及其构件具有较好的适用性,验证了基于OpenSees

平台所建立的有限元分析模型的正确性,这为本文后续新型框架梁柱节点的数值分析奠定了良好的基础。

3 新型框架梁柱节点抗震性能数值分析

3.1 新型框架梁柱节点试件设计

本文模拟所采用的梁柱节点组合件,取自于一般多层、多跨框架结构在侧向荷载下相邻梁柱反弯点之间的典型单元,模拟分析时采用足尺试件。试件的钢筋均按现行规范^[10]进行配置,梁柱纵筋和箍筋均采用 HRB500 级钢筋,混凝土强度等级为 C30,各试件截面尺寸及配筋均相同,梁截面尺寸 $b \times h = 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,柱截面尺寸 $b \times h = 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,试件几何尺寸及配筋图如图 6 所示。所有试件中柱的设计轴压比为 0.35。各试件 FRC 的使用范围见表 1。

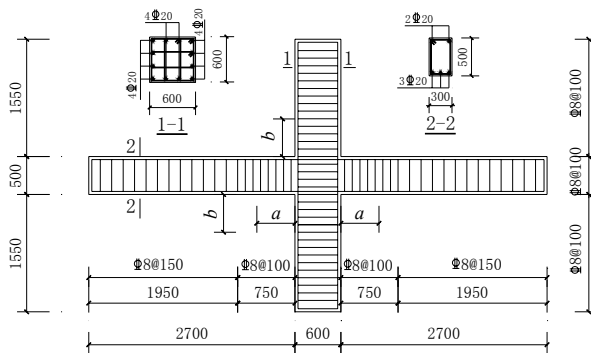


图 6 试件几何尺寸及配筋图

Fig.6 Dimensions and reinforcement details of specimen

表 1 各试件 FRC 使用参数
Tab.1 The range of FRC for each specimen

试件 编号	FRC 使用范围		
	a/mm	b/mm	核心区
RC-1	—	—	—
FRCJ-1	500	600	全部
FRCJ-2	750	900	全部
FRCJ-3	2 700	1 550	全部

注:“—”表示不使用 FRC,为普通混凝土;FRC 使用范围之外是普通混凝土。

3.2 材料本构模型的参数确定

在对结构进行非线性反应分析时,需要反映的是结构构件实际能够发挥的强度水准;《混凝土结构设计规范》^[10]建议,结构非线性分析时材料强度宜取其平均值。因此,本文在确定钢筋和混凝土材料强度及弹性模量等参数时,均采用材料强度平均值。

3.2.1 普通混凝土

采用 OpenSees 进行数值模拟时,截面恢复力模型采用基于柔度法的纤维模型,在纤维截面划分时,分为核心受约束混凝土和保护层无约束混凝土两部分。对于 C30 无约束混凝土,取轴心抗压强度平均值 $f_{c,m} = 28.03 \text{ N/mm}^2$,相应的应变为 $\varepsilon_0 = 2 f_{c,m} / E_0$,取极限压应变 $\varepsilon_{cu} = 0.004$,此时混凝土压应力降为 0,并且卸载刚度减小到 $0.1 E_0$;峰值拉应力之后的受拉软化段刚度的绝对值取为 $E_{ts} = 0.125 E_0$ 。

对于 C30 受约束混凝土,经计算取梁、柱构件受约束混凝土的强度增大系数 $K = 1.1$,则轴心抗压强度为 $K f_{c,m}$,相应的应变为 $K \varepsilon_0$,极限抗压强度为 $f_{c,m}'' = 0.2 K f_{c,m}$ 。对于混凝土受箍筋加拉筋约束的情况,混凝土极限压应变由式(5)确定。

3.2.2 纤维增强混凝土 (FRC)

对于 C30 无约束 FRC,为了对比分析,取其轴心抗压强度平均值与普通混凝土相同,即取轴心抗压强度平均值为 $f_{c,m}$,考虑到棱柱体强度与立方体强度的差异,依据规范^[10]可得立方体抗压强度 $f_{cu,m} = f_{c,m} / 0.76$ 。根据李艳^[11]的研究结果可知,FRC 的弹性模量 $E_0 = f_{cu,m}^{0.596} \times 10^3 \text{ (MPa)}$;抗拉强度 $f_t = 3.683 f_{cu,m}^{0.174}$;峰值应变为 $\varepsilon_0 = 2 f_{c,m} / E_0$,取极限应变 $\varepsilon_{cu} = 0.03$,此时,相应的压应力为 0,卸载刚度减小到 $0.1 E_0$;峰值拉应力之后的受拉软化段刚度的绝对值取为 $E_{ts} = 0.125 E_0$ 。

同理,对于 C30 受约束 FRC,取梁、柱构件受约束混凝土的强度增加系数 $K = 1.1$,则轴心抗压强度为 $K f_{c,m}$,相应的应变为 $K \varepsilon_0$,极限抗压强度为 $f_{c,m}'' = 0.2 K f_{c,m}$ 。极限压应变取为

$$\varepsilon_{cu} = 0.03 + 0.9 \rho_s (f_{yh} / 300)$$

通过以上分析，可得所用混凝土材料的相关参数如表 2 所示。对于钢筋，由规范^[10]得，HRB500 级钢筋的屈服强度平均值 f_{ym} 为 534.28 MPa，极限强度平均值 f_{stm} 为 669.66 MPa，弹性模量 E_s 为 200 GPa。

3.3 OpenSees数值模拟及结果分析

对各试件的节点单元进行离散划分，采用 OpenSees 进行数值模拟，得到各试件柱端剪力-位移滞回曲线见图 7(a)~7(d)，相应的骨架曲线如图 8 所示。

表 2 混凝土材料参数				
Tab.2 Parameters of concrete material				
项 目	普通混凝土		纤维增强混凝土	
	保护层混凝	约束混凝	保护层混凝	约束混凝土
$f_{c,m}$ /MPa	28.03	30.83	28.03	30.83
ε_0	0.001 7	0.001 87	0.006 53	0.007 18
$f_{c,m}^u$ /MPa	0	6.17	0	6.17
ε_{cu}	0.004	0.013	0.03	0.038 6
f_t /MPa	2.80		6.90	
E_0 /MPa	33 000		8 586.33	

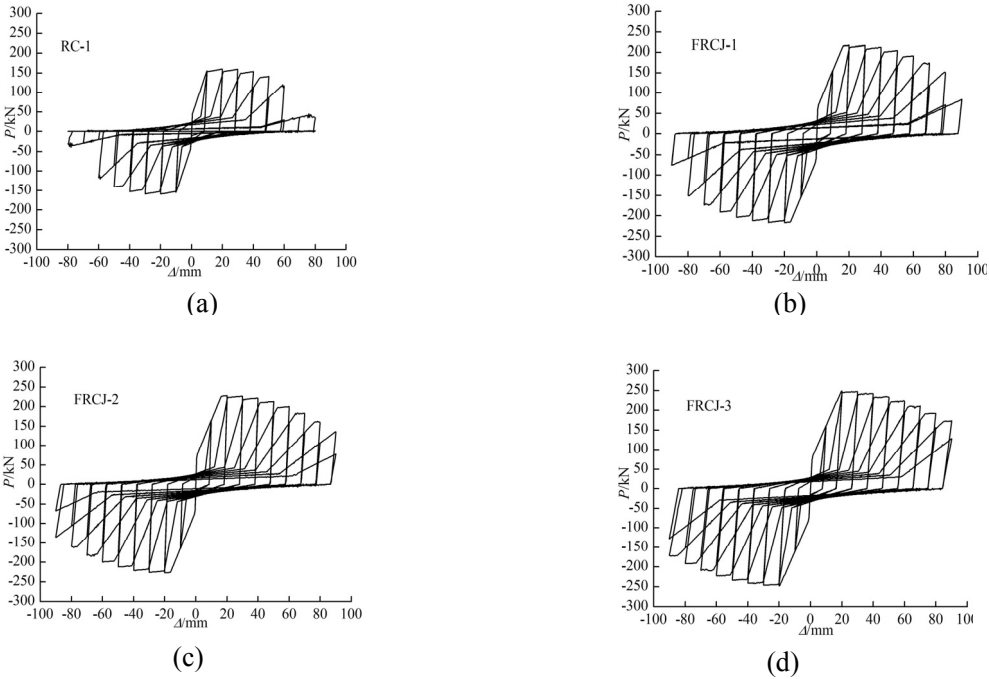


图 7 各试件的滞回曲线
Fig.7 Hysteretic curves of specimens

通过分析以上模拟结果可知：

(1) 有限元分析结果表明，使用 FRC 材料的梁柱节点 (FRCJ-3) 的极限承载力为 248.67 kN，而普通钢筋混凝土梁柱节点 (RC-1) 的极限承载力仅为 159.77 kN，节点的承载力提高了 55.64%。由于 FRC 材料具有很好的抗剪性能，特别适用于以剪切变形为主的框架梁柱节点区域，从而使其承载力有较大提高。

(2) 由各模拟试件的滞回曲线可知，使用 FRC 材料的梁柱节点构件 (FRCJ-1、FRCJ-2、FRCJ-3) 滞回环比较饱满，耗能能力较强。FRC 拉伸时应力-应变曲线表现为应变硬化特征，受压时也表现出良好的韧性，可见该材料能够吸收更多的能量。将其用于钢筋混凝土梁柱节点，其吸收能量的能力得到充分发挥，因而滞回环较饱满，结构耗能能力较强。

(3) 试件 FRCJ-1、FRCJ-2、FRCJ-3 的极限承载力分别是 216.66 kN、228.20 kN、248.67 kN，节点承载力仅分别提高了 5.33%、8.97%，而相应 FRC 材料的使用范围增大很多。另外，由滞回曲线可知，三者滞回曲线的饱满程度相当，耗能能力相差不多。

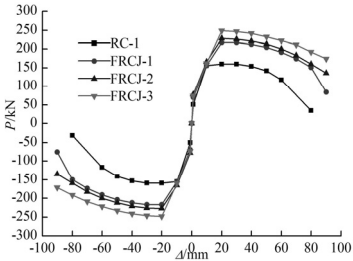


图 8 各试件的骨架曲线
Fig.8 Skeleton curves of specimens

4 结论

分别对2个梁柱节点试件在低周反复荷载作用下的抗震性能进行 OpenSees 有限元数值模拟,并与相应的试验结果进行对比分析,在验证数值模型合理的基础上,对使用 FRC 材料的新型框架梁柱节点的抗震性能进行数值分析。通过分析研究,得到以下结论:

(1) OpenSees 有限元模型能够较好地模拟试验构件在低周反复荷载作用下的基本反应特性,模拟结果与试验结果较为接近。表明所选择的材料本构关系模型及相关材料参数取值,对于模拟钢筋混凝土框架节点具有较好的适用性。

(2) 使用 FRC 材料的梁柱节点具有较高的承载能力及耗能能力。由于 FRC 材料良好的抗剪性能和延性,节点的抗裂性能和剪切延性将明显改善,整个结构构件的承载能力及抗震性能都有很大程度的提高。

(3) 数值计算结果表明,在节点及梁柱端部一定范围局部使用 FRC 材料的情况下,再增大 FRC 的使用范围,对梁柱节点的抗震性能影响较小。综合考虑结构抗震性能与经济性的统一,结合本文的分析结果,建议除梁柱节点核心区使用 FRC 外,梁、柱端的 FRC 材料的使用范围分别取梁、柱截面高度。

参考文献 References

- [1] LI V C, Kanda T. Engineered cementitious composites for structural applications[J]. ASCEJ. Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2): 66-69.
- [2] LI Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536.
LI Victor C. Progress and application of engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531-536.
- [3] 李静, 杨发云, 甘琳. 高强混凝土新型梁柱节点抗震性能非线性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 110-114.
LI Jing, YANG Fayun, GAN Lin. Nonlinear finite element analysis for seismic performance of high-strength concrete beam-column joints with new reinforcement details[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 110-114.
- [4] 程彩霞. PVA 纤维水泥基复合材料增强框架节点抗震性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
CHENG Caixia. A study on the earthquake-resistant behavior of the PVA fiber cementitious composite reinforced frame joints[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2009.
- [5] 苏骏, 徐世烺. 高轴压比下 UHTCC 梁柱节点抗震性能试验[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 53-56.
SU Jun, XU Shilang. Experimental study on seismic behaviors of UHTCC new beam-column joints with high axial compression[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition, 2010, 38(7): 53-56.
- [6] 苏骏, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料新型梁柱节点抗裂性能研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 99-102.
SU Jun, XU Shilang. Research on cracking behavior of a new type of UHTCC frame beam-column joints[J]. Industrial Construction, 2010, 40(8): 99-102.
- [7] Menegotto M. and Pinto P.E.. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending[C]// IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, 1973.
- [8] 吕西林, 郭子雄, 王亚勇. RC 框架梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(1): 2-7.
LÜ Xilin, GUO Zixiong, WANG Ya-yong. Experimental study on seismic behavior of beam-column subassemblages in RC frame[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(1): 2-7.
- [9] 吴健秋. 基于 OpenSees 的梁-柱节点单元的适用性和定参方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
WU Jianqiu. A study on the applicability and parameter defining method of the beam-column model in OpenSees[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [10] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010 Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 李艳. 高性能纤维增强水泥基复合材料力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LI Yan. Study on mechanical performance of high performance fiber reinforced cement composite[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [12] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

Numerical analysis of the seismic behavior of beam-column joints with fiber reinforced concrete in partial section

LIANG Xingwen, XING Pengtao, WANG Yingjun

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The numerical analysis model of the beam-column joints using the finite element software OpenSees was built and numerical simulation of the seismic behavior of two beam-column joints specimens under low reversed cyclic loading were carried out. The simulation results coincide with those of the experimental results, showing that the choice of the material constitutive relation model and related material parameters for simulation the seismic behavior of reinforced concrete frame structure have good applicability and rationality. By using this model, the seismic behavior of the new frame structure, whose beam-column joints within a certain size using fiber reinforced concrete (FRC) were analyzed. The results showed that the beam-column joints with fiber reinforced concrete in partial section have higher bearing capacity and energy dissipation ability. With the increase of the region of FRC, the corresponding bearing capacity and energy dissipation ability do not increase much.

Key words: fiber reinforced concrete (FRC); new frame structure; beam-column joints; seismic behavior

(本文编辑 吴海西)

(上接第 174 页)

- [3] 黄波,孟卫东,李宇雨. 基于双边激励的产学研合作最优利益分配方式[J]. 管理科学学报,2011,14(7):32-42.
HUANG Bo, MENG Wei dong, LI Yu yu. The optimal profit sharing arrangement in industry-university-institution cooperation based on double-sided incentive[J]. Journal of Management Sciences in China,2011, 14(7):32-42.
- [4] Michael G.jacobides, Thorbjorn Knudsen, Mie Augier. Benefiting from innovation: Value creation,value appropriation and the role of industry architectures[J]. Research Policy, 2006(35):1200-1221.
- [5] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 2002.
ZHANG Weiying. Game theory and information economics[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2002.
- [6] ROPER Stephen, DU Jun, James H Love. Modelling the innovation value chain[J]. Research Policy,2006(37):961-977.
- [7] 林强, 顾培亮. 面向一次性合作的供应链协调与激励机制[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1):125-130.
LIN Qiang, GU Peiliang. Coordinative and incentive mechanisms of one-shot cooperation in supply chain[J].Journal of Southwest Jiaotong University, 2008,43(1):125-130.
- [8] 詹美求, 潘杰义. 校企合作创新利益分配问题的博弈分析[J]. 科研管理, 2008, 29(1):8-13.
ZHAN Meiqiu, PAN Jieyi. Research on the profit distribution game of cooperative innovation between universities and enterprises[J]. Science Research Management,2008,29(1):8-13.

Research on profit distribution of cooperative innovation in Energy-saving building materials industry

LIU Xiaojun, WANG Mengmeng

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: With the widespread demand for new energy-saving building materials, more and more companies have chosen to collaborate with research institution. This paper analyzed the process of cooperation innovation and the transformation path of innovation technologies, proposed profit distribution model, and found technical value, commercialization ability have a positive effect. The innovation costs have a negative effect for profit distribution. Finally, an estimation method of each parameter is given to solve the model in practical applications problem of energy-saving building materials industry.

Key words: energy-saving building materials industry; cooperative innovation process; profit distribution model; game

(本文编辑 沈波)