

新型自密实混凝土加固震损 RC 框架节点 低周反复试验数值模拟

胡克旭¹, 赵志鹏¹, 尹帅锋²

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235)

摘要: 在前期节点加固试验研究基础上, 运用有限元 Opensees 程序软件对试验进行仿真模拟。提出了节点损伤分区概念, 将节点的震损分为梁柱端部损伤区和节点核心损伤区两部分并差别处理; 结合梁柱节点单元的特点, 提出使用面积加权平均的方法计算加固后震损 RC 框架节点核心区平均受剪应力-应变关系; 同时提出将柱子损伤模型推广应用到节点时对损伤 D 值折减的方法。结果表明模拟滞回曲线与试验曲线符合较好, 建立的加固震损 RC 框架节点有限元模型可以较准确地模拟试验试件在低周反复荷载下的受力变形性能, 为进一步理论分析奠定基础。

关键词: 自密实混凝土; RC 框架节点; 节点损伤分区; 震损加固; 数值分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0808-06

Numerical simulation for pseudo-static test of earthquake-damaged RC frame joints strengthened by self compacting concrete

ZHAO Zhipeng¹, HU Kexu¹, YIN Shuaifeng²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

Abstract: In this paper, the previous experimental study is simulated using the finite element software Opensees. The conception of joint damage partition is presented, which divides the seismic damage into beam column end damage zone and joint core damage zone being treated differently. According to the characteristics of Beam Column Joint Element, the Area Weighted Average method is proposed to get the average shear stress-strain relationship in the core area of the damaged RC frame joints. At the same time, it is concluded that the damage D value should be reduced when applying the Column-Damage-Model to the joints. The results show that the simulation results stay in good agreement with the experimental results, and the finite element model of the strengthened RC frame joints with seismic damage in this paper can be used to simulate the deformation behavior of the specimen under low cyclic loading, and it lays the foundation for the further theoretical analysis.

Keywords: self compacting concrete; RC frame joints; joint damage partition; seismic damage reinforcement; Numerical simulation

钢筋混凝土节点受力性能分析一直是抗震和加固领域的热点问题, 框架结构的主要受力构件为梁柱, 其受力性能较为简单, 前期学者已经能够较好的模拟其非线性受力特性, 而梁柱节点的受力比较复杂, 尤其是加固后的带有震损的节点受力更加复杂。目前对于加固震损节点的试验研究较多, 陆洲导, 曹忠民, 程莉等曾先后分别对碳纤维、高强钢绞线网-聚合物砂浆复合面层、玄武岩纤维加固的带有震损的混凝土框架节点的抗震性能进行了试验研究^[1-4], 而对其进行数值模拟的研究还较少。对加固震损框架节点的模拟中主要有两个难点, 一是带损伤节点核心区新旧混凝土剪应力与应变的关系如何确定; 二是对加固后节点内损伤的处理, 目前没有针对于框架节点提

出的损伤模型, 如何将梁柱构件的损伤模型应用到节点的损伤计算有待解决。此外, 得到节点损伤之后如何将之反映到模型当中又是一个重要问题。本文在前人的研究基础之上, 选取合适的单元及参数进行模拟计算, 模拟中采取适当的措施将得到的损伤反映到模型中, 取得了比较好的模拟结果, 对同类问题的研究有参考意义。

1 试验介绍

1.1 试件设计

刘春浩^[5]等人进行了新型自密实混凝土材料加固平面框架节点的抗震性能试验, 以研究新型自密实混凝土材料对震损 RC 框架节点的加固效果, 同时研究了不同震损程度对加固后 RC 节点

抗震性能的影响. 试验共设计了 5 榀平面十字形框架节点试件, 编号分别为 J0、J1、J2、J3、J4. 其中 J0、J1、J2、J3 为待加固试件, 其尺寸及配筋相同, J4 为对比试件, 尺寸与其它试件加固后尺寸相同. J0 直接进行放大截面加固; J1~J3 先进行预震损试验, 然后再进行放大截面加固, 加固采用新型自密实混凝土材料 TC20, 加固后所有试件尺寸相同, 加固后试件对应编号为 JGJ0~JGJ3. 通过 J1~J3 与 J0 加固后试验结果的比较来分析框架节点震损后加固与无损加固试件抗震性能的差别; 通过 J1~J3 之间的比较来分析不同损伤程度对加固效果的影响; 通过 J1 与 J2 比较分析不同加固箍筋布置的加固效果; 对比试件 J4 不加固直接加载至破坏, 用以比较加固后节点与普通节点的抗震性能. 加固前试件详细尺寸及配筋如图 1(左为试件 J0~J3, 右为试件 J4)所示, 加固后试件详细尺寸及配筋如图 2(左为试件 JGJ0、JGJ1、JGJ3, 右为试件 JGJ2) 所示. 试件设计的主要参数见表 1.

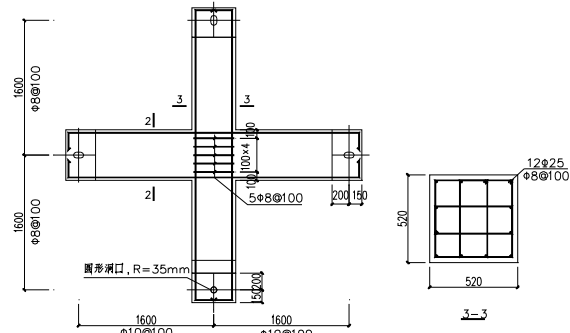
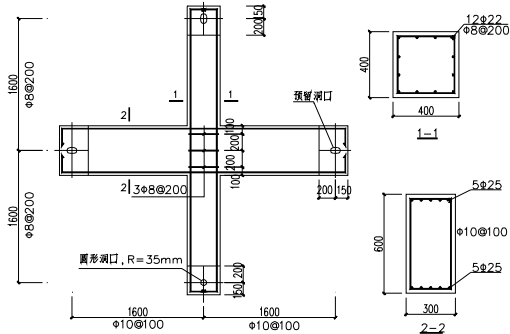


图 1 试件几何尺寸及配筋形式 (单位: mm)
Fig.1 Geometry and steel layout of specimens (unit: mm)

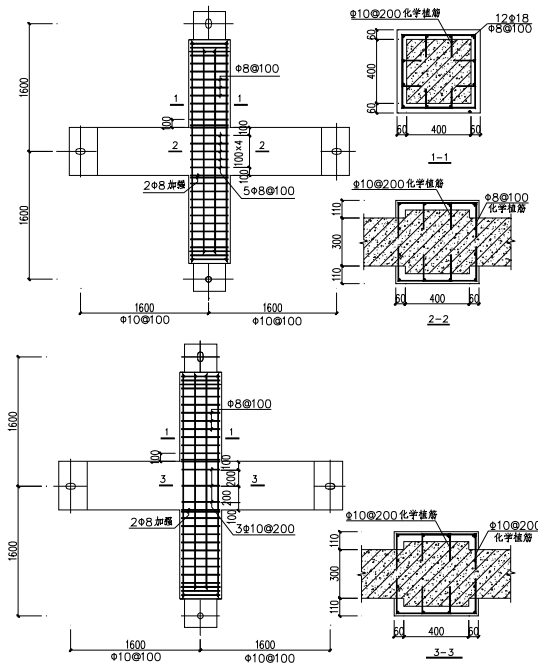


图 2 加固后试件几何尺寸及配筋形式 (单位: mm)
Fig.2 Geometry and steel layout of reinforced specimens (unit: mm)

表 1 试件设计参数表
Tab.1 Parameters of specimens

试件编号		原柱截面尺寸/mm	原核心区配箍	预震损程度	加固后柱截面尺寸/mm	加固核心区配箍
加固前	加固后					
J0	JGJ0	400×400	3Φ8@200	—	520×520	5Φ8@100
J1	JGJ1	400×400	3Φ8@200	中等损坏	520×520	5Φ8@100
J2	JGJ2	400×400	3Φ8@200	中等损坏	520×520	3Φ10@200
J3	JGJ3	400×400	3Φ8@200	严重损坏	520×520	5Φ8@100
J4		520×520	5Φ8@200	—	对比试件, 不加固	

1.2 试验方案

对试件 J0~J4 加载至不同损伤程度, 用水泥基灌浆料放大截面加固后再进行低周反复的试验, 将对比试件 J4 与加固后的试件 JGJ0~JGJ3 加载至被破坏为止.

2 有限元模拟

2.1 模型简图

根据加载装置形式及构件梁柱端部的约束情况, 简化试件的边界条件和荷载形式, 将模型简化

为图 3 所示形式进行分析计算.

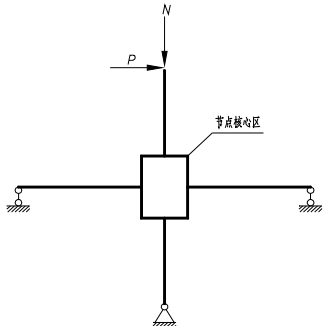


图 3 简化分析模型
Fig.3 Simplified analysis model

2.2 材料本构

2.2.1 钢筋材料本构

OpenSees^[6]中常用的钢筋材料有 Steel01 和 Steel02 两种. 其中 Steel02 材料与实际钢筋材料试验结果吻合较好、数值稳定性好, 此外 Steel02 材料考虑了钢筋的各向同性应变硬化作用, 可反映钢筋的强化和 Bauschinger 效应, 为较多研究者所采用. Steel02 本构模型见图 4(左为应力应变曲线, 右为滞回规则曲线). 模拟中钢筋采用 steel02 材料本构, 考虑钢筋强化, 钢筋强度按照实测值取用, 强化系数 0.01.

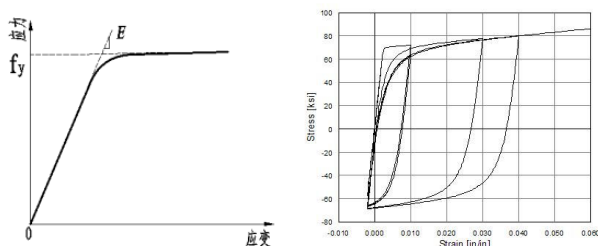


图4 Steel02 本构模型

Fig.4 Steel02 constitutive model

2.2.2 混凝土材料本构

OpenSees 中常用的混凝土材料有 Concrete01 和 Concrete02 两种. 此两种材料均基于修正的 Kent-Park 本构模型, 均可通过提高混凝土受压骨架曲线的峰值应力、峰值应变以及改变软化段斜率以考虑箍筋约束作用对混凝土强度与延性的影响. Concrete01 不考虑混凝土材料的抗拉强度, Concrete01 采用的滞回规则是由 Karsan 与 Jirsa 提出的, 其主要特点在于以线性路径卸载, 且卸载路径与再加载路径为同一直线段. Concrete01 本构模型见图 5(左为应力应变曲线, 右为滞回规则曲线).

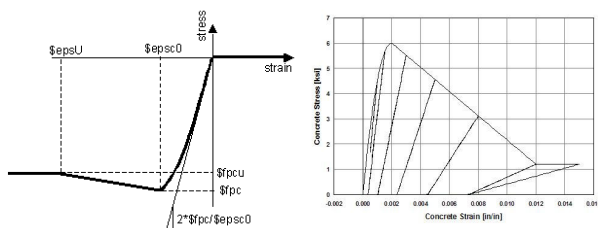


图5 Concrete01 本构模型

Fig.5 Concrete01 constitutive model

模拟中加固前试件混凝土材料采用 Concrete01 模型, 混凝土强度值采用构件钻芯取样后的测得的抗压强度值. 考虑箍筋的约束作用, 采用 Kent-Park 箍筋约束混凝土本构模型计算约束混凝土的抗压强度和对应的压应变值. 加固用材料也按照 Concrete01 材料模型, 考虑到水泥基灌浆材料与混凝土材料的不同, 根据吴元^[7]等人的研究, 按下式

计算加固材料的棱柱体轴心抗压强度:

$$f_c = 0.91 f_{cu,150}$$

式中: $f_{cu,150}$ 为加固材料立方体抗压强度实测值. 此外, 与 f_c 对应的应变取为 0.003 2.

2.3 构件单元选择

2.3.1 梁柱单元选择

OpenSees 中常用的非线性梁柱单元有基于位移的梁柱单元(Displacement Based Beam-Column Element)、基于力的梁柱单元(Force Based Beam-Column element)和集中塑性铰梁柱单元(Concentrated Plastic Hinge element). 考虑到收敛性问题, 此次模拟中梁和柱采用基于位移的梁柱单元, 通过单元细分的方法来保证其计算精度. 其优点是收敛性好, 需要的迭代次数较少.

2.3.2 节点单元选择

OpenSees 中常用的节点单元有二维节点单元(Joint2D Element)、弹性管状节点单元(Elastic Tubular Joint Element)和梁柱节点单元(Beam Column Joint Element). 其中弹性管状节点单元用于模拟平面钢管节点, 二维节点单元和梁柱节点单元用于模拟二维平面梁柱节点. 模拟中节点核心区采用梁柱节点单元(Beam Column Joint Element), OpenSees 的梁柱节点单元命令用于创建一个二维梁柱节点单元对象, 这一单元在二维和三维结构中均可使用, 需注意的是荷载仅可在该单元的平面内传力. 梁柱节点单元模型最早是 2003 年由美国华盛顿大学的 Lowes、Mitra 及斯坦福大学的 Altoontash^[8]共同提出的, 此后 Mitra^[9]和 Lowes^[10]先后在 2004 年和 2007 年两次对该梁柱节点单元模型进行了模型本构和定参方面修改.

2.3.3 节点单元定参

如图 6 所示, 梁柱节点单元包括四个内节点(internal node)、四个外结点(external node)、核心区剪切板(shear panel)、四个界面剪切弹簧(interface-shear spring)以及八个位于梁柱端部的拉压弹簧(bar-slip spring).

梁柱节点单元主要受力组件为核心区剪切板、界面剪切弹簧和拉压弹簧. 其中核心剪切板反映梁柱节点核心区的受剪变形性能; 界面剪切弹簧体现梁柱端部的剪力传力机制; 拉压弹簧则将梁柱端部钢筋拉力和混凝土受压区压力进行等效, 能够较为合理地反映 RC 梁柱节点的传力机制和破坏形式. 梁柱节点单元定参主要可分为三部分:

(1) 节点核心区剪切应力应变关系的确定. 节

点核心区剪切应力应变关系是通过拉压杆模型计算确定的. 拉-压杆模型的受力机制见图 7, 核心区的宏观传力机构被分为斜压杆机构和桁架机构两部分, 斜压杆机构由主压杆(图中 ad)组成, 直接传递部分剪力; 桁架机构由次压杆(图中虚线表示), 可承受一部分剪力, 并由箍筋拉力来平衡.

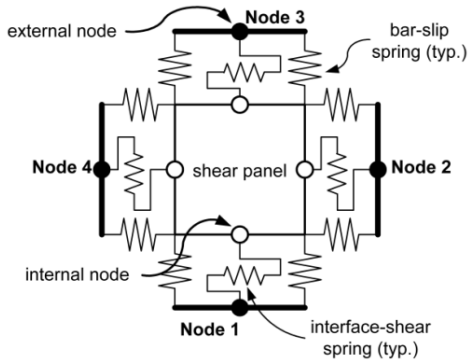


图 6 Beam Column Joint Element 构成图
Fig.6 Composition diagram of BeamColumnJoint Element

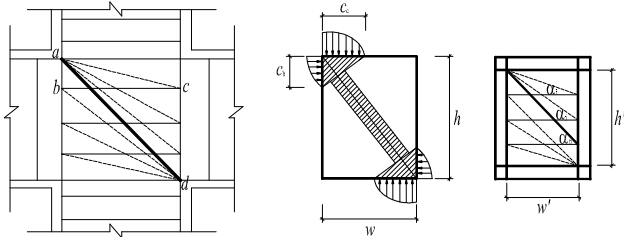


图 7 拉-压杆模型受力机制简图
Fig.7 Mechanism of the Tension strut model

拉-压杆模型的计算要点有: ①节点受力平衡条件, 节点承受的水平剪力等于各压杆力的水平分量之和, 竖向剪力等于各压杆力的竖向分量之和; ②主压杆宽度和次压杆宽度之间的几何相容条件; ③拉杆应变、次压杆应变和核心区剪切应变的变形协调条件; ④次压杆与箍筋、纵筋相交处结点的平衡条件; ⑤混凝土的本构关系, 混凝土本构关系采用 Mander 约束混凝土本构模型, 箍筋本构关系采用双折线应力应变关系, 硬化系数取 0.01.

根据以上计算要点以及文献[11]中的计算公式, 本文编制了 MATLAB 计算程序, 进行了节点核心区的定参计算, 较为准确的求解 RC 节点核心区的剪切应力-应变关系.

(2)界面剪切弹簧的材料本构确定. 界面剪切弹簧本构取为弹性, 其弹性模量设为无穷大, 这与试验实际情况相符, 因为试验构件的破坏形式均为节点核心区受剪破坏, 梁柱根部并无出现明显的横向滑移和严重的横向开裂.

(3)拉压弹簧的材料本构确定. 拉压弹簧的材料本构采用 OpenSEES 提供的 bar-slip 材料本构.

2.4 预震损处理

2.4.1 节点损伤分区

本文借鉴文献[12]提出的 RC 梁柱构件损伤分区概念, 考虑到框架节点的表现损伤主要集中在节点核心区以及梁端和柱端, 提出框架节点损伤分区模型, 如图 8 所示. 在模拟时对核心损伤区、梁柱端部损伤区以及无损区差别处理, 核心损伤区、梁柱端部损伤区分别按计算损伤进行折减, 无损区则不进行损伤折减. 使用时根据构件裂缝发展情况对损伤长度取值, 此次模拟中 RC 节点构件的梁柱端部损伤区长度取为 $0.5h_b$ 或 $0.5h_c$.

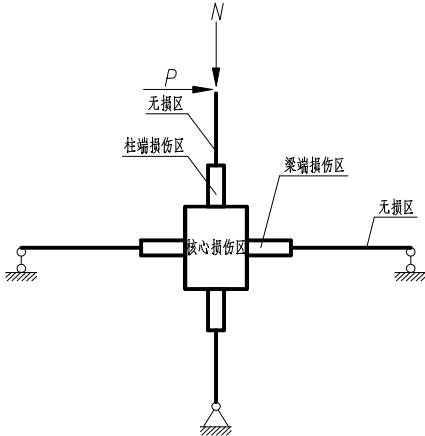


图 8 节点损伤分区示意图
Fig.8 Schematic diagram of joint damage partition

2.4.2 节点损伤计算

目前并无专门用于框架节点的损伤模型, 模拟中采用牛荻涛损伤模型^[13], 模型的计算公式为:

$$D = (\delta_m / \delta_u) + \alpha (E / E_u)^\beta$$

式中: δ_m 为地震作用下构件的最大变形; δ_u 为单调荷载作用下构件的极限变形; E 为构件的累积滞回耗能; E_u 为结构的极限滞回耗能; α 和 β 是组合系数. 该模型是针对 RC 柱提出的, 考虑到 RC 柱损伤集中在柱子端部, 而框架节点损伤分布区域包括节点核心区、梁端和柱端, 损伤分布区域集中程度低于 RC 柱构件, 故而对框架节点所采用的损伤折减系数 α 应小于计算损伤指数 D . 据上分析, 通过试算来确定对框架节点的损伤折减程度. 将构件损伤折减系数 α 取为计算损伤 D 值的一半, 即 $\alpha = 0.5D$. 预震损试验后试件 J0~J4 损伤计算结果如表 2 所示.

表 2 试件损伤 D 值表
Tab.2 Chart of specimens damage

试件	J0、J4	J1	J2	J3
D 值	0.0	0.43	0.43	0.734
α 值	0.0	0.215	0.215	0.367

对梁、柱端部损伤区,折减后的混凝土峰值强度为 $(1-\alpha_m)f'_c$,弹性模量 $(1-\alpha_m)E_0$,其中 f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度, E_0 为混凝土初始切线模量;对加固后节点核心区平均受剪应力-应变关系的处理,考虑到 Beam Column Joint 单元的特点,提出使用面积加权平均的方法计算加固震损 RC 框架节点核心区平均受剪应力-应变关系.具体为:采用拉压杆模型计算原节点核心区的 $\tau-\gamma$ 关系,进行损伤折减后得到受损节点核心区的 $\tau-\gamma$ 曲线;再用拉压杆模型计算加固材料节点核心区的 $\tau-\gamma$ 曲线;最后按照两种材料所占的截面面积进行加权平均,计算出加固后震损节点核心区的 $\tau-\gamma$ 关系.

3 模拟结果与试验结果对比分析

图 9 为各节点模拟滞回曲线与试验滞回曲线的对比图.由图可见数值模拟曲线与试验滞回曲线吻合度较高,比较准确的反映出试验构件的承载力水平和加卸载刚度变化趋势以及因节点核心区剪

切变形等引起的“捏拢”现象.值得注意的是模拟中前期刚度和承载力均大于试验结果,笔者认为原因有二:一是试验设备零件间隙引起的“柔度”所致;二是加载初期箍筋应力水平较低,未能发挥其约束作用所致.

表 3 为节点模拟与试验承载力对比结果,由表格可以看到带有损伤的加固试件除试件 JGJ3 外模拟承载力均比试验值略小,可能原因是严重损伤试件在加固时破碎混凝土被凿掉被新浇混凝土替代,模拟时把此部分当作损伤混凝土处理的原因;所有试件中误差较大的为带有损伤试件 JGJ1~JGJ3,误差较小的为没有损伤的 J4 和 JGJ0,原因可能是由柱子损伤模型应用到节点后产生误差.但整体而言模拟误差均较小,最大误差为 7%,模拟准确度较高.由此判断,本文模拟分析中提出的节点损伤分区的概念、面积加权平均节点核心区定参方法是合理的,模拟中对于节点区损伤的处理是合适的,模拟采用的模型是比较准确的.

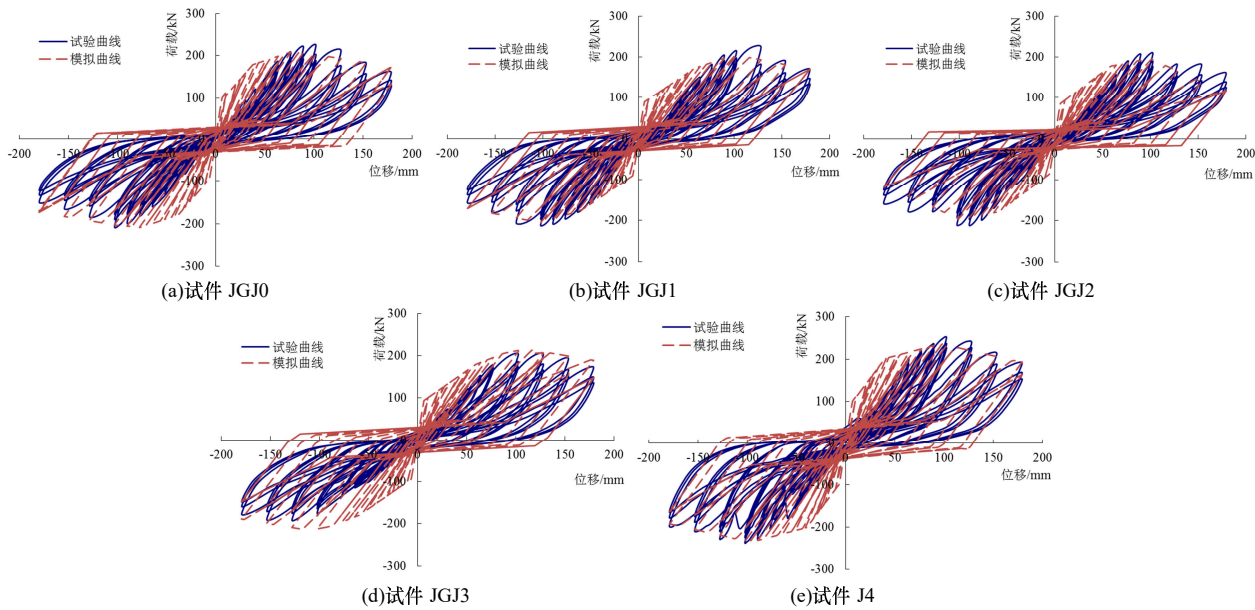


图 9 试验与模拟滞回曲线对比
Fig.9 Comparison between experimental and simulated hysteretic curves

表 3 模拟与试验结果对比

Tab.3 Comparison of simulation and test results

构件编号	F_t/kN	F_s/kN	F_s/F_t	F_t'/kN	F_s'/kN	F_s'/F_t'	$ (F_s-F_s')-(F_t-F_t') /(F_t-F_t')$
J4	251.0	235.7	94%	-238.0	-235.2	99%	4%
JGJ0	227.2	208.7	92%	-209.5	-208.2	99%	5%
JGJ1	228.0	205.5	90%	-209.5	-205.6	98%	6%
JGJ2	210.2	195.5	93%	-212.3	-195.7	92%	7%
JGJ3	206.9	213.3	103%	-193.1	-213.0	110%	7%

注: F_t 、 F_t' 为正向最大、反向最大承载力试验值, F_s 、 F_s' 为最大、最小承载力模拟值.

4 结论

本文首先介绍了课题组先前进行的 RC 框架

节点震损加固试验,然后通过建立加固震损 RC 框架节点的 OpenSees 有限元模型,对试验进行了数值仿真模拟.本文的主要工作有:

(1) 提出了节点损伤分区概念,将节点的震损分为梁柱端部损伤区和节点核心损伤区两部分并差别处理的方法。此外在节点定参过程中,考虑到梁柱节点单元的特点,提出使用面积加权平均的方法计算加固震损 RC 框架节点核心区平均受剪应力-应变关系;

(2) 提出将柱子损伤模型应用到节点时对损伤 D 值折减的方法,文中应用牛荻涛损伤模型算出节点的损伤 D 值,取损伤折减系数 α 为计算损伤 D 值的 0.5 倍,即 $\alpha = 0.5D$ 后的计算结果较为符合;

(3) 选取合适的材料模型、构件单元并合理定参后对试验进行了模拟,模拟结果与试验结果符合较好,说明本文所建立的加固震损 RC 框架节点有限元模型可以较准确地模拟试验试件在低周反复荷载下的受力变形性能,为进一步理论分析奠定基础。

参考文献 References

- [1] 程莉. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
CHENG Li. Investigation of BFRP-reinforced pre-damaged concrete beam-column joints under reversed cyclic loading [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [2] 曹忠民, 李爱群, 王亚勇, 等. 高强度钢绞线网-聚合物砂浆复合面层加固震损梁柱节点的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(6): 45-50.
CAO Zhongmin, LI Aiqun, WANG Yayong, et al. Experimental study on damaged RC beam-column joints strengthened by composite cover of high strength wire mesh and polymer mortar[J]. Earthquake Resistant Engineering Retrofitting, 2005, 27(6): 45-50.
- [3] 陆洲导, 洪涛, 谢莉萍. 碳纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能的初步研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(2): 9-12.
LU Zhoudao, HONG Tao, XIE Liping. An initial study on performance of damaged interior column-beam-slab subassemblies strengthened by carbon fiber reinforced plastics [J]. Industrial Construction, 2003, 33(2): 9-12.
- [4] 余琼, 陆洲导. 受损对碳纤维加固框架节点的影响[J]. 同济大学学报, 2004, 32(2): 177-181.
YU Qiong, LU Zhoudao. Comparison and analysis of injured frame joint and uninjured frame joint strengthened by carbon fiber reinforced plastics[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(2): 177-181.
- [5] 胡克旭, 张鹏, 刘春浩. 新型材料加固钢筋混凝土框架节点的抗震试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43: 447-451.
HU Kexu, ZHANG Peng, LIU Chunhao. Seismic testing study on RC joints strengthened by new concrete material[J]. China Civil Engineering Journal. 2010, 43: 447-451.
- [6] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees users manual[R]. Berkeley: PEER University, 2007.
- [7] 吴元, 王凯, 杨晓婧等. 水泥基灌浆料基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构. 2014(19): 95-98.
WU Yuan, WANG Kai, YANG Xiaoqian, et al. Experimental study on basic mechanical properties of cementitious grout[J]. Building Structure. 2014(19): 95-98.
- [8] LOWES L N, MITRA N, ALTOONTASH A. A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames[M]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, 2003.
- [9] MITRA N, LOWES L N. Evaluation and advancement of a reinforced concrete beam-column joint model[C]// Canada: Vancouver, B.C., 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.
- [10] MITRA N, LOWES L N. Evaluation, calibration and verification of a reinforced concrete beam-column joint model[J]. Journal of Structural Engineering. 2007, 133(1): 105-120.
- [11] 韩风霞, 王志军, 宋孟超, 等. 钢筋混凝土梁柱节点核心区拉-压杆模型化方法研究[J]. 土木建筑与环境工程. 2010(1): 61-65.
HAN Fengxia, WANG Zhijun, SONG Mengchao, et al. Strut-and-tie model method of reinforced concrete beam-column joint core[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering. 2010(1): 61-65.
- [12] 李维涛, 鞠杨, 应惠清. RC 框架结构损伤指标研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009 (4): 204-207.
LI Weitao, JU Yang, YING Huiqing. Damage index of RC frame structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009 (4): 204-207.
- [13] 牛荻涛, 任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 1996(04): 44-54.
NIU Ditao, REN Lijie. Improved double parameter seismic damage model for reinforced concrete structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 1996(04): 44-54.

(编辑 吴海西)