

钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌实验数值模拟

李雁军, 吕大刚, 王震宇, 王光远

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 该文来源于由清华大学和中国建筑学会抗震防灾分会建筑结构抗倒塌专业委员会组织的钢筋混凝土框架拟静力倒塌实验数值模拟的盲测竞赛。该文采用基于纤维截面的有限元模型以及通过修正斜压场理论确定节点域受力性能的方法, 对钢筋混凝土框架柱、节点以及整体结构的拟静力实验进行了数值模拟, 对比分析结果表明: 分析结果与实验结果吻合较好, 分析方法客观、合理、可靠, 为以后的结构倒塌实验分析提供了理论指导。

关键词: 钢筋混凝土; 数值模拟; OpenSees; 修正斜压场理论; 节点

中图分类号: TU375.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.S065

NUMERICAL SIMULATION FOR QUASI-STATIC COLLAPSE TEST OF RC FRAME

LI Yan-jun, LÜ Da-gang, WANG Zhen-yu, WANG Guang-yuan

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The study was motivated by the participation in the blind prediction contest of the RC frame quasi-static tests organized by Tsinghua University and Professional Committee of Collapse-prevention of Building Structure of Association of Earthquake Resistance and Disaster Prevention, Architectural Society of China. This paper presents the simulation of the nonlinear response of a quasi-static test of RC columns, RC beam column joints and a RC frame under inverse triangle loading. A finite element model based on the fiber section is used for beam and column specimens. A macro model is used for a beam column joint specimen and its material behavior is identified by modified compression-field theory. The results show that the simulation results agree well with the test results. The analytical method is reasonable and reliable, thusly it provides guidelines for the analysis of structural collapse tests.

Key words: reinforce concrete; numerical simulation; OpenSees; modified compression-field theory; joint

钢筋混凝土框架结构是地震区最为常见的抗侧力结构体系, 由于其平面布置灵活多样, 能提供较大的建筑空间, 被广泛应用于住宅、学校以及办公楼等建筑中。设计合理、构造得当的框架结构能提供足够的强度、刚度以及变形能力, 满足小震、中震以及大震的地震需求, 是多高层结构中最为常

见的结构形式之一。在现代基于性能的地震工程中, 利用非线性静力分析方法或非线性动力时程分析方法进行结构抗震性能评估的基础是客观精确的有限元分析模型的建立。

本文来源于由清华大学和中国建筑学会抗震防灾分会建筑结构抗倒塌专业委员会组织的钢筋

收稿日期: 2012-03-13; 修改日期: 2012-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178150, 51078109, 50978080)

通讯作者: 李雁军(1981—), 男, 山东泰安人, 博士生, 主要从事钢筋混凝土结构抗震性能分析等研究(E-mail: mmssott@163.com).

作者简介: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构可靠度、工程风险分析、结构动力学、结构非线性分析、结构全寿命设计、地震工程与风工程、土木基础设施系统等研究(E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

王震宇(1971—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博导, 从事钢筋混凝土结构的 FRP 抗震加固与设计方法、钢筋混凝土结构地震损伤、倒塌机理与性能设计、钢-混凝土组合结构抗震等研究(E-mail: zhenyuwang@hit.edu.cn).

王光远(1924—), 男, 河南温县人, 教授, 院士, 博导, 从事工程项目全系统全寿命优化、工程软设计理论、结构模糊随机优化设计、结构广义可靠度理论及应用、抗灾结构优化设计、大型复杂结构选型等研究(E-mail: ssott008@163.com).

混凝土框架拟静力倒塌实验数值模拟的盲测竞赛，竞赛的组织者发布试件相关的材料和几何参数，以及实验时测得的位移响应，参赛者来预测试件的反力。本文通过引入修正斜压场理论确定节点域的恢复力模型，采用基于纤维截面的有限元模型以及宏观节点模型，对钢筋混凝土框架柱、节点以及整体结构进行了数值模拟，数值模拟结果跟实验结果吻合较好，说明本文的分析方法合理可靠。

1 实验概况

为了研究钢筋混凝土框架结构地震倒塌机理，检验现有计算程序倒塌模拟效果。设计了一组钢筋混凝土框架结构拟静力实验^[1]，包括构件实验(首层的边柱和中柱以及边节点和中节点)和框架结构实验。整体结构按 7 度设防设计，实验模型的缩尺比例为 1：2，模型在底层柱脚考虑了拉梁，以考察拉梁对柱子的约束影响，框架梁考虑楼板以更好模拟楼板对结构受力的影响。

底层边柱和中柱的试件尺寸及配筋如图 1 所示^[1]，实验时边柱柱顶施加的轴向压力为 140.78kN，中柱柱顶施加的轴向压力为 256.25kN。

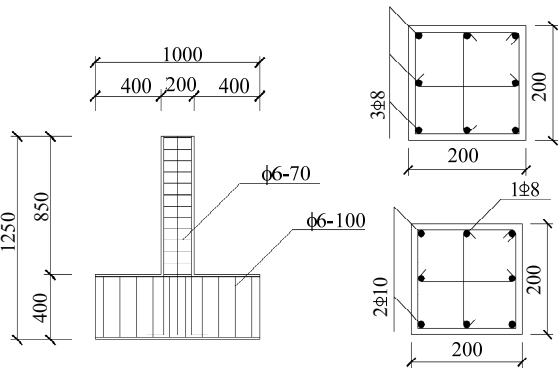


图 1 柱试件尺寸及配筋

Fig.1 Dimension and reinforcement of column specimen

底层边节点和中节点试件中柱配筋图见图 1 及梁配筋图见图 2^[1]，实验时柱顶施加轴向压力，边节点为 218kN，中节点为 398kN，实验采用梁端往复加载模式。

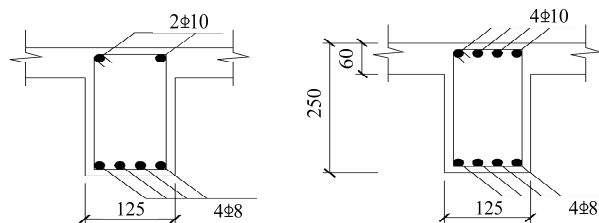


图 2 节点试件中梁配筋图

Fig.2 Beam reinforcement of joint specimen

钢筋混凝土整体框架拟静力实验如图 3 所示^[1]，边柱柱顶轴力和中柱柱顶轴力分别为 163kN 和 326kN，考虑 6 层原始结构按倒三角模式加载，实验结构模型水平方向 3 个千斤顶的推力比为 18：2：1。

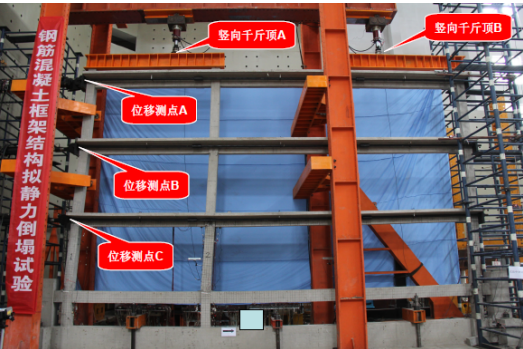


图 3 钢筋混凝土整体框架实验
Fig.3 RC frame collapse test

试件采用的钢筋材料和混凝土材料的性能如表 1、表 2 所示。

表 1 钢筋材料参数

Table 1 Material parameter of steel bar

钢筋类别	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	屈服应变	极限强度/MPa	极限应变
φ4	195000	390	0.0021	414	0.267
φ6	203941	441	0.0022	529	0.342
B8	289850	582	0.0020	855	0.288
B10	265433	481	0.0020	745	0.236

表 2 混凝土材料参数

Table 2 Material parameter of concrete

实验	位置	立方体抗压强度/MPa
钢筋混凝土整体框架实验	地梁	36.6
	拉梁层梁柱	31.8
	一层梁柱	36.2
	二层梁柱	34.7
柱构件实验	三层梁柱	33.6
	底层边柱和中柱	30.1
节点构件实验	底层边节点	43.4
	底层中节点	41.6

2 钢筋混凝土框架结构拟静力实验的数值模拟

2.1 模拟平台

本文采用太平洋地震工程研究中心(PEER)研发的开源的地震工程模拟平台 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)^[2]作为数值模拟工具。该平台提供了多种单元的分析模型和数值求解方法用于地震作用下结构体系和岩土工程的数值模拟，可进行模态分析、线性分析、

非线性分析、静力分析以及动力分析,构件和结构的局部或整体响应可通过 recorder 对象方便的记录。相对于传统的商业软件,开源的 OpenSees 可以进行自主开发,添加新的材料类型、新的单元分析模型以及求解方法等。

2.2 材料本构模型与有限元分析模型

2.2.1 混凝土及钢筋材料的本构模型

混凝土受压本构模型采用修正的 Kent-Park 模型^[3],如图 4 所示, K 表示由横向箍筋约束引起的混凝土强度增大系数,分析中没有考虑混凝土的抗拉强度;采用纤维截面建模时,将梁柱截面混凝土区分为箍筋约束的核心混凝土和保护层混凝土,核心混凝土的极限抗压强度取为 $0.2Kf_c$,考虑到保护层混凝土的剥落,保护层混凝土的极限抗压强度取为 0.0MPa 。钢筋材料的本构模型采用能考虑强度退化的三折线模型,屈服后的应变硬化率取为 $0.01E_s$,如图 5 所示。

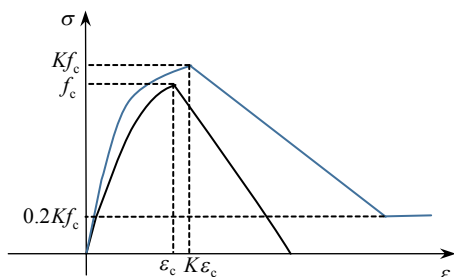


图 4 混凝土材料本构模型

Fig.4 Stress-strain relation of concrete

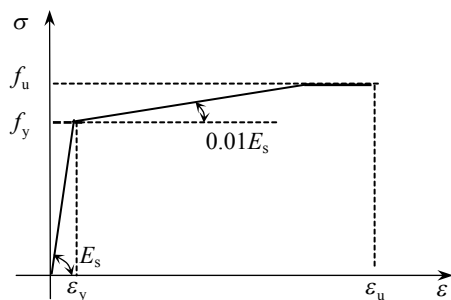


图 5 钢筋材料本构模型

Fig.5 Stress-strain relation of steel

2.2.2 节点域剪切块的恢复力模型

本文将修正斜压场理论引入,用于确定节点域剪切块恢复力模型的骨架曲线。1986 年,Vecchio 和 Collins 在斜压场理论的基础上,考虑开裂混凝土的抗拉强度,并且采用经实验验证了的开裂混凝土的平均应力-应变关系,提出了修正斜压场理论^[4]。本文基于修正斜压场理论,利用 Matlab 编制程序计算出节点域剪切块的弯矩曲率骨架曲线,示意图如

图 6 所示,计算得到的节点实验模型的节点域剪切块骨架曲线的参数值参见表 3。节点域剪切块的恢复力模型采用能考虑强度、刚度以及加卸载刚度退化的广义滞回材料模型模拟。

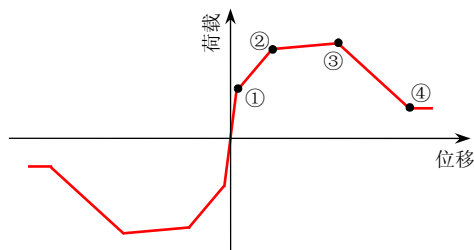


图 6 剪切块骨架曲线

Fig.6 Skeleton curve of shear panel

表 3 剪切块模型参数值

Table 3 Parameter value of shear panel

骨架点		①	②	③	④
边节点	剪应力/MPa	2.97	4.13	4.58	0.23
	剪应变	0.00021	0.0034	0.013	0.024
中节点	剪应力/MPa	4.01	7.81	8.17	0.41
	剪应变	0.00037	0.0031	0.0074	0.017

2.2.3 有限元分析模型

OpenSees 中有 3 种梁柱单元分析模型可供选择。基于有限单元刚度法的分布塑性梁柱单元 (dispBeamColumn), 基于有限单元柔度法的分布塑性梁柱单元 (forceBeamColumn) 和集中塑性梁柱单元 (beamWithHinges)。这 3 种单元的刚度矩阵是直接通过划分的截面纤维的单轴应力-应变关系根据平截面假定积分得到, 在 OpenSees 中还可以通过定义零长度单元的方式采用集中塑性铰模型模拟梁柱单元, 这种方法需要对宏观的零长度单元进行细致的验证, 对理想弹塑性材料的响应有较好的效果。本文采用了 dispBeamColumn 单元来模拟框架柱和梁, 基于纤维截面的 dispBeamColumn 单元通过截面纤维的单轴应力-应变关系基于平截面假定求得单元的刚度矩阵, 保证了模拟的客观性, 能合理地考虑轴力与弯矩的相互作用。

节点作为框架结构的重要组成部分, 受到压、拉、弯、剪、扭多种作用的耦合影响, 受力非常复杂, 相关的精细化建模受到越来越多的重视。一些学者在实验和震害调查的基础上, 对节点进行了深入的研究, 提出了一些节点的有限元分析模型, 如集中塑性节点模型^[5-7]、剪刀模型^[8-9]等。本文采用由 Altoontash^[10]提出的 Joint2D 节点模型进行节点的模拟, 模型示意图如图 7 所示。该节点单元由 4 根铰接于一体的刚性杆链接而成, 形成一个可在平

面内任意变形的平行四边形，每根刚性杆的中点处有 1 个节点，用于构造梁柱单元模型以及确定节点域的尺寸，本文在进行有限元建模时取梁柱交叠的区域为节点域。

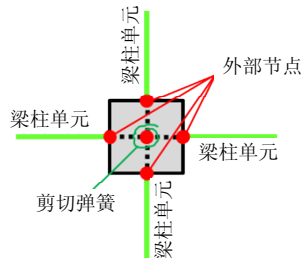


图 7 节点模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of joint model

2.2 数值模拟结果

本文基于上述的有限元分析理论，采用 OpenSees 模拟平台编制相应的有限元分析程序，对钢筋混凝土框架柱、节点和整体框架进行了数值模拟，结果如图 8~图 10 所示。对比分析结果表明，数值模拟结果与实验结果拟合较好，本文的分析方法能够较好地再现构件和整体结构在往复荷载下的受力性能，能够很好地模拟钢筋混凝土结构在地震作用下的抗震性能。

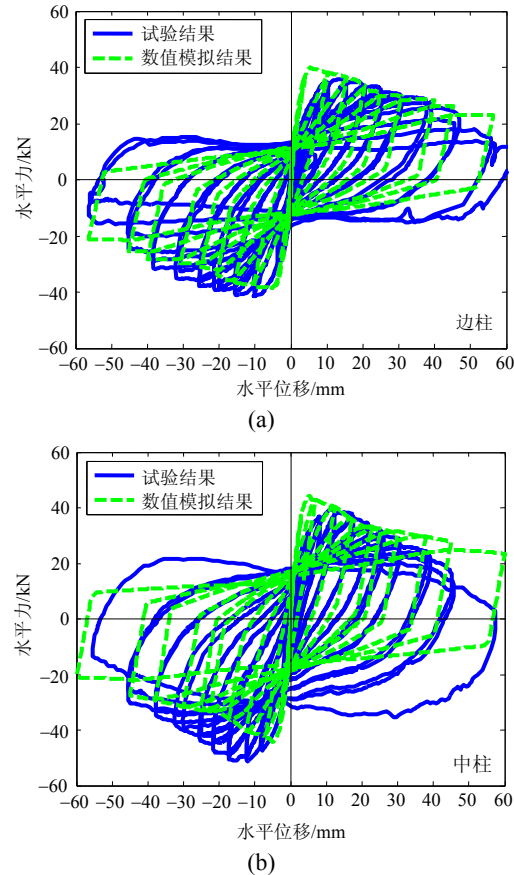


图 8 框架柱的数值模拟结果

Fig.8 Load-displacement hysteretic curves of columns

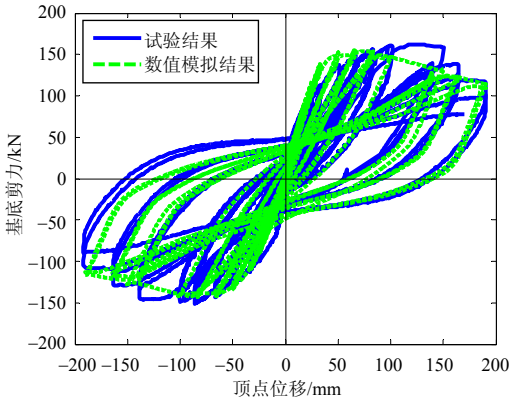


图 9 整体结构的数值模拟结果

Fig.9 Load-displacement hysteretic curve of frame

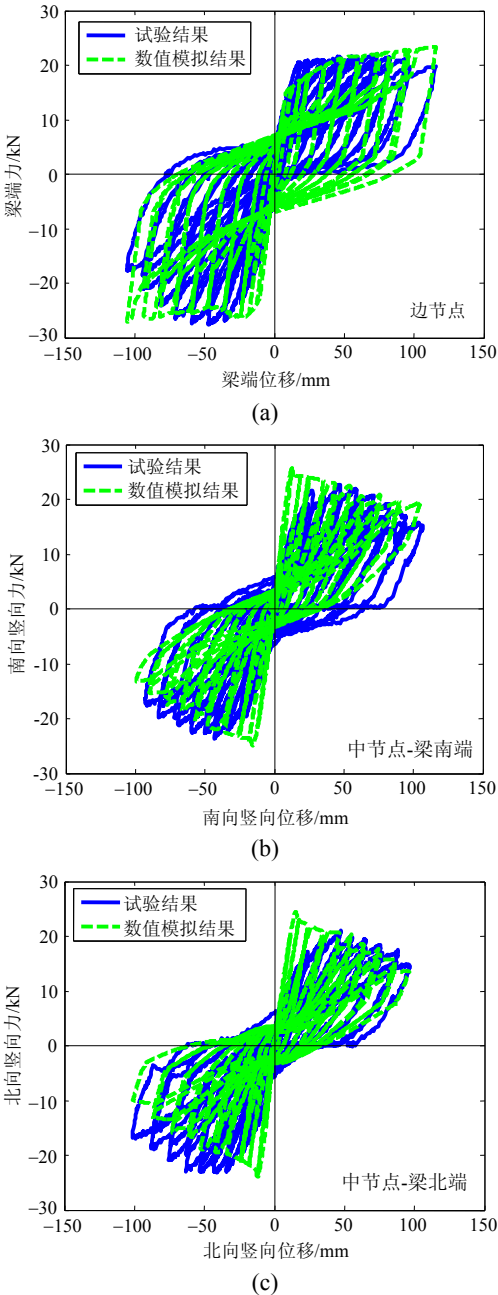


图 10 框架节点的节点数值模拟结果

Fig.10 Load-displacement hysteretic curves of joints

3 结论

本文采用截面纤维模型以及梁柱宏观节点模型, 基于 OpenSees 地震工程模拟平台编制有限元分析程序, 对钢筋混凝土框架柱、节点以及整体结构拟静力倒塌实验进行了数值模拟, 得出以下主要结论:

(1) 修正斜压场理论可用于钢筋混凝土梁柱节点域剪切块恢复力模型骨架曲线的计算。

(2) 基于有限单元刚度法的纤维截面模型以及宏观节点模型能很好地模拟钢筋混凝土结构在往复荷载作用下受力性能, 本文的数值模拟方法具备了很高的准确性和客观性, 为以后的结构倒塌实验分析打好了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] 陆新征. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌实验[R]. 北京, 2011: 1—6.
Lu Xinzhen. RC frame quasi-static collapse tests [R]. Beijing, 2011: 1—6. (in Chinese)
- [2] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L, et al. Open system for earthquake engineering simulation: Command language manual [M]. Berkeley, USA: University of California, 2010: 98—113.
- [3] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal Proceedings, 1982, 79(1): 13—27.
- [4] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. ACI Structural Journal, 1986, 83(2): 219—231.
- [5] Otani S. Inelastic analysis of reinforced-concrete frame structures [J]. Journal of Structural Division of American Society of Civil Engineers, 1974, 100(7): 1433—1449.
- [6] Anderson J C, Townsend W H. Models for reinforced frames with degrading stiffness [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1977, 103(12): 1433—1449.
- [7] Filippou F C, Issa A. Nonlinear analysis reinforced concrete frames under cyclic load reversals [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1988.
- [8] EI-Metwally S E, Chen W F. Moment-rotation modeling of reinforced concrete beam-column connections [J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(4): 384—394.
- [9] Alth S, Kunnath S K. Modeling inelastic shear deformation in RC beam-column joints in engineering mechanics [C]. Proceedings of 10th Conference. Boulder: ACSE, 1995: 822—825.
- [10] Altoontash A. Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints [D]. Stanford: Stanford University, 2004.