

# 结构模态 Pushover 及高振型影响的对比评估

王七林<sup>1</sup>, 闻奇光<sup>2</sup>

(1. 重庆大学建筑设计研究院, 重庆 400045; 2. 中国汉嘉设计集团股份有限公司西南分公司, 成都 610041)

**摘要:**以 6 层、10 层和 16 层规则钢筋混凝土平面框架为例, 对框架输入 3 种不同加速度幅值的地震动, 并将各框架在七条地震波作用下的非线性动力反应统计结果作为对比基准点, 以层间侧移和梁、柱端部转角为考察对象, 研究了 4 种常规 Pushover 及 Modal Pushover 的分析结果的误差变化规律。研究表明, 随框架层数增加, Modal Pushover 的层间侧移误差基本不变, 常规 Pushover 的模拟误差明显增大, 表明 Modal Pushover 能更合理地模拟高振型的影响。随非线性程度加深, Modal Pushover、常规 Pushover 分析的层间侧移误差均相应增大。Modal Pushover 对上部楼层梁端转角和多数柱端转角的模拟误差明显比常规 Pushover 更小。

**关键词:**钢筋混凝土; 框架; 高振型; 模态 Pushover; 非线性分析

**中图分类号:** TU311.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2009)01-0060-06

## A Comparative Evaluation of Model Pushover and the Influence of Higher Modes

WANG Qi-lin<sup>1</sup>, WEN Qi-guang<sup>2</sup>

(1. Architectural Design and Research Institute of Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Hanjia Design Group Joint-Stock Company of China Southwest Branch Company, Chendu 610041, P. R. China)

**Abstract:** Three reinforced concrete plane frames with total heights of 6, 10, and 16 stories, respectively were taken as examples. Nonlinear dynamic responses of three frames under excitations of seven earthquake waves with varying earthquake intensities were selected as the datum mark of a comparison study. The changing rules of the responses analyzed by four kinds of ordinary Pushover Analysis and Modal Pushover Analysis were studied by reviewing the inter-story drift ratio and rotation at beam and column ends. Results show that the error of inter-story drift ratio analyzed by Modal Pushover Analysis essentially is invariable when the total frame height increases, while the error of ordinary Pushover Analysis is added corresponding to a larger fundamental period. This indicates that Modal Pushover Analysis can cover the influence of higher modes more reasonably. When nonlinear responses of frames were more severe, the inter-story drift ratio errors of Modal Pushover Analysis and ordinary Pushover Analysis also increase correspondingly. The errors of rotation at upper story beam ends and the majority of column ends analyzed by Modal Pushover Analysis are smaller than those of ordinary Pushover Analysis.

**Key words:** reinforced concrete; frame; higher modes; modal pushover; nonlinear analysis

静力弹塑性分析(Pushover)是一种评估结构抗震性能的简化实用方法, 已在我国逐渐推广并在一

收稿日期: 2008-10-10

基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC-2006BB7022)

作者简介: 王七林(1970-), 男, 重庆大学国家一级注册师, 主要从事混凝土结构设计与分析研究, (E-mail) wangsumt@126.com。

些实际工程中得到不同程度的应用。对 Pushover 分析结果影响最明显的两个因素是侧向力分布形式和目标位移,其中目标位移的确定并不随 Pushover 方法的不同而受到影响,因此,侧向力分布形式成为区分各种 Pushover 方法的主要依据。目前较为常用的主要包括均匀分布、倒三角分布、弹性反应谱多振型组合分布等固定水平荷载的侧向力分布模式,以及适应性的侧向力分布方式等,且研究表明不同侧向力分布会导致明显不同的分析结果<sup>[1-7]</sup>。上述各种常规 Pushover 分析方法最大的不足是缺乏完整的理论基础,为突破常规 Pushover 分析方法的局限性,Chopra<sup>[8]</sup>在结构动力学理论的基础上,将弹性模态的概念推广到 Pushover 分析中,采用振型分解、地震作用分解的思想在 Pushover 分析方法中考虑了高振型的影响,提出了具有较强理论依据的 Model Pushover 分析(即模态 Pushover,以下简称 MPA)方法。

为验证 MPA 的优势,本文以三个规则框架为例,将几种有代表性的常规 Pushover 与 MPA 的分

析结果进行比较,并以多波输入下的非线性动力反应统计结果为评价标准,研究了层数不同(反映高振型的影响)、地震动强度变化(非线性程度不同)对 MPA 及常规 Pushover 的影响规律。

## 1 框架基本信息及非线性分析方法

按我国规范 GB50010—2001 和 GB50011—2001 设计的设防烈度为七度(设计基本地震加速度 0.1 g, II 类场地,设计地震分组为第一组)的 6 层、10 层、16 层钢筋混凝土平面框架 KJ1、KJ2 和 KJ3(抗震等级 KJ1 为三级, KJ2 和 KJ3 均为二级,基本周期分别为 1.61 s、2.04 s 和 3.04 s)如图 1 所示(限于篇幅,未给出配筋)。三框架层高除底层为 4.5 m 外其它均为 3.3 m,柱距均为 6.0 m。各框架的柱截面尺寸见图 1,梁截面尺寸均为 300 mm×500 mm。梁、柱混凝土强度等级均为 C30,板厚为 100 mm,梁、柱纵筋为 HRB335,横向钢筋及板筋采用 HPB235。柱均按对称配筋,平面外纵筋由构造要求及最小配筋率控制。

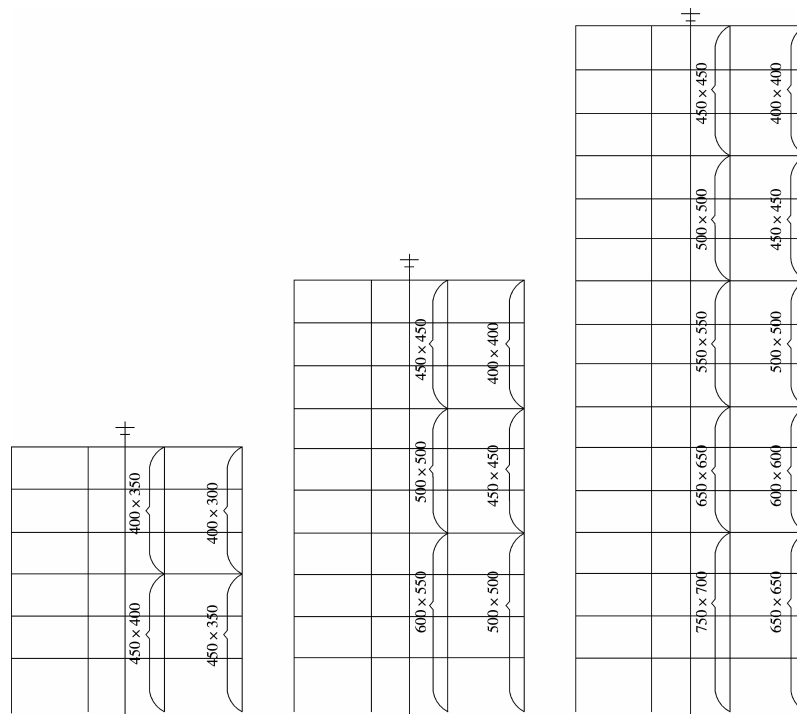


图 1 框架 KJ1、KJ2 和 KJ3 的计算简图

(注:图中标注的柱截面尺寸皆为柱高度×柱宽度,单位 mm)

按《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)和王亚勇等的成果<sup>[9]</sup>建议的方法对三框架各选出了 7 条(共 21 条)地震波,其加速度反应谱见图 2。各地震波除按 7 度罕遇水准的峰值加速度 0.22 g 进行调幅外,还按照最大非线性程度对应的峰值加速度(以

形成层侧移机构或非线性数值分析发散为依据, KJ1、KJ2 和 KJ3 分别取 0.48 g、0.55 g 和 0.47 g)以及非线性程度较低的 0.1 g 进行调幅。图 2 中所示均为按照 0.22 g 的峰值加速度进行调幅之后所得的加速度反应谱曲线。

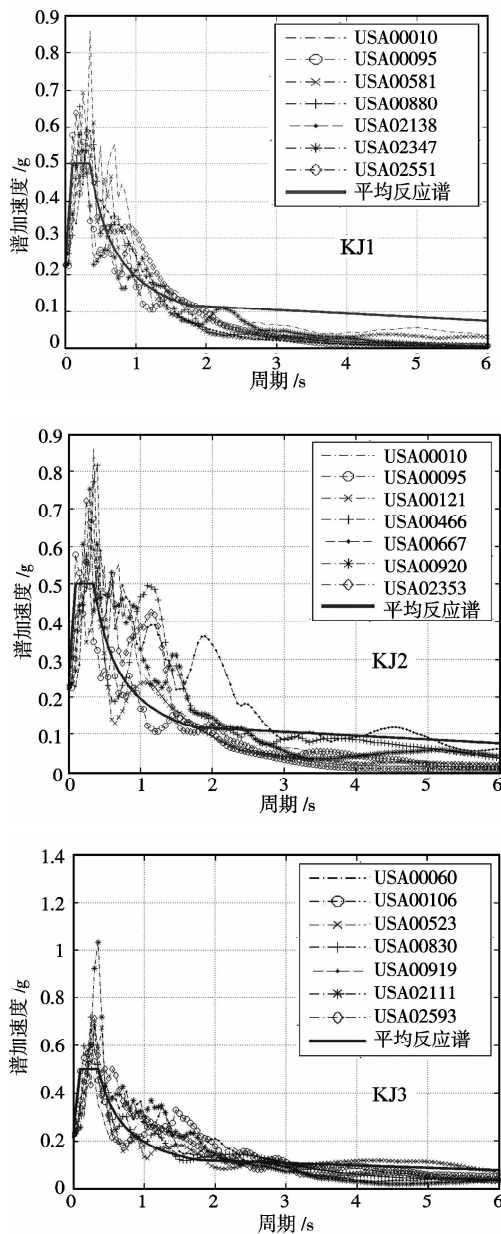


图 2 框架 KJ1、KJ2 和 KJ3 所采用的实际地面加速度记录的反应谱

该文所有非线性分析均在 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 平台上完成<sup>[10]</sup>。分析时,材料对象采用了基于 Kent-Scott-Park<sup>[11]</sup> 的单轴混凝土模型 (Concrete02 Material) 和基于 Menegotto-Pinto 的钢筋模型 (Steel02 Material),截面对象采用纤维模型 (Fiber Section);单元对象采用基于柔度法的非线性梁柱单元<sup>[12-13]</sup> (Force Based Nonlinear Beam Column Element)。

## 2 各种 Pushover 分析的基本原理

该文进行常规 Pushover 分析时共采用了下面

四种有代表性的侧向力分布形式:

1) 模式 A: 该模式假定水平荷载与楼层的质量成正比, 故第  $j$  层的侧向力增量  $\Delta F_j$  为:

$$\Delta F_j = \frac{W_j}{\sum_{i=1}^n W_i} \Delta V_b \quad (1)$$

式中,  $W_j$  为框架第  $j$  楼层的重力荷载代表值,  $\Delta V_b$  为底部剪力增量,  $n$  为框架总层数。

2) 模式 B: 该模式为 FEMA273<sup>[14]</sup> 采用的侧向力分布形式, 沿框架高度呈倒三角分布, 即:

$$\Delta F_j = \frac{W_j h_j}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \Delta V_b \quad (2)$$

式中,  $W_j$ 、 $\Delta F_j$ 、 $\Delta V_b$ 、 $n$  等同式 1,  $h_j$  为第  $j$  楼层距地面的高度。

3) 模式 C: 该模式为考虑高度影响的等效分布, 通过引入高度影响因子  $k$  以考虑加速度沿框架高度的变化, 第  $j$  层的侧向力增量  $\Delta F_j$  为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta F_j = \frac{W_j h_j^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \Delta V_b \quad (3)$$

式中  $k$  按下述方法取值 (与结构第一振型的弹性周期  $T_1$  相关):

$$T_1 < 0.5 \text{ s 时, } k = 1.0$$

$$0.5 \text{ s} \leq T_1 \leq 2.5 \text{ s 时, } k = 1 + (T_1 - 0.5) / 2$$

$$T_1 > 2.5 \text{ s 时, } k = 2.0$$

算例框架 KJ1、KJ2 和 KJ3 的  $k$  值分别为 1.52、1.78 和 2.0。

4) 模式 D: 该自适应模式可根据结构振型 (或侧移) 的变化调整侧向力分布, 定义如下<sup>[3]</sup>:

$$\Delta F_j = \frac{W_j \left[ \sum_{k=1}^n (\varphi_{jk} \Gamma_k)^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^n W_i \left[ \sum_{k=1}^n (\varphi_{ik} \Gamma_k)^2 \right]^{1/2}} V_b - F_j^{dd} \quad (4)$$

式中,  $\varphi_{jk}$  为第  $k$  阶振型在第  $j$  层的值,  $\Gamma_k$  为第  $k$  阶振型的振型参与系数,  $V_b$  为底部剪力,  $F_j^{dd}$  为结构第  $j$  层在上一步加载时的侧向力。

MPA 方法采用如下基本分析步骤<sup>[8]</sup>:

- 1) 计算框架的模态参数 (振型、自振周期), 按质量参与系数大于 95% 的条件选取足够振型数;
- 2) 计算框架在竖向荷载作用下的反应  $r_g$ ;
- 3) 对第  $n$  个振型, 按  $s_n^* = m\varphi_n$  的侧向力模式对框架进行推覆, 得到顶点为目标位移时的反应  $r_{n+g}$ ;
- 4) 按照第一步所选定的参与组合的振型数目重复第三个步骤;
- 5) 通过 SRSS 法 (本文均为规则框架) 组合各个

振型的反应。

需说明的是,各常规 Pushover 分析时,其目标位移直接取所选定的各地震峰值加速度水准下算例框架顶点水平侧移的动力分析平均值(皆为 7 条波的平均);MPA 分析则按如下步骤确定各振型推覆的目标位移:

1)对所选输入地震波,计算所选地震水准下框架各楼层的水平侧移向量时程。

2)对每一地震波,按下式求得第  $n$  振型的 MPA 目标位移<sup>[15]</sup>。

$$u_{jn} = \max(u_{jn}(t)) \tag{5}$$

$$u_{jn}(t) = \varphi_n^T m u(t) \varphi_{jn} / \varphi_n^T m \varphi_n \tag{6}$$

式中,  $u_{jn}$  为第  $n$  振型的第  $j$  层目标位移,  $u_{jn}(t)$  为第  $j$  层  $t$  时刻水平位移在第  $n$  振型上的分量,  $\varphi_{jn}$  为第  $n$  振型在第  $j$  层的分量,  $m$  为质量矩阵,  $u(t)$  为  $t$  时刻的框架水平位移向量。

3)将各地震波下的顶点位移在各个振型上的分量求均值,该均值定义为框架在该振型推覆下的目标位移。

### 3 框架层数对分析结果的影响

以下各图中,“NLRHA”为 7 条地震波作用下框架非线性反应的平均值;“模式 A、B、C、D”和“MPA”分别代表前述各常规 Pushover 分析和模态 Pushover 的分析结果,三框架在 MPA 分析中分别考虑了前二(KJ1)、前三(KJ1)、前四(KJ2)阶振型的贡献进行组合,其原因在于计算表明,更高阶的振型参与组合并不能明显减小误差(限于篇幅,未列出具体过程)。

图 3—图 5 是在 0.22 g 加速度幅值下 KJ1、KJ2 和 KJ3 的各种 Pushover 的层间侧移与非线性时程反应的统计平均值的相对误差对比,图中横坐标“Error”按  $\text{Error} = (r_p - r_{\text{NLRHA}}) / r_{\text{NLRHA}}$  (式中  $r_p$  为各种 Pushover 分析的分析结果,  $r_{\text{NLRHA}}$  为非线性动力反应的层间侧移)进行计算。

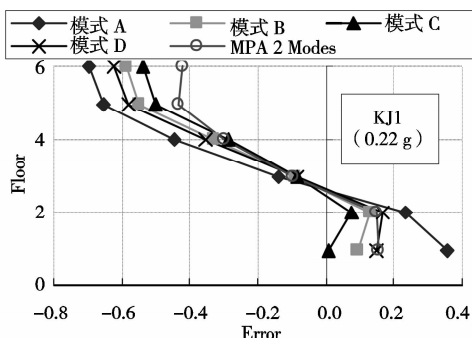


图 3 峰值加速度 0.22 g 下 KJ1 层间侧移误差

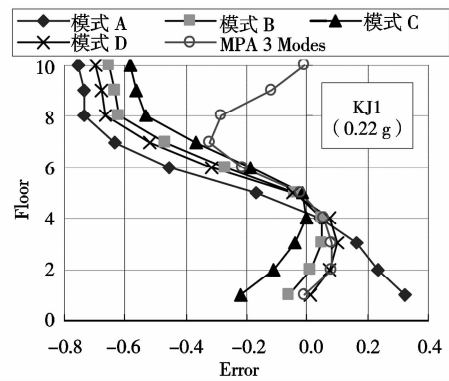


图 4 峰值加速度 0.22 g 下 KJ2 层间侧移误差

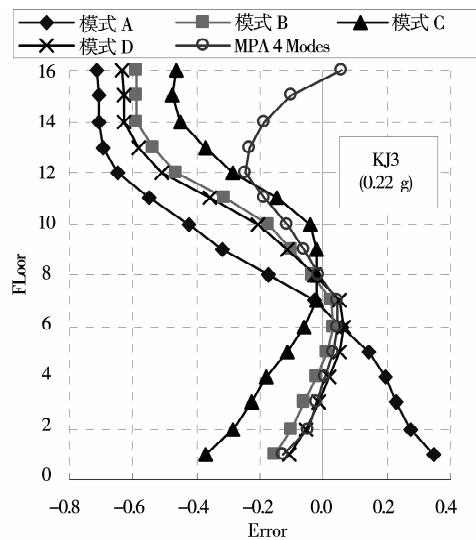


图 5 峰值加速度 0.22 g 下 KJ3 层间侧移误差

三框架的对比表明,不论框架层数多少,MPA 的误差一般皆比其它常规 Pushover 相对更小(主要是上部楼层较为明显,下部楼层区别不大)。此外,MPA 在 KJ1 中与其它常规 Pushover 的差异即使在上部楼层差异也不非常明显(下部楼层甚至误差稍大),随着层数增加,KJ2 和 KJ3 的 MPA 结果误差明显减小。特别是 KJ3,无论上部、下部楼层 MPA 的误差均偏很小,而其它常规 Pushover 总是无法在各个楼层皆实现较好的误差控制(模式 C 在上部楼层误差较小,但下部楼层则是模式 B 和模式 D 效果更好)。

需注意的是,虽然从理论上讲自适应模式 D 较为合理,但模式 C 的误差经常更小,而模式 A 无论在上部、下部楼层误差总是最大。

图 6—图 8 给出了 0.22 g 加速度幅值下三框架的梁、柱端部转角的分析结果对比,为提高清晰度,这里不再给出模式 A、模式 B 的结果。

对比分析表明,在三框架的下部楼层 MPA 的梁端转角偏大(KJ1 的梁单元编号为 1~18,KJ2 的

梁编号为 1~30, KJ3 的梁编号为 1~48), 而模式 C、模式 D 的常规 Pushover 误差相对更小; 在三框架上部楼层, MPA 与动力分析结果相符较好, 其误差比模式 C、模式 D 小。

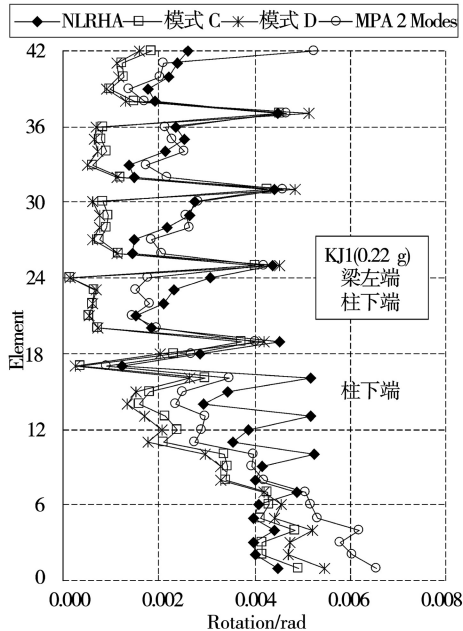


图 6 峰值加速度 0.22 g 下 KJ1 梁、柱端部转角对比

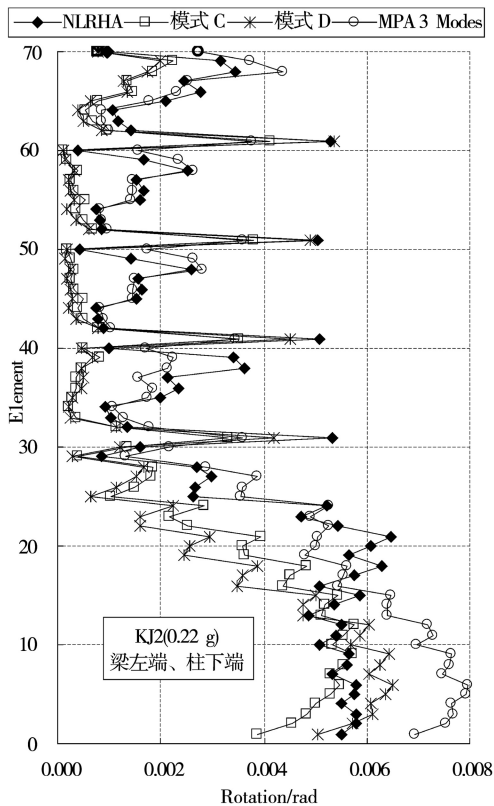


图 7 峰值加速度 0.22 g 下 KJ2 梁、柱端部转角对比

对三框架的柱端转角而言, MPA 与动力分析结果相符明显比模式 C、模式 D 更好。但在底层柱下端 (KJ1 四柱脚编号分别为 19、25、31、37; KJ2 四柱脚编号分别为 31、41、51、61; KJ3 四柱脚编号分别为 49、

65、81、97), 模式 C、模式 D 计算的柱底转角与 MPA、动力分析结果均差异不大 (MPA 有时误差稍大)。

#### 4 非线性程度对分析结果的影响

限于篇幅, 该文仅以 KJ2 为例对非线性程度的影响方式进行分析, 应予说明, KJ1、KJ3 未列出的规律与下文给出的 KJ2 基本一致。

结合图 9、图 10 和图 4 的分析结果可发现, 随着输入地震波加速度幅值加大 (即框架非线性程度加深), MPA、常规 Pushover 分析的框架层间侧移相对于动力分析结果的误差也相应增大。另外, 非线性程度较小 (0.1 g)、非线性程度较大 (0.22 g 和 0.55 g) 时, MPA 与常规 Pushover 的相对差别无明显变化。

图 11、图 12 和图 7 的对比分析表明, 非线性程度较小 (0.1 g) 时, 模式 C、模式 D 模拟的柱端转角误差有所降低, 非线性程度较大之后 (0.22 g 和 0.55 g), MPA 对 4~6 层的梁端转角和几乎所有柱端转角的模拟效果皆明显比常规 Pushover 分析结果的误差更小 (四个底层柱下端 MPA 优势不明显)。此外, 随着非线性程度加深, MPA 对 1~3 层的梁端转角的模拟误差有减小的趋势。

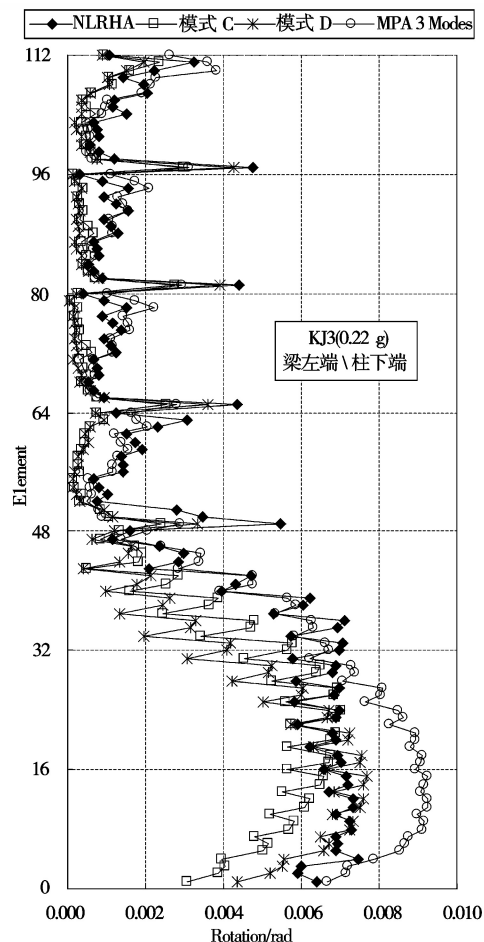


图 8 峰值加速度 0.22 g 下 KJ3 梁、柱端部转角对比

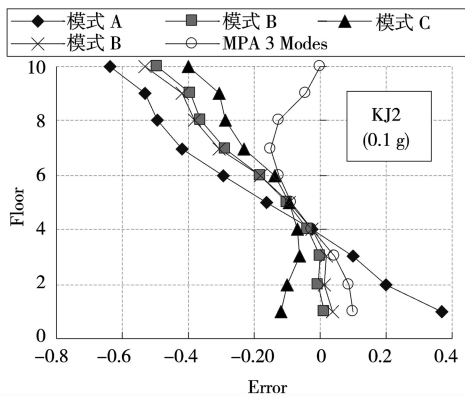


图 9 峰值加速度 0.1 g 下 KJ2 各层间移误差

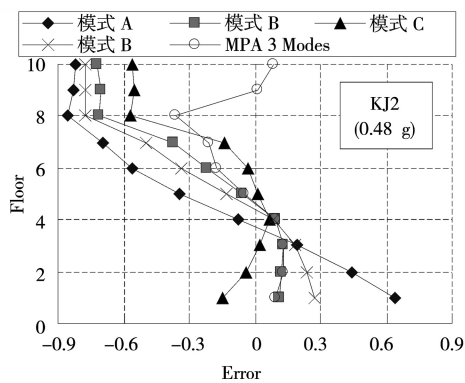


图 10 峰值加速度 0.48 g 下 KJ2 各层间移误差

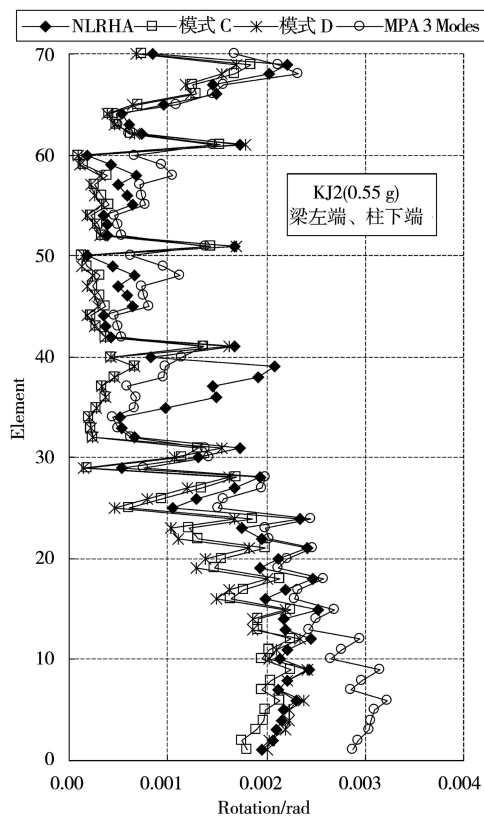


图 11 峰值加速度 0.1 g 下 KJ2 梁、柱端部转角对比

### 5 结 论

通过以上非线性地震反应对比分析可得如下初步结论:

1)常规 Pushover 分析的层间侧移与动力分析结果相比有不同程度的低估误差,且随着框架楼层总数的增加,误差明显增大。

2)MPA 模拟的层间侧移误差随着楼层增多并未增大,表明模态 Pushover 方法能更合理地模拟高振型参与非线性反应的影响。

3)随非线性程度加深,MPA、常规 Pushover 分析的层间侧移的误差也相应增大;MPA 对下部楼层梁端转角的模拟误差有减小的趋势,对上部楼层梁端转角和除底层柱下端之外的几乎所有柱端转角的模拟误差则明显比常规 Pushover 更小。

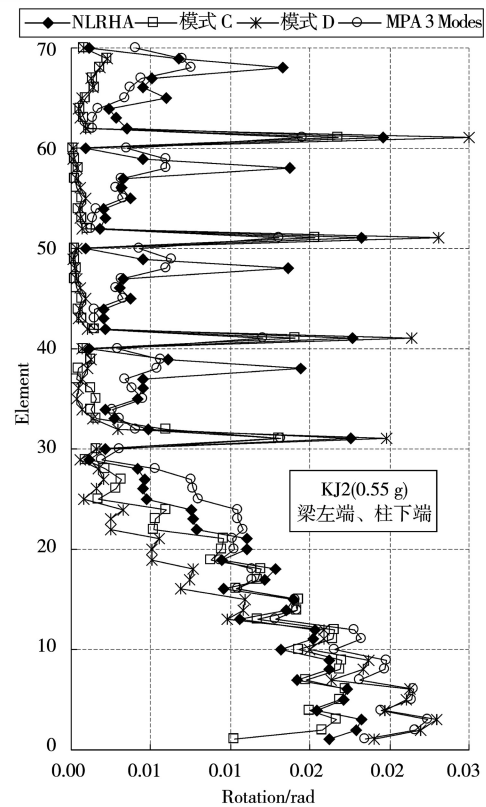


图 12 峰值加速度 0.55 g 下 KJ2 梁、柱端部转角对比

#### 参考文献:

[ 1 ] KRAWINKLAR H, SENEVIRATNA G D P K. Pros and Cons of a Pushover analysis of seismic performance evaluation[J]. Engineering Structures, 1998, 20:452-464.

[ 2 ] 熊向阳,戚震华. 侧向荷载分布方式对静力弹塑性分析结果的影响[J]. 建筑科学, 2001, 17(5):8-13.

(下转第 71 页)

- report, Structural Engineering and Structural Mechanics, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 1986.
- [ 8 ] 蒋永生,陈忠范,周绪平,等. 整浇梁板的框架节点抗震研究[J]. 建筑结构学报,1994, 15(6): 11-16.  
JIANG YONG-SHENG, CHEN ZHONG-FAN, ZHOU XU-PING, et al. Aseismic research on RC frame joint of monolithically casted slab [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(6): 11-16.
- [ 9 ] 刘光明,杨红,邹胜斌,等. 基于新规范的钢筋混凝土框架抗震性能评价[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(1): 40-49.  
LIU GUANG-MING, YANG HONG, ZOU SHENG-BIN, et al. Seismic assessment of RC frame structure based on new design codes [J]. Journal of Chongqing
- Jianzhu University, 2004, 26(1): 40-49.
- [10] 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.
- [11] 徐飞略. 竖向荷载作用下现浇钢筋混凝土框架结构弹塑性分析与试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2007.
- [12] ABAQUS, Inc. ABAQUS user manual, version 6. 7 [M]. 2007.
- [13] 石亦平,周玉容. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [14] 庄茁,张帆,由小川,等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [15] 中华人民共和国行业标准. GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

(编辑 王秀玲)

(上接第 65 页)

- XIONG Xiang-yang, QI Zhen-hua. The influence of lateral load patterns on the results of static Pushover analysis [J]. Building Science, 2001, 17(5): 8-13.
- [ 3 ] 侯爽,欧进萍. 结构 Pushover 分析的侧向力分布及高阶振型影响[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(3):89-97.  
HOU SHUANG, OU JIN-PING. A study of load pattern selection of pushover analysis and influence of higher modes [ J ]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004. 24(3): 89-97.
- [ 4 ] KALKAN E, SASHI S K. Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures [J], Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1721-1731.
- [ 5 ] SUN JING-JIANG, Tetsuro O, ZHAO YAN-GANG, et al. Lateral load pattern in pushover analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(1): 99-107.
- [ 6 ] JAVADEN S I, TAGHINELHAD R. Evaluation of lateral load patten in pushover analysis [J]. WIT Transactions on the Built Environment, 2007, 93(6): 279-287.
- [ 7 ] CARDONE D. Nonlinear static methods vs. experimental shaking table test results [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(6):847-875.
- [ 8 ] CHOPRA A K, GOEL K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31:561-582.
- [ 9 ] 王亚勇,刘小弟,程民宪. 建筑结构时程分析法输入地震波的研究[J]. 建筑结构学报, 1991, 12(2):51-60.
- WANG YA-YONG, LIU XIAO-DI, CHENG MIN-XIAN. Study on the input earthquake ground motion for time history analysis of structures [J]. Journal of Building Structures, 1991, 12(2):51-60.
- [10] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H and FENVES G L. OpenSees Users Manual [R]. PEER, University of California at Berkeley, 2006.
- [11] 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 Structural Journal, 1982, 79(1): 13-27.
- [12] SPACONE E, FILIPPOU F C and TAUCER F. Fiber Beam-column Model for Non-linear Analysis of R/C Frames, part 1 Formulation [ J ]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25 (7): 711-725.
- [13] SCOTT M H, FRANCHIN P, FENVES G L, et al. Response sensitivity for nonlinear beam-column elements [J], Journal of Structural Engineering, 2004, 130(9): 1281-1288.
- [14] FEMA273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of building [R]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 1996.
- [15] CHOPRA A K, GOEL R K, CHINTANAPAKDEE C. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(3): 757-778

(编辑 胡玲)