

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0197-05

基于自适应 POA 和 IDA 的 RC 框架填充墙 结构超强系数分析

李雁军¹, 吕大刚², 王震宇²

(1. 济南大学土木建筑学院, 济南 250022; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 结构整体超强系数是结构整体抗震性能系数的重要组成部分。针对不同结构高度严格按照现行设计规范设计了 6 个高烈度区具有代表性的结构模型, 并采用 OpenSees 分析平台建立有限元模型, 同时通过与已有试验结果的对比验证了建模方法的客观准确性。基于自适应 POA 和 IDA 得到了设计结构模型的整体超强系数及其变化规律, 通过对比分析得出: 填充墙对 RC 框架结构的整体超强系数影响显著, 但随着结构高度的增加, 填充墙对结构超强系数的影响逐渐减弱。按现行规范设计 VIII 度设防的结构模型中 RC 框架结构的超强系数最小值为 1.2, 考虑填充墙作用的 RC 框架填充墙结构的超强系数最小值为 2.1。分析方法的选择对超强系数分析有重要影响, 静力分析方法低估了结构的超强系数。

关键词: RC 框架; 填充墙; 自适应 PushOver; 增量动力分析; 超强系数

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.S038

THE OVERSTRENGTH FACTOR OF RC FRAMES WITH INFILLED WALLS BASED ON ADAPTIVE POA AND IDA

LI Yan-jun¹, LÜ Da-gang², WANG Zhen-yu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Ji'nan 250022, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The structural global overstrength factor is a global seismic performance factor. Six typical RC structures in high intensity regions are designed according to the current Chinese Codes, and finite element models are built based on OpenSees software. The objectivity and accuracy of modeling methods are verified by existing experimental results. The values and rules of overstrength factor are obtained by adaptive pushover analysis (POA) and incremental dynamic analysis (IDA). The analytical results show that infilled walls have a significant effect on the overstrength factor of RC frames. The effect of infilled walls on overstrength factors decreases gradually with the increase of structural height. The minimum overstrength factor of RC frames designed according to the current Chinese Codes is 1.2 when the seismic precautionary intensity is VIII. But considering the influence of infilled walls, the minimum overstrength factor becomes 2.1. Analysis methods have important effect on the overstrength factor. Comparing with dynamic analysis, static analysis underestimates overstrength factors.

Key words: RC frame; infilled walls; adaptive PushOver; incremental dynamic analysis; overstrength factor

收稿日期: 2016-03-26; 修改日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278150, 51178150); 济南大学科研启动基金项目(XBS1450)

通讯作者: 李雁军(1981—), 男, 山东人, 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, 主要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).

美国 ATC-63 项目最新的研究报告 FEMA-P695 中, 结构整体抗震性能系数是对反应修正系数、整体超强系数和位移放大系数的总称。结构的超强系数定义为结构的实际强度与设计强度的比值, 反映了结构储备强度的大小。FEMA-450 条文说明中将结构整体超强的原因归结为设计超强、材料超强和结构体系超强三个方面。各国规范规定的结构超强系数最低限值主要是依靠工程经验确定的, 自从伯克利的研究者和 ATC-19 报告从理论上将反应修正系数分解为整体超强系数、延性折减系数和阻尼折减系数乘积之后, 国内外很多学者开始采用数值模拟方法对各类结构体系的超强系数展开研究^[1-8]。

本文严格按我国抗震规范设计了六个典型钢筋混凝土框架结构, 然后利用 OpenSees 有限元分析平台, 采用自适应 PushOver 分析(APOA)和增量动力分析(IDA)考察了填充墙对 RC 框架结构超强系数的影响, 以及分析方法对超强系数计算结果的影响, 得到了一些有意义的结论。

1 结构模型设计与有限元建模

1.1 结构模型设计

建筑物高度对结构整体抗震性能有重要影响, 本文严格按照现行规范设计了高烈度区具有代表性的 RC 框架结构和 RC 框架填充墙结构, 结构模型平面布置相同, 层数分别为 3 层、5 层、10 层, 其中 RC 框架填充墙结构中填充墙单向满布布置。结构模型的设计基本资料: 设计使用年限: 50 年; 建筑抗震设防类别: 丙类; 建筑场地类别: II 类; 设防烈度(设计基本地震加速度): VIII 度(0.20 g); 设计地震分组: 第一组; 场地特征周期为: 0.35 s; 基本风压: 0.4 kN/m²; 地面粗糙度为 C 类; 基本雪压: 0.30 kN/m²; 楼面活荷载标准值: 2.0 kN/m²。建筑结构的阻尼比: 0.05; 混凝土强度: C40; 梁、柱主筋: HRB400; 箍筋: HPB235。各结构模型首层层高均为 3.9 m, 标准层层高均为 3.3 m, 楼板厚度为 120 mm, 填充墙采用普通粘土砖, 边跨外墙厚度为 240 mm, 中间隔墙厚度为 120 mm。5 层 RC 框架填充墙结构模型示意图如图 1 所示。

1.2 结构模型有限元模型

结构模型有限元建模采用 PEER 研发的开源地震工程模拟平台 OpenSees。混凝土材料本构采用经 Scott 修正的 Kent-Park 模型, 参照 Mander 理论考虑箍筋对混凝土的约束作用; 钢筋材料本构采用可

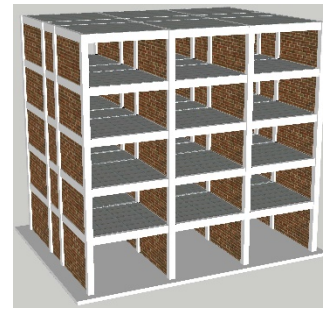


图1 RC 框架填充墙结构模型

Fig.1 RC space frame with infilled masonry walls

考虑等向应变硬化和 Bauschinger 效应改进的 Menegotto-Pinto 模型。梁柱采用基于平截面假定的纤维截面模型模拟, 建立基于柔度法的非线性梁柱单元模型。填充墙采用可考虑平面内和平面外的相互作用等效斜撑模型模拟, 该模型由两个相同的基于柔度法的集中塑性铰梁柱单元和一个考虑平面外质量的质量单元组成^[9]。

利用已有的试验数据分别对静力和动力作用下结构模型的建模方法进行了验证。通过对苏州科技学院进行的两层单跨 RC 框架填充墙模型拟静力试验^[10]进行有限元分析, 通过与试验结果对比表明: 分析得到的水平力与水平位移的骨架曲线与试验的骨架曲线拟合较好, 验证了静力作用下结构模型的有限元建模方法的客观性与可靠性(图 2 给出了数值模拟结果与试验结果的对比)。

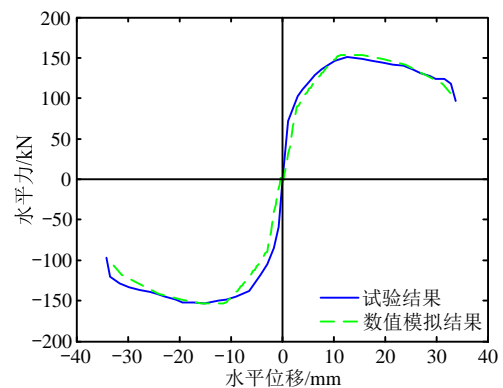


图2 RC 框架填充墙基底力-顶层位移关系曲线

Fig.2 Base shear-top displacement curve of RC frame with infilled walls

通过对文献[11]进行的 RC 框架和 RC 框架填充墙结构模型振动台试验的数值模拟分析, 分析得到的结构模型的位移响应以及加速度响应均与试验结果拟合较好, 验证了动力作用下结构模型建模方法的准确性(图 3 给出了缩放到 VIII 度罕遇地震强度的 El Centro 地震动作用下 4 层 RC 框架填充墙结

构模型的位移以及加速度响应的试验结果与有限元分析结果的对比)。

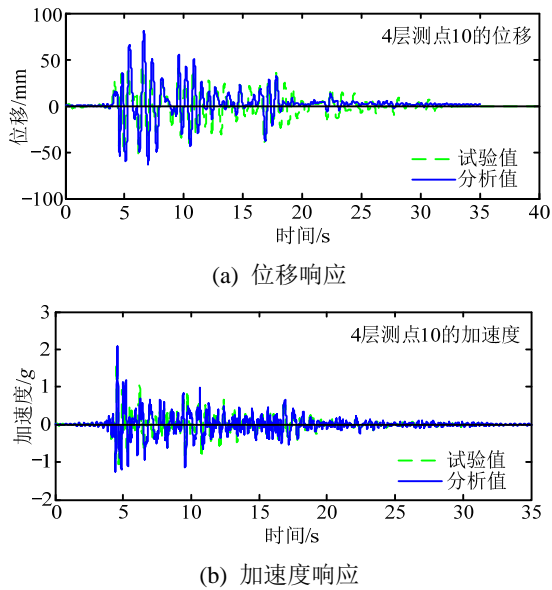


图3 El Centro地震动作用下4层RC框架填充墙位移以及加速度响应

Fig.3 Displacement and acceleration time histories of 4-story RC frame with infilled masonry walls under El Centro excitation

采用已验证的有限元建模方法,建立设计结构模型的有限元模型,5层RC框架填充墙结构的有限元模型示意图如图4所示。

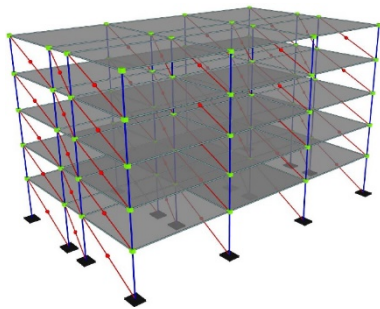


图4 5层RC框架填充墙结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of a 5-story RC frame with infilled masonry walls

2 自适应 POA 和 IDA 的基本原理

PushOver 分析(POA)能够得到结构构件的屈服和失效顺序和结构整体的能力曲线,确定结构发生强非线性的关键部位,给出构件强度退化对整体结构的影响。目前已被建筑抗震设计规范(GB50011-2010)推荐作为结构弹塑性变形分析方法。但传统的 POA 以一种固定的荷载分布模式代表结构在地震作用下的惯性力分布,分析结果依赖于初始荷载分布模式的选择,不能考虑单调递增的加载过程中刚

度的连续退化、模态的改变以及周期的增长。自适应 POA 不同于传统的 POA,能够考虑高阶模态的影响,以及刚度连续退化引起的结构动力特性的改变^[12]。

与传统的 POA 一样,在分析之初需要定义一个初始荷载 P_0 ,需要注意的是,初始水平荷载 P_0 并没有严格的定量意义,它只是确定了荷载的竖向分布形式,给出了荷载的相对大小。理论上可以采用任何形状的荷载分布(如倒三角、均匀、抛物线等),但为了减少初始荷载分布形式对由结构的动力特性确定的荷载分布的影响,建议 P_0 采用均匀分布模式。每一步分析可采用荷载控制或响应控制,所谓荷载控制,就是每一步分析的荷载直接由荷载增量系数 $\Delta\lambda$ 与初始水平荷载 P_0 确定,然后求解得到结构的每一步下的响应;所谓响应控制,就是首先由响应增量确定每一步的响应量,然后求解得到对应于该响应量的荷载增量系数 $\Delta\lambda$,来确定每一步分析的荷载。具体分析步骤如下:

1) 定义质量矩阵 M 和初始水平荷载 P_0 , 并且选取参与模态组合的阶数 N ;

2) 计算结构当前状态(第 m 步)的模态 Φ , 确定结构各阶模态下荷载的分布 F_{ik} :

$$F_{ik} = \Gamma_k \phi_{ik} m_i \quad (1)$$

式中: F_{ik} 为第 k 阶模态下第 i 层的相对荷载; Γ_k 为第 k 阶模态的阵型参与系数; ϕ_{ik} 为第 k 阶模态下第 i 层的相对位移; m_i 为第 i 层的质量;

3) 采用 SRSS 或 CQC 组合规则得到前 N 阶模态下各层的相对荷载,确定当前状态下(第 m 步)各层力增量的分布形式 $F^{(m)}$;

4) 计算下一步(第 $m+1$ 步)施加的荷载向量 $P^{(m+1)}$:

$$P_i^{(m+1)} = P_i^{(m)} + \Delta\lambda^m F_i^{(m)} P_{0i} \quad (2)$$

式中: $P_i^{(m+1)}$ 为第 $m+1$ 步第 i 层的荷载; $P_i^{(m)}$ 为第 m 步第 i 层的荷载; $\Delta\lambda^m$ 为第 m 步荷载增量系数; $F_i^{(m)}$ 为第 m 步第 i 层的荷载相对值; P_{0i} 为初始荷载中第 i 层的荷载;

5) 进行静力弹塑性分析;

6) 重复第2)步~第5)步,直至达到目标位移。

基于上述分析理论在 OpenSees 分析平台添加自适应 POA 模块,进行结构超强系数静力分析。

增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)是一种参数化的分析方法,通过该方法可以了解结构在不同地震强度下结构的性能,该方法将地

震动按所需比例划分成不同的强度等级, 计算在不同地震强度下结构的地震响应, 得到结构抗震性能的完备数据库。它可以完整地了解结构在同一地震动不同地震水平下结构的反应及地震需求, 更好地了解结构进入非线性后的性能。本质上, POA 是逐步增量的静力分析, 而 IDA 则是逐步增量的动力分析。

3 结构超强系数分析

3.1 基于自适应 POA 的结构超强系数分析

采用等能量原理对自适应 POA 得到的能力曲线进行等效线性化求取当量屈服强度、结构初始刚度以及结构的屈服位移。

- 1) 对结构进行自适应 POA, 得到结构的静力能力曲线;
- 2) 采用等能量原理将 $V_b-\Delta$ 能力曲线转化为双折线弹塑性模型, 得到结构的当量屈服强度 V_y ;
- 3) 利用底部剪力法或振型分解反应谱法计算结构模型的设计基底剪力 V_d ;
- 4) 由结构整体超强系数定义 ($R_s = V_y / V_d$) 计算得到结构的整体超强系数 R_s 。

3.2 基于 IDA 的结构超强系数分析

- 1) 对结构模型进行 IDA, 得到结构的动力能力曲线, 并采用等能量原理得到结构的当量屈服强度 V_y ;
- 2) 利用底部剪力法或振型分解反应谱法计算结构模型的设计基底剪力 V_d ;
- 3) 由结构整体超强系数的定义 $R_s = V_y / V_d$ 计算得到结构的整体超强系数 R_s 。

4 RC 框架填充墙结构的超强系数分析

基于自适应 POA 得到的 RC 框架填充墙结构和 RC 框架结构的整体超强系数如图 5 所示。从图中可以看出, RC 框架填充墙结构和 RC 框架结构的整体超强系数随着结构高度的增加均呈递增的趋势; 不同高度 RC 框架结构的整体超强系数变幅为 35%, 而对于 RC 框架填充墙结构则为 20%; 并且对于同一高度的结构模型而言, RC 框架填充墙结构的整体超强系数要大于 RC 框架结构的, 且随着结构高度的增加, RC 框架填充墙结构整体超强系数的增幅有下降的趋势(由 3 层结构的 83.6% 递减到 10 层结构的 63.8%), 这说明随着结构高度的增加,

填充墙对 RC 框架结构整体超强系数的影响逐渐减弱。

基于 IDA 求得的 RC 框架填充墙结构和 RC 框架结构的整体超强系数如图 6 所示。从图中可以看出, 基于动力分析方法得到的整体超强系数随着结构高度的增大没有明显的规律, 5 层结构的整体超强系数最小, 10 层结构的整体超强系数最大; 不同高度 RC 框架结构的整体超强系数变幅为 44%, 而对于 RC 框架填充墙结构则为 30%, 与静力方法相比, 动力方法分析结果的离散性略大; 与静力方法分析结果相似, 对于同一高度的结构模型而言, RC 框架填充墙结构的整体超强系数要大于 RC 框架结构的结果, 并且随着结构高度的增加, RC 框架填充墙结构整体超强系数的增幅有下降的趋势(由 3 层结构的 108.2% 递减到 10 层结构的 64.1%), 同样说明随着结构高度的增加, 砌体填充墙对 RC 框架结构整体超强系数的影响在减弱。

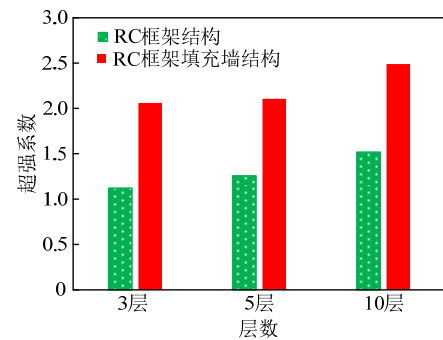


图 5 基于自适应 POA 的结构整体超强系数
Fig.5 Structural global overstrength factor obtained by adaptive POA

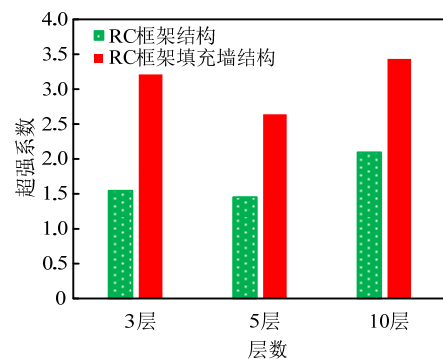


图 6 基于 IDA 的结构整体超强系数
Fig.6 Structural global overstrength factor obtained by IDA

通过对比静力分析和动力分析得到的结构超强系数, 可以看出无论是 RC 框架填充墙结构还是 RC 框架结构, 基于动力分析方法得到的结构整体超强系数均大于基于静力分析方法得到的结果, 并且对于同一高度的结构而言, RC 框架填充墙结构

基于动力分析方法得到的结构整体超强系数放大倍率更大一些,也就是说 RC 框架填充墙结构相对更敏感于分析方法的选择。

5 结论

本文分别采用自适应 POA 和 IDA 对 6 个不同高度结构模型的整体超强系数进行了分析研究,通过对比分析得出如下结论:

(1) 填充墙显著增大了 RC 框架结构的超强系数,设计结构模型中,RC 框架结构的超强系数最小值为 1.2,考虑填充墙作用的 RC 框架填充墙结构的超强系数最小值为 2.1;随着结构高度的增加,填充墙对结构超强系数的影响逐渐减弱。

(2) 分析方法的选择对超强系数分析有重要影响,与动力分析方法相比,静力分析方法低估了结构的超强系数,与 RC 框架结构相比,由于填充墙的作用,RC 框架填充墙结构更敏感于分析方法的选择。

参考文献:

- [1] Annan C D, Youssef M A, EL Naggat M H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, 13(1): 1—21.
- [2] Lee H J, Kuchma D A. Seismic overstrength of shear walls in parking structures with flexible diaphragms [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007, 11(1): 86—109.
- [3] 韦锋,李刚强,白绍良.各国设计规范对基准设防地震和结构超强的考虑[J].*重庆大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(6): 102—108.
Wei Feng, Li Gangqiang, Bai Shaoliang. Reference earthquake design level and consideration of structure overstrength in latest seismic design codes of different countries [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(6): 102—108. (in Chinese)
- [4] 翟长海,谢礼立.钢筋混凝土框架结构超强研究[J].*建筑结构学报*, 2007, 28(1): 101—106.
Zhai Changhai, Xie Lili. Study on overstrength of RC frame structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1): 101—106. (in Chinese)
- [5] 崔双双,吕大刚.钢筋混凝土框架结构整体超强系数需求分析[J].*地震工程与工程振动*, 2015, 35(6): 1—7.
Cui Shuangshuang, Lü Dagang. Demand analysis for structural overstrength factor of reinforced concrete frames [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamic*, 2015, 35(6): 1—7. (in Chinese)
- [6] Jain S K, Navin R. Seismic overstrength in reinforced concrete frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1995, 121(3): 580—585.
- [7] Mwafy A M, Elnashai A S. Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings [J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2002, 11(5): 329—351.
- [8] Balendra T, Huang X. Overstrength and ductility factors for steel frames designed according to BS 5950 [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2003, 129(8): 1019—1035.
- [9] Kadysiewski S, Mosalam K M. Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction [R]. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2009.
- [10] 周振铎.多层砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究和理论分析[D].苏州:苏州科技学院,2010.
Zhou Zhenyi. Experimental research and theory analysis on seismic behavior of multi-storey reinforced concrete frame structure with masonry filler wall [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] 李雁军.砌体填充墙 RC 空间框架振动台试验与抗震性能评定[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
Li Yanjun. Shaking table tests and seismic performance assessment of RC space frames with infilled masonry walls [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] Elnashai A S. Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2001, 12(1): 51—69.