

# 模型校验后高层建筑非线性抗震性能分析

周云<sup>1,2</sup>, 周祎<sup>1</sup>, 李紫玮<sup>1</sup>, 易伟建<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 作为非结构构件的填充墙, 在很大程度上影响着结构的整体抗震性能, 然而填充墙与结构构件之间的相互作用十分复杂, 地震作用下填充墙具有高度的非线性和很大的不确定性。设计阶段通常忽略填充墙的有利影响和不利影响, 以周期折减系数来考虑刚度变小引起的内力变化。本文在 Perform-3D 中建立高层建筑的非线性分析模型, 并利用高层建筑结构环境激励测试得到的结果对高层建筑结构的有限元模型进行修正, 然后在 Perform-3D 模型中添加斜撑单元, 得到考虑填充墙的非线性分析模型。对四栋高层建筑进行非线性动力时程分析, 探讨填充墙对高层建筑结构抗震性能的影响。

**关键词:** 高层建筑; 填充墙; 非线性分析; 抗震性能; 模型校验;

## 1 绪论

对高层建筑进行结构分析和设计时, 除结构构件之外, 非结构构件也会对结构在地震下的反应产生较大影响, 例如地震作用下结构的响应会受到填充墙的影响。然而设计者在设计结构时为了简化通常不考虑填充墙对结构抗震性能的影响, 因此填充墙带来的有利和不利影响在设计阶段均被忽略, 例如在我国抗震规范中以周期折减系数来考虑刚度变小引起的内力变化。然而许多高层建筑的现场环境振动试验结果表明<sup>[1-4]</sup>, 分析模型与实测结构基频往往并不相符, 这通常是对非结构构件的不恰当建模或忽略导致的。而在地震尤其是大震作用下, 结构往往会进入非线性阶段, 而填充墙也随着自身的破坏加剧, 刚度会逐渐降低。因此评估填充墙在非线性阶段对高层结构整体抗震性能的影响规律十分重要。基于我国“三水准两阶段”的抗震设计思想, 在大震作用下对结构进行弹塑性分析, 其中包括了弹塑性时程分析和静力非线性分析等。本文基于结构识别六步圆的概念, 对十栋高层建筑进行了环境振动激励试验, 建立高层建筑的有限元模型并利用识别参数对模型进行修正, 以探讨填充墙对高层建筑结构抗震性能的影响。采用动力时程分析进行大震作用下的弹塑性分析, 来评估填充墙在非线性阶段对高层结构整体抗震性能的影响规律。

## 2 来宾高层实验

本文的研究是基于广西来宾高层建筑随机振动测试项目, 该项目于 2013 年 1 月, 在湖南大学土木工程结构健康监测研究团队([www.hnutest.com](http://www.hnutest.com))的主导下展开。该随机振动测试项目从 200 多栋待选高层建筑中选择了十栋测试对象, 均为百米左右的钢筋混凝土高层建筑。通过随机振动信号测试及工作模态分析等相关技术, 对高层建筑的模态参数进行了识别。十栋高层均为刚完工尚未交房的住宅楼, 无家具等荷载, 因此暂无活荷载对结构质量的影响。每栋建筑均具有中央核心电梯筒, 结构形式各异, 同一个小区的两栋结构具有类似的结构形式, 基础为人工挖孔桩。本文从中选择了四栋高层进行非线性分析, 如下表 2.1 所示:

---

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51208190); 国家重点研发计划(2016YFC0701308, 2016YFC0701400)

作者简介: \*周云(1979-), 男, 湖南人, 副教授, 博士, 主要从事结构健康监测和结构动力识别方面研究(E-mail:[zhouyun05@hnu.edu.cn](mailto:zhouyun05@hnu.edu.cn))

表 2.1 四栋高层基本信息

序号	测试高层	高度 (m)	层数 (n)	结构形式	平面形式
1	北岸雅阁 2#(BAYG2#)	87.0	26	框架-剪力墙	近似矩形, 规则
2	金穗小区 3#(JSAQ3#)	122.7	39	剪力墙	风车型, 不规则
3	祥云苑 A 座(XYYA#)	86.1	24	剪力墙	风车型, 不规则
4	水户皇门 2#(SHHM2#)	107.4	33	剪力墙	工字型, 不规则

表 2.2 四栋高层前三阶模态识期 (三种方法对比分析) (单位: s)

阶数	1			2			3		
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3
SHHM2#	1.433	1.572	1.6	1.294	—	—	1.214	—	—
JSXQ3#	1.621	1.486	1.618	1.479	1.468	1.484	1.287	1.29	1.479
XYYA#	0.917	0.873	0.843	0.865	0.87	0.81	0.8	0.855	0.804
BAYG2#	1.245	1.245	1.227	1.122	1.125	1.122	0.958	1.005	0.983

采用不同的前处理以及后处理方法处理环境振动测试信号。为防止信号泄漏, 首先对脉冲响应函数添加指数窗进行预处理。随后采用三种模态参数识别方法: 随机子空间法<sup>[7]</sup> (Stochastic Subspace Identification, SSI)、随机减量法结合复模态指示函数法<sup>[8-9]</sup> (Complex Mode Indicator Function, CMIF) 和互相关函数法结合复模态指示函数法对模态参数进行识别。表 2.2 为四栋高层各方法的参数识别结果。

### 3 非线性模型的建立及模型修正

由于 PKPM 计算原理和建模过程的简化, 其计算结果与结构实际状态有所差异。本文需另选其他有限元分析软件进行非线性分析。本文选用 Perform-3D (Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structure) 作为分析软件, 建立结构的非线性模型。

本文借助同济大学吴晓涵副教授研发的 NosaCAD 程序, 在 PKPM 软件中进行结构建模和计算后, 将 PKPM 模型导入 NosaCAD 中, 再用 NosaCAD 将模型处理后导入 Perform-3D 中, 再在 Perform-3D 中对模型进一步处理。材料参数选用标准值, 线荷载和节点荷载采用 SATWE 导荷结果, 结构质量按照抗震分析所要求的质量模式转入 Perform-3D。为简化运算, 采用刚性楼板假定。NosaCAD 模型转化为 Perform-3D 模型时, 采用弯矩-曲率模型或纤维模型进行转换, NosaCAD 在模型转换过程中可自动生成 Perform-3D 中弯矩-曲率模型和纤维模型的大部分参数。根据 NosaCAD 转换的截面纤维模型自动满足 Perform-3D 的要求 (最大纤维数不超过 60)。根据 NosaCAD 中定义的楼层组设置刚性楼板, 将采用刚性楼板假定的楼层组各节点进行水平自由度限制, 确保各节点水平位移相同。

对四栋高层建筑在 Perform-3D 中建立两种弹塑性分析模型。通过 NosaCAD 从 PKPM (SATWE) 直接转换建立的 Perform-3D 模型命名为 Model1, 并未直接对填充墙进行建模, 填充墙对结构刚度的影响参考中国规范用周期折减系数考虑。在 Model1 的基础上添加斜撑, 直接对填充墙进行考虑模型命名为 Model2, 如表 3.1 所示。

表 3.1 Perform-3D 中的两种模型

模型名称	软件	填充墙考虑方式
Model5	Perform-3D	未对填充墙建模
Model6	Perform-3D	使用斜撑单元对填充墙进行建模

本例分析涉及到的材料本构模型主要有混凝土本构模型和钢筋本构模型。在 Perform-3D 中, 大部分非线性弹性组件都有相同的 F-D (广义力-广义变形) 关系线样式, 即“YULRX”五折骨架曲线, 混凝土材料受压本构曲线采用混凝土结构设计规范 (GB50010-2010) <sup>[10]</sup> 附录 C.2 中的公式计算并简化为五折线。

本文中, 梁柱均采用塑性区模型, 即由中间弹性段和两端弹塑性区段组成。梁单元以受弯为主, 其弹

塑性区段采用基于截面的恢复力模型，而柱的受力过程更为复杂，受到双向弯矩和轴力变化的影响，因此其弹性区段采用纤维模型。墙单元均采用能够应用于实际工程中不规则开洞墙肢的 General Wall 单元。连梁的模拟在普通梁的基础上增加了一个剪切铰来模拟。填充墙模拟采用单杆斜撑，如图 3.1 (a) 所示。每片填充墙均由一对等效斜撑来模拟，该斜撑仅考虑受压而忽略受拉，具有足够的精度来反应填充墙力-位移反应的主要特性，且相较于有限元模型减轻了计算负担，增加了计算速度。每根等效斜压杆均将被指定如图 3.1 所示的力-位移关系，包含了能反映填充墙非线性行为的必要特性参数，例如填充墙的初始刚度、峰值强度以及峰后强度。

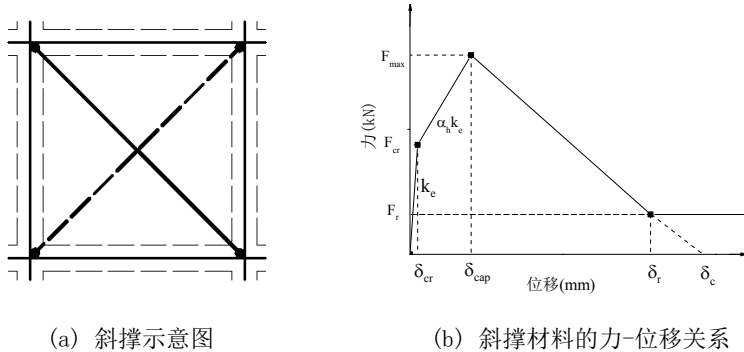


图 3.1 单杆等效斜撑

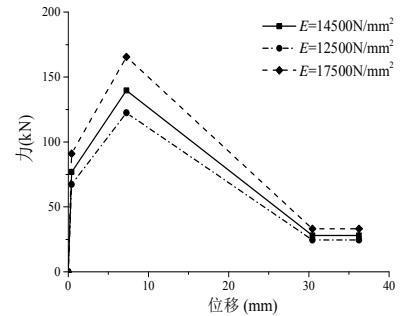


图 3.2 填充墙骨架曲线调整示例

对分析模型进行模态分析后，通过正问题试算的方法调整填充墙弹性模量，对计算模型进行修正。利用最小二乘法寻找到与前十二阶实测周期最为匹配的计算周期。图 3.2 中给出了不同弹性模量对应的填充墙骨架曲线，可以看到弹性模量取值 16~20% 的增减，会给填充墙骨架曲线的初始刚度带来 15~35% 的增减，并随后影响到整条骨架曲线。

## 4 非线性时程分析

按照现行中国建筑抗震设计规范 (GB50011-2010) [11] 筛选地震波。要求了与建筑结构地震破坏密切相关的地震动三要素：频谱特性、有效峰值和持续时间。根据此三要素，在 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://ngawest2.berkeley.edu>) 中进行选波，并参考杨溥等 [12] 基于中国抗震设计规范提出的双频段控制选波方法对地震动记录进行筛选，通过 PKPM 程序进行对处理后的地震记录进行批量计算，选出基底剪力满足规范要求的地震记录即可。针对每栋高层选择了三条满足条件的地震动记录。对四栋高层结构按弱轴方向输入筛选出合适的地震动记录，对结构做弹塑性动力时程分析，每栋高层的分析结果如下。

### 4.1 层间位移角

层间位移角是判断结构变形的重要指标，根据结构弹塑性动力时程分析结果，图 4.1 给出了四栋结构在各条地震波作用下的层间位移角分布。

四栋高层在多条地震动作用下，对比 Model1 (不考虑填充墙刚度模型) 和 Model2 (考虑填充墙刚度模型) 的层间位移角，显然填充墙对结构的刚度具有明显的贡献。高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3-2010) [12] 规定对框架-剪力墙结构，弹塑性层间位移角限值为 0.01rad，对剪力墙结构，弹塑性层间位移角限值为 1/120，约为 0.0083，从图中可以看到四栋高层的层间位移角均满足规范要求，框剪结构的最大层间位移角没有超过 0.005，而剪力墙结构的最大层间位移角没有超过 0.0025。

最后对比四栋高层建筑 Model1 和 Model2 最大层间位移角发生的位置，可以发现填充墙对整体刚度的贡献使得最大层间位移角所在的层数发生了上移，这是一个趋于安全的变化。

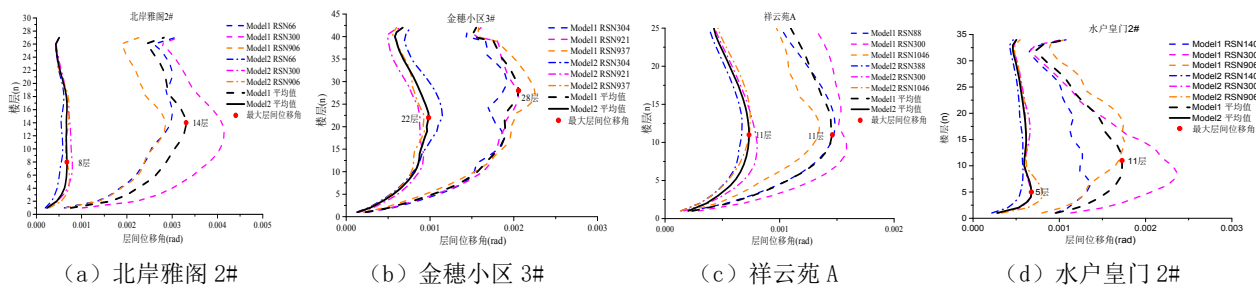


图 4.1 大震作用下层间位移角对比

## 4.2 层间剪力

对各结构进行动力弹塑性分析，得到各结构在多条地震波作用下层间剪力的平均值，包括了总层间剪力，以及竖向构件柱、剪力墙和填充墙承担剪力的具体分布。图 4.2 给出了四栋结构在各条地震波作用下的平均层间位移角以及各构件的承担情况。其中北岸雅阁 2#为框架剪力墙结构，因此 Model1 和 Model2 的层间剪力分布分为两张图列出，其余三栋剪力墙结构两种模型的层间剪力分布表示在同一图中。

对比四栋高层建筑 Model1 和 Model2 的总层间剪力，可发现由于填充墙增加了结构总刚度，相较于 Model1，Model2 的结构总层间剪力更大。框架-剪力墙结构北岸雅阁 2#的 Model1 中，结构的层间剪力主要由剪力墙承担，而在添加了填充墙斜撑的 Model2 中，填充墙承担了结构大部分剪力，同时填充墙分担了剪力墙和柱的大部分剪力，这意味着填充墙先于柱和剪力墙成为第一道防线。而其余三栋剪力墙结构中，填充墙同样使结构的总层间剪力变得更大，填充墙虽然承担了较大部分剪力，但相较于框剪结构北岸雅阁 2#填充墙分担的层间剪力少一些。一方面可能和填充墙的分布有关，另一方面可能由于结构形式不同，填充墙对剪力墙结构的影响相较于框架剪力墙结构更小。

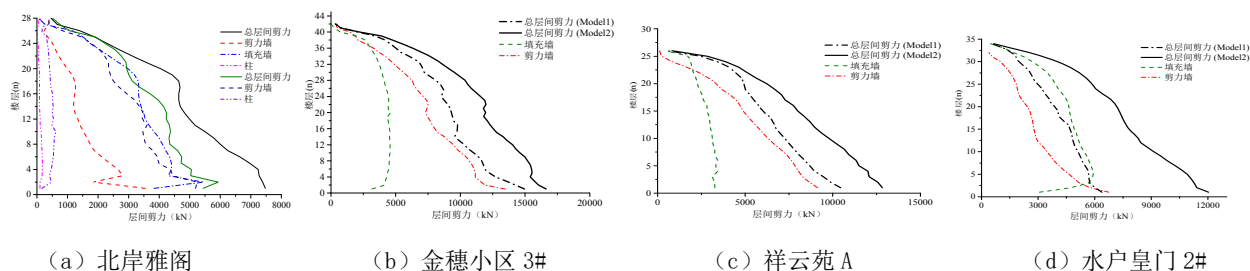


图 4.2 大震作用下的层间剪力对比

## 4.3 层间位移

对各结构进行动力弹塑性分析，得到各结构在多条地震波作用下各层水平位移的平均值。图 4.3 给出了四栋结构在各条地震波作用下的层间位移和平均层间位移。

对比四栋高层建筑 Model1 和 Model2 的平均层间位移，可发现由于填充墙增加了结构总刚度，相较于 Model1，Model2 的结构水平位移更小。在大震作用下，对于框架-剪力墙结构北岸雅阁 2#，填充墙对结构刚度的贡献明显大于其余三栋剪力墙结构，这一现象与上一节的现象类似，从另一个方面说明了填充墙对剪力墙结构的影响相较于框架剪力墙结构更小。

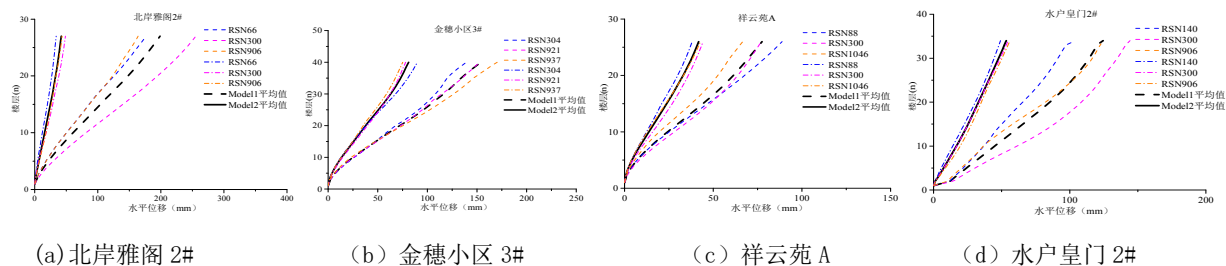


图 4.3 大震作用下层间水平位移对比

## 5 小结

本文从来宾高层建筑随机振动测试项目中选择了四栋高层建筑结构，对填充墙进行建模并利用实测的结构动力特性对有限元分析模型进行修正，最后使用修正后的分析模型进行非线性动力时程分析，讨论了填充墙在大震作用下对结构抗震性能的影响。结论如下：

(1) 对四栋高层进行环境振动测试得到的实测数据，通过不同的前处理和后处理路径，总共三种提取模态参数的方法对信号进行处理，可得到四栋高层在各方法处理下的参数识别结果。(2) 利用实测周期对填充墙初始模量进行调整，得到合适的弹性模量并进一步得到填充墙骨架曲线，在 Perform-3D 中添加考虑填充墙的斜撑单元。可得到结构考虑填充墙的非线性分析模型。

(3) 对四栋高层建筑结构考虑填充墙和不考虑填充墙两种模型进行动力时程分析，并列出了分析结果，包括层间位移角和层间剪力。参考规范对最大层间位移角的限值，结构的设计均符合规范要求，且填充墙对结构的刚度具有明显的贡献，使得层间位移角降低同时还使得最大层间位移角的位置发生了上移。同时发现填充墙对框架-剪力墙结构的影响程度比对剪力墙结构的影响程度要大。并且填充墙的存在还分担了柱和剪力墙承担的层间剪力，先于梁、柱和剪力墙等结构构件成为第一道防线。

## 参考文献

- [1] Li Q S, Wu J R, Liang S G, et al, Full-scale measurements and numerical evaluation of wind-induced vibration of a 63-story reinforced concrete tall building[J]. Engineering structures, 2004, 26(12): 1779-1794.
- [2] Li Q S, Wu J R, Correlation of dynamic characteristics of a super-tall building from full-scale measurements and numerical analysis with various finite element models[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2004, 33(14): 1311-1336.
- [3] 易伟建, 周云, 覃廖辉. 大底盘双塔楼高层建筑的随机振动测试及模型修正研究[J]. 土木工程学报, 2009, 02: 65-72.
- [4] 李秋胜, 郅伦海, 段永定等. 台北 101 大楼风致响应实测及分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 24-31.
- [5] Liu S C, Yao J T P, Structural identification concept[J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(12): 1845-1858.
- [6] Doebling S W, Farrar C R, The state of the art in structural identification of constructed facilities[J]. Los Alamos National Laboratory, 1999.
- [7] Peeters B, System identification and damage detection in civil engineering. Department of Civil Engineering[J]. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2000: 233.
- [8] Shih C Y, Tsuei Y G, Allemang R J, et al, Complex mode indication function and its applications to spatial domain parameter estimation[J]. Mechanical systems and signal processing, 1988, 2(4): 367-377.
- [9] Phillips A W, Allemang R J, Fladung W A, The Complex Mode Indicator Function (CMIF) as a parameter estimation method. In: Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering[J]. Spie International Society for Optical, 1998, 705-710.
- [10] 中华人民共和国国家标准, 混凝土结构设计规范 (GB50010-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010, 162-198.
- [11] 中华人民共和国国家标准, 建筑抗震设计规范 (GB50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010, 1-74.
- [12] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000, (06): 33-37.
- [13] 中华人民共和国国家标准, 高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010, 1-103.