

考虑填充墙刚度影响的实测高层建筑增量动力分析

周云^{1,2} 裴熠麟¹ 周祎¹ 易伟建^{1,2}

(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: 高层结构中的填充墙在地震作用下与周围结构构件之间的相互作用十分复杂, 对建筑结构的整体抗震性能具有较大影响。然而我国规范在结构设计阶段通常不考虑填充墙对抗震性能的影响, 统一采用周期折减系数考虑刚度减小引起的内力变化, 因此准确评估填充墙对结构抗震性能的影响具有重要意义。本文在对一栋框-剪结构和一栋剪力墙高层建筑进行随机振动测试的基础上, 利用 Perform-3D 对每栋高层分别建立了三种分析模型。其中对于未考虑填充墙作用的结构模型, 分别采取规范建议值和实测周期值两种方式进行周期折减。对于通过添加斜撑单元来考虑填充墙作用的结构模型, 利用环境激励测试识别获得的结构模态信息进行模型修正。对该三种模型进行了增量动力分析, 探讨潜在危险性水平地震作用下填充墙对高层建筑抗震性能的影响。结果表明, 填充墙增加了结构在弹性阶段的整体初始刚度, 但随着地震动强度的增加逐渐丧失对结构刚度的贡献作用。相比考虑了填充墙作用的模型计算结果, 规范建议的周期折减系数较为保守。研究发现, 填充墙对框架-剪力墙结构的影响程度要比剪力墙结构的影响程度要大。

关键词: 高层建筑; 模型校验; 填充墙; 抗震性能; 增量动力分析

中图分类号: TU398^{+.9}

文献标识码: A

文章编号:

Incremental dynamic analysis of on-site tested high-rise buildings for considering the influence of infilled wall stiffness

Zhou Yun^{1,2} Pei Yilin¹ Zhou Yi¹ Yi Weijian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A complicated interaction relationship is presented by the infilled wall with surrounding structural components of high-rise buildings under seismic action, thus leading a huge influence for structure seismic performance. While the influence of infilled wall is generally ignored during seismic design, and the period reduction coefficient is adopted for considering the structure performance influenced by the infilled stiffness degradation. Therefore, it is essential for accurately evaluating the influence of infilled wall to structure seismic performance. Based on the on-site random vibration test for a high-rise frame-shear wall structure and shear wall structure, three types of finite element models are built in Perform-3D respectively. For the analytical models without the consideration of infilled wall, the natural period reduction coefficient is employed as the suggested value in Chinese design code and the measured value of period tests respectively. For the analytical model with diagonal strut element for simulating the performance of infilled wall, the modal behavior is calibrated by the record obtained from the vibration test. And the incremental dynamic analysis is implemented for discussing the influence of infilled wall to structure performance under the potential hazardous seismic action. The calculated results revealed that the infilled wall has strengthened the structure initial stiffness in elastic stage while decreased the contribution with the growth of ground motion intensity. And the natural period reduction coefficient suggested by design codes is conservative compared with the analysis results of analytical model with infilled wall. The research also noticed the influence of infilled wall is larger for frame-shear wall structure than shear wall structure.

Keywords: high-rise building; model calibration; infilled wall; seismic performance; incremental dynamic analysis

E-mail: zhouyun05@126.com

引 言

填充墙作为一种非结构构件, 在地震作用下发生

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178175)、国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400)、湖南省科技发展计划专项项目(2017SK2220)

作者简介: 周云, 博士, 副教授

收稿日期: 2018-03-31

开裂后强度和刚度会随之降低，并造成周围结构构件产生开裂及局部滑移，导致接触长度发生变化。高层建筑中的填充墙对结构整体抗震性能的影响较大，然而我国规范在设计阶段通常不考虑填充墙与结构构件之间复杂的作用关系，统一采用周期折减系数来综合考虑因填充墙刚度变小而引起的内力变化。

目前众多高层建筑的现场随机振动测试结果表明^[1-2]，高层建筑分析模型的基本周期通常与实测结构存在一定差异，这大多是在设计过程中对填充墙等非结构构件进行忽略或者不恰当建模所导致的。该差异可能将导致无法对结构性能做出准确评估。而结构在大震作用下往往会进入非线性阶段，且填充墙随着自身破坏加剧，其刚度也会逐渐降低，因而有必要对真实情况下的结构非线性性能进行研究。由于传统时程分析方法仅能获取特定地震动记录下结构的受力和变形，无法分析因地震动参数变化导致的结构反应随机性影响，因此评价潜在危险性水平地震下填充墙对高层结构的影响尤为必要。

增量动力分析 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) 是以弹塑性时程分析为基础，能综合反映结构因地震动强度变化而历经的弹性、弹塑性直至坍塌的破坏全过程，有效弥补了单一时程分析对结构性能评估的不确定影响^[3]。本文基于结构识别的概念和基本理论^[4]，对两栋高层建筑进行了环境振动激励测试，利用模态参数识别结果对有限元模型进行模型校验。并采用 IDA 方法进行高层建筑抗震性能分析，讨论潜在危险性水平地震动作用下填充墙对结构反应的影响。

1 IDA 计算原理

IDA 分析是指对结构施加一个或多个地震动记录，每条地震动记录通过乘以一系列比例系数，调幅成一组具有不同强度的地震动，并分别施加于结构上进行动力时程分析。通过选取合适的地震动强度参数 (intensity measure, IM) 和结构性能参数 (engineering demand parameters, EDP)，绘制 IDA 曲线。常用的 IM 指标有峰值位移、峰值速度、峰值加速度、加速度反应谱等，常用的 EDP 指标有结构顶点位移、最大基底剪力、最大层间位移角、楼层最大延性等。该方法现已被许多学者广泛应用于结构抗震性能评估中^[5-8]。

基于 IDA 方法的结构抗震性能分析计算步骤如下：

(1) 建立可靠的结构弹塑性分析模型；

(2) 依据规范要求选取一系列地震动记录进行分析。研究表明^[9]，10~20 条地震动记录能够对结构抗震性能做出精确评估。同时，选取合适的 IM 和 EDP 指标；

(3) 针对每条记录进行地震动强度单调调幅，计算该输入下结构的动力反应。将得到的第一个 EDP-IM 性能点记为 Δ_1 ，其与原点连线的斜率记为 K_e ；继续计算下一个调幅地震动记录下结构的动力反应，得到第二个性能点并记作 Δ_2 。若该点与前一性能点连线斜率大于 $0.2K_e$ ，则继续计算下一调幅地震动记录下的性能点，直至 Δ_i 与 Δ_{i-1} 连线斜率小于 $0.2K_e$ ；

(4) 变换原始地震动记录，重复步骤 (3)，得到结构的 IDA 曲线簇；

(5) 对 IDA 曲线簇进行统计分析，并结合所定义的性能水平对结构抗震性能进行评估。

2 高层振动测试

基于广西来宾高层建筑随机振动测试项目，湖南大学土木工程结构健康监测研究团队从 200 多栋新建高层建筑中选取了十栋百米左右的钢筋混凝土结构进行随机振动测试，通过采用工作模态分析等相关技术，对其模态参数进行识别。待测对象均为施工完成但尚未交房的民用住宅楼，无家具等设备，因此不考虑活荷载对结构质量的影响。每栋高层建筑均配有中央核心电梯筒，基础类别为人工挖孔桩，抗震设防烈度为 6 度，设计基本地震加速度为 $0.05g$ ，设计地震分组为第一组，II 类场地。本文各选取了一栋框架-剪力墙结构和剪力墙结构进行分析，结构信息及测试情况详见图 1。

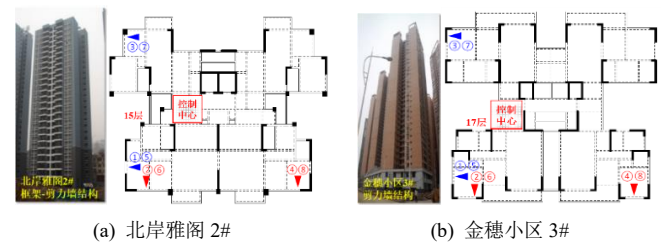


图 1 测试高层及平面布置图

Fig.1 Instrumentation Layout for the Tested Buildings

实际结构在环境激励下的响应十分复杂。为减少因认知不确定性而造成的模态缺失或虚假模态，通过采用随机子空间法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) 和复模态指示函数法 (Complex Mode Indicator Function, CMIF) 进行模态参数识别，其中 CMIF 法采取互相关函数法 (Cross Correlation, CC) 进行前处理。使用上述方法对模态参数识别结果进行相互验证及补

充^[10],从而获得更加完备的结构动力特性,详见表1。通过对比发现两栋高层周期实测值与设计值的比值范围分别在0.31~0.39与0.35~0.44之间,与高层结构设计规程(JGJ3-2010)^[11]建议框-剪结构周期折减系数取值0.7~0.8、剪力墙结构取值0.8~1.0具有一定差距,通常认为是填充墙这类非结构构件导致的。因此,拟建立考虑填充墙刚度影响的有限元模型,讨论潜在危险性水平地震作用下填充墙对结构抗震性能的影响。

表1 测试高层前三阶周期识别结果(单位:s)

Table1 Results of the First Three Order Periods for the Tested Buildings (Unit: s)

测试高层	模态计算	1st	2nd	3rd
	SSI	1.245	1.245	1.227
北岸雅阁2#	CC+CMIF	1.122	1.125	1.122
	设计值	3.537	3.311	2.628
	SSI	1.433	1.572	1.600
金穗小区3#	CC+CMIF	1.294	--	--
	设计值	3.707	3.620	3.167

3 有限元模型建立及修正

3.1 非线性模型建立

在进行IDA分析时需对模型进行多次弹塑性时程分析,准确的弹塑性分析是保证计算结果合理性的关键所在。本文选用Perform-3D软件对结构进行非线性分析。

在PKPM中对高层建筑进行建模和计算后,通过吴晓涵^[12]研发的NosaCAD将模型导入至Perform-3D中进行完善和处理,其中NosaCAD在转换过程可自动生成Perform-3D中弯矩-曲率模型和纤维模型所需的大部分参数。荷载工况采用SATWE导荷结果,结构质量根据抗震分析要求的质量模式进行转化。为提高计算效率,假定楼板无限刚性。在Perform-3D中建立了三种弹塑性分析模型,详见表2。其中Model1采用设计模型对填充墙的考虑方式,即未直接对填充墙进行建模,而是采用规范建议值进行周期折减。Model2则采用周期实测结果与设计结果的比值作为折减系数。Model3通过添加斜撑单元对填充墙进行模拟,并利用实测的结构模态信息对有限元模型进行修正。

表2 有限元模型信息

Table2 Information for the Analytical Finite Element Models

模型	填充墙质量	填充墙刚度	周期折减
Model1	考虑	不考虑	规范建议值

Model2	考虑	不考虑	实测值
Model3	考虑	斜撑模型	不折减

在Perform-3D模型中,梁柱采用塑性区模型,即由中部弹性区段和端部弹塑性区段构成。墙体采用通用墙单元,连梁单元通过添加剪切铰来考虑剪切刚度的非线性影响。根据文献^[13]建议,对填充墙采用单杆斜撑模型进行模拟,并定义如图2所示的力-位移关系,该图能够较好地表达填充墙非线性行为所需的必要特性参数,如初始刚度、峰值强度及峰后强度等。采用5%的模态阻尼和0.2%的瑞利阻尼。

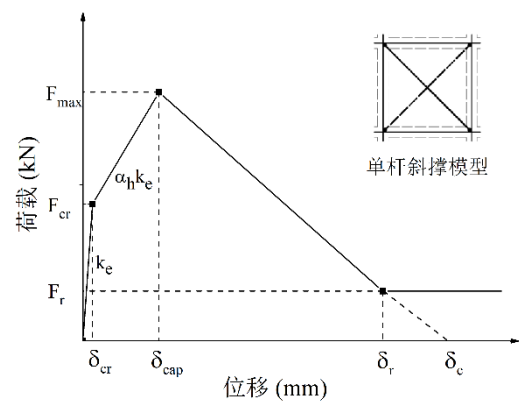


图2 斜撑模型及荷载-位移曲线示意图

Fig.2 Pictures of Diagonal Strut Model and Load-Displacement Relationship

3.2 模型修正

在对实际结构进行模态分析后,利用正问题试算方法调整填充墙初始弹性模量,对有限元模型进行修正,并通过最小二乘法寻找与前十二阶实测周期最为匹配的计算周期。进一步通过参数计算得到合适的填充墙骨架曲线。以金穗小区3#为例,参数调整过程详见图3、4。

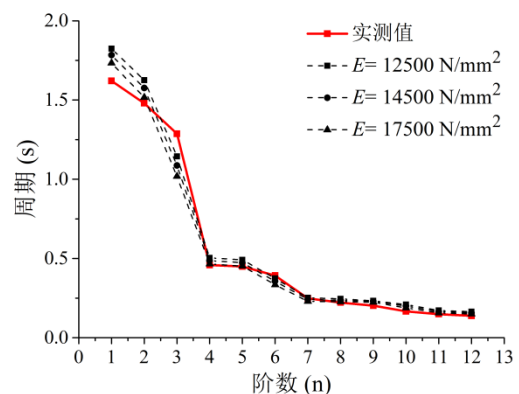


图3 不同填充墙弹性模量下周期对比

Fig.3 Comparison for the Natural Periods for Different

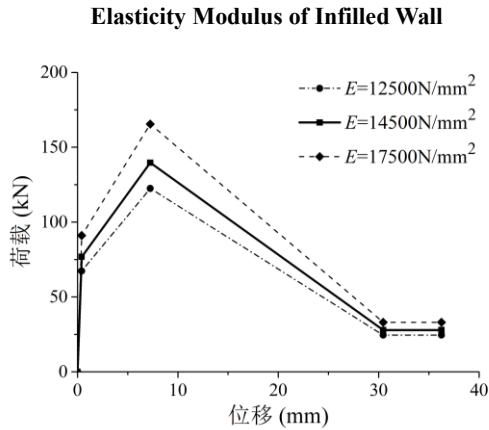


图 4 填充墙骨架曲线调整

Fig.4 Adjustment for the Skeleton curve of Infilled Wall

由图 4 可知，不同弹性模量的填充墙均会产生对应的骨架曲线。当弹性模量发生约 16~20%的变化时，填充墙的初始刚度将发生约 15~35%的增减，并相应影响到整条骨架曲线。

4 基于 IDA 的抗震性能评估

4.1 地震动选取

不同的地震动记录下的结构响应往往离散性较大。为获取具有相同特征的地震动记录，根据现行中国建筑抗震设计规范（GB50011-2010）^[4]要求，以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）为依据，在太平洋地震工程研究中心 PEER（Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://ngawest2.berkeley.edu>）中进行地震波初选，并参考杨傅等^[15]提出的双频段控制选波方法与设计反应谱进行匹配，再输入至 PKPM 模型中进行批量计算，选取基底剪力满足规范要求的地震动记录。本文选取了 15 条地震动记录进行 IDA 计算，设计反应谱与所选地震动的加速度反应谱详见图 5。

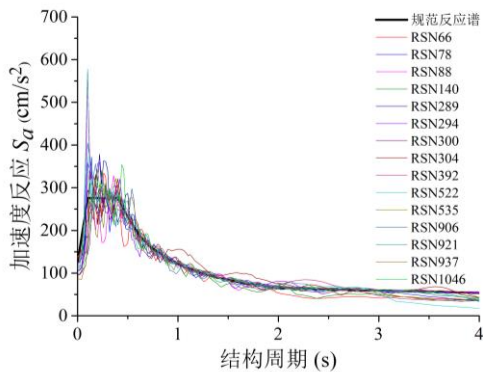


图 5 所选地震波反应谱及设计反应谱

Fig.5 Response Spectrum for the Selected Ground Motion and

the Target Response

4.2 IDA 分析结果

本文选取结构基本周期对应的加速度反应谱 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为 IM 参数，选用楼层最大层间位移角 θ_{max} 作为 EDP 参数。采用变步长法计算方式，以 0.1g 作为初始调幅步长，0.05g 作为步长增量，分别对两栋高层建筑三类模型进行了 IDA 分析，并变换地震动记录，得到 IDA 曲线如图 6 所示。

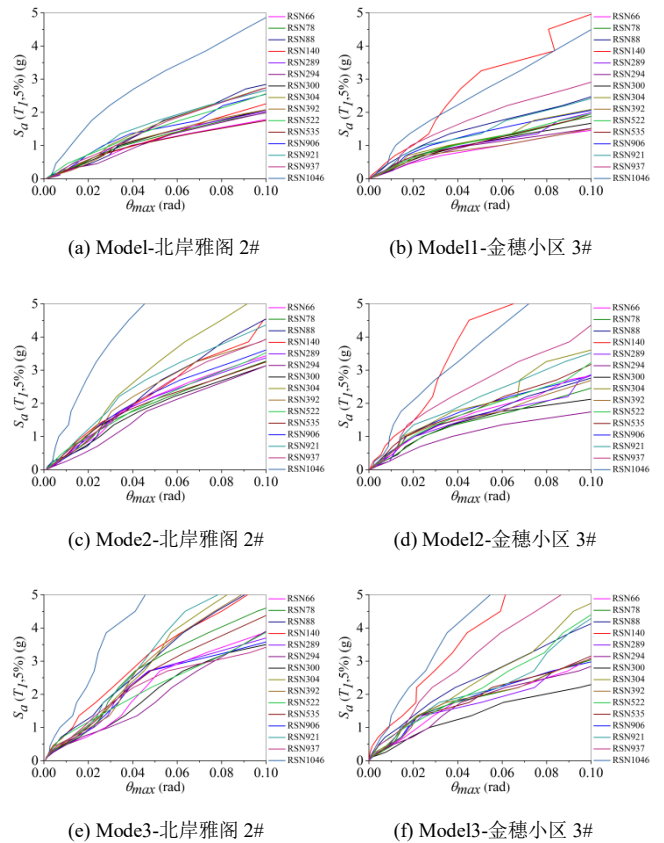
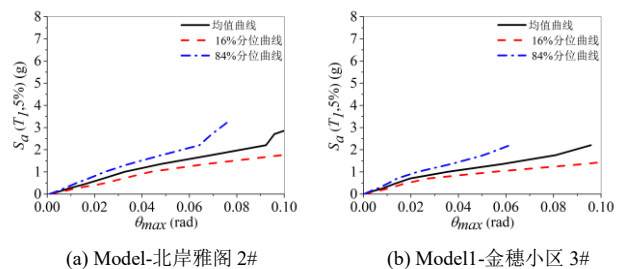


图 6 IDA 计算曲线簇

Fig.6 IDA Analysis Curves of the Structure

考虑到 IDA 分析结果的离散性，需对 IDA 曲线簇进行统计分析。假定其均服从对数正态分布，并按 IM 统计方式得到 16%，50%和 84%分位曲线，以标准差对数形式表达结构反应的离散程度，统计分析结果详见图 7。



(a) Model-北岸雅阁 2#

(b) Model1-金穗小区 3#

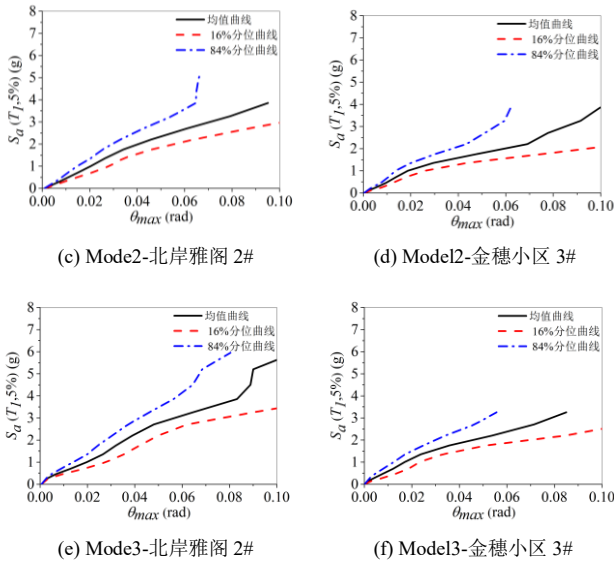


图 7 IDA 分位曲线簇

Fig.7 IDA Analysis Partition Curves of the Structure

4.3 抗震性能评估

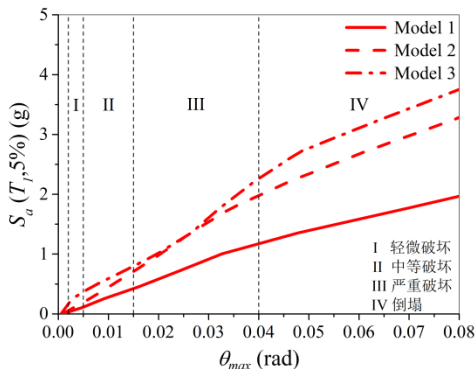
基于性能的抗震设计通过设计多层次的抗震目标，可保证不同风险地震动作用下的结构安全及个性化需求。其关键在于对结构性能进行正确分析与评价，据以此来检查结构设计的合理性，以及是否需要进一步优化。

本文依据 HAZUS^[16]定义的结构在处于轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌四种不同破坏状态下的层间位移角限值，对抗震性能水平进行量化，如表 3 所示。

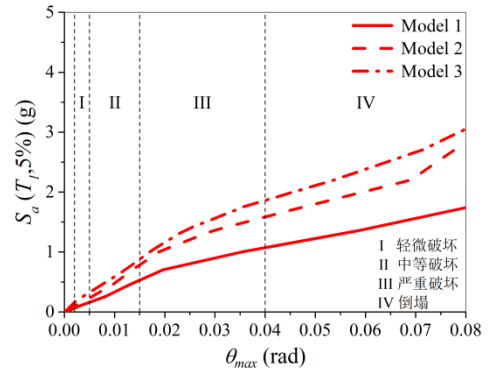
表 3 不同破坏状态下的量化指标限值

性能水平	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
指标限值	0.002	0.005	0.015	0.04

根据上述定义的性能水平及量化限值，对两栋高层结构在三种不同计算方式下的 IDA 曲线进行评估分析，详见图 8。



(a) 北岸雅阁 2#



(b) 金穗小区 3#

图 8 IDA 均值曲线及破坏性能划分

Fig.8 IDA Analysis Mean Curves and Destructive Performance

Division of the Structure

经对比发现，Model1 始终处于 Model3 的包络线之中，表明规范建议的周期折减系数值偏于保守。在抗震设计阶段，若对结构基本周期进行进一步折减，其计算结果也偏于安全，尤其在结构发生严重破坏之前。同时，北岸雅阁 2#中 Model1 与 Model3 的加速度反应谱离散程度与较金穗小区 3#相比较，表明填充墙对框-剪结构的影响程度比剪力墙结构大。

5 结论

本文基于广西来宾高层建筑随机振动测试项目，对一栋高层框-剪结构和一栋剪力墙结构分别建立了三种有限元模型。其中对未考虑填充墙作用的模型分别采取两种周期折减方式，对考虑填充墙作用的模型利用实测模态信息进行模型修正。在 Perform-3D 中进行了 IDA 分析，讨论了潜在危险性水平地震作用下填充墙对高层结构抗震性能的影响。结论如下：

(1) 对两栋高层建筑进行了环境振动测试，测试识别的结构模态信息与设计模型相比存在一定差异，通常认为是设计阶段对填充墙的考虑和计算方式导致的。因此需对结构真实情况下的抗震性能展开研究。

(2) 设计了三种考虑填充墙刚度影响的有限元模型，并进行了 IDA 分析。计算结果表明，我国现行设计规范建议的周期折减系数偏于保守。抗震设计过程中若对结构基本周期进行足够折减，其计算结果也偏于安全，尤其是在结构未发生严重破坏之前。

(3) 对于经校验的考虑填充墙作用的高层分析模型，发现填充墙在线性阶段会增加结构的整体初始刚度。但随着地震动强度的增强，填充墙的破坏程度随之加大，逐渐丧失对结构刚度的贡献作用。

(4) 对比高层框架-剪力墙和剪力墙结构在不同计算方式下分析结果的离散程度,发现填充墙对框-剪结构的影响程度要比高层剪力墙结构大,在结构设计阶段应加以区分考虑。

参考文献

- [1] Li Q S, Wu J R, Liang S G. 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] 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(2):65-72(Yi Weijian, Zhou Yun, Qin Liaohui. Measurement of ambient vibration of a twin-tower building with enlarged base and model modification [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009(2):65-72(in Chinese))
- [3] 周颖, 吕西林, 卜一. 增量动力分析法在高层混合结构性能评估中的应用 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(2):183-187(Zhou Ying, Lu Xilin, Bo Yi. Application of incremental dynamic analysis to seismic evaluation of hybrid structure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010,38(2):183-187(in Chinese))
- [4] Catbas F N, Moon F, Aktan A E. An integrated view for structural identification of civil infrastructure systems: An overview of a collaborative ASCE committee effort [J]. 2010.
- [5] Vamvatsikos D. Seismic performance uncertainty estimation via IDA with progressive accelerogram-wise Latin Hypercube Sampling [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014,140(8):657-670.
- [6] 韩建平, 黄林杰, 孙小云. 考虑填充墙平面内外相互作用评估 RC 框架-填充墙结构抗整体性倒塌能力 [J]. *工程力学*, 2016, 33(9):146-154(Han Jianping, Huang Linjie, Sun Xiaoyun. Global collapse resistance capacity investigation of infilled RC frame considering in-plane and out-of-plane interaction of infill walls [J]. *Engineering Mechanics*, 2016,33(9):146-154(in Chinese))
- [7] 张令心, 徐梓洋, 刘洁平. 基于增量动力分析的超高层混合结构地震易损性分析 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9):19-25(Zhang Lingxin, Xu Ziyang, Liu Jieping. Seismic vulnerability analysis of super high-rise hybrid structures based on incremental dynamic analysis [J]. *Journal of Building Structures*, 2016,37(9):19-25(in Chinese))
- [8] Marra A M, Salvatori L, Spinelli P, et al. Incremental dynamic and nonlinear static analyses for seismic assessment of medieval masonry towers [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017,31(4):04017032.
- [9] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(5):19-25(Lu Xilin, Su Ningfen, Zhou Ying. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012,32(5):19-25(in Chinese))
- [10] 谭德先, 周云, 米斯特. 环境激励下高层建筑结构模态测试与有限元建模分析 [J]. *土木工程学报*, 2015(9):41-50(Tan Dexian, Zhou Yun, Mi Site. Ambient vibration dynamic test and finite element analysis for high-rise buildings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015(9):41-50(in Chinese))
- [11] JGJ 3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011(JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese))
- [12] 吴晓涵, 孙方涛, 吕西林. 上海世博会中国馆结构弹塑性时程分析 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(5):112-118(Elasto-plastic time history analysis of the structure of China Pavilion at the 2010 World EXPO [J]. *Journal of Building Structures*, 2009,30(5):112-118(in Chinese))
- [13] Asteris P G, Cotsovos D M, Chrysostomou C Z, et al. Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(12):1905-1921.
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010(GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese))
- [15] 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, 33(6):33-37.
- [16] HAZUS99 User's manual. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 1999, 15-20.

周云 (1979-), 男, 博士, 副教授。主要从事大型结构静动力测试与结构识别方面的研究。

裴熠麟 (1995-), 男, 硕士研究生。主要从事结构健康监测方面的研究。

周祎 (1992-), 女, 硕士。主要从事高层建筑抗震分析方面的研究。

易伟建 (1954-), 男, 博士, 教授。主要从事结构抗震试验, 结构抗倒塌理论与结构损伤诊断方面的研究。