

考虑填充墙刚度影响的实测高层建筑非线性抗震性能分析

周云, 裴熠麟, 周祎, 易伟建

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

摘要: 以广西来宾高层建筑测试项目中的一栋剪力墙结构为研究对象, 在对其进行环境振动测试的基础上, 依据现场实测模态数据对建立的结构有限元模型进行参数修正, 评估结构的抗震性能. 在 Perform-3D 中建立该高层结构的初始有限元模型, 采用与 PKPM 设计模型相同的处理方式研究填充墙的影响, 结构的模态周期计算结果表明, 两类模型具有较好的可比性. 通过在 Perform-3D 模型中添加斜撑单元对填充墙进行模拟, 利用现场实测数据对斜撑单元的特征参数进行修正. 对考虑和未考虑填充墙刚度影响的结构有限元模型分别进行了增量动力分析, 评估潜在危险性水平地震作用下结构的整体抗震性能. 结果表明, 初始模型的最大层间位移角和顶层位移约为校验模型的 1.1~1.4 倍, 最大基底剪力却是校验模型的 40%~60%.

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: xxxx

文献标识码: A

文章编号: 0455-2059(2019)06-0001-10

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2019.06.001

Nonlinear seismic performance analysis of on-site tested high-rise buildings to consider the impact of infilled wall stiffness

Zhou Yun^{1,2}, Pei Yi-lin², Zhou Yi², Yi Wei-jian²

Key Laboratory of Damage Detection of Hunan Provincial, School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: Based on the on-site random vibration test for the high-rise buildings in Laibin, Guangxi Province, the finite element (FE) model of a high-rise shear wall structure was built in Perform-3D to conduct a seismic behavior research, and the corresponding parameters of the analytical model was corrected by the modal information on high-rise buildings obtained from on-site vibration tests. A primary model of high-rise buildings was built by Perform-3D where the non-structural component as infilled wall was treated with the same modeling strategy as that of PKPM. The calculation result of modal periods suggested a good comparability between the two models. The diagonal bracing element calibrated by the measured records was added to simulate the behavior of an infilled wall. The incremental dynamic analyses were conducted in the primary and calibrated structure FE model to evaluate the influence of the infilled stiffness to structural performance under the potential hazardous seismic actions. The results revealed that the maximum inter-story drift and the roof displacement of the primary FE model were approximately

收稿日期: 2018-08-07 修回日期: 2018-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51338004); 国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701400); 长沙市科技计划项目(KQ1706019)

作者简介: 周云(1979-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 博士研究生导师, e-mail: zhouyun05@gmail.cn, 研究方向为高层抗震分析和结构健康监测.

1.1~1.4 times larger than the calibrated FE model, while the maximum base shear was 40%~60% less contrarily.

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

随着轻质建筑材料的广泛应用, 高层建筑的刚度和阻尼比等特性参数随之减小, 导致结构对风振、地震及环境激励等外部作用更加敏感, 因此研究水平作用下高层建筑的结构特性具有重要意义. 由于现行抗震设计计算方法与结构的模态信息密切相关, 而高层建筑的抗震性能与其动力特性直接相关, 因此获取结构实际动力特性对其抗震性能的评估尤为重要. 目前可通过随机振动测试、强迫振动测试和地震动测量等方法获取建筑结构的动力特性.

Brownjohn 等^[1]对新加坡一栋 26 层建筑进行了现场动力测试, 研究结构在风等横向荷载作用下的响应信息; Li 等^[2]对香港某 370 m 高层建筑进行了足尺模态测试, 获得了结构的自振频率及阻尼特性; Xu 等^[3]利用希尔伯特-黄变换及随机减量法对深圳地王大厦在 York 台风中记录下的结构响应数据进行了分析; Li 等^[4]对上海金茂大厦进行了现场风振测试; 易伟建等^[5]对深圳市某高层建筑进行了环境振动测试, 对比分析了 PKPM 设计结果与振动测试识别结果, 提出了一种填充墙计算模型的修正方法; Li 等^[6]在台北 101 大厦上建立了一套完整的结构健康监测系统, 以研究风和地震作用对高层建筑的影响; Liu 等^[7]在天津 117 大厦上建立了一套包含加速度、风速、位移、温度和应变监测装置在内的结构健康监测系统; Zhou 等^[8]对来宾市十栋钢筋混凝土高层建筑进行了随机振动测试, 利用实测模态信息修正结构有限元模型, 对小震作用下线弹性阶段的结构响应进行了评估.

在建筑结构的抗震计算中, 填充墙作为一种必要的非结构构件, 在地震作用下发生开裂后其强度和刚度会随之降低, 并造成周围结构构件开裂及局部滑移, 导致二者的接触长度发生变化, 对整体结构的抗震性能产生较大影响. 在结构设计阶段, 国家规范通常不考虑填充墙的刚度影响, 只对其质量进行计算, 并忽略了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由填充墙刚度引起的整体结构内力变

化^[9]. 国家规范建议的周期折减系数取值范围较小, 其合理性值得探讨. 建筑结构的实测结果表明^[10], 高层建筑计算模型的基本周期通常与实际结构存在一定差异, 这大多是由于设计过程中对填充墙等非结构构件进行忽略或不恰当建模引起的, 可能导致无法对结构性能进行准确评估. 结构在大震作用下往往会进入非线性阶段, 填充墙随着自身破坏的加剧, 刚度也会逐渐降低, 并可能造成结构整体刚度突降, 因此有必要对真实情况下的结构抗震性能进行评估.

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重要. 增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 以弹塑性时程分析为基础, 能够综合反映建筑结构因地震动强度变化而历经的弹性、弹塑性直至坍塌的全过程, 有效弥补了单一时程分析对结构性能评估的不确定影响^[11].

本研究依托广西来宾高层建筑随机振动测试项目, 在对多栋高度 100 m 左右的钢筋混凝土高层建筑结构的模态参数进行识别的基础上, 从中选出一栋剪力墙结构进行研究分析. 在非线性分析软件 Perform-3D 中建立结构的初始有限元模型, 其中针对填充墙等非结构构件采用与 PKPM 设计软件相同的思路, 通过对比分析计算模型与设计模型的模态周期值来验证所建立模型的正确性, 从而代替 PKPM 软件进行结构性能计算. 通过在 Perform-3D 模型中加入斜撑单元来模拟填充墙的刚度作用, 并利用现场环境振动测试获得的模态数据对结构初始有限元模型进行参数校验. 利用校验后的 Perform-3D 模型进行 IDA (???????? ???? ??) 分析, 从最大层间位移角、最大基底剪力、顶层位移三个方面与未考虑填充墙刚度影响的初始模型计算结果进行比较, 研究了潜在危险性水平地震动作用下填充墙对高层结构整体抗震性能的影响, 对国家规范建议的周期折减系数的合理性进行了分析.

1 基于IDA的抗震性能分析方法

IDA分析是指对结构施加一条或多条地震动记录,其中针对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作用,分别施加于结构上进行动力时程分析.通过选取适当的地震动强度参数(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^[12].该方法已被广泛应用于结构抗震性能的评价中^[13].

基于IDA方法的高层结构抗震性能分析步骤:

步骤1 选取适当的有限元软件,建立可靠的结构非线性分析模型;

步骤2 选取适当的IM和EDP指标,并依据一定筛选原则,选取一系列符合结构场地条件的地震动记录进行分析.文献[14]指出,10~20条地震动记录足以对结构抗震性能做出精确评估;

步骤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1个EDP-IM性能点记为 Δ_1 ,其与原点连线的斜率记为 K_0 ;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2个性能点并记作 Δ_2 .若该点与前一性能点连线斜率大于 $0.2 K_0$,则继续计算下一调幅地震动记录下的结构性能点,直至 Δ_i 与 Δ_{i-1} 连线斜率小于 $0.2 K_0$.如果 $\Delta_i \geq 0.1$,则认为EDP限值为0.1;

步骤4 变换原始地震动记录,重复步骤3,得到结构的IDA计算结果曲线簇;

步骤5 对IDA曲线簇进行概率统计分析,利用计算数据结果对结构抗震性能进行评估.

2 高层结构振动测试

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(www.hnutest.com)从200多栋新建高层建筑中选取了10栋高度100m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付使用的民用住宅楼,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,地震设计分组为第1组,II类场地.本研究选取了一栋高层剪力墙结构进行分析,结构信息及测试情况见图1.

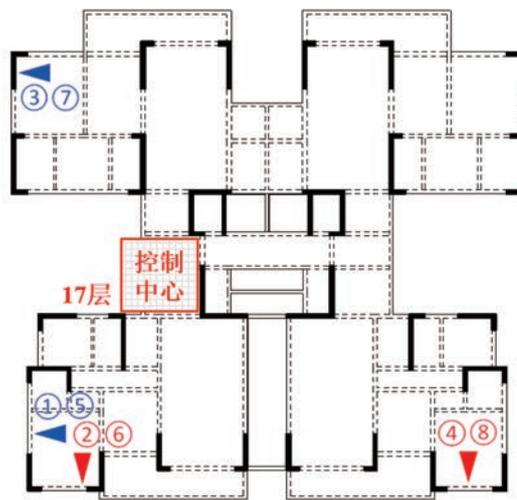


图1 测试高层及平面布置图

Fig. 1 Instrumentation layout for the tested structure

实际建筑结构在环境激励下的响应十分复杂^[15].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,从而获得更加完备的结构动力特性(见表1).通过对比发现该高层结构周期实测值与设计值的比值在0.35~0.44,与高层结构设计规程(JGJ 3-2010)^[9]建议的高层剪力墙结构周期折减系数取值0.8~1.0有一定差距,通常认为是填充墙这类非结构构件所导致的.拟建立考虑填充墙刚度影响的建筑结构有限元模型,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

Table 1 Results of the first three order periods for the tested structure

测试高层	模态计算	1st	2nd	3rd
金穗小区3#	SSI	1.433	1.572	1.600
	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 有限元模型建立

在进行IDA分析时需对有限元模型进行多次弹塑性时程计算, 准确的弹塑性分析是保证计算结果合理性的关键所在. Perform-3D已被广泛应用于高层结构的非线性问题分析: 张令心等^[12]对某50层超高层混合结构进行了基于IDA方法的地震易损性分析; 杜永峰等^[16]对某平面不规则框架-剪力墙结构进行了基于性能的地震易损性分析; Sarkisian等^[17]对某30层混凝土核心筒高层结构进行了非线性时程计算; Poon等^[18]将其应用于高度为632m的上海中心大厦的非线性抗震问题研究中, 因此本研究选用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^[19]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中建立了两种弹塑性分析模型: 模型1(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, 而是将填充墙质量转化为恒载并施加于结构上, 不考虑填充墙刚度, 周期折减采用国家规范建议值; 模型2(Model2)考虑填充墙质量, 采用单杆斜撑模型对填充墙刚度进行考虑, 不考虑周期折减. 利用现场实测结构模态信息对有限元模型进行了参数修正.

现行填充墙计算模型可分为宏观模型和微观模型^[20]. 其中宏观模型依据以往地震作用下填充墙的行为响应, 对实际结构构件进行了简化处理. 微观模型则是将墙体划分为许多细小单元, 以研究局部位置的应力-应变关系. Holmes^[21]提出将填充墙简化为等效铰接斜撑, 其厚度与实际填充墙一致, 宽度定义为斜撑长度的1/3; Thiruvengadam^[22]针对开洞填充墙, 提出可将单杆斜撑改进为多重压杆模型; Crisafulli^[23]将多重压杆等效斜撑模型与相应的精确有限元分析结果进行了对比; Crisafulli等^[24]提出一种利用四节点平板连接框架梁-柱节点的宏观模型, 较好地解释了填充墙的抗压和抗剪行为. 在实际工程应用及结构分析中, 单杆斜撑模型凭借准确的模拟及良好的计算效率得到

了广泛应用. 因此本研究选取该模型对填充墙进行模拟计算.

3.2 有限元模型校验

PKPM软件的模型计算结果与结构真实状态存在一定差异. Perform-3D致力于结构的非线性动力分析及抗震性能评估, 且对填充墙等非结构构件拥有较为完善的建模模块. 本研究利用Perform-3D建立结构模型并进行潜在危险性水平地震作用下的IDA分析. 为保证Perform-3D分析模型的计算结果与PKPM设计模型具有可比性, 在保证构件材料类型、截面尺寸等参数一致的前提下, 在Perform-3D中对填充墙构件采取与PKPM相同的处理方式, 即仅考虑由填充墙质量引起的荷载效应, 以周期折减系数考虑由填充墙刚度对整体结构造成的影响.

由于现行抗震计算方法与结构前若干阶模态直接相关, 为验证所建立的非线性模型的正确性, 对两类模型的计算周期进行了对比(图2). 可见二者前12阶周期的平均误差在5%, 证明了由Perform-3D建立的非线性模型的可靠性.

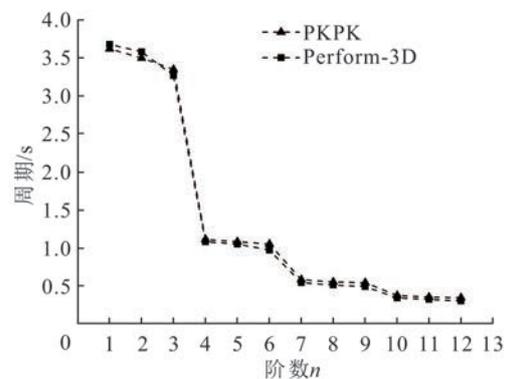


图2 PKPM设计模型与Perform-3D初始模型计算周期对比

Fig. 2 Comparison of modal periods between the PKPM design model and the initial Perform-3D analytical model

3.3 有限元模型修正

在Perform-3D模型中, 梁柱构件采用塑性区模型, 即由中部弹性区段和端部弹塑性区段构成. 墙体采用软件自带的通用墙单元, 连梁单元则通过在普通梁单元基础上添加剪切铰来考虑剪切刚度产生的非线性影响.

采用Holmes^[21]提出的等效斜撑模型对填充墙进行有限元模拟. 其中斜撑厚度与实际墙体相同, 宽度取为墙体对角线长度的1/3. 由于建筑结构不

同位置处的填充墙厚度有所差异(如房屋外墙厚度 240 mm, 卫生间内隔墙厚度 120 mm), 为简化建模过程, 将斜撑模型的厚度统一取为 180 mm. 填充墙质量模拟采用 PKPM 处理方式将墙体质量转化为恒载并施加于结构上, 设置斜撑材料密度为 0. 测试高层中的填充墙由 MU10 页岩多孔砖拌和 M5 水泥砂浆砌筑而成, 砌体抗压强度标准值为 2.4 MPa, 泊松比 0.2, 轴心抗压强度标准值按插值法取为 4.8 MPa. 测得的填充墙砌体弹性模量通常离散性较大, 依据国家规范建议的混凝土弹性模量插值法将填充墙弹性模量初定为 $1.85 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$. 针对每根单杆斜撑模型, 指定如图 3 所示的荷载-位移关系, 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, 同时相较其他模型提高了计算效率. 结构整体模型采用 5% 的模态阻尼和 0.2% 的瑞利阻尼.

在对初始模型进行模态分析后, 采用正问题试算方法调整填充墙弹性模量, 利用最小二乘法寻找与前 12 阶实测周期最匹配的计算周期(图 4). 该高层建筑最匹配的填充墙弹性模量取为 $1.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 与规范建议值相比在合理范围之内.

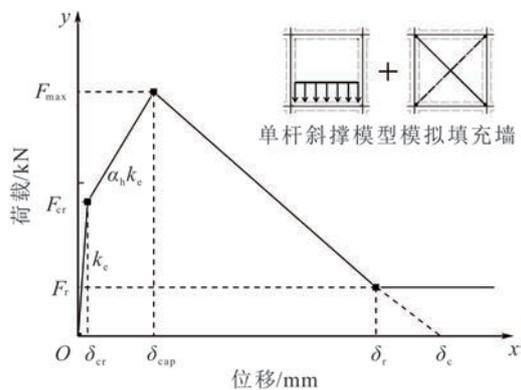


图3 斜撑模型荷载-位移曲线示意图

Fig. 3 Load-displacement relationship of the diagonal strut model

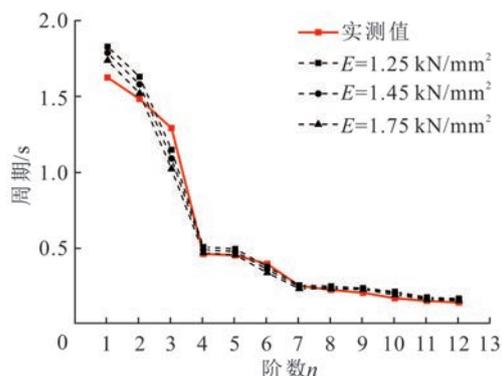


图4 填充墙弹性模量调整

Fig. 4 Adjustment for the elasticity modulus of infilled wall

在得到合适的弹性模量后可计算得到填充墙的骨架曲线, 其中最重要的参数为填充墙的峰值应力 F_{\max} , 主要由填充墙的尺寸及砌体的开裂应力 f_{tp} 决定^[25]. 针对本项目, 可求得 f_{tp} 的合理范围为 0.13~0.27 MPa. 填充墙的骨架曲线需满足^[25]: 开裂强度取 0.55 倍峰值强度, 即 $F_{cr}=0.55F_{\max}$; 峰值强度对应的峰值应变 δ_{cap} 取为 0.25% 倍的层间位移角; 刚度退化系数 α_n 取为 0.05. 确定满足以上条件的 f_{tp} 即可得到填充墙的整条骨架曲线, 其中不同弹性模量对应的填充墙骨架曲线见图 5. 可见当弹性模量取 16%~20% 时, 会造成骨架曲线初始刚度发生 15%~35% 增减, 并随后影响整条骨架曲线.

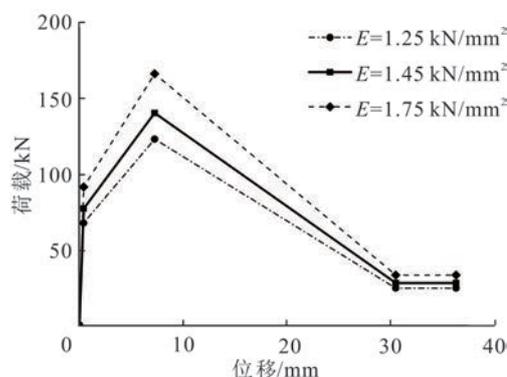


图5 不同填充墙弹性模量对应结构骨架曲线对比

Fig. 5 Adjustment for the skeleton curve of infilled wall

4 基于 IDA 的抗震性能评估

4.1 地震动选取

不同地震动记录输入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^[9]要求, 以与建筑结构震害破坏密切相关的地震动 3 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(<http://ngawest2.berkeley.edu>)进行地震波初选; 参考杨傅等^[26]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^[27]. 本研究最终选取 15 条地震动记录(表 2)进行 IDA 计算, 相应的设计反应谱与加速度反应谱见图 6.

4.2 IDA 计算结果

将挑选出的地震波依次沿 x 方向输入至 Perform-3D 模型中进行 IDA 计算. 针对输入的每条地震动记录, 采用变步长法计算, 以 0.10 g 作为初始调幅步长, 0.05 g 作为步长增量, 依次进行动

表2 IDA分析选取地震动记录基本信息
Table 2 Information of the selected seismic records for the IDA analysis

编号	地震动序号	地震名称	年份	震级	D_{5-95}	$V_{30}/(m/s)$	PGA/(cm/s^2)
1	RSN66	San Fernando	1971	6.61	23.9	328.09	41.258
2	RSN78	San Fernando	1971	6.61	18.9	452.86	147.911
3	RSN88	San Fernando	1971	6.61	23.6	389.00	151.773
4	RSN140	Tabas_Iran	1978	7.35	24.2	302.64	102.753
5	RSN289	Irpinia_Italy-01	1980	6.90	24.2	455.93	123.901
6	RSN294	Irpinia_Italy-01	1980	6.90	22.9	496.46	34.859
7	RSN300	Irpinia_Italy-02	1980	6.20	20.0	455.93	172.274
8	RSN304	Irpinia_Italy-02	1980	6.20	22.1	496.46	20.790
9	RSN392	Coalinga-03	1983	5.38	16.1	286.41	48.677
10	RSN522	N. Palm Springs	1986	6.06	18.5	307.54	46.849
11	RSN535	N. Palm Springs	1986	6.06	21.6	330.74	68.100
12	RSN906	Big Bear-01	1992	6.46	21.5	328.09	79.066
13	RSN921	Big Bear-01	1992	6.46	23.2	312.47	76.710
14	RSN937	Big Bear-01	1992	6.46	22.4	416.15	36.113
15	RSN1046	Northridge-01	1994	6.69	22.0	339.60	59.510

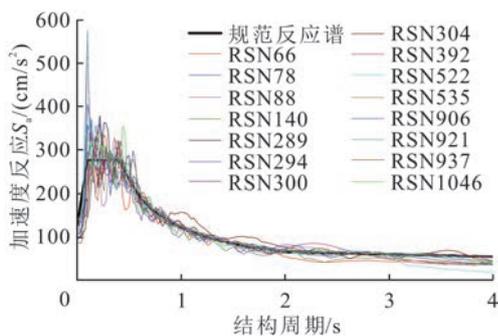


图6 所选地震波反应谱及设计反应谱

Fig. 6 Response spectrums of the selected and target ground motion

力时程分析, 直至满足分析终止条件. 变换地震动记录, 获得相应的 IDA 计算结果曲线簇. 对比分析 Model1 和 Model2 中最大层间位移角、最大基底剪力和顶层位移, 对结构的抗震性能进行评估.

4.2.1 最大层间位移角

建筑结构的层间位移角与结构节点转动及层间变形能力直接相关. 通过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, 选取楼层最大层间位移角 θ_{max} 作为 EDP 参数, 对 Model1、2 中最大层间位移角进行研究(图 7).

考虑到 IDA 计算结果具有一定离散性, 需对相应性能曲线簇进行统计分析. 假定其均服从对数正态分布, 按照 IM 统计方式得到 $(\mu_{EDP}e^{-\sigma_{EDP}}, IM)$, (μ_{EDP}, IM) 和 $(\mu_{EDP}e^{+\sigma_{EDP}}, IM)$ 性能点, 并绘制相应的 16%、50% 和 84% 分位曲线, 以标准差对数形式表示结构反应的离散程度(见图 8).

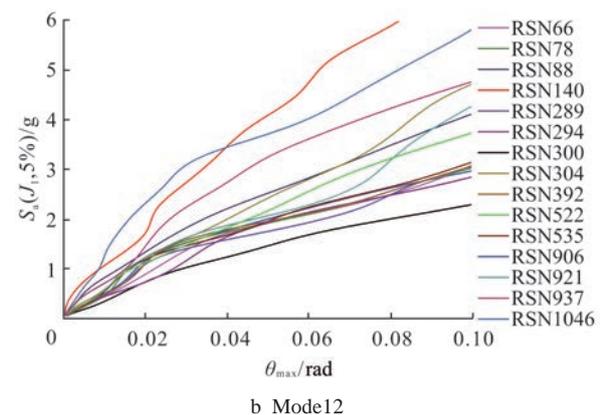
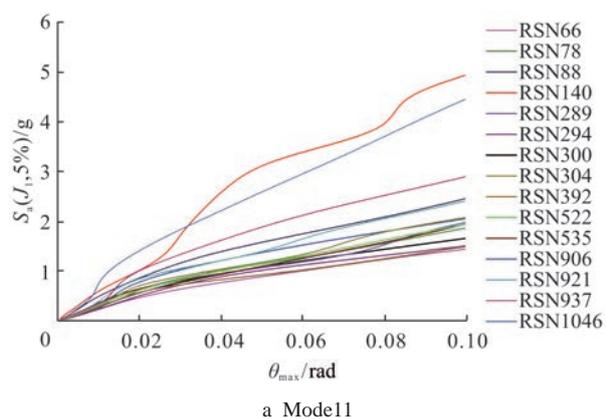
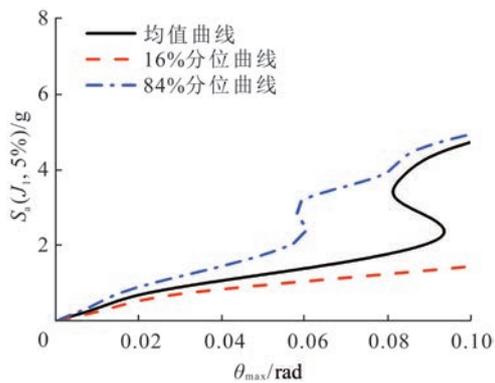


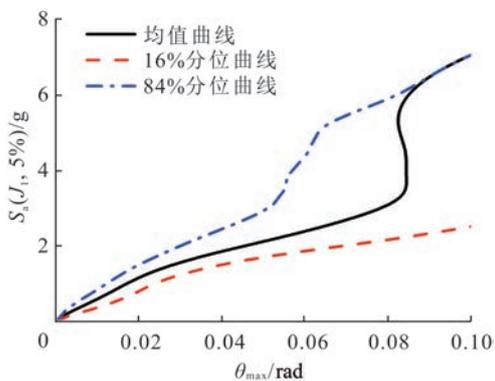
图7 模型1、2最大层间位移角 IDA 计算结果

Fig. 7 IDA calculation results of the maximum inter-story drift ratio of Model1 and 2

由图 8 可知, Model1、2 在 x 方向上的层间位移角变化趋势基本相同. Model1 在线性阶段的结构初始刚度明显小于 Model2; 随着地震动强度的逐步增加, Model1 中结构整体刚度下降速率比 Model2 快.



a Model1



b Model2

图8 最大层间位移角IDA分位曲线

Fig. 8 IDA partition curves of the maximum inter-story drift ratio

计算结果表明, Model1 中均值曲线约为 Model2 的 1.11 倍, 16% 分位曲线约为 1.23 倍, 84% 分位曲线约为 1.07 倍. 当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 1.755 g 时, Model1、2 中均值曲线最大差值为 0.045 rad, 16% 分位曲线最大差值为 0.078 rad; 当 $S_a(T_1, 5\%)$ 达到 5.205 g 时, 84% 分位曲线最大差值为 0.049 rad.

基于性能的抗震设计通过设计多层次的抗震目标, 保证不同风险地震作用下的结构安全及个性化需求, 关键在于对结构性能进行正确分析与评价, 据此来检查结构设计的合理性, 以及是否需要进一步优化. 本研究依据吕西林等^[4]定义的结构在处于正常使用、基本可使用、修复后可使用、生命安全和接近倒塌 5 种不同破坏状态下的层间位移角限值, 对结构抗震性能水平进行量化(图9).

地震作用下 Model1 的最大层间位移角曲线始终处于 Model2 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, 尤其是在结构处于生命安全极限状态之前.

4.2.2 最大基底剪力

变更结构最大基底剪力 V_{base} 作为 EDP 参数,

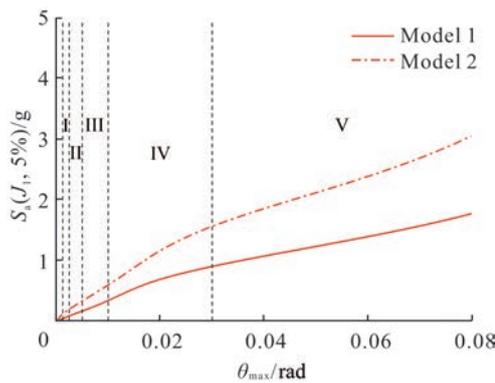
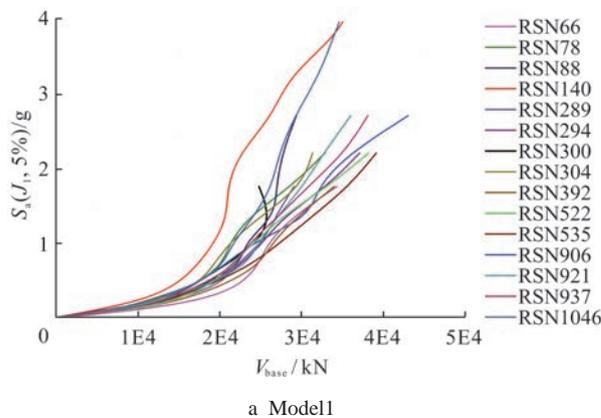


图9 IDA均值曲线及结构破坏性能划分

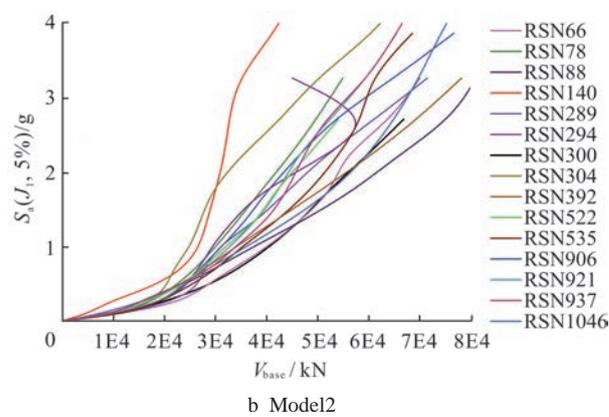
Fig. 9 IDA analysis mean curves and destructive division of structural performance

Model1、2 在 x 方向水平地震作用下的最大基底剪力如图 10 所示. 统计两种情况下的 16%, 50% 和 84% 分位曲线(图 11).

对比 Model1、2 的 3 类分位曲线发现, 在相同地震动强度作用下, Model2 中结构最大基底剪力更大, 表明实际情况下填充墙有效增加了结构整体刚度. 当地震动强度增大至约 6 g 时, Model2 中结构性能曲线相较 Model1 仍在发散, 表明该地震



a Model1



b Model2

图10 最大基底剪力IDA计算结果

Fig. 10 IDA calculation results of the maximum base shear force

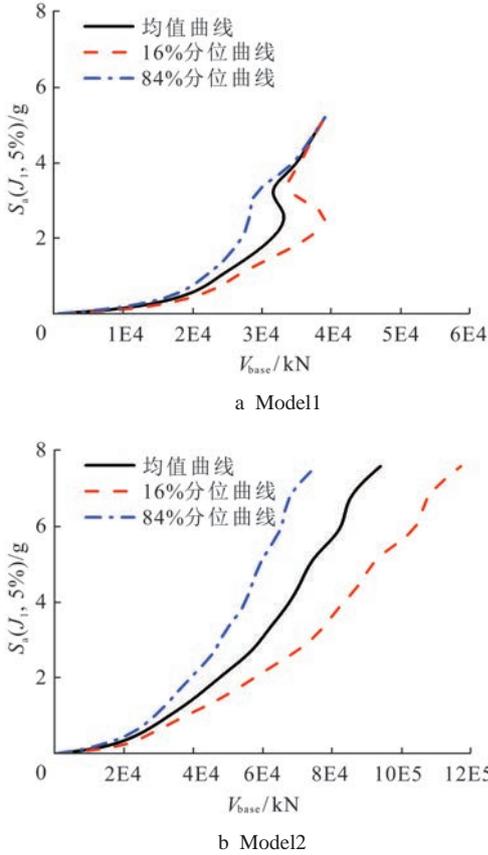


图 11 最大基底剪力 IDA 分位曲线对比
Fig. 11 IDA partition curves of the maximum base shear force

动强度作用下实际结构仍具有一定承载力.

Model2 中均值曲线约为 Model1 的 1.96 倍, 16% 分位曲线约为 2.27 倍, 84% 分位曲线约为 1.74 倍. Model1 中均值曲线较 Model2 平均相差 2.42×10^4 kN, 16% 均值曲线平均相差 3.32×10^4 kN, 84% 分位曲线平均相差 1.71×10^4 kN. 当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为 $5.205 g$ 时, Model1、2 均值曲线最大差值为 3.51×10^4 kN, 16% 分位曲线最大差值为 5.29×10^4 kN, 84% 分位曲线最大差值为 2.07×10^4 kN. Model2 中底层填充墙构件承担的有效峰值剪力均值约为 Model1、2 中最大基底剪力增加量的 139.87%. 由于主体结构的内力水平大致与结构整体变形呈正相关, 考虑了填充墙刚度影响的 Model2 最大层间位移角、顶层位移均有明显减小, 表明实际结构中填充墙有效分担了主体结构中的地震作用. 在地震作用下将先于梁、柱、剪力墙等结构构件成为第 1 道防线, 提高整体结构抗力.

4.2.3 顶层位移

图 12 为 Model1、2 中以结构顶层位移 U_{roof} 作为 EDP 参数的 IDA 曲线簇, 其相应的分位曲线簇见图 13.

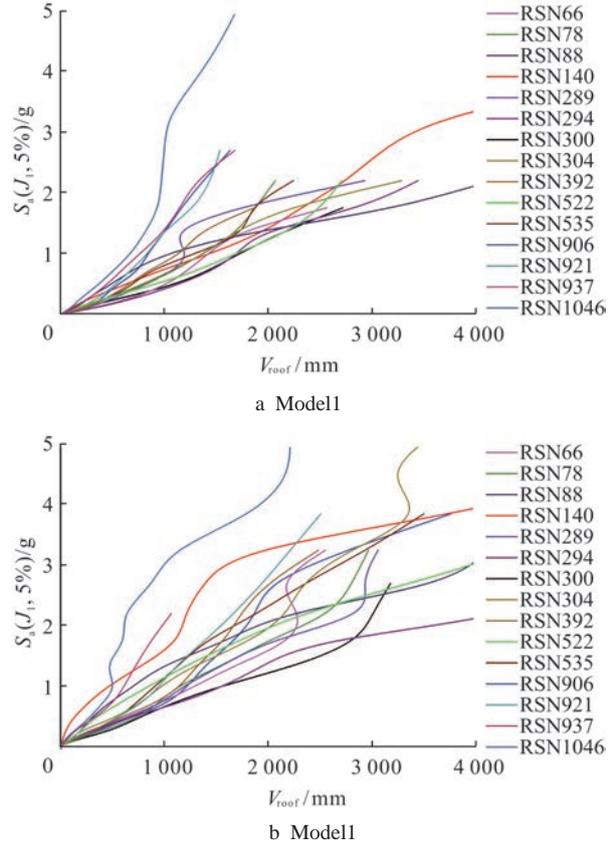


图 12 顶层位移 IDA 计算结果
Fig. 12 IDA calculation results of the roof displacement

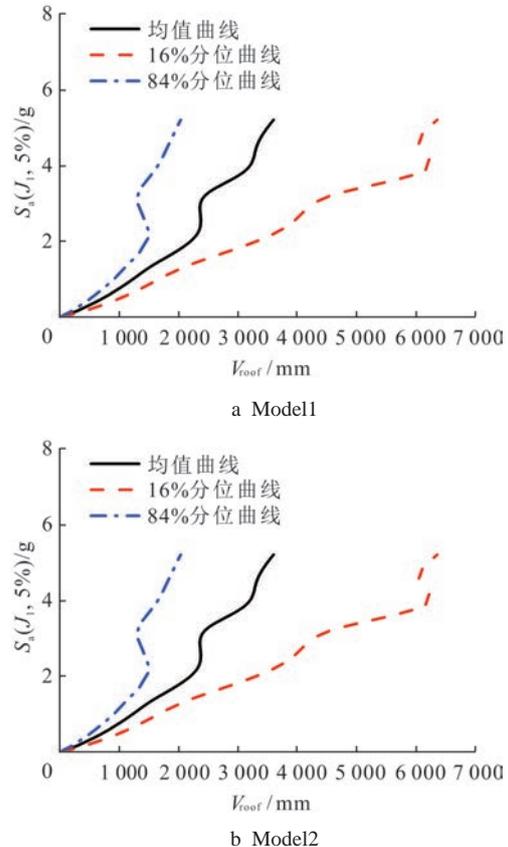


图 13 顶层 IDA 分位曲线对比
Fig. 13 IDA partition curves of the roof displacement

根据计算结果知,两类模型性能曲线的变化趋势基本相同.其中Model1均值曲线约为Model2的1.23倍,16%分位曲线约为1.10倍,84%分位曲线约为1.35倍.当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为1.755 g时,Model1、2均值曲线最大差值为324 mm;当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为3.855 g时,16%分位曲线最大差值为218 mm;当 $S_a(T_1, 5\%)$ 为1.355 g时,84%分位曲线最大差值为255 mm.现行规范建议的周期折减系数在结构水平位移计算上也是偏于保守的.

5 结论

基于广西来宾高层建筑随机振动测试项目,在Perform-3D中对一栋高层剪力墙结构建立了两种有限元模型,并分别与PKPM设计模型进行了模态周期对比.利用现场实测信息对有限元模型进行参数修正,利用校验后的模型进行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.

对一栋高层钢筋混凝土剪力墙结构进行了现场环境振动测试,测试识别的结构模态信息与PKPM设计模型相比存在一定差异,通常认为是现行结构设计国家规范中对填充墙的考虑和计算方式所导致的.针对被测高层建筑,在Perform-3D中建立了相应的有限元分析模型,其中针对填充墙等非结构构件采用与PKPM结构设计时相同的方式.对比发现两类模型的模态周期基本吻合,验证了Perform-3D中所建模型的可靠性.

在Perform-3D中所建高层结构模型的基础上,通过添加斜撑单元对填充墙进行模拟,利用现场实测获得的结构模态信息对有限元模型进行参数修正.对比发现校验后的结构模型更符合实际情况.针对考虑和未考虑填充墙刚度影响的结构模型分别进行了IDA分析,发现填充墙在线性阶段有效增加了结构的整体初始刚度,在地震作用下将先于梁、柱、剪力墙等结构构件成为第1道防线;随着地震动强度的逐级增加,填充墙破坏程度也随之加大,逐步丧失对结构刚度的贡献.

从最大层间位移角、最大基底剪力、顶层位移3方面对考虑和未考虑填充墙刚度影响的结构模型抗震性能进行了对比评估,发现未考虑填充墙作用的模型最大层间位移角、顶层位移均大于考虑填充墙作用的结构模型,最大基底剪力却相对较小.该结果表明国家现行设计规范建议的周期折减系数取值偏大,导致对实际的结构基底剪

力估计不足,而对层间位移角及水平位移的计算却相对保守.通过采用基于最大层间位移角的结构性能评价指标对结构破坏状态进行了量化.结果表明,在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,尤其是在结构处于生命安全极限状态之前.

参考文献

- [1] Brownjohn J M W, Ang C K. Full-scale dynamic response of high-rise building to lateral loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities. 1998, 12(1): 33-40.
- [2] Li Q S, Fang J Q, Jeary A P, et al. Evaluation of wind effects on a supertall building based on full-scale measurements[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 29(12): 1845-1862.
- [3] Xu Y L, Chen S W, Zhang R C. Modal identification of Di Wang Building under Typhoon York using the Hilbert-Huang transform method[J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2003, 12(1): 21-47.
- [4] Li Q S, Fu J Y, Xiao Y Q, et al. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building[J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1745-1758.
- [5] 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,2009,42(2): 65-72.
- [6] Li Q S, Zhi L H, Tuan A Y, et al. Dynamic behavior of Taipei 101 Tower: field measurement and numerical analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(1): 143-155.
- [7] Liu T, Yang B, Zhang Q L. Health monitoring system developed for Tianjin 117 high-rise building[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 30(2): B4016004.1-B4016004.7.
- [8] Zhou Yun, Zhou Yi, Yi Wei-jian, et al. Operational modal analysis and rational finite-element model selection for ten high-rise buildings based on on-site ambient vibration measurements[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(5): 4017043-4017051.
- [9] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010: 31-37.
- [10] 谭德先,周云,米斯特,等.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,2015,48(9): 41-50.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] vam Vatsikos D. Seismic performance uncertainty estimation via IDA with progressive accelerogram-wise Latin Hypercube Sampling[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(8): 657-670.
- [14] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 19-25.
- [15] 李宁洲, 卫晓娟, 丁旺才, 等. 车轮转速信号混合噪声的非线性 Volterra 滤波方法[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 279-284.
- [16] 黄小宁, 杜永峰, 李慧. 基于性能的平面不规则结构地震易损性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(6): 1645-1650.
- [17] Sarkisian M, Long E, Hassan W. Performance-based engineering of core wall tall buildings[J]. Structures Congress, 2013, 30(4): 1094-1108.
- [18] Poon C K, Hsiao L E, Zhu B, et al. Non-linear time history analysis for the performance based design of Shanghai Tower[J]. Structures Congress, 2011, 28(1): 541-551.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Holmes M. Steel frames with brickwork and concrete infilling[J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, 1961, 19(4): 473-478.
- [22] Thiruvengadam V. On the natural frequencies of infilled frames[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1985, 13(3): 401-419.
- [23] Crisafulli F J. Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills[D]. Canterbury: Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 1997.
- [24] Crisafulli F J, Carr A J. Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2007, 40(2): 69-77.
- [25] Dolsek M, Fajfar P. The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame-a deterministic assessment[J]. Engineering Structures, 2008, 30(7): 1991-2001.
- [26] 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.
- [27] 李宇, 吴桂楠, 李琛, 等. 长周期地震动弹塑性反应谱的参数影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 90-97.

(责任编辑: 张 勇)