

实测高层建筑抗震分析中填充墙刚度的影响*

仇一颗,周祎,周云[†],易伟建

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:对高层建筑结构进行抗震分析时,结构设计软件 PKPM 通常以周期折减系数来考虑填充墙对结构刚度的影响.以来宾市高层实测项目中 8 栋高层为研究对象,对其进行随机振动测试并在有限元软件 Sap2000 中建模,利用实测数据对有限元分析模型进行校验并比较校验前后的抗震分析结果.在 Sap2000 中建立高层建筑模型并采用与 PKPM 软件相同的方式考虑填充墙的影响,计算结果表明 2 种模型具有可比性.利用壳体模型和斜撑模型分别在 Sap2000 软件中对填充墙进行模拟,并利用现场实测数据对模型进行校验.用 Sap2000 模型代替 PKPM 模型进行小震作用下线弹性阶段的地震反应分析,与 PKPM 软件的计算结果对比后发现相较于修正后的 Sap2000 模型计算值,PKPM 模型计算的未经折减的层间剪力是 Sap2000 模型的 1/2 左右,而水平位移和层间位移角却是 Sap2000 模型的 3~4 倍.根据 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》建议的周期折减系数为 0.7~1.0,设计取值更为保守.

关键词:高层建筑;填充墙模型;周期折减系数;模型校验;地震反应谱分析

中图分类号:TU973.31

文献标志码:A

Influence of Infill Wall Stiffness on Seismic Analysis of High-rise Building

QIU Yike, ZHOU Yi, ZHOU Yun[†], YI Weijian

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: When structural seismic analysis is conducted on high-rise buildings, the impact of the infill wall stiffness on the structure response is usually considered by the fundamental period reduction factor in the PKRM software. In this paper, eight high-rise buildings in the Laibin High-Rise Testing Project were examined. These buildings were tested for ambient vibration and seismic analysis, which were also modeled and calibrated by the Finite Element (FE) Sap2000 software. First, eight FE models for the eight buildings were built in Sap2000. The same modeling for infilled wall using PKPM was also calculated, and the comparison of these two calculation results demonstrates the comparability of these two models. Next, shell model and diagonal strut model were adopted in the modeling of infill wall, and the models were cali-

* 收稿日期:2017-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178175), National Natural Science Foundation of China(51178175); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51208190), National Natural Science Foundation of China(51208190); 教育部高等学校博士学科点新教师基金资助项目(201201611120028), Research Fund for Chinese Doctoral Program of Higher Education(201201611120028)

作者简介:仇一颗(1969—),女,湖南汨罗人,湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail:zhouyun05@hnu.edu.cn

brated by using the data from test. Thereafter, Sap2000 model was used for seismic response analysis instead of PKPM model. Finally, the seismic response spectrum analysis in linear elastic status was conducted under small earthquake. The comparison of the calculation results from PKPM software shows that, compared with the calculated value of calibrated model, the unreduced floor shear force calculated by PKPM is half of that by Sap2000, and the inter story displacement and inter story drift calculated by PKPM is three to four times of that by Sap2000. Moreover, the value of fundamental period reduction factor suggested by Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building (JGJ3-2010) is 0.7~1.0, which is more conservative to the results obtained from the analysis.

Key words: high-rise building; infill wall model; period reduction factor; model validation; seismic response spectrum analysis

随着轻质墙体材料的使用,现代高层建筑变得更为轻柔,相应地这些建筑对风力、地震以及外部环境的激励等变得更加敏感。水平荷载通常控制着高层建筑的设计,于是研究风和地震作用下高层建筑结构的特性十分重要。同时高层建筑实测的动力特性与结构的抗震性能相关,现行抗震计算方法如振型分解反应谱法,与结构前若干阶模态直接相关,因此也决定着结构动力响应的大小。这就需要对自然环境下高层建筑的动力行为进行评估,而从原型建筑的实测中获得的动力特性则最为可靠。目前,主要有3种方法来研究建筑结构的动力特性,包括强迫振动试验,地震动测量以及随机振动试验^[1]。

国内外众多学者进行了关于高层建筑的现场实测及相关研究,从而获取了一批宝贵的实测数据。1998年,Brownjohn等^[2]对新加坡一座26层高层建筑进行了现场振动实测来获取其动力特性,研究了结构在风及其他横向载荷下的反应。2003年,Satake等^[3]对日本137座钢框架、25座钢筋混凝土结构以及43座钢框架混凝土结构的阻尼比进行了统计,结果表明高层建筑越高,第1阶模态阻尼比越小。2004年Li等^[4]对325m高79层的深圳地王大厦进行了脉动法场地测试,建立了7种有限元模型来模拟外弦支撑带和垂直支撑对结构动力特性的影响。2006年,Kijewski-Correa等^[5]对比了芝加哥3栋高层的实测动力特性和有限元模型的计算特性,并引入了一种特别的对高层结构进行健康监测的系统,并于2011年和2013年被应用于广州电视塔的模式分析上^[6-7]。在地震多发区,高层结构的损坏程度意味着潜在的经济效益和社会效益的损失程度。而高层结构在地震中损失程度的估计需要借助多个学科来评估。Hans^[8]等于2005年对5栋建筑做了3种激励试验:环境激励、谐波激励和利用重型

机械铲的冲击激励;对比结果后发现3种试验方法所得到的模态频率和阻尼比是基本一致的,这说明环境激励这种相对更加安全便捷的方法能够得到足够准确的结构动力特性。Michel等^[9]对法国Grenoble一栋9层建筑做了相关研究,对附近一座桥梁拆除引起的地面运动进行了记录,并与环境振动测试得到的模态参数进行了对比,提出利用环境振动记录可以补充和完善建筑的地震易损性评估。周云等^[10]利用脉冲锤击法对组合板进行了损伤识别。Alguhane等^[11]对一栋5层的钢筋混凝土建筑做了地震评估,分为考虑填充墙和不考虑填充墙两种情况。基于结构性能的地震易损性评估需要用到结构的有限元模型,而有限元模型的修正便利用了环境振动测试提供的数据。

建筑是复杂的结构构件和非结构构件的组合,许多非结构构件(例如填充墙)对结构的动力性能影响很大。结构的性能随着强度的增加而提高,但是强度的增加伴随着刚度的提高而吸引更大的横向地震力。因而,在进行结构抗震设计时,对非结构构件的考虑是否合理值得深入研究。在利用设计常用的PKPM软件进行高层结构抗震设计时,通常只考虑填充墙的质量,不考虑其刚度,并且辅之以周期折减系数来考虑刚度变小的内力变化。由于周期折减系数范围较小,其合理性便值得讨论。

本文结合广西来宾市高层建筑随机振动测试项目,对多座百米左右钢筋混凝土高层建筑结构进行了短期结构振动测试研究,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。由于在填充墙的精确模拟上,PKPM设计软件存在一定的局限性。因此,第1步利用Sap2000软件对所测试的8栋高层进行建模,计算模态周期后与PKPM模型的计算值进行对比,验证

模型的可行性从而代替 PKPM 软件进行计算. 第 2 步在 Sap2000 模型上加入 2 种不同的填充墙模型(壳体模型、斜撑模型), 并利用现场振动测试获得的模态参数对这 2 种模型进行校准. 第 3 步使用校准后的 2 种 Sap2000 模型进行抗震分析, 从层间剪力、水平位移以及层间位移角 3 个方面与未考虑填充墙刚度影响的 PKPM 软件计算结果进行对比, 从而讨论填充墙对结构抗震分析的影响, 并对周期折减系数的合理性进行讨论.

1 填充墙的模拟方法

框架中的填充墙是一种非结构构件, 在有限元分析中, 填充墙的总体上可分为微观模型和宏观模型 2 种. 微观模型是使用较细的划分来模拟填充墙, 以研究局部位置的应力-应变关系, 而宏观模型则是使用单个有限元模型来表示填充墙并研究结构整体的特性.

国外众多学者对填充墙等效模型进行了研究. 1961 年 Holmes^[12] 首次提出了用 2 根在端部铰接的压杆来替代填充墙, 压杆的厚度以及材料和填充墙相同, 并提出了斜撑的宽度与填充墙对角线长度的公式关系为 $1/3$, 这是最早提出明确公式的等效斜撑模型. 1985 年 Thiruvengadam^[13] 提出了多重压杆等效斜撑模型, 对开洞墙具有更大的适应性, 因此被认为是一种对单压杆模型的改进. 1997 年 Crisafulli^[14] 研究了不同的多重压杆等效斜撑模型对结构的刚度以及填充墙周边框架结构的影响, 并与相对应的精确有限元分析的结果进行了比较. 2007 年 Crisafulli 和 Carr^[15] 提出了一种新的宏观模型, 该模型利用四节点平板单元连接框架梁-柱节点, 能够合理解释砌体墙的抗压和抗剪行为. 在工程实际中使用得最多的是等效斜撑模型, 等效斜撑模型中最基本的参数是等效斜撑的有效宽度, 用以代表填充墙的刚度和强度.

本文采用 2 种方法在有限元模型中对填充墙进行模拟, 分别是壳体模型和斜撑模型. 其中斜撑模型采用 Holmes 提出的等效斜撑模型, 斜撑模型的宽度取为墙体对角线长度的 $1/3$, 且斜撑的厚度与填充墙相同. 同时, 由于不同部位的填充墙厚度不等(如外墙 240 mm, 厕所内隔墙为 120 mm), 为简化建模过程, 壳体与斜撑的厚度均视不同高层的具体情况取为统一厚度. 填充墙质量则模拟 PKPM 处理方法, 即将填充墙质量换算为恒载加在结构上且不

考虑其刚度, 故建模时壳体以及斜撑的密度均设为 0.2 种模型的示意图如图 1 所示.

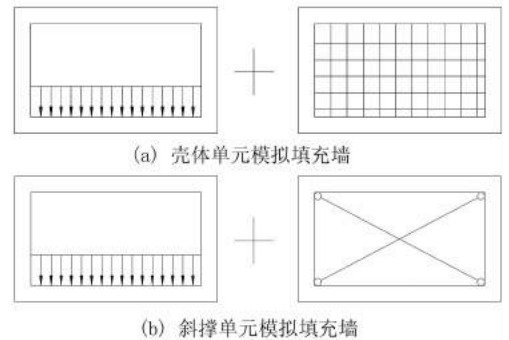


图 1 2 种填充墙模拟方法的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of two kinds of simulation methods of infill wall

2 广西来宾市高层测试项目简介

2013 年 1 月, 在来宾市住房与建设委员会的支持下, 湖南大学土木工程结构健康监测研究团队(www.hnutest.com) 对来宾市 8 座高层建筑进行了现场动力特性实测. 8 栋高层建筑均为住宅楼, 具有中央核心电梯筒, 底部或有 2~4 层大裙楼, 裙楼基础多为独立基础而高层基础多为桩基础, 同一个小区的两栋结构具有类似的结构形式. 在选择所测高层建筑过程中, 遵循以下几项原则: 高层建筑主体完工尚无家具等载荷, 因此无活荷载对楼层质量的影响; 待测高层无塔吊附着, 且内外脚手架均已拆除; 楼层的各位置均能任意到达; 高层结构形式各异, 同一小区选 2 栋近似结构进行对比, 详细测试情况见参考文献[16]. 图 2 中列出了被测高层建筑的照片, 表 1 中列出了高层建筑的测试概况, 表 2 中列出了这 8 栋高层随机振动测试的前 3 阶模态的频率.

3 有限元建模及模型概况

PKPM 是基于中国规范而研发的分析软件, 其计算原理和建模过程采用了简化处理手段, 使计算结果和结构的真实状态有所差异. PKPM 在建模过程中主要进行了以下简化: 1) 对于填充墙一类的非结构构件, 仅计算其等效质量, 并不考虑其刚度; 2) 建筑物在基础顶端视为固定端, 不考虑地基土的影响, 也不考虑基础与上部结构的相互影响; 3) 楼梯处板厚调为 0, 其质量按等效面荷载施加在板上, 不考

虑楼梯对结构整体刚度的影响. 本文主要讨论的是 PKPM 中关于填充墙简化的问题.

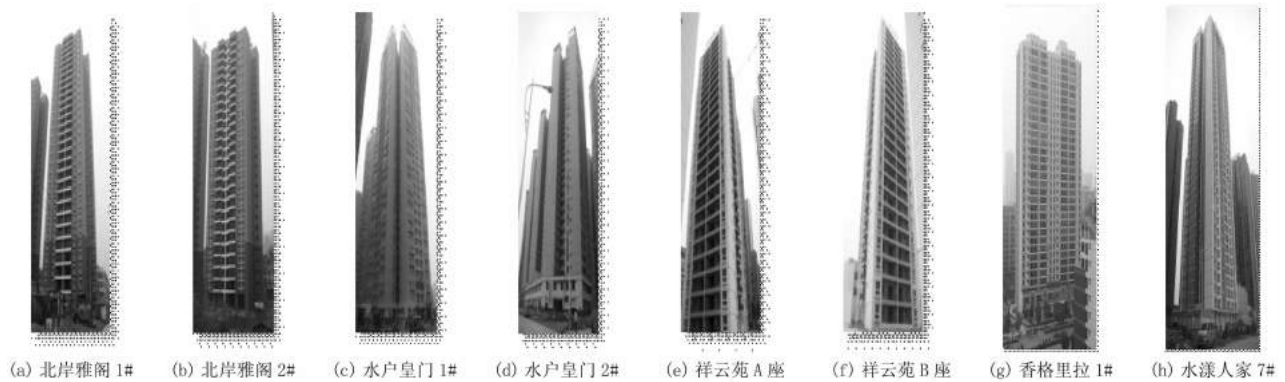


图 2 测试高层建筑照片
Fig. 2 Pictures of tested high-rise buildings

表 1 被测高层建筑概况
Tab. 1 General description of tested high-rise buildings

序号	测试高层	高度/m	层数 n	结构形式	气温/ $^{\circ}\text{C}$	平面形式	10 min 平均风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	北岸雅阁 1#	96	29	剪力墙	10.1~10.3	近似矩形	1.685 6
2	北岸雅阁 2#	87	26	剪力墙	14.0~15.6	近似矩形	2.376 7
3	香格里拉 1#	105	32	框架-剪力墙	11.7~13.5	蝴蝶型	0.692 9
4	祥云苑 A 座	86	24	剪力墙	12.0~12.8	风车型	2.849 0
5	祥云苑 B 座	86	24	剪力墙	14.8~16.5	风车型	1.716 9
6	水漾人家 7#	133.3	39	剪力墙	10.7~11.6	风车型	1.322 9
7	水户皇门 1#	128	39	剪力墙	16.2~17.9	工字型	0.887 3
8	水户皇门 2#	107	33	剪力墙	10.0~11.2	工字型	1.472 3

表 2 所测高层的前 3 阶模态的频率
Tab. 2 First 3 measured frequencies of tested high-rise buildings

阶数	北岸雅阁 1#	北岸雅阁 2#	香格里拉 1#	祥云苑 A 座	祥云苑 B 座	水漾人家 7#	水户皇门 1#	水户皇门 2#	Hz
第 1 阶	0.71	0.80	0.58	1.09	1.09	0.62	0.56	0.70	
第 2 阶	0.84	0.89	0.71	1.16	1.16	0.69	0.64	0.71	
第 3 阶	0.96	1.05	1.02	1.25	1.27	0.79	0.98	0.82	

PKPM 中 SATWE 对柱、梁及支撑的模拟使用一维构件,使用两端带刚臂的空间杆单元来模拟其受力状态. 剪力墙的模拟使用通用墙元,具有较好的适用性. 墙元是在壳元的基础上凝聚而成,选用是四节点平面厚薄壳通用单元. 楼板的模拟, SATWE 提供了 4 种对楼板的假定:假定楼板整体平面内无限刚;假定楼板分块平面内无限刚;假定楼板分块平面内无限刚,并带有弹性连接板带;假定楼板为弹性板. 同时 SATWE 也可以对弹性楼板进行网格

细分.

Sap2000 汇集了世界上大部分国家和地区的结构设计规范,也包含了最新一版的中国规范,具有强大的建模功能. Sap2000 中由框架单元来模拟梁和柱,与 SATWE 相似,节点的连接方式可以自行选择. 剪力墙及楼板用壳单元进行模拟. 壳单元用来在平面或三维结构中模拟壳、膜和板的性能,是一个组合了膜和板弯曲行为的 3 或 4 节点单元. 对于结构中的每一壳单元,用户可选择模拟纯膜、纯板或纯壳

性能. 为对结构的真实模拟, 本文采用薄壳单元模拟剪力墙和楼板, 又因为整个分析建立在小震范围内线弹性阶段, 在模态分析时可以忽略钢筋的作用, 所以本文未考虑分层壳模拟剪力墙.

有限元分析软件的功能与水平能从其单元库的质量反映出来, 上述 2 种有限元分析软件的模型假定差异不大. 而剪力墙和楼板这类二维构件的模型化假定直接决定了高层结构分析模型的科学性及可信度. 有限元分析软件的差异主要在于对剪力墙和楼板的模型化假定的不同. 而综上对梁、柱、剪力墙及楼板的模拟上来讲, Sap2000 的功能相较 SATWE 更加全面和强大.

本文对每栋高层结构建立了 4 种模型, 表 3 为对 4 种模型的简要说明. 需要说明的是, 实测的周期数据是建立在结构受到微幅振动的基础上. 因此本文只开展对结构在小震作用下的线弹性阶段的研究.

表 3 有限元模型简述

Tab. 3 Brief introduction of finite element models

编号	类型	说明
模型 1	PKPM 模型	考虑填充墙质量, 不考虑其刚度
模型 2	Sap2000 模型	考虑填充墙质量但不考虑其刚度 (模拟 PKPM 模型)
模型 3	Sap2000 壳体模型	模型 2 基础上使用壳体单元考虑填充墙刚度
模型 4	Sap2000 斜撑模型	模型 2 基础上使用斜撑模型考虑填充墙刚度

4 地震影响系数讨论

根据 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》^[17] 第 5.1.2 条, 来宾市高层建筑需要采用振型分解反应谱法进行抗震计算. 采用振型分解反应谱法时, 不进行扭转耦联计算的结构, 结构 j 振型 i 质点的水平地震作用标准值, 应按下列公式确定:

$$F_{ji} = \alpha_j \gamma_j X_{ji} G_i, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: α_j 为相应于 j 振型自振周期的地震影响系数. 根据《建筑抗震设计规范》第 5.1.5 条规定画出如图 3 所示地震影响系数曲线, 根据地震影响系数曲线, 可由结构自振周期查表得到地震影响系数 α . 在地震影响系数曲线上标出每栋楼的 α (共 8 栋), 那么 PKPM 模型、Sap2000 模型及实测这 3 种情况便分别对应了 3 个范围. 结果如图 4 所示. 对比图 4 中实

测值、PKPM(模型 1)和 Sap2000(模型 2)的计算值范围, 可以看到 PKPM 与 Sap2000 的计算值范围基本重合, 但二者都高估了实测的周期, 而且比实测的 α 值偏小.

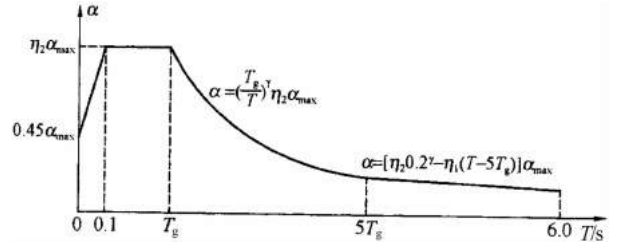


图 3 地震影响系数曲线

Fig. 3 Seismic influence coefficient curve

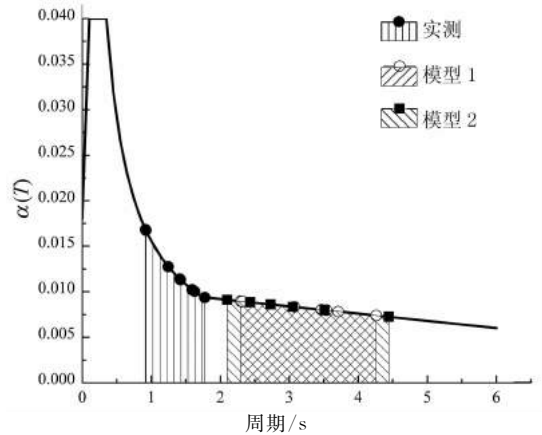


图 4 地震影响系数范围对比

Fig. 4 Comparison of the range of seismic influence coefficient

5 Sap2000 模拟填充墙的校准

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. 而 Sap2000 对本文拟研究的填充墙模拟具有较强的建模能力, 故采用 Sap2000 建立模型并进一步探讨结构的真实动力性能. 为评估 Sap2000 模型的准确性, 在保证 Sap2000 模型与 PKPM 模型构件材料、截面和尺寸一致的前提下, 采用相同的填充墙处理方式, 即只考虑填充墙荷载, 辅之以周期折减系数来考虑其刚度, 计算后比较两款软件的模态周期以及地震作用下的内力分布. 模型 1(PKPM)与模型 2(Sap2000)前 12 阶模态对应的模态周期计算值比较如图 5 所示.

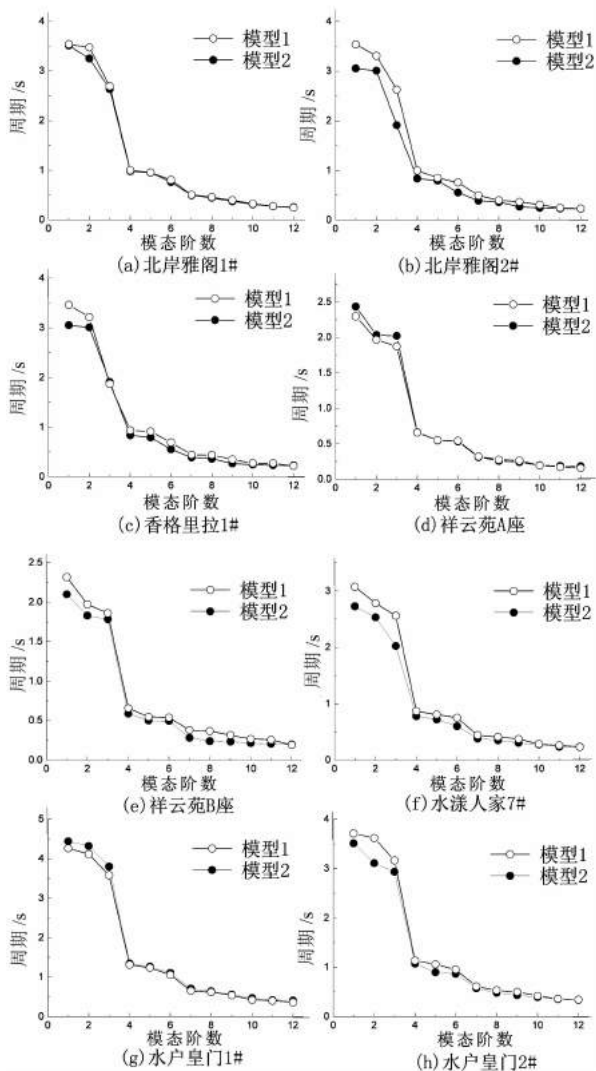


图 5 模态分析比较
Fig. 5 Comparison of modal analysis

由图 5 可知,使用 Sap2000 建立高层建筑模型并模拟 PKPM 对填充墙的处理方式,计算得到的前 12 阶模态周期基本吻合。

为考察填充墙刚度对高层建筑结构动力特性分析的影响,在模型 2 的基础上,建立了模型 3(壳体模型)和模型 4(斜撑模型).考虑到填充墙为 MU10 页岩多孔砖拌合 M5 水泥砂浆砌筑,由规范查得砌体抗压强度标准值为 2.4 MPa,泊松比为 0.2,因此根据混凝土弹性模量按插值法将填充墙的初始弹性模量 E_c 取为 $1.85 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,在软件中利用自定义材料模拟填充墙,计算后发现计算周期与实测周期值相差较大.因此利用环境激励得到的模态数据来校准有限元模型.利用正问题分析方法,通过调整填充墙的弹性模量来校准模型.调整后模型 3(壳体模型)的填充墙弹性模量取值范围为 3.4~7.0

MPa,而模型 4(斜撑模型)的填充墙弹性模量取值范围为 6~12 MPa.

图 6 列出了壳体模型校准前的模态周期以及校准后模型 3(壳体模型)、模型 4(斜撑模型)和实测的模态周期值(未列出斜撑模型校准前的模态周期,与校准前的壳体模型计算结果接近).由图 6 可知,校准效果明显且校准后模型 3 和模型 4 的模态周期计算值与实测结果基本符合。

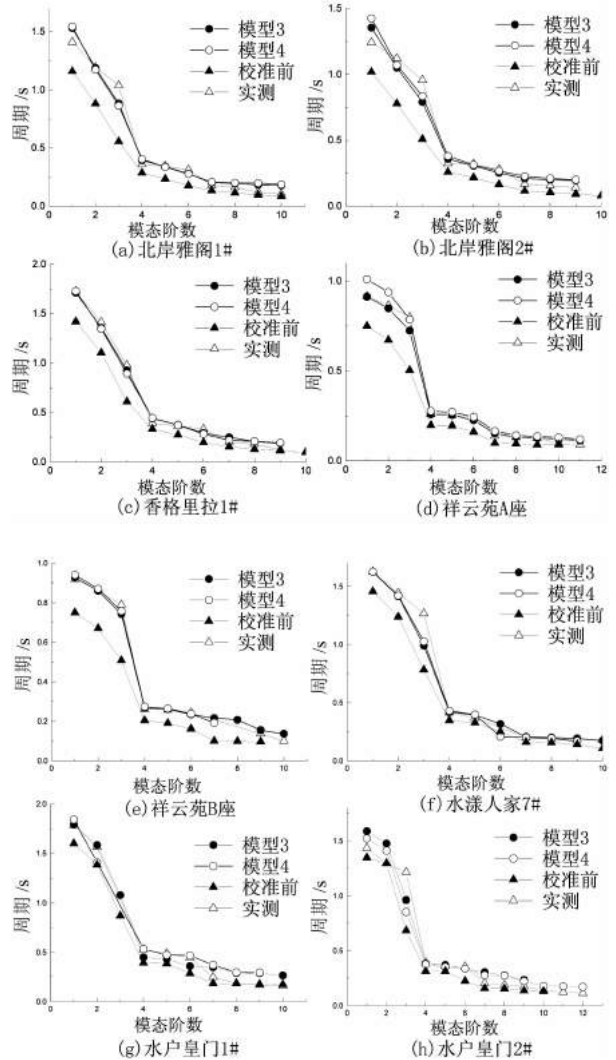


图 6 校准后的模态周期比较
Fig. 6 Comparison of calibrated modal period

6 Sap2000 模型抗震分析及对比

模型 3 和模型 4 经过校准后,对其进行抗震分析.对校准后的模型 3、模型 4 施加与 PKPM 模型上相同的恒荷载与活荷载,分析计算层间剪力、水平位移等,并与 PKPM 的计算结果进行比较。

6.1 层间剪力

图7、图8分别列出了模型3、模型4在X向、Y向地震力作用下产生的层间剪力,同时列出了模型1(PKPM)的层间剪力以作比较.

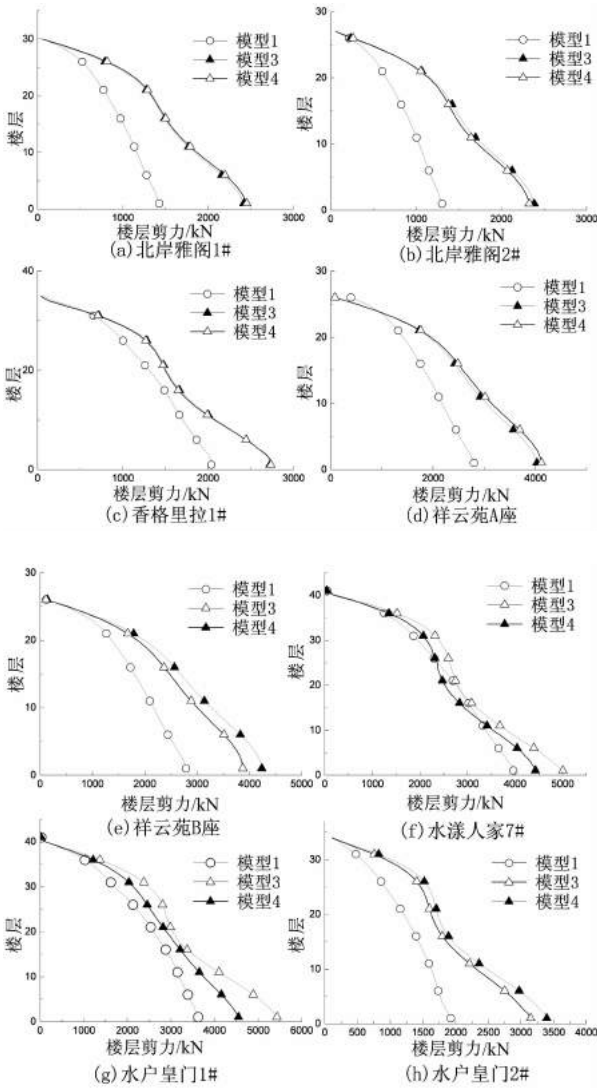


图7 X向地震力作用下的层间剪力比较
Fig.7 Comparison of floor shear force under seismic force in X direction

图7和图8分别为X向地震力作用下的层间剪力比较和Y向地震力作用下的层间剪力比较.由图7和图8可知,模型3和模型4的层间剪力基本相近,且模型4的结果略小于模型3,表明经过校验后的Sap2000中2种填充墙的处理方式在计算层间剪力时所得结果保持一致.

将模型3、模型4与模型1进行对比,发现模型3与模型4的层间剪力均大于模型1,模型3、模型4的底层层间剪力值几乎是模型1的2倍,即考虑填充墙实际刚度的Sap2000建立起来的壳体模型和斜

撑模型计算得到的层间剪力值均大于PKPM模型分析所得层间剪力.

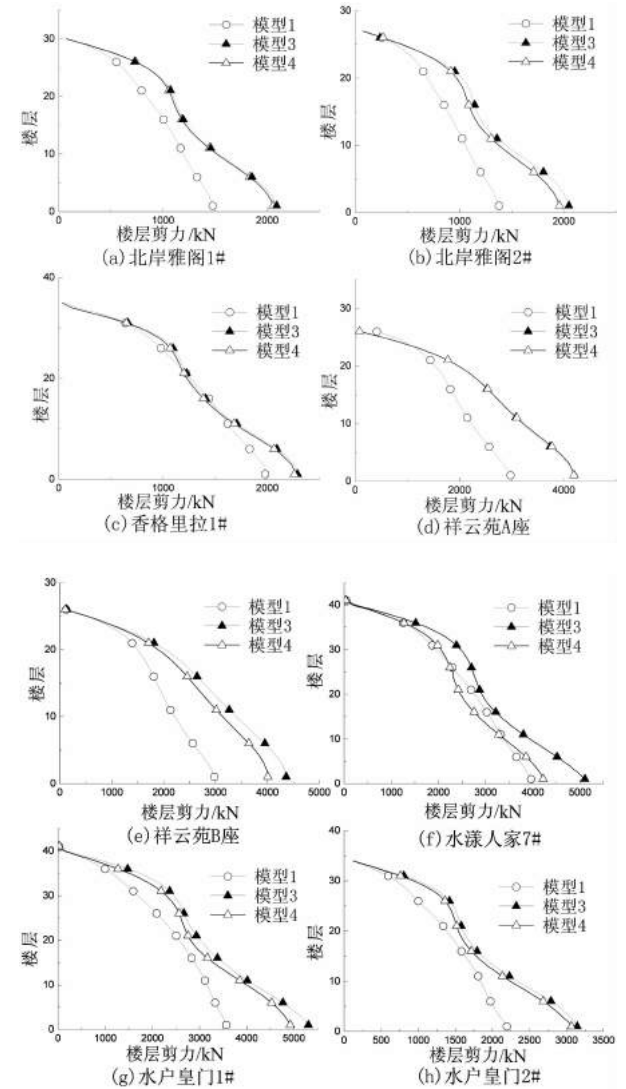


图8 Y向地震力作用下的层间剪力比较
Fig.8 Comparison of floor shear force under seismic force of Y direction

6.2 层间位移

模型1(PKPM模型)、模型3(壳体模型)、模型4(斜撑模型)在X向、Y向地震力作用下产生的楼层水平位移对比分别如图9和图10所示.

对比模型3和模型4的水平位移可以看到在两个方向上其值都基本重合.再将模型3、模型4与模型1的水平位移进行对比,发现模型1的水平位移远远大于模型3、模型4的水平位移,也可以看出模型1的顶层水平位移几乎是模型3、模型4的4倍甚至以上.因此在水平位移的计算上PKPM也是偏于保守的.

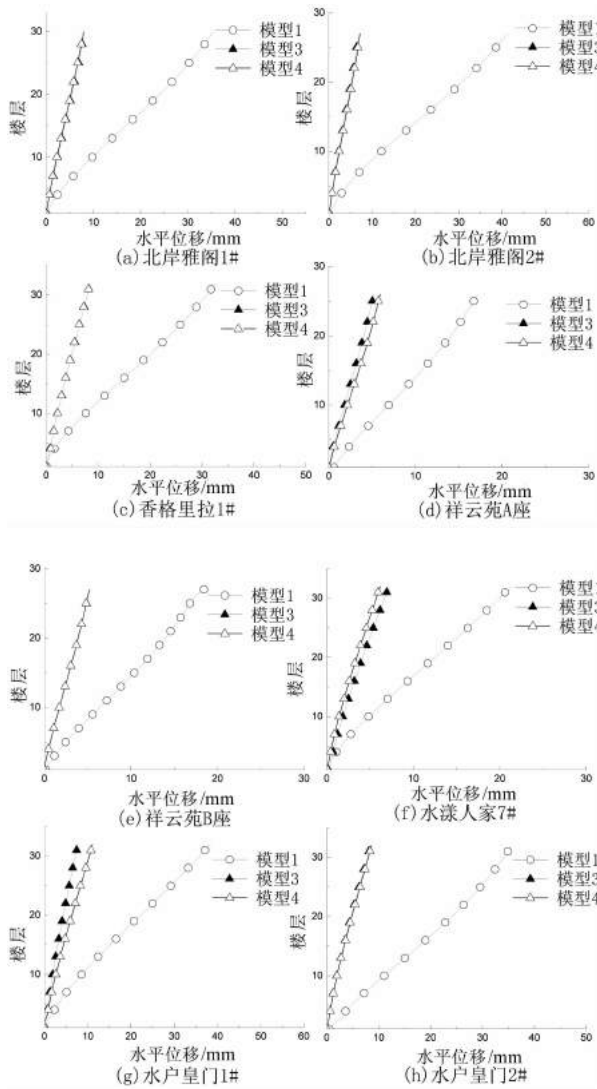


图9 X向水平位移比较

Fig. 9 Comparison of the horizontal displacement in X direction

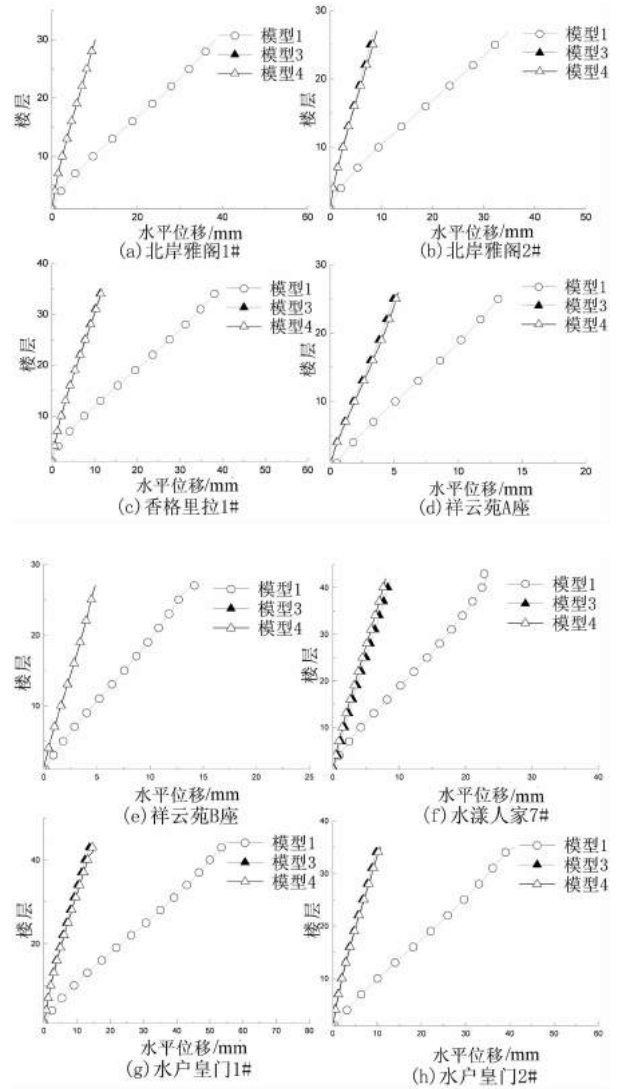


图10 Y向水平位移比较

Fig. 10 Comparison of the horizontal displacement in Y direction

6.3 层间位移角

层间位移角是指按弹性方法计算的楼层层间最大位移与层高之比,即 $\Delta u/h$,主要为限制结构在正常使用条件下的水平位移,确保高层结构应具有足够的刚度,避免产生过大的位移而影响结构的承载力、稳定性和使用要求。

模型1(PKPM模型)、模型3(壳体模型)、模型4(斜撑模型)在X向、Y向地震力作用下产生的层间位移角分别见图11、图12。图中模型3、模型4的层间位移角在两个方向上都基本重合。且模型1的层间位移角远远大于模型3、模型4的层间位移角,也可以看出模型1的最大层间位移角几乎是模型3、模型4的4倍甚至以上。因此在层间位移角的计算上PKPM同样也是偏于保守的。

6.4 Sap2000与PKPM抗震分析比较小结

通过Sap2000的2种模型(壳体模型、斜撑模型)的抗震分析结果在3个方面(层间剪力、水平位移和层间位移角)与PKPM模型抗震分析结果比较可以发现,PKPM计算的层间剪力是Sap2000的1/2左右,而水平位移和层间位移角却是Sap2000的3到4倍。在使用PKPM进行高层结构抗震设计时,一方面考虑了填充墙对重力荷载代表值的影响,将填充墙的质量折算为荷载;另一方面忽略了填充墙的刚度对结构计算周期的影响,进而影响了地震影响系数,但随后又辅之以周期折减系数来考虑刚度变小引起的内力变化。根据JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[18]建议框剪结构周期折减系数取值0.7~0.8,而剪力墙结构取值为0.8~

1.0. 相对于本文的计算结果,规范的建议值较为保守.相较于 Sap2000 中对填充墙进行建模的分析模型,PKPM 中采用周期折减系数对填充墙进行考虑

的设计模型是偏柔的.但使用 PKPM 考虑填充墙对结构反应的影响时,是具有综合性和包容性的.本文也仅在小震作用下线弹性分析范围内进行讨论.

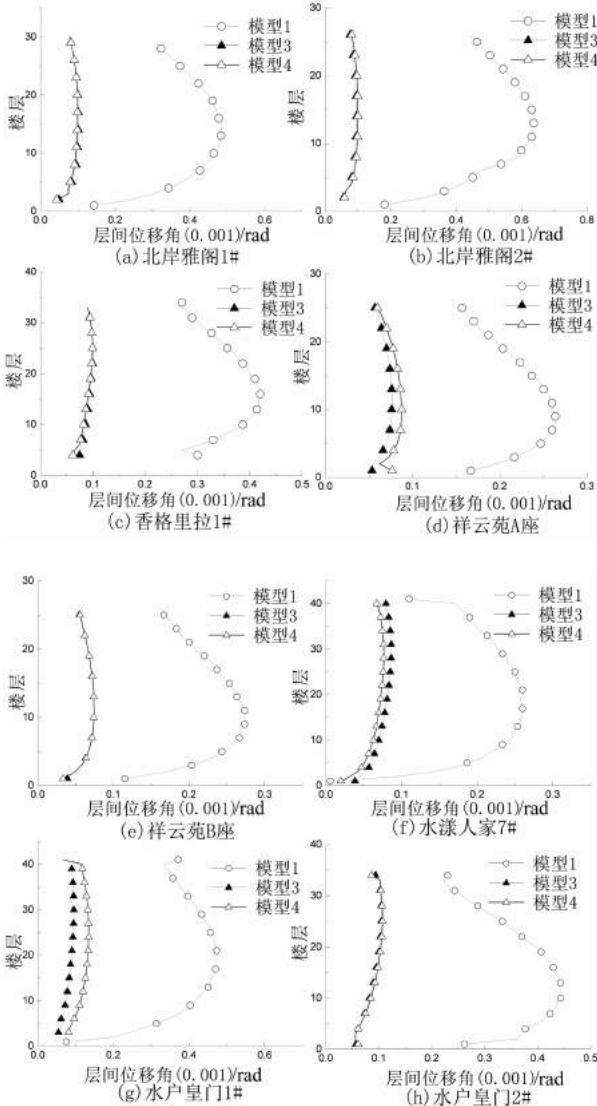


图 11 X 向层间位移角比较
Fig. 11 Comparison of the inter-story displacement angle in X direction

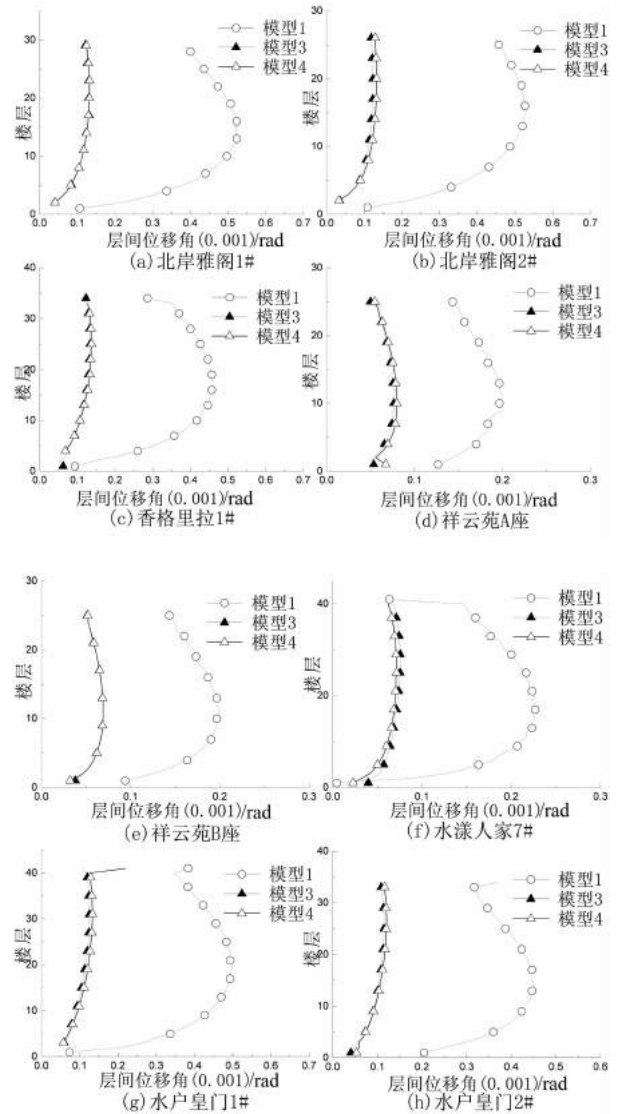


图 12 Y 向层间位移角比较
Fig. 12 Comparison of the inter-story displacement angle in Y direction

7 结论

本文对广西来宾市 8 座百米框架-剪力墙高层结构进行了短期结构振动测试研究,获得了结构振动模态参数.另外在 Sap2000 中对高层建筑分别进行建模计算并与 PKPM 计算结果进行对比,同时利用现场振动测试获得的模态参数对 Sap2000 模型进行校准.使用校准后的 Sap2000 模型进行抗震分析,与 PKPM 计算结果进行对比来讨论填充墙对结构

抗震分析的影响.通过对来宾市 8 栋高层 4 种模型的分析计算对比,可以得到如下结论:

- 1) 在 Sap2000 中建立 8 栋高层的结构模型,并采用与 PKPM 建模时相同的方式考虑填充墙的影响,对比二者的模态周期计算值,发现差值不大,故验证了 Sap2000 中建立的分析模型的正确性.
- 2) 在 Sap2000 中建立高层结构模型并使用壳体和斜撑对填充墙进行模拟,利用环境激励测试得到结构动力特性对模型进行修正,对比修正前后的模态周期等计算结果,发现修正后的模型更加符合

实测结果,并且壳体单元和等效对角斜撑考虑填充墙刚度的效果基本一致。

3) 通过比较壳体模型、斜撑模型和 PKPM 模型的层间剪力、水平位移以及层间位移角,发现 PKPM 的层间剪力小于壳体模型和斜撑模型的层间剪力。同时 PKPM 的水平位移和层间位移角均大于另两种模型,故 PKPM 对层间剪力估计不足,对水平位移和层间位移角的计算相对保守。因此认为对于某些地区的高层建筑在小震作用下线弹性分析,现行规范中对周期折减系数的取值偏于保守。

参考文献

- [1] 周云,张军凯,陈松柏,等.大跨度拱桥静动力试验与结构识别的实践[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(5):10-19. ZHOU Y,ZHANG J K,CHEN S B,*et al.* Practice of static and dynamic experiments and structural identification of long-span arch bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(5):10-19. (In Chinese)
- [2] 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.
- [3] SATAKE N,SUDA K I,ARAKAWA T,*et al.* Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan [J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(4):470-477.
- [4] 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.
- [5] KIJEWski-CORREA T,KILPATRICK J,KAREEM A,*et al.* Validating wind-induced response of tall buildings; synopsis of the Chicago full-scale monitoring program[J]. Journal of Structural Engineering,2006,132(10):1509-1523.
- [6] CHEN W H,LU Z R,LIN W,*et al.* Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower[J]. Engineering Structures,2011,33(12):3628-3646.
- [7] KIJEWski-CORREA T,KWON D K,KAREEM A,*et al.* Smartsync: an integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings[J]. Journal of Structural Engineering,2012,139(10):1675-1687.
- [8] HANS S,BOUTIN C,IBRAIM E,*et al.* In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: Experimental investigations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2005,34(12):1513-1529.
- [9] MICHEL C,GUÉGUEN P,BARD P Y. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2008,28(8):593-604.
- [10] 周云,蒋运忠,易伟建,等.基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):36-45. ZHOU Y,JIANG Y Z,YI W J,*et al.* experimental research on structural damage detection based on modal flexibility theory [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2015,42(5):36-45. (In Chinese)
- [11] ALGUHANE T M,KHALIL A H,FAYED N M,*et al.* Seismic assessment of old existing RC buildings in madinah with masonry infilled using ambient vibration measurements[J]. Engineering and Technology,2015,9(1):43-51.
- [12] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineering,1961,19(4):473-478.
- [13] THIRUVENGADAM V. On the natural frequencies of infilled frames[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1985,13(3):401-419.
- [14] CRISAFULLI F J. Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills[D]. New Zealand: Department of Civil Engineering University of Canterbury,1997.
- [15] 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.
- [16] 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. TAN D X,ZHOU Y,MIS T,*et al.* Ambient vibration dynamic test and finite element modeling research for high-rise buildings [J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(9):41-50. (In Chinese)
- [17] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:31-37. GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: Building Industry Press of China,2010:31-37. (In Chinese)
- [18] 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,2010:43. JGJ 3-2010 Technical specification for concrete structures of tall buildings[S]. Beijing: Building Industry Press of China,2010:43. (In Chinese)