

# 环境激励下高层建筑结构模态测试与有限元建模分析

谭德先 周云 米斯特 易伟建 谢利民 蒋运忠  
(湖南大学, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 对高层建筑在环境激励下现场实测以及随机振动分析, 所获得的频率和振型等模态信息对于高层建筑结构的动力性能评估和抗震设计有着重要的意义。介绍广西来宾的高层建筑动力测试项目, 对8栋高层建筑结构进行系统地随机振动信号测试, 通过互相关函数分析和傅里叶变换从而得到结构的互功率谱, 利用设置参考点进行分步试验获得结构的工作模态, 从而获得结构振动的自振频率等重要参数。在PKPM软件和Sap2000软件中建立高层建筑有限元模型从而获得结构振动的计算频率和振型。为了研究填充墙的刚度和质量对高层结构动力特性的影响, 在Sap2000软件中特别建立三种有限元模型。通过研究发现测试所得到的结构的基频为常用设计软件PKPM计算基频值的2倍以上, 另外合理地选用壳单元模拟剪力墙刚度并考虑填充墙质量作用于梁上能较准确地估计结构实测模态值。最后将本次对8栋高层结构测试所得到的基频与5个国家基本周期的经验公式估计值进行对比分析。

**关键词:** 高层建筑; 随机振动; 工作模态分析; 填充墙刚度; 模型校验; 周期估计  
**中图分类号:** TU355 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2015)09-0041-10

## Ambient vibration dynamic test and finite element analysis for high-rise buildings

Tan Dexian Zhou Yun Mi Site Yi Weijian Xie Limin Jiang Yunzhong  
(Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Natural frequencies and modal shapes of high-rise buildings, obtained from on-site ambient vibration test and operational modal analysis, are very important for evaluation of structural dynamic performance and seismic design. In this paper, a dynamic test project of Guangxi Laibin high-rise buildings was introduced. In this project, 8 high-rise buildings were selected for ambient vibration test to obtain the basic time history signals, then the cross correlation function analysis and fast Fourier transform were utilized to generate cross power spectra, from which the modal parameters such as natural frequencies can be obtained by operational modal analysis. Finite element (FE) models were constructed in PKPM and Sap2000 programs to calculate analytical modal frequencies and mode shapes. In order to consider influence of mass and stiffness of the in-filled wall on the dynamic properties of the high-rise buildings, 3 FE models were built in Sap2000 to estimate modal frequencies and modal shapes. It was found that the measured fundamental frequency is twice larger than that obtained from PKPM analysis. In addition, the structural modes obtained from the FE analysis, which uses shell elements to simulate mass and stiffness contribution of the in-filled wall to the corresponding beams, agree well with those obtained from the test. Finally, the frequencies of the 8 high-rise buildings obtained from the tests were compared with those calculated by the empirical equation in 5 countries.

**Keywords:** high-rise building; ambient vibration; operational modal analysis; in-filled wall stiffness; model calibration; fundamental period estimation

**E-mail:** zhouyun05@hnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51208190), 高校博士点基金  
新教师基金(20120161120028), 湖南省优秀青年骨干教师  
培养计划和湖南大学青年教师成长基金

作者简介: 谭德先, 博士研究生

收稿日期: 2014-07-04

## 引言

随着轻质墙体材料的使用, 现代高层建筑刚度和阻尼比以往变得更小, 导致这些建筑对于风振、地震作用以及外部环境的激励等更加敏感。建筑在其建

造和服役期内不可避免地会受到环境的影响及材料侵蚀,如台风、地震、疲劳、机械振动、材料老化、构件缺陷、预应力损失、人行破坏以及恐怖袭击等危害性事件,都会造成构件和结构损伤积累进而导致抗力衰减,从而使其抵抗自然灾害的能力下降,因此有必要采取科学的手段和措施来评估结构的健康和性能。另外,建筑物在使用的过程中受到地震或台风的影响,他们的动力行为在这些自然环境下的状态需要进行评估。另外建筑高度越高,其承受的风速越大,处于风流场中的高层建筑的各个表面都受到不同变化着的压力,使高层建筑产生一定的运动,这些振动会引起人体生理的疲劳与心理的不舒适感。尤其是当高层建筑自振周期的振动频率与人体的自振频率相接近时,容易与人体产生共振而带来的不舒适感。因此对于高层建筑动力特性的实测研究具有重要的意义。

国际上众多学者对一些高层建筑进行了实测研究和分析,从而获取了一批宝贵的实测数据。1998年,Brownjohn等<sup>[1]</sup>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,对其动力反应和风特性进行了15个月的测量,研究了结构在风和其他横向载荷下的反应。2000年和2003年,Brownjohn等<sup>[2-3]</sup>对框架-核心筒结构的新加坡人民广场大厦进行了实地测试,并分析了各种因素的影响。2003年,Satake等<sup>[4]</sup>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,第一阶模态阻尼比越小,特别是宾馆和公寓的阻尼比要比其他结构高。2004年Li等<sup>[5]</sup>对325m高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,并进行了外支支撑带和垂直支撑对结构动力特性的影响分析。2004年,Wu等<sup>[6]</sup>基于灵敏度的有限元模型修正方法对310m高的南京电视塔的实测数据进行了模型修正研究,考虑了6种模型修正工况以及不同的参数修正组合。2004年,Lei等<sup>[7]</sup>提出了利用经验模态分解(EMD)、随机减量法(RDT)和希尔伯特黄变换(HHT)等方法进行高层建筑随机振动频率和阻尼的识别方法。2005年,Chassiakos等<sup>[8]</sup>对长滩公共安全大楼进行了翻修前、中、后期的实地场地测试,对不同条件下的结构动力特性进行了分析。2006年,Kareem<sup>[9]</sup>等利用全球定位系统(GPS)测试结果对芝加哥高层建筑健康检测项目进行了分析。2009年,Dyke<sup>[10]</sup>等比较了几种模态参数识别算法,包括特征值实现算法(ERA)、最小二乘预测误差算法以及随机子空间算法(SSl),对1:3的四层钢框架结构进行了理论与试验研究,结果表明SSl

算法能提供最为精确的频率和振型的识别值。2013年,Li等<sup>[11]</sup>对492m高,安装了主动调频质量阻尼器系统(ATMD)的上海环球金融中心进行了动力特性和风力作用下的观测,并对安装ATMD系统前后的频率和阻尼比进行了研究。2013年,Ahsan等<sup>[12]</sup>利用模块化的健康监控系统采用SmartSync技术进行了世界最高层建筑Bruj Khalifa的测试。2014年,Ni<sup>[13]</sup>等对610m高的广州电视新塔安装了近600个传感器进行健康监控研究。

在影响高层建筑动力特性的众多因素中,填充墙是其中一个最关键的因素。填充墙和框架的相互作用机理十分复杂,其主要影响因素有填充墙和框架的相对刚度比、加载方式、填充墙和框架之间的连接形式以及施工质量等。国外学者集中研究了框架填充墙结构在单调和循环加载下的抗震性能。1985年,Thiruvengadam等<sup>[14]</sup>研究了填充墙和框架接触长度造成结构固有频率损伤问题。1993年,高小旺等<sup>[15]</sup>分析了钢筋混凝土框架房屋中填充墙对房屋周期的影响和楼层间弹性位移分布规律,给出了按填充墙数量和开洞等因素确定周期折减系数的简化方法。1997年,Madan等<sup>[16]</sup>对1987~1997年间的填充墙框架结构的试验和模拟研究相关文献进行了总结。1998年,Mosalam<sup>[17]</sup>等通过对一座两层两跨重力荷载作用下的钢框架填充墙进行拟动力试验研究,评估了测试结构的动力性能。1999年,Chaker等<sup>[18]</sup>对两座三层框架结构进行了振动测试,其中一座是空心黏土砖填充墙结构,在脉动风作用下填充墙框架的基本周期远小于空框架的基本周期。2002年,Al-Chaar等<sup>[19]</sup>对5个1/2模型进行了静力试验研究,通过测试的应力、应变和转角等关系推导了判断填充墙失效模式的计算公式。2006年,Amanat等<sup>[20]</sup>建立了三维有限元模型,对影响结构自振周期的因素进行了数值模拟,通过敏感性分析认为梁、柱刚度大小对自振周期影响较小,尺寸效应、填充墙数量有重要的影响。2011年,Asteris等<sup>[21]</sup>对自1950年以来提出的填充墙理论模型进行了研究,其中包括斜撑模型、多支撑模型和剪切弹簧模型等,文章对各模型参数的选取进行了总结,对其优缺点进行了评述。

大型结构动力特性测试是通过在外界环境激励作用下进行短期的振动或者应变的测试,来获得结构的模态特性,从而通过反分析获得结构的物理参数。而对于高层建筑的实测受到研究经费和业主的限制,因而测试机会难得,一些特别的超高层建筑才能获得测试机会,而对一个地区多栋高层的实测则少有报道。另外用来进行结构抗震设计的高层结构基本周

期等参数与实际结构实测结果是否一致,没有考虑模型修正和校验的设计模型用来进行抗震评估是否合理,均值得深入思考和研究。

本文将结合广西来宾高层建筑测试项目,对多座百米框架-剪力墙高层结构进行短期结构振动测试研究,通过信号分析及工作模态分析等相关技术,对高层建筑的模态参数进行识别。另外在PKPM和Sap2000中对高层建筑分别进行建模计算,通过多个模型的正问题分析,研究填充墙刚度和质量影响的最佳模拟方法。最后对识别得到的几栋高层结构的基本周期与经验公式的计算值进行比较。

## 1 广西来宾市高层建筑动力测试项目

广西来宾市靠近南海地区,具有典型的亚热带季风气候特征,年平均气温 $18.1 \sim 21.2^{\circ}\text{C}$ 。常受到台风侵袭而对房屋结构设施造成影响,局部风力可达到9

级。另外广西分布着几条大的地震带,有着发生地震的隐患。来宾市在近10年的地级市建设中大力发展高层建筑,在市中心区涌现出近300栋高层结构。2013年1月,湖南大学土木工程结构健康监测团队([www.hnutest.com](http://www.hnutest.com))通过搜集资料进行仔细调查和研究,在几十个小小区中挑选出6个小区共11座高层建筑进行了现场动力特性实测,本文所列内容为其中8栋高层建筑。所测试的高层建筑均为住宅楼,都具有中央核心电梯筒,底部或有2~4层大裙楼,裙楼基础大多为独立基础而高层基础多为桩基础,同一个小区的两栋建筑具有类似的结构形式。

在选择高层建筑过程中,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;待选高层无塔吊附着,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。测试高层结构的照片如图1所示,测试概况如表1所示。



(a) 水户皇门2# (b) 水户皇门1# (c) 金穗小区1# (d) 金穗小区3# (e) 祥云苑A (f) 祥云苑B (g) 北岸雅阁1# (h) 北岸雅阁2#

图1 测试高层建筑照片

Fig. 1 Pictures of tested high-rise buildings

表1 来宾高层建筑测试概况

Table 1 General description of tested high-rise buildings

序号	测试高层	高度(m)	层数	结构形式	气温( $^{\circ}\text{C}$ )	平面形式	10min 平均风速(m/s)
1	水户皇门-1#栋	128	39	剪力墙	16.2~17.9	工字型	0.8873
2	水户皇门-2#栋	107	33	剪力墙	10.0~11.2	工字型	1.4723
3	金穗小区-1#栋	107	33	框架-剪力墙	18.2~18.4	风车型	2.9373
4	金穗小区-3#栋	123	39	框架-剪力墙	22.5~26.3	风车型	1.9880
5	祥云苑-A座	86	24	剪力墙	12.0~12.8	风车型	2.8490
6	祥云苑-B座	86	24	剪力墙	14.8~16.5	风车型	1.7169
7	北岸雅阁-1#栋	96	29	剪力墙	10.1~10.3	近似矩形	1.6856
8	北岸雅阁-2#栋	87	26	剪力墙	14.0~15.6	近似矩形	2.3767

## 2 高层建筑随机振动测试方法

本次结构测试采用 LMS SCADAS Mobile 8 通道数据采集系统,如图 2(a)所示,采用 4 个美国 731A 高灵敏度地震加速度传感器和 8 个扬州科动 KD12000L 超低频地震加速度传感器协调配合进行时域信号同步采集,加速度传感器安装于可调平台座上,在墙角同步校验测试时照片如图 2(b)所示。采用 Rg58u 美标军用电缆进行数据传递,为节约电缆用线,测站参考层设置在大楼约中部位置,参考点设为平面  $x$  方向 2 个测点以及  $y$  方向 2 个测点,一共设置 4 个测点,从而可分别获得平动和扭转模态。另外设置移动层 4 个测点传感器排列方向与参考层相同,移动层从顶层开始往下每隔 3~4 层挪动一次作为一组测试工况。采样频率设置为 204.8Hz,频谱分析时 FFT 点数为 8192。利用 LMS 软件自带的工作模态分析模块,进行互相关函数分析然后作傅里叶变换,进而得到两点之间的自功率谱和互功率谱,由功率谱的峰值可以获得结构测试的若干阶工作模态频率、振型和阻尼比。



(a) LMS 数据采集系统

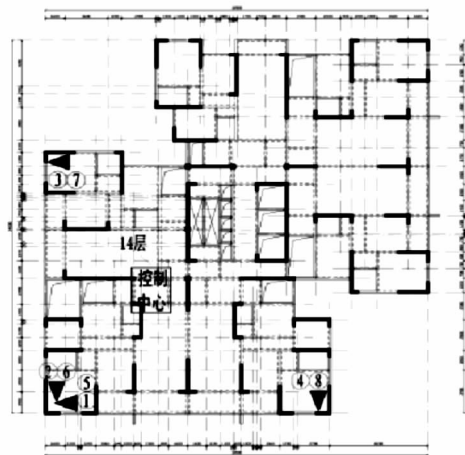


(b) 4 个加速度传感器测试  
图 2 高层建筑现场测试仪器

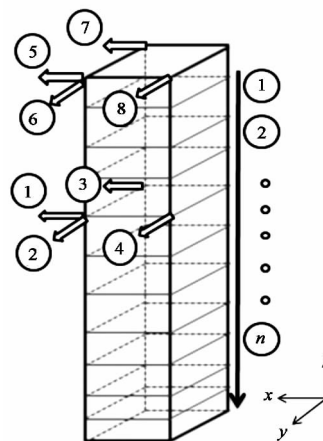
Fig. 2 Test equipments for on-site high-rise building test

各高层建筑测试的方案基本相似,本文以祥云苑 A 座为例对本次高层建筑测试结果作详细地分析。该高层建筑结构的标准层平面测点布置图以及测点沿楼层分布图如图 3 所示。在 15min 测试过程中,测试

所获得的 19#点的加速度时程信号如图 4(a)所示,所得的 1#点与 3#点的互功率谱如图 4(b)所示,可见在前 25Hz 结构振动模态峰值清晰明显。本文对 10Hz 以前的模态参数进行识别,对  $x$  方向和扭转方向的频谱分别进行模态参数识别,所获得的稳态图如图 5(a)~图 5(b)所示,从这两幅图的比较可以清晰分辨出高层建筑的振动呈现模态密集区的形式,在一个密集区分别有  $x$  方向、 $y$  方向和扭转三种振动模态。在模态辨识过程中,可通过各方向互功率谱图识别和判断出平动模态和扭转模态。



(a) 标准层



(b) 楼层高度

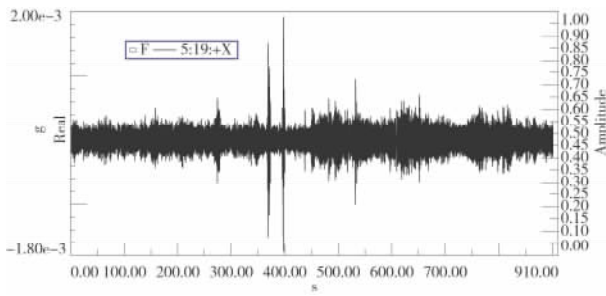
图 3 祥云苑 A 座楼层测点布置图

Fig. 3 Instrumentation layout for Xiangyunyuan A building

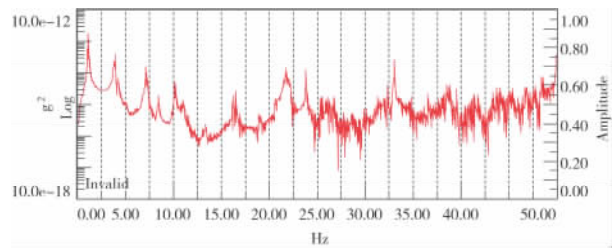
## 3 有限元建模分析

### 3.1 PKPM 建模与 Sap2000 建模

文中共采用 2 种软件对结构进行有限元建模分析与特征值计算。首先采用中国建筑科学研究院 PKPM 软件中的 SATWE 模块对结构进行分析,对于高层建筑结构建模而言,该软件的特点是对于填充墙这类非结构构件,仅计算其等效质量而不考虑其刚度,而把填



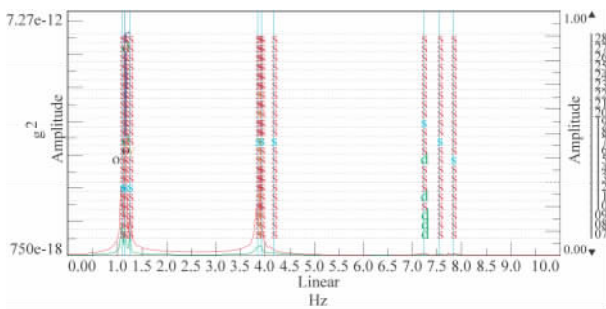
(a) 19#点加速度时程信号



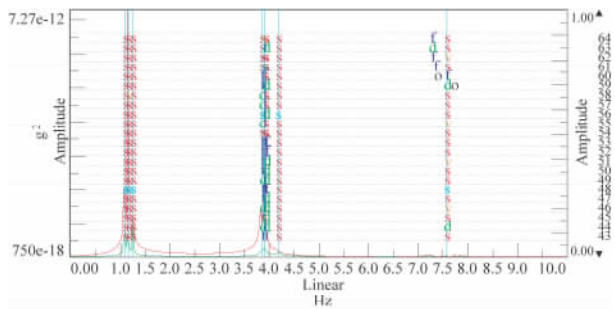
(b) 1#和 3#互功率谱图

图 4 祥云苑 A 座测试典型振动信号和功率谱

Fig. 4 Typical tested vibration signal and power spectrum for Xiangyunyuan A building



(a) X 方向



(b) 扭转方向

图 5 祥云苑 A 座典型模态参数识别稳态图

Fig. 5 Typical modal parameter identification stabilization figures for Xiangyunyuan A building



(a) 水户皇门 2# (b) 水户皇门 1# (c) 金穗小区 1# (d) 金穗小区 3# (e) 祥云苑 A (f) 祥云苑 B (g) 北岸雅阁 1# (h) 北岸雅阁 2#

图 6 测试高层的 Sap2000 模型图

Fig. 6 Sap2000 models for tested high-rise buildings

充墙的影响用周期折减系数笼统考虑。另外,PKPM 的基础计算和上部结构计算分属于两个子模块,计算时只考虑基础和上部结构的荷载传递,建筑物在基础顶面位置被视为固定端,不考虑基础和上部结构的相互影响,也不考虑地下室范围内的地基土和建筑的相互作用。考虑到 PKPM 软件主要针对设计的使用用途,本文另外采用 Sap2000 软件对结构建模并进行模态分析计算,对 8 座高层建筑用 Sap2000 建模所得到的模型如图 6 所示。

### 3.2 计算模型中填充墙的考虑

在高层建筑建模过程中,填充墙是影响计算频率最不确定的因素之一。为考察填充墙刚度对高层建筑结构动力特性分析的影响,利用 PKPM 软件对高层进行建模外,另外在 Sap2000 软件中对每栋高层建筑建立了 3 种模型,分别是:

- (a) 模型 1 为未考虑填充墙质量和刚度的模型;
- (b) 模型 2 为仅考虑填充墙质量的模型;
- (c) 模型 3 为同时考虑填充墙质量和刚度的

模型。

其中模型 1 对填充墙的质量和刚度影响均不考虑,该模型仅作为空框架(或剪力墙)结构为后续模型作基线对比。模型 2 的建立与 PKPM 软件处理填充墙的方式一致,对于填充墙仅仅计算其等效质量,并按均布线荷载施加到相应梁上,由于填充墙开有门窗洞口等,采用墙体恒载折算系数 0.75,该工况用来与 PKPM 建立的模型进行对比;对于模型 3,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 2.4MPa,泊松比为 0.2,弹性模量  $E_c$ 。根据混凝土弹性模量按插值法取为  $1.85 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ,轴心抗压强度标准值按插值法取为 4.8MPa。在软件中利用自定义材料模拟填充墙,并通过计算耗时与单元尺寸关系曲线对比分析,确定单元的合理尺寸为 1m 的墙体,并将该单元精度应用于其他高层的计算。对于祥云苑 A 在 Sap2000 中的建模 3 种模型如图 7 所示。

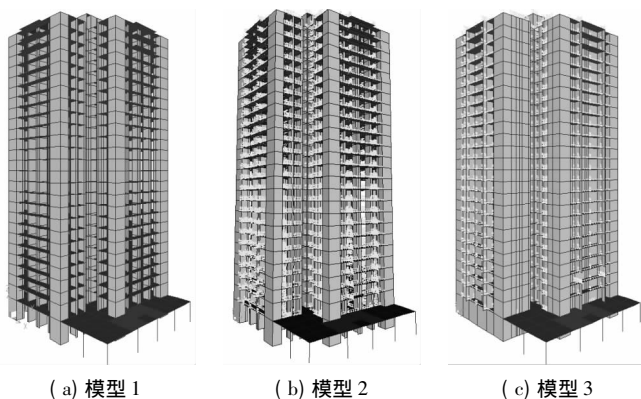


图 7 Sap2000 中 3 种建模方法

Fig. 7 Three modeling methods in Sap2000

### 3.3 祥云苑 A 座测试与计算结果的对比分析

以祥云苑 A 座为例,对利用 LMS 软件分析得到的实测值、PKPM 计算值、Sap2000 建立的 3 种模型的计算值分别列表于表 2 之中,可见实测基频为 1.09Hz,而 PKPM 软件考虑活荷载进行分析计算值为 0.44Hz,实测值为计算值的 2.48 倍。Sap2000 模型 2 考虑填充墙作为线荷载加到墙上,其频率计算值与 PKPM 计算值较为接近,基频为 0.51Hz。其中模型 2 和 PKPM 软件计算结果稍有差别,主要是因为 PKPM 软件中采用墙元而 Sap2000 软件中采用壳元,另外 PKPM 软件中还采用了 0.8 的周期折减系数。利用 Sap2000 中壳单元建立填充墙模型并考虑其刚度同时考虑质量后,计算频率大幅提高,基频增加到 1.33Hz,与实测值较为接近,实测值为计算值的 0.82 倍。同时,图 8 列出了实测祥云苑 A 所测试获得前 10 阶模态振型,图 9 列出了利用 Sap2000 模型 3 所获得的前 10 阶模态振型,

这些结果均反映了模态密集区内  $x$  方向平动,  $y$  方向平动和扭转模态交替出现的情形。

有限元软件建模过程中进行的简化处理,使得计算频率和实测频率之间存在一定的差异。在运用 Sap2000 计算结构动力特性时存在的误差有:未考虑场地土和结构物间的相互作用,仅将结构物在  $\pm 0.000$  处的边界条件设置为固定端;对于楼梯位置,只作了楼板开洞处理,对于电梯井门洞,卫生间和卧室等小面积窗洞,建模中都未进行细致的开洞处理;填充墙建模采用薄壳单元,其对填充墙模拟有增强作用等等。

### 3.4 所有高层测试与计算结果的对比分析

将所测试的 8 栋高层建筑的前 3 阶实测值与计算值列于表 3 之中,发现 3 种模型计算频率变化规律值与祥云苑 A 座较为一致,其中 Sap2000 模型 3 的计算结果与 LMS 软件分析得到的测试结果基本一致,因此在实际工程中,利用这种建模方式对实际高层结构进行抗震性能评估比模型 1 和模型 2 要准确。

## 4 基频计算对比分析

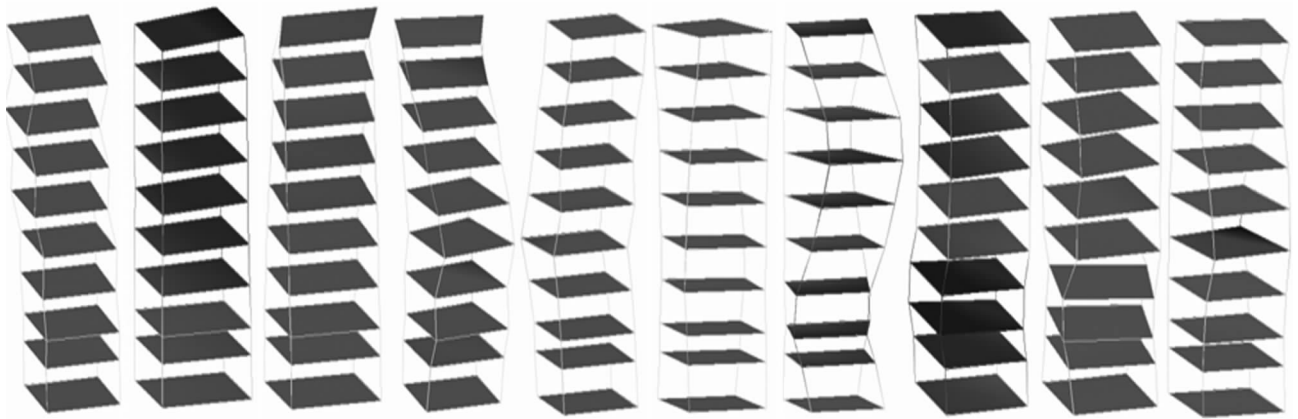
高层建筑结构的自振周期是结构固有的基本动力学特性,它是判断高层建筑刚度是否合理、质量和刚度是否匹配的重要依据。我国在抗震设计过程中,计算建筑物受到的地震作用主要采用的方法有:底部剪力法和振型分解反应谱法。在过程中,需要获得地震影响系数  $\alpha$ ,首先要计算结构的基本自振周期  $T$ 。当结构物较复杂,质量和刚度沿高度分布不均匀时,应采用振型分解反应谱法,需要第 1、第 2 和第 3 阶自振周期,按每一阶周期计算相应的地震影响系数,最后由振型组合计算出体系的最大地震反应。

影响结构自振周期的因素很多,如建筑的平面布置形式、立面布置形式、结构的质量分布和刚度分布、所用材料的特性、非结构构件的质量和刚度、非结构构件的分布形式和连接形式、结构物的施工质量以及场地土的情况等。在上述诸多因素中,填充墙沿各个方向分布数量对该方向自振周期影响较大。学者们从理论计算、现场实测和试验分析等多个方面研究了它的获得途径。就基本周期的计算而言,目前结构设计中常用的计算方法大致分为:①精确计算:矩阵迭代法;②近似计算:能量法、等效质量法、顶点位移法;③经验公式计算。经验公式是通过已建成建筑物进行现场动力特性测试,在分析多组试验数据的基础上,利用数学模型进行统计回归,提出一个符合大多数情况的通用公式。本文将用实测值与美国、欧洲、日本、智利和我国规范中的经验公式进行对比,见表 4。

表 2 祥云苑 A 座测试频率与计算频率对比表

Table 2 Comparison of tested and calculated frequencies for Xiangyunyuan A# building (Hz)

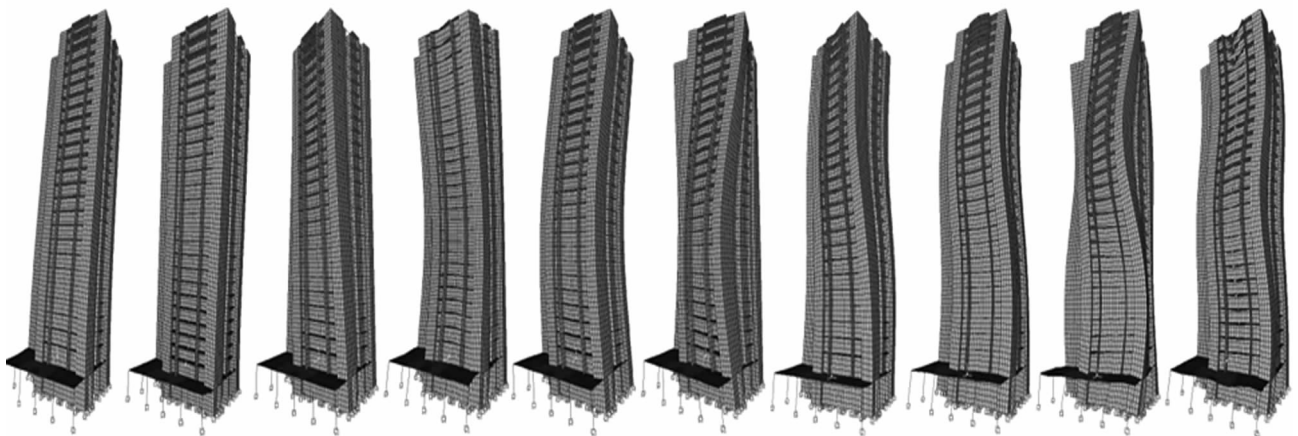
频率数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测值	1.09	1.16	1.25	3.85	3.93	4.18	7.22	7.56	7.81	10.84
PKPM	0.44	0.51	0.53	1.51	1.81	1.84	3.11	3.64	3.81	5.14
SAP(模型 1)	0.63	0.71	0.73	2.23	2.54	2.63	4.61	5.30	5.53	7.54
SAP(模型 2)	0.51	0.59	0.60	1.82	2.12	2.16	3.75	4.37	4.60	6.13
SAP(模型 3)	1.33	1.49	1.98	5.06	5.11	6.18	10.01	10.05	10.46	11.18



(a)  $f_1 = 1.091\text{Hz}$  (b)  $f_2 = 1.156\text{Hz}$  (c)  $f_3 = 1.250\text{Hz}$  (d)  $f_4 = 3.852\text{Hz}$  (e)  $f_5 = 3.927\text{Hz}$  (f)  $f_6 = 4.181\text{Hz}$  (g)  $f_7 = 7.221\text{Hz}$  (h)  $f_8 = 7.555\text{Hz}$  (i)  $f_9 = 7.807\text{Hz}$  (j)  $f_{10} = 10.835\text{Hz}$

图 8 实测祥云苑 A 频率和振型值

Fig. 8 Measured modal frequencies and modal shapes for Xiangyunyuan A building



(a)  $f_1 = 1.334\text{Hz}$  (b)  $f_2 = 1.487\text{Hz}$  (c)  $f_3 = 1.980\text{Hz}$  (d)  $f_4 = 5.057\text{Hz}$  (e)  $f_5 = 5.110\text{Hz}$  (f)  $f_6 = 6.178\text{Hz}$  (g)  $f_7 = 10.054\text{Hz}$  (h)  $f_8 = 10.457\text{Hz}$  (i)  $f_9 = 11.183\text{Hz}$  (j)  $f_{10} = 15.678\text{Hz}$

图 9 模型 3 计算祥云苑 A 频率和振型值

Fig. 9 Calculated modal frequencies and mode shapes for Xiangyunyuan A building using Model 3

(a) 1997 美国 UBC 规范<sup>[22]</sup>中规定: 对于所有的结构物, 其基本自振周期可近似按照下列公式计算:

$$T = C_i (h_n)^{3/4} \quad (1)$$

式中: 对于混凝土框架和偏心支撑框架  $C_i = 0.0731$ , 对于其他结构物  $C_i = 0.0488$ ;  $h_n$  为基础顶面到结构物第  $n$  层的高度 (m)。对于剪力墙结构,  $C_i$  值可

取  $0.0743 / \sqrt{Ac}$ 。

(b) 欧洲规范<sup>[23]</sup>中规定, 对于钢筋混凝土剪力墙结构, 其基本自振周期估算公式可按下式计算:

$$T = 0.05H^{3/4} \quad (2)$$

(c) 日本建筑标准法<sup>[24]</sup>中规定, 抗震设计时, 对于混凝土框架-剪力墙结构, 其基本自振周期可采用如下

表 3 所有高层前三阶测试和计算频率  
Table 3 Calculated first three measured and calculated modes (Hz)

高层及阶数	LMS 测试值	PKPM 计算值	SAP2000 模型 1	SAP2000 模型 2	SAP2000 模型 3
1st	0.71	0.28	0.48	0.37	0.86
北岸雅阁 1# 2nd	0.84	0.29	0.50	0.38	1.13
3rd	0.96	0.37	0.58	0.45	1.79
1st	0.80	0.28	0.48	0.35	0.98
北岸雅阁 2# 2nd	0.89	0.30	0.53	0.39	1.28
3rd	1.05	0.38	0.64	0.47	1.96
1st	0.76	0.29	0.40	0.33	0.92
金穗小区 1# 2nd	0.83	0.30	0.44	0.36	1.01
3rd	0.84	0.43	0.46	0.38	1.47
1st	0.62	0.28	0.37	0.30	0.67
金穗小区 3# 2nd	0.68	0.29	0.38	0.31	0.82
3rd	0.78	0.36	0.41	0.34	1.43
1st	1.09	0.44	0.63	0.52	1.33
祥云苑 A 座 2nd	1.16	0.51	0.71	0.60	1.49
3rd	1.25	0.53	0.73	0.60	1.97
1st	1.09	0.43	0.64	0.52	1.33
祥云苑 B 座 2nd	1.16	0.51	0.71	0.60	1.49
3rd	1.27	0.54	0.74	0.61	1.97
1st	0.56	0.23	0.31	0.25	0.63
水户皇门 1# 2nd	0.64	0.24	0.32	0.26	0.72
3rd	0.98	0.28	0.35	0.28	1.15
1st	0.70	0.27	0.38	0.31	0.74
水户皇门 2# 2nd	0.71	0.28	0.44	0.35	0.77
3rd	0.82	0.32	0.46	0.37	1.46

估算公式:

$$T = 0.07 \frac{H}{\sqrt{B}} \sim 0.13 \frac{H}{\sqrt{B}} \quad (3)$$

(d) Guendelman<sup>[25]</sup> 经过统计智利 2010 年前建成的 2622 栋建筑的基本周期, 建议建筑结构基本周期的

合理分布范围取为:

$$T = 0.014H \sim 0.025H \quad (4)$$

由于本文所研究的高层建筑尚无人居住, 无家具等荷载, 因此在比较过程中取偏刚的下限周期值。

(e) 我国 2012 荷载规范<sup>[26]</sup> 规定: 钢筋混凝土剪力墙结构的基本自振周期按下式计算:

$$T = 0.03 + 0.03 \frac{H}{\sqrt[3]{B}} \quad (5)$$

以上式中:  $H$  为房屋总高度 (m);  $B$  为房屋宽度 (m)。

将各高层测试模态结果与 5 种基本周期估算经验公式相互比较, 发现美国规范和我国规范均高估了实际结构的基频, 而欧洲规范、日本规范和 Guendelman 的统计数据均低估了实际结构的基频。其中美国规范的基频估计值最大, 而 Guendelman 的基频估计值最小。

### 5 结论

本文对广西来宾高层建筑结构振动测试项目进行详细介绍, 对来宾市中心区 4 个小区共 8 栋高层建筑进行了环境激励下结构的振动测试, 进行工作模态分析获得结构的振动模态频率。对高层结构利用 PKPM 软件和 Sap2000 进行了多工况建模分析, 最后与 5 个国家或地区对于基频估计值与实测值进行对比, 得到的基本结论如下:

(1) 在高层建筑的环境激励测试过程中, 通过设置若干测点作为参考层, 移动若干测点作为测试层, 能够解决传感器数目过少的困难, 基本思想与分片子结构测试类似, 从实际测试效果看, 该方法能准确获得结构的前若干阶频率和振型, 但由于移动层和参考层的振型测试在不同时间测试, 与信号各态历经平稳随机过程不符, 造成其振型显得不光滑。

(2) 高层结构的测试表明, 模态频谱中的峰值显示出模态密集区的典型特征, 在每个密集区内分别存在  $x$  方向平动、 $y$  方向平动和整体扭转 3 个不同模态,

表 4 实测与经验公式估算基本频率对比表

Table 4 Comparison of tested frequencies with those estimated by empirical equations (Hz)

项目分类	水户皇门 1#	水户皇门 2#	金穗小区 1#	金穗小区 3#	祥云苑 A 座	祥云苑 B 座	北岸雅阁 1#	北岸雅阁 2#
实测基频	0.708	0.803	0.760	0.618	1.091	1.087	0.563	0.703
美国规范	1.218	1.437	1.375	1.118	2.051	1.978	1.069	1.301
欧洲规范	0.526	0.601	0.601	0.542	0.708	0.708	0.652	0.702
日本规范	0.697	0.689	0.793	0.682	0.943	0.941	0.815	0.884
Guendelman 下限	0.558	0.668	0.668	0.581	0.831	0.831	0.744	0.821
我国规范	0.859	0.904	0.991	0.859	1.187	1.188	1.044	1.136



这3阶模态出现的顺序和结构特性有关。需要通过 $x$ 方向和 $y$ 方向频率的独立分析辨识和提取出这3种类型的模态。

(3) 通过对8栋高层建筑的实测值与计算值对比分析,实测值比PKPM软件建模所获得的结构基频的计算值要高2倍以上。通过在Sap2000中分别考虑了填充墙的刚度和质量所建立的3种模型比较分析,发现用壳单元合理模拟填充墙并合理划分单元精度,所得到的计算模型预测值与测试结果最为接近。该模型可用于对结构进行精确的抗震评估和分析。

(4) 通过对美国、欧洲、日本、智利和中国基本周期估算经验公式相互比较,发现美国规范和我国规范均高估了实际结构的基频,而欧洲规范、日本规范和智利公式均低估了实际结构的基频。

由于地基条件模拟的复杂性,本文未对结构地基刚度进行模拟。另外,由于本次测试结构均为刚竣工结构,未有任何装修及家具荷载,因此本文计算得到的高层结构的频率值比使用过程中的高层结构的频率值要相对偏高,特此说明。

#### 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] Brownjohn J M W, Pan T C, Deng X Y. Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high-rise building [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(4): 523-543
- [3] Brownjohn J M W. Ambient vibration studies for system identification of tall buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(1): 71-95
- [4] Sasaki A, Satake N, Tamura, et al. Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(4): 470-477
- [5] 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 & Structural Dynamics*, 2004, 33(14): 1311-1336
- [6] Wu J R, Li Q S. Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(7): 979-990
- [7] J N Yang, Ying L, Lin S, et al. Identification of natural frequencies and dampings of in situ tall buildings using ambient wind vibration data [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 130(5): 570-577
- [8] Chassiakos A G, Masri S F, Nayeri R D, et al. Use of vibration monitoring data to track structural changes in a retrofitted building [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2007, 14(2): 218-238
- [9] Abdelrazaq A, Kochly M, 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
- [10] Giraldo D F, Song W, Dyke S J, et al. Modal identification through ambient vibration: comparative study [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(8): 759-770
- [11] He Y C, Li Q. Dynamic responses of a 492-m-high tall building with active tuned mass damping system during a typhoon [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2014, 21(5): 705 - 720
- [12] Correa T K, 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*, 2013, 139(10): 1675-1687
- [13] Ni Y Q, Xia Y, Liao W Y, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(1): 73 - 98
- [14] Thiruvengadam V. On the natural frequencies of infilled frames [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1985, 13(3): 401-419
- [15] 高小旺,卜庆顺. 多层钢筋混凝土框架房屋周期折减系数和层间弹性位移修正系数的取值 [J]. *建筑结构*, 1993(2): 42-46
- [16] Madan A, Reinhorn, A M. Modeling of masonry infill panels for structural analysis [J]. 1997, 123(10): 1295-1302
- [17] Mosalam K M, White R N, Ayala G. Response of infilled frames using pseudo-dynamic experimentation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, 27(6): 589-608
- [18] Chaker A A, Cherifati A. Influence of masonry infill panels on the vibration and stiffness characteristics of R/C frame buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1999, 28(9): 1061-1065
- [19] Issa M, Al-Chaaf G, Sweeney S. Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(8): 1055-1063
- [20] Amanat K M, Hoque E. A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(4): 495-502
- [21] Asteris P G, Antoniou S T, Sophianopoulos D S, et al. Mathematical macromodeling of infilled frames: state of the art [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(12): 1508-1517
- [22] Uniform Building Code 1997: Structural engineering design provisions [S]. California: International Conference of Building Officials, 1997
- [23] prEN1998-1: 2003. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [S]. London: European Committee for Standardization, 2003
- [24] BSLJ-1994 Building Standard Law in Japan [S]. Tokyo: Building Center of Japan, 1994
- [25] Lagos R, Kupeer M. Performance of high-rise buildings

under the February 27<sup>th</sup> 2010 Chilean earthquake [C]// Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo ,Japan ,2012: 1754-1765

[26] GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012( GB50009—2012 Load code for the design of building structures [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2012( in Chinese )

谭德先( 1962-) 男, 博士研究生。主要从事高层建筑测试与建模方面的研究。

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。

米斯特( 1989-) 男, 硕士。主要从事高层建筑有限元建模分析方面的研究。

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, 结构损伤诊断方面的研究。

谢利民( 1989-) 男, 硕士。主要从事混凝土结构动力测试与结构识别方面的研究。

蒋运忠( 1990-) 男, 硕士。主要从事钢-混凝土组合结构静动力测试与结构建模方面的研究。