

# 大底盘双塔楼高层建筑的随机振动测试 及模型修正研究

易伟建<sup>1</sup> 周 云<sup>1</sup> 覃廖辉<sup>2</sup>

(1. 湖南大学, 湖南长沙 410082; 2. 长沙市规划设计院, 湖南长沙 410007)

摘要: 利用环境随机激励, 对深圳一座 27 层框架-剪力墙结构的大底盘连体双塔高层商业住宅楼模态进行测试, 得到该结构平动及扭转模态测试结果。采用 PKPM 软件中 SATWE 模块对该结构建模分析, 计算得到结构的固有频率和模态振型。经过与各国计算高层建筑的基本周期的经验公式相比较, 发现实测结构的自振频率比理论计算的自振频率要大, 同时大于各国规范经验公式的估计值, 说明该结构的实际刚度较大或实际质量较小。通过考虑地下室的影响以及减小楼面活载和恒载的初步模型修正, 以及把填充墙作为等效斜撑的详细模型修正和对等效斜撑有效宽度的优化, 修正后的计算固有频率和实测固有频率基本符合, 说明本文方法可用于高层建筑结构模型修正。

关键词: 大底盘双塔楼; 高层建筑; 随机振动测试; 实验模态分析; 填充墙模型; 动力模型修正

中图分类号: TU317<sup>+.1</sup> 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2009) 02-0065-08

## Measurement of ambient vibration of a twin-tower building with enlarged base and model modification

Yi Weijian<sup>1</sup> Zhou Yun<sup>1</sup> Qin Liaohui<sup>2</sup>

(1. Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Changsha Academy of Urban Planning and Design, Changsha 410007, China)

**Abstract:** A modal experiment of a full-scale 27 story frame-shear wall high-rise building structure was conducted, using ambient vibration measurements. The building consists of two towers connected by air corridors and an enlarged base. The natural frequencies, translation and torsion mode shapes were measured, and the analytical natural frequencies and mode shapes were obtained by using the SATWE module of the software, PKPM. In comparison with the empirical formulas for calculation of the fundamental frequency of tall buildings in different countries, it is found that the measured fundamental frequency of the structure is higher than the calculated and empirically-evaluated fundamental frequency, indicating either the stiffness of the structure larger than that of the analytical model or the mass of the structure smaller than that of the analytical model. By considering the stiffness effect of the basement of the structure and the actual load on the floors, a primary model update was conducted. Then the infill-wall was modeled as an equivalent inclined brace and its width was optimized in the final model updating. After model updating, the calculated natural frequencies agree well with the measured data, illustrating that the method can be used in model updating of high-rise building structures.

**Keywords:** twin-tower structure with enlarged base; tall building; random vibration measurement; experimental modal analysis; infill wall model; dynamic model updating

**E-mail:** hunuyi2006@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (50678064)

作者简介: 易伟建, 博士, 教授

收稿日期: 2007-10-22

# 引 言

随着高层建筑的迅速发展，大底盘多塔楼结构受到人们的青睐。该结构的特点是底部几层设置为大底盘裙房，上部采用两个或两个以上的塔楼为主体结构，上部塔楼之间可采用空中走廊连接，能方便双塔楼的联系。对于高层建筑和结构的现场模态测试国内外有许多学者进行了研究。Brownjohn<sup>[1-2]</sup>等对框架-核心筒结构的新加坡人民广场大厦进行了实地测试，并分析了多种因素的影响。Li<sup>[3]</sup>等对 325 m 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，并进行了外弦支撑带和垂直支撑对结构动力特性的影响分析。Wu<sup>[4]</sup>等利用基于灵敏度的有限元模型修正方法对 310 m 高的南京电视塔的实测数据进行了模型修正研究，考虑 6 种模型修正工况以及不同的参数修正组合。Chassiakos<sup>[5]</sup>等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。国内学者从 20 世纪 90 年代初开始对底部大空间多塔楼结构的特性进行了研究。但是对该类结构的动力性能实测研究未见文献报道。

进行高层建筑结构的动力特性测试时，填充墙对于结构动力特性的影响不能忽视，影响其刚度的主要因素有填充墙的数量、开洞情况以及界面尺寸和材料强度。由于填充墙的加入，其刚度比空框架大很多，遭遇地震时受到地震作用越大，使得框架的抗震设计越不安全。Chaker 等<sup>[6]</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，在风脉动情况下填充墙框架的基本周期远小于空框架的基本周期。Thiruvengadam 等<sup>[7]</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。高小旺等<sup>[8]</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层间弹性位移分布规律，给出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。Amanat 等<sup>[9]</sup>建立三维有限元模型，对影响结构自振周期因素进行数值模拟，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。

本文将深圳一座框架-剪力墙结构的大底盘连体双塔楼高层商业住宅楼为例，利用随机振动测试法对结构进行现场动力参数实测，得到结构振动模态信息，然后用 SATWE 软件对结构建模并进行模态分析，对测试结果与计算结果进行了比较和分析。在商业软件中采取考虑地下室、减去活载、减小恒载等初

步模型修正，对填充墙采用双向等效斜撑模型进行进一步详细模型修正，使测试频率值与计算频率值较好地符合。

## 1 大底盘双塔楼联体结构场地模态测试

### 1.1 瑞华大厦简介

瑞华大厦位于深圳南山区，见如图 1（测试时塔吊已去除）。总建筑面积 27577.28 m<sup>2</sup>，建筑占地面积 1217.68 m<sup>2</sup>，结构形式为钢筋混凝土框支剪力墙结构，建筑高度 86.35 m，主体结构地上 27 层，地下 2 层，群房层数 3 层。混凝土强度在 C35~C45 之间。基础形式为预应力管桩，基础持力层为花岗岩强风化层，地基承载力标准值 2800 kN/m<sup>2</sup>。本工程的双塔关于轴线单轴正对称，其中在 7、9、11、13、15、17、19、21、23、25 层设置不在平面形心轴线的天桥（见图 2），27 层设置了面积更大的天桥，作顶层活动区及下部天桥档雨之用。主体结构的每座塔楼中间设有两部电梯的电梯井和楼梯共同组成的核心筒，核心筒伸出屋面成为炮楼形式。



图 1 瑞华大厦全景  
Fig. 1 Panorama of the Ruihua Building

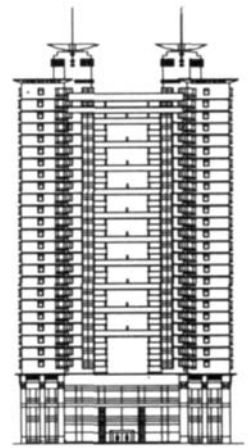


图 2 瑞华大厦正立面图  
Fig. 2 Front view of the Ruihua Building

### 1.2 环境激励下模态参数识别方法

同时考虑风和地脉动（以风为主）作为环境干扰，可提高结构测量反应的信噪比，但此时输入源不明确，只能获得结构的反应频谱。利用结构反应频谱估计传递函数幅值用于结构模态的识别，需假定输入源为有限带宽白噪声，即在一定范围内输入功率谱  $S_{xx}(\omega)$  为常数  $a$ ，由此有式 (1)：

$$|H(\omega)|^2 = S_{yy}(\omega) / S_{xx}(\omega) = S_{yy}(\omega) / a \quad (1)$$

在分析过程中，系统输入为未知，仅利用系统的响应信号来确定系统的部分参数。利用结构测试信号的自谱和两个信号的互谱，在固有频率位置会出现峰

值，固有频率处，两测点信号之间的相干函数接近 1，相位角为 0°或 180°，用不同测点在固有频率响应的比，获得固有振型。

### 1.3 环境激励下模态参数识别方法

对该楼的动力测试工作于 2 月进行，此时该座大厦已经完工，正处于售楼阶段，初步装修已经做完，室内无家具等附属质量。测试仪器为 DASP 振动信号分析与采集设备，包括高灵敏度超低频 INV-9898 型的压电加速度传感器 2 只，频率范围 0~100 Hz；电荷放大器 1 台；INV303 分析仪器 1 台。测点的布置考虑到扭转测试和平动测试，如图 3~5 所示。测试方法如下：

(1) 扭转模式的测试。共进行 3 次测试。X 和 Y 方向如图 3 所示。利用 A-A 方向放置两个传感器进行标定，在 A-B 点的 X 方向和 A-C 点 Y 的方向进行测试，采样 64 页（每页采样点数 512 点）。在第 14 层走廊测试扭转模式用来验证顶层扭转振动，E~F 点 X 方向，F-G 点 Y 方向，采样 64 页，如图 4 所示。

(2) 整体平动振型的测试。以 24 层顶（25 楼）D 点为基准点，放置一传感器，另外一传感器分别放置在 28、20、16、12、8、4 层的 D 点，分别测试 X 方向与 Y 方向的平动模式，采样 64 页。

测试得到的互功率谱图如图 6~9 所示，识别得到的前若干阶模态振型图如图 10 所示。本次试验测得大厦的基本频率为 0.684 Hz，为 X 方向平动。若干阶振型按模态密集区分类，每个密集区中分别存在 X 方向平动、Y 方向平动和扭转振动，分别存在第一、第二、第三模态密集区，由于信号噪声污染以及识别精度误差，未能将密集区中每阶模态识别出来。测量结果能够识别出三阶扭转振动，分别为 1.172 Hz，3.809 Hz，9.082 Hz。

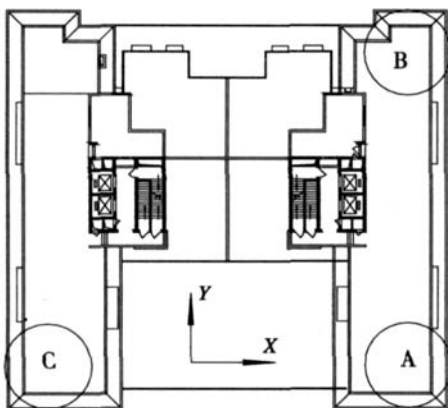


图 3 顶层测点布置图

Fig. 3 Placement of measurement point on the top story

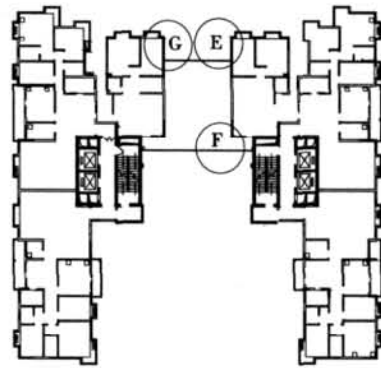


图 4 第 14 层测点布置图

Fig. 4 Placement of measurement point on the 14th story

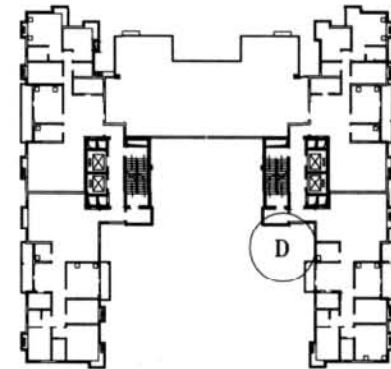


图 5 标准层测点布置图

Fig. 5 Placement of measurement point on the standard story

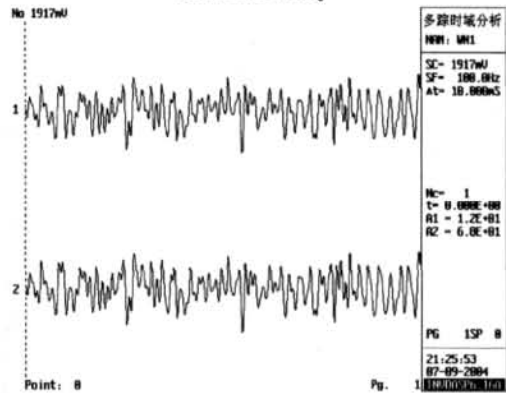


图 6 A-A 点 X 方向传感器标定图

Fig. 6 Calibration of the transducer on A-A point in X direction

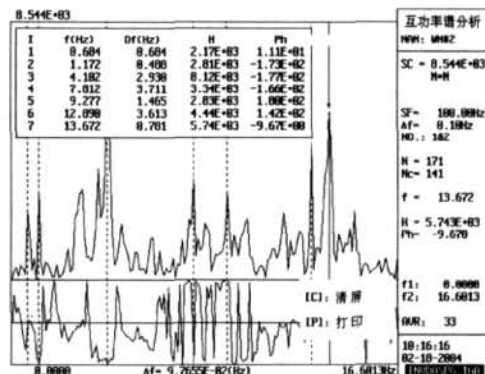


图 7 顶层 A-B 点 X 方向互谱图

Fig. 7 Cross power spectrum on A-B point in X direction



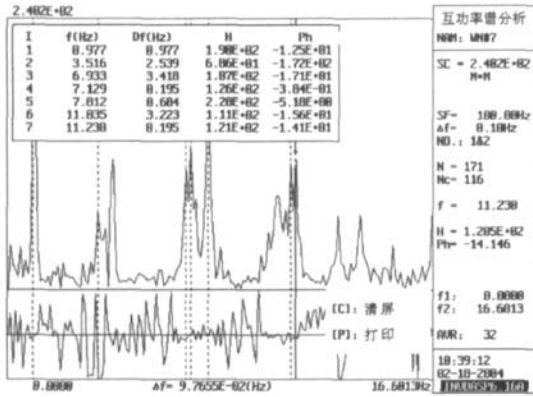


图 8 24层~20层 D点 Y方向互谱图  
Fig. 8 Cross power spectrum on D point on 24~20 story in Y direction

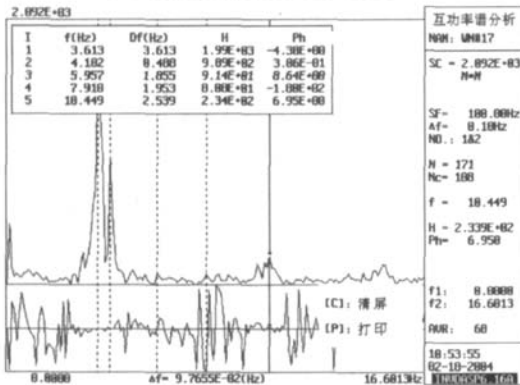


图 9 14层 F-G点 Y方向互谱图  
Fig. 9 Cross power spectrum on F-G point on 14 story in Y direction

## 2 计算分析与比较

### 2.1 计算模态分析

该结构原设计单位利用广厦结构计算软件进行计算，本文利用 PKPM 软件根据竣工图重新建模计算，如图 11 所示。

PKPM 软件中 SATWE 模块采用空间杆单元模拟梁、柱及空间构件，用在壳元基础上凝聚而成的墙元模拟剪力墙。对剪力墙体系的结构，结构模型化时所受的限制要少。计算得到结构前 12 阶模态如表 1 所示，以下分析均以该次计算结果作为参考。楼房的自振频率只与结构柱子和剪力墙的数量和位置以及楼层的质量有关，即与刚度和质量有关，其他的因素影响小。高阶的振型全都是扭转振动，主要是“凹”型建筑的开口端的不同的振动形式，这也是此种建筑的特点和弱点之一。

### 2.2 与经验公式的比较

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002) 建议的简化计算公式，框架-剪力墙和框架-筒体结构的周期  $T = (0.08 \sim 0.1) N$ ，计算得到基本周期为 2.16 s~2.7 s，即频率在 0.46 Hz~0.37 Hz 之间，理论计算的自振频率在其范围之内而测量结果在其之外。对房屋周期的估算，文献 [10] 对日本 1977 年

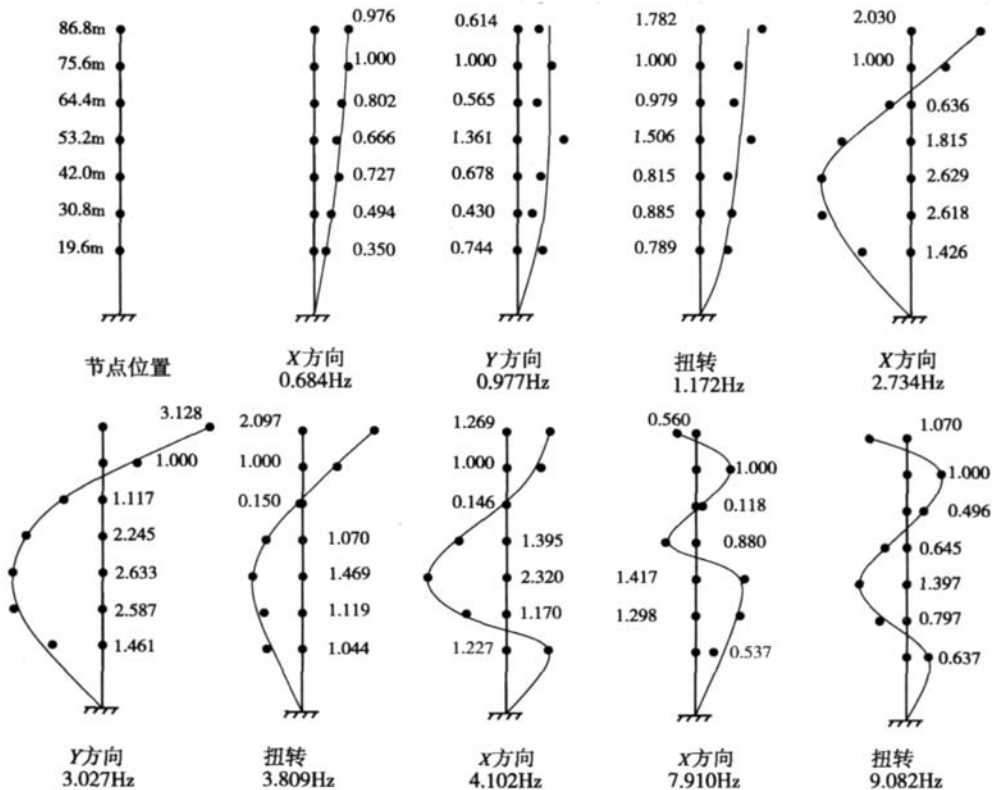


图 10 测试得到平动振型图  
Fig. 10 Transverse vibration shapes by measurement

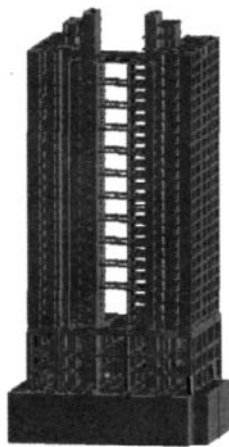


图 11 由 SATWE 建立的模型图  
Fig. 11 The SATWE model

新抗震设计法（草案）、美国 1978 年建筑物抗震设计暂行条例以及我国抗震规范背景材料等进行了总结，拟建房屋的自振周期可借鉴已建同类房屋的脉动周期，但是脉动法测得的房屋自振周期仅反映微小变形下的结构动力特性。一些非结构部件也参加了工

作，使周期偏短。地震期间，房屋将产生较大变形，结构出现一些细微裂缝，刚度下降，一些非结构部件和连接退出工作，自振周期变长。有资料表明，1971 年美国 San Fernando 发生 6.6 级地震时，位于 8 度区内的洛杉矶市，记录到 70 余幢高层建筑的自振周期，实测数据表明，地震期间房屋的基本周期为震前周期的 1.1~2.0 倍，震后略有恢复，是震前的 1.0~1.4 倍。本结构和各国经验公式对比见表 2。

文献 [11] 指出，在估算新建高层建筑的自振周期时，不能直接引用脉动实测周期，而应将它乘以 1.5 左右的放大系数。测试得到自振频率 0.684 比计算得到的频率值 0.402 高了 1.7 倍，说明该结构形式实际刚度较大。工程设计人员感兴趣的问题是设计结构得到的固有频率计算值与实测值之比是多少，以便合理地选择周期折减系数来计算地震力，而由于结构复杂不可能进行精确的模型修正研究，因此直接利用商业设计软件进行模型修正具有现实和重要的意义。

表 1 计算模态分析值  
Table 1 Value from calculating modal analysis

工况	$f_1(Y)$	$f_2(X)$	$f_3(T)$	$f_4(Y)$	$f_5(T)$	$f_6(X)$	$f_7(Y)$	$f_8(T)$	$f_9(X)$	$f_{10}(Y)$	$f_{11}(Y)$	$f_{12}(Y)$
原始数据	0.402	0.496	0.518	1.537	1.698	1.763	2.954	3.159	3.489	4.482	4.843	5.666

(Hz)

注：X 指 x 方向平动模态，Y 指 y 方向平动模态，T 指扭转模态（以下各表相同）。

表 2 计算与实测基本频率对比表  
Table 2 Comparison of the natural frequencies between calculation and measurement

分类	日本 1977	美国 1978	我国抗震规范背景材料	计算机归纳	实测
$T_1$ 公式	0.06N	0.05H/√B	0.33+0.00069×H×√B	0.065N	—
$T_1(s)$	1.620	1.237	1.601	1.755	1.460
$f_1(Hz)$	0.617	0.808	0.625	0.570	0.684

### 3 大底盘双塔楼结构的模型修正研究

在设计工作中，常常将结构按照最不利的情况考虑，楼层质量根据“荷载规范”按恒载+活载的方式加以考虑；对于填充墙的影响则不考虑填充墙的刚度作用，而仅把填充墙当作条形荷载施加于梁上；本结构有地下室两层，地下为预应力管桩，通常商业计算软件不考虑地基与结构共同作用的影响，把±0.000 处的位置作为固定端。而实际上，刚竣工售楼的毛坯房其活载为 0，恒载仅为楼板质量；填充墙体不仅仅对质量有影响，还对刚度有影响；地下室的楼层也会有影响。本节将对这些因素加以考虑。

#### 3.1 初步模型修正

由于结构设计人员在设计一座建筑结构之前无法

预料到结构承受载荷的大小，因此通通按最不利的情形加以考虑，由此计算的频率往往偏小很多，这种影响未有人进行比较。在初步模型修正中，主要通过调整是否考虑地下层，是否考虑活荷载和恒载对结构动力特性的影响，本节设计各种工况如表 3 所示，初步修正计算频率比较见表 4。

通过实测值与各工况的比较，可以看到考虑地下室对结构频率影响不大，且通常结构设计中将±0.000 作为基准位置，因此在以下的各工况中均不考虑地下室的影响。通过逐步减小活载和恒载使得计算频率值有逐步提高，实测频率与计算频率比从 1.70 降到 1.51，与文献 [11] 描述的 1.5 的差距相符。说明通过初步调整，实测频率与计算频率之间会存在约 50% 的差距，实际工程中则可以通过初步调整后的频率值估算竣工阶段建筑结构实际频率的大小。

表 3 初步模型修正的工况比较

Table 3 Comparison of cases in initial model updating

工 况	工况描述
Case 1	考虑 2 层地下室的影响
Case 2	基于 Case 1, 去除活荷载
Case 3	基于 Case 2, 恒载仅考虑楼板重量

3.2 详细模型修正

在填充墙框架结构设计中, 当计算填充墙框架的动力特性时, 通常采用调整系数法, 即对填充墙只考虑重量而不计算其刚度, 计算所得房屋的基本周期乘以调整系数予以降低, 计算之地震荷载全分配给所有框架, 不考虑填充墙本身承受地震作用的能力。文献 [12] 通过推导发现, 空腹框架的抗侧刚度小于 1.26 倍填充墙的抗侧刚度时, 抗震设计对空框架是不安全

的。现有的框架填充墙结构的计算模型主要有: 墙、框并联模型、等效斜撑模型、等效平面框架模型、带窗洞的简化模型、三个等效支撑模型等<sup>[12-13]</sup>。

对于高层结构, 斜撑模型更利于应用到商业软件结构建模和分析中。如图 12 所示, 本文将斜撑模型改进为等效斜撑模型, 文献 [12] 通过计算和实测表明等效斜撑模型更能较好地描述实际结构。该模型有 3 个参数: 厚度  $t$ 、弹性模量  $E$  和支撑杆件宽度  $h$ ,  $t$  取实际墙体厚度, 弹性模量取实际墙体模量, 支撑杆宽度取为未知量, 为区别带窗墙和实心墙的区别, 简化处理取带窗墙斜支撑杆件宽度为实心墙的 1/2。通过搜索支撑杆件宽度来确定最优的支撑杆宽度。设计详细模型修正各工况比较如表 5 所示, 详细修正计算频率比较如表 6 所示。

表 4 初步修正计算频率比较

Table 4 Comparison of the numerical frequencies by initial model updating

工 况	$f_1(X)$	$f_2(Y)$	$f_3(T)$	$f_4(X)$	$f_5(Y)$	$f_6(T)$	$f_7(X)$	$f_8(T)$	$f_9(Y)$	$f_{10}(X)$	$f_{11}(T)$	$f_{12}(T)$
实测值	0.684	0.977	1.172	2.734	3.027	3.809	4.102	—	—	7.910	9.082	—
Case 1	0.402	0.496	0.518	1.537	1.698	1.763	2.954	3.159	3.489	4.482	4.843	5.666
Case 2	0.416	0.514	0.536	1.596	1.754	1.846	3.073	3.268	3.675	4.679	5.003	5.959
Case 3	0.452	0.559	0.585	1.732	1.900	2.003	3.317	3.524	3.965	5.048	5.400	6.435

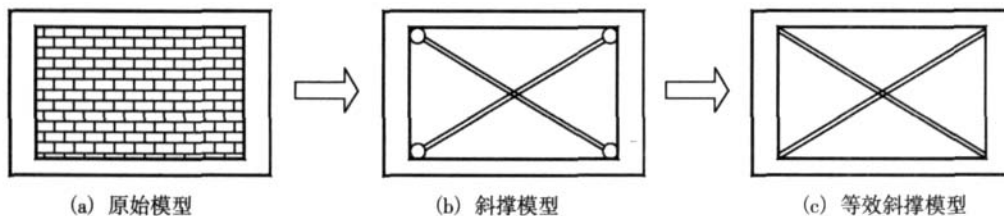


图 12 简化斜撑模型示意图

Fig. 12 Simplified inclined brace

表 5 详细模型修正各工况比较

Table 5 Comparison of the cases by detailed model updating

工 况	工 况 描 述
Case 4	在 Case 3 的基础上, 交叉斜撑实心墙设为 250 mm×600 mm, 带窗墙设为 250 mm×300 mm
Case 5	在 Case 3 的基础上, 交叉斜撑实心墙设为 250 mm×400 mm, 带窗墙设为 250 mm×200 mm
Case 6	在 Case 3 的基础上, 交叉斜撑实心墙设为 250 mm×300 mm, 带窗墙设为 250 mm×150 mm
Case 7	在 Case 3 的基础上, 交叉斜撑实心墙设为 250 mm×250 mm, 带窗墙设为 250 mm×125 mm
Case 8	在 Case 3 的基础上, 交叉斜撑实心墙设为 250 mm×200 mm, 带窗墙设为 250 mm×100 mm

表 6 详细修正计算频率比较

Table 6 Comparison of the numerical frequencies by detailed model updating

工 况	$f_1(X)$	$f_2(Y)$	$f_3(T)$	$f_4(X)$	$f_5(Y)$	$f_6(T)$	$f_7(X)$	$f_8(T)$	$f_9(Y)$	$f_{10}(X)$	$f_{11}(T)$	$f_{12}(T)$
实测值	0.684	0.977	1.172	2.734	3.027	3.809	4.102	—	—	7.910	9.082	—
Case 4	0.652	1.031	1.104	2.406	3.184	3.348	5.066	6.549	6.702	7.880	9.960	10.215
Case 5	0.660	1.022	1.083	2.420	3.142	3.248	4.978	6.196	6.378	7.734	9.515	9.852
Case 6	0.660	1.008	1.059	2.417	3.097	3.171	4.900	5.952	6.154	7.593	9.174	9.579
Case 7	0.659	0.997	1.041	2.411	3.064	3.121	4.843	5.807	6.017	7.491	8.969	9.407
Case 8	0.655	0.979	1.019	2.400	3.018	3.061	4.771	5.637	5.855	7.364	8.711	9.200



将该高层结构的内外填充墙位置处均采用等效斜撑模型,为简化将斜撑宽度统一设定为 250 mm,弹性模量取墙体的弹性模量,斜撑的杆件的宽度按照表 5 用搜索法分别进行计算。如表 6 所示,当斜撑宽度取 250 mm 时,结构的基频及各阶频率与测试频率比较符合,相差仅 1.04 倍。因此,对于本文双塔楼结构,进行填充墙模型修正,设置合理的支撑宽度,

能使结构实测频率与计算频率符合较好,也说明利用商业设计软件进行必要的调整能够对结构进行必要的修正。Case 6 计算得到的各阶振型如图 13 所示,可见高层结构以三个模态为一模态密集区,分别为  $x$  方向平动、 $y$  方向平动和扭转模态组成,而对于高阶模态,则平动和扭转振动中也掺有扭转成分,但是这种扭转的影响随等效斜撑的加入而减弱。

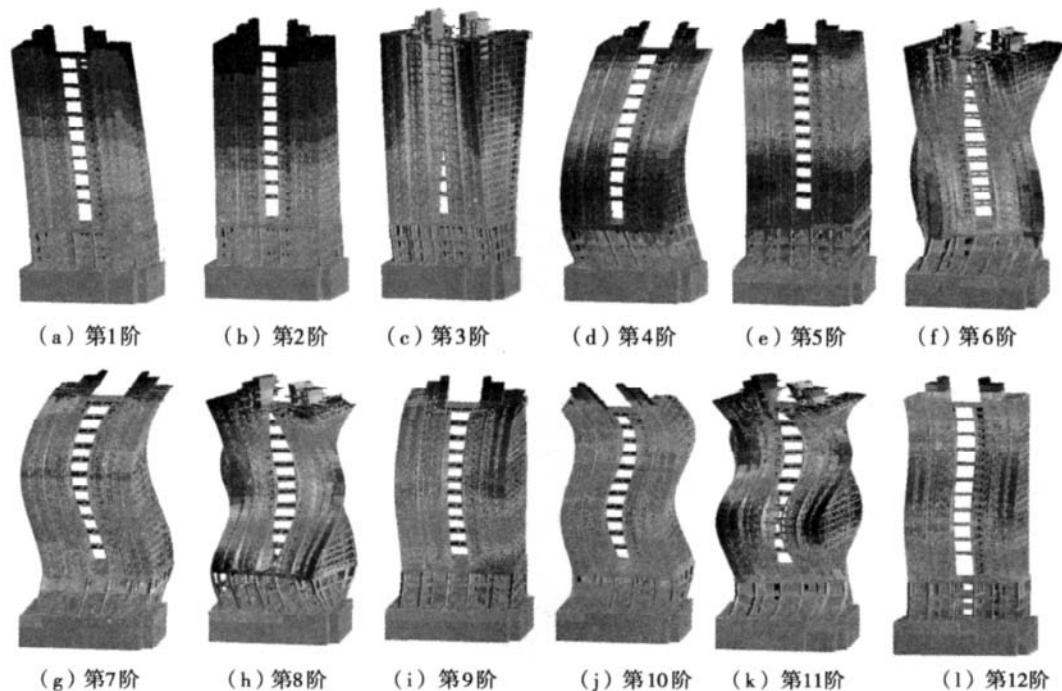


图 13 Case 6 各阶振型图  
Fig. 13 Mode shapes of Case 6

## 4 结 论

本文对深圳一座框架-剪力墙大底盘双塔楼联体结构进行了现场模态测试研究,得到了前若干阶模态振型,利用 PKPM 软件中 SATWE 模块对竣工结构进行实际建模并进行模态分析,对计算模态和实测模态进行对比。利用实测数据,针对结构荷载变化和地下室变化进行了初步模型修正,以及针对填充墙等效模拟进行了详细模型修正,得到主要结论如下:

(1) 对深圳瑞华大厦进行了环境激励下的模态测试,测试得到了前若干阶振动模态。由于连接天桥位置的偏心,该种结构的各阶模态中都存在扭转振动的成分。测试得到的该结构基频为 0.684 Hz,利用 SATWE 软件计算结构基频为 0.402 Hz,两者相差 1.70 倍。

(2) 将测试结果与各种经验公式进行比较,发现该结构的测试基本频率均高于各国规范的经验公式,说明此种结构形式实际刚度较大。这与实际条件与结

构的设计条件不同有关,与地下室的设置、恒载和活载的大小、填充墙的位置和刚度有关。

(3) 考虑地下层结构和减小结构恒载或活载进行的初步模型修正,修正结构的基频为 0.452 Hz,与测试频率相差 1.51 倍,与文献 [11] 提出的修正系数吻合。针对已有的各种填充墙框架模型提出了等效斜撑模型,该模型能够合理地利用现有商业结构设计软件,通过搜索法进行等效斜撑模型的有效宽度选择,当  $h=250$  mm 时结构的测试频率与结构计算频率相符较好,相差 1.04 倍。本文提出的模型修正方法可用于进行高层结构设计的基本周期估算。

## 参 考 文 献

- [1] 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 and Structural Dynamics, 2000,29(4) 523-543
- [2] Brownjohn J M W. Ambient vibration studies for system identification of tall buildings [J]. Earthquake Engin-

- eering and Structural Dynamics, 2003, 32(1) :71-95
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Chaker A A, Cherifati A. Influence of masonry infill panels on the vibration and stiffness characteristics of R/C frame buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(9): 1061-1065
- [7] Thiruvengadam V. On the natural frequencies of infilled frames [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1985, 13(3):401-419
- [8] 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 (Gao Xiaowang, Pu Qingshun. The value of period reduction coefficient and the elastic storey displacement correction coefficient in multistorey frame structure [J]. Building Structure, 1993, 2: 42-46 (in Chinese) )
- [9] 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
- [10] 冶金工业部建筑研究总院工程抗震研究室. 九国抗震设计规范汇编 [M]. 北京: 地震出版社, 1982
- [11] 刘大海, 杨翠如, 钟锡根. 高层建筑抗震设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [12] 李常青. 填充墙框架结构动力模型修正研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004 (Li Changqing. Dynamic model modification of infilled frame [D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese))
- [13] 秦鹏. 框架填充墙结构的动力试验与研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004 (Qin Peng. Dynamic experiment and analytical study of infilled frames [D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese))
- [8] 高小旺, 卜庆顺. 多层钢筋混凝土框架房屋周期折减系

易伟建 (1954-), 男, 博士, 教授。主要研究混凝土结构理论, 结构抗震与健康监测。

周 云 (1979-), 男, 博士研究生。主要从事结构损伤诊断研究及参数识别研究。

覃廖辉 (1980-), 男, 学士, 工程师。主要从事建筑结构设计工作。