

# 基于环境振动的某设置防震缝结构的动力特性\*

刘佩<sup>1,2†</sup>, 连鹏宇<sup>1</sup>, 张茉颜<sup>1</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 窦蕾<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘要:**对于设置防震缝的既有相邻结构,防震缝的塞缝和盖缝处理措施可能引起相邻结构间的动力相互作用,由此引起的模态会增加模态参数识别的复杂程度.以利用悬臂构件形成防震缝的某钢筋混凝土办公楼为例,该办公楼由主楼、东楼和西楼三部分组成,在各相邻结构内分别进行环境振动测试,利用频域分解法对其模态参数进行识别,得到了主楼和东楼的四阶及西楼的两阶自振频率、阻尼比和振型.由于各相邻结构间存在因防震缝的填缝措施引起的相互作用,导致一个结构的自振频率和由相互作用产生的频率混杂在一起.各结构有限元模型的自振频率和振型与识别结果吻合较好,但由于结构间的相互作用增强了整栋建筑的整体性,主楼和东楼的有限元模型的第三阶扭转频率均小于识别结果.对设置防震缝的相邻结构来说不应总是假定相互之间是独立的.

**关键词:**环境振动;防震缝;相邻结构;模态参数识别;有限元分析

**中图分类号:**TU311

**文献标志码:**A

## Dynamic Characteristics of a Building with Seismic Joints Based on Ambient Vibration

LIU Pei<sup>1,2†</sup>, LIAN Pengyu<sup>1</sup>, ZHANG Moyan<sup>1</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, DOU Lei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Technical solutions for sealing and covering seismic joints may induce dynamic interactions between as-built adjacent structures. Moreover, noise modes due to dynamic interactions make modal parameter identification complex. In this paper, ambient vibration tests were conducted to obtain the actual dynamic characteristics of a reinforced concrete office building, whose seismic joints were formed by cantilever members. The tested building was divided into the main building, eastern building and western building. Tests were conducted in each structural part separately. Four modes of the main building and eastern building, and two modes of the western building were identified using the frequency domain decomposition method. The results show that due to the dynamic interactions between adjacent structures caused by the infill of the seismic joints, natural frequencies of a structure were mixed together with those due to the interactions with the adjacent structures. Modes of each building from the finite element models agreed well with the identification results, except that the third natural frequencies of the main building and eastern

\* 收稿日期:2015-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208030), National Natural Science Foundation of China (51208030);中央高校基本科研业务费(2014JBM100), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014JBM100);北京交通大学大学生创新性实验计划项目, Undergraduate Innovation Training Program of Beijing Jiaotong University

作者简介:刘佩(1982-),女,河北石家庄人,北京交通大学副教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: liupeio130@126.com

building were smaller than the identified ones, because the integrity of the whole building was enhanced by the dynamic interactions. Therefore, it should not always be assumed that adjacent structures with seismic joint are independent.

**Key words:** ambient vibration; seismic joint; adjacent structures; modal parameter identification; finite element analysis

对于体型复杂、平立面不规则的建筑,常在适当部位设置防震缝,形成多个较规则的抗侧力结构单元,设置了防震缝的相邻结构在既有建筑中广泛存在。历次地震的震害表明,防震缝处的碰撞破坏是结构常见的损伤形式<sup>[1-4]</sup>。由于使用功能的要求,结构建成后一般需要对防震缝进行塞缝和盖缝处理。对设防震缝的结构进行设计和分析时,一般假定防震缝两侧的结构是相互独立的。但在地震作用下,防震缝中的填充物可能引起相邻结构之间力的传递,进而导致相邻结构的碰撞破坏<sup>[5]</sup>。因此防震缝的填缝措施是否会对既有相邻结构的动力特性产生影响,对预测其在地震作用下的碰撞响应进而对其提出修复加固方案至关重要。

环境振动测试是得到足尺结构实际动力特性的有效手段,已被用于许多建筑结构的动力特性实测中<sup>[6-11]</sup>。基于环境振动测试进行模态参数识别在实际工程中应用时,存在的最大问题是如何判断识别得到的模态参数中哪些是真实模态,哪些是虚假模态。大部分运行模态参数识别方法都假定输入激励为高斯平稳白噪声过程,尽管很多实例表明,如果输入激励不完全满足该假定,但当功率谱足够光滑的时候,这些方法仍然适用,但是由于激励的主导频率与结构的自振频率混杂在一起,增加了识别的复杂程度。对于土木工程结构来说,识别得到的可疑的模态参数也可能来源于相邻结构的动力相互作用。Rainieri等<sup>[12]</sup>对设置防震缝的相邻框架结构进行了环境振动测试,结果表明,由于之前的地震作用使设置防震缝的相邻结构产生了碰撞破坏,且由于各结构采用相同的基础,相邻结构之间存在相互作用,对识别结果产生了重要影响。因此,需对未发生碰撞破坏的设置防震缝的相邻结构间的相互作用对其模态参数的影响展开进一步的研究。

设置防震缝的一种常见方案为利用悬挑构件设缝。本文以某利用悬挑构件形成防震缝的钢筋混凝土办公楼为例,对其进行环境振动测试,利用防震缝两侧结构的实测加速度反应数据及频域分解法对三部分结构的模态参数进行识别,并建立所测办公楼

的有限元模型进行模态分析,与识别结果进行对比,对进行了填缝处理的相邻结构间的动力相互作用进行研究。

## 1 所测设置防震缝的办公楼

所测办公楼标准层结构平面布置如图1所示。主楼和东楼地上十层,采用钢筋混凝土框架剪力墙结构,西楼地上三层,采用钢筋混凝土框架结构,首层层高4.5 m,其余层高3.9 m。该办公楼地下二层,采用筏形基础。西楼和主楼之间的连廊1如图2(a)所示,连廊1由西楼和主楼的二层和三层的悬挑板组成,两板之间设防震缝1,如图2(b)所示。主楼和东楼之间的连廊2如图3(a)所示,连廊2由东楼各层的悬挑板组成,该板与主楼楼板之间设防震缝2,如图3(b)所示。

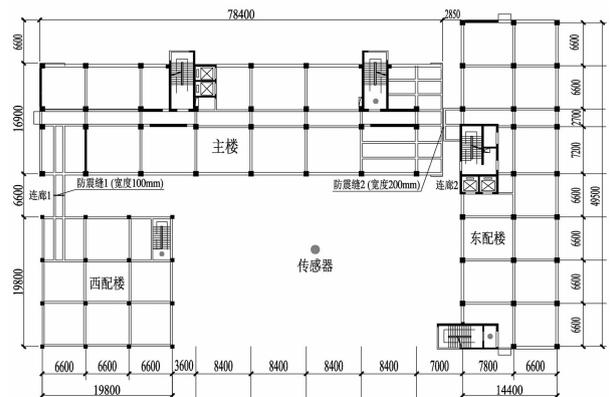


图1 所测办公楼标准层结构平面布置图(单位:mm)

Fig.1 Structural plan layout of a typical floor of the tested office building(Unit:mm)

## 2 环境振动测试方案

环境振动测试采用的振动信号采集设备为北京东方振动和噪声研究所出厂的INV3018C型8通道24位信号采集仪,利用软件DASP-V10对信号进行实时采集及记录,采用的传感器为中国地震局工程力学研究所出厂的941B型拾振器。



(a) 连廊 1 (b) 防震缝 1

图 2 连廊 1 及防震缝 1

Fig. 2 Sky bridge 1 and seismic joint 1



(a) 连廊 2 (b) 防震缝 2

图 3 连廊 2 及防震缝 2

Fig. 3 Sky bridge 2 and seismic joint 2

环境振动测试在该办公楼的三部分结构的楼梯间分别进行,共分 3 次进行测试,分别为:1)测试 1 在西楼三层框架结构的楼梯间进行,在每层测点处朝北(Y 向)和朝东(X 向)各放置一个水平加速度传感器,各层测点尽量保证在一条直线上;2)测试 2 在主楼十层框架剪力墙结构的楼梯间进行,在每层测点处朝北和朝东各放置一个水平加速度传感器,由于测试通道数的限制,分 3 组进行,第 1 组测点布置在 2~5 层,第 2 组测点布置在 5~8 层,第 3 组测点布置在 8~10 层及楼顶,测试参考点的设置原则为不能选在振型坐标较小的位置,不同组的测试结果可以相互验证;3)测试 3 在东楼十层框架剪力墙结构的楼梯间进行,测点布置方案同测试 2,其中五层测点布置见图 4。标准层传感器的布置位置如图 1 所示。测试采样频率取 512 Hz,采样时间为每组 20 min。

### 3 频域分解法

频域分解法的基本思想为:利用奇异值谱的峰值识别得到结构的振型;利用奇异值谱峰值附近数

据的相关函数的跨越零点次数确定自振频率;利用相关函数的包络线结合对数衰减技术得到阻尼比。由于数据的截断及理论依据不充分等原因,通过相关函数识别得到的自振频率和阻尼比误差较大,因此本文通过最小二乘技术<sup>[14]</sup>识别结构的自振频率和阻尼比。



图 4 测试 3 的五层测点

Fig. 4 Sensors on the fifth story in test 3

#### 3.1 振型的识别<sup>[13]</sup>

假定环境振动激励为白噪声过程,对于阻尼比较小的结构,在第  $m$  阶模态处,所测响应  $y(t)$  的功率谱密度矩阵可以表示为

$$\mathbf{G}_{yy}^T(i\omega) \approx \boldsymbol{\varphi}_m \left[ \text{diag} \left( 2 \text{Re} \left( \frac{c_m}{i\omega - \lambda_m} \right) \right) \right] \boldsymbol{\varphi}_m^H \quad (1)$$

式中:  $c_m$  为实数标量;  $\boldsymbol{\varphi}_m$  为第  $m$  阶振型,  $\lambda_m = -\sigma_m + i\omega_{dm}$  为结构频响函数矩阵的第  $m$  阶极点;  $\sigma_m, \omega_{dm}$  分别为阻尼系数和阻尼模态频率。

响应  $y(t)$  的功率谱密度矩阵在  $\omega_k$  处的估计值通过奇异值分解可以表示为

$$\hat{\mathbf{G}}_{yy}(i\omega_k) = \mathbf{U}(\omega_k) \mathbf{S}(\omega_k) \mathbf{U}(\omega_k)^H \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{S}(\omega_k)$  为包含标量奇异值  $s_{kj}$  的对角阵;  $\mathbf{U}(\omega_k) = [\mathbf{u}_{k1}, \mathbf{u}_{k2}, \dots, \mathbf{u}_{kM}]$  为包含奇异向量  $\mathbf{u}_{kj}$  的酉矩阵;  $j = 1, \dots, M, M$  为振型数。

对响应  $y(t)$  的功率谱密度矩阵进行奇异值分解得到奇异值谱曲线,在某个峰值处,若仅第  $m$  阶模态起控制作用,则

$$\hat{\mathbf{G}}_{yy}^T(i\omega_k) \approx \mathbf{u}_{m1} s_{m1} \mathbf{u}_{m1}^H \quad (3)$$

则结构第  $m$  阶振型的估计值可通过最大奇异值对应的酉向量得到为

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_m = \mathbf{u}_{m1} \quad (4)$$

#### 3.2 自振频率及阻尼比的识别<sup>[14]</sup>

对比式(1)和式(3),得

$$\begin{bmatrix} 2s_{m1}\omega & -s_{m1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{dm} \\ \sigma_m^2 + \omega_{dm}^2 \\ d_m \end{bmatrix} = s_{m1}\omega^2 \quad (5)$$

设该第  $m$  阶模态峰值谱线附近的频率点为  $\omega_k$  ( $k=1,2,\dots,p$ ),对应的最大奇异值为  $s_{k1}$ ,分别代入式(5)形成如下矩阵方程:

$$Ax = y \quad (6)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 2s_{11}\omega_1 & -s_{11} & 1 \\ 2s_{21}\omega_2 & -s_{21} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2s_{2p}\omega_p & -s_{p1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = [\omega_{dm} \quad \sigma_m^2 + \omega_{dm}^2 \quad d_m]^T \quad (7)$$

$$y = [s_{11}\omega_1^2 \quad s_{21}\omega_2^2 \quad \dots \quad s_{p1}\omega_p^2]^T$$

其最小二乘解为:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (8)$$

求出  $x$  后按照式(8)可解得第  $m$  阶自振频率和阻尼比为  $\omega_m = \sqrt{\sigma_m^2 + \omega_{dm}^2}$ ,  $\zeta_m = \sigma_m / \sqrt{\sigma_m^2 + \omega_{dm}^2}$ .

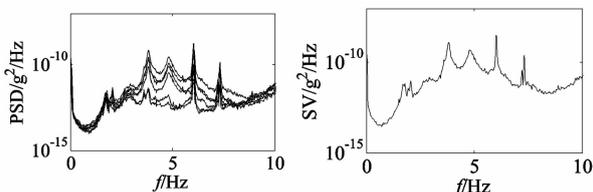
## 4 识别结果分析

### 4.1 功率谱及奇异值谱

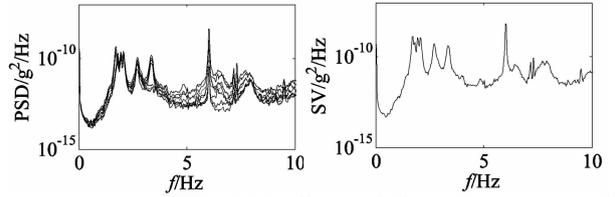
利用各组环境振动测试所得 8 个通道的加速度时程,计算得到各工况测试数据的功率谱密度(PSD)及最大奇异值(SV)谱曲线见图 5,其中计算 PSD 和 SV 谱时采用平均周期图法,FFT 采样点数取 16 384,加汉明窗,窗长同 FFT 采样点数,重叠部分为 25%窗长.

### 4.2 自振频率和阻尼比

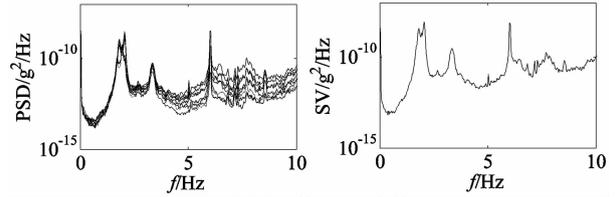
利用频域分解法识别得到的各阶自振频率和阻尼比见表 1,可以看出同一结构不同工况识别得到的结果一致;各阶自振频率的变异性明显小于阻尼比的变异性,说明自振频率的识别精度较高,而由于结构的阻尼机制较为复杂,故阻尼比的识别精度相对较差,但各部分结构识别得到的阻尼比在 0.30%~3.57%之间,小于 5%,符合混凝土材料的阻尼特性.



(a) 测试 1(西楼)



(b) 测试 2 第 3 组(主楼)



(c) 测试 3 第 3 组(东楼)

图 5 各测试工况的 PSD 和 SV 谱  
Fig. 5 PSD and SV spectra for all the setups

表 1 识别得到的自振频率(Hz)及阻尼比(%)  
Tab. 1 Identified natural frequencies (Hz) and damping ratios (%)

	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶
测试 1(西楼)	3.82 (1.43)	4.84 (3.09)	—	—
测试 2 第 1 组(主楼)	1.70 (1.68)	1.94 (1.60)	2.75 (1.62)	6.37 (1.02)
测试 2 第 2 组(主楼)	1.70 (1.26)	1.96 (1.53)	2.76 (2.07)	6.49 (1.63)
测试 2 第 3 组(主楼)	1.70 (0.87)	1.95 (1.50)	2.73 (2.42)	6.47 (1.42)
测试 3 第 1 组(东楼)	1.80 (2.85)	2.05 (0.30)	3.40 (0.83)	6.40 (1.12)
测试 3 第 2 组(东楼)	1.80 (3.57)	2.05 (0.88)	3.40 (1.44)	6.40 (1.43)
测试 3 第 3 组(东楼)	1.81 (2.66)	2.06 (0.35)	3.34 (1.55)	6.45 (1.90)

注:括号内数值为识别得到的阻尼比(%).

### 4.3 振型

利用频域分解法识别得到的各阶振型如图 6 所示,括号内的数值为不同组识别得到的频率和阻尼比的平均值.

由图 6 可以看出,西楼三层框架结构的前两阶振型均为扭转振型,与该结构的平面布置不规则(二层楼板不连续)特性一致;主楼十层框架剪力墙结构的第一阶振型为南北向(短轴向)的一阶弯曲振型,第二阶振型为东西向(长轴向)的一阶弯曲振型,第三阶振型为一阶扭转振型,第四阶振型为南北向二阶弯曲振型耦合扭转振型;东楼十层框架剪力墙结构的第一阶振型为东西向(短轴向)一阶弯曲振型耦合扭转振型,第二阶振型为扭转振型且东西向一阶弯曲振型较大,第三阶振型为一阶扭转振型,第四阶振型为东西向二阶弯曲振型耦合扭转振型.西楼和

东楼的第一和第二阶振型的模态置信准则值均接近于 1.

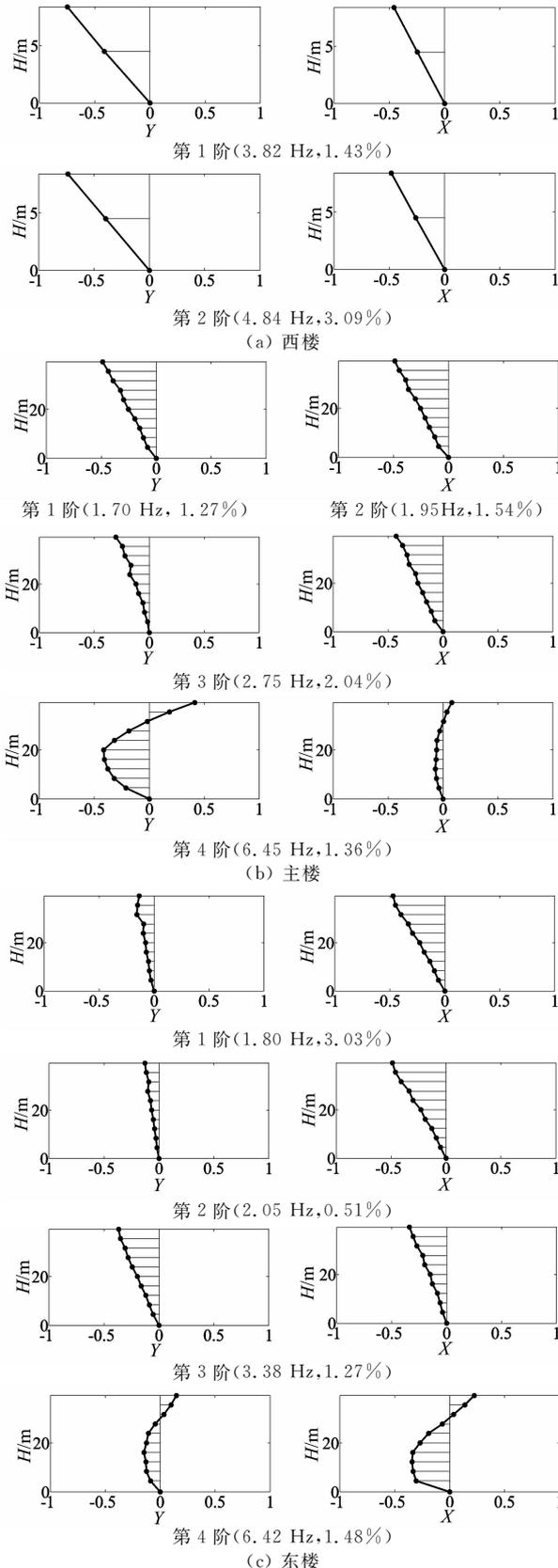


图 6 各楼识别得到的各阶振型图

Fig. 6 Identified mode shapes of each building

#### 4.4 相邻结构之间的相互作用

由图 5 中的 PSD 和 SV 谱可以看出,主楼的前三阶自振频率对应西配楼 PSD 和 SV 谱曲线前三个峰值的频率,西楼的第二阶频率及东楼的第三阶频率对应主楼 PSD 和 SV 谱曲线中两个峰值的频率,主楼的第三阶频率对应东楼 PSD 和 SV 谱曲线上的第三个峰值的频率,表明该办公楼各结构之间存在相互作用,导致一个结构的某些自振频率出现在与其相邻结构的反应功率谱峰值处。

由表 1 可以看出,主楼的第四阶自振频率与东楼的基本相等;由图 6 可以看出,主楼的第四阶振型与东楼的第四阶振型一致,表明由于结构间的相互作用,导致相邻结构的高阶模态趋于一致。

由图 6 还可以看出,除主楼的第一阶振型外,主楼和东楼的各阶振型均带有扭转效应,表明除了由于结构本身的平面布置外,由于结构间的相互作用,导致整栋建筑间的整体性增强,使各阶平动振型耦合一定的扭转。

相互作用的产生原因一方面可能是由于虽然设置了防震缝,但由于防震缝的塞缝和盖缝措施,使相邻结构之间有一定的振动传递;另一方面可能是由于三部分结构的基础为同一筏形基础。

为了进一步验证相邻结构之间的相互作用特性,在三层连廊 1 防震缝 1 两侧布置测点,在一侧结构处施加冲击荷载(70 kg 的人从离楼面 10 cm 起跳),另一侧结构测点处的传感器可以测到反应;而在三层连廊 2 防震缝 2 两侧布置测点,在一侧结构处需施加更大的冲击荷载(70 kg 的人从离楼面 20 cm 起跳),另一侧结构测点处的传感器才可以测到反应,表明主楼与东楼和西楼之间均存在相互作用,且主楼与东楼之间的相互作用程度小于主楼和西楼之间的相互作用程度。

#### 5 有限元模态分析

所测办公楼的混凝土强度等级:剪力墙为 C35 和 C30;柱为 C30 和 C40;梁和板为 C30. 剪力墙的厚度主要为 300 mm 和 400 mm. 楼板的厚度主要为 180 mm 和 165 mm. 框架柱的截面尺寸主要为 600 mm×600 mm 和 700 mm×700 mm,框架梁的截面尺寸主要为 300 mm×600 mm 和 400 mm×600 mm. 外墙主要采用 240 mm 厚保温砌块,内墙主要采用 200 mm 厚陶粒混凝土砌块. 计算模型的具体参数取值见表 2.

表 2 有限元模型的计算参数

Tab. 2 Parameters of the finite element models

材料	弹性模量 /(kN·mm <sup>-2</sup> )	泊松比	质量密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
C30 混凝土	30	0.2	2500
C35 混凝土	31.5	0.2	2500
C40 混凝土	32.5	0.2	2500
陶粒混凝土砌块	1.7	0.3	500
保温砌块	1.4	0.3	650

利用 SAP2000 建立三部分结构的有限元模型进行模态分析,计算模型的基本假定为:1)不考虑土结构相互作用,上部结构计算模型底部固接;2)梁、柱、墙、楼板均为线弹性体;3)考虑填充墙对结构抗侧刚度的影响;4)楼板上施加均布荷载且按测试时的实际情况考虑。

梁和柱通过框架单元进行模拟;楼梯简化为斜板,且楼梯斜板、楼板、剪力墙和填充墙均通过壳单元进行模拟。

利用所建有限元模型得到三部分结构的自振频率见表 3。可以看出计算所得自振频率与识别结果吻合较好,但主楼和东楼的第三阶自振频率小于识别结果,可能是由于相邻结构间的动力相互作用引起实际结构的抗扭刚度增大造成的。

利用所建有限元模型得到三部分结构的振型如图 7 所示,可以看出各阶振型与识别结果一致,其中东楼第一阶振型的扭转效应不如识别结果明显,可能是由于实际相邻结构间存在相互作用导致的。

表 3 有限元模型(FEM)计算得到的自振频率:Hz

Tab. 3 Natural frequencies obtained from the FEMs;Hz

		第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
西楼	FEM	3.98	4.84	—	—
	识别结果	3.82	4.84	—	—
主楼	FEM	1.77	1.85	2.04	6.54
	识别结果	1.70	1.95	2.75	6.45
东楼	FEM	1.75	1.91	2.36	6.70
	识别结果	1.80	2.05	3.38	6.42

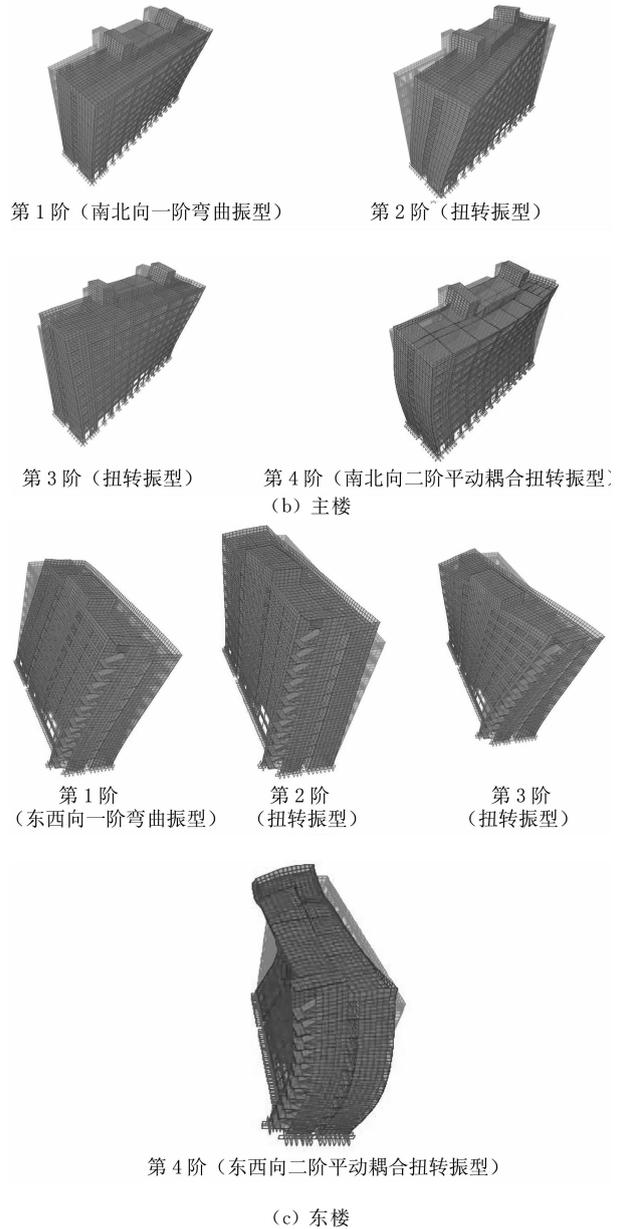


图 7 有限元模型得到的各楼的振型图

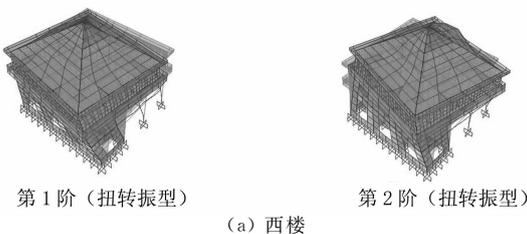
Fig. 7 Mode shapes obtained from the FEMs of each building

## 6 结论

本文对某设防震缝的钢筋混凝土办公楼进行了环境振动测试,利用频域分解法对其模态参数进行了识别,得到了所测相邻结构的实际动力特性。

由于建成后防震缝的填缝措施使得所测相邻结构之间存在动力相互作用,一个结构的某些自振频率出现在与之相邻的结构功率谱密度曲线峰值对应的频率处,因此,对于设置防震缝的相邻结构,不应总是假定相邻结构之间是相互独立的。

识别相邻结构实际的动力特性时,应对相邻结



(a) 西楼

构均进行环境振动测试,并结合识别得到的振型由于相邻结构相互作用产生的模态对识别结果的影响。

防震缝的形式、宽度、填缝措施多种多样,要想全面了解防震缝及其填缝措施对相邻结构动力特性的影响及在地震作用下可能产生的碰撞反应,后续需对更多设防震缝的结构进行测试分析。

## 参考文献

- [1] 王立成. 汶川地震后学校砌体建筑结构破坏情况调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 650—656.  
WANG Licheng. Investigation and analysis for damage of school masonry buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 650—656. (In Chinese)
- [2] 张泾钰. 建筑物的变形缝在汶川地震中的反应及对策思考[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 83—85+108.  
ZHANG Jingyu. Reflections on countermeasures and responses of joints of structures in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2009, 28(4): 83—85+108. (In Chinese)
- [3] 门进杰, 史庆轩, 张曦虎. 汶川地震对远震区高层建筑造成的震害及设计建议[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(5): 648—653.  
MEN Jinjie, SHI Qingxuan, ZHANG Xihu. Seismic damage of high buildings caused in the remote areas from epicenter and seismic design suggestion [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science, 2008, 40(5): 648—653. (In Chinese)
- [4] BACHMANN H. Seismic conceptual design of buildings—basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities [M]. Biel: Swiss Federal Office for Water and Geology, Swiss Agency for Development and Cooperation, 2012: 50—51.
- [5] COLE G L, DHAKAL R P, TURNER F M. Building pounding damage observed in the 2011 Christchurch earthquake[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(5): 893—913.
- [6] SOYOZ S, TACIROGLU E, ORAKCAL K, *et al.* Ambient and forced vibration testing of a reinforced concrete building before and after its seismic retrofitting [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2013, 139(10): 1741—1752.
- [7] SAHIN A, BAYRAKTAR A, ÖZCAN D M, *et al.* Dynamic field test, system identification, and modal validation of an RC Minaret; Preprocessing and postprocessing the wind-induced ambient vibration data [J]. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 25(4): 336—356.
- [8] AU S K, ZHANG F L. Ambient modal identification of a primary-secondary structure by fast Bayesian FFT method [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28(4): 1318—1325.
- [9] AU S K, NI Y C, ZHANG F L, *et al.* Full scale dynamic testing and modal identification of a coupled floor slab system [J]. Engineering Structures, 2012, 37(4): 167—178.
- [10] 非明伦, 周光全, 卢永坤, 等. 昆明高(超高)层建筑环境振动特性实测与统计分析[J]. 地震研究, 2012, 35(1): 117—127.  
FEI Minglun, ZHOU Guangquan, LU Yongkun, *et al.* Actual measurement and statistical analysis of ambient vibration characteristics of the high-rise (skyscraper) buildings in Kunming [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(1): 117—127. (In Chinese)
- [11] 傅继阳, 赵若红, 徐安, 等. 大跨屋盖结构风效应的风洞试验与原型实测研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(9): 12—18.  
FU Jiyang, ZHAO Ruohong, XU An, *et al.* Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a large roof structure [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(9): 12—18. (In Chinese)
- [12] RAINIERI C, FABBRICINO G, MANFREDI G, *et al.* Robust output-only modal identification and monitoring of buildings in the presence of dynamic interactions for rapid post-earthquake emergency management [J]. Engineering Structures, 2012, 34(1): 436—46.
- [13] BRINCKER R, ZHANG L M, ANDERSON P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition [J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3): 441—455.
- [14] 陈刚, 吴小辰, 柳勇军, 等. 基于频域分解法和广域稳态量测的低频振荡模式辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 1—6.  
CHEN Gang, WU Xiaochen, LIU Yongjun, *et al.* Identification of low-frequency oscillation modes based on frequency domain decomposition method and wide area ambient measurement [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 1—6. (In Chinese)