

郭西锐, 王立新, 姜慧, 等. 地王大厦强震动监测与动力分析[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 73-79. [GUO Xirui, WANG Lixin, JIANG Hui, et al. Strong motion Monitoring and Dynamic Analysis of Diwang Plaza[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 73-79.]

## 地王大厦强震动监测与动力分析

郭西锐<sup>1,2,3,4</sup>, 王立新<sup>1,2,3</sup>, 姜慧<sup>1,2,3</sup>, 朱嘉健<sup>1,2,3</sup>, 朱敏<sup>4</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;  
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070; 4. 防灾科技学院, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 基于深圳地王大厦强震动台阵实时监测系统记录到的两次地震作用下不同结构层振动响应数据, 计算得到了地面以上各测点楼层与基底响应之间以及各加强层相邻两测点之间的传递函数, 分析了地王大厦弹性阶段的动力反应规律和水平加强层对结构抵抗侧向变形的影响。结果表明: 水平加强层能有效增强结构整体抗侧移能力, 但同时会引起结构内力突变, 从而形成薄弱层, 因此需合理设置结构加强层。

**关键词:** 超高层建筑; 振动监测; 传递函数; 水平加强层

**中图分类号:** TU317; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 01-0073-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.012

## Strong motion Monitoring and Dynamic Analysis of Diwang Plaza

GUO Xirui<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Lixin<sup>1,2,3</sup>, JIANG Hui<sup>1,2,3</sup>, ZHU Jiajian<sup>1,2,3</sup>, ZHU Min<sup>4</sup>

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangdong Province, Guangzhou 510070, China; 4. Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China)

**Abstract:** Based on the vibration response data of different structural layers under two earthquakes recorded by the real-time monitoring system of strong motion array of Shenzhen Diwang Plaza, the paper calculated the transfer functions between each measuring point above the ground floor and the basement as well as the transfer functions between neighboring floors near the strengthened stories, and analyzed the dynamic responses and the influence of the horizontal strengthened floor on structural lateral deformation of Diwang Plaza. The results show that the horizontal strengthened story can effectively enhance the overall lateral capacity of the structure.

**收稿日期:** 2016-03-27

**基金项目:** 广东省公益研究与能力建设专项(2015A020217007); 人社部 2013 年留学人员科技活动项目择优资助经费; 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室、广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室建设项目(2011A060901006); 中央高校基本科研业务费(ZY20150312)

**作者简介:** 郭西锐(1989-), 男, 在读硕士, 主要从事研究方向结构抗震、结构健康监测. **E-mail:** guoxirui@foxmail.com.

**通信作者:** 王立新(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地震工程、结构强震动监测研究. **E-mail:** wlxustc@hotmail.com.

However, it can also cause internal force mutation of the structure, and form a weak floor. Therefore, the strengthened story should be settled reasonably.

**Keywords:** Super high-rise building; Vibration monitoring; Transition function; Horizontal strengthened story

## 0 引言

随着传感器和测量系统的数字化、智能化以及计算机技术的发展,使得开展大型实体结构的动力特性测试变得更为容易。过去几十年间,动力学实验本质上是用来识别大型土木工程结构在其某一使用阶段的动力参数<sup>[1]</sup>。数据采集系统和互联网信息传输系统的发展以及监测数据高效处理软件的开发等使得对超高层建筑结构振动状况进行长期的实时监测,并记录其真实地震反应成为现实。

从上世纪末开始,国内学者先后对深圳地王大厦的动力特性及风致结构响应进行了测试和分析。1996年7月,王亚勇等<sup>[2]</sup>采用脉动法测试地王大厦主楼结构特性,包括自振周期、振型、阻尼比;1996年9月,钱稼茹等<sup>[3]</sup>采用GPS测量了地王大厦动力特性和大风时楼顶位移和加速度;2008年徐枫、肖仪清等<sup>[4]</sup>监测了常态风和12号台风“鹦鹉”过程中结构振动响应,分析了结构风致振动响应;2013年,广东省和中国地震局省部共建重点实验室首次在地王大厦典型楼层架设了数字强震动台阵实时监测系统,以对地王大厦结构振动状况进行实时监测,迄今记录到了多次台风和小震影响下的结构振动响应,为地王大厦等超高层建筑结构的动力特性分析和健康监测提供了数据支持。

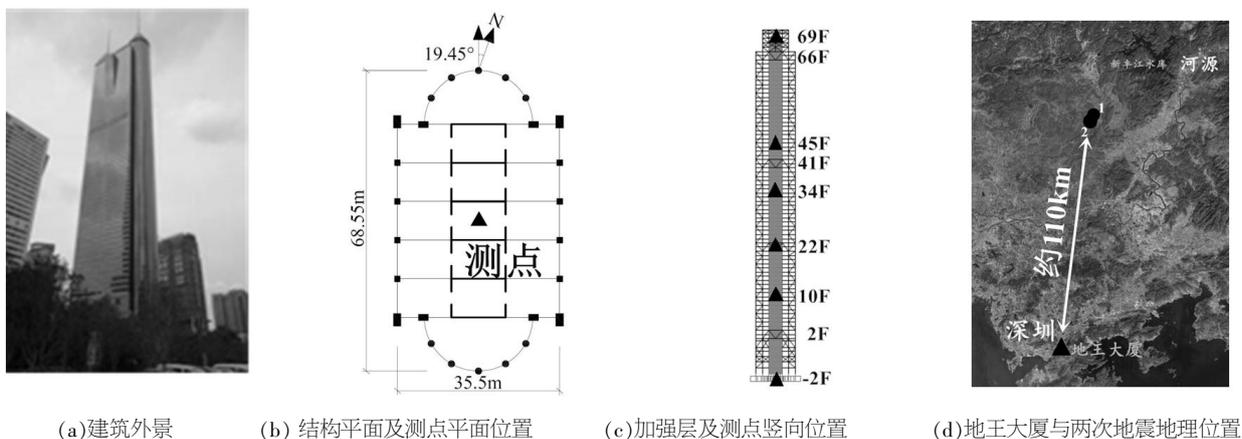
本文根据地王大厦强震动监测台阵实时监测

数据,对其模态进行了识别,同时采用有限元方法对地王大厦模态分析结果进行了比较分析;地王大厦强震动监测台阵记录到的某两次地震(小震)影响下的结构振动响应数据,计算得到了地面以上各测点楼层的振动信号与基底反应、以及各加强层相邻两测点信号之间的传递函数,对其地震作用下结构动力响应进行了分析,研究了地王大厦水平加强层的设置对结构抵抗侧向变形的影响。

## 1 结构及监测系统简介

### 1.1 结构简介

地王大厦上部主体结构为外框内筒式的框架核心筒结构:外围为箱型钢框架结构,核心筒为型钢混凝土结构,核心筒与外框架采用工字型钢梁连接。办公楼地面以上标准层为69层,若加上设备层和避难层在内,实际为81层。主楼结构高度(至天面)为310 m,天面上部连接2个直径为6 m、高度为15 m的圆柱,上部为2个59 m高的桅杆,桅杆顶高为383.95 m。主体结构高宽比为8.73,超出了《高层建筑混凝土结构技术规程》和《高层民用建筑钢结构技术规程》规定的高宽比限值7.0。其建筑外景和结构平面如图1a和图1b所示。为增大其整体抗侧刚度,在58层以下的外框架箱型钢柱内浇筑C45高强混凝土,4个角柱沿高程横向设置工字型钢斜撑,并在第2、22、41、66层设置4个加强层,如图1c所示。



(a)建筑外景

(b)结构平面及测点平面位置

(c)加强层及测点竖向位置

(d)地王大厦与两次地震地理位置

图1 地王大厦外景与结构平面及测点位置

Fig.1 Perspective and structure plane of Diwang plaza, and the plane positions of monitoring points

## 1.2 监测系统简介

为实时监测建筑结构振动状况和记录超高层建筑真实地震反应, 2013 年在地王大厦上架设了数字强震动台阵监测系统。该系统包含 6 个测点, 共 18 个采集通道, 如图 1c 所示, 加速度传感器分别布置在-2F、10F、22F、34F、45F、69F 六个楼层, 可实时监测记录结构环境振动及地震作用下的加速度响应, 各层测点的平面位置如图 1b 所示。其中每一测点记录到的结构的横向、纵向和竖向振动加速度响应, 即各通道采集的数据由光纤实时传回台网中心进行存储分析。本文选取了强震动台阵记录到的距地王大厦约 110 km 的河源新丰江水库大坝两次地震作用下的结构振动响应数据进行分析, 如图 1d 所示。

## 2 结构模态识别

### 2.1 基于监测数据的结构自振频率识别

采用峰值拾取法, 对结构基于环境激励下的

加速度响应数据进行分析, 确定结构各阶自振频率。本文选取 2014 年 7 月 10 日 11:00-12:00 的地王大厦 10F、22F、34F、45F 和 69F 各测点加速度振动记录数据进行频谱分析。

表 1 中给出了地王大厦前 9 阶自振频率识别结果, 其中第 1 阶振型为短轴方向 (横向) 侧弯, 频率为 0.170 Hz; 第 2 阶振型为长轴方向 (纵向) 侧弯, 频率为 0.199 Hz。由于结构平面只有一个测点的数据, 不能确定扭转频率。因此本文结合他人相关实测研究结果<sup>[3-4]</sup>和下文有限元分析结果, 综合确定地王大厦的其余各阶自振频率和振型, 并将本次实测分析结果与文献 [3] 和文献 [4] 的实测分析结果进行了比较, 结果如表 1 所示。可见, 三种识别结果吻合的较好; 相对而言, 本文结果比文献 [3] 普遍要小, 最大差值为 7.46%, 发生在第 7 阶横向振型; 而与文献 [4] 实测结果的最大差值仅为 1.12%。这是由于文献 [3] 测试时间在地王大厦刚建成阶段, 运营近 20 年后其结构荷载工况与之前有较大差异, 本文与文献 [4] 的测试时间较文献 [3] 更为接近, 结构楼面荷载工况

表 1 自振频率识别结果比较

Table 1 Comparison of identified natural frequencies

阶次	振型	本文实测 /Hz	文献 [3]		文献 [4]		有限元分析	
			实测/Hz	相对差值/%	实测/Hz	相对差值/%	频率/Hz	相对差值/%
1	横向一阶	0.170	0.178	4.66	0.168 9	0.47	0.169	0.6
2	纵向一阶	0.199	0.210	5.29	0.199 3	0.2	0.196	1.5
3	扭转一阶	0.278	0.298	6.78	0.278 2	0.14	0.272	2.9
4	纵向二阶	0.539	0.538	0.26	0.538 3	0.2	0.608	12.8
5	横向二阶	0.649	0.698	6.96	0.642 2	1.12	0.620	4.5
6	扭转二阶	0.845	0.898	5.94	0.839 3	0.64	0.784	7.2
7	纵向三阶	1.179	1.274	7.46	1.168	0.94	1.098	6.8
8	横向三阶	1.498	1.546	3.1	-	-	1.365	8.9
9	扭转三阶	1.591	1.674	4.96	-	-	1.458	8.4

注: 相对差值=本文实测-文献实测/文献实测×100%

等条件更为相似, 因此二者测试结果相差较小。

### 2.2 基于有限元方法的结构模态分析

采用 SAP2000 有限元分析软件建立了地王大厦三维空间有限元模型。工程概况、建模几何参数及材料参数 (见上文 1.1 节) 均来自地王大厦实际结构施工图纸资料。其中, 剪力墙和楼板采用壳单元模拟, 巨柱和钢梁采用框架单元。计算时不考虑土-结相互作用, 假定结构底部边界条件为固接。所建模型共有 19 626 个单元, 有限元模型如图 2 所示。

采用特征向量法进行模态分析, 分析采用的计算振型数为前 30 阶, 各个方向振型质量累计参

与系数均超过 90%, 且结构扭转为主的第一周期与平动为主的第一周期之比为 0.62, 小于 0.85。得到地王大厦前 9 阶自振频率、振型特征分别见图 3 和表 1。

根据表 1 和图 3 振型图可知, 根据有限元建模分析得到的地王大厦各阶频率与实际监测数据得到的频率较为接近, 结构第 1 阶频率误差仅为 0.6%, 除了扭转 1 阶频率差值较大, 其余振型频率差值均控制在 10% 以内。

## 3 结构地震响应分析

自 2013 年地王大厦强震动台阵实时监测系统

架设以来，多次记录到了河源地区地震引起的地王大厦结构振动响应。表 2 列出了其中两次地震的相关信息，图 4 和图 5 分别为两次地震影响期间地王大厦-2F 测点(基底)的 90 s 加速度响应记录。从图中可以看出，两次地震影响时侧点的横向地震动加速度均稍大于纵向加速度，虽然该类地震影响较小，但是通过各测点的加速度响应记录可以发现，其影响要明显大于一般环境的扰动，因此可以通过分析该类小震作用下结构动力反应，研究弹性阶段结构地震响应规律，为超高层建筑地震作用下的动力分析和健康诊断提供参考和依据。

图 6 给出了两次地震影响期间各测点楼层横向(EW)振动的峰值加速度、峰值速度和峰值位移，其中 3.8 级地震影响期间 22F 测点数据丢失。由图 4 至图 6 可知，3.8 级地震影响时的结构横向振动峰值加速度、速度、位移均比 4.2 级地震影响时要大，这是由于两次地震震源深度、地震波频谱特性差异所致，根据表 2 和图 4 可知，3.8 级地震震源深度较浅，结构底层测得加速度峰值大于 4.2 级地震，同时比较图 5 两次地震加速度反应

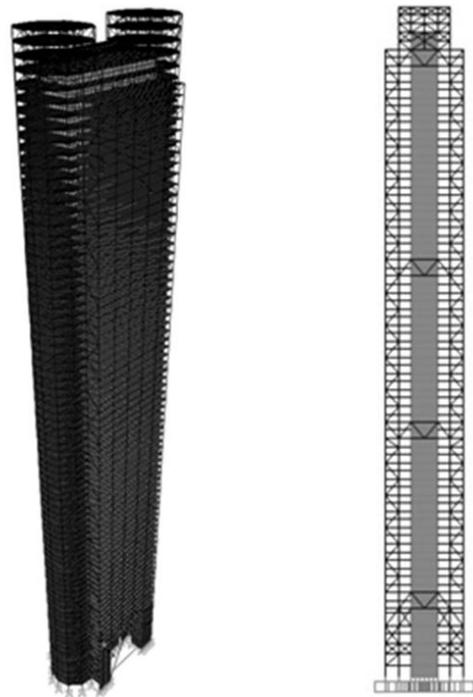


图 2 有限元模型  
Fig.2 Finite element model

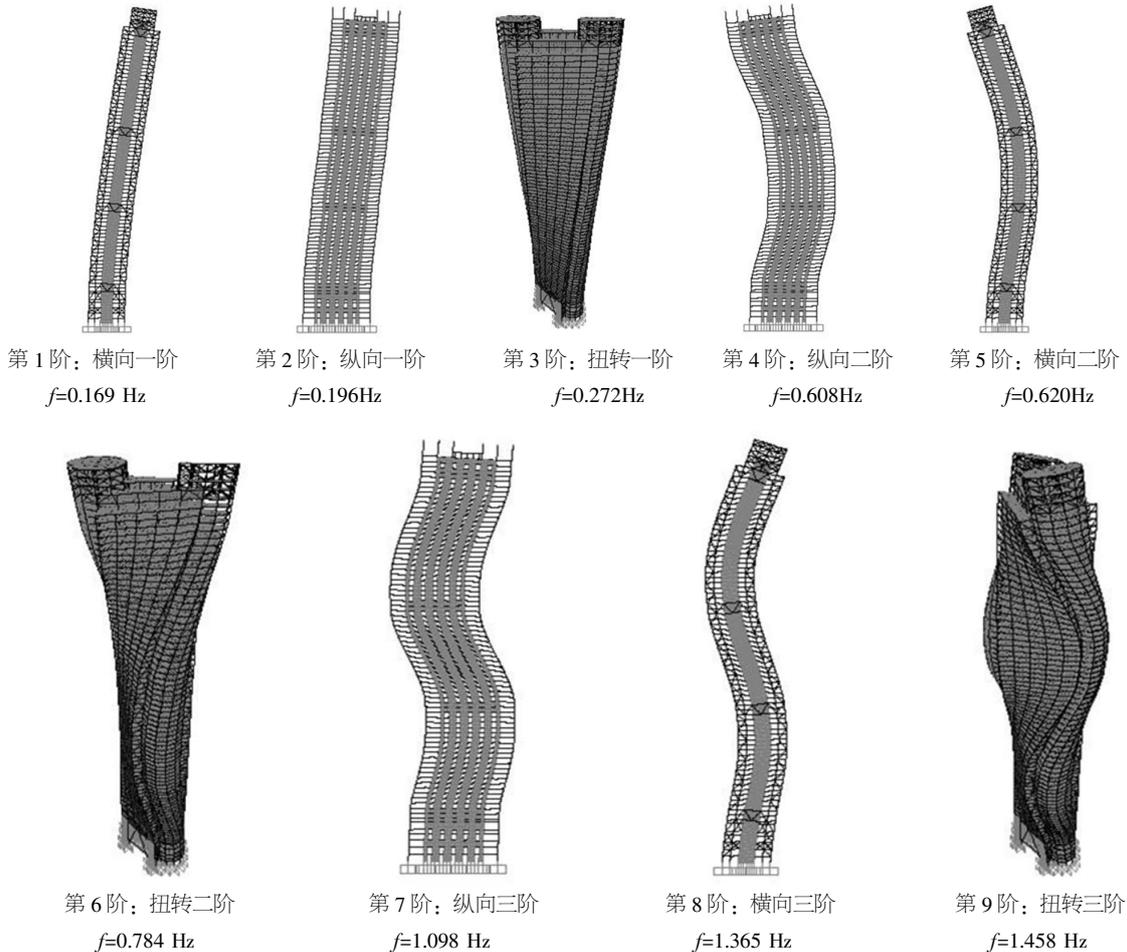
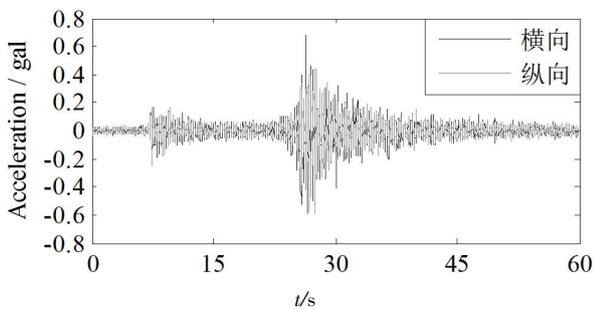


图 3 地王大厦前 9 阶振型图  
Fig.3 The first 9 vibration modes of Diwang plaza

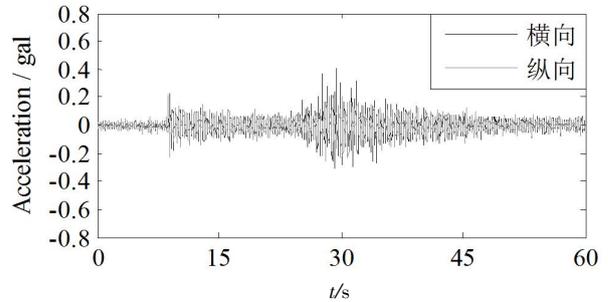
表 2 两次地震信息

Table 2 Information of two earthquakes

序号	发震日期	时间/h:s:min	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ $M_s$	深度/km	地点	距离/km
1	2014-04-25	16:04:18	23.54	114.29	3.8	7	广东河源	110
2	2014-07-11	13:39:30	23.54	114.28	4.2	12	广东河源	110



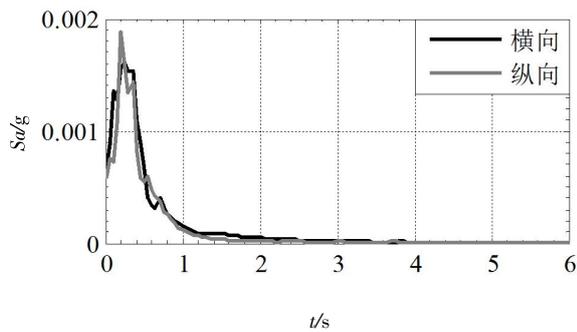
(a) 3.8 级地震时-2F 测点的加速度响应记录



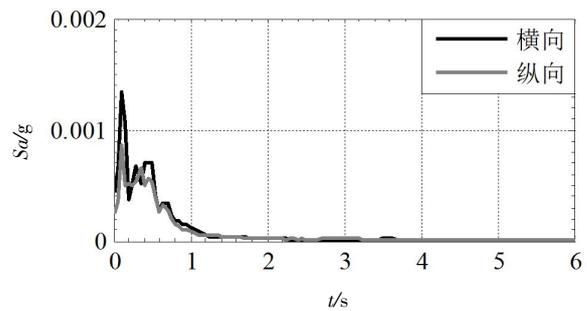
(b) 4.2 级地震时-2F 测点的加速度响应记录

图 4 两次地震时-2F 测点的加速度响应记录

Fig.4 Acceleration time history records of -2F measuring point during two earthquakes



(a) 3.8 级地震时-2F 测点的加速度反应谱



(b) 4.2 级地震时-2F 测点的加速度反应谱

图 5 两次地震时-2F 测点的加速度反应谱

Fig.5 Acceleration response spectra at -2F measuring point during two earthquakes

谱, 3.8 级地震长周期成分明显比 4.2 级地震丰富, 对地王大厦的影响更为明显。

由图 6 可知, 地面以上结构各测点楼层地震动加速度峰值随着楼层增大呈逐渐减小的趋势; 结构横向峰值速度和位移并不完全随结构高度的

上升而增大, 其中在 34F 测点处峰值加速度、速度和位移出现变小的现象, 这可能是由于 34F 楼层处于 22F 和 41F 加强层之间, 结构刚度发生明显变化, 加强层为结构提供了比普通层更强的抗侧移刚度所致。由此可知, 在结构中布置水平加

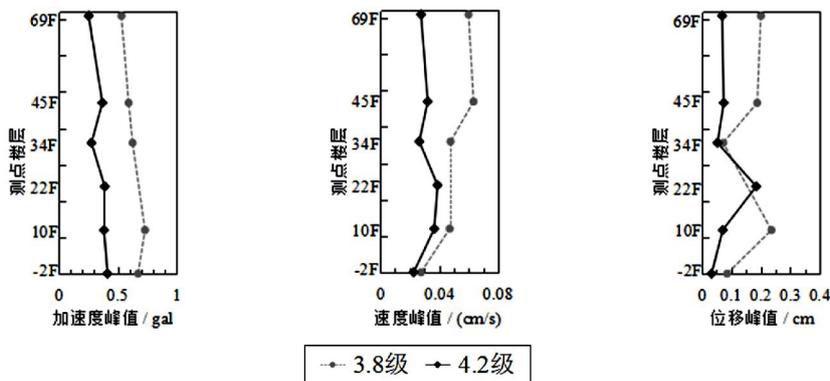


图 6 两次地震影响期间各测点楼层横向振动的峰值加速度、速度和位移

Fig.6 Peak acceleration, speed and displacement of each measuring floor during two earthquakes

强层能对侧移起到有效的控制作用<sup>[5]</sup>。

## 4 传递函数分析

### 4.1 上部楼层与基底之间传递函数分析

为确定地面以上各测点楼层结构振动与基底振动之间的关系,采用低通数字滤波器,通带频率为 0~20 Hz (如图 7a 所示),以 -2F 测点信号为输入信号,地面以上各测点信号为输出信号,计算了两次地震影响时基底反应与地面以上各测点楼层振动之间的传递函数。图 7b 和图 7c 分别给出了两次地震横向振动信号传递函数计算结果。

由图 7 可知,两次地震时振动信号均在 0~10 Hz 频段内具有明显的放大效应,同时 3.8 级地震时各侧点放大倍数普遍比 4.2 级地震时要小,但在高频段较 4.2 级地震更为突出。其中由图 7b 可见 3.8 级地震时各侧点楼层振动放大效应在各频率段分布较平缓;而由图 7c 可知,4.2 级地震中各测点楼层的振动在低频段放大较明显,最大放大倍数发生在频率约 1.38 Hz 处,结合上文自振频率识别结果,该频率接近结构横向第三阶振型(结构第

8 阶振型)自振频率 1.498 Hz,即 4.2 级地震对结构横向第三阶振型有明显的放大作用。高阶振型虽对结构的最大位移和最大层间位移角影响不大,但对结构的内力反应影响很大,因此高阶振型对结构地震内力影响不容忽视<sup>[6]</sup>。

### 4.2 加强层相邻测点之间传递函数分析

水平加强层能有效地增强结构的整体抗侧移能力,但同时会引起结构内力突变,核心筒体在加强层处的内力突变程度会随着加强层设置数目的增加而趋于缓和<sup>[7]</sup>。为研究地王大厦横向水平加强层对结构振动的影响,利用加强层上下相邻测点(加强层以下测点信号为输入信号、以上测点信号为输出信号)监测数据,计算地王大厦各加强层相邻测点横向振动信号的传递函数,计算结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8、图 9 可知,两次地震作用下加强层相邻测点信号的传递函数相差不大,其中,4.2 级地震时 -2F 与 10F 测点之间低频段的传递函数值明显较 3.8 级地震时大。34 层与 45 层传递函数值在约 3.2 Hz 处出现峰值,说明传递信号在 3.2 Hz 处有

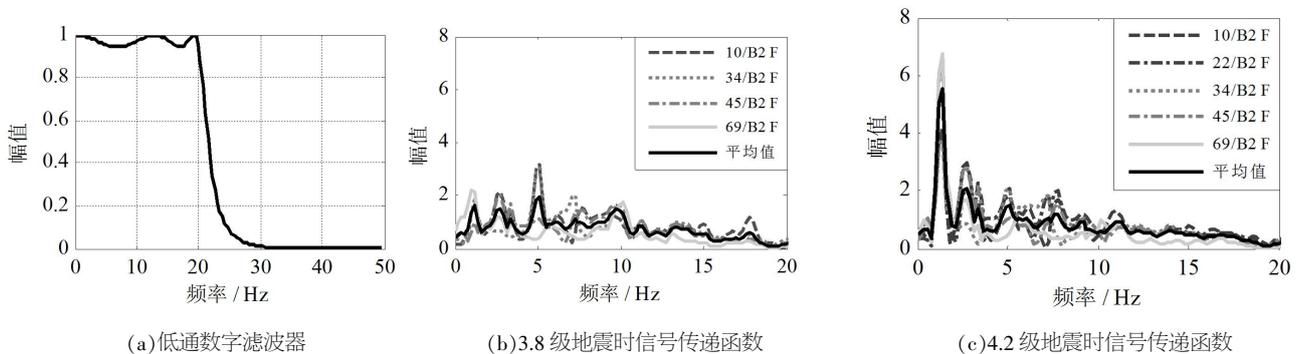


图 7 滤波器及两次地震时结构横向振动信号传递函数曲线

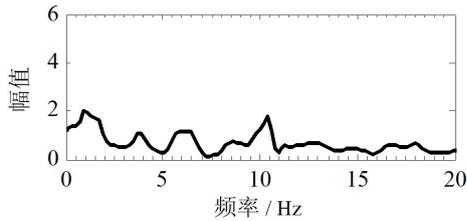
Fig.7 The IIR and structure transverse vibration signal transfer functions during two earthquakes

明显的放大作用,而在第 10 层与 34 层、45 层与 69 层之间的传递函数在约 3.2 Hz 处刚好相反,有明显的减小现象。由此可知,在不同高度设置加强层对结构动力响应影响不同。

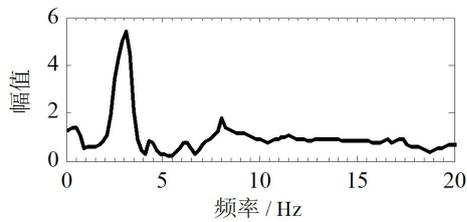
通过对比不同加强层上下相邻测点信号之间的传递函数的差异和地震作用下结构的动力响应可知,设置加强层是一种减少结构水平位移的有效方法;在地震特别是强震作用下,加强层的设置虽可减少整体结构位移,同时也会引起结构楼层刚度突变、加强层附近结构内力剧增,容易形成薄弱层<sup>[8]</sup>,从而导致结构损伤和破坏。

## 5 结语

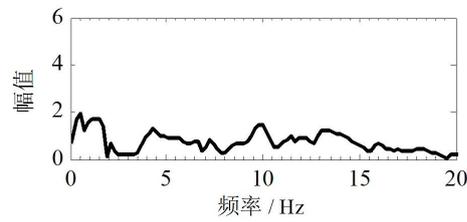
本文基于深圳地王大厦强震动监测台阵实时监测数据,对地王大厦模态进行了识别分析,同时与有限元方法模态分析结果进行了对比;通过记录到的某两次地震(小震)影响下的结构振动响应数据,计算了各测点楼层与基底响应之间以及各加强层相邻两测点之间的传递函数;讨论了地王大厦弹性阶段的动力反应和水平加强层对结构侧向变形的影响,结果表明:不同频谱特性的地震作用对结构反应的放大作用不同,对超高层建筑的动力分析结果影响很大,结构动力分析中应



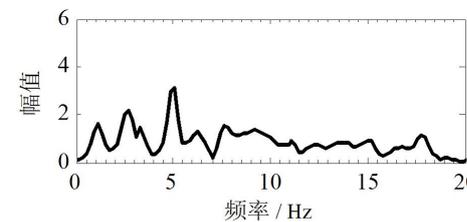
(a) 45 层与 69 层



(b) 34 层与 45 层



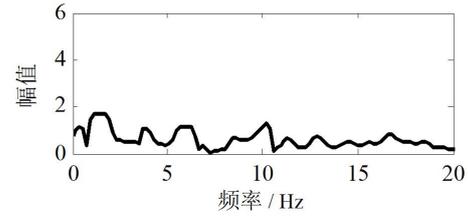
(c) 10 层与 34 层



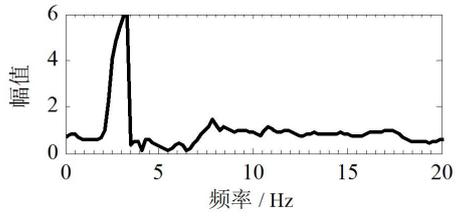
(d) -2 层与 10 层

图 8 3.8 级地震时加强层相邻测点横向振动信号传递函数

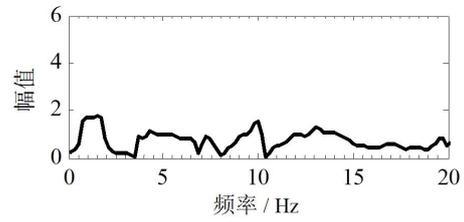
Fig.8 The lateral vibration signal transfer functions of adjacent measuring points in the reinforcing floors during M3.8 earthquake



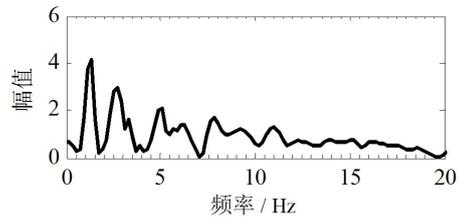
(a) 45 层与 69 层



(b) 34 层与 45 层



(c) 10 层与 34 层



(d) -2 层与 10 层

图 9 4.2 级地震时加强层相邻测点横向振动信号传递函数

Fig.9 The lateral vibration signal transfer functions of adjacent measuring points in the reinforcing floors during M4.2 earthquake

重视地震波的选取;水平加强层能有效地增大结构的抗侧移刚度,但同时会引起结构内力突变,从而形成薄弱层,因此合理设置结构加强层可有效控制结构地震响应,减小结构的地震破坏作用。

参考文献:

[1] Cunha A, Caetano E, Delgado R. Dynamic tests on a large cable-stayed bridge. An efficient approach [J]. Journal of Bridge Eng, ASCE, 2001, 6 (1): 54-62.  
 [2] 王亚勇,张自平,贺军,等.深圳地王大厦测振、测风实验研究[J].建筑结构学报,1998,19(3):58-63.  
 [3] 钱稼茹,过静珺,陈志朋.地王大厦动力特性及大风时楼顶位移和加速度实测研究[J].土木工程学报,

1998, 31 (6): 30-38.  
 [4] 徐枫,陈文礼,肖仪清,等.超高层建筑风致振动的现场实测与数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):51-57.  
 [5] 傅学怡.带刚性加强层 R.C.高层建筑设计建议[J].建筑结构,1999(10):44-47.  
 [6] 沈飞,楼梦麟.超高层建筑地震反应中高阶振型影响分析[C]//宁波:第20届全国结构工程学术会议论文集,2011.  
 [7] 阮永辉,吕西林.带水平加强层的超高层结构的力学性能分析[J].结构工程师,2000(4):12-16.  
 [8] 徐培福,黄吉锋,肖从真,等.带加强层的框架-核心筒结构抗震设计中的几个问题[J].建筑结构学报,1999,20(4):2-10.