

文章编号: 1000-4750(2010)Sup.I-0132-04

# 松软基础上 6 幢高层建筑的振动特性测试

\*史文海<sup>1</sup>, 李正农<sup>2</sup>

(1. 温州大学建筑与土木工程学院, 浙江, 温州 325035; 2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 湖南, 长沙 410082)

**摘 要:** 采用脉动观测法对温州市区 6 幢高层建筑的自振特性进行了测试。通过分析建筑的自振周期, 得到了松软基础上高层建筑的基本周期与建筑高度和楼层数之间的近似关系。测试结果表明: 20 世纪 90 年代初和 2000 年后建成的高层建筑的抗震性能存在一定的差异, 温州市区松软基础上高层建筑在遭受到外地强震波及的时候容易产生共振反应。

**关键词:** 高层建筑; 地震; 振动测试; 松软地基; 动力特性

**中图分类号:** TU317<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A

## MEASUREMENTS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SIX HIGH-RISE BUILDINGS ON SOFT FOUNDATIONS

\*SHI Wen-hai<sup>1</sup>, LI Zheng-nong<sup>2</sup>

(1. College of Architectural and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency (Hunan University), Ministry of Education, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** The dynamic behaviors of 6 high-rise buildings in Wenzhou urban district are investigated by means of field vibration test. The structural natural vibration period is obtained to analyze the relationship between the fundamental period and the height and the floor number of high-rise buildings on soft foundation. Some difference is observed in earthquake-resistant performance between the tall buildings built in early 1990s and those after 2000s. Moreover, the tall buildings in Wenzhou urban district on soft foundation may undergo resonant reactions under far-fault strong earthquakes.

**Key words:** tall building; earthquake; vibration test; soft foundation; dynamic characteristic

近年来, 国内外学者对高层建筑结构的动力特性已开展了大量的实测研究工作。如李国强等<sup>[1]</sup>对上海金茂大厦的动力特性进行了测试, 分析了其动力特性。孙崇绍等<sup>[2]</sup>对甘肃省河西地区高层建筑动力特性进行了脉动观测研究, 指出了今后在该地区修建高层建筑时应注意的若干问题。吕西林等<sup>[3-4]</sup>对上海环球金融中心大厦的振动特性进行了试验研究。Brownjohn 等<sup>[5]</sup>对新加坡人民广场大厦进行了现场测试, 分析了多种因素的影响。Li 等<sup>[6-8]</sup>对我国多幢超高层建筑的风致响应特征进行了深入的实测研究。Chassiakos 等<sup>[9]</sup>对长滩公共安全大楼

进行了翻修前期、中期和后期的实测, 并对不同条件下的结构动力特性进行了分析。Chaker 等<sup>[10]</sup>对两座三层框架结构进行了振动测试, 分析了填充墙对结构基本周期的影响。但迄今为止, 我国松软基础上高层建筑动力特性尚无实测资料。

温州是典型的松软土地基城市, 在多次台湾强震远场波及中, 许多高层建筑都出现明显震感或局部破坏。为找出强震远场影响与高层建筑结构自身动力特性的关系, 并获得松软地基土上高层建筑的动态特性实测参数, 我们在温州市区选取了 6 幢有代表性的高层建筑进行脉动测试分析。

收稿日期: 2009-04-01; 修改日期: 2009-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778072, 90815030); 浙江省教育厅项目(Y200803519); 住房和城乡建设部项目(2009K218)

作者简介: \*史文海(1979—), 男, 湖南益阳人, 讲师, 博士生, 从事工程结构抗震、抗风研究(E-mail: whshi@126.com);

李正农(1962—), 男, 湖北武汉人, 教授, 工学博士, 博导, 从事工程结构抗震、抗风研究(E-mail: zhn88@263.net).

## 1 地基特点

温州是素以松软地基而著名的沿海城市。据地质勘察资料,温州市区人民路鹿城大厦往东,经国际大酒店,开太至黎明路海关大楼,海关大楼往南经均瑶宾馆、王朝大酒店至下吕浦、车站大道一带,第四纪覆盖层一般都超过 80m 甚至百余米,为典型的四类场地,即软弱地基。每次遭受外地强震特别是台湾强震波及的时候,这些地段的建筑物都普遍有感,尤其是高层建筑,震感更为强烈,并造成一些建筑物局部破坏。

## 2 动力特性测试

### 2.1 测试方法

采用脉动观测法,即利用建筑物的脉动响应来确定其动力特性。测试使用仪器为中国地震局工程力学所研制的 DAQ-PI-321 型高精度振动数据采集仪、振动分析软件包和 891 振动测试系列。选择在结构地震反应中起关键作用且具有一定共性的建筑物自振周期与振动位移作为测试内容。

一般的,建筑物的振动状态可分为水平振动、扭转振动和垂直振动。地震灾害表明,导致建筑物破坏的主要原因是水平振动和扭转振动。为测量水平振动,测点(传感器)应布置在建筑物的刚度中心。现场测试时,刚度中心不易确定。在建筑平面基本对称的情况下,把测点布置在平面的几何中心处较合适。扭转振动是指整个建筑物绕着结构的刚度中心转动,显然,建筑物的四周边缘是转动最大的位置。因此,测试中在建筑的侧边成双成对的布置测点来测量其扭转振动。为准确反映建筑物的振动特性,在传感器(拾震器)安装时,应特别注意测试方向以及不同楼层平面位置尽可能一致。为同时测定水平振动和扭转振动,每次测试使用 6 个传感器,并按要求在同一平面内布置。

### 2.2 结构概况与测试方案

1) 海关大楼。主楼 20 层,塔楼 1 层,高 80m,钢筋混凝土框-剪结构体系,如图 1(a)。据地质勘察资料,钻孔 63.8m 未见基岩,属软弱地基。测水平振动的传感器布置于塔楼(21 层)中央,测扭转振动的传感器则布置于主楼顶层(20 层)弧型边线上,大楼顶层平面及测点布置如图 1(b)。

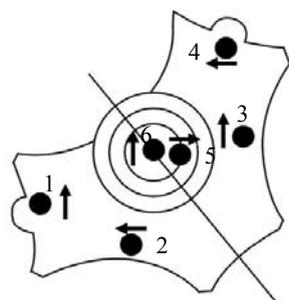
2) 温州国际大酒店。25 层,其中第 24 层和第 25 层为圆型塔楼,高 100m,框-剪结构体系,如图 1(c)。据地质勘察资料,该楼及附近钻孔 80m 未

见基岩,属软弱地基。测扭转振动的传感器绕塔楼顶层周围对称布置,测水平振动的传感器则布置于 24 层圆型餐厅的中央,大楼顶层平面测点布置如图 1(d)。

3) 王朝大酒店。主楼 21 层,塔楼二层,高 84m,框-剪结构体系,如图 1(e)。据地质勘察资料,场地上部为巨厚的淤泥软土,71.7m 未见基岩,属软弱地基。测试时所有观测点均布置在塔楼(第 23 层)的屋顶。测水平振动的传感器布置在塔楼中央,测扭转振动的传感器则按塔楼矩形四边成双对称布置,如图 1(f)。



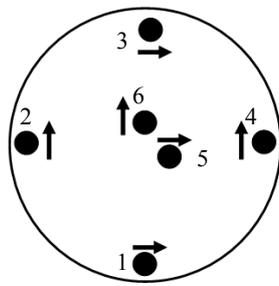
(a) 海关大楼



(b) 传感器布置图



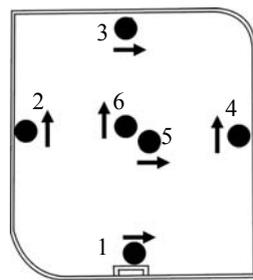
(c) 国际大酒店



(d) 传感器布置图



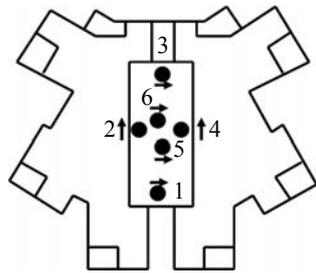
(e) 王朝大酒店



(f) 传感器布置图



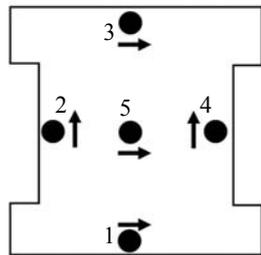
(g) 金马大厦



(h) 传感器布置图



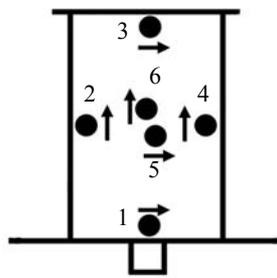
(i) 银河大厦



(j) 传感器布置图



(k) 联合广场



(l) 传感器布置图

图 1 6 幢脉动测试的高层建筑及其传感器布置图

Fig.1 Pictures of the six tall buildings and arrangements of the accelerometers

4) 金马大厦。主楼 31 层，塔楼 2 层，高 112m，框-剪结构体系，如图 1(g)。勘察资料表明，基础属软弱地基。因现场条件限制，测试时传感器全部布置在塔楼顶层，测水平振动的传感器布置于塔楼中央，测扭转振动的传感器成双对称布置于塔楼四周，如图 1(h)。

5) 银河大厦。由三幢中高层住宅楼组成。测试对象为 B 幢，16 层，高 57m，框-剪结构体系，如图 1(i)。据地质勘察资料，80m 未见基岩，属软弱

地基。测试观测点均布置在 16 层的屋顶，测扭转振动的传感器布置于楼面的四周，测水平振动的传感器布置于楼层中心，如图 1(j)。

6) 联合广场。由 3 幢高层商住楼组成。测试对象为 C 幢，主楼 30 层，塔楼 3 层，高 107m，框-剪结构体系，如图 1(k)。勘察资料表明，82m 才见全风化凝灰岩，为软弱地基。测试时传感器布置于塔楼顶层，测水平振动的传感器布置于塔楼中央，测扭转振动的传感器成双对称布置于塔楼四周，如图 1(l)。

### 3 测试结果分析

6 幢高层建筑的基本周期与水平位移实测结果如表 1 和表 2 所示。表中测定的位移是在自然环境激励下建筑物自身振(晃)动的幅度。一般而言，楼层越高，振动幅度(位移)越大。然而，实测结果并非完全如此，这直接与建筑自身的动力特性有关。实测结果表明，建于本世纪初的联合广场和金马大厦虽然楼层最高(33 层)，但振动幅度并不大，且振动呈良好的对称性。相对而言，建于 20 世纪 90 年代的海关大楼、国际大酒店、王朝大酒店和银河大厦，不但振动幅度大，对称性也差。原因在于后者的建设规范和抗震设计更为合理，相对而言有更好的抗震性能。这也就是在历次台湾强震波及的时候，该类高楼震感较其他高楼更为敏感的原因。

表 1 海关大楼的测试结果

测点编号	1	2	3	4	5	6
测点位置	西小弧	西大弧	东大弧	东小弧	中心	中心
周期/s	1.12	1.14	1.15	1.12	1.10	1.14
位移/ $\mu\text{m}$	9.6	11.1	13.0	10.6	7.0	8.2

表 2 其他 5 幢高层建筑的测试结果

建筑名称	测点编号	1	2	3	4	5	6
国际酒店	测点位置	南侧	西侧	北侧	东侧	中心	中心
	周期/s	1.69	1.69	1.47	1.69	1.47	1.69
王朝酒店	测点位置	南侧	西侧	北侧	东侧	中心	中心
	周期/s	—	1.29	1.18	1.29	1.18	1.29
银河大厦	测点位置	南侧	西侧	北侧	东侧	中心	中心
	周期/s	0.78	0.79	0.78	0.79	0.78	—
金马大厦	测点位置	南侧	西侧	北侧	东侧	中心	中心
	周期/s	1.41	1.69	1.47	1.69	1.47	1.69
联合广场	测点位置	南侧	西侧	北侧	东侧	中心	中心
	周期/s	1.27	1.26	1.26	1.33	1.27	1.33
	位移/ $\mu\text{m}$	12.1	13.1	12.0	12.9	11.6	7.3

表 3 归纳了 6 幢高层建筑的结构特点和基本周期。结果表明各大楼的基本周期在 0.78s—1.69s 之间，且基本周期  $T$  与楼层数  $N$ 、建筑高度  $H$  之间有

如下关系:

$$T=0.04N-0.06N, T=0.012H-0.016H$$

式中: 周期  $T$  的单位为 s; 高度  $H$  的单位为 m。据对曾波及温州并产生远场影响的台湾强震进行的频谱分析, 其地震波的卓越周期在 0.78s—1.69s 范围, 这与以上 6 幢高层建筑脉动观测的自振周期 1.1s—1.69s 范围基本吻合, 证明了强震的远场影响容易使温州市区高层建筑产生共振反应。

表 3 6 幢高层建筑的特点

Table 3 The characteristics of six tall buildings

建筑名称	基本 周期/s	基岩 深度/m	结构 型式	场地 类别	高度/m	楼层数
海关大楼	1.10—1.14	>63	框-剪	四	80	21
王朝酒店	1.18—1.29	>72	框-剪	四	84	23
国际酒店	1.47—1.69	>80	框-剪	四	100	25
银河大厦	0.78—0.79	>80	框-剪	四	57	16
联合广场	1.26—1.33	82	框-剪	四	107	33
金马大厦	1.41—1.69	82	框-剪	四	112	33

## 4 结论

(1) 采用脉动观测法对高层建筑进行动力特性测试, 方法简单有效, 可在建筑物的健康监测与损伤诊断中予以推广应用。

(2) 温州市区松软基础上框-剪结构的基本周期  $T$  与楼层数  $N$ 、建筑高度  $H$  之间存在线性关系:  $T=0.04N-0.06N, T=0.012H-0.016H$ 。该规律可作为今后松软基础上高层建筑结构抗震设计的参考。

(3) 所测高层建筑的自振基本周期与曾波及温州并造成远场影响的台湾强震地震波频谱的卓越周期基本吻合, 证明了温州市区高层建筑在遭受外地强震波及的时候容易发生共振反应。

(4) 实测结果表明, 建于本世纪初的高层建筑较 20 世纪 90 年代建的高层建筑在建设规范和抗震设计方面更为合理, 具有更好的抗震性能。

## 参考文献:

- [1] 李国强, 陈素文, 李杰. 上海金茂大厦结构动力特性测试[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 35—39.  
Li Guoqiang, Chen Suwen, Li Jie. Measurements of

- dynamic properties of Shanghai Jinmao mansion [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(2): 35—39. (in Chinese)
- [2] 孙崇绍, 石玉成. 甘肃省河西地区高层建筑动力特性脉动观测研究[J]. 西北地震学报, 2000, 22(3): 224—231.  
Sun Chongshao, Shi Yucheng. The microtremor measurements of dynamic characteristics of 3 tall buildings in Hexi corridor of Gansu province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 20(3): 224—231. (in Chinese)
- [3] Lu X L, Zou Y, Lu W S. Shaking table model test on Shanghai World Financial Center Tower [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(4): 439—457.
- [4] 吕西林, 李培振, 郭献群. 上海环球金融中心大厦振动控制及现场实测分析[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 63—70.  
Lu Xilin, Li Peizhen, Guo Xianqun. Vibration control and site measurement on Shanghai World Financial Center Tower [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 63—70. (in Chinese)
- [5] Brownjohn J M W. Ambient vibration studies for system identification of tall buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(1): 71—95.
- [6] Li Q S, Xiao Y Q, Wong C K. Full-scale monitoring of typhoon effects on super tall buildings [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20: 697—717.
- [7] Li Q S, Wu J R, Liang S G. Full-scale measurements and numerical evaluation of wind-induced vibration of a 63-storey reinforced concrete tall building [J]. Engineering Structures, 2004b, 26(12): 1779—1794.
- [8] Fu J Y, Li Q S, Wu J R. Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind-induced responses of super-tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 1332—1358.
- [9] Chassiakos A G, Masri S F, Nayeri R D. Use of vibration monitoring data to track structural changes in a retrofitted building [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2007, 14(2): 218—238.
- [10] 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.