

超高层建筑结构风致振动监测数据的 分析与应用

郭西锐

(智性科技南通有限公司)

【摘要】文章通过对超高层建筑进行长期的环境振动监测,研究结构模态频率的风致振动影响。利用布置的强震动监测系统记录到的结构振动响应,分析结构在常态风和强风影响下的加速度和位移幅值。采用功率谱法对超高层建筑在不同风荷载作用下的模态频率进行识别和比较,结果表明强风荷载作用期间会导致超高层建筑结构的模态频率降低。强风荷载对超高层建筑模态频率的影响不可忽视,在结构健康监测等研究中应考虑风荷载等环境的影响。

【关键词】超高层建筑;结构健康监测;风致振动;频率变化

中图分类号: TU973

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.12.041

Analysis and Application of Wind-Induced Vibration Monitoring Data of Super High-rise Building Structure

GUO Xi-rui

(Zhixing Technology Nantong Co., Ltd.)

【Abstract】This article studies the wind-induced vibration influence of structural modal frequencies through long-term environmental vibration monitoring of super high-rise buildings. By using the structural vibration responses recorded by the arranged strong vibration monitoring system, the acceleration and displacement amplitudes of the structure under the influence of normal wind and strong wind are analyzed. The modal frequencies of super high-rise building under different wind loads are identified and compared by power spectrum density method. The results show that the modal frequency of the super high-rise building structure will be reduced during the strong wind load. The influence of strong wind loads on the modal frequency of super high-rise building cannot be ignored, and the influence of wind loads and other environmental factors should be considered in research of structural health monitoring.

【Keywords】super high-rise building; structural health monitoring; wind-induced vibration; frequency variation

1 引言

结构健康监测技术作为保障重大工程结构安全的重要技术,近些年来在世界范围内得到了快速的发展和运用。目前,国内外众多超高层建筑、大型桥梁和水库大坝等重大工程结构上都布置了强震动监测系统。通过连续测量和分析结构在使用过程中的环境振动响应,可为建筑结构管理人员提供参考数据以判断结构的运行状态,并对其进行健康评价。其中,由结构振动响应识别结构频率,再利用结构自振频率的变化对结构健康状况进行评价,是健康评价的常用方法之一^[1]。

由实测数据进行识别得到的模态频率不仅与结构自身的质量和刚度有关,还受到风荷载、温度以及地震作用等因素的影响。有研究表明,风荷载或地震作用下, $P-\Delta$ 效应会引起抗侧刚度的降低,使结构周期发生变化^[2,3]。根据荷载与位移的非线性关系,

风荷载和地震作用期间构件的刚度会发生退化,从而导致结构的自振频率降低。如果在风荷载和地震作用期间构件是弹性的,风荷载和地震作用前后结构的自振频率将不会发生变化^[4]。对现有建筑结构的振动响应记录进行分析可以让我们对结构的动力特性有更好的理解,同时对结构的健康状况进行评估。国内许多学者^[5-10]做过超高层建筑风致振动的现场实测和数值模拟相关研究,但超高层建筑模态频率连续监测中的风致振动影响却鲜有涉及。

本文利用超高层建筑上强震动台阵的环境振动记录。首先,选取了常态风和某次强风影响下超高层建筑结构的振动响应记录;然后,对监测数据进行分析,得到常态风和强风影响下的加速度、位移幅值,以及采用功率谱法对超高层建筑在常态风和强风作用下的结构模态频率进行识别;最后,将模态频率识别结果进行对比分析。

2 监测系统简介

超高层建筑上布设的强震动监测系统为数字强震结构台阵系统,该强震动台阵实时监测记录结构环境振动加速度响应。该系统包含6个测点,共18个采集通道。在下列各层布置测点、放置加速度传感器:-2F、10F、22F、34F、45F、69F,其中每一测点测量结构的横向、纵向和竖向的加速度,各通道采集数据由光纤实时传回监控中心进行保存。本文只分析横向和纵向加速度信号。

3 结构振动响应结果分析

如图1所示为超高层建筑顶层连续31天中纵向和横向每十分钟加速度记录的绝对峰值统计结果。从图中可以发现,第17、18日加速度出现增大现象,这是由于该超高层建筑受强风影响。取顶层监测数据为常态风作用下一天中的结构加速度响应,并通过积分得到位移时程。振动监测数据显示,本次强风影响过程前后共96小时(第16日0时—19日24时)的加速度记录 and 积分得到位移的时程如图2所示,记录了此次台风对超高层建筑的影响。

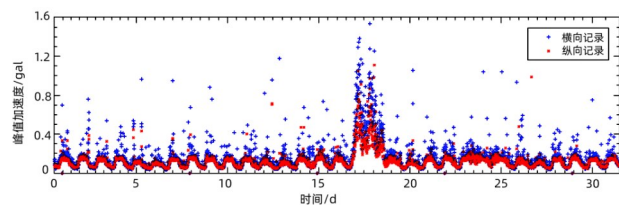


图1 超高层建筑顶层连续31天每十分钟绝对峰值加速度

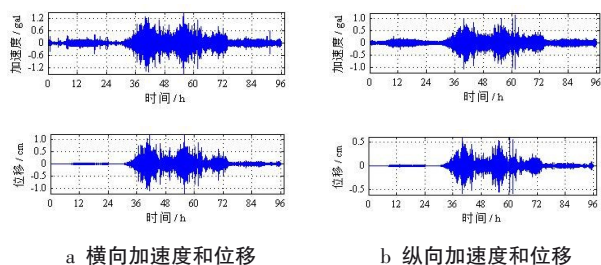


图2 强风作用下顶层加速度和位移

表1所示为常态风和强风影响下,超高层建筑顶部加速度和位移峰值的比较结果:在常态风作用下,由于该建筑横向的刚度相对较小,横向振动位移幅度是纵向的2.2倍,横向振动加速度是纵向的2.50倍;在强风作用下,横向振动位移幅度是纵向的2.2倍,横向振动加速度是纵向的1.4倍;在常态风和作用下,楼顶的位移角非常小。但是,强风作用下的横向和纵向位移均约为常态风作用下的18倍。相较

于常态风,本次强风对结构振动的影响较大,对于研究结构风致振动有一定的价值。

表1 顶层加速度和位移的峰值比较

		加速度/gal	位移/cm
横向	常态风	-0.377~0.413	-0.065~0.072
	强风	-1.476~1.536	-1.279~1.218
纵向	常态风	-0.165~0.158	-0.033~0.032
	强风	-1.047~1.109	-0.582~0.594

超高层建筑频谱分析数据选取常态风、强风天气11:00—12:00时段1小时的顶层加速度振动记录。图3为常态风作用下超高层建筑顶层加速度信号的自功率谱分析结果,第1阶振型为横向侧弯,对应频率0.1697Hz;第2阶振型为纵向侧弯,对应频率0.1989Hz。同时可见,纵横向功率谱中0.6772Hz等频率处均出现尖峰,推测为平移振动外的其他振动形式。图4为强风作用下顶层加速度信号的自功率谱分析结果,横向加速度基频0.1683Hz,纵向加速度基频0.1983Hz。强风作用下,结构纵横向以第一自振频率为主,推测因风频接近结构纵横向基本自振频率。结合结构模态频率识别结果,超高层建筑在强风荷载作用下的振动以纵横向侧弯模态为主。对比常态风与强风作用下的加速度频谱,强风作用下识别的结构自振频率略小于常态风工况。

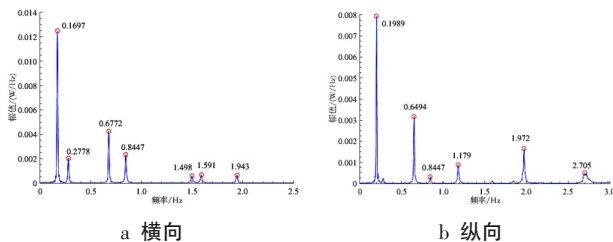


图3 加速度信号自功率谱分析(常态风)

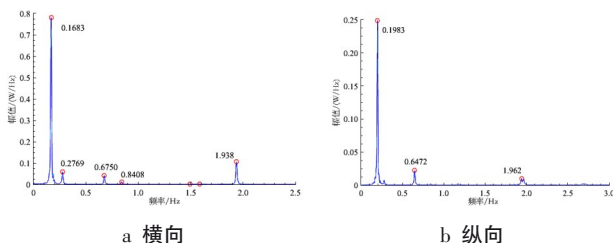


图4 加速度信号自功率谱分析(强风)

4 结构频率识别

结合强震动台阵系统及各模态频率识别方法特点,采用功率谱法实现超高层建筑模态频率长期自动识别。选取10F、22F、34F、45F、69F测点,对强风

表2 不同时间的各阶模态频率平均值变化情况

方向	时间\序号	1	2	3	4	5	6	7	8
横向	影响前	0.1697	0.2797	0.5397	0.6788	0.8481	1.5023	1.5938	1.9435
	影响时	0.1688	0.2769	0.5396	0.6762	0.8426	1.4968	1.5860	1.9396
	影响后	0.1697	0.2797	0.5403	0.6781	0.8475	1.5031	1.5923	1.9431
纵向	影响前	0.1989	0.5410	0.6523	0.8480	1.1838	1.8561	1.9808	2.2980
	影响时	0.1983	0.5403	0.6470	0.8425	1.1739	1.8572	1.9668	2.2851
	影响后	0.1997	0.5409	0.6522	0.8474	1.1834	1.8568	1.9812	2.2963

影响前、中、后各一天的纵横向每 10 分钟监测数据进行分析,得到超高层建筑纵向前 8 阶识别频率如图 10 所示。可见各阶识别频率均有不同程度波动,强风影响时纵横向各阶频率普遍略小于影响前、后,一阶模态频率降幅约 1%;强风影响前、后频率波动水平一致,表明强风作用时结构自振频率降低,后续恢复正常,说明本次强风未影响建筑结构健康。超高层建筑内部相对恒温,此次频率变化可归因于强风作用。

篇幅所限,本文仅给出一阶模态频率变化图(图 5),纵坐标频率为当日识别频率的每小时平均值,以清晰呈现变化趋势。图中可见,强风影响时一阶模态频率略小于影响前、后,即强风作用期间结构自振频率减小,过后恢复至正常波动范围。推测因荷载与位移的非线性关系,风荷载作用下构件刚度暂时退化,导致结构自振频率降低;强风消失后刚度恢复,结构自振频率亦回归正常波动水平。

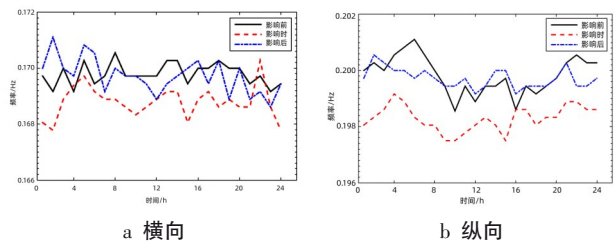


图5 不同时间一阶模态频率变化

5 结语

通过对超高层建筑进行持续的环境振动监测,对常态风和强风影响下的结构振动响应记录进行加速度和位移幅值分析;采用功率谱方法对结构的模态频率进行识别,比较了结构在常态风和强风作用下结构模态频率的变化情况。在常态风作用下,超高层建筑的振动幅度较小;在强风的影响下,超高层建筑的振动幅度比常态风高一个数量级,约 18 倍。

强风荷载作用期间会导致超高层建筑的模态频率降低;风荷载变化引起的模态频率波动可能会淹

没结构轻微损伤所引起的频率变化,从而影响基于自振频率而得出的结构损伤诊断结果;在超高层结构的健康监测等研究中应考虑风荷载的影响。而且强风引起的建筑结构振动可能引起人们的不适,在结构设计中必须考虑风荷载等环境振动对结构的舒适性影响。

参考文献

[1] Cawley P., Adams R.D.The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J].The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979 (14): 49-57.

[2] 肖从真, 王翠坤, 张维. 高层建筑的重力二阶效应分析方法与主要影响因素[J]. 建筑科学, 2003, 19 (4): 14-16.

[3] 梁仁杰, 吴京, 何婧, 等 .P-Δ效应对结构动力特性的影响[J]. 土木工程学报, 2013, 46 (S2): 68-72.

[4] Kanazawa, K. (2006)"Structural damage detection from natural frequency eliminated by temperature effect", Proceedings of 2006 IMAC-XXIV: Conference& Exposition on Structural Dynamics, Society for Experimental Mechanics, USA, pp.

[5] 王亚勇, 张自平, 贺军, 吕振利. 深圳地王大厦测振、测风试验研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19 (3): 58-63.

[6] 肖仪清, 欧进萍, 李朝, 等. 深圳地土大厦台风特征与风致振动同步观测研究[C]. 第十二届全国结构风工程学术会议论文集, 2005: 792-797.

[7] 徐枫, 陈文礼, 肖仪清, 段忠东, 欧进萍. 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.

[8] 乔升访, 唐孟雄, 胡贺松, 等. 基于 SHM 的超高层建筑性能化评估研究现状[J]. 广州建筑, 2020, 48 (3): 27-31.

[9] 单伽程, 王律己, 余桦, 苏金蓉. 结构强震观测与评估研究现状与展望[J]. 工程力学, 2022, 39 (11): 1-12.

[10] 唐德徽. 超高层结构风振时变动力特性跟踪与变化机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.