

文章编号: 1001-4888(2018)04-0534-09

超高层建筑多种风洞试验方式对比研究^{*}

王磊^{1,2}, 王泽康¹, 张振华¹, 闫安志¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南焦作 454000; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北武汉 430072)

摘要: 为了研究超高层建筑不同风洞试验方式结果的差异及原因, 对某 347m 超高层建筑进行了刚性测压模型、强迫振动模型和多自由度气弹模型风洞试验, 并将三种试验结果进行分析。对比了刚性测压模型与气弹模型的风致位移响应, 分析气动阻尼比对位移响应的影响; 同时对比了强迫振动模型与多自由度气弹模型在湍流场及均匀流场中气弹参数的差异。结果表明: 刚性测压模型风洞试验在气弹效应不显著的情况下较为可靠而方便; 当气弹效应较显著时, 多自由度气弹模型的风洞试验结果更为真实; 在均匀流场中, 结构发生共振时, 强迫振动模型的风洞试验结果有一定的参考价值, 但在湍流场中, 特别是不发生共振时, 试验结果与实际情况存在较大差异。高层建筑强迫振动模型振动形式的不精确性会导致试验结果的失真, 将强迫振动模型应用到实际高层建筑抗风时, 其振动形式还有待改进。

关键词: 风洞试验; 刚性模型; 强迫振动模型; 多自由度气弹模型

中图分类号: TU973.2; V211.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-032

0 引言

目前, 超高层建筑的风洞试验方式主要有刚性模型测力或测压试验、气动弹性模型试验和强迫振动模型试验。这些试验方法各有优势, 通常认为, 测力天平 and 刚性测压模型试验适用于研究高度不太高或气动弹性效应不太明显的超高层建筑^[1-5]; 而气弹模型则较多应用于高宽比较大或气弹效应较显著的超高层建筑^[6-11], 因为此类模型可以兼顾气弹效应的影响; 高层建筑强迫振动模型自 20 世纪 90 年代被提出后^[12-14], 一直受到关注, 并被应用于超高层建筑气弹效应研究及实际高层建筑抗风设计中^[14, 15]。文献[16]通过强迫振动试验识别了某高层建筑的气弹参数, 将该气弹参数与刚性测压模型试验结果相结合, 对该建筑的风致响应进行修正, 并认为这种做法是一种稳定、可靠且有实用前景的精细化抗风设计方法。

虽然诸多学者通过不同类型的超高层建筑风洞模型试验都做出了相应的研究成果, 业界对这些试验方法的优劣也有基本一致的认识。但是, 以同一个建筑为研究对象进行多种方式的风洞试验, 以直接对比不同试验方式差异及其原因的研究还有待加强, 尤其是将强迫振动模型应用到超高层建筑风洞试验所带来的误差还未引起重视。本文对某 347m 超高层建筑进行了刚性测压模型试验、强迫振动模型和气弹模型风洞试验, 对试验结果进行对比研究, 为超高层建筑风洞试验方式的选取和改进提供参考。

1 风洞试验概况

1.1 建筑概况

该超高层建筑结构位于湖南省长沙市, 所处地区 100 年重现期的基本风压为 0.40 kN/m^2 。结构总

^{*} 收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(51178359, 51308195, 51708186)资助, 河南理工大学博士基金(B2016-62)

通讯作者: 王磊(1987—), 男, 博士, 讲师。主要从事结构抗风研究。Email: tumuwanglei@123.com

高 347m,共 80 层,建筑横截面宽度 48m,结构一阶平动频率为 0.17Hz。建筑横截面为切角方形截面,东西两侧面有凹槽,南北两侧面有凸起,该建筑效果图见图 1。

1.2 刚性测压模型概况

试验在武汉大学 WD-1 边界层风洞实验室进行。试验模型风向角及建筑坐标轴示意图如图 2 所示。所模拟实际风场均为 C 类湍流场,图 3 为所模拟风场的风剖面、紊流度和风速谱。

刚性模型由透明有机玻璃制成,总共布置了 509 个测压点进行同步测压。试验模拟了周边 250m 半径范围的主要建筑,试验照片见图 4。气弹模型和强迫振动模型试验也考虑了同样的周边建筑情况。



图1 建筑效果图

Fig.1 Architecture pictorial drawing

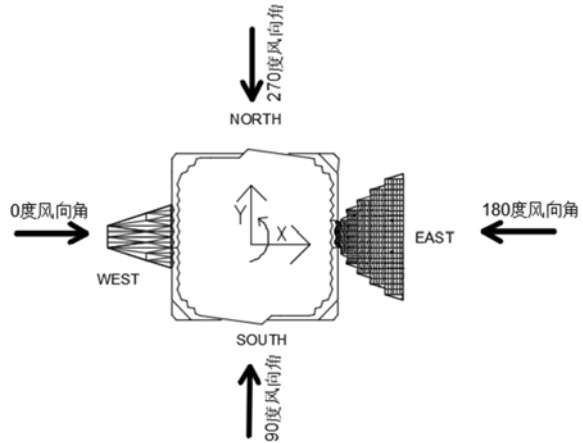


图2 风向角及坐标示意图

Fig.2 Wind direction and coordinate

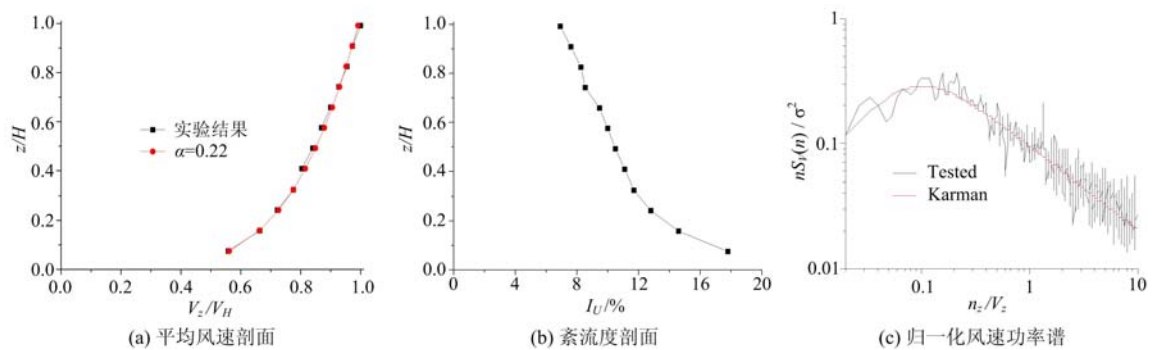


图3 平均风速风剖面、湍流度和归一化风速谱

Fig.3 Profile mean wind speed, turbulence intensity and normalized power spectra of wind speed

强迫振动模型的上部建筑模型的几何缩尺比为 1 : 400,频率缩尺比为 20 : 1,风速比 1 : 20,试验流场为湍流场和均匀场。双向摆式强迫振动装置可以实现建筑模型按设定频率和振幅的顺风向和横风向耦合摆动,振动形式与前人强迫振动模型^[11-14]相同,为线性振型的简谐振动。双向强迫振动装置固定于风洞底板(见图 5),其工作原理可以参考文献[16]。建筑模型通过中心杆与振动台连接,当振动台按设定频率、振幅做简谐振动时,可以带动上部模型沿两个主轴向摆动。图 6 为风洞中建筑模型照片。图 7 为风洞试验中使用的双轴强迫振动装置基本结构图。

1.3 多自由度气弹模型试验

多自由度气弹模型见图 8,相关制作、调试方法可参见文献[8]和文献[19],限于篇幅不再具体介绍。首先进行敲击试验,通过自由衰减曲线识别结构 X 轴向和 Y 轴向的频率和结构阻尼比。X 轴向与 Y 轴向的自振频率约为 7.35Hz,结构阻尼比约为 0.01,模型质量等参数经相似比转化后与实际建筑相一致,不再具体说明。在模型顶部位置顺、横风向布置激光位移计测量顶部位移,采样时间 120s。MD-OF 模型振型与实际建筑振型的对比情况见图 9。



图 4 刚性测压模型
Fig. 4 Rigid test model



图 5 强迫振动装置安装情况
Fig. 5 Forced vibration device



图 6 强迫振动模型
Fig. 6 Forced vibration model

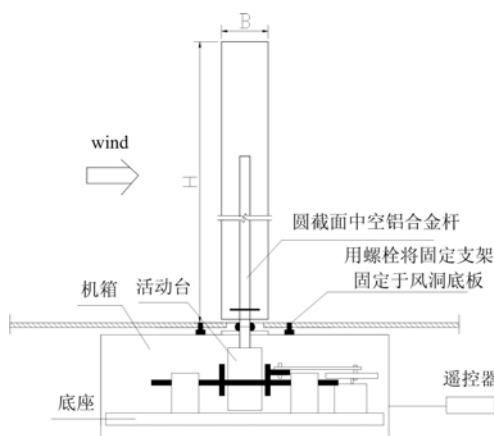


图 7 装置剖面图
Fig. 7 Profile of forced vibration device

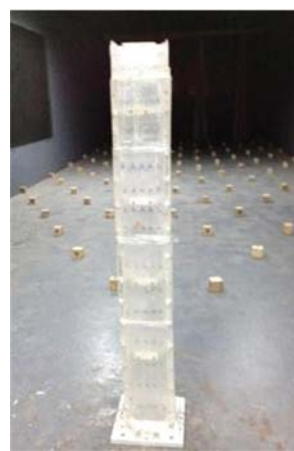


图 8 多自由度气弹模型
Fig. 8 MDOF aero-elastic model

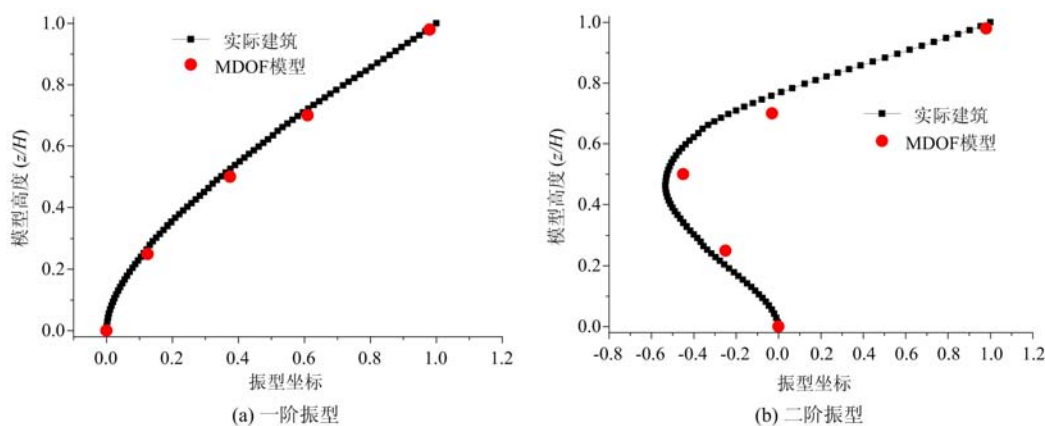


图 9 振型图
Fig. 9 Mode shape of MDOF model

2 试验结果对比分析

2.1 刚性模型与多自由度气弹模型对比

为方便对比分析,取 270° 风向角的试验结果做为研究对象,在计算刚性模型风致响应时,取结构阻尼比都为 0.01,并根据频域振型叠加法计算风致响应^[3]。本文建筑 100 年重现期风速对应的折算风速约为 7,但是作为理论研究,本文亦分析了折算风速大于 7 的情况。图 10 为刚性模型与多自由度气弹

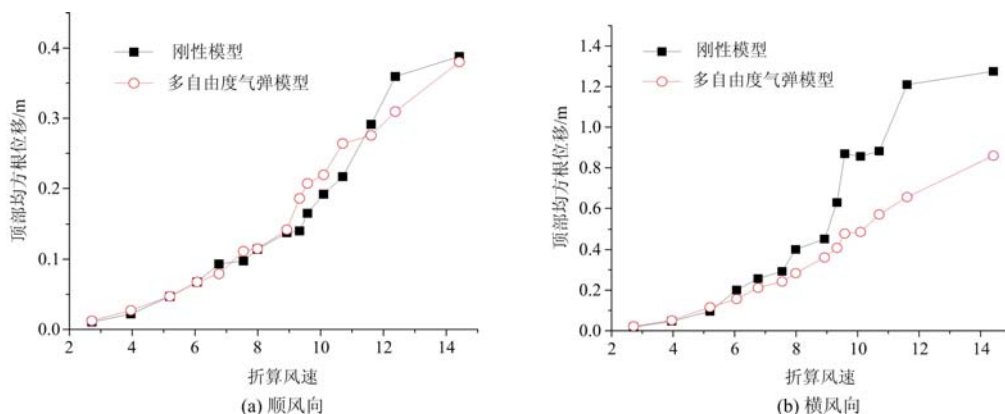


图10 均方根位移响应

Fig. 10 RMS displacement response

模型横风向和顺风向顶部均方根位移随折算风速的变化曲线。图11为多自由度气弹模型气动阻尼比随折算风速的变化曲线。本文识别气动阻尼的方法为随机减量法,限于篇幅,不再介绍具体识别过程。

从图10(a)中可以看出,刚性模型和多自由度气弹模型的顺风向顶部均方根位移随折算风速的变化曲线较为吻合。从图10(b)中可以看出:在折算风速小于6时,刚性模型和气弹模型横风向位移响应均方根近乎相等;在折算风速大于6时,刚性模型的顶部位移均方根要大于多自由度气弹模型,二者差异的原因在于多自由度气弹模型考虑到了气动阻尼的影响。结合图11多自由度气弹模型气动阻尼的变化情况,图10的结果可以得到合理的解释。具体来说,在折算风速小于6时,横风向气动阻尼接近于0,此时气动阻尼影响可以忽略。当折算风速大于6后,气动阻尼随折算风速的增大而迅速增大,且均为正值,因此气弹模型的顶部位移均方根增长趋势较刚性模型而言较为缓慢。最终使得两种模型的风致位移响应差值折算风速的增大大致呈增加趋势。

以上结果说明,在气弹效应不显著的情况下,刚性模型结果是可靠的;当考虑气弹效应时,多自由度气弹模型较为真实地反映了结构风效应。

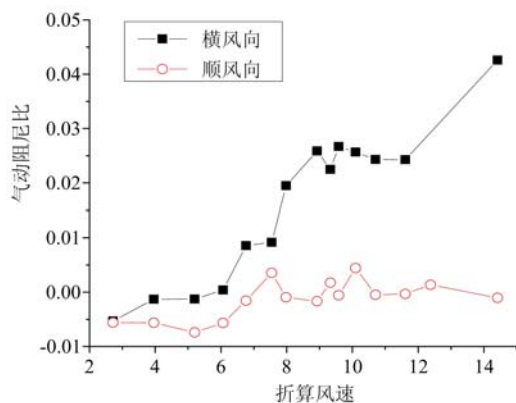


图11 气弹模型气动阻尼比

Fig. 11 Aerodynamic damping ratio of MDOF model

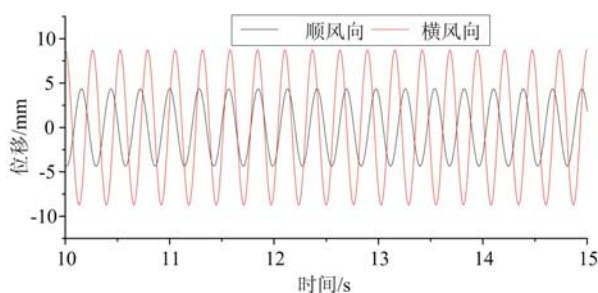


图12 强迫振动模型位移时程

Fig. 12 Time history of forced harmonic vibration model

2.2 湍流场中强迫振动模型与多自由度气弹模型试验对比

湍流场中强迫振动模型的位移时程曲线如图12所示。从图12中可以看出,强迫振动位移时程具有较理想的简谐性。图13为多自由度气弹模型的位移时程曲线,从图中可以看出,在各个折算风速下,模型顶部位移时程曲线并没有呈现出较强的简谐特性。显然,多自由度气弹模型的这种随机性的振动方式与强迫振动模型的简谐振动方式有很大差别。

图14为多自由度气弹模型和强迫振动模型的横风向振动频率随折算风速的变化曲线。图14中,强迫振动模型横风向振动频率是由所识别的气动刚度系数换算得到的。所用的气动刚度系数识别方法

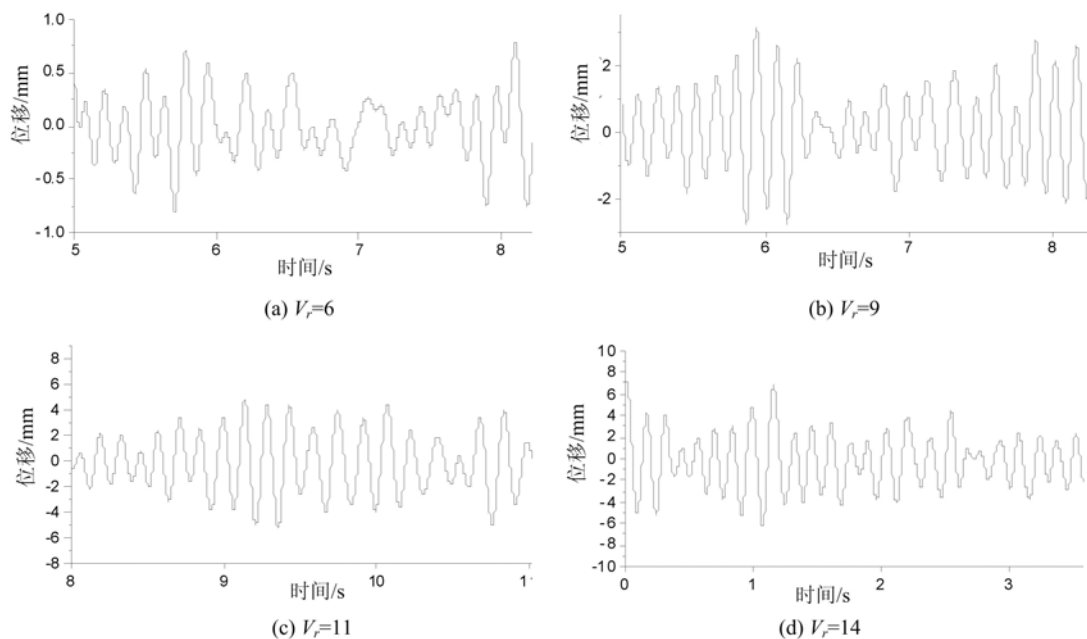


图 13 气弹模型横风向位移响应时程

Fig. 13 Across-wind displacement response by MDOF model

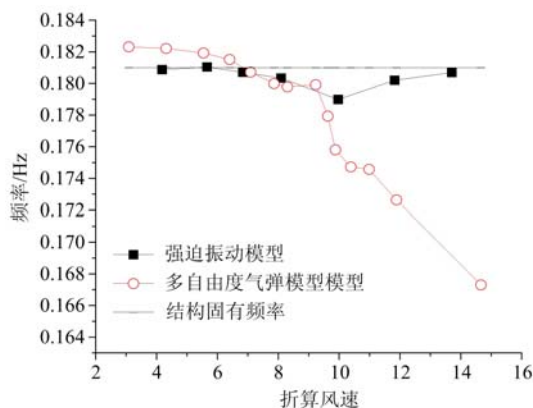


图 14 模型横风向振动频率对比

Fig. 14 Across-wind vibration frequency of different model

为复气动刚度法,囿于篇幅限制,不再对该方法做具体介绍,可参见文献[13,14]。从图 14 可以发现,强迫振动模型识别的振动频率随折算风速的增大呈“V”字形。而多自由度气弹模型测得的模型横风向振动频率在折算风速接近 10 之后迅速减小,在折算风速到达 15 时,振动频率与结构固有频率相比减小了 8%左右。可见,两种模型在气动刚度方面的识别结果相差甚远。

图 15 为强迫振动模型与多自由度气弹模型的横风向和顺风向气动阻尼比随折算风速的变化曲线。从图 15 的结果看,两种试验方式的阻尼曲线差别显著,甚至不具有可比性。究其原因,是由于两种试验模型振动方式的差别较大,造成相应的气弹效应及气动弹性参数大不相同。显然,从振动形式这一角度来说,强迫振动模型的试验结果是不真实的,因为在实际振动过程中,尤其是不发生共振的情况下,并不会出现图 12 所示的简谐振动形式。换言之,既有强迫振动模型试验并不能像文献[16]所说的那样成为高层建筑的“稳定、可靠且大有实用前景的精细化抗风设计方法”。

2.3 均匀流场中的强迫振动模型与多自由度气弹模型试验对比

为进一步研究多自由度气弹模型与双向强迫振动模型气弹参数上差异的原因,在均匀流场中对两种模型再次进行了风洞试验。

图 16 为多自由度气弹模型在均匀流场中顶部横风向均方根位移随折算风速的变化曲线。从图中可以看出,多自由度气弹模型在折算风速为 11 时达到最大值,之后随折算风速的增大而减小。图 17 为折算风速为 11 时的横风向顶部位移的时程曲线。从图 17 中可以看出多自由度气弹模型在均匀流共振风速时的位移响应时程具有较明显的简谐周期性。这说明在均匀流场中,模型顶部折算风速为 11 时结构出现了很大程度的共振。显然,相对于图 13 中湍流场的横风向涡振位移时程来说,图 17 的涡振情况更接近简谐强迫振动。

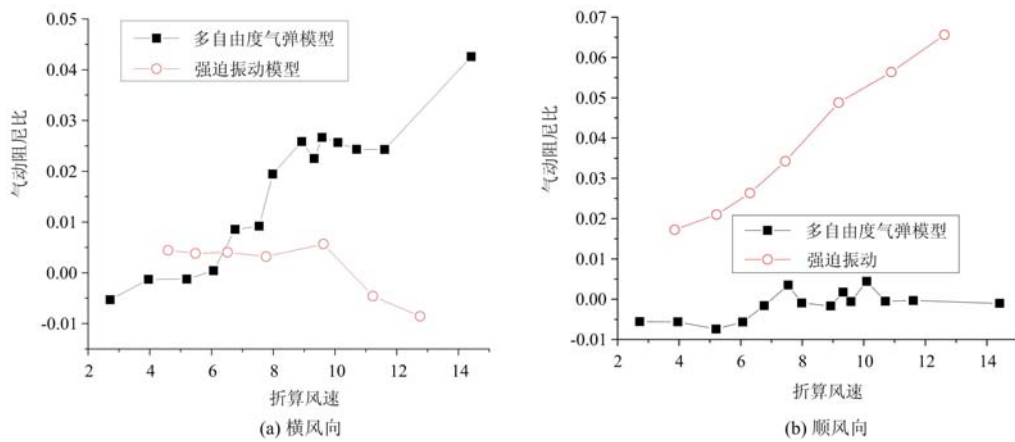


图15 模型气动阻尼比对比

Fig. 15 Across-wind aerodynamic damping ratio of different model

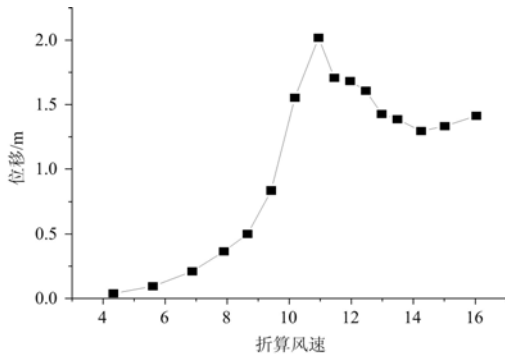


图16 横风向均方根位移

Fig. 16 RMS displacement in cross-wind

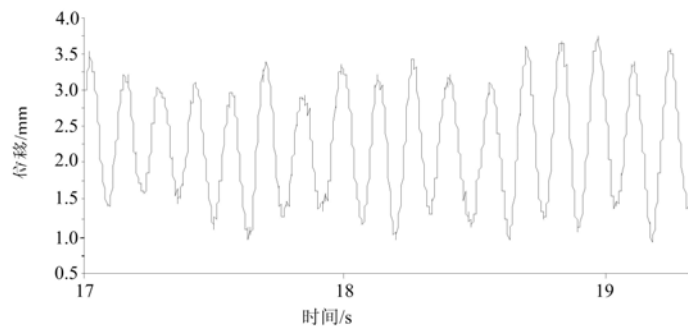


图17 横风向涡致位移时程

Fig. 17 Time history of vortex induced displacement

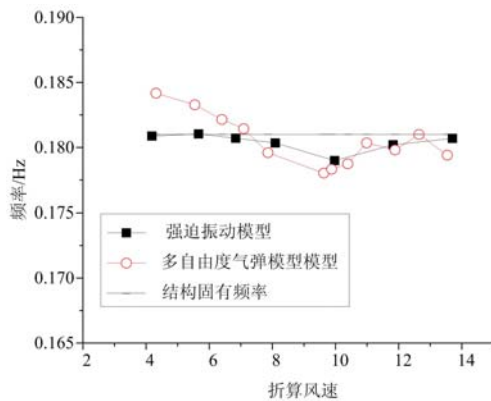


图18 模型横风向振动频率对比

Fig. 18 Across-wind vibration frequency by different model

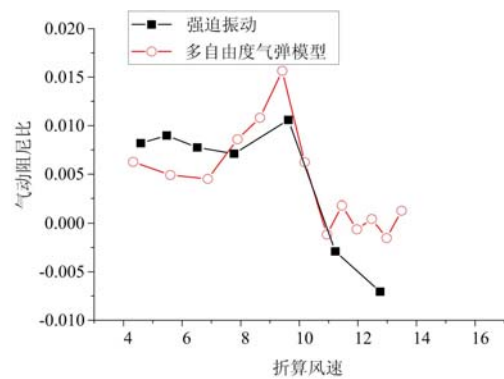


图19 模型横风向气动阻尼比对比

Fig. 19 Across-wind aerodynamic damping ratio by different model

图18为强迫振动模型与多自由度气弹模型横风向频率随折算风速变化曲线。其中强迫振动模型频率是指,通过强迫振动模型试验识别的气动刚度系数比结构固有频率进行修正后的结果。从图中可以看出,两条曲线的变化情况基本吻合,都呈“V”状且变化趋势一致。要说明的是:振动频率和气动刚度变化,并不是由材料的非线性导致,而是气动刚度起到了主要作用,文献[17]已经对此进行了证实,本文图16和图18的数据也证明了这一点,因为图16中折算风速12左右时的位移较大,而相应图18的振动频率变化量和气动刚度却很小。

图19为强迫振动模型与多自由度气弹模型横风向气动阻尼比随折算风速的变化曲线。图中两条

曲线出现最大值的位置均在折算风速为 10 的附近,曲线的变化趋势基本一致。上述结果表明:在均匀流场低折算风速时,气弹模型振动是随机的,与强迫振动模型的振动形式显著不同,此时的气动阻尼和气动刚度仍有较大差别;在共振风速附近,气弹模型的振动形式接近简谐,振动频率及气动阻尼比随折算风速的变化趋势与强迫振动模型基本一致;折算风速大于共振风速时则介于以上两种情况之间。

要补充说明的是,通常来说在低折减风速时典型方形截面模型横风气动阻尼在 0 附近且为正值,在折算风速 8~12 时出现负值,在 12 以后重新增长^[8-11]。图 11 中横风向气动阻尼比曲线与既有方截面气动阻尼研究结果不尽相同,其原因在于:(a)本文模型截面为带切角、凹槽和凸起的方形截面,截面类型与标准方截面差别较大,气弹效应存在差异则是必然结果。(b)气弹参数与风致位移有密切联系。在实际湍流场中,在折算风速达到理论共振风速时本文气弹模型横风向位移并没有明显的增大,因而相应的气动阻尼也未在此处有突变现象,即在折算风速 8~12 时气动阻尼未出现负值。而图 19 中均匀流场的气动阻尼则与既有研究结果较为一致,其原因也是在于在均匀流场中气弹模型在共振风速附近出现了较大的横风向位移(见图 16)。

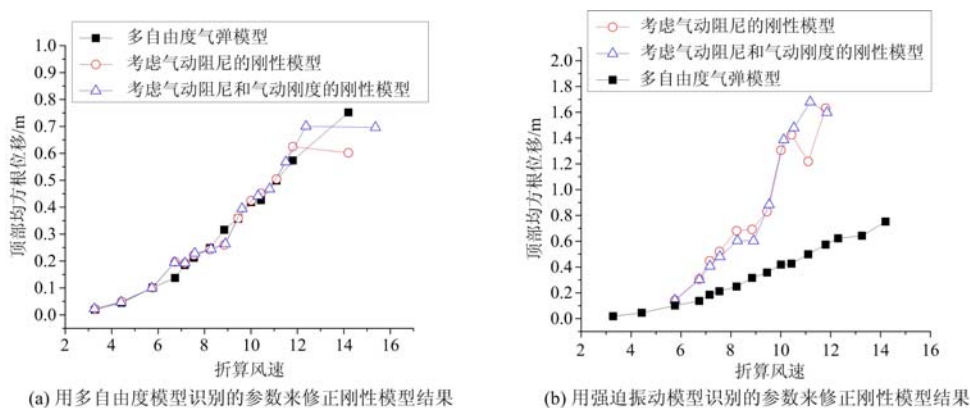


图 20 考虑气弹参数的刚性模型风致位移

Fig. 20 Displacement of rigid model corrected by aerodynamic parameters

2.4 考虑气弹参数后刚性模型风致响应

图 20(a)和图 20(b)分别给出了用多自由度气弹模型和强迫振动模型识别得到的气弹参数对刚性模型横风向位移进行修正所得的结果。从图 20(a)可以看出,考虑气动阻尼后,刚性模型横风向位移与多自由度气弹模型风致位移非常接近,这就进一步验证了 2.1 节的内容。从图 20(a)可知,除个别点外,考虑气动刚度对风致位移响应的影响很小,说明气动刚度对本文建筑的贡献不大。从图 20(b)可以看出,用强迫振动模型识别的气弹参数来修正刚性模型时,刚性模型位移曲线与气弹模型的位移曲线相差显著,没有起到合理有效的修正效果。这就进一步验证了 2.2 节的观点。

3 结论

本文以某高层建筑为例,对高层建筑几种风洞试验数据进行了定性的对比研究,相关结论亦可作为其他高层建筑的定性参考。针对将强迫振动模型应用到实际超高层建筑抗风设计的现象,本文初步指出将既有强迫振动试验方式应用于实际高层建筑抗风设计时还存在缺陷,并分析了缺陷原因。

(1) 当不必考虑气弹效应时,刚性模型所模拟的试验结果是可靠的;当气弹效应较显著时,气弹模型的试验结果更加符合实际。

(2) 在均匀流场中,强迫振动模型试验结果更适用于结构发生共振时的情况。在湍流场中,超高层建筑强迫振动模型与多自由度气弹模型的气弹参数结果有显著差异。在湍流场中,结构不发生明显共振时,强迫振动模型试验结果可信性较差。

(3) 对于实际湍流场不发生共振的情况,用多自由度气弹模型识别的气弹参数对刚性模型风致响应进行修正是一种可靠的做法,但用强迫振动模型识别的气弹参数来修正,修正效果则偏离实际。

(4) 造成超高层建筑强迫振动模型试验结果失真的原因是,强迫振动模型的简谐振动形式与实际

振动情况差别过大。既有的超高层建筑强迫振动装置系统还有待改进,以尽可能地模拟出实际结构的随机振动特性。

参考文献:

- [1] 顾明,周印,张锋,等.用高频动态天平方法研究金茂大厦的动力风荷载和风振响应[J].建筑结构学报,2000,21(4):55—61 (GU Ming, ZHOU Yin, ZHANG Feng, et al. Study on wind loads and wind-induced vibration of Jinmao building using high-frequency-force-balance method[J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(4):55—61 (in Chinese))
- [2] 王磊,梁枢果,邹良浩,等.阻塞效应对高层建筑风洞试验的影响分析[J].实验力学,2013,28(2):261—268 (WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Test study on the wind pressure distribution of a super high-rise building[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):261—268 (in Chinese))
- [3] 梁枢果,邹良浩,郭必武.基于刚性模型测压风洞试验的武汉国际证券大厦三维风致响应分析[J].工程力学,2009,26(3):118—127 (LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, GUO Biwu. Investigation on wind-induced 3-D response of Wuhan International Stock Building on wind tunnel tests of rigid models[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3):118—127 (in Chinese))
- [4] 谢壮宁,方小丹,倪振华,等.广州西塔风效应研究[J].建筑结构学报,2009,30(1):107—114 (XIE Zhuangning, FANG Xiaodan, NI Zhenghua, et al. Study on Guangzhou West Tower[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1):107—114 (in Chinese))
- [5] 李会知.高层建筑风压试验研究[J].实验力学,2000,15(2):157—162 (LI Huizhi. An experimental investigation for the wind pressure distribution on a high building[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(2):157—162 (in Chinese))
- [6] 梁枢果,吴海洋,陈政清.矩形超高层建筑涡激共振模型与响应研究[J].振动工程学报,2011,24(3):240—245 (LIANG Shuguo, WU Haiyang, CHEN Zhengqing. Investigation on model and responses of vortex-induced resonances of rectangular super high-rise buildings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(3):240—245 (in Chinese))
- [7] 王磊,梁枢果,邹良浩,等.某拟建838m高楼多自由度气弹模型风洞试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(1):9—16 (WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Investigation of the wind-induced responses of a tower 838m high based on a multi-degree-of freedom aero-elastic model wind tunnel test[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2015, 42(1):9—16 (in Chinese))
- [8] 王磊,梁枢果,邹良浩,等.超高层建筑多自由度气弹模型的优势及制作方法[J].振动与冲击,2014,33(17):24—29 (WANG Lei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Advantages and making method of a super high-rise building's multi-DOF aero-elastic model[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 33(17):24—29 (in Chinese))
- [9] 李寿英,肖春云,范永钢,等.方形截面超高层建筑全风向气动阻尼的试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(7):9—15 (LI Shouying, XIAO Chunyun, FAN Yonggang, et al. Experimental investigation of aerodynamic damping on super-high-rise buildings with square cross section under the action of full-direction wind[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2015, 42(7):9—15 (in Chinese))
- [10] Quan Y, Cao H L, Gu M. Effects of turbulence intensity and exterior geometry on across-wind aerodynamic damping of rectangular super-tall buildings[J]. Wind and Structures, 2016, 22(2):185—209.
- [11] 曹会兰,全涌,顾明.矩形截面超高层建筑横风向气动阻尼的风洞试验研究[J].空气动力学学报,2014,32(3):351—359 (CAO Huilan, QUAN Yong, GU Ming. Wind tunnel test on across-wind aerodynamic damping of rectangular super-high-rise buildings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(3):351—359 (in Chinese))
- [12] CHEN Rouhua, CHENG Chiming, LU Pochien. Wind-structure interaction of a high-rise building in boundary layer flows[J]. Journal of the Chinese Institute of Civil Hydraulic Engineering, 1997, 9(2):271—279.
- [13] Steckley A, Vickery B J, Isyumov N. On the measurement of motion induced forces on models in turbulent shear flow[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1990, 36(36):339—350.
- [14] Vickery B J, Steckley A. Aerodynamic damping and vortex excitation on an oscillating prism in turbulent shear flow[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1):121—140.

- [15] 汤怀强, 邹良浩, 梁枢果, 等. 基于扭转强迫振动风洞试验的矩形截面高层建筑三维风荷载研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7):116—122 (TANG Huaqiang, ZOU Lianghao, LIANG Shuguo, et al. Three-dimensional wind loads of rectangular tall buildings based on torsional forced vibration wind tunnel tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7):116—122 (in Chinese))
- [16] 宋微微, 梁枢果, 邹良浩, 等. 超高层建筑气动弹性效应双向受迫振动风洞试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11):84—91 (SONG Weiwei, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Investigation on wind-induced aeroelastic effects of a super high-rise building with 347m in height by bi-axial forced vibration wind tunnel test[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11):84—91 (in Chinese))
- [17] Wang L, Liang S, Song J, et al. Analysis of vortex induced vibration frequency of super tall building based on wind tunnel tests of MDOF aero-elastic model[J]. Wind & Structures An International Journal, 2015, 21(5):523—536.
- [18] Liang Shuguo, Zou Lianghao, PengXiaohui, et al. Dynamic wind loads on tall building models undergoing Bi-axial forced vibration in wind tunnel test[C]. The 12th International Conference on Wind Engineering, Amsterdam, The Netherlands, 2011:1055—1062.
- [19] 王磊, 梁枢果, 张振华, 等. 超高层建筑横风向气动阻尼比评估方法研究[J]. 工程力学, 2017, 34(1):145—153 (WANG Lei, LIANG Shuguo, ZHANG Zhenhua, et al. Across wind aerodynamic damping of super tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 145—153 (in Chinese))

Comparative study of various wind tunnel experimental methods for super high-rise building

WANG Lei^{1,2}, WANG Ze-kang¹, ZHANG Zhen-hua¹, YAN An-zhi¹

(1. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the difference and cause of results obtained from different wind tunnel experiment methods for super high-rise building, adopting the rigid pressure model, forced vibration model and multi-degree of freedom aeroelastic model, wind tunnel experiment was carried out, respectively, for a 347-m high-rise building. Results obtained from every model were analyzed. The wind-induced displacement response of rigid pressure measurement model and aeroelastic model was compared, and the influence of aerodynamic damping ratio on displacement response was analyzed. At the same time, the difference of aeroelastic parameters between forced vibration model and the multi-degree of freedom aeroelastic model in turbulent flow field and uniform flow field was compared, respectively. Results show that the wind tunnel experiment by using rigid pressure model is more reliable and convenient, under the condition that the aeroelastic effect is not significant; when the aeroelastic effect is more significant, the results obtained from wind tunnel experiment by multi-degree of freedom aeroelastic model are more true. In uniform flow field, when the structure is resonant, the results from wind tunnel experiment using forced vibration model have some reference value; but in the turbulent flow, especially when there is no resonance, its experimental results are quite different from the actual situation. The inaccuracy form forced vibration model for high-rise building will lead to distortion of the experimental results. When forced vibration model is applied to the actual high-rise buildings, the vibration form needs to be improved.

Keywords: wind tunnel experiment; rigid model; forced vibration model; multi-degree of freedom aeroelastic model