

粘滞阻尼器在连体高层结构中的抗风减振效果

陈学伟^{a,b}, 韩小雷^{a,b}, 毛贵牛^a, 季静^{a,b}

(华南理工大学 a. 高层建筑结构研究所, 广州 510640; b. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 主要研究设置粘滞阻尼器的连体高层结构风振响应及风动力荷载作用下粘滞阻尼器对结构内力、变形、加速度及能量耗散的控制效果。根据连体高层结构刚性模型的风洞试验, 得到风压系数时程数据。通过编制基于风洞试验的风荷载时程处理程序 WINDHIST V2.0, 可将风洞试验数据进行处理并导入有限元程序进行风振时程分析。对连体高层结构进行多工况风振时程分析, 结果显示: 设置粘滞阻尼器能减小连体结构内力及变形, 内力的控制效果优于变形的控制效果。连体结构顶部加速度是由脉动风的动力效应引起, 粘滞阻尼器能有效地控制结构顶部楼层加速度。

关键词: 结构; 动力荷载; 风工程; 时程分析; 粘滞阻尼器; 高层结构; 风洞试验; 风致响应

中图分类号: TU973.14; TU973.32 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0074-07

Wind-induced Response Analysis on a Connected Tall Building Structure with Viscous Damper

CHEN Xue-wei^{a,b}, HAN Xiao-lei^{a,b}, MAO Gui-niu^a, JI Jing^{a,b}

(a. Tall Building Structure Research Institute; b. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: The control effects of a connected tall building structure with viscous damper in several respects were studied, such as internal force, deformation, acceleration and energy under dynamic wind load. Firstly, wind pressure time-history data were obtained from the wind-tunnel test of the structure model, and then a wind load processing program WINDHIST V2.0 based on wind tunnel test was developed, by which wind pressure data processed and inputted into Finite Element Method(FEM) program. Thus wind-induced vibration time-history could be analysed under various working conditions. It was shown that both the internal force and deformation of the connected structure with viscous damper can be decreased, while the effect of the former was more obvious than the latter. The acceleration at the top of the connected structure caused by dynamic response of fluctuating wind can be controlled effectively by viscous damper.

Key words: structures; dynamic loads; wind engineering; time-domain analysis; viscous damper; tall building; wind tunnel test; wind-induced response

风荷载是高层建筑设计的主要控制因素之一, 一般的风荷载计算方法是根据中国荷载规范^[1], 采用等效风静力荷载, 该静力风荷载通过风振系数 β_z 考虑风动力放大, 规则体型结构的风振系数 β_z 通过荷载规范计算得到, 复杂体型结构一般采用基

于风洞试验数据的频域法计算得到。由于粘滞阻尼器在高层结构中越来越多的得到应用, 风振分析的频域法对于此类结构不再适用, 而时域法^[2]是对此类结构进行风振分析的有效手段。

收稿日期: 2009-04-15

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题基金(C708086z)

作者简介: 陈学伟(1983-), 男, 博士生, 主要从事高层建筑结构抗震及抗风分析, (E-mail) dinochen1983@yahoo.com.cn.

1 风振时域法

1.1 基本原理

风振分析主要分为2种方法^[3]:频域法与时域法。频域法物理概念清晰,计算效率较高而应用广泛。时域法可以考虑结构几何与材料非线性的影响,直观描述一定时程内结构的风振响应过程,而且不存在频域法中模态截断的影响^[4]。

李杰^[5]等对单层球面风振分析的时域法与频域法进行了比较,表明时域法和频域CQC法的计算结果比较一致。笔者基于AR法^[6]模拟生成风压时程,并对不同场地^[7]、不同结构形式、不同高度、不同刚度的高层结构进行风振时程分析^[8],计算结果与按简化^[9-10]公式计算结果进行对比,表明时域方法具有一定的精度,能合理评估结构在风荷载下的响应。

风振时域法的求解方法与地震时域法相同,建立集中参数多自由度体系的运动方程,如式(1)所示。该文主要研究带粘滞阻尼器的结构体系,运动方程增加了非线性阻尼器一项 $C_v\dot{u}^\alpha$,如式(2)所示。由于结构附加粘滞阻尼器,频域法不能计算结构风振响应。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (1)$$

$$M\ddot{u} + C_v\dot{u}^\alpha + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (2)$$

其中 K 为刚度矩阵; C 为阻尼矩阵; M 为对角质量矩阵; u, \dot{u}, \ddot{u} 分别为结构的位移、速度、加速度向量。 $P(t)$ 为所施加的荷载。

为求解附加粘滞阻尼器的结构风振响应的控制方程,采用由E. L. Wilson^[11]开发的快速非线性分析法(FNA)^[12],此方法主要针对线弹性结构使用而设计,但结构中可以有有限数量预定义的非线性单元,如粘滞阻尼器单元。

1.2 基本步骤

风振时域法的基本步骤如下:

1)通过有限元软件建立结构弹性分析模型。根据具体情况,选取合理的结构计算模型。材料性能为线弹性,结构几何变形为小变形。结构设置了粘滞阻尼器,需要定义粘滞阻尼器的非线性性能。

2)确定风荷载时程数据。风振时程分析首先需确定风荷载时程,目前常用的方法是:①进行风荷载的时程模拟,将风速时程转换为风荷载时程;②直接通过风洞试验测得结构表面各测点的风压系数时程数据,再转换为风荷载时程,将风荷载数据导入有限元分析软件中。

3)确定时程分析参数。选取时程分析方法:逐步积分法或快速非线性分析,时间步长及分析总时间等。

4)进行时程分析并统计结果。根据结构层间位移,层间剪力,耗能情况及楼层加速度评估结构风振响应。

2 工程实例

2.1 工程概况

某连体高层建筑结构^[13]总高度86.5 m,主要由相距120 m的左右两个塔楼、高空连廊及低空连廊4部分组成;塔楼采用现浇钢筋混凝土框架剪力墙结构,高空连廊及低空连廊采用钢桁架结构。结构三维布置图如图1所示。为了改善结构抗震性能,提高高空连廊的舒适度,左右塔楼与高空连廊上弦平面及下弦平面设置粘滞阻尼器,顶层结构布置如图2所示。其中,高空连廊上弦平面、下弦平面分别布置有12只粘滞阻尼器,阻尼器参数为:阻尼系数 $C=2\,500\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$,阻尼指数 $\alpha=0.4$;左右塔楼分别布置了22只粘滞阻尼器,阻尼器参数为:阻尼系数 $C=2\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$,阻尼指数 $\alpha=0.3$ 。经模态分析得到结构前4阶振型的周期分别为:2.465 s、1.877 s、1.672 s、0.855 s。

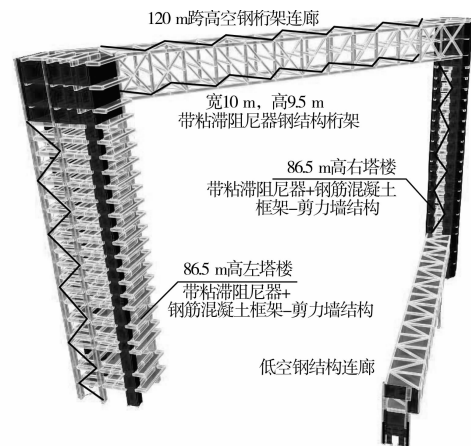


图1 连体高层结构三维示意图

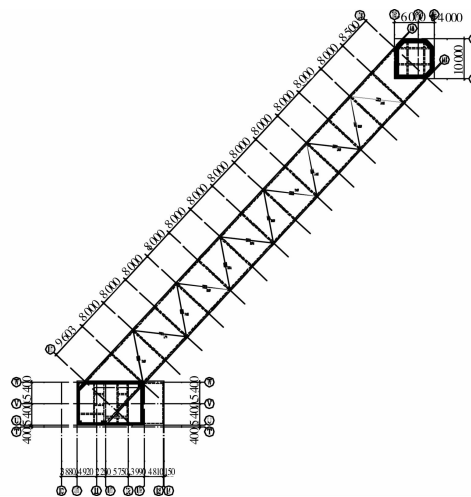


图2 连廊顶部阻尼器布置图

2.2 风洞试验

风洞试验^[14]中,试验模型为刚体模型,包括此连体结构及其前期工程(设缝分隔),如图 3 所示。模型的几何缩尺比为 1/200。模型表面布置了 332 个测压点。试验风向角间隔取 10°,即试验中模拟了 36 个风向的作用。样本点数为 20 480,采样频率为 313 Hz。根据风洞试验的几何缩尺、风速缩尺和风压测量的时间步长可以确定实际模型的风压时程的时间步长为 0.275 8 s。模型区边界层流场模拟为 B 类地貌场地,地貌粗糙度系数为 0.16,基本风压设定为 0.60 kPa。

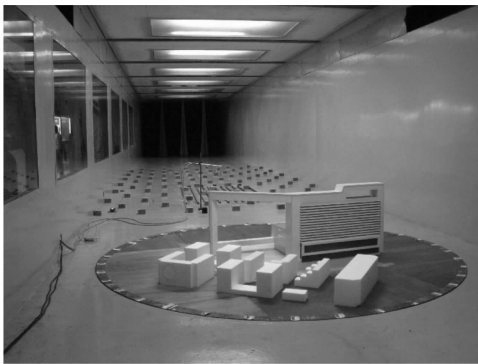


图 3 风洞试验模型图

脉动风的主要特性包括湍流强度、湍流积分尺度等。国际风荷载标准 ISO 指出:离地 30 m 处的大气湍流强度近似与地面粗糙度系数相等。风洞试验中为了满足《荷载规范》^[1]中规定的地貌粗糙度系数及湍流沿高度分布风要求,在试验前进行了测试和校验。采用的风压系数时程数据来源于风洞试验,试验中采用的脉动风的湍流强度经过换算后基本满足规范的要求。湍流积分尺度与湍流互谱密度函数的物理关系密切,即与脉动风的空间相关性关系密切。这主要影响到脉动风在频域内的湍流特性,和频域分析是直接相关的。该文采用风洞试验风压系数时程数据进行时域分析,且各测点同步进行测压的风压时程数据能够体现脉动风的空间相关性,即对湍流积分尺度这一脉动风特性有所考虑。

3 程序编制

在风洞中选一个不受建筑模型影响、且离风洞洞壁边界层足够远的位置作为试验参考点,在该处设置了一根毕托管测量参考点风压,用于计算各测点与参考点高度有关但与试验风速无关的无量纲风压系数。试验参考点选在高度为 0.8 m 处,该高度在缩尺比为 1/200 的情况下对应于实际高度 160 m。

在空气动力学中,物体表面的压力通常用无量纲压力系数 C_{pi} 表示如下:

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (3)$$

其中 C_{pi} 为测点 i 处的风压系数, P_i 为作用点在测点 i 处的压力, P_0 和 P_∞ 分别为试验参考高度处的总压和静压。各测点的风压力计算公式如式(4)所示。

$$F_i = \omega_i A_i = C_{pi} \omega_r = C_{pi} \times \omega_0 \times 1.00 \times \left(\frac{160}{10}\right)^{0.32} \quad (4)$$

其中 F_i 为测点 i 处的风压力, ω_i 为测点 i 处的风压, ω_r 为参考高度处的风压, A_i 为从属面积, ω_0 为基本风压。

结构刚度足够且不存在大变形边界,因此不采用气动弹性模型,不考虑流体与结构的相互作用。连体高层结构的高空连廊与低空连廊不满足刚性隔板假定,有限元模型中风压荷载采用点荷载输入,点荷载时程按式(4)进行计算。左右塔楼由于楼板的作用,满足刚性隔板假定,风荷载时程按楼层合力输入,楼层合力的计算示意图及计算公式如下所示。

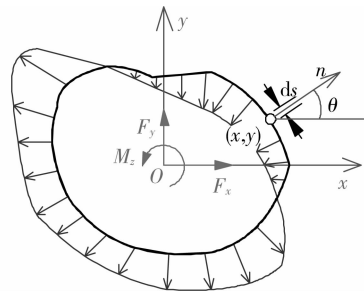


图 4 楼层合力计算示意图

$$F_x = -\omega_r H \int_L \cos \theta C_p ds \quad (5)$$

$$F_y = -\omega_r H \int_L \sin \theta C_p ds \quad (6)$$

$$M_z = -\omega_r H \int_L (x \sin \theta - y \cos \theta) C_p ds \quad (7)$$

其中, F_x 、 F_y 、 M_z 分别为楼层 x 方向作用力, y 方向作用力及绕 z 轴扭矩, H 为楼层从属高度。

根据上述理论,采用面向对象语言 Delphi^[15] 编制了基于风洞试验数据的风振时程荷载处理程序 WINDHIST V2.0。程序流程图如图 5 所示,程序读取风洞试验模型测点空间坐标信息,刚性隔板信息及模型表面法向量,然后自动按格式提取风洞试验风压数据,转化成有限元模型的点荷载及楼层荷载时程数据,并自动向有限元模型添加荷载时程及风振分析工况。程序界面如图 6 所示。

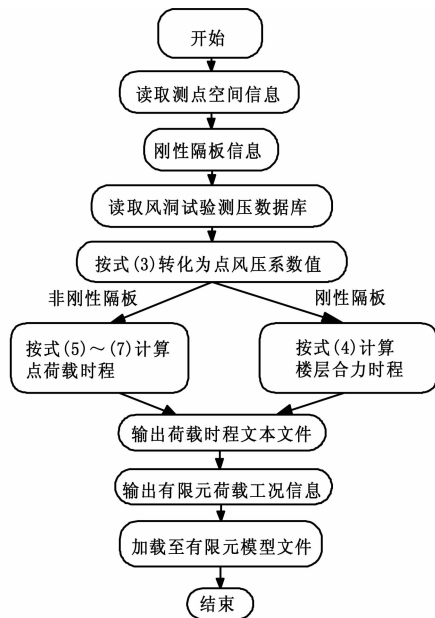


图 5 程序流程图

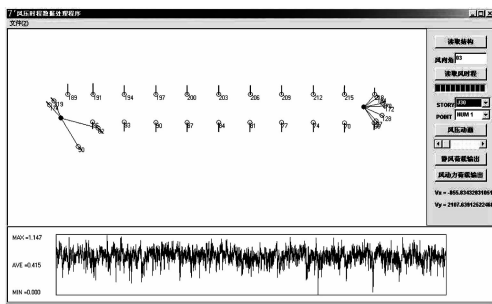


图 6 程序界面图

4 风振响应分析

4.1 风振时程分析

时域法采用美国 CSI 公司开发的 ETABS 进行分析。数值计算采用快速非线性分析(FNA)法。积分前进行模态计算,振型取前 40 阶,参与质量达到 93.28%。承载力验算时,结构阻尼比取为 0.035,风振加速度计算时,结构阻尼比取为 0.01。由于结构平面不规则,每隔 30°风向角进行风振时程分析,风向角的规定及 x,y 方向规定如图 7 所示。

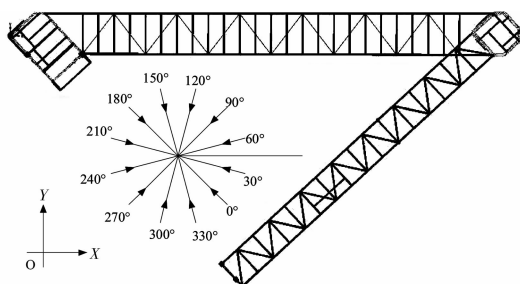


图 7 风向角示意图

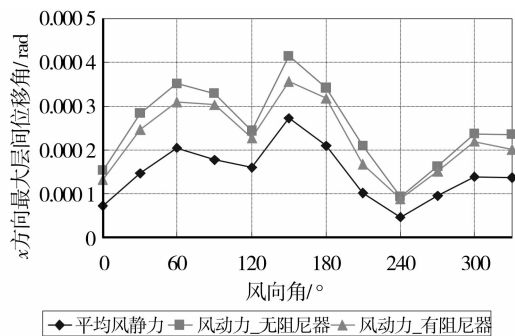
4.2 分析结果

风动力荷载分为平均风与脉动风 2 部分^[16]。风动力效应是由脉动风引起的,而平均风是一种静力效应。粘滞阻尼器对风振的控制主要是减小脉动风的风振效应。该文对连体结构进行 3 种工况的分析:平均风静力荷载工况、设置阻尼器的风动力分析和未设置阻尼器的风动力分析。粘滞阻尼器控制风振响应的计算公式如式(8)所示。

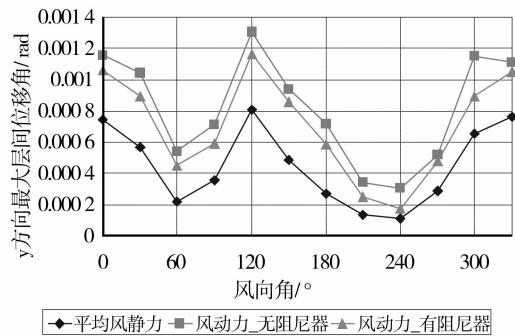
$$\varphi = \frac{R_{uc} - R_{ave}}{R_c - R_{ave}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, φ 为减振效果系数, R_{uc} 为未设置阻尼器控制下结构的响应值, R_{ave} 为平均风作用下结构的响应值, R_c 为设置阻尼器控制下结构的响应值。

经分析可得,左塔楼刚度比右塔楼较小,左塔楼层间位移角均大于右塔楼层间位移角,所以对左塔楼的最大楼层层间位移角在不同风向角风荷载作用进行对比,如图 8 所示。最大层间位移角出现在 120°风向角工况,即 y 负方向;由于粘滞阻尼器的减振作用,结构层间位移角有所降低,y 方向结构变形的减振效果 φ 约为 32.8%,x 方向结构变形的减振效果系数 φ 约为 24.6%。



(1) x 方向

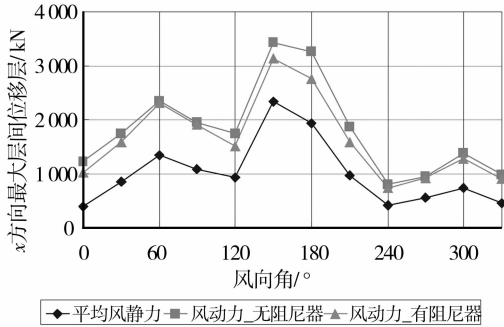


(2) y 方向

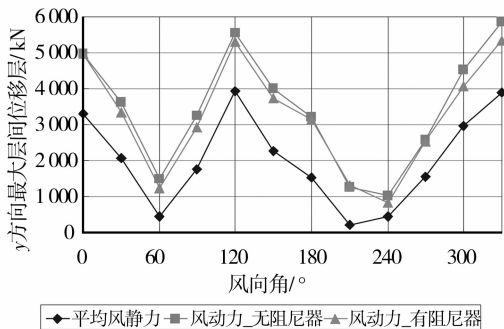
图 8 不同风向角风荷载作用下最大层间位移角对比

结构最大楼层层间剪力在不同风向角风荷载作用进行对比如图 9 所示。最大层间剪力出现在 330°风向角工况,即 y 正方向;由于粘滞阻尼器的减振作

用,结构层间剪力有所降低,y 方向结构变形的减振效果系数 φ 约为 19.3%,x 方向结构变形的减振效果系数 φ 约为 15.5%。左塔楼层间位移角与结构层间剪力的减振效果系数 φ 如表 1 所示。



(1) x 方向



(2) y 方向

图 9 不同风向角风荷载作用下最大层间剪力对比

表 1 减振效果系数

风向角/ $^{\circ}$	左塔 x 方向 层间位移角	左塔 y 方向 层间位移角	x 方向 楼层剪力	y 方向 楼层剪力
0	25.90%	23.70%	25.00%	0.00%
30	26.80%	31.90%	17.10%	17.30%
60	29.30%	28.80%	3.70%	24.50%
90	17.10%	34.70%	3.80%	22.20%
120	19.00%	28.80%	29.40%	15.30%
150	41.50%	18.20%	26.00%	14.70%
180	18.20%	28.80%	37.90%	4.90%
210	39.30%	43.80%	31.40%	-6.10%
240	10.60%	66.80%	17.20%	33.00%
270	16.20%	18.50%	7.90%	3.70%
300	17.30%	52.20%	15.80%	30.10%
330	33.70%	17.40%	16.20%	26.20%
平均值	24.60%	32.80%	19.30%	15.50%

结构耗能情况在不同风向角风荷载作用进行对比,如表 2 所示。结构阻尼器耗散能量与总输入能量的比约为 70%。阻尼器的能量耗散随着脉动风引起结构振动而平缓增加,如图 10 所示。由于脉动风动力荷载是平稳的随机荷载,阻尼器的耗能曲线接近一条斜直线。因为结构模态阻尼比较小,而且结构采用阻尼指数较高的粘滞阻尼器,所以阻尼器耗散能量比模态阻尼要多。

表 2 不同风向角风荷载能量耗散情况对比表

风向角/ $^{\circ}$	输入能量/ kN·m	阻尼器 耗能/kN·m	模态耗能/ kN·m	势能/ kN·m	动能/ kN·m	阻尼器 耗能比
0	179.41	115.70	16.31	47.38	0.02	64.5%
30	101.84	70.80	9.53	21.48	0.03	69.5%
60	85.85	67.45	8.54	9.85	0.02	78.6%
90	149.83	115.53	15.93	18.35	0.02	77.1%
120	201.43	121.15	16.44	63.76	0.07	60.1%
150	189.69	135.53	21.49	32.52	0.15	71.4%
180	208.95	155.38	31.43	21.93	0.21	74.4%
210	92.00	73.50	16.52	1.97	0.01	79.9%
240	23.35	17.92	3.57	1.79	0.07	76.8%
270	73.43	54.96	10.97	7.50	0.01	74.8%
300	141.42	81.83	12.03	47.44	0.13	57.9%
330	128.16	75.68	62.01	63.55	2.59	59.1%

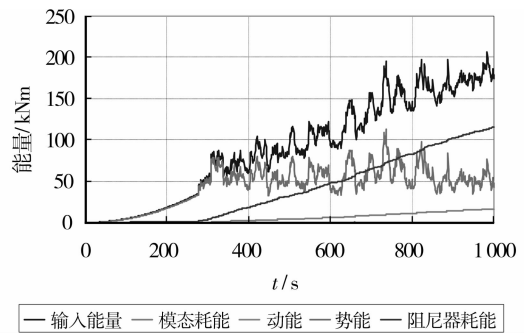
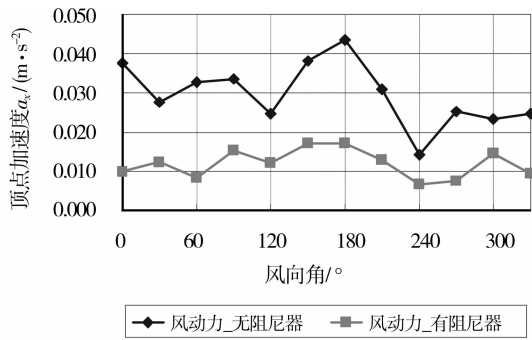
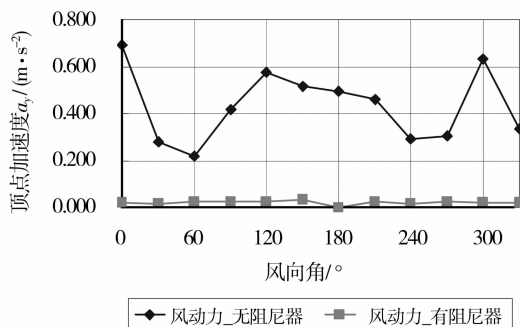


图 10 0°风荷载作用下能量耗散曲线图

为提高高空连廊的风振舒适度,在高空连廊的上下弦平面设置了粘滞阻尼器。高空连廊出现最大加速度的部位在连廊的跨中。跨中水平方向加速度远大于竖向加速度。跨中水平方向加速度在不同风向角风荷载作用下的对比如图 11 所示。从图 11 中可见,粘滞阻尼器主要设置在结构的 y 方向,粘滞阻尼器很好地控制 y 方向的加速度,其值降低约 90%,而 x 方向加速度降低约 50%。



(1) x方向



(2) y方向

图11 0°风向角风荷载作用下顶层高空连廊跨中加速度对比

综上所述,连体结构设置粘滞阻尼器,能有效地控制结构风振加速度。由于风荷载按频率成分可以分为平均风与脉动风,平均风类似一种静力荷载,而脉动风是一种平稳的动力荷载。粘滞阻尼器只能对脉动风引起的动力响应进行控制,通过y方向最大楼层剪力的对比可知,y方向脉动风压占总风压的比例约为30%,设置粘滞阻尼器后,脉动风引起楼层剪力的控制效果约为15.5%,总剪力的控制效果约为5%。设置阻尼器对结构宏观的内力及变形有控制效果,但是并不明显。设置阻尼器增加结构总体阻尼,粘滞阻尼器的耗能大于结构模态耗能。结构顶点加速度主要是脉动风的动力效应引起,设置阻尼器能减小风振加速度,效果十分明显。

5 结 论

该文论述了风振时域法的主要原理与分析步骤。时域法进行高层结构风振分析比较耗时,但是时域法能够考虑几何或材料非线性的因素。当结构设置了非线性阻尼器,时域法是结构风振分析的有效方法。对设置了粘滞阻尼器的连体高层结构,通过时域法进行风振分析。经分析表明,设置粘滞阻尼器能较大的提高整体结构的总阻尼,对脉动风引起的结构振动起到良好的控制作用,有效地控制结构顶部楼层加速度。由于结构抗侧刚度足够,周期约为2.465 s,因此脉动风压占总风压的比例不大,

所以粘滞阻尼器对内力及变形的控制效果不是十分明显。对于刚度较小的超高层建筑结构,脉动风比例较大,粘滞阻尼器的内力及变形的控制效果应相应增大。

参考文献:

- [1] GB 50009-2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 王修琼, 张相庭. 混合回归模型及其在高层建筑风响应时域分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 5-7. WANG XIU-QIONG, ZHANG XIANG-TING. Hybrid regressive model and its application in time-domain analysis of tall building's response to wind action[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 5-7.
- [3] 刘锡良, 周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84. LIU XI-LIANG, ZHOU YING. Numerical simulation methods of wind load [J]. Industrial Construction, 2005, 35(5): 81-84.
- [4] MACRIO DI PAOLA. Digital simulation of wind field velocity[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74/75/76): 91-109.
- [5] 李杰, 倪振华, 谢壮宁. 单层球面网壳风振分析的时域法与频域法比较[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 63-68. LI JIE, NI ZHEN-HUA, XIE ZHUANG-NING. Comparison of wind-induced vibration analysis of single-layer spherical latticed shells between time domain method and frequency domain method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 63-68.
- [6] DEODATIS G, SHINOZUKA M. Auto-regressive model for nonstationary stochastic process [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASEC, 1998, 114(11): 1995-2012.
- [7] 王修琼, 崔剑锋. Davenport 谱中系数 K 的计算公式及其工程应用[J]. 同济大学学报, 2006, 30(7): 849-852. WANG XIU-QIONG, CUI JIAN-FENG. Formula of coefficient K in expression of davenport spectrum and its engineering application [J]. Journal of Tongji University, 2006, 30(7): 849-852.
- [8] 陈学伟, 韩小雷, 郑宜, 等. 高层建筑结构风振时程分析软件的技术研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(3): 136-141. CHEN XUE-WEI, HAN XIAO-LEI, JACK C, et al. Computer program for wind time-history load simulation of tall building structure under wind-induced vibration [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(3): 136-141.
- [9] 黄本才. 高层建筑风振系数简化方法和实用计算表格 [J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 46-51.

- HUANG BEN-CAI. The simplified method and computing tables for MOE [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(3): 46-51.
- [10] 黄本才. 高层民用建筑钢结构人体舒适度验算[J]. *建筑结构*, 1998(6): 34-37.
HUANG BEN-CAI. Checking computations on human comfort of high-rise occupancy types steel building [J]. *Building Structure*, 1998(6): 34-37.
- [11] WILSON E L. Three dimensional dynamic analysis for structures with emphasis on earthquake engineering [M]. *Computers and Structures, Inc., Berkeley, Calif*, 1997.
- [12] WILSON E L, FARHOOMAND I, K J. Nonlinear dynamic analysis of complex structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1973(1): 241-252.
- [13] 韩小雷, 何伟球, 陈学伟, 等. 中洲中心二期观光门架基于性能的建筑结构抗震超限设计可行性报告[R]. 广州: 华南理工大学高层建筑结构研究所, 2009.
HAN XIAO-LEI, HE WEI-QIU, CHEN XUE-WEI, et al. Performance-based design on the HUB. II sightseeing gate [R]. *Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou*, 2009.
- [14] 谢壮宁, 石碧青. 广州中洲观光门风荷载特征风洞试验数据图表[R]. 汕头: 汕头大学大气边界层风洞实验室, 2008.
XIE ZHUANG-NING, SHI BI-QING. Data and figures of wind tunnel test on the HUB. II sightseeing gate [R]. *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Shantou University, Shantou*, 2008.
- [15] 何光渝, 雷群. Delphi 常用数值算法集 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 黄本材, 黄国砚, 林颖儒, 等. 体育场屋盖结构静动力风荷载实用分析方法 [J]. *空间结构*, 2006, 6(3): 33-39.
HUANG BEN-CAI, HUANG GUO-YAN, LIN YING-RU, et al. Analytical methods of static and dynamic wind loading on cantilever roof structures for stadium [J]. *Spatial Structures*, 2006, 6(3): 33-39.

(编辑 王秀玲)

(上接第 68 页)

- [5] 朱伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8): 897-902.
ZHU WEI, QIN JIAN-SHE, LU TING-HAO. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 897-902.
- [6] 朱伟, 陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望 (第 2 讲): 盾构隧道技术和施工管理 [J]. *岩土工程界*, 2001, 4(12): 14-16, 20.
ZHU WEI, CHEN REN-JUN. Present state and perspectives of shield construction techniques (2): shield techniques and construction management [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2001, 4(12): 14-16, 20.
- [7] KUWAHARA H, YAMAZAKI T, KUSAKABE O. Ground deformation mechanism of shield tunneling due to tail void formation in soft clay [C] // Proc, 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg, Kalkema, Rotterdam, The Netherlands, 1997: 1457-1460.
- [8] ZHOU XIAO-WEN, PU JIA-JU, BAO CHENG-GANG. Effect of shield tail void closure on lining earth pressure [C] // Proceedings of 15th Int. Cont. on soil Mech. and Geotech. Engrg, San Francisco, 2001: 1441-1444.
- [9] 刘元雪, 施建勇, 许江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 239-243.
LIU YUAN-XUE, SHI JIAN-YONG, XU JIANG, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2): 239-243.
- [10] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(2): 160-171.
- [11] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33(4-5): 234-247.
- [12] SWOBODA G, ABU-KRISHA A. Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(3): 327-333.
- [13] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, et al. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(10): 835-846.
- [14] 梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

(编辑 胡英奎)