

文章编号: 1000-4750(2011)06-0103-07

核筒悬挂建筑结构体系的顺风向风致响应分析

蔡文华^{1,2}, 张继文¹, *涂永明^{1,3}, 梁书亭¹

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 盐城工学院土木学院, 盐城 224003;

3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 核筒悬挂建筑结构是一种新型的高层建筑结构体系, 其风致响应的研究很少。模拟了 B 类地貌下的风速时程, 并转化为作用在结构上的风荷载时程; 利用有限元软件 ANSYS 建立了结构计算模型, 进行了结构水平顺风向风振响应分析, 并与悬挂非减振结构进行比较, 给出了阻尼器参数优化结果。分析结果表明, 在水平顺风向风荷载作用下, 核筒悬挂减振结构与非减振结构相比顶部位移、加速度均有所下降。阻尼器刚度的合理选择, 不仅可使核筒顶部的位移响应减小, 还可有效地控制悬挂楼层层间相对位移; 而阻尼器阻尼系数取一个较大值(如 $1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$)就可达到较好的控制效果。核筒悬挂减振结构具有良好的应用前景, 该文的研究工作为这种新型结构体系的实用抗风设计提供参考。

关键词: 悬挂结构; 风速模拟; 风致响应; 阻尼器; 参数优化

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

THE ANALYSIS OF ALONG-WIND-INDUCED RESPONSES OF CORE-TUBE SUSPENDED BUILDING STRUCTURE

CAI Wen-hua^{1,2}, ZHANG Ji-wen¹, *TU Yong-ming^{1,3}, LIANG Shu-ting¹

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China;

3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The Core-tube suspended structure is a novel kind of high-rise structural systems, while its wind-induced responses have not been studied systematically. The wind speed time-history in B class landscape is simulated. And then the wind speed time-history is transformed into wind load time-history acting on the building structure. The calculation model of a vibration-absorption suspended building is built with the finite element method software ANSYS. Then the wind-induced responses are calculated, which are compared with those of ordinary suspended structures. Consequently, the optimized values of parameters for damper connections are discussed. The results show that the displacement and acceleration responses of the top core-tube of a vibration-absorption suspended building under an along-wind load are less than those of an ordinary suspended building. The appropriate damper stiffness can not only reduce the displacement of the top core-tube, but also control the inter-story displacements of suspended floors effectively. And that an improved dynamic control of

收稿日期: 2009-11-19; 修改日期: 2010-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808039); 江苏省自然科学基金项目(BK2008148, BK2009138); 教育部博士点基金新教师项目(20070286095); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(2008KB24)

作者简介: 蔡文华(1978—), 女, 江苏镇江人, 讲师, 博士生, 从事悬挂建筑结构研究(E-mail: caiwenhua10@163.com);

张继文(1965—), 男, 江苏昆山人, 教授, 博士, 博导, 从事现代预应力结构、FRP 应用技术研究(E-mail: jwzhang@vip.163.com)

*涂永明(1978—), 男, 江西新建人, 副教授, 博士, 从事悬挂建筑结构研究(E-mail: tuyongming@seu.edu.cn);

梁书亭(1964—), 男, 河南许昌人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土、钢结构、钢-混凝土组合混合结构体系及其减振抗震控制等方面的研究(E-mail: stling@seu.edu.cn)

responses of a suspending building can be achieved with a relatively large damping coefficient, for instance, $1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$. The core-tube suspended structures have a good application prospect, and the present work may provide a wind-resistant design reference for this kind of structures.

Key words: suspended building structure; wind speed simulation; wind-induced response; damper; parameter optimization

随着社会的不断发展,科学技术的日益进步,高层建筑结构体系也在不断地推陈出新,悬挂减振建筑结构体系便是其中之一。其形态策略和结构技术手段能够达到节地、节材、对环境破坏最小、施工高度工业化和装配化的程度,能完整的体现建筑全生命周期“绿色”的概念和精神,因而被誉为“绿色建筑形态”的建筑^[1]。不仅如此,悬挂减振结构体系还具有良好的减振性能。作为一种新型的减振结构体系,它将建筑结构的楼层用吊杆悬挂在主要承重结构上,并在竖向承重结构和悬挂楼层之间合理设置阻尼器等,以达到减振耗能的效果,如图 1(a)所示。根据主承重结构的不同,悬挂建筑结构分为:核筒刚梁式、树状构架式、巨型框架式、拱式、框架悬索式等,如图 2 所示,而其中以核筒刚梁式和巨型框架式悬挂结构为主。目前,对于这两类悬挂结构体系,国内外学者主要对其自振特性、结构中阻尼器的布置、相关参数的优化设计以及结构在地震作用下的动力响应等开展了研究。研究表明:悬挂建筑结构在合理地设置阻尼器,并优化悬挂楼层与主结构连接方式后,能显著地降低结构在地震作用下的动力响应,提高结构的安全性^[2-8]。

随着建筑结构向高、轻、柔方向发展,强风荷载成为高层建筑结构设计的主要荷载之一。目前,对于高层核筒悬挂建筑结构的研究主要集中在地震作用下的结构动力分析方面^[2-5,7-8],而对风致响应的研究比较少。此类结构风致响应分析的难点不仅在于需模拟出符合悬挂建筑结构实际条件的风速时程,还在于该类建筑结构形式比较新颖,传力途径与传统结构不同,是自下而上,然后再自上而下;而且还需考虑悬挂楼层与主结构之间的阻尼器等装置和相关参数设置等。本文针对高层核筒悬挂减振结构体系,按照随机振动理论,选择 Davenport 功率谱来模拟悬挂建筑结构的风速时程,并将其转化为风荷载时程,利用 ANSYS 有限元程序对其进行动力时程分析,得出了一些有意义的结论,为悬挂结构实用抗风设计提供参考。

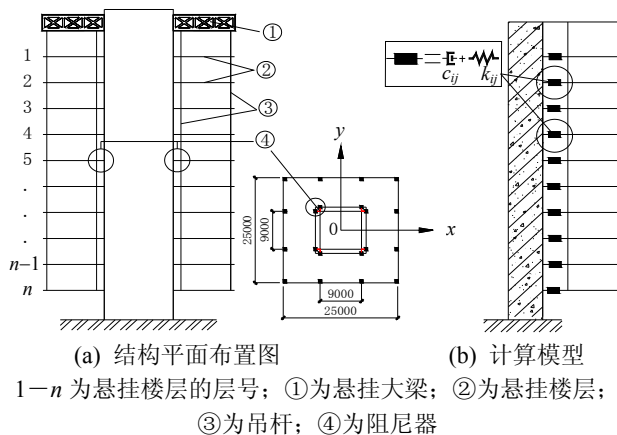


图 1 悬挂减振结构布置及分析计算模型图

Fig.1 Structural layout and analysis model of suspended damping structure

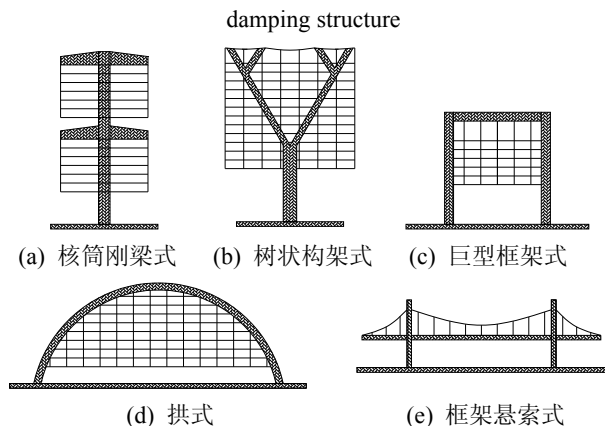


图 2 悬挂建筑结构形式

Fig.2 Forms of suspended building structure

1 顺风向脉动风速的模拟

脉动风实际上是三维的紊流风,它包括顺风向、横风向和垂直向的紊流。本文主要考虑顺风向脉动风的作用,研究核筒悬挂减振结构的顺风向风致响应,并对影响参数进行分析。

1.1 风荷载的特性

根据近地风的特点,将风速分解为:平均风速和脉动风速。平均风速,是风速中的长周期部分,考虑到风的长周期通常远远地大于一般结构的自振周期,故可认为它对结构的作用相当于静力的;而脉动风速是在平均风基础上的脉动,是由风的不规则性引起的,可以看作是一个各态历经的零

均值平稳高斯随机过程, 周期只有几秒至几十秒, 与结构物的自振周期比较接近, 对结构的作用是动力的, 也是引起结构振动的主要因素。

脉动风速可以采用 Davenport 提出的沿高度不变的脉动风速谱^[9-10], 其表达式为:

$$\frac{S_v(n)}{V_{10}^2} = \frac{4kx^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (1)$$

式中: $x=1200n/V_{10}$; n 为脉动风的频率; $S_v(n)$ 为脉动风速功率谱; k 为与地面粗糙度有关的系数; V_{10} 为标准高度 10m 处的平均风速。

在顺风向, 高层建筑一般需要同时考虑高度和宽度方向的相关性, 对此本文采用 Davenport 提出的指数形式的经验公式:

$$\text{Coh}(r, n) = \exp \frac{2n[c_x^2(x_i - x_j)^2 + c_z^2(z_i - z_j)^2]^{1/2}}{V_{zi} + V_{zj}} \quad (2)$$

式中: c_x 、 c_z 为常数, 一般分别取为 16、10; x 、 z 为垂直于来流的水平向和竖向; V_{zi} 、 V_{zj} 为相应点的平均风速。

平均风速计算主要有对数律和指数律两种, 一般采用计算较为简便的指数律, 即:

$$\frac{V}{V_z} = \left(\frac{H}{H_z} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: V_z 为标准高度 H_z 处的平均风速, 我国荷载规范规定 $H_z=10\text{m}$; V 为高度 H 处的平均风速; α 为地面粗糙度指数。

1.2 风速时程模拟

在明确了风的特性的基础上, 可用随机过程模拟的方法得到脉动风速时程。目前, 风速模拟的方法主要有谐波合成法和线性滤波法两类^[10-13]。线性滤波法由于占用计算机内存小, 计算快等优点被广泛用于描述平稳随机过程, 尤其是其中的自回归模型方法(AR 法)。本文就采用这种方法对核筒悬挂结构多变量互相关水平脉动风速进行模拟。

按照南京地区的实际情况, 基本风压为 0.4kN/m^2 , 10m 高处的风速为 25.3m/s , 地面粗糙度根据建筑物周围的地貌条件拟定为 B, 粗糙度指数为 0.16, 粗糙度系数 $k=0.003$; 频率取值范围 $0.001\text{Hz}-10\text{Hz}$, 并且等分为 9999; 时距 102.4s, 时间步长 0.1s, 利用 matlab 程序语言编写了模拟 11 个空间相关脉动风速曲线的程序。计算得出如图 1 所示悬挂建筑结构的顶点高度处(46.2m)的水平脉动风速时程曲线, 如图 3 所示, 图 4 则为水平功率

谱函数的模拟谱与目标谱的对比曲线。

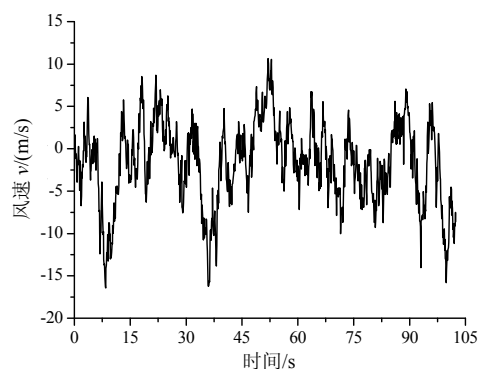


图 3 脉动风速时程

Fig.3 Time history of turbulent wind speed

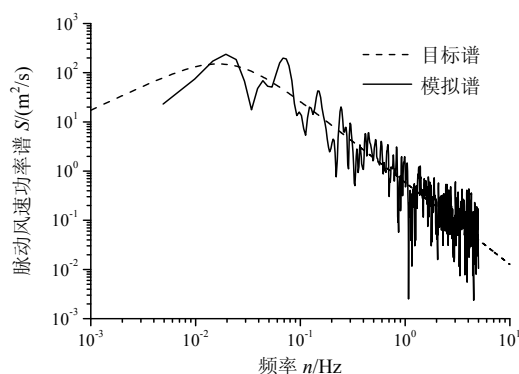


图 4 模拟谱与目标谱的对比图

Fig.4 Comparison chart of simulated spectrum and target spectrum

从图 4 可以看出, 模拟风速的功率谱在走势方面与目标谱一致, 且在低频和高频区域的误差均较小, 两者则非常接近。因此, 可以确定该模拟方法的有效性, 本文所编制的风速时程模拟程序可以用于结构的风致响应分析。

由模拟风速的时程曲线, 可得到各点模拟的脉动风压时程曲线。进而可由风压、挡风面积、体型系数, 可进一步得到各点的风荷载时程曲线。有了各点的风荷载样本曲线就可以进行结构的风致动力响应分析。

2 结构计算模型及运动方程的建立

如图 1(a)所示的钢筋混凝土核心筒悬挂建筑结构体系, 主要由主体核筒、悬挂楼层、吊杆以及消能减振装置(例如阻尼器)四部分组成。核筒为 11 层, 层高 4.2m, 线质量为 $1.8 \times 10^4\text{kg/m}$, 混凝土强度等级为 C40, 截面惯性矩为 97.2m^4 ; 悬挂大梁采用井字式, 每根质量为 $8.5 \times 10^4\text{kg}$; 悬挂大梁下共吊挂 10 层楼层, 每层质量约为 $2.64 \times 10^5\text{kg}$, 为便于描述,

从上至下依次编号为 1 层—10 层, 每个悬挂楼层与核筒之间设置相同数量和参数的阻尼器, 阻尼器刚度、阻尼系数分别为 $1 \times 10^4 \text{ N/m}$ 和 $1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; 图 1(b)所示为此结构的动力分析模型。

根据主体核筒、悬挂大梁、阻尼器装置的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵, 可得高层悬挂减振结构体系的运动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (4)$$

其中: $\mathbf{X} = \{x_1 \cdots x_{N-L} | x_{N-L+1} \cdots x_N\}^T$;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^C & 0 \\ 0 & \mathbf{M}^S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^C + \mathbf{K}^a & \mathbf{K}^{CS} \\ \mathbf{K}^{CS'} & \mathbf{K}^S \end{bmatrix};$$

$$[\mathbf{K}^a] = \text{diag}[0 \cdots 0 k_{N-L+1}]_{1 \times (N-L)}。$$

式中: $[\mathbf{K}^{CS}]$ 为核筒与悬挂楼层的耦合刚度矩阵, 由悬挂框架顶层的层间剪切刚度和消能装置的参数按照相应自由度形成; 阻尼矩阵 $[\mathbf{C}]$ 由两部分组成, 一部分为主体核筒和悬挂楼段的阻尼(采用 Rayleigh 阻尼); 另一部分为阻尼器的阻尼。 $N-L$ 为核筒离散节点数; L 为悬挂楼层数; $\mathbf{F}(t)$ 为脉动风荷载向量。

3 悬挂减振结构风振响应时程分析

为了进行对比分析, 本文主要计算了悬挂减振结构和非减振结构在水平顺风荷载作用下结构 y 方向(如图 1 中所示)的响应。非减振结构与悬挂减振结构的主要区别是: 前者悬挂楼段与核筒之间为连杆铰接连接, 而后者则在相应部位设置了耗能减振阻尼器, 本文中采用粘弹性阻尼器, 其计算模型采用开尔文模型。

运用分块兰索斯法^[14]对结构进行模态分析。结构的阻尼采用瑞雷阻尼, 取阻尼比为 0.05, 并由模态分析的结果取前 2 阶频率代入式(5)可得: $\alpha = 0.169$, $\beta = 0.0148$ 。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \\ \beta = \frac{2\zeta(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \end{cases} \quad (5)$$

为了分析悬挂减振结构的减振效果, 将模拟所得的风荷载时程导入 ANSYS 程序利用 Newton-Raphson 法直接求解结构动力平衡方程, 其中, 积分时间步长取小于第 50 阶振型周期的 $1/10$ ^[15-16] 为 0.01s, 对风荷载时程进行时域内的线性插值, 使风荷载时程步长等于积分时间步长。另外, 在分析时

通过设置自动时间步长(AUTOTS, ON)由程序自行选择子步时间步长。

1) 动力响应分析。

第 3 层、第 7 层、第 10 层的位移时程曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 从上至下悬挂楼层的位移逐渐增大; 图 6 是悬挂楼层第 1 层与第 10 层层间相对位移时程曲线和悬挂楼面第 10 层与同标高处核筒间相对位移时程曲线的比较图。由图 6 可知, 悬挂楼层第 1 层与第 10 层之间的层间相对位移小于悬挂楼层第 10 层与同标高处核筒间的相对位移。

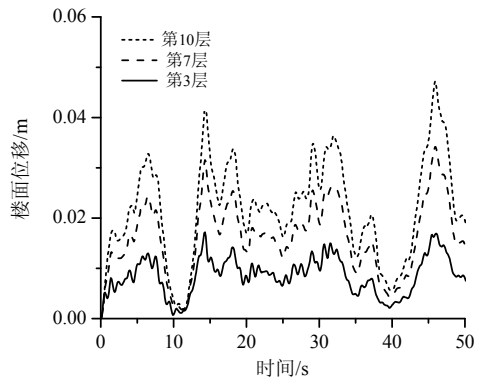


图 5 悬挂楼层位移时程曲线

Fig.5 Displacement time histories of suspended floors

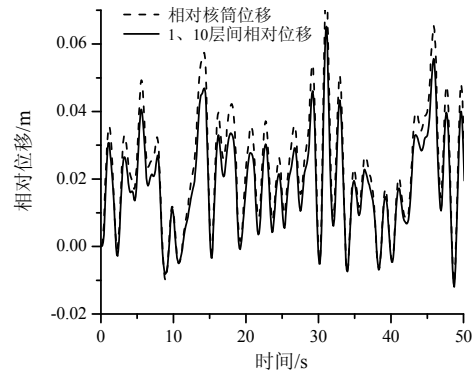


图 6 悬挂楼层相对位移时程曲线

Fig.6 Relative displacement time histories of suspended floors

2) 减振效果分析。

如图 7 所示, 在模拟风荷载作用下, 悬挂减振结构核筒顶部的侧移、加速度与非减振结构相比都有不同程度的降低。悬挂减振结构与非减振结构相比, 核筒顶部的侧移峰值从 7.06mm 下降到 6.48mm, 下降了 8.2%; 核筒顶部的加速度峰值从 0.121m/s 下降到 0.087m/s, 下降了 28%。由此可见, 模拟风荷载作用下, 悬挂减振结构具有一定的减振效果。

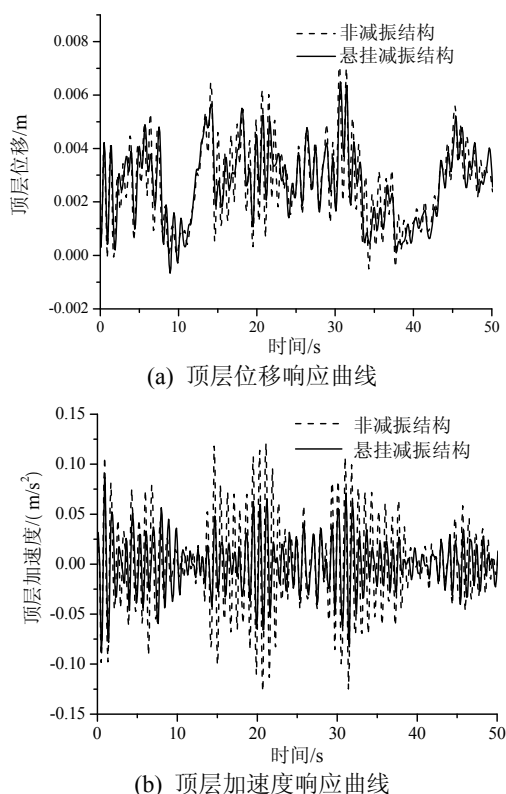


图7 核筒顶部位移、加速度时程曲线

Fig.7 Displacement and acceleration time histories at the top of core-tube

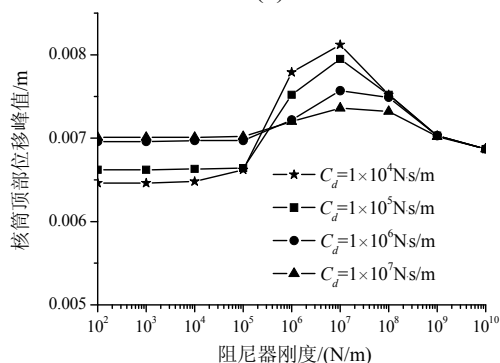
4 阻尼器参数分析及优化

悬挂楼面作为核筒悬挂减振结构的主要活动场所,在强风作用下产生的较大层间相对位移可能导致悬挂楼面的非结构构件的破损;而此时核筒所受的力主要是悬挂楼面通过阻尼器传递而来的,一般较小,故本文以控制悬挂楼层层间相对位移响应为主,同时兼顾主体核筒顶点位移,分别讨论阻尼器刚度和阻尼系数对位移响应的影响。

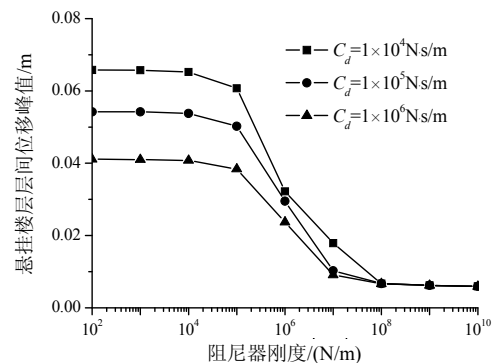
4.1 阻尼器刚度对结构位移响应的影响

如图8所示的核筒悬挂减振结构的主体核筒顶部位移峰值和悬挂楼层层间相对位移峰值随阻尼器刚度变化曲线。由图8(a)可知,当阻尼器刚度小于 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 时,主体核筒顶部位移峰值在各级阻尼系数下分别基本保持定值,此时阻尼器刚度对主体核筒位移响应峰值的影响较小;而当阻尼器刚度大于 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 时,核筒顶部位移先增加后又减小。其中,可以看到一个有趣的现象,即在刚度较小的时候(小于 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 时),阻尼系数越小,位移响应峰值越小;然而在刚度较大的时候(大于 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 时),阻尼系数越小,位移响应峰值反而越大。这可能是因为,在刚度较大时,主体核筒与悬挂楼层之间

的相对速度减小,从而使得由阻尼项对位移峰值响应带来的减小的影响超过了刚度项带来的增大的影响,而使该刚度范围内,阻尼系数越小的,结构的位移峰值响应越大。然而,到了刚度非常大的时候(大于 $1 \times 10^9 \text{ N/m}$ 时),阻尼项的影响基本可以忽略,在图8(a)中表现为曲线最右端趋近于相同了。由图8(b)可知,悬挂楼层的层间位移响应峰值随着阻尼系数的增大而减小,这是符合常识的;在阻尼器刚度很大的时候,层间相对位移响应峰值又趋于相同值。可见,在阻尼器刚度很大的时候,阻尼系数的影响很小,这与图8(a)得到的结论是相同的。



(a) 核筒顶部位移峰值随阻尼器刚度变化的曲线



(b) 悬挂楼层1、10层层间相对位移峰值随阻尼器刚度变化的曲线

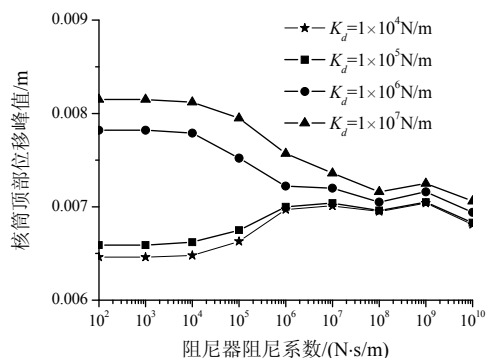
图8 核筒顶部位移和悬挂楼层层间相对位移的峰值随阻尼器刚度变化的曲线

Fig.8 Curves of peak displacement at the top of core-tube and relative peak displacement between suspended floors with the changes of damper stiffness

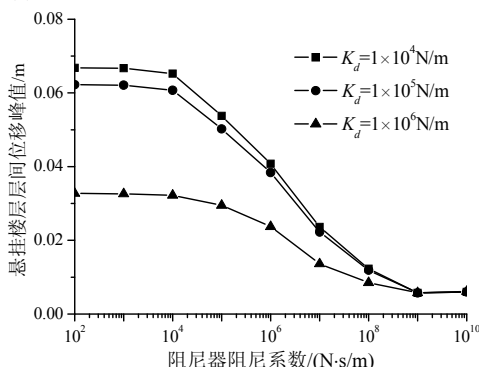
4.2 阻尼器阻尼系数对结构位移响应的影响

图9(a)为核筒悬挂减振结构的主体核筒顶部位移峰值随阻尼器阻尼系数变化的曲线。图9(b)给出了悬挂楼层的第1层和第10层的层间相对位移峰值。可以看到,随着阻尼器阻尼系数的增大,核筒顶部位移峰值和悬挂楼层的层间位移峰值都会减小,且都各自趋于相同值。这与图8中的结论是类似的,也说明在控制结构的风致位移响应时,不需

要无限地增大阻尼器的阻尼系数,而是取一个较大值(如取 $1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$)就可以达到较好的控制效果。



(a) 核筒顶部位移峰值随阻尼系数变化的曲线



(b) 悬挂楼层 1 层、10 层层间相对位移峰值随阻尼系数变化的曲线

图 9 核筒顶部位移和悬挂楼层层间相对位移的峰值随阻尼系数变化的曲线

Fig.9 Curves of peak displacement at the top of core-tube and relative peak displacement between suspended floors with the changes of damping coefficient

5 结论与建议

本文以核筒悬挂减振结构为研究对象,采用 matlab 语言编写了计算程序,进行了风速时程的模拟和结构的风致响应分析,并对阻尼器进行了参数分析与优化,可以得出以下结论:

(1) 本文模拟得到的风速时程是有效的,可以用于悬挂减振结构的风振响应分析。

(2) 悬挂减振结构核筒顶部的侧移、加速度响应与非减振结构相比具有一定的减振效果。核筒顶部的侧移峰值从 7.06mm 下降到 6.48mm,下降了 8.2%;核筒顶部的加速度峰值从 0.121m/s 下降到 0.087m/s,下降了 28%。

(3) 阻尼器参数的合理选择,可以提高核筒悬挂结构在风荷载作用下的减振性能。当阻尼器刚度较小时,主体核筒顶部位移峰值在各级阻尼系数下分别基本保持定值,此时阻尼器刚度对主体核筒位

移响应峰值的影响较小;而当阻尼器刚度大于 $1 \times 10^5 \text{ N/m}$ 时,核筒顶部位移先增加后又减小;悬挂楼层的层间位移响应峰值随着阻尼刚度的增大而减小,最后趋于相同值。

(4) 在控制结构的风致位移响应时,不需要无限地增大阻尼器的阻尼系数,而是取一个较大值(如取 $1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$)就可以达到较好的控制效果。

参考文献:

- [1] Dunican P. The art of structural engineering [J]. the Structural Engineer, 1966, 44(3): 97—108.
- [2] 涂文戈, 邹银生. MTMD 减震结构体系的频域分析[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 78—88.
Tu Wenge, Zou Yinsheng. Analysis of multistory structures with MTMD in frequency domain [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 78—88. (in Chinese)
- [3] 欧进萍, 张微敬. 高层建筑结构的风振阻尼控制分析与设计方法[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 32—37.
Ou Jinping, Zhang Weijing. Analysis and design method for wind-induced vibration passive damping control of tall building [J]. Journal of Building Structure, 2003, 24(6): 32—37. (in Chinese)
- [4] 邓志恒, 秦荣. 巨型框筒部分悬挂结构控制体系地震反应特性及阻尼控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 133—138.
Deng Zhiheng, Qin Rong. Study on characteristics of seismic response and damping control for mega-frame tube with partial suspension systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 133—138. (in Chinese)
- [5] 周坚, 伍孝波. 核筒悬挂结构体系自振特性研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 75—81, 74.
Zhou Jian, Wu Xiaobo. A study of model-frequency behavior of core-wall suspension structures [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 75—81, 74. (in Chinese)
- [6] 夏逸鸣, 张韞美, 赵惠麟. 悬挂式层间减震结构地震反应的比较分析[J]. 工程力学, 2000, 17(6): 73—81, 52.
Xia Yiming, Zhang Yunmei, Zhao Huilin. Comparative analysis of earthquake response of suspension structures with story vibration absorption apparatus [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(6): 73—81, 52. (in Chinese)
- [7] 涂永明. CFRP 索悬挂建筑结构静力和动力分析及研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
Tu Yongming. Study on the static and dynamic mechanisms of CFRP cable suspended building structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [8] Zhang Y H, Liang Q Z. Asynchronous driving principle

- and its application to vibration control [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29(2): 259—270.
- [9] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
Zhang Xiangting. Wind Load theory and wind-resistant calculation manual of engineering structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990. (in Chinese)
- [10] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.
Huang Bencai. Structural analysis theory and application of wind [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2000. (in Chinese)
- [11] Owen J S. The application of auto-regressive time series modeling for the time-frequency analysis of civil engineering structures [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23: 521—536.
- [12] 舒新玲, 周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003, 9(4): 27—32.
Shu Xinling, Zhou Dai. AR model of wind speed time series and its rapid implementation [J]. *Spatial Structures*, 2003, 9(4): 27—32. (in Chinese)
- [13] Mario Di Paola. Digital simulation of wind field velocity [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74: 91—109.
- [14] 王勖成. 有限元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Wang Xucheng. The finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 田玉基, 杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 170—174.
Tian Yuji, Yang Qingshan. Analysis models and methods for structural seismic responses [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 170—174. (in Chinese)
- [16] 田玉基, 杨庆山. 国家体育场屋盖结构风振响应的时域分析[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 95—99.
Tian Yuji, Yang Qingshan. Wind-induced responses of Beijing national stadium using time history analysis method [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(6): 95—99. (in Chinese)

(上接第 102 页)

- [7] Krenk S, Damkilde L. Warping of joints in I-beam assemblages [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, 117(11): 2457—2474.
- [8] Krenk S. Constrained lateral buckling of I-beam gable frames [J]. *Journal of the Structural Engineering, ASCE*, 1990, 116(12): 3268—3284.
- [9] Masarira A. The effect of joints on the stability behaviour of steel frame beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58: 1375—1390.
- [10] Morrell P J B, Riddington J R, Ali F A, Hamid H A. Influence of joint detail on the flexural/torsional interaction of thin-walled structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 1996, 24: 97—111.
- [11] Tong G S, Yan X X, Zhang L. Warping and bimoment transmission through diagonally stiffened beam-to-column joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 61(6): 749—763.
- [12] 颜潇潇, 童根树, 张磊. 梁柱节点翘曲位移传递的分析[J]. 钢结构, 2005, 20(3): 25—29.
Yan Xiaoxiao, Tong Genshu, Zhang Lei. Analysis of warping degree transfer at beam-column joints [J]. *Steel Structures*, 2005, 20(3): 25—29. (in Chinese)