

# VED 在控制高层钢结构建筑风振反应中的研究

葛晓明, 刘雯彦, 范存新

(苏州科技学院土木系, 215011, 苏州)

[摘要] 研究了用于控制高层钢结构建筑风振反应的粘弹性阻尼器(VED)设计方法. 通过计算整体结构的有效阻尼比, 建立了设置 VED 结构抗风设计的风振系数和脉动增大系数的调整公式, 得到了设置 VED 结构在顺风向和横风向的层加速度计算方法. 并以例子证明了 VED 是一种有效的耗能减振构件, 它有效地减小了结构顺风向位移和横风向风振加速度.

[关键词] 阻尼器, 高层钢结构, 等效阻尼比, 风振控制

[中图分类号] TU311; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)03-0062-05

## 0 引言

随着我国经济的发展, 钢结构高层建筑正在越来越多地被建造. 由于钢结构高层建筑一般刚度较柔和阻尼较小, 当结构的高度较高和高宽比较大时, 结构的刚度和舒适度的抗风设计要求很难用常规的设计方法去较合理地满足. 因此, 对这类钢结构高层建筑的抗风设计采用振动控制的方法是十分必要的.

VED 是一种简单、方便和性能十分优良的耗能控制装置. 它与其它耗能控制装置相比具有两方面的优点: 首先, 只要结构在微小干扰下开始振动, 它就能耗能. 因此即使在弹性小幅振动的情况下它也起制振作用, 避免了其它耗能阻尼器存在的阻尼器初始刚度如何与结构侧移刚度相匹配的问题. 再者其应力和应变滞回曲线接近于椭圆形, 因此它的耗能能力很强. 计算和试验表明, 设置了 VED 的高层钢结构建筑的阻尼比可提高数倍, 因此它能十分有效地抑制钢结构高层建筑的风振反应.

由于粘弹性材料是一种高分子聚合物, 它受环境温度和工作频率的影响最大. 一般来说, 它的剪切模量随温度的升高而减小, 随频率的增大而增大, 粘弹性材料损耗因子 对应某个温度和某个频率存在最大值. 因此在设计 VED 时, 必须合理设计粘弹性阻尼材料. 一方面应使其在高层建筑的工作频率段(超低频)和工作温度下 值尽量的高, 另一方面又需使它的剪切模量和极限变形能力适应实际工作的需要.

VED 主要以支撑的形式设置在结构上, 一般有两种支撑形式: 人字形支撑和斜撑, 见文[4]所示.

本文提出了用于钢结构高层建筑抗风的 VED 设计方法. 文中在导出设置 VED 钢结构高层建筑有效阻尼比的基础上, 建立了设置 VED 结构抗风设计的风振系数和脉动增大系数的调整公式, 提出了设置 VED 结构在顺风向和横风向的层加速度反应满足舒适度要求的减振计算方法. 并以例子证明了 VED 对于抑制钢结构高层建筑的风振反应是十分有效的, 它有效地减小了结构顺风向位移和横风向风振加速度.

## 1 设置 VED 的钢结构高层建筑的有效阻尼比

由于 VED 是直接通过阻尼来耗散能量并实现减小主体结构风振反应的目标的, 因此在结构上设置 VED 实际就是增加了结构的阻尼. 这样, 若能计算出设置了 VED 的高层钢结构的实际阻尼比(即有效阻尼比), 就可依此调整高层钢结构抗风设计的风振系数和脉动增大系数, 从而使 VED 对高层钢结构的抗风设计按《高层民用建筑钢结构设计与施工》规程来进行.

收稿日期: 2001-09-10.

基金项目: 苏州科技学院科研基金项目(2002).

作者简介: 葛晓明, 1963-, 苏州科技学院土木系, 讲师, 主要从事结构动力学方面的研究.

粘弹性阻尼材料的力学模型有很多种, 目前在结构振动中应用最为广泛的是复刚度模型. 因此粘弹性阻尼材料的剪切模量在复平面中可表示成:

$$G^* = G(1 + i D) = G + i G D \quad (1)$$

其中  $G$  是粘弹性材料的实剪切模量;  $G D$  是粘弹性材料剪切模量的虚部;  $D$  为粘弹性阻尼材料的损耗因子, 它是材料阻尼力与弹性力的比值, 反应了材料耗能能力的大小.

据此推得整体结构的刚度为

$$[K]^* = [K](1 + i D) \quad (2)$$

式中  $D$  为设置粘弹性支撑后整体结构的有效阻尼损耗因子.

设置了 VED 的钢结构高层建筑的运动方程为:

$$[M]\{X\} + (1 + i D)[K]\{X\} = \{P(t)\} \quad (3)$$

式中:  $\{X\}$ 、 $\{\ddot{X}\}$  分别为设置 VED 结构的层位移和层加速度向量;  $[M]$  为结构的层质量矩阵;

$[K] = [K_s] + [K_D]$  为结构总的侧移刚度矩阵, 其中  $[K_s]$  为原结构的侧移刚度矩阵,  $[K_D]$  为粘弹性支撑对结构侧移刚度矩阵的贡献;  $[K] = [K_s] + [K_D]$ ,  $[K_s]$  为原主体钢结构的阻尼损耗因子;  $D$  为所用粘弹性支撑体系的阻尼损耗因子;  $\{P(t)\}$  为顺风向的脉动风荷载向量.

因此设置了 VED 的钢结构高层建筑的运动方程实际为:

$$[M]\{X\} + (1 + i D_s)[K_s]\{X\} + (1 + i D_D)[K_D]\{X\} = \{P(t)\} \quad (4)$$

应用振型迭加法, 分别得整体结构第  $j$  振型广义坐标  $q_j(t)$  的方程为:

$$\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\} \ddot{q}_j + (1 + i D_j) \{\phi_j\}^T [K] \{\phi_j\} q_j = \{\phi_j\}^T \{P(t)\} \quad (5)$$

$$\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\} \ddot{q}_j + \{\phi_j\}^T [K] \{\phi_j\} q_j + i (D_j \{\phi_j\}^T [K_s] \{\phi_j\} + D_D \{\phi_j\}^T [K_D] \{\phi_j\}) q_j = \{\phi_j\}^T \{P(t)\} \quad (6)$$

式中:  $\{\phi_j\}$  为设置 VED 结构的第  $j$  振型向量;  $D_j$  为原钢结构高层建筑第  $j$  振型的阻尼损耗因子;  $D_D$  为 VED 对应第  $j$  振型频率的阻尼损耗因子.

显然, 比较方程 (5) 和方程 (6) 便可求得:

$$D_j = \frac{D_D \{\phi_j\}^T [K_D] \{\phi_j\}}{\{\phi_j\}^T ([K_s] + [K_D]) \{\phi_j\}} \quad (7)$$

这就是设置 VED 钢结构高层建筑第  $j$  振型有效阻尼损耗因子的计算公式. 按照复阻尼理论和粘滞阻尼理论表示的单自由度振动体系振动一周耗散能量的等价关系, 可以容易地导得粘滞阻尼理论中结构的振型阻尼比和复阻尼理论中结构的阻尼损耗因子之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} D_j &= 2 \zeta_j \\ D_D &= 2 \zeta_{Dj} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $\zeta_j$  为设置 VED 钢结构高层建筑第  $j$  振型的有效阻尼比;  $\zeta_{Dj}$  为原钢结构高层建筑第  $j$  振型的阻尼比. 将公式 (8) 代入公式 (7), 就可求得设置 VED 钢结构高层建筑第  $j$  振型的有效阻尼比  $\zeta_j$  的计算公式:

$$\zeta_j = \frac{2 \zeta_{Dj} \{\phi_j\}^T [K_s] \{\phi_j\} + \zeta_j \{\phi_j\}^T [K_s] \{\phi_j\}}{2 \{\phi_j\}^T ([K_s] + [K_D]) \{\phi_j\}} \quad (9)$$

## 2 设置 VED 的钢结构高层建筑的抗风设计方法

### 2.1 强度和刚度的抗风设计方法

对于结构强度和刚度的抗风设计, 一般仅考虑结构顺风向的平均风和脉动风的作用. 根据 高层民用建筑钢结构设计与施工规程, 作用在高层建筑任意高度处顺风向的等效静力风荷载标准值  $w_z$  可按下述公式计算:

$$w_z = z_s z w_0$$

(10)

式中:  $w_0$  为基本风压( $\text{kN m}^2$ );  $z$  为风压高度变化系数;  $s$  为风载体型系数;  $z$  为顺风向结构高度  $z$  处的风振系数.

显然, 上式只有风振系数  $z$  与结构阻尼比有关. 根据我国 建筑结构荷载规范 可知, 风振系数  $z$  是由下述公式计算的:

$$z = 1 + \frac{z}{z}$$

(11)

其中:  $z$  为脉动影响系数;  $z$  为振型系数, 可在规范中查取. 仅脉动增大系数  $z$  与结构阻尼比有关. 对于设置 VED 的钢结构高层建筑,  $z$  可表示为:

$$z = \frac{1}{z} \left[ \int_0^1 |H_{q1}(i)|^2 S_f(\omega) d\omega \right]^{1/2} \left[ 1 + (x_1^2 - 6) (1 + (x_1^2)^{4/3})^{1/2} \right]$$

(12)

式中:  $|H_{q1}(i)|^2$  为设置 VED 结构第一振型广义坐标反应的传递函数;  $S_f(\omega)$  为规格化的 Davenport 功率谱密度函数, 即:  $\int_0^\infty S_f(\omega) d\omega = 1$ ;  $x_1 = 30 (w_0 T_1^2)$  其中  $T_1$  为结构的基本自振周期;  $z$  为设置 VED 高层钢结构第一振型有效阻尼比.

为了方便设计者使用, 本文将脉动增大系数对应于不同结构有效阻尼比的值制成表 1. 这样, 由公式 (10) (11) 就可求得设置 VED 高层钢结构上顺风向等效静力风荷载的标准值, 从而计算出结构构件的内力、层位移和层间位移, 进行结构强度和刚度的抗风设计.

表 1 脉动增大系数

结构第一振型有效阻尼比 $z$	$w_0 T_1^2$			
	0.5	1.0	5.0	10.0
0.02	1.78	1.93	2.37	2.60
0.03	1.56	1.67	2.02	2.20
0.04	1.44	1.53	1.82	1.97
0.05	1.36	1.44	1.69	1.82
0.06	1.31	1.38	1.59	1.71
0.07	1.27	1.33	1.52	1.63
0.08	1.24	1.29	1.47	1.56
0.09	1.22	1.27	1.42	1.51
0.10	1.20	1.24	1.39	1.47

2.2 舒适度的抗风设计方法

由于舒适度主要取决于结构的风振层加速度, 而钢结构高层建筑, 尤其是钢结构超高层建筑横风向的涡激风振层加速度反应有时会超过顺风向的脉动风振层加速度反应, 因此结构舒适度的抗风设计必须同时考虑顺风向和横风向的反应.

根据 高层民用建筑钢结构设计与施工规程, 结构顶部顺风向脉动风振加速度的最大值为:

$$a_w = \frac{s_r w_0 A}{m_{tot}}$$

(13)

式中:  $A$  为建筑物总迎风面积;  $m_{tot}$  为建筑物总质量,  $r$  为重现期调整系数. 显然, 由设置 VED 高层钢结构的有效阻尼比按表 1 选取脉动增大系数  $z$  后, 就可直接由公式 (13) 来计算设置 VED 高层钢结构顶部顺风向的最大脉动风振加速度.

结构横风向的风振加速度反应主要由涡激干扰所引起. 由于涡激干扰与高层建筑结构的平面形状密切相关, 且其功率谱密度函数的形状与高度有关, 因此很难找到一个统一的简化公式来计算高层钢结构横风向的风振层加速度反应. 对此, 只能用频率域的方法来解决. 考虑到设置 VED 的钢结构高层建筑横风向的风振反应以第一振型为主, 且设置 VED 的高层钢结构具有有效阻尼比  $z$ , 因此结构顶部横

风向的最大风振加速度可表示为:

$$a_y = \gamma_{ln} \left[ \int_0^4 |H_{y1}(i)|^2 S_{F1}(\gamma_1) d\gamma_1 \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中  $|H_{y1}(i)|^2 = \frac{1}{(\gamma_1)^2 \{ [1 - (\gamma_1)^2]^2 + (2\gamma_1)^2 \}}$ ;  $S_{F1}(\gamma_1) = \frac{\{ \gamma_1 \}_1^T [S_{(P_y)}(\gamma_1)] \{ \gamma_1 \}_1}{(\{ \gamma_1 \}_1^T [M] \{ \gamma_1 \}_1)^2}$ ;  
 $[S_{(P_y)}(\gamma_1)]$  为结构横风向涡激风力向量的互功率谱密度函数矩阵;  $\gamma_1$  为设置 VED 结构横风向第一振型的圆频率;  $\{ \gamma_1 \}_1$  为设置 VED 结构横风向第一振型向量;  $\gamma_{ln}$  为结构横风向第一振型向量在结构顶部的幅值;  $\gamma_1$  为涡激干扰的峰因子, 依规范取为 2.2.

显然, 对于具有不同平面形状的高层钢结构, 其横风向的涡激干扰将具有不同的互功率谱密度函数矩阵.

### 3 VED 在某工程初步设计中的应用

该工程主楼是一座高 205 m 的 50 层全钢结构超高层建筑. 它的结构平面图和剖面图见图 1 和图 2 所示.

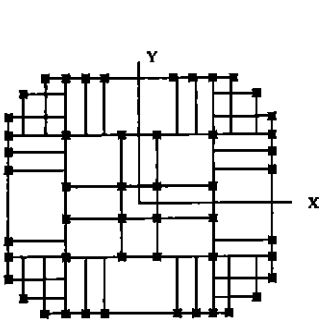


图 1 标准层结构平面图

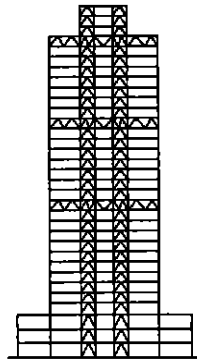


图 2 结构剖面图

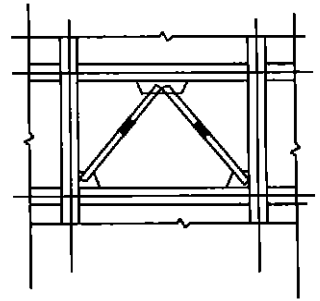


图 3 结构内筒上的 VED 支撑

由图中可见, 此结构的特点是结构平面为缺角的正方形, 它由钢框架和人字形支撑组成的钢核芯筒和外圈 4 片钢框架所构成. 为了提高结构的抗侧刚度, 在结构的第 14、30 和 47 层设置了 3 个刚性层. 这是全钢结构超高层建筑的一种典型的结构体系.

此钢结构的设计地震烈度为 8 度, III 类场地. 设计基本风压为  $0.42 \text{ kN/m}^2$ , C 类地貌. 整个结构设计是由地震作用控制的. 为了提高结构的抗震能力, 并解决在设计风压下结构顶部横风向最大风振加速度不满足舒适度设计要求的问题, 决定采用 VED 来克服上述不足. 本着不增加结构造价的原则, 采用如下的具体做法:

(1) 将除第一~三层(为劲性混凝土裙房结构层)和 3 个刚性层之外的所有其余结构层内筒的人字型钢支撑改为人字型 VED 支撑(详见图 3 所示, 每层共 8 个). VED 中的粘弹性阻尼材料采用 WG11F 型号, 损耗因子  $\tan \delta = 1.34$ , 剪切模量  $G = 1.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ .

(2) 使 VED 支撑的抗侧刚度尽量与原钢支撑接近.

(3) 保证 VED 支撑具有足够的耗能能力. (其粘弹性材料的工作温度设定为  $25^\circ\text{C}$ ), 工作频率为  $n_1 = 0.267 \text{ Hz}$ )

根据以上公式, 编制了计算程序, 程序框图见图 4. 经计算, 按上述方式设置了 VED 支撑的钢结构超高层建筑的有效阻尼比由原来的 0.02 提高到 0.09, 大大增强了结构总体耗能能力. 由于工程的结构设计是由地震作用所控制的, 因此在此我们仅列出风荷载作用下, 原结构与设置 VED 结构刚度和舒适度方面

风效应的比较, 详见表 2 和表 3 所示.

表 2 风荷载作用下结构顺风向位移的比较

	原结构	设置粘阻尼器结构
(层间位移 层高) max	1 1 237(第 22 层)	1 1 311(第 23 层)
顶点位移 总高度	1 1 746	1 1 859

表 3 结构横风向风振加速度的比较

层号	原结构	设置阻尼器结构
42	0. 313 3	0. 143 9
44	0. 328 0	0. 150 6
46	0. 347 0	0. 159 3
48	0. 360 2	0. 165 4
50	0. 371 3	0. 170 5

由表中可见, 设置 VED 后, 结构顺风向的位移有相当的减少. 结构第 41~ 50 层横风向的风振加速度平均减少了 54%, 其减振效果是十分显著的, 它使结构各层完全满足了舒适度的抗风设计要求.

4 结论

文章研究了用于控制高层钢结构建筑风振反应的粘弹性阻尼器( VED) 设计方法. 通过计算整体结构的有效阻尼比, 建立了设置 VED 结构抗风设计的风振系数和脉动增大系数的调整公式, 得到了设置 VED 结构在顺风向和横风向的层加速度计算方法. 并以例子证明了 VED 是一种有效的耗能减振构件, 它有效地减小了结构顺风向位移和横风向风振加速度. 文章提出的方法和所得的结论可供工程设计人员参考使用.

[ 参考文献]

[ 1] 瞿伟廉, 王墨耕. 高层建筑和高耸结构的风振控制设计[ M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991, 23~ 112.  
[ 2] 张相庭. 结构风压和风振计算[ M]. 上海: 同济大学出版社, 1985, 45~ 155.  
[ 3] Zhang R H, Soong T T. Seismic Design of Viscoelastic Damper for Structural Applications[J]. ASCE, J. Struc. Div, 1992, 118( 5): 45~ 61.  
[ 4] 刘雯彦, 瞿伟廉. 控制高层钢结构建筑地震时粘弹性阻尼器 设计方法[ J]. 工程力学增刊, 1998: 73~ 78.

Research in Viscoelastic Dampers on the Wind  
Resistance of Tall Buildings with Steel Structure

Ge Xiaoming, Liu Wenyan, Fan Cunxin

(Suzhou Institute of Science and Technology, 215011, Suzhou, PRC)

**Abstract:** A design method for wind resistance of steel tall buildings with the installation of viscoelastic dampers (VED) is presented. With the effective damping ratio of steel tall building installed with VED obtained, the revised formulas of wind vibration coefficient and fluctuation increment coefficient are established. The calculation methods of storey acceleration responses of the structure suppressed by VED in alongwind and acrosswind directions are introduced. The example of a 50-storey building is given to illustrate that the design method described in the paper is very convenient and effective, and practical for structural engineers.

**Key words:** VED, steel tall buildings, effective dampion ratio, suppression of wind vibration

[ 责任编辑: 刘健]

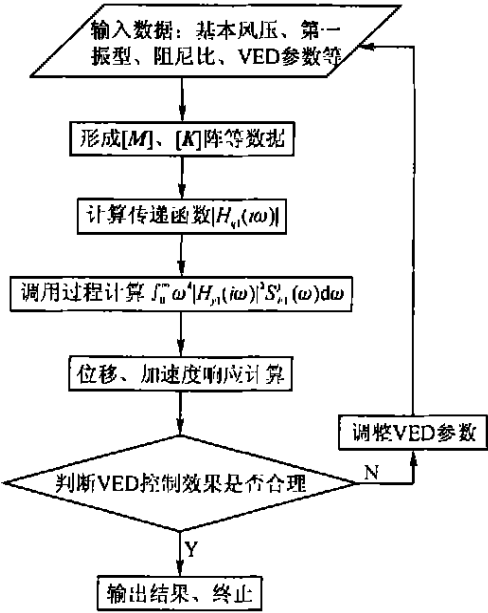


图 4 计算程序框图