

DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.10.006

液体黏滞阻尼器在超高层建筑抗风设计中的应用研究

王 森^{1,2}, 陈永祁³, 马良喆³, 罗嘉骏¹, 魏 琏^{1,2}

(1 深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034; 2 深圳市力鹏建筑设计事务所, 深圳 518034; 3 北京奇太振控科技发展有限公司, 北京 100037)

[摘要] 超高层结构过大的顶点风振加速度会令人感到不适和恐慌, 使用液体黏滞阻尼器可增加结构阻尼比, 从而减小结构顶点风振加速度达到抗风减振的目的。对抗风振设计中液体黏滞阻尼器应用中的有关问题进行讨论, 包括液体黏滞阻尼器不同布置方式的减振率对比, 阻尼器非线性模型的计算模拟方法, 液体黏滞阻尼器的型号选取、安装、维护等。同时通过工程案例, 说明合理布置液体黏滞阻尼器可以有效地减小超高层结构顶点风振加速度, 提高其风振舒适度。

[关键词] 液体黏滞阻尼器; 超高层结构; 风振加速度

中图分类号: TU398.7 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2020)10-0044-07

[引用本文] 王森, 陈永祁, 马良喆, 等. 液体黏滞阻尼器在超高层建筑抗风设计中的应用研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(10): 44-50. WANG Sen, CHEN Yongqi, MA Liangzhe, et al. Research on application of liquid viscous damper in wind resistance design of super high-rise buildings[J]. Building Structure, 2020, 50(10): 44-50.

Research on application of liquid viscous damper in wind resistance design of super high-rise buildings

WANG Sen^{1,2}, CHEN Yongqi³, MA Liangzhe³, LUO Jiajun¹, WEI Lian^{1,2}

(1 Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;

2 Shenzhen Li Peng Building Structure Design Institute, Shenzhen 518034, China;

3 Beijing Qi Tai Shock Control and Scientific Development Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Excessive apex wind vibration acceleration of super high-rise structures can cause discomfort and panic. Using liquid viscous dampers can increase the structural damping ratio, thereby reducing the apex wind vibration acceleration of the structure to achieve the purpose of wind vibration reduction. Related issues in the application of liquid viscous dampers in wind-induced vibration reduction design were discussed, including the comparison of the vibration reduction rates about different arrangements of liquid viscous dampers, the calculation and simulation methods of the damper nonlinear models, and model selection, installation and maintenance of the liquid viscous damping. At the same time, the engineering case shows that the reasonable arrangement of the liquid viscous damper can effectively reduce the apex wind vibration acceleration of super high-rise structure and improve its wind vibration comfort.

Keywords: liquid viscous damper; super high-rise structure; wind vibration acceleration

0 前言

超高层结构在脉动风作用下产生的结构顶点风振加速度通常较大, 若不加以控制, 过大的顶点风振加速度会令人感到不适和恐慌。因此, 《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[1](简称高规)规定了结构的顶点风振加速度限值 a_{lim} (表 1)。

使用功能	$a_{lim}/(m/s^2)$
住宅、公寓	0.15
办公、旅馆	0.25

对于某些超高层建筑, 若结构自身刚度已足够,

再通过增加刚度来减小风振加速度会引起结构自重和地震反应的增大。此时使用阻尼器来增加结构阻尼比以达到抗风减振的目的是较为有效的。

目前工程界为减小风作用下结构顶点加速度多采用设置液体黏滞阻尼器或 TMD 的方法, 相比液体黏滞阻尼器, TMD 构造复杂、占用空间大, 且较重对结构抗震不利。本文将针对在工程中更易实施的液体黏滞阻尼器进行讨论, 包括阻尼器的布置、结构计算、减振率对比、质量要求等问题, 并通过实际工程案例进行说明。

作者简介: 王森, 博士, 高级工程师, Email: ws2001622@163.com。

1 液体黏滞阻尼器的基本原理

1.1 阻尼力

液体黏滞阻尼器为速度相关型阻尼器,静力荷载作用下其并无轴向刚度,阻尼器出力与其活塞运动速度之间具有下列关系:

$$F_d = C_d |\dot{u}|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

式中: F_d 为阻尼器出力; C_d 为阻尼器的阻尼系数,与油缸直径、活塞直径、导杆直径和流体黏度等因素有关; \dot{u} 为阻尼器的活塞运动速度; α 为速度指数,与阻尼器内部构造有关。

液体黏滞阻尼器出力随阻尼系数成线性变化,阻尼系数 C_d 越高,耗能越大,但造价也越高。速度指数 α 越小,耗能越大,但过小的速度指数会导致产品性能不够稳定。

依据速度指数 α 的取值,可将液体黏滞阻尼器分为三类:线性液体黏滞阻尼器($\alpha=1$)、非线性液体黏滞阻尼器($0<\alpha<1$)和超线性液体黏滞阻尼器($\alpha>1$)。线性、非线性液体黏滞阻尼器的出力与速度关系曲线见图 1。

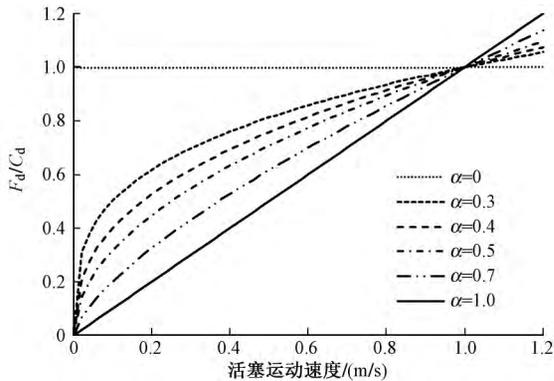


图 1 液体黏滞阻尼器的出力与速度关系曲线

由图 1 可知,线性液体黏滞阻尼器阻尼力与其活塞运动速度成线性关系;非线性液体黏滞阻尼器在小于 1.0m/s 的较低速度下,可输出较大的阻尼力,而速度较高时,阻尼力的增长率较小。由于风振通常速度相对较低,因此抗风时一般选用非线性液体黏滞阻尼器。

1.2 模型

计算时阻尼器按非线性连接单元输入。根据《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[2]规定,液体黏滞阻尼器宜采用 Maxwell 模型(图 2)。Maxwell 模型中阻尼单元与弹簧单元串联,当模拟液体黏滞阻尼器时,可将弹簧刚度设为无穷大,此时 Maxwell 模型中只有阻尼单元发挥作用。《ETABS 使用指南(2004)》建议使用 $10^2 \sim 10^4$ 倍的 C_d 值作为弹簧单元的刚度。



图 2 Maxwell 模型

关于 Maxwell 模型中的弹簧刚度,可使用附加体系分析模型以得出更为精确的结果,其分析模型见图 3。

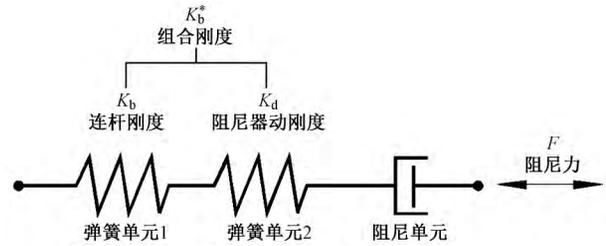


图 3 附加体系分析模型

对于附加体系,由于阻尼器与连接构件串联,设阻尼力为 F ,支撑阻尼器的连杆沿阻尼器方向的刚度 K_b 与阻尼器在动力荷载作用下的内部动刚度 K_d (由阻尼器厂家测试后提供)的组合刚度为 K_b^* ,附加体系在 F 作用下的位移为 u 则有:

$$u = \frac{F}{K_b^*} = \frac{F}{K_b} + \frac{F}{K_d} \quad (2)$$

即有:

$$K_b^* = \frac{K_b K_d}{K_b + K_d} \quad (3)$$

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[3](简称抗规)第 12.3.5 条第 1 款规定支撑阻尼器的连杆刚度应满足下式要求:

$$K_b = \left(\frac{6\pi}{T_1}\right) C_d \quad (4)$$

式中 T_1 为消能减震结构的基本自振周期。

式(4)是根据单自由度的液体黏滞阻尼器结构导出的^[4],用于高层建筑风振计算时, T_1 取结构基本自振周期,即结构的第 1 平动周期。

2 应用方法

2.1 斜撑式连接

斜撑式连接将液体黏滞阻尼器以斜撑的方式布置于结构墙柱间或柱与柱之间(图 4)。其传力直接,安装方便,仅需简单吊装并使用销轴连接即可,可安置在隔墙内,不占用建筑使用



图 4 斜撑式布置的液体黏滞阻尼器

面积,也不影响建筑室内美观。是目前工程中广泛应用的一种连接形式。

2.2 伸臂连接

伸臂连接又称竖直连接,通过结构弯曲变形造成的内外部结构竖直位移差来使阻尼器运动,减振效果较优。该连接方式首次在菲律宾香格里拉项目^[5]中应用,需额外设置伸臂桁架,一端牢固连接于筒体,另一端与柱间竖向安装阻尼器。这种连接方式较为复杂,造价也相对较高,目前尚在进一步研究发展中。

2.3 套索式(Toggle)连接

套索式连接(图5)属于美国某公司的专利,是一种可以放大液体黏滞阻尼器位移的机械系统。理论上,当结构楼层变形较小时可通过该方式连接,在阻尼器参数相同时,可将阻尼器变形放大2~3倍。这种连接形式要求安装精度高,且其放大阻尼减振的效果与结构变形的组合效应有关。使用时需经过布置阻尼器的有效性分析或敏感性分析后确定。此外,这种连接方式目前实际应用较少,需要进一步研究和实践。



图5 部分国外工程的套索阻尼器

3 设置液体黏滞阻尼器的结构风振加速度计算

3.1 整体模型

对于设置液体黏滞阻尼器的结构,在计算结构的顶点风振加速度时宜采用时程分析法。墙、梁、柱等结构构件按弹性单元输入,液体黏滞阻尼器宜采用线性或非线性连接单元(即Maxwell模型)。

3.2 风荷载时程作用下的计算方法

3.2.1 运动方程

为了方便理解,以带黏滞阻尼器的单质点为例,其在风荷载作用下的平动运动平衡方程如下:

$$m\ddot{u}(t) + (c + c_e)\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (5)$$

式中: m 为结构质量; $u(t)$ 为结构位移; $\dot{u}(t)$ 为结构速度; $\ddot{u}(t)$ 为结构加速度; t 为时间; c 为结构阻尼; c_e 为阻尼器黏滞阻尼; k 为结构抗侧刚度; $p(t)$ 为风

荷载时程平动作用力。

方程(5)与一般单质点运动方程不同,由于有黏滞阻尼器,阻尼项由结构自身阻尼和阻尼器阻尼相加而成。设:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (6)$$

$$\zeta = \zeta_s + \zeta_e = \frac{c + c_e}{c_r} = \frac{c + c_e}{2m\omega} \quad (7)$$

式中: ω 为结构自振频率; ζ 为附加阻尼器后的结构总阻尼比; ζ_s 为结构自身阻尼比, $\zeta_s = c/c_r$; ζ_e 为阻尼器的附加阻尼, $\zeta_e = c_e/c_r$; c_r 为临界阻尼系数, $c_r = 2m\omega$ 。

将式(6)、式(7)代入方程(5)得:

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = \frac{p(t)}{m} \quad (8)$$

对于非线性液体黏滞阻尼器, ζ_e 可按抗规中的公式估算:

$$\zeta_e = \frac{W_c}{4\pi W_s} \quad (9)$$

式中: W_c 为所有液体黏滞阻尼器在结构预期位移下往复一周所消耗的能量; W_s 为设置液体黏滞阻尼器的结构在预期位移下的总应变能。

在设计时, ζ_e 的值一般由厂家对黏滞阻尼器进行测试后提供。

同理可得单质点扭转运动方程:

$$J\ddot{\varphi}(t) + (c + c_e)\dot{\varphi}(t) + K_\varphi\varphi(t) = M(t) \quad (10)$$

式中: J 为结构转动惯量; K_φ 为结构抗扭刚度; φ 为结构角位移; M 为风荷载时程扭矩。

3.2.2 加载及计算结果取值

风荷载时程宜采用风洞试验提供的风荷载时程数据。舒适度计算使用10年一遇的风压强度,钢筋混凝土结构阻尼比取1.5%~2%,钢结构取1%。每个风向角的风荷载时程数据数量与结构楼层数相等,每层有 X 、 Y 向平动作用及扭矩三个分量。计算时可采用刚性楼板假定,风荷载时程作用点取相应楼层的楼板质心。

在建筑结构顶部提取风振加速度时程。由于加速度时程的最大值并不稳定,采用最大值评估可能会高估或低估风振加速度,宜按加速度时程的均方根值乘以《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)给出的峰值因子2.5(对应标准高斯分布的保证率为99.38%^[6])进行评估。

4 若干问题的讨论

4.1 某工程案例

某超高层公寓(15层以下为办公楼),采用钢筋

混凝土框架-核心筒结构体系,地面以上 61 层,结构高度为 246.85m,屋顶以上构架最高处高约 255.85m,宽度为 23m,高宽比约为 10.7(超过高规限值较多)。典型楼层平面布置图见图 6。

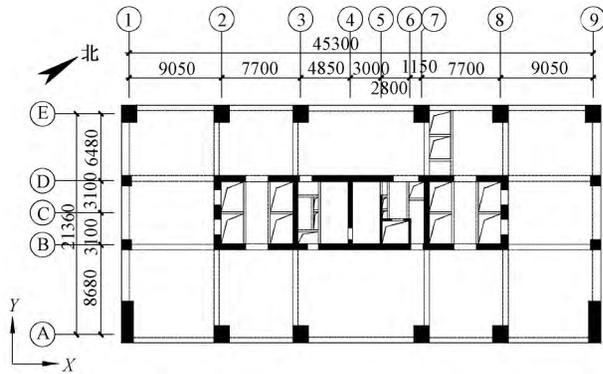


图 6 塔楼典型楼层平面布置图

本工程分别在 35.1, 71.7, 120, 164.7, 213m 结构高度处设有 5 个避难层(层高均为 5.1m),从高到低依次命名为“避难层 1~5 层”。拟在避难层布置液体黏滞阻尼器或伸臂桁架。

4.2 未设置伸臂桁架的情况

引入第 1 组对比模型,第 1 组模型各避难层均不设伸臂桁架,分别在不同避难层设置阻尼器,以分析结构的减振率。模型 1-0 全楼无阻尼器,模型 1-i (i=1~5) 分别在避难层 i 层设置阻尼器,阻尼器布置在避难层周边,见图 7。第 1 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 2(减振率为模型 1-i 均方根求出的峰值加速度相对于模型 1-0 下降的百分比,正文其余位置同)。由表 2 可知,在不设置伸臂桁架的情况下,阻尼器布置在楼层中间的避难层 2, 3 层时,其减振率更高。

第 1 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 2

模型编号	1-0	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
最大加速度/(m/s ²)	0.273	0.266	0.263	0.257	0.269	0.269
最小加速度/(m/s ²)	-0.280	-0.249	-0.243	-0.252	-0.251	-0.263
均方根求出峰值加速度/(m/s ²)	0.186	0.168	0.164	0.166	0.169	0.175
减振率	—	9.68%	11.83%	10.75%	9.14%	5.91%

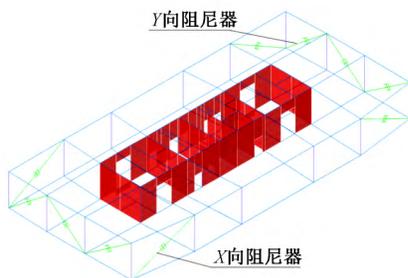


图 7 第 1 组模型阻尼器布置示意图

4.3 设置伸臂桁架的情况

对该工程案例的避难层 1 层不设伸臂桁架;避难层 2~5 层各设置 8 榀伸臂桁架,布置见图 8。以下各组分析模型均依此作为结构基本模型,在该模型上分析阻尼器位置、参数及设置方法等对结构减振率的影响。

4.3.1 不同避难层的阻尼器减振率

引入第 2 组对比模型,对不同避难层设置阻尼器的减振率进行对比。模型 2-0 全楼无阻尼器,模型 2-i (i=1~5) 分别是在避难层 i 层设有阻尼器,避难层阻尼器布置方式和数量与第 1 组模型相同,见图 7。第 2 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 3。

第 2 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 3

模型编号	2-0	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
最大加速度/(m/s ²)	0.298	0.214	0.217	0.224	0.216	0.220
最小加速度/(m/s ²)	-0.283	-0.290	-0.293	-0.298	-0.299	-0.302
均方根求出峰值加速度/(m/s ²)	0.193	0.174	0.177	0.179	0.181	0.185
减振率	—	9.84%	8.29%	7.25%	6.22%	4.15%

由表 2、3 可知,虽然第 1 组模型和第 2 组模型的阻尼器布置形式相同,但设置伸臂桁架后阻尼器总体的减振率低于相应不设置伸臂桁架的模型。同时可以看出,不同于第 1 组模型,第 2 组模型中设置阻尼器的避难层位置越低,阻尼器减振率越高。由此可知,针对不同的结构布置方案,阻尼器布置的有效性分析是必须的。

4.3.2 X 向阻尼器的敏感性分析

该工程案例的 Y 向顶点风振加速度较大,引入第 3 组模型,对 X 向布置的阻尼器进行敏感性分析。第 3 组的 3 个模型在 5 个避难层 Y 向均布置阻尼器,见图 9。模型 3-0 在 X 向不布置阻尼器,模型 3-1 在各避难层 X 向的①~②轴、⑧~⑨轴间布置阻尼器,模型 3-2 在各避难层 X 向的①~②轴、②~③轴、③~⑦轴、⑦~⑧轴、⑧~⑨轴间布置阻尼器。第 3 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 4。由表 4 可知,在 X 向布置阻尼器可以在一定程度上

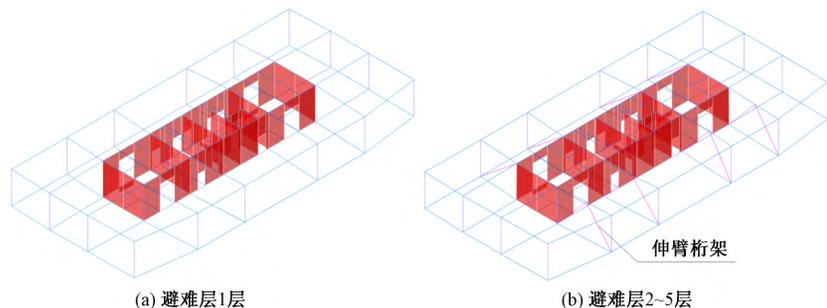


图 8 避难层伸臂桁架布置示意图

第 3 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 4

模型编号	3-0	3-1	3-2
最大加速度/(m/s ²)	0.195	0.218	0.178
最小加速度/(m/s ²)	-0.248	-0.223	-0.214
均方根求出的峰值加速度/(m/s ²)	0.140	0.136	0.129
减振率	—	2.86%	7.86%

减小 Y 向顶点风振加速度。

4.3.3 Y 向阻尼器的敏感性分析

引入第 4 组模型,对 Y 向布置的阻尼器进行敏感性分析。模型 4-0 全楼无阻尼器。模型 4-1 和模型 4-2 均在各避难层 X 向的①~②轴、⑧~⑨轴间布置阻尼器,模型 4-1 还在避难层 1 层 Y 向沿②,③,⑦,⑧轴于核心筒与外柱间的 A~B 轴、D~E 轴间布置阻尼器;模型 4-2 在模型 4-1 基础上,在 5 个避难层平面两端沿 Y 向布置了阻尼器,见图 10。第 4 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 5。由表 5 可知,在 Y 向设置阻尼器对 Y 向风振加速度的减小有明显作用。去掉全楼避难层 Y 向两端的阻尼器时,减振率从原来的 29.46% 骤降至 13.66%。风振峰值加速度也达到了 0.167m/s²,超出了规范限值。

第 4 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 5

模型编号	0	4-1	4-2
最大加速度/(m/s ²)	0.298	0.206	0.218
最小加速度/(m/s ²)	-0.283	-0.281	-0.223
均方根求出的峰值加速度/(m/s ²)	0.193	0.167	0.136
减振率	—	13.47%	29.53%

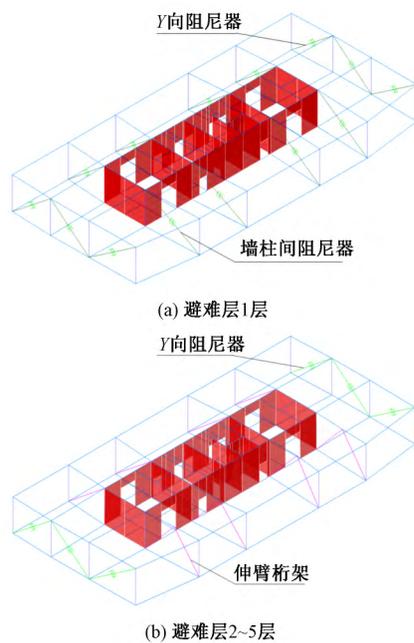


图 9 第 3 组模型 Y 向阻尼器布置示意图

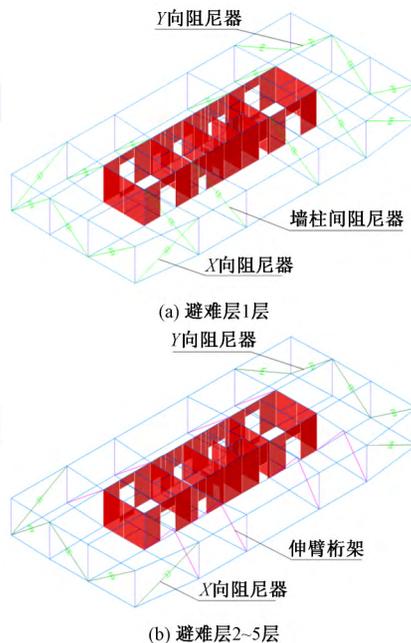


图 10 第 4 组模型 4-2 与第 5 组模型阻尼器布置示意图

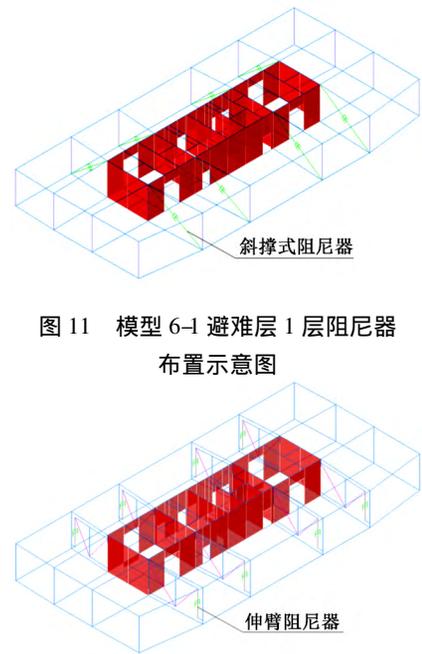


图 11 模型 6-1 避难层 1 层阻尼器布置示意图

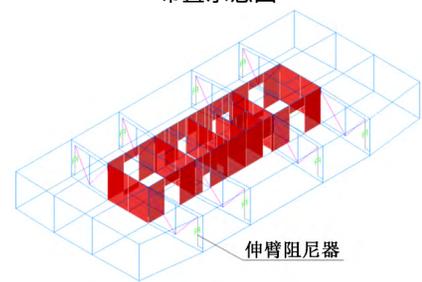


图 12 模型 6-2、6-3 避难层 1 层阻尼器布置示意图

4.3.4 阻尼器的支撑连杆刚度与内部动刚度

引入第 5 组对比模型,其中各模型的阻尼器布置相同,见图 10,仅变化各模型的阻尼器刚度 K 值,分析其对减振率的影响,对比模型的相关参数及 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 6,弹簧刚度 K 近似取《ETABS 使用指南(2004)》的推荐值。

第 5 组模型的参数和 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 6

模型编号	5-0	5-1	5-2	5-3
全楼阻尼器弹簧刚度 K/(×10 ⁶ kN/m)	100	20.0	10.0	5.00
等效钢材截面面积/m ²	4.854	0.971	0.485	0.243
最大加速度/(m/s ²)	0.218	0.220	0.222	0.228
最小加速度/(m/s ²)	-0.223	-0.226	-0.230	-0.237
均方根求出的峰值加速度/(m/s ²)	0.136	0.139	0.142	0.149

由表 6 可知,模型 5-0 使用了较大的弹簧刚度推荐值,但其线刚度等效的钢材截面面积约为 4.854m²,明显过大。由表 6 计算结果可知,弹簧刚度 K 对模型的 Y 向顶点风振加速度有一定的影响。K 值越大,减振效果越好。根据本文式(3)计算得阻尼器组合刚度 K_b^{*},代入 Maxwell 模型可得出更为准确的结果,同时支撑连杆的刚度 K_b 应满足抗规范要求。

4.3.5 斜撑式连接与伸臂连接的对比

为对比黏滞阻尼器不同连接布置方式对结构减振率的影响,引入第 6 组对比模型。模型 6-0 见图 8,全楼无阻尼器。模型 6-i (i=1~3) 在避难层 1 层设置 8 个墙柱间阻尼器,且使用参数相同的阻尼器,模型 6-1 为斜撑式布置,见图 11;模型 6-2 和模型

6-3 在避难层 1 层均采用伸臂竖直式布置阻尼器, 见图 12, 13, 其伸臂截面分别为 $1400 \times 400 \times 80 \times 50$, $1800 \times 800 \times 80 \times 50$ 。第 6 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果见表 7。由表 7 可知, 对于本工程案例而言, 当伸臂桁架刚度较大时伸臂连接布置方式的阻尼器减振率会略高于斜撑式布置方式的阻尼器, 同时也说明采用伸臂布置方式的阻尼器减振率与伸臂桁架刚度也有关系。

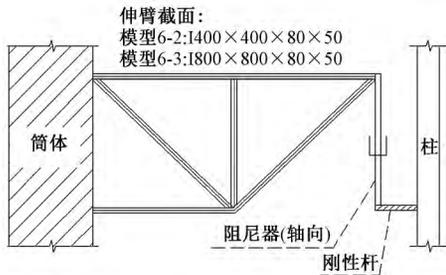


图 13 模型 6-2 6-3 的伸臂布置示意图

第 6 组模型的 Y 向顶点风振加速度计算结果 表 7

模型编号	6-0	6-1	6-2	6-3
最大加速度 / (m/s^2)	0.298	0.225	0.231	0.226
最小加速度 / (m/s^2)	-0.283	-0.297	-0.288	-0.289
均方根求出的峰值加速度 / (m/s^2)	0.193	0.181	0.185	0.177
减振率	—	6.22%	4.15%	8.29%

5 抗风振阻尼器的特点和要求

5.1 长时间连续工作下寿命

由于风荷载持续时间长, 阻尼器长时间连续工作消耗功率可能会过大, 产生的热量对阻尼器寿命很不利, 因此一定要计算阻尼器的功率。特殊情况下可采用金属密封无摩擦阻尼器^[7], 但价格相对较高。

5.2 风荷载作用下的微小位移

抗风用黏滞阻尼器除了功率的要求外, 由于风荷载相对地震而言频率较低, 峰值力较小, 要求所用阻尼器在较低速度时可以正常工作。为此需要液体黏滞阻尼器既能在大荷载、大冲程下短时间工作, 又能在小荷载、小冲程下长期连续有效工作。较小的阻尼器内摩擦系数是这种阻尼器的关键技术, 美国某公司最新项目中的黏滞阻尼器小位移测试报告中^[8], 阻尼器位移振幅为 $0.5\text{mm} (\pm 0.05\text{cm})$ 时, 阻尼器的出力表现正常。

5.3 阻尼器的安装精度

超高层钢筋混凝土建筑多采用框架-核心筒结构, 其自身刚度较大, 风振引起的层间位移通常仅为数毫米。为了保证阻尼器的减振效果, 除对阻尼器质量有严格要求外, 也应严格要求阻尼器的安装精度。美国某公司在近期的采用斜撑式连接液体黏滞

阻尼器的项目中, 实测安装误差小于 0.25mm , 达到了较高的安装精度。

5.4 阻尼器的更换和维护

一般而言, 液体黏滞阻尼器在使用若干年后即需要维护或更换, 具体时间要看不同厂家的不同产品规格。因此在设计时要注明其维护更换时长, 并要求其工作寿命不少于建筑结构使用年限。在布置阻尼器时也应考虑建筑使用过程中能方便更换和维护。

液体黏滞阻尼器的常见问题为漏油, 如不及时维护或更换会影响其减振功能。质量差的液体黏滞阻尼器有可能会刚安装上去就漏油的情况, 要严格防止此类情况发生^[9]。

5.5 阻尼器的质量检测

每套阻尼器在出厂前都需要按照相关规定进行检测, 合格后才可交付使用。

6 工程案例

6.1 工程概况

对于第 4 节中的某超高层公寓, 风洞试验结果表明, 当结构阻尼比取 2% 时, 10 年一遇风荷载作用下结构的顶点最大加速度为 0.192m/s^2 , 不满足规范“不超过 0.15m/s^2 ”的要求。风洞试验报告数据也表明, 当结构阻尼比取 3% 时, 该值为 0.150m/s^2 , 基本满足规范要求; 结构阻尼比取 3.5% 时, 该值为 0.137m/s^2 , 满足规范要求。因此本工程采用布置斜撑式连接的液体黏滞阻尼器以增大结构阻尼比的方法来解决该问题。

6.2 液体黏滞阻尼器的布置

由于结构 Y 向高宽比较大, 其侧向刚度相对较弱, 结构设计时在避难层 2~5 层的 Y 向中间 4 榀布置了伸臂桁架。避难层的伸臂桁架及阻尼器布置方式见图 10, X 向在 5 个避难层周边各布置 4 个阻尼器; Y 向在 5 个避难层周边各布置 6 个阻尼器, 并在第 1 个避难层墙柱间布置 8 个阻尼器, 共布置阻尼器 58 个。

6.3 液体黏滞阻尼器参数

由于风荷载相对地震而言频率较低, 峰值力较小, 因此采用相对较低速度时能输出较大阻尼力的非线性液体黏滞阻尼器, 各阻尼器的阻尼系数均为 $8000\text{kN}/(\text{m/s})^{0.4}$ 。

6.4 计算模型

采用 ETABS 软件对塔楼进行分析。液体黏滞阻尼器采用 Maxwell 单元进行模拟, 墙、梁、柱等结构构件按弹性单元输入。计算模型如图 14 所示。

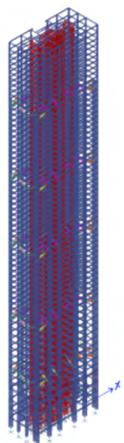


图 14 ETABS 分析模型

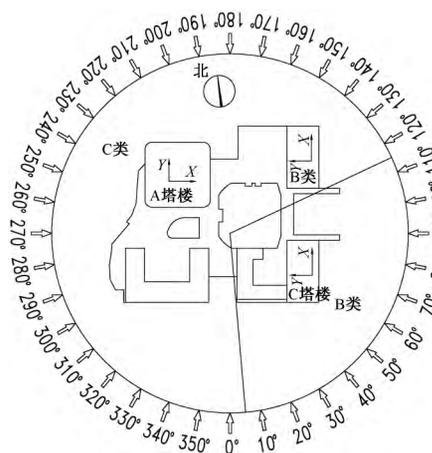


图 15 风洞试验风向角示意图

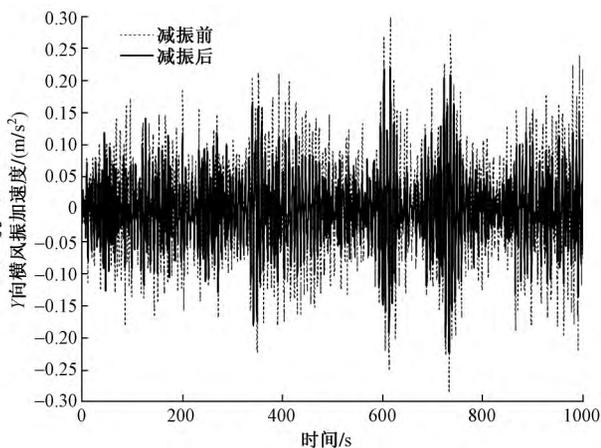


图 16 减振前后的 Y 向顶点风振加速度时程曲线

风荷载使用风洞试验报告提供的结果。风洞试验结果表明,未设阻尼器的结构,在风向角 110° 时结构 X 向最大顶点风振加速度为 0.146m/s^2 ,在风向角 180° 时结构 Y 向最大顶点风振加速度为 0.192m/s^2 。风洞试验风向角示意图见图 15。

6.5 减振效果

计算结果表明,起控制作用的 Y 向顶点风振加速度,减振前为 0.192m/s^2 ,减振后为 0.136m/s^2 ,减振率 29.46%,减振后顶点风振加速度可以满足高规要求。减振前后的 Y 向顶点风振加速度时程曲线见图 16。从图 16 中可以看出,采用设置阻尼器的减振措施后结构的顶点风振加速度明显减小。

附加阻尼比可采用“对比法”进行估算。将无阻尼器时的结构阻尼比提高 1.5%,即阻尼比为 3.5%时,10 年一遇风荷载作用下的顶点最大风振加速度为 0.137m/s^2 。采用减振方案后,计算得出的顶点风振加速度为 0.136m/s^2 ,由此可推算阻尼器提供的附加阻尼比约为 1.5%。

7 结论

(1) 当超高层建筑在风振加速度计算结果或风洞试验得出的结果不满足高规要求时,可采用液体黏滞阻尼器增大结构阻尼比来降低结构顶点的风振加速度,使其满足高规要求或需要达到的更高舒适度要求。

(2) 对液体黏滞阻尼器的 Maxwell 模型中弹簧刚度 K 进行了对比分析,结果显示 K 值对风荷载时程计算结果有一定影响, K 值越大,液体黏滞阻尼器减振率越高。设计斜撑式连接液体黏滞阻尼器时应根据本文式(3)计算出阻尼器的组合刚度 K_b^* ,代入 Maxwell 模型得出更为准确的结果,同时支撑连杆刚度 K_b 应满足抗规的要求。

(3) 布置阻尼器时需要进行敏感性或有效性分析。对比阻尼器在不同位置、不同布置形式下的减振率,找出最佳布置方案。合理配置黏滞阻尼器位置和数量,可大幅度减小结构风振加速度,同时达到较为经济的效果。

(4) 抗风振阻尼器有长时间工作、位移相对较小、需要更换维护等特点。设计时应注意安装精度及使用寿命等要求。

(5) 通过对工程案例进行分析得出,在布置液体黏滞阻尼器后,结构顶点风振加速度的减振率接近 30%,减振效果显著。

参 考 文 献

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 欧进萍, 吴斌, 龙旭. 结构被动耗能减振效果的参数影响 [J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 60-70.
- [5] 彭程, 马良喆, 陈永祁. 伸臂阻尼器系统在高层结构中的应用 [J]. 建筑结构, 2015, 45(S1): 451-458.
- [6] 张相庭. 结构风压和风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [7] 彭程, 马良喆, 陈永祁. 液体黏滞阻尼器在超高层结构上的抗风效果分析 [J]. 建筑结构, 2015, 45(2): 80-88.
- [8] 彭程, 赵成华, 陈永祁. 创新型减振设备液体黏滞阻尼器工程应用与检测 [J]. 建筑技术, 2013, 44(S1): 186-192.
- [9] 陈永祁, 马良喆, 彭程. 建筑结构液体黏滞阻尼器的设计与应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.