

基于性能的某高层结构风振控制研究

周云¹, 汪大洋¹, 李庆祥²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广州 510006; 2. 广东省建筑科学研究院, 广州 510500)

摘要: 基于性能的设计思想是目前工程结构设计研究的热点问题之一, 本文结合某高层结构, 将该思想用于结构抗风分析中, 通过减振技术实现结构性能化设计目标。采用 ADINA 和 Etabs 两种软件建立了结构的三维有限元模型, 给出了两对角粘滞阻尼支撑减振控制方案, 并在无控和有控条件下分别对该结构进行了风振反应分析。结果表明, 两种软件的计算结果具有良好的吻合性; 通过在结构中设置粘滞阻尼支撑, 达到了不同设计风压等级下顺风向和横风向均能满足预期性能目标的要求; 粘滞阻尼器可有效提高结构的风振性能水准, 便于性能化设计思想在工程结构抗风设计中的实现。研究成果可为基于性能的设计思想在工程结构抗风设计中的推广应用提供参考。

关键词: 基于性能; 高层建筑; 风振控制; 粘滞阻尼器; 性能目标

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标识码:** A

Performance-based study on wind-vibration control of a high-rise building

ZHOU Yun¹, WANG Da-yang¹, LI Qing-xiang²

(1. School of Civil Engineering of GuangZhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Academy of Building Research, Guangzhou, 510500, China)

Abstract: The performance-based design idea was introduced in wind-induced vibration analysis of high-rise buildings and performance objectives were realized by using vibration control technology. The expected performance objectives of the building were presented and in order to realize the expected objectives, two kinds of numerical models were built based on both ADINA and Etabs platforms and the control measure of double diagonal damper braces was presented. Then, performances of the structure with and without dampers were investigated in detail. The results show that good agreement is obtained between the computational results from ADINA and Etabs. Under excitations of middle and strong wind pressure, the expected performance objectives can not be achieved in the case of without dampers. However, the expected objectives can be well realized in the case of with dampers in all wind pressure levels. So, structural dynamic performance against wind-induced vibration can be improved effectively by vibration control technology, such as viscous damper control, which provides a reliable way of realizing the performance-based idea in structural wind-resistant design. The results provide reference in certain extent to the application of the performance-based design idea in structural design.

Key words: performance-based; high-rise building; wind-vibration control; viscous damper; performance objective

随着新材料、新技术与新结构体系等的不断发展与推广应用, 工程结构逐渐变得越来越高、跨度也越来越大, 结构体系不断向柔性化方向发展, 抗震与抗风设计已成为结构设计不可或缺的两个重要方面, 尤其对于部分柔性高层结构, 抗风设计更为重要, 甚至起决定性作用。结构抗震设计经过近百年的发展, 已近形成了较系统的抗震设计理论, 从传统的结构静力法、反应

谱法发展到目前热点研究的基于性能的抗震设计理论^[1-6]。结构抗风设计理论和方法的研究滞后于结构抗震设计理论和方法的研究, 对一个建筑结构在地震作用下按基于性能的抗震设计方法进行, 而对风荷载不按基于性能的设计方法进行, 显然是不合理的。因此, 有必要同时开展基于性能的结构抗震与抗风设计, 以达到合理可靠的建筑结构设计。笔者在文献 [7, 8] 中提出了基于性能的结构抗风设计理论框架, 并对结构抗风性能目标、结构设计风压等级等进行了初步研究与探讨。本文针对某高层结构, 将基于性能的设计思想用于该结构的抗风分析中, 分别采用 Etabs 和 ADINA 软件对该高层结构进行风振反应分析, 结合粘滞阻尼控制技术实现结构预期性能设计目标的要求。

基金项目: 高等学校博士点学科专项基金资助项目(200810780001); 广东省自然科学基金团队项目(8351009101000001); 广东省教育科学项目(20090912); 广州市教育系统创新团队项目(09T003)

收稿日期: 2011-04-25

第一作者 周云男, 教授, 博士生导师, 1965年9月生

1 高层结构概况

某高层建筑位于广东沿海城市(如图1、2所示),地下3层,地上43层,总高200m,标准层层高为4.35m,平面尺寸为40.4m×44.8m,四周棱边处作切角处理,并分别在15/16/29/30四层上设置对称的敞开式空中花园。结构形式为框架-核心筒结构,核心筒采用钢筋混凝土剪力墙结构,混凝土强度等级为C60;外框架1-15层柱采用型钢混凝土柱,型钢材质为Q345,16层-43层采用普通钢筋混凝土柱,混凝土强度等级为C50;外框架梁采用钢筋混凝土梁,混凝土强度等级为C40。

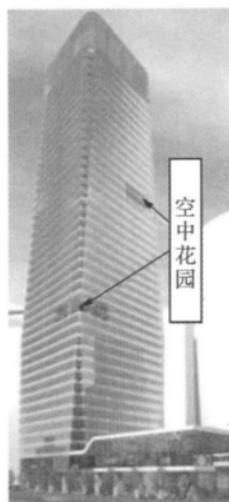


图1 建筑效果图
Fig. 1 Building effect

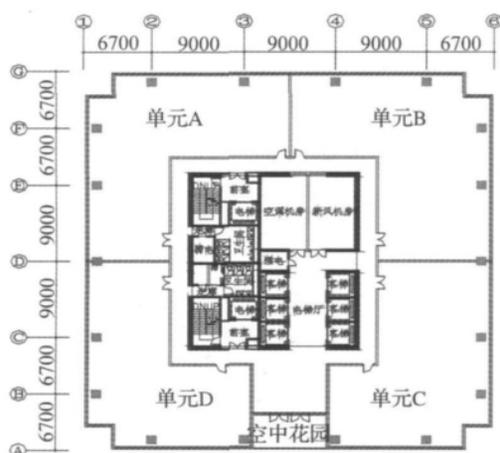


图2 标准层平面图
Fig. 2 Typical floor plan

结构设计使用年限为50年,所处地貌为D类,10m高度处10年一遇的基本风压为 0.45 kN/m^2 ,地面粗糙度指数 $\alpha = 0.3$ 。楼面恒载为 1.5 kN/m^2 ,屋面恒载为 3.5 kN/m^2 ,楼面活载根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)^[9]取值,见表1。

表1 楼面活载取值(单位: kN/m^2)
Tab. 1 Values of live load (Units: kN/m^2)

楼面功能	荷载标准值	楼面功能	荷载标准值
办公室、住宅	2.0	电梯机房	7.0
餐厅	2.5	上人屋面	2.0
健身房	4.0	配电间、水箱间	10.0
消防楼梯	3.5	屋顶花园	4.0
商店	3.5	储藏室	5.0
餐厅厨房	4.0	一般设备间	4.0

2 结构风振性能预期设计目标

该结构地处广东沿海城市,濒临南海,风力较大,《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)中规定,该地区10年一遇基本风压为 0.45 kN/m^2 ,50年一遇基本风压为 0.75 kN/m^2 ,100年一遇基本风压为 0.9 kN/m^2 。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)^[10]中规定高度超过150m的高层建筑结构应具有良好的使用条件,满足舒适度要求,在10年一遇风荷载作用下结构顺风向与横风向顶点最大加速度不应超过: 0.15 m/s^2 (住宅、公寓)、 0.25 m/s^2 (办公、旅馆)。广东省实施《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)补充规定中指出,结构承载力计算时,基本风压的重现期应与设计使用年限一致。针对建筑结构的自身特点及以上规范的要求,在结构设计中业主提出以下要求:

① 结构设计按照50年一遇风荷载(基本风压为 0.75 kN/m^2)进行;

② 50年一遇风荷载作用下楼层层间最大位移与层高之比的限值为1/500;

③ 50年一遇风荷载作用下顶层顺风向与横风向最大加速度限值为 0.15 m/s^2 。

本文基于业主要求,并根据文献[7,8]中的研究结果,确定该结构的设计风压强度与对应的预期性能目标,见表2。

表2 结构风振预期设计目标

Tab. 2 Expected performance objectives of the building

建筑类别	II		
设计风荷载/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.45	0.75	1.2
设计风压等级	弱风压	中风压	强风压
结构风振性能水准	性能健康	性能健康	性能亚健康
顶点加速度限值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.15	0.15	0.25
最大层间侧移角限值	1/500	1/500	1/200

3 三维数值模型建立

分别采用美国CSI公司的大型结构分析与设计软件Etabs9.2.0和通用软件ADINA建立三维有限元模型,如图3所示。Etabs模型中剪力墙采用壳单元,楼板采用膜单元,梁、柱采用空间杆单元。ADINA模型中梁、柱单元均采用三维梁单元模拟,钢材本构采用塑性材料中的双线性塑性材料模型,混凝土本构采用ADINA软件中自带的材料模型^[17]。

4 结构模态分析

结构自振特性是衡量其质量与刚度是否匹配、刚

度是否合理的重要指标。按照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002) 5.1.13 条“计算振型数应使振型参与质量不小于总质量的 90%”的规定对结构选取了 20 个振型,经计算满足要求。结构前六阶振动周期与振动形式见表 3,结构第一振型以 Y 向平动为主,第二振型以 X 向平动为主,第三振型以绕 Z 向扭转为主。由表 3 可知,结构扭转第一自振周期 T_3 与平动第一自振周期 T_1 之比分别为 0.62 和 0.64,均小于 0.85,表明结构的扭转振动效应较小。

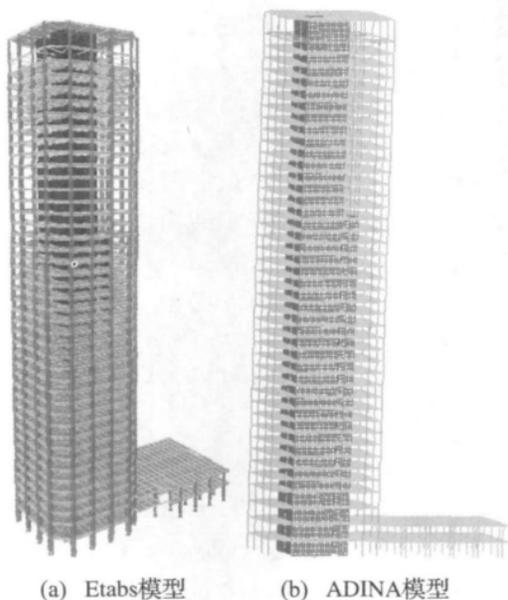


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical model

表 3 结构自振特性

Tab. 3 Natural characteristics of the building

振型	1	2	3	4	5	6	
Etabs	周期	3.94	3.74	2.45	1.20	1.02	0.87
	振动形式	平动	平动	扭转	平动	平动	扭转
ADINA	周期	4.11	3.89	2.62	1.37	1.1	0.95
	振动形式	平动	平动	扭转	平动	平动	扭转

5 结构无控风振性能分析

作用于结构上的风荷载由平均风荷载和脉动风荷载组成,本文计算中平均风荷载采用指数律平均风速剖面;脉动风荷载根据文献 [11, 12] 研究,基于 Darvenport 脉动风速谱,利用改进的自回归 AR 模型^[13-15] 模拟得到结构的脉动风荷载时程。

表 4 给出了两种有限元软件分析得到的结构上部楼层顺风向和横风向的峰值加速度值,图 4 为不同设计风压等级条件下结构顺风向和横风向层间位移角的 Etabs 和 ADINA 分析结果对比图。在弱风压条件下,结构顶点顺风向和横风向峰值加速度分别为 0.085 m/s^2 和 0.102 m/s^2 ,小于“性能健康”所规定的顶点峰值加速度的限值要求;同时结构层间位移角亦较小。在中风压条件下,考虑与不考虑周围建筑物影响时结构顶点顺风向和横风向峰值加速度分别为 0.134 m/s^2 和 0.18 m/s^2 ,超过“性能健康”的限值要求;而同等条件下结构层间位移角仍处于“性能健康”水准规定的最大层间侧移角的限值内。在强风压条件下,结构层间位移角同样较小,满足结构设计“性能亚健康”的目标要求,

表 4 结构风振加速度(单位: m/s^2)

Tab. 4 Wind-induced vibration accelerations of the structure

风向	顺风向						横风向					
	Etabs		ADINA		Etabs		ADINA					
分析软件	Etabs	ADINA										
基本风压/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.45	0.75	1.2	0.45	0.75	1.2	0.45	0.75	1.2	0.45	0.75	1.2
43	0.085	0.126	0.252	0.084	0.134	0.277	0.094	0.165	0.331	0.102	0.18	0.34
42	0.08	0.119	0.238	0.074	0.124	0.252	0.09	0.157	0.318	0.094	0.172	0.324
41	0.077	0.114	0.23	0.07	0.115	0.241	0.088	0.152	0.308	0.092	0.164	0.306
层 40	0.075	0.111	0.222	0.069	0.114	0.232	0.085	0.148	0.299	0.085	0.161	0.288
号 39	0.072	0.107	0.214	0.068	0.112	0.22	0.083	0.144	0.291	0.081	0.153	0.279
38	0.069	0.104	0.207	0.066	0.108	0.214	0.081	0.139	0.282	0.078	0.145	0.265
37	0.066	0.1	0.199	0.065	0.104	0.203	0.079	0.135	0.273	0.075	0.137	0.253
36	0.064	0.096	0.191	0.064	0.1	0.195	0.076	0.13	0.264	0.073	0.135	0.248
35	0.061	0.092	0.183	0.062	0.098	0.186	0.073	0.126	0.254	0.07	0.123	0.237
34	0.058	0.089	0.175	0.06	0.092	0.182	0.071	0.122	0.244	0.066	0.118	0.23
33	0.056	0.085	0.167	0.056	0.088	0.178	0.068	0.118	0.234	0.067	0.112	0.226

但结构顺风向和横风向的峰值加速度分别为 0.277 m/s^2 和 0.34 m/s^2 , 超过“性能亚健康”水准的峰值加速度限值要求, 处于“性能病态”水准, 不满足结构设计预期设计目标的要求。综上所述, 无控状态下该结构层间位移角均满足相应性能设计目标的要求, 但顶点峰值加速度不满足表 2 提出的预期性能设计目标的要求。因此, 拟对该结构采取相应控制措施, 以提高结构的风振性能。

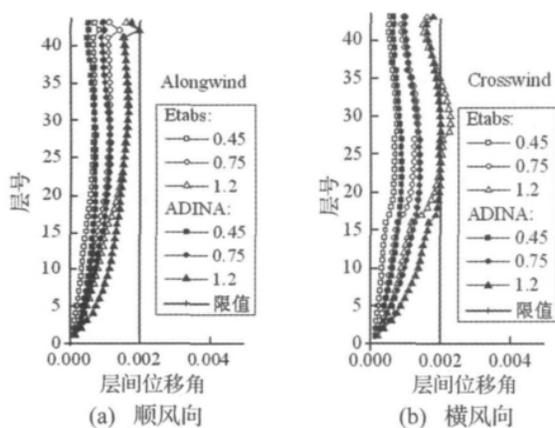


图 4 结构层间位移角 Etabs 与 ADINA 分析结果对比

Fig. 4 Contrasts of structural story drift between Etabs and ADINA

6 结构有控风振性能分析

6.1 风振控制方案

粘滞阻尼器在工程结构中广泛应用的诸多设计实践表明^[16], 该装置可有效降低结构在外界荷载作用下的振动, 提高结构的安全性和舒适性。根据该工程的特点及无控作用下结构风振反应分析的研究结果, 采用粘滞阻尼器对该结构进行减振控制, 以提高结构的风振性能。所用粘滞阻尼器的参数: 阻尼系数为 $200 \text{ kN}/(\text{mm/s})^{0.3}$ 、最大出力为 500 kN 、行程 $\pm 30 \text{ mm}$, 阻

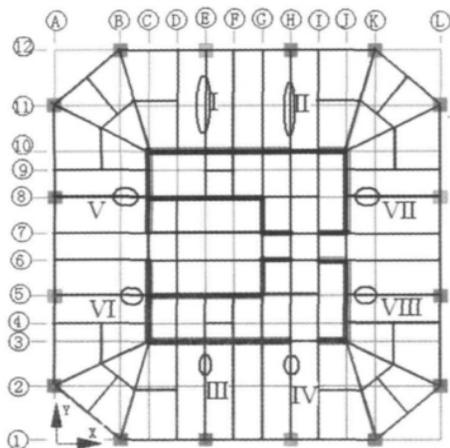


图 5 粘滞阻尼器布置位置

Fig. 5 Installation of viscous dampers

尼器采用两对角支撑安装形式。结构中共布置粘滞阻尼器 128 个, 其中 X 方向 48 个, 设置在 29-31 及 40-43 层的 V、VI、VII、VIII 位置处(如图 5 所示); Y 方向 80 个, 设置在 28-32 及 39-43 层的 I、II、III、IV 位置处(如图 5 所示)。

6.2 结构有控风振性能分析

根据第 5 节的分析, 结构在弱风压条件下风振性能水准处于“性能健康”状态, 满足预期性能设计目标的要求, 所以本节重点研究中风压和强风压条件下结构的风振反应。

定义风振作用下设置阻尼装置的结构减振效果 Δ 的计算公式如下:

$$\Delta = \frac{\text{无控风振反应} - \text{有控风振反应}}{\text{无控风振反应}} \times 100/100$$

表 5 给出了结构顶点峰值加速度的减振效果对比结果, 图 6 为在 no、VD 状态下结构顺风向和横风向顶点峰值加速度时程曲线对比图 (no 表示无控、VD 表示粘滞阻尼控制), 图 7 为在 no、VD 状态下结构顺风向和横风向层间位移角对比图, 图 8 为在 no、VD 状态下结构顺风向和横风向楼层剪力和弯矩沿高度的变化曲线对比图。

中风压条件下, 结构顺风向顶点峰值加速度分别为 0.1 m/s^2 (ADINA) 和 0.093 m/s^2 (Etabs), 最大层间位移角小于 $1/500$; 横风向顶点峰值加速度分别为 0.124 m/s^2 (ADINA) 和 0.118 m/s^2 (Etabs), 最大层间位移角亦小于 $1/500$, 满足中风压条件下预期“性能健康”的目标要求。强风压条件下, 结构顺风向顶点峰值加速度分别为 0.195 m/s^2 (ADINA) 和 0.175 m/s^2 (Etabs), 最大层间位移角均小于 $1/200$; 横风向顶点峰值加速度分别为 0.229 m/s^2 (ADINA) 和 0.216 m/s^2 (Etabs), 最大层间位移角亦小于 $1/200$, 满足强风压条件下预期“性能亚健康”的目标要求。

6.1 节给出的粘滞阻尼减振控制方案对该结构的风振反应具有良好的控制效果, 如在中风压条件下结构顺风向与横风向顶点峰值加速度的减振效果分别达到 25.4%、31.1% (ADINA), 且结构层间位移角、内力反应亦明显小于无控状态。

表 5 顶点峰值加速度减振效果对比

Tab. 5 Contrasts of control effect of the top peak accelerations

风压	风向	no	ADINA		Etabs	
			VD	Δ	VD	Δ
0.75kN/m ²	顺风向	0.134	0.1	25.4%	0.093	30.6%
	横风向	0.18	0.124	31.1%	0.118	34.4%
1.2kN/m ²	顺风向	0.277	0.195	29.6%	0.175	36.8%
	横风向	0.34	0.229	32.6%	0.216	36.5%

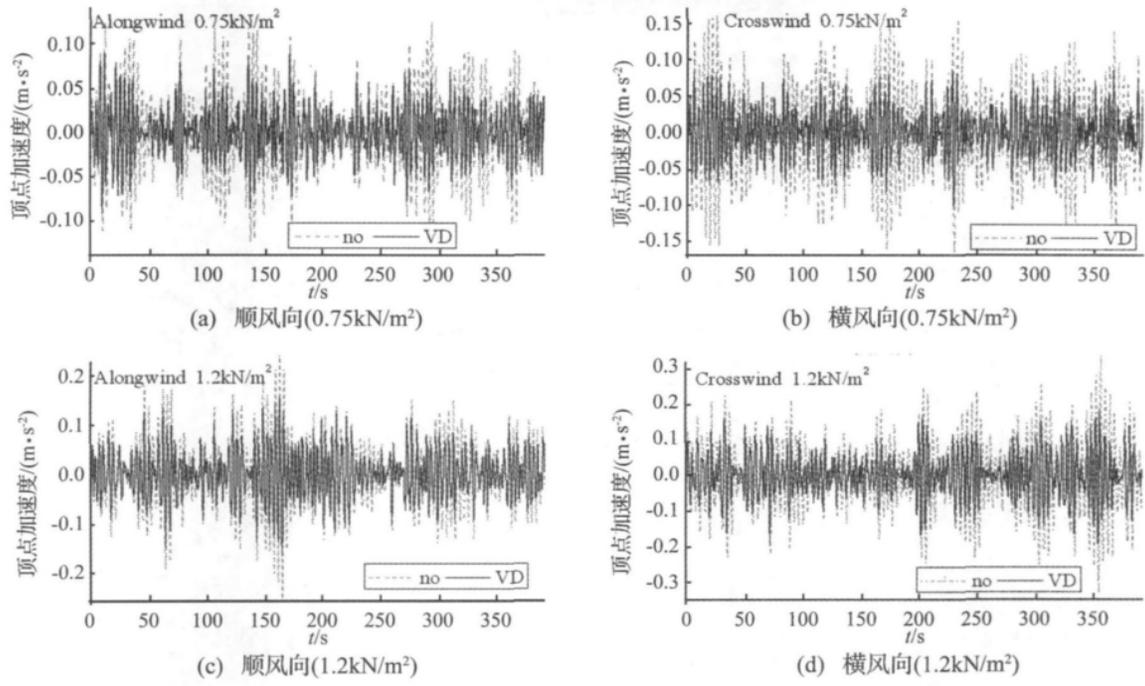


图 6 结构顶点加速度时程

Fig. 6 Time series of the top accelerations

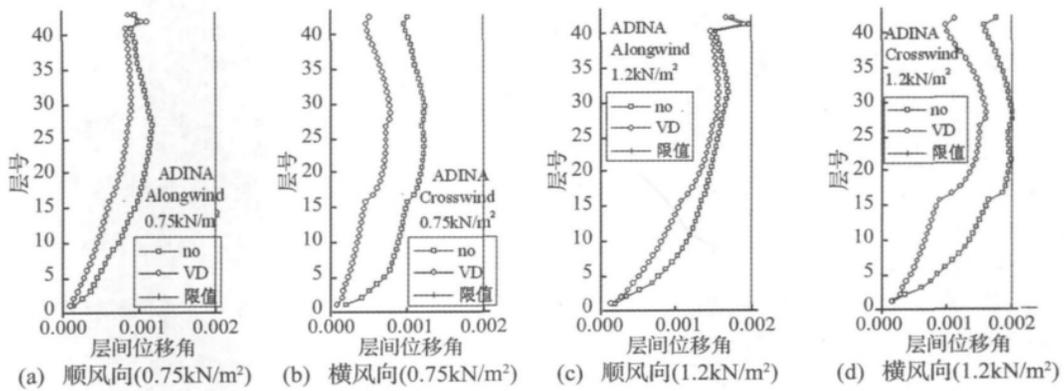


图 7 结构层间位移角

Fig. 7 Story drifts of the structure

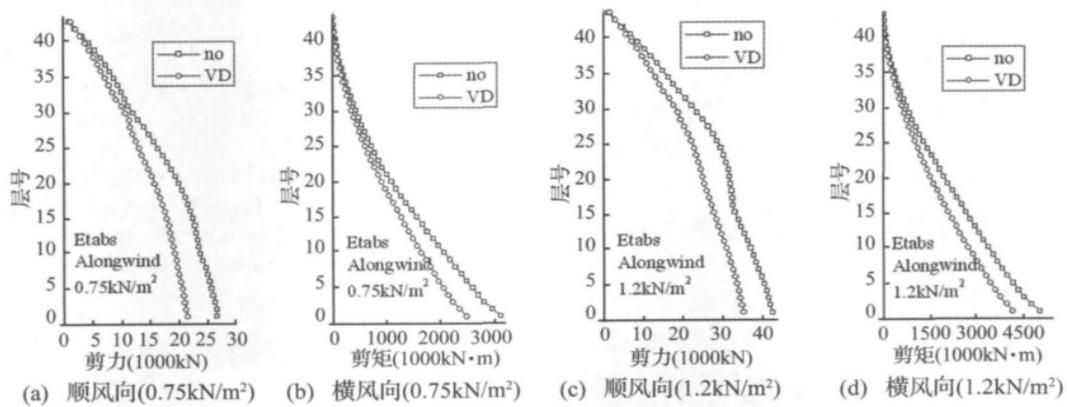


图 8 结构楼层剪力和弯矩

Fig. 8 Story shear force and moment of the structure

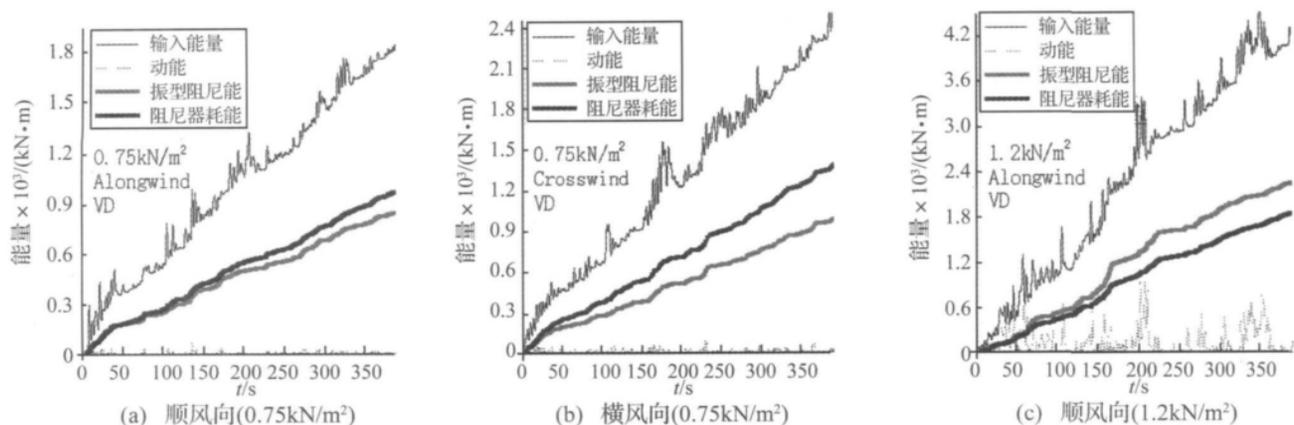


图9 结构风振能量分布图

Fig.9 Distributions of structural energy in wind action

图9为在 0.75 kN/m^2 和 1.2 kN/m^2 条件下结构顺风向和横风向的风振能量图。由图9可见,风振作用输入结构的总能量随时间近似线性增加,这与脉动风荷载时程模拟的初始假定“风荷载为零均值平稳白噪声随机过程”是一致的;三种工况下阻尼器耗散的能量约占风振总输入能的40%左右,说明该结构中阻尼器的设置具有大量耗散风振输入能量的能力,进而可有效提高结构的风振性能;风振输入能量随风压强度等级的增大而增长(如图9(c)中的风振输入能要高于9(a)),且同等风压条件下结构横风向风振输入能要高于顺风向,进一步说明了结构风振反应随风压等级的增大而增大及横风向风振反应大于顺风向风振的现象。

7 结论

将基于性能的抗风设计思想用于某高层建筑结构的风振控制分析中,通过对该结构性能化分析研究,得到以下结论:

(1) 通过在结构相关部位设置两对角粘滞阻尼支撑,实现了中风压和强风压条件下结构顺风向和横风向风振反应均能满足预期性能目标的要求,表明减振控制技术能有效改善建筑结构的安全性和舒适性,有利于高层结构不同风振性能化设计目标的实现;

(2) 基于性能的结构抗风设计能够实现不同风压等级下明确的性能目标,保证结构在生命周期内的可靠运行;

(3) 两种软件对该结构模态分析、风振反应分析的结果具有良好的吻合性。

结构性能化抗风分析与设计思想目前尚属起步阶段,但以其具有的优越性而言必将成为未来结构设计的发展方向(尤其对于高层建筑或有特殊要求的建筑物),建议进一步深入开展该方法在结构抗风设计中的理论和应用研究。

参考文献

- [1] Moehle J P. Displacement based design of RC structure [A]. Eervera A, ed. 10th world conf on Earthquake Eng. Mexico: WECC, 1992.
- [2] SEAOC, Vision 2000. Performance based seismic engineering of buildings, I - II: Conceptual framework [R]. Structural Engineers Association of California, Sacramento, 1995.
- [3] BSSC. NEHRP Recommended provisions for seismic regulation of new buildings and other structures [R]. Report No: FEMA302, Washington, 1998.
- [4] FEMA368. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures [R]. Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2000.
- [5] 郭子雄. 基于变形的抗震设计理论及应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [6] 李刚, 程耿东. 基于性能的结构抗震设计统一理论—理论、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 周云. 结构风振控制的设计方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 周云, 汪大洋, 陈小兵. 基于性能的结构抗风设计理论框架 [J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 244-251.
- [9] 建筑结构荷载规范(GB50009-2001) [S]. 北京: 中国建筑出版社, 2002.
- [10] 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ3-2002) [S]. 北京: 中国建筑出版社, 2002.
- [11] 周云, 汪大洋, 邓雪松, 等. 某超高层结构三种风振控制方法的对比研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 16-21.
- [12] 汪大洋, 周云, 王绍合. 耗能减振层对某超高层结构的减振控制研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 84-91.
- [13] Spanos P D, Zeldin B A. Monte carlo treatment of random fields: abroad perspective [J]. Applied Mechanics Review, 1998, 51(3): 219-237.
- [14] Shinozuka M, Deodatis G. Simulation of multi-dimensional gaussian stochastic fields by spectral representation [J]. Applied Mechanics Review, 1996, 49(1): 29-53.
- [15] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic process [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1996, 122(3): 778-787.
- [16] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
- [17] ADINA R&D, Inc. Theory and modeling guide [M]. Volume I, II and III. Watertown, USA, 2005.