

基于粘滞阻尼器的单桩式海上风力机结构振动控制

薛世成, 岳敏楠, 闫阳天, 李 春

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为探究湍流风与地震联合作用下单桩式海上风力机的结构动力学响应与振动控制,以单桩式 NREL 5 MW 海上风力机为研究对象,采用有限元法建立三维壳模型并基于二次开发将体等效线性模型集成于 ABAQUS 中,通过附加粘滞阻尼器对地震诱导风力机振动进行控制。结果表明:粘滞阻尼器能够大幅降低地震导致的风力机塔顶振动,但对湍流风引起的塔顶振动控制效果并不明显;粘滞阻尼器也能缓解因地震造成的支撑结构上 Von-Mises 应力集中现象且在粘滞阻尼器安装位置效果最好;粘滞阻尼器能够显著降低风力机桩基部分所受剪力最大值,而对弯矩的控制效果则在风力机支撑结构部分效果最明显。

关键词:海上风力机;粘滞阻尼器;动力响应;地震;单桩式

中图分类号:TK83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.05.017

[引用本文格式]薛世成,岳敏楠,闫阳天,等.基于粘滞阻尼器的单桩式海上风力机结构振动控制[J].热能动力工程,2021,36(5):111-118. XUE Shi-cheng, YUE Min-nan, YAN Yang-tian, et al. Vibration control of monopile offshore wind turbine structure based on viscous damper[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5):111-118.

Vibration Control of Monopile Offshore Wind Turbine Structure based on Viscous Damper

XUE Shi-cheng, YUE Min-nan, YAN Yang-tian, LI Chun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to study the structural dynamic response and vibration control of monopile offshore wind turbine under the combined action of turbulent wind and earthquake, the monopile NREL 5 MW offshore wind turbine was used as the research object. The three-dimensional shell model was established by the finite element method and the soil equivalent linear model was integrated into ABAQUS based on the secondary development. The vibration of the earthquake-induced wind turbine was controlled by adding viscous dampers to the tower. The results show that the viscous damper can greatly reduce the vibration of the tower top caused by the earthquake, but it has no evident effect on the vibration control of the tower top caused by the turbulent wind. At the same time, the viscous damper can also alleviate the local Von-Mises stress concentration on the supporting structure caused by the earthquake and has the best effect at the location where the viscous damper is installed. The viscous damper can significantly reduce the maximum shear force in the pile foundation of wind turbine, while the bending moment control effect is most clear in the supporting structure of wind turbine.

收稿日期:2020-07-16; 修订日期:2020-08-13

基金项目:国家自然科学基金(51976131, 51676131);上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设项目(19060502200)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976131, 51676131); Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project(19060502200)

作者简介:薛世成(1996-),男,山西大同人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:李 春(1963-),男,北京人,上海理工大学教授。

Key words: offshore wind turbine, viscous damper, dynamic response, earthquake, monopile

引 言

我国风资源丰富的东南沿海地区处于地震活跃带,风力机在工作期间不仅受风、浪联合作用,且需要时刻准备抵御地震侵袭。作为典型的钢管塔型高耸结构,风力机动力学呈低刚度和低阻尼特性,地震载荷导致其过度振动,甚至导致屈曲和倒塌^[1]。随着风电技术进步,新一代大容量风力机叶片更长,塔架更高,整体结构更加细长,使这一问题进一步凸显。因此,开发有效的减震装置抑制风力机在地震载荷下的过度振动,以保证发电效率与安全性十分重要。

国内外学者对于风力机振动控制的研究大多集中在调谐型阻尼器上,文献[2]基于气动-伺服-水动-控制开源软件平台 FAST 研究了调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)对风-震联合作用下陆上大型风力机的控制效果,结果表明 TMD 系统能够明显减缓塔架一阶固有频率处的振动,结构安全性得到改善。文献[3]基于有限元模型对使用调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper, TLD)控制风力机塔架风致疲劳进行研究,结果表明 TLD 有效降低了塔架的应力幅值,使基于热点应力法得出的塔架高周疲劳寿命由 17.6 年增长到 25.6 年,满足了 20 年设计寿命的要求。文献[4]探究了多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass dampers, MTMD)在风力机上的应用,结果表明 MTMD 能有效作用于风力机的基本振型和高阶振型,相较于 TMD 更适于控制由多种外界载荷同时作用导致的结构振动。文献[5]建立风力机与调谐液柱阻尼器(tuned liquid column damper, TLCD)耦合模型,结果表明 TLCD 能提高风力机系统的可靠性,与单个 TLCD 相比,多重 TLCD 系统并不能降低风力机结构的易损性。

但是,调谐型阻尼器面临着挤占风力机内部空间的问题^[6]。与调谐型阻尼器相比,粘滞阻尼器具有占用空间小、安装成本低的优势^[7]。在其他高耸结构振动控制领域,粘滞阻尼器作为振动控制措施应用更加广泛^[8],证明了其在建筑减震领域的有效性和可靠性^[9]。文献[10]通过 ANSYS 建立大跨度

斜拉桥模型,在其上布置 8 个粘滞阻尼器,研究表明粘滞阻尼器能够有效减弱斜拉桥关键部位在地震下的位移响应。文献[11]通过 PERFROM-3D 建立了附设粘滞阻尼器的 149 m 高楼的框架结构,并进行了弹塑性地震时程分析,结果表明粘滞阻尼器能有效降低结构的层间位移角和层间剪力,减小高层建筑框架结构的损伤。文献[12]基于增量动力法分别对附加粘滞阻尼器、防屈曲支撑和摩擦阻尼器的高层建筑进行了易损性分析,使用地震工程模拟开放体系(Open System for Earthquake Engineering Simulation, OpenSees)进行建模计算,结果表明在所采用的 3 种阻尼器中,粘滞阻尼器无论是从抵抗结构倒塌概率分析还是从位移指标分析均优于其他两种阻尼器,证明粘滞阻尼器有着优异的抗震性能。

目前对于粘滞阻尼器作为风力机减震装置的研究较少,为研究粘滞阻尼器在风力机振动控制中的作用,本文以单桩式 NREL 5 MW 海上风力机为研究对象,基于通用有限元软件 ABAQUS 建立海上风力机多环境载荷联合作用模型,对其进行时程分析,研究粘滞阻尼器对风力机动力学响应的影响。

1 环境载荷

1.1 土-构耦合模型

由于土与结构之间物理性质不同,导致在地震作用下两者之间产生耦合作用,称为土构耦合效应(Soil Structure Interaction, SSI),SSI 效应对地震作用下风力机的动力学响应有明显影响^[13]。为使有限元分析结果接近于实际情况,建立精确的桩土模型,通过实体土体模型与主从接触面模型模拟 SSI 效应。

选用基于粘弹性理论的等效线性模型作为土壤的动力本构模型。该模型不寻求建立具体的应力-应变关系,而是以等效剪应变和等效剪切模量随剪应变幅值与应力状态变化的关系来表达土壤的动力性质。等效线性模型^[14]为:

通过 Kelvin 模型描述土的粘弹性:

$$\tau = G\gamma + \eta_c \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: τ —剪应力, Pa; G —土的剪切模量, Pa; γ —剪应变; η_c —剪切粘滞系数。

剪切粘滞系数为:

$$\eta_G = 2G\lambda/\omega \quad (2)$$

式中: λ —阻尼比; ω —圆频率。

土体剪切模量比 G/G_{\max} 与阻尼比 λ 和剪应变 γ 的关系通过实验得出,截切模量可以由此确定,其中最大剪切模量为:

$$G_{\max} = kp_a \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

式中: k —模量系数; σ_m —土体围压, Pa; p_a —大气压强,取 101.325 kPa; n —模量指数。

ABAQUS 未内置等效线性模型,通过 ABAQUS 提供的二次开发工具和预留接口,基于 Fortran 语言编写用户自定义材料子程序 UMAT,将等效线性模型集成于 ABAQUS 内。

计算流程需要进行静-动力联合计算,首先通过静力计算得到土体初始应力场,然后将静力计算结果作为动力计算初值,多次迭代确定等效线性模型的参数,随后开始正式计算。

考虑到海底土壤的实际情况,采用分层土体描述不同土层物理参数,土体动力学及静力学参数如表 1 所示。

表 1 土体动力学及静力学参数

Tab. 1 Kinetic and statics parameters of soil

参数	粉土	粉砂夹粉土	粉质粘土
埋深/m	0~10	10~27	27~50
密度/ $t \cdot m^{-3}$	1.87	1.84	1.96
弹性模量/MPa	67	72	45
泊松比	0.250	0.245	0.270
内摩擦角/ $^\circ$	22.5	28.8	14.8
黏聚力/MPa	0.032	0.016	0.049
模量系数 k	844	836	851
模量指数 n	0.55	0.63	0.50

土体与结构之间以主从接触面模型模拟两者间存在的相互作用,其中以刚性较大的风力机桩基外壁为主接触面,土体表面为从接触面。法向接触作用选用硬接触模型,切向接触作用选用库伦摩擦模型,并以“罚函数”法增强其收敛性。土体模型如图 1 所示。土体内部采用八节点六面体线性单元,土体模型外侧采用无限元边界以避免地震波与结构相互作用引起的外行波在模型内部反射影响计算结果,其使用单元为八节点六面体无限单元。

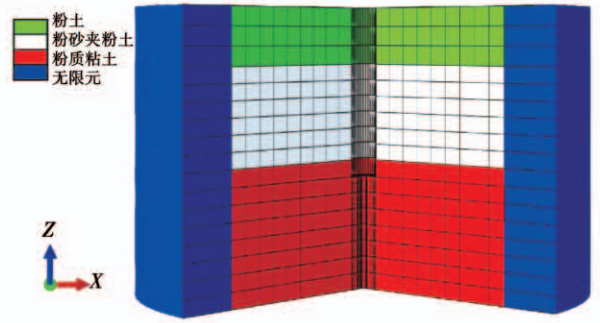


图 1 土体模型

Fig. 1 Soil model

1.2 地震载荷

地震输入选用实测地震记录,选自太平洋地震工程研究中心数据库^[15],地面运动记录峰值位移为 0.176 m,震级为 7.62 级,以风力机模型采用的坐标系为基准, X 、 Y 和 Z 分别表示前后方向、侧向与垂直方向,其中前后方向指湍流风来流方向,侧向与来流方向垂直。

在进行计算时,地震载荷以位移边界的形式加载于土体模型底部有限单元划分区域,无限单元区域仅起到耗散外行波的作用。

1.3 湍流风载荷

选用 Kaimal 湍流风谱模型模拟风力机所处风场环境,平均风速取 11.4 m/s。Kaimal 湍流风谱模型^[16]为:

$$S_i(f) = \frac{4\sigma_i^2 L_i / \bar{u}_{hub}}{(1 + 6fL_i / \bar{u}_{hub})^{5/3}} \quad (4)$$

式中: i —湍流风的不同分量; $S_i(f)$ —来流方向分量功率谱密度, W/Hz; \bar{u}_{hub} —轮毂高度处平均风速, m/s; f —循环频率, Hz; L_i —速度分量积分尺度, m; σ_i^2 —标准差,其值等于湍流强度与平均风速之比。

垂直方向风速满足以下关系:

$$u(z) = \bar{u}_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.2} \quad (5)$$

式中: $u(z)$ —垂向速度分布, m/s; z —高度, m; z_{hub} —轮毂所在高度, m。

水平方向风速满足空间相干模型:

$$S_{k,h}(f) = \xi(\Delta r, f) \sqrt{S_{k,k}(f) \cdot S_{h,h}(f)} \quad (6)$$

式中: $S_{k,h}(f)$ — k, h 两节点的互功率谱, W; $\xi(\Delta r, f)$ —相干系数; Δr —节点间距离, m; $S_{k,k}(f)$ — k 点功率谱, W; $S_{h,h}(f)$ — h 点功率谱, W。

采用气动-伺服-水动-控制开源软件平台 FAST 作为前处理软件,基于 Kaimal 湍流风谱模型生成的风场模型,求得风力机轮毂中心处所受风轮推力,加载于有限元模型中,湍流风遍历于仿真过程之中,地震载荷在仿真开始后第 50 s 开始加载,仿真过程中载荷加载情况如图 2 所示。

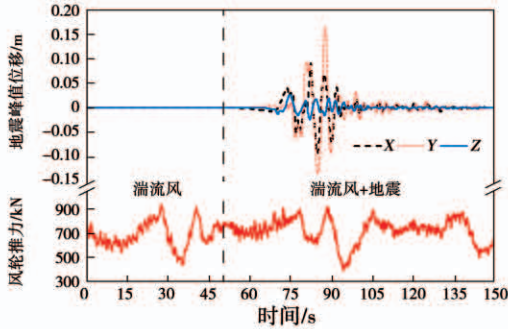


图2 载荷加载情况

Fig.2 Load action condition

总仿真时间为 150 s,时间步长设定为 0.05 s,共需迭代 3 000 步。求解算法使用 Hilber-Hughes-Taylor 隐式算法,该算法可以在保证精度的同时,允许使用较大步长进行迭代以节约计算时间。

2 研究对象

选用单桩式 NREL 5 MW 风力机,其结构设计参数^[17]如表 2 所示。

表2 NREL 5 MW 风力机主要参数

Tab.2 Main parameters of NREL 5 MW wind turbine

参数	数值
额定功率/MW	5
额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.4
额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	12.1
风轮直径/m	126
轮毂直径/m	3
塔架前一阶固有频率/Hz	0.32
塔架高度/m	87.6
轮毂质量/kg	567 80
叶片质量/kg	177 40
机舱质量/kg	240 000
塔架质量/kg	347 460
塔架侧向一阶固有频率/Hz	0.31

考虑到风力机连接结构过于复杂,影响计算效率,简化风力机塔架、支撑结构和桩基之间的连接机构。同时,为避免简化损失质量,将塔架用钢的计算密度修正为 $8\,500 \text{ kg/m}^3$,弹性模量取 210 GPa,泊松比取 0.3,材料屈服极限取 380 MPa ^[18]。钢材使用线性弹塑性本构。风力机模型如图 3 所示。

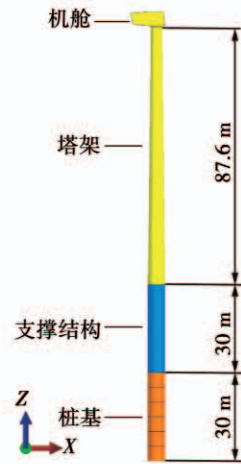


图3 单桩式支撑结构海上风力机结构模型

Fig.3 Structural model diagram of offshore wind turbine with monopile support structure

3 粘滞阻尼器

3.1 粘滞阻尼器原理及参数

粘滞阻尼器是一种常用的耗能型减震装置。根据阻尼力产生原理可分为粘滞阻尼墙、筒式粘滞阻尼器与缸式粘滞阻尼器 3 种^[19]。本文采用缸式粘滞阻尼器,其主要由阻尼器缸体、阻尼介质(一般为液体硅油)和活塞 3 部分组成。在发生地震时,活塞在阻尼器缸体中运动,推动阻尼介质通过活塞上的节流通道,从而产生阻尼力,将地震引发的振动能量通过粘滞性液体剪切耗能消耗掉。粘滞阻尼器的刚度较低,对于风力机而言几乎不会产生附加刚度,同时也近乎不产生附加质量,主要以附加阻尼的方式起到减震作用^[20]。缸式粘滞阻尼器结构如图 4 所示。

作为一种速度相关型阻尼器,粘滞阻尼器提供的阻尼力和活塞与缸体相对速度之间的关系为:

$$F = CV^\alpha \quad (7)$$

式中: F —阻尼力, N; C —阻尼系数; V —活塞与缸体相对速度, m/s ; α —阻尼指数, $\alpha = 1$ 为线性阻尼器, $\alpha \neq 1$ 为非线性阻尼器。

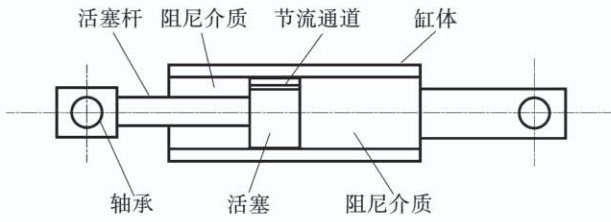


图4 粘滞阻尼器

Fig.4 Viscous damper

基于粘滞阻尼器生产商提供的参数^[21]并加以试算,选取其中效果最优的一组进行正式计算,其中阻尼器的阻尼系数为 $5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,阻尼指数为 0.4。

3.2 粘滞阻尼器布置方式

风力机在湍流风或地震载荷下发生屈曲或倒塌事故时,大部分破坏发生在风力机塔架底部^[22]。同时,考虑到海上风力机在安装与维护方面与陆上风力机存在差别,将粘滞阻尼器设置在水线附近。以垂直形式安装于风力机塔架内壁上,这是由于风力机是高耸柔性结构,在湍流风载荷或者地震载荷下,风力机的弯曲变形占据主导地位,即风力机变形表现为沿塔壁的拉伸或压缩,垂直布置阻尼器有利于充分利用这一变形形式。

考虑到粘滞阻尼器通常采用多层布置的方式增强减震能力,布置了一个两层的阻尼器系统。由于地震载荷在风力机 X 方向与 Y 方向均会产生影响,因此在同一层内对称布置 4 个阻尼器,两层共布置 8 个阻尼器。单个阻尼器两端距离为 10 m。阻尼器布置如图 5 所示。

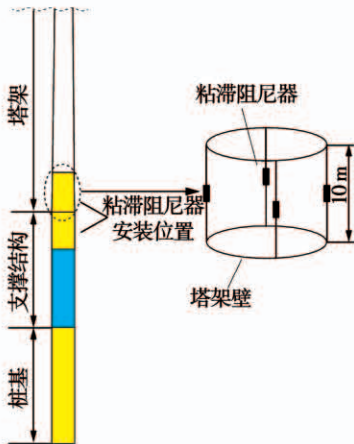


图5 粘滞阻尼器布置示意图

Fig.5 The arrangement of viscous dampers

3.3 附加粘滞阻尼器的动力学方程

将风力机结构简化为单自由度模型,其动力方程如下所示。

$$[M]\{\ddot{x}\} + \{[C] + [C']\}\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (8)$$

式中: $[M]$ —质量矩阵; $[C]$ —阻尼矩阵; $[C']$ —粘滞阻尼器提供的附加阻尼矩阵; $[K]$ —刚度矩阵; $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{x\}$ —加速度、速度和位移向量; $\{F(t)\}$ —时变外部载荷。

4 结果与分析

4.1 塔顶位移

对于受到多种复杂载荷影响的风力机,其最显著的动态响应为塔顶位移。地震与湍流风联合作用下,风力机有无粘滞阻尼器时的塔顶位移如图 6 所示。

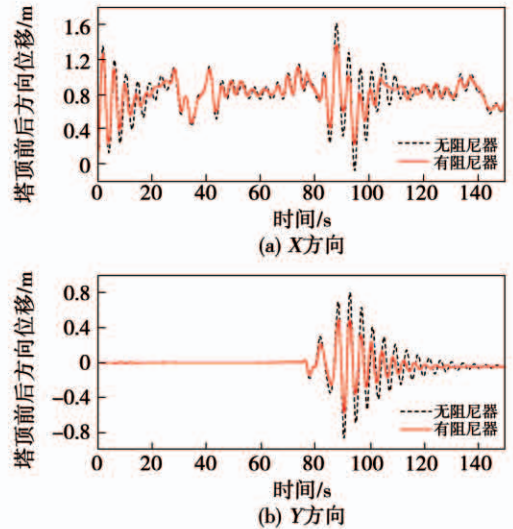


图6 塔顶位移时域曲线

Fig.6 Tower top displacement time domain curve

由图 6 可知,对于地震引起的风力机塔顶位移激增,粘滞阻尼器在两个方向上均有显著的控制效果。在 X 方向上,塔顶位移在 88 s 处出现最大值,在附加粘滞阻尼器后,X 方向最大塔顶位移由 1.61 m 降低至 1.36 m,降低了 15.5%。在 Y 方向上,塔顶位移在 90.5 s 处出现最大值,在附加粘滞阻尼器后,Y 方向最大塔顶位移由 0.86 m 降低至 0.55 m,降低了 36%。安装粘滞阻尼器后,塔顶 X 方向的位移变化范围由 $-0.07 \sim 1.61 \text{ m}$ 缩小至 $0.24 \sim 1.36$

m, 缩小了 33.3%, 而塔顶 Y 方向位移变化范围由 -0.86 ~ 0.79 m 缩小至 -0.56 ~ 0.55 m, 缩小了 32.7%。塔顶 X 方向位移均方差由 0.22 降低至 0.17, 降低了 24.5%。塔顶 Y 方向位移均方差由 0.17 降低至 0.10, 降低了 41.2%。同时, 由 50 s 数据可知, 粘滞阻尼器对单纯由湍流风导致的塔顶位移也有一定的控制效果。

图 7 为附加粘滞阻尼器前后风力机塔顶位移频域特征。由图 7 可知, 附加粘滞阻尼器后, 塔顶 X 方向与 Y 方向的最大幅值均大幅下降。其中, 塔顶 X 方向幅值最大值由 0.075 m 降至 0.039 m, 塔顶 Y 方向幅值最大值由 0.049 m 的降至 0.023 m, 两者分别下降了 48.0% 与 53.1%, 说明粘滞阻尼器能显著降低塔顶振动。

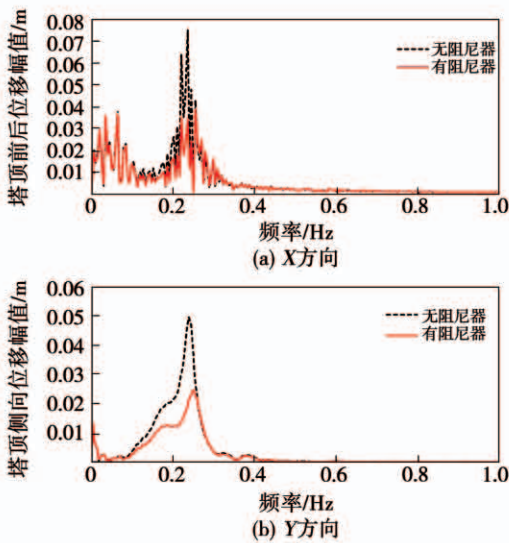


图 7 塔顶位移频域曲线

Fig. 7 Tower top displacement frequency domain curve

4.2 Von-Mises 应力

风力机受到外部载荷影响, 应力状态会发生显著改变。有无粘滞阻尼器时, 风力机桩、支撑结构及塔架的 Von-Mises 应力云图如图 8 所示。

由图 8 可知, 在地震载荷作用下, Von-Mises 应力最大值出现在桩基底部, 有无粘滞阻尼器时应力分别为 1.02×10^8 和 1.04×10^8 Pa, 两者相差不到 2%, 同时两者桩基应力分布非常相似, 说明粘滞阻尼器对桩基所受应力影响不大。安装粘滞阻尼器后, 应力云图中表示较高应力区的浅色部分面积明

显减少。同时, 在粘滞阻尼器与风力机连接点之间区域的 Von-Mises 应力显著减小, 未安装粘滞阻尼器时, 两连接点连线上的应力均值为 5.31×10^7 Pa, 安装粘滞阻尼器后, 此值降为 1.10×10^7 Pa, 降低了约 79.4%。连接点处未出现明显的应力集中现象。因此, 粘滞阻尼器能明显改善风力机在地震载荷下的塔筒应力状态, 且不会对风力机局部产生负面影响。

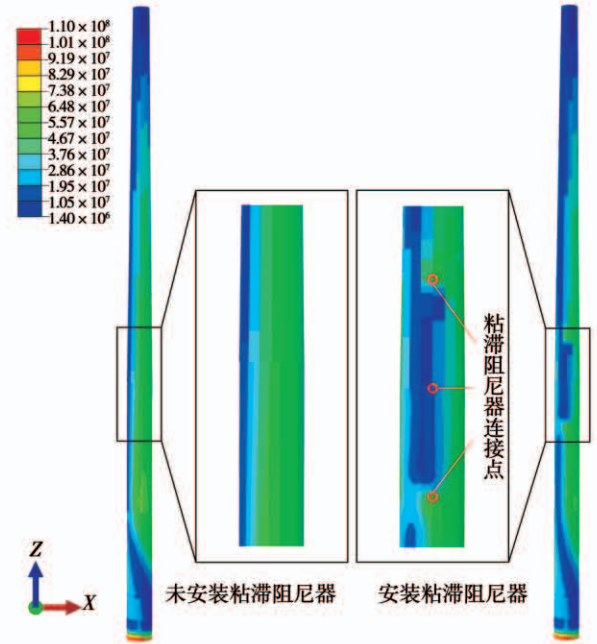


图 8 机桩、支撑结构及塔架 Von-Mises 应力云图 (Pa)

Fig. 8 Von-Mises stress nephogram of pile, supporting structure and tower (Pa)

4.3 不同高度处弯矩与剪力

图 9 为有无粘滞阻尼器时不同高度处弯矩对比。由图 9 可知, 地震发生时风力机最大弯矩出现在海床高度处, 在风力机的埋土桩基部分, 弯矩随高度增加而增加, 而对于支撑结构及塔架部分, 则高度越高弯矩越小。粘滞阻尼器使风力机所受最大弯矩由 9.87×10^8 N · m 降至 9.18×10^8 N · m, 降低了 7.0%。同时, 在粘滞阻尼器的安装区域, 弯矩降低效果更加明显, 在 30 m 处, 降低了 13.0%。但粘滞阻尼器对埋土桩基部分弯矩几乎没有降低效果, 且在靠近塔顶位置, 粘滞阻尼器对弯矩的控制效果也基本可以忽略。

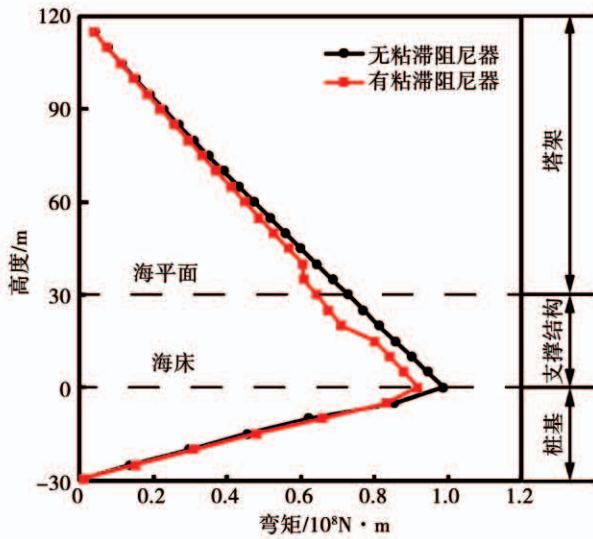


图 9 风力机不同高度处所受弯矩对比

Fig.9 Bending moment of wind turbine at different heights

图 10 为有无粘滞阻尼器时不同高度处剪力对比。由图 10 可知,风力机受到地震载荷时,其所受最大剪力出现在桩基部分,在海床下方呈现出随高度增加先增大后减小的趋势,而在海床上方,剪力随高度增加而减小。安装粘滞阻尼器后,桩基上的剪力最大值由 6.94×10^6 N 降至 4.90×10^6 N,降低了 29.4%。而在海床上方,粘滞阻尼器仍能降低同高度处结构所受剪力,但其效果相比桩基部分而言并不明显。

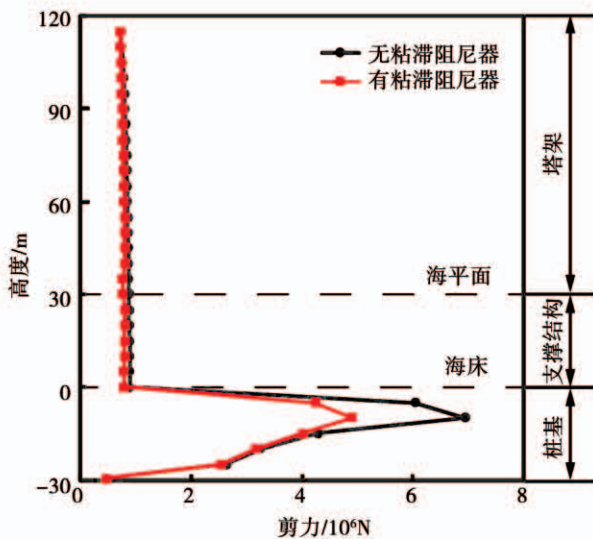


图 10 风力机不同高度处所受剪力对比

Fig.10 Bending shearing force of wind turbine at different heights

5 结论

(1) 粘滞阻尼器对单桩式海上风力机在地震载荷下的塔顶振动有显著的控制作用,不仅能够降低风力机塔顶振动的最大值,而且能够降低塔顶位移的变化范围,但是粘滞阻尼器对湍流风导致的塔顶振动控制效果并不明显。

(2) 粘滞阻尼器能够减小风力机较高应力区域的面积,同时也能显著降低其安装位置附近局部区域的应力,在连接点处不会产生明显应力集中现象。

(3) 粘滞阻尼器能够明显降低风力机塔筒的最大弯矩与最大剪力,其对风力机塔筒最大剪力的控制效果相比最大弯矩而言更加显著。

参考文献:

[1] 闫阳天,岳敏楠,李 春,等.大型近海风力机塔架地震动力学响应分析[J].热能动力工程,2019,34(9):91-98.
YAN Yang-tian, YUE Min-nan, LI Chun, et al. Seismic dynamic response analysis of large offshore wind turbine tower[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 91-98.

[2] 刘中胜,杨 阳,李 春,等.基于 TMD 控制的风力机结构抗震研究[J].机械强度,2019,41(4):785-791.
LIU Zhong-sheng, YANG Yang, LI Chun, et al. Anti-seismic study of wind turbine structure based on TMD[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(4): 785-791.

[3] 陆 越.风力发电机塔架风致疲劳损伤的 TLD 控制技术[D].苏州:苏州科技大学,2018.
LU Yue. Technology of TLD control for wind induced fatigue damage of wind turbine tower [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018.

[4] ZUO Hao-ran, BI Kai-ming, HAO Hong. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 303-315.

[5] MENSAH A F, DUEÑAS-OSORIO L. Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCDs) [J], Structural Safety, 2014, 47: 78-86.

[6] 杨 阳,岳敏楠,李 春,等.风力机地震动力学研究现状综述[J].热能动力工程,2019,34(9):14-23,56.
YANG Yang, YUE Min-nan, LI Chun, et al. A review on the state-of-the-art of seismic analysis of wind turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 14-23, 56.

[7] BRODERSEN M L, HØGSBERG J. Damping of offshore wind turbine tower vibrations by a stroke amplifying brace[J]. Energy Procedia, 2014, 53: 258-267.

- [8] 吴波,李惠. 建筑结构被动控制的理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
WU Bo, LI Hui. Theory and application of passive control of building structure[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997.
- [9] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计理论及应用[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2013.
ZHOU Yun. Design theory and application of viscous damping structure[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2013.
- [10] 肖开乾,徐怀兵,刘敏,等. 大跨度斜拉桥抗震性能分析与减震控制研究[J]. 自然灾害学报,2020,29(1):57-63.
XIAO Kai-qian, XU Huai-bing, LIU Min, et al. Seismic performance analysis and vibration control study of one cable-stayed bridge[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 57-63.
- [11] 魏宏亮,冯力强,李万润. 近场地震作用下某高层建筑设置粘滞阻尼器的减震分析[J]. 甘肃科技, 2019, 35(20): 105-108.
WEI Hong-liang, FENG Li-qiang, LI Wan-run. Seismic reduction analysis of a high-rise building with viscous dampers subjected to near-fault ground motions[J]. Gansu Science and Technology, 2019, 35(20): 105-108.
- [12] 国巍,曾晨,潘毅,等. 基于增量动力分析法的高层建筑-阻尼器系统地震易损性分析[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(4): 59-68.
GUO Wei, ZENG Chen, PAN Yi, et al. IDA based seismic fragility analysis of high-rise building-damper system[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4): 59-68.
- [13] 闫阳天,杨阳,李春,等. 基于土-结构耦合作用的风力机塔架地震动力学响应分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(9): 115-122.
YAN Yang-tian, YANG Yang, LI Chun, et al. Analysis of seismic dynamic response of wind turbine based on soil-structure interaction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(9): 115-122.
- [14] 李同春,赵兰浩. 地震作用下边坡稳定安全度分析与评价[M]. 南京:河海大学出版社,2016.
LI Tong-chun, ZHAO Lan-hao. Analysis and evaluation of slope stability safety degree under seismic action[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2016.
- [15] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) ground motion database[DB/OL]. <https://ngawest2.berkeley.edu/>.
- [16] IEC 61400-1, Wind turbines design requirements[S].
- [17] JONKMAN J M, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development in[R]. NREL/TP-500-38060, Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [18] AGBAYANI N A. A technical overview of ASCE/AWEARP 2011: recommended practice for compliance of large land-based wind turbine support structures[C]//Structures Congress 2014, Reston, 2011.
- [19] 刘莎. 粘滞阻尼器在结构抗震加固改造中的研究与应用[D]. 成都:西南交通大学,2007.
LIU Sha. Research and application of viscous dampers for seismic reinforcement and reconstruction of structures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [20] 钱锡梅. 装置粘滞阻尼器的结构减震分析[D]. 合肥:安徽建筑大学,2018.
QIAN Xi-mei. Energy dissipation analysis of the structure of the device viscous dampers[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.
- [21] BERQUIST M, DEPASQUALE R, FRYE S, et al. Fluid Viscous Dampers General Guidelines for Engineers[EB/OL]. <https://go.taylordevices.com/damper-manual>, 2019-05-19/2020-06-23.
- [22] CHEN Xiao, LI Chuan-feng, XU Jian-zhong. Failure investigation on a coastal wind farm damaged by super typhoon: A forensic engineering study[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 132-142.

(王治红 编辑)