

# 不同场地下土-结相互作用对风机结构地震响应影响研究

张亚林<sup>1</sup>, 马会超<sup>2\*</sup>, 张振利<sup>1</sup>, 贾克勤<sup>1</sup>, 吴建新<sup>1</sup>, 王文明<sup>2,3</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101;  
3. 山东建筑大学 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 济南 250101)

**摘要:** 地震灾害是影响风机正常运行的重要因素, 土-结相互作用 (SSI效应) 对风机动力响应会产生影响。以不同场地 (硬土和软土) 的陆上风机为研究对象, 采用 ABAQUS 软件建立风机-基础-土体精细化有限元模型, 并对土体四周施加黏弹性边界。从太平洋 PEER 地震数据库中分别选取硬土地地和软土地地各 3 条地震动, 对整体结构进行不同强度地震作用下的动力时程分析, 研究场地类别、SSI 效应对风机地震响应的影响。研究表明, SSI 效应对风机结构在地震荷载下的响应具有放大作用: 在硬土地地, 相较不考虑 SSI 效应的情况, 塔筒应力最大值的变化率最高达到 65.31%, 塔顶位移最大值的变化率最高达到 18.75%; 在软土地地, SSI 效应对风机动力响应的放大作用更为显著, 相较不考虑 SSI 效应的情况, 塔筒应力最大值的变化率最高达到 151.40%, 塔顶位移最大值的变化率最高达到 67.65%。风机结构在地震作用下, 最大塔顶位移达到 0.72 m, 接近塔筒总高度的 1%; 最大塔筒应力达到 249.97 MPa, 结构响应较大, 位于软土地基的风机结构存在破坏的风险。本文的研究成果为风机结构的设计提供了参考, 强调了在风机结构设计中考虑 SSI 效应的重要性, 特别是在软土地区, 更应考虑 SSI 效应对风机动力响应的放大作用。

**关键词:** 风机结构; 土-结相互作用; 地震作用; 场地类别; 黏弹性边界; 地震响应; 软土地基

中图分类号: TU311.3, TM315

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0021-14

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240901001

## Seismic Response of Wind Turbine Structures Considering Soil-Structure Interaction at Different Site Conditions

ZHANG Yalin<sup>1</sup>, MA Huichao<sup>2\*</sup>, ZHANG Zhenli<sup>1</sup>, JIA Keqin<sup>1</sup>,  
WU Jianxin<sup>1</sup>, WANG Wenming<sup>2,3</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD., Jinan 250013, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 3. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting & Underground Space Engineering, Ministry of Education, Jinan 250101, China)

\*Corresponding author: 1834398255@qq.com

**Abstract:** Earthquake disasters are significant factors affecting the normal operation of wind turbines, and soil-structure interaction (SSI) can influence the dynamic response of wind turbines. Focusing on onshore wind turbines in different site conditions (hard soil and soft soil), a refined finite element model of the turbine-foundation-soil system was established using ABAQUS, and a viscoelastic boundary was applied around the soil. Three seismic motions were selected from the PEER earthquake database for both hard and soft soil sites to perform dynamic time-history analysis

收稿日期: 2024-09-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51908340)

作者简介:

张亚林 (1966—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事土建结构设计方面的研究。E-mail: zhangyalin@sdepci.com。

通信作者:

马会超 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构防灾减灾方面的研究。E-mail: 1834398255@qq.com。

of the entire structure under different seismic intensities, and examine the impact of site category and SSI effects on the seismic response of wind turbines. The results indicate that SSI effects amplify the seismic response of wind turbine structures. In hard soil sites, compared to scenarios without considering SSI effects, the maximum change rate of tower stress reaches up to 65.31%, and the maximum change rate of tower top displacement reaches up to 18.75%; in soft soil sites, the amplification effect of SSI on the dynamic response of wind turbines is more significant, with the maximum change rate of tower stress reaching up to 151.40%, and the maximum change rate of tower top displacement reaching up to 67.65%. Under seismic actions, the maximum tower top displacement of the wind turbine structure reaches 0.72 m, which is close to 1% of the total height of the tower; the maximum tower stress reaches 249.97 MPa, indicating a significant structural response and a risk of damage to wind turbine structures on soft soil foundations. This study provides a reference for the design of wind turbine structures, emphasizing the importance of considering SSI effects in wind turbine design, especially in soft soil areas, where the amplification effect of SSI on the dynamic response of wind turbines should be given particular attention.

**Keywords:** wind turbine structure; soil-structure interaction; seismic action; site category; viscoelastic boundary; seismic response; soft soil foundation

随着全球经济的快速发展,大力发展新能源成为促进经济可持续发展的战略选择。风力发电作为清洁能源的核心组成部分,因其可再生、低碳、高效等优点而备受关注。近年来,风电技术的持续突破与风力资源的高效开发利用,推动风力发电在全球能源结构中的占比显著提升,使风力发电成为推动绿色低碳发展的关键路径之一<sup>[1-2]</sup>。在这一背景下,对风机的结构设计和安全性能提出了更高的要求。

土体-结构相互作用(SSSI效应)指的是土体与结构之间的相互作用,它不仅能够改变风机结构的动态特性,还可能放大或减小风机结构的动态响应。为研究SSSI效应对风机结构的影响,诸多学者对此展开了研究。项颖等<sup>[3]</sup>采用子结构法对不同地震动下土体参数对风机结构动力特性及地震响应进行了研究,结果表明在考虑土体-结构相互作用下增大土体剪切波速会使风机的结构频率增大。王斯伟等<sup>[4]</sup>分析了SSSI效应对风机支撑体系的影响,介绍了地基动荷载的计算方法,基于质量-弹簧-阻尼模型对地基与基础的接触问题进行探讨,并总结了SSSI效应的注意事项和分析方法。白久林等<sup>[5]</sup>基于无质量集总参数模型,建立了考虑SSSI效应的风机结构单自由度分析模型,并根据大样本地震动结果的非线性最小二乘基数及统计分析,形成了新反应谱的规范形式。李万润等<sup>[6]</sup>基于ABAQUS建立叶片-机舱-塔架-基础-土体整体精细化有限元模型,并根据场地土特性设置土体参数,选取四种不同类型地震动,研究发现远场地震动作用下大型风电结构动力响应较近场地震动作用下大型风电结构动力响应更大,考虑SSSI效应会降低风电结构的自振频率。戴靠山等<sup>[7]</sup>基于ABAQUS建立塔筒-基础-土体模型,在风机运转的状态下,使用FAST软件将风速时程转换为风荷载时程并输入到模型中,从土体底部输入地震动,对风机的动力响应进行分析,结果表明考虑SSSI效

应会降低风机结构的自振频率,并使风机结构的动力响应显著增加。刘海卿等<sup>[8]</sup>使用弹簧系数法和集中质量法建立SSSI效应计算模型,并基于ABAQUS软件建立考虑SSSI效应的锥形管风机塔架有限元模型,将其与基础约束全部自由度条件锥形管风电塔架做对比分析,发现考虑SSSI效应的风机塔架在地震作用下的加速度和位移均能得到很好的控制。梅轩等<sup>[9]</sup>建立了海上风机地震动力学仿真模型,在此基础上研究了考虑和不考虑SSSI效应时风机的动力响应,研究发现SSSI效应会放大风机结构的动力响应。孙杰等<sup>[10]</sup>建立了考虑SSSI效应的海上风机模型,分析了SSSI效应对TMD减振效果的影响,结果表明SSSI效应会放大风机结构的动力响应,且降低TMD的减振效果。RODRIGUEZ-GALVAN等<sup>[11]</sup>以单桩式基础风力机为研究对象,分析了其被埋置于均匀和非均匀土层中,等效剪切波速从 $100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,4种不同功率(5~15 MW)的海上风力机的地震响应。TANG等<sup>[12]</sup>采用壳单元对风机进行建模,同时考虑风、浪和地震荷载的影响,研究发现考虑SSSI效应的塔顶和塔底容易发生屈曲。

在风力发电领域,风机结构的设计和评估通常需要考虑多种荷载,其中地震荷载是影响风机结构安全的关键因素之一。崇高等<sup>[13]</sup>使用有限元法建模并计算了风力发电机组塔架的自然模态位移和地震荷载,并根据计算结果来确定地震对风机塔架设计的影响,结果表明Ⅷ级烈度地震荷载引起的荷载值小于风机塔架的极限荷载,风机塔架的设计满足建设在Ⅰ~Ⅷ级烈度地震地区的要求。SERRAS等<sup>[14]</sup>基于RUAUMOKO对WT塔进行抗震分析,发现重复地震作用对WT塔的地震影响有显著影响。SANTANGELO等<sup>[15-16]</sup>分别对陆上和海上风机结构进行了地震作用下的抗震性能分析,评估了不同方法的准确性,并研究了气动阻尼的相关水平。张浦

阳等<sup>[17]</sup>采用抗液化剪应力法来计算判别地震动作用下风机基础的液化情况,通过计算结果得出,在地震动作用下,0~10 m深度的土层部分区域出现了液化现象,并得出了在基础内部和下部土体施加竖向静力荷载对塔筒内土体的抗液化能力有显著提高作用的结论。杜鹏等<sup>[18]</sup>根据地震作用下风机监测数据以及拟静力分析来研究海上风机在地震作用下的动力响应,结果表明,风机塔筒的最大加速度出现在塔筒的中部,地震动下风机结构的高阶模态会更加显著。陈立等<sup>[19]</sup>基于某海上风电场工程的土工试验结果,使用OpenSees软件,对海上风机基础的地震动响应进行研究,计算结果发现整体结构在地震动作用下产生了不可恢复的变形,可能会影响上部机组的正常工作。徐亚洲等<sup>[20]</sup>以2 MW风机结构为原型,按1:20的比例设计试验模型,来研究地震脉冲效应和竖向地震效应对结构的影响,结果表明脉冲型近场地震动对结构的响应有显著的影响;竖向地震动分量对结构的竖向加速度和竖向位移有显著的影响。徐小凤等<sup>[21]</sup>将海上风机地震动响应问题视为波动散射问题,通过施加人工边界条件来实现海域场地的地震动输入,并基于广义饱和和多孔介质统一计算框架,提出了一种海水-饱和海床-风机耦合作用高效分区分析方法,实现了考虑SSI效应以及流固耦合效应的海上风机地震动响应分析。戚蓝等<sup>[22]</sup>应用ABAQUS有限元软件中UMAT平台嵌入了可以反映土体滞后性和非线性的等效线性动本构模型来考虑SSI效应,建立叶片-塔架-基础-土体有限元模型,采用时域分析法对风机进行地震动响应分析,发现SSI效应会降低风机的自振频率。侯法奎等<sup>[23]</sup>基于ABAQUS有限元软件建立单桩-外平台整体模型,采用黏弹性边界法对地震荷载的施加进行模拟,分析了地震动作用下整体结构的响应情况,并探究了外平台对单桩响应和自振特性的影响,研究发现在地震动作用下,单桩-外平台结构的最大应力出现在支撑杆与工作平台的连接处,外平台能有效降低单桩自振频率的增大程度。霍涛等<sup>[24]</sup>基于风机结构整体模型对风机结构在II类场地地震波作用下的响应进行对比分析,结果表明,相较于普通地震波,长周期地震波会使风机结构的动力响应得到放大。MA等<sup>[25]</sup>研究了预应力混凝土塔筒在地震作用下的响应,发现基础的弹簧刚度对基础弯矩和固有频率有巨大影响。YANG等<sup>[26]</sup>对风机结构进行了地震、海浪和风荷载作用下的数值分析,研究了土与结构相互作用对风机结构动力响应的影响。ASAREH等<sup>[27]</sup>研究了地震和气动荷载相互作用对风机整体结构动力响应的影响,并提出了计算发电功率和设计导出参数的公式。

风力资源开发区的场地条件差异较大,软土地基和硬土地基是其中最典型的两种类型。软土地基通常分布

于沿海、湖泊及冲积平原地区,而硬土地基则广泛分布于内陆山区,以岩石层为主的区域。对风机结构进行抗震分析时,有必要研究不同场地条件下SSI效应对其在地震动作用下响应的影响,而目前对SSI效应的研究较少考虑半无限土体的辐射阻尼特性。本文以山西某在役风机为原型,采用ABAQUS有限元软件建立风机结构-基础-土体的精细化有限元模型,对土体施加黏弹性边界,能够有效地吸收边界上散射波的能量,从而更好地模拟SSI效应。研究选取了硬土和软土两种场地情况,以反映不同地质条件下的SSI效应,并从太平洋PEER地震数据库中选取了三条地震动记录,以模拟风机在地震荷载下的响应。通过对不同工况下的塔筒应力和塔顶位移进行分析,来探究SSI效应对风机结构地震响应的影响,为风机结构在地震条件下的动力响应分析提供参考,并为风机设计提供科学依据。

## 1 考虑SSI效应的计算模型

在风机受地震荷载作用的过程中土体被视为半无限空间,土体受到振动产生的能量会随着在土体中传播而逐渐消散,反射波和散射波在土体中不会发生反射,此种阻尼为辐射阻尼<sup>[28]</sup>。利用ABAQUS有限元软件进行分析时通常截取一定范围的土体,将半无限空间变为有限空间,并通过在土体上施加人工边界来模拟半无限土体的辐射阻尼,从而保证土体内反射波和散射波在土体边界不发生反射。

黏弹性人工边界是一种局部人工边界,它通过在土体边界上设置连续的并联弹簧阻尼系统来模拟半无限介质的弹性恢复功能。这种边界条件能够有效地吸收边界上散射波的能量,从而避免了在土体边界处反射波和散射波的产生。在地震作用下,土体中的振动能量会随着波的传播而逐渐消散,这种能量的耗散过程在黏弹性人工边界中得到了很好的模拟,能够更真实地反映土体对结构响应的影响。在数值模拟中采用黏弹性人工边界来计算具有合理性,可以根据土体的物理和力学特性,通过调整弹簧和阻尼器的参数来模拟不同的土体条件。

本文利用ABAQUS有限元软件建立了两种风机计算模型:一种是不考虑SSI效应的风机计算模型,另一种是考虑SSI效应的风机计算模型。将风机结构底部直接接地模型视为不考虑SSI效应的风机计算模型,这种简化模型忽略了土体对结构动态响应的影响。在建立考虑SSI效应的风机计算模型时,通过在土体四周施加黏弹性人工边界来模拟地震波在半无限土体中的传播和能量耗散,从而更真实地反映土体的动态响应。在不考虑SSI效应的模型中,地震动从风机底部输入;在考虑SSI效应的模型中,地震动从土体底部输入。两种风机计算

模型如图1所示。

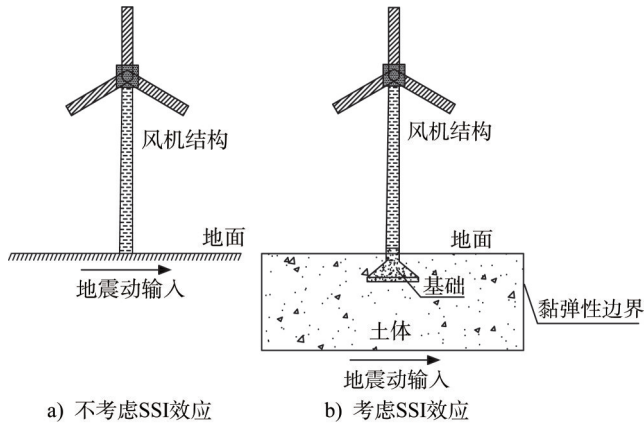


图1 风机计算模型

Fig. 1 Calculation models of wind turbine

黏弹性人工边界实质是在边界上设置连续的并联弹簧阻尼系统,其中弹簧和阻尼器的参数是由介质材料所决定的,具体计算公式为<sup>[29]</sup>:

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R} \quad (1)$$

$$C_{BT} = \rho C_s, C_{BN} = \rho C_p \quad (2)$$

式中: $K_{BT}$ 为切向弹簧的刚度系数; $K_{BN}$ 为法向弹簧的刚

度系数; $C_{BT}$ 为切向阻尼器的阻尼系数; $C_{BN}$ 为法向阻尼器的阻尼系数; $\alpha_T$ 和 $\alpha_N$ 为黏弹性边界的修正系数<sup>[29]</sup>, $\alpha_T$ 和 $\alpha_N$ 的取值参考文献[30], $\alpha_T = 0.5, \alpha_N = 1$ ;  $\rho$ 和 $G$ 分别为介质的密度和剪切模量; $R$ 为波源至人工边界点的距离; $C_s$ 和 $C_p$ 分别为介质的剪切波速和纵波波速,可表示为:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

式中: $E$ 为介质的弹性模量; $\nu$ 为介质的泊松比。

## 2 地震动选取

为研究不同场地条件下SSI效应对风机结构地震响应的影响,以II类场地(硬土)和IV类场地(软土)下的设计反应谱为依据,分别从太平洋PEER地震数据库选取三条地震动,总计6条地震动记录,如表1所示。规范设计谱与所选地震动反应谱对比如图2所示。

表1 选取的地震动记录

Table 1 Selected ground motion records

场地类型	地震名称	记录地点	震级	峰值加速度/g	卓越周期/s
硬土	Humbolt Bay(1937)	Ferndale City Hall	6.90	0.200	0.21
	Helena, Montana-01(1935)	Carroll College	7.51	0.204	0.24
	Helena, Montana-02(1935)	Helena Fed Bldg	7.51	0.181	0.20
软土	Kern County(1952)	Taft Lincoln School	7.36	0.173	0.36
	Parkfield(1966)	San Luis Obispo	6.16	0.203	0.32
	San Fernando(1971)	Anza Post Office	6.61	0.196	0.33

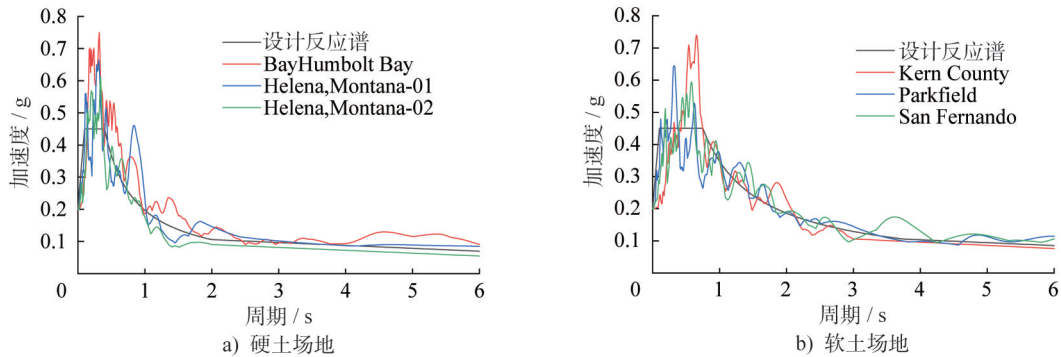


图2 地震动反应谱与设计谱对比

Fig. 2 Comparison between ground motion response spectrums and design spectrums

根据不同的地震强度要求,分别对所选6条地震动的峰值加速度统一调幅至0.070 g(常遇地震)、0.200 g(设防地震)和0.400 g(罕遇地震),以全面评估风机结构在不同地震强度下的响应。6条地震动均以0.02 s的步长进行记

录。为提高计算效率,选取每条地震波的前18 s作为分析时段。为保留地震波的原始特性,研究中未对地震动记录进行基线矫正和滤波处理,以更真实地反映地震波对风机结构的动力响应。地震动时程数据如图3所示。

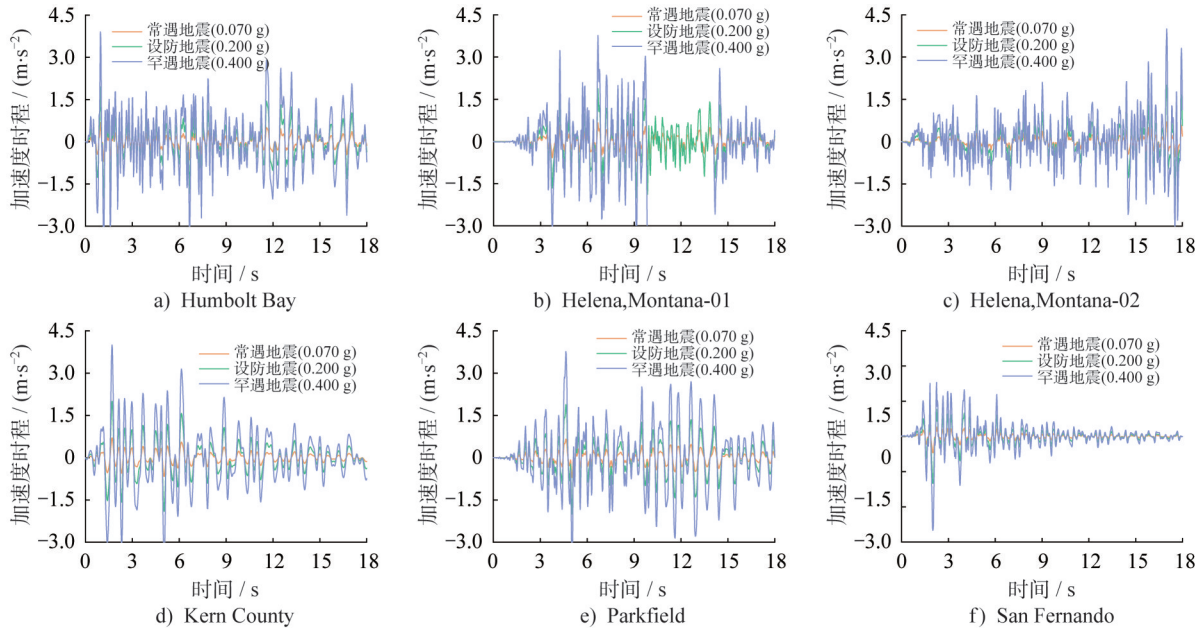


图3 调幅后的地震加速度时程曲线

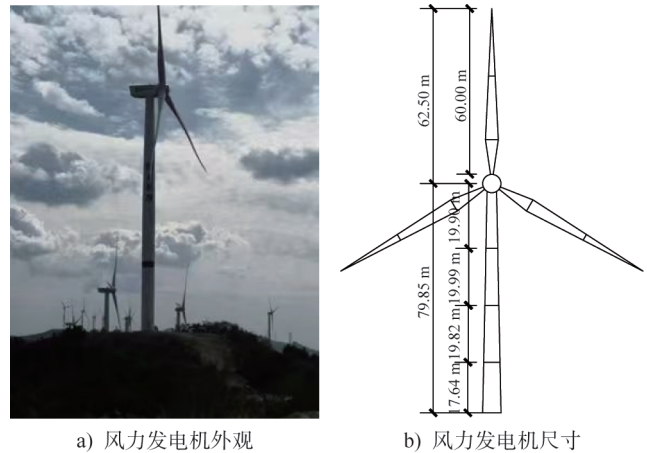
Fig. 3 Time-history curves of seismic acceleration after amplitude modulation

### 3 有限元模拟

#### 3.1 有限元模型

本文以山西某在役风机为原型,在ABAQUS有限元软件中进行建模。塔筒总高度77.35 m,共分为四节,从下往上看,第一节的高度为17.64 m,第二节的高度为19.82 m,第三节的高度为19.99 m,第四节的高度为19.90 m。塔筒上部直径和下部直径分别为3.28 m和4.30 m。机舱尺寸为5.31 m×4.52 m×4.99 m,质量为22 100 kg。轮毂半径为2.50 m,质量为27 000 kg。叶片半径为60.00 m,单个叶片质量为12 500 kg,共三个叶片。采用三一重能SE11520型风力发电机组,叶片材料为玻璃纤维增强树脂,塔筒采用Q345钢。风机外观以及尺寸如图4所示。风机基础和基础环的主要参数如表2所示。

两种风机计算有限元模型如图5所示。模型中,轮毂与三个叶片采用C3D10四面体单元模拟,共划分1 707个单元;塔筒和机舱采用C3D8R六面体单元模拟,分别划分1 092和100个单元,以确保几何和刚度特征的准确表现。土体尺寸为100 m×100 m×35 m,宽度为基础直径的5倍,高度为基础高度的10倍,以确保土体边界对结



a) 风力发电机外观 b) 风力发电机尺寸

图4 风力发电机工程案例

Fig. 4 Engineering case of wind turbine

构分析的影响可以忽略。基础与土体之间的接触条件在法向采用Hard型接触,在切向采用Penalty型摩擦,摩擦系数为0.3。塔筒与机舱、机舱与叶片之间的连接未考虑相对滑移,采用绑定约束。模型在建模时保证了风机结构的质量矩阵与刚度矩阵的准确性。风机各部位及土体的本构关系和相关参数如表3所示。

表2 风机基础及基础环主要参数

Table 2 Main parameters of wind turbine foundation and foundation ring

部分	参数	数值/m
风机基础	底部圆形半径	9.40
	顶部圆形半径	3.35
	基础高度	3.55
	外径	2.15
基础环	内径	2.07
	高度	1.80
	厚度	0.08

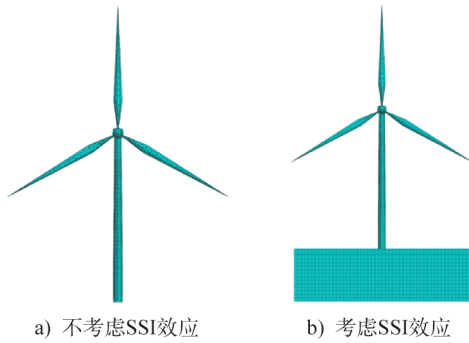


图5 风机有限元模型

Fig. 5 Finite element models of wind turbine

### 3.2 工况选取

针对不同场地下考虑 SSI 效应的风机结构在地震荷载下的响应进行了详细的工况选取。为了全面评估地震荷载对风机结构的影响,本文考虑了两种不同的土体类型(硬土和软土)、三种不同的地震强度(0.070 g、0.200 g、0.400 g)和是否考虑 SSI 效应,总计 36 种工况,如表 4 所示。

## 4 模态分析

模态分析是结构动力学中重要的分析方法,用于确定结构在自由振动状态下的固有频率。在进行风机的风致响应分析前,需要对风机的模态进行分析。利用 ABAQUS 软件中的子空间迭代法分别对不考虑 SSI 效应、考虑 SSI 效应(硬土)和考虑 SSI 效应(软土)的风机模型进行模态计算,计算结果如表 5 所示。

分析结果表明,SSI 效应降低了风机结构的自振频率,导致结构的刚度和稳定性降低,尤其是在软土条件下,这一效应更加明显。这意味着,在风荷载作用下,考虑 SSI 效应能够更真实地反映风机结构的动力特性,提供更可靠的设计依据并能够更准确地进行安全评估。同时,模态分析也为进一步的风致响应分析提供了重要的

表3 材料本构模型和参数

Table 3 Material constitutive models and parameters

材料	本构模型	参数	数值	
风机基础	CDP	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 400	
		弹性模量/GPa	33	
		泊松比	0.2	
		拉伸屈服应力/MPa	3	
		压缩屈服应力/MPa	30	
钢筋	线弹性	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7 800	
		弹性模量/GPa	200	
		屈服应力/MPa	458	
硬土	Drucker-Prager	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 200	
		弹性模量/MPa	50	
		泊松比	0.3	
		摩擦角/ $^{\circ}$	25	
软土	Drucker-Prager	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1 800	
		弹性模量/MPa	10	
		泊松比	0.4	
		摩擦角/ $^{\circ}$	15	
塔筒	线弹性	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7 500	
		弹性模量/GPa	200	
		泊松比	0.3	
		阻尼系数 $\alpha$	0.07	
		阻尼系数 $\beta$	0.01	

参考数据,有助于全面分析不同场地条件下风机结构的动态响应。

## 5 计算结果分析

### 5.1 塔筒应力

硬土和软土两种场地下考虑 SSI 效应的风机计算模型和不考虑 SSI 效应的风机计算模型在三条地震波作用下的塔筒应力时程曲线如图 6~图 11 所示,不同工况下塔筒应力最大值如表 6 所示,在地震作用下塔筒应力是波动的。研究发现:SSI 效应在硬土和软土两种场地下对受地震荷载作用的风机动力响应均有放大作用。在硬土场地下,考虑 SSI 效应塔筒应力最大值相较于不考虑 SSI 效应塔筒应力最大值的变化率达到 65.31%,而在软土场地下,这一变化率达到 151.40%,这表明软土地区对受地震荷载作用的风机动力响应有更明显的放大作用。这一现象说明了在进行风机抗震设计时,必须考虑 SSI 效应,

表4 工况选取  
Table 4 Selection of load cases

场地类型	地震动	加速度峰值	不考虑 SSI 效应	考虑 SSI 效应	
硬土	Humbolt Bay	0.070 g	工况 1	工况 2	
		0.200 g	工况 3	工况 4	
		0.400 g	工况 5	工况 6	
	Helena, Montana-01	0.070 g	工况 7	工况 8	
		0.200 g	工况 9	工况 10	
		0.400 g	工况 11	工况 12	
		Helena, Montana-02	0.070 g	工况 13	工况 14
			0.200 g	工况 15	工况 16
			0.400 g	工况 17	工况 18
	软土	Kern County	0.070 g	工况 19	工况 20
			0.200 g	工况 21	工况 22
			0.400 g	工况 23	工况 24
Parkfield		0.070 g	工况 25	工况 26	
		0.200 g	工况 27	工况 28	
		0.400 g	工况 29	工况 30	
San Fernando		0.070 g	工况 31	工况 32	
		0.200 g	工况 33	工况 34	
		0.400 g	工况 35	工况 36	

表5 风机自振频率

Table 5 Natural frequencies of the wind turbine

模态阶数	Hz		
	不考虑 SSI 效应	考虑 SSI 效应 (硬土)	考虑 SSI 效应 (软土)
一阶	0.29	0.27	0.26
二阶	0.30	0.28	0.27
三阶	0.61	0.61	0.61
四阶	0.64	0.64	0.64
五阶	0.82	0.81	0.80
六阶	0.94	0.92	0.92
七阶	1.14	1.13	1.13
八阶	1.19	1.19	1.18
九阶	3.13	2.78	1.73
十阶	3.46	3.06	1.78

## 5.2 塔顶位移

硬土和软土两种场地下考虑 SSI 效应和不考虑 SSI 效应风机在三条地震波作用下的塔顶位移时程曲线如图 12~图 17 所示,不同工况下塔顶位移最大值如表 7 所示,每一种地震波作用下产生的塔顶位移都是波动的。研究发现:SSI 效应在硬土和软土两种场地下对受地震荷载作用的风机动力响应均有放大作用。在硬土地场地下,考虑 SSI 效应塔顶位移最大值相较不考虑 SSI 效应塔顶位移最大值的变化率最高达到 18.75%,而在软土地场地下,这一变化率最高达到 67.65%,这表明软土地区对受地震荷载作用的风机动力响应有更明显的放大作用。在软土条件下,塔顶位移最大值和波动幅度均高于硬土条件下塔顶位移最大值和波动幅度,由于软土较低的剪切模量和不同的阻尼特性,塔筒更容易在地震作用下产生较大的变形和应力集中。考虑 SSI 效应时,塔顶位移最大值达到 0.72 m,接近塔筒总高度 1%,结构响应较大。这一现象与模态分析结果一致,模态分析结果表明 SSI 效应降低了风机结构的自振频率,从而使得风机结构的刚度和稳定性降低。

特别是在软土条件下,以确保结构的安全性和可靠性。忽略 SSI 效应可能导致低估风机在地震中的受力大小,从而带来潜在的风险。

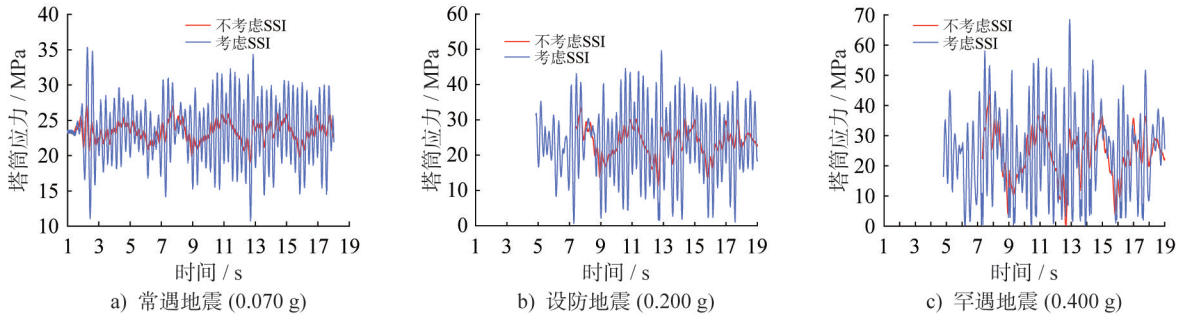


图6 Humboldt Bay作用下塔筒应力时程曲线(硬土)

Fig. 6 Time-history curves of tower stress under Humboldt Bay action (hard soil)

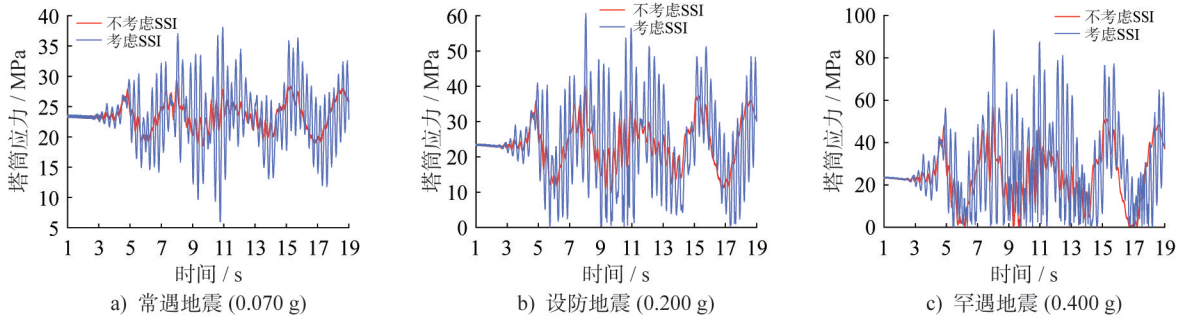


图7 Helena, Montana-01作用下塔筒应力时程曲线(硬土)

Fig. 7 Time-history curves of tower stress under Helena, Montana-01 action (hard soil)

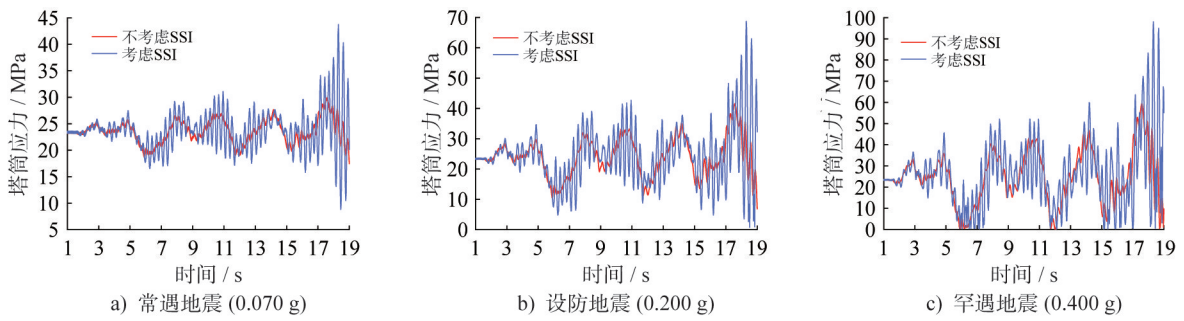


图8 Helena, Montana-02作用下塔筒应力时程曲线(硬土)

Fig. 8 Time-history curves of tower stress under Helena, Montana-02 action (hard soil)

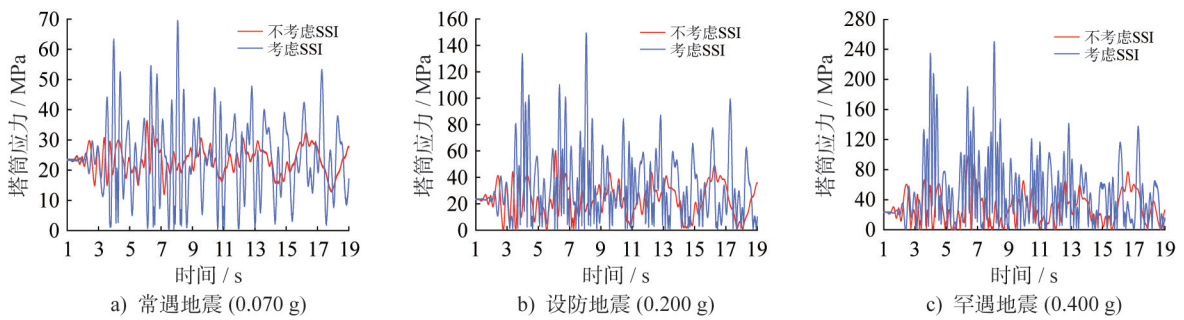


图9 Kern County作用下塔筒应力时程曲线(软土)

Fig. 9 Time-history curves of tower stress under Kern County action (soft soil)

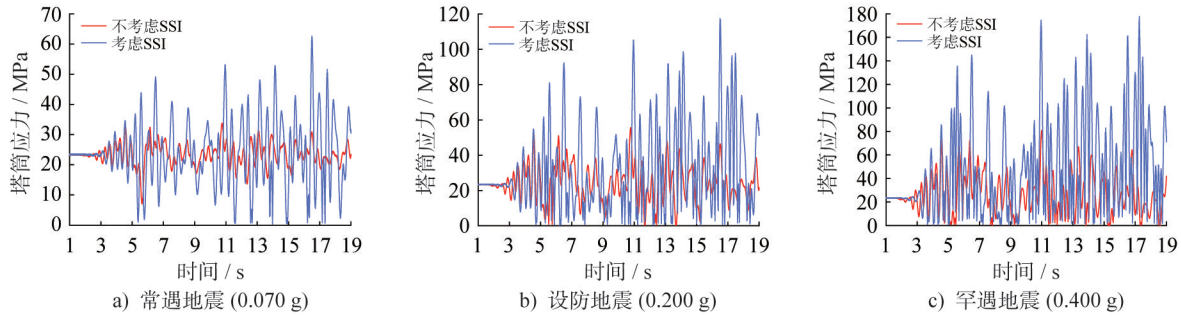


图10 Parkfield作用下塔筒应力时程曲线(软土)

Fig. 10 Time-history curves of tower stress under Parkfield action (soft soil)

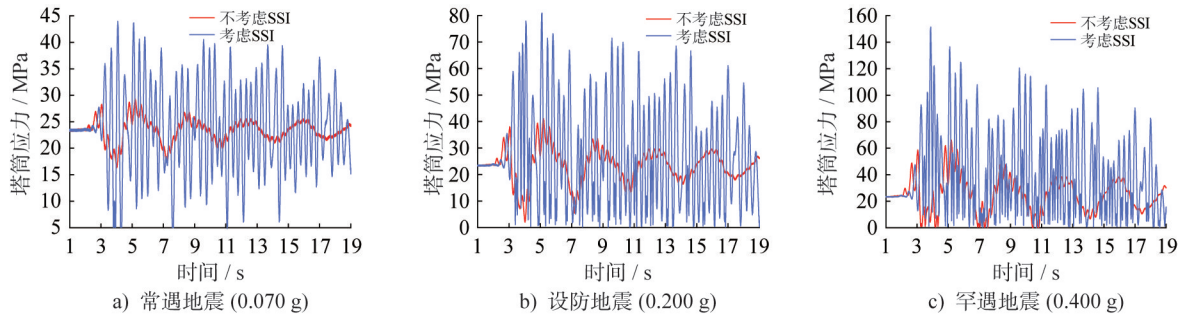


图11 San Fernando作用下塔筒应力时程曲线(软土)

Fig. 11 Time-history curves of tower stress under San Fernando action (soft soil)

表6 塔筒应力最大值

Table 6 Maximum stress of the tower

场地类别	地震波	加速度峰值	塔筒应力最大值/MPa		变化率/%
			不考虑 SSI 效应	考虑 SSI 效应	
硬土	Humbolt Bay	0.070 g	27.06	35.33	30.56
		0.200 g	33.52	54.11	61.43
		0.400 g	43.48	70.36	61.82
	Helena, Montana-01	0.070 g	29.46	38.08	29.26
		0.200 g	40.39	60.61	50.06
		0.400 g	57.21	93.15	62.82
Helena, Montana-02	0.070 g	29.88	43.73	46.35	
	0.200 g	41.58	68.74	65.31	
	0.400 g	59.60	98.09	64.58	
软土	Kern County	0.070 g	36.44	69.58	90.94
		0.200 g	60.36	149.41	147.53
		0.400 g	99.43	249.97	151.40
	Parkfield	0.070 g	33.77	62.61	85.40
		0.200 g	55.63	117.44	111.10
		0.400 g	80.88	177.75	119.77
San Fernando	0.070 g	29.28	43.96	50.14	
	0.200 g	41.14	80.91	96.67	
	0.400 g	66.23	151.35	128.52	

注:塔筒应力最大值的变化率=(考虑 SSI 效应塔筒应力最大值-不考虑 SSI 效应塔筒应力最大值)/不考虑 SSI 效应塔筒应力最大值×100%。

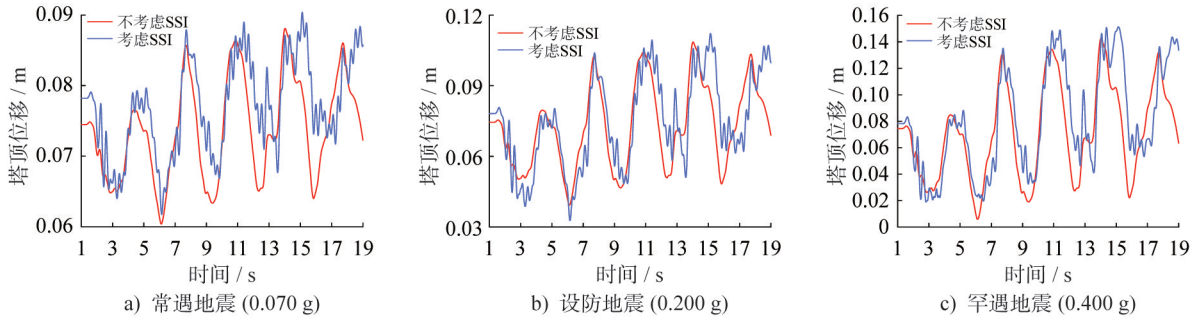


图12 Humboldt Bay作用下塔顶位移时程曲线(硬土)

Fig. 12 Time-history curves of tower top displacement under Humboldt Bay action (hard soil)

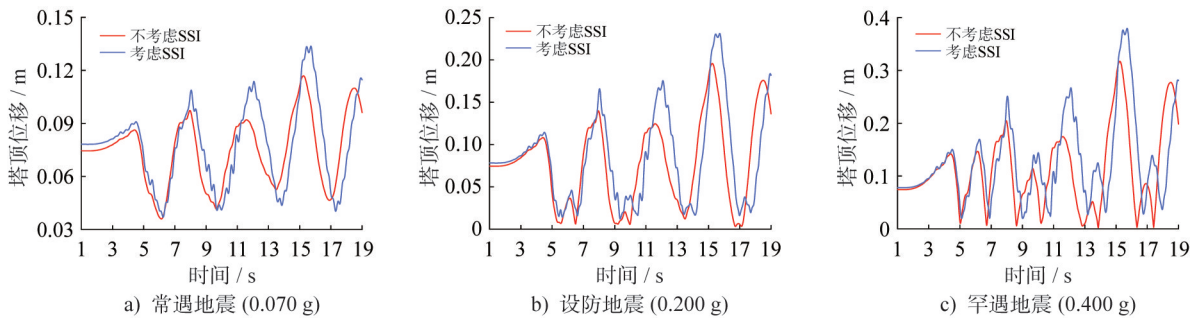


图13 Helena, Montana-01作用下塔顶位移时程曲线(硬土)

Fig. 13 Time-history curves of tower top displacement under Helena, Montana-01 action (hard soil)

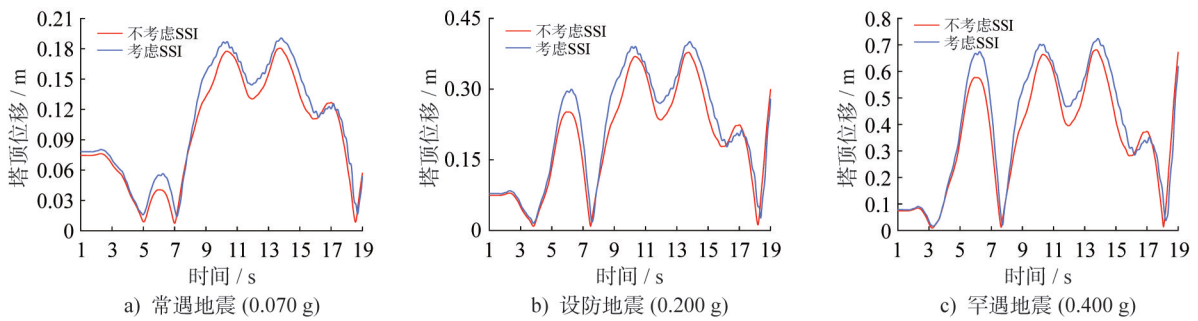


图14 Helena, Montana-02作用下塔顶位移时程曲线(硬土)

Fig. 14 Time-history curves of tower top displacement under Helena, Montana-02 action (hard soil)

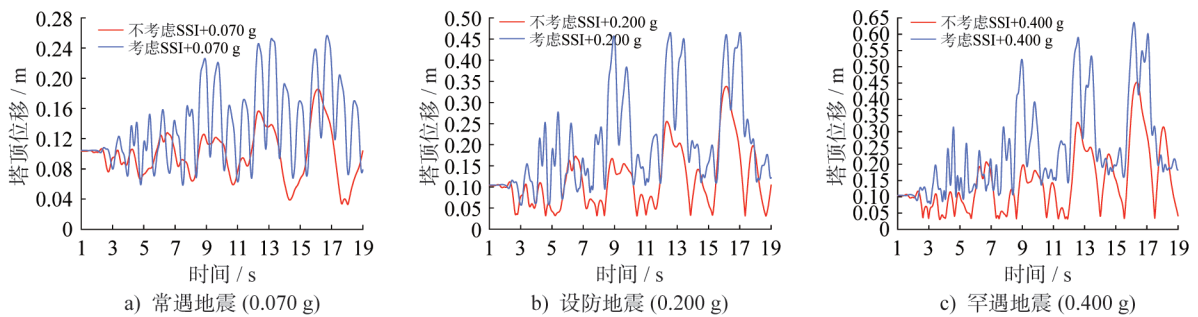


图15 Kern County作用下塔顶位移时程曲线(软土)

Fig. 15 Time-history curves of tower top displacement under Kern County action (soft soil)

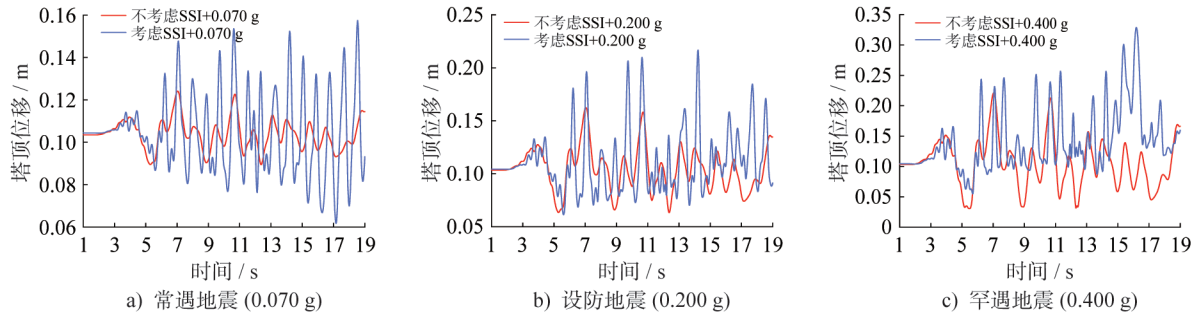


图16 Parkfield作用下塔顶位移时程曲线(软土)

Fig. 16 Time-history curves of tower top displacement under Parkfield action (soft soil)

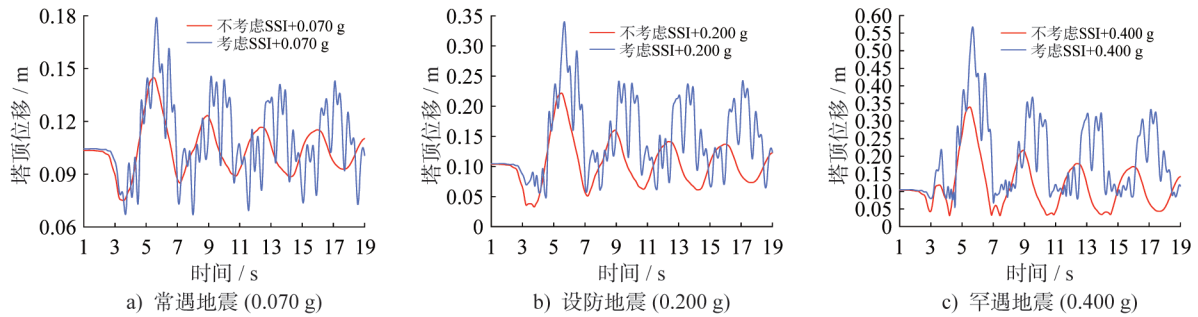


图17 San Fernando作用下塔顶位移时程曲线(软土)

Fig. 17 Time-history curves of tower top displacement under San Fernando action (soft soil)

表7 塔顶位移最大值

Table 7 Maximum displacement of the tower top

场地类别	地震波	加速度峰值	塔顶位移最大值/m		变化率/%
			不考虑 SSI 效应	考虑 SSI 效应	
硬土	Humbolt Bay	0.070 g	0.08	0.09	11.25
		0.200 g	0.11	0.12	9.09
		0.400 g	0.14	0.15	7.14
	Helena, Montana-01	0.070 g	0.12	0.13	8.33
		0.200 g	0.20	0.23	15.00
		0.400 g	0.32	0.38	18.75
软土	Kern County	0.070 g	0.18	0.26	44.44
		0.200 g	0.34	0.47	38.24
		0.400 g	0.45	0.64	42.22
	Parkfield	0.070 g	0.12	0.16	33.33
		0.200 g	0.16	0.22	37.50
		0.400 g	0.22	0.33	50.00
San Fernando	0.070 g	0.14	0.18	28.57	
	0.200 g	0.22	0.34	54.55	
	0.400 g	0.34	0.57	67.65	

注:塔顶位移最大值的变化率=(考虑 SSI 效应塔顶位移最大值-不考虑 SSI 效应塔顶位移最大值)/不考虑 SSI 效应塔顶位移最大值×100%。

## 6 结论

本文以山西某风机为研究对象,基于ABAQUS软件建立了精细化的风机结构-基础-土体模型,对土体施加能够有效地吸收散射波的黏弹性边界,从而更好地模拟SSI效应,对不同场地条件下风机在地震荷载下的响应进行分析。研究结果表明:

(1) 通过黏弹性边界模拟的SSI效应能够有效吸收边界上散射波的能量,避免了土体边界处反射波和散射波的产生。在有限元软件ABAQUS中实现黏弹性人工边界相对简单,可以根据土体的物理和力学特性调整弹簧和阻尼器的参数,以模拟不同的土体条件。

(2) 通过模态分析,发现SSI效应显著降低了风机结构的自振频率。这表明SSI效应使得风机结构的刚度和稳定性降低。在地震荷载作用下,考虑SSI效应能够更真实地反映风机结构的动力特性,提供更可靠的设计依据并能够更准确地进行安全评估。

(3) 对比考虑SSI效应和不考虑SSI效应的风机计算模型,发现SSI效应对风机结构在地震荷载下的响应具有放大作用:在硬土地下,相较于不考虑SSI效应的情况,最大塔筒应力变化率最高达到65.31%,最大塔顶位移变化率最高达到18.75%;在软土地下,相较于不考虑SSI效应的情况,最大塔筒应力变化率最高达到151.40%,最大塔顶位移变化率最高达到67.65%。这表明在软土地下,SSI效应对风机动力响应的放大作用更为明显,这是由于软土较低的剪切模量和不同的阻尼特性,使得地震作用下风机响应更为显著。

(4) 考虑SSI效应时,风机结构在地震作用下,最大塔顶位移达到0.72 m,接近塔筒总高度的1%;最大塔筒应力达到249.97 MPa,结构响应较大,考虑到结构工作中的疲劳效应以及设防烈度的提高,风机存在破坏的风险。

(5) 本研究为风机结构的设计提供了参考,强调了在风机结构设计中考虑SSI效应的重要性,特别是在软土地区,更应考虑SSI效应对风机动力响应的放大作用。

## 参考文献:

- [1] 江山,张发,刘庆阳,等.既有基础环型风机基础改造方法研究[J].可再生能源,2023,41(3):339-344. DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2023.03.007.  
JIANG Shan, ZHANG Fa, LIU Qingyang, et al. Research on the composite connections of the existing wind turbine foundation[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(3): 339-344. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2023.03.007. (in Chinese)
- [2] WANG W M, GAO Y H, QIU D P, et al. Research on the strengthening and retrofitting methods of existing wind turbine foundations with embedded-ring[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17 (16) : 3793-3803. DOI: 10.1049/rpg2.12882.
- [3] 项颖,王珏.SSI效应对重力式风机动力特性及地震响应的分析[C]//中国力学大会-2021+1论文集(第二册).西安:[出版者不详],2022.  
XIANG Ying, WANG Jue. Analysis of the influence of SSI effect on the dynamic characteristics and seismic response of gravity wind turbines[C]//Proceedings of China Mechanics Conference-2021+1 (Volume 2). Xi'an: [s.n.], 2022. (in Chinese)
- [4] 王斯伟,周丰,张伟.风电机组支撑体系SSI效应分析[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(增刊1):289-292.  
WANG Siwei, ZHOU Feng, ZHANG Wei. Research on SSI effect on wind turbine support system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(Suppl.1): 289-292. (in Chinese)
- [5] 白久林,龚彦安,李晨辉,等.考虑SSI效应的适用于风电结构设计的地震反应谱[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):170-179. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2022128.  
BAI Jiulin, GONG Yan'an, LI Chenhui, et al. Seismic response spectrum for wind turbine design considering SSI effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49 (11) : 170-179. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2022128. (in Chinese)
- [6] 李万润,吴王浩,范科友,等.考虑土-结构相互作用的大型风电结构地震响应分析[J].土木工程学报,2022,55(增刊1):39-48. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2022.s1.0243.  
LI Wanrun, WU Wanghao, FAN Keyou, et al. Seismic response analysis of large wind turbine considering soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(Suppl.1): 39-48. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.s1.0243. (in Chinese)
- [7] 戴靠山,毛振西,张玉林,等.考虑土-结构相互作用的运转状态风电塔抗震分析[J].工程科学学报,2017,39(9):1436-1442. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.018.  
DAI Kaoshan, MAO Zhenxi, ZHANG Yulin, et al. Seismic response analyses of a wind turbine under operating conditions considering soil-structure interaction [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9) : 1436-1442. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.018. (in Chinese)
- [8] 刘海卿,杜岩,于春艳.考虑土-结构相互作用锥形管风电塔架地震响应分析[J].建筑结构,2010,40(增刊2):116-118. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.s2.034.  
LIU Haiqing, DU Yan, YU Chunyan. Considering soil-structure interaction tapered pipe wind power tower earthquake response analysis [J]. Building Structure, 2010, 40(Suppl.2): 116-118. DOI: 10.19701/j.jzjg.2010.s2.034. (in Chinese)
- [9] 梅轩,杨阳.土-构耦合效应对15MW风力机地震动态响应的影 响[J].动力工程学报,2022,42(3):269-275,285.

- DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2022.03.011.
- MEI Xuan, YANG Yang. Effect of soil-structure interaction on seismic behaviors of 15 MW wind turbine[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(3): 269-275, 285. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2022.03.011. (in Chinese)
- [10] 孙杰, 黎冰, 陈燕萍. 土与结构相互作用对海上风机 TMD 减振效果的影响研究[J]. 水力发电, 2023, 49(6): 92-98. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2023.06.016.
- SUN Jie, LI Bing, CHEN Yanping. Influence of soil-structure interaction on TMD vibration reduction effect of offshore wind turbines[J]. Water Power, 2023, 49(6): 92-98. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2023.06.016.(in Chinese)
- [11] RODRIGUEZ-GALVAN E, ALAMO G M, MEDINA C, et al. Influence of seabed profile on the seismic response of monopile-supported offshore wind turbines including dynamic soil-structure interaction [J]. Marine Structures, 2023, 92: 103500. DOI:10.1016/j.marstruc.2023.103500.
- [12] TANG H M, YUE M N, YAN Y T, et al. Influence of soil - structure interaction models on the dynamic responses of an offshore wind turbine under environmental loads [J]. China Ocean Engineering, 2023, 37(2): 218-231. DOI:10.1007/s13344-023-0020-8.
- [13] 崇高, 董苗苗. 地震对风力发电机组塔架设计的影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 188-191.
- CHONG Gao, DONG Miaomiao. Influence of earthquake on tower design of wind turbine generator[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 188-191. (in Chinese)
- [14] SERRAS D N, ATHANASIOU A. Performance assessment of a steel wind turbine tower subjected to repeated earthquakes [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas. Cham: Springer International Publishing, 2022: 396-404.
- [15] SANTANGELO F, FAILLA G, SANTINI A, et al. Time-domain uncoupled analyses for seismic assessment of land-based wind turbines[J]. Engineering Structures, 2016, 123: 275-299. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.05.043.
- [16] SANTANGELO F, FAILLA G, ARENA F, et al. On time-domain uncoupled analyses for offshore wind turbines under seismic loads[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(2): 1007-1040. DOI:10.1007/s10518-017-0191-x.
- [17] 张浦阳, 丁红岩, 李芳. 海上筒型风机基础地震荷载下的抗液化性能研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1587-1593. DOI:10.3969/j.issn.0254-0096.2013.09.017.
- ZHANG Puyang, DING Hongyan, LI Fang. Study on soil liquefaction of bucket foundation of offshore wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(9): 1587-1593. DOI:10.3969/j.issn.0254-0096.2013.09.017.(in Chinese)
- [18] 杜鹏, 杨阳, 成伟, 等. 基于监测数据和拟静力方法的海上风机地震动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(3): 560-567. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230710004.
- DU Peng, YANG Yang, CHENG Wei, et al. Seismic dynamic response analysis of offshore wind turbines based on monitoring data and quasi-static calculation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 560-567. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230710004. (in Chinese)
- [19] 陈立, 田会元, 徐明强. 基于土工试验的海上风电复合筒型基础地震响应研究[J]. 结构工程师, 2023, 39(6): 171-178. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2023.06.019.
- CHEN Li, TIAN Huiyuan, XU Mingqiang. Seismic response analysis of offshore wind power composite bucket foundation based on geotechnical test [J]. Structural Engineers, 2023, 39(6): 171-178. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2023.06.019.(in Chinese)
- [20] 徐亚洲, 孟莹, 丁艳琼. 近场地震作用下风力发电塔结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(8): 49-57. DOI:10.15951/j.tmgcxb.23040313.
- XU Yazhou, MENG Ying, DING Yanqiong. Shaking table test for wind turbine tower structure under near-field ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(8): 49-57. DOI:10.15951/j.tmgcxb.23040313.(in Chinese)
- [21] 徐小凤, 陈少林, 孙杰. 近海单桩式风机地震响应分区耦合分析方法[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(1): 96-105. DOI: 10.11779/CJGE20231025.
- XU Xiaofeng, CHEN Shaolin, SUN Jie. Zonal coupling analysis method for seismic response of offshore monopole wind turbine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(1): 96-105. DOI: 10.11779/CJGE20231025.(in Chinese)
- [22] 戚蓝, 刘国威, 王海军. 近海风电筒型基础风机结构地震动力响应分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7): 116-118, 122. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2012.07.040.
- QI Lan, LIU Guowei, WANG Haijun. Analysis on seismic dynamic response of structure for offshore wind turbine with bucket foundation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(7): 116-118, 122. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2012.07.040.(in Chinese)
- [23] 侯法垒, 姚莫凡, 胡雨承, 等. 考虑外平台影响下海上风机单桩基础结构地震动力响应分析[J]. 水力发电, 2024, 50(1): 82-89, 102. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2024.01.017.
- HOU Falei, YAO Mofan, HU Yucheng, et al. Seismic dynamic response analysis of offshore wind turbine single-pile foundation structure considering the influence of external platform[J]. Water Power, 2024, 50(1): 82-89, 102. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2024.01.017.(in Chinese)
- [24] 霍涛. 长周期地面运动对风机塔筒结构动力响应的影响[C]//第十九届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 杭州:[出版者不详], 2019.
- HUO Tao. The influence of long-term ground motion on the

- dynamic response of wind turbine tower structure [C]// Proceedings of the 19th National Symposium on Modern Structural Engineering. Hangzhou: [s.n.], 2019. (in Chinese)
- [25] MA H W, ZHANG D D. Seismic response of a prestressed concrete wind turbine tower[J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14(8): 561-571. DOI:10.1007/s40999-016-0029-y.
- [26] YANG Y, BASHIR M, LI C, et al. Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation [J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 215-228. DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.02.077.
- [27] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Effects of seismic and aerodynamic load interaction on structural dynamic response of multi-megawatt utility scale horizontal axis wind turbines[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 49-58. DOI:10.1016/j.renene.2015.07.098.
- [28] 李嘉瑞, 景立平, 董瑞, 等. ABAQUS模拟土-结构相互作用时人工边界的选取[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 174-182. DOI:10.13197/j.eeev.2020.03.174.lijr.018. LI Jiarui, JING Liping, DONG Rui, et al. Artificial boundary selection when calculating soil-structure interaction with ABAQUS[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 174-182. DOI:10.13197/j.eeev.2020.03.174.lijr.018.(in Chinese)
- [29] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.1068. MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1445-1457. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.1068. (in Chinese)
- [30] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[C]// 全国防震减灾工程学术研讨会. 南京:[出版者不详], 2007. LIU Jingbo, DU Yixin, YAN Qiushi. Viscous-elastic artificial boundary and earthquake dynamic input in common finite element software [C]// National Seismic on Earthquake Prevention and Disaster Reduction Engineering. Nanjing: [s. n.], 2007. (in Chinese)