

# 考虑 SSI 效应的钢 - 混风电塔筒地震响应分析

王旭雅<sup>1</sup>, 申彦利<sup>1,2</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 河北省装配式结构工程技术研究中心, 邯郸 056038)

**摘要:** 为研究土 - 结构相互作用 (简称 SSI 效应) 对钢 - 混风电塔筒地震响应的影响, 采用数值模拟方法建立“塔筒 - 基础 - 土体”有限元模型, 并采用非线性 P - Y 弹簧模拟桩 - 土之间的相互接触来考虑 SSI 效应。选取近场脉冲型长周期、远场长周期和非长周期地震动记录各 7 条, 基于土体非线性特征考虑土体对地震动的放大及滤波效应。分析考虑 SSI 效应时, 塔筒结构在不同地震动下的地震响应。结果表明: 在进行钢 - 混风电塔筒抗震设计时, SSI 效应起到不利作用, 不可忽视, 在长周期地震动作用下, 远场作用下的动力响应大于近场作用下的结果, 考虑 SSI 效应后, 加速度在接近过渡段处的混凝土筒段处达到最大, 非长周期作用下, SSI 效应对过渡段处的内力响应影响较大。研究结果可为钢 - 混风电塔筒的抗震设计提供参考。

**关键词:** 钢 - 混风电塔筒; 土 - 结构相互作用; 地震响应分析; 数值模拟; 长周期地震动

**中图分类号:** TU352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0141-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.022

## Seismic Response Analysis of Steel - Concrete Hybrid Wind Power Tower under SSI Effect

WANG Xuya<sup>1</sup>, SHEN Yanli<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Provincial Research Center of Assembly Structural Engineering Technology, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to study the influence of soil - structure interaction (SSI effect) on the seismic response of steel - concrete wind turbine tower, the finite element model of 'tower - foundation - soil' was established by numerical simulation method, and the nonlinear P - Y spring was used to simulate the mutual contact between pile and soil to consider the SSI effect. Select 7 near - field pulse type long - period, far - field long - period, and non long - period earthquake records each. Based on the nonlinear characteristics of soil, considering the amplification and filtering effects of soil on seismic motion, analyze the seismic response of tower structures under different seismic motions when considering the SSI effect. Research has found that the SSI effect plays an adverse role in the seismic design of steel - concrete wind turbine towers and cannot be ignored. Under the action of long - period seismic motion, the dynamic response in the far field is greater than that in the near field. After considering the SSI effect, the acceleration reaches its maximum at the concrete cylinder section near the transition zone. Under the action of non - long period, SSI effect has a great influence on the internal force at the transition section. The results of this study can provide

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (51378169)。

作者简介: 王旭雅 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 结构抗震方面的学习和研究。

通信作者: 申彦利 (1977—), 男, 博士后, 教授, 研究方向: 结构抗震工程学方面的研究。

收稿日期: 2024 - 12 - 12

## 建筑结构

reference for the seismic design of steel-concrete wind turbine tower.

**Key words:** steel-concrete hybrid wind turbine tower; soil-structure interaction; seismic response analysis; numerical simulation; long-period ground motion

### 0 引言

在“30·60”双碳目标驱动下,我国风电产业加速向规模化、高塔化发展,风电场常选址于地震活跃区<sup>[1-2]</sup>。因此,风电塔筒在复杂地震动作用下的性能研究备受学者关注。

有学者<sup>[3-4]</sup>对比分析了风电结构在近场地震和远场地震作用下的动力响应,发现结构在近场地震动作用下的响应更为明显;梅竹等<sup>[5]</sup>分析了风电塔在长周期地震动下的动力响应,发现长周期地震动超过风荷载成为风电塔的控制荷载;李万润等<sup>[6]</sup>通过对比分析发现大部分余震对于风电结构造成的损伤低于主震;此外,通过振动台试验,徐亚洲等<sup>[7]</sup>发现在随机地震作用下,塔筒位移响应的变异性会随高度增加而逐渐增大。随着发电容量的提升,风电结构越来越高大,它的重心也随之增强,从而对土体造成了巨大的压力,导致塔筒产生了应力重分布,因此土体与结构之间的相互作用(简称SSI效应)需予以重视<sup>[8]</sup>。为了系统评估风电塔筒在地震作用下的安全性,深入研究SSI效应的塔筒结构地震响应及其影响因素具有重要意义。Taddei等<sup>[9]</sup>提出采用广义土弹簧模型考虑SSI效应,结果表明在软弱地层中,简化土弹簧模型可有效反映风电塔筒整体的主要动态特性;Risi等<sup>[10]</sup>评估了一座海上单桩风电塔架在SSI效应下的动力特性,发现该结构对极端地壳和界面地震较为敏感,其脆性在软土地基中尤为突出;Natale等<sup>[11]</sup>通过对比分析SSI效应下的海上风电结构地震响应,得出SSI效应对叶片的动力响应有较大的影响;李万润等<sup>[12]</sup>在风电结构的整体模型基础上发现,考虑SSI效应的风电结构在高频地震作用下表现出了多振型叠加特点;霍涛<sup>[13]</sup>通过建立整体有限元模型进行地震响应分析,结果表明,塔筒与门框交接处和塔底与机舱主轴处在SSI效应和长周期地震动作用下较为薄弱;戴靠山等<sup>[14]</sup>发现考虑SSI效应时,运转工况下风电塔的结构动力响应受到显著影响;而梅轩等<sup>[15]</sup>发现在停机工况下,SSI效应会显著增大基础弯矩,但对塔顶位移影

响较小。

综上所述,当前国内外的学者在探讨SSI效应对风电结构的动力响应分析时,大都集中在对全钢塔筒的研究。由于钢-混风电塔筒与全钢风电塔筒的动力特性不同,有必要深入研究SSI效应对钢-混风电塔筒地震响应的影响。基于此,拟采用OpenSees数值模拟构建风电结构有限元模型,采用非线性动力P-Y弹簧进行考虑SSI效应,参考前人研究结果<sup>[12]</sup>,选取近场脉冲型长周期、远场长周期和非长周期地震记录各7条,建立塔底固结模型和考虑SSI效应的塔筒模型,进行地震响应对比分析,研究不同地震动作用下SSI效应对钢-混风电塔筒地震响应的影响。

### 1 研究对象

选取某建于7度抗震设防区的钢-混风电塔筒为研究对象。塔筒模型结构参数见表1。研究对象的尺寸示意图如图1所示。

表1 塔筒模型结构参数  
Table 1 Structural parameters of tower model

塔筒参数	说明
上部结构	混凝土筒段 80 m, 底座半径为 3 m, 顶部半径为 2 m。 钢塔筒段 40 m, 底座半径为 1.75 m, 顶部半径为 1.3 m。过渡段 1.5 m。
基础结构	采用多桩承台基础, 承台半径 9 m, 高度 3 m, 下设 4 根钻孔灌注桩, 桩径 2 m, 桩长 40 m。
场地条件	多遇地震, 场地类别为 III 类, 设计地震加速度为 0.10 g, 设计地震分组为第三组, 场地特征周期为 0.65 s, 建筑结构阻尼比为 0.04。

### 2 数值建模

采用有限元软件 OpenSees 构建数值模型分析。分别建立不考虑SSI效应的塔底固结模型和考虑SSI效应的“塔筒-基础-土体”一体化模型。塔筒上部机舱及叶片的质量简化为集中质量施加于塔筒顶部,筒身与承台桩基础的分布质量等效为节点质量。塔底固结和“塔筒-基础-土体”一体化模型如图2所示。

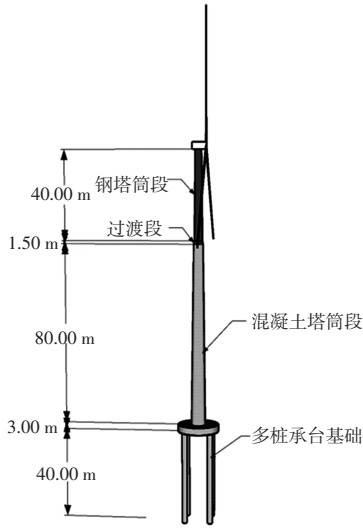
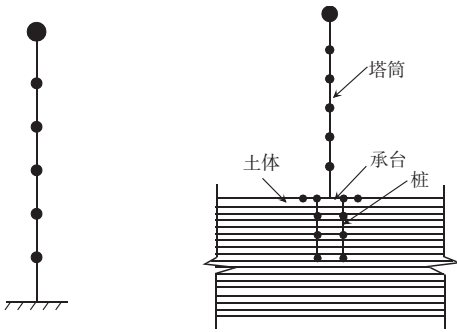


图 1 风电塔尺寸示意图

Fig. 1 Wind turbine tower size diagram



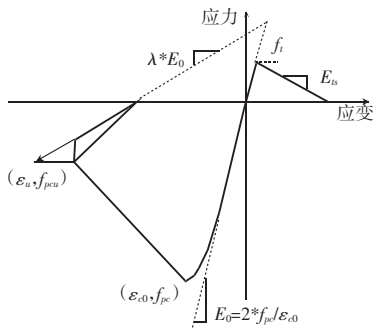
(a) 塔底固结模型 (b) “塔筒 - 基础 - 土体”一体化模型

图 2 数值计算模型示意图

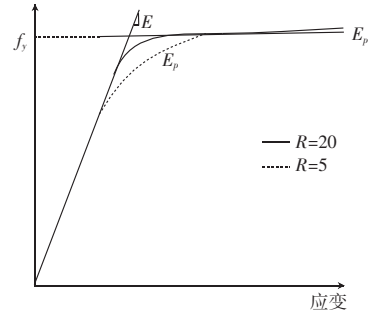
Fig. 2 Schematic diagram of the numerical calculation model

2.1 模型建立

风电塔筒采用梁柱单元进行模拟，过渡段单元长度为 1.5 m，共 1 个单元，塔身及基础单个单元长度为 5 m，共 44 个单元。单元截面采用圆形纤维截面。筒段混凝土标号为 C60，基础混凝土标号为 C40，均选用 Concrete02 材料模拟，本构关系采用 Kent - Scott - Park 模型，如图 3 (a) 所示，各参数



(a) Concrete02 本构关系



(b) Steel02 本构关系

图 3 材料本构关系

Fig. 3 Material constitutive relationship

具体数值见表 2。钢筋型号为 HRB400，筒段钢材为 Q345，均选用 Steel02 材料模拟，本构关系采用 Giuffre - Menegotto - Piano 模型，如图 3 (b) 所示，各参数具体数值见表 3。

表 2 Concrete02 材料本构参数

Table 2 Concrete02 material constitutive parameters

构件	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	峰值应变 / $\epsilon_0$	峰值应变 / $\epsilon_u$
混凝土筒	38.5	2.85	0.002	0.003 3
多桩承台基础	26.8	2.39	0.002	0.003 3

表 3 Steel02 材料本构参数

Table 3 Steel02 material constitutive parameters

构件	抗拉强度/MPa	弹性模量	屈服后刚度比
钢筋	400	$2.00 \times 10^5$	0.01
筒筒	345	$2.06 \times 10^5$	0.01

2.2 桩 - 土相互作用模拟

土体采用平面四边形单元进行模拟，土体边界采用人工边界，设定模型地基土体总长为 100 m，高度为 65 m，土体的左右边界保持位移同步（通过 equalDOF 实现），并在土体底部进行固结处理。筒身、承台及桩基础之间采用共节点接触，桩 - 土之间的相互接触分别采用 P - Y、T - Z 和 Q - Z 三种弹簧进行模拟，均采用零长度单元。桩 - 土相互作用简化模型图如图 4 所示。

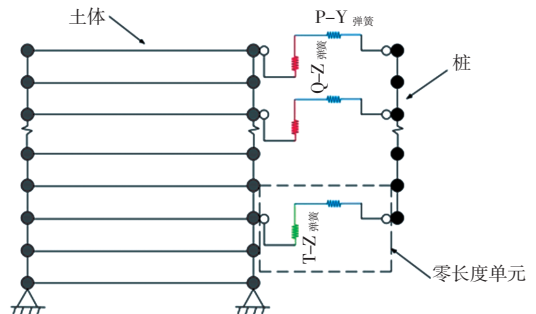


图 4 桩 - 土相互作用简化模型图

Fig. 4 Pile - soil interaction simplified model diagram

## 建筑结构

### 3 地震动的选取与处理

#### 3.1 地震动的选取

为对比分析不同地震动对钢-混风电塔筒的影响,从 PEER 强震数据库中选取了 7 条断层距小于

20 km 的近场脉冲型长周期地震动,7 条断层距大于 40 km 的远场长周期地震动,同时选取了 7 条非长周期地震动为对比地震动<sup>[16-17]</sup>,所选地震动的具体信息见表 4。

表 4 地震动信息  
Table 4 Ground motion information

类型	地震动编号	事件	时间	测站	震级	断层距/km	PGA/g
近场脉冲地震动	E1	"Imperial Valley_06"	1979	"EC County Center FF"	6.53	7.31	0.212 0
	E2	"Imperial Valley_06"	1979	"El Centro Array #3"	6.53	10.79	0.267 4
	E3	"Imperial Valley_06"	1979	"El Centro Differential Array"	6.53	5.09	0.352 6
	E4	"Imperial Valley_06"	1979	"Holtville Post Office"	6.53	5.35	0.258 2
	E5	"Kobe_Japan"	1995	"Port Island (0 m)"	6.90	3.31	0.347 9
	E6	"Darfield_New Zealand"	2010	"TPLC"	7.00	6.11	0.299 7
	E7	"El Mayor_Cucapah_Mexico"	2010	"Westside Elementary School"	7.20	10.31	0.255 1
远场长周期地震动	E8	"Landers"	1992	"Covina_W Badillo"	7.28	128.06	0.068 1
	E9	"Landers"	1992	"LA_W 70th St"	7.28	163.96	0.063 4
	E10	"Chi_Chi_Taiwan"	1999	"CHY093"	7.62	49.82	0.065 8
	E11	"Chi_Chi_Taiwan"	1999	"ILA049"	7.62	85.67	0.083 2
	E12	"Chi_Chi_Taiwan"	1999	"KAU015"	7.62	106.51	0.027 1
	E13	"Chi_Chi_Taiwan"	1999	"KAU064"	7.62	100.04	0.042 6
	E14	"Hector Mine"	1999	"Mecca_CVWD Yard"	7.13	91.96	0.100 8
非长周期地震动	E15	"Victoria_Mexico"	1980	"Victoria Hospital Sotano"	6.33	6.07	0.044 7
	E16	"Morgan Hill"	1984	"Los Banos"	6.19	63.16	0.051 5
	E17	"Chi_Chi_Taiwan_04"	1999	"CHY065"	6.20	85.86	0.030 7
	E18	"Chuetsu_oki_Japan"	2007	"NIG002"	6.80	51.66	0.036 4
	E19	"Chuetsu_oki_Japan"	2007	"NIGH03"	6.80	89.37	0.028 7
	E20	"Christchurch_New Zealand"	2011	"Styx Mill Transfer Station "	6.20	11.24	0.184 9
	E21	"Christchurch_New Zealand"	2011	"TPLC"	6.20	16.60	0.125 6

#### 3.2 地震动的处理

通过考虑土体的滤波效应,可以更加准确地模拟桩-土之间的相互作用<sup>[18]</sup>。为精确模拟桩-土相互作用,利用时域非线性方法对选取的地震动进行考虑土体滤波效应的处理,场地土特性见表 5。每层土的动力曲线图如图 5 所示。

表 5 场地土层特性表  
Table 5 Site stratum characteristics table

土层	土质	土类号	波速 $V_s$ /(m/s)	密度 /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	层厚 /m
1	砂土	1	134	1 800	2
2	黏土	2	146	1 800	6
3	粉土	3	180	1 850	8
4	粉质黏土	4	200	1 900	7
5	粉质黏土	4	225	1 900	6
6	黏土	5	236	1 930	10
7	粉质黏土	4	202	1 950	9
8	黏土	5	241	1 930	8
9	粉质黏土	6	358	2 090	6
10	粉质黏土	6	480	2 100	3

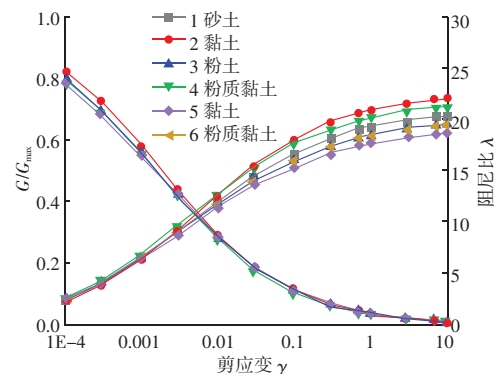


图 5 场地土非线性动力特性曲线  
Fig. 5 Site soil nonlinear dynamic behavior curve

进行场地非线性时域分析时,为了能够考虑土层所处深度对土体非线性参数的影响,土体本构模型使用改进的双曲线本构模型,采用模量折减和阻尼曲线(MRD)方法,通过拟合  $G/G_{\max} - \gamma$  和  $\lambda - \gamma$  曲线来确定土体参数,并将 21 条原始地震动反演至土层底部。近场脉冲(E1)、远场长周期(E9)和

非长周期 (E16) 等 3 条地震记录的反演时程与实际地震时程对比如图 6 所示。

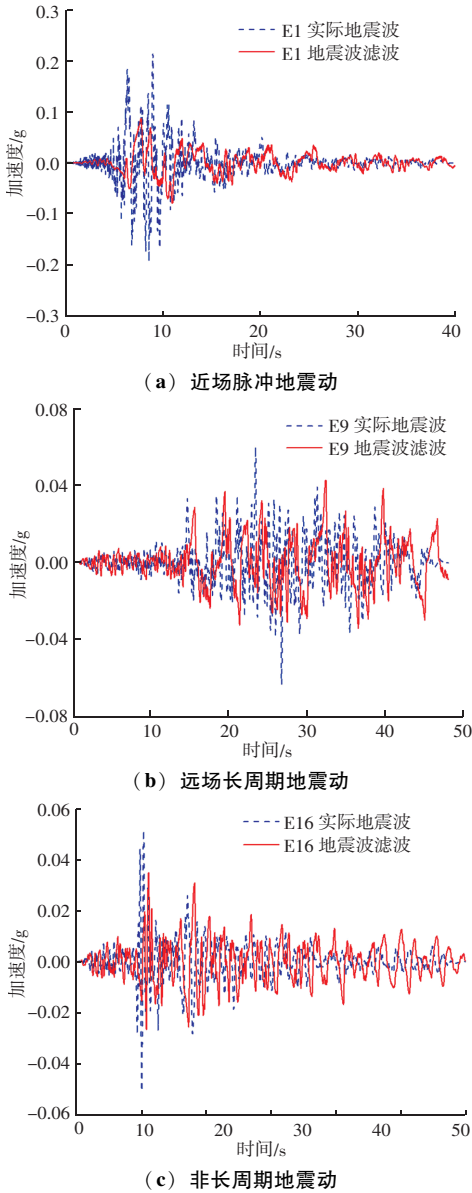


图 6 地震动反演时程与实际时程对比曲线

Fig. 6 Comparison curve between inverted and actual seismic ground motion time histories

## 4 SSI 效应对钢 - 混风电塔筒地震响应的影响分析

### 4.1 SSI 效应对塔筒位移响应的影响分析

为研究土 - 结构相互作用 (SSI 效应) 对风电塔筒地震响应的影响, 将三类地震动分别施加于两类风电塔筒模型, 以塔筒顶部的位移为主要分析指标, 对比不同地震动、不同模型的计算结果。并从中各选取一条具有代表性的地震动作用下的塔顶位移时

程曲线图。由图 7 可知, 忽略 SSI 效应会低估塔顶位移。考虑 SSI 效应的钢 - 混风电塔顶位移平均峰值在近场脉冲、远场长周期和非长周期地震动作用下, 是忽略 SSI 效应结果的 1.14、1.33、1.08 倍。为准确评价塔筒结构的抗震性能, 计算塔筒地震响应时不能忽略 SSI 效应。此外, 在长周期地震动作用下, 考虑 SSI 效应的远场地震动引起的塔顶位移平均峰值约为近场地震动的 1.4 倍。可见对塔筒而言, 远场长周期地震动的影响大于近场脉冲型地震动。

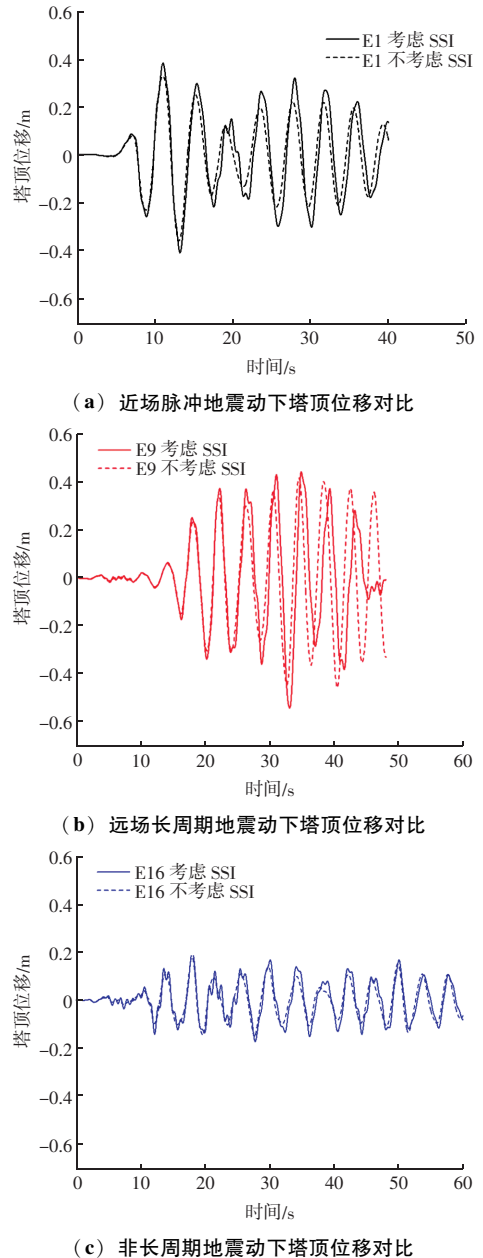


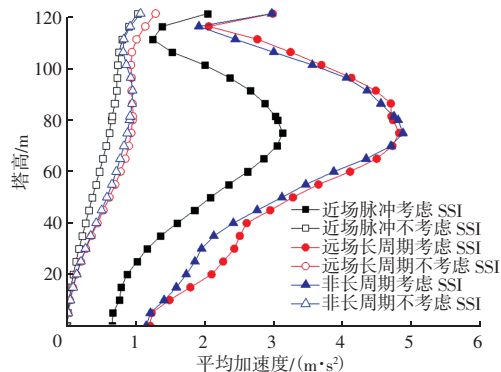
图 7 塔顶位移时程图

Fig. 7 Time history curve of tower top displacement

## 建筑结构

### 4.2 SSI 效应对塔筒加速度响应的影响分析

为了评估 SSI 效应对风电塔筒加速度响应的影响规律,对比了两类模型在三类地震动作用下的加速度响应,并对同类地震动下的响应结果进行了平均处理。由图 8 可知,考虑 SSI 效应时,塔筒加速度在接近钢混过渡段处的混凝土塔筒段达到最大值;在不考虑 SSI 效应时,塔筒加速度沿高度变化不明显。考虑 SSI 效应的塔筒在近场脉冲、远场长周期和非长周期地震动作用下的最大加速度分别为  $5.41$ 、 $7.65$ 、 $6.25 \text{ m/s}^2$ 。由此可见,远场长周期地震动对塔筒加速度响应影响较大。



(d) 三类地震动下平均加速度对比

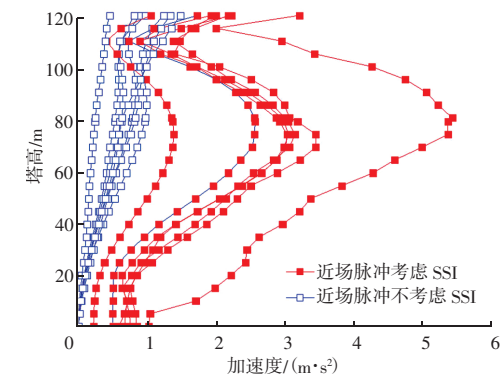
图 8 风电塔筒沿高度的加速度响应对比

Fig. 8 Acceleration response comparison along the height of the wind turbine tower

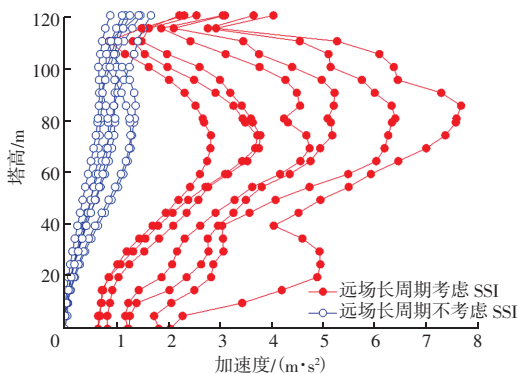
此外,风力涡轮机的竖直振动模式的频率高于水平振动模式,在远场长周期地震动作用下,可能会加剧机舱设备损坏的风险。

### 4.3 SSI 效应对塔筒过渡段处内力响应的分析

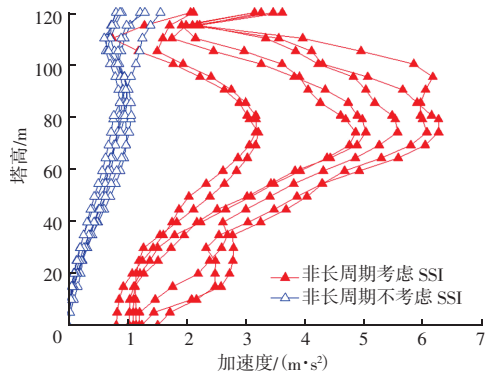
在三类地震动作用下,两类不同模型的过渡段内力最大值对比结果如图 9 所示。



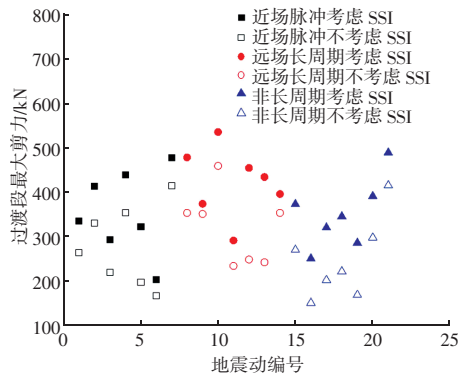
(a) 近场脉冲地震动下加速度对比



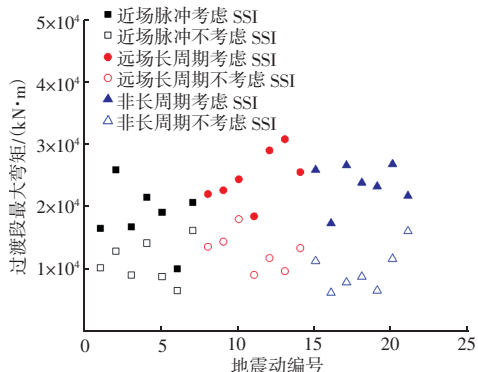
(b) 远场长周期地震动下加速度对比



(c) 非长周期地震动下加速度对比



(a) 三类地震动下过渡段最大剪力对比



(b) 三类地震动下过渡段最大弯矩对比

图 9 三类地震动下过渡段内力响应对比

Fig. 9 Comparison of internal force response in the transition segment under three types of ground motions

考虑 SSI 效应后, 在近场脉冲、远场长周期和非长周期地震动作用下, 过渡段最大剪力平均值分别增大了 1.28、1.32、1.42 倍, 最大弯矩平均值分别增大了 1.69、1.94、2.45 倍。可以看出, 考虑 SSI 效应时的过渡段处剪力、弯矩峰值明显大于不考虑 SSI 效应的结果。此外, 由于非长周期地震动的频率较为丰富, 在考虑了土体滤波的放大效应后, 非长周期地震动作用下, SSI 效应对过渡段内力响应的影响更大。

## 5 结论

以某钢 - 混风电塔筒作为研究对象, 建立 OpenSees 有限元模型, 并采用非线性 P-Y 弹簧模拟桩 - 土之间的相互接触作用来考虑 SSI 效应。选择近场脉冲、远场长周期和非长周期地震动各 7 条, 探讨了在不同地震动下 SSI 效应对钢 - 混风电塔筒动力响应的影响, 得出如下结论:

(1) 考虑 SSI 效应后, 在不同地震动下对塔顶位移、塔筒加速度和钢混过渡段处内力响应均产生了不利影响。

(2) 风电塔筒因其自振周期较长的特性, 在长周期地震动作用下, 其动力响应受远场地震动的影响更为显著, 超过近场作用下的响应。

(3) 对于钢 - 混风电塔筒, 考虑 SSI 效应时, 加速度响应在接近钢混过渡段处的混凝土筒段到达最大。此外, 在非长周期地震动下, SSI 效应对过渡段处的内力响应影响较为显著。

## 参 考 文 献

[1] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2016, 120: 57-67.

[2] SADOWSKI J A, CAMARA A, M LAGA-CHUQUITAYPE C, et al. Seismic analysis of a tall metal wind turbine support tower with realistic geometric imperfections [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2017, 46 (2): 201-219.

[3] SIGURSSON G, RUPAKHETY R, RAHIMI S E, et al. Effect of pulse-like near-fault ground motions on utility-scale land-based wind turbines [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 18

(3): 953-968.

- [4] 王佳龙, 冯娜. 风力发电塔近、远场地震动响应减震效果分析 [J]. *科技创新与应用*, 2021, 11 (31): 59-62.
- [5] 梅竹, 胡皓, 戴靠山, 等. 长周期地震动 - 脉动风耦合作用下风电塔架动力响应分析与混合试验初步验证 [J]. *工程力学*, 2021, 38 (增刊1): 58-65.
- [6] 李万润, 范科友, 吴王浩, 等. 主余震序列作用下风力发电塔架结构的地震损伤研究 [J]. *工程力学*, 2024, 41 (12): 65-79.
- [7] 徐亚洲, 于明阳, 任倩倩, 等. 随机近场地震作用下风力发电塔结构振动台试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40 (19): 309-316.
- [8] 柯世堂, 王同光, 曹九发, 等. 考虑土 - 结相互作用大型风力发电结构风致响应分析 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48 (2): 18-25.
- [9] TADDEI F, MESKOURIS K. Seismic analysis of onshore wind turbine including soil - structure interaction effects [C] // *International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities*. Aachen, 2013.
- [10] RISI D R, BHATTACHARYA S, GODA K. Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 109: 154-172.
- [11] NATALE A, GIUSEPPE F, FELICE A. Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures [J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2015, 373 (2035): 20140086.
- [12] 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.
- [13] 霍涛. 长周期地面运动和 SSI 效应对风机动力响应的影响 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40 (1): 142-150.
- [14] 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.
- [15] 梅轩, 杨阳. 土 - 构耦合效应对 15 MW 风力机地震动态响应的影响 [J]. *动力工程学报*, 2022, 42 (3): 269-275.
- [16] 王海东, 刘巴黎, 蔡长丰. 近场水平地震动选取原则及脉冲型水平地震动弹性谱特性研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39 (1): 222-230.
- [17] 党育, 李连峰. 长周期地震动的界定及对应场地发生概率 [J]. *兰州理工大学学报*, 2018, 44 (6): 112-117.
- [18] KIM H D, LEE G S, LEE K I. Seismic fragility analysis of 5 MW offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2014, 65: 250-256.