

考虑土 - 结构相互作用的输电塔抗震研究综述

张志领

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月11日; 发布日期: 2025年1月23日

摘 要

输电塔作为电力系统中重要的基础设施,其抗震性能对电力系统的稳定性和安全性具有至关重要的作用。传统的输电塔抗震分析通常忽略了土 - 结构相互作用(Soil-Structure Interaction, 简称SSI效应), 这导致对地震响应的预测较为保守。随着研究的深入,越来越多的研究开始考虑这个因素,特别是在强震或复杂地质条件下,土体与结构之间的相互作用对结构的振动响应和稳定性有着显著影响。本文综述了考虑土 - 结构相互作用的输电塔抗震研究,分析了SSI效应对输电塔抗震性能的影响,并详细介绍了目前关于土 - 结构相互作用的研究方法、成果并展望了未来的研究方向。

关键词

输电塔, 土 - 结构相互作用, 地震

A Review of Seismic Resistance of Transmission Towers Considering Soil-Structure Interaction

Zhiling Zhang

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 11th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

Transmission towers, as significant infrastructure in the power system, play a vital role in the stability and security of the power system. The seismic performance of traditional transmission towers is usually analyzed while ignoring the Soil-Structure Interaction (referred to as the SSI effect), resulting in a relatively conservative prediction of seismic responses. With in-depth research, an

文章引用: 张志领. 考虑土-结构相互作用的输电塔抗震研究综述[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 86-93.

DOI: 10.12677/hjce.2025.141011

increasing number of studies have begun to consider this factor. Particularly under strong earthquakes or complex geological conditions, the interaction between the soil and the structure has a remarkable impact on the vibration response and stability of the structure. This paper reviews the seismic research of transmission towers considering the soil-structure interaction, analyzes the influence of the SSI effect on the seismic performance of transmission towers, and elaborates on the current research methods, achievements regarding the soil-structure interaction, and looks forward to future research directions.

Keywords

Transmission Tower, Soil-Structure Interaction, Earthquake

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济社会的发展以及煤炭、石油等一次能源的紧缺，电力作为清洁的二次能源将逐渐成为主要的能源消费方式[1]。当前经济社会发展对电力能源的需求量越来越大，为了满足经济的增长对能源的需求，特高压、长距离、大跨越的输电线路建设已成为电力供应的主要发展模式[2]。随着电力网建设进程的不断推进，特高压、长距离、大跨越电力输送将成为常态。全国的电力网络是我国的经济命脉，所以对于输电塔的防灾减灾的研究是非常重要的课题。以往在进行输电塔的设计时，主要考虑的荷载为风荷载、覆冰荷载等，一般不考虑地震荷载的作用。但近年来地震作用下，输电塔因地震发生破坏的实例屡见不鲜。如图1所示，输电塔在地震作用下发生倒塌破坏。



Figure 1. Real scene of damaged transmission towers after the earthquake

图 1. 地震后输电塔损坏实景图

输电塔作为电力传输的核心设施，其抗震安全性逐渐成为电力行业研究和工程设计的关键课题。输电塔通常安装在复杂的地质环境中，其稳定性不仅受到地震荷载的直接作用，还受到土体和输电线路的影响。并且大多数地震作用下破坏的输电塔，都可以见到基础及周边土体的损坏。传统的抗震分析方法通常假设输电塔基础是刚性的，并忽略了基础土体的作用，这种简化方法往往低估了输电塔的地震动响应和地震对输电塔造成风险。

土-结构相互作用(SSI 效应)在实际地震过程中对输电塔的影响不可忽视。土-结构相互作用考虑了土体的弹性、塑性以及和结构的相互影响,在土-结构作用下,输电塔的地震响应可能表现出不同于传统地震响应分析的特性,因此,在进行抗震分析时,必须考虑这些因素。

本文的目的是总结近年来在考虑 SSI 效应下输电塔抗震分析的研究进展,论述土-结构相互作用对输电塔地震响应的影响,综述相关的研究方法,并展望未来的研究方向。

2. SSI 效应的理论

2.1. SSI 效应理论的发展

土-结构相互作用(SSI)是指土体与结构在外力作用下相互影响的过程。SSI 效应的基本理论认为,土体和结构是一个不可分割的整体,土体的变形影响结构的动力响应,结构的受力又反过来影响土体的变形。SSI 效应是土体与结构之间相互作用的过程,特别是在外部荷载(如地震、风、重力等)作用下,土体的变形和结构的振动相互影响的现象。SSI 理论的出现与发展不仅极大丰富了土木工程和结构力学的理论框架,也为基础设施尤其是建筑物、桥梁、核电站和输电塔等的抗震设计提供了重要的理论支持。

最早的 SSI 效应理论可以追溯到 20 世纪初。Lamb [3]首次分析了弹性地基上的振动问题,这为该领域的进一步发展奠定了基础。当时,土体被视为结构的静态基础,但土体和结构之间的相互影响没有受到足够重视。最初的研究主要集中在基础的承载力和基础沉降的计算上,忽视了土体的动态行为对结构响应的影响。

进入 20 世纪 40~50 年代后,研究人员逐渐认识到土-结构相互作用对结构地震响应的影响。Reissner [4]在 Lamb 的解法基础上,通过对刚性圆形基础板在竖向荷载下振动的研究,提出了被广泛接受的基础振动理论——Reissner 理论,从而推动了 SSI 效应动力问题的系统研究。二战后的工业化进程中,钢筋混凝土结构和钢结构的广泛应用促使人们开始关注土体与结构在动态荷载下的相互作用。当时,SSI 效应主要被看作是结构基础沉降、基础承载力和土体反应的问题,但这些研究大多集中在静力分析层面,动态行为仍未被充分认识。

到了 20 世纪 60~80 年代,随着地震工程的飞速发展,SSI 效应的研究开始考虑动态荷载的影响。研究者们已成功推导出圆形和矩形基础在应力边值条件下的平移、摆动及扭转振动的瞬态与稳态解析解。然而,这些早期的模型较为简化,未能充分反映结构与地基之间的能量传递机制。直到 1967 年,Parmelee [5]提出了更加完善的土-结构动力相互作用计算模型,他将结构和基础视为耦合体系进行研究,尤其聚焦于地震作用下的动力反应,为该领域的理论与应用发展提供了重要的新视角。地震模拟、地下结构设计和抗震分析等课题的深入研究促使土-结构相互作用理论得到更进一步的探索。

在这一时期,结构动力学和土力学的交叉研究开始兴起,土体和结构的相互作用不再被看作是单纯的静力问题,而是一个复杂的动态问题。许多学者提出了动力土-结构相互作用(DSSI)的理论,并通过理论模型和实验研究揭示了土体在地震作用下的非线性行为。

2.2. SSI 效应的研究方法

通常,研究 SSI 效应的方法主要有两种:子结构法和直接法。子结构法,也称为多步骤法,在这种方法中,土体和结构分别独立求解,之后通过叠加原理将它们的影响结合起来,计算最终的地震反应。由于子结构法依赖叠加原理,因此子结构法的前提条件是假设土体和结构是线性的。目前,针对土体,已经开发了等效线性和非线性数值模型,如用于浅基础的非线性 Winkler 基础模型[6]以及桩基础的非线性弹簧模型[7]。无论基础类型或土壤模型如何,上部结构的非线性行为也可通过简化的本构模型来进行建模[8]。

直接法被认为是研究 SSI 效应的最精确方法, 尤其适用于复杂结构和非线性土体模型的情况。该方法通过将土体和结构一同建模, 并在同一个步骤中求解运动控制方程来进行分析。在建模过程中, 土壤是连续体, 并通过界面接触与基础相连接, 而且要定义适当的边界条件, 以确保散射波不会在穿过边界时产生反射。直接法在处理各种地基类型和线性、非线性土壤模型等复杂 SSI 问题时有较高的准确性。但其计算复杂且分析时间较长。

两种土 - 结构相互作用(SSI)研究方法在精度和效率上存在显著差异。子结构法无需离散半无限土层, 因此计算效率更高, 解决问题所需时间较少, 适用范围广, 常被用于 SSI 分析。同时, 子结构法能够将惯性和运动相互作用分开单独计算, 具有一定灵活性。尽管应用广泛, 但研究发现子结构法在某些情况下会产生较大误差, 例如高估顶部位移和设计基底力[9]并导致较大的层间位移需求。此外, 该方法难以准确处理材料和几何非线性问题[10]。

对于复杂和重要结构, 直接法由于能够同时考虑土体和结构的非线性行为, 提供更高的精度, 但计算成本较高。子结构法在效率和适用性上具有显著优势, 但在复杂非线性问题中的精度较差。直接法尽管成本高昂, 却适合复杂结构的精确分析。未来需要针对子结构法的局限性开展更多研究, 以优化其在 SSI 问题中的表现。图 2 概述了 SSI 问题的技术和方法。

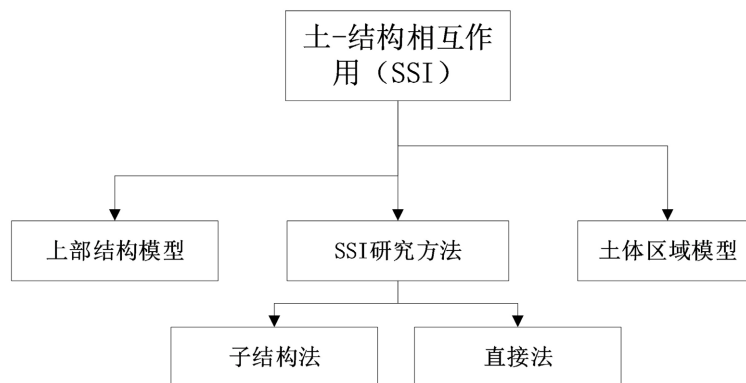


Figure 2. Techniques and methods for SSI problems
图 2. SSI 问题的技术和方法

2.3. SSI 效应的计算方法

解决 SSI 问题有三种常用的计算方法, 即有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)和边界元法(BEM)。20 世纪 70 年代, 有限元法(FEM)作为一种强有力的数值分析工具被引入到土 - 结构相互作用的研究中。这一时期, 有限元法逐渐成为土 - 结构相互作用分析的主要工具。通过将土体、基础和结构离散化为有限单元, 研究人员能够模拟土体与结构之间的耦合效应, 分析动态荷载作用下的结构响应。Idriss [11]研究了 SSI 效应的有限元分析方法(FEM), 并在此基础上研究了土体对结构的动态响应影响。有限元法的应用使得 SSI 效应的分析更加精准, 能够处理复杂的土层、非线性土体行为以及不同类型基础的影响。

为降低计算成本并提高求解稳健性, 研究人员开发了耦合方法。Stevens 和 Krauthammer [12]提出了 FEM 与有限差分法(FDM)的混合分析技术, 其中 FDM 适用于处理非线性和大应变变形的波传播, 而 FEM 用于分析结构响应。该混合方法平衡了精度和计算工作量, 但 FEM 在处理无界介质时存在局限。Godbole [13]等人采用无限单元与有限单元耦合, 解决了静力 SSI 分析中的无界介质问题。

继 FEM 之后, 边界元法(BEM)作为一种新的数值方法被发展起来。Wolf 和 Darbre [14]指出, 在不同的边界元法(BEM)中, 间接 BEM 法的计算结果较为准确, 并且能够保持土体动刚度矩阵的对称性, 同时

便于计算荷载引起的位移。Çelebi [15]等人采用频域 BEM 分析了刚性基础的动力响应,建立了面支基础和预埋基础的阻抗函数,在多个振动模式下得到了数值解与解析解的一致性。

BEM 法也与有限元法(FEM)结合使用,解决了各种土-结构相互作用(SSl)问题,如 DSSI 瞬态分析和耦合剪力墙的分析。Wang [16]通过耦合边界元法和有限元法,研究了三维地基-土相互作用,土体通过边界元表示,确保了土-结构界面的平衡与连续性。此外,BEM 法不适用于非均质和各向异性介质,且控制微分方程的解析解往往难以获得。为此,Wegner 等[17]开发了结合有限元法与边界元法优势的尺度边界有限元法(SB-FEM),作为一种半解析方法。

FEM 因其强大的模拟能力,成为 SSI 效应计算的核心方法,但在计算效率和无界介质处理方面存在局限。单一方法难以全面覆盖复杂的 SSI 问题,多方法结合(如 FEM 与 FDM、BEM 与 FEM)能够综合各自优势,提高计算效率和精度。所以解决 SSI 问题的关键在于结合多种数值方法的特点和优势,通过技术创新和方法耦合,突破传统方法的局限性,推动分析精度和效率的提升。

3. 考虑 SSI 效应的输电塔地震响应研究

目前,对考虑 SSI 效应的输电塔地震响应研究,多集中于数值模拟领域,输电塔作为一种高耸结构与传统建筑结构相比,其对 SSI 效应的反应更敏感,国内外学者对考虑 SSI 效应的输电塔地震响应开展了下列研究。

3.1. 输电塔地震分析简化模型

目前多数考虑 SSI 效应的研究采用直接法,通过将土体和结构一同建模分析,直接法是研究 SSI 效应最精准的方法,但是直接法由于计算模型较为复杂,对计算资源的消耗较大,尤其是进行地震响应研究。所以为了提高输电塔地震响应计算效率,许多学者提出了简化模型。刘兴龙[18]将地基土用一系列弹簧和阻尼器等效,用弹簧模拟地基土的等效刚度,用阻尼器考虑地基土的耗能特性。大幅提高计算效率,并将简化模型的结果与完整模型进行对比,简化模型与整体模型相比差值较小,均在 3%左右。汪之松[19],王磊[20]将输电塔的上部结构简化为较为典型的多质点力学模型,将塔底基础简化为具有等效质量和等效转动惯量的集中质点。采用 S-R (Swaying-Rocking)模型来考虑地震作用下地基土对结构动力响应的影响。并且推导出输电塔简化模型体系的震动运动方程,该简化模型具有较高的精度和计算效率。徐静[21]在有限元软件 ANSYS 中采用实体单元建立精细模型来模拟地基和基础,明确了场地对输电塔自振特性和动力响应的影响;改进了利用弹簧和阻尼模拟下部结构的方法,简化模型与精细模型之间的最大误差不超过 5.5%。通过简化模型计算出的相互作用增量可以用于快速评估 SSI 效应对系统响应的影响。

因此,简化模型作为一种有效的替代方案,能够在保证较高精度的同时显著提高计算效率。这些简化方法为地震响应分析中的输电塔 SSI 效应研究提供了更为高效的计算手段。

3.2. 输电塔 SSI 效应多维地震研究

多维地震是指地震运动同时包含多个方向的分量,通常包括水平(X 和 Y 方向)和竖直(Z 方向)的加速度分量,以及可能的旋转分量。多维地震的描述更加全面和真实,能够更好地反映地震时地基的复杂运动特性。这些分量一起作用于结构时,会导致结构产生更复杂的响应。相比于单一方向的地震,多维地震能够更准确地反映出地震对结构的综合影响,尤其是对于不对称结构或复杂结构。魏文晖[22][23]采用有限元方法建立考虑 SSI 效应的输电塔模型,分析了在不同场地条件下多维地震(包括水平和摇摆分量)对输电塔的动力响应。研究发现,地震动的摇摆分量会显著影响输电塔的响应,尤其是在软土条件下,这种影响更为显著。考虑水平和摇摆分量的耦合作用会增大塔顶的位移和加速度响应,同时土体越软,

摇摆分量对结构的不利影响越大。袁超[24],周翔[25]的研究结果表明:输电塔在考虑了SSI效应后,摇摆地震动将进一步增大结构的动力响应,增大的幅度会随着土质变软而增大。

多维地震,包括水平和摇摆分量,在考虑SSI效应时对输电塔的动力响应有重要影响。特别是在软土条件下,摇摆分量的影响更为显著,导致结构响应的增大。多维地震的分析能够更全面地评估地震对输电塔的综合影响,为复杂结构的抗震设计提供更为精确的依据。

3.3. 输电塔 SSI 效应地震倒塌易损性研究

传统抗震分析中未考虑土-结构相互作用,可能低估输电塔的地震响应,进而高估其抗倒塌能力。田利[26]通过增量动力分析(IDA)方法,考虑SSI后,输电塔的地震响应增加,自振频率降低,抗倒塌能力减弱。因此,考虑SSI能够更准确地评估输电塔的倒塌风险,从而确保输电系统的安全性。刘凯悦[27]进一步分析了土层变化地震动下SSI的影响,分析表明,土层变化地震动显著影响了输电塔的动力特性、倒塌模式以及损伤分布位置。通过增量动力分析,明确了SSI和土层变化地震动对不同性能状态下倒塌易损性的影响,提出了结构在不同条件下的超越概率和地震损失评估。李兴建[28]研究了地震动一致输入和行波输入条件下输电塔-线体系的倒塌破坏。考虑SSI后,行波效应对倒塌模式的影响显著,特别是对输电塔-线体系的极限承载力和失效杆件位置产生了重要影响。输电塔的薄弱部位受地震激励下的行波效应影响较大,而SSI效应和行波效应的耦合会进一步增加倒塌风险。因此,在评估倒塌易损性时,应充分考虑地震动的输入方式及SSI效应的综合影响。

考虑SSI效应可以更准确地评估输电塔在地震中的倒塌风险,因为SSI不仅影响塔的地震响应,还改变其自振特性、倒塌模式和损伤分布。研究表明,地震动输入方式(如行波效应)与SSI效应的耦合会显著增加倒塌风险,强调在倒塌易损性评估中必须综合考虑这两者的影响。

3.4. 场地条件对输电塔地震响应的影响

场地条件是影响输电塔在地震作用下动力响应的重要因素。尤其是在软土或不均匀土层上,地震波的传播特性会发生显著变化,导致结构的震动响应和破坏模式复杂化。因此,在进行地震响应分析时,必须充分考虑场地的地质和土壤条件,以便准确评估结构在不同地震动下的行为,确保建筑物和基础设施的抗震设计能应对实际的地震风险。输电塔作为高柔性、高耸结构,对地震动的特性和地基条件尤为敏感。并且,输电塔分布范围广,各地质条件区域都有输电塔竖立。所以研究场地条件的影响很有必要。毛龙[29]研究了场地因素对SSI效应的影响,建立了四种场地条件下的输电塔有限元模型,并进行了模态和地震响应分析。结果表明,考虑SSI后,输电塔的周期延长,振型滞后,在软土和中软土条件下,SSI对动力响应的不利影响尤为显著。张琰[30]建立了输电塔-基础-地基相互作用模型,分析了地震作用下相互作用对输电塔动力响应的影响。结果表明:在场地条件较差时,输电塔-基础-地基相互作用显著增加了输电塔的位移和应力,影响不可忽略,应在抗震设计中重点考虑。场地条件作为最直接的影响因素,应当作为输电塔地震响应分析首要考虑的因素,输电塔分布地区广袤,不同地区场地条件不同,充分考虑不同地区的场地条件能为输电塔的抗震设计提供更好的参照。

4. 结论与展望

综上所述,土-结构相互作用和塔-线体系作用是输电塔抗震研究中的关键因素。通过考虑这些因素,可以更准确地预测输电塔在地震作用下的响应,优化抗震设计。当前考虑SSI效应的输电塔抗震研究,主要集中在简化建模方法、多维地震的影响、倒塌易损性分析和场地条件的影响。多维地震和场地条件是影响输电塔动力响应和倒塌易损性的关键因素。通过简化模型优化计算效率、针对不同场地条件

调整抗震设计, 是提升输电塔安全性的重要路径。尽管在考虑 SSI 效应的输电塔抗震研究方面已取得一定进展, 但仍面临诸多挑战。

复杂地质条件与非线性问题: 土体的非线性和复杂地质条件对抗震响应的影响尚未完全掌握, 需要更加精确的建模方法。

多因素耦合分析: 地震、风荷载、土壤液化、结构疲劳等多种因素的耦合作用可能共同影响输电塔的抗震性能, 未来的研究应更全面地考虑这些因素。

输电塔与输电电缆的相互作用也是复杂的, 为了使研究更加贴近真实情况, 要考虑塔-线体系的作用。电缆的非线性振动与塔架的相互作用需要更深入地研究, 尤其是在强震作用下电缆的非线性和弹性恢复行为。

参考文献

- [1] 李振宇, 黄格省. 推动我国能源生产革命的途径分析[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3521-3529.
- [2] 李新民. 全球能源互联网重塑世界能源格局[J]. 青海科技, 2016, 23(2): 36-37.
- [3] Lamb, H.I. (1904) On the Propagation of Tremors Over the Surface of an Elastic Solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, **203**, 1-42.
- [4] Reissner, M.E. (1937) On the Theory of Beams Resting on a Yielding Foundation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **23**, 328-333. <https://doi.org/10.1073/pnas.23.6.328>
- [5] Parmelee, R.A. (1967) Building-Foundation Interaction Effects. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **93**, 131-152. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0000834>
- [6] Raychowdhury, P. (2008) Nonlinear Winkler-Based Shallow Foundation Model for Performance Assessment of Seismically Loaded Structures. PhD Thesis, University of California.
- [7] Boulanger, R.W., Curras, C.J., Kutter, B.L., Wilson, D.W. and Abghari, A. (1999) Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 750-759. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:9\(750\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:9(750))
- [8] Hassani, N., Bararnia, M. and Ghodrati Amiri, G. (2018) Effect of Soil-Structure Interaction on Inelastic Displacement Ratios of Degrading Structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **104**, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.10.004>
- [9] Rahmani, A., Taiebat, M., Liam Finn, W.D. and Ventura, C.E. (2016) Evaluation of Substructuring Method for Seismic Soil-Structure Interaction Analysis of Bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **90**, 112-127. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.013>
- [10] Jabini Asli, S., Saffari, H., Zahedi, M.J. and Saadatnezhad, M. (2019) Comparing the Performance of Substructure and Direct Methods to Estimate the Effect of SSI on Seismic Response of Mid-Rise Structures. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **15**, 81-94. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1597560>
- [11] Idriss, I.M. and Sadigh, K. (1976) Seismic SSI of Nuclear Power Plant Structures. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **102**, 663-682. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0000292>
- [12] Stevens, D.J. and Krauthammer, T. (1988) A Finite Difference/Finite Element Approach to Dynamic Soil-Structure Interaction Modelling. *Computers & Structures*, **29**, 199-205. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(88\)90253-2](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90253-2)
- [13] Godbole, P.N., Viladkar, M.N. and Noorzaei, J. (1990) Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis Using Coupled Finite-Infinite Elements. *Computers & Structures*, **36**, 1089-1096. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(90\)90216-o](https://doi.org/10.1016/0045-7949(90)90216-o)
- [14] Wolf, J.P. and Darbre, G.R. (1984) Dynamic-Stiffness Matrix of Soil by the Boundary-Element Method: Conceptual Aspects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **12**, 385-400. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290120307>
- [15] Çelebi, E., Firat, S. and Çankaya, İ. (2006) The Evaluation of Impedance Functions in the Analysis of Foundations Vibrations Using Boundary Element Method. *Applied Mathematics and Computation*, **173**, 636-667. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.04.006>
- [16] Wang, S. (1992) Coupled Boundary and Finite Elements for Dynamic Structure (3D)-Foundation-Soil Interaction. *Computers & Structures*, **44**, 807-812. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(92\)90465-c](https://doi.org/10.1016/0045-7949(92)90465-c)
- [17] Wegner, J.L., Yao, M.M. and Zhang, X. (2005) Dynamic Wave-Soil-Structure Interaction Analysis in the Time Domain. *Computers & Structures*, **83**, 2206-2214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.04.004>
- [18] 刘兴龙. 考虑 SSI 效应的特高压输电塔线体系风振响应研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.

- [19] 汪之松, 刘兴龙, 武彦君, 等. 考虑 SSI 效应的输电塔-线体系风振响应简化分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 319-327.
- [20] 王磊, 李正良, 王涛. 考虑 SSI 效应的输电塔-线耦合系统抗震可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 192-203.
- [21] 徐静. 考虑 SSI 的输电塔-线体系地震反应分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [22] 魏文晖, 徐辅中, 袁超, 等. 考虑 SSI 效应输电塔线体系多维地震响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(3): 39-45.
- [23] 魏文晖, 徐佩, 周翔, 等. 考虑 SSI 的输电塔在地震摇摆分量下的响应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(8): 46-53.
- [24] 袁超. 地震动摇摆分量和输电塔线体系的多维地震响应研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [25] 周翔. 水平-摇摆地震动作用下土-输电塔体系动力响应研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [26] 田利, 李兴建, 易思银, 等. 地震下考虑桩-土-结构相互作用的输电塔-线体系响应分析[J]. 世界地震工程, 2018, 34(3): 1-11.
- [27] 刘凯悦. 考虑 SSI 的特高压输电塔-线体系地震易损性分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [28] 李兴建. 考虑 SSI 的输电塔-线体系动力响应与倒塌分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [29] 毛龙. 考虑桩-土-结构相互作用的输电塔抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
- [30] 张琰, 王志勇, 邢月龙, 等. 基于输电塔-基础-地基动力相互作用的地震反应分析[C]//《工业建筑》2016 年增刊 II. 北京: 工业建筑杂志社, 2016: 308-311.