

风电基础最近 10 年研究综述

葛兵¹, 赵亮¹, 李沛^{2,3,4*}, 周佰祥^{2,3,4}, 李杰^{2,3,4}, 彭述权⁵

(1. 唐山港通新能服务发展有限公司, 河北 唐山 063611; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;
3. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 4. 天津市水下隧道建设与运维技术重点实验室,
天津 300222; 5. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 风电基础的承载特性、沉降控制及耐久性直接决定风电场的安全运行与服役寿命。当前研究分散于基础选型、荷载分析、沉降预测及材料劣化等孤立领域, 缺乏对“承载-沉降-耐久性”三者耦合关系的系统梳理。文章以 Web of Science 和中国知网最近 10 年文献及现行规范为数据源, 从承载与抗震特性、沉降机理与预测、耐久性退化与防护、大体积混凝土裂缝控制 4 个维度展开系统综述。研究表明: 基础选型已经形成水深驱动的技术路线共识, 15 MW+机组基础设计进入工程实践; API 标准 $p-y$ 曲线对大直径单桩存在初始刚度偏低、极限土抗力偏保守和循环退化系数不匹配 3 方面本质局限; 氯离子点蚀与碳化均匀锈蚀的差异化影响已较明确; 智能温控技术在大体积混凝土裂缝控制中取得实质性进展。在此基础上, 揭示了承载-沉降-耐久性间的内在逻辑链条, 指出了 $p-y$ 曲线修正、桩-土界面循环弱化及多场耦合劣化模型 3 个关键科学问题, 展望了冲刷智能监测、数字孪生运维及深远海漂浮式基础等前沿方向。

关键词: 风力发电; 基础工程; 承载能力; 沉降控制; 耐久性; 研究进展与挑战

中图分类号: U6; U655.54; TU473

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)10-0014-11

doi: 10.7640/zggwjs202610003

Wind turbine foundations: A review of the past decade

Ge Bing¹, Zhao Liang¹, Li Pei^{2,3,4*}, Zhou Baixiang^{2,3,4}, Li Jie^{2,3,4}, Peng Shuquan⁵

(1. Tangshan Gangtong New Energy Service Development Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063611, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300222, China; 5. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Wind turbine foundations directly determine the operational safety and service life of wind farms through their bearing characteristics, settlement control, and durability. Current research remains fragmented across isolated domains such as foundation selection, load analysis, settlement prediction, and material degradation, lacking a systematic examination of the coupling relationships among bearing capacity, settlement, and durability. Drawing on literature from Web of Science and CNKI over the past decade and current design codes, this paper presents a systematic review across four dimensions: bearing and seismic behavior, settlement mechanisms and prediction, durability degradation and protection, and mass concrete crack control. Key findings are as follows: a water-depth-driven technology roadmap for foundation selection has been established, with foundation design for 15 MW+turbines already entering engineering practice; API standard $p-y$ curves exhibit three fundamental limitations for large-diameter monopiles: underestimation of initial stiffness, conservatism in ultimate soil resistance, and mismatch of cyclic degradation coefficients; the distinct impacts of chloride-induced pitting corrosion versus carbonation-induced uniform corrosion have been clarified; and intelligent temperature control technologies have achieved

收稿日期: 2026-06-22 修回日期: 2026-07-31

基金项目: 中交一航局科技研发项目 (2025-QNCX-09)

作者简介: 葛兵 (1984—), 男, 河北衡水人, 高级工程师, 港口航道与海岸工程专业。

*通讯作者: 李沛, E-mail: lipei5@ccccltd.cn

substantial progress in mass concrete crack control. On this basis, the intrinsic logical chain linking bearing capacity, settlement, and durability is elucidated. Three critical scientific challenges are identified: the revision of p - y curves, cyclic degradation of the pile-soil interface, and multi-field coupled deterioration models. The future research directions are also envisioned, including intelligent scour monitoring, digital twin-based operation and management, and deep-sea floating foundations.

Key words: wind power; foundation engineering; bearing capacity; settlement control; durability; advances and challenges

0 引言

风力发电作为清洁能源的重要组成部分，在全球能源结构中的占比持续攀升。根据全球风能理事会(GWEC)的数据：1) 2023—2027 年间，全球风电装机容量预计将达到 680 GW，到 2030 年累计装机容量将上升至 1 221 GW；2) 截至 2023 年底，全球海上风电装机容量已达 75.2 GW，其中中国以 38 GW 的装机容量位居世界首位。随着近海资源的逐渐饱和，海上风电正朝着离岸更远、水深更大(>50 m)、单机容量更大(10~20 MW)的方向发展，即风电产业正向规模化、深远海化和大容量化方向加速迈进。

风电机组单机容量不断增大，塔筒高度和叶片直径持续增加，对其支撑结构提出了更高的要求。风机基础是支撑塔筒、机仓和叶片的关键结构，其造价占整个风机系统成本的 20%~30%，承担着传递竖向荷载(结构自重)、水平荷载(风、浪、流)和弯矩荷载(叶片气动载荷)的关键功能，其承载力、抗震性能、沉降控制、耐久性设计直接关

系到风电机组的运行安全和服役寿命。近年来，国内外学者围绕上述问题开展了大量研究，但尚缺乏对沉降、耐久性及关键挑战的系统性综述。本文基于风电基础类型的选取，依次论述并系统梳理承载与抗震特性、沉降机理、耐久性退化 3 方面的研究进展和逻辑关系，并对未来发展方向进行展望。

1 风电基础类型

风电基础根据安装环境可分为陆上风电基础和海上风电基础 2 大类。

1.1 陆上风电基础类型

陆上风电基础以钢筋混凝土扩展基础(如环形基础、筏板基础)为主，其特点是体积巨大(属于大体积混凝土范畴)，对温度裂缝控制和不均匀沉降控制的要求极为严格；此外，还包括桩基础(如灌注桩、预制桩)和岩石锚杆基础(适用于岩基场地)等形式。陆上风电基础类型对比如表 1 所示，优点及局限性如表 2 所示。

当前国内陆上风电发展趋势显示，随着单机

表 1 陆上风电基础类型对比

Table 1 Comparison of onshore wind turbine foundation types

基础类型	适用地质	适用水深(地下水位)	适用单机容量/MW	埋深(桩长)	相对成本	施工工期/d
扩展基础	承载力 ≥ 150 kPa 的硬塑黏土、密实砂土、碎石土、风化岩	地下水位低于基底，或可降水施工	2~8 (主流 3~6)	埋深 2~4 m，底板直径 15~25 m	100 万~180 万元/台，相对成本低	15~25
桩基础	黏土、淤泥质土、松散砂土、填土等浅层承载力不足的地基	无限制(水下可施工)	不限 (大容量首选)	桩长 15~50 m，桩径 0.6~1.5 m	200 万~400 万元/台，相对成本高	30~60
锚杆基础	中风化及以上岩体，且岩体结构完整、无贯通性裂隙	无严格限制，但锚杆防腐要求高	2~5 (受锚杆数量限制)	杆长 5~15 m，锚入岩体 ≥ 3 m	60 万~120 万元/台，相对成本最低	10~20

表 2 陆上风电基础的优点及局限性

Table 2 Advantages and limitations of onshore wind turbine foundations

基础类型	优点	局限性
扩展基础	1)施工简便，工艺成熟，无需大型专用设备；2)受力明确：以基底压力扩散至地基，设计方法完善；3)质量控制直观，模板+钢筋+混凝土均为常规工序；4)耐久性好，混凝土基础使用寿命可达 50 a 以上	1)对地基承载力的要求较高，软土需换填或者加固；2)大容量风机(≥ 8 MW)基础尺寸过大，经济性差；3)大体积混凝土温度裂缝控制难度大；4)基坑开挖量可达 800~2 000 m ³ ，土方量大
桩基础	1)适应性强，几乎不受浅层地质条件限制；2)承载力高，单桩竖向承载力可达 5 000~15 000 kN；3)抗震性能好，桩身延性优越；4)沉桩施工深度可控，可穿越软土层嵌入持力层	1)施工成本高，需打桩机或钻孔灌注设备；2)灌注桩需泥浆护壁，泥浆处理和排放是环保难题；3)预制桩沉桩振动噪声大，近居民区受限；4)桩-承台连接节点是薄弱环节
锚杆基础	1)充分利用岩体自身强度，材料用量极少；2)混凝土用量约为扩展基础的 1/3~1/5；3)施工速度快，钻机成孔后注浆锚固即可；4)对地表扰动最小，环境友好	1)适用范围窄，仅限于基岩出露或浅埋岩层(覆盖层不大于 3 m)；2)锚杆防腐是长期耐久性的核心难题；3)锚固力取决于岩体质量，裂隙发育岩体不适用；4)锚杆抗拔试验须逐根进行，检测工作量大

容量向 8~10 MW 级持续增大,扩展基础的底板直径已逼近 30 m 极限;大容量风机的陆上基础正逐步从扩展基础转向桩基础(尤其灌注桩+承台方案)。

1.2 海上风电基础类型

海上风电基础类型对比如表 3 所示,优点及局限性如表 4 所示。

表 3 海上风电基础类型对比
Table 3 Comparison of offshore wind turbine foundation types

基础类型	适用水深/m	适用地质	适用单机容量/MW	典型尺寸	相对成本	施工工期	关键施工装备
单桩基础	0~30(最佳 10~25)	砂土、硬黏土、软岩 (SPT $N>15$); 不适用深厚软黏土或浅埋基岩	3~10(商业化成熟)	直径 4~10 m, 壁厚 30~100 mm, 入土深度 20~50 m, 自重 400~1 200 t	中等, 水深 30 m 约 800 万~1 500 万元/台	1~3 d/根 (沉桩)	大型液压锤 (IHCS-3000 型或同等级)
导管架基础	15~80(最佳 30~60)	适应性广(砂土、黏土、成层土、软岩), 对地质变化不敏感	6~20(商业化成熟)	桩径 1.2~3.0 m, 导管架高 30~80 m, 用钢量 500~1 200 t	较高, 水深 50 m 约 1 500 万~3 000 万元/台	5~15 d/座 (吊装+打桩)	大型浮吊船($\geq 2 000$ t 起重能力)
漂浮式基础	>60	海床条件对基础本身约束较小; 系泊锚固系统对土体类型敏感	8~20	排水量 3 000~20 000 t(半潜式); 平台直径 60~100 m	最高, 3 000 万~8 000 万元/台	7~30 d (系泊+调试)	锚作船、大型浮吊船、湿拖拖轮
重力式基础	0~30	适用基岩海床、硬黏土、密实砂土, 承载力 ≥ 200 kPa; 不适用软土	2~12	底板直径 15~30 m, 总重 1 500~4 000 t, 高 5~10 m	中等, 1 000 万~2 000 万元/台	3~7 d (安放+压载)	半潜式重载运输船、大型浮吊
吸力桶基础	10~60	适用砂土、粉土、黏土, 渗透系数适中; 不适用含大粒径卵石或漂石地层	3~15(商业化成熟)	单桶直径 8~15 m, 长径比 0.5~3.0, 自重 200~800 t(含框架)	1 000 万~2 200 万元/台	2~5 d/桶	吸力泵系统、中型浮吊船(1 000~1 600 t)

表 4 海上风电基础的优点及局限性
Table 4 Advantages and limitations of offshore wind turbine foundations

基础类型	优点	局限性
单桩基础	1)结构形式和制造工艺最简单,供应链高度工业化;2)海上安装最快,单桩数小时内完成沉桩;3)构件数量最少,无水下连接或节点;4)设计规范最成熟,全球运行经验积累最丰富;5)冲刷防护技术完善,标准化程度高	1) ≥ 10 MW 风机时,直径-壁厚比达到实际制造极限;2)打桩时噪声排放严重,海洋哺乳动物避区 >20 km;3)对冲刷敏感,冲刷坑深度可超过桩径的 1.5 倍;4)对地质勘察精度极度依赖,存在拒锤或溜桩风险;5)海床含漂石或浅埋基岩时可能无法打入设计深度
导管架基础	1)刚度-重量比优越,空间桁架高效抵抗倾覆力矩;2)适应复杂地质和较深水域,荷载通过多桩分散传递;3)海床基底压力低于单桩,适用于软土地;4)通过冗余实现抗疲劳,多传力路径降低单根构件失效风险;5)已成功应用于 15+MW 风机	1)同等水深用钢量为单桩的 1.3~1.8 倍;2)管节点疲劳是控制性设计条件,应力集中系数达 5~10;3)多项海上工序(吊装、打桩、灌浆)延长天气窗口需求;4)灌浆连接段耐久性 & 长期裂缝监测仍属活跃研究课题;5)水下连接节点多,防腐系统复杂
漂浮式基础	1)水深几乎不受限,摆脱深度依赖型成本增长;2)海床扰动最小,适用于敏感海洋生态系统;3)可在工厂全预制并码头调试,减少海上天气窗口依赖;4)完全可迁移和拆除,具备资产再部署可行性;5)可获取深水区优质风资源(>60 m)	1)成本为固定式基础的 3~5 倍,目前仅靠补贴具备商业可行性;2)系泊缆绳疲劳及合成纤维绳退化需持续监测;3)浮式平台动态电缆设计技术尚不成熟;4)全球范围内能组装大型浮式平台的港口基础设施稀缺;5)低频纵荡和横摇运动影响电能质量并增加叶片疲劳荷载
重力式基础	1)结构的可靠性高,混凝土疲劳性能远优于焊接钢节点;2)对冲刷敏感度低,自重大提供固有抗冲刷能力;3)全生命周期维护成本最低,无需外加电流阴极保护;4)沉箱式可湿拖运输,部分码头预制可行;5)欧洲北海地区超 30 a 成功运行记录	1)自重极大,需专用重载运输船和大型浮吊;2)对不均匀沉降高度敏感,海床整平精度控制技术要求高;3)水深超过 30 m 后尺寸和重量急剧增大,经济性丧失;4)大体积混凝土在海洋环境中的长期耐久性,氯离子渗透、冻融、碱骨料反应;5)限于基岩海床使用,软基需昂贵的换填或地基处理
吸力桶基础	1)静音安装,无打桩噪声,对海洋哺乳动物影响可以忽略;2)可反向注水完全回收,海床可恢复原状,实现绿色拆除;3)安装过程无打桩疲劳损伤,保持钢材完整性;4)安装速度快,海上作业时间大幅缩短;5)在设计水深范围内对深度变化相对不敏感	1)遇漂石、卵石或浅埋硬层时贯入受阻难以处理;2)软黏土中长期循环荷载下桶壁摩擦力退化规律尚未完全探明;3)多桶基础的差异沉降控制难度大;4)低渗透性土体(粉质黏土、细粉土)显著降低负压贯入速度;5)与单桩和导管架相比,全球长期运行基准数据积累较少

单桩基础(适用于水深不大于 30 m 的浅海区域)因施工简便、成本相对较低,是目前海上风电场应用最广泛的基础形式,通常由大直径钢管桩通过锤击或钻孔方式打入海床;导管架基础(适用于水深 30~60 m)在深厚软基或基岩埋藏较深的复

杂地质条件下,可通过增加桩数或采用群桩复合形式满足承载要求;漂浮式基础(适用于水深超过 60 m 的深远海区域)包括半潜式、立柱式(Spar)、张力腿式(TLP)和驳船式 4 种形式;重力式基础(适用于水深不大于 30 m 的海床为岩石、硬黏土

或密实砂土等承载能力较高的地基条件)是一种依靠自身巨大自重抵抗风浪倾覆荷载的浅基础形式;吸力桶基础(适用于水深 10~60 m 的砂土、粉土、黏土及成层土地基,尤其适用于排水条件良好的砂质海床(贯入阻力小)和具有一定强度的正常固结黏土,是一种依靠桶内外水压差实现负压贯入安装、服役期通过桶壁侧摩阻力与桶端阻力联合提供承载力的基础形式。

漂浮式基础是开发深远海风能资源的必由之路^[1]。目前,全球漂浮式风电已进入示范验证向小批量商业化过渡阶段:挪威 Equinor 的 Hywind Scotland(30 MW, 2017 年投运)是全球首个商业化漂浮式风电场,累计发电量已超过 400 GW·h,验证了漂浮式技术的长期可靠性;葡萄牙 WindFloat Atlantic(25 MW, 2020 年投运)采用半潜式基础,运行 4 a 来可用率超过 93%。截至 2025 年底,全球漂浮式风电在建及规划项目总装机已超过 60 GW。

综上所述,海上风电基础发展的总体趋势是:浅水区(<30 m)单桩基础占绝对主导,过渡水深(30~60 m)逐步转向导管架和吸力桶基础,深水区(>60 m)最终过渡至漂浮式平台。这一水深驱动的基础转型与风机单机容量从 3~6 MW 向 15~20 MW 的规模化升级同步推进——风机容量增大使泥面处的倾覆力矩放大 3~5 倍,从根本上重塑了基础选型的计算逻辑。

风电基础类型的选取不仅决定施工工艺和工程造价,更从根本上影响后续各环节的分析框架。单桩基础的承载特性以水平受荷桩分析为核心,其沉降模式主要体现为桩侧摩阻力退化引起的渐进沉降;而重力式/扩展基础的承载安全受基底应力分布和抗倾覆稳定性控制,沉降问题则表现为地基土的不均匀压缩和蠕变。耐久性方面,不同基础类型的腐蚀暴露条件和防护策略也存在系统性差异。以下将按“承载与抗震→沉降与倾斜→耐久性退化”的逻辑顺序分别展开论述,揭示三者之间的内在关联。

2 复杂荷载作用下风电基础承载及抗震特性

2.1 扩展基础悬挑端宽高比限值

现行国家标准 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[2]和行业标准 NB/T 10311—2019《陆上风电场工程风电机组基础设计规范》^[3]规定,简化设计计算时,扩展基础悬挑端的宽高比不宜大于 2.5,以保证基底反力呈线性分布。然而, Wang

等^[4]指出,地基反力的分布形态主要受地基土刚度控制,而非宽高比,这一观点对传统设计假定提出了修正。然而, Wang 等^[4]的研究仅针对砂土地基条件,对于软黏土和成层土地基中宽高比与基底反力分布的关系尚缺乏系统验证,其结论的普适性有待进一步研究。

2.2 荷载影响

海上风电基础在服役期间承受着 3 类荷载的复杂组合:1) 上部结构自重及风荷载产生的竖向压力;2) 波浪、海流产生的水平荷载;3) 叶片气动不平衡及湍流风产生的绕 Z 轴扭矩。Ju 等^[5]指出,传统设计往往低估了扭矩与竖向荷载的组合效应:在湍流风作用下,叶片旋转产生的周期性扭矩通过塔筒传递至桩基,在桩-土界面引发剪切应力;一旦超过土体极限抗剪强度,桩侧摩阻力将丧失,导致桩体发生突发的竖向沉降和过度转动。风电基础在服役期间承受的主要荷载汇总于表 5。

表 5 风电基础主要荷载类型

Table 5 Main load types acting on wind turbine foundations

荷载类型	主要来源	作用方向	分析方法
竖向荷载	上部结构自重、风压竖向分量	竖直向下	静力平衡分析
水平荷载	风荷载、波浪力、海流力	水平方向	Morison 方程/风谱模型
倾覆荷载	风/浪水平力产生的偏心弯矩	绕水平轴旋转	二阶 Stokes 波浪理论
扭矩	叶片气动不平衡、湍流风	绕 Z 轴旋转	CFD(Computational Fluid Dynamics)气动分析
地震荷载	地震动引起的惯性力	多方向	响应谱法/时程分析法

2.3 荷载计算方法

Zhang 等^[6]在其研究中系统分析了海上风电基础承受的竖向、水平及弯矩荷载特征:采用指数函数描述平均风速随高度的变化规律;采用风谱模型结合谐波叠加法模拟脉动风速时程,进而计算作用于叶片和塔筒的风荷载;采用二阶 Stokes 波浪理论和 Morison 方程计算波流荷载。桩-土相互作用建模方面, Ju 等^[5]提出同时考虑剪切(竖向)和扭转(旋转)双自由度的 t - z 弹簧模型,较传统方法有显著改进。El-Bayome 等^[7]研究了 GFRP 筋(Glass Fiber Reinforced Polymer reinforcement)增强纤维混凝土桩的轴弯性能,结果表明 GFRP 筋在受压构件中的承载力贡献约为 3%~14%,略低于钢筋的 12%~16%。Han 等^[8]基于黏聚单元法(CEM:

Cohesive Element Method)结合随机场理论,建立了非均质冰板-结构相互作用的数值模型。

2.4 地震作用

地震作用下饱和砂土液化是海上风电基础面临的重大威胁,可导致地基承载力丧失和桩基破坏。Asgari 等^[9]研究了液化土中桩群的地震响应,分析了桩数、桩位、桩非线性及频率含量的影响,建议在有限桩群设计中应考虑安全系数。Haeri 等^[10]通过大型振动台试验研究了液化诱发侧向扩展下的桩群地震响应,发现桩前土压力取决于桩位,与相邻效应和遮蔽效应密切相关。Motamed 等^[11]对板桩码头后桩群在液化大位移下的响应进行了试验研究,证实桩侧向力具有显著的位置依赖性。Xu 等^[12]通过大型振动台试验对比了液化与

非液化土层中桩群-结构系统的地震响应,揭示液化场地中桩身弯矩显著增大。Zheng 等^[13]采用 3D 并行有限元方法从抗震韧性视角评估了不同桩群配置在液化土中的响应特性。但该研究基于特定场地条件(单一均匀砂层)的数值模拟,对于实际风电场地常见的成层土和倾斜基岩面条件,桩群的液化响应规律可能存在显著差异,模型在复杂地层中的适用性还需更多验证。

2.5 抗震设计

国内风电基础抗震设计主要使用规范(表 6)与 API RP 2A-WSD^[14]和 DNV-ST-0126^[15]等国际规范在设防水准体系、桩基水平承载分析和液化场地处理与强度退化 3 方面的主要差异对比见表 7—表 9。

表 6 国内风电基础抗震设计主要使用规范

Table 6 Primary seismic design codes for wind turbine foundations adopted in China

规范编号	规范名称	使用范围
NB/T 10105—2025	海上风电场工程风电机组基础设计规范	新建、改建和扩建的海上风电场工程风电机组基础
NB/T 11600—2024	风电场工程抗震设计规范	抗震设防烈度 6 度、7 度、8 度和 9 度地区的新建、改建、扩建的陆上和海上风电工程的建(构)筑物
JTS 146—2012	水运工程抗震设计规范	抗震设防烈度 6 度、7 度、8 度和 9 度的港口水工建筑物和船闸水工建筑物的抗震
JTS 147-7—2022	水运工程桩基设计规范	新建、改建和扩建港口工程、通航建筑物、航道整治建筑物、航标工程和船厂水工工程等水运工程的桩基
GB 55002—2021	建筑与市政工程抗震通用规范	抗震设防烈度 6 度及以上地区的各类新建、扩建、改建建筑与市政工程
GB/T 50011—2010(2016 年版)	建筑抗震设计规范	抗震设防烈度 6 度、7 度、8 度和 9 度地区建筑工程

表 7 国内外风电基础抗震设计规范对比(设防水准体系)

Table 7 Comparison of domestic and international seismic design codes for wind turbine foundations (Waterproofing level system)

对比项	API RP 2A-WSD	DNV-ST-0126	NB/T 11600—2024	GB/T 50011—2010(2016 年版)
地震作用分级	Strength Level Earthquake、Abnormal Level Earthquake	Accidental Limit State	三水准设防:多遇地震(小震)、设防地震(中震)、罕遇地震(大震)	三水准设防:多遇地震(小震)、设防地震(中震)、罕遇地震(大震)
设防目标	确保结构不倒塌、关键构件不失效、可修复	确保结构不倒塌、关键构件不失效、可修复	小震不坏、中震可修、大震不倒	小震不坏、中震可修、大震不倒
设计方法	工作应力法+荷载抗力系数法	分项安全系数法	多遇地震下弹性变形验算、罕遇地震下弹塑性变形验算	多遇地震下弹性变形验算、罕遇地震下弹塑性变形验算

表 8 国内外风电基础抗震设计规范对比(桩基水平承载分析)

Table 8 Comparison of domestic and international seismic design codes for wind turbine foundations (Lateral load analysis of pile foundations)

对比项	API RP 2A-WSD	DNV-ST-0126	JTS 147-7—2022	NB/T 10105—2025
理论基础	Matlock 软黏土 p - y 曲线和 Reese 砂土 p - y 曲线	采纳 API 体系并加以修正	采纳 p - y 曲线法,基本沿用 API-Reese-Matlock 体系	采纳 p - y 曲线法,基本沿用 API-Reese-Matlock 体系
大直径桩修正	对 $D>2$ m 的大直径桩修正 API 原始 p - y 曲线,并制定 DNV-RP-C212 ^[16] 专项指南	对 $D>2$ m 的大直径桩修正 API 原始 p - y 曲线,并制定 DNV-RP-C212 专项指南		已关注大直径单桩($D=6\sim 10$ m)修正需求
群桩效应	p -multiplier 方法(折减系数 0.3~0.7 按桩距调整)	考虑群桩影响范围和效率系数	JTS 147-7—2022 有群桩效应折减规定,与 API 基本一致	JTS 147-7—2022 有群桩效应折减规定,与 API 基本一致

表 9 国内外风电基础抗震设计规范对比(液化场地处理与强度退化)

Table 9 Comparison of domestic and international seismic design codes for wind turbine foundations(Liquefaction site treatment and strength degradation)

对比项	API RP 2A-WSD	DNV-ST-0126	GB/T 50011—2010 (2016 年版)	GB 55002—2021	NB/T 11600—2024
液化判 别方法	仅原则性要求场地评估，未 规定具体方法	要求基于 CPT/SPT/剪切 波速进行场地液化潜力 评价	GB/T 50011—2010 制 定 SPT(Standard Penetration Test) 液化判别法	GB 55002—2021 强制要求对于 抗震设防烈度不低于 7 度且地 面下 20 m 范围内存在饱和砂土 和饱和粉土时，应进行液化判别	
循环强 度退化	通过 p -multiplier 折减 p - y 曲 线(0.05~0.50)反映循环荷载 引起的强度退化	更显式考虑循环刚度退 化模型	液化土层桩侧摩阻力/ 桩端阻力乘以折减系数		强调“液化场地需考 虑循环荷载引起的 强度退化效应”
判别 深度		按场地条件确定，无统 一上限		明确规定地面下 20 m 范围为判 别深度	
处理 措施		推荐碎石桩、深层搅拌、 预压排水等；或采用穿 透液化层的大直径桩	根据地基液化等级和抗 震设防类别选用地基抗 液化措施		

如表 7—表 9 所示，在桩基水平承载分析的理论基础方面，国内规范采纳的 p - y 曲线法基本沿用 API RP 2A-Reese-Matlock 体系，而该体系的建立基于直径 ≤ 2 m 的小直径桩的现场试验数据。对于当前海上风电普遍采用的直径 6~10 m 的大直径单桩，API 标准 p - y 曲线的适用性存在以下 3 方面局限：1) 初始刚度偏低，大直径桩的桩前土体破坏模式更接近浅基础的三维楔形体破坏，而非 API 所假定的平面应变水平土弹簧逐层屈服模式，导致标准 p - y 曲线在初始段低估了土抗力刚度^[17-18]；2) 极限土抗力取值偏保守，API 建议的极限土抗力公式未考虑桩径效应和深度效应的耦合影响，对于直径 >5 m 的桩基，实际极限土抗力显著高于 API 计算值，在典型硬黏土地基中可达 API 预测值的约 2.5 倍^[19]；3) 循环退化系数不匹配，API 的循环 p - y 曲线是基于数百次至数千次循环的试验结果，而海上风电基础在全寿命周期内将承受 $10^7\sim 10^8$ 量级的循环荷载，现有循环退化模型能否外推至如此高循环周数尚需充分验证。挪威船级社导则 DNV-RP-C212^[16]，针对上述问题提出了桩径相关修正因子和基于现场 CPT 测试的土抗力标定方法；国内 NB/T 10105—2025《海上风电场工程风电机组基础设计规范》也已关注大直径单桩修正需求，但尚未给出体系化的修正方案和独立的设计曲线。因此，建立适用于大直径单桩的 p - y 曲线体系是当前海上风电基础设计的核心研究课题之一。

在新型结构体系方面，Zhang 等^[20]通过数值模拟研究了轴向压缩比、MECC (Micro-Expansive

Cementitious Composite)高度、混凝土强度、钢管强度、宽厚比和剪跨比对局部 MECC 增强柱抗震性能的影响，并提出了采用快速硬化超高性能混凝土 (UHPC: Ultra-High Performance Concrete) 连接的预制桥墩新型装配方案。Wang 等^[21]研究了局部钢-聚丙烯混合纤维 ECC (Engineered Cementitious Composite) 增强钢管混凝土柱的抗震性能，表明该方案可有效减小结构损伤、提高延性和耗能能力。

上述复杂荷载作用下基础承载特性的分析主要关注强度和稳定性极限状态，而风电基础的另一关键设计控制因素是正常使用极限状态下的变形行为：基础的沉降与倾斜。承载能力不足可导致突发性破坏(强度失效)，而长期循环荷载引起的累积沉降则是一种渐进性损伤(使用性失效)，两者之间存在密切关联：过度的沉降和倾斜不仅直接影响风机运行安全(塔筒垂直度超限、叶片与塔筒碰撞风险增大)，还将通过改变荷载传递路径加速基础结构的疲劳损伤和耐久性退化。以下重点讨论沉降机理、预测方法及主要控制因素。

3 风力发电基础沉降与倾斜

3.1 沉降机理与预测方法

沉降是风力发电基础最主要的失效模式之一，也是基础设计的关键控制指标。无论是海上单桩在竖向荷载与扭矩联合作用下的刺入破坏，还是陆上扩展基础因宽高比过大或地基不均匀引起的不均匀沉降，都会导致风机塔筒倾斜、叶片与塔筒净空减小、疲劳荷载增加，甚至引发整机倾覆。

海上风电基础的沉降主要来源于桩基在长期荷载作用下的竖向位移，按时间发展阶段可分为

瞬时沉降、固结沉降和蠕变沉降3类。对于单桩基础,沉降主要由桩端阻力和桩侧摩阻力共同承担。在长期循环荷载(如波浪、风荷载)作用下,桩周土体可能发生刚度退化与强度衰减,导致累积沉降持续增长。当前沉降预测方法主要包括理

论解析法(如基于弹性理论的 Mindlin 解和荷载传递法)、数值模拟法和经验公式法3大类。此外,机器学习方法近年来已被引入沉降预测领域,为处理多因素耦合的复杂非线性问题提供了新途径。风电基础沉降预测方法的对比分析见表10。

表10 风电基础沉降预测方法对比

Table 10 Comparison of settlement prediction methods for wind turbine foundations

荷载方法	代表性理论/工具	使用条件	优点	局限性
理论解析法	Mindlin 解、荷载传递法;弹性/弹塑性理论	均质地基、简单边界	计算效率高,物理意义明确	难以处理复杂地层和非线性行为
数值模拟法	有限元(FEM)、有限差分(FDM)、离散元(DEM)	复杂地层、多场耦合	可模拟复杂边界和材料非线性	计算成本高,参数标定困难
经验公式法	循环应力比;幂函数/对数模型	特定土类、特定工况	形式简洁,工程实用性强	外推能力有限,缺乏普适性
机器学习法	ANN(Artificial Neural Network)、随机森林(RF)、XGBoost、LSTM(Long Short-Term Memory)	多因素耦合预测	可挖掘非线性映射关系	依赖训练数据质量,物理可解释性弱

实际工程中,建议根据工程阶段和精度需求选用沉降预测方法:

1) 在预可研和初步设计阶段,经验公式法因其参数少、计算简便而广泛采用,但其预测精度受区域性经验系数限制。

2) 在详细设计和施工图阶段,以数值模拟辅以理论解析进行精细化校核。机器学习法的沉降预测精度在部分案例中已优于传统经验公式,但其泛化能力受训练数据集规模和代表性制约。

3.2 沉降影响因素

桩-土相互作用是基础沉降分析的核心问题。影响基础沉降的主要因素可归纳为4类:土体性质(如密实度、含水率、颗粒级配)、荷载特征(如荷载大小、频率、循环次数)、桩基几何参数(如桩径、桩长、长径比)以及环境条件(如波浪、海流、地震)。Guo 等^[22]和 Li 等^[23]的研究表明,长期低幅值循环荷载作用下,软黏土表现出准弹性行为,虽不发生破坏性失效,但累积孔压和永久应变会对结构性能产生显著影响。Jamali 等^[24]对库德岛淤泥(Coode Island Silt)的研究揭示了砂含量对循环荷载下永久应变累积的显著调控作用,且其影响程度与循环应力比密切相关。Ju 等^[25]进一步指出,循环应力比、循环次数、荷载频率和土体特性是影响累积沉降的主要因素。Asgari 等^[26]通过数值模拟研究了碎石桩和桩-钉技术加固液化土层的效果,证实合理布设加固措施可有效抑制液化引起的侧向位移。总体而言,现有沉降影响因素研究多基于单一因素敏感性分析,对于多因素耦

合效应(如循环荷载频率与土体密实度的交互作用、排水条件与加载幅值的联合影响)的定量认识仍显不足,多因素正交试验或响应面法研究值得进一步开展。

3.3 吸力桶基础沉降特征

吸力桶基础的沉降机制更为复杂,主要包括:固结沉降(超孔隙水压力消散引起的土体体积压缩)、蠕变沉降(恒定有效应力下的剪切变形)、循环累积沉降(风浪等循环荷载引起的不可恢复塑性变形)。Zhang 等^[27]通过有限元分析揭示了桶基在长期服役过程中桩-土间的荷载重分配机制。

不均匀沉降会在塔筒与基础连接部位和桩身过渡段引入显著的结构附加应力。这种附加应力将加速焊缝和混凝土的疲劳损伤累积,为氯离子和水分侵入提供更多微观通道,从而显著缩短基础的疲劳寿命和腐蚀耐久年限。与此同时,耐久性退化(如钢筋锈蚀引起的截面削弱和黏结强度下降)又将降低基础的刚度,使同等荷载水平下的沉降量进一步增大,形成“沉降增大→附加应力→耐久性退化→刚度降低→沉降进一步增大”的正反馈循环。以下将系统分析耐久性退化的主要机理、预测方法及防护策略,并重点关注上述耦合效应的定量表征。

4 风力发电基础耐久性

4.1 腐蚀分区与耐久性劣化机理

海上风电基础长期处于高腐蚀性海洋环境,耐久性问题尤为突出。按海洋环境垂向分带,基础结构依次穿越5个腐蚀区带:大气区、飞溅区、潮

差区、全浸区和海泥区，其中飞溅区因氧气供应充足且干湿交替频繁，腐蚀速率最高^[28]。氯离子侵蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性退化的主导因素，可通过空气传播和海水直接接触 2 种途径侵入混

凝土内部，导致混凝土和钢筋的逐渐劣化，最终影响结构的使用寿命等^[29]。海上风电基础各劣化类型的机理、关键影响因素、主要后果及耐久性提升措施汇总于表 11。

表 11 海上风电基础劣化机理与耐久性提升措施

Table 11 Degradation mechanisms and durability enhancement measures for offshore wind turbine foundations

劣化类型	主要机理	关键影响因素	主要后果	耐久性提升措施
氯离子侵蚀	Cl 扩散→钝化膜破坏→钢筋电化学腐蚀	氯离子浓度、温湿度、混凝土孔隙率	钢筋截面减小，延性降低	提高混凝土密实度，增加保护层厚度
混凝土碳化	CO ₂ 与 Ca(OH) ₂ 反应→pH 降低→钢筋脱钝	CO ₂ 浓度、湿度、水胶比	钢筋锈蚀、保护层开裂	矿物掺合料替代，表面涂层防护
冻融循环	孔隙水反复冻融→微裂缝扩展	冻融次数、含水率、含气量	表面剥落，强度衰减	引气剂使用，优化含气量
硫酸盐侵蚀	SO ₄ ²⁻ 与水泥水化产物反应→膨胀性产物	SO ₄ ²⁻ 浓度、水泥矿物组成	混凝土膨胀开裂，强度丧失	采用抗硫酸盐水泥，降低水灰比
冲蚀	水流携带泥沙→混凝土表面磨蚀	流速、泥沙含量、混凝土强度等级	保护层减薄，骨料外露	提高混凝土强度，采用抗冲磨材料
生物腐蚀	微生物代谢产物→混凝土化学侵蚀	微生物种类、溶解氧含量	表面疏松，局部酸化	防污涂层，阴极保护

在钢筋锈蚀的化学驱动力层面，氯离子侵蚀与混凝土碳化存在本质区别：氯离子通过局部破坏钢筋表面钝化膜引发点蚀，腐蚀速率高且集中于局部区域，对钢筋延性和疲劳性能的影响尤为突出；混凝土碳化则是通过大气 CO₂ 与水泥水化产物 Ca(OH)₂ 反应生成 CaCO₃，逐步降低混凝土孔溶液 pH，当碳化深度超过保护层厚度时导致钝化膜失稳，引发均匀锈蚀，其腐蚀速率较慢，对钢筋-混凝土黏结性能的退化影响更为显著。

4.2 腐蚀速率预测方法

准确的腐蚀速率预测是基础寿命评估的核心前提。传统的预测方法包括室内加速试验、现场暴露试验和理论分析 3 类。近年来，机器学习方法在该领域得到了广泛应用：Zhang 等^[30]提出了基于 KPCA-ISHO-LSSVM 的海上风电基础腐蚀速率预测模型；Jiang 等^[31]构建了机器学习驱动的桥梁腐蚀评估本体知识库，为腐蚀预测提供了数据驱动的新范式。

尽管机器学习方法在腐蚀速率预测中展现出良好的拟合精度，但这一技术路线在风电基础领域的工程成熟度仍处于早期探索阶段，存在以下 3 方面约束：

1) 物理可解释性不足。现有机器学习模型（如 LSSVM、随机森林、神经网络）本质上是黑箱或灰箱模型，预测结果难以从腐蚀电化学机理层面加以解释，在工程审查和规范符合性评价中，缺乏可解释性的预测结果往往难以获得审查机构

的认可。

2) 数据需求与可获得性之间的矛盾。高精度机器学习模型通常需要大规模、高质量的训练数据集，但海上风电基础的实际腐蚀监测数据极少公开。现有研究大多依赖实验室加速试验数据或少量公开的海洋平台腐蚀数据集进行训练，其外推至实际海上风电基础的可靠性缺乏充分验证。

3) 与半经验方法相比的优劣。传统半经验腐蚀模型（如幂函数模型、Melchers 的多阶段腐蚀模型）虽精度有限，但参数物理意义明确、外推稳定性好。机器学习模型在特定数据集上的预测精度优于半经验方法，但在数据分布偏移条件下可能出现显著误判。

4.3 氯离子侵蚀对 RC 结构的劣化效应

氯离子侵蚀对钢筋混凝土的劣化效应体现在多个层面：对钢筋而言，不仅导致截面面积减小，还显著降低了延性和屈服强度，诱发脆性断裂^[32]；对混凝土而言，引起保护层剥落和开裂，降低了抗压强度^[33]；对钢筋-混凝土界面而言，显著降低黏结强度^[34-35]；Mangat 等^[36]建立了梁弯曲强度衰减与腐蚀程度之间的定量关系；进一步地，Biondini 等^[37]、Biondini 等^[38]和 Firouzi 等^[39]从结构系统层面揭示了氯离子侵蚀对钢筋混凝土结构抗震性能的显著削弱效应及服役寿命的缩减规律。

4.4 结构耐久性评估方法

结构耐久性评估方法可分为概率方法和确定性方法 2 大类。概率方法通过蒙特卡洛模拟、贝

叶斯推断等技术,综合考虑材料性能、环境作用和荷载的随机性。Rezaie 等^[40]提出了基于贝叶斯推断和最大似然估计的腐蚀 RC 结构地震韧性概率评估框架,利用结构检测数据更新劣化参数,结合机器学习实现非参数最大似然估计,有效降低了评估不确定性。Fang 等^[41]基于数字孪生技术,结合高斯过程代理模型和动态贝叶斯网络,建立了海上平台疲劳裂纹扩展的实时预测方法,为解决腐蚀-疲劳耦合问题提供了新思路。

4.5 混凝土时变性能与长期耐久性

混凝土作为风机基础的主体材料,其时变性能对耐久性评估至关重要。Savin 等^[42]采用试验与数值相结合的方法,研究了长期受荷混凝土构件在动力作用下的非线性黏弹性行为。Levtchitch 等^[43]对服役 20~30 a 混凝土构件的研究表明,其峰值应变从 0.002 降至 0.001 2,且随着应变率从 10^{-6} s^{-1} 增加至 10^{-2} s^{-1} ,混凝土动态强度显著提高,但静态预应力的存在会削弱动态硬化效应。Savin 等^[44]进一步提出了改进的非线性黏弹性模型,融合修正的老化黏弹性模型和修正的 ZWT 模型,可同时考虑长期荷载和龄期对混凝土动态性能的影响;模型参数基于 190 个数值算例的回归分析确定,与试验结果吻合良好($R^2 > 0.9$)。Tian 等^[45]基于机器学习方法建立了 GFRP 筋在碱性环境中残余抗拉强度的预测模型。Elmezayen 等^[46]提出了以非金属织物增强地聚物基体修复箍筋锈蚀 RC 梁的创新方案。此外,基础不均匀沉降引发的上部结构附加内力会加速疲劳损伤积累,进一步加剧整体耐久性退化。

4.6 大体积混凝土裂缝控制

对于陆上风电,大体积混凝土基础的裂缝控制是确保其耐久性的核心环节。裂缝不仅削弱结构承载面积、加速钢筋锈蚀,还将在冻融循环作用下持续扩展,最终导致基础失效。王东龙^[47]将风机基础大体积混凝土裂缝归纳为温度应力裂缝、收缩裂缝、荷载裂缝和沉降裂缝 4 种类型,并提出应从抗裂材料优选、配合比优化设计和施工工艺改进 3 个层面实施综合控制。

在工程实践层面,国内外风电基础大体积混凝土裂缝控制积累了丰富的经验与教训。国内陆上风电项目中,扩展基础底板直径达 25~30 m、单次浇筑方量超过 800 m^3 的案例已不鲜见。典型裂缝问题集中于浇筑后 3~7 d 的温度峰值期和 14~

28 d 的收缩发展期。在欧洲大型海上风电场的基础建造中,普遍采用冰水拌和、预冷骨料和埋管通水冷却等综合温控措施,成功将混凝土内部峰值温度控制在 65 $^{\circ}\text{C}$ 以下。

在智能化温控技术方面,近年来以下技术取得了实质性进展:1) 分布式光纤测温系统(DTS, Distributed Temperature Sensing)可沿基础浇筑层布设,实现空间分辨率达 0.5 m、温度分辨率 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的实时温度场监测,较传统点式热电偶测温有了质的飞跃;2) 智能通水冷却系统通过实时采集温度监测数据,基于预设的温控曲线自动调节冷却水流量和温度,已在多个大型水电工程(如白鹤滩、乌东德水电站)中成功应用;3) 基于水化动力学模型的温度-应力场耦合仿真技术(如 HYMOSTRUC, Hydration Morphology and Structure formation; Du-COM, Durability of Concrete Model)可在施工前进行裂缝风险预测和冷却方案优化,显著减少现场试错成本。

据丹麦能源署技术报告,10 MW 重力式基础底板直径已达 30~40 m,混凝土用量达 3 000~4 000 t,未来 15 MW+机型的基础尺寸和浇筑方量还将进一步增加。裂缝控制面临新的挑战:基础厚度和平面尺寸的增大使内部散热路径更长,体积-表面积比增大导致绝热温升更接近于无限大体积条件,内外温差控制难度显著增加;同时,更大的平面尺寸意味着更高的 L/H (长/高)比,外部约束应力(由基底摩擦力和已有混凝土约束引起)随之增大,收缩裂缝的风险显著上升。

5 结语

本文以 Web of Science 和中国知网近 10 年文献及现行规范为数据源,从承载与抗震特性、沉降机理与预测、耐久性退化与防护、大体积混凝土裂缝控制 4 个维度,系统梳理了风电基础工程的研究进展,揭示了承载-沉降-耐久性三者间的内在逻辑链条。

1) 核心研究进展:基础选型已形成“浅水单桩→过渡水深导管架/吸力桶→深水漂浮式”的水深驱动技术路线共识,15 MW+机组基础设计进入工程实践;多自由度弹簧模型与三维连续介质方法成为水平-弯矩-扭矩联合承载分析的主流方法;基于 CPT 的 $t-z$ 曲线标定与循环累积沉降数值模拟推动沉降预测走向工程化应用;氯离子侵蚀机理与概率寿命评估框架趋于成熟,智能温控技术

在大体积混凝土裂缝控制中取得实质进展。

2) 关键科学问题与知识空白: 一是循环荷载下桩-土界面渐进弱化与多因素耦合(循环应力比、频率、排水条件、土体各向异性)的累积沉降预测仍缺乏可靠模型; 二是裂缝-氯离子侵蚀-冻融循环的多场耦合劣化机理与长期性能预测方法尚不完善; 三是 API 标准 p - y 曲线对大直径单桩存在初始刚度偏低、极限土抗力偏保守与循环退化系数不匹配 3 方面本质局限, 桩-土相互作用模型亟待修正。

3) 未来研究方向与技术展望: 发展基于光纤光栅与分布式声学传感的冲刷智能监测, 结合数字孪生平台实现冲刷风险的动态评估与预警; 构建“物理层—模型层—决策层”融合的数字孪生体系, 突破多源异构数据融合、模型实时降阶与预测性维护等瓶颈; 面向深远海漂浮式基础, 攻关模块化设计、轻质高强材料与智能系泊系统以降低平准化度电成本; 探索岩土工程大模型在风电基础场址评估、参数反演与沉降预测中的应用。

参考文献:

- [1] 颜求智. 漂浮式风机基础结构研究综述[J]. 中国水运, 2026(5): 132-134.
Yan Q Z. A review of research on floating wind turbine foundation structures[J]. China Water Transport, 2026(5): 132-134.
- [2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S].
- [3] NB/T 10311—2019 陆上风电场工程风电机组基础设计规范[S].
NB/T 10311—2019 Code for design of wind turbine foundations for onshore wind power projects[S].
- [4] Wang H, Zhang X, Hao H, et al. Sustainable design optimization and bearing capacity analysis of large width-to-height ratio in dandy soil[J]. Sustainability, 2025, 17(21): 9820.
- [5] Ju S H, Chiu C S, Hsu H H. Studying the settlement of OWT monopile foundations using a T-Z spring with the torsional effect [J]. Processes, 2023, 11(2): 490.
- [6] Zhang X L, Liu J X, Han Y, et al. A framework for evaluating the bearing capacity of offshore wind power foundation under complex loadings[J]. Applied Ocean Research, 2018, 80: 66-78.
- [7] El-Bayome E, Hassanli R, Zhuge Y, et al. Analytical investigation of axial-moment interaction behaviour of GFRP-RC piles made of high-strength and ultra-high-performance concrete[J]. Structures, 2025, 74: 108493.
- [8] Han S, Yang B, Yang B, et al. Numerical simulation of heterogeneous ice sheet-structure interaction based on cohesive element method[J]. Applied Ocean Research, 2024, 145: 103942.
- [9] Asgari A, Ranjbar F, Bagheri M. Seismic resilience of pile groups to lateral spreading in liquefiable soils: 3D parallel finite element modeling[J]. Structures, 2025, 74: 108578.
- [10] Haeri S M, Rajabigol M, Salaripour S, et al. Effects of physical modeling boundary conditions on the responses of 3×3 pile groups to liquefaction induced lateral spreading[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2023, 21: 2469-2502.
- [11] Motamed R, Sesov V, Towhata I, et al. Experimental modeling of large pile groups in sloping ground subjected to liquefaction-induced lateral flow: 1-G shaking table tests[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(2): 261-279.
- [12] Xu C S, Dou P F, Du X L, et al. Seismic performance of pile group-structure system in liquefiable and non-liquefiable soil from large-scale shake table tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 138: 106299.
- [13] Zheng G, Zhang W B, Zhou H Z, et al. 3D Numerical modeling of the inertial and kinematic interactions of inclined pile groups in liquefiable soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(8): 04024172.
- [14] API RP 2A-WSD Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms: Working stress design[S]. 22nd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2014.
- [15] DNV-ST-0126 Support structures for wind turbines[S]. Oslo: DNV AS, 2021.
- [16] DNV-RP-C212 Offshore soil mechanics and geotechnical engineering[S]. 2019-09 ed. Oslo: DNV GL AS, 2019.
- [17] Achmus M, Kuo Y S, Abdel-Rahman K. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 725-735.
- [18] Kallehave D, Thilsted C L, Liingaard M A. Modification of the API p - y formulation of initial stiffness of sand[C]//Proceedings of the 7th international conference on offshore site investigation and geotechnics. 2012: SUT-OSIG-12-50.
- [19] Byrne B W, Houlsby G T, Burd H J, et al. PISA design model for monopiles for offshore wind turbines: Application to a stiff glacial clay till[J]. Géotechnique, 2019, 70(11): 1030-1047.
- [20] Zhang Z, Guo F Y, Gao J D, et al. Seismic performance of an innovative prefabricated bridge pier using rapid hardening ultra-high performance concrete[J]. Structures, 2025, 74: 108558.
- [21] Wang F M, Yu C Y, Huang A S, et al. Seismic performance of local steel-polypropylene mixed fiber ECC-reinforced CFST columns[J]. Structures, 2025, 74: 108428.
- [22] Guo L, Wang J, Cai Y Q, et al. Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50(7): 28-37.
- [23] Li Q L, Ling X Z, Sheng D C. Elasto-plastic behaviour of frozen soil subjected to long-term low-level repeated loading, Part I: Experimental investigation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 125: 138-151.
- [24] Jamali H, Tolooiyan A, Dehghani M, et al. Long-term dynamic behaviour of Coode Island Silt (CIS) containing different sand content [J]. Applied Ocean Research, 2018, 73(8): 59-69.
- [25] Ju S H, Chiu C S, Hsu H H, et al. Studying the settlement of OWT

- monopile foundations using a T-Z spring with the torsional effect[J]. *Processes*, 2023, 11(2): 490.
- [26] Asgari A, Oliaei M, Bagheri M. Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pin-nig techniques[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 51: 77–96.
- [27] Zhang Y H, Zhao S F, Zhou H J, et al. Long-term settlement of suction bucket foundations supporting offshore wind turbines in clay[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 145: 103932.
- [28] Melchers R E. Predicting long-term corrosion of metal alloys in physical infrastructure[J]. *Materials Degradation*, 2019, 3(1): 4.
- [29] Rezaie S, Khalighi M, Bahrami J, et al. On the integration of inspection data with seismic resilience assessment of corroded reinforced concrete structures[J]. *Engineering Structures*, 2024, 308: 117974.
- [30] Zhang F, Zhang F, Zou H B, et al. Offshore wind power foundation corrosion rate prediction model based on improved SHO algorithm[J]. *Processes*, 2024, 12(6): 1215.
- [31] Jiang Y, Li H, Yang G, et al. Machine learning-driven ontological knowledge base for bridge corrosion evaluation[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 144735–144746.
- [32] Almusallam A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2001, 15(8): 361–368.
- [33] Vidal T, Castel A, François R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(1): 165–174.
- [34] Bhargava K, Ghosh A K, Mori Y, et al. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete: Analytical and empirical models[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(11): 1140–1157.
- [35] Al-Sulaimani G J, Kaleemullah M, Basunbul I A, et al. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members[J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(2): 220–231.
- [36] Mangat P, Elgarf M S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement[J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(1): 149–158.
- [37] Biondini F, Camnasio E, Palermo A. Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(7): 880–900.
- [38] Biondini F, Palermo A, Toniolo G. Seismic performance of concrete structures exposed to corrosion: case studies of low-rise precast buildings[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(1–2): 109–119.
- [39] Firouzi A, Abdolhosseini M, Ayazian R. Service life prediction of corrosion-affected reinforced concrete columns based on time-dependent reliability analysis[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 117: 104944.
- [40] Rezaie S, Khalighi M, Mirzaei Z, et al. Probabilistic assessment of seismic resilience for corroded RC-structures using Bayesian inference and maximum likelihood estimation[J]. *Structures*, 2025, 74: 108586.
- [41] Fang X, Wang H H, Li W J, et al. Fatigue crack growth prediction method for offshore platform based on digital twin[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110320.
- [42] Savin S Y, Sharipov M Z, Moskovtseva V S. Experimental and theoretical study of the performance of long-term loaded reinforced concrete members in compression under dynamic action[J]. *Building and Reconstruction*, 2025, 2(118): 65–80.
- [43] Levitchich V, Kvasha V, Boussalis H, et al. Seismic performance capacities of old concrete[C]//13th world conference on earthquake engineering. 2004: No. 2182.
- [44] Savin S Y, Sharipov M Z. Nonlinear visco-elastic behavior of concrete under static-dynamic loading: Experimental and numerical studies[J]. *Structures*, 2025, 74: 108496.
- [45] Tian L Y, Wang L C, Xian G J. Machine learning prediction of residual tensile strength of glass fiber reinforced polymer bars in alkaline environments[J]. *Structures*, 2025, 74: 108552.
- [46] Elmezayen Y, El-Hassan H, El-Maaddawy T. Nonmetallic fabric-reinforced geopolymers for rehabilitation of reinforced concrete beams with corroded stirrups[J]. *Structures*, 2025, 74: 108500.
- [47] 王东龙. 陆上风力发电风机基础中大体积混凝土浇筑及裂缝控制技术[C]//江西省汽车工程学会, 江西省工程师联合会. 工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(二). 2025: 575–578.
- Wang D L. Research on mass concrete pouring and crack control technology for onshore wind turbine foundations[C]//Jiangxi Society of Automotive Engineering, Jiangxi Engineers Federation. Proceedings of symposium on engineering technology and new energy economy (Volume II). 2025: 575–578.