

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.056



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



空间变异性砂土地基中柔性单桩的水平承载性能与可靠度分析

全亚刚¹, 张云飞², 王晨迪¹, 陈莹洁¹, 易江涛²

(1. 青海省交通建设管理有限公司, 西宁 810021; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 受沉积过程、地质历史及环境因素的综合影响, 岩土材料在空间分布上具有显著的非均质性。传统的水平受荷桩设计方法通常将土体参数简化为空间均质常量, 并采用理想化模型分析, 常导致桩基水平承载力的高估或低估。采用随机有限元方法, 选取砂土内摩擦角作为关键随机变量, 系统研究其空间变异性(通过变异系数、水平自相关距离及竖向自相关距离表征)对柔性单桩水平承载力特性及失效概率的影响规律。结果表明: 砂土内摩擦角的空间变异性对桩基水平承载力影响显著。随着内摩擦角变异系数与竖向自相关距离的增大, 水平极限承载力均值显著降低, 而其变异系数同步增大, 表明土体空间变异性不仅降低了承载力的平均水平, 还增大了其离散性; 在考察的7种典型空间变异参数组合下, 柔性单桩的失效概率均超过50%; 基于分析结果建立了安全系数与失效概率之间的定量关系式。

关键词: 单桩基础; 随机场; 土体空间变异性; 水平承载性能; 可靠度分析

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Analysis of lateral bearing behavior and reliability for flexible monopiles in spatially variable sandy soils

TONG Yagang¹, ZHANG Yunfei², WANG Chendi¹, CHEN Yingjie¹, YI Jiangtao²

(1. Qinghai Provincial Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining 810021, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Influenced by sedimentation processes, geological history, and environmental factors, geomaterials exhibit significant spatial heterogeneity. Traditional design methods for laterally loaded monopiles typically simplify soil parameters as spatially homogeneous constants and employ idealized analytical models, frequently leading to overestimation or underestimation of the horizontal bearing capacity of monopiles. This study adopts the random finite element method, selecting the internal friction angle of sand as the key random variable, to

收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 青海省重点研发与转化计划(2025-GX-147); 青海省交通建设管理有限公司科研项目(JJ-2023-00983); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1288)

作者简介: 全亚刚(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程和公路工程研究, E-mail: 9183734@qq.com。

易江涛(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yijt@foxmail.com。

Received: 2024-12-27

Foundation items: Qinghai Province Key Research and Transformation Program (No. 2025-GX-147); Qinghai Province Transportation Construction Management Co., Ltd. Research Project (No. JJ-2023-00983); Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2022NSCQ-MSX1288)

Author brief: TONG Yagang (1980-), senior engineer, main research interests: geotechnical engineering and highway engineering management, E-mail: 9183734@qq.com.

YI Jiangtao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yijt@foxmail.com.

systematically investigate the influence of its spatial variability – characterized by the coefficient of variation, horizontal autocorrelation distance, and vertical autocorrelation distance – on the horizontal bearing behavior and probability of failure of flexible monopiles. Results demonstrate that the spatial variability of the sand's internal friction angle significantly affects the horizontal bearing capacity of monopiles. As the coefficient of variation of the internal friction angle and the vertical autocorrelation distance increase, the mean ultimate horizontal bearing capacity decreases markedly while its coefficient of variation increases correspondingly. This confirms that soil spatial variability not only reduces the average bearing capacity but also increases its dispersion. For all seven typical spatial variability parameter combinations examined, the probability of failure for flexible monopiles exceeded 50%. Based on the analytical results, a quantitative relationship between the safety factor and the probability of failure was established.

Keywords: monopile foundation; random field; soil spatial variability; lateral bearing capacity; reliability analysis

作为现代土木工程中关键的基础承载形式,桩基的力学性能直接影响桥梁、高层建筑、海上平台及输电线路等重大工程的安全性。当前工程实践中桩基的设计方法主要基于确定性理论框架^[1-2],其核心假设是将土体参数简化为空间均质常量,并采用理想化的计算模型进行分析。然而,大量现场勘测数据表明^[3-5],受沉积过程、地质历史及环境作用等因素的影响,天然土体力学参数,如砂土内摩擦角、黏土不排水抗剪强度和压缩模量,在空间分布上呈现显著的非均质性。其中,砂土内摩擦角作为影响砂土地基稳定性与承载力的核心参数,不仅存在显著的空间变异性,还具有复杂的空间自相关特征^[6-8]。忽视空间变异性可能导致两类设计风险^[9-10]:一方面,可能高估地基承载力,从而使基础设计偏于不安全(如 Dogger Bank 海上风电项目);另一方面,过度保守的设计可能显著提高工程造价(如美国旧金山湾 Treasure Island 码头扩建项目)。因此,针对具体问题开展能够量化土体空间变异性影响的可靠度分析,对于实现基础设计在安全性与经济性之间的最优平衡具有重要的理论价值和工程意义。

近年来,随着土体空间变异性的研究逐渐深入。岩土体材料的空间变异性在边坡稳定性^[11-14]、浅基础^[15-16]及深基础^[17-20]的研究中已得到广泛探讨。然而,在桩基承载特性研究中,相关成果仍显不足。近年来,一些学者在该领域取得了显著进展。仇文岗等^[14]的研究表明,忽略岩土体参数的空间变异性将高估边坡的失效概率和抗滑桩体的最大弯矩值。赵春风等^[17]基于静力触探试验(CPT)确定桩基竖向抗压承载力的可靠度指标及其统计特性,为桩基竖向承载力的可靠度评估提供了新的理论框架。Haldar 等^[18]则聚焦水平受荷桩基,应用随机场理论对其承载力进行可靠度分析,揭示了土体参数空间

变异性对水平承载性能的显著影响。此外,Teixeira 等^[19]采用一阶可靠度法和蒙特卡罗模拟方法,明确了不同土体参数对桩基可靠度的贡献程度。Depina 等^[20]通过研究发现,增加桩基埋置深度能有效降低响应的平均值和方差,从而显著提升单桩在正常使用极限状态和承载极限状态下的可靠性。Orakci 等^[21]研究了内摩擦角变异性对单桩失效概率的影响,指出过大的内摩擦角变异系数会导致单桩失效概率显著增加。刘润等^[22]通过可靠度分析方法评估了渤海海域桩基础的稳定性,为类似海洋工程桩基设计提供了重要参考。

尽管桩基可靠度分析领域已取得颇为显著的进展,但当前研究仍存在若干局限性。目前,多数研究主要聚焦于特定区域或特定荷载条件下桩基的可靠度分析,尚未系统性阐明砂土内摩擦角空间变异性对大直径柔性桩水平承载特性的影响机理与规律。此外,针对砂土地基中桩基水平承载特性的可靠度研究^[21-22]多局限于失效概率的定性分析,缺乏可直接应用于工程设计的定量可靠度评估方法。随着大直径柔性桩在海上风电导管架基础中的大规模应用,解决上述问题已刻不容缓。鉴于此,笔者采用拉格朗日有限元法结合改进的线性插值随机场生成技术,并基于蒙特卡罗模拟,系统探究砂土内摩擦角空间变异性对水平受荷桩承载性能的影响,研究深入剖析砂土内摩擦角空间变异性对柔性单桩水平承载特性的作用机制,重点揭示砂土空间变异系数、水平相关距离及竖向相关距离对柔性单桩水平承载能力与失效概率的影响规律。尤为关键的是,创新性地建立了安全系数与失效概率之间的显式函数关系,为水平受荷桩的可靠度设计计算提供了坚实的理论依据和可行的工程解决方案。

1 有限元模型和随机场模拟

1.1 有限元模型和分析步设置

运用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,基于拉格朗日有限元方法构建起三维桩-土相互作用模型。图 1 为该模型的几何尺寸以及相关参数。

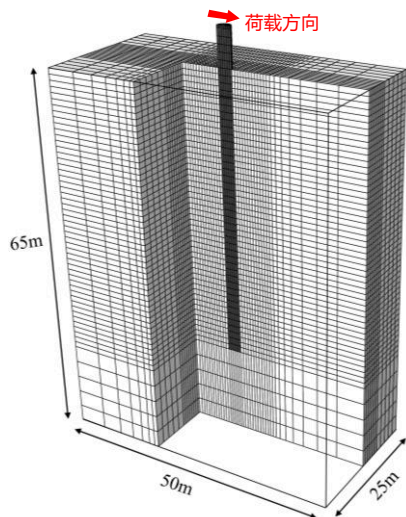


图 1 有限元模型及网格划分

Fig.1 Finite element model and mesh discretization

为了便于对模型进行验证,模型的主要尺寸与 Zhu 等^[23]开展的离心机试验模型保持一致。具体而言,桩基直径为 $D=2.5$ m,埋深为 $L=50$ m,水平荷载作用高度为 $h=6.75$ m。土体模型尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 深 $=50$ m $\times$ 25 m $\times$ 65 m。现有数值研究和离心机试验^[24]表明,桩与边界不小于 $6D$,模型桩距离底部边界不小于 $2D$,即可消除边界效应^[25]。

桩和土体均采用八节点线性拉格朗日单元进行离散化处理。为提高计算效率并确保精度,土体采用分级网格划分策略:在邻近桩体区域布置细密网格(水平方向 $0.25D$,竖向 $0.4D$),以精确模拟桩周土体的应力集中和变形特征;远场区域则采用较疏网格以降低计算成本。网格敏感性分析结果显

示,当网格密度和模型尺寸加倍时,荷载-位移曲线的变化幅度小于 5%,证实当前网格方案能有效消除边界效应并保证计算精度^[25]。

土体本构模型采用经典的摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型,以模拟砂土的弹塑性力学行为。摩尔-库伦模型能够较好地描述砂土在剪切过程中的应力-应变关系,其强度参数包括内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。在模型验证阶段,参考 Zhu 等^[23]的离心机试验数据,将内摩擦角设为确定性参数 $\varphi=37.7^\circ$ (对应福建标准砂的实测值)。在随机有限元分析中,内摩擦角 φ 被设为独立随机变量,服从对数正态分布,其均值 μ_φ 保持为 37.7° 。为反映砂土的无黏性特征,模型中黏聚力 c 取值为 0.1 kPa。此外,为真实反映砂土压缩模量 E_s 的应力依赖特征,采用非线性关系^[26]描述 E_s 随应力的变化规律,其具体表达式为

$$E_s = \bar{K} p_{\text{atm}} \left(\frac{\sigma_m}{p_{\text{atm}}} \right)^{\bar{n}} \quad (1)$$

式中: σ_m 为平均主应力; p_{atm} 为标准大气压力值,取 100 kPa;刘晋超等^[27]建议中等密实福建砂中 $\bar{K}$ 、 $\bar{n}$ 分别取 560 、 0.6 。该非线性关系能有效模拟土体弹性模量随围压增加而增大的特性,从而更真实地反映土体的实际力学行为。在 ABAQUS 有限元软件中实现上述模量随应力非线性发展的复杂关系,需要通过用户子程序(USDFLD)与场变量耦合来完成。具体实施步骤如下:1)在 ABAQUS 材料属性模块中,将压缩模量 E_s 定义为场变量 F_v 的函数;2)在 USDFLD 用户子程序中,通过调用功能子程序提取单元积分点的 6 个应力分量,计算平均应力 σ_m ,并将其赋值给场变量 F_v ;3)将 USDFLD 子程序与 ABAQUS 的拉格朗日有限元分析模块进行关联。在计算过程中,场变量 F_v 会在每个迭代步自动更新,并同步更新 E_s 值,从而准确反映材料的非线性行为。除上述参数外,其余土体材料参数见表 1。

表 1 土体参数取值

Table 1 Soil parameter values

有效重度 $\gamma'/$ (kN/m ³)	剪胀角 $\psi/(^\circ)$	黏聚力 c /kPa	泊松比	水平空间相关距离 θ_h/m	垂直方向相关距离 θ_v/m	内摩擦角变异系数 COV _{φ}
9.36	2.9	0.1	0.21	5~80	1.2~4	0.05~0.15

桩体设置为实心桩,采用线弹性本构模型进行模拟,其截面抗弯刚度为 $E_p I_p = 56.66$ GN $\cdot$ m²。线弹性模型假设桩体在受力过程中始终处于弹性变形阶段,适用于模拟桩基在正常工作状态下的力学行为。

桩-土相互作用采用通用接触模型进行模拟,其中法向行为设置为“硬接触”准则,允许接触面分

离;切向行为通过罚函数算法定义,界面摩擦系数取值为 $\mu = \tan(0.75\varphi)$ ^[27]。研究表明^[28],这一接触模型设置能够准确表征桩-土界面的力学特性,有效模拟桩基水平承载性能,展现出良好的计算精度和可靠性。

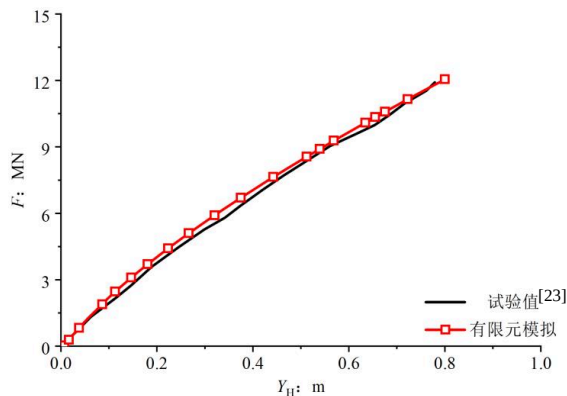
在模拟过程中,不考虑单桩的安装过程,假设桩体预先埋置于土体中。分析分为两个步骤:第 1

步为地应力平衡分析(Static, General),通过施加重力荷载实现土体的初始应力平衡,并通过土体位移场验证边界条件及荷载施加的正确性;第2步为水平受荷分析(Static, General),在桩头指定点施加水平位移,以模拟桩基在水平荷载作用下的响应过程。

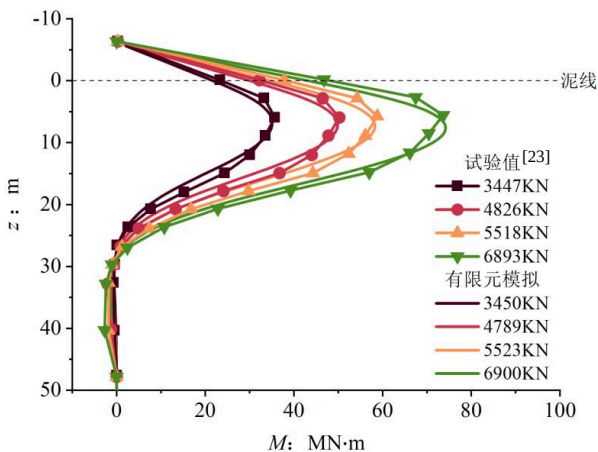
对于土体边界条件,在两个分析步中,土体的所有外侧面及底面均设置为法向位移约束(即法向位移为0),而土体表面则完全自由。在地应力平衡步中,桩体的所有方向位移均约束,以确保桩体保持固定状态;在水平受荷步中,仅对桩头施加水平位移,而不施加其他约束条件。

1.2 有限元模型验证

由于随机有限元分析结果具有概率分布特性,直接验证存在困难。采用间接验证方法,即通过确定性模型与经典试验数据的对比实现模型验证。确定性分析的模型验证选取 Zhu 等^[23]的离心机试验数据作为基准,对试验和计算所得多种结果进行详细对比(见图2)。其中,图2(a)为离心机试验结果



(a) 荷载位移曲线



(b) 桩身弯矩

图2 数值模拟结果与离心机试验数据对比

Fig. 2 Comparison of numerical simulation and centrifuge test results

与有限元模拟结果的荷载位移曲线对比,图2(b)为离心机试验和有限元模拟分析所得桩身弯矩。由图2可见,确定性土体中单桩基础的荷载位移曲线、桩身弯矩响应与离心机试验结果呈现出高度的一致性,足以证明研究采用有限元模型的有效性。

1.3 土体空间变异性

土体空间变异性是天然土体的固有特性,主要由长期地质作用和环境因素共同形成。这种变异性在水平和垂直方向上表现出显著差异,反映了土体沉积过程和地质历史的复杂性。为有效模拟土体空间变异性,Phoon等^[29]提出了一个理论框架,将土体参数分解为确定性趋势函数 $\mu(z)$ 和随机残差函数 $\xi(z)$,其表达式为

$$\xi(z) = \zeta(z) + \mu(z) \quad (2)$$

式中: $\xi(z)$ 为深度 z 处的土体参数; $\mu(z)$ 表征土体参数的均值变化趋势,描述土体参数的均值变化; $\zeta(z)$ 描述参数在趋势值附近的随机波动。随机残差函数通常由两个关键参数描述:变异系数(COV),用于量化变异性的幅度;波动范围(θ)用于描述土体参数的空间自相关性。由于土体沉积过程各向异性,空间相关性通常通过水平自相关长度(θ_h)和垂直自相关长度(θ_v)加以描述。这两个参数分别反映土体在水平与垂直方向的空间依赖性尺度,其差异源于土体的层状沉积特性。一般而言,水平自相关长度较大,反映土体在水平方向的连续性;垂直自相关长度较小,体现土体在垂直方向的分层特性。这种各向异性特征对土体力学行为影响显著,尤其在桩基与土体相互作用分析中,需充分考量空间变异性的方向性特征。

假设内摩擦角 φ 为独立随机变量,并服从对数正态分布,其均值 $\mu_\varphi = 37.7^\circ$ 。为系统研究砂土内摩擦角变异系数(COV_φ)和相关长度(θ)的影响,设计7组统计参数组合(见表2)。参数 COV_φ 的取值范围为0.05~0.15,水平相关长度(θ_h)的取值范围为5~80 m,垂直相关长度(θ_v)的取值范围为1.5~4

表2 土体内摩擦角参数组合

组合	内摩擦角变异系数 COV_φ	水平向相关距离 θ_h (m)	竖向相关距离 θ_v (m)
I	0.05	25	2.5
II	0.1	25	2.5
III	0.15	25	2.5
IV	0.1	5	2.5
V	0.1	80	2.5
VI	0.1	25	1.2
VII	0.1	25	4

m。各参数的取值范围均基于现有文献的统计分析结果^[29-30],能有效覆盖天然砂土在实际工程中的典型空间变异性范围。

在这 7 种组合中,组合 II 作为基准案例;组合 I~III 用于研究变异系数 COV_φ 的影响;组合 II、IV、V 用于研究水平相关长度 θ_h 的影响,组合 II、VI 和 VII 用于研究垂直相关长度 θ_v 的影响。随机场的生成采用改进的线性估计方法^[31](Modified Linear Estimation Method, MLEM),生成的典型三维随机场如图 3 所示。

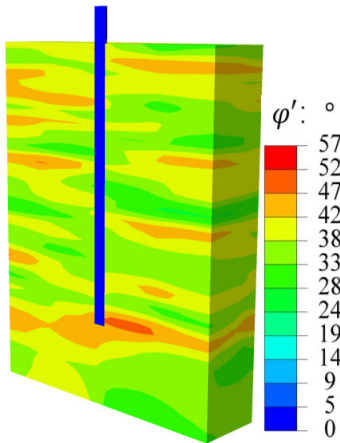


图 3 典型砂土内摩擦角随机场

Fig.3 Typical sandy soil internal friction angle random field

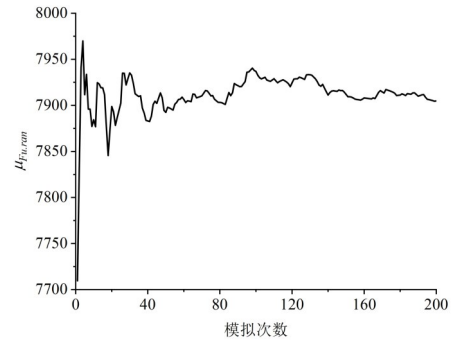
为验证 200 次蒙特卡罗模拟是否足以确保计算结果的统计稳定性,选取基准组合 II 进行分析。图 4 为组合 II 中桩基承载力均值 $\mu_{Fu,ran}$ 和标准差 $\sigma_{Fu,ran}$ 随模拟次数增加的变化趋势。从图 4 可以看出,在模拟次数较少时,均值和标准差均表现出较大波动;随着模拟次数的增加,波动逐渐减弱并趋于稳定。表明当蒙特卡罗模拟次数达到 200 次时,计算结果已收敛,能够满足统计分析的要求^[32]。

2 计算结果与分析

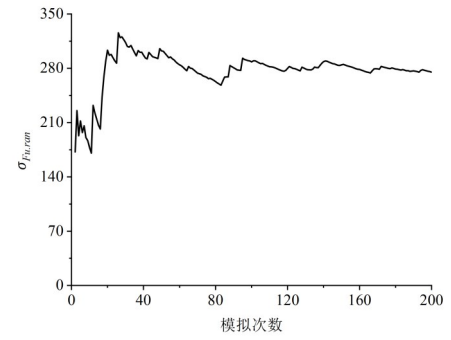
采用随机有限元方法和蒙特卡罗模拟,分析不同空间变异性参数组合(变异系数、相关距离)下桩基极限承载力均值及变异系数的变化规律,评估空间变异性参数对水平极限承载力的影响。

2.1 空间变异性土体中水平受荷桩承载力分析

图 5~图 7 呈现了表 2 所列各参数组合经 200 次模拟计算所得的桩头荷载-泥面位移曲线。根据 Zhu 等^[23]的研究,取泥面位移达到 $0.1D$ (D 为桩径)时对应的桩头荷载作为单桩水平极限承载力 F_u 。由图 5 可知,随着砂土内摩擦角变异系数(COV_φ)增大,荷载-位移曲线的离散程度显著增加,与确定性土体的计算结果差异更为突出。具体表现为:当 COV_φ 取值较小时,荷载-位移曲线分布相对集中,



(a) $\mu_{Fu,ran}$



(b) $\sigma_{Fu,ran}$

图 4 极限承载力均值 $\mu_{Fu,ran}$ 与标准差 $\sigma_{Fu,ran}$ 随模拟次数的变化

Fig.4 Variation of $\mu_{Fu,ran}$ and $\sigma_{Fu,ran}$ with the number of simulations

表明桩基承载力离散性较小;而 COV_φ 增大时,曲线分布范围明显扩展,揭示了土体参数空间变异性对桩基承载力的重要影响

图 6 表明,随着竖向相关距离(θ_v)由 1.2 m 增至 4 m,空间变异性土体的荷载-位移曲线离散范围同样明显增大。当 $\theta_v=1.2$ m 时,随机水平极限承载力 $F_{u,ran}$ 波动区间为 7.398~8.477 MN; θ_v 增至 4 m 时, $F_{u,ran}$ 波动范围扩展至 7.079~8.835 MN,与确定性土体结果 $F_{u,det}$ 产生明显偏差。这一规律说明,竖向相关距离的增加会强化土体参数的空间变异性效应,进而对桩基承载力产生更显著的影响。

相比之下,水平相关距离(θ_h)的变化对桩基水平极限承载力的影响相对有限。图 7 表明,当 θ_h 从 5 m 增加至 80 m 时,空间变异性土体的荷载-位移曲线离散程度较图 5 和图 6 明显减小。这一现象表明,在给定的参数范围内,桩基水平极限承载力对水平相关距离的变化表现出较低的敏感性。该力学行为特征与柔性桩的典型响应机制直接相关:在水平荷载作用下,柔性桩的变形主要集中于浅层邻近桩侧的土体区域,而深层及远场土体的响应较弱。由于水平相关距离的变化范围(5~80 m)远大于实际受影响区域的范围,因此其对桩基承载力的影响效应相对有限。

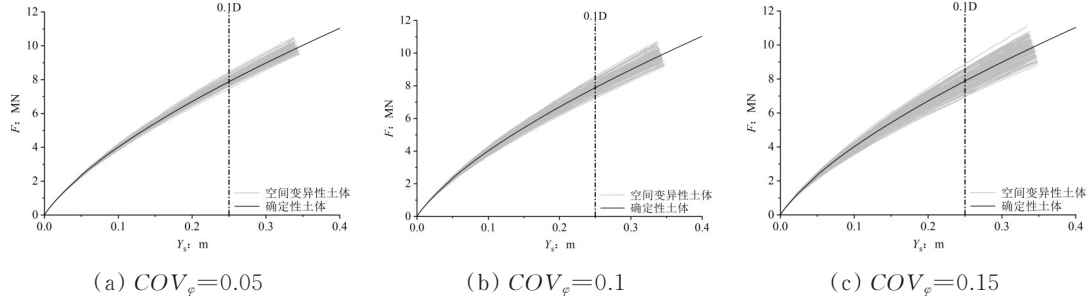


图5 不同变异系数条件下的桩头荷载-泥面位移关系曲线

Fig.5 Relationship between pile head load and displacement under different coefficient of variation

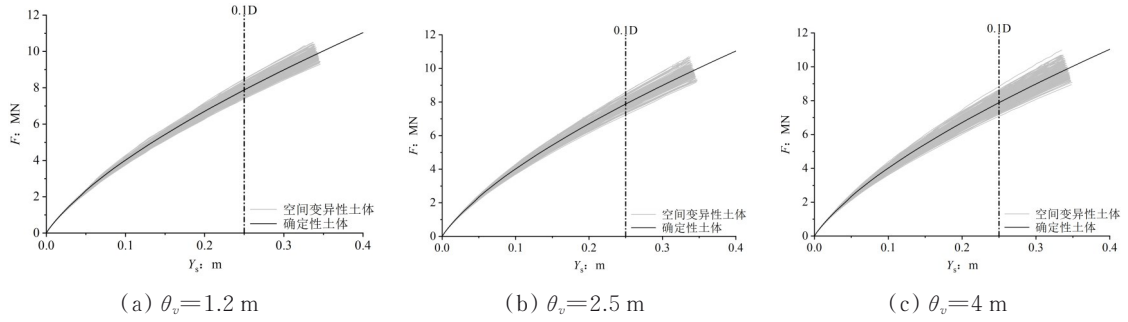


图6 不同竖向相关距离条件下的桩头荷载-泥面位移关系曲线

Fig.6 Relationship between pile head load and displacement under different vertical autocorrelation length

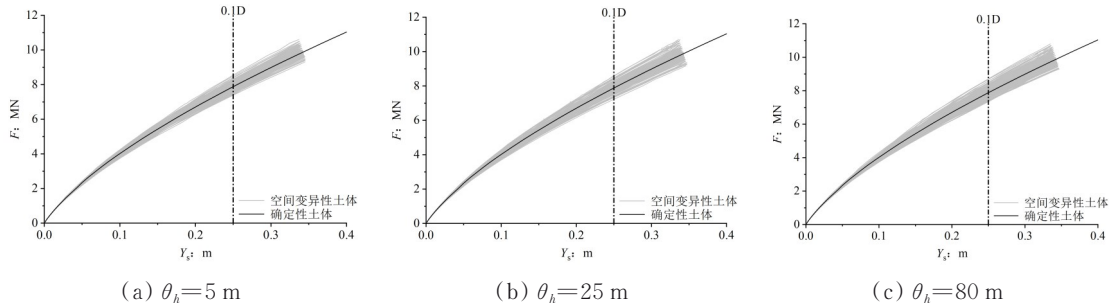


图7 不同水平向相关距离条件下的桩头荷载-泥面位移关系曲线

Fig.7 Relationship between pile head load and displacement under different horizontal autocorrelation length

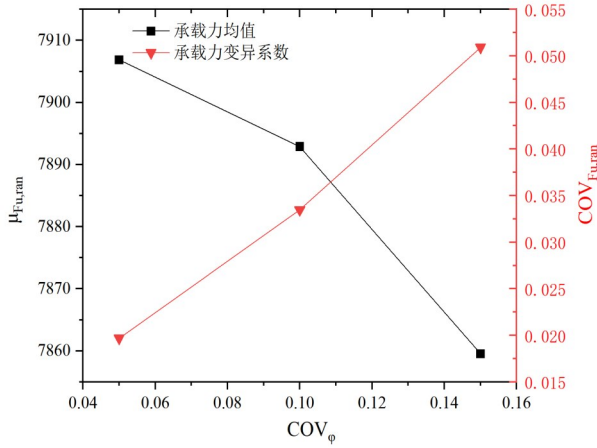
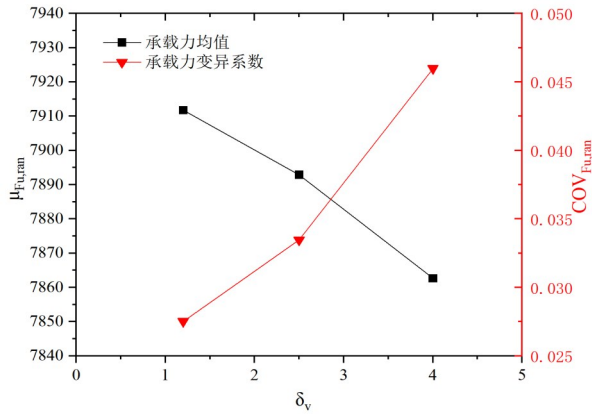
图8为水平承载力均值 $\mu_{F_{u,ran}}$ 和承载力变异系数 $COV_{F_{u,ran}}$ 随内摩擦角变异系数的变化趋势。由图8可以看出,随着砂土内摩擦角变异系数(COV_φ)从0.05增大到0.15,单桩水平极限承载力均值 $\mu_{F_{u,ran}}$ 呈现出明显的下降趋势;同时,桩基水平极限承载力的变异系数 $COV_{F_{u,ran}}$ 从0.02增长到0.051,且增长速率显著加快。这一结果表明,随着土体参数变异性的增加,桩基承载力的不确定性显著增强,均值承载力则逐渐降低。类似地,图9为水平承载力均值 $\mu_{F_{u,ran}}$ 和承载力变异系数 $COV_{F_{u,ran}}$ 随竖向相关距离的变化趋势。由图9可以发现,当竖向相关距离(θ_v)从1.2 m增加至4 m时,水平极限承载力均值 $\mu_{F_{u,ran}}$ 从7 912 kN减小至7 862 kN,同时变异系数 $COV_{F_{u,ran}}$ 也随 θ_v 的增加而显著增大。这说明竖向相关距离的增大会加剧土体参数的空间变异性,

从而对桩基承载力产生更显著的影响。相对而言,水平相关距离(θ_h)对桩基水平极限承载力均值 $\mu_{F_{u,ran}}$ 的影响相对有限,如图10所示。

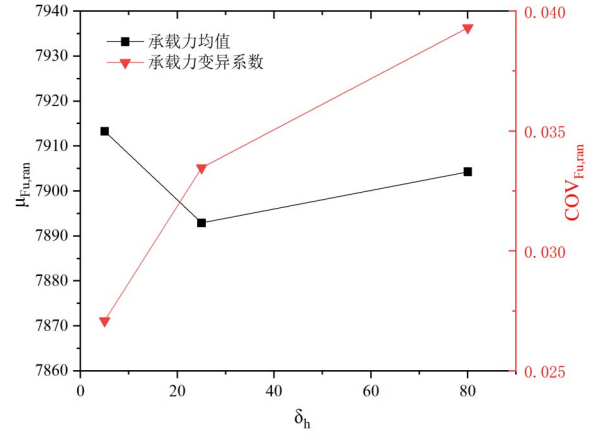
综上所述,砂土内摩擦角的变异系数(COV_φ)和竖向相关距离(θ_v)是影响柔性桩水平极限承载力的重要因素。这一发现为考虑土体空间变异性的桩基设计提供了重要依据,同时也揭示了柔性桩在水平荷载作用下的独特力学行为。在实际工程中,应重点关注土体参数的变异性和竖向相关距离的影响,以提高桩基设计的可靠性和安全性。

2.2 空间变异性土体桩周土体破坏机制

为系统阐明空间变异性土体中桩土相互作用的破坏机理,选取参数组合Ⅱ中具有显著承载力差异的3个典型算例(生成变异体土体的随机算例分别为第49、96、120)进行对比分析。通过对3个算例

图8 $\mu_{F_{u,ran}}$ 和 $COV_{F_{u,ran}}$ 随 COV_{φ} 的变化规律Fig.8 Variations of $\mu_{F_{u,ran}}$ and $COV_{F_{u,ran}}$ with COV_{φ} 图9 $\mu_{F_{u,ran}}$ 和 $COV_{F_{u,ran}}$ 随 θ_v 的变化规律Fig.9 Variations of $\mu_{F_{u,ran}}$ and $COV_{F_{u,ran}}$ with θ_v

在桩基础泥面位移达到 0.1D 工况下的速度矢量场和内摩擦角随机场分布云图(图 11)的系统分析发

图10 $\mu_{F_{u,ran}}$ 和 $COV_{F_{u,ran}}$ 随 θ_h 的变化规律Fig.10 Variations of $\mu_{F_{u,ran}}$ and $COV_{F_{u,ran}}$ with θ_h

现,算例 49 浅层桩周土体内摩擦角普遍偏小,导致该区域土体抗剪强度明显减弱,在荷载作用下表现出更大的土体流动速度。值得注意的是,虽然各算例的土体参数分布存在差异,但其破坏模式均呈现出典型的柔性桩特征:浅层土体(0~2D 深度)形成明显的楔形破坏区,桩端区域(>5D 深度)基本保持固定状态,而深层土体(2~5D 深度)由于桩头位移量较小尚未充分参与受力。进一步分析发现,柔性桩的水平承载力主要由浅层楔形破坏区的土体抗力决定,算例 49 浅层土体内摩擦角偏低导致该区域强度不足,最终表现为极限承载力较确定性土体降低,而算例 120 则因浅层土体参数较优而呈现出更高的承载性能,这一现象充分证实了浅层土体参数分布对桩基水平承载特性的决定性影响。

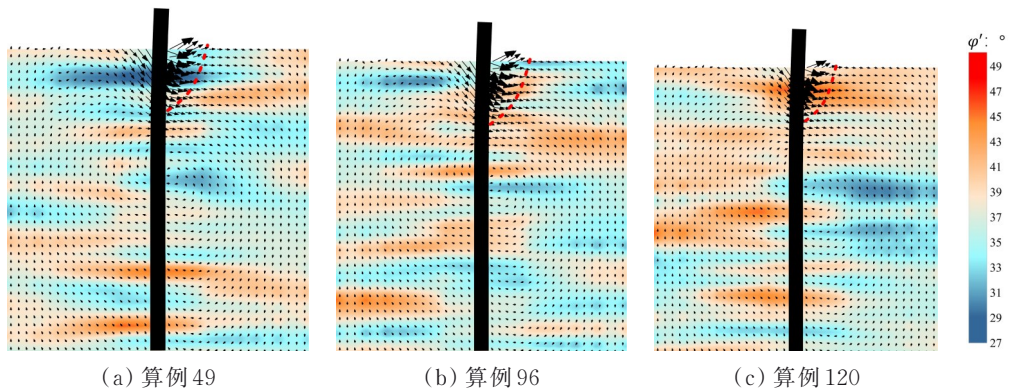


图 11 参数组合 II 典型算例(49、96、120)的速度矢量分布图

Fig.11 Velocity vector distributions of representative cases (49, 96, 120) in parameter combination II

2.3 水平受荷桩承载力的安全系数与失效概率

Griffiths 等^[33]在研究变异性土体中基础的承载力时提出,当基础在变异性土体中的承载力 $F_{u,ran}$ 低于其在确定性土体中的承载力 $F_{u,det}$ 时,即可判定基础失效。Cassidy 等^[34]在对桩靴基础的安装过程进

行可靠性分析时,提出将变异性土体中承载力与确定性承载力的比值定义为模型因子 λ (式(3))

$$\lambda = F_{u,ran} / F_{u,det} \quad (3)$$

当模型因子 λ ($\lambda = F_{u,ran} / F_{u,det}$) 小于 1 时,即认定基础已经失效,相应的概率被定义为失效概率

$P(\lambda < 1)^{[34]}$ 。

2.3.1 随机承载力模型因子检验

图 12 为 3 组不同土体空间变异性参数组合下模型因子 λ 的分布直方图,并检验其是否符合正态

分布与对数正态分布。图中分别给出了参数组合 I、Ⅲ和Ⅶ的模型因子 λ 的直方图及其概率密度分布拟合曲线。通过对比可以看出,模型因子 λ 的分布形态更接近于对数正态分布。

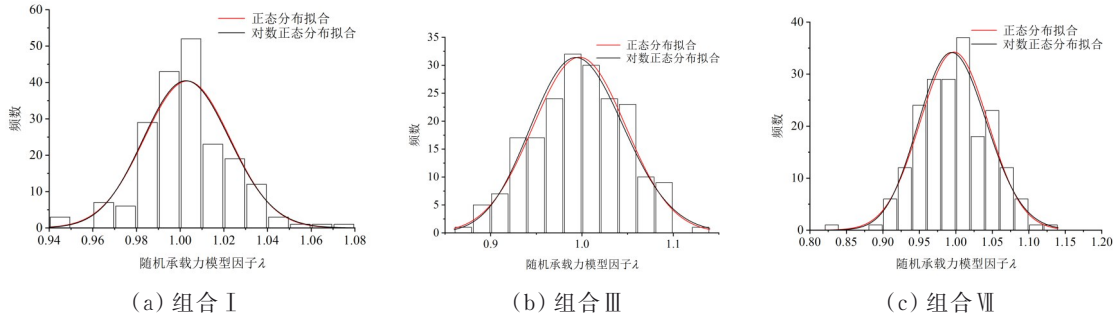


图 12 不同变异参数组合下模型因子的直方图及其概率密度分布拟合曲线

Fig.12 The histogram of the model factor and its probability density distribution fitting curves under different variability parameter combinations

为验证这一观察结果,笔者采用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验对模型因子 λ 的分布进行了拟合优度分析。表 3 列出了参数组合 I~组合Ⅶ的 K-S 检验结果,包括 P 值(显著性水平)。根据表 3 的结果可以观察到不同变异性参数组合下,模型因子 λ 的分布与对数正态分布的吻合程度更高。因此,在对模型因子 λ 进行概率描述时,采用对数正态分布能够更精确地反映其统计特性。

表 3 K-S 检验结果

Table 3 The result of K-S test

组合	对数正态分布	正态分布
I	0.241 06	0.194 85
II	0.406 26	0.294 56
III	0.682 58	0.825 47
IV	0.530 96	0.410 22
V	0.661 63	0.509 53
VI	1	0.896 69
VII	0.994 6	0.803 63

2.3.2 失效概率与安全系数

图 13 为 7 组不同变异性参数组合下随机承载力模型因子 λ 的累积概率分布情况。从图 7 能够清晰地看出,在不同变异性参数组合下,桩基失效破坏的概率均超过了 50%。这一现象表明,在具有空间变异性的土体中,水平受荷桩发生失效破坏的可能性较大,进一步凸显了土体空间变异性对桩基承载性能的显著影响。

在桩基设计计算过程中,通常会引入安全系数 n 以降低桩基发生失效破坏的概率。然而,对于安全系数的合理取值,目前仍存在较大的不确定性。为深入剖析和评估经安全系数折减后水平受荷桩

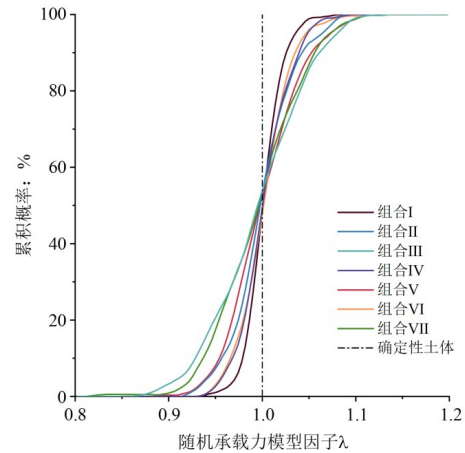


图 13 不同变异参数组合条件下模型因子的累积概率分布

Fig.13 Cumulative probability distribution of model factor under different variability parameter combinations

的承载性能及其可靠性,构建式(4)所示失效概率 P_f 的函数表达式。

$$P_f = P(F_{u,ran} < F_{u,det}/n) = P(\lambda < 1/n) \quad (4)$$

依据概率等效原则,可建立式(5)所示等式。

$$P(\lambda < 1/n) = P(\ln \lambda < \ln(1/n)) = \Phi \left[\frac{\ln(1/n) - \mu_{\ln(\lambda)}}{\sigma_{\ln(\lambda)}} \right] \quad (5)$$

式中: Φ 为标准正态累计概率函数; $\mu_{\ln(\lambda)}$ 为模型因子 $\mu_{\ln(\lambda)}$ 的对数均值; $\sigma_{\ln(\lambda)}$ 为模型因子 $\sigma_{\ln(\lambda)}$ 的对数标准差。由式(5)还可进一步推导出安全系数与失效概率的显性表达式。

$$n = e^{-(\mu_{\ln(\lambda)} + \sigma_{\ln(\lambda)} \Phi^{-1}(P_f))} \quad (6)$$

当给定目标失效概率 P_f 时,可根据式(6)直接反算出所需的安全系数 n ,从而将确定性安全系数转换为可靠度指标。图 14 展示了不同变异性参数

组合下失效概率与安全系数的关系曲线。从图 14 能明显看出,随着安全系数增大,失效概率逐渐降低,但不同变异性参数组合下的变化趋势存在差异。表 4 进一步列出了失效概率为 1%、0.1% 和 0.01% 时不同变异性参数组合下所需的安全系数取值。这些结果为工程实践中基于可靠度的桩基设计提供关键参考。例如,当失效概率要求为 1% 时,不同变异性参数组合下的安全系数取值范围为 1.2~1.5;而当失效概率要求降至 0.01% 时,安全系数需进一步提升至 1.8~2.2。这一结果表明,随着对失效概率要求的提高,所需的安全系数显著增大,充分反映了土体空间变异性对桩基设计安全性的重要影响。

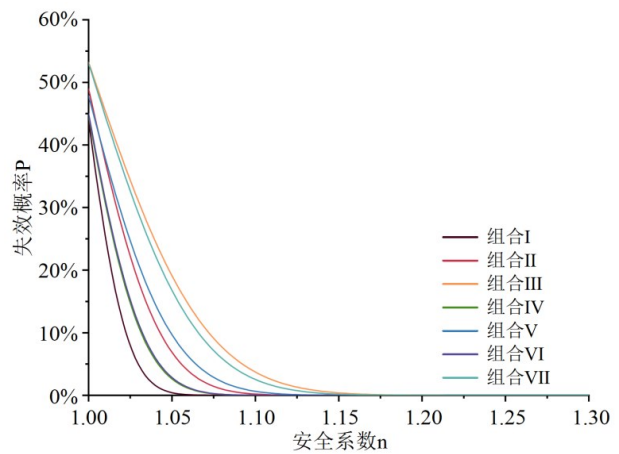


图 14 不同变异参数组合条件下失效概率随安全系数的变化规律

Fig.14 Variation of failure probability with safety factor under different variability parameter combinations

表 4 不同参数组合的失效概率与安全系数的关系
Table 4 The relationship between failure probability and safety factor for different parameter combinations

失效概 率/%	参数组合						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	1.04	1.08	1.13	1.06	1.09	1.06	1.12
0.1	1.06	1.11	1.18	1.08	1.12	1.08	1.16
0.01	1.07	1.13	1.21	1.11	1.14	1.10	1.19

2.3.3 变异性参数对安全系数的影响

通过对比变异系数(COV_{φ})、水平相关距离(θ_h)和竖向相关距离(θ_v)对安全系数的影响,揭示了各参数在桩基可靠度设计中的重要性。

从表 4 可以看出,当 COV_{φ} 从 0.05 增加到 0.1 时(对应参数组合 I、II、III),安全系数从 1.04 增长到 1.13,增幅显著。这一变化表明,随着 COV_{φ} 的增大,土体参数的不确定性显著增加,导致桩基承载力的变异性增大。为确保桩基的可靠性,需采用更大的安全系数以应对土体参数的高变异性。

竖向相关距离(θ_v)反映了土体参数在垂直方向上的空间相关性。从表 4 可以看出,当 θ_v 从 2.5 m 增大到 4 m 时(对应参数组合 II、IV、V),安全系数由 1.06 增长到 1.12,增幅明显。这表明,随着 θ_v 的增大,土体参数的空间变异性对桩基承载力的影响更加显著。为确保桩基的可靠性,需进一步提高安全系数以应对竖向相关距离增大的影响。

水平相关距离(θ_h)则反映了土体参数在水平方向上的空间相关性。结果表明,当 θ_h 从 5 m 增大到 80 m 时(对应参数组合 II、VI、VII),安全系数的变化相对不明显。这一现象与柔性桩的破坏机制密切相关:在水平荷载作用下,柔性桩仅浅层桩侧土体受到扰动(图 11)。而水平相关距离的变化范围(5~80 m)超出了该有效影响区域,因此对桩基承载力的影响相对有限。

综合上述分析可知,土体内摩擦角变异系数(COV_{φ})和竖向相关距离(θ_v)是影响安全系数取值的主要因素,而水平相关距离(θ_h)的影响相对较小。具体而言:1) COV_{φ} 的增大会导致土体参数的不确定性增加,从而显著提高安全系数的取值;2) θ_v 的增大会加剧土体参数在垂直方向上的变异性,进一步增加安全系数的需求;3) θ_h 的变化对安全系数的影响较小。

3 结论

深入分析了空间变异性砂土地基中柔性单桩的水平承载性能,揭示了内摩擦角变异系数与相关距离的关键作用,构建了失效概率与安全系数的显式关系。具体结论如下:

1) 柔性桩的水平承载力主要来源于浅层楔形区土体。砂土内摩擦角变异系数和竖向相关距离的增大会显著增大荷载-位移曲线的离散性,而水平相关距离的影响较小,这与柔性桩仅浅层土体受力的破坏特性相符。

2) 内摩擦角变异系数和竖向相关距离是影响水平受荷桩极限承载力的关键参数。二者的增大会导致承载力均值逐渐降低,同时使极限承载力变异系数显著增大,表明土体参数空间变异性不仅会削弱桩基平均承载力,还会增加其不确定性。

3) 在所有变异性参数组合下,单桩基础的失效概率均超过 50%。通过建立安全系数与失效概率之间的显式函数关系,为水平受荷桩的可靠度设计提供了理论依据和工程实用方法。

4) 在水平受荷桩设计中,需要综合考虑砂土内摩擦角变异系数、竖向相关距离及允许失效概率,合理确定安全系数。对于土体变异性较高的情况,

应适当提高安全系数以确保桩基可靠性;当土体变异性较低时,可酌情降低安全系数,实现经济效益优化。

受研究条件限制,对空间变异性砂土地基中柔性单桩水平承载性能的研究仍有不足,未来研究可重点关注:扩大土体参数范围,研究不同内摩擦角均值及分布类型的影响;考虑砂土多参数(如内摩擦角、膨胀角、密度等)的空间变异性及其耦合效应。

参考文献

- [1] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [3] GAO Y F, ZHU D S, ZHANG F, et al. Stability analysis of three-dimensional slopes under water drawdown conditions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51 (11): 1355-1364.
- [4] 李典庆, 祁小辉, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的无限长边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (10): 1799-1806.
LI D Q, QI X H, ZHOU C B, et al. Reliability analysis of infinite soil slopes considering spatial variability of soil parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1799-1806. (in Chinese)
- [5] 祁小辉, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑地层变异的边坡稳定不确定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1385-1396.
QI X H, LI D Q, CAO Z J, et al. Uncertainty analysis of slope stability considering geological uncertainty [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1385-1396. (in Chinese)
- [6] LI L, LI J H, HUANG J S, et al. Bearing capacity of spudcan foundations in a spatially varying clayey seabed [J]. Ocean Engineering, 2017, 143: 97-105.
- [7] WANG Y, CAO Z J. Expanded reliability-based design of piles in spatially variable soil using efficient Monte Carlo simulations [J]. Soils and Foundations, 2013, 53 (6): 820-834.
- [8] CAI Y M, BRANSBY F, GAUDIN C, et al. A framework for the design of vertically loaded piles in spatially variable soil [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134: 104140.
- [9] CHO S E, PARK H C. Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(1): 1-26.
- [10] SIVAKUMAR BABU G L, SRIVASTAVA A, MURTHY D S. Reliability analysis of the bearing capacity of a shallow foundation resting on cohesive soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(2): 217-223.
- [11] 明思成, 仇文岗, 何昱苇, 等. 考虑各向异性空间变异性的边坡可靠度分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 60-74.
MING S C, ZHANG W G, HE Y W, et al. Analysis on slope reliability considering anisotropic spatial variability of soil parameters [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4): 60-74. (in Chinese)
- [12] 李丞, 苏立君. 不同随机场模拟对斜坡失稳风险评估结果的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42 (3): 17-23.
LI C, SU L J. Influence of different random field simulation on the results of slope failure risk assessment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 17-23. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z C, WANG T P, CHEN Z H, et al. Reliability analysis for monopile foundation of offshore wind turbine considering correlated wind and waves and spatially varying soils [J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 115594.
- [14] 仇文岗, 王琦, 陈福勇, 等. 考虑岩体空间变异性的边坡可靠度分析及抗滑桩随机响应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3157-3168.
ZHANG W G, WANG Q, CHEN F Y, et al. Reliability analysis of slope and random response of anti-sliding pile considering spatial variability of rock mass properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3157-3168. (in Chinese)
- [15] 张子富, 杨文智, 朱海涛. 特高压输电线路杆塔基础承载力可靠度分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(增刊1): 142-146.
ZHANG Z F, YANG W Z, ZHU H T. Reliability analysis of bearing-capacity of tower foundations designed for ultra high voltage transmission lines [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(Sup 1): 142-146. (in Chinese)
- [16] 洪昌华, 龚晓南. 基于稳定分析法的碎石桩复合地基承载力的可靠度[J]. 水利水运科学研究, 2000(1): 30-35.
HONG C H, GONG X N. Reliability of bearing capacity of composite foundation based on stabilization analysis [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000(1): 30-35. (in Chinese)
- [17] 赵春风, 徐超, 高大钊. 基于随机场模型的桩基竖向承载力可靠性分析[J]. 地下空间, 2004(4): 449-452, 464

- 563.
ZHAO C F, XU C, GAO D Z. Reliability analysis of vertical bearing capacity of pile based on random field theory [J]. *Underground Space*, 2004(4): 449-452, 464-563. (in Chinese)
- [18] HALDAR S, SIVAKUMAR BABU G L. Effect of soil spatial variability on the response of laterally loaded pile in undrained clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(4): 537-547.
- [19] TEIXEIRA A, HONJO Y, GOMES CORREIA A, et al. Sensitivity analysis of vertically loaded pile reliability [J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(6): 1118-1129.
- [20] DEPINA I, LE T MHUE, EIKSUND G, et al. Behavior of cyclically loaded monopile foundations for offshore wind turbines in heterogeneous sands [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 65: 266-277.
- [21] ORAKCI O, HUVAJ N, FRANÇOIS S, et al. Probability of unsatisfactory performance of monopile foundations for offshore wind turbines considering variations in seabed properties [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 277: 114335.
- [22] 刘润, 闫澍旺. 渤海湾地基土随机场特性及可靠度分析 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(4): 464-467.
LIU R, YAN S W. Random field model and reliability analysis of foundation soil in Bohai gulf [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 464-467. (in Chinese)
- [23] ZHU B, LI T, XIONG G, et al. Centrifuge model tests on laterally loaded piles in sand [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2016, 16(4): 160-172.
- [24] WEN K, WU X F, ZHU B. Numerical investigation on the lateral loading behaviour of tetrapod piled jacket foundations in medium dense sand [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 100: 102193.
- [25] 王欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
WANG H. Lateral behaviour of offshore monopile and bucket foundations in sand [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [26] ACHMUS M, ABDEL-RAHMAN K. Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany[M]// *Frontiers in Offshore Geotechnics*. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2005
- [27] 刘晋超, 熊根, 朱斌, 等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 591-599.
LIU J C, XIONG G, ZHU B, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 591-599. (in Chinese)
- [28] 熊根. 近海大直径单桩水平受荷离心模型试验和三维数值分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
XIONG G. Centrifuge modelling and 3-D numerical analysis of large diameter single pile under lateral loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [29] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 612-624.
- [30] WU T H, LEE I M, POTTER J C, et al. Uncertainties in evaluation of strength of marine sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 113(7): 719-738.
- [31] LIU Y, LEE F H, QUEK S T, et al. Modified linear estimation method for generating multi-dimensional multi-variate Gaussian field in modelling material properties [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 38: 42-53.
- [32] LIU F, CHENG P, LUO Y J, et al. Large-deformation study of T-bar penetration in spatially variable sediments [J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 150: 104105.
- [33] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited [J]. *Géotechnique*, 2001, 51(4): 351-359.
- [34] CASSIDY M, LI L, HU P, et al. Deterministic and probabilistic advances in the analysis of spudcan behaviour [M]// *Frontiers in Offshore Geotechnics III*. London, UK: CRC Press, 2015: 183-212.

(编辑 XXX)