

考虑工程场地非均匀分布特征的管桩竖向承载力估计方法研究

刘 钊

湖南楚湘建设工程集团有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

工程场地非均匀性是影响管桩竖向承载力差异的关键因素, 传统的设计配桩忽略了工程场地中土层分布的非均匀特征, 往往导致管桩设计承载力与工程实际存在偏差。针对这一问题, 本文提出一种考虑工程场地非均匀分布特征的管桩竖向承载力估计方法。首先通过工程勘察获取管桩几何参数与场地土体力学参数数据集, 计算参数统计特征并构建空间权重矩阵, 基于上述基础构建土体力学参数随机场, 量化同一土层内部参数的空间变异性, 随后将随机场模拟的多组土体参数代入承载力计算公式, 得到多组承载力结果, 最终通过统计分析明确承载力分布特征。工程实例验证表明: 所提方法构建的土体参数随机场与实测数据规律高度吻合, 能够精准反映工程场地非均匀分布特征引发的承载力不确定性; 该场地管桩竖向承载力均值为16009.7 kN, 5%分位值为15703.3 kN, 95%分位值为16209.6 kN, 大概率区间15703.3 kN~16209.6 kN, 可用于工程配桩的设计取值。研究成果为管桩竖向承载力的可靠性设计与工程风险评估提供了科学技术路径。

关键词

工程场地非均匀分布特征, 管桩, 竖向承载力, 估计方法

Research on the Estimation Method for Vertical Bearing Capacity of Pipe Piles Considering Non-Uniform Distribution Characteristics of Construction Sites

Zhao Liu

Hunan Chuxiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: March 27, 2026; accepted: April 17, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

The non-uniformity of the construction site is a key factor affecting variations in the vertical bearing capacity of pipe piles. Traditional pile design methods overlook the non-uniform distribution characteristics of the site, often leading to discrepancies between the designed bearing capacity of pipe piles and actual engineering conditions. To address this issue, this paper proposes an estimation method for the vertical bearing capacity of pipe piles considering the non-uniform distribution characteristics of construction sites. First, the geometric parameters of pipe piles and the dataset of soil mechanical parameters of the site were obtained through engineering investigation, the statistical characteristics of parameters were calculated and the spatial weight matrix was constructed. On this basis, the random field of soil mechanical parameters was established to quantify the spatial variability of parameters within the same soil layer. Then, multiple groups of soil parameters simulated by the random field were substituted into the bearing capacity calculation formula to obtain multiple groups of bearing capacity results. Finally, the distribution characteristics of bearing capacity were clarified through statistical analysis. Engineering case verification shows that the random field of soil parameters constructed by the proposed method is highly consistent with the law of measured data, and can accurately reflect the uncertainty of bearing capacity caused by the non-uniform distribution characteristics of construction sites; the average value of vertical bearing capacity of pipe piles in this site is 16009.7 kN, the 5% quantile value is 15703.3 kN, the 95% quantile value is 16209.6 kN, and the high-probability interval of 15703.3 kN~16209.6 kN. The results can be utilized for engineering pile design values. This research provides a scientific and technological pathway for the reliability design of pipe pile vertical bearing capacity and engineering risk assessment.

Keywords

Non-Uniform Distribution Characteristics of Construction Sites, Pipe Piles, Vertical Bearing Capacity, Estimation Method

Copyright © 2026 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

在岩土工程领域，管桩凭借承载能力强、施工效率高、适应性广等优势，被广泛应用于高层建筑、桥梁、港口等各类工程的基础工程中，其竖向承载力直接关乎上部结构的稳定性与整体工程的安全可靠性[1][2]。然而，实际工程场地的土体受沉积环境、地质演化及后期扰动等多重因素影响，性质复杂多变，呈现出显著的非均匀性特征。即使是同一土层内部，不同深度与水平位置的侧壁摩擦阻力、锥尖阻力等关键力学参数也存在明显的随机性与离散性，这一客观现象直接决定了管桩与土体的相互作用机制具有复杂的不确定性[3][4]。

当前，管桩竖向承载力的计算估计方法主要包括现场试验法、经验公式法及数值模拟法三类，但均存在难以兼顾“准确性、经济性与非均匀性表征”的局限。现场试验法虽能直接获取管桩在实际场地的承载性能数据，但其成本高昂、耗时漫长，且对场地条件要求苛刻，难以大规模推广应用，更无法全面反映土体力学参数在空间上的随机分布特征[5]。经验公式法基于过往工程经验与试验数据总结得出，计算流程简便，但受区域土体性质差异影响显著，通用性与准确性受限，且本质上将土体力学参数视为固

定常量,无法体现参数的随机性,难以精准匹配特定场地的土体非均匀特性[6]。数值模拟法虽能在一定程度上模拟土体与管桩的相互作用,但其在处理土体力学参数的空间变异性方面存在明显缺陷,往往通过简化假设将参数均质化处理,无法准确刻画参数在空间上的随机波动,导致模拟结果与工程实际存在偏差[7][8]。更为关键的是,在传统管桩竖向承载力分析方法中,“ $t-z$ ”弹簧法是将不同土层简化为一系列“ $t-z$ ”弹簧,每个“ $t-z$ ”弹簧均代表了某一土层的桩-土荷载传递效应[6];而规范中桩基设计方法则是根据桩型,对不同土层取不同侧摩阻力代表值。这些传统的承载力分析或计算方法均普遍采用“同一工程场地地质条件一致”这一假设,忽略了工程场地土非均匀性这一核心影响因素,导致配桩结果与实际工况存在偏差,难以满足现代工程对高精度设计、施工及风险管控的要求,甚至可能为工程埋下潜在安全隐患[9][10]。针对这一现状,亟需建立一种能够科学表征土体空间非均匀性、量化承载力不确定性的分析估计方法。

为此,本文提出一种考虑工程场地非均匀特征的管桩竖向承载力概率分析方法。首先通过工程勘察获取管桩几何参数与场地土体力学参数数据集,基于统计分析与时空权重矩阵构建土体力学参数随机场,量化工程场地非均匀分布的内部力学参数空间变异性;随后将随机场模拟得到的多组土体参数代入承载力计算模型,获得多组承载力结果;最终通过统计分析得到管桩竖向承载力的统计分布特征,实现工程场地非均匀性对管桩竖向承载力影响的定量化评估。本文研究成果旨在为管桩竖向承载力的可靠性设计与工程风险评估提供更科学、精准的理论支撑与技术方法。

2. 管桩竖向承载力分析方法构建

由于实际场地土体存在天然的空间非均匀性,基于传统管桩竖向承载力计算的配桩方法易偏离工程实际,因此本文提出考虑工程场地非均匀特征的分析方法,其具体流程如图1所示。首先,通过工程勘察获取管桩几何尺寸参数与场地土体力学参数数据集,为后续分析提供基础输入。在此基础上,对场地土体力学参数数据集进行统计特征计算,并构建表征土体空间变异性的空间权重矩阵。基于上述统计信息与空间权重矩阵,构建 N 组反映工程场地非均匀性的场地土体力学参数随机场,随后将每组随机场对应的土体参数代入管桩竖向承载力计算模型,得到多组承载力结果。最终通过统计分析方法得到管桩竖向承载力的统计分布特征,实现工程场地非均匀性对管桩竖向承载力影响的定量化分析。

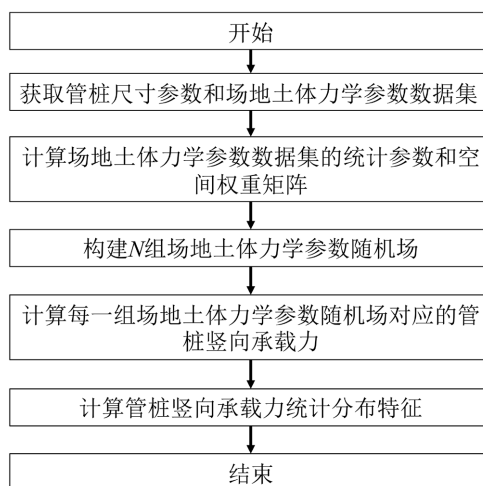


Figure 1. Calculation process for bearing capacity of non-uniform pipe piles in construction sites

图1. 考虑工程场地非均匀性管桩承载力计算流程

对于一般工程场地而言,管桩多嵌入由粉质黏土、粉土、细砂等不同类型土层构成的分层土体中,

如图 2 所示, 其竖向承载性能并非仅由土体性质决定, 而是管桩自身几何参数(包括桩长 L 、桩端面积 A 及桩身周长 u 等核心指标)与各土层力学特性耦合作用的结果。管桩竖向承载力的形成依赖桩侧摩阻力与桩端阻力的共同贡献, 二者均与对应位置的土体性质紧密相关。在实际工程勘察过程中, 技术人员需通过原位测试测定不同土层深度处的桩侧摩阻力与锥尖阻力, 明确各土层对承载力的贡献特性, 随后结合管桩几何参数, 依据现行规范中的计算方法或理论分析模型, 将土体阻力参数与桩体构造参数代入公式, 最终完成管桩竖向承载力的定量计算, 为工程设计提供依据。

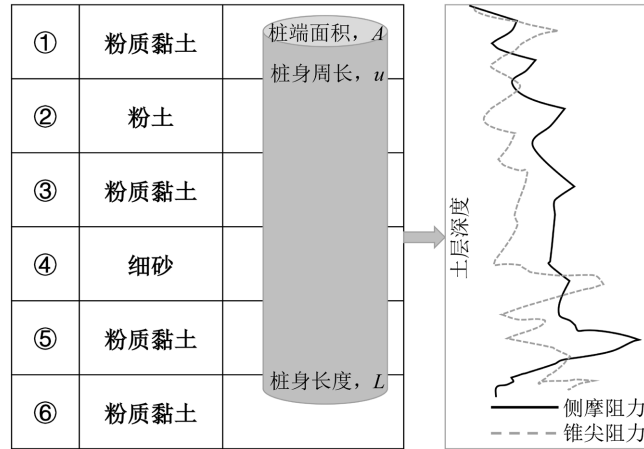


Figure 2. Spatial distribution characteristics of pipe pile resistance
图 2. 管桩阻力空间分布特征

对于一般实际工程而言, 其不同土层深度处桩侧摩阻力与锥尖阻力可通过静力触探试验进行获取。各土层深度处 h_s 的侧壁摩擦阻力 f_s 和锥尖阻力 q_s 可表示为:

$$[h_s, f_s, q_s] = [(h_{s,0}, f_{s,0}, q_{s,0}), (h_{s,1}, f_{s,1}, q_{s,1}), \dots, (h_{s,n}, f_{s,n}, q_{s,n})] \quad (1)$$

式中 n 表示数据点数量。基于上述非均匀分布工程场地土体力学参数数据集, 即可计算得到侧壁摩擦阻力标准差 σ_f , 锥尖阻力标准差 σ_s 。

为精准量化桩身长度方向土体参数的空间相关性, 需通过空间权重矩阵对不同深度位置的参数贡献度进行表征。考虑到土体参数的空间相关性随距离增加呈“衰减性”, 本研究采用指数函数构建空间权重矩阵, 可表示为:

$$W = [w_{ij}]_{n \times n}, w_{ij} = \exp(-|h_{s,i} - h_{s,j}|/d) \quad (2)$$

式中 w_{ij} 为第 i 个深度测点和第 j 个深度测点之间的空间权重系数, d 表示相关距离。

以所建立的空间权重矩阵为基础, 进一步结合侧壁摩擦阻力标准差以及锥尖阻力标准差, 可通过随机函数展开法构建非均匀分布场地中任意土层深度处场地土体力学参数随机场。该过程实现了空间相关性表征与参数变异性量化的有机耦合, 能够更真实地反映土体参数在三维空间中的随机分布特征。场地中任意土层深度处场地土体力学参数随机场可采用下式表示:

$$[h_i, f_i, q_i] = \left[h_{s,i}, \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} f_{s,j}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} + \lambda_f \right), \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} q_{s,j}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} + \lambda_q \right) \right], i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中 λ_f 为均值为 0，标准差为 σ_f 的正态分布， λ_q 为均值为 0，标准差为 σ_s 的正态分布。

依据每一组场地中任意点的任意土层深度处场地土体力学参数随机场，可进一步结合管桩几何参数与桩土相互作用机理计算得到管桩竖向承载力。具体而言，管桩竖向承载力计算采用侧摩阻力与锥尖阻力叠加模型，表达式如下：

$$Q_{UK} = u \sum_{i=1}^n f_i (h_i - h_{i-1}) + q_z A \quad (4)$$

式中 q_z 为桩端所处土层深度位置所对应的锥尖阻力。

3. 管桩竖向承载力分析方法应用

3.1. 工程背景

本研究依托的桥梁工程位于安徽省亳州市蒙城县板桥集镇境内，该桥梁采用左右幅分离式设计且左右幅跨径布置存在细微差异。由于桥梁基础承载性能直接受场地地质条件影响，此工程场景具备典型性，为管桩竖向承载力的针对性分析提供了实际研究载体。为精准掌握桥位区的工程地质与水文地质条件，本项目开展了系统性勘察工作，综合采用调绘、钻探、标准贯入试验、静力触探试验等原位测试手段，并配合室内土工试验，全面查明了场地土体的分层特征、力学性质及水文分布情况，此次勘察不仅为桥梁施工图设计提供了必要的地质依据，更为本研究中管桩竖向承载力分析所需的土体力学参数奠定了可靠的数据基础。此外，本研究所需的基础参数分为管桩几何参数与场地土体力学参数两类，且均源于工程实际资料，有效保障了分析过程的真实性与结果的可靠性。其中，管桩几何参数通过该桥梁工程的设计报告直接获取，核心尺寸参数明确为桩端面积 $A = 0.502 \text{ m}^2$ ，桩身长度 $L = 16 \text{ m}$ ，桩身周长 $u = 2.512 \text{ m}$ ，上述参数作为管桩竖向承载力计算公式的关键输入项，为后续承载力量化计算提供了核心几何依据。场地土体力学参数则结合前述勘察工作形成的现场勘探报告获取。详勘工作中设计单位每隔一个墩布置了一个地质钻孔(间距 40 m)，具体选取该工程 0~8#墩范围内共 5 个地质钻孔的静力触探采样点数据作为代表性分析对象。其中 SQJK203 采样点地层情况如图 3 所示。参数内容包含不同土层深度处的桩侧摩阻力、锥尖阻力等关键力学指标，最终形成完整的土体力学参数数据集，为后续统计分析 with 随机场构建提供原始数据支撑。

地层编号	地层名称	层底深度 /m	图例
①	粉质黏土	3.20	
②	粉质黏土	7.60	
③	细砂	19.00	
④	粉质黏土	21.10	
⑤	粉质黏土与粉土互层	26.30	

Figure 3. Stratigraphic conditions at sampling points
图 3. 采样点地层情况

3.2. 场地土体力学参数数据集

图4展示了SQJK203采样点土层内桩侧摩阻力与锥尖阻力随深度变化的分布特征。从图4(a)可以看出,侧摩阻力在同一土层的不同位置呈现明显离散性,即使处于同一土层深度区间,侧摩阻力的观测值仍存在显著波动,随深度增加整体呈缓降趋势,但同一土层内的数值差异始终存在,体现了土体性质在水平向的非均质性。图4(b)的锥尖阻力同样表现出这一规律,同一土层内,锥尖阻力的观测值离散程度较高,浅部同一土层内的波动幅度尤为显著;随深度增加,同一土层内锥尖阻力的离散性进一步增强,反映了同一土层内部土体力学性质的空间变异性特征。通过对该场地土体力学参数数据集的统计分析,可得侧摩阻力标准差为142.72 kPa,锥尖阻力标准差为10.64 MPa。该观测结果与统计数据共同揭示了岩土工程中对土层的划分并非精准,即使是同一土层,其侧摩阻力与锥尖阻力也并非均匀分布,而是具有显著的空间变异性。而在非均匀工程场地中,这种空间变异性将更为显著。因此,传统方法中利用分布稀疏的地勘资料代表对应局部区域的土层与岩土参数,并将同一土层简化为均质,采用代表值来进行桩基承载力计算。这种方法存在一定局限性,需采用考虑场地非均匀性的分析方法,才能更精准地刻画土体参数分布特征,提升管桩竖向承载力计算的可靠性。

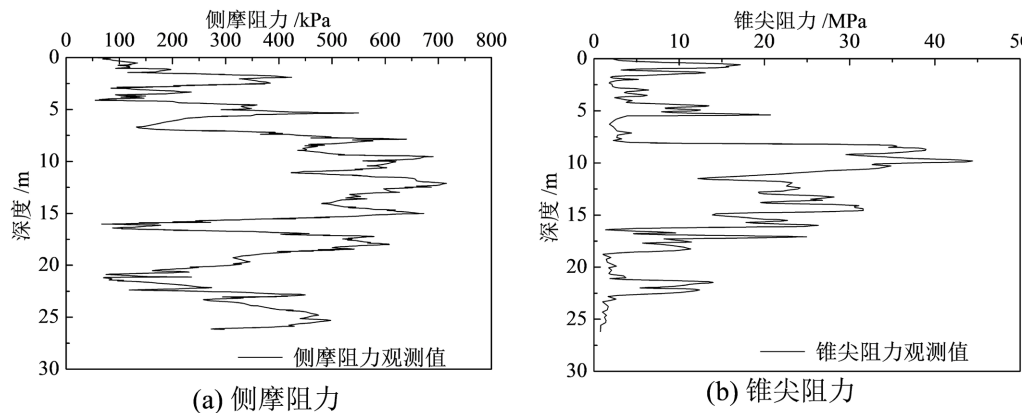


Figure 4. Dataset of lateral friction resistance and cone tip resistance
图4. 侧摩阻力与锥尖阻力数据集

3.3. 场地土体力学参数随机场的构建

基于上述所获取的侧摩阻力标准差和锥尖阻力标准差,进一步结合式(3)即可建立考虑空间变异特征的侧摩阻力与锥尖阻力随机场。图5(a)给出了侧摩阻力随机场样本,图中灰色曲线代表随机场模拟样本,黑色实线为均值曲线,可见随深度增加,随机场均值呈缓降趋势,与土体天然沉积的竖向分层特征一致,而同一深度处样本离散程度显著,既体现了同一土层内部的水平向非均质性,其均值曲线又与实测数据统计规律高度吻合,兼顾了宏观特征拟合与微观变异性量化。图5(b)为锥尖阻力随机场样本。从图中可以看出,其数值量级远高于侧摩阻力,反映了端承与侧摩作用的力学差异。从图中另可知,对于锥尖阻力而言,其浅层波动幅度大于深层,契合浅层土体受地表扰动更显著的工程实际。此外,随深度增加,其离散范围逐步扩大,这与深层土体沉积环境复杂、力学性质变异性更强的规律一致,也解释了深层管桩承载力离散性更高的现象。整体而言,该随机场模型通过均值曲线锚定宏观土层特征,以随机样本波动范围量化工程场地土层的非均匀性,为管桩竖向承载力的统计分布分析提供了包含不确定性的土体参数输入,使分析结果既能反映承载力均值水平,又能体现工程场地非均匀性引发的承载力离散性,最终提升管桩设计的可靠性,进一步提高配桩设计水平。

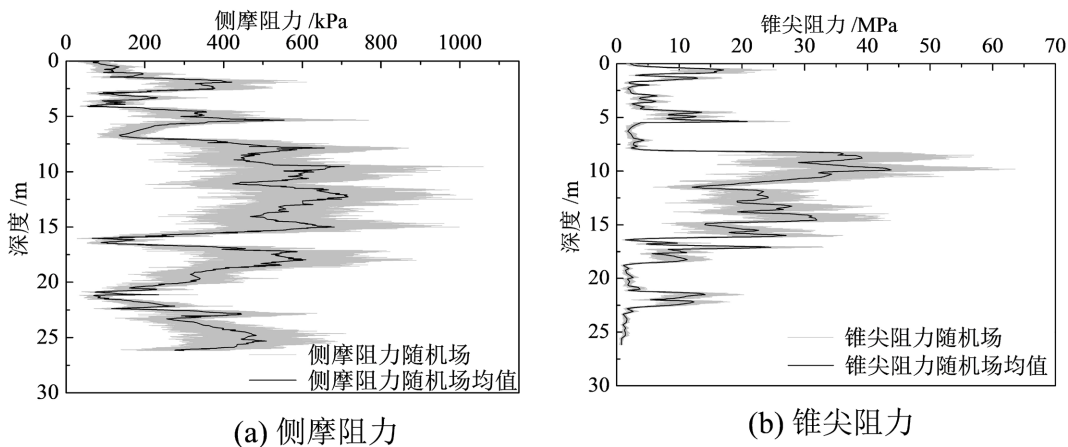


Figure 5. Random samples of lateral friction resistance and cone tip resistance
图 5. 侧摩阻力和锥尖阻力随机样本

3.4. 承载力统计分布特征分析

当侧摩阻力和锥尖阻力随机样本构建完成后,即可进一步采用式(4)计算得到不同随机条件下的管桩竖向承载力值,其统计分布特征如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,竖向承载力在 15.9×10^3 kN~ 16.1×10^3 kN 区间的相对频率最高,体现了承载力分布的集中性;而 15.6×10^3 kN, 16.3×10^3 kN 等区间的相对频率较低,对应承载力的极值分布,这一离散特征是工程场地非均匀性导致阻力参数波动的直接结果。图 6(b)所给出的竖向承载力累积频率分布特征则进一步量化了承载力的概率区间。从图中可以看出,该场地管桩竖向承载力均值为 16009.7 kN, 5%分位数数值为 15703.3 kN, 95%分位数数值为 16209.6 kN。需要注意的是,若忽略土体非均匀特征,直接采用各土层参数的算术均值计算,得到的管桩竖向承载力值仅为 15.82×10^3 kN。该值虽接近统计分布的均值下限,但既无法反映承载力因工程场地非均匀性产生的离散范围,也未考虑极端工况下承载力的波动风险。相比之下,基于随机样本得到的统计分布结果,既明确了承载力的均值水平,又通过分位值量化了工程场地非均匀性引发的承载力不确定性:对于实际工程而言,5%分位值可作为工程设计中的保守取值,能有效规避因土体参数局部弱化导致的承载力不足风险;95%分位值可作为承载力的上限参考,为优化桩长、控制工程成本提供依据。

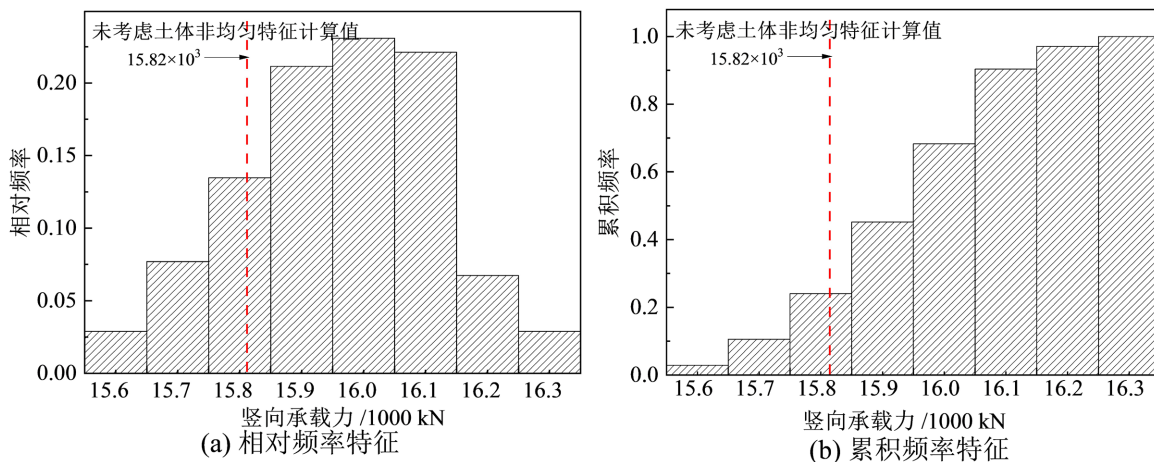


Figure 6. Statistical characteristics of vertical bearing capacity
图 6. 竖向承载力统计特征

4. 结论

本研究构建了融合土体参数空间变异性的管桩竖向承载力概率分析方法,并结合工程实例进行了方法验证与应用,可得出以下核心结论:

(1) 针对传统方法忽略工程场地非均匀性的问题,本文提出融合随机场理论的管桩竖向承载力概率分析方法,通过构建土体力学参数随机场,可量化同一土层内侧摩阻力、锥尖阻力的空间变异性,突破了均质土体假设的局限。

(2) 工程实例验证显示,所提方法可靠适用。土体参数随机场与实测数据规律吻合,且能通过承载力统计分布精准反映非均匀性引发的承载力不确定性,该场地管桩竖向承载力均值为 16009.7 kN, 5%分位值为 15703.3 kN, 95%分位值为 16209.6 kN。

(3) 该方法为管桩承载力设计与风险评估提供新路径,兼顾经济性与准确性,明确的承载力大概率区间 15703.3 kN~16209.6 kN 可直接支撑工程取值,有助于提升管桩基础安全性。

参考文献

- [1] 黎振宇. 不均匀土层下水泥土复合管桩基础的设计探讨[J]. 中华建设, 2025(8): 132-134.
- [2] 朱田, 李熹. 多种方法在 PHC 管桩竖向抗压承载力分析中的应用[J]. 吉林水利, 2025(11): 68-72.
- [3] 熊利, 李勇, 聂浩帆, 等. 干湿循环膨胀土区域预应力管桩位移时效研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(22): 60-64.
- [4] 张继营. 土塞效应和挤密效应对管桩承载力计算方法研究[J]. 运输经理世界, 2025(20): 159-161.
- [5] 张盛楠, 徐东升, 杜文博, 等. 珊瑚礁砂参数变异性对管桩基础承载特性影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(4): 97-103.
- [6] 吴俊喜, 李满旺. 静载试验作用下的基桩竖向抗压承载力分析[J]. 粘接, 2025, 52(12): 256-259.
- [7] 邝悦峰, 林惠庭, 黄日胜, 等. 潜孔锤引孔灌土静压管桩法抗压承载力性能试验[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(10): 39-43.
- [8] 吴磊磊, 张志峰, 吴道祥. 基于光纤及自平衡测试的管桩承载力静力触探法分析[J]. 广州建筑, 2025, 53(9): 9-15.
- [9] 乔旭. 基于 FLAC3D 数值模拟的 PVC 管桩体稳固性优化研究[J]. 黄冈师范学院学报, 2025, 45(5): 51-58.
- [10] 吴以诺. 复杂地质条件下静压管桩承载力提升技术探析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(14): 4-6.