

智能化监测技术的引入为沥青路面的水损害防治提供了更为有效的手段。通过安装传感器和监测系统,能够实时监控沥青路面的水分变化、温度变化和裂缝发展,及时预警并采取修复措施。这些新型材料和技术不仅提高了路面的耐用性,也在一定程度上降低了维护成本和频率,为湿热地区的沥青路面防治技术带来了新的发展机遇。

4.3 未来发展趋势

未来,湿热地区沥青路面的防治技术将朝着高效、环保和智能化方向发展。随着智能材料和先进技术的逐步成熟,沥青路面施工和养护的效率将得到大幅提升。高效的防水技术将以减少施工周期和降低养护成本为目标,同时注重提高材料的环保性和可持续性。例如,采用环保型改性材料和低排放的施工工艺,不仅能够有效延长路面的使用寿命,还能降低对环境的负担。此外,智能化监测技术的进一步发展将使得沥青路面的监控和修复更加精准和实时。通过物联网技术和大数据分析,能够实时监控路面的健康状况,预警潜在问题并制定优化方案,从而实现更高效的管理和维护。未来,湿热地区的沥青路面防治技术将更多地依赖于创新材料、智能化技术和环保理念的结合,以实现更加可持续的路面建设与养护目标。

5 湿热地区沥青路面水损害防治的优化路径

5.1 加强技术培训与应用推广

湿热地区沥青路面防治技术的应用效果与施工和养护人员的技术水平密切相关。为了确保技术的正确实施,必须加强对相关人员的培训,特别是对施工人员和养护人员的操作规范、技术细节及安全防护措施进行培训。这不仅可以提高施工质量,减少施工过程中的错误,还能确保养护工作的长期有效性。此外,政府部门应加大对先进防治技术的推广力度,通过政策支持鼓励企业采用高效、环保的技术手段。可以通过组织技术研讨会、发布技术白皮书、设立培训基地等方式,推动新技术的广泛应用。通过技术培训与推广,可以确保湿热地区沥青路面防治技术的应用更加规范和高效,从而提高道路的耐用性和安全性。

5.2 建立长期的监测与评估机制

水损害的防治需要持续的监测与管理。施工后,定期对沥青路面进行水损害评估是至关重要的,通过及时发现潜在问题并进行修复,可以有效延长路面的使用寿命。建立长期监测机制,利用先进的检测技术,如传感器、图像识别技术和数据分析平台,对路面状态进行实时监控,可以做到早发现、早预警。定期评估不仅能够帮助发现水损害的初期症

状,还能提供数据支持,为未来的养护决策提供依据。通过建立科学的监测系统,政府与企业可以同步跟进路面的健康状况,确保防治措施的及时调整和优化,进一步提升防治技术的应用效果。

5.3 推动行业标准化建设

为了确保湿热地区沥青路面水损害防治技术的广泛应用和有效实施,推动行业标准化建设至关重要。相关技术标准和操作规范的统一,可以确保不同施工单位和养护单位在技术实施过程中遵循相同的标准,从而提高技术的普及率和实施效果。制定和完善技术标准时,应考虑到当地气候条件、道路使用性质以及材料的选择等因素,制定符合实际的标准。此外,行业标准化建设还需涵盖施工、检测、维护等各个环节,确保技术的全程控制和质量保证。通过规范化的标准体系,不仅可以提升整个行业的技术水平,也有助于政府监管和质量评估,推动沥青路面防治技术在湿热地区的全面推广和应用。

6 结语

湿热地区沥青路面水损害防治技术的研究涉及材料科学、施工技术和养护管理等多个领域。湿热气候下,水分的渗透和积聚是导致沥青路面损害的重要原因。通过对湿热地区气候特点的深入分析,可以针对性地提出有效的防治措施,如采用改性沥青、优化路面结构设计、引入高效防水材料等,从而减少水损害对沥青路面的影响。随着新型材料和智能化技术的不断发展,未来的防治技术将更加高效、环保和智能。例如,智能监测技术可以实时监控沥青路面的状态,及时发现水损害风险,并进行远程调控和修复。通过这些先进的技术手段,湿热地区沥青路面的防治效果将得到显著提升,为道路桥梁的可持续发展提供更为可靠的技术支持,确保交通安全与道路质量的长效保障。

参考文献

- [1] 郑敏楠.道路沥青路面水损害的防治与养护探讨[J].居舍,2021,(08):29-30.
- [2] 康兰方.试论道路沥青路面水损害的防治与养护[J].价值工程,2020,39(16):70-71.
- [3] 王子冉.市政道路沥青路面水损害成因及有效防治[J].四川水泥,2018,(11):67.
- [4] 阎健.市政道路沥青路面水损害成因及有效防治分析[J].山西建筑,2017,43(07):130-132.
- [5] 周孟云,刘大龙.市政道路沥青路面水损害成因及有效防治研究[J].黑龙江科技信息,2016,(22):232.

Calculation Method and Engineering Application of Negative Friction Resistance in Pile Foundation Under Groundwater Seepage

Shouxing Zhang

Hebei Provincial Regional Geological Survey Institute, Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

Groundwater seepage is a critical factor affecting the long-term bearing capacity of pile foundations. The resulting changes in soil effective stress and redistribution of frictional resistance at the pile-soil interface lead to the formation and development of negative friction resistance. Based on seepage theory and the interaction mechanism between piles and soil, this study investigates the generation mechanism and calculation methods of negative friction resistance in pile foundations under groundwater conditions. A coupled pile-soil model was established to account for the effects of seepage on effective stress, pore water pressure, and frictional resistance distribution, deriving calculation formulas applicable to various boundary conditions. The model's accuracy was validated through finite element analysis and field monitoring, while the influence of seepage direction, permeability coefficient, and soil compressibility on negative friction resistance was analyzed. Results indicate that groundwater rise and foundation consolidation are the primary causes of negative friction resistance, and reasonable control of pile length ratio and pile end stiffness can effectively mitigate adverse effects. This method provides guidance for pile foundation design and safety assessment under complex hydrogeological conditions.

Keywords

Groundwater seepage; Negative frictional resistance; Pile-soil interaction

地下水渗流作用下桩基负摩阻力计算方法及工程应用

张授兴

河北省区域地质调查院, 中国·河北 廊坊 065000

摘 要

地下水渗流是影响桩基长期承载性能的重要因素, 其引发的土体有效应力变化与桩土界面摩阻重分布, 会导致负摩阻力的形成与发展。本文基于渗流理论与桩土相互作用机理, 研究地下水作用下桩基负摩阻力的产生机制与计算方法。建立桩土耦合模型, 考虑渗流对有效应力、孔隙水压力及摩阻分布的影响, 推导适用于不同边界条件的计算公式。通过有限元分析与现场监测验证模型准确性, 并分析渗流方向、渗透系数及土层压缩性对负摩阻力的影响规律。结果表明, 地下水上升与地基固结是负摩阻力的主要诱因, 合理控制桩长比与桩端刚度可有效削弱不利影响。该方法对复杂水文地质条件下桩基设计与安全评估具有指导意义。

关键词

地下水渗流; 负摩阻力; 桩土相互作用

1 引言

在软弱地基与高含水层地区, 桩基常受到地下水位变化与渗流应力的长期作用, 导致桩土相互作用机制的复杂化。当地下水位上升、地基固结或地层压缩发生时, 桩周土体向下运动, 而桩身相对稳定或沉降较小, 桩侧界面产生向下的剪应力即为负摩阻力。其存在会使桩基附加荷载增加, 导致沉降量扩大甚至桩身结构受力异常。传统桩基设计多基

于静水假设, 未充分考虑渗流效应下的孔隙水压力变化与土体应力重分布, 计算结果偏于保守或失真^[1]。近年来, 随着地下水抽排、回灌及降雨入渗等人类活动的频繁, 地下水动力学变化对桩基的影响愈加显著。针对这一问题, 本文以地下水渗流条件下桩基负摩阻力为研究对象, 分析其形成机理、计算方法与影响因素, 提出基于渗流-固结-桩土耦合理论的计算模型, 并通过工程实例验证方法的可靠性, 为工程实践提供可操作的分析框架。

2 地下水渗流作用下负摩阻力的形成机理

2.1 渗流与有效应力变化的耦合关系

地下水渗流改变了桩周土体的应力平衡状态。根据

【作者简介】张授兴(1981-), 男, 中国河北廊坊人, 本科, 高级工程师, 从事岩土工程研究。

Terzaghi 有效应力原理，土体总应力由有效应力与孔隙水压力共同组成。当地下水渗流方向向上时，孔隙水压力增大，土体有效应力减小，桩周土体抗剪强度降低，摩阻力减弱；当渗流方向向下时，地下水排泄造成附加固结沉降，使桩周土体向下滑移，从而产生负摩阻力。此过程中，渗流速率与渗透系数直接决定孔压变化幅度及应力分布规律。现场实测表明，在地下水位波动频繁地区，桩侧摩阻力的正负转换常与地下水流速变化呈线性关系，说明渗流应力是负摩阻力形成的重要外部驱动因素。

2.2 固结沉降与桩土相对位移机制

负摩阻力的本质是桩土相对位移所引起的剪切应力重分布。当地基土在自重、建筑荷载或渗流固结作用下产生沉降，而桩身因刚度大、沉降小，桩周土体相对桩身向下运动，使界面上部产生向下的摩阻力。沉降差越大，负摩阻力越显著。渗流条件下，地下水排泄导致土层孔隙压缩，增加地基固结沉降速度，强化桩土间的相对滑移效应^[2]。研究表明，在高渗透性粉细砂层中，渗流固结引起的负摩阻力可占桩总摩阻力的 30% 以上，对桩顶荷载传递及沉降控制不容忽视。

2.3 水文地质条件与土层特性的影响

不同水文地质环境对负摩阻力形成的敏感性差异显著。在粉质黏土与淤泥质土层中，由于压缩性大、渗透性差，负摩阻力发展速度较慢但累积量大；而在砂质地层中，渗流通道发育，孔压变化灵敏，负摩阻力形成迅速但持续时间较短。此外，地层的分层性及地下水埋深变化决定了负摩阻力的空间分布特征。若上层为可渗透层、下层为低渗透层，渗流势差将集中在桩中上部区域，使负摩阻力呈“钟形”分布，形成典型的局部集中效应。

3 负摩阻力计算方法的理论分析

3.1 经典力学模型与计算假设

传统负摩阻力计算主要基于桩土相对位移理论与滑动面假设，其核心思想在于桩与周围土体存在相对位移时，界面产生剪切应力，进而形成摩阻力分布。经典模型认为桩土间摩阻力与相对位移呈非线性关系，可采用双折线模型、双曲线模型或指数衰减模型进行拟合。其表达式一般为：

$$q_s(z) = f(\Delta u, \sigma_v', \delta_s)$$

其中， $q_s(z)$ 为桩侧摩阻力， Δu 为孔隙水压力增量， σ_v' 为有效应力， δ_s 为桩土相对位移。模型中假设孔压变化均匀分布，不考虑渗流效应的动态性，适用于地下水稳定或静水条件下的桩基受力分析。然而在地下水持续渗流的环境中，该假设会导致摩阻力计算偏差，尤其在高渗透性砂层或长期固结条件下，孔压时变特征与有效应力变化之间存在明显滞后关系，使传统模型的适用性受到限制。因此，在多变水文地质条件下，有必要引入渗流耦合因素，对传统力学模型进行修正与拓展，以提高负摩阻力计算的准确性。

3.2 渗流耦合修正模型的建立

为克服传统模型未能考虑渗流应力动态变化的不足，本文基于渗流—固结耦合理论建立修正模型。假设孔隙水压力沿桩深呈指数衰减规律：

$$\Delta u(z) = \Delta u_0 e^{-kz}$$

其中， Δu_0 为地表孔压增量， k 为衰减系数，取决于渗透系数、土层厚度及边界条件。由 Terzaghi 有效应力原理可得桩侧摩阻力修正表达式：

$$q_s(z) = \beta[\sigma_v' - \Delta u(z)]$$

式中， β 为桩土摩阻系数。通过沿桩深积分，得总负摩阻力：

$$Q_n = \int_{z_1}^{z_2} q_s(z) dz$$

该模型可反映孔压变化对摩阻力分布的影响，尤其适用于地下水波动显著、土层分异复杂的区域。与静态模型相比，渗流耦合模型能准确描述负摩阻力的形成与峰值转移过程。研究表明，随渗透系数增大或地下水位上升，负摩阻力峰值区上移，桩顶附加荷载增大；当渗流方向逆转时，摩阻力可由负转正，体现了应力场与渗流场的耦合响应特征。

3.3 负摩阻力的判定与分布规律

负摩阻力的识别与分布判定是桩基设计的关键环节。一般认为，当桩周土体相对沉降量大于桩身沉降量的 1.2 倍时，界面摩阻方向由上向下转变，标志着负摩阻力的产生。沿桩深分布特征表现为“上大下小”，即桩顶段摩阻力最大，中部过渡区次之，桩端区域逐渐减弱。不同渗流条件下，负摩阻力的作用范围存在明显差异：在下渗流条件下，桩中部负摩阻力集中，峰值可达总桩摩阻力的 40% 以上；在上升流条件下，由于有效应力减小，负摩阻力衰减明显，甚至出现局部正摩阻力区，形成“剪应力反转带”。此外，土层分层性对摩阻分布具有重要影响，高渗透性砂层中摩阻力变化敏感，而低渗透性黏土层中则呈现平缓分布。综合分析表明，负摩阻力不仅与桩土相对位移有关，更受渗流梯度、地层结构及孔压变化速率共同控制。通过建立判定标准与分布模型，可为桩基安全储备与抗沉降设计提供可靠依据。

4 负摩阻力的数值模拟与参数研究

4.1 有限元模型的建立与验证

为深入研究地下水渗流作用下桩基负摩阻力的分布规律与形成机制，本文基于 ABAQUS 建立了三维桩土耦合有限元模型。桩体采用线弹性材料模拟，以反映其轴向受力与弯曲变形特性；土体采用修正 Cam-Clay 本构模型，能够合理描述渗流固结条件下土体的应力—应变关系及孔压变化过程。模型中渗流场由达西定律控制，考虑渗透系数的深度变化及孔压传递效应。桩土接触面采用摩擦接触算法，定义可滑移边界，以模拟界面摩阻力的非线性特征。计算过程中，