

# Discussion on the Side Friction Resistance Characteristics of Pile Foundations in Different Geological Layers

Haiyang Xie Yong Yan

Wuhan Geological Prospecting & Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430050, China

## Abstract

As an important form widely used in deep foundation structures, the bearing performance of pile foundations shows significant differences under different geological conditions, especially the variation of lateral friction resistance is the most sensitive. This paper systematically discusses the lateral frictional resistance endured by pile foundations in different geological layers, analyzes its formation mechanism, influencing factors, and manifestation characteristics in typical strata, with a focus on the differences in frictional resistance among clay layers, sand layers, and pebble layers. Through on-site static load tests, in-situ tests and numerical simulations, etc., the variation laws and control factors of pile side resistance under different stratum conditions were compared and analyzed, and targeted parameter selection and construction optimization suggestions were proposed. The research results can provide theoretical support and technical basis for the design of pile foundations under complex geological conditions, enhancing the safety and economy of the project.

## Keywords

Pile foundation Side friction resistance Geological layer Pile-soil action Construction technology

## 不同地质层中桩基侧摩阻力特性探讨

谢海洋 严勇

武汉地质勘察基础工程有限公司, 中国·湖北 武汉 430050

## 摘要

桩基作为深基础结构中广泛应用的重要形式,其承载性能在不同地质条件下表现出显著差异,尤其以侧摩阻力的变化最为敏感。本文围绕不同地质层中桩基所承受的侧摩阻力展开系统探讨,分析其形成机理、影响因素及典型地层中的表现特征,重点研究黏土层、砂土层与卵石层中的摩阻差异。通过现场静载试验、原位测试与数值模拟等方法,对比分析不同地质层条件下桩侧阻力的变化规律与控制要素,提出针对性强的参数选取与施工优化建议。研究成果可为复杂地质条件下桩基设计提供理论支持与技术依据,提升工程安全性与经济性。

## 关键词

桩基; 侧摩阻力; 地质层; 桩土作用; 施工工艺

## 1 引言

在岩土工程领域,桩基作为深基础的重要形式,其承载性能直接关系到上部结构的安全与稳定。侧摩阻力作为桩基总承载力的重要组成部分,受地质条件、桩型参数与施工工艺等多因素影响,尤其在不同地层中其变化趋势和力学特性存在显著差异。随着城市建设深入软弱地基与复杂地质环境,准确掌握各类地层中侧摩阻力的发展规律,成为桩基设计优化的关键环节。近年来,随着现场测试手段和数值模拟技术的进步,为桩土作用研究提供了丰富的实证与模拟数据。本文将系统分析各类典型地质层中的桩基侧摩阻力特性,结合实测与理论结果,探索其在设计与施工中的应用价值。

## 2 桩基侧摩阻力的基本理论与影响因素

桩基在竖向荷载作用下通过桩端阻力与侧摩阻力共同承担上部结构传来的力,侧摩阻力来源于桩身与周围土体之间的相互剪切作用。在荷载传递过程中,桩周土体受剪变形,形成剪应力集中带,当剪应力超过土体与桩体之间的界面黏聚力与内摩阻力时,即表现为侧摩阻力的发挥。桩土接触界面状态、相对位移、应力集中程度与土体强度参数直接决定了侧阻力的形成过程。不同土体的变形模量、抗剪强度与应变软化特征,会在加载初期、中期与极限状态下展现出不同的侧阻发展趋势。桩土之间的黏聚性、粗糙度以及水文环境等因素也参与了界面摩阻力的演化过程,使侧摩阻力成为一个典型的多因素耦合力学响应结果。

【作者简介】谢海洋(1990-),男,中国湖北红安人,助理工程师,从事项目质量技术管理。

### 3 常见地质层类型与桩侧阻特性差异分析

#### 3.1 黏土层中桩基侧摩阻力的发展特征

黏土层因其高黏结性、低透水性及明显的塑性变形能力，在桩土作用中形成了独特的摩阻力学响应。在荷载传递过程中，桩周黏土通过剪切滑移积累侧摩阻力，界面黏结力与负孔压效应促使摩阻力在中等荷载下迅速增长。随着应力集中与变形推进，剪应力可能超过黏土极限抗剪强度，引发软化与滑动，从而导致侧阻发展趋缓或下降。在中软至硬塑状态下，黏土层对侧摩阻力的发挥具有较强支撑作用，表现为上部强、下部弱的分布特征。含水率的变化、孔隙水压力消散能力以及应变速率都将影响桩周摩阻力的建立过程。

#### 3.2 砂土层中摩阻力分布与变化机制

砂土层中桩基侧摩阻力主要依赖于颗粒间摩擦力与桩土相对位移所形成的界面剪切效应。在垂直荷载作用下，桩身与周围砂粒接触界面形成一定的剪应力集中区，粗粒结构及低黏结性使砂土层中摩阻力呈现明显的应力-位移相关性。砂土层在地基自重压密或施工扰动后，其结构性可能增强摩阻力，但也存在因孔隙率高而形成滑移面、降低剪应力承载的风险。在不同深度分布的砂层中，侧摩阻力表现为随深度增加而增强的趋势，直至临界应力状态出现。

#### 3.3 卵石层及风化岩层中侧阻力的力学表现

卵石层及风化岩层属于结构强度高、骨架稳定性强的土体类型，其桩基侧摩阻力主要来源于颗粒嵌挤作用与界面粗糙面的剪切承载。在卵石层中，桩与卵石间形成点接触或面接触结构，嵌挤阻力显著高于一般土层，表现为高强度、高刚度的摩阻反应。卵石层中摩阻力的发挥受桩体扰动引起的碎石重新排列影响，而风化岩层中摩阻力的增强则更多体现于结构重建与剪切面滑移控制的动态平衡过程。

### 4 不同地质层桩基施工工艺对侧摩阻力的影响

#### 4.1 钻孔灌注桩在不同地质条件下的摩阻表现

钻孔灌注桩因其成孔方式与桩体成型特点，在不同地质层中展现出差异显著的侧摩阻力性能。在黏土层中，由于钻孔过程对原状土体扰动较大，易造成桩周土体强度下降，导致初始摩阻力偏低，但后期随土体固结可逐步恢复。砂土层中成孔稳定性差，泥浆护壁不当会引发孔壁坍塌，桩周界面粗糙度降低，影响侧阻力发挥。卵石层中钻进阻力大，孔壁完整性受扰动影响显著，常因清孔不到位导致桩周泥浆残留，形成隔离层，削弱摩阻效能。钻孔灌注桩的桩土接触面多为原位接触，不经预压，侧摩阻力发展缓慢，需结合长期加载与固结效果评估最终承载状态，其在结构稳定性与施工适应性上仍需针对地层特点精细控制施工工艺。

#### 4.2 沉管灌注桩工艺对侧摩阻力产生的改性效应

沉管灌注桩通过强行贯入地层形成桩孔，并在拔管同时灌注混凝土，因其挤密地基的特性，在特定地质条件下可显著提高桩周侧摩阻力。黏土层中沉管入土形成的扰动可导

致桩周土体重塑，短期内摩阻力下降，但随着土体回弹与孔隙压力消散，摩阻力会逐渐增强。对于卵石夹层或碎石含量高的地层，沉管过程易引发管口堵塞与孔径变形，影响桩身完整性与摩阻均匀性。施工速度、灌注同步性、混凝土塌落度等技术细节将直接影响桩土界面质量，从而决定侧摩阻力是否能够充分发挥，需在设计中针对性设定参数与控制标准。

#### 4.3 成孔质量与泥浆护壁技术对侧阻力的作用

桩基施工中的成孔质量与护壁技术对桩周土体扰动程度及界面状态具有关键影响，是侧摩阻力发挥的前提保障。在弱黏土地层中，泥浆护壁通过抑制孔壁坍塌保证成孔稳定性，但泥浆浓度、比重控制不当会导致残留泥膜粘附桩壁，形成隔离层，阻碍桩土有效接触，严重削弱摩阻承载能力。砂土层中成孔过程中孔壁扰动显著，泥浆循环速度不足将导致砂粒堆积，产生孔形变化与局部塌方，造成摩阻不均。在卵石层或风化岩层，成孔技术难度大，常因岩渣残留导致孔底沉渣厚度增加，不仅影响端阻力，也破坏侧壁清洁度，使摩阻发挥受限。成孔垂直度、孔径控制与泥浆参数的联动调节应作为工艺控制重点，以实现桩土界面的均匀接触与摩阻力的持续稳定发展，图1为不同桩基的结构方式解析。

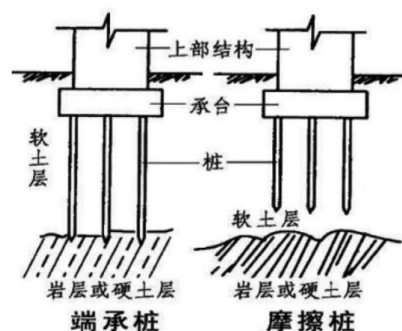


图1 不同桩基的结构方式解析

### 5 现场测试与数值模拟对侧摩阻力的研究手段

#### 5.1 静载试验与低应变测试对侧阻力的识别方法

静载试验是评估桩基承载性能的主要手段，可通过荷载-沉降曲线分析侧摩阻力与端阻力的分布比例。加载过程中采用分级加载-卸载方法，配合埋设桩身应变计与位移计，可反演不同深度的桩周摩阻力发展规律。试验结果能够准确反映实际工况下的承载状态，为摩阻特性分析提供直观数据支持。低应变反射波测试主要用于桩身完整性评估，虽不能直接量化摩阻力，但可通过反射信号变化间接识别桩土接触质量与界面扰动程度。在黏土层中波速变化较明显，可判断桩身与软弱土体结合质量，在砂土层中则可通过波阻抗差异识别接触界面质量。两类测试联用能在确保桩身安全的同时，提供摩阻力分布的有效参考数据，图2为静载试验与低应变测试对侧阻力的识别量表。

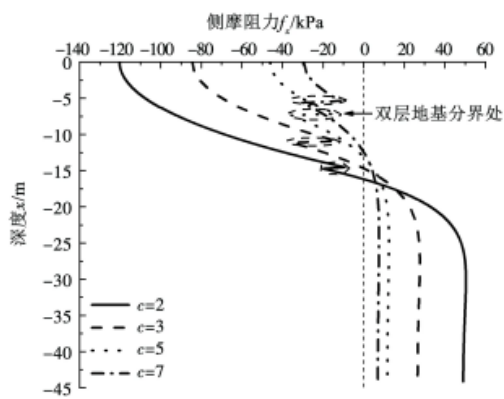


图2 静载试验与低应变测试对侧阻力的识别量表

## 5.2 原位测试（如孔压静力触探）在地质层识别中的作用

孔压静力触探试验通过连续推进探头并测量锥头阻力、侧壁摩阻与孔压变化，可高精度识别地质层变化与力学性质，为摩阻力评估提供可靠基础数据。该方法能在不扰动原状土体的前提下实时反映土层强度、密实度及摩阻趋势，是预测桩基在不同深度侧摩阻力的重要手段。尤其在细颗粒土中，孔压变化曲线能够揭示土体排水性与剪切强度发展状况，有助于判断界面摩阻演化过程。在砂土层中，摩阻比与锥阻比的比值可直接推断地层密实程度与预期摩阻水平。该测试方法具有连续性强、代表性高的优点，可为数值建模与参数反演提供地层参数标定依据，是指导设计与优化摩阻利用效率的重要工具。

## 5.3 有限元模拟在桩-土摩阻分析中的精度控制策略

有限元模拟在研究桩基侧摩阻力方面具有高度灵活性与精细化特征，通过构建合理的桩土相互作用模型，可在多种地质条件与荷载工况下分析摩阻发展趋势。通过对实测数据进行模型反演校核，可实现对桩基摩阻力分布的高可信度模拟，为复杂地质条件下设计参数的选取与优化提供理论支持。

## 6 优化设计中不同地层侧摩阻力参数的选取建议

桩基设计中广泛采用经验系数法与现行规范推荐值来

确定不同地层的侧摩阻力计算参数，操作简便，适用范围广泛。在黏土层中，经验系数通常依赖于土体天然含水率、塑性指数与深度修正系数，对于一致性较高的软土或硬塑土层，能较好反映实际受力状况。砂土层的摩阻参数常按标准贯入击数分级，对应分布范围明确，设计中具有良好的通用性。风化岩层与卵石层则因结构复杂，经验值常偏保守，导致设计承载力低估或桩长不合理。规范推荐值虽然提供分层参数参考，但对区域地质差异与桩型工艺未作精细区分，适应性有限。依赖经验值容易掩盖局部地质特征变化的影响，因此在复杂地层中建议结合实测数据校核，避免因参数不匹配而产生桩长超设、侧摩失效等问题。实际工程中，针对勘察等级较低或地层复杂度较高区域，应综合考虑不利地质因素影响，合理提升设计安全系数，以确保结构承载稳定性与长期服役性能。

## 7 结语

桩基侧摩阻力作为桩土相互作用的重要组成部分，在不同地质条件下呈现出显著的差异性，其形成机制与演化路径受到多种因素的共同影响。通过系统探讨地质层类型、施工工艺、测试方法与参数选取策略，有助于全面理解桩侧阻力的发展规律与控制要素，为优化设计提供技术支撑。工程实践中应注重实测数据与理论分析的结合，提升对复杂地层中侧摩阻力特性的认知深度。在应对地质不确定性时，强化设计弹性与安全冗余管理，将有助于提升桩基承载性能的稳定性和使用年限。

## 参考文献

- [1] 辛亮亮.大厚度黄土地方场地桩基承载特性及固结沉降引起的负摩阻力分析[D].导师：叶帅华;梁亚平.兰州理工大学,2024.
- [2] 陈列霞.真空排水管桩排水固结性能及侧摩阻力特性室内模型试验研究[D].导师：刘叔灼;李峰.华南理工大学,2023.
- [3] 陈智华.淤泥质软土下双护筒桩基负摩阻力特性研究[D].导师：刘延波.哈尔滨工程大学,2023.
- [4] 朱润朝.堆载下长短桩组合桩基负摩阻力特性研究[D].导师：范孟华.河南大学,2021.