

# 软土地区大直径超长桥梁桩基承载力特性研究

秦继伟 樊景成

河南省地质局矿产资源勘查中心 河南 郑州 450000

**摘要:** 随着我国重大交通基础设施向滨海、河口及湖沼等深厚软土区域延伸,大直径超长钻孔灌注桩已成为跨越此类不良地质条件的大型桥梁工程中不可或缺的基础形式。该类桩基兼具“大直径”(通常指桩径 $D \geq 1.5\text{m}$ )与“超长”(一般指桩长 $L \geq 60\text{m}$ ,甚至超过百米)的双重特征,在高压缩性、低强度、强流变性的软土地基中,其承载机理呈现出显著区别于常规桩基的复杂性。本文从岩土力学基本原理出发,系统剖析软土物理力学特性对桩-土相互作用的根本影响,深入探讨大直径超长桩在竖向荷载作用下的荷载传递机制、侧阻力与端阻力的发挥规律及其协同效应,并重点阐释尺寸效应、时间效应及临界桩长等关键概念在此类桩型中的特殊表现。在此基础上,对现行规范中基于经验公式的承载力计算方法在应用于该类特殊桩基时所面临的理论局限进行反思,并提出以沉降控制为核心、融合多尺度力学认知的设计理念。本研究旨在为软土地区大跨桥梁桩基的合理设计提供理论支撑与方法论指导。

**关键词:** 软土;大直径桩;超长桩;桥梁基础;承载力机理;荷载传递

## 引言

21世纪国家重大战略推动跨江跨海通道、高铁网大规模建设,这些工程常穿越我国东南沿海等地的深厚软土区。软土作为不良工程地质介质,具有高含水率等特性,给基础工程带来挑战。为确保上部结构——尤其是承受巨大恒载与动载的大跨度桥梁——的安全、稳定与长期服役性能,工程界普遍采用大直径、超长钻孔灌注桩作为主墩基础。这种选择源于其能够有效穿透巨厚软弱覆盖层,将荷载可靠地传递至深部相对稳定的持力层,并凭借巨大的几何尺寸提供充足的承载力储备。然而,“大直径”与“超长”的耦合,在软土这一特殊赋存环境中,催生了诸多复杂的岩土力学问题。传统的桩基设计理论,多建立在小直径、中等长度桩的试验与经验之上,其核心假设与简化模型在面对此类极端工况时,其适用性受到严重质疑。因此,超越经验公式的束缚,回归力学本质,深入探究软土地区大直径超长桩基的内在承载机理,不仅是岩土工程学科发展的内在需求,更是保障国家重大基础设施安全的迫切现实要求。

### 1 软土的工程特性及其对桩基工作状态的制约

软土并非一种简单的连续介质,而是一个由固、液、气三相组成的、具有复杂微观结构和宏观响应的多孔介质。

#### 1.1 软土的核心力学属性

①结构性与灵敏度:天然沉积的软土往往具有絮凝状或蜂窝状的微观结构,这种结构赋予了其一定的“天然强度”。然而,一旦受到外部扰动(如钻孔施工),这种脆弱的结构极易被破坏,导致强度大幅衰减,即表现出高灵敏度。这意味着成桩过程本身就会劣化桩周土体

的力学性能。②非线性与弹塑性:软土的应力-应变关系高度非线性,且具有明显的弹塑性特征。在小应变下可能表现为近似弹性,但随着应变增大,迅速进入塑性流动阶段<sup>[1]</sup>。其变形模量随应力水平的增加而增大,这使得用单一的弹性模量来描述其性质是不恰当的。③固结与流变:由于渗透性极低,软土在荷载作用下的排水固结过程极其缓慢,可持续数年乃至数十年。更重要的是,即使在有效应力不变的情况下,其变形仍会随时间持续增长,即次固结或蠕变。这是软土区别于其他土类的最本质特征之一。

#### 1.2 对桩基承载力的制约机制

上述特性共同决定了软土对桩基承载力的根本制约:

①侧阻力供给能力低下:软土的低抗剪强度直接限制了其能提供的极限单位侧阻力。同时,其高压缩性意味着在较小的桩-土相对位移下,土体便可能发生过大变形,无法有效“咬合”桩身,从而难以充分发挥其潜在的摩擦阻力。②承载力发挥的滞后性:由于固结和流变的存在,桩基承载力并非瞬时达到其理论最大值。在加载初期,大部分荷载可能仅由浅部土体承担;随着时间的推移,深部土体逐渐固结、强度提高,其侧阻力才得以逐步发挥。这种时间依赖性(时效性)是软土桩基设计中不可忽视的关键因素。③沉降成为控制性指标:在软土地基上,即使桩基的极限承载力远高于上部结构荷载,其产生的沉降(包括瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降)也可能因过大而影响上部结构的正常使用。因此,对于大直径超长桩而言,设计往往由沉降控制而非承载力控制。

## 2 大直径超长桩基承载力特性的理论机理

当“大直径”与“超长”这两个特征叠加于软土环境之中，桩基的承载机理会呈现出一系列独特的现象。

### 2.1 荷载传递的深度非线性

对于超长桩，其长度远大于所谓的“临界桩长”（即侧阻力达到极限所需桩长）。在此条件下，桩顶施加的荷载通过桩身轴力沿深度向下传递，而轴力的衰减速率取决于桩周土体的侧阻力。在浅部深厚的软土层中，由于土体强度低、易压缩，所能提供的侧阻力极小，导致桩身轴力衰减缓慢，大部分荷载被传递至深部。只有当桩身进入相对较好的土层（如砂层、硬塑粘土或风化岩）时，侧阻力才开始显著发挥，轴力迅速衰减。因此，荷载传递呈现出强烈的深度非线性，承载力的主体贡献来源于桩身下部。

### 2.2 尺寸效应的凸显

“尺寸效应”是指桩的几何尺寸（主要是直径）对其单位面积侧阻力和端阻力的影响。对于大直径桩，这一效应尤为显著：①侧阻力尺寸效应：大直径桩在成孔过程中对周围土体的扰动范围更大，形成的泥皮通常更厚、更疏松，这极大地削弱了桩-土界面的有效剪切强度。此外，大直径桩的桩周土体处于更复杂的三维应力状态，其峰值强度对应的应变也更大。这些因素共同导致大直径桩的单位面积侧阻力普遍低于根据小直径试桩得出的经验值<sup>[2]</sup>。②端阻力尺寸效应：大直径桩的桩端承载属于深基础问题，其破坏模式更接近于整体剪切破坏，影响范围广。根据塑性理论，极限端阻力会随桩径增大而有所降低，因为更大的桩径意味着更深的埋置深度和更复杂的应力重分布。

### 2.3 侧阻力与端阻力的协同与制约

在超长桩中，侧阻力是承载力的主要来源，端阻力占比较小。二者之间存在复杂的相互作用：①侧阻主导：由于桩长远大于临界桩长，绝大部分荷载在到达桩端前已被桩侧摩阻力所平衡。②端阻的“触发”作用：虽然端阻占比小，但其发挥对于调动深部侧阻力至关重要。只有当桩端产生足够的“刺入”位移，才能使桩端附近区域的桩-土相对位移增大，从而激活该区域的侧阻力。可以说，端阻的发挥是深部侧阻充分调动的必要条件。③相互制约：一旦端阻开始发挥作用，它会减小桩端附近的桩身压缩量，从而减小该区域的桩-土相对位移，反过来又会抑制侧阻力的进一步增长。这种动态平衡关系使得承载力的发挥成为一个自调节的过程。

## 3 关键影响因素的理论探讨

### 3.1 临界桩长的概念再审视

临界桩长（ $L_c$ ）是桩基设计中的一个重要概念，指

桩侧阻力达到其极限值所需的最小桩长。在均质土层中， $L_c$ 可由理论公式估算。然而，在软土地区，情况变得极为复杂：①非均质地层：实际地层是分层的，软土层之下可能存在多个力学性质不同的土层。此时，临界桩长并非一个固定值，而是取决于各土层的厚度与强度。②软土层的“无效”性：在巨厚软土层中，该层对侧阻力的贡献微乎其微，可近似视为“无效长度”。真正有效桩长应从进入第一个能提供有效侧阻的土层算起。因此，一味增加桩长以穿越软土层，其经济效益会急剧下降，存在一个技术经济最优的“合理桩长”。

### 3.2 时间效应（时效性）的力学内涵

时间效应对软土桩基承载力的影响是双重的：①承载力增长：随着时间的推移，桩周软土在桩身荷载引起的附加应力作用下，发生固结，有效应力增加，土体强度（不排水抗剪强度 $c_u$ ）随之提高。这使得桩侧阻力具有“时效性”，即承载力随时间而增长<sup>[3]</sup>。②沉降发展：与此同时，土体的固结和流变也导致桩基沉降持续发展。这种长期沉降对于桥梁结构的平顺性和耐久性构成威胁。因此，设计时不仅要考虑初始承载力，更要预测其长期沉降行为。

### 3.3 成桩工艺的隐性影响

尽管本文不涉及具体施工，但必须认识到，成桩工艺是连接设计理论与工程现实的桥梁，其对最终承载力有决定性影响。钻孔过程中的泥浆性能、清孔质量、混凝土浇筑的连续性与密实度等，都会直接影响桩-土界面的状态。特别是泥皮的存在，相当于在桩与土之间设置了一层软弱夹层，会显著降低界面的剪切强度，这是理论分析中常被忽略但现实中至关重要的负面因素。

## 4 对现行设计方法的反思

目前，国内外桥梁桩基设计普遍遵循相关行业规范，其核心是极限状态设计法，承载力计算多采用总应力法或有效应力法的经验公式：

$$Q_u = Q_s + Q_p = \sum(q_{si} \cdot u \cdot l_i) + q_p \cdot A_p$$

其中， $q_{si}$ 和 $q_p$ 通常根据土的物理指标（如标准贯入击数 $N$ 、静力触探锥尖阻力 $q_c$ 等）查表或通过经验关系式确定。这种方法在应用于软土地区大直径超长桩时，存在深刻的理论缺陷：①经验公式的外推风险：规范中的经验参数大多源于大量中小型桩的统计回归，其数据库中缺乏真实尺度的大直径超长桩样本。将这些参数直接外推至极端尺寸的桩基，忽略了显著的尺寸效应，必然导致承载力被系统性高估。②静态模型的局限：经验公式本质上是一个静态的、瞬时的承载力评估模型。它完全忽略了软土固有的时间效应，既未考虑承载力随时间的

增长,也未考虑沉降的长期发展,无法满足对结构长期性能精准预测需求。③荷载传递的过度简化:公式假定侧阻力沿桩身按某种预设模式(如均匀分布、梯形分布)发挥,这与超长桩在非均质软土地基中“自上而下、渐进式、非线性”的真实荷载传递过程相去甚远。④界面特性的缺失:计算模型将桩-土界面视为理想接触,未能反映实际工程中因施工扰动、泥皮等因素造成的界面弱化。

### 5 面向未来的设计理念与建议

针对上述局限,未来的软土地区大直径超长桩基设计应朝着更加科学、精细和可靠的方向发展:①确立“沉降控制”为核心的设计哲学:鉴于软土地基的变形特性,设计目标应从单纯满足承载力要求,转变为在满足承载力安全系数的前提下,严格控制桩基的总沉降及工后沉降。这要求设计师具备更强的变形分析能力。②发展基于机理的半理论-半经验方法:应鼓励发展能够部分反映荷载传递机理的分析方法,例如荷载传递( $t-z, Q-w$ )曲线法。通过将桩离散为一系列弹簧单元,可以更真实地模拟侧阻与端阻的非线性发挥过程,并方便地引入时间相关的土体参数<sup>[4]</sup>。③重视桩-土共同作用分析:对于群桩基础,必须考虑群桩效应。在深厚软土中,超长群桩的应力影响区在深部大面积重叠,导致土体的整体压缩,群桩沉降远大于单桩沉降之和。设计应从单桩分析转向群桩-承台-土体的共同作用体系分析。④强化对施工过程的理论考量:设计理论应尝试纳入对成桩效应的修正。例如,可以通过引入界面折减系数,对规范给出的侧阻力标准值进行系统性折减,以补偿施工扰动带来的负面

影响。⑤推动精细化勘察与原位测试:高质量的设计始于高质量的地质信息。应加强针对深部土层的精细化勘察,获取能真实反映土体应力历史和结构性的参数(如OCR, $\lambda, \kappa$ 等),为理论分析提供可靠输入。

### 6 结语

软土地区大直径超长桥梁桩基承载力特性,是软土属性与桩基极端几何特征耦合的复杂结果。其特点鲜明:承载力主要源于深部良好土层,浅部软土作用小;荷载传递深度非线性与时间依赖性强;尺寸效应突出,单位面积阻力低于常规;侧阻力与端阻力动态协同制约。现行规范的经验公式法,因静态、外推、简化等局限,难以应对此类复杂问题。未来设计实践需从“经验驱动”转向“机理驱动”,以沉降控制为核心,融合荷载传递理论、土体本构关系及施工效应等多维度知识,构建科学严谨、适应极端工况的桩基设计理论体系,为国家重大基础设施在复杂地质条件下的安全、经济、耐久建设提供坚实理论支撑。

### 参考文献

- [1]蒋玉龙,冯国鹏,徐泽楠.饱和软土中桩基竖向承载力特性的试验研究[J].工程机械与维修,2024,(03):75-77.
- [2]李向男.厚硬壳层软土地区桥梁桩基承载力试验分析[J].交通世界,2025,(36):168-170.
- [3]乔世范,蔡子勇,檀俊坤,等.深厚淤泥软土地层桩基承载力性状研究[J].建筑结构,2022,52(S1):2729-2735.
- [4]谢晓军,成凯,张超.厚硬壳层软土地区桩基承载力试验研究[J].公路,2024,69(01):177-182.