

关于在软土地基条件下市政桥梁桩基施工沉降控制技术的应用研究

梁睿

440883*****4556

摘要: 市政桥梁作为城市交通网络的关键节点,其桩基施工质量直接影响桥梁整体稳定性与使用寿命。软土地基因具有高含水量、低强度及高压缩性等特性,已成为市政桥梁桩基施工中沉降控制的主要难点。传统桩基沉降控制技术依赖经验设计与常规监测手段,在软土地基复杂应力环境下易出现沉降量超标、差异沉降显著等问题,制约桥梁工程的安全性及耐久性。本文针对软土地基条件下市政桥梁桩基施工沉降控制需求,系统研究了沉降产生机理与关键影响因素,深入分析了桩基类型选择、桩侧摩阻力优化、桩端承载力提升及施工过程控制等核心技术措施,重点探讨了沉降监测技术与动态反馈调整机制的应用方法。研究表明,通过桩基设计与施工技术的协同优化,结合实时监测数据的动态反馈,可有效控制软土地基中桩基的沉降量与差异沉降,提升市政桥梁桩基的长期稳定性,为类似工程提供理论与技术参考。

关键词: 软土地基; 市政桥梁; 桩基施工; 沉降控制; 承载力

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 12. 021

引言

随着我国城市化进程的快速推进,市政桥梁建设规模持续扩大,大量桥梁需跨越河流、湖泊及城市低洼地带,其基础常建于软土地基之上。软土地基以高含水量、低抗剪强度及高压缩性为主要特征,桩基施工后易因附加应力作用产生显著沉降,若沉降控制不当,可能导致桥梁上部结构开裂、桥面不平顺甚至引发安全事故。传统桩基沉降控制技术主要依赖经验公式计算与常规监测手段,在软土地基复杂应力路径与时间效应作用下,难以精准预测沉降量并实现动态调整。近年来,随着岩土力学理论与施工技术的不断发展,针对软土地基的桩基沉降控制技术逐步完善,为市政桥梁工程的安全实施提供了新的解决方案。本文聚焦软土地基条件下市政桥梁桩基施工沉降控制问题,研究沉降机理、关键技术措施及动态反馈机制,旨在提升桩基沉降控制的科学性与有效性。

1 软土地基条件下桩基沉降机理与影响因素分析

1.1 软土地基的工程特性与沉降特征

软土地基主要由淤泥、淤泥质土及部分冲填土组成,其典型工程特性表现为:一是高含水量,通常超过液限(含水量大于50%),土体呈流塑或软塑状态;二是低强度,抗剪强度指标(内摩擦角与黏聚力)远低于硬质

土层,承载力极低;三是高压缩性,压缩系数大于 0.5MPa^{-1} ,受附加应力作用时易产生显著压缩变形;四是触变性,土体结构受扰动后强度急剧降低,静置后缓慢恢复;五是流变性,长期荷载作用下土体变形随时间持续发展。这些特性导致软土地基中桩基施工后,桩周土体与桩端土层在附加应力、孔隙水压力消散及土体固结作用下产生复杂的沉降变形,包括瞬时沉降(弹性变形)、主固结沉降(孔隙水压力消散引起的塑性变形)及次固结沉降(土体结构长期蠕变导致的缓慢变形)。

1.2 桩基沉降的主要影响因素

软土地基中桩基沉降量受多重因素综合影响,可归纳为以下四类:一是地基土特性,包括土层分布(如软土厚度、下卧硬持力层位置)、物理力学参数(如压缩模量、抗剪强度)、地下水水位(影响孔隙水压力消散速率)及土体结构性(如是否存在絮状胶结结构);二是桩基自身特性,涵盖桩型选择(如钻孔灌注桩、预应力管桩)、桩径与桩长(直接影响桩侧摩阻力与桩端承载力)、桩身材料强度(如混凝土标号)及桩体完整性(如是否存在缩颈、断桩缺陷);三是施工工艺参数,包括成孔方式(如泥浆护壁钻孔、干作业成孔)、桩侧摩阻力激发措施(如桩侧注浆、预压处理)、桩端后注浆工艺(提升桩端阻力)及沉桩顺序(影响邻桩应力叠加);四是外部荷载条件,涉及桥梁上部结构传来的竖

向荷载（如车道荷载、人群荷载）、施工临时荷载（如堆载材料、机械设备重量）及环境荷载（如地震作用、车辆振动）。这些因素相互作用，共同决定了桩基的沉降量与沉降速率。

2 软土地基条件下桩基沉降控制的核心技术措施

2.1 桩基类型与参数的优化选择

桩基类型的选择是沉降控制的基础环节。针对软土地基特性，需综合考虑桩侧摩阻力与桩端承载力的发挥条件。对于软土层较厚（厚度超过 15 米）且下卧硬持力层埋深较大的工况，优先选用摩擦型桩（如钻孔灌注桩），通过增大桩侧表面积（如采用扩底桩、螺旋肋桩）提升桩侧摩阻力；当软土层较薄（厚度小于 10 米）且下卧硬持力层埋深适中时，可采用端承型桩（如大直径预应力管桩），通过增加桩端入硬持力层深度（一般要求进入硬持力层不小于 2 倍桩径）提高桩端承载力。桩径与桩长的设计需满足承载力要求的同时，控制沉降量在允许范围内。例如，增大桩径可提高单桩承载力，减少桩数从而降低群桩效应导致的差异沉降；适当增加桩长可使桩端嵌入更稳定的土层，减少桩端沉降量。此外，桩身混凝土标号需根据软土地基的腐蚀性环境调整（如提高抗硫酸盐侵蚀性能），桩体完整性需通过超声波检测等技术手段保障，避免因桩身缺陷引发局部沉降突变^[1]。

2.2 桩侧摩阻力的强化技术

桩侧摩阻力是软土地基中桩基承载力的主要组成部分（占比通常超过 60%），强化桩侧摩阻力可显著降低桩基沉降量。施工中可采用以下技术措施：一是桩侧注浆技术，在桩身混凝土达到设计强度后（通常为 28 天），通过预埋注浆管向桩侧土层注入水泥浆液，浆液扩散后填充桩侧土体孔隙并固化，提高桩侧土体的抗剪强度与桩土接触紧密性，试验表明注浆后可提升桩侧摩阻力 30%-50%；二是桩侧粗糙化处理，在成孔过程中通过特殊钻头（如螺纹钻头）或机械刻痕工艺使桩侧表面形成凹凸不平的纹理，增加桩土界面的摩擦力；三是桩周土体改良，对软土层进行预压处理（如真空预压、堆载预压）或掺入固化剂（如水泥、石灰），提高桩周土体的强度与密实度，间接增强桩侧摩阻力。此外，桩侧摩阻力的发挥还受桩土相对位移影响，需控制桩顶荷载

施加速率，避免因加载过快导致桩侧摩阻力未充分激发^[2]。

2.3 桩端承载力的提升技术

桩端承载力是控制桩基沉降尤其是主固结沉降的关键因素。针对软土地基中常见的软弱桩端持力层（如淤泥质土），需通过专项技术提升桩端阻力。一是桩端后注浆技术，在桩端一定深度范围内（通常为桩端以下 2-3 米）预埋注浆管，待桩身混凝土达到设计强度后注入高压水泥浆液，浆液扩散后置换软弱土体并形成结石体，显著提高桩端土体的承载力与抗变形能力，注浆压力一般控制在 1.5-3.0MPa，可根据地层条件调整；二是扩大桩端截面技术，通过桩端扩底工艺（如机械扩孔、爆破扩孔）使桩端截面面积增大（通常扩大 1.5-2.0 倍），增加桩端与稳定土层的接触面积，分散集中应力；三是桩端持力层选择优化，在地质勘察阶段精确判定下卧硬持力层位置（如砂层、卵石层），通过调整桩长使桩端嵌入硬持力层不小于规范要求（如砂层不小于 1.5 倍桩径，卵石层不小于 1.0 倍桩径），避免桩端置于软弱土层中。这些技术的综合应用可有效提升桩端承载力，减少桩端沉降量占总沉降量的比例。

2.4 施工过程的关键控制技术

施工过程中的工艺控制对沉降控制具有直接影响。一是成孔质量控制，软土地基中成孔易引发塌孔、缩颈等问题，需采用泥浆护壁钻孔工艺（泥浆比重控制在 1.1-1.3），保持孔壁稳定性；对于干作业成孔（如长螺旋钻孔），需控制钻进速度避免扰动桩周土体。二是桩身混凝土浇筑质量，采用导管法浇筑水下混凝土时，需保证混凝土的和易性与连续性，避免断桩或夹泥缺陷；对于干作业桩，需控制混凝土的坍落度与振捣密实度。三是桩顶标高控制，桩顶嵌入承台的长度需满足规范要求（通常不小于 50 毫米），避免因桩顶嵌入不足导致应力集中。四是群桩施工顺序优化，软土地基中群桩施工需遵循“先中间后周边”或“对称施工”原则，避免邻桩施工应力叠加导致土体隆起或桩体偏位；对于密集桩群，可采用跳打工艺（如隔一打一）减少土体扰动。五是沉桩速率控制，预应力管桩等挤土桩施工时，需控制每日沉桩数量与速率，避免孔隙水压力急剧升高引发土体隆起或周边建筑物沉降^[3]。

3 沉降监测技术与动态反馈调整机制

3.1 沉降监测体系的构建

软土地基中桩基沉降监测是验证控制效果、指导动态调整的关键手段。监测体系需覆盖桩基自身沉降与周边环境的影响两方面,具体包括:一是桩基沉降监测,在每根桩顶或承台设置沉降观测点(采用不锈钢标志点),通过精密水准仪或静力水准仪定期测量沉降量(监测频率为施工期每天1次,运营初期每周1次,稳定后每月1次),重点监测差异沉降(相邻桩沉降差)与累计沉降量;二是桩身应力监测,在桩身关键位置(如桩顶、桩端、1/2桩长处)埋设钢筋应力计或混凝土应变计,实时监测桩身内力变化,分析桩侧摩阻力与桩端承载力的发挥过程;三是周边土体变形监测,在桩周土体中布设分层沉降仪、测斜仪及孔隙水压力计,监测土体分层沉降、侧向位移及超孔隙水压力消散情况,评估桩周土体的固结状态;四是桥梁上部结构响应监测,在桥墩顶部与梁体连接处设置位移传感器,监测桥面平整度与结构变形,确保沉降控制满足使用功能要求^[4]。

3.2 动态反馈与调整机制

监测数据需通过信息化平台实时传输与分析,建立“监测-分析-反馈-调整”的动态循环机制。当监测数据显示异常(如某桩沉降速率超过1毫米/天,或相邻桩沉降差超过规范允许值),首先通过有限元软件(如PLAXIS)模拟沉降发展趋势,判断偏差来源(如桩侧摩阻力不足、桩端持力层软弱或施工工艺问题)。若确定为桩侧摩阻力未充分激发,可补充桩侧注浆工艺;若桩端沉降量过大,可实施桩端后注浆或调整后续桩的桩端嵌入深度;若群桩差异沉降显著,可优化后续桩的施工顺序或增加临时支撑措施。调整后继续监测效果,直至沉降量与沉降速率满足设计要求(如最终沉降量不超过20毫米,差异沉降不超过1/1000)。动态反馈机制实现了从“经验控制”向“数据驱动”的转变,显著提升了沉降控制的精准性与适应性。

4 沉降控制技术的综合应用策略

单一技术的应用往往难以完全解决软土地基桩基沉降问题,需通过多技术协同形成综合控制体系。具体策略包括:首先,在设计阶段基于地质勘察资料(如钻

孔柱状图、土工试验报告),采用数值模拟方法(如PLAXIS有限元软件)分析不同桩型、工艺及参数组合下的沉降响应,优选最优方案;其次,在施工阶段严格执行标准化工艺流程(如钻孔灌注桩的“泥浆制备→成孔→清孔→钢筋笼下放→混凝土浇筑”五步法),并通过动态监测实时修正施工参数;最后,在运营阶段建立长期监测机制(如每半年监测一次桩顶沉降与地表变形),结合桥梁健康监测系统评估沉降发展趋势,必要时采取补偿注浆或结构加固措施。通过“设计-施工-运营”全生命周期的技术协同,可实现软土地基市政桥梁桩基沉降的高效控制,保障桥梁结构的长期稳定性与使用功能^[5]。

5 结论

软土地基条件下市政桥梁桩基施工沉降控制是保障桥梁安全与耐久性的核心环节。本文研究表明,软土地基因其高含水量、低强度及高压缩性特性,导致桩基沉降机理复杂且影响因素众多,传统控制技术难以满足精准要求。通过桩基类型与参数的优化选择、桩侧摩阻力与桩端承载力的强化技术、施工过程的关键工艺控制,可有效降低桩基沉降量与差异沉降;结合实时监测数据的动态反馈调整机制,能够及时发现并解决沉降异常问题,实现沉降控制的动态优化。未来研究可进一步结合智能传感技术(如光纤光栅沉降传感器)与机器学习算法(如预测沉降趋势),推动软土地基桩基沉降控制向智能化、精准化方向发展,为城市市政桥梁工程的高质量建设提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 深厚软土桥梁桩基荷载传递特性及沉降控制效果研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 13-19.
- [2] 软基环境下道路桥梁沉降问题的施工技术改进[J]. 上海建材, 2024(1): 101-103, 110.
- [3] 软土地基桥梁桩基施工沉降监测与处理技术研究[J]. 科技创新与应用, 2025(14): 42-45.
- [4] 软土地基上的铁路桥梁桩基变形控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2025(5): 45-49.
- [5] 桥头软基沉降分析及处理研究[J]. 工程建设与设计, 2024(18): 19-22.