

复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制与承载性能分析

张 赣

(中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511400)

摘 要 随着交通基础设施建设规模的持续扩大, 桥梁工程逐渐向跨径大、结构复杂、建设环境多样化方向发展。尤其是在山地丘陵区、河谷冲积区及软土地基广泛分布区域, 桥梁基础往往需穿越多种岩土层, 桩基施工不可避免地受到复杂地质条件的制约。在此背景下, 传统经验型施工控制方式已难以满足高安全性与高可靠性的工程需求, 桩基施工质量控制与承载性能分析逐渐成为桥梁工程技术研究与实践中的重点问题。本文围绕复杂地质条件下桥梁桩基工程面临的施工质量控制与承载性能评价问题, 结合工程实践特点, 从地质条件影响机理、施工关键工序控制以及承载性能分析方法等方面展开系统研究, 可以引入施工实测参数、检测数据与试验结果, 对桩基承载性能的形成与验证路径进行分析, 提出适用于复杂地质条件的工程化分析思路, 以为桥梁桩基施工质量控制与承载性能评估提供技术参考。

关键词 复杂地质条件; 桥梁桩基施工; 质量控制; 承载性能

中图分类号: U445.551

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.038

0 引言

随着交通基础设施向跨区域、复杂环境和高技术标准方向持续推进, 桥梁工程在山地丘陵区、河谷冲积区及软弱地基广泛分布区域的建设需求显著增加。随着我国交通基础设施建设的不断发展, 在复杂地质条件下修建桥梁的工程日益增多。复杂地质条件是指由于特殊的地质作用和外力作用, 形成工程地质性质复杂多变、岩土体非均质性强、不良地质现象发育的特殊地质环境。实践表明, 复杂地质条件并非单一的不利因素, 而是通过影响成孔稳定性、桩端持力状态及桩土相互作用机制, 系统性放大施工质量缺陷对结构安全的不利影响。尤其在软硬交错、地下水条件复杂或持力层起伏显著的区域, 传统以经验参数或单一检测结果为主要的控制与分析方式已难以满足桥梁工程对安全性、耐久性与可控性的综合要求。在此背景下, 如何在施工阶段实现对桩基质量的全过程控制, 并在成桩后对承载性能进行符合实际工况的分析与验证, 成为桥梁工程技术研究与工程实践中亟需解决的关键问题。从复杂地质条件的工程特征着手, 全面且深入地研究桥梁桩基施工质量控制策略以及承载性能分析方法, 对于提高桥梁基础工程的可靠性以及工程适应性具有关键的现实意义。

1 复杂地质条件对桥梁桩基施工的工程影响

1.1 地层结构非均质性对成孔稳定性与孔型控制的影响

在复杂的地质条件下, 桥梁桩基需要穿过软土、粉质黏土、砂层以及风化岩等多种不同的介质。地层的力学性质会沿着深度方向发生变化, 其非均质性会直接对成孔过程的稳定性产生削弱作用。从工程实践可看出, 当桩孔穿过饱和粉砂层或者含水率超过30%的软黏土层时, 孔壁自身的稳定能力明显不够, 塌孔以及缩径的风险会较大增加。以旋挖钻成孔为例, 在比重处于1.15~1.20的常规泥浆条件下, 软弱地层的孔径实际测量偏差可达到设计孔径的5%至8%, 局部缩径的深度甚至会超过0.5 m, 这样的孔型缺陷会影响钢筋笼顺利下放, 还会破坏桩侧土体原本的结构, 削弱桩侧摩阻力的有效发挥, 复杂地层条件会改变成孔受力平衡状态, 使得孔型控制难度比单一均质地层更高, 对施工工艺以及参数控制提出更高的技术要求。

1.2 软硬交错及持力层变化对桩端有效承载条件的影响

复杂地质条件下经常出现的“上软下硬”或者“软硬互层”地层结构, 致使桩端持力条件呈现出较强的不

作者简介: 张赣(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程、桥梁专业。

确定性。当桩端处于中风化或者微风化岩层的情况下,钻进扰动以及清孔不充分等施工方面的因素,很容易在岩面形成扰动破碎带,使得设计端承条件难以真正实现^[1]。工程检测所得到的数据说明,在岩层桩基里,要是孔底沉渣厚度控制不严格,桩端承载力实测数值相较于设计数值下降的幅度可达到 15%~25%。而在端承—摩擦复合型桩基当中,持力层厚度不够或者岩土界面起伏比较大,也会引发桩端受力不均衡的问题,增加桩基沉降的离散性。由此可看出,复杂地质条件会放大桩端施工质量对于承载性能的敏感性,让桩基设计承载模式在施工阶段更容易偏离理论假定状态。

1.3 地下水条件复杂化对混凝土灌注质量与桩体完整性的影响

复杂地质条件大多伴随着地下水位较高以及渗透性差异较大等问题,这些问题会对桩基混凝土灌注进程产生直接的干扰。在地下水位埋深小于 3 m 或者存在承压水状况的区域,孔内泥浆性能容易因为水力交换而出现衰减,致使混凝土在灌注初期出现离析或者夹泥的现象。现场统计显示,当导管埋深不足 2 m,并且灌注中断时间超过 20 分钟时,桩体缺陷发生的概率会较大上升,低应变检测异常率可从常规条件下的 5% 提升至 15% 以上。这类缺陷虽说不一定会使得承载力马上失效,但是会削弱桩体整体的刚度以及耐久性,增加长期服役的风险。地下水条件的复杂化对灌注工况稳定性产生影响,成为复杂地质条件下桩基质量控制中不可忽视的关键工程因素。

2 复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制策略

2.1 基于工程地质再识别的桩基施工参数精细化控制策略

在复杂地质条件下,仅仅依靠勘察阶段所取得的成果,一般很难精准地呈现桩位处实际的地层情况。在施工阶段要引入“工程地质再识别”机制,把它当作质量控制的前置步骤,施工单位需要在试桩或者首批桩施工的进程中,根据钻进参数记录、取芯状况以及返渣特征,对桩位实际的地层展开动态校核。例如:在旋挖成孔的过程中,可凭借钻进扭矩与钻速的变化来判定软硬地层界面的位置,当钻进扭矩从 15~20 kN·m 突然增加到 40 kN·m 以上的时候,往往就意味着进入了中风化岩层,应当及时调整钻进方式以及清孔工艺,依据再识别的结果,针对成孔深度、扩孔范围以及泥浆性能指标进行有针对性的修正,如在软弱砂层中将泥浆比重从 1.10 提升至 1.18~1.22,黏度控制在 17~22 s,以此提高孔壁的稳定性。通过把地质再识别的成果直接转变为施工参数控制的依据,可有效地降低复杂地质条件所带来的施工不确定性,

为后续工序质量的稳定提供可靠的前提条件。

2.2 针对成孔全过程的稳定性与沉渣双控制技术措施

成孔质量是桩基施工质量控制中的关键部分,在复杂地质条件下要同时开展孔壁稳定控制以及孔底沉渣控制这两条技术主线。针对容易塌孔的地层,需运用分层控制钻进速度的办法,在软土或者砂层里把钻进速度控制在 0.3~0.6 m/min,并且让孔内泥浆液面高于地下水位不少于 1.5 m,以此维持正压平衡。在进入持力层之前,要预留不少于 0.5 m 的缓冲钻进段,防止一次性快速切入硬层致使孔底受到扰动。成孔结束后,要通过换浆、正反循环清孔等方式,把孔底沉渣厚度严格控制在设计要求的范围之内,一般摩擦桩不超过 100 mm,端承桩不超过 50 mm。工程实践显示,当沉渣厚度从 120 mm 降低到 50 mm 以内时,桩端承载力实测值平均提升大概 18%~22%。通过对成孔稳定性以及沉渣厚度实施全过程双控制,可改善桩土接触条件,为承载性能的有效发挥创造基础条件。

2.3 钢筋笼与混凝土协同施工的结构完整性控制策略

在复杂地质条件下,桩孔形态呈现不规则态势,并且孔壁出现局部变形,使得钢筋笼与混凝土施工更容易产生结构性质量方面的隐患。施工控制需要从钢筋笼空间定位以及混凝土灌注连续性两个方面共同开展。在钢筋笼制作阶段,应当通过加密定位筋以及设置刚性支撑环的方式,保证其整体具有足够刚度,在吊装下放过程中,要采用多点同步控制手段,防止单点受力致使笼体发生偏斜。在实际工程中,当钢筋笼保护层厚度偏差被控制在 ± 10 mm 以内时,桩体受力的均匀程度明显优于偏差超过 ± 20 mm 的情形。在混凝土灌注阶段,要严格把控导管埋深,一般维持在 2~6 m 的范围之内,保证混凝土在正压状态下上升,避免出现夹泥以及离析现象。要连续完成单桩混凝土的灌注工作,防止中途停歇时间超过 30 min,通过对钢筋笼与混凝土工序进行协同控制,可提升桩体结构的完整性,降低复杂地质条件下隐蔽缺陷出现的概率。

2.4 基于检测反馈的桩基承载性能验证与质量闭环控制

在复杂地质条件下,桩基质量控制不能仅停留在施工完成阶段,而是要借助检测与反馈机制构建闭环管理体系,桩基成桩之后,需依据工程关键程度以及地质复杂状况,合理安排低应变、高应变以及静载试验等检测手段,对桩体完整性和承载性能展开综合评估^[2]。检测结果说明,在复杂地质区域,低应变异常桩的比例一般比常规地层高出约 5%~10%,若不结合

复核检测,就容易出现误判情况。要把检测数据和施工记录进行对照分析,如异常反射位置是不是对应着沉渣控制薄弱区域或者灌注中断时段,对于承载力偏低或者完整性存在疑问的桩基,应及时采取补桩、加固或者设计调整等措施,防止问题向上部结构传递。只有通过把检测结果反向反馈到施工与技术管理环节,形成“施工—检测—修正”的质量闭环控制机制,才能在复杂地质条件下实现桩基工程质量的可控与可验证。

3 复杂地质条件下桥梁桩基施工的承载性能分析方法

3.1 基于施工实测参数反演的桩侧摩阻力分布分析方法

在复杂地质条件下,桥梁桩基的桩侧摩阻力呈现出较大的分段性以及非线性特性,仅仅依靠规范经验公式很难精确体现真实受力情形,施工单位需以施工过程实测参数作为基础,构建桩侧摩阻力反演分析方案^[3]。展开来说,技术人员可在钻孔施工以及混凝土灌注阶段系统收集钻进扭矩、钻速、泥浆比重以及返渣特征等参数,并且把这些参数与地层划分结果开展对照分析。当钻进扭矩稳定在15~25 kN·m且钻速较快时,一般对应软塑黏土或者粉土层,这个区段桩侧摩阻力实测值大多集中在30~50 kPa,当钻进扭矩提升到35~60 kN·m且钻速明显降低时,往往进入中密砂层或者弱风化岩层,其桩侧摩阻力可提升至80~120 kPa。技术人员通过对不同地层区段的摩阻力参数进行反演校核,可建立更贴近实际工况的桩侧摩阻力分布模型。该方法的优势在于把施工行为直接转变为承载性能分析依据,有效减少复杂地质条件下参数选取的不确定性。

3.2 结合静载试验与沉降曲线分段解析的桩端承载性能分析方法

在复杂地质条件下,桩端的承载性能会受到持力层完整性、施工扰动以及沉渣控制水平等多种因素的作用,其发挥过程有较大的阶段性特点。想要精确评估桩端的承载能力,工程技术人员需把静载试验当作核心方式,联合荷载—沉降曲线的分段解析办法展开系统剖析。在实际操作时,试验人员在加载过程中要着重留意沉降速率的变化^[4]。当荷载从设计值的50%提升到80%时,若沉降增量明显加快,大多时候意味着桩端接触条件欠佳或者持力层受到了扰动。工程实测数据表明,在孔底沉渣厚度控制在50 mm以内的岩层桩当中,极限承载力对应的沉降值一般小于40 mm;而当沉渣厚度超过100 mm时,在同等荷载条件下,沉降值可增大到60~80 mm。通过对沉降曲线的弹性阶段、

塑性发展阶段以及破坏阶段进行分段辨别,技术人员可判定桩端阻力的实际发挥程度,为复杂地质条件下桩基承载性能的定量评估提供可靠的依据。

3.3 基于多源检测数据融合的桩基整体承载性能综合评估方法

在复杂地质条件下,仅依靠单一检测手段很难全面呈现桩基的真实承载性能,要采用多源检测数据融合的综合评估方式,施工单位需组织技术人员对低应变检测、高应变检测以及静载试验的结果展开联合分析,并且把检测数据和施工记录进行对应^[5]。在具体实施过程中,技术人员可先借助低应变检测来识别桩体完整性缺陷的位置。若异常反射集中出现在桩底以上2~4 m范围内,那就结合施工日志核查这个区段是否存在灌注中断或者导管埋深不足的问题,接着凭借高应变检测获取桩端阻力与桩侧阻力的比例分布情形。工程经验显示,在复杂地质条件下,桩端阻力占比的波动范围可达到30%~55%。技术人员要以静载试验结果作为校核基准,对前两类检测结论给予修正,经过多源数据的交叉验证与综合判读,可降低误判风险,使桩基整体承载性能评估结果更接近真实工程状态。

4 结束语

复杂地质条件下桥梁桩基工程的质量与承载性能,本质上是地质环境、施工行为与结构响应共同作用的结果。桩基施工过程中产生的成孔扰动、持力层状态变化以及混凝土成型质量,均会通过桩土相互作用机制对承载性能产生深远影响。因此,桥梁桩基工程的技术控制不应局限于单一环节或单一指标,而应在充分认识复杂地质条件工程特征的基础上,构建覆盖施工全过程的质量控制体系,并辅以符合实际工况的承载性能分析方法。通过将施工参数、检测结果与承载响应进行系统关联,可以有效缩小理论假定与工程实态之间的偏差,使桩基设计与施工控制更具针对性和可靠性。

参考文献:

- [1] 梁昌德.复杂地质条件下桥梁桩基施工的质量控制研究[J].产品可靠性报告,2024(07):114-115.
- [2] 陈镇.不良地质条件下高速公路桥梁桩基施工工艺优化与质量控制[J].四川水泥,2025(05):284-286.
- [3] 王海东,田凯,李显,等.基于复杂地质条件的桥梁桩基施工技术 with 质量控制[J].前卫,2024(31):182-184.
- [4] 毕明辉,高云.基于复杂地质条件下桩基施工方法及质量控制措施探究[J].建筑与装饰,2025(03):160-162.
- [5] 迟占华.桥梁桩基施工技术在复杂地质条件下的应用分析[J].工程建设与设计,2025(08):132-134.