

深厚软土区超深桥梁桩基施工质量影响因素及防控措施

李仁山

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：随着我国交通基础设施建设工作的逐步推进，施工作业逐渐向沿海及江河冲积平原等深厚软土区域延伸。面对深厚软土孔隙比大、含水量高、抗剪强度低以及压缩性强等特点，再加上超深桩基施工深度大、工艺复杂，致使施工过程中存在质量隐患，威胁着桥梁结构安全及使用寿命。本文立足于深厚软土工程特性，系统梳理影响施工质量的主要因素，在此基础上，提出了针对性的防控策略，并结合典型案例验证其实际效果，以期同类区域超深桥梁桩基的施工质量管控提供参考。

【关键词】：深厚软土；超深桥梁桩基；施工质量；影响因素；防控措施

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.073

引言

我国深厚软土广泛分布于沿海平原和长江中下游等区域，该区域土层承载力低、地质条件复杂，给超深桥梁桩基施工带来了更大难度。近年来，随着高速铁路、跨海通道等重大工程持续推进，超深桩基的应用日益增多，其施工质量直接关系到桥梁的承载能力、稳定性和长期性能。在深厚软土区开展深桩施工，不仅要应对多变的地质条件，还要克服工艺难度高、环境风险大等现实困难，施工中容易出现孔壁失稳、桩身偏斜、断桩或承载力不足等问题。这些问题不仅增加了返工成本和施工周期，也可能埋下长期结构安全隐患。因此，深入剖析深厚软土区超深桩基质量的主要影响因素，探索切实可行的控制措施，对提升工程质量、保障桥梁长期安全运行具有重要意义，也是当前软土地区桥梁建设亟需解决的关键技术问题。

1 深厚软土区超深桩基施工特点与难点

1.1 地质条件复杂性

深厚软土区域的地质环境往往表现出较强的不确定性与不均匀性，成为影响超深桩基施工质量的首要因素。软土层通常厚度较大，天然含水率普遍偏高，多在40%~70%间波动，孔隙比常超过1.0，压缩系数则可达 $0.7\sim 1.5\text{ MPa}^{-1}$ ，整体呈现出高压缩性、低强度的工程劣性。不仅如此，该区域地层结构往往并不单一，常夹杂粉砂层、软弱夹层，甚至可能隐伏岩溶或断层破碎带，进一步加剧了地质条件的复杂程度。这种多变的成层条件，直接导致桩基成孔困难，易引发桩身偏斜等质量问题。给施工质量管控带来极大阻碍。

1.2 施工工艺挑战性

面对深厚软土的特殊工程性质，超深桩基的施工工艺也相应承受着更大的技术压力与操作风险。首先在成孔环节，必须根据地层变化灵活选用旋挖、冲击或回旋钻等方式，并严格控制泥浆的比重、黏度与含砂率，确保护壁效果，否则极易出现

塌孔或缩颈现象。而混凝土灌注环节要求更为严苛，超深桩必须实现连续灌注，导管埋深、混凝土流动性的控制精度直接关系到灌注质量。稍有疏忽就会发生断桩、夹泥等严重质量缺陷。软土的流变性会导致桩基建成后出现长期沉降，通过桩端持力层选择、桩长优化等措施控制工后沉降，成为施工工艺优化的核心难点。

1.3 环境与安全风险

在深厚软土区域开展超深桩基施工，环境因素与安全风险同样不容忽视。施工现场往往位于城市周边或生态敏感区，钻机作业产生的振动会对周围软土层造成扰动，可能诱发邻近建筑物出现不均匀沉降或裂缝。同时，如泥浆排放处理不当，导致废浆泄漏，容易对周边土壤及地下水造成污染，不符合绿色施工的相关要求。安全方面，超深桩基施工需使用大型起重、钻孔设备，设备的稳定性直接影响施工安全，一旦设备出现故障或操作不当，极易引发机械伤害、孔壁坍塌等安全事故。软土区域施工场地承载力低，大型设备作业易发生下沉，进一步加剧了施工安全风险。

2 施工质量影响因素分析

2.1 地质条件因素

在深厚软土区开展超深桩基施工，地质条件往往起到决定性作用，它不仅决定着施工的难易程度，也直接关系到质量控制的重点方向。软土层的厚度及其空间分布特征，是影响桩基承载性能的关键变量。通常情况下，软土层越厚，桩基在长期使用中的沉降变形量就越难控制，只有将桩端穿透软弱层、稳固嵌入中风化岩等硬质持力层，才能从源头上控制沉降、保障单桩承载力。地下水位也是关键影响因素，高水位会显著增加孔壁坍塌风险，需通过护筒隔离或降水措施降低水位，否则会严重影响成孔质量。不良地质的影响同样不容忽视，砂层易导致塌孔，岩溶区域需提前进行注浆加固，断层带则需调整桩位避开，否则会引发桩身偏斜、承载力不足等问题。

2.2 施工工艺因素

施工工艺的合理性及现场执行的规范性，同样是影响桩基质量的关键因素。首先在成孔阶段，应结合具体地层条件选择适宜的钻进方式——旋挖钻虽然效率较高，但在软硬不均地层中容易造成孔斜；冲击钻适应性相对更广，但钻进速度偏慢。如果设备选型与地层不匹配，成孔的垂直度与孔壁稳定性就难以保证。泥浆性能控制至关重要，泥浆比重、粘度不足无法有效护壁，易引发孔壁坍塌；比重过高则会影响混凝土灌注质量，导致桩身夹泥。混凝土灌注环节的管控尤为关键，导管埋深不足易引发断桩，超灌高度不足则会导致桩顶强度不足，这些问题都会严重影响桩基的整体性和承载能力。

2.3 设备与材料因素

施工设备与工程材料作为桩基施工的物质基础，其性能优劣直接影响施工过程能否顺利推进。以钻机为例，如果设备扭矩或动力头转速无法满足深厚软硬互层地层的钻进需求，不仅钻进效率低下，还容易因钻进不均而造成孔壁不规则甚至孔斜，因此选择大功率、扭矩可调的钻机更为稳妥。钢筋笼质量存在缺陷会直接降低桩身承载力，制作过程中出现的钢筋笼变形、焊接缺陷，会严重影响桩基的受力性能。混凝土材料的质量同样关键，坍落度、骨料粒径不符合要求，易导致混凝土离析、堵管，进而引发断桩等质量缺陷，影响桩基的耐久性和承载能力。

2.4 人为与管理因素

即便地质条件、工艺设计、设备材料都处于可控范围，人为因素仍然是决定施工质量的关键一环。若技术交底流于形式，施工人员将无法准确理解关键工艺参数，操作中难免失误频发。与此同时，现场质量监控体系的完善程度也直接影响隐患的排查效率，如果检测频率不足或检查流于表面，许多隐蔽质量问题便难以被及时发现并纠正。此外，应急预案不完善也是重要影响因素，面对塌孔、断桩等突发情况，缺乏科学有效的处理措施，会导致质量问题进一步扩大，造成严重的经济损失和工期延误。

3 施工质量防控措施

3.1 地质勘察与方案优化

为有效把控桩基施工质量，需从勘察设计阶段加强管控。首先，应通过地质勘察明确地质情况。针对深厚软土区域，常规的勘探布点往往效果不佳，需要加密勘探孔，明确软土层的厚度变化、空间分布规律以及含水量、压缩性等物理学指标，为施工方案制定提供准确依据。同时开展静力触探、十字板剪切试验等专项原位测试，精准获取不排水抗剪强度等关键参数，确保施工方案的针对性和科学性。桩型选择需结合地质条

件，优先采用摩擦型桩或复合地基加固后桩基，有效提升桩基承载力和抗沉降能力。地质勘察过程中，需重点把控关键参数的检测质量，具体控制标准如表1所示。

表1 深厚软土区地质勘察关键参数

参数类型	检测方法	控制标准
软土厚度	钻孔取样+地质雷达	误差≤5%
含水量	烘干法	天然含水率 40%~70%
压缩系数	固结试验	$A_{1-2} \leq 1.5 \text{ MPa}^{-1}$
不排水抗剪强度	十字板剪切试验	$c_u \geq 10 \text{ kPa}$

3.2 成孔工艺控制

成孔质量直接决定桩基的最终质量。护筒埋设环节，可以采用双层护筒的组合方式——外层短护筒主要起固定孔口的作用，防止地表土体塌落；内层长护筒则要深入软土层内部，埋深至少达到3m，护筒顶部要高出地面0.5m以上，这样才能有效隔开地下水和软土，避免钻进过程中孔壁失稳。泥浆配制选用膨润土与氯化钠组合配方，严格控制泥浆性能指标，比重维持在1.1~1.3之间，粘度控制在20~25s，含砂率不超过4%，定期检测泥浆性能并及时调整配比。钻孔过程中实时监测钻进速度、泥浆面高度，每钻进5m验孔一次，发现偏斜立即回填片石校正，确保成孔垂直度和孔径符合设计要求。

3.3 混凝土灌注质量控制

混凝土灌注质量直接关系到桩身的完整性与是否存在缺陷。对此，灌注环节需严格把控导管准备、灌注参数控制、超灌管理等各项施工作业。导管选用内径250~300mm的专用导管，使用前进行气密性试验，试验压力不低于0.6MPa，导管接头加装密封圈，防止灌注过程中出现漏浆。灌注参数需精准把控，首盘混凝土量不小于1.5m³，确保导管埋深达到0.8~1.2m，灌注过程中保持连续，总灌注时间不超过3h，避免混凝土初凝导致灌注中断。桩顶超灌高度不小于0.8m，待混凝土凝固后凿除桩顶浮浆，确保凿除后桩顶强度满足设计要求，保障桩基顶部受力性能。

3.4 沉降控制措施

软土的流变性决定了桩基在建成之后是否会发生持续沉降。为避免沉降问题的出现，需提前制定防控策略。首先，合理选择桩端持力层，使桩端进入硬塑状态的黏性土层或中密以上的砂层，进入深度大于2m，充分借助硬层承载力压住沉降。在桥梁基础设计中设置沉降后浇带，延迟后浇带浇筑时间，有

效释放软土的不均匀沉降,减少差异沉降对桥梁结构的影响。对于桩周土沉降大于桩沉降的区域,采用涂层钢筋笼或增加桩长的方式,减少桩周土与桩身之间的负摩阻力,进一步控制桩基工后沉降,确保桥梁长期稳定。

3.5 绿色施工与安全管理

深厚软土区施工,存在较大的环境风险和安全隐患,必须落实绿色施工,加强安全管理。泥浆处理应配套泥浆循环系统,提高泥浆的重复利用率,废弃泥浆不能随便排放,必须经过沉淀、脱水处理之后再统一外运,避免污染周边土壤和水体。施工振动控制采用低振动钻机,合理安排施工时段,避开居民休息时间,减少施工振动对周边环境的影响。安全监测方面,安装孔壁压力传感器、沉降观测点,实时监控施工安全,及时发现并处理安全隐患,保障施工顺利开展。

4 工程案例

4.1 工程概况

京沪高铁位于长江中下游冲积平原的某软土区段,该区域属典型深厚软土地层,软土层埋深浅、厚度大,天然含水量普遍偏高,压缩性较强,工程地质条件相对复杂。区段内桥梁基础采用 CFG 桩复合地基配合桩筏结构的形式,借助群桩效应改善软土地基的承载性能,控制基础沉降,施工过程中严格遵循本文提出的防控措施开展作业。

参考文献:

- [1] 冯建辉.深厚软土地区路堤荷载对临近桥梁桩基安全性的影响分析[D].华南理工大学,2023.
- [2] 黄崇浩.软土地基冲孔灌注桩施工技术探究[J].江西建材,2023,(01):244-245+248.
- [3] 吴安康.基坑开挖中软土地基支护与桩基施工探究[J].城市建筑空间,2022,29(S2):892-893.
- [4] 张毓珂.复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制体会[J].质量与市场,2022,(14):127-129.
- [5] 陈明忠.软土地基的桩基础施工及质量控制技术的研究[J].居业,2022,(02):69-71.
- [6] 曾德平.深层软土桥梁桩基施工质量控制分析[J].运输经理世界,2020,(11):42-43.

4.2 防控效果

施工结束后,委托第三方检测单位对桩基质量进行了系统检测。检测数据显示,绝大部分桩基的工后沉降量控制在 30mm 以内,少量桩基虽略超该值,但经补强处理后仍满足高铁运营对基础变形的控制标准,实现了良好的施工质量管控效果。

4.3 经验总结

从该区段的实施效果来看,深厚软土区采用复合地基与桩基协同工作的形式,能够有效提升地基承载力,抑制工后沉降。严格落实地质勘察与方案优化、施工工艺管控、安全与绿色施工等各项措施,能够有效防范各类质量隐患,提升施工质量。该工程积累的经验,可为同类深厚软土区超深桥梁桩基施工提供宝贵的实践参考。

5 结语

为全面提升深厚软土区超深桥梁桩基施工质量,需从地质条件分析、材料选用及现场管理等层面入手。本文结合实际工程项目,系统分析了影响质量的主要因素,并提出了地质勘察深化、成孔工艺优化、混凝土灌注控制、沉降应对措施以及绿色施工与安全保障等质量提升策略。结合京沪高铁软土区段的实际应用来看,这套措施在控制沉降、保障桩身完整性方面效果良好。未来,可尝试引入智能化监测手段,全面实现对钻进参数、泥浆性能、灌注过程等关键数据的采集与分析,进一步提升质量管控的精细化水平,为深厚软土区桥梁工程的高质量建设提供可靠的技术保障。