

水利工程深基坑钢管桩支护施工技术应用研究

董 婕 刘端婧

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：随着水利工程规模的扩大和复杂化，深基坑施工面临地质条件复杂、地下水影响显著等挑战，钢管桩支护技术因其高强度、易施工和适应性强的特点，逐渐成为深基坑支护的关键手段。本文围绕水利工程深基坑钢管桩支护施工技术的应用展开研究，系统探讨钢管桩支护的技术原理、适用条件及施工工艺，以期为水利工程深基坑支护技术的标准化、精细化发展提供助力。

关键词：水利工程；深基坑；钢管桩支护；施工技术

水利工程作为国家基础设施建设的核心领域，其深基坑施工质量直接关系工程安全与使用寿命。深基坑工程常面临地质条件复杂、地下水位波动大、周边环境敏感等问题，传统支护方式如混凝土灌注桩、土钉墙等在变形控制、施工周期及成本效益方面存在局限性。钢管桩支护技术凭借其高承载力、快速施工和可回收性等优势，逐渐成为深基坑支护的重要选择。近年来，随着大型水利枢纽、泵站及堤防工程的推进，深基坑开挖深度不断增加，对支护结构的稳定性和环保性提出了更高要求，亟需探索更高效、适应性更强的支护技术。

1 钢管桩支护技术理论分析

1.1 技术原理

钢管桩支护技术基于土体与桩体协同作用原理，利用钢管桩的高强度、刚度和抗变形能力，形成对基坑侧壁的主动支护体系。钢管桩桩身与周围土体的摩擦力及端承力传递荷载，其支护效果取决于桩体入土深度、间距、壁厚等参数。在深基坑开挖过程中，桩体通过横向约束土体侧向位移，减少基坑变形风险；同时，钢管桩可结合冠梁、腰梁等水平支撑构件形成空间网格结构，进一步提升整体稳定性^[1]。而钢管桩内部可灌注混凝土或水泥浆液，形成“钢管-混凝土”复合结构，增强抗弯与抗剪性能。

1.2 适用条件

钢管桩支护技术适用于地质条件复杂、开挖深度大且对变形控制要求严格的深基坑工程。在软土、砂土、粉土等易液化或高压缩性地层中，钢管桩凭借其高刚度可显著抑制土体流变；在地下水位较高或存在承压水的区域，钢管桩的密闭性与抗渗性可有效阻断渗流路径，配合降水措施实现干作业环境。同时，该技术对邻近建筑物密集、施工空间受限的水利工程，如河道整治、泵站基坑等，具有显著优势，因其施工振动小、无需大型

机械作业，可减少了对周边结构的扰动。

然而，钢管桩支护的经济性与岩质地层的适用性需谨慎评估。在岩体强度高、完整性好的地层中，钻孔困难且成本剧增；而在超深基坑，如深度超过20米或强震区，需结合内支撑或锚索形成复合支护体系^[2]。总体而言，其适用性需综合考虑地质水文条件、基坑规模、环境敏感度及工期要求，进行数值模拟与现场试验优化设计参数，可以确保技术可行性与经济性平衡。

2 水利工程深基坑钢管桩支护施工技术

2.1 施工准备

施工准备阶段需基于地质勘察与支护设计，构建系统性技术方案。首先，结合工程地质报告与基坑支护设计文件，利用BIM技术建立三维地质模型，明确土层分布、地下水位及潜在不良地质体，优化钢管桩的桩长、桩径、间距等参数。针对水利工程高水位特点，需开展专项水土压力计算，确定桩体抗弯、抗剪承载力需求，并编制桩位布置图及施工顺序流程图。其次，现场实施“三通一平”基础作业，设置临时排水沟与集水井，预埋降水井点以控制地下水位；采用全站仪布设测量控制网，定位桩位轴线并设置导向架，确保桩体垂直度误差 $\leq 1\%$ 。同时，需对施工设备进行工况校验，依据土层力学特性选择压桩力阈值，避免桩体沉入过程中的挤土效应引发周边土体扰动。

技术交底与风险预控是施工准备的核心环节。施工单位要组织设计、施工、监理单位联合开展图纸会审，针对钢管桩焊接工艺、桩端加固措施等关键技术节点进行交底，明确焊缝探伤检测标准，如超声波检测Ⅱ级合格及防腐涂层施工要求，如环氧煤沥青涂层厚度 $\geq 300\mu\text{m}$ 。针对复杂水文条件，制定应急预案，包括突发涌水封堵工艺、桩体偏移动态纠偏技术等^[3]。

2.2 钢管桩的制作与安装

钢管桩制作需严格遵循《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205),采用Q355B及以上低合金高强度钢卷板,通过螺旋焊接或直缝焊接工艺成型。管桩壁厚应根据设计弯矩、剪力及腐蚀裕量综合确定,通常为8—20mm,焊缝需进行100%超声波探伤检测,确保Ⅱ级合格标准。针对水利工程高湿环境,桩体表面需采用喷砂除锈(Sa2.5级)后涂覆环氧富锌底漆(80 μ m)+环氧云铁中间漆(120 μ m)+聚氨酯面漆(100 μ m)的三层防腐体系,并在桩端增设加强环板以抵抗沉桩应力集中。

安装阶段优先采用静压法或振动沉桩工艺,根据地层阻力选择压桩设备,其压力值范围在800—3000kN之间。施工时需通过全站仪与激光测斜仪双控桩位偏差,并采用导向架限位装置抑制桩体偏斜。对于密排桩支护,采用跳打施工顺序,间隔2—3根桩,减少挤土效应对邻桩的影响。桩间连接节点采用法兰盘螺栓紧固或CO₂气体保护焊对接,焊缝强度需满足等强连接要求。在动水压力显著区域,桩底1—2m范围内可预埋注浆管,沉桩完成后注入水泥-水玻璃双液浆,即水灰比0.5—0.6,注浆压力0.8—1.2MPa,形成桩端加固区以提升抗拔承载力。

2.3 支护结构的施工

支护结构的施工需以钢管桩为基础,借助冠梁、腰梁及内支撑系统形成空间受力体系。冠梁作为顶部水平连接构件,采用C30及以上混凝土现浇,截面尺寸根据桩顶反力计算确定,通常为800mm×1200mm,内部预埋HRB400级钢筋与钢管桩焊接锚固,焊缝强度需满足等强连接要求。腰梁设置于基坑侧壁中部,依据分层开挖深度分阶段施工,采用H型钢或组合钢梁,将高强螺栓与钢管桩翼缘板连接,节点处增设加劲肋以提升抗剪性能^[4]。对于大跨度基坑,需增设对撑或角撑,采用液压千斤顶施加预加力,补偿土体应力释放引起的变形。在渗水风险区,桩间挂设钢筋网并喷射C25细石混凝土(厚度 $\geq$ 100mm),形成连续止水帷幕,同时预埋可重复注浆管,但要保持间距1.5m,以应对后期局部渗漏。

施工过程需遵循“分层开挖、动态调整”原则,依托信息化监测数据优化支护参数。采用振弦式钢筋计、测斜仪及孔隙水压计实时监测支护结构内力、位移及地下水位变化,利用BIM平台集成数据,建立支护体系力学状态预警阈值。当监测值超限时,立即启动应急预案:针对桩体偏移,采用微型钢管桩斜向补强;针对局部渗流,实施双液注浆快速封堵。此外,基坑底部30cm预留土体采用人工清槽,避免机械扰动造成桩端土体软化;开挖后及时施作混凝土垫层(C20,厚度 $\geq$ 200mm)并铺设土工布,减少基底回弹变形。全流程精细化控制,可以确

保支护结构在复杂水土耦合作用下的协同承载性能,满足水利工程深基坑“零渗漏、微变形”的核心要求。

2.4 基坑开挖与支护协同作业

基坑开挖与支护协同作业需遵循“分层分段、先支后挖”原则,利用时空效应控制实现支护结构与土体变形的动态平衡。依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120),将基坑竖向划分为3—5层,每层开挖深度 $\leq$ 3m,水平方向按20—30m分段跳挖,每层土方开挖后48小时内完成该区域腰梁及支撑安装。采用“预加轴力补偿”技术,在钢支撑端部设置轴力伺服系统,根据土压力监测数据动态调整预加轴力,抵消因土体卸载引起的应力重分布^[5]。对于邻近敏感构筑物区域,采用“抽条法”开挖,保留土堤宽度 $\geq$ 1.5倍开挖深度,结合钢管桩-锚索复合支护体系,即锚索长度15—25m,张拉力500—800kN,通过预应力施加时机与开挖进度的精准匹配,将地表沉降控制在10mm以内。

协同作业需依托实时监测数据构建反馈优化机制。采用分布式光纤传感技术监测支护结构应变场,结合三维激光扫描获取基坑整体变形数据,有限元反演分析优化后续开挖参数。当桩体水平位移速率超过3mm/d或累计位移达预警值(0.3%H,H为基坑深度)时,立即启动分级加载应急支撑(Φ 800×16mm钢管斜撑,倾角45° $\pm$ 5°)或局部回填反压。针对高水位砂层,采用“管井降水-帷幕截水”联合工法(井距15m,滤管长度 $\geq$ 2m),将地下水位降至坑底以下1m,同步实施桩间高压旋喷注浆,形成厚1.2m的防渗体,动态修正施工方案,确保复杂水土耦合作用下的工程安全与效率平衡。

3 水利工程深基坑钢管桩支护施工案例分析

3.1 工程概况

某大型水利枢纽工程位于长江中下游冲积平原,基坑平面尺寸为120m×80m,最大开挖深度18.5m,设计为泵站与节制闸一体化结构。场地地层自上而下依次为:①素填土(厚1.5m)、②粉质黏土(厚6m,渗透系数1×10⁻⁶cm/s)、③粉细砂层(厚8m,渗透系数5×10⁻⁴cm/s)、④强风化泥岩(未揭穿)。地下水位埋深1.2m,受长江水位季节性波动影响显著,最大水位差达6m。周边300m范围内存在既有堤防、跨江大桥桥墩等敏感构筑物,地表沉降控制要求 $\leq$ 15mm。

3.2 工程难点与支护设计

(1)技术难点。①高渗透性砂层与承压水共存,基坑存在管涌、流砂风险;②粉质黏土层具流变性,开挖后侧向变形速率达2mm/d;③邻近桥墩基础为摩擦桩,对振动与土体位移敏感。

(2) 支护方案。①采用“钢管桩+内支撑+止水帷幕”复合支护体系；②钢管桩。选用 $\Phi 630 \times 12$ mm螺旋焊管，材质Q355B，桩长24m（入岩深度 ≥ 5 m），间距0.8m密排布置，桩顶标高-2.0m；③支撑体系。设置3道H型钢腰梁（H500 $\times 300 \times 11 \times 18$ ），水平间距4m，竖向间距5m，角部增设 $\Phi 609 \times 16$ mm斜撑，预加轴力1200kN；④止水结构。桩间挂设 $\Phi 6 @ 100 \times 100$ 钢筋网，喷射C25混凝土（厚120mm），并在外围增设双排高压旋喷桩（ $\Phi 800 @ 600$ mm，深25m），形成封闭式止水帷幕；⑤降水系统。布置36口管井（井深30m，滤管长度8m），真空深井降水结合明排系统，控制地下水位低于坑底2m。

3.3 施工关键技术实施

(1) 钢管桩施工。

①沉桩工艺。采用ZJB-1200型液压静力压桩机，压桩力控制在1800~2200kN，终压力稳压3分钟；

②垂直度控制。安装激光测斜仪与桩身导向架，垂直度偏差 $\leq 0.8\%$ ，桩位偏差 ≤ 30 mm；

③桩端处理。沉桩至设计标高后，通过预埋注浆管注入水泥-膨润土浆液（水灰比0.6，注浆压力1.5MPa），形成直径1.2m的扩大头，提升端承力30%。

(2) 协同作业管理。

①分层开挖。分4层开挖（每层4.5m），遵循“先撑后挖”原则，每层开挖后24小时内完成腰梁安装；

②动态调压。在钢支撑端部安装轴力伺服系统，根据光纤监测数据（应变精度 $\pm 3 \mu \varepsilon$ ）动态调整预加轴力，将腰梁挠度控制在 $L/500$ （L为跨度）；

③应急措施。在第三层开挖时监测到局部桩体位移达25mm（预警值20mm），立即采用 $\Phi 159 \times 8$ mm微型钢管桩斜向补强（倾角 60° ，长度15m），并回填2m厚砂袋反压，48小时内位移速率降至0.5mm/d。

(3) 渗流控制。

①帷幕验证。通过钻孔抽水试验，测得止水帷幕渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-6}$ cm/s，满足设计要求；②实时监测。布置12组渗压计，监测显示最大水力梯度0.15，远低于临界值0.8，无管涌风险；③应急封堵：在东北角出现0.5L/s渗

水点时，采用双液注浆（水玻璃：水泥浆 = 1 : 1，凝胶时间30s）快速封堵。

3.4 监测数据与效果分析

(1) 变形控制。①桩顶水平位移最大值12.3mm（设计限值25mm），周边桥墩沉降9.8mm；②基坑隆起量8.5mm，底板回弹率0.046%，符合《建筑基坑工程监测技术规范》（GB50497）要求。

(2) 结构内力。①钢管桩最大弯矩值286kN·m（设计值320kN·m），应力比0.72；②腰梁最大轴力1050kN（设计值1200kN），安全系数1.14。

(3) 经济效益。①较传统钻孔灌注桩方案缩短工期45天，节约成本18%；②钢管桩回收率达85%，减少建筑垃圾1200吨。

结束语

综上所述，水利工程深基坑钢管桩支护技术凭借高强度、快速施工及协同变形控制能力，有效解决了深基坑工程中的渗流风险、土体位移及环境敏感等难题。案例分析表明，钢管桩支护结合信息化监测与动态调控，能够实现“零渗漏、微变形”的核心目标，同时通过绿色施工与资源回收，显著降低工程碳足迹，契合可持续发展理念。

参考文献

- [1] 陈志春. 水利工程建筑深基坑钢管桩支护施工技术[J]. 工程技术研究, 2024, 9(18): 52-54.
- [2] 张继勇. 深基坑锁扣钢管桩支护施工技术研究[J]. 河南建材, 2024(1): 34-37.
- [3] 范民浩, 孙剑, 鞠凤萍. 灌注桩-钢管桩复合土钉墙组合支护体系的研究与应用[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(3): 35-40.
- [4] 刘栗州. 临河深基坑锁扣钢管桩施工对比应用技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(8): 53-55.
- [5] 张立, 白晓宇, 杲晓东, 等. 深基坑双排微型钢管桩支护受力特性原位试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2023, 54(9): 3621-3634.