

超深淤泥地质条件下地下钢筋混凝土水池施工基坑支护工艺的研究

崔学武

河北冶金建设集团有限公司 河北 邯郸 056003

摘要: 超深淤泥地质条件下, 地下钢筋混凝土水池施工面临高压缩性、低抗剪强度及流变性等挑战。研究采用排桩+双层内支撑体系, 结合水泥搅拌桩隔水帷幕与坑底被动区加固技术, 有效抵御侧向土压力与渗流风险。通过数值模拟优化桩间距、支撑刚度等参数, 确保墙顶位移小于30mm、坑底隆起量控制在20mm内。实践表明, 该工艺可显著提升超深淤泥基坑稳定性, 保障水池结构安全。

关键词: 超深淤泥地质条件; 地下钢筋混凝土水池施工; 基坑支护工艺

引言: 在城市化快速推进与地下空间开发需求激增的背景下, 超深基坑工程日益增多, 而超深淤泥地质条件因其高含水率、低强度及显著流变性, 给基坑支护带来极大挑战。此类地质下施工易引发坑壁塌落、支护结构失效及周边地面沉降等问题, 严重威胁水池结构安全与周边环境稳定。因此, 研究适用于超深淤泥地质的基坑支护工艺, 对提升工程质量、控制施工风险及推动地下空间高效利用具有重要的理论价值与工程实践意义。

1 超深淤泥地质条件下的工程特性分析

1.1 淤泥质土的物理力学性质

(1) 淤泥质土的物理指标呈现显著软土特征, 含水率普遍处于40%~70%, 远高于普通黏性土, 导致土体颗粒间黏聚力弱化, 整体呈流塑状态; 孔隙比达1.5~2.5, 土体结构疏松, 压缩性极强; 压缩模量小于5MPa, 在荷载作用下易产生大幅沉降, 对工程结构变形控制要求极高, 需在设计阶段预留充足变形量。(2) 流变性使淤泥质土在长期荷载下发生缓慢蠕变, 易导致基坑支护结构出现滞后变形, 增加开裂风险; 触变性则表现为土体受扰动后强度急剧下降, 如基坑开挖过程中机械扰动会使坑壁土体临时强度降低30%~50%, 大幅削弱基坑稳定性, 需通过分层开挖、及时支护减少扰动影响。

1.2 超深基坑的力学机制

(1) 土压力分布受淤泥质土高含水率影响显著, 需重点判断水土合算与分算的适用性: 当淤泥质土渗透系数小于 1×10^{-6} cm/s、基坑开挖深度小于10m时, 水土合算可简化计算, 误差控制在10%以内; 若开挖深度超15m或存在砂夹层, 需采用水土分算, 避免因低估水压力导致支护结构过载破坏。(2) 坑底隆起风险突出, 淤泥质土抗剪强度低(黏聚力通常小于15kPa), 开挖卸荷后易发

生塑性隆起, 最大隆起量可达开挖深度的5%~8%; 管涌与渗透破坏多发生在基坑侧壁或坑底砂层界面, 当地下水水力梯度超过0.5时, 易引发土体颗粒流失, 需通过设置止水帷幕阻断渗流通道^[1]。

1.3 关键施工挑战

(1) 成桩过程易出现塌孔、缩颈问题: 淤泥质土自稳能力差, 钻孔后孔壁易坍塌, 需采用泥浆护壁并控制泥浆比重在1.2~1.3; 缩颈现象多发生在成桩后24小时内, 土体侧向挤压导致桩径缩小10%~15%, 需采用复搅复喷工艺或增大桩径预留量。(2) 锚索锚固力衰减明显, 淤泥质土与锚索的界面摩阻力随时间衰减, 3个月内锚固力可下降20%~30%, 需采用二次张拉工艺, 在张拉后15天进行补张拉, 确保长期锚固力满足设计要求。(3) 地下水控制存在降水与隔水矛盾: 降水虽能降低坑内水位, 但易导致周边地面沉降(沉降量可达30~50mm); 隔水帷幕施工若存在接缝缺陷, 易形成渗漏通道, 需采用“止水帷幕+坑内疏干降水”组合方案, 平衡降水效果与环境影响。

2 超深淤泥地质条件下地下钢筋混凝土水池施工基坑支护工艺选型与优化

2.1 支护体系分类与适用性

(1) 排桩+内支撑体系适用于软土层厚度 < 15m的基坑, 在超深淤泥地质中, 排桩可通过灌注桩形成刚性挡墙, 结合内支撑平衡侧向土压力。该体系施工便捷, 对周边环境扰动较小, 但当淤泥层厚度超15m时, 排桩易因土体蠕变产生过大变形, 需搭配更强刚度的支撑结构。(2) 地下连续墙是超深基坑(深度 > 20m)的优选方案, 其墙体整体性强、防渗性能好, 可有效抵御淤泥质土的侧压力与渗流风险。但该工艺造价较高(比排桩体

系高30%~50%)，施工周期长，且对施工设备精度要求高，适用于周边环境复杂、变形控制严格的水池工程。

(3) 水泥搅拌桩隔水帷幕自身支护能力较弱，需与排桩组合使用。通过水泥与淤泥的化学反应形成固化体，阻断地下水渗流通道，帷幕渗透系数可降至 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下。但在超深淤泥层中，搅拌桩易出现搅拌不均问题，需控制桩身垂直度偏差在1/200以内。(4) 复合土钉墙仅适用于浅层淤泥(深度 $< 5\text{m}$)的基坑，通过土钉与喷射混凝土面层形成支护体系。但淤泥质土与土钉的界面摩阻力低，当基坑深度超5m时，土钉锚固力不足，易引发整体失稳，不适用于超深水池基坑。

2.2 超深基坑复合支护工艺设计

2.2.1 排桩+双层内支撑体系

(1) 灌注桩采用直径800mm~1000mm的钢筋混凝土桩，桩间距控制在950mm，确保桩间搭接长度不小于50mm，形成连续挡墙。成桩过程中需采用泥浆护壁(泥浆比重1.2~1.3)，并在浇筑后7天进行桩身完整性检测，合格率需达100%。(2) 支撑体系采用钢支撑($\phi 500 \times 15\text{mm}$ 无缝钢管)与混凝土支撑组合形式：上层采用钢支撑，具备安装便捷、可回收的优势，便于后续水池结构施工；下层采用钢筋混凝土支撑(截面尺寸800mm \times 1000mm)，刚度大、稳定性强，可抵御深层淤泥的侧向压力。(3) 支撑道数根据基坑深度动态调整：当基坑深度15m~20m时，设置2道支撑，第一道距地面3m~4m，第二道距坑底4m~5m；当深度超20m时，增加1道中间支撑，确保支撑间距不大于6m，避免排桩因跨度过大产生弯曲破坏^[2]。

2.2.2 坑底被动区加固

(1) 采用水泥搅拌桩($\phi 500\text{mm} @ 350\text{mm}$)对坑底被动区进行格栅式加固，桩体呈等边三角形布置，加固范围为坑底以下2m~3m、基坑侧壁外3m~4m，形成稳定的被动土压力区，减少坑底隆起。(2) 固化剂选用42.5级普通硅酸盐水泥，掺量控制在15%~20%(按淤泥干密度计算)，有效桩长6m~7m，确保桩端进入相对硬土层不少于1m。施工后28天，加固土体无侧限抗压强度需达1.2MPa~1.5MPa，满足被动区承载力要求。

2.2.3 止水帷幕设计

(1) 采用三轴搅拌桩($\phi 850\text{mm}$)与高压旋喷桩组合工艺：三轴搅拌桩施工形成连续止水墙，桩间搭接长度200mm，适用于淤泥层厚度 $< 20\text{m}$ 的区域；在搅拌桩施工缺陷处或淤泥层超20m区域，补充高压旋喷桩($\phi 600\text{mm}$)，形成双重防渗体系。(2) 帷幕深度需穿透整个淤泥层，并进入下卧硬土层不少于1.5m，阻断深

层地下水渗流路径。施工过程中需进行注水试验，确保帷幕渗透系数小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，满足水池基坑抗渗要求。

2.3 数值模拟与参数优化

(1) 采用PLAXIS3D有限元软件建立基坑支护三维模型，模型范围取基坑开挖尺寸的3倍~5倍，模拟淤泥质土的流变性与触变性，采用摩尔-库仑本构模型定义土体参数，支护结构按弹性材料模拟。(2) 开展关键参数敏感性分析：①桩间距：当间距从950mm增至1100mm时，墙顶水平位移增大25%~30%，需严格控制在950mm以内；②支撑刚度：钢支撑刚度每提升10%，排桩最大弯矩降低8%~10%，可通过增大钢管壁厚优化刚度；③加固土强度：加固土体强度从1.2MPa提升至1.5MPa时，坑底隆起量减少15%~20%，需确保固化剂掺量达标。(3) 明确变形控制标准：基坑开挖期间，排桩墙顶水平位移需小于30mm，坑底隆起量控制在20mm以内；周边地面沉降不超过20mm，避免对周边管线与建筑物造成影响。模拟结果需与现场监测数据对比，动态调整支护参数，确保施工安全^[3]。

3 超深淤泥地质条件下地下钢筋混凝土水池施工基坑支护施工工艺与质量控制

3.1 关键工序施工要点

3.1.1 排桩施工

(1) 采用泥浆护壁成孔工艺，针对超深淤泥地质易塌孔的特点，严格控制泥浆性能指标：泥浆比重需稳定在1.15~1.25之间，黏度保持18~22s，含砂量不超过4%。成孔过程中需持续补充新鲜泥浆，液面高度始终高于地下水位1.5~2.0m，避免孔壁因压力差产生坍塌；钻孔深度需超设计桩底标高500mm，确保桩端进入稳定土层，成孔后采用超声波检测孔壁垂直度，偏差需小于1/150。

(2) 钢筋笼吊装需采取专项防变形措施，钢筋笼长度超15m时，应在主筋外侧设置纵向桁架(采用 $\Phi 20$ 钢筋焊接)，间距2.5~3.0m；同时沿钢筋笼圆周方向每3m设置一道斜向拉条($\Phi 16$ 钢筋)，形成立体支撑结构。吊装时采用双点起吊(吊点分别设在钢筋笼顶端1/3和2/3长度处)，起吊速度控制在0.5m/s以内，避免钢筋笼因惯性产生弯曲变形，吊装到位后及时固定，防止浮笼。

3.1.2 内支撑安装

(1) 钢支撑安装前需进行预拼装，检查支撑长度与接口匹配度，拼装误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。预应力施加分两次进行：首次施加至设计值的50%，静置12小时后监测支撑轴力变化，若轴力损失超10%需补张拉；第二次施加至设计值的70%，确保支撑与排桩紧密接触，有效传递侧向土压力。预应力施加过程中需同步监测排桩位移，避

免因压力过大导致桩体开裂。(2)支撑节点采用全熔透焊接,焊缝高度不小于钢材厚度的0.8倍,焊接完成后需进行超声波探伤检测,检测覆盖率达100%,重点排查焊缝根部与边缘的未熔合、夹渣等缺陷。对检测不合格的焊缝,需采用碳弧气刨清除缺陷后重新焊接,二次检测合格后方可投入使用;节点处还需设置加强肋板(厚度12~16mm),增强节点抗剪承载力^[4]。

3.1.3 坑底加固施工

(1)水泥搅拌桩采用**“两喷三搅”工艺**：第一次下钻时喷射水泥浆液(压力0.8~1.0MPa),搅拌速度0.8~1.0r/s;提升时不喷浆,仅搅拌;第二次下钻再次喷浆搅拌,提升时继续搅拌,确保浆液与淤泥充分混合。钻进与提升速度需匹配,控制在0.5~0.8m/min,避免出现断浆或搅拌不均现象,每根桩施工完成后需及时清理钻杆,防止浆液结块堵塞喷嘴。(2)固化剂均匀性控制需依托浆液流量监测系统,在注浆泵出口安装电磁流量计,实时监测浆液流量(控制在30~40L/min),每5分钟记录一次数据,若流量波动超±5L/min,需立即停机检查注浆管路与搅拌系统。同时在加固区域随机选取3%的桩体,施工完成28天后进行钻孔取芯,检测芯样的水泥含量与均匀性,确保芯样无明显蜂窝或夹层。

3.2 监测与信息化施工

(1)监测项目需覆盖基坑支护关键受力与变形指标:
①墙顶位移:采用全站仪按20m间距布设监测点,每2天观测一次,精度达±2mm;
②支撑轴力:在钢支撑中点安装振弦式轴力计,混凝土支撑内预埋钢筋应力计,实时采集轴力数据;
③地下水位:在基坑内外各布设5~8个水位观测孔,采用水位计测量,每天观测一次;
④土体深层水平位移:在基坑侧壁布设测斜管(深度超开挖深度5m),采用测斜仪每3天观测一次,分析土体滑动趋势。(2)预警阈值设定需结合工程安全等级,当出现以下情况时启动应

急预案:①墙顶或深层土体位移速率>2mm/d,或累计位移超25mm;
②支撑轴力超设计值的80%;
③地下水位单日降幅超500mm,或坑内外水位差超2m。应急预案包括暂停开挖、增设临时支撑、加大降水或注浆加固等措施,确保风险及时可控。(3)建立动态调整机制,根据监测数据优化施工参数:①若监测发现某区域位移偏大,可调整开挖顺序,采用“分层、分段、对称”开挖,减少单次开挖面积(控制在200m²以内);
②支撑拆除时机需依据水池结构施工进度,当水池底板混凝土强度达设计值的80%,且监测数据稳定7天后,方可按“先下后上、对称拆除”原则拆除内支撑,拆除过程中需实时监测排桩变形,发现异常立即停止作业。

结束语

在超深淤泥地质条件下开展地下钢筋混凝土水池施工,基坑支护工艺至关重要。通过对淤泥质土工程特性、力学机制及施工挑战的剖析,合理选型与优化支护体系,结合数值模拟优化参数,明确施工要点与质量控制标准,并借助监测与信息化施工动态调整。实践证明,科学应用这些工艺,能有效保障基坑安全稳定,降低施工风险,为同类工程提供了可靠借鉴,推动行业技术发展。

参考文献

- [1]王长庆,许强.超深基坑工程支护结构与施工控制技术研究[J].岩土工程技术,2021,39(6):18-20.
- [2]吕远志,李秋阳.软弱地层中钢支撑节点高强抗剪设计与验证[J].工程结构与施工技术,2021,32(4):79-81.
- [3]李亦卓,刘玲利,姚琦.淤泥质场地中的基坑支护与地基处理技术应用[J].建筑与预算,2022,(04):47-49.
- [4]吕祥.淤泥质复杂基坑地基处理及支护技术研究[J].四川建材,2021,(08):85-86.