

# 旋流井逆作法支撑柱竖向承载力提升技术及其工程实践

廖若晨

中国宝武新钢集团，江西新余，338025；

**摘要：**在地下空间开发领域，旋流井逆作法施工中支撑柱的竖向承载性能是决定工程安全性的核心要素。针对复杂地质条件下支撑柱承载力不足的工程难题，本文构建了涵盖设计优化、工艺创新、材料升级的系统性提升技术体系，并通过工程实证验证其有效性。研究基于逆作法施工力学特性，揭示了支撑柱在竖向荷载下的承载机理，建立了地质参数、设计指标、施工工艺与承载力之间的耦合关系模型。提出了基于钢管混凝土组合结构的截面优化方法、桩端后注浆强化工艺及高性能复合材料应用技术，形成了从理论分析到工程实施的完整技术链条。依托某钢铁厂旋流井工程，通过现场试验与监测数据对比，验证了技术体系的可靠性，支撑柱承载力提升率达 37.5%，沉降控制在 15mm 以内。研究成果为逆作法支撑结构设计提供了新的技术路径，对类似深基坑工程具有重要的参考价值。

**关键词：**旋流井逆作法；支撑柱；竖向承载力；承载机理；组合结构；后注浆技术

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.07.039

## 引言

随着工业基础设施建设的深化，旋流井作为钢铁、矿山行业关键的地下水处理构筑物，其深度和规模不断扩大。逆作法施工技术以“地上地下同步施工”的优势，有效解决了深基坑施工中的工期控制与变形管理难题，在旋流井工程中应用日益广泛。支撑柱作为逆作法施工中的竖向承重核心构件，承担着上部结构荷载、水平支撑体系荷载及施工阶段动态荷载的多重作用，其承载力可靠性直接影响基坑支护结构的整体稳定性。然而，复杂地质条件（如高压缩性软土层、富水砂层）与施工过程中的不确定性（如成孔偏差、混凝土密实度不足），常导致支撑柱出现承载力衰减、沉降超限等问题。现有研究多集中于桩基承载力提升技术，但针对逆作法支撑柱这一特殊受力构件的系统性研究相对匮乏，尤其是在组合结构受力机理、施工工艺与承载力的量化关系等方面仍需深入探索。本文结合理论分析与工程实践，构建支撑柱承载力提升技术体系，为逆作法施工安全提供技术保障。

## 1 旋流井逆作法支撑柱受力特性分析

### 1.1 逆作法施工力学模型构建

旋流井逆作法施工遵循“先支后挖、分层逆作”原则，其典型施工流程如图 1 所示：首先施工地下连续墙作为永久性围护结构，同步进行首层梁板结构施工形成支撑平台；随后分层开挖土方至各层支撑标高，施工环形水

平支撑体系，支撑柱作为竖向支点连接各层水平结构；待地下结构施工至井底，完成内部结构浇筑。在此过程中，支撑柱承受的荷载随施工阶段动态变化，包括：

竖向荷载：上部结构自重（20%-30%）、水平支撑体系荷载（40%-50%）、施工活荷载（15%-25%）；

水平荷载：基坑开挖引起的土体侧压力（峰值达 80-120kPa）、地下连续墙位移产生的附加弯矩（最大弯矩系数 0.8-1.2）；

动态荷载：土方开挖引起的应力释放效应（土体有效应力变化率 15%-25%）、地下水渗流产生的浮托力（水位差 1m 时浮力增量 9.8kN/m<sup>2</sup>）。

### 1.2 支撑柱承载机理与失效模式

支撑柱典型截面形式包括钢筋混凝土柱（边长 600-1000mm）和钢管混凝土柱（直径 800-1200mm），其竖向承载力由柱体抗压强度、桩侧摩阻力与桩端承载力组成，表达式为：
$$Q_u = Q_p + Q_s = A_{pq} \cdot p_u + \sum_{i=1}^n q_{si} \cdot l_i$$
式中： $Q_u$  为极限承载力（kN）， $Q_p$  为桩端承载力（kN）， $Q_s$  为桩侧摩阻力（kN）， $A_{pq}$  为桩端面积（m<sup>2</sup>）， $q_{pi}$  为桩端土承载力特征值（kPa）， $u$  为桩周长（m）， $l_i$  为各土层厚度（m）， $q_{si}$  为各土层侧摩阻力特征值（kPa）。

通过载荷试验发现，支撑柱失效模式主要包括：

刺入破坏（软弱土层占比 > 40% 时，发生概率 65%）：桩端土层承载力不足导致柱体整体下沉；

侧摩阻力失效（地下水位以下黏性土层，摩阻力折

减系数 0.6-0.8)：泥皮厚度超标(>5mm)引起界面粘结力下降；

组合结构脱黏(钢管混凝土柱，脱黏率>10%时承载力下降 20%)：混凝土收缩导致钢管与核心混凝土协同工作性能降低。

## 2 支撑柱竖向承载力影响因素量化分析

### 2.1 地质参数敏感性研究

采用 Plaxis3D 有限元软件，对不同土层参数下支撑柱承载力进行模拟，结果表明：

土层黏聚力(c 值)每增加 10kPa，侧摩阻力提升 12%-15%，对软土地基效果显著；

地下水位每上升 1m，砂土侧摩阻力下降 8%-10%，黏土下降 5%-7%，需考虑浮力对有效应力的影响；

桩端持力层强度( $q_p$ )提高 20%，整体承载力提升 18%-22%，是端承型支撑柱的控制因素。

缺陷类型	允许偏差	实际偏差	承载力折减率
桩身垂直度偏差	1/300	1/150	10%-15%
桩端沉渣厚度	≤50mm	150-200mm	18%-25%
混凝土强度标准差	≤5MPa	8-10MPa	12%-18%
钢管柱焊接缺陷	一级焊缝	三级焊缝	20%-30%

## 3 竖向承载力提升技术体系构建

### 3.1 基于协同受力的组合结构优化设计

钢管混凝土柱性能强化采用“约束效应系数” $\zeta=0.8-1.2$  的优化设计，通过公式 $\zeta=f_{ys}/(f_{cs}/\alpha_c)$ 控制钢管与混凝土的强度匹配，使核心混凝土抗压强度提高 30%-40%。工程实例中，Q345B 钢管(壁厚 12mm)与 C40 混凝土组合柱，其轴心抗压强度达 32.5MPa，较普通钢筋混凝土柱提升 45%。

变截面梯度设计技术在软弱土层段(如淤泥质黏土层)采用扩径工艺(直径增大 200mm)，使该段侧摩阻力提升 25%-30%；桩端设置扩大头(直径 1.5-2.0 倍桩径)，端承力提高 40%-50%。数值模拟显示，变截面设计可使整体承载力提升 18%-22%。

### 3.2 施工工艺全过程质量控制技术

成孔精度智能监控系统集成北斗定位与惯性导航技术，实时监测钻孔垂直度(精度±0.1%)，配合气举反循环清孔工艺，将沉渣厚度控制在 30mm 以内，较传统工艺提升 50%清孔效率。

### 2.2 设计参数正交试验

通过 L9(3<sup>4</sup>) 正交试验，分析截面尺寸(D=800/1000/1200mm)、入土深度(L=15/18/21m)、混凝土强度(C30/C40/C50)、配筋率( $\rho=1.0\%/1.5\%/2.0\%$ )对承载力的影响，极差分析显示：

入土深度影响最显著(极差 R=1200kN)，每增加 3m 承载力提升 15%-20%；

截面尺寸次之(R=850kN)，直径增大 200mm 承载力提升 10%-15%；

混凝土强度与配筋率影响相对较小(R=400-500kN)，但 C40 较 C30 强度提升 25%时承载力仅增加 8%，存在材料强度利用率瓶颈。

### 2.3 施工质量缺陷量化评估

通过实测数据统计，施工误差对承载力的影响如下：

高压旋喷桩端后注浆技术采用“两次注浆+间歇施压”工艺：首次注入水灰比 0.5 的纯水泥浆(注浆压力 2-3MPa)，间隔 4h 后注入掺 3%硅酸钠的速凝浆(压力提升至 4-5MPa)，使桩端土体强度提高 30%-40%，侧摩阻力增强 15%-20%。注浆量计算公式为： $Q=\alpha\beta adl$  式中： $\alpha$  为土层修正系数(砂土 1.2-1.5，黏土 0.8-1.0)， $\beta$  为充盈系数(1.1-1.3)， $d$  为桩径(m)， $l$  为注浆段长度(m)。

钢管混凝土柱密实度控制采用“真空辅助浇筑+超声波检测”技术，在钢管顶部设置真空泵(真空度-0.08MPa)，配合 C40 自密实混凝土(坍落扩展度 650-700mm)，实现混凝土充盈度≥99%，脱黏缺陷率从传统工艺的 15%降至 3%以下。

### 3.3 高性能材料应用技术

纳米改性混凝土掺入 0.5%纳米 SiO<sub>2</sub> (平均粒径 50nm)与 1%聚丙烯纤维，使混凝土 28d 抗压强度提升 15%，抗裂性能提高 20%，氯离子扩散系数下降 30%，适用于高侵蚀性地下环境。

耐候型 Q460GJ 钢材针对地下潮湿环境,采用添加 0.08%Cu、0.05%Ni 的耐候钢,其腐蚀速率较普通钢材降低 40%,表面锈层形成致密保护膜(厚度 50–80  $\mu\text{m}$ ),使钢管柱设计寿命从 50 年延长至 80 年。

## 4 工程实践与效果验证

### 4.1 工程概况与初始方案缺陷

某钢铁厂旋流井工程,设计深度 25m,平面尺寸  $\Phi 15\text{m}$ ,采用“地下连续墙+钢管混凝土柱”逆作法施工。地质勘察显示:0–3m 杂填土,3–11m 淤泥质黏土(承载力特征值  $f_{ak}=60\text{kPa}$ ,含水率  $\omega=55\%$ ),11–25m 砂卵石层( $f_{ak}=350\text{kPa}$ ,  $N_{63.5}=25$  击)。初始设计支撑柱参数: $\Phi 800\text{mm}$  钢管混凝土柱,入土深度 18m(进入砂卵石层 7m),C30 混凝土,Q235B 钢管(壁厚 10mm),设计承载力 5000kN。首次试桩检测(慢速维持荷载法)显示,当荷载加至 4000kN 时,累计沉降达 45mm(超过规范允许值 30mm),极限承载力仅 4200kN,不满足设计要求。

### 4.2 提升技术实施与监测方案

#### 技术改进措施

结构优化:钢管材质升级为 Q345B(壁厚增至 12mm),混凝土强度提高至 C40,入土深度增加至 20m(砂卵石层进入深度 9m);

工艺改进:采用旋挖钻机成孔(垂直度偏差控制在 0.3%以内),桩端预埋 3 根注浆管,实施高压后注浆(单桩注浆量 1.2 $\text{m}^3$ ,终压 4MPa);

材料升级:核心混凝土掺入 1.5 $\text{kg}/\text{m}^3$  钢纤维,提高抗裂性能。

监测系统布置埋设 10 个振弦式压力传感器(柱身每 5m 布设 1 个),6 个沉降观测点(沿柱周均布),实时监测施工阶段荷载传递与沉降发展。

### 4.3 效果分析

承载力提升效果二次试桩结果显示,荷载加至 5500kN 时沉降稳定(最终沉降 18mm),极限承载力达 6000kN,较初始方案提升 42.9%,满足设计安全系数 1.2 要求。荷载-沉降曲线(Q-s 曲线)显示,注浆后桩端阻力占比从 35%提升至 50%,侧摩阻力贡献从 65%调整为 50%,受力模式更趋合理。

长期性能监测施工全过程沉降监测表明,支撑柱最大累计沉降 15mm(发生在主体结构施工阶段),后期沉降速率  $<0.05\text{mm}/\text{d}$ ,满足《建筑基坑工程监测技术规范》

(GB50497) 要求。应变监测显示,钢管与混凝土应变差始终  $<50\mu\epsilon$ ,表明组合结构协同工作性能良好,未出现脱黏失效。

## 5 结论与展望

### 5.1 核心研究结论

建立了逆作法支撑柱“荷载传递-结构响应-地质耦合”的承载力影响因素体系,明确入土深度、桩端持力层强度、施工密实度为关键控制参数;

开发了以钢管混凝土组合结构、桩端后注浆、高性能材料为核心的技术体系,工程应用表明承载力提升率可达 30%–40%,沉降控制精度提高 60%;

提出了基于施工阶段动态监测的质量控制方法,实现了支撑柱承载力的可测、可控、可调。

### 5.2 技术创新与工程价值

本文突破传统桩基设计思路,构建了逆作法支撑柱专属的承载力提升技术,解决了复杂地质条件下的工程难题。研究成果已纳入《钢铁企业旋流井施工技术规范》(修订稿),为同类工程提供了标准化技术方案,经济效益显著(单柱造价降低 12%,工期缩短 15%)。

### 5.3 未来研究方向

开展支撑柱-水平支撑-围护结构的整体协同受力研究,建立三维空间力学模型;

探索智能传感技术(如光纤光栅、应力计阵列)在承载力实时评估中的应用;

研究低碳材料(如再生骨料混凝土、耐候钢)在支撑柱中的工程适应性,推动绿色施工技术发展。

## 参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范(JGJ94-2021) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [2] 黄茂松, 徐中华. 深基坑工程逆作法施工力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 85–120.
- [3] 钢管混凝土结构设计及施工规范(GB50936-2014) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] 刘金砺. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 150–185.
- [5] 赵明华, 邹金锋. 岩石力学与工程[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 801–808.