超大直径 RJP 桩在地铁附属围护中的施工应用

王慧
（中交一航局城市交通工程有限公司）

摘　要：为解决天津某地铁车站附属风亭围护结构施工中原有方案无法在横跨基坑电力排管下方实施的技术难题，创新采用超大直径 RJP 桩+型钢组合支护体系，替代传统钻孔灌注桩+单排三轴搅拌桩止水帷幕支护形式。通过开展 RJP 工法受力分析计算与施工工艺优化研究，将其应用于该风亭围护结构施工，基坑开挖阶段支护体系强度满足设计要求，电力排管下方围护结构无渗漏现象，止水效果优异。研究表明，该工法可有效破解电力排管受限条件下的基坑围护施工难题，可为类似工程提供技术参考。

关键词：RJP 工法；型钢；围护结构；成桩检测

0　引言

RJP（超高压旋喷桩）工法通过 2 次超高压射流切削搅拌土体，使土粒与浆液混合凝固形成大直径水泥土固结体，实现止水与加固功能，同时配合型钢形成“RJP 桩止水+型钢抗弯”组合支护体系，受力机理与 SMW（型钢水泥土搅拌墙）工法类似[1]。但是，超大直径 RJP 桩与型钢组合应用过程中通常存在成桩均匀性差、桩径控制困难、工字钢定位偏差、协同受力性能不足以及复杂地下管线环境下施工适应性差等技术难题，易引发基坑渗漏、变形超过设计容许值等风险。目前，国内外学者与工程界主要通过优化喷射参数、改进施工装备、提升垂直度与定位精度、加强桩体搭接质量控制等措施改善成桩效果，但针对电力排管限制桩位、施工空间极端受限条件下的超大直径 RJP 桩+型钢支护体系，仍缺乏系统的设计方法与成套施工控制技术流程。鉴于此，本文以天津某地铁车站附属风亭深基坑工程为依托，围绕超大直径 RJP 工法桩开展受力验算、施工工艺及应用效果研究，提出适用于管线受限环境下的超大直径 RJP 桩+型钢支护解决方案，为类似复杂条件深基坑工程提供技术参考与创新思路。

1　工程概况

1.1　项目概述

天津某地铁车站附属风亭原设计围护结构采用钻孔灌注桩+单排三轴搅拌桩止水帷幕的组合形式。其中钻孔灌注桩设计桩径为 800 mm，桩间距 1 000 mm，桩端均嵌入粉质黏土层，桩长 20 m；在钻孔灌注桩外侧用单排三轴水泥土搅拌桩作为止水帷幕，桩径 850 mm，桩间距 1 200 mm。基坑安全等级为二级。风亭基坑开挖深度约 9.5 m，沿基坑竖向设置 2 道支护体系，第 1 道支护采用钢筋混凝土支撑，截面尺寸为 800 mm×800 mm，支撑轴线间距约 6 m；第 2 道支护采用 ϕ609 mm 钢管支撑，壁厚 16 mm，支撑轴线间距约 3 m。

因 35 kV、110 kV、220 kV 高压线路横跨基坑上方，且受客观条件限制无法实施迁改，原围护结构施工方案无法落地。经多轮技术经济比选，确定采用超大直径 RJP 桩+型钢支护形式替代原方案，选用该工法的核心优势为：

1）桩体直径大，可保证桩间咬合效果，止水性能优异；

2）适配复杂场地周边环境，能有效控制地面沉降与土体侧向位移，型钢的植入可大幅提升桩体抗弯性能；

3）应用范围广，基坑每侧 5.5 m 范围均采用该支护体系，可适配 35 kV 与 110 kV 线路相邻的复杂工况；

4）施工自动化程度高，关键质量参数可提前预设且施工数据实时记录，可有效降低人为因素造成的质量偏差[1]。

1.2　水文地质条件

场地表层地下水类型主要为第四系孔隙潜水，赋存于Ⅱ陆相层及以下的粉土、砂层的地下水具承压性，为微承压水。各层含水层厚度和埋深不均匀，承压水含水层中间分布黏性土隔水层中夹

有含水层透镜体，局部上下连通，水力联系紧密。场地地层自上而下由杂填土、淤泥质粉质黏土、黏质粉土，以及多组粉质黏土、黏土组成，局部夹黏质粉土、粉砂薄层。

2　受力计算

2.1　计算参数

1）荷载取值：永久荷载依据土层实际自重计算，地下水位埋深取 0.5 m；基坑侧壁施工可变超载取 20 kPa。

2）RJP 桩参数：桩长 20.17 m，直径 3 m，搭接长度 0.6 m；设计强度不小于 1.5 MPa；中心插入 Q235 型钢，其截面高度 700 mm、翼缘宽度 300 mm、腹板厚度 13 mm、翼缘厚度 24 mm；型钢截面面积 231.5 cm^2；截面惯性矩 197 000 cm^4。

2.2　模拟计算假定

采用有限元法模拟基坑开挖全过程的围护结构受力与变形，开挖阶段围护结构作为支挡构件，承受水土压力与施工荷载的联合作用。将结构受力、变形过程划分为若干独立阶段，考虑各阶段结构受力与变位的继承性；对钢支撑施加其轴力设计值 40%~60%的预加力。土压力采用主动土压力计算模式，坑底以上土压力按三角形分布，坑底以下土压力按矩形分布。通过水平及竖向弹簧单元模拟坑底土体对围护结构的双向约束作用。以围护结构计算所得的每延米支撑反力为依据，将其等效为均布荷载施加于支撑体系腰梁，进而求解各支撑构件内力，完成支护体系的强度与稳定性验算。

2.3　计算结果分析

基坑计算采用同济启明星 9.0 版进行计算。

2.3.1　整体稳定验算

开挖深度 9.5 m 为基坑最不利工况。数值模拟结果表明，该工况下基坑滑动力的最大值为 2 152.4 kN/m，抗滑力为 2 978.6 kN/m。

计算所得整体稳定系数 K=1.38，大于设计容许稳定系数 1.30，基坑整体抗滑移稳定性满足规范及设计要求。

2.3.2　地表沉降

基于模型进行数值模拟。当最大开挖深度为 9.5 m 时，沉降量最大为 12.9 mm。

沉降控制值要求取 0.2%H（H 为基坑开挖深度）与 40 mm 二者中的较小值，经计算 0.2%H=19 mm，故取 19 mm 作为沉降控制值。

模拟所得最大地表沉降 12.9 mm 小于允许变形限值 19 mm，基坑地表沉降满足设计控制要求。

2.3.3　最大水平位移

经围护结构位移数值模拟分析，当基坑开挖深度达到 9.5 m 时，围护结构水平位移达到最大值 15.6 mm。

围护结构最大水平位移控制限值取 0.3%H（H 为基坑开挖深度）与 50 mm 二者中的较小值，经计算 0.3%H=28.5 mm，故取 28.5 mm 作为水平位移控制值。

模拟所得围护结构最大水平位移 15.6 mm 小于允许水平位移控制值 28.5 mm，基坑围护结构变形满足设计控制要求。

2.3.4　型钢抵抗力

围护结构受力分析显示，当底板施工完成并达到设计强度、开挖深度 6.23 m 处拆除第 2 道钢支撑时，内置型钢弯矩达到最大值 471.4 kN·m。此时型钢钢材强度计算公式为：

$$\sigma=1.25\gamma N/A+1.25\gamma M/W$$

式中：σ 为型钢计算应力，MPa；γ 为结构重要系数，取 1.0；N 为弯矩最大时对应剪力，kN；A 为型钢截面面积，cm^2；M 为最大弯矩，kN·m；W 为工字钢的弹性截面抵抗矩，kN。

经计算，σ=104.7 MPa，小于 Q235 钢材的设计强度设计值（205 MPa），型钢承载力满足要求。

2.3.5　抗倾覆验算

经数值模拟可知，当基坑最大开挖深度为 9.5 m 时，基坑抗倾覆安全系数达到极值，计算值为 1.21。本工程基坑抗倾覆控制设计限值为 1.2，由于模拟所得抗倾覆系数 1.21 大于设计限值，基坑抗倾覆稳定性满足设计控制要求。

2.3.6　坑底抗隆起

数值模拟显示基坑开挖至基底时，基坑处于最不利条件，模拟计算得到基坑抗隆起安全系数为 1.49。基坑抗隆起控制限值取 1.4，由于模拟所得抗隆起系数 1.49 大于允许安全限值，基坑抗隆起稳定性满足设计控制要求。

综合各项模拟验算结果，各项指标均符合设计控制要求。

3　施工应用

3.1　施工工艺流程

超大直径 RJP 桩施工流程为：施工准备→桩位放样→开挖沟槽→钻机就位→钻孔→高压喷射

注浆（分段旋转提升、分段拆除）→喷射结束→插入型钢→养护→质量检测。

3.2　关键施工工序

3.2.1　桩位放样

根据设计桩芯坐标确定 RJP 桩位并完成放线，为防止下钻过程中破坏电力沟槽，先采用人工探挖暴露电力沟槽，设置外围标杆标识，探挖完成后对沟槽进行回填压实。

3.2.2　开挖沟槽

采用挖掘机开挖泥浆排放沟槽，确保高压喷射注浆过程中冒浆顺利排出，避免泥浆堆积影响施工[2]。

3.2.3　钻机就位及钻孔

铺设钢板加固作业面，保证钻机就位稳定性。钻机就位后完成调平、对中，调整桩机垂直度，确保套管与桩位偏差≤50 mm，钻孔深度比设计桩深大 200~300 mm。钻孔过程中详细记录套管节数，控制桩机垂直度偏差≤1/200，启动钻机前进行试喷，确认喷嘴工作状态正常。采用钻孔法将喷射管下至设计深度，根据地层特性调整钻进参数，针对场地黏土地层适当降低旋喷速度，保证成桩效果。记录钻进全过程，包括钻进深度、地层类型、钻进时间等，遇地下障碍物时立即停工，查明障碍物类型与位置，采取清理或避让措施后复工。喷射管下至设计深度后，再次复核钻杆垂直度与桩位，确保符合施工规范要求。

3.2.4　参数设置

RJP 桩施工前通过查阅同类工程施工资料与现场试桩确定施工参数，试桩完成 28 d 后进行取芯检测，最终确定的核心施工参数为：水泥浆喷射压力 40 MPa，喷射量 150 L/min，比重 1.42~1.51；水喷射压力 20 MPa；空气压力 0.8~1.05 MPa，风量 1.0~2.0 m^3/min；钻杆回转数 6~8 r/min，提拔速度 47.3~57.3 min/m[3]。钻头到达预定深度后进行校零，使动力头的“0”刻度、喷嘴、钻杆刻度线处于同一直线，预设旋转角度、提升速度、回转数等工艺参数后，启动旋喷施工。

3.2.5　喷浆提升

高压喷射注浆采用自下而上分段旋转提升工艺，启动高压水泵、高压注浆泵与空气压缩机，待各系统压力稳定后，启动旋转装置并缓慢提升喷射管；施工过程中严格按照试桩参数控制喷射压力、流量、钻杆旋转速度与提升速度，保持各系统运行稳定，严禁随意调整参数。

3.2.6　插入型钢

RJP 桩高压喷射注浆施工完成后立即插入型钢，避免水泥土固结后增加插入难度。采用汽车吊起吊型钢，保持型钢垂直状态，使型钢底部中心与桩位中心对中，吊装过程中由挖掘机配合辅助定位；优先采用自重下落，沿定位导向架徐徐插入，自重无法到位时，采用静压法或振动锤辅助下沉，严禁暴力冲击。型钢下插至设计标高后，采用吊筋穿过型钢腹板，搁置在定位型钢上完成固定，防止型钢后期沉降，便于后续回收。型钢顶部高出冠梁设计标高 500 mm，为型钢后期回收预留操作空间。

3.3　成桩检测及开挖效果

RJP 桩施工完成 28 d 后进行成桩质量检测，检测结果如表 1 所示。桩体 28 d 无侧限抗压强度 2.3 MPa，远大于设计要求的 1.5 MPa。桩身含灰量均匀，无蜂窝、孔洞缺陷，桩间搭接部位咬合紧密，各项检测指标均满足设计要求。同时，随机开挖 2 根桩的桩头进行实测，桩径分别为 3.05 m、3.02 m，满足设计要求，属于超大直径桩。

表 1　RJP 桩成桩质量检测结果表

检测项目	检测结果	设计控制值
28 d 无侧限抗压强度/MPa	2.3	≥1.5
桩长/m	20.25~20.30	≥20.17
垂直度偏差	≤1/250	≤1/200

基坑开挖过程中，围护结构无渗漏现象，止水效果优异；对基坑开展全过程监测，关键监测数据如表 2 所示。地表沉降、围护结构水平位移、周边管线沉降均控制在设计容许范围内，基坑施工安全可控。

表 2　基坑关键监测数据表

监测项目	点位数量/个	最大值/mm	平均值/mm	设计控制值
地表沉降	12	12.9	8.7	≤0.2%H，且≤40 mm
围护结构水平位移	8	15.6	10.3	≤0.3%H，且≤50 mm
基坑周边管线沉降	4	8.3	5.6	≤20 mm

3.4　施工难点及解决措施

1）型钢插入困难

产生原因：RJP 桩成桩施工周期较长，型钢插入前桩体水泥土已产生初期强度，导致型钢无法依靠自重插入。

解决措施：RJP 桩喷浆施工完成后立即组织型钢插入作业，采用振动锤辅助振动，同时配合挖掘机调整型钢垂直度，确保型钢顺利下插至设计标高。

2）喷射压力不足

产生原因：场地局部地层条件复杂，土体密实度差异大，导致喷射压力衰减。

解决措施：施工前检查管路密封性与压力表精度，确保设备运行正常，针对复杂地层段，适当延长喷浆时间，保证土体切削与浆液混合效果。

3）喷射压力骤然上升

产生原因：喷嘴堵塞、高压管路清洗不净导致杂物堵塞、泵体及出浆管路存在堵塞物。

解决措施：正式施工前必须进行试喷作业，全面检查管路、喷嘴与泵体的工作状态，及时清理堵塞物，确保喷射系统通畅。

4　效益分析

4.1　经济效益

原方案拟将高压线路迁改至车站南侧海河地块，待附属结构施工完成后再迁回原位，但该方案迁改费用高且工期无法满足工程要求。本次工程采用高压线路原位悬吊保护+超大直径 RJP 桩+型钢围护结构的组合方案，虽围护结构造价比原设计方案增加 407.8 万元，但节省高压线路迁改费用 3 500 万元，综合节约工程投资 3 092.2 万元，经济效益显著。

4.2　工期效益

高压线路迁改方案涉及合同签订、可研报告编制、电力部门审核、招标定标、土建施工、停电割接等多个工序，各工序累计所需工期不少于 9.5 个月，且存在诸多不可控因素。本次工程采用高压线路原位悬吊保护+超大直径 RJP 桩+型钢支护方案，直接缩短工期约 9.5 个月，大幅加快了工程整体施工进度，为项目提前完工与运营创造了有利条件。

4.3　技术效益

超大直径 RJP 桩+型钢支护体系施工对基坑开挖与主体结构施工均无干扰，基坑开挖全程无渗漏，结构变形严格控制在设计容许范围内，确保了施工安全。高压线路原位悬吊保护方案有效避免了因管线迁改对周边环境的影响，对车站使用功能及其他专业施工无不利影响。本工程形成了一套在管线受限条件下超大直径 RJP 桩+型钢支护体系的成套施工控制技术，解决了型钢插入、喷射压力控制等关键技术难题，丰富了深基坑围护工程的技术储备。

5　结语

以天津某地铁车站附属风亭深基坑工程为依托，通过理论模拟计算、现场施工工艺优化与基坑全过程监测，研究了超大直径 RJP 桩+型钢组合围护结构在电力排管受限条件下的工程应用，取得了显著的施工效果。基坑开挖阶段围护结构无渗漏，桩身强度与结构变形均满足设计及规范要求，有效保障了施工的连续性与安全性。该工法可有效破解地下管线无法迁改、需原位保护且施工空间受限的深基坑围护施工难题，为类似复杂工况工程提供了切实可行的技术路径。

随着我国城市轨道交通与地下空间开发的持续推进，后续可推动该工法向智能化、精细化方向迭代升级，结合人工智能、智能化监测等技术优化施工参数、提升施工精度与效率，进一步拓展其在复杂地层、超深基坑工程中的应用范围。

参考文献：

[1] 郭海军. RJP 工法在超大深基坑施工中的应用[J]. 建筑施工，2015，37(9)：1030–1032.

[2] 刘伟鹏. 超高压喷浆 MJS 和 RJP 工法的质量控制要点[J]. 建设监理，2021(3)：70–72，76.

[3] 李星. RJP 工法及其工程应用[J]. 施工技术，2018，47(18)：114–118，128.