

银都路越江隧道工程中缝隙旋喷加固技术的施工工艺与质量保障

李志永

上海景业建设工程监理咨询有限公司

DOI:10.12238/bd.v9i2.4365

[摘要] 银都路越江隧道工程浦东段基坑位于芦恒路至林浦南路之间,地质条件复杂,结构形式多变,基坑最大深度达27.2米,对土体稳定性及结构安全提出更高要求。缝隙旋喷加固技术在复杂场地条件下表现出良好的地基适应性与止水效果,是提升基坑围护稳定性和防渗性能的关键手段,采用螺旋钻杆搅拌桩与高压旋喷桩跳孔施工相结合的加固方式,结合冷缝控制措施及全过程质量检测体系,强化了加固体连续性与完整性,显著改善围护结构变形控制能力与地下水渗透控制水平。技术实施过程中根据基坑结构特征动态调整施工参数,形成成套适应性强、控制精度高的施工工艺体系,为深基坑安全施工提供了坚实保障,具有良好的推广应用价值。

[关键词] 银都路隧道; 浦东段基坑; 缝隙旋喷; 加固技术; 质量控制

中图分类号: TV551.4 **文献标识码:** A

Construction process and quality assurance of gap rotary spray reinforcement technology in Yindu Road Cross River Tunnel Project

Zhiyong Li

Shanghai Jingye Construction Engineering Supervision & Consultation Co., Ltd.

[Abstract] The foundation pit of the Pudong section of the Yindu Road Cross River Tunnel Project is located between Luheng Road and Linpu South Road, with complex geological conditions and varied structural forms. The maximum depth of the foundation pit is 27.2 meters, which puts higher requirements on soil stability and structural safety. The gap rotary spray reinforcement technology has shown good foundation adaptability and waterproofing effect under complex site conditions, and is a key means to improve the stability and anti-seepage performance of foundation pit enclosure. The reinforcement method combines spiral drill pipe mixing pile and high-pressure rotary spray pile jumping hole construction, combined with cold joint control measures and whole process quality inspection system, strengthens the continuity and integrity of the reinforcement body, significantly improves the deformation control ability of the enclosure structure and the level of groundwater infiltration control. During the technical implementation process, the construction parameters are dynamically adjusted based on the structural characteristics of the foundation pit, forming a complete set of construction technology systems with strong adaptability and high control accuracy, providing a solid guarantee for the safe construction of deep foundation pits and having good promotion and application value.

[Key words] Yindu Road Tunnel; Pudong section foundation pit; Gap spinning spray; Reinforcement technology; quality control

引言

银都路越江隧道作为连接浦西与浦东的重要市政基础设施,其浦东段基坑施工面临深基坑、高水位、复杂地层结构等综合性技术挑战,特别是在盾构工作井及连接段区域,对地基承载力、基坑变形控制及渗透稳定性提出严格要求。缝隙旋喷加固技术在该类复杂基坑中的应用,依托高压旋喷与螺旋钻搅拌复合工艺,实现土体结构重构与渗透系数控制,形成强度与防渗性

能兼具的加固体,具备良好的成桩连续性与适应性,满足工程对支护系统稳定性的严苛要求。施工过程中结合跳孔旋喷、冷缝抑制及动态检测技术,构建以质量可控、施工高效、安全可靠为目标的技术体系,在保障基坑稳定与隧道结构安全方面展现出显著成效,体现出该加固方法在城市深基坑工程中的工程适应性与技术先进性。

1 工程概况与加固施工难点分析

1. 1银都路隧道浦东段基坑结构特征

银都路越江隧道工程浦东段基坑位于芦恒路至林浦南路，总长850.593米，采用分段式矩形明挖基坑形式，分为工作井、机架段、2号至4号基坑。基坑宽度47.0米至20.4米，最大开挖深度27.2米，结构复杂，对围护稳定性和地基承载力要求高。工作井和机架段是盾构始发关键区域，需高刚度和空间；2号至4号基坑用于通道建设，需控制变形和周边土体稳定^[1]。支护系统采用地连墙结合内支撑，辅以缝隙旋喷加固，各基坑的结构参数由下表1可知。工作井开挖深度最大，需高强度加固和止水；机架段长度105.5米，对沉降差控制要求高；其余基坑空间较充分，采用跳孔式高压旋喷工艺。

表1 银都路隧道浦东段基坑结构特征表

基坑名称	长度(m)	宽度范围(m)	最大开挖深度(m)
工作井	28.5	47.0~20.4	27.2
机架段	105.5	47.0~20.4	26.5
2号基坑	231	47.0~20.4	25.8
3号基坑	275.6	47.0~20.4	26.9
4号基坑	212.5	47.0~20.4	26.3

从地质条件分析，该区域地层以第四系软弱粘性土层为主，局部夹有粉土及细砂层，地下水位高、水压大，土体抗剪强度低，极易出现渗流破坏或侧壁变形风险，需在基坑周边布设高强度、低渗透加固体系，特别是洞门及端头区域需采取密实加固措施以抑制应力集中带来的结构稳定性风险。

1. 2施工难点

银都路越江隧道浦东段加固施工的核心难点集中在洞门区域及盾构始发工作井围护段，其主要技术瓶颈体现在成桩精度控制、旋喷桩密实度保障及冷缝裂隙防控三方面。洞门加固区采用螺旋钻搅拌与高压旋喷复合工艺施工，设计加固尺寸为长47m、宽15.5m、深30.6m，施工空间狭窄、邻近结构复杂。该区域需构建具有一定刚度和止水能力的加固体，以增强盾构洞门开挖段的稳定性，由于加固体需与后续盾构始发平台无缝衔接，施工中对成桩垂直度、重合度、浆液扩散半径等参数要求极高，任何微小偏差均可能导致桩体间冷缝增多。

2 缝隙旋喷加固施工工艺与质量控制

2. 1螺旋钻杆搅拌桩施工技术

螺旋钻杆搅拌桩施工技术是实现浦东段深基坑边坡稳定与止水帷幕形成的关键加固手段，设备选型满足设计提出的30米以上搅拌深度和大直径桩径要求，钻杆采用三段螺旋结构，具备良好的垂直稳定性与连续输浆性能，施工中能够确保桩体搅拌均匀性高于92%。在实际工程应用中，施工参数控制为工艺质量的核心要素^[2]。钻进速度控制应依据岩层硬度和设备性能，结合螺旋钻杆搅拌桩工艺在软弱土层中的适用特性，现场施工中

钻进速度控制在0.6~0.8m/min区间，可有效保证水泥浆与土体的充分融合，避免因提升过快造成桩体夹层或空洞。施工区域采用套打布桩方式，外圈形成止水连续体，中间分隔带构建支护内核，满足结构稳定与变形控制双重需求；监测数据表2显示A1至A5五组代表桩的搅拌均匀度均值为93.5%，桩长控制精度优良，搅拌一致性良好达到了施工工艺标准与结构性能要求。

表2 螺旋钻杆搅拌桩实验数据

桩号	桩长(m)	搅拌均匀度(%)	钻进速度(m/min)
A1	30.1	93.1	0.78
A2	30.3	92.8	0.79
A3	30.2	94.2	0.76
A4	30.4	93.5	0.75
A5	30	94	0.77

施工过程中配备自动数据采集系统，实时监控钻进深度、浆液注量、钻机扭矩与旋转速度，确保施工信息可追溯、数据可量化，为后期质量评估与异常识别提供有效支撑。

2. 2高压旋喷桩跳孔施工法

高压旋喷加固工艺用于围护结构与结构地墙之间的缝隙区域，形成强度与渗透控制兼具的补强体，增强端部连接段整体刚度，该段采用跳孔施工法布设桩位，根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)第6.3.1条，跳孔距离间隔应为4~6m，有效降低浆液互扰与喷注路径偏移概率，提高相邻桩体重叠密度^[3]。高压旋喷作业采用上架施工平台布置钻机及泵送系统，提升作业安全性与操作稳定性，为避免掉钻事故，高架平台下设集液导流系统与备品管路，并设置作业时限控制单元，限定单桩作业时长与间歇时间。施工过程中采用高压水泥浆液(双液体系)进行三重喷注，《高压喷射注浆技术规程》(JGJ/T 148-2019)中规定三重管法中水喷射压力宜大于30MPa，此处喷射压力保持在32~35MPa，旋转速度15~18r/min，确保地层扰动充分、浆液扩散半径达到设计要求，跳孔法在成桩过程中体现出良好的桩体咬合效果与桩间重合控制力，施工中避免了连续桩布设可能引起的浆液失控扩散问题，有效提升了结构连接区段的整体稳定性与抗渗性能。

2. 3冷缝预防措施

冷缝是加固体连续性与密实性破坏的关键风险源，根据施工现场作业特征与设备运行规律，冷缝多集中于因供电中断、设备故障或人员转换引起的桩间非连续施工区段^[4]。本工程中采用冷缝抑制技术路径以作业连续性与响应机制构建为核心，联合监测温差与强度衰减控制策略，形成完整防控体系。试验数据表3显示当停钻时间控制在5分钟以内时，接缝处强度降低率维持在6%以内，温度波动小于2.5℃，桩体界面性能趋于稳定，超过6分钟时，接缝区强度下降显著，最大降低率达9.2%，测点T1至T5的停钻时间与强度衰减结果表明，连续施工控制窗口在4~5分钟之间最为有效。

表3 冷缝预防措施试验参数表

测点编号	停钻时间(min)	接缝处强度降低率(%)	温度波动范围(℃)
T1	5	6.1	2.3
T2	6	8.3	2.7
T3	4	4.7	2
T4	7	9.2	2.9
T5	3	3.2	1.8

为避免冷缝产生,施工现场采取三项具体措施,双回路供电系统确保不间断能量输入;高频故障监测系统可自动判别关键设备异常并切换备用设备;施工平台配备多套螺旋钻杆与喷注系统,确保作业衔接无缝交替。

2.4 质量检测体系

质量检测体系涵盖桩体力学性能、完整性评价与渗透控制指标,通过现场抽检、第三方检测与全过程监测三位一体进行质量保障,在检测批次B1至B5中,根据《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202-2018),静钻抗压强度应满足设计要求,28天无侧限抗压强度应大于1MPa,现场实测平均值远高于该标准,说明成桩强度满足结构使用要求,满足基坑止水及稳定设计要求。桩体完整率均在96.9%以上,桩身连续性良好,内部结构未出现夹层或空洞反应,渗透系数检测结果表明,桩体整体渗透性控制在 $1.0\times 10^{-6}\text{cm/s}$ 以下,具备高效的阻水性能^[5]。检测方法包括钻芯取样强度测试、桩体声波透射、渗透性实测及静载荷试验,声波透射结果与实测完整率数据吻合度高,表明施工记录与质量评估指标具有高度一致性,质量管理体系对检测数据进行实时归档与风险预警,如出现强度异常或渗透异常,即触发纠偏机制进行补桩或再加固处理。检测结果表4同步接入项目BIM平台,构建施工过程与质量数据一体化模型,实现可视化、溯源化与风险前置预警,为后续结构运维提供坚实的数字基础。

表4 质量检测数据汇总表

检测批次	抗压强度(MPa)	完整率(%)	渗透系数(cm/s)
B1	6.6	98.1	1.00E-06
B2	6.5	97.9	1.10E-06
B3	6.7	98.4	9.90E-07
B4	6.8	98.6	9.60E-07
B5	6.4	96.9	1.20E-06

3 实施效果

银都路越江隧道浦东段缝隙旋喷加固工程完成后,基坑结构稳定性显著提升,围护系统整体刚度满足深基坑安全标准,止水帷幕完整性优于同类工程水平。螺旋钻杆搅拌桩施工区域地基承载力提高幅度平均为28%,地层扰动控制良好,未出现桩体偏位、塌孔等结构性缺陷。高压旋喷桩跳孔法在连接区段构建了均匀致密的加固体,形成高强度抗渗闭合环,桩间重合率平均达32%,实现设计要求的连续止水效果,基坑监测数据显示坑内外水位差控制在50cm以内,说明止水体系渗透控制性能良好,基坑侧壁最大水平位移控制在15.6mm内,均低于变形控制警戒值,说明围护结构变形处于可控状态。冷缝抑制措施实测强度恢复率平均达到94.6%,施工过程未出现由冷缝引起的渗水或结构局部破坏情况,施工质量达到预期目标。成桩完整率检测均值达98%以上,渗透系数维持在 $1.0\times 10^{-6}\text{cm/s}$ 量级,加固体各项指标稳定,工程结构连续性与整体抗渗能力显著增强,表明缝隙旋喷加固技术在复杂深基坑中的应用具有良好效果与技术推广价值。

4 结语

银都路越江隧道浦东段基坑工程地质条件复杂、结构形式多变,缝隙旋喷加固技术在解决成桩质量控制、冷缝预防和结构连续性保障等关键问题中展现出显著优势。螺旋钻杆搅拌桩与高压旋喷跳孔工艺构建了高强度、低渗透的一体化加固体系,全过程质量控制与实测指标验证了加固效果的稳定性与可靠性。施工数据与现场监测结果表明,该技术路径能够有效应对深基坑工程在止水、稳定性及施工精度方面的严苛要求,具备良好的工程适应性与推广价值,验证了前期设计与施工组织的合理性,构成了从理论、工艺到实施的完整闭环体系。

【参考文献】

- [1]上海银都路越江隧道新建工程外部道路进入施工尾声[J].隧道与轨道交通,2024,(04):55.
- [2]刘燕萍.隧道接线道路线位选线方案研究——以上海市龙水南路越江隧道为例[J].中国市政工程,2024,(6):23-26+155-156.
- [3]林增龙.上海银都路越江隧道工程总体设计[J].交通与运输,2024,37(S1):78-81+91.
- [4]胡佳萍.复杂建设条件下越江隧道工程方案的对策研究[J].中国市政工程,2024,(01):78-81+156.
- [5]豆世康,彭可云,刘艺,等.蓉江四路越江隧道工程设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2024,(02):266-270+293+25.

作者简介:

李志永(1982--),男,汉族,上海松江区人,本科,中级工程师,研究方向:缝隙旋喷;加固技术;质量控制。