

轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术研究

胥文涛, 赵 凯

(武汉地铁桥隧管理有限公司, 湖北 武汉 430061)

摘 要 城市轨道交通沿线密集的基坑施工常诱发既有隧道管片收敛与沉降, 给线路运营带来一定的安全隐患。为提升轨道交通保护区域稳定性, 确保项目顺利开展, 本文依托某工程实例案例, 通过分析微扰动注浆参数控制技术原理与技术指标要点, 解析了轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制难点, 并且从注浆参数预设、注浆压力控制等方面提出了相应的施工参数技术控制策略, 最后针对该技术的操作工艺展开研究。工程实践表明, 该技术通过精细化注浆实现主动变形控制, 保障了轨道交通安全运行。

关键词 轨道交通保护; 微扰动注浆; 参数控制; 隧道变形

中图分类号: U231.3; U455.49

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.018

0 引言

在当前城市更新与基础设施建设持续推进的背景下, 多数基坑工程的施工场地紧邻既有轨道交通隧道, 导致基坑开挖阶段对既有轨道交通隧道产生影响, 极易出现土体沉降、位移等情况。如果在基坑开挖阶段未采取有效防护性措施, 就容易造成既有轨道交通中管片收敛、裂缝、渗漏水等病害, 严重危害临近隧道安全性, 也会对轨道交通正常运营造成影响^[1]。

1 工程概况

某危房改造二期 B 片 (一期) 项目为城市更新重点工程, 包含 2 栋 30-43F (超) 高层住宅、商业、3 层幼儿园、2 层地下室及景观廊架, 核心施工难点为基坑邻近既有轨道交通区间隧道, 需要微扰动注浆加固以保障地铁安全。本项目基坑东西向长约 118 m、南北向长约 130 m, 围护结构总长约 419 m, 开挖面积约 8 000 m², 开挖深度为 8.50 m~11.00 m, 其中 BC 支护段开挖深度为 10.3 m。基坑采用 $\Phi 1200@1500$ (部分 $\Phi 1200@1300$) 钻孔灌注桩 + 一道钢筋混凝土内支撑; 邻近地铁侧采用 CSM 等厚水泥土搅拌墙止水帷幕 (墙底入强风化岩层 ≥ 0.5 m), 非邻近侧采用 $\Phi 850@600*1200$ 三轴搅拌桩。BC 支护段与地铁结构最小水平净距约 11.2 m, 属轨道交通重点保护区域, 需实施微扰动注浆加固。

2 轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术原理与技术指标要点

2.1 微扰动注浆参数控制技术核心原理

微扰动注浆参数控制技术在应用阶段, 需选择符合施工需求的专用注浆设备, 按照技术参数配比浆液后, 使用设备缓慢注入土体空隙或裂隙内。该技术应用后能有效提升既有轨道交通隧道土体强度, 降低土体渗透性, 减少对周边既有轨道交通线路的影响。微扰动注浆参数控制技术以土体渗透注浆、压密注浆组合方式为主, 通过合理调整注浆压力、速率等参数, 降低对周边土体产生挤压的作用, 防止注浆环节造成土体隆起或位移, 实现加固与扰动控制的双重目标。本项目中微扰动注浆参数控制技术主要应用到 BC 支护段实现土体加固, 有效控制基坑结构沉降, 防止对轨道交通隧道造成影响, 再配合使用 CSM 等厚水泥土搅拌墙提高止水效果, 建立“止水 + 加固”的双重防护体系^[2]。

2.2 轨道交通保护相关规范要求

在轨道交通运营管理过程中, 安全性是根本性指标, 需明确保护区划分标准及施工扰动控制指标。本项目施工作业环节, 其保护规范体现为隧道结构允许沉降量、收敛值等。基于此, 按照项目施工需求进行微扰动注浆参数调整。根据本项目基坑开挖深度 8.5 m~11.0 m 与地铁近距离最小 11.2 m 的实际情况, 在微扰动注浆参数控制技术应用时, 确保轨道结构沉降量在规定范围内, 且注浆时隧道收敛值不超过技术标准。

作者简介: 胥文涛 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 轨道交通土木建筑。

同时，在微扰动注浆参数控制技术应用阶段，确定注浆加固要求，主要从注浆材料、施工工艺、质量验收方面做好参数控制，具体如表 1 所示。

表 1 微扰动注浆控制参数与验收要求

控制类型	关键参数 / 要求
轨道结构控制值	隧道沉降 $\leq 3\text{ mm}$ ，收敛值 $\leq 2\%$
注浆材料	超细水泥—水玻璃双液浆， 初凝时间 $30\text{ s} \sim 60\text{ s}$
施工工艺	孔位偏差 $\leq 5\text{ cm}$ ，注浆压力 $0.3\text{ MPa} \sim 0.8\text{ MPa}$
质量验收	注浆充盈、无串浆冒浆， 沉降监测达标

3 轨道交通保护区微扰动注浆参数控制难点分析

3.1 地质条件复杂导致参数适配性差

本项目基坑开挖深度设计为 $8.50\text{ m} \sim 11.00\text{ m}$ ，且现场地质勘测发现其土层分层明显，不同深度土层渗透率、孔隙率有较大差异。而在该项目中 BC 支护段开挖深度达到 10.3 m ，其下部土层渗透性较弱，上部土层渗透性较强。在该区域止水施工中采用的是 CSM 等厚水泥土搅拌墙，墙体嵌入强风化岩层深度超过 0.5 m ，且岩层和土层的浆液吸附、扩散特性有明显差异。针对上述不同区段地质条件差异，在现场施工环节，若选择单一注浆参数，则极易造成部分区域加固不足，部分区域扰动过大，无法实现精准控制，也会影响既有地铁运营线路安全。

3.2 扰动控制与加固效果的平衡难度大

微扰动注浆参数控制技术的应用，能实现加固效果与扰动控制的平衡。但在本项目施工环节，微扰动注浆参数控制技术应用存在如下矛盾：BC 支护段与地铁最小距离为 11.2 m ，开挖深度 10.3 m ，需严格控制注浆压力与速率以确保加固效果，从而保证基坑稳定性。在实践过程中，通过配合钻孔灌注桩与支撑体系虽然能够抵抗土体压力，但压力、速率过高容易造成土体隆起，隧道存在附加应力引发变形；压力、速率过低，无法保证浆液扩散，土体加固效果不达标，也就不能有效抵抗基坑开挖时土体扰动，甚至引发基坑边坡失稳影响地铁运行安全^[3]。

3.3 参数动态调整缺乏科学依据

由于本项目基坑开挖面积达 $8\,000\text{ m}^2$ ，围护长度 419 m ，其施工规模较大，且不同支护段工况有很大差异。例如：BC 支护段与非临近地铁段地质条件扰动控制指标有很大不同，这造成现场施工时地质条件、隧道变形监测持续变化。为满足各区段施工要求，在微扰动注浆参数控制技术应用中，需根据不同隧道段情况及时调整注浆参数。然而，目前在微扰动注浆参数

控制技术应用时，未有完善的参数调整方法，且人员经验不足，极易造成控制不当而引发注浆效果不达标。

3.4 注浆过程监测与反馈滞后

本项目微扰动注浆参数控制技术应用中，需建设覆盖整个基坑的监测体系。在注浆施工中，需监测隧道变形、土体位移等，但各项数据采集与反馈存在一定滞后性。BC 支护段和地铁最小距离为 11.2 m ，隧道变形敏感，如果扰动超出标准，且没有及时停止注浆、调整参数，就极易造成隧道结构损伤而引发施工风险升高。上述问题若不能及时解决，在现场施工中就会引发基坑支护体系稳定性不足，造成基坑坍塌。

4 轨道交通保护区微扰动注浆参数控制技术

4.1 注浆参数预设方法

通过对本项目施工地质勘察结果、隧道结构参数、基坑施工参数综合分析，结合加固目标，采取室内试验、数值模拟仿真等方式确定注浆参数。本项目临近地铁的 BC 支护段地质条件较为特殊，需根据现场地质勘测结果调整微扰动注浆压力速率、浆液配比参数值，结合 CSM 搅拌墙止水效果，预留参数调整空间，以达到两者适配的标准；非临近地铁段，适当调整参数，保证其加固效果合格且降低施工成本，和钻孔灌注桩支护体系协同控制^[4]。

4.2 关键参数精准控制要点

第一，注浆压力控制。由于本项目 BC 段距离地铁 11.2 m ，开挖深度 10.3 m 。在注浆施工中采取分级加压方式，从低到高增大注浆压力，以防初期压力过大造成扰动。在注浆作业阶段落实压力控制措施，防止隧道允许变形值超出标准，及时监测现场施工情况，以免超出土体承载极限，也不会给 CSM 搅拌墙造成扰动。第二，注浆速率控制。微扰动注浆参数控制技术应用中，需按照“慢注、匀注”的原则，结合土体渗透性调整注浆速率。在该项目施工中，BC 支护段下部弱渗透土层减慢注浆速率，上部强渗透土层提高注浆速率，保证浆液顺利扩散，且配合 CSM 搅拌墙的止水效果，以防浆液渗漏。第三，浆液配比控制。根据本项目微扰动注浆施工需求，调整浆液配比参数，确保水泥、粉煤灰、外加剂等配比方案具备精准性，使浆液流动性、加固效果达到要求，且防止注浆施工给周边的隧道以及土体结构造成影响。第四，注浆深度与注浆量控制。根据本项目的基坑开挖深度、土层分层情况，确定分层注浆深度。BC 支护段注浆深度到强风化岩层以上 0.5 m ，注浆量结合土地空隙率、加固范围精准计算。而非临近地铁段注浆深度设定时，需考虑到基坑开挖深度特点，以保证注浆性能满足技术标准。

4.3 试注浆验证与参数优化

在微扰动注浆作业开始前,结合本项目轨道交通保护区特性,选择代表性点位试验注浆。在该试验点位选择时,其和地铁区间结构外边线距离为11.2 m,开挖深度10.3 m,止水帷幕为CSM等厚水泥土搅拌墙。在该试验阶段,检测注浆压力速率、浆液扩散范围、隧道变形等数据,根据检测数据分析注浆效果,以确定预设参数是否达到要求。通过对注浆结果的分析,优化调整注浆参数。BC支护段注浆压力与速率保持匹配,提高注浆加固效果,且防止造成轨道变形;非临近地铁段选择代表性点位同步试注浆,优化参数以适配三轴搅拌桩止水帷幕、钻孔灌注桩支护体系,进而确保各部分施工达到精准匹配。

4.4 施工过程动态调整策略

微扰动注浆施工阶段建设参数动态调整机制,需结合现场监测数据以及施工反馈及时调整注浆参数,以保证注浆具备适配性。BC支护段监测数据临近允许值时,需立即降低注浆压力、减缓速率,并检查CSM止水情况,以防渗漏造成扰动现象。如果在注浆加固阶段发现加固效果不合格,需确保其扰动不超标的情况下,及时根据现场情况调整浆液配比、增加注浆量,确保注浆参数和现场施工情况保持动态匹配。

5 轨道交通保护区微扰动注浆施工工艺与质量控制

5.1 微扰动注浆施工工艺流程

结合本项目基坑规模、支护形式及止水帷幕类型等实际工况,明确微扰动注浆的完整施工流程,包括:施工准备、钻孔定位、钻孔钻进、浆液制备、注浆施工、注浆结束及封孔处理。针对各环节制定明确、可操作的技术规范,并重点强化以下三个方面的严格控制:第一,钻孔精度,保证钻孔位置与BC支护段、非邻近地铁段的支护结构、止水帷幕(CSM搅拌墙、三轴搅拌桩)精确适配,杜绝钻孔偏差导致浆液扩散范围偏离设计区域^[5]。第二,浆液制备质量,根据本项目各区域不同的参数要求,准确配比浆液。第三,注浆连续性,防止施工中漏注、断注,而在BC支护段,更要让注浆与CSM搅拌墙彼此配合,真正形成“止水+加固”双重防护。

5.2 施工过程质量控制要点

加强注浆材料质量管控是施工控制的首要环节。首先对水泥、外加剂等原材料进行进场检验,确认其符合设计要求及本项目微扰动注浆的参数控制需要,严格控制钻孔深度及垂直度,即BC支护段钻孔深度确保强风化岩层以上0.5 m,与CSM搅拌墙底平齐,非邻近地铁段钻孔深度根据开挖深度合理确定,避免钻孔偏差造成浆液扩散范围偏离设计区域,切实保证加固

效果^[6]。注浆过程中实时监测浆液温度、流动性,主动、及时地调整配比,使浆液性能稳定可靠。注浆结束后及时、规范地对注浆孔进行封孔处理,防止土体沉降,尤其是BC支护段的封孔质量要严格控制,不能影响CSM搅拌墙的止水效果,同时与钻孔灌注桩内支撑体系良好配合,共同保障基坑稳定性。

6 轨道交通保护区微扰动注浆参数控制技术应用效果分析

从对本项目注浆施工后土体强度、渗透性的系统检测中可以看到,BC支护段土体强度相比注浆前有很大提高,符合加固设计要求;渗透性大大降低,与CSM等厚水泥土搅拌墙形成了极好的止水加固体系;对比注浆前后隧道沉降、收敛数据可知,注浆后隧道沉降量严格控制在规范允许范围之内,收敛值没有超限;注浆过程未发生扰动超标现象,有效保护了地铁运营安全;非邻近地铁段注浆施工效果也很好,土体加固后与三轴搅拌桩止水帷幕、钻孔灌注桩内支撑体系彼此协同,基坑开挖时稳定性更佳。

7 结束语

轨道交通保护区施工具备较高敏感性,若选择的施工技术不当或者施工参数控制不足,极易对既有轨道交通运行安全造成影响,也会影响工程建设效果。在该区域内施工选择微扰动注浆参数控制技术,落实参数控制措施,根据现场实际情况及时调整微扰动注浆技术参数,能有效提高隧道结构安全性与稳定性。本文选择某轨道交通项目作为案例,深入探讨微扰动注浆参数控制技术,通过结合现场实际情况,及时调整施工技术参数,旨在有效降低对隧道的影响,确保现场施工顺利进行,保障轨道交通运营安全,为今后同类型项目施工提供经验。

参考文献:

- [1] 张晨.微扰动注浆工艺在地铁保护中的应用[J].建筑施工,2020,42(07):1272-1273,1283.
- [2] 赵帅,张东明,邵华,等.盾构隧道微扰动注浆对土体强度和衬砌横向收敛的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(08):1145-1153.
- [3] 黄斌.微扰动注浆工法治理隧道收敛变形的效果分析[J].建筑科技,2022,06(03):96-99.
- [4] 黄氏,张艺嘉,梁爽.基于MJS与微扰动注浆的地铁隧道变形整治方案设计[J].工程机械,2025,56(02):128-131.
- [5] 燕全会.桩基后注浆技术的应用探讨及施工管理[J].广东建材,2025,41(07):138-144.
- [6] 湛启阳,夏进斌.和政隧道软弱围岩段注浆加固技术参数优化与应用[J].中国公路,2025(03):115-117.