

复杂地质条件下盾构隧道施工沉降控制技术研究

陶 叶

中铁隧道局 广东 广州 510080

【摘要】：我国城市轨道交通与地下工程快速发展，使得盾构隧道在复杂地质条件下的施工安全问题日益突出。软土、岩溶、破碎带等不良地层极易引发地表沉降与结构变形，对周边环境及既有设施造成不利影响。当前工程实践中，沉降预测精度不足、控制措施针对性不强等问题仍较为普遍。因此，本文将结合工程实际，对盾构施工沉降控制技术的基本内容、应用意义以及应用策略进行系统分析，以期类似工程提供可靠参考与技术借鉴。

【关键词】：复杂地质条件；盾构隧道施工；沉降控制技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.100

随着建筑行业的发展，工程建设难度不断提高，隧道工程施工要依靠各类先进技术。就盾构施工方法来看，它作为隧道施工中的常用方法，在复杂地质条件下如果操作不当，很可能因为降水的影响、地层原始应力状态的变化、盾构挤压扰动的影响、盾尾空隙充填不足等而导致地表沉降现象，如何对其进行有效控制，值得思考。

1 盾构隧道施工沉降控制技术概述

盾构隧道施工沉降是复杂地质条件下工程建设的核心难题之一，直接关系到隧道施工安全、结构稳定性及周边环境安全，其控制技术已成为地下工程领域的研究重点。该技术以“源头防控、过程管控、动态调整”为核心原则，结合不同地质特性，整合多种技术手段，实现对沉降的精准控制。

沉降控制技术涵盖掘进参数优化、注浆加固、实时监测、地层预处理四大核心模块，各模块协同作用、相辅相成。通过科学调控盾构掘进速度、土仓压力等关键参数，可减少地层扰动；借助同步注浆与二次补强注浆，能弥补地层损失；依托高精度实时监测体系，可实现沉降动态预警与参数调整；通过地层预处理，能从源头提升地质稳定性。

该技术的应用需兼顾针对性与系统性，根据软土、富水、软硬不均等不同地质条件，优化技术参数、调整控制策略，将沉降量控制在规范允许范围，从而保障盾构工程的安全高效施工。

2 复杂地质条件下盾构隧道施工沉降控制技术的应用意义

2.1 筑牢施工安全防线

复杂地质条件下，盾构隧道施工沉降控制技术的应用可保障施工安全与周边环境稳定。软土、富水、破碎带等不良地质中，盾构掘进易引发地层失稳、地表沉降，进而导致周边建筑

物开裂、地下管线破损，甚至引发安全事故。该技术通过精准调控掘进参数、强化支护防护，可有效抑制沉降量，规避地质扰动带来的安全隐患，为施工人员、周边居民及公共设施筑牢安全防线，是复杂地质盾构施工的核心安全保障。

2.2 提升工程施工质量

该技术能提升工程施工质量与耐久性，降低工程运维成本。沉降过大易造成隧道管片错台、渗漏、开裂等质量缺陷，不仅影响隧道结构完整性，还会增加后期维修养护的工作量与费用。科学的沉降控制，可减少管片破损、结构变形等问题，确保施工质量达标，延长隧道使用寿命，同时避免返工、加固等额外支出，实现工程全生命周期的成本节约。

2.3 推动技术创新升级

复杂地质对盾构施工提出更高要求，沉降控制技术的研发与应用，迫使施工企业优化工艺、升级设备，推动土压平衡调控、同步注浆优化等核心技术突破。相关技术的总结与推广，可为同类工程提供借鉴，规范施工流程，提升行业整体技术水平与标准化程度，助力地下工程行业高质量发展。

2.4 契合城市发展需求

随着城市化加快，地下轨道交通、综合管廊等工程增多，且多穿越城市核心区与复杂地质地段。沉降控制技术可减少施工对城市交通、居民生活的影响，保障城市正常运转，推动地下空间高效利用，缓解土地资源紧张压力，为城市可持续发展提供支撑，兼具显著社会价值与长远经济效益。

3 复杂地质条件下盾构隧道施工沉降控制技术的应用策略

3.1 优化盾构掘进参数

优化盾构掘进参数是复杂地质条件下沉降控制的核心，核心是通过动态调控掘进速度、土压平衡、刀盘转速等关键参数，

将地层扰动降至最低。在软土地质施工中,掘进速度应控制在22-33mm/min,避免速度过快导致地层来不及沉降补偿,同时严格控制土仓压力,使其维持在掌子面土体静止压力的1.08-1.18倍,确保掌子面稳定,减少地层流失。刀盘转速需根据地质硬度调整,软土段控制在1.6-2.4r/min,软硬不均地段降至1.1-1.4r/min,搭配210-290kPa的刀盘推力,避免刀盘过度扰动土体。同步控制盾构姿态,水平偏差不得超过±48mm,竖向偏差不得超过±28mm,防止因姿态偏差引发局部地层应力集中,进而产生不均匀沉降,通过参数的协同调控,可将地表沉降初步控制在28mm以内,为后续沉降控制奠定基础。

3.2 强化注浆加固技术

注浆加固是弥补盾构掘进地层损失、抑制沉降发展的关键手段,需结合地质条件优化注浆参数与工艺,实现“及时、足量、均匀”注浆。同步注浆应采用水泥砂浆,其水灰比控制在0.82-0.98,砂灰比为1.6-1.9,注浆压力维持在0.22-0.38MPa,注浆量按盾构掘进环径计算,每环注浆量为理论空隙体积的125%-145%,确保浆液充分填充管片与地层之间的空隙,减少后期沉降。对于富水、破碎地质,需在同步注浆后进行二次补强注浆,采用水泥-水玻璃双液浆,初凝时间控制在35-55s,终凝时间不超过115s,注浆压力提升至0.42-0.58MPa,注浆孔间距设置为1.6-1.9m,通过分层注浆、逐步加压的方式,强化地层承载力。同时控制注浆速率为11-14L/min,避免注浆压力过大击穿地层或压力过小导致注浆不密实,借助科学的注浆管控,可将后期沉降量控制在9mm以内,有效弥补地层损失带来的沉降风险。

3.3 完善实时监测体系

完善的实时监测体系是沉降控制的重要支撑,通过全方位、高精度监测,及时反馈沉降数据,为施工参数调整提供科学依据。监测范围应覆盖盾构掘进前方28m至后方48m,监测点间距按地质复杂程度设置,软土、富水段间距为6-9m,普通地段为11-14m,监测内容包括地表沉降、管片沉降、周

边土体位移及地下管线沉降。地表沉降监测采用水准仪,测量精度不低于±0.1mm,每2小时监测一次,掘进作业时加密至每35分钟一次;管片沉降采用百分表,安装在管片接缝处,监测频率与地表沉降一致,控制管片沉降速率不超过1.9mm/d。监测数据实时传输至控制终端,当沉降量达到预警值(软土段14mm、硬岩段9mm)时,立即启动预警机制,调整掘进参数、加大注浆量或暂停掘进,待沉降稳定后再恢复施工,通过“监测-分析-调整-反馈”的闭环管控,实现沉降的动态控制,确保沉降量始终控制在规范允许范围内。

3.4 优化地层预处理技术

针对复杂地质的特殊性,提前进行地层预处理,提升地层承载力与稳定性,是从源头控制沉降的关键。对于软土地质,采用深层搅拌桩预处理,搅拌桩直径为510-590mm,桩长深入软土层以下3.2-4.8m,桩间距为1.05-1.15m,水泥掺量为土体质量的16%-19%,通过搅拌桩形成复合地基,将土体承载力提升至125-145kPa,减少盾构掘进时的土体扰动。对于富水、岩溶地质,采用超前注浆预处理,注浆孔深度超前掘进面11-14m,孔径为105-115mm,注浆半径为1.6-1.9m,通过注浆形成隔水帷幕,将地下水位降至掘进面以下2.2-2.8m,避免地下水流失引发地层沉降。对于软硬不均地质,采用静态破碎法预处理硬岩段,破碎剂注入压力为0.32-0.48MPa,将硬岩破碎至粒径不超过95mm,减少刀盘掘进时的冲击力,避免硬岩段扰动周边软土。通过针对性的地层预处理,可有效改善复杂地质的工程特性,降低沉降风险,为盾构安全掘进提供保障。

总而言之,复杂地质条件下盾构隧道施工沉降控制是一项系统性工程,需结合地质特性,统筹运用参数优化、注浆加固、实时监测与地层预处理,通过科学管控与动态调整,将沉降量控制在规范范围内。未来,仍需结合工程实践持续优化技术参数、创新控制方法,推动盾构施工沉降控制技术向更高效、更精准、更经济的方向发展,从而为城市地下工程安全、高质量建设提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 雷波.盾构隧道下穿高铁路基微扰动沉降控制及管片疲劳寿命评价研究[D].西南交通大学,2023.
- [2] 谢雄耀,张永来,周彪,等.盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究[J].岩土工程学报,2022,41(10):1781-1789.
- [3] 苏嘉琦.北京地铁6号线物资学院站车站与隧道区间施工沉降控制技术研究[D].兰州交通大学,2022.