

供水管线穿越特殊地段施工技术研究

陈立峰

新疆水发建设集团有限公司 新疆 830000

【摘要】：供水管线作为城市生命线工程的核心组成部分，其安全、稳定运行直接关系到区域经济社会发展与人民群众的生活福祉。随着城市化进程的加速推进及水资源配置格局的优化调整，新建及改扩建供水管线的线路日益复杂，不可避免地需要穿越河流、铁路、高速公路、既有地下管网密集区、软土沉降区、岩溶发育带以及高烈度地震带等特殊地段。这些特殊地质与交通环境给管道施工带来了极大的技术挑战，包括高风险的顶进作业、复杂的应力控制、严格的变形控制要求以及极高的环境保护标准。一旦施工不当，极易引发地面塌陷、管线断裂、交通中断、周边建筑受损甚至重大水污染事故。本文旨在系统综述供水管线穿越特殊地段的关键施工技术与最新研究进展。

【关键词】：供水管线；特殊地段；穿越施工；非开挖技术；沉降控制；风险管控；水平定向钻；顶管法

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.046

引言

水是城市生存与发展的基础资源，而供水管线则是输送这一生命之源的血管。近年来，随着国家新型城镇化战略的深入实施及“十四五”水安全保障规划的推进，我国供水管网建设进入了新一轮的高峰期。然而，城市建成区土地资源日益紧缺，地下空间开发强度不断增大，导致供水管线的敷设路径受到极大限制。为了避开地面建筑物、保护生态环境或缩短线路长度，大量供水管线不得不选择穿越河流、铁路、高速公路、地铁隧道、既有综合管廊以及地质条件极其复杂的区域。这些“特殊地段”往往具有地质条件多变、周边环境敏感、施工干扰因素多、安全风险高等显著特征。

在常规地段，供水管线的施工主要采用开槽埋设法，工艺成熟且成本较低。但在特殊地段，开槽施工不仅会严重破坏地表交通和环境，甚至可能因深基坑开挖导致周边建筑物倾斜、道路塌陷等灾难性后果。因此，非开挖技术及特殊的穿越施工工艺成为了解决这一矛盾的关键手段。^[1]

1 特殊地段类型特征及其对供水管线施工的影响机理

准确识别特殊地段的类型并深刻理解其对施工的影响，是制定科学施工方案的前提。必须从地质环境、交通设施、既有管线及生态敏感区四个维度进行分类剖析。

1.1 复杂地质条件下的岩土力学响应与失稳机制

特殊地质条件是制约供水管线穿越的首要因素。在深厚软土地区，土体强度低、压缩性高，开挖或顶进过程中极易产生流塑变形，导致掌子面失稳、地面隆起或凹陷，且土体对管道的摩擦阻力大，顶进困难。在富水砂层或粉细砂层中，地下水压力高，若止水措施不当，极易发生管涌、流沙甚至突水事故，造成大规模塌方。在岩溶发育区，地下溶洞、溶蚀裂隙分布不均，钻头易偏斜、卡钻，甚至遭遇高压涌水。在高烈度地震带，地震动可能导致地基液化或断层错动，对管线产生巨大的剪切

力。这些地质因素相互作用，使得围岩应力状态复杂多变，传统的地基处理或支护手段往往难以奏效，必须采取针对性的加固与隔离措施。

1.2 交通干线与重要构筑物的保护约束

穿越铁路、高速公路、地铁隧道及大型桥梁桩基等交通干线时，施工必须在保证交通畅通和结构安全的前提下进行。这类地段通常对地表沉降有极严格的要求（如控制在毫米级），任何微小的沉降都可能导致轨道几何形位改变、路面开裂或桥梁墩台倾斜。同时，这些构筑物下方往往存在复杂的地下基础，施工扰动可能破坏其持力层。此外，穿越期间不能中断交通，要求施工速度快、噪音小、振动低。传统的明挖法完全不可行，必须采用高精度的非开挖技术，并配备严密的自动化监测系统，实时反馈施工参数，确保“零影响”穿越。^[2]

1.3 既有地下管网密集区的避让与协同

在城市中心区，地下空间已被电力、通信、燃气、排水等各类管线占据，形成错综复杂的“地下迷宫”。供水管线穿越此类区域时，面临的主要问题是空间狭小、管线权属复杂、交叉点众多。施工过程中极易误碰既有管线，引发停电、停气、断水甚至爆炸事故。特别是在老旧城区，原有管线资料缺失或不准确，增加了施工的不确定性。此时，施工不仅要考虑自身管线的安全，还需兼顾周边管线的保护，往往需要采用微扰动技术，并在施工前进行详细的管线探测与三维建模，制定精细化的避让或托换方案。

1.4 生态敏感区与水源保护区的环境约束

在穿越河流、湖泊、湿地及饮用水源保护区时，施工必须遵循最严格的环保标准。这类地段通常禁止大规模开挖，严禁泥浆外排，防止水体污染。河流穿越还涉及水上作业安全、通航安全及河床稳定性问题。水源保护区内的施工更需杜绝任何可能的污染源，确保水质绝对安全。这要求施工工艺必须实现“零排放”，如采用封闭式泥浆循环系统、使用环保型泥浆材

料,并严格控制施工周期,减少对水生生物和生态环境的干扰。^[3]

2 供水管线穿越特殊地段的关键施工技术与工艺优化

针对不同特殊地段,需因地制宜地选择最优穿越技术,并对工艺流程进行精细化优化。

2.1 水平定向钻(HDD)技术在软土与河流穿越中的应用

水平定向钻技术因其对地表干扰小、适应性强,成为穿越河流、软土及一般障碍的首选。在软土及河流穿越中,关键在于导向孔轨迹的控制与扩孔、回拖过程的泥浆管理。通过高精度导向系统,可精确控制钻孔轨迹,避免偏离设计路线。在扩孔阶段,需根据土质选择合适的扩孔器尺寸与转速,配合膨润土泥浆的配制,形成稳定的泥皮护壁,防止孔壁坍塌。对于长距离穿越,需分段扩孔以降低扭矩和拉力。回拖时,应控制速度,防止拉断管材。特别需要注意的是,在河流穿越中,需计算足够的覆盖深度,防止船只抛锚损伤管线,并采取措施防止泥浆泄漏污染水体。

2.2 顶管法在交通干线与密集管网区的精准施工

顶管法适用于穿越铁路、公路、建筑物及地下管网密集区,尤其是大口径、长距离的供水管线。现代顶管技术已发展为泥水平衡式、土压平衡式等多种模式。在软土及富水地层中,泥水平衡顶管机通过调节泥浆压力来平衡土仓压力,有效控制地表沉降。在穿越既有构筑物时,需采用高精度激光导向系统,实时纠偏,确保轴线误差控制在毫米级。针对长距离顶进产生的巨大摩擦力,可采用中继间技术分段接力顶进。同时,加强触变泥浆的减阻效果,优化注浆工艺,及时填充管节外侧空隙,防止地面沉降。对于穿越既有管线,可采用微型顶管或套管保护法,实现“微创”穿越。^[4]

2.3 盾构法在超大断面与极复杂地质中的优势应用

对于超大直径供水管线或地质条件极差(如高水压、强风化岩、破碎带)的特殊地段,盾构法具有无可比拟的优势。盾构机集挖掘、支护、衬砌于一体,能有效控制围岩变形,安全性高。在穿越河流或深层软土时,盾构机可通过调整刀盘扭矩、推进速度及出土量,维持土仓压力平衡,防止冒顶或超挖。在岩溶发育区,盾构机可配备超前地质钻机,提前探明溶洞并进行注浆填充。盾构法虽初期投资大,但成洞质量好、对环境影响极小,特别适合城市核心区及重要基础设施下方的穿越工程。

2.4 浅埋暗挖法与管幕法在狭窄空间的灵活应用

在空间受限、无法使用大型机械的狭窄街道或地下障碍物密集区,浅埋暗挖法(如CRD法、双侧壁导坑法)及管幕法展现出灵活性。通过分步开挖、临时支撑及二次衬砌,逐步成

型。管幕法则是在隧道轮廓外预先打入钢管形成帷幕,再在管内进行开挖,能有效隔离周围土体,防止坍塌。这种方法对周边建筑物影响小,但施工速度慢,对作业人员技术要求高。在穿越既有地铁隧道时,常采用管幕法进行加固,形成刚性保护壳,确保既有结构安全。^[5]

3 穿越过程中的风险控制与沉降治理技术

无论采用何种穿越技术,控制地表沉降、防止管线变形及突发事故都是核心任务。

3.1 全过程地表沉降预测与控制策略

建立基于数值模拟与现场实测的沉降预测模型,提前评估施工对周边的影响。在施工前,根据地质条件和施工方案,预测最大沉降值及沉降槽范围。施工中,实施“动态设计、信息化施工”,根据监测数据实时调整掘进参数(如出土量、推进速度、泥浆压力)。对于敏感目标,采取主动保护措施,如预注浆加固土体、设置隔离桩、降低顶进速度等。坚持“少量多次”注浆原则,及时填充空隙,控制沉降发展。

3.2 管线纠偏与姿态控制技术

在长距离穿越中,管线轴线容易发生偏移。利用高精度全站仪、陀螺仪及激光指向仪,实时监测管节姿态。一旦发现偏差,立即通过调整顶进方向、纠偏千斤顶组合或局部注浆进行修正。对于水平定向钻,通过调整钻头角度和泥浆流量来控制轨迹。对于顶管,采用“勤测勤纠”策略,将偏差控制在允许范围内,避免累积误差过大导致无法纠正。

3.3 注浆加固与堵漏止水技术

针对穿越过程中出现的空洞、裂缝或渗漏,采用化学注浆或水泥浆液进行加固堵漏。在软土区,采用双液注浆快速凝固,封堵涌水通道;在岩溶区,采用高压劈裂注浆填充溶洞。对于既有管线周围的加固,可采用袖阀管注浆技术,精准注入浆液,提高土体强度和抗渗性。同时,建立完善的防排水系统,及时排除积水,防止水土流失。

3.4 突发事件应急处置与救援机制

制定详尽的应急预案,涵盖涌水、塌方、管线破裂、设备故障等常见险情。组建专业的应急救援队伍,配备大功率抽水机、注浆车、备用电源等设备。定期开展应急演练,提高全员应急处置能力。建立与消防、医疗、市政等部门的联动机制,确保一旦发生事故,能够迅速响应、高效处置,将损失降到最低。

4 智能化监测与全生命周期管理体系构建

面对特殊地段的高风险性,必须引入智能化手段,构建全方位的质量安全管控体系。

4.1 基于物联网的智能监测预警平台

利用物联网技术,在施工现场布设位移计、倾角计、应力

计、水压计等传感器，实时采集地表沉降、管线变形、土体压力等数据。通过 5G 网络将数据传输至云端平台，利用大数据分析和人工智能算法，自动识别异常趋势，发出分级预警。建立可视化数字孪生模型，直观展示施工过程与风险状态，辅助决策者快速制定应对措施。

4.2 全生命周期质量追溯与信用评价

建立供水管线穿越施工的全生命周期质量档案，从勘察、设计、施工到运维，实现数据全程可追溯。利用区块链技术确保数据的真实性和不可篡改性。对参建单位进行信用评价，将施工质量、安全记录与招投标挂钩，实行优胜劣汰。推广标准化作业流程，规范施工工艺，减少人为失误。

4.3 绿色施工与环境保护措施

在穿越生态敏感区时，严格执行绿色施工标准。采用封闭式泥浆循环系统，实现泥浆零排放；使用低噪声、低振动设备，减少对周边环境的影响；制定生态修复方案，施工后及时恢复植被。加强环境监测，确保各项指标符合环保要求，实现工程建设与生态环境的和谐共生。

5 结语

供水管线穿越特殊地段施工是一项技术含量高、风险系数大、协调难度强的系统工程。随着城市建设的不断发展，特殊地段穿越的需求将日益增长，面临的挑战也将更加严峻。本文系统梳理了特殊地段的分类特征及其影响机理，深入探讨了水平定向钻、顶管、盾构等关键技术的工艺优化与风险控制措施，并提出了智能化监测与全生命周期管理的对策建议。

实践证明，只有通过科技创新驱动，构建“精准勘察+方案优选+智能监控+动态调控”的综合技术体系，并辅以科学的管理制度和完善的应急预案，才能有效克服特殊地段施工难题，确保供水管线的安全、高效与优质。未来，随着新材料、新能源、人工智能及数字孪生技术的进一步发展，供水管线穿越施工将向更加智能化、无人化、绿色化的方向迈进。我们应持续推动产学研用协同创新，完善相关标准规范，培养高素质复合型人才，打造一批经得起历史检验的精品工程、安全工程、绿色工程，为保障国家水安全、促进城市可持续发展贡献坚实力量。这不仅是对工程技术人员的挑战，更是对整个行业智慧与担当的考验。让我们携手并进，共同开创供水管线建设的美好未来。

参考文献：

- [1] 雒增强.市政供水管道水平定向钻施工关键技术[J].大众标准化,2026,(05):37-39.
- [2] 张巍.供水管线穿越煤矿采空区设计概述[J].内蒙古水利,2026,(01):39-41.
- [3] 熊仲明,张佳斌,陈轩,等.上下盘错动作用下穿越地裂缝综合管廊损伤分析[J].地下空间与工程学报,2025,21(06):2180-2191.
- [4] 赵李楠.长输管线非开挖水平定向钻施工泥浆性能控制技术研究[J].化工管理,2025,(24):157-160..
- [5] 钟国强,陈子涵,王思长.基于 ABAQUS 的管线下穿施工对高速公路安全性影响分析[J].价值工程,2025,44(21):109-112.