复杂地下管网工程中 PE 管材弯曲敷设管理研究

唐军军

上海电信工程有限公司 上海 200065

【摘　要】：为解决复杂地下管网环境空间受限、管线交错带来的传统直管敷设困难问题，本文聚焦具体工程案例，分析复杂地下环境特征与弯曲敷设需求，重点阐述 PE 管材优异的柔韧性和弯曲半径适应性，详细介绍应用中涉及的关键技术环节，包括弯曲段路由的优化规划与空间高效利用、精确的弯曲施工过程控制，以及与既有管网协调的敷设策略。应用实践表明，PE 管材的弯曲敷设能有效解决空间冲突，提升管网构建效率与协调性，为复杂地下空间的管道工程建设提供了实用技术方案。

【关键词】：PE 管材；弯曲敷设；复杂地下管网

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.072

1 引言

城市建设的快速发展对地下空间资源的需求日益增大，各类管线在地下空间纵横交错、密集分布，形成了高度复杂的管网系统，在此背景下新建管线工程的实施常面临严峻挑战，尤其是当施工区域空间局促、既有管线布局复杂多变时。传统的刚性管材由于弯曲性能有限，无法适应频繁转向或狭窄空间内的非直线敷设需求，往往需要进行大量的管件连接或开凿更宽裕的作业面，这显著增加了施工难度和成本，延长了工期，频繁的接口还带来了潜在的渗漏点或结构薄弱点风险，同时在老旧城区改造、小区内部配套以及需避开重要地下设施等特定场景中，对管道走向的灵活性和对既有管网的避让能力提出了更高要求。松江区泖港镇曙光村农民平移房通信配套项目即是一个典型实例，该项目需要在 154 户新建农房区域铺设通信管道及入户光纤，工程实施时小区内部道路尚未完全成形，地下各类管线的敷设已基本完成，导致可供通信管道使用的有效地下空间异常紧张且受到严格限制。更复杂的情况是部分农房预埋的入户管线因施工原因被掩埋或损坏，需要在极其有限的、已被多种管线占据的空间内，精准定位并修复或重新接入用户线路，如何在这种空间受限、管线交错的复杂地下环境中，高效、可靠地完成管道敷设，并确保与既有管网协调共存，成为项目成功实施的关键技术难题，也直接催生了在分支管道应用中寻求更灵活解决方案的需求。

2 项目概况及弯曲敷设需求分析

2.1 项目背景简述

松江区泖港镇曙光村农民平移房通信配套项目是保障新建 154 户农民平移房通信需求的核心基础设施工程，项目需在小区内部同步建设三级通信系统主干通信管道网络、光缆分纤箱节点系统、入户光纤预埋管网，项目区域处于在建居住区开发中期阶段，内部道路已完成路基压实（压实度≥93%）但尚未实施混凝土硬化层浇筑[1]。施工环境呈现高动态复杂性，多单位交叉作业导致地下管线预埋坐标频繁变更，后期农户装修阶段频繁发生预埋管线机械破坏事件。通信管道作为衔接市政主干网与用户终端的光信号传输通道，其敷设精度与结构稳定性直接决定光纤入户成功率及后期运维成本，关键矛盾点道路硬化进度滞后迫使通信管道在未受保护的路基上施工，而农户急于入住引发的装修潮导致管线破损率高达 17%。

2.2 复杂地下管网环境特征描述

空间高度受限小区内部道路设计宽度仅 4-6m，地下 0.5-1.2m 断面内已密集敷设四类市政管线，给水管 DN200 球墨铸铁管，埋深 0.9m，污水管 DN300 HDPE 双壁波纹管，埋深 1.1m，燃气管 De110 PE 管，埋深 1.0m，电力管Ø100 PVC-C 管，埋深 0.7m，通信管道需在剩余不足 0.8m×0.6m 的狭小立体空间内规划路由，其中巷道交叉口有效敷设断面更降至 0.5m×0.4m。隐蔽工程干扰建筑商预埋的入户通信管（De50 PVC 管）出现两类定位异常，施工偏差 32 处入户管水平偏移量超设计值，最大偏差 35cm，因未按图施工导致，填土掩埋 41 段入户管管口被回填土覆盖，位置信息缺失率达 26%，既有燃气管、雨水管等因竣工资料未及时更新，15 个关键节点存在空间坐标冲突风险[2]。动态施工叠加路基变形传导，道路硬化单位每日 6-8 台压路机作业，未固化路基在振动荷载下产生不均匀沉降，最大沉陷量 3cm，导致前期敷设的刚性管道接口脱开，装修破坏农户装修阶段在墙体开槽钻孔时，9 处预埋通信管被电锤击穿，管道破损点均位于距建筑立面 0.5m 范围内。

作者简介：唐军军（1976.4.10），汉族，男，上海人，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：市政工程。

环境侵蚀威胁施工期跨越汛期（6-8 月）引发两类风险，管沟积水单日最大降雨量 125mm 时，地下水位上升至距地表 0.8m，管沟积水深度达 40cm，水力冲刷饱和软土，黏土层含水率＞35%承载力下降至 80kPa，传统水泥管接口在渗流冲刷下出现 5 处渗漏点，空间冲突量化分析如表 1 所示。

表 1 空间冲突量化分析

冲突类型	发生频次	影响范围
管网水平间距不足	28 处	最小间距 0.15m
立体交叉重叠	9 处	高差＜0.2m
预埋管位置丢失	41 段	占总量 26%

2.3 弯曲敷设面临的核心问题与需求

在空间约束与动态干扰叠加的复杂环境中，传统直管敷设模式暴露三大核心问题，空间避让困难传统 PVC 或水泥管需通过管件直角转弯，在密集管网中难以避开既有管线（如燃气、排水管），强行开槽扩宽易引发次生破坏，狭窄巷道内无法满足直管最小敷设间距要求，导致管线间距不足引发后期维护冲突。路径适应性不足建筑商预埋入户管位置偏移时，刚性管材无法实现微小角度转向精准对接，入户段管道路由需绕越房屋基础或地下障碍物，直管+弯头组合导致接口增多，漏水风险倍增。动态协调失效道路硬化施工的机械振动易使刚性管接口松动，而频繁的路面开挖修复将破坏管道整体性，装修阶段入户管损坏后，传统管材无法在已封堵墙体内实施非破坏性修复[3]。由此产生的弯曲敷设核心需求，连续柔性转向能力要求管材可沿曲线路径连续弯曲敷设，规避地下障碍物而不依赖接头，微空间适应能力在≤500mm 狭窄断面内实现小半径弯曲（弯曲半径≤20 倍管径），解决入户段“最后一米”对接难题，抗动态形变能力承受路基沉降、机械振动及水力冲击时保持结构完整，避免接口失效，施工纠偏能力支持非开挖状态下局部管段二次弯曲调整，应对预埋管位置偏差等突发状况。

3 PE 管材弯曲敷设技术在项目中的具体应用

3.1 PE 管材弯曲性能的适应性优势

PE（聚乙烯）管材在曙光村项目中成功应对复杂地下环境挑战，其核心优势体现在三方面。高柔韧性与弯曲半径适应性，冷弯施工高效性 PE 管材最小冷弯半径仅需 20 倍管径 DN110 管可实现＞2m 弯曲半径，无需弯头配件即可实现连续曲线敷设，在巷道交叉口等受限区域，单次弯曲角度可达 15°（DN75 管实测值），满足 90%避障需求，狭小空间适配能力针对入户段断面宽≤500mm 的极端条件，成功实施 S 形双曲率弯曲，水平曲率半径 R=1.5m，垂直曲率半径 R=2m，精准补偿建筑商预埋入户管的 30cm 水平偏移[4]。动态形变恢复与抗冲击能力弹性抗压性能，道路施工期平均每日承受压路机 6 次碾压（荷载 16t），管体最大凹陷量 8mm，低于 PVC 管 25mm，卸载后 24 小时内恢复至原始曲率（残余变形率＜3%），水力环境稳定性汛期地下水位上升至距地表 0.8m 时，PE 管热熔接口在 0.15MPa 浮力作用下未出现渗漏，而同期敷设的 PVC 管接口渗漏率达 5 处/公里。损伤可控的延展修复能力非开挖修复效率，对装修破坏的 9 处入户管（电锤击穿孔径≤20mm），采用截断置换工艺：切除受损段后，直接热熔连接新管，加热温度 210±5℃，单点修复耗时仅 35 分钟，形变协调优势修复段利用 PE 材料 12%的断裂伸长率，自然吸收房屋基础沉降差异，最大沉降差 2cm，避免二次断裂。性能量化对比如表 2 所示。在施工启动阶段，项目团队建立了“入户段精细化敷设专项策划表”，对路径偏移风险、预埋定位错误等进行前期排查，并组织多轮交底会议，确保作业班组在资源、人手、应急预案上提前到位，提升施工组织管理效率。

表 2 性能量化对比

指标	PE 管材	传统 PVC 管
机械碾压残余变形率	＜3%	≥15%
接口水力渗漏点	0 处/1.8km	5 处/1.8km
单点修复耗时	35 分钟	240 分钟
弯曲段通棒合格率	100%	82%

3.2 PE 管材应用的关键施工技术要点

3.2.1 弯曲段路由规划与空间利用

针对地下管网交织环境，实施三维协同规划，立体避障路由设计采用电磁探测与人工探孔结合，精确定位既有燃气管（埋深 1.2m）、排水管（埋深 0.9m）走向，在垂直空间实施分层敷设通信 PE 管规划于燃气管上方 0.3m、排水管下方 0.4m 的夹层区（埋深 0.8－1.0m），水平间距≥0.5m[5]。动态路径优化机制对建筑商掩埋的入户管，依据房屋基础图建立坐标模型，在弯曲路由中预设±25cm 纠偏裕量，利用 PE 管连续弯曲特性，在巷道转角处设计渐近线型平滑过渡（曲率半径 R=3m），替代传统 90° 弯头占用空间。在项目推进前期，制定了地下管线冲突预判机制，基于前置探测与分层规划结果，项目组对全线划分 8 类施工优先级段落，联合业主方实施分区调度制度，最大限度减少交叉作业冲突与资源等待时间。

3.2.2 弯曲段施工控制

核心控制弯曲精度与结构稳定性，冷弯定型工艺环境温度＞10℃时采用自然冷弯 DN50－DN75 管以 3m 为单元分段施

压，弯曲速率≤5°/min，辅以曲率规实时监测（偏差≤5%），低温环境启用热风枪辅助弯曲，加热温度≤110℃避免材料晶格损伤。施工过程中建立“冷弯质量控制流程”，将温度监测、曲率检测、分段施压等关键节点嵌入技术流程卡控表中，配合专岗复检制度，实现工艺稳定性闭环管理。沟槽基底强化在软土路段铺设 100mm 级配砂石垫层，压实度≥90%；弯曲段下方预埋 C15 混凝土基座（宽 300mm×高 150mm），抑制水力冲刷导致的管体位移[6]。覆土协同防护分层回填细砂至管顶 200mm，人工夯实避免机械损伤；弯曲段外侧加装 PE 护套（厚度 2mm），抵抗路基振动应力。同时制定“施工期极端天气应急响应预案”，针对汛期积水、软土下沉等外部风险，提前布设抽排系统与沉降监测点，配合责任划分明确的风险处置机制，在雨前 24 小时完成关键段封闭保护，显著降低了施工中断与返工风险。针对 PE 管冷弯、非开挖修复等特殊工艺，施工前组织专项培训与技术交底 3 轮次，编制《PE 通信管敷设操作指引》并形成视频化交底材料，覆盖所有施工班组，确保关键工序“人、机、料、法、环”各要素达成标准化作业要求。

3.2.3 与既有管网的协调敷设策略

时空错峰施工与道路硬化单位签订协同计划：通信管弯曲段敷设完成 48h 内禁止重型机械通行，预留管土结构稳定期，在燃气管道压力测试阶段暂停相邻区域开挖，采用导向钻微扰动穿越。共享运维通道将 PE 管弯曲段与给水管并行敷设（间距 0.6m），共用检修手孔（1.2m×0.8m），减少地面井盖密度 50%，智能标定与追溯弯曲段两端埋设 RFID 电子标识器（定位精度±10cm），关联 BIM 模型坐标，规避后期装修钻孔破坏。技术成效项目共敷设 PE 管弯曲段 1.8km，减少管件接口 326 个，工期缩短 15 天；验收检测显示弯曲段通棒率 100%，汛期零渗漏记录。此外，为确保施工过程高效推进，项目同步建立了通信工程协调管理机制。结合 BIM 模型每日更新的地下空间动态信息，施工单位编制“弯曲段作业时间窗口表”，与燃气、电力等专业单位实行错峰施工管控，减少作业冲突。施工协调组设立专人每日会签施工区域图纸，对施工路径变更、接口冲突等技术问题进行组织响应，确保“技术路径—施工窗口—资源配置”三者统一，有效提升了现场执行力与调度效率。此外，基于精确空间坐标的标识编码系统，施工期内完成了全线路 RFID 标识绑定与入档，结合 BIM 平台数据模型，为后期维护阶段实现快速定位、精准检修、低干扰作业提供了信息化基础，有效延伸了施工端的管理价值链条至全生命周期维度。

3.3 施工组织与空间协调管理

在本项目复杂地下空间条件下，技术路径的高效实施依赖于科学的组织协调机制。项目团队基于空间冲突分布图构建了作业优先级模型，通过 PDCA 管理循环对关键区段进行施工进度控制，动态评估施工风险点。现场设立施工日志系统，记录每日施工情况与问题处理措施，并将各施工点位与 BIM 模型绑定，实现精准时空管控。该组织机制确保了 PE 管柔性敷设技术在实际推进过程中不因外部变量而产生反复或返工，保障整体施工质量和效率。

4 结论

复杂地下管网环境中的空间约束、既有管线冲突及动态施工干扰，对传统管道敷设方式构成严峻挑战，曙光村通信配套工程实践表明 PE 管材凭借其优异的柔韧性、小弯曲半径适应能力及抗形变特性，成为解决此类难题的有效技术路径。通过三维路由规划实现立体避障，冷弯工艺控制保障弯曲段结构稳定性，时空错峰与共享通道策略促进多系统协调，PE 管弯曲敷设技术显著降低了管件接口数量，提升了管网空间利用效率与施工容错率。该技术的成功应用验证了其在规避地下障碍、适应路径偏差及抵抗动态荷载方面的综合优势，为密集型地下空间的高效管道建设提供了可复用的工程解决方案，对提升城市地下基础设施建设的科学性与经济性具有实践意义。同时，本项目所建立的基于 BIM 与交叉作业管控机制的现场协调管理体系，也为类似复杂条件下的工程管理提供了可复制的组织经验。

参考文献：

[1] 杨晓军,李佳,杨永崇,等.复杂城市地下综合管廊控制测量技术研究[J].测绘技术装备,2024,26(04):47-51.

[2] 张雪鑫.针对地下管廊复杂环境的信道仿真计算[D].北京邮电大学,2023.

[3] 黎思成,李原,靳金平,等.大型地下管沟复杂节点结构地震响应规律[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):926-933.

[4] 朱丹.浅析 PE 管材在自来水工程上的运用特点[J].城市建设理论研究(电子版),2017,(22):172-173.

[5] 雨日.泥浓式推盾机在地下管网建设中的新应用[J].今日工程机械,2016,(04):60-61.

[6] 刘志伟.大口径 PE 管材在输水工程中的应用[J].科技风,2011,(21):129.