城市地下综合管廊施工方法比选及沉降控制研究

沈应鹏

宁夏晨乾建设发展有限公司　宁夏　银川　750000

摘　要：城市地下综合管廊是保障城市生命线安全运行的重要基础设施，其施工方法选择与沉降控制直接关系工程安全与周边环境稳定。本文系统梳理了明挖现浇法、明挖预制拼装法、浅埋暗挖法、顶管法和盾构法五种主要施工方法的技术特点与适用条件，从地质适应性、施工效率、环境影响、经济性和沉降控制效果五个维度进行综合比选，提出方法选择应遵循“地质适配、环境优先、经济合理”的原则。在此基础上，从地层加固、支护参数优化、开挖工艺控制和信息化监测四个方面构建了沉降控制技术体系，重点分析了注浆加固、冻结法、超前支护和分区分步开挖等关键措施的适用机理。研究表明，沉降控制应从被动监测转向主动调控，建立施工参数与地表变形的动态响应关系，实现信息化施工与风险预警。本文可为城市综合管廊工程的施工方案决策和沉降控制设计提供理论参考。

关键词：城市地下综合管廊；施工方法比选；沉降控制；地层加固

引言

随着我国城镇化进程持续推进，城市地下空间开发利用规模不断扩大，综合管廊作为集约化敷设电力、通信、燃气、给排水等市政管线的核心载体，已在各大城市加速建设。然而，综合管廊多位于城市主干道下方，沿线建（构）筑物密集、地下管线错综复杂，施工过程中不可避免地引起地层扰动，导致地表沉降，严重时可能危及邻近建筑和既有管线的安全。因此，科学选择施工方法并有效控制沉降，成为综合管廊建设亟待解决的关键问题。当前，关于管廊施工方法的研究多集中于单一工法的技术优化，缺乏多工法系统比选的研究框架；沉降控制方面则偏重监测数据描述，对控制机理与主动调控策略的探讨尚不充分。本文旨在建立多维度施工方法比选体系，并构建“预加固—精施工—强监测”的沉降控制技术框架，为工程实践提供参考。

1 城市地下综合管廊主要施工方法及特点

1.1 明挖现浇法

明挖现浇法是最传统的管廊施工方法，其工序为：基坑围护 → 土方开挖 → 垫层浇筑 → 钢筋绑扎 → 模板安装 → 混凝土浇筑 → 养护 → 拆模 → 回填。基坑围护结构常采用钻孔灌注桩加止水帷幕，桩径一般为 0.8~1.2m，桩间距 1.2~1.6m，止水帷幕多采用三轴搅拌桩，水泥掺量通常为 15%~20%。对于深度超过 10m 的基坑，需设置内支撑体系，支撑间距一般为 3~6m，并施加预应力以控制围护结构变形。混凝土浇筑采用 C35~C40 防水混凝土，抗渗等级不低于 P8，变形缝处设置橡胶止水带和遇水膨胀止水条双重防水。该方法技术成熟、结构整体性好、防水性能可靠，适用于场地开阔、交通疏解条件较好的路段[1]。其不足在于施工周期长、对地面交通干扰大、基坑暴露时间长，在软土地区易引发较大地表沉降，基坑开挖引起的坑底隆起和围护结构侧移是沉降的主要来源。

1.2 明挖预制拼装法

预制拼装法将管廊节段在工厂预制，运至现场后吊装拼接。预制节段长度一般为 2~4m，采用 C40 以上高强度混凝土，接头形式包括承插式、企口式和预应力连接式。承插式接头施工便捷，但对止水要求高；预应力连接式整体性好，但施工工序复杂。接头防水通常采用多道设防：一道为压缩式橡胶密封圈，二道为遇水膨胀止水条，三道为嵌缝密封膏。拼装时需控制相邻节段的高差和错台，一般高差不超过 5mm，错台不超过 3mm。相比现浇法，其显著优势在于：施工速度快、现场湿作业少、质量易于控制、对交通影响时间短。工厂化生产还可减少现场噪声和扬尘污染，符合绿色施工理念。但该方法对运输和吊装设备要求高，接头防水处理是技术难点，且预制节段标准化程度高，难以适应平面曲线变化较大的线路。

1.3 浅埋暗挖法

浅埋暗挖法基于新奥法原理，采用“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的施工原则。超前小导管一般采用 Φ42~Φ50mm 钢管，长度 3~5m，环向间距 0.3~0.4m，外插角 10°~15°，注浆材料常用水

泥-水玻璃双液浆，凝胶时间控制在 30~60s。开挖进尺在软弱地层中控制在 0.5~1.0m，初期支护采用钢拱架加喷射混凝土，钢拱架间距 0.5~0.75m，喷射混凝土厚度 250~350mm。二次衬砌采用模筑钢筋混凝土，厚度 300~500mm。该方法适用于不宜明挖的城市核心区，对地面交通影响小，无需大面积拆迁，特别适合穿越繁华商业区或历史保护地段。但施工工序复杂、工期较长，且对地层条件敏感，在富水软弱地层中需辅以超前注浆或冻结加固。施工过程中的地层沉降控制难度较大，需要精细化的监测和反馈机制。

1.4 顶管法

顶管法通过工作井将预制管节逐节顶入地层，适用于穿越道路、铁路、河流等障碍物的区段。管节一般为钢筋混凝土管，直径可根据管廊断面确定，接口采用 F 型钢承口或双插口形式，设置橡胶密封圈止水。顶进设备包括液压千斤顶和顶铁，顶力计算需考虑管壁摩阻力和迎面阻力，摩阻力可通过触变泥浆套减阻，减阻效果可达 30%~50%。中继间设置间距一般为 80~150m，具体取决于顶力计算结果。顶进纠偏采用激光导向系统，偏差超过 20mm 时启动纠偏油缸[2]。其优势在于无需大面积开挖、对地面干扰小，施工速度快，综合造价相对较低。但管廊断面形式受限，长距离顶进时方向控制困难，且顶力随距离增加而显著增大。在曲线顶进时，管节接头受力复杂，施工精度要求高。

1.5 盾构法

盾构法采用盾构机掘进并同步拼装管片衬砌，适用于长距离、大断面管廊建设。盾构机类型需根据地层条件选择：软土地层宜采用土压平衡盾构或泥水盾构，岩层宜采用硬岩掘进机。土压平衡盾构通过控制土仓压力和螺旋输送机转速维持开挖面稳定，土仓压力一般设定为静止土压力的 1.1~1.3 倍。管片宽度一般为 1.2~2.0m，厚度 300~500mm，采用 C50 以上混凝土，接头采用弯螺栓连接。同步注浆采用水泥砂浆，注浆量一般为理论空隙的 150%~200%，注浆压力控制在 0.2~0.4MPa。其自动化程度高、施工速度快、对地层扰动相对可控，且能适应多种地层条件。但设备投入大、始发与接收井施工复杂，且管片接头防水和曲线段施工难度较大。盾构法在经济性上仅适用于长距离区间，短距离施工时设备摊销成本过高。

2 施工方法综合比选

2.1 比选指标体系

本文从五个维度建立比选指标体系：地质适应性、施工效率、环境影响、经济性和沉降控制效果。各维度权重可根据具体工程条件调整。地质适应性考察工法对不同土层和地下水条件的适用能力；施工效率包括掘进速度、工序衔接和工期可控性；环境影响涵盖地面交通干扰、噪声振动和地层扰动范围；经济性综合考虑直接造价和设备摊销；沉降控制效果评价工法对地表变形的控制能力。为进一步量化比选，可采用层次分析法确定各指标权重，再结合模糊综合评价对各工法进行打分排序。地质适应性可细分为土层类型、地下水条件和地层均匀性三个子指标；环境影响可细分为交通干扰、噪声振动和地层扰动三个子指标。

2.2 比选分析

明挖现浇法地质适应性最强，几乎适用于各类地层，但环境影响最大、施工效率最低。预制拼装法在施工效率和质量控制方面优势明显，但地质适应性和曲线适应能力较弱。浅埋暗挖法环境影响小，但施工效率低、地质适应性中等。顶管法在穿越障碍物时优势突出，但断面适应性和长距离控制能力有限。盾构法综合效率最高，但经济性最差，适用于长距离大断面工程[3]。在实际工程中，可根据线路条件分段采用不同工法，实现优势互补。例如，在开阔路段采用明挖预制拼装法，在穿越建筑物区段采用浅埋暗挖法或顶管法，在长距离区间采用盾构法。

2.3 比选原则

综合比选应遵循：①地质适配原则，根据土层性质、地下水条件选择工法；②环境优先原则，在建筑物密集区优先选择对地层扰动小的工法；③经济合理原则，在满足安全和环境要求的前提下控制造价；④工期匹配原则，根据项目总体进度安排选择施工效率适配的工法。四项原则需统筹权衡，避免单一指标主导决策。在实际操作中，可建立多目标决策模型，将定性分析与定量评价相结合，提高比选的科学性和可操作性。

3 沉降控制技术体系

3.1 沉降产生机理

管廊施工引起地表沉降的机理主要包括：开挖卸荷导致地层应力重分布、地下水疏降引起固结沉降、支护结构变形导致地层位移、以及施工扰动引起的土体结构性破坏。不同工法的沉降机理各有侧重：明挖法以基坑变形和降水固结为主，暗挖法以地层损失和支护变形为主。地层损失率是暗挖法沉降控制的核心指标，盾构法地层损失率一般控制在 0.5%~1.5%，浅埋暗挖法一般控制在 1%~2%。而基坑围护结构变形则是明挖法沉降控制

的关键，围护结构最大侧移一般控制在 0.1%~0.3%H（H 为基坑深度）。此外，沉降随时间的发展规律也因工法而异，明挖法沉降主要集中在开挖和降水阶段，暗挖法沉降则贯穿整个施工过程。

3.2 地层预加固技术

（1）注浆加固：砂性土用渗透注浆，压力 0.3~0.8MPa；黏性土用劈裂注浆，压力 1.0~2.0MPa。浆液采用水泥浆或水泥-水玻璃双液浆。孔间距 1.0~1.5m，梅花形布置，加固范围为开挖轮廓线外 2~3m。要求加固后波速提高 20%以上，常与超前支护配合使用。（2）冻结法：适用于富水软弱地层，冻结孔间距 0.8~1.2m，冻结壁厚 1.5~3.0m，平均温度-8~-12℃。加固效果好、无污染，但成本高、解冻后可能融沉，融沉量控制在 10~30mm。（3）超前支护：管棚适用于较大断面，钢管 Φ89~Φ159mm，长 10~30m，环向间距 0.3~0.5m；小导管适用于中小断面，长 3~5m；水平旋喷桩适用于软弱地层，桩径 0.5~0.8m，桩长 10~15m。设计应结合地层条件和开挖工法确定支护参数。

3.3 施工过程沉降控制

（1）分区分步开挖：将大断面划分为若干小断面，分步开挖、及时支护，减小单次开挖引起的地层扰动范围。明挖基坑应分层开挖、随挖随撑，每层开挖深度一般不超过 3m；暗挖隧道应采用台阶法或 CD 法、CRD 法，台阶长度一般控制在 3~5m，CD 法各分部开挖面积一般不超过 30m²。分步开挖的核心在于控制单次开挖面积和暴露时间，通过时空效应减小地层变形[4]。（2）支护参数优化：根据数值分析和现场监测反馈，动态调整支护刚度、支撑间距和预应力大小，实现支护结构与地层变形的协调控制。支护参数优化应兼顾安全性和经济性，避免过度支护造成浪费。在实际施工中，可通过反分析确定地层参数，进而优化支护设计。例如，根据现场监测的围护结构侧移数据，反算土体弹性模量和泊松比，再以此修正数值模型，预测后续开挖的变形趋势。（3）开挖工艺控制：控制开挖进尺、减少超挖、及时施作初期支护和二次衬砌，缩短地层暴露时间。开挖进尺应根据地层条件和支护能力合理确定，一般软弱地层中宜控制在 0.5~1.0m。超挖量应控制在设计允许范围内，一般不超过 50mm。此外，应合理安排施工时序，避免多工序同时作业造成地层扰动叠加。

3.4 信息化监测与动态调控

建立“监测—反馈—调控”闭环系统：布设地表沉降、深层土体位移、支护结构变形和地下水位等监测点。地表沉降监测点间距一般为 10~20m，深层土体位移采用测斜管，测斜管深度应超过预计变形影响深度。设定分级预警值，一般分为黄色、橙色和红色三级，对应沉降量分别为控制值的 60%、80%和 100%。根据监测数据反分析地层参数，动态调整施工参数。关键技术包括：自动化监测技术、无线传输与云平台管理、以及基于机器学习的沉降预测模型。信息化监测的核心在于实现数据的实时采集、快速分析和及时反馈，使沉降控制从被动应对转向主动调控。工程实践中，应将监测结果与施工进度关联，实现动态设计和信息化施工。

结束语

城市地下综合管廊施工方法比选应综合考虑地质条件、环境约束、工期要求和经济性，建立多维度评价体系。沉降控制应从被动监测转向主动调控，构建“预加固—精施工—强监测”的全过程技术体系。施工方法选择与沉降控制密切相关，合理的工法选择是有效控制沉降的前提，而精细的沉降控制又能拓展工法的适用范围。未来研究应重点关注：智能化施工装备与沉降控制技术的融合、基于数字孪生的施工过程仿真与预警、以及绿色低碳施工工艺的推广应用。通过技术创新与管理优化，实现综合管廊建设的安全、高效与环境友好。

参考文献

[1] 王卫东, 徐中华. 城市地下综合管廊建设关键技术研究进展 [J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊 1):1-12.

[2] 刘松玉, 蔡国军. 城市地下空间开发中的岩土工程问题与挑战 [J]. 土木工程学报,2022,55(3):1-14.

[3] 张顶立, 房倩. 城市地下工程建设安全风险控制研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(6):1081-1098.

[4] 陈湘生, 李克非. 城市综合管廊预制拼装技术发展与展望 [J]. 隧道建设,2022,42(1):1-10.