

城市地下综合管廊市政结构优化设计与空间利用研究

刘宇

中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300381

摘要: 随着我国城镇化进程的不断加速,地下综合管廊作为集约化、智能化的市政基础设施,其优化设计与空间利用成为提升城市韧性和可持续发展能力的关键。本文从结构专业视角出发,结合技术创新,系统探讨综合管廊的优化设计方法、空间高效利用策略及市政结构协同机制,为城市地下空间开发提供理论支撑与实践参考。

关键词: 城市;地下综合管廊;市政结构;优化设计;空间利用

引言

城市地下综合管廊通过集中敷设电力、通信、给排水、燃气等管线,解决了传统直埋式管线导致的“马路拉链”和“空中蜘蛛网”问题,显著提升了城市空间利用效率与防灾能力。目前我国已建成的城市地下综合管廊已达百万平方米以上,并呈高速增长态势。然而,其复杂的地下结构体系对设计合理性、施工安全性及运维便捷性提出了更高要求。本文聚焦结构优化与空间利用两大核心方向,探索综合管廊的高效建设路径。

一、城市地下综合管廊结构专业优化设计的关键技术

综合管廊结构设计使用年限为100年,结构安全等级为一级,重要性系数 $\gamma_0=1.1$,抗震设防类别为乙类,防水等级为二级。通过以下措施实现优化:

(一) 耐久性设计

1. 材料选择:管廊结构设计,尤其在特殊节点部位,会遇到结构重要受力构件截面受到限制的情况,既要保证结构自身的安全可靠度,还要满足功能上的使用要求,以结构缝划分的独立单元内,可采用高性能混凝土及高强度钢筋,同时满足上述要求。

2. 变形缝设置:根据规范地下管廊变形缝的最大间距为30m,变形缝是混凝土浇筑质量的薄弱环节,易形成渗漏点,修复难度大;优化变形缝的设置间距,减少变形缝的设置数量,可以直接改善上述问题;采用低收缩的混凝土材料,或者在混凝土中掺入有补偿收缩功能的外加剂、抗裂纤维等,可以做为优化变形缝设置间距的有效措施。

3. 防水体系:结构自防水(混凝土采用P8及以上抗渗等级)+外防水层(如高分子卷材);同时将变形缝范

围作为防水设计的重点部位,变形缝内设中埋式橡胶止水带,外部加强防水措施(外贴式止水带或防水涂层)作为二道防线。

(二) 抗震与延性设计

1. 抗震性能提升:基于有限元分析优化节点构造,管廊交叉口等复杂节点,提高抗震等级或加强抗震构造措施;对于关键构件以及承受外部荷载较大的结构支撑构件及相关支撑体系,加强约束箍筋的直径与间距,提升结构延性,确保结构在罕遇地震下的功能可恢复性;保障地下综合管廊作为城市基础设施核心载体的安全可靠度,提升城市韧性。

2. 隔震技术:在高烈度区,增设减震支座或耗能构件,可在管廊与土层间设置橡胶隔震支座,降低地震波传递。确保结构在罕遇地震下的功能可恢复性。

3. 抗震缝设计:抗震缝、温度缝、沉降缝三缝合一,统一合理规划布置,结构缝处,要考虑地震位移量,缝内填充柔性材料,材料应同时满足耐久性相关的要求。

(三) 荷载与受力分析优化

1. 动态荷载适应性:考虑地下水位变化、周边施工扰动及交通荷载影响,在常规静力计算的基础上,模拟动态荷载作用,分析优化设计。

2. 利用有限元软件(如ANSYS、ABAQUS)模拟非对称荷载或局部沉陷的影响。在人员出入口、管廊交叉口等重要节点,适当进行防连续倒塌设计,可以采取增加冗余约束、加强人员通道关键构件的承载力等措施。

(四) 标准段管廊断面设计

1. 矩形断面:空间利用率高,适用于常规埋置深度、管线种类多的场景,空间利用率高,可以根据需要布置单舱或者多舱,单层或者多层形式,舱室组合自由度高;但结构构件截面尺寸受外部荷载、计算跨度、组合形式

等因素影响敏感，从而增加工程成本。

2.圆形或马蹄形断面：结合结构受力特征，适用于深埋较深或高水压区域，可充分发挥混凝土的抗压性能，受力均匀，还可以根据土质、埋深等具体情况结合盾构法施工。但是廊内管线布置存在一定局限性，可在管线种类单一或者作为综合性管廊的支管段选用。

3.管廊断面形式的选择，需结合施工形式，兼顾经济性与空间利用率。

（五）施工工法优化

传统现浇工艺，需经过支模、绑钢筋、浇筑及养护等一系列环节，施工周期长，且对周边环境有一定程度的影响；可根据工程所在地区，综合考虑运输与吊装成本，管廊标准段采用预制管廊；预制管廊标准化程度高，无需传统现浇工艺环节，工期可缩短30%~50%，同时减少对工地周边环境的影响。

对于埋深较深且有穿越廊段的部位采用非开挖技术，用于穿越既有道路或河流，管廊断面相对较大，可采用盾构法施工；小直径管廊可采用顶管法施工。

（六）复杂节点结构设计优化

城市地下综合管廊节点设计是其中最核心的一环，管廊节点一般指功能性节点，如人员进出口、投料口、通风口等，以及交叉口、接入口等布置性节点。其复杂性主要表现在受力体系改变，荷载分布差异性大，管线交汇支撑构件设置受限以及功能整合等方面。节点设计不仅要考虑管道的物理连通性，而且要预留足够的安全作业空间，以保证施工、后期维护人员安全方便。对管廊节点进行优化设计，是提升管廊整体运行效率与可靠性的关键。

综合管廊复杂节点的结构优化需突破传统设计模式，通过精细化分析、差异化施工与新型构造技术的协同，解决不均匀沉降、内力畸变等核心问题。计算过程中，采用精细化有限元分析技术，分割单元尺寸 $\leq 0.5\text{m}$ ，确保应力梯度捕捉精度；土体采用弹塑性模型，考虑不同土层变形模量的差异；针对交叉节点，设置全约束边界，模拟相邻结构刚度耦合效应。分析过程中，采用弹性地基梁模型与Winkler地基模型，进行差异性数据比对。依据计算分析结果，针对荷载差异性，采取差异化地基处理方案。高荷载区适当超挖换填素砼等刚性材料，过渡区采用级配碎石，控制压实系数，低荷载区直接坐于天然地基。如变形差异较大，还可以在节点四周设结构缝，复杂节点作为独立单元采用复合地基或刚性桩基础。通过精细化有限元模型指导差异化地基处理，结合变形缝与刚度增强技术的协同创新，可系统解决复杂节点的沉

降与内力难题。

二、城市地下综合管廊空间高效利用策略

（一）现状与问题分析

1.空间规划与设计问题

1.1规划碎片化：部分城市管廊建设缺乏系统性规划，新老城区衔接不足，导致空间利用效率低下。

1.2断面设计不合理：传统管廊断面多采用单一结构，未能根据管线类型和未来扩容需求灵活调整，造成空间浪费。

1.3立体开发不足：多数管廊仅布局于浅层地下空间，未与深层地下设施（如地铁、人防工程）协同开发。

2.技术与施工限制

2.1施工技术单一：国内主要依赖明挖法，对地面交通和环境影响大，制约了复杂地形下的空间开发。

2.2智能化水平低：管廊监测系统覆盖率不足，难以实时优化空间分配和应急管理。

3.管理与政策瓶颈

3.1权责划分不清：多部门管理导致协调困难，影响空间资源的整合利用。

3.2标准体系缺失：缺乏统一的建设与运营标准，导致重复建设和资源浪费。

（二）分层布局与功能集成

在具体实施过程中，遵循竖向分层规划、多功能舱室设计的原则对管道布局及空间利用进行优化，这一过程中将重力流管线（如污水管）置于下层，电力、通信等非重力管线置于上层，减少交叉干扰；并按功能要求及使用频率划分独立舱室。如为保证安全，可将电力、通讯管道安排在同个舱室内，给排水、燃气管道应分别设置独立的舱室。各类型管道应严格按照国家有关规范要求布置，保证安全距离及检修通道宽度。例如独立设置燃气舱、热力舱，其与其它管道之间的安全距离不能低于规范所规定的最低要求。并预留20%~30%的扩容空间，适应未来管线增容需求。

而且为提高空间利用率，在管廊断面设计时，应根据所含管线类型和规模、施工方式和预留空间等因素来确定断面型式。如地下管线较多时，可采用矩形截面形式，使空间利用率达到最大。同时对管线的高度、宽度进行合理控制，保证管廊内净高及检修通道宽度满足规范要求。如管廊内净高不应小于2.4 m，当双侧支撑或管线双侧时，检修通道的净宽不应小于1.0 m。

（三）规划设计阶段BIM技术的应用

1.三维可视化协同设计：在三维可视化协同设计方

面,利用BIM技术,对管廊进行精确的三维建模。借助该模型,设计者可对管廊的空间布局进行全方位、直观的观察,明晰各类管线走向及其与周边建筑的空间关系。以电力、给排水、通信等多个专业设计为例,相应的设计人员可利用相同的BIM模型平台,通过碰撞检测功能模块实时检测各自设计的管线。此功能可准确识别管线间距不够、位置重叠等极小空间冲突,解决传统二维平面图设计因视角限制带来的设计缺陷,提高设计精度和完整性。

2.参数化设计与优化:在参数化设计和优化方面,BIM具有参数化建模功能,使得设计者可以通过调整关键参数,实现管廊断面尺寸、坡度、管径等参数的快速调整。在调试过程中,借助专业模拟分析软件,可模拟计算管廊的承载能力、通风效果和人员疏散情况。例如,利用有限元软件对不同截面尺寸的管廊进行数值模拟,根据计算结果对管廊进行优化设计,以保证在满足结构安全性的同时,降低工程造价。利用计算流体力学软件模拟通风系统,通过调节通风孔的位置、数量和管径,达到较好的通风效果和节能效果;结合疏散仿真软件,对管廊内人员疏散路径进行分析,优化管廊内部布局,实现应急疏散中人员的安全快速疏散,实现管廊功能和经济性的最佳平衡。

(四) 优化空间规划与设计

1.分层开发与立体布局:在分层开发过程中,可与城市地质条件相结合。首先对该地区进行详细的地质调查,得到该地区的土质、岩体硬度和地下水水位等资料。进而构建“干线-支线-电缆管廊”多级网络。干线管廊是城市地下管线的大动脉,一般埋在道路中心以下,深度一般为6-10 m。由于它承担着长距离、大规模的管道运输任务,对稳定和安全的要求很高,深部埋地可以减少地面交通和其他因素的干扰。支线管廊主要承担区域配建,为周边建筑和街区提供服务,其可以设置在靠近建筑的地方,深度大约3-6米,截面尺寸根据服务区管线的要求确定,一般2-3米,宽2-4米,通过分路连接主管廊,达到精确配管的目的。缆线管廊集中在人行道的浅层处,埋深在1-3米左右,主要用来安置通讯和有线电视等电缆。这一布局可实现地下浅层和深层空间的协同利用,提高空间利用率。

2.地下空间协同开发:在规划阶段将地铁、商业综合体等设施纳入综合管廊的设计中。如对地铁站点周边的管廊走向和接入方式进行合理的规划,对管廊与地铁结构进行精确的空间分析,确定5-10 m的安全距离,以避免施工和后期运营之间的相互影响。同时将管廊纳入

地下商业体发展的整体设计中,在充分利用地下商业体内部空间的基础上,合理设置地下管廊检修口和通风口,使之与商业空间布局和谐统一,提高其综合利用价值。

(五) 技术创新与智能化应用

1.非开挖技术推广:应用盾构法、顶管法等技术减少地面干扰,适应复杂城市环境下的空间开发需求。以盾构法为例,其施工采用盾构机推进地层,刀盘切土,同步安装衬砌进而形成地下空间。比如普通的6 m直径盾构机,在中硬土层中每天掘进速度可以达到8-12 m。在盾构机中采用先进的导向系统,可以精确控制掘进方向,偏差控制在 ± 50 mm以内,大大降低对地面交通和周围建筑的影响,特别适合城市干道下的管廊建设。

2.智慧化管理平台:建设智慧化管理平台是提高管廊空间利用率的重要途径。该平台将物联网、人工智能、大数据等技术融合在一起,通过在管廊中各种管道和关键节点处安装温度、压力、位移等传感器,实时监测管线的运行状况。并借助人工智能算法,对监测数据进行智能化分析,进而动态调整相应管线的配置,提升管廊的空间利用率,为高效利用城市地下空间提供强有力的支撑。

(六) 政策与机制完善

1.统一规划与标准制定:建立国家层面的管廊建设标准,明确入廊管线类型、收费机制及维护责任,避免重复建设。

2.跨部门协调机制:设立城市地下空间综合管理机构,统筹管廊规划与交通、人防等工程的衔接。

结束语

综上所述,对城市地下综合管廊进行结构优化和空间高效利用需从规划、技术、政策等多维度协同推进,是实现城市可持续发展的重要保障。未来研究可进一步探索地下空间与“海绵城市”“韧性城市”等理念的融合,结合碳中和目标,推动绿色建造技术与可再生能源在管廊中的应用。通过持续创新与制度优化,地下综合管廊将成为城市高质量发展的核心基础设施之一。

参考文献

- [1]林坚.城市地下综合管廊运维技术研究与应用探析[J].居业,2024,(01):28-30.
- [2]赵志楠,王莉,李云飘,赵伟.《城市地下综合管廊安全防控技术研究及示范》项目成果综述[J].中国勘察设计,2023,(11):94-97.
- [3]万朝阳,郝伟强.关于城市地下综合管廊的施工技术研究与应用[J].中国住宅设施,2023,(08):148-150.