

地下结构工程绿色低碳设计与施工技术研究

祝建业 褚满帅

北京城建设计发展集团股份有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266000

[摘要]在国家“双碳”目标全面推进的大背景下, 地下结构工程, 如综合管廊、城市地铁、隧道等工程的建设规模持续扩大, 但是传统地下建设模式存在很多短板。例如高能耗、高碳排放等行业绿色转型的压力十分突出。施工过程中不仅要用到大量基础建材, 而且工序复杂, 作业周期长, 施工过程中产生噪音、扬尘、渣土、垃圾等。针对以上行业痛点, 对地下工程绿色低碳的核心设计思路进行了系统性的分析。结合各类施工场景的能耗特点, 核心环节建立低碳设计指标体系, 以及低碳支护、节能掘进、工业化建造等施工技术, 明确技术优化路径与质控标准, 解决传统地下工程高耗、高排、高扰动的行业难题, 为地下工程低碳化、绿色化建设提供理论支撑与技术参考。

[关键词]地下结构工程; 绿色低碳; 结构设计; 施工技术; 全生命周期; 节能降碳

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19776

中图分类号: TU94

文献标识码: A

Research on Green and Low-carbon Design and Construction Technology for Underground Structural Engineering

ZHU Jianye, CHU Manshuai

Qingdao Branch of Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract: Against the backdrop of the comprehensive promotion of the national dual carbon strategy, the construction scale of underground structural engineering, such as comprehensive pipe galleries, urban subways, tunnels, etc., continues to expand. However, there are many shortcomings in the traditional underground construction mode. For example, the pressure of green transformation in industries with high energy consumption and high carbon emissions is very prominent. The construction process not only requires a large amount of basic building materials, but also has complex procedures, long operation cycles, and generates noise, dust, debris, garbage, etc. during the construction process. A systematic analysis has been conducted on the core design ideas of green and low-carbon underground engineering in response to the pain points in the above industries. Based on the energy consumption characteristics of various construction scenarios, the core link is to establish a low-carbon design index system, as well as low-carbon support, energy-saving excavation, industrial construction and other construction technologies, clarify the technical optimization path and quality control standards, solve the industry problems of high consumption, high emission and high disturbance in traditional underground engineering, and provide theoretical support and technical reference for low-carbon and green construction of underground engineering.

Keywords: underground structural engineering; green and low-carbon; structural design; construction technology; full lifecycle; energy conservation and carbon reduction

引言

随着城镇化的提质增效, 地下交通、车库等工程规模不断加大, 是拓展城市空间的重要载体。传统地下工程具有高能耗、高扰动等问题, 建材生产运输、土方开挖、机械作业等环节碳排放占主导地位。地下工程受复杂地质、密闭空间、地下水约束更强, 粗放式建设易造成资源浪费与生态扰动, 并增加运维成本。双碳背景下, 地下工程属

于基建领域低碳减碳的重点方向之一, 在设计阶段应转变传统的思维定式, 探索全生命周期绿色低碳技术体系的研究方法, 目前大多为个案研究分析, 并未形成通用性的低碳设计原则及标准的技术体系。总结归纳地下空间工程低碳设计理念、关键技术及控制要点, 提出通用型的低碳技术方案, 构建通用型绿色低碳技术体系, 为行业低碳化升级提供理论支撑。

1 地下结构工程碳排放特征与绿色低碳建设原则

1.1 工程碳排放核心来源

地下建筑碳排放具有全过程、多环节、高度集中性特征，主要集中于实体建造及施工环节，以混凝土、钢筋等关键材料的生产加工所形成的碳排放为主，占工程碳排放比重较高；在施工过程中尤其是开挖、浇筑等环节往往需要使用重型机械设备，燃油电力会带来大量的碳排放。对垃圾清运、耗材损耗、设施等辅助环节也存在大量隐性碳排放。另外运维能耗产生的碳排放如排水系统、照明等都是长期碳排放主要来源。

1.2 绿色低碳建设核心原则

地下工程绿色低碳设计与施工的过程中要严格遵循全生命周期原则、资源最优配置原则、生态最小扰动原则、技术适配性原则，保障落地实效。

1.3 地下工程绿色低碳评价指标体系

为量化地下结构工程绿色低碳建设水平，规范设计与施工技术标准，具体指标及标准如下表所示。

2 地下结构工程绿色低碳核心设计技术

2.1 结构轻量化与构型优化设计

绿色低碳设计是地下工程降碳源头的核心，设计阶段方案优化可实现 70%以上全周期碳减排潜力。传统地下结构安全冗余过大，造成建材浪费与无效碳排放。轻量化

设计依托精准地质数据，利用围岩自承载能力，弱化冗余支护，优化截面、配筋与布局。主体结构采用差异化设计，按地质承载力动态调整墙体厚度与配筋，杜绝全段的高配浪费。线性工程采用流线型断面替代矩形，减少开挖与衬砌用量。附属结构取消冗余构件，采用一体化复合结构实现功能集成。同时以极限状态设计法替代容许应力法，精准把控安全储备，最大限度降低材料消耗与碳排放。

2.2 被动式低碳节能设计技术

建筑地下部分具有封闭性好但通风和采光不畅的特点，传统做法采用机械设备进行控制，其耗电量较大。因此，通过对建筑平面布置及构件的选择来达到改善地下建筑内部环境的目的即为被动式低耗能技术，在后续使用过程中可以减少碳排放量。在地下空间通风中，根据热压作用和风压作用设计通风竖井及通道形成自然通风系统以节约风机能源。在地下空间采光中，采用布设天窗、导光管引入自然光，代替人工照明；保温上优化外墙、顶板保温构造，利用土体恒温性来减少温度控制耗能；同时适应地源热泵系统，借助土体及地下水储存能量进行采暖制冷以取代传统能源，在根源上减少了运行维护的碳排放量。

2.3 绿色低碳建材选型与配比优化设计

建材物化碳排放是地下工程碳排放核心，绿色建材选

表 1 具体指标与标准

一级指标	二级指标	指标释义	管控标准
节能指标	施工综合能耗强度	单位工程量施工电力、燃油总能耗	较传统工艺降低 15%以上
	运维设备节能率	通风、照明、排水系统节能改造效果	运维能耗降低 20%以上
	可再生能源利用率	地源热泵、太阳能等可再生能源应用占比	可再生能源占总能耗 10%以上
	高耗能设备占比	现场老旧高耗能机械设备使用占比	禁止使用淘汰类高耗能设备
节材指标	建材损耗率	钢筋、混凝土、模板等主材施工损耗比例	主材损耗率控制在 3%以内
	绿色建材使用率	低碳混凝土、再生建材、环保型材应用占比	绿色建材占比不低于 60%
	结构材料优化率	通过结构优化减少的建材用量比例	建材用量优化减少 10%以上
	建筑垃圾资源化率	施工废渣、废料回收再利用比例	资源化利用率不低于 80%
节水指标	施工用水重复利用率	施工废水、降水回收循环使用比例	重复利用率不低于 75%
	地下水节约率	减少无序地下水抽排的节约比例	地下水抽排量降低 30%以上
	节水设备普及率	现场节水器具、循环水设备覆盖比例	100%全覆盖
节地指标	地下空间利用率	地下空间有效使用面积占总开挖面积比例	空间利用率提升 15%以上
	临时用地复用率	施工临时场地后续复用、恢复比例	临时用地 100%生态恢复或复用
环保指标	施工扬尘控制达标率	现场扬尘排放符合行业标准的达标比例	100%达标
	施工废水达标排放率	处理后废水排放合规比例	100%达标
	生态扰动控制度	对周边土体、地下水、植被的扰动程度	无不可逆生态扰动
低碳指标	单位工程量碳排放强度	单位体积地下结构总碳排放量	较传统工艺降低 20%以上
	碳封存技术应用率	低碳建材、固碳技术应用覆盖比例	重点工序全覆盖

型是设计降碳关键。传统工程大量使用高碳水泥、钢筋,碳排放高且耐久性差。低碳建材核心为替换高碳材料、优化配比、提升耐久性:混凝土以粉煤灰、矿粉等固废替代部分水泥,制备高强耐久混凝土;钢材采用高强度低合金钢筋替代普通钢筋,减少钢筋含量及比例。辅助材料使用可回收再利用材料,废料作为骨料用于次要受力位置,进行二次利用。尽可能采用耐久性强的材料,从整个生命周期上进行减碳。

2.4 地下水生态协同低碳设计

传统的地下工程大多采用被动止水、大排量强排水的方式进行施工及运营,不仅耗能巨大,并且容易造成降深过大以及对周边环境的影响等问题。地下水生态联合设计采取主动止水优先,疏干排水辅助的方法,利用止水帷幕及自防水措施提高结构体抗渗性能,降低地下水控制过程中所需的抽排水规模;布置减压井及疏水廊道,合理控制水压,防止盲目出水;设计污水、地下水收集再利用系统,用于喷淋、养生等用水。

2.5 数字化低碳设计技术

依托 BIM、大数据、数字化仿真技术,实现地下结构全参数低碳优化设计。利用 BIM 构建三维模型,整合地质、结构、材料、能耗参数,自动优化构件尺寸、配筋与材料用量,杜绝冗余。通过数字化仿真提前测算结构受力、能耗与碳排放总量,多方案比选最优低碳方案。数字化模型贯通设计、施工、运维数据,实现全周期低碳闭环管控。

3 地下结构工程绿色低碳施工核心技术

施工阶段是地下工程能耗与碳排放集中释放期,也是低碳管控关键环节。低碳施工技术以低能耗、低扰动、低排放、高资源利用率为核心,涵盖基坑支护低碳施工、工业化建造、节能掘进、绿色环保施工、智慧低碳管控五大技术体系,全方位降低施工碳排放与生态扰动。

3.1 低碳基坑支护与地基处理技术

基坑开挖作为地下室建设的关键步骤,传统围护方式所消耗资源多、能量消耗量大,并对周边环境产生较大干扰。低耗能围护主要以匹配场地条件为目标,强调轻型化及可重复使用特点,充分发挥土体自身作用力。尽可能选用可重复使用的型钢支撑以及模块化材料来取代不可回收的一次性支撑,在完成作业任务后进行再利用。普通基坑通常采取复合轻型支护模式,将土钉或者锚索技术与土体原位受力相结合,缩短距离,去除多余工序。地基处理 MJS、DJP 等为低能耗工艺,成桩速度快、水泥浆用量少,

开挖采用分层、分段、对称进行,防止过挖,减少外运及扬尘产生,达到节约材料能源场地的目的。

3.2 装配式工业化低碳建造技术

传统的现浇模式工作量较大,资源消耗也比较大,这是导致施工过程中产生大量碳排放的主要因素之一。而采用装配式建筑,在工厂中进行生产加工,并在施工现场完成组装工作,从而对碳排放进行有效控制。首先,在工厂中进行生产制造可以确保建筑材料的有效配置,减少浪费的同时还可以将能源以及废物集中回收,大大减少每件产品所产生的碳排放量;其次,施工现场只需要进行组装及封堵等工作,因此可以在很大程度上减少施工过程中的时间成本,从而节省了大量机械设备所耗费的能量。适用于管廊、车库、隧道衬砌等工程,标准化设计、模块化拼装,精简工序、降低损耗。预制构件精度高、耐久性强,减少运维碳排放,湿作业大幅减少,降低废水与垃圾量。

3.3 节能高效掘进与开挖施工技术

隧道、管廊掘进为能耗大项工序,节能掘进通过对工艺及设备的改进进行降碳:使用智能化盾构、掘进机,数字化控制掘进参数,精准掘进,减少超挖及废渣量;浅埋项目采用非开挖、微开挖等方式,降低土方量及地面扰动。出渣采用密闭式运输、集约化模式,减少能耗及扬尘。弃土废渣现场筛分再生为回填骨料,就地资源化利用,减少清运及新材料消耗。

3.4 绿色环保施工配套技术

绿色低碳配套措施围绕节水节噪、消解隐蔽碳排放及施工扰动等方面展开。在节约用水上,建立循环水池,将降水、冲洗污水进行沉淀处理后再利用;在节能减排上,使用变频设备、低耗能灯具以及太阳能电源,在安排作业面时做到不浪费资源、减少无效运转。在减少污染、降低噪声上,封闭式作业、雾化抑制扬尘等。选用低噪声设备及设置隔声屏障,垃圾回收分类、废弃物再利用。对地下水资源进行保护,在施工过程中采取按需疏干、回灌补水的方法来降低抽水量,防止地面发生下沉现象。

3.5 智慧低碳施工管控技术

以 BIM+智慧工地及大数据为支撑进行全生命周期能耗管理与控制。利用智慧管理系统对施工现场用电、用油、用水以及材料等能源资源进行实时统计,并对高耗能作业环节以及不必要的能源浪费情况进行有效分析并加以改进;运用信息化手段合理安排施工流程与机械操作时间,减少不必要的能源浪费;同时对施工现场各环节碳排放量及时计算与更新。对每个环节进行碳排放量实

时统计,并根据实时情况优化施工计划;采用电子表格进行记录并保存以方便随时查询及管理,形成智能环保施工体系。

4 地下结构工程绿色低碳技术应用优化策略

4.1 构建全生命周期低碳管控体系

建立勘察、设计、施工、拆除全流程闭环管控。勘察精准摸排地质水文条件。设计落实轻量化、节能化、绿色化理念,源头控碳,施工严格执行低碳工艺强化能耗管控,运维依托被动式节能与智慧能源系统降低能耗,拆除推行垃圾资源化回收,减少末端碳排放,实现全周期降碳。

4.2 推动绿色低碳技术标准化适配

针对不同地质条件与结构类型,建立差异化低碳技术适配标准。根据软土、硬岩、富水、杂填等地层特性,匹配低碳支护、掘进、地基处理技术;针对隧道、管廊、人防等结构类型,优化专属低碳方案,避免技术套用,提升应用实效。同时完善绿色建材、低碳工艺行业标准,规范应用流程与质控要求。

4.3 强化数字化与低碳技术深度融合

深化 BIM、大数据、AI、物联网在地下工程低碳建设中的应用,实现设计精准化、施工智能化、运维智慧化。通过数字化仿真实现多方案低碳比选与参数优化;通过智慧监测实现能耗、环境指标实时管控;通过数据沉淀构建低碳数据库,为技术优化与标准更新提供支撑,推动行业低碳技术迭代。

4.4 完善低碳施工质控与考核机制

建立绿色低碳施工质控体系,将节能、节材、环保、低碳指标纳入质控核心,明确各工序低碳标准与验收规范。构建常态化考核机制,将碳排放强度、资源利用率、环保达标率等纳入项目考核,倒逼全过程落实低碳要求,杜绝技术形式化,保障绿色低碳落地见效。

5 结论与展望

文中从双碳背景下,针对地下工程高能耗生态扰动大等痛点,提出绿色低碳的设计及施工技术体系,明确碳排放来源以及低碳建设原则,并建立包含节能、节材、环保、低碳的评价指标体系。提出了结构轻量化、被动式节能、绿色建材适配、地下水协同设计、数字化设计五项设计技术,以及低碳支护、装配式建造、节能掘进、绿色施工、智慧管控五大施工技术,形成全过程低碳技术体系,具有良好的通用性。研究认为地下工程低碳重在源头控碳、过程降耗、全程控制。从设计到施工各环节中,结构合理化和材料高性能化的优化是降低碳排放的重要途径,施工过程中工艺创新和智能化管理则是关键措施。全周期管控是长效保障。多技术集成应用可以达到降耗减碳、少扰动生态保护的效果,安全、质量、效益与低碳统一。今后,地下工程低碳技术的发展趋势会朝着智能化、集成化、固碳化、产业化方向前进,低碳固碳建材、无人化装备、全周期碳核算将成为研究的重点。

[参考文献]

- [1]张梦楠,曹楠楠,朱雪莲.典型国家“双碳”目标实现路径解析及中国借鉴[J].河北地质大学学报,2024,47(1):119-126.
 - [2]曾国华,汤志立.城市地下空间一体化发展的内涵、路径及建议[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):701-713.
 - [3]苟明中.城市轨道交通绿色建造发展面临的挑战及对策研究[J].现代城市轨道交通,2025(2):1-5.
 - [4]晓希,姜岩,王玉东,等.双碳目标下装配式地铁车站技术体系与实践[J].现代城市轨道交通,2025(6):36-41.
- 作者简介:祝建业(1991—),男,汉族,山东省德州人,中级工程师,研究生,毕业于山东大学岩土工程专业,研究方向/现从事工作为结构工程/地下结构。