

面向低碳目标的大体积混凝土 结构建造技术路径研究

史如友¹, 张丽^{2*}

(1. 山东绿建新材料有限公司, 山东 德州 253700;

2. 乐陵市综合检验检测中心, 山东 德州 253600)

摘要 针对大体积混凝土结构材料、施工、评估层面, 碳排放大、资源消耗多、管理粗放的难题, 本文系统地探索了其实现低碳化建造的技术途径。在对结构特性和碳排放关键环节进行关联分析的基础上, 提出覆盖“源头减量—过程控制—循环利用—制度保障”的综合性策略。结果表明: 通过大力推广低碳胶凝材料和优化设计、建设智能施工和精准养护系统、开发废料资源化和碳捕捉技术、以全生命周期碳评价及协同管理平台作为辅助手段, 可有效地实现大体积混凝土结构施工过程中节能降耗和低碳转型的目标, 从而为工程实际提供系统性的解决方案。

关键词 大体积混凝土结构; 绿色低碳; 建造技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.041

0 引言

“双碳”战略目标提出后, 建筑业是我国碳排放的重点领域之一, 减排任务艰巨。大体积混凝土结构具有体量大、水泥用量大、温控能耗大等特点, 是基础设施工程中碳的主要排放量。目前, 其绿色建造还面临着对高碳材料的依赖、粗放式的建造工艺、全生命周期的碳管理欠缺等多方面的挑战。因此, 系统地分析其碳排放关联环节并探讨可行的低碳技术路径和管理策略, 对于促进土木工程建造方式绿色变革至关重要。本文对该领域关键问题进行梳理, 提出集成技术和管理创新协同战略, 旨在为行业绿色转型提供实践参考。

1 大体积混凝土结构特性

1.1 典型结构特征与工程要求

大体积混凝土结构通常是指其最小断面尺寸超过 1 米, 并且需要采取相应的控制措施, 以避免由于水泥水化热和收缩变形导致的混凝土实体结构出现裂缝。第一, 其典型特征体现在巨大的几何尺寸与混凝土方量上, 这直接决定原材料 (尤其是水泥、骨料) 需求的规模极其庞大^[1]。第二, 由于混凝土导热性能差, 硬化时水泥水化放出的大量热聚集于结构内, 造成内外温差明显, 如不加以控制, 由此引起的温度应力很

容易诱发有害裂缝并危害到结构整体性、耐久性、安全性。所以, 温控防裂一直是其设计和施工中贯穿始终的核心工程需求, 常规上往往依靠布置复杂冷却水管系统, 使用低热水泥或者大量掺粉煤灰/矿粉等措施来实现、分层分块浇筑等过程, 这类措施通常都会伴随有附加的物料、能耗、管理成本。第三, 此类结构多是工程关键部位, 设计寿命长 (常达百年以上), 对长期性能 (抗渗性、抗腐蚀性、体积稳定性等) 要求极高, 这就对材料耐久性设计及后期养护维护提出了更严格的标准^[2]。

1.2 结构特性与碳排放的关键关联点

大体积混凝土结构特点与全生命周期碳排放有着深层次、多环节联系。在材料生产阶段, 庞大的水泥用量是碳排放的“主力军”, 每生产 1 吨硅酸盐水泥约排放 0.8 ~ 1.0 吨二氧化碳, 它来源于石灰石分解过程排放及燃料燃烧能量排放。结构对低热、高耐久性的要求, 虽可能促进辅助胶凝材料的使用, 但也可能推动特种水泥或化学外加剂的应用, 其生产碳排放需综合评估。传统冷却水循环系统为控制大体积混凝土水化热而需不断消耗水泵电力, 这就要求施工建造阶段必须进行冷却水循环; 分层分块浇筑会带来模板用量的增加、施工周期的延长等问题, 并间接加大机械能耗^[3]。

作者简介: 史如友 (1979-), 男, 专科, 研究方向: 建筑材料。

*通信作者: 张丽 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 产品质量与安全。E-mail: 1033998416@qq.com

2 大体积混凝土结构绿色低碳建造中存在的主要问题

2.1 材料层面的问题

目前,大体积混凝土绿化施工中材料层面所面临的关键问题是对高碳胶凝材料依赖和低碳替代技术成熟度与成本矛盾。尽管采用粉煤灰、矿渣粉等工业固废作为辅助胶凝材料部分替代水泥已成为常规做法,并取得一定减排成效,但其替代率存在物理力学性能与工作性要求的瓶颈,难以实现更高比例的替代。尽管新型的低碳胶凝材料,如碱激发胶凝材料、高贝利特水泥、碳酸钙钙—钙矾石体系,在实验室的研究中显示出了更低的碳排放潜能,但其长期耐久性能(抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等)数据尚不完善,大规模工程应用的可靠性未经充分验证,且生产成本较高,没有统一标准和规范支持,致使设计方和施工方基于风险规避的考虑而未敢轻试。另外,骨料绿色化也同样凸显。天然砂石过度采挖已经带来对生态环境的严重破坏,同时,机制砂石生产过程耗能较大,优质再生骨料由于其成因复杂、性质波动较大且含有大量杂质等原因,很少被用于大体积混凝土这种重要的结构^[4]。

2.2 施工与养护层面的问题

从建设和维护层面上看,存在的问题主要体现在传统工艺粗放性,对经验的依赖性和智能化水平不够而造成资源和能源的浪费。第一,温控防裂施工还主要依靠“一刀切”的经验方案。冷却水通水流量、温度、时长大多依靠经验设置,缺少以实时温度场和应力场数据为基础的动态准确调控,易引发或冷却不足而引发裂缝的危险,或者降温过大,浪费水电资源,加大混凝土受约束初期的危险^[5]。第二,浇筑过程管理精细化水平不高。大体积混凝土具有浇筑方量较大,历时较长等特点,对于混凝土的供给、运输、振捣等环节的配合要求非常高。在实际工作中往往由于调度不周而发生供料中断或者压车等待等事故,这不但影响施工质量,而且造成运输车辆和泵送设备闲置,增加无意义的燃油和电力消耗。第三,养护环节缺乏智能化和绿色化的运用手段。传统洒水养护或者覆盖保温材料方式水资源消耗较大且覆盖材料循环使用率较低。

2.3 评价与管理层面的问题

在评估和管理的过程中,关键的挑战是缺少一个覆盖整个生命周期、量化的绿色和低碳评估体系。现有的绿色建筑评价标准(LEED、BREEAM、中国《绿色建筑评价标准》等)更多关注建筑的运营阶段能耗与室内环境,对于施工阶段尤其是大体积混凝土这类隐蔽工程碳排放问题,目前还没有详细而统一的计算方

法及数据清单。在项目设计或施工决策阶段,通常更倾向于使用“事后核算”的方式,而不是“事前预测和过程控制”,这样很难直观地评估不同方案对碳排放的具体影响。在管理上,设计、施工、材料供应、运维各环节割裂,“铁路警察,各管一段”。设计方出于对结构安全的保守考虑可能会过多地采用材料;施工方为赶工期,也许会选择高碳排放却又方便快捷的技术;由材料供应商提供的环境产品声明(EPD)的数据存在不完整或可信度存疑的情况。

3 大体积混凝土结构绿色低碳建造综合策略

3.1 源头减量、低碳材料与优化设计策略

源头减量是减少大体积混凝土碳足迹的最基本和有效方法,核心是对低碳胶凝材料体系进行革新和以性能为基础的优化设计。第一,要大力开发和推广应用低熟料含量、高固废利用率新型胶凝体系。在确保早期强度增长和长期耐用性的基础上,通过优化颗粒的级配和采用化学激发方法,成功地将粉煤灰、矿渣、钢渣、硅灰等工业固废的混合比例提高到了超过50%,甚至对无熟料碱刺激胶凝材料非关键部位进行探索。同时,加快有关材料国家标准及工程应用指南的制定和完善,以减少市场准入风险。第二,积极采用再生骨料技术。建立工程现场或区域性的建筑垃圾资源化处理中心,生产高品质再生粗、细骨料,通过强化处理工艺(颗粒整形、杂质分离等)和科学的配合比设计,将其安全、在大体积混凝土非受力部位或者次要受力部位合理运用,并逐步增加替代率。第三,促进优化设计。采用BIM技术的三维协同设计实现工程量的准确计算和冗余规避。基于结构仿真分析(如有限元法),进行体型优化,在满足力学性能的前提下减少混凝土用量。大力推广高强、高性能混凝土的应用,以提高强度等级缩小截面尺寸达到全面降低材料用量目的。第四,拓展基于性能数字化配合比设计和全生命周期优化方法。借助机器学习和大数据分析技术深度挖掘大量原材料性能数据,建立材料组分—微观结构—宏观性能量化关系模型,从而准确地确定胶凝材料、骨料、外加剂在符合具体工程性能,以及施工要求情况下的最小掺量和最佳配合比。同时,引入全生命周期评估(LCA)工具,在设计阶段对不同材料组合和结构方案在资源消耗、碳排放、耐久性等方面的综合影响进行模拟与比选,保证所用优化设计策略既能达到源头减量,又能在全生命周期环境负荷最小化与经济性最优平衡。

3.2 过程控制、智能施工与精准养护策略

对施工过程进行精细化、智能化管控,对于降低能源消耗和资源浪费具有至关重要的意义。要建设基

于物联网、大数据、人工智能等技术的智能施工、精准养护系统。在温控上,构建以分布式光纤传感或者无线传感器网络为核心的温度—应力实时监测系统,并把采集到的数据传送到云端平台,通过机器学习算法预测温度场与应力场的发展趋势,并反向智能控制冷却水系统的流量、温度与通断时间,实现从“经验控制”到“数据驱动,动态反馈,自适应调控”的精准温控,最大限度地节省水电能耗,同时保证防裂安全。将智慧物流调度系统运用到浇筑组织中。整合商品混凝土搅拌站的生产状态、交通路况和现场浇筑进度,优化混凝土运输车辆的智能排程和路径,达到“即至即浇即用”的目的,缩短等待时间、降低运输车辆及泵送设备空载率及怠速油耗。养护环节普及自动化和智能化养护装备。例如:利用带温湿度传感器的自动喷淋系统,根据混凝土表面状态及天气情况自动开启或停止,准确补水;采用智能保温保湿毯可以循环利用,保温性能可以随环境温度的变化而自动调整。建立数字化质量追溯和碳排放核算体系,贯穿于整个建设全过程。通过对每批混凝土、各关键工序给予唯一数字标识,来实时获取和上传原材料消耗、设备能耗和温控参数、养护记录和其他数据到云端,并使用区块链技术来保证它们是不可篡改的。建设结束时,该系统能够自动生成该单位项目或建设路段精细化碳足迹报表,明确揭示各个环节碳排放热点和减碳成效,为进一步优化后续工程的流程和绩效评估提供必要的技术支持,从而建立一个“监控—调控—核算—优化”的完整管理流程,以持续提高大型混凝土施工的环保标准。

3.3 循环利用、废料资源化与碳捕捉策略

建设流程从“资源—产品—垃圾”的线性模型转变为“资源—产品—再生资源”的循环模型,并在此基础上积极研究碳捕获固存的相关技术。第一,对施工现场废料进行全过程分类管理和就地资源化。设专用清洗回收设备对泵车、罐车清洗废水及剩余混凝土中砂、石、浆水等进行分选,经分选后砂石可以用作低标号混凝土或者垫层,浆水经处理之后可以用来对混凝土进行拌和或维护,从而达到“零排放”的目的。废弃混凝土试块、砌块等能被移动式破碎筛分设备处理为再生骨料。第二,对大体积混凝土碳化养护及碳捕捉利用技术进行探究。利用混凝土水化产物($\text{Ca}(\text{OH})_2$)能够与 CO_2 反应生成碳酸钙的特性,在养护阶段引入浓度可控的 CO_2 废气,既可加速混凝土早期强度发展,又能永久固存一部分 CO_2 。可研究在封闭的养护罩内通入工业尾气(如电厂烟气)进行碳化养护的可行性。更为先进的是研究开发能够将 CO_2 直接矿物化并封存的预制混凝土构件或者

将加工后的 CO_2 混入混凝土搅拌中制备“碳负性”骨料。

3.4 制度保障、评价体系与协同管理策略

要实现技术路线落地,必须有强大的制度体系做保证。第一,要构建适合大体积混凝土结构全生命周期的碳排放核算和评价标准。该标准应当为材料、装备、运输等本土化碳排放因子提供详尽数据库,并对建材生产、运输、施工建造、运营维护直至拆除回收等各个环节核算边界和方法进行清晰界定,开发用户友好的计算软件或插件,方便设计、施工单位在方案比选时进行快速碳评估。第二,推广基于建筑信息模型(BIM)和数字孪生(Digital Twin)技术的全生命周期合作管理平台。平台集成设计模型、施工进度、物资采购、质量监测、碳排放数据,使参与各方在相同数据环境中协同作业。管理者可以对项目碳足迹进行实时监测、高碳排放环节预警、不同管理决策碳排放效应仿真,实现碳排放过程可视化和动态管控。第三,政策激励和市场机制的健全。政府要对绿色高效建造技术推出专项补贴、税收减免等政策,在项目招投标及评优评价体系中增加施工阶段碳排放指标。

4 结束语

推进大体积混凝土结构低碳化建造是涉及材料革新、工艺升级、模式变革等方面的系统工程。本文对其材料、施工、管理层面核心问题进行系统阐述,并构建以低碳材料和优化设计为原点,以智能施工和精准养护为流程,资源循环和碳捕捉是辅助,标准体系和协同管理是保障等综合技术路径。未来需要从多方协同和政策引导等方面进一步强化多材料工程可靠性验证、智能调控系统标准化应用和全生命周期碳核算体系落地,把低碳理念有效地渗透到建造的整个过程中,最终达到产业的优质和可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈骁彦. 混凝土结构裂缝防控的施工标准化管理体系构建[J]. 水泥, 2026(02):141-144.
- [2] 刘文祥,付伟星,王东峰,等. 隧道结构超大体积混凝土底板水化热控制技术[J]. 建筑技术, 2026,57(02):163-166.
- [3] 曾启洪,刘雨欣,刘波,等. 大体积混凝土结构施工管理云平台开发与应用[J]. 土木工程信息技术, 2025,17(06):60-65.
- [4] 杨雁君,周锡海,韦宇宁,等. 基于MIDAS FEA的横门西特大桥主墩承台大体积混凝土温控技术[J]. 城市道桥与防洪, 2025(12):222-227.
- [5] 姜宜翰. 土木工程大体积混凝土结构施工技术应用研究[J]. 工程机械与维修, 2025(12):149-151.