

大体积混凝土施工裂缝智能监测与补偿控制技术研究

白雪

中国水利水电第一工程局有限公司 吉林长春 130033

摘要:为解决大体积混凝土施工过程中易产生温度裂缝的问题,本文以结构热应力控制为核心,对裂缝的智能监测与补偿控制技术展开系统研究。通过构建多源传感器网络、优化数据采集与识别算法,形成裂缝早期感知与趋势预测机制;结合主动控温、应力释放与诱导缝设计,建立动态响应与自适应干预体系,提升结构早龄期抗裂性能。同时,构建完整的智能系统架构与工程部署流程,强化监测数据与控制决策的协同闭环,以期为大体积混凝土工程中裂缝风险防控提供科学、高效的技术路径与工程参考。

关键词:大体积混凝土施工裂缝;智能监测;补偿控制技术

一、大体积混凝土裂缝形成机理分析

(一)大体积混凝土的热力耦合特性

大体积混凝土在水化过程中释放大量化热,导致内部温度显著上升,由于热传导受限,其内部与表层间形成显著的温度梯度,从而诱发热应力集中。混凝土的导热系数、比热容与体积率对热场演化具有显著影响,在约束条件作用下形成热应力与变形耦合作用。该类耦合现象表现为局部热膨胀受限引起的拉应力集中,且随龄期发展逐步向结构内部传递。有限元热力耦合模型显示,水化热峰值出现时间受骨料种类、水胶比及外加剂影响显著。若温度控制不当,将导致内外温差超过裂缝临界值,从而产生不可逆裂缝损伤。热场与应力场协同演化过程对裂缝形成起主导作用,需建立基于温控参数的全过程热力耦合分析机制,以提高裂缝预测的准确性与控制策略的有效性^[1]。

(二)裂缝类型与发展特征

大体积混凝土裂缝类型受多重因素影响,主要分为温度收缩裂缝、塑性沉降裂缝与约束引起的应力裂缝等。温度收缩裂缝源于水化热所致的体积膨胀与冷却阶段收缩不匹配,形成内部张拉应力集中区;其通常沿结构长方向发展,具有贯穿性与不可逆性。塑性沉降裂缝多在初凝前后产生,因混凝土自重引发骨料下沉与浆体上浮,在钢筋或埋件部位形成界面不连续带,呈纵向分布,深度较浅。约束应力裂缝通常出现在边界与转角处,由基础约束或模板拘束导致的应力集中区域产生,并沿主应力方向扩展。裂缝发展初期表现为微观离析与微裂纹扩展,随着时间推移形成可检测性裂缝。不同类型裂

缝的发展路径与扩展速率受应力梯度、干燥速率及水泥水化反应速率综合影响,需依据实际工况分类建模以指导预防与控制策略制定。

二、智能裂缝监测技术体系构建

(一)多源传感器布设优化

多源传感器布设需综合考虑裂缝潜在发展区域、结构几何特征与施工阶段荷载路径,形成覆盖面广且响应灵敏的监测网络。在大体积混凝土结构中,推荐采用热电偶阵列、应变光纤传感器及分布式光纤光栅(FBG)系统联合部署,以实现多物理场的动态感知。传感器布设应以温度梯度最大区、结构受力集中区和边界转角处为重点监测位置,按照布设密度0.25~0.5个/m³分区配置,实现空间分辨率与精度的均衡。为避免局部测点遗漏,需辅以仿真分析结果优化布设方案,基于结构热力耦合场数据构建传感器布设矩阵。混合布设策略可通过无线节点协调同步,结合LoRa或NB-IoT通信模块进行实时数据回传,有效降低传输延迟与布线成本。此外,应对传感器嵌入深度、封装材料耐久性进行技术选型,以适应混凝土硬化期内温升达65℃及早期裂缝微应变小于50μ ϵ 的监测需求。

(二)数据采集与预处理系统

数据采集系统需满足多通道同步采集、高频率记录与长期运行稳定性要求,推荐采用高集成度的数据采集器(DAQ)结合分布式边缘计算节点。为保证裂缝演化过程中关键数据的完整性,应设定采样频率不少于1 Hz,分辨率优于0.01℃(温度)与5μ ϵ (应变),支持24小时连续运行与存储。信号预处理模块包括噪声滤波、小

波去噪、趋势分离与异常值识别,确保后续数据分析的准确性。为应对传感器漂移和环境干扰,应构建基于统计模型的动态校准机制,并引入基线修正算法,以保持数据长期一致性。数据传输链路采用多路径冗余机制,配合自动重发协议(ARQ)与CRC校验机制增强抗干扰能力。在边缘节点设立数据分级存储与预警触发模块,实现本地初步数据整合与初级异常识别,有效缓解中心服务器压力并缩短响应时间。整体系统设计应支持工业标准Modbus、CAN总线与OPC UA协议接口,以实现与智能施工系统的无缝集成^[2]。

(三) 智能化数据解析与裂缝识别方法

裂缝数据解析需依托多变量时间序列分析、特征提取与智能识别算法协同建模,建立动态预测与演化规律挖掘模型。针对大体积混凝土土裂缝形成过程,建议构建基于LSTM(长短期记忆网络)模型的温应力预测框架,输入特征包括多源传感器历史温度、应力变化率与环境参数,共涉及18类变量,模型预测精度可达92%以上。裂缝识别采用基于模式识别的异常检测机制,融合PCA(主成分分析)与孤立森林(Isolation Forest)算法,对高维数据空间中的应变突变、梯度异常与相对位移趋势进行深度筛查。在识别机制中引入时空热图可视化技术,实时标识高风险区域。系统应嵌入反馈闭环控制模块,将裂缝识别结果实时反馈至控温系统与张力释放装置,实现自适应调控。此外,裂缝发展趋势评估采用加权模糊隶属函数法,综合考虑裂缝开口宽度变化速率($>20\mu\text{m/h}$)、应变突升幅度($>100\mu\epsilon$)与温差梯度阈值($>15^\circ\text{C/m}$),构建多因素评判模型,提高预警的实效性 with 准确性。

三、裂缝补偿与控制技术研究

(一) 主动控温技术

主动控温技术旨在通过调控混凝土内部温度场演化过程,有效削减热应力峰值与温差梯度,降低裂缝诱发风险。针对水化热集中释放期,应构建以内嵌冷却系统为核心的主动温控方案,通过塑料或不锈钢冷却管布设于温度升高敏感区,以冷却水循环方式导出热量,维持内部温升速率低于 1.0°C/h 。推荐采用冷却水进出温差控制在 $8\sim 12^\circ\text{C}$,流量应在 $0.05\sim 0.10\text{L/s}\cdot\text{m}$ 范围内变化调控,以实现最优散热效率。冷却管间距应根据结构断面厚度确定,一般不大于 800mm ,并确保在结构内埋深保持在混凝土表面下 200mm 以上,防止表面温差突变。控温系统需集成PID闭环控制算法,通过温度传感器实时

采集监测数据,反馈调节流量与进水温度。结合浇筑分区时间序列控制策略,可在 $24\sim 72$ 小时的关键水化期内有效将温差梯度控制在 12°C 以内,从而显著降低热裂缝的形成概率,提高混凝土结构的整体稳定性^[3]。

(二) 应力释放与诱导缝设计

应力释放与诱导缝设计是裂缝控制中关键的结构优化手段,通过引导和分散内应力集中区域,有效避免裂缝无序发展。诱导缝宜设置于结构几何转折、边缘刚度突变和混凝土断面突宽位置,缝间距应依据结构厚度和约束条件确定,通常为 $4\sim 6\text{m}$,并确保与温控策略协调布设。缝深一般为混凝土厚度的 $1/3\sim 1/2$,缝宽控制在 $8\sim 12\text{mm}$,以保证应力集中点准确转移。在缝体构造中可引入PVC或EVA等柔性隔离材料,同时设置双向止水带以保证结构防渗性能。为增强诱导效果,推荐在缝体内部预埋低模量聚合物材料,以吸收局部张拉应变,缓释裂缝能量传递。结构仿真分析显示,在设置诱导缝后,主拉应力峰值可降低 $15\%\sim 25\%$,有效提升裂缝控制效果。此外,结合早龄期混凝土弹性模量增长模型和热应力演化路径,可构建应力释放时序控制曲线,引导诱导缝在应力形成前期完成裂缝定位,从而实现可控裂缝导向与结构应力调节协同作用。

(三) 裂缝自愈合与功能材料技术

裂缝自愈合技术依赖材料自身或外部刺激响应机制实现裂缝闭合与结构完整性恢复,主要包括化学自愈、微胶囊释放和矿化诱导三类机制。化学自愈型水泥基材料通过引入MgO膨胀剂与高活性矿物掺合料,在裂缝发生后生成体积膨胀产物,实现自封闭功能;实验数据显示,当MgO掺量控制在 8% 时,裂缝自愈率可达 80% 以上,且裂缝宽度小于 $150\mu\text{m}$ 时自愈效果最为显著。微胶囊自愈系统利用直径 $50\sim 200\mu\text{m}$ 的聚合物微囊包覆反应性单体,当裂缝触发囊体破裂后释放修复剂,与水泥基质发生聚合反应形成闭合膜。矿化诱导型自愈合技术则通过引入可控释载体(如 CaCO_3 前驱体)诱导结晶沉积,有效封堵水通道与微裂隙。在实际应用中,需综合考虑功能材料的反应活性、环境适应性与分布均匀性,结合水胶比、水化热释放曲线与界面黏结强度参数建立多尺度自愈机制模型,以提升混凝土在服役期内的微损伤自修复能力与耐久性能保持水平^[4]。

(四) 基于反馈闭环的自适应控制系统

基于反馈闭环的自适应控制系统集成实时数据采集、响应判断与控制执行模块,形成动态闭环调控机制以对

裂缝诱发因素进行主动干预。系统核心由嵌入式控制单元、边缘计算模块与执行机构构成，控制逻辑采用模糊控制与增益调节相结合的策略，对温度、应力和湿度三维数据进行融合分析。

四、智能监测与补偿控制系统集成与应用

(一) 系统集成架构设计

智能监测与补偿控制系统需构建基于“感知-传输-决策-执行”四层协同结构，实现多源数据融合、状态评估与实时干预一体化运行。感知层由分布式温度、应变、湿度传感节点构成，节点采样频率不低于1 Hz，测量精度分别达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 5\mu\varepsilon$ 与 $\pm 1.5\%\text{RH}$ 。传输层采用双通道冗余通信结构，主链路支持以太网Modbus-TCP协议，辅助链路配置NB-IoT模块，保障数据稳定回传。决策层通过工业嵌入式计算平台（配置四核1.6 GHz处理器、8GB内存）运行自适应模糊控制与机器学习裂缝预测模型，决策时延控制在1秒内。执行层包括温控系统、张力释放装置及诱导缝驱动模块，均通过CAN总线联动控制，具备10 ms级响应能力。系统平台整体通过OPC UA实现与BIM施工平台互联，支持PLC集成接口。各子系统通过时间同步协议（IEEE 1588）实现毫秒级数据对齐，确保全生命周期内热力信息闭环流转，提升系统集成稳定性与多工况适应性^[5]。

(二) 系统工程化部署流程

系统工程化部署需遵循“规划—集成—测试—运行”四阶段路径，确保智能裂缝控制系统在复杂施工环境下实现全周期精确运行。前期规划阶段应基于有限元模拟结果开展结构温控敏感区与裂缝高风险区域识别，划分监测单元并制定布设策略。传感器类型与型号选型应考虑测量精度、抗干扰能力及施工兼容性，例如在主应力集中的承台区域优先采用耐碱光纤光栅传感器。布设阶段应依据设计图纸与标定坐标实施高精度埋设，传感器埋设深度误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，连接导线统一编号以防布线混乱。通信模块与电源系统布置应同步进行，配合中继节点和信号放大器配置提升传输稳定性。

部署测试阶段通过小负载运行验证系统各模块协同

响应性能，推荐设置24~72小时的在线监测测试窗口，期间通过同步采集温度、应力与应变数据分析信号完整性与响应延迟。系统记录频率应设置为 $\geq 1\text{Hz}$ ，数据包丢失率控制在0.5%以下，监测误差控制在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 及 $\pm 10\mu\varepsilon$ 范围内。各节点间通信需实现秒级响应，反馈控制信号延迟不得超过2秒，以保障系统在实时调控中的可靠性。试运行完成后进入正式运行阶段，系统通过主控平台接入施工调度网络，依据混凝土浇筑进程与现场环境数据动态调整控制策略，实现温度、应力和诱导装置的多维联动。为提升系统长期运行稳定性，应构建周期性数据备份机制与异常断电重启恢复模块，在主控中心设置双通道冗余系统提升容灾能力。系统部署完成后需整理形成完整工程布设图、数据接口标准、硬件维护指南与操作规程，便于后期技术人员开展例行维护、系统升级与智能扩展。

结语

总而言之，大体积混凝土裂缝控制技术的发展正在从经验型手段向智能化、系统化方向转变。通过多源传感感知、实时数据处理、自适应控制反馈等关键环节协同集成，裂缝形成过程得以动态掌握，裂缝扩展趋势实现主动干预。补偿材料、诱导缝与控温系统的精准联动显著提升结构的整体耐久性与施工质量，为复杂工程场景中裂缝风险的科学管理提供了有效技术路径。

参考文献

- [1] 史军辉, 孟彦丽. 大体积混凝土浇筑技术及测温数据分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(06): 41-43.
- [2] 路亚男. 大体积混凝土施工裂缝控制技术研究[J]. 居业, 2024, (04): 25-27.
- [3] 王伟. 公路桥梁设计和施工过程中裂缝成因分析[J]. 汽车周刊, 2025, (06): 232-234.
- [4] 龙芝英. 建筑施工中混凝土裂缝的防治[J]. 住宅与房地产, 2025, (11): 114-116.
- [5] 杨雯. 道路桥梁施工中的裂缝成因及预防对策[J]. 汽车周刊, 2025, (05): 252-254.