

大体积混凝土温度裂缝协同防控与智能监测体系研究

马江霖¹ 王伟²

1. 青岛市即墨区河库管护中心 山东 青岛 266200; 2. 青岛市即墨区水资源综合服务中心 山东 青岛 266200

摘 要: 大体积混凝土结构在水利水电、大型桥梁墩台壳等工程中应用广泛。由于水化放热集中、内部散热缓慢, 极易形成显著的内外温差及温度梯度, 进而引发温度应力。当拉应力超过混凝土早期抗拉强度时, 将形成温度裂缝, 威胁结构的整体性、耐久性。本文系统研究了大体积混凝土温度裂缝的形成机理与影响因素, 深入探讨了从材料设计、配合比优化、施工工艺改进到智能化监测预警的全链条温度裂缝防控技术, 为大体积混凝土结构施工期温度裂缝控制提供了系统化解解决方案。

关键词: 大体积混凝土; 温度裂缝; 温度应力; 裂缝防控

引言

大体积混凝土通常指最小断面尺寸大于 1 米, 或施工过程中因水泥水化热引起温度变化和收缩变形、需采取特殊技术措施控制温度应力与裂缝的混凝土结构。其在现代大型基础设施建设中至关重要。然而, 大体积混凝土在硬化过程中释放大量的水化热, 因混凝土导热性能差, 热量难以迅速散失, 导致结构内部温度急剧升高, 而表面温度受环境温度影响相对较低, 这显著的内外温差以及随后的降温收缩过程, 在混凝土约束条件下将产生显著的拉应力。混凝土在早期抗拉强度和极限拉伸变形能力较低, 当温度应力超过其抗拉强度或极限拉伸值时, 极易产生表面裂缝甚至贯穿性裂缝^[1]。

温度裂缝的危害性主要包括: 破坏结构整体性, 削弱承载能力; 为水分、侵蚀性离子提供快速通道, 加速钢筋锈蚀和混凝土劣化; 影响结构美观与使用功能; 后期修复难度大、成本高昂。因此, 有效控制大体积混凝土施工期的温度场分布, 抑制温度裂缝的产生与发展, 是保障工程质量和结构安全的关键技术环节。

本文通过系统梳理温度裂缝成因^[2], 聚焦材料优化、工艺创新与智能监测, 提出一套高效、精准、可实施性强的温度裂缝防控与监测技术体系, 为大体积混凝土结构施工期温度裂缝控制提供了系统化解解决方案。

1 温度裂缝形成机理与影响因素

1.1 裂缝形成机理

1.1.1 温度场非均匀性

水化放热集中于内部, 散热主要发生在表面, 形成“内热外冷”的温度梯度。

1.1.2 温度变形受约束

混凝土具有热胀冷缩特性。升温期内部膨胀受外

部相对低温区约束产生压应力^[3]; 降温期内部收缩受外部约束产生拉应力。

1.1.3 早期混凝土性能薄弱

早期混凝土弹性模量增长快, 抗拉强度和极限拉伸值增长缓慢, 徐变能力有限, 难以松弛拉应力。

1.1.4 应力超限开裂

当混凝土内部产生的最大温度拉应力超过其相应龄期的抗拉强度, 或其产生的最大温度拉应变超过其相应龄期的极限拉伸值时, 混凝土结构将发生开裂。

1.2 关键影响因素

1.2.1 材料因素

①水泥品种与用量: 高标号、高细度水泥水化快、放热量大; 水泥用量是影响总水化热的关键。②掺合料种类与掺量: 粉煤灰、矿粉、硅灰等可降低水化热峰值并延缓温升。③骨料特性: 砂岩、石灰岩、石英岩三种骨料的热膨胀系数、导热性能依次增大。④外加剂: 缓凝剂延缓温升速率, 减水剂降低用水量和水泥用量。

1.2.2 结构因素

①结构尺寸与形状: 尺寸越大, 内部温升越高, 散热越慢; 形状复杂处约束强, 应力集中。②约束条件: 地基、相邻块体、钢筋等约束越强, 拉应力越大。

1.2.3 环境因素

①环境温度: 浇筑温度、环境气温、风速及温差影响较大。②湿度: 表面水分蒸发影响表面温度和变形收缩。

1.2.4 施工因素

①浇筑温度: 初始温度越高, 最终温升越高。②浇筑速度与分层厚度: 影响散热路径和热量累积。③养护措施: 保温、保湿效果直接影响表面温度与

作者简介: 马江霖 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为水利水电工程。

湿度。

2 温度裂缝控制关键技术

2.1 材料优化与配合比设计

2.1.1 降低水化热总量与放热速率

选用中低热或低热水泥,如P·LH或P·O 42.5R。通过优化骨料级配、使用高效减水剂,在保证工作性能和强度的前提下,尽可能降低胶凝材料总量。

2.1.2 大掺量优质矿物掺合料

①粉煤灰(FA):I级灰,掺量20%~40%。显著降低早期水化热,延缓温峰出现时间,改善和易性,降低用水量。②矿渣粉(GGBS):S95/S105级,掺量30%~60%。降低水化热总量,改善后期强度与耐久性。③复掺技术:FA+GGBS,兼顾早期温控与后期性能。硅灰(SF)掺量5%~10%用于增强早期强度和密实度,但需注意其可能略微增加早期水化热。

2.1.3 严格控制水泥用量

通过优化骨料级配、使用高效减水剂,在保证工作性能和强度的前提下,尽可能降低胶凝材料总量。

2.1.4 优化骨料体系

选用热膨胀系数小、导热系数相对高的骨料,采用连续级配,降低空隙率,减少砂浆用量,严格控制骨料含泥量低于1%。

2.1.5 应用高性能外加剂

高效减水剂(HRWR)可大幅降低水胶比,提高强度与耐久性,减少用水量和水泥用量。缓凝剂能延缓凝结时间,推迟温峰出现,降低温升速率,有利于热量消散。减缩剂能降低混凝土毛细孔张力,减少自收缩和干燥收缩,辅助降低开裂风险。

2.1.6 配合比设计原则

以“低水化热、低收缩、良好工作性、满足设计强度与耐久性”为目标。设计流程优先考虑温控要求,再验证力学与耐久性指标。

2.2 施工工艺优化

2.2.1 降低浇筑温度

①预冷骨料:对粗骨料喷淋冷水、风冷;细骨料遮阳、喷水降温;骨料仓保温。②冷却拌合水:使用制冷水(2℃~5℃)。③遮阳与夜间浇筑:避免高温时段浇筑,运输车、泵管覆盖保温隔热材料。

2.2.2 优化浇筑方案

(1)分层分块浇筑:将大体积结构划分为尺寸合理的浇筑块,设置后浇带或跳仓法施工,释放早期收缩应力。分层浇筑时,下层混凝土强度达到一定值后再浇上层,间隔时间不宜过长,避免形成冷缝。

(2)控制浇筑速度与层厚:避免过快浇筑导致

热量过度积聚。合理控制层厚有利于散热。

(3)埋设冷却水管系统:采用Φ25mm~32mm薄壁钢管或HDPE管,布置成蛇形网络,间距0.8~1.5m,距边缘0.5~1.0m,距表面和孔洞大于1.0m。当层高大于3m时需多层布置,需有可靠支撑固定,防止移位或压扁。

(4)通水冷却:①一期冷却(浇筑后~3天):通常使用温水来控制温升速率,防止温峰过高。流量15~25 L/min,进出口温差小于10℃。②二期冷却(温峰后~14天):通制冷水(8℃~15℃),加速内部降温,减小内外温差。需严格控制降温速率,防止冷却裂缝。

(5)智能调控:基于实时温度监测数据,动态调整进水温度、流量、通水时间甚至通水回路,实现精准控温。避免过度冷却导致表面拉应力剧增。

(6)强化表面保温保湿养护:①保温:在混凝土终凝后立即覆盖保温材料,保温层厚度需通过计算确定,需使混凝土表面等效放热系数 β 满足 $\beta \leq K/(\lambda\alpha)$ ($T_{\max}-T_a)/\Delta T_{\text{allow}}$,其中 K 为安全系数, λ 为导热系数, α 为线胀系数, ΔT_{allow} 为允许温差),特别加强棱角处、突出部位保温。②保湿:覆盖不透水薄膜或持续洒水喷雾,保持表面相对湿润大于90%,减少干缩叠加效应。养护时间不低于14天。③防风:设置挡风设施,降低表面风速,减少对流散热。

3 智能化温度与裂缝监测方法

实时精准的温度场监测是实施有效温控的前提,也是评估温控效果和裂缝风险的关键^[4]。

3.1 传感器网络布设

3.1.1 测点布置原则

测点布置需反映温度场特征,如中心最高温点、表面角点、变截面处、冷却水管附近、约束边界处等。平面网格间距1.5~3.0m,垂直方向每层至少3个点(近底、中、近顶)。

3.1.2 传感器类型

①热电偶:经济耐用,精度较高,需导线连接。②数字温度传感器:单总线,布线简化,精度较高。③光纤光栅温度传感器:抗电磁干扰,耐腐蚀,可串联复用,精度高,适合长期监测。

3.1.3 有线/无线传输

有线传输稳定可靠;无线传感网络布线灵活,适合复杂或移动结构。

3.2 分布式光纤传感技术

在钢筋绑扎阶段将传感光缆按预定路径(蛇形、网格形)绑扎固定在钢筋骨架上,覆盖关键监测区域。

光缆需预留接头与解调设备连接。

3.3 裂缝自动监测技术

3.3.1 表面裂缝监测

(1) 图像识别法: 架设高清摄像头, 定期拍摄混凝土表面图像, 利用图像处理算法自动识别裂缝位置、长度、宽度变化。

(2) 裂缝计: 在易裂区域预埋或粘贴振弦式或电阻式裂缝计, 精确测量裂缝开合度。

3.3.2 内部微裂缝监测

(1) 声发射: 捕捉混凝土内部微裂纹产生和扩展时释放的瞬态弹性波信号。通过传感器阵列定位声源位置, 评估裂缝活性和严重程度。需在混凝土中预埋 AE 传感器。

(2) 分布式光纤应变传感: 通过测量光纤应变分布异常, 间接推断内部裂缝位置。

3.4 监测数据融合与智能预警平台

(1) 数据采集与传输: 集成各类传感器数据, 通过有线、无线网络传输至中央服务器。

(2) 数据处理与分析: 实时显示温度场、应变场云图、等值线图。

(3) 预警与决策支持: 设置阈值报警, 基于人工智能预测裂缝风险等级, 结合实时数据, 动态优化冷却水参数, 调整保温措施。

(4) 融合 BIM 与数值模拟: 建立结构 BIM 模型, 集成传感器位置与监测数据。利用有限元软件进行温度场与应力场预测模拟, 可视化展示潜在高应力区与裂缝风险区。形成“监测—模拟—预警—调控”的闭环智能温控系统。

4 工程应用案例分析

某大型水电站重力坝坝段浇筑(尺寸: $L \times W \times H = 30\text{m} \times 25\text{m} \times 4\text{m}$), 基础强约束, 夏季最高温度超过 35°C , 要求严格控制裂缝, 其控制措施为

(1) 材料: P·O 42.5 水泥 +25% I 级 FA+20% S95 GGBS, 胶材总量 $300\text{kg}/\text{m}^3$, $W/B=0.40$, 聚羧酸减水剂 + 缓凝剂。 T_p 控制不超过 20°C 。

(2) 工艺: 分 2 层浇筑, 每层 2m, 间隔 5 天。埋设 3 层冷却水管 ($\Phi 32$ HDPE, 间距 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$)。覆盖两层保温棉被, 厚度 5cm 以上, 同时用塑料薄膜保湿。

(3) 监测: 布设分布式光纤 (DTS, 蛇形布置) 和 80 个 PT100 点式传感器。

(4) 效果: DTS 清晰显示温度场演变。 $T_{\max}$ 较纯水泥方案降低 18°C , 出现在浇筑后 48h。最大温差为 21.5°C 。降温速率严格控制在 $1.5^\circ\text{C}/\text{d}$ 内。冷却水管进出口平均温差 8°C 。浇筑后 60 天检查外观, 仅发现极少数小于 0.1mm 的细微裂纹, 未发现贯穿裂缝。监测数据与 MIDAS 模拟结果吻合良好。

5 结语

本文系统研究了大体积混凝土施工期温度裂缝的形成原因与防控对策, 建立了包含材料设计、工艺优化与智能监测的综合性防控体系, 得出以下结论:

1) 采用中低热水泥、大掺量优质矿物掺合料复配、严格控制胶凝材料总量和水胶比、应用高效减水剂与缓凝剂, 可有效降低水化热总量并延缓温峰出现, 显著降低内部最高温升, 有效预防温度裂缝的产生。

2) 严格控制浇筑温度是降低最终温升的有效方法; 科学分层分块浇筑能有效释放早期收缩应力, 减小约束; 冷却水管系统是调控内部温度、减小内外温差的重要手段; 智能化的通水策略, 结合实时监测数据动态调整, 是实现精准温控的保障; 及时足效的表面保温、保湿养护可显著减少表面裂缝的产生。

3) 分布式光纤传感技术提供了连续、全域、高精度的温度场与应变场监测能力, 是传统点式传感器的革新升级。结合无线传感器网络、裂缝自动识别等技术, 构建了多维度、全过程的裂缝风险感知网络。基于 BIM 与数值模拟的智能预警平台, 实现了“监测—模拟—预警—调控”的全过程管理, 极大提升了温控决策的科学性和时效性。

4) 工程实践证明, 系统性地应用上述材料、工艺与监测技术, 能够改善大体积混凝土的内外温差稳定性, 有效抑制温度裂缝的产生与发展, 显著提升工程质量和结构耐久性。

参考文献:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 中国电力出版社, 2012.
- [3] GB 50496-2018. 大体积混凝土施工标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [4] 杨孟, 苏怀智, 郭芝韵, 等. PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术在水工结构物健康监测中的可行性探讨 [J]. 中国科技论文, 2014, 9(5):499-501.