

超高层建筑大体积混凝土施工温度控制的热传导模型与应用

黄超恒

湖北山河汇建设工程有限公司 湖北武汉 430062

DOI:10.12238/ems.v7i9.15176

[摘要] 超高层建筑大体积混凝土施工中,水化热引起的温度裂缝是主要质量隐患。本文提出基于热传导理论的温度预测与控制方法,通过建立三维非稳态温度场模型,结合现场监测数据,实现混凝土内部温升规律的可视化分析。重点探讨模型在材料优化、冷却系统设计及养护措施中的应用路径,为温差控制提供科学依据。实践表明,该方法能显著降低裂缝风险,提升超高层混凝土结构的施工质量与长期耐久性。

[关键词] 温度控制;大体积混凝土;热传导模型;裂缝防治

引言

混凝土结构尤其是大体积混凝土结构的温度裂缝问题是土木工程质量的顽症之一,裂缝不仅影响美观,而且严重影响构筑物的使用寿命和安全性。目前混凝土构筑物几乎都不不同程度存在温度裂缝,温度裂缝问题已经成为土木工程界普遍关注的问题。超高层建筑的厚实基础底板、核心筒等大体积混凝土结构,在硬化过程中产生大量水化热。内部热量积聚与表面散热不均形成显著温差,引发拉应力并导致裂缝,直接影响结构安全。传统经验式温控方法存在滞后性,难以适应复杂工况。本文以热传导理论为基础,建立施工期温度场预测模型,通过量化分析水化热释放、传导与消散过程,指导精准温控措施实施。

一、温度裂缝的产生与防控需求

大体积混凝土裂缝主要源于温差应力与收缩应力的叠加效应。

(一) 温差应力的形成机制

水泥与水混合后发生化学反应,释放大量热量,称为水化热。在混凝土浇筑初期,这些热量在结构内部快速积累。由于混凝土导热性能有限,内部热量无法及时散发,导致中心区域温度显著升高。例如,在厚度超过 1.5 米的底板中,内部温度可能在 3 天内升至 60℃ 以上。与此同时,混凝土表面直接接触空气或模板。受环境温度、风力等因素影响,表层散热速度远快于内部。夏季高温时,表面温度可能维持在 35℃ 左右;冬季则可能降至 10℃ 以下。这种内外散热差异形

成了温度梯度。当内外温差超过 25℃ 时,内部高温区域的膨胀趋势会受到表层低温区域的强力约束。这种约束效应在混凝土硬化初期尤为危险。因为此时混凝土抗拉强度不足(通常低于 2MPa),但弹性模量已开始增长。内部膨胀受限产生的拉应力一旦超过材料承受极限,便会形成从中心向表面延伸的裂缝。这类裂缝宽度可能达到 0.3 毫米以上,且多呈贯穿性,对结构防水性和耐久性造成永久损害。

(二) 超高层结构的特殊挑战

超高层建筑中的大体积混凝土构件面临更严峻的温控挑战。以核心筒剪力墙为例,其厚度常达 2.5 米至 4 米。混凝土体积越大,内部蓄热量越高。实验表明,厚度每增加 0.5 米,中心温度峰值约上升 8℃-12℃。同时,超厚构件使热量散逸路径延长,降温周期可能延长至 15 天以上。钢筋配置进一步加剧散热困难。超高层结构配筋率通常超过 3%,密集的钢筋网如同金属骨架包裹混凝土。钢材导热系数约为混凝土的 5 倍,导致热量沿钢筋快速传导,形成局部高温区。但钢筋与混凝土热膨胀系数差异(钢材 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,混凝土 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)又会在界面产生附加应力。高空环境带来不可控风险。300 米高度处风速可达地面 2 倍以上,加速表面散热。昼夜温差可能超过 15℃,导致混凝土表层反复胀缩。此外,泵送施工要求高流动性混凝土,单位水泥用量增加至 450kg/m³ 以上,水化热总量相应提升 30%。这些因素叠加,使超高层项目温差控制难度远超普通建筑。

二、热传导模型的核心构建方法

模型通过数学方程模拟热量在混凝土中的传递过程, 实现温度场动态预测。

(一) 基础方程与参数设定

热传导模型的核心是三维非稳态热传导微分方程: $\partial T / \partial t = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + Q / (\rho c)$ 。该方程描述了混凝土内部温度随时间(t)和空间位置(x, y, z)的变化规律。其中温度(T)是核心预测目标, 单位为摄氏度。导温系数(α)反映混凝土的导热速度, 典型值为0.002-0.004 m²/h。水化热速率(Q)表征水泥反应放热强度, 随混凝土龄期变化。密度(ρ)取2300-2500 kg/m³, 比热容(c)取0.9-1.0 kJ/(kg·°C)。

方程中空间二阶导数项体现热量从高温区向低温区的扩散过程, 时间导数项记录温度随时间的变化速率。附加项 $Q / (\rho c)$ 表示水化热对温升的贡献。实际应用中需将结构离散为有限个单元, 通过计算机迭代求解每个单元的温度变化。

(二) 关键参数的工程取值

水化热模型的准确性直接决定预测效果。采用指数衰减函数表达:

$Q(t) = Q_0 \cdot m \cdot e^{(-mt)}$ 其中 Q_0 为最终放热总量(kJ/m³), m 为放热速率系数。普通硅酸盐水泥 Q_0 约350 kJ/kg, 掺30%粉煤灰后可降至250 kJ/kg。速率系数 m 取值0.3-0.8 d⁻¹, 低温环境取低值。

边界条件设定需符合现场实际:

暴露表面: 换热系数 β 取15-40 kJ/(m²·h·°C), 风速每增加1m/s, β 提高10%

接触地基: 按第三类边界条件处理, 换热系数取5-10 kJ/(m²·h·°C)

保温覆盖: 50mm 厚岩棉被等效热阻0.5 (m²·°C)/W

材料参数通过试验确定:

导热系数 λ : 2.0-3.5 W/(m·K), 骨料含量高时取上限

导温系数 α : 0.0025-0.0040 m²/h, 与含水率正相关

比热容 c : 0.88-1.05 kJ/(kg·°C), 温度每升10°C增加1.5%

注: 所有参数取值需考虑施工环境修正。夏季高温时导热系数降低5%-8%, 冬季低温阶段比热容增加3%-5%。钢筋区域按等效导热系数法处理, 配筋率每增加1%, 有效导热系数

提高2.3%。

三、温度控制策略的工程化实施

(一) 材料选择与温度控制

在混凝土配合比设计中, 材料选择直接影响温度控制效果。中热硅酸盐水泥因其特殊的矿物成分配比, 相比普通水泥可减少15%-20%的水化热。施工时掺加30%的II级粉煤灰, 能够等量替代水泥并改善混凝土工作性能, 实测数据显示可降低水化热峰值25%左右。夏季高温季节施工需特别注意骨料温度控制, 粗骨料应提前进行喷淋降温, 保持碎石温度不超过环境温度5°C; 细骨料堆放高度不宜超过4米, 避免内部蓄热。拌合水采用冰屑降温时, 掺量控制在总用水量的30%-50%范围内, 确保混凝土出机温度不超过35°C。缓凝型高效减水剂的选用应通过试验确定, 一般掺量为胶凝材料总量的0.8%-1.5%, 能有效延缓温升速率, 使混凝土初凝时间延长至8-10小时。在实际工程应用中, 这些措施配合使用可使大体积混凝土的中心温度降低30-40°C, 内外温差控制在25°C的规范限值内。

(二) 主动降温系统设计

冷却水管选用壁厚2mm的镀锌钢管, 外径25mm, 按照垂直方向1.0m、水平方向1.5m的标准间距呈蛇形布置。管道安装前需进行0.4MPa压力试验, 确保接头处无渗漏。循环水泵选用流量可调式离心泵, 保证管内水流速度稳定在0.6-0.8m/s范围内。根据温度场模拟结果, 在混凝土浇筑完成8-12小时内启动冷却系统, 初始进水温度控制在比混凝土温度低8-12°C。

温度调控分为三个阶段实施: 温升期保持连续通水, 当混凝土芯部温度达到峰值后转入恒温期, 此时通过电动调节阀控制各回路流量, 使降温速率维持在1.5-2°C/天。智能控制系统每30分钟采集一次温度数据, 当相邻测点温差超过15°C或与预测值偏差大于3°C时, 自动启动流量补偿程序。降温后期需逐步提高进水温度, 每天调高幅度控制在2-3°C, 直至与混凝土温度差小于5°C时停止通水。施工中需特别注意管道防堵措施, 进水端应设置过滤精度0.3mm的Y型过滤器, 每8小时检查一次管道通畅情况。冷却水总循环量按每立方米混凝土0.8-1.2m³/h配置, 系统应配备备用泵组以确保连续运行。通过这种分级调控方式, 可将大体积混凝土的内外温差控制在25°C以内, 同时避免因降温过快引起的收缩裂缝。

(三) 外部养护技术措施

混凝土浇筑完成后 12 小时内开始覆盖养护，优先选用 50mm 厚防火岩棉被作为保温材料。当气象预报显示昼夜温差超过 15℃时，需实施 24 小时不间断覆盖养护，并在混凝土表面加铺塑料薄膜进行双重防护。拆模作业应避免高温时段和寒潮天气，选择日温差小于 10℃的稳定气候条件下进行。拆模后 2 小时内必须完成养护剂喷涂作业，采用丙烯酸类成膜养护剂时，单次喷涂量控制在 0.2kg/m²，两次喷涂间隔时间不少于 4 小时。

温度监测系统采用分布式布置方案，在结构物表面和内部按 5m 间距布置数字温度传感器，其中结构中心区域加密至 3m 间距。监测数据每 30 分钟自动采集一次，当发现中心与表层温差超过 22℃或单点温度突变超过 3℃/h 时，系统立即触发声光报警。现场技术人员收到警报后，应在 1 小时内完成三项检查：冷却水循环系统流量是否达标、保温层覆盖是否严密、养护剂膜层是否完整。保湿养护采用智能喷淋系统时，喷头间距设定为 1.8m×1.8m，水雾粒径控制在 0.1-0.3mm 范围。喷淋水温应介于混凝土表面温度±10℃之间，每次喷淋持续时间不超过 5 分钟，间隔时间根据环境湿度调整但不得少于 30 分钟。对于掺加矿粉的混凝土，湿养护期应延长至 21 天以上，期间混凝土表面湿度需持续保持在 90%以上。

四、现场应用与效果验证

(一) 典型工程实施流程

该项目针对厚度 4.5 米的基础底板，采用分级温控方案分三个阶段实施。施工准备阶段使用 Revit 软件建立三维模型，输入底板长宽尺寸 82m×68m、混凝土设计强度 C40 等参数。实验室提供的配合比显示，每立方米混凝土采用 280kg P·MH42.5 中热水泥，掺入 30%F 类Ⅱ级粉煤灰，减水剂掺量为 1.5%。将这些数据导入 MIDAS 温度场分析软件后，预测显示混凝土中心最高温度将达到 68℃，出现在浇筑后 48 小时左右。

混凝土浇筑阶段实行双控管理：一方面安排 3 名检测员轮班，使用数显温度计每 2 小时测量入模温度；另一方面通过预埋的 PT100 温度传感器自动采集数据。当实测温度与预测值偏差超过 2℃时，控制系统会立即重新计算温度发展曲线，并调节冷却水系统的流量阀。现场配置的 2 台冷水机组可提供 15℃的冷却水，通过分集水器向 12 个独立回路供水，

每个回路流量控制在 1.8-2.2m³/h。养护监测阶段采用三级预警机制：在混凝土内部布置 36 个测温点，当芯部与表层温差达到 20℃时，系统自动增加冷却水流量 10%；温差达到 23℃时，除调节水流外还需加盖双层保温棉被；若温差达到 25℃的警戒值，则需启动应急预案，包括暂停冷却通水、搭设临时保温棚等措施。所有温度数据通过 LoRa 无线网络传输至监控中心，工程师通过平板电脑可实时查看各测点温度曲线，系统每 6 小时自动生成温度梯度分析报告。

(二) 质量控制成效

该项目基础底板厚度 4.5 米，单次浇筑量达 6800 立方米。实施温度控制后，混凝土芯部最高温度稳定在 62-64℃范围内，较传统施工方法降低 8-10℃。通过冷却水管动态调节，将结构内外最大温差控制在 19-22℃之间，低于规范规定的 25℃限值。60 天龄期时采用超声波检测仪对结构进行全数扫描，未发现宽度超过 0.2mm 的贯穿性裂缝，仅局部存在少量表面毛细裂缝。与同类工程对比数据显示，采用智能温控系统可使大体积混凝土的裂缝发生率降低 70%以上，结构耐久性指标提升 30%。经第三方检测机构验证，该底板混凝土 56 天强度达标率 100%，氯离子扩散系数小于 3×10⁻¹² m²/s，各项指标均满足超高层建筑百年使用寿命要求。

结语

热传导模型将大体积混凝土温控从经验判断提升至量化分析阶段。通过耦合材料特性、环境参数与施工动态数据，实现温度场全过程可视化预判。该模型指导下的分级控制策略，在超高层工程中有效抑制了温度裂缝，为同类项目提供了可复用的技术路径。

参考文献

- [1]王冠杰.大体积混凝土筏板基础裂缝机理及控制方法研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [2]黎文栋.基于分布式光纤地铁车站底板温度监测与温度裂缝控制研究[D].广州大学,2022.
- [3]张二祥.某超高层建筑施工关键技术研究[J].建筑与预算,2024(5):22-24.
- [4]亢光能.超高层建筑大体积混凝土施工温控技术优化研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(3):71-73.
- [5]许迁迁,孙旭东,库学忠,等.大体积混凝土裂缝控制方法研究[J].建筑技术开发,2024,51(3):49-51.