

大体积混凝土基础温度裂缝控制技术优化与数值模拟研究

欧阳军 王金童 张得科

甘肃送变电工程有限公司, 甘肃兰州, 730030;

摘要: 大体积混凝土基础在建筑工程中应用广泛, 然而温度裂缝问题严重影响其结构性能与耐久性。本文聚焦大体积混凝土基础温度裂缝控制, 深入剖析温度裂缝产生的机理, 从材料选择与配合比优化、施工工艺改进、养护措施完善等方面提出技术优化策略。同时, 运用数值模拟手段, 借助有限元软件模拟大体积混凝土基础施工过程中的温度场与应力场变化, 为温度裂缝控制提供科学依据。研究成果对提升大体积混凝土基础施工质量、有效防控温度裂缝具有重要的理论与实践意义。

关键词: 大体积混凝土; 温度裂缝; 控制技术; 数值模拟

DOI: 10.69979/3029-2727.25.12.015

引言

随着建筑工程规模扩大, 大体积混凝土基础广泛应用于高层建筑、桥梁等领域。因其体积大, 水泥水化热难散发, 易形成大温度梯度产生温度应力, 超过抗拉强度便会开裂, 影响结构安全与耐久性。当前建筑更复杂, 该问题成工程界热点, 故本文通过理论分析、数值模拟优化温控技术, 模拟温应力场变化, 为实际工程提供参考。

1 大体积混凝土基础温度裂缝产生机理

1.1 水泥水化热

水泥水化过程会释放大热量, 使混凝土内部温度快速上升。大体积混凝土基础因体积大、热量难散发, 内部温度常达 60°C – 80°C 甚至更高。随着时间推移, 内部温度持续升高, 而表面受环境影响温度较低, 易形成显著温度梯度。例如某高层建筑基础浇筑后 3–5 天, 内部温度峰值达 70°C , 表面仅 30°C , 内外温差达 40°C 。这种温度梯度会导致混凝土内部膨胀、表面收缩, 当变形受约束时, 便会产生温度应力, 为裂缝产生埋下隐患^[1]。

1.2 温度梯度与约束条件

混凝土内外温度梯度是诱发温度裂缝的关键因素。除水泥水化热致内部高温外, 环境温度变化会进一步加剧梯度形成, 如寒冷季节表面温度骤降、内部温度仍高, 使梯度大幅增大。同时, 大体积混凝土基础施工中受地基、模板及自身内部约束, 地基约束会限制基础自由变形, 导致内部温度应力无法释放, 进而引发裂缝。例如桥梁承台施工时, 因承台与地基紧密连接, 地基约束作

用显著, 在温度应力下承台表面易出现裂缝。

1.3 混凝土自身特性

混凝土自身特性对温度裂缝影响显著。其导热系数低, 热量在内部传递慢, 加剧了温度分布不均, 致使内部温度居高难降, 内外温差进一步拉大。随着龄期增长, 弹性模量逐渐增大, 在温度变化时, 约束了混凝土自身的温度变形, 促使温度应力不断增加。而且, 混凝土抗拉强度相对较低, 一旦温度应力超出此限度, 裂缝便会随之出现。不同配合比下, 混凝土热学与力学性能有别, 对温度裂缝的敏感程度也不同。例如, 水泥用量多的混凝土, 水化热大, 温度裂缝出现几率更高。

2 温度裂缝控制技术优化

2.1 材料选择与配合比优化

2.1.1 水泥品种选择

优先选用低热水泥, 如低热矿渣硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥等。这些水泥在水化过程中释放的热量相对较少, 能有效降低混凝土内部的温升。例如, 在某大型水利工程大体积混凝土基础中, 采用低热矿渣硅酸盐水泥, 相较于普通硅酸盐水泥, 混凝土内部最高温度降低了 8°C – 10°C 。同时, 合理控制水泥用量, 在满足混凝土强度和施工性能要求的前提下, 尽量减少水泥用量, 以降低水化热的产生^[2]。

2.1.2 掺合料的应用

在混凝土中掺加粉煤灰、矿渣粉、硅灰等适量矿物掺合料, 可替代部分水泥以减少用量、降低水化热, 还能改善工作性能与耐久性。其中, 粉煤灰凭火山灰活性与水泥水化产物氢氧化钙二次反应, 降低内部碱性并提升抗化学侵蚀能力; 矿渣粉则细化内部孔隙, 提高密实

度与抗渗性。例如某高层建筑筏板基础混凝土中，掺 20%-30%粉煤灰后，绝热温升降低 10℃-15℃，且和易性改善，便于施工振捣。

2.1.3 骨料优化

选择热膨胀系数较小的骨料，如石灰岩、玄武岩等，可减少混凝土在温度变化时的变形。同时，控制骨料的粒径和级配，确保骨料的良好级配，使混凝土在满足施工和易性的前提下，减少水泥浆用量，从而降低水化热^[3]。例如，采用连续级配的粗骨料，可使混凝土的空隙率降低，水泥用量相应减少，进而降低混凝土的温升。

2.1.4 外加剂的使用

使用减水剂可以在保持混凝土工作性能不变的情况下，减少用水量，降低水灰比，提高混凝土的强度和耐久性。高效减水剂还能改善水泥颗粒的分散性，延缓水泥水化速度，降低水化热峰值。膨胀剂的加入可使混凝土在硬化过程中产生一定的膨胀变形，补偿混凝土的收缩，抵消部分温度应力，防止裂缝的产生。例如，在某大型地下室底板大体积混凝土中，使用减水剂和膨胀剂双掺技术，有效控制了混凝土的坍落度损失，提高了混凝土的抗裂性能。

2.2 施工工艺改进

2.2.1 混凝土浇筑方案优化

采用分层分段浇筑方法，控制每层浇筑厚度和浇筑时间间隔。分层浇筑可使混凝土内部的水化热及时散发，避免热量过度积聚。合理安排浇筑顺序，从短边开始向长边浇筑，或从中间向两端浇筑，确保混凝土在浇筑过程中的均匀性和整体性。例如，在某大型商业综合体大体积混凝土基础施工中，采用分层浇筑，每层浇筑厚度控制在 300-500mm，浇筑时间间隔根据混凝土的初凝时间和温度情况进行调整，有效降低了混凝土内部温度。

2.2.2 降低混凝土入模温度

在夏季高温季节施工时，采取措施降低混凝土原材料的温度。对骨料进行遮阳降温，在骨料堆上搭设遮阳棚，避免阳光直射。用低温水或冰水搅拌混凝土，降低拌和水的温度。例如，通过在搅拌水中加入冰块，可使混凝土入模温度降低 3℃-5℃。合理安排浇筑时间，选择在夜间或气温较低的时段进行混凝土浇筑，减少环境温度对混凝土入模温度的影响。

2.2.3 混凝土振捣与抹压

加强混凝土振捣，确保混凝土密实，排除混凝土内部的气泡和空隙，提高混凝土的强度和抗渗性。在混凝土初凝前进行二次抹压，消除混凝土表面的早期裂缝。二次抹压可使混凝土表面更加密实，提高表面混凝土的

抗拉强度，防止表面裂缝的产生。例如，在某桥梁承台大体积混凝土施工中，通过严格控制振捣时间和振捣间距，以及及时进行二次抹压，有效减少了混凝土表面裂缝的出现^[4]。

2.3 养护措施完善

2.3.1 保温保湿养护

在混凝土浇筑完成后，及时进行保温保湿养护。采用覆盖塑料薄膜、草帘、棉被等保温材料，减少混凝土表面的热量散失，延缓混凝土表面温度的下降速度，减小混凝土内外温差。保持混凝土表面湿润，防止混凝土因失水而产生干缩裂缝。例如，在某水工大体积混凝土基础施工中，混凝土浇筑后立即覆盖塑料薄膜和草帘，养护时间不少于 14 天，有效控制了混凝土温度裂缝的产生。

2.3.2 温控监测与调整

在大体积混凝土基础内部和表面布置温度传感器，实时监测混凝土的温度变化情况。根据监测数据，及时调整养护措施。当混凝土内外温差接近或超过 25℃（规范允许值）时，增加保温材料厚度或采取其他升温措施；当混凝土表面温度过低时，可采用加热水喷淋等方法提高表面温度。例如，在某高层建筑大体积混凝土基础施工中，通过温控监测系统，及时发现混凝土内部温度过高、内外温差过大的问题，采取增加保温棉被层数、向养护水中加热等措施，使混凝土内外温差控制在合理范围内。

3 大体积混凝土基础温度场与应力场数值模拟

3.1 数值模拟原理与方法

3.1.1 热传导理论

大体积混凝土基础在施工过程中的温度场变化遵循热传导理论。热传导方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

其中， ρ 为混凝土密度， c 为混凝土比热容， T 为温度， t 为时间， k 为混凝土导热系数， Q 为水泥水化热生成速率。通过求解该方程，可以得到混凝土在不同时刻、不同位置的温度分布。

3.1.2 有限元方法

有限元方法是连续的求解域离散为有限个单元的组合物，通过对每个单元进行分析，得到整个求解域的近似解。在大体积混凝土基础温度场和应力场数值模拟中，利用有限元软件（如 ANSYS、MIDAS 等）将混凝土基础划分成众多的单元，对每个单元建立热传导和力

学平衡方程, 然后进行组装求解, 得到整个混凝土基础的温度场和应力场分布。

3.2 数值模型建立

3.2.1 几何模型构建

根据实际大体积混凝土基础的尺寸和形状, 在有限元软件中建立相应的几何模型。对于复杂的基础结构, 可进行适当简化, 但要确保关键部位和主要特征的准确性。例如, 对于带有桩基础的大体积混凝土承台, 可将桩基础简化为等效的边界约束, 重点关注承台部分的温度场和应力场变化。

3.2.2 材料参数设定

输入混凝土的热学性能参数(如导热系数、比热容、密度)、力学性能参数(如弹性模量、泊松比、抗拉强度)以及水泥水化热参数(如水泥水化热放热速率函数)。这些参数可通过试验测定或参考相关规范和经验取值^[5]。例如, 通过混凝土绝热温升试验, 得到水泥水化热放热速率与时间的关系, 将其作为数值模拟的输入参数。

3.2.3 边界条件设置

考虑混凝土与外界环境的热交换, 设置对流边界条件和辐射边界条件。对流边界条件用于描述混凝土表面与空气之间的热量传递, 辐射边界条件用于考虑混凝土表面与周围环境的热辐射。同时, 根据实际情况设置基础与地基之间的接触条件、约束条件等。例如, 假设基础底面与地基之间为完全接触, 约束基础底面的竖向位移; 基础侧面与模板之间设置一定的热阻, 模拟模板对混凝土散热的影响。

3.3 模拟结果分析

3.3.1 温度场模拟结果

通过数值模拟可获取大体积混凝土基础不同施工阶段的温度场分布云图与温度-时间变化曲线。分析结果能掌握内部温度变化规律, 明确温度峰值的位置、出现时间及温度梯度分布。例如, 从云图可见基础中心常为内部最高温区域, 随时间推移温度向四周扩散, 表面受环境影响降温快, 形成明显梯度; 曲线则显示浇筑后内部温度快速上升, 3-5 天达峰值后逐渐下降。

3.3.2 应力场模拟结果

结合温度场模拟结果与混凝土力学性能参数, 可计算出大体积混凝土基础的应力场分布。分析该结果能明确内部应力集中区域与应力大小, 判断是否超抗拉强度, 进而预测裂缝可能出现的位置与时间。例如, 从应力场云图可见, 混凝土表面及内部薄弱部位易应力集中, 拉应力超限时可能开裂。模拟不同时刻应力场变化, 还能

观察应力发展趋势, 为温控防裂提供依据。

3.3.3 模拟结果验证与应用

将数值模拟结果与实际工程的温、应力监测数据对比, 验证并评估模型准确性。若两者吻合度高, 说明模型可靠, 可指导后续工程温控防裂。依据模拟结果优化施工方案与温控措施: 如模拟显示内部温度超允许范围, 可调整浇筑方案、增设冷却水管; 若发现局部应力集中易致裂缝, 可采取加强配筋或设膨胀加强带等措施。

4 结论

本文针对大体积混凝土基础温度裂缝控制展开研究, 结论如下: 其一, 温度裂缝由水泥水化热引发的温度梯度、外部约束及混凝土自身热力学特性共同导致, 三者相互作用加剧风险。其二, 材料上优化配合比(选低热水泥、掺矿物掺合料等)、施工中改进浇筑振捣工艺、养护时强化保温保湿与温控监测, 可有效降低裂缝概率。其三, 基于热传导理论与有限元法的数值模型, 能精准模拟温应力场变化, 为温控优化提供依据, 对提升基础稳定性与耐久性具实践价值。

参考文献

- [1] 常旭东, 何鑫, 孙西文. 水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J]. 水泥, 2025, (09): 116-119.
- [2] 张骏首, 商和松, 李建锋, 等. 建筑工程中大体积混凝土施工裂缝控制技术[J]. 水泥, 2025, (09): 155-157.
- [3] 孙嘉良, 张兰林. 近场地震动下高性能混凝土框架结构倒塌机理与抗倒塌设计[J]. 水泥, 2025, (09): 107-110.
- [4] 林小雄. 高层厂房建筑混凝土施工裂缝防治技术研究[J]. 水泥, 2025, (09): 128-130.
- [5] 袁邦陆. 水利工程施工中控制混凝土裂缝技术分析[J]. 价值工程, 2025, 44(25): 81-84.

作者简介: 欧阳军, 性别: 男, 民族: 汉, 出生日期: 1979 年 2 月, 籍贯: 安徽萧县, 职务/职称: 高级工程师, 学历: 本科; 研究方向: 输电线路施工。

王金童, 性别: 男, 民族: 汉, 出生日期: 1979 年 8 月, 籍贯: 甘肃兰州, 职务/职称: 高级工程师, 学历: 本科, 研究方向: 输电线路施工。

张得科, 性别: 男, 民族: 汉族, 出生日期: 1977 年 12 月, 籍贯: 河南浚县, 职务/职称: 高级工程师, 学历: 本科, 研究方向: 输电线路工程。