大体积混凝土裂缝控制施工技术应用研究

李建新

单县村镇建设和房屋征收服务中心　山东　菏泽　274300

摘　要：大体积混凝土施工中，由水化热引起的温度应力及收缩变形是导致结构开裂的主要因素，裂缝控制直接关系到工程结构的整体性、耐久性与安全性。本文从大体积混凝土裂缝成因机理入手，系统分析了温度梯度控制、配合比优化、约束条件缓解及施工养护等关键环节的技术逻辑；在此基础上，从材料优选、温控设计、施工工艺优化及信息化监测等方面，构建了覆盖施工全过程的裂缝控制技术体系，并探讨了智能温控与数字孪生等新兴技术在裂缝精准管控中的应用前景，旨在为大体积混凝土工程的裂缝防治提供系统的技术与管理参考。

关键词：大体积混凝土；裂缝控制；水化热；温度应力；施工技术

引言

大体积混凝土因断面尺寸大（> 1m），水化热积聚导致内外温差显著，在约束下产生温度拉应力，当超过抗拉强度时即引发裂缝。此类裂缝不仅影响外观和整体性，更作为侵蚀介质通道加速钢筋锈蚀和混凝土劣化，严重威胁结构安全。工程界长期秉持“抗放结合”思路：通过材料选择降低水化热以“抗”，借助构造措施和温控工艺释放应力以“放”。尽管已有大量研究与实践，但随着工程规模大型化和结构复杂化，裂缝控制仍面临严峻新挑战，需持续深化技术应对。

1 大体积混凝土裂缝成因机理分析

1.1 温度裂缝的形成机制

温度裂缝是大体积混凝土主要裂缝类型，其形成分三个阶段。升温阶段：水泥水化放热致内部迅速升温，因导热系数低（1.5 ~ 2.5W/(m · K)），中心比表面高 20 ~ 40℃，内部膨胀受约束产生压应力，表面受拉应力。降温阶段：峰值后热量散失，混凝土收缩。因内外速率差异，内部受外层约束转为拉应力状态。当综合拉应力超抗拉强度即开裂[1]。危险期有两个高峰：一是浇筑后 3 ~ 5 天水化热峰值期，此时内外温差最大；二是 7 ~ 14 天降温收缩期，此时弹性模量显著增长而抗拉强度增长滞后，约束应力迅速增大，开裂风险最高。

1.2 收缩裂缝的分类与成因

除温度收缩外，大体积混凝土还存在自身收缩和干燥收缩。自身收缩源于水泥水化过程中绝对体积的减少，在高水胶比混凝土中数值较小，但在低水胶比的高性能混凝土中不可忽视，可占收缩总量的 30% ~ 50%。干燥收缩是混凝土内部水分向外界蒸发引起的体积减小，在大体积混凝土中，由于内部湿度场分布不均匀，表面干燥收缩受到内部约束，易产生表面细密裂纹。塑性收缩发生在混凝土浇筑后初凝前，表面水分蒸发速率超过泌水上升速率时产生毛细管负压，导致表面龟裂，虽不深入但影响外观和表层质量。

1.3 约束条件与应力累积效应

裂缝的形成不仅取决于混凝土自身的变形特性，更与约束条件密切相关。大体积混凝土的约束分为外部约束和内部约束。外部约束来自地基、相邻已浇块或模板的固定作用，当混凝土降温收缩时，外部约束限制自由变形，在结构内部产生拉应力，约束越强、结构尺度越大，应力水平越高。内部约束源于混凝土自身温度场的不均匀性——核心高温区膨胀受到表层低温区的约束，形成自平衡应力系统。在混凝土温度变化和收缩过程中，这两种约束相互叠加，在应力集中部位（如截面突变处、孔洞周边）达到峰值，成为裂缝首先出现的“突破口”。

2 材料优选与配合比优化设计

2.1 水泥品种的合理选择

水泥品种是控制水化热的关键。在满足强度等级要求的前提下，应优先选用低热水泥——矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥或低热硅酸盐水泥的水化热显著低于普通硅酸盐水泥。同强度等级下，矿渣水泥 3 天水化热较普通水泥降低约 30% ~ 40%，7 天降低约 20% ~ 30%。水泥的细度和矿物组成同样影响水化速率——比表面积过高的水泥早期水化过快，热量集中释放，应避免使用[2]。工程中也可采用中热硅酸盐水泥作为替代方案，在降温效果和强度发展之间取得折中。

2.2 矿物掺合料的掺入效应

粉煤灰和矿渣粉是降低水化热最经济有效的掺合料。粉煤灰取代部分水泥后，降低水化热主要通过稀释效应和二次火山灰反应的双重作用，优质粉煤灰的取代率可达 20%～30%，水化热降低约 15%～25%。磨细矿渣粉的取代率可更高（30%～50%），且对后期强度发展有利，但其掺量较大时会延长凝结时间，需结合施工工期综合考虑。硅粉由于比表面积大、活性高，掺量一般控制在 5%～10%，可提高早期强度但水化热降低作用有限，不宜作为主降热手段。

2.3 外加剂的应用

高效减水剂是降低水胶比、减少水泥用量的必要手段。通过掺入聚羧酸系高效减水剂，在保持坍落度不变的情况下，可降低用水量 15%～25%，相应减少水泥用量，间接降低水化热。缓凝剂的作用在于延缓水泥水化放热速率，使热量释放时间延长、温度峰值降低——缓凝时间一般控制在 4～8 小时，既能保证施工连续性，又能有效削减温升峰值。膨胀剂通过生成钙矾石产生适度膨胀，补偿混凝土的收缩，但应严格控制掺量，过量膨胀反而有害。

2.4 配合比设计原则

大体积混凝土配合比设计应遵循“低水胶比、低水泥用量、大掺量矿物掺合料”的原则。在满足设计强度和工作性的前提下，每立方米混凝土水泥用量宜控制在 250～350kg 范围内，水胶比控制在 0.35～0.50 之间。粗骨料宜选用连续级配、粒径较大的碎石（最大粒径可达 40～80mm），在保证泵送要求的前提下尽可能增大骨料粒径，减少浆体体积。细骨料宜选用中粗砂，细度模数控制在 2.5～3.0 之间，含泥量不宜大于 2%。配合比设计确定后，需进行绝热温升试验、抗裂性能试验等专项验证，确认温升和收缩指标符合工程要求。

3 施工温控技术与工艺优化

3.1 混凝土入模温度控制

降低入模温度是控制温升的起点。当环境温度较高时，可采取以下措施：对粗骨料进行洒水冷却或搭棚遮阳，降低骨料温度（骨料每降低 1℃，混凝土出机温度降低约 0.4～0.6℃）；用冰水或加冰代替部分拌和水（冰块代替率一般为 20%～50%）；在胶凝材料中增加矿渣粉等较低热材料比例；选择夜间气温较低时段进行浇筑。通过综合措施，大体积混凝土的入模温度一般应控制在 25～30℃以下，炎热地区应尽量控制在 28℃以下。

3.2 分层分段浇筑技术

分层分段浇筑是控制温度应力的基本施工方法。对于大体积基础底板，可采用斜面分层浇筑法（坡度一般为 1:6～1:8），每层厚度控制在 300～500mm，层间间歇时间以不超过下层混凝土初凝时间为限，避免形成冷缝。对于超长结构，可设置后浇带或施工缝将结构分段，分段长度一般为 20～40m，待早期温度收缩变形完成后再浇筑后浇带混凝土（一般间隔不少于 42 天）[3]。分层浇筑可减小单次浇筑体量，降低温度峰值，同时使各层之间形成施工缝释放部分应力。

3.3 埋设冷却水管循环降温

对于厚度超过 2m 的大体积混凝土，埋设冷却水管是主动控温的有效技术措施。冷却水管一般采用直径 25～50mm 的薄壁钢管或 PE 管，水平间距为 1.0～1.5m，垂直间距为 0.5～1.0m，呈蛇形布置。冷却水通水时机至关重要——过早通水会使表面温度骤降，增大内外温差；过迟则错过峰值控温窗口。一般通水时间为混凝土浇筑后 6～12 小时开始，通水持续 7～14 天。冷却水温度与混凝土内部温差不宜过大，一般控制在 20～25℃以内，防止冷击产生热应力裂缝。通水流量和速度应根据实测温度动态调整，实现精细化温控。

3.4 养护与表面保温措施

大体积混凝土养护的核心目标是“外保温、内散热”——在内部降温的同时，通过对表面进行保温覆盖，降低表面散热速率，减小内外温差。常用的覆盖材料包括塑料薄膜、草袋、棉毡和聚苯乙烯板等，覆盖厚度应根据热工计算确定。在冬季施工时，模板外侧还应增设保温层（如岩棉板），防止冷空气直接接触混凝土表面。养护周期一般不少于 14 天，降温阶段应严格控制降温速率不超过 2℃/d，当实测内外温差小于 15℃时方可逐步解除覆盖。

4 裂缝控制的辅助技术与信息化手段

4.1 温度实时监测系统

准确掌握混凝土内部的温度分布是科学控温的基础。在混凝土浇筑前，按结构尺寸在代表性位置预埋热电偶或光纤温度传感器，测点布置应包括中心点、表层点、中间点和环境温度测点。数据采集频率应为升温阶段每 1～2 小时一次，降温阶段每 4～6 小时一次。实时监测数据应及时绘制温度-时间曲线和温度场等温线图，为冷却水通水策略和保温覆盖措施的调整提供直接依据。

4.2 应力应变监测与预警

在温度监测基础上，在关键部位（如截面突变区、约束较强区域）埋设应变计或应力计，获取混凝土内部

应力发展的第一手数据。将实测应力值与混凝土当前龄期的抗拉强度进行比较，评估开裂风险。当应力接近强度的 70%时发出预警信号，提示加强温控措施或调整施工方案。应力监测与温度监测相结合，可构建从“温度感知”到“应力评估”再到“风险预警”的完整闭环。

4.3 智能温控与自动调节系统

在大体积混凝土施工中，基于物联网的智能温控系统逐步得到应用。该系统通过温度传感器实时采集数据，由控制器将实测温度与预设的理想温度曲线进行对比，依据温差和温降速率偏差，自动调节冷却水流量、调节保温覆盖层厚度，形成闭环自动控制[4]。对于设置冷却水管的工程，智能调节阀可根据各区域温度实测值独立调整通水流量，实现差异化精准控温，克服了传统手动调节难以对多路水管同步控制的局限。

4.4 数字孪生驱动的裂缝风险预测

数字孪生技术在大体积混凝土施工中的应用代表了裂缝控制的前沿方向。基于材料热力学参数、结构几何模型和环境边界条件，建立温度场和应力场的数字孪生模型，进行施工全过程仿真分析，在虚拟空间预测不同施工方案下的温度和应力演化路径，辅助优化施工参数。施工过程中，实时监测数据源源不断地反馈至数字模型，驱动模型动态修正，使后续施工阶段的裂缝风险预测更加精准，真正实现从“经验判断”向“数据驱动的科学决策”的跨越。

5 管理措施与质量控制体系

5.1 施工组织设计与专项方案编制

大体积混凝土施工前必须编制专项施工技术方案，内容包括：原材料选用与配合比设计；温度计算与温控指标确定（绝热温升、内外温差、降温速率等）；浇筑方案设计（分层厚度、浇筑顺序、浇筑速率）；冷却水管布置与运行方案；养护与保温方案；测温方案与应急预案。专项方案应通过专家论证后方可实施，施工过程中应严格按方案执行，任何变更须经原审批程序确认。

5.2 施工过程质量检验制度

建立从材料进场到养护完成的全程质量检验制度。原材料每批进场均应按规范进行复试，配合比须根据骨料含水率实时调整。浇筑过程中，每班至少进行两次坍落度检测和混凝土温度测量，并按规定留置标准养护和同条件养护试件，同条件试件应与结构同位置同养护条件放置。拆模前须进行温度梯度检查，确认满足拆模条件后方可操作。

5.3 应急预案与裂缝处理

针对可能出现的温度超标和裂缝风险，应预先制定应急预案：冷却系统故障时的备用供水方案、停电时的备用发电机、极端天气（暴雨、大风、寒潮）时的遮盖和保护措施等。对于裂缝出现后的处理，根据裂缝性质和宽度分级处置——表面龟裂可采用环氧树脂涂刷封闭；缝宽 0.2 ~ 0.3mm 的浅层裂缝可采用低压注浆；贯穿性裂缝或缝宽超过 0.3mm 者，须经设计单位验算和专项加固处理。

6 结语

大体积混凝土裂缝控制涉及材料、力学及施工等多学科。本文从温度应力、收缩变形和约束三大成因入手，构建了涵盖材料优选（低热水泥、掺合料等）、配合比优化、施工工艺控制（温控、分层浇筑）及信息化监测的全链条技术体系。核心观点认为：裂缝控制是“抗放结合”的系统工程，“抗”靠材料优化降低水化热并提高抗裂性，“放”通过分层浇筑、冷却降温及养护释放应力；信息化监测则是实现动态精准控制的“神经系统”。未来，随着智能传感、数字孪生及 AI 技术发展，该技术将向全过程、全要素的数字化精准管控演进，为超大型结构安全建造提供坚实保障。

参考文献

[1] 王铁梦, 周士琼, 韩素芳. 大体积混凝土温度裂缝控制理论与工程实践 [J]. 工业建筑,2023,53(3):1-10.

[2] 阎培渝, 张林, 王强. 低热水泥在大体积混凝土中的应用研究 [J]. 建筑材料学报,2022,25(6):587-595.

[3] 刘加平, 冉千平, 刘建忠. 大掺量矿物掺合料混凝土水化热调控技术综述 [J]. 硅酸盐学报,2023,51(8):1973-1984.

[4] 张希黔, 李志强, 王洪涛. 大体积混凝土冷却水管温控技术优化研究 [J]. 施工技术,2024,53(2):56-64.