

大体积混凝土温控防裂施工技术探讨

张振武 石勇刚

湖北水总水利水电建设股份有限公司 湖北 钟祥 431900

摘要：为解决大体积混凝土施工中的温控防裂问题，探讨温控防裂施工技术的重要性及应用。分析温度应力对混凝土结构的影响，阐述裂缝控制的必要性，并综述当前温控防裂技术的研究现状。通过研究温度控制方法、配合比设计、浇筑工艺优化及温控防裂材料的应用，结合实际工程数据，论证各项技术的适用场景与效果。同时，识别施工过程中的问题，提出解决方案与技术改进措施。结论显示，合理温控与防裂措施能显著提高工程质量，确保结构安全。

关键词：大体积混凝土；温控防裂；配合比设计；浇筑工艺优化

引言

混凝土热力学特性表明，大体积混凝土因胶凝材料水化热积聚易引发温度梯度，当温度应力超过混凝土抗拉强度时，将导致结构开裂^[1]。该问题在桥梁锚碇、高层建筑基础等工程中尤为突出，如苍容浔江大桥锚碇施工通过优化冷却水管布置与通水参数，使混凝土内部最高温度降低8.2°C，有效控制了裂缝发展^[1]。城市超高层建筑基础施工实践显示，采用分层浇筑结合表面保温措施，可使混凝土内外温差控制在25°C以内，显著提升结构耐久性^[2]。热应力耦合分析表明，大体积混凝土开裂本质是温度场与应力场相互作用的结果^[3]。现有研究多聚焦于单一温控措施，而智能化监控技术通过埋设温度传感器与应力监测装置，可实时反馈混凝土内部状态，为动态调整温控参数提供依据^[3]。

1 大体积混凝土温控防裂的重要性

1.1 温度应力对混凝土结构的影响

混凝土热力学理论表明，温度应力源于混凝土内部与外部环境的温差效应，是大体积混凝土施工中产生裂缝的核心诱因之一^[4]。当混凝土内部温度差异超出允许的限值，产生的拉应力就会比其抗拉承载能力高，引发结构性贯穿裂缝。基于热传导原理，大体积混凝土在胶凝材料水化过程中释放的热量会使内部温度升高到60~80°C。若没有有效温度控制手段，混凝土内外区域之间可能出现超过25°C的温差，从而引发较强的温度应力。此类应力效应不但会削弱结构的即时稳定性能，还会凭借应力松弛机制削弱混凝土的长期耐久性，进而在结构整个服役周期内埋下安全隐患。

1.2 裂缝控制的必要性

按照混凝土断裂力学理论，裂缝的存在会明显改变结构内部应力分布模式。当裂缝宽度超过0.2mm，混凝土

碳化进程就会加速，其深度变化趋势像指数函数，进而让钢筋锈蚀速度提升3到8倍。基于结构可靠性理论，裂缝引发的刚度降低会让结构在承受荷载时的变形程度提高20%至40%左右。这种变化会直接削弱结构的正常使用性能。在桥梁工程领域，要是承台部位有裂缝出现，可能会让支座体系发生位移，接着使上部结构产生额外应力；而在高层建筑结构里，核心筒区域的裂缝会减少整体结构的抗侧向刚度，从而对结构的抗震能力产生不好的影响。裂缝宽度达到0.1mm的时候，结构预期使用寿命会减少大约三成。在海洋和化学侵蚀环境下，氯离子的扩散速度会随着裂缝尺寸变大呈现出非线性加速的特点。

1.3 温控防裂技术的研究现状

近年来，全球科研单位在大体积混凝土的温度调控以及裂缝防控技术上有了重要突破。在温度控制方法方面，智能温控系统通过埋设分布式温度传感器，实现混凝土内部温度场的实时监测与反馈调节^[4]。该系统可以精准调节冷却水流量，严格把控混凝土内外温差在15°C以下，和传统方式相比，能让裂缝出现的概率降低40%。在材料应用研究领域，开发应用低热水泥、膨胀剂等新型材料，显著降低了混凝土的绝热温升，幅度达10~15°C。同时，其自生体积膨胀率提升到 2×10^{-4} 水平，能有效抵消收缩变形的影响。用有限元方法耦合仿真分析温度场和应力场，能精准模拟各种施工环境里温度应力的变化趋势，给冷却管道布设间距的合理调整提供理论支持。实际工程应用表明，借助数值仿真来优化温度控制策略，能有效降低混凝土内部最高温度，降幅在8~12°C，同时让温度应力最大值减少15%~20%。智能化管理策略则利用现代信息技术手段，实现水利工程的远程监控、数据分析与智能决策，提高维护效率和管理水平。

2 大体积混凝土温控防裂技术的应用

2.1 温度控制方法

大体积混凝土施工时，温度调控是避免裂缝出现的关键。冷却水循环技术通过埋设冷却水管，利用循环水带走混凝土内部热量，有效降低水化热峰值，适用于高温季节或高强度等级混凝土施工^[5]。表面覆盖技术用保温性材料（像聚乙烯泡沫板、岩棉被）把混凝土外层覆盖起来，降低结构内外温差，避免因表层温度突然下降出现梯度型温差裂缝。采用预埋金属管道和循环冷却系统配合来控制温度的办法，能精准调控混凝土内部温度，这种工艺特别适合构造形式复杂或者体量较大的混凝土施工情况。方法选取要综合考虑工程体量、环境气温和混凝土热工特性，经系统优化分析，使温度场分布均匀。

2.2 配合比设计

水泥用量是调控水化热效应的核心参数，减少每单位体积的水泥掺量（选用低热水泥品种或添加粉煤灰、矿渣微粉等无机矿物掺合组分），能有效抑制水化过程中的热量释放强度。骨料级配的优化就是合理调整粗细骨料的配比，改善混凝土内部孔隙的分布状况，提升热传导效能，减轻温度应力局部集中的趋势。外加剂类型的选取特别重要，就像缓凝型高效减水剂，能让混凝土的凝结过程变得缓慢，可以避免因为初始凝固时间太短而出现塑性收缩裂缝；而引气剂的作用是引入大量均匀分布的微细气泡，从而提升混凝土的抗裂能力。在具体工程应用里，得用正交试验方法来明确最佳配比参数，同时要符合温度控制和力学性能方面的设计标准。

2.3 浇筑工艺优化

分层浇筑方法用阶段性施工方式，把混凝土一层一层浇筑，每层厚度保持在0.5~1.0m，靠各层间施工间歇期，让热量释放效果更好，防止整体浇筑时可能有的热能累积情况。整体浇筑方式施工效率较高，但要搭配内置降温手段，不然容易因水泥水化过程中产生的过高绝热温升使结构开裂。浇筑速率要根据环境温度来调整，气温高时要降低浇筑速度（小于等于1.5米/小时），温度低时能适当加快浇筑效率（小于等于2.5米/小时），来协调水化热的产生和散发过程。浇筑顺序的优化主要采取从低到高、从中心向四周的布料办法，能有效减少因混凝土过度堆积而形成的局部高温区域。二次振捣技术能够把结构内部的气泡排除掉，让材料变得更致密就能有效抑制裂缝的形成。

2.4 温控防裂材料的应用

温控防裂材料靠物理或化学机制来优化混凝土材料特性，进而提升抗裂性能。膨胀剂（像HEA型氧化钙

类膨胀剂）在水化的时候能够生成钙矾石，以此来抵消混凝土的收缩变形，让干缩裂缝的发生概率降低。纤维材料（像聚丙烯纤维、钢纤维）依靠应力分散机制，阻止微观裂缝的延伸，进而增强混凝土的延性和抗破坏能力。在具体工程应用里，膨胀剂的掺入比例得控制在水泥质量的6%到8%这个范围，要是掺量太高，也许会引发过大的膨胀应力；对于纤维材料而言，掺量要按照结构形式来调整，其中聚丙烯纤维的推荐使用量是0.9kg/m³，钢纤维建议采用30至50kg/m³的掺量。

3 大体积混凝土温控防裂施工技术的问题与对策

3.1 施工过程中的问题识别

大体积混凝土进行温控防裂施工时，温度场分布不均匀是关键控制难点。混凝土结构体量大，内部和外部环境热量释放速度明显不一样，容易产生温度差异，这种温差效应会使应力在局部区域集中，最后可能造成开裂。材料性能的波动性必须重点关注，水泥水化时热量释放速度以及骨料热膨胀系数等关键参数一旦改变，就可能加大温度应力，让裂缝控制的有效性降低。例如，在特大桥承台施工中，若未对混凝土入模温度进行严格把控，极易因内外温差过大而引发贯穿性裂缝。施工工艺不合理对温控防裂效果影响非常大。要是浇筑顺序没设置好，或者振捣操作没做好，可能会让混凝土内部结构受到损害，进而削弱抗裂能力。

裂缝形成是施工过程里的又一个明显技术难题，表现形式多种多样，主要有表层裂纹、内部裂纹以及穿透性裂纹等类型。表面裂缝一般是混凝土表层水分流失太快或者养护措施没做好导致的，深层及贯穿性裂缝主要是温度应力和收缩应力一起作用引起的。在实际工程中，如高水头船闸闸首施工，若未采取有效温控措施，混凝土内部温度峰值过高，将导致结构产生不可逆的塑性变形，进而引发裂缝扩展。此外，气温突然变、湿度改变等外部环境条件，可能明显干扰混凝土的温度分布，让裂缝出现的可能性提高。

3.2 问题产生的原因分析

水泥的类型、强度等级和掺量，对混凝土水化时热量释放速度影响极大。用早强特性水泥或掺量过高，混凝土内部温度会快速升高，进而增强温度应力效应。此外，要是骨料级配配置得不好，含泥量超出了限定标准等，同样会对混凝土的施工性能以及抵抗开裂的能力产生不利影响。细骨料里泥质成分含量要是超出了限值，会使混凝土和钢筋之间的粘结强度减弱，还会增大结构出现裂缝的可能性。在混凝土浇筑阶段，要是没采用分层浇筑或者跳仓浇筑这些有效的施工办法，混凝土内部

热量就容易过度积累，没办法及时排出去。振捣操作要是不充分或者过度，可能会让混凝土内部骨料和水泥石之间的结合力变弱，接着产生薄弱界面，让其抗裂能力下降。此外，养护措施有缺陷，像养护周期短或者覆盖材料选得不对等，都可能让混凝土表层水分流失太快，接着出现干缩性裂缝。气温波动会明显改变混凝土表层热量散失的速度。施工时，外界温度要是突然降低，混凝土表层和内部的温度差异就会显著变大，进而引发温度应力。湿度变化或许会让混凝土内部水分的蒸发速度发生改变，进而给力学性能的形成过程以及抵抗开裂的能力带来不利作用。

3.3 解决方案与技术改进

为解决材料选用不合理的问题，要对水泥类型和用量进行优化调整，优先推荐使用低热或中热水泥，同时严格管控水泥使用量。要加强骨料的质量管理，让骨料级配变得科学合理，含泥量也要达到标准。可加入适量粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，来减缓混凝土水化热释放速度，增强其抵抗开裂的能力。为解决施工工艺的缺陷，要优化浇筑流程，采用分阶段浇筑和间隔仓位浇筑等策略，能有效减少混凝土内部热能过度累积。要强化振捣过程的管理工作，让混凝土结构的密实性达到标准。应健全养护机制，按照环境状况合理选用养护材料并确定养护周期，保证混凝土表层是湿润状态，进而避免因干燥收缩出现裂缝。在高水头船闸闸首施工中，通过改进施工工艺，可有效控制混凝土温度场及应力场，提高其抗裂性能。为应对环境因素影响，得强化环境监测和调控机制，动态跟踪温度、湿度等关键环境指标的

变化，及时实施相应调节手段。在温度急剧下降阶段，能用铺设保温层、实施加温养护等方法，降低混凝土表层和核心的温度差。

4 结论

大体积混凝土温控防裂施工技术的核心在于通过热力学调控与材料优化实现结构安全，其技术路径涵盖温度场-应力场耦合分析、冷却系统设计、配合比优化及智能监控等多维度。研究表明，冷却水循环与分层浇筑工艺的协同应用可有效降低混凝土内部最高温度与内外温差，如苍容浔江大桥锚碇工程通过优化冷却水管参数使最高温度降低8.2°C，而城市超高层建筑基础施工采用分层浇筑结合表面保温将温差控制在25°C以内，显著提升了结构耐久性。上述技术成果在复杂工程环境下给大体积混凝土施工搭建起完整的解决框架，对保证结构长期稳定有关键作用。

参考文献

- [1]杨琳,殷绪敏,韩月鹏.苍容浔江大桥锚碇大体积混凝土温控技术研究[J].公路,2024,69(12):16-23.
- [2]张永生,王硕,肖永龙,等.城市大体积混凝土施工温度控制技术研究[J].建筑结构,2023,53(S02):1293-1300.
- [3]刘毅,辛建达,张国新,等.大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J].硅酸盐学报,2023,51(05):1228-1233.
- [4]刘晓东,任永革,朱晶,等.智能温控系统对大体积混凝土施工的影响[J].混凝土,2022,(06):179-184.
- [5]周俊,黄齐龙,白占时,等.复杂岩层水域大体积现浇异形混凝土承台施工技术研究[J].公路,2021,66(01):122-129.