

大体积混凝土温度裂缝成因分析与综合防控技术研究

薛生东

新疆生产建设兵团建设工程(集团)有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要:随着我国基础设施建设规模的不断扩大,大体积混凝土结构在水利水电、核电站、桥梁基础、超高层建筑底板等重大工程中得到广泛应用。然而,由于其几何尺寸大、水泥水化热集中释放、内外温差显著等特点,极易在早期硬化阶段产生温度裂缝,严重影响结构的耐久性、整体性和安全性。本文系统分析了大体积混凝土温度裂缝的形成机理,从材料、结构、环境及施工等多个维度深入探讨裂缝产生的根本原因,并在此基础上,提出一套涵盖原材料优选、配合比优化、温控设计、施工工艺改进及后期养护等环节的综合防控技术体系。期望为大体积混凝土工程的质量控制提供理论支撑与实践指导。

关键词:大体积混凝土;温度裂缝;水化热;温度应力;综合防控;温控措施

引言

大体积混凝土(Mass Concrete)通常指最小尺寸不小于1米,且因水泥水化反应产生的热量在结构内部难以及时散发,导致内外温差超过 25°C ,从而可能引发有害裂缝的混凝土结构。近年来,随着“新基建”战略的推进和超大型工程项目的实施,大体积混凝土的应用日益广泛。然而,温度裂缝问题始终是制约其工程质量的核心难题之一。温度裂缝不仅影响结构外观,更会削弱混凝土的抗渗性、抗冻性及抗化学侵蚀能力,严重时可导致钢筋锈蚀、结构承载力下降甚至失效。因此,深入研究大体积混凝土温度裂缝的成因机制,并构建科学有效的综合防控体系,具有重要的理论价值与工程意义。

1 大体积混凝土温度裂缝的形成机理

1.1 水化热的产生与传导

大体积混凝土在浇筑成型后,水泥颗粒与拌合水发生持续的水化反应,这一过程伴随着大量热量的释放。普通硅酸盐水泥在前7天内即可释放出总水化热的70%左右,中心区域温升可达 40 至 70°C 。由于混凝土本身的导热性能较差,其导热系数一般仅为 1.3 – $1.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,导致内部积聚的热量无法迅速向外界传导。与此同时,结构表面直接暴露于环境之中,受空气对流、辐射及蒸发冷却等作用,温度迅速下降。这种内外散热条件的显著差异,使得混凝土截面内部形成强烈的非均匀温度场^[1]。根据热传导基本原理,温度梯度的存在必然驱动热流由高温区向低温区传递,但由于混凝土低导热性的限制,热量传递速率远低于生成速率,从而加剧了温度分布的不均匀性,为后续温度应力的产生奠定了物理基础。

1.2 温度应力的发展

混凝土作为一种热敏性材料,其体积会随温度变化

而发生热胀冷缩。在无约束条件下,这种变形是自由的,不会产生内力。然而,在实际工程中,大体积混凝土结构往往受到来自地基、相邻构件或自身不同部位之间的多重约束。在浇筑初期,混凝土内部因水化放热而升温膨胀,但外部区域温度较低且受基础约束,限制了内部的自由膨胀,从而在表层产生压应力;随着水化反应逐渐减缓,结构整体开始进入降温阶段,此时混凝土体积收缩,若收缩变形受到外部或内部约束的阻碍,则会在结构内部,尤其是表面区域,产生拉应力。值得注意的是,混凝土在早期(特别是3–7天龄期内)的抗拉强度极低,通常仅为同龄期抗压强度的 $1/10$ 至 $1/15$ 。一旦由降温收缩引起的拉应力超过该阶段混凝土的实际抗拉强度极限,微裂缝便会在薄弱区域萌生并扩展,最终形成可见的温度裂缝。

1.3 收缩变形的叠加效应

除了温度变化引起的热胀冷缩外,大体积混凝土在硬化过程中还经历多种类型的收缩变形,这些变形与温度收缩相互叠加,进一步加剧了开裂风险。其中,自收缩源于水泥水化消耗内部自由水,导致毛细孔中产生负压,进而引起浆体自身体积的不可逆减小,尤其在低水胶比高性能混凝土中更为显著;干燥收缩则主要发生在混凝土表面,由于水分向环境中蒸发,造成表层干缩,若内部仍处于湿润状态,则形成内外收缩差异;此外,在初凝前的塑性阶段,若表面失水速率过快(如高温、大风天气),还会产生塑性收缩裂缝^[2]。这些不同机理的收缩行为在时间上部分重叠,在空间上相互耦合,共同作用于尚未建立足够强度的混凝土基体,显著降低了其抵抗开裂的能力,尤其是在结构几何突变、配筋稀疏或施工缝附近等应力集中区域。

1.4 约束条件的影响

约束是温度裂缝产生的必要力学条件。理论上,若混凝土结构完全自由,即使存在极大温差也不会产生内应力。然而,现实工程中约束无处不在。外部约束主要来源于基础对底板的固结作用,例如筏板基础与坚硬岩基之间的强粘结,会严重限制底板的整体收缩;内部约束则源于结构截面内部不同深度处的温度差异,高温核心区试图膨胀或收缩时,受到低温表层的牵制,反之亦然,从而在层间产生剪切应力;此外,结构自身的刚度分布不均,如墙体与厚底板连接处的刚度突变,也会形成局部高应力区。约束程度越高,温度变形所受到的限制越大,由此诱发的温度应力也就越显著。因此,合理评估并有效削弱不利约束,是控制温度裂缝的关键环节之一。

2 温度裂缝的主要成因分析

2.1 材料因素

混凝土的组成材料对其热学与力学性能具有决定性影响。首先,水泥的矿物组成直接决定了水化放热速率与总量。C3S和C3A含量高的普通硅酸盐水泥水化速度快、放热量大,易导致早期温峰过高。其次,单位水泥用量是影响总水化热的关键参数,用量越大,放热总量越高,温升越剧烈。骨料作为混凝土中的主要骨架,其级配、粒径、含泥量及导热性能均会影响整体热传导效率与界面粘结强度。连续级配的粗骨料不仅能减少胶凝材料用量,还能提升导热路径的连续性;而含泥量过高则会削弱骨料-浆体界面过渡区的密实度,成为裂缝萌生的薄弱面。此外,若未合理使用矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣粉)和高效外加剂,将难以实现水胶比的降低与水化热的延缓,从而加剧温度裂缝风险。

2.2 结构与设计因素

结构形式与设计细节对温度裂缝的产生具有重要影响。当混凝土构件的几何尺寸过大,尤其是厚度或体积显著增加时,散热路径延长,内部热量更难散失,导致内外温差急剧增大。在超长结构中,若未设置后浇带、诱导缝或伸缩缝等构造措施,结构将无法有效释放由温度变化和收缩引起的累积应变,从而在约束端部或中部产生高拉应力区。配筋设计同样至关重要,构造钢筋不仅承担荷载,还在控制裂缝宽度与分布方面发挥关键作用。若配筋率不足、钢筋间距过大或未在应力集中区域加强配筋,将难以有效抑制微裂缝的扩展。此外,结构刚度的突变,如洞口、转角、厚度变化处,容易形成应力集中,若未采取局部加强措施,极易成为裂缝的起始点。

2.3 施工与环境因素

施工过程中的操作细节与外部环境条件是诱发温度裂缝的直接诱因。夏季高温环境下施工,若未对原材料采取降温措施,混凝土入模温度可能高达35℃以上,这不仅抬高了初始温度基准,还加速了水化反应,使温峰提前且更高。浇筑方式不当,如一次性浇筑厚度过大或分层间隔时间过短,会导致下层混凝土尚未完成主要温升即被上层覆盖,热量叠加效应显著。养护阶段若保湿保温措施不到位,表面水分快速蒸发造成干缩,同时环境冷却使表层温度骤降,双重作用下极易在表层形成网状裂缝。此外,寒潮、大风等恶劣天气会急剧改变混凝土表面的热交换条件,造成短时间内温差剧增,超出混凝土的适应能力。因此,精细化的施工组织与对环境变化的动态响应,是防控温度裂缝不可或缺的环节。

3 大体积混凝土温度裂缝综合防控技术体系

3.1 原材料优选与配合比优化

从源头控制水化热是防控温度裂缝的根本途径。在胶凝材料选择上,应优先采用中热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥,其C3S和C3A含量较低,水化放热速率平缓。同时,大量掺加优质矿物掺合料是行之有效的技术手段。研究表明,掺入30%至50%的I级粉煤灰或S95级粒化高炉矿渣粉,不仅能显著降低单位体积混凝土的总水化热(降幅可达20%~40%),还能改善浆体的流变性能,减少泌水与离析,并通过火山灰效应提升后期强度与密实度^[3]。在配合比设计中,应采用聚羧酸系高性能减水剂,在保证工作性的前提下将水胶比控制在0.35~0.40之间,从而减少水泥用量和自由水含量。辅以适量缓凝剂(如葡萄糖酸钠),可有效推迟水化放热峰值出现的时间,使其与混凝土的自然散热过程相协调,避免温峰过高。骨料方面,应选用洁净、坚硬、级配良好的粗骨料,最大粒径宜控制在20~40mm范围内,以降低浆体体积占比并增强热传导能力,必要时可考虑使用导热系数较高的玄武岩或花岗岩骨料。

3.2 结构设计优化

合理的结构设计能够从宏观上削弱温度应力的不利影响。对于超长或超厚的大体积混凝土结构,应在适当位置设置后浇带,通常宽度为800~1000mm,间距30~40m,待主体结构完成大部分温降和收缩后再进行封闭,从而有效释放早期累积的温度应变。诱导缝则通过在预定位置局部削弱截面(如设置V形槽或预埋薄板),引导裂缝在可控位置规则开展,避免随机开裂。在配筋设计上,除满足承载力要求外,应特别重视温度-收缩钢筋的配置。在易裂区域(如板角、孔洞周边、厚度突变处)加密构造钢筋,采用小直径、密间距(如Φ12@150)

的布置方式,可显著提高混凝土的抗裂韧性。建议温度钢筋的最小配筋率不低于0.2%。此外,在施工前应利用有限元软件(如MIDAS/Civil、ABAQUS)进行三维瞬态热-力耦合仿真分析,精确预测温度场与应力场的时空演化规律,为优化浇筑顺序、冷却方案及养护策略提供科学依据。

3.3 施工过程温控关键技术

施工阶段是温度裂缝防控的主战场,需实施全过程精细化温控。首先,应严格控制混凝土入模温度,夏季施工时可通过骨料遮阳喷淋、拌合水加冰或使用地下水等方式,确保入模温度不超过28-30℃;冬季则需防止早期冻害,采取保温拌合与运输措施。其次,推行分层分块浇筑工艺,每层厚度控制在300-500mm,层间间隔5-7天,使下层混凝土完成主要温升后再浇筑上层,避免热量叠加。对于特大体积结构,预埋冷却水管是主动降温的有效手段。通常采用 $\phi 25-32\text{mm}$ 的HDPE管,按1.0-1.5m间距蛇形布置于结构内部,通入10-15℃的循环冷水,通过调节流量与通水时间,将中心最高温度控制在55℃以内,内外温差不超过25℃。通水周期一般为3-7天,需结合实时测温数据动态调整^[4]。浇筑完成后,必须立即实施表面保温保湿养护。初凝后覆盖塑料薄膜防止水分蒸发,再加盖土工布或保温棉被以减缓表面散热速率。养护时间不得少于14天,尤其在3-7天的关键期,应加强测温频次(每2小时一次),确保温控措施及时有效。

3.4 智能监测与预警系统

传统人工测温存在滞后性与覆盖盲区,难以满足现代大体积混凝土工程的精细化管理需求。为此,可部署基于分布式光纤测温(DTS)或无线物联网传感器的智能监测系统,实现对混凝土内部多点、连续、实时的温度数据采集。这些数据可上传至BIM平台,构建结构的数字孪生模型,动态可视化温度场演变过程。进一步结合热-力耦合算法,系统可自动计算当前温度应力状态,并与混凝土实时抗拉强度进行比对。当预测温差接近临界阈

值(如23℃)或拉应力即将超限时,系统可自动发出预警,并联动控制冷却水泵启停或调整保温覆盖厚度,形成“感知—分析—决策—执行”的闭环控制体系,大幅提升温控的精准性与主动性。

4 结语

本文系统分析了大体积混凝土温度裂缝的形成机理,指出其本质是水化热积聚、温度梯度发展、多重约束作用与早期抗拉强度不足共同耦合的结果。在此基础上,构建了涵盖材料优化、结构设计、施工控制与智能监测的全链条综合防控技术体系。展望未来,大体积混凝土温度裂缝防控技术将朝着绿色化、智能化与高性能化方向发展。一方面,应加快开发新型低热高强胶凝体系,如硫铝酸盐水泥、碱激发胶凝材料等,从源头上消除水化热隐患;另一方面,可探索将相变材料(PCM)引入混凝土基体,利用其相变潜热实现“储热-释热”的自调节功能,平抑温度波动。同时,深化人工智能与大数据技术在温控预警中的应用,构建基于机器学习的裂缝风险预测模型,实现从“被动响应”到“主动预防”的转变。最终,亟需建立覆盖设计、施工、运维全生命周期的温度裂缝评估、防控与修复标准体系,为国家重大基础设施的长期安全服役提供坚实保障。

参考文献

- [1]邱沈和.大体积混凝土温度裂缝形成机理及防治措施[J].上海建材,2025,(05):125-128+132.
- [2]倪天红.大体积混凝土温度裂缝控制与施工监测技术研究[J].城市开发,2025,(19):171-173.
- [3]黄文波.大体积混凝土基础施工温度裂缝控制简易技术措施研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流论文集.漳州华侨城置业有限公司,2025:305-307.
- [4]于全.大体积混凝土水化热及温度裂缝控制技术综述[J].科学技术创新,2025,(07):132-135.