

水利工程大体积混凝土温控防裂质量控制关键技术研究

包金泉¹ 李常君² 蒋帛霖¹

1. 内蒙古蒙东水务有限公司 内蒙古 通辽 028000

2. 内蒙古工程项目管理有限公司 内蒙古 通辽 028000

摘要: 大体积混凝土因其水化热高、内外温差大、收缩变形显著等特点,在水利工程建设中极易产生温度裂缝,严重影响结构的安全性、耐久性和防渗性能。本文系统分析了大体积混凝土裂缝成因机制,重点围绕原材料优选、配合比优化、施工工艺控制、温度监测与智能调控、保温保湿养护等关键环节,深入探讨了温控防裂的质量控制技术体系。研究表明,通过“源头控制—过程调控—后期养护”三位一体的全生命周期温控策略,可显著降低温度应力,有效预防裂缝产生,保障大体积混凝土结构的长期服役性能。研究成果对提升我国水利工程质量具有重要的理论价值和实践指导意义。

关键词: 大体积混凝土; 水利工程; 温度裂缝; 温控防裂; 质量控制; 水化热

引言

随着我国水利基础设施建设的持续推进,大型水电站、高坝水库、船闸、泵站等重大水利工程不断涌现。这些工程普遍采用大体积混凝土结构,其最小尺寸通常不小于1米,且一次性浇筑方量巨大(常达数千甚至上万平方米)。由于水泥水化反应释放大量热量,而混凝土导热性能较差,导致内部温度急剧升高,形成显著的内外温差。当由此产生的拉应力超过混凝土的抗拉强度极限时,便会在结构表面或内部产生温度裂缝。温度裂缝不仅削弱结构的整体性和承载能力,更会加速水、氯离子、二氧化碳等有害介质的侵入,引发钢筋锈蚀、碱骨料反应等耐久性问题,严重威胁水利工程的安全运行和使用寿命。尤其在高水头、强渗透环境下,裂缝还可能成为渗漏通道,影响工程防渗功能。因此,如何有效控制大体积混凝土的温度场与应力场,防止裂缝产生,已成为水利工程施工中的核心质量控制难题。

1 大体积混凝土裂缝成因机理分析

1.1 温度应力

水泥水化是一个强烈的放热过程。以普通硅酸盐水泥为例,其完全水化可释放约500kJ/kg的热量。在大体积混凝土内部,由于导热系数较低,热量难以迅速散失,导致中心区域温度迅速攀升,可达50℃至70℃甚至更高;而结构表面因直接暴露于环境中,散热较快,温度相对较低,从而形成显著的“内热外冷”温度梯度。根据热弹性力学原理,这种不均匀的温度分布会引起混凝土内部各部分膨胀或收缩程度不同,进而在结构内部产生自生应力。同时,基础或相邻已硬化混凝土对新浇筑体的变形约束又会引入外约束应力。当这两种应力叠加

后的总拉应力超过混凝土在该龄期的抗拉强度时,裂缝便不可避免地产生。

1.2 收缩变形

除温度作用外,混凝土自身的多种收缩行为同样是裂缝形成的重要诱因。在初凝前,若环境干燥、风速较大,混凝土表面水分蒸发速率超过泌水上升速率,将导致塑性收缩裂缝;硬化后,随着内部自由水和凝胶水的持续散失,混凝土会发生干燥收缩;对于现代低水胶比高性能混凝土,即使在密封条件下,也会因自干燥效应而产生自收缩;此外,大气中的二氧化碳与水泥水化产物发生碳化反应,亦会引起体积减小^[1]。这些收缩变形在受到内部骨料或外部结构约束时,同样会产生拉应力,与温度应力叠加,进一步加剧开裂风险。

1.3 外部约束条件

水利工程中,大体积混凝土结构往往直接浇筑于坚硬基岩之上,或与早期浇筑的混凝土块体紧密连接,其约束刚度极大,极大地限制了混凝土的自由变形能力。此外,结构几何形状的突变区域,如廊道、孔口、闸墩转角等部位,容易形成应力集中;配筋设计不合理,如钢筋间距过大或分布不均,也会削弱混凝土抵抗拉应力的能力。这些因素共同作用,使得局部区域更容易率先开裂,进而可能发展为贯穿性裂缝。

2 温控防裂质量控制关键技术体系

针对上述裂缝成因,本文提出“源头控制—过程调控—后期养护”三位一体的全生命周期温控防裂技术体系,涵盖以下关键技术:

2.1 原材料优选与配合比优化(源头控制)

2.1.1 胶凝材料体系优化

优先选用中热硅酸盐水泥(P·MH)或低热矿渣硅酸盐水泥(P·SLH),其早期水化速率较慢,3天和7天水化热显著低于普通硅酸盐水泥,能有效延缓温峰出现时间并降低峰值温度。在此基础上,大量掺加优质矿物掺合料是降低水化热的关键手段。粉煤灰和粒化高炉矿渣粉不仅能替代20%至50%的水泥用量,减少单位体积的总放热量,还能通过火山灰反应改善混凝土的微观结构,提高后期强度和耐久性。同时,粉煤灰的微珠形态可起到“滚珠效应”,改善拌合物的工作性,降低用水量。为匹配掺合料的缓凝特性,需选用缓凝型高效减水剂,既能保证足够的施工操作时间,又能推迟水化放热峰值,为热量散发创造有利条件。

2.1.2 骨料选择与控制

应选用洁净、级配连续、热膨胀系数低的天然河砂和碎石,避免使用含泥量高或含有活性二氧化硅的骨料,以防碱骨料反应。严格控制骨料的含泥量不超过1%,泥块含量不超过0.5%,以确保水泥浆体与骨料界面的粘结强度^[2]。在夏季高温季节施工时,骨料堆场应搭设遮阳棚,并可采用喷淋系统对骨料进行预冷,有效降低拌合物的初始温度。

2.1.3 配合比设计原则

应在满足设计强度、耐久性和工作性的前提下,贯彻“低水胶比、低水泥用量”的原则。水胶比宜控制在0.35至0.45之间,以减少自由水含量,从而降低干燥收缩。单位水泥用量应尽可能压缩,通常不超过280kg/m³,其余胶凝材料由粉煤灰、矿粉等替代。砂率的选择需兼顾和易性与体积稳定性,一般控制在38%至42%。对于对抗裂性要求极高的部位,可在配合比中引入适量的微膨胀剂,如UEA或CSA,使其在混凝土硬化初期产生适度的体积膨胀,以补偿因温降和干缩引起的体积减小,从而抵消部分拉应力。

2.2 施工工艺与浇筑控制(过程调控)

2.2.1 分层分块浇筑

采用“薄层短间歇”的分层浇筑方法,将大体积结构划分为若干厚度为1.5至2.5米的水平层,可以显著缩短热量传递路径,利于内部热量向表面散发。同时,通过设置施工缝或诱导缝,人为地将整体结构分割成若干独立单元,能够有效释放早期因温升和收缩产生的约束应力。相邻块体之间的浇筑间隔时间至关重要,通常应控制在5至10天,待先浇筑块体完成大部分温升并开始降温后再进行后续浇筑,可避免新老混凝土之间产生过大的温度梯度和约束应力。

2.2.2 混凝土入模温度控制

在夏季高温环境下,必须采取综合措施将入模温度严格控制在28℃以内。这包括使用地下水或深井水拌合,用冰屑替代部分拌合水(冰的掺量一般不超过总用水量的30%),对运输车辆加装隔热罩,以及尽量安排在夜间或清晨气温较低时段进行浇筑。而在冬季寒冷地区,则需防止混凝土早期受冻,可通过加热骨料(温度不宜过高,以免影响外加剂性能)和使用热水(水温不超过60℃)拌合等方式,将入模温度维持在5℃以上,但同时要避免入模温度过高,以免加大内外温差。

2.2.3 振捣与泌水处理

应采用高频插入式振捣器,遵循“快插慢拔、插点均匀”的原则,既要保证混凝土充分密实,又要避免过振导致骨料离析或漏振形成蜂窝麻面。对于大流动性混凝土,浇筑后表面常有泌水现象,若不及时排除,会在表层形成水灰比较大的薄弱层,极易开裂^[3]。因此,应在初凝前及时刮除泌水,并进行二次抹压,以闭合因塑性沉降和水分蒸发引起的早期微裂缝,提高表层混凝土的密实度和抗裂能力。

2.3 温度监测与智能调控系统

2.3.1 埋设温度传感器

应在混凝土浇筑前,在结构的关键部位,如几何中心、距表面1/4厚度处、近基岩面以及应力集中区域,预埋足够数量的温度传感器。测点的平面间距一般为10至15米,竖向间距为1至2米,形成一个立体的监测网络。通过数据采集系统,可实现24小时不间断自动记录,并将数据实时上传至项目监控中心,为后续分析和决策提供依据。

2.3.2 建立温度场数值模型

基于现场实测的配合比、环境气象数据和边界条件,利用有限元分析软件(如MIDASCivil、ANSYS等)建立三维瞬态热-力耦合模型。该模型能够模拟混凝土从浇筑到后期冷却全过程的温度场和应力场演变规律,预测可能出现的高风险区域。通过将模型预测结果与实测数据进行对比和修正,可以不断优化模型参数,使其具备较高的预测精度,从而为通水冷却等温控措施的启动时机、持续时间和强度提供科学指导。

2.3.3 智能通水冷却系统

通水冷却是主动干预温度场最有效的手段。整个冷却过程通常分为两个阶段:一期冷却(削峰)和二期冷却(降温)。一期冷却在混凝土浇筑后12至24小时内开始,通过预埋在混凝土内部的冷却水管通入10至15℃的低温水,目的是快速带走内部积聚的热量,将中心最高温度控制在45℃以内。待温度达到峰值并开始自然下降后,进入

二期冷却阶段,此时通入温度稍高的循环水(如18℃),以非常缓慢的速率(日降温幅度不超过1.5℃)引导混凝土整体降温,避免因降温过快而产生新的温度梯度和拉应力。现代工程越来越多地采用基于PLC的自动控制系统,该系统能根据各测点的实时温度,自动调节冷却水的流量和水温,实现精准、高效的智能温控。

2.4 保温保湿养护技术(后期养护)

2.4.1 表面保温

拆模后,混凝土表面直接暴露于大气中,若不加以保护,会因与环境温差过大而产生剧烈的温度梯度。因此,必须立即覆盖保温材料,如双层土工布、专用保温被或草帘,并在其上覆盖一层塑料薄膜以防止水分蒸发。保温层的厚度并非一成不变,而应根据季节、昼夜温差和混凝土内部温度进行动态调整,其核心目标是确保混凝土中心与表面的温差始终控制在25℃以内,这是防止表面开裂的关键阈值。在严寒地区,还可搭设暖棚,并辅以蒸汽或电热设备进行增温养护。

2.4.2 持续保湿

充足的水分是保证水泥持续水化、提高混凝土强度和减少干缩的前提。养护时间不得少于28天,对于重要水利结构,建议延长至60天甚至更长。可采用自动喷淋系统定时洒水,或在平面上蓄水养护,确保混凝土表面始终保持湿润状态^[4]。特别需要注意的是,要避免养护过程中出现干湿交替的情况,因为反复的干湿循环会加剧混凝土的收缩-膨胀变形,反而诱发新的裂缝。

2.4.3 裂缝应急处理

尽管采取了全面的预防措施,但在极端条件下仍可能出现少量非结构性表面裂缝。对于宽度小于0.2毫米的微裂缝,通常不影响结构安全,可采用环氧树脂类涂料进行表面封闭处理,既美观又能阻止水分侵入。而对于宽度超过0.3毫米或有渗漏迹象的裂缝,则必须进行压力灌浆处理,常用的灌浆材料包括聚氨酯(适用于活动裂缝)和环氧树脂(适用于静止裂缝),通过高压将浆液注入裂缝深处,使其固化后恢复结构的整体性和防水性能。

3 讨论与展望

尽管当前的大体积混凝土温控技术已日趋成熟,并在众多重大工程中取得成功应用,但仍面临一些深层次的挑战。例如,市场上矿物掺合料的品质参差不齐,其活性指数的波动会直接影响水化热的预测精度;在全

球气候变化背景下,极端高温或严寒天气频发,对现有温控方案的适应性提出了更高要求;此外,目前多数工程的温控管理仍较多依赖技术人员的经验判断,缺乏一个集数据感知、智能分析、自动决策与反馈执行于一体的闭环控制系统。面向未来,大体积混凝土温控防裂技术的发展将呈现几个重要趋势。首先,材料科学的进步将催生更多新型低热、高强、高韧的胶凝材料体系,如硫铝酸盐水泥基复合材料或地聚物混凝土,从根本上解决水化热问题。其次,数字孪生技术的引入将彻底改变温控管理模式,通过构建物理工程与虚拟模型的实时映射,融合BIM、物联网、大数据和机器学习算法,实现对裂缝风险的超前预警和对冷却系统的全自动、自适应调控。再次,绿色低碳理念将推动温控技术向节能方向发展,例如利用地源热泵技术回收冷却水中的热量用于冬季养护,实现能源的循环利用。最后,仿生学和微生物技术的交叉融合,有望开发出具有自主修复能力的智能混凝土,即使出现微小损伤也能自行愈合,从而将结构的耐久性提升到一个全新的高度。

4 结语

大体积混凝土温控防裂是保障水利工程结构安全与长期服役性能的核心技术难题。本文系统剖析了温度应力、收缩变形及外部约束等多重因素耦合作用下的裂缝形成机理,并在此基础上,构建了一套覆盖“源头控制—过程调控—后期养护”全生命周期的温控防裂质量控制技术体系。该体系强调从胶凝材料优化、精细化施工、智能化监测到长效化养护的全过程协同管理。展望未来,随着新材料、新技术、新理念的不断融入,大体积混凝土温控防裂技术必将朝着更加智能、绿色、可靠的方向迈进,为国家重大水利基础设施的高质量建设和可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]杨磊.水利工程大体积混凝土浇筑温控措施研究[J].工程技术研究,2025,10(09):106-108.
- [2]张继.水利工程大体积混凝土温控措施研究[J].水利技术监督,2024,(06):217-219.
- [3]马己安,张鑫华.水利工程中大体积混凝土温控防裂措施研究[J].科技资讯,2023,21(16):158-161.
- [4]朱秦秦.水利工程大体积混凝土温控与裂缝防治技术[J].珠江水运,2023,(13):92-94.