

水利水电工程混凝土裂缝成因分析与防治措施

徐志苏

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 混凝土作为水利水电工程中最主要的建筑材料之一,其性能直接关系到工程结构的安全性、耐久性和服役寿命。然而,在实际施工与运行过程中,混凝土结构常出现不同程度的裂缝问题,严重影响工程质量和运行安全。本文系统分析了水利水电工程中混凝土裂缝的主要类型及其成因,包括温度应力裂缝、干缩裂缝、塑性收缩裂缝、沉降裂缝、化学反应裂缝以及荷载作用裂缝等,并从材料、设计、施工及运维等多个维度探讨了裂缝产生的机理。在此基础上,提出了针对性的综合防治措施,涵盖原材料优选、配合比优化、温控防裂技术、施工工艺控制、养护管理及后期修补策略等内容。研究表明,通过全过程、多维度的裂缝防控体系,可有效降低混凝土裂缝的发生率,提升水利水电工程的整体质量与耐久性。

关键词: 水利水电工程; 混凝土裂缝; 成因分析; 温控防裂; 防治措施

引言

水利水电工程是国家基础设施的重要组成部分,承担着防洪、发电、灌溉、供水和生态保护等多重功能。由于其结构体积极庞大、服役环境复杂、使用年限长(通常要求50年以上),对混凝土的性能提出了极高的要求。然而,混凝土作为一种脆性复合材料,在硬化过程中极易受到内外部因素的影响而产生裂缝。这些裂缝不仅影响结构外观,更会削弱混凝土的抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性,进而威胁工程结构的整体稳定性和安全性。近年来,随着高坝、大体积混凝土结构在水利水电工程中的广泛应用,裂缝问题日益突出。例如,三峡、溪洛渡、白鹤滩等大型水电站均在施工阶段遭遇不同程度的裂缝问题,虽经及时处理未造成严重后果,但其教训值得深入总结。因此,系统研究混凝土裂缝的成因并提出科学有效的防治措施,具有重要的理论价值和现实意义。本文旨在全面梳理水利水电工程中混凝土裂缝的类型与成因机制,并结合工程实践,提出一套系统化、可操作的裂缝防控技术体系,为相关工程的设计、施工与运维提供理论支撑和技术指导。

1 混凝土裂缝的主要类型及成因分析

1.1 温度应力裂缝

温度应力裂缝是水利水电工程中最常见、危害最大的裂缝类型,尤其在大体积混凝土结构中尤为突出。其成因主要源于水泥水化热引起的内外温差。混凝土浇筑后,内部水泥水化反应释放大热量,导致中心温度迅速升高(可达50~70℃甚至更高),而表面散热较快,形成显著的温度梯度。当内外温差超过临界值(一般认为25℃为警戒线)时,混凝土内部产生拉应力,若该拉应

力超过混凝土当时的抗拉强度,即产生裂缝。此外,环境温度骤变(如寒潮袭击)、基础约束(如基岩对坝体底部的约束)也会加剧温度应力,诱发贯穿性或深层裂缝。此类裂缝多呈规则分布,常垂直于约束方向,深度较大,对结构整体性和防渗性能构成严重威胁。

1.2 干缩裂缝

干缩裂缝主要发生在混凝土硬化后期,因水分蒸发导致体积收缩而产生。混凝土中的自由水和部分结合水在干燥环境中逐渐散失,引起毛细孔负压增大,从而导致体积收缩。若收缩受到外部约束(如模板、钢筋、相邻结构)或内部不均匀收缩,则会在混凝土表面形成网状或龟裂状裂缝,宽度通常较小($< 0.2\text{mm}$),但分布密集。在水利水电工程中,暴露于大气环境中的闸墩、溢流面、渠道衬砌等部位易发生干缩裂缝。虽然此类裂缝多为表层裂缝,但若环境潮湿-干燥循环频繁,可能加速钢筋锈蚀或冻融破坏,进而影响结构耐久性。

1.3 塑性收缩裂缝

塑性收缩裂缝发生在混凝土初凝前的塑性阶段,主要由于表面水分蒸发速率大于泌水上升速率所致。在高温、低湿、大风等不利气候条件下,混凝土表面迅速失水,体积急剧收缩,而下部混凝土仍处于塑性状态,无法提供足够约束,导致表面开裂。此类裂缝多呈不规则、短而浅的龟裂状,常见于大面积板式结构或薄壁构件^[1]。在水利水电工程施工中,夏季高温季节浇筑的面板、底板等部位易出现此类裂缝,虽不影响结构承载力,但会降低表面抗渗性和美观性。

1.4 沉降裂缝

沉降裂缝由地基不均匀沉降或模板支撑系统失稳引

起。当地基承载力不足、回填土压实不实或地下水位变化剧烈时,结构不同部位产生差异沉降,导致混凝土受拉开裂。此外,若模板刚度不足、支撑间距过大或拆除过早,也可能在混凝土尚未获得足够强度前发生变形开裂。此类裂缝通常沿沉降方向延伸,呈斜向或阶梯状,多出现在结构转角、高低跨交接处等应力集中区域。

1.5 化学反应裂缝

化学反应裂缝主要包括碱-骨料反应(AAR)、硫酸盐侵蚀、钙矾石延迟生成(DEF)等引起的膨胀性开裂。其中,碱-骨料反应是由于水泥中的碱(Na_2O 、 K_2O)与活性骨料(如蛋白石、玉髓等)在潮湿环境下发生化学反应,生成吸水膨胀的碱硅凝胶,导致混凝土内部膨胀开裂。此类裂缝呈网状或地图状,伴随凝胶渗出,具有长期性和不可逆性。在水利水电工程中,长期处于水环境中的结构(如坝体、输水隧洞)若使用了含活性成分的骨料,极易发生此类病害,严重威胁工程寿命。

1.6 荷载作用裂缝

荷载裂缝由设计不当、超载运行或地震等外力作用引起。包括弯曲裂缝、剪切裂缝、疲劳裂缝等。在水利水电工程中,闸门启闭频繁、水压力突变、地震动荷载等均可能诱发结构性裂缝。此类裂缝通常具有明确的力学特征,如受弯构件底部的横向裂缝、剪力区的斜裂缝等,需通过结构复核与加固处理。

2 混凝土裂缝的综合防治措施

针对上述各类裂缝成因,应采取“预防为主、防治结合”的原则,构建覆盖材料、设计、施工、运维全生命周期的裂缝防控体系。

2.1 材料层面的控制

从材料源头控制是预防混凝土裂缝的基础环节。首先,应优先选用低热水泥,如中热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥,这类水泥的水化热释放速率慢、总量低,能有效抑制温升,已在三峡等重大工程中得到成功应用。其次,合理掺加矿物掺合料是另一项关键措施。粉煤灰、矿渣粉或硅灰不仅能替代部分水泥以减少水化热,还能通过火山灰反应改善混凝土的微观结构,提高密实度和后期强度,同时粉煤灰的“滚珠效应”有助于提升拌合物的工作性,降低用水量,从而减少收缩^[2]。此外,采用聚羧酸系高性能减水剂可在大幅降低水胶比(甚至低于0.35)的同时保证良好的流动性,既提高了强度和耐久性,又减少了因多余水分蒸发引起的干缩。最后,骨料的质量控制不容忽视,必须严格筛选非活性骨料以避免碱-骨料反应,优化级配以减少空隙率,并将含泥量控制在1%以内,以降低因杂质引起的界面弱化和收

缩开裂风险。

2.2 配合比优化设计

配合比设计是连接材料性能与工程需求的桥梁。在满足强度、抗渗、抗冻等基本性能的前提下,应通过正交试验、数值模拟或经验公式,对水胶比、胶凝材料总量、砂率等关键参数进行精细化调整。例如,采用“双掺”技术(即同时掺加粉煤灰和矿渣粉),可在保证早期强度发展的基础上,将胶凝材料总用量控制在 $180\sim 220\text{kg}/\text{m}^3$ 的合理区间,显著降低水化热峰值和总收缩量。同时,适当增加粗骨料比例、优化细骨料细度模数,也有助于减少浆体体积,从而降低开裂敏感性。配合比的优化不仅是技术问题,更是经济与耐久性的平衡,需结合具体工程特点进行定制化设计。

2.3 温控防裂技术

针对大体积混凝土的温控防裂,必须采取系统化的技术手段。在混凝土拌制阶段,可通过骨料预冷、加冰屑或液氮等方式降低原材料温度,使入仓温度控制在 $10\sim 18^\circ\text{C}$ 的合理范围,从源头上抑制温升。浇筑后,应在结构内部预埋高密度聚乙烯(HDPE)冷却水管,通入循环冷水进行中期降温,有效削减最高温度峰值并控制降温速率(建议不超过 $1^\circ\text{C}/\text{天}$),防止因降温过快产生二次温度裂缝。与此同时,表面保温保湿措施不可或缺,可采用土工布、草帘与塑料薄膜组合覆盖,冬季防止寒潮侵袭,夏季避免阳光直射,最大限度减小内外温差和水分蒸发^[3]。此外,合理的结构分缝也是释放约束应力的有效方法,如采用跳仓浇筑、设置后浇带或诱导缝,可在不削弱整体性的前提下,为混凝土提供必要的变形空间,避免贯穿性裂缝的形成。

2.4 施工工艺控制

施工过程是裂缝防控的关键执行阶段。应科学安排浇筑时间,尽量避开日间高温时段,选择夜间或清晨进行作业,以降低环境对混凝土温湿度的影响。浇筑时应严格控制每层厚度(一般不超过2米)和层间间歇时间(通常为5至10天),确保上下层混凝土良好结合,避免形成冷缝。振捣操作需做到“快插慢拔、均匀密实”,既要保证混凝土充分密实、消除气泡,又要防止过振导致骨料离析或浆体上浮。模板系统必须具备足够的刚度和稳定性,支撑间距应经过计算验证,拆模时间应依据同条件养护试块的强度确定,一般不得早于7天,以确保混凝土在获得足够强度前不受扰动。这些看似细节的施工控制,实则是裂缝防控成败的关键所在。

2.5 养护管理

养护是防止干缩与塑性裂缝的最后一道防线,其重

要性常被低估。混凝土终凝后应立即开始保湿养护,并持续不少于14天,对于重要结构或大体积混凝土,建议延长至28天。可采用自动喷淋系统、蓄水养护、覆盖湿麻袋或喷涂成膜型养护剂等多种方式,确保混凝土表面始终处于湿润状态,有效抑制水分蒸发引起的收缩^[4]。对于大体积混凝土,养护期间还应同步进行内部温度监测,根据实测数据动态调整保温层厚度或冷却水流量,实现“智能养护”。只有将养护视为与浇筑同等重要的工序,才能真正发挥混凝土的潜在性能,最大限度减少裂缝的发生。

2.6 裂缝修补与后期处理

对于施工或运行阶段已出现的裂缝,应根据其性质、宽度、深度及对结构安全的影响程度进行分类处置。对于宽度小于0.2毫米的表层微裂缝,可采用表面封闭法,如涂刷环氧树脂涂料或水泥基渗透结晶型防水材料,既能封闭裂缝,又能增强表面抗渗性。对于宽度在0.2至1.0毫米之间的深层裂缝,则宜采用压力灌浆技术,将低黏度环氧树脂或聚氨酯浆液注入裂缝内部,实现结构性粘结与防渗双重效果。若裂缝已贯穿整个截面或属于荷载引起的结构性裂缝,则必须进行详细的结构安全评估,必要时采取碳纤维布粘贴、钢板加固或增设预应力锚杆等补强措施。对于处于活动状态的裂缝(如因地基持续沉降引起),则不宜采用刚性材料封闭,而应设置柔性止水带或弹性密封胶,允许结构在一定范围内变形而不致再次开裂。所有修补工作均应在彻底清理裂缝、确保界面洁净干燥的前提下进行,并通过超声波检测、钻芯取样等手段验证修补质量,确保治理效果持久可靠。

3 工程案例分

以某大型水电站重力坝为例,该工程坝高180米,混凝土总方量达800万立方米。在初期施工阶段,多个坝段出现了温度裂缝,最大宽度达到0.8毫米,引起了工程各方的高度关注。经深入调查分析,裂缝主要归因于混凝土入仓温度过高(实测达28℃)、冷却水管布置间距过大导致降温效率低下,以及表面保温措施不到位,致使

内外温差失控。针对这些问题,项目部迅速调整技术方案:首先改用低热硅酸盐水泥并掺加30%粉煤灰,显著降低水化热;其次对骨料进行预冷处理,将混凝土入仓温度严格控制在16℃以内;同时优化冷却水管布置,将间距加密至1.5米×1.5米,并延长通水冷却时间至28天;此外,在混凝土表面覆盖3厘米厚的复合保温被,冬季施工时还增设暖棚以维持环境温度。对于已形成的裂缝,则采用环氧压力灌浆结合碳纤维布加固的方式进行修复。实施上述综合措施后,后续浇筑仓号的裂缝发生率下降了85%以上,最大裂缝宽度被有效控制在0.15毫米以内,完全满足《水工混凝土施工规范》的要求,为工程顺利推进提供了有力保障。

4 结语

水利水电工程混凝土裂缝的产生是多种因素耦合作用的结果,涉及材料、环境、结构、施工等多个方面。单一措施难以根治裂缝问题,必须建立“材料优选—配合比优化—温控设计—精细施工—科学养护—智能监测—及时修补”的全过程防控体系。未来,随着智能温控系统、自修复混凝土、数字孪生技术等新技术的应用,混凝土裂缝防控将迈向更精准、更智能的新阶段。工程技术人员应不断总结经验,推动技术创新,为水利水电工程的高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]常敬龙.水利水电工程混凝土裂缝分析及施工处理方法研究[J].水上安全,2025,(11):173-175.
- [2]王蒙,赵杰,郭建.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.湖北浩川水利水电工程有限公司,2025:637-640.
- [3]石宝林.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[J].水上安全,2023,(15):28-30.
- [4]宋丽萍.水利水电工程大体积混凝土裂缝成因与控制对策研究[J].黑龙江水利科技,2022,50(07):8-11.