

水利水电工程混凝土裂缝成因分析与防治措施

杨鹏¹ 何青松²

1. 四川山语城建设工程有限公司 四川 成都 610000

2. 四川天耀鑫筑建筑工程有限公司 四川 成都 610000

摘要: 混凝土作为水利水电工程中最主要的建筑材料之一,其耐久性与结构完整性直接关系到工程的安全运行与使用寿命。然而,在实际工程中,混凝土裂缝问题普遍存在,不仅影响结构外观,更可能削弱结构承载能力、加速钢筋锈蚀、降低抗渗性能,严重时甚至危及大坝、水闸、隧洞等关键构筑物的整体安全。本文系统梳理了水利水电工程中混凝土裂缝的主要类型,深入剖析了裂缝产生的根本原因,包括材料因素、施工工艺、环境作用及结构设计等多个维度,并在此基础上提出了针对性的综合防治措施。研究表明,通过优化混凝土配合比设计、加强温控防裂技术、改进施工管理流程、采用先进养护方法以及实施科学监测预警机制,可有效控制裂缝的发生与发展,保障水利水电工程长期安全稳定运行。

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;耐久性

引言

混凝土因其良好的力学性能、可塑性、耐久性及相对经济性,被广泛应用于大坝、溢洪道、引水隧洞、厂房、闸墩等关键部位。然而,混凝土作为一种脆性复合材料,在复杂多变的服役环境中极易产生裂缝。裂缝的存在不仅破坏结构的整体性,还可能成为水、氯离子、二氧化碳等侵蚀性介质侵入的通道,加速内部钢筋锈蚀和混凝土劣化,进而影响工程的安全性、适用性和耐久性。尤其在大型水利水电工程中,如高坝、长隧洞、深基坑等结构,混凝土体积庞大、约束条件复杂、温差变化剧烈,裂缝问题尤为突出。例如,三峡大坝、小浪底水利枢纽等重大工程在建设过程中均面临严峻的温控防裂挑战。因此,深入研究混凝土裂缝的成因机理,探索科学有效的防治策略,对于提升我国水利水电工程建设质量、延长工程服役寿命、保障国家水安全具有重要的理论价值和现实意义。

1 混凝土裂缝的主要类型

根据裂缝的成因、形态及发展规律,水利水电工程中的混凝土裂缝可大致分为以下几类:

1.1 温度裂缝

温度裂缝是水利水电工程中最常见、危害最大的裂缝类型。其成因主要是混凝土在硬化过程中水泥水化放热导致内部温度急剧升高(可达50~70℃),而表面散热较快,形成内外温差;随后在降温阶段,混凝土收缩受到基础或相邻结构的约束,产生拉应力。当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,即产生裂缝。此类裂缝多呈表面龟裂状或贯穿性裂缝,常见于大体积混凝土结构如重力

坝、闸墩等。

1.2 干缩裂缝

干缩裂缝由混凝土内部水分蒸发引起体积收缩所致。在干燥环境中,混凝土表层失水速率远大于内部,导致表层收缩受内部约束而开裂。此类裂缝通常较细、分布密集,多出现在混凝土浇筑后早期(3~14天),呈网状或平行排列,深度较浅,但若与温度裂缝叠加,则可能加剧结构损伤。

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。此时混凝土尚未具备足够强度,若表面水分蒸发过快(如高温、大风、低湿度环境),表层迅速失水收缩,而下部混凝土仍处于流动状态,无法提供有效约束,从而在表面形成不规则短裂缝。此类裂缝虽浅,但易成为后期裂缝扩展的起点。

1.4 沉降裂缝

沉降裂缝主要由地基不均匀沉降或模板支撑系统刚度不足引起。当地基承载力差异较大或回填土压实不均时,结构不同部位产生差异沉降,导致混凝土内部产生附加应力而开裂^[1]。此外,若模板支撑下沉或拆除过早,也可能引发此类裂缝。裂缝走向常与沉降方向一致,多为斜向或竖向。

1.5 荷载裂缝

荷载裂缝由结构承受超出设计值的外荷载(如水压力、地震力、施工荷载等)引起。当局部应力集中或整体超载时,混凝土抗拉或抗剪能力不足,导致开裂。此类裂缝通常具有明确的受力方向,如梁底受拉区的横向

裂缝、柱体的斜裂缝等。

1.6 化学反应裂缝

主要包括碱-骨料反应(AAR)和硫酸盐侵蚀等引起的膨胀性裂缝。碱-骨料反应是混凝土中的碱性物质与活性骨料发生化学反应,生成吸水膨胀的凝胶,导致混凝土内部产生膨胀应力而开裂。此类裂缝发展缓慢但不可逆,对结构耐久性构成严重威胁。

2 混凝土裂缝成因的多维分析

2.1 材料因素

混凝土裂缝的产生与原材料性能密切相关。高标号水泥虽能提供较高早期强度,但其水化热大、放热速率快,易导致大体积混凝土内部温升过高,加剧温度应力。水泥用量过多不仅增加成本,还会放大水化热效应和干燥收缩。骨料的质量同样关键,若含泥量超标或级配不良,将降低混凝土的密实度和强度;若骨料中含有活性成分,则可能诱发碱-骨料反应。外加剂的使用虽能改善工作性,但若掺量控制不当,可能导致凝结时间异常、引气过多或相容性问题,间接削弱混凝土的抗裂能力。此外,水胶比过高会显著增加孔隙率,降低强度与抗渗性,同时加剧干缩变形,为裂缝形成创造条件。

2.2 施工工艺因素

施工过程中的操作细节对裂缝控制具有决定性影响。若浇筑方案设计不合理,如分层过厚或层间间隔时间过长,容易在新旧混凝土交界面形成冷缝,成为薄弱环节。振捣作业若不充分,会导致混凝土内部存在空洞或蜂窝,降低整体密实度;而过度振捣则可能引起骨料下沉、浆体上浮,造成离析泌水,同样削弱抗裂性能。模板支撑系统的稳定性亦不容忽视,若支撑刚度不足或基础沉降,会在混凝土硬化前引发结构变形;过早拆模则使混凝土在未达到足够强度时暴露于外部荷载或温湿度变化中,极易开裂^[2]。此外,施工缝处理若不到位,如凿毛不彻底、界面清理不净或未设置止水措施,将直接影响新旧混凝土的粘结质量,形成渗漏与开裂的隐患。

2.3 环境与气候因素

外部环境对混凝土裂缝的形成具有显著催化作用。气温骤变,尤其是寒潮来袭或昼夜温差过大,会加剧混凝土内外温差,诱发较大的温度应力。在干热河谷或高原地区,强烈的日照辐射使结构表面温度远高于内部,形成复杂的温度梯度场。同时,大风天气会加速混凝土表面水分蒸发,显著提升塑性收缩和干缩的风险;低湿度环境则持续促进水分流失,延长收缩过程。这些环境因素往往相互叠加,在特定季节或地域条件下形成“高风险窗口期”,对施工组织和养护措施提出更高要求。

2.4 结构设计因素

结构设计的合理性直接影响混凝土的应力状态。若结构约束过强,例如新浇混凝土与老混凝土、基础或相邻构件之间缺乏有效的变形协调措施,将限制其自由收缩,导致拉应力累积。配筋设计若不合理,如钢筋间距过大、保护层过厚或构造钢筋配置不足,将无法有效抑制裂缝的开展宽度。此外,若未根据结构长度、形状变化或约束条件合理设置伸缩缝、后浇带或诱导缝,混凝土在温度与收缩作用下缺乏应力释放通道,极易在薄弱部位集中开裂。因此,设计阶段应充分考虑混凝土的体积变形特性,采取主动防控措施。

2.5 温控管理缺失

在大体积混凝土施工中,温控管理是防裂的核心环节。若未制定科学的温控方案,或执行不到位,极易导致混凝土内部最高温度过高、降温速率过快。例如,未对原材料进行预冷,拌合水温过高,会使出机口温度超标;未埋设冷却水管或通水时机不当,无法有效调控中期温降过程;拆模后未及时覆盖保温材料,使表面温度骤降,加大内外温差。这些管理缺失将直接导致温度应力超过混凝土抗拉强度,形成贯穿性裂缝,严重影响结构安全与防渗性能。

3 混凝土裂缝的综合防治措施

3.1 优化混凝土配合比设计

防治裂缝应从材料源头入手,通过科学的配合比设计降低内因风险。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,可显著减少水化热总量。同时,大量掺加粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料,不仅能替代部分水泥降低温升,还能改善混凝土的微观结构,提高后期密实度与耐久性。在满足强度和施工性能的前提下,应严格控制水胶比,一般建议不超过0.45,并尽量减少总胶凝材料用量。骨料应选择级配良好、含泥量低、无活性成分的优质材料,以确保混凝土的体积稳定性。外加剂的使用需精准控制,高效减水剂可降低用水量,而膨胀剂虽可补偿收缩,但需谨慎评估其长期稳定性,避免二次膨胀开裂。

3.2 强化温控防裂技术

针对大体积混凝土,必须建立全过程温控体系。施工前应对骨料喷淋降温、拌合水加冰,确保混凝土出机口温度控制在合理范围。浇筑时采用分层分块、薄层短间歇的方式,既有利于散热,又能避免冷缝形成。在混凝土内部预埋蛇形冷却水管,通过分期通水(初期快速降温、中期缓慢控温、后期保温)精确调控温度历程。拆模后立即覆盖保温保湿材料,如聚乙烯泡沫板加塑料

薄膜,冬季防冻、夏季防晒,维持内外温差在安全阈值内^[3]。近年来,智能温控系统的发展为精细化管理提供了可能,通过分布式光纤或无线传感器实时监测温度场,结合BIM平台动态调整冷却策略,实现“按需降温”。

3.3 改进施工工艺与管理

施工过程是裂缝防控的关键执行环节。振捣作业应做到均匀、充分而不离析,确保混凝土密实。施工缝和诱导缝的设置需科学合理,在应力集中区引导裂缝有序开展,并确保接缝处理到位,包括凿毛、清洗、涂刷界面剂及设置止水带。模板支撑系统必须具备足够刚度和稳定性,严禁过早拆模,尤其承重结构应依据同条件试块强度确定拆模时间。同时,应强化施工组织管理,建立裂缝防控责任制,加强技术交底与过程巡查,杜绝因人为疏忽导致的质量缺陷。

3.4 加强养护措施

养护是保障混凝土正常水化、控制早期收缩的重要手段。混凝土终凝后应立即开始湿养护,采用洒水、覆盖湿麻袋或蓄水等方式,持续时间不少于14天,若掺有大量矿物掺合料,宜延长至21天。在高温、大风或暴晒环境下,应搭设遮阳棚或采用自动喷雾系统,维持适宜的温湿度环境。对于难以持续洒水的部位,如陡坡、高空结构,可喷涂成膜型养护剂,形成封闭膜层以减少水分蒸发。良好的养护不仅能提高强度,更能显著降低早期裂缝风险。

3.5 结构设计优化

设计阶段应充分考虑混凝土的变形特性,采取主动防裂措施。在易裂部位如墙顶、孔口周边加密构造钢筋,可有效控制裂缝宽度。根据结构长度和约束条件,合理设置后浇带或伸缩缝,释放早期收缩和温度应力^[4]。对于重要薄壁结构,如闸墩或压力管道,可考虑采用预应力技术,通过施加预压应力抵消部分使用阶段的拉应力,从根本上提升抗裂能力。

3.6 裂缝监测与修复

即便采取全面防控措施,仍需建立长效监测机制。在关键部位布设裂缝计、应变计、渗压计等传感器,构建结构健康监测系统,实现对裂缝发展、渗漏状况的长期跟踪。一旦发现裂缝,应根据其宽度、深度、成因及危害程度,选择合适的修复方法。表面微裂缝可采用环氧树脂或聚合物砂浆封闭;深层或渗漏裂缝则需进行压力灌浆,常用材料包括环氧树脂、聚氨酯等;对于承载力受损部位,可辅以碳纤维布或钢板加固,恢复结构完整性与功能。

4 工程案例分析:某高拱坝温控防裂实践

以某200米级高拱坝为例,该工程地处干热河谷,昼夜温差大,年蒸发量高,混凝土总量超过300万立方米,温控防裂难度极大。项目团队从材料、施工、监测多维度协同发力,取得了显著成效。在材料方面,采用低热硅酸盐水泥复配30%粉煤灰和10%硅粉,水胶比控制在0.38,有效降低了水化热与收缩。施工中全面推行“薄层短间歇”浇筑法,最大层厚不超过2米,层间间隔控制在5天以内,并全坝预埋冷却水管实施三期通水降温。同时,部署1200余个温度传感器,结合BIM平台实现温度场可视化与智能调控。表面防护方面,夏季采用双层保温被配合自动喷淋系统,冬季则启用电热保温毯,确保全年温控稳定。竣工后三年监测数据显示,坝体最高温升控制在32℃以内,内外温差始终低于18℃,未发现贯穿性裂缝,渗漏量远低于设计允许值,充分验证了综合温控体系的有效性。

5 结语

水利水电工程混凝土裂缝的产生是材料、施工、环境、设计等多因素耦合作用的结果。单纯依赖事后修难以根治问题,必须树立“全过程防控”理念,从源头抓起,系统施策。本文提出的防治体系强调在材料层面通过低热水泥、矿物掺合料、优化配合比降低内因;在施工层面依托精细化管理和先进温控技术控制外因;在设计层面通过合理构造释放约束应力;在运维层面借助智能监测实现早期预警与精准修复。未来,随着智能建造、数字孪生、新型抗裂材料(如纤维混凝土、自修复混凝土)的发展,水利水电工程混凝土裂缝防控将迈向更高水平的智能化与绿色化。唯有坚持科技创新与工程实践深度融合,方能筑牢国家水安全的“混凝土基石”。

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]郭海龙.水利水电工程中混凝土裂缝的防治[J].石材,2023,(08):80-83.
- [4]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.