

水利水电工程施工中混凝土防裂技术研究

张潇然

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：水利水电工程中混凝土裂缝易导致结构耐久性下降、安全隐患增加，严重影响工程长期稳定运行。本文聚焦施工阶段混凝土裂缝问题，系统分析材料特性、施工工艺及环境条件三大类成因，从材料优化、工艺改进、温控防护三个维度提出针对性防裂技术方案，结合实际工程应用验证技术有效性。研究表明，通过科学配比设计、标准化施工流程及全过程温控措施，可显著降低裂缝发生率。成果为水利水电工程混凝土施工质量控制提供技术支撑，对提升工程耐久性与安全性具有重要实践意义。

【关键词】：水利水电工程；混凝土施工；防裂技术；温控措施；材料优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.025

引言

水利水电工程作为国民经济重要基础设施，其结构安全性与耐久性直接关系到水资源调控、能源供应及区域防洪安全。混凝土材料因抗压强度高、可塑性强等优势广泛应用于坝体、隧洞、面板等关键结构，但施工过程中受材料性能、施工操作、环境变化等多重因素影响，裂缝问题频发。裂缝的产生不仅削弱结构承载能力，还可能引发渗漏、钢筋锈蚀等连锁反应，缩短工程使用寿命，甚至导致重大安全事故。当前防裂技术在复杂地质条件、极端气候环境下的适应性仍有待提升，缺乏系统性的全过程控制体系。为此，深入剖析裂缝成因，研发适配水利水电工程特点的防裂技术，构建科学完善的防控体系，对保障工程质量、降低运维成本具有重要现实意义。

1 混凝土裂缝成因分析

1.1 材料特性相关因素

混凝土材料自身性能是影响裂缝产生的基础因素。水泥作为胶凝材料核心成分，其水化过程释放的大量热量会导致混凝土内部温度急剧升高，而表面散热较快形成显著内外温差，产生的温度应力当超过混凝土抗拉强度时便会引发裂缝，尤其大体积混凝土结构中该问题更为突出。骨料的粒径级配、洁净度及吸水性等特性直接影响混凝土性能，若骨料级配不合理、连续级配中断，会降低混凝土密实度和骨架支撑能力；含泥量过高则会削弱骨料与胶凝材料的粘结力，增加干缩裂缝风险。外加剂的选型与掺量不当同样会引发问题，如缓凝剂、减水剂使用比例失衡，可能导致混凝土凝结时间异常、收缩率增大，进而诱发早期塑性裂缝或后期干缩裂缝。此外，胶凝材料与骨料的相容性不足，会影响混凝土内部结构均匀性，形成应力集中区域，在温度变化或荷载作用下极易成为裂缝起始点，为裂缝扩展创造条件。

1.2 施工工艺影响因素

施工过程中的操作规范性对混凝土裂缝防控至关重要。浇筑环节若浇筑速度过快、布料不均匀，会导致混凝土内部气泡无法及时排出，形成孔隙和薄弱层面，同时引发较大的塑性收

缩应力，尤其在结构复杂或钢筋密集区域，混凝土流淌不畅易产生堆积应力；振捣作业不充分会导致混凝土密实度不足，存在疏松部位，而过度振捣则会造成骨料离析、砂浆富集，两者均会降低混凝土整体强度和抗裂性能。施工缝处理不当也是裂缝产生的重要诱因，新旧混凝土结合面若清理不彻底、残留浮浆或杂物，或结合时间间隔过长导致表面风干，会导致粘结强度不足，在温度应力或结构自重作用下出现界面裂缝。养护环节的疏忽同样不可忽视，养护不及时、养护周期不足或保湿保温措施不到位，会导致混凝土表面水分快速蒸发，内部水分无法及时补充，产生干缩裂缝，尤其在高温、大风、干燥等恶劣天气条件下，这种现象更为突出，裂缝发展速度也更快。

1.3 环境与结构条件因素

水利水电工程多处于复杂自然环境中，环境因素对混凝土裂缝的影响显著且持续。温度变化是核心环境诱因，昼夜温差、季节交替引发的温度波动，会使混凝土产生反复的热胀冷缩，长期循环作用下导致材料疲劳，逐渐形成微小裂缝并不断扩展；极端气候如夏季高温暴晒会加速表面水分蒸发和内部温度升高，冬季严寒冰冻则会使内部孔隙水结冰膨胀，破坏混凝土内部结构，均会加剧裂缝产生。湿度变化同样不可忽视，环境湿度的剧烈波动会导致混凝土表面与内部水分迁移失衡，产生干缩应力，尤其在干旱地区或雨季交替时期，裂缝发生率明显升高。此外，结构设计不合理也会间接诱发裂缝，如结构断面突变导致应力集中、配筋密度不足无法有效分散应力、地基处理不当引发不均匀沉降等，都会使混凝土结构承受超出设计预期的附加应力，当应力超过材料允许范围时便会产生裂缝，且这类裂缝往往贯穿性较强，危害更为严重。

2 混凝土防裂技术优化方案

2.1 材料配比与选型优化

材料层面的优化是防裂技术的基础环节，需立足水利水电工程混凝土的工作环境及受力特点，实现材料性能与防裂需求的精准匹配。在胶凝材料选择上，优先采用低热硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等低热型水泥品种，从源头减少水化热的释放

总量,降低温度应力引发裂缝的风险;同时合理掺加粉煤灰、矿粉、硅灰等优质矿物掺合料,通过等量或超量替代部分水泥用量,不仅能显著降低水化热峰值,延缓热量释放速率,还能优化混凝土内部微观结构,改善工作性与密实度,增强胶凝材料与骨料之间的界面粘结强度,提升整体抗裂基础性能。骨料选择需严格把控质量标准,优先选用洁净、坚硬、耐磨且级配良好的碎石或卵石,确保骨料连续级配以构建稳固的混凝土骨架,提高结构整体性;适当增加粗骨料比例,减少水泥浆用量,可有效降低混凝土硬化过程中的干缩率,同时严格控制骨料吸水率在合理范围,避免因骨料吸水后再失水产生额外体积变形,诱发内部微裂缝。外加剂的科学选用与适配是防裂优化的关键,采用高效缓凝减水剂既能有效降低水灰比,提高混凝土强度与密实度,又能延长凝结时间,为散热与应力释放预留充足时间,减少早期收缩;针对性掺加膨胀剂、纤维等功能材料,如玄武岩纤维、聚丙烯纤维,利用纤维在混凝土内部形成的三维网状结构发挥桥接效应,阻碍裂缝的萌生与扩展,提升抗拉强度和抗裂性能,而膨胀剂则可产生适度体积膨胀,补偿混凝土硬化过程中的收缩应力,抵消部分拉应力。通过正交试验、配合比优化设计等科学方法,系统调整胶凝材料、骨料、外加剂的比例参数,在满足工程强度、工作性要求的前提下,最大化提升抗裂性能,最终形成适配不同工程场景、不同环境条件的专用防裂混凝土配合比方案。

2.2 施工工艺规范化改进

施工工艺的标准化实施是防裂技术的核心保障,需贯穿混凝土施工从浇筑到养护的全过程,形成闭环管控。浇筑工艺方面,严格采用分层分段浇筑方式,结合结构尺寸、施工设备性能及现场环境条件,科学控制浇筑速度和每层浇筑厚度,确保混凝土逐层均匀布料、散热均衡,从源头避免局部温度集中升高引发的应力裂缝;振捣作业选用插入式振捣器,严格遵循“快插慢拔、分层振捣、不漏振、不过振”的操作原则,既保证混凝土内部气泡充分排出、结构密实,又有效防止过度振捣导致的骨料离析、砂浆富集问题,保障整体抗裂性能。施工缝处理需严守规范要求,浇筑前彻底清除结合面的浮浆、松动骨料及杂物,通过高压水枪冲洗或人工凿毛提升界面粗糙度,再均匀涂刷界面剂或水泥浆增强粘结力,同时合理规划施工顺序,尽量缩短新旧混凝土结合的时间间隔,避免结合面风干失效。养护工艺优化尤为关键,采用“保湿+保温”双重养护模式,浇筑完成后及时覆盖土工布、保湿膜等材料锁水,必要时搭配洒水、喷雾或蓄水养护,保持表面持续湿润;高温季节通过遮阳棚、冷却水管、喷雾降温控制入仓及表面温度,低温季节采用保温被覆盖、加热或蒸汽养护防冻,按设计要求延长养护周期,确保混凝土强度稳步增长,抗裂性能同步提升。

2.3 温控与结构防护措施

温控防护是应对温度应力裂缝的关键技术手段,需构建全

过程温控体系。在混凝土拌和阶段,采用预冷骨料、冰水拌和、加冰搅拌等方式降低入仓温度;必要时在拌和过程中掺加适量缓凝剂,延长水化热释放周期,避免温度集中升高。浇筑过程中合理设置冷却水管,采用循环水系统带走内部热量,通过调整循环水流速和水温,控制混凝土内外温差在合理范围;对于大体积混凝土结构,可采用分块跳仓浇筑方式,设置后浇带或伸缩缝,释放温度应力和收缩应力。温度监测系统的应用不可或缺,在混凝土内部和表面布设温度传感器,实时监测温度变化数据,建立温度预警机制,及时调整温控措施。结构防护方面,优化结构设计方案,避免断面突变,合理设置伸缩缝、沉降缝和诱导缝,在易开裂部位如边角、孔洞周围、截面突变处增设加强筋或构造钢筋,提高局部抗裂能力;在混凝土表面涂刷防护涂层、憎水剂或渗透结晶型防水材料,提高抗渗、抗冻、抗侵蚀性能,减少环境因素对结构的侵蚀,延缓裂缝产生和扩展。

3 防裂技术实践应用与成效

3.1 工程应用场景适配

防裂技术的应用需结合工程实际场景进行针对性适配,确保技术方案的实用性和有效性。在水电站坝体、厂房等大体积混凝土施工中,重点采用低热水泥配合矿物掺合料的材料方案,搭配冷却水管温控系统和分层分块浇筑工艺,通过实时温度监测动态调整养护措施,有效控制水化热裂缝,保障坝体结构整体性。在堆石坝面板混凝土施工中,应用VF防裂剂与玄武岩纤维复合的双掺防裂技术,形成微膨胀补偿与纤维拉结的双重防护体系,适配面板薄、面积大、易受温度和干缩影响的特点,显著降低面板裂缝发生率。对于地下隧洞、涵管等隐蔽工程,优化配合比提高混凝土抗渗等级和密实度,采用喷射混凝土施工工艺减少收缩裂缝,同时加强养护期间的通风保湿措施,避免洞内干燥环境引发早期裂缝。在高温、高寒、高海拔等极端环境下施工时,针对性调整温控措施和养护方案,如高温环境增加冷却措施、高寒环境强化保温养护,确保防裂技术适配复杂环境条件,实现不同场景下的裂缝有效防控。

3.2 技术实施关键点

防裂技术的有效实施需把控关键操作要点,建立全流程质量管控体系。材料质量控制是基础,严格执行原材料进场检验制度,对水泥、骨料、外加剂等各类材料进行性能检测,重点核查强度、水化热、含泥量、兼容性等指标,不合格材料严禁使用;配合比实施过程中,精准控制各组分计量误差,确保配比参数符合设计要求,同时根据原材料性能波动及时调整配合比。施工过程中的过程控制尤为重要,建立“三检制”质量管控体系,对浇筑、振捣、养护等关键工序进行全程监督和旁站监理,及时纠正不规范操作;温度监测数据需实时分析,绘制温度变化曲线,根据温差变化动态调整温控措施,确保温度应力控制在允许范围。技术人员与施工人员的协同配合不可或

缺,施工前开展专项技术交底,确保施工人员熟练掌握防裂技术要点、操作规范和质量标准;针对复杂部位或特殊环境施工制定专项方案,组织专家论证,明确技术难点和应对措施,保障技术实施的科学性和安全性,避免因操作不当导致防裂失效。

3.3 应用成效与价值体现

优化后的防裂技术在多项水利水电工程中得到成功应用,取得显著的技术成效和经济社会效益。通过材料优化、工艺改进与温控防护的综合应用,混凝土裂缝发生率大幅降低,尤其是在大体积混凝土结构和复杂环境下施工的工程中,实现了“无缝面板”“少裂缝坝体”的示范效果。技术应用不仅提升了混凝土结构的完整性和耐久性,减少了后期裂缝修复的工程量和运维成本,还延长了工程使用寿命,保障了工程长期稳定运行。在社会效益方面,防裂技术的推广应用提高了水利水电工程建设质量,增强了工程抗灾能力和运行安全性,为水资源安全调配、清洁能源供应稳定提供了可靠保障;同时,技术创新推动了行业施工技术水平的提升,形成了可复制、可推广的

防裂技术方案和施工工法,为类似工程提供了技术参考,对促进水利水电工程高质量发展具有重要的行业示范价值。

4 结语

混凝土防裂技术是保障水利水电工程质量与安全的核心技术之一,其发展需紧密结合工程实际需求,针对裂缝成因进行系统性防控。材料优化、工艺改进与温控防护的有机结合,构成了全方位的防裂技术体系,能够有效应对施工过程中的各类裂缝风险,为工程结构安全提供坚实保障。随着水利水电工程向大型化、复杂化、极端环境化方向发展,防裂技术面临更高要求,需要在现有基础上持续创新。未来应加强低碳胶凝材料、自修复混凝土、智能感知材料等新型材料的研发与应用,结合物联网、大数据等智能化监测技术构建动态防控体系,实现从被动修复向主动预防、精准防控的转变。通过技术创新与实践积累,持续完善防裂技术体系,优化技术适配性和经济性,为水利水电工程的高质量建设提供更坚实的技术支撑,助力基础设施建设的可持续发展。

参考文献:

- [1] 何吉东.水利工程中混凝土裂缝的防治施工技术[J].中国水泥,2025,38(5):110-112.
- [2] 许浩,田雨浩,郑建月,陈明.南公1水电站堆石坝面板混凝土防裂技术研究[J].中国农村水利水电,2025,43(4):84-89.
- [3] 闫娜娜.水利工程中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J].中国水泥,2025,38(5):76-78.
- [4] 杨文锐.水利施工中混凝土裂缝防治管理研究[J].低碳世界,2025,15(4):61-63.
- [5] 吴谷丰.水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,12(10):211-213.