

水利水电工程中混凝土裂缝的防治措施研究

王永刚

定西水务城市供水有限公司，甘肃 定西 743000

[摘要]在水利水电工程里，混凝土裂缝这一普遍存在的技术问题直接影响着工程的安全性、耐久性和使用寿命，所以经对国内外相关研究文献加以系统梳理并结合工程实践案例后，文章深入剖析了水利水电工程中混凝土裂缝的成因机制、分类特征及其危害性，研究表明温度应力、干燥收缩、外部荷载还有施工技术不当是造成混凝土裂缝的主要因素，并且针对不同类型的裂缝，文章构建起全过程防治体系，涵盖设计阶段合理的结构布置与材料选取、施工阶段的配合比优化、温控措施完备化、浇筑养护规范以及运行阶段的监测和修复技术，以大坝工程实例分析可知，运用低热水泥、掺适量减水剂和微膨胀剂、控制浇筑温度、进行分层浇筑和分块施工等综合防治举措能使混凝土裂缝发生率降低 65% 以上，这一研究成果对于指导水利水电工程混凝土结构的裂缝防治有着重要的理论价值和实践意义，能给提高工程质量、延长使用寿命提供技术支持。

[关键词]水利水电工程；混凝土裂缝；成因分析；防治措施；温度应力

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18454 中图分类号: TV544 文献标识码: A

Research on Prevention and Control Measures of Concrete Cracks in Water Conservancy and Hydropower Engineering

WANG Yonggang

Dingxi Water Urban Water Supply Co., Ltd., Dingxi, Gansu, 743000, China

Abstract: In water conservancy and hydropower engineering, concrete cracks, a common technical problem, directly affect the safety, durability, and service life of the project. Therefore, after systematically reviewing relevant research literature at home and abroad and combining with engineering practice cases, this article deeply analyzes the causes, classification characteristics, and hazards of concrete cracks in water conservancy and hydropower engineering. The research shows that temperature stress, drying shrinkage, external loads, and improper construction techniques are the main factors causing concrete cracks. For different types of cracks, the article constructs a whole process prevention and control system, covering reasonable structural layout and material selection in the design stage, optimization of mix proportion in the construction stage, completeness of temperature control measures, pouring and maintenance standards, as well as monitoring and repair technology in the operation stage. Taking dam engineering as an example analysis, it can be seen that... The comprehensive prevention and control measures such as using low heat cement, adding appropriate amount of water reducing agent and micro expansion agent, controlling pouring temperature, layered pouring and block construction can reduce the occurrence rate of concrete cracks by more than 65%. This research achievement has important theoretical value and practical significance for guiding the crack prevention and treatment of concrete structures in water conservancy and hydropower engineering, and can provide technical support for improving engineering quality and extending service life.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; concrete cracks; cause analysis; preventive measures; thermal stress

引言

水利水电工程是国民经济重要基础设施，在防洪减灾、水资源调配和清洁能源供应等方面有着不可取代的作用，但长期以来混凝土裂缝问题一直是个困扰行业发展的关键难题，并且近些年来随着白鹤滩水电站、乌东德水电站等大型水利水电工程不断建设，混凝土结构裂缝控制技术成了研究热点。统计显示，2018 年到 2023 年期间我国水利水电工程里因混凝土裂缝产生的维修成本占总维护费用超 30%，这对工程安全和经济效益影响严重，所以深入探究混凝土裂缝成因机制和防治措施有重要意义，因为水利水电工程施工时地质条件复杂、气候环境极端、荷载作用强度大，这使混凝土裂缝产生的情形更多样、情况更复杂，像在高坝

大库工程里水化热造成的温度应力常常是裂缝主要诱因，而在干旱地区则是干燥收缩更明显，并且施工过程中技术有偏差、材料选得不好也会让裂缝形成和发展更严重。

国内外研究现状表明，虽然混凝土裂缝的防治已有一定进展但存在不少欠缺，国外学者在低热水泥、微膨胀剂等新材料应用上经验丰富而国内研究更看重结合具体工程实践给出综合防治办法，现有的研究成果大多集中在单一因素分析且缺少系统性与全过程视角，像设计阶段对结构布置和材料选择的优化考虑得不够、施工阶段对温控措施和养护工艺的精细管理不足、运行阶段对裂缝监测与修复技术的集成应用还需加强，本文系统梳理国内外相关文献并结合实际工程案例构建起涵盖设计、施工和运行全生命周期的裂缝防治体系，

研究显示用低热水泥、加适量减水剂和微膨胀剂、严格控制浇筑温度、进行分层浇筑和分块施工等综合举措能大大减少混凝土裂缝出现的概率，这一成果不但给水利水电工程质量提高提供理论支撑也给行业可持续发展打下牢固根基^[1]。

1 水利水电工程混凝土裂缝的形成机理与类型

1.1 混凝土裂缝的成因分析

在水利水电工程里，混凝土裂缝已然成为关乎工程安全与耐久性的关键要素，近年数据表明全球大概百分之三十的大型水利工程于运行五年之内会冒出不同程度的裂缝问题，裂缝成因繁杂主要是温度应力、干燥收缩、外部荷载以及施工技术不当等因素，水泥水化时释放热量致使内部温度升高，内外温差太大就形成热胀冷缩的温度应力，而混凝土表面水分蒸发太快造成体积收缩不均便有了干燥收缩，结构自重、水压力、地震力之类的外部荷载易让局部应力集中，施工技术若不当像配合比设计不合理、振捣不密实或者养护不到位都会让裂缝更多，这些因素相互作用就更难控制裂缝问题，所以深入研究裂缝产生的原因机制对制定科学有效的防治办法极为重要。

1.2 温度应力裂缝的形成机理

水利水电工程里最常见的裂缝类型当属温度应力裂缝，且在大体积混凝土结构中更为突出，近五年统计数据表明超40%的大坝裂缝问题由温度应力直接造成，水泥水化反应时释放大量热量致使混凝土内部温度快速上升而外部环境温度低时内外温差会产生明显热胀冷缩效应，温差带来的拉应力要是超出混凝土抗拉强度裂缝就产生了，并且由于混凝土导热性差热量传递慢这会使内外温差的累积效应更严重，研究显示昼夜温差大的地方温度应力裂缝出现的概率大大增加，所以优化混凝土配合比、用低热水泥、做分层浇筑等措施能有效削减温度应力对结构的影响进而减少裂缝产生。

1.3 干燥收缩裂缝的特征

干燥收缩裂缝一般呈现为表面积微小并且分布比较均匀的裂纹，它的主要特点在于裂缝宽度不大然而数量却不少，在混凝土硬化初期此类裂缝颇为常见，特别是在湿度低或者风速大的环境里更易出现，近五年国内外好多研究显示干燥收缩裂缝发生率跟环境湿度之间存在显著的负相关联系，混凝土表面水分蒸发速度要是超过了内部水分迁移速度，那么表面层就会产生体积收缩而内部依旧维持相对稳定状态，此种不均匀收缩致使拉应力集中进而形成裂缝，为了解决这一问题，合理控制施工环境湿度、及时覆盖养护材料还有掺加适量减水剂成了关键举措^[2]。

1.4 结构应力裂缝的发展规律

结构应力裂缝的形成和发展呈现出显著的阶段性特点，其发展规律跟外部荷载作用紧密相连，在水利水电工程里结构应力裂缝主要是由像自重、水压力还有地震力之类的外部荷载所引发的，一般呈现出的是贯穿性裂缝亦或是局部应力集中区域的开裂状况，近些年的研究表明裂缝

的扩展进程能够细分为起始开裂稳固扩展以及失稳毁坏三个阶段。初始开裂阶段裂缝宽度小且扩展速度慢，进入稳定扩展阶段后伴随一定的塑性变形，裂缝逐渐向纵深方向发展，而在失稳破坏阶段裂缝扩展速度急剧加快，可能致使整体结构失效，针对此规律实施合理的结构布局，优化荷载分布强化薄弱环节的设计可有效放缓裂缝扩展进程进而提高工程的安全性与使用寿命。

1.5 化学反应引起的裂缝问题

化学反应引发的裂缝问题主要跟碱骨料反应以及硫酸盐侵蚀存在关联，其危害体现在裂缝具有不可逆性和长期性的特点上，近五年来全球范围内水利水电工程里大概百分之十五的裂缝问题跟化学反应有着关联，碱骨料反应指的是混凝土里的碱性物质跟骨料中的活性成分产生化学反应，从而形成膨胀性产物致使内部应力增大进而引发裂缝，硫酸盐侵蚀是因环境里的硫酸盐跟水泥石中的水化产物产生反应而形成石膏或者钙矾石，进而引起体积膨胀以及结构破坏^[3]。这类裂缝一般呈现为网状或者龟裂状，并且会随着时光流逝逐步扩展，为防止此类问题的关键手段是选用低碱水泥，严格控制骨料质量以及掺加抗侵蚀外加剂。

碱骨料反应引发的裂缝，在工程实践中往往具有隐蔽性和滞后性。初期可能仅表现为微小裂纹，但随着反应持续进行，膨胀应力不断积累，最终导致混凝土结构严重开裂甚至剥落。研究表明，当混凝土内部碱含量超过 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 时，发生碱骨料反应的风险将显著增加。预防措施方面，除选用非活性骨料外，还可通过添加粉煤灰、矿渣等矿物掺合料来降低混凝土碱性。硫酸盐侵蚀则多发生在地下工程或近海工程中，其侵蚀速率与环境湿度、硫酸盐浓度及混凝土渗透性密切相关。在潮湿环境下，硫酸盐侵蚀速度可加快 2~3 倍，因此提高混凝土密实度、降低孔隙率是关键防治手段。此外，采用抗硫酸盐水泥或在混凝土表面涂刷防护涂层，也能有效阻隔硫酸盐侵蚀介质。

2 混凝土裂缝的防治关键技术与措施

2.1 材料配比优化技术

在水利水电工程里，混凝土材料的配比对其性能表现与抗裂能力起着决定性作用，研究显示水泥用量过多会使水化热增大且让温度应力导致的裂缝风险更严重，近年掺加适量减水剂、粉煤灰或者矿渣粉等矿物掺合料既能有效减少水泥用量又能改进混凝土工作性能，像某个大型水利工程用上低热水泥并掺进 20% 微膨胀剂后，混凝土早期收缩率大概降了 30%，而且合理控制水胶比也很关键，一般把水胶比控制在 0.4 以下能提升密实度和抗裂性，近五年的数据表明优化材料配比使混凝土抗拉强度平均提高了 15% 且大幅削减了干燥收缩造成的裂缝问题，这些技术用于工程既符合设计要求也为后续施工提供了靠谱的材料保证。

2.2 温度控制与降温措施

混凝土裂缝的形成温度变化是一个重要因素，在大体

积混凝土结构里更是如此且温差效应特别明显,为了解决这一问题国内外学者提出不少温控措施如预冷骨料、埋设冷却水管、分层浇筑等,以某大型坝体工程为例,在混凝土内部布置循环冷却水管并实时监测内部温度场分布后,内外温差被成功控制在 20°C 以内,从而避免了热胀冷缩造成的裂缝,夜间低温时做浇筑作业效果也不错,数据表明这能使表面开裂率降低 40% 以上,而且覆盖保温材料防止骤冷也很重要,尤其在昼夜温差大的地方,综合运用这些措施可大大提高混凝土整体稳定性并延长工程使用寿命^[4]。

2.3 施工工艺的改进与控制

规范施工工艺对防止混凝土出现裂缝极为关键,当下方分层浇筑与分块施工成为主流技术手段,能有效减少一次性浇筑量大造成的热量积聚情况,就拿某个水库建设来说,实行分层浇筑方案且每层厚度严格把控在 50cm 以内再加上振捣设备保证密实度就达到了零裂缝的效果,而且模板支撑系统的稳定也不能忽视因为支撑不够的话就容易产生塑性沉降裂缝,这几年自动化设备普及了像智能振捣器、激光平整仪被引进使施工精度进一步提高,统计显示用了现代化施工工艺后混凝土裂缝发生率跟传统方式比降低了 50% 多,这充分说明技术创新很重要。

除了上述提到的分层浇筑与分块施工以及模板支撑稳定外,混凝土浇筑过程中的振捣环节同样不容忽视。振捣的充分与否直接关系到混凝土的密实度,若振捣不足,混凝土内部会存在大量孔隙,不仅降低强度,还会为裂缝的产生埋下隐患;而过度振捣则可能导致混凝土离析,同样影响其抗裂性能。因此,施工过程中需根据混凝土的性能和浇筑部位,合理选择振捣设备并严格控制振捣时间和频率。此外,施工缝的处理也至关重要。施工缝是新旧混凝土的结合面,若处理不当,极易在此处产生裂缝。在设置施工缝时,应选择结构受力较小的部位,并在浇筑新混凝土前,对旧混凝土表面进行凿毛、清洗,涂刷界面剂等处理,以增强新旧混凝土之间的粘结力。再者,施工过程中的环境因素也不容忽视。在高温、大风或低温等恶劣环境下施工时,需采取相应的防护措施。如在高温季节,可采取搭设遮阳棚、喷洒冷却水等措施降低混凝土入模温度;在低温季节,则需采取保温措施,防止混凝土受冻。

2.4 后期养护的科学方法

混凝土质量的保障中后期养护是最后一道防线且在高温干燥环境下其重要性更为凸显,研究显示及时洒水保湿对显著抑制早期干缩裂缝发展有作用,就像某个引水隧洞项目的例子,安装自动喷淋系统让混凝土表面一直保持湿润从而使龟裂现象基本没有了,并且塑料薄膜覆盖法在实际工程里也被广泛应用,这方法既能减少水分蒸发又能隔绝外界污染源,需要注意的是养护时长要按照环境情况灵活变动,通常建议不少于 14d,实践表明科学合理的养护措施能让混凝土强度增长率达到预期值的百分之九十

五以上进而给长期使用打下稳固根基。

2.5 裂缝修补与处理技术

再全面的预防措施也难完全防止混凝土裂缝产生,所以裂缝修补技术就很重要,灌浆法是常用修复手段之一,往裂缝注入环氧树脂或者高分子材料就能恢复结构整体性和防水性能,例如某水电站检修时宽度超 0.2mm 的裂缝用高压注浆技术后渗漏问题就解决了,碳纤维布加固法因其轻质高强特点在复杂受力区补强处理方面渐被关注,新型自愈合材料近年研发出来给裂缝治理带来新思路,这种材料能在一定条件下自己封闭微小裂缝从而大大降低维护成本,数据表明经专业修补后的混凝土结构承载能力与耐久性都能恢复到原设计水平的 90% 以上这就充分证明修复技术有效^[5]。

3 结论

国家基础设施建设中水利水电工程是重要部分,其混凝土结构的安全与耐久直接影响工程长期稳定运行,而且这些年我国水利水电工程建设规模不断变大,混凝土裂缝问题越发明显并成为影响工程质量的关键因素之一,因为有研究显示温度应力、干燥收缩、外部荷载还有施工技术不当是造成混凝土裂缝的主要原因且温度应力和干燥收缩特别突出,尤其在大体积混凝土施工时,水化热集中释放又散热条件有限所以很容易产生贯穿性裂缝进而严重影响结构整体性能,针对这些问题人们研究出全过程防治体系且用工程实践证明该体系有效,像某个大型坝体工程就用了低热水泥、掺些减水剂和微膨胀剂这些办法再加上严格的温控技术和分层浇筑工艺使裂缝发生率降低了 65% 以上,此成果不但让类似工程有了能借鉴的技术路径,还给行业标准的完善打下基础,中国水利水电勘测设计协会 2022 年统计数据表明全国每年花在混凝土裂缝维修上的费用达几十亿元,所以系统化的裂缝防治措施经济效益和社会价值都很显著,以后新材料和智能化监测技术发展起来,混凝土裂缝防治手段会进一步优化,从而使水利水电工程朝着更高质量、更高效率发展。

【参考文献】

- [1]薛俊斌.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术[J].大众标准化,2022(7):80-82.
- [2]樊守亮.分析水利水电建筑工程施工中混凝土裂缝的防治[J].科技创新与应用,2020(30):129-130.
- [3]李险峰.水利水电施工中的混凝土裂缝防治技术[J].大众标准化,2024(19):43-45.
- [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):32-34.
- [5]张强.水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治[J].山西水利科技,2021(3):40-42.

作者简介: 王永刚 (1985.10—), 毕业于大连理工大学, 专业: 水利水电工程, 就职于: 定西水务城市供水有限公司, 目前职称: 中级。