

水利工程中混凝土裂缝防治技术研究

顾子龙¹, 王蕊², 王旭¹, 张闯¹, 朱明¹

1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 江苏省淮沐新河管理处, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ERA.2026010002

摘 要 : 水利工程中混凝土裂缝问题普遍存在, 直接影响结构的安全性与耐久性。通过对裂缝成因进行系统分析, 结合工程实践和数据对比, 总结出材料优化、结构改进、施工控制及养护管理等多层次的防治措施。结果显示, 合理控制水化热、优化配合比、采用新型掺合料与纤维材料, 并辅以科学的施工工艺和养护方法, 能够有效降低裂缝发生率, 提升整体结构性能。研究成果为提高水利工程质量与延长服役寿命提供了有价值的技术参考。

关 键 词 : 水利工程; 混凝土裂缝; 防治技术; 耐久性

Research on the Prevention and Control Technology of Concrete Cracks in Water Conservancy Projects

Gu Zilong¹, Wang Rui², Wang Xu¹, Zhang Chuang¹, Zhu Ming¹

1. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

2. Management Office of Huaishu Xinhe in Jiangsu Province, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : The issue of concrete cracks is prevalent in water conservancy projects, directly impacting the safety and durability of structures. Through a systematic analysis of the causes of cracks, combined with engineering practices and data comparisons, this study summarizes multi-level prevention and control measures, including material optimization, structural improvement, construction control, and maintenance management. The results demonstrate that reasonable control of hydration heat, optimization of mix proportions, adoption of new admixtures and fiber materials, complemented by scientific construction techniques and maintenance methods, can effectively reduce the incidence of cracks and enhance overall structural performance. The research findings provide valuable technical references for improving the quality and extending the service life of water conservancy projects.

Keywords : water conservancy projects; concrete cracks; prevention and control technology; durability

引言

水利工程规模庞大, 混凝土作为主要建材, 在施工与运行中极易产生裂缝, 严重影响结构的安全性与耐久性。尽管国内外学者已在裂缝防治方面开展了多层次研究, 但面对水利工程复杂环境条件, 仍存在适用性不足与措施不完善的问题。为进一步提升工程质量与延长服役寿命, 亟需从材料、结构、施工及养护等方面提出系统化的防裂技术路径, 为后续实践与技术推广提供参考。

一、混凝土裂缝的成因分析

(一) 材料因素

混凝土作为一种多组分复合材料, 其内在质量直接决定了裂缝产生的可能性。首先, 水泥水化热是引发裂缝的主要原因之一。在大体积混凝土中, 水化反应剧烈放热, 内部温度急剧上升, 而表层散热快, 形成明显的温度梯度, 极易导致内外收缩不均, 从而产生温度裂缝。其次, 骨料级配不合理也会加剧裂缝风险。当粗细骨料搭配不当时, 骨料间空隙过大, 需水量增加, 导致干缩变形加大, 进而削弱了混凝土整体抗裂性能。再次, 外加

剂的使用若控制不当同样会带来不利影响。比如减水剂、膨胀剂等虽然能改善流动性和早期性能, 但若掺量不合理, 可能导致混凝土结构稳定性下降, 表现为开裂或收缩不均。因此, 材料的选择、配比及掺合料的科学应用, 是决定混凝土裂缝形成与否的重要因素^[1]。

(二) 环境因素

水利工程通常处于复杂的自然环境中, 外部条件对混凝土裂缝的形成有着显著影响。温度变化是最直接的因素, 昼夜温差或季节性温差过大时, 混凝土内外部温度应力差增加, 极易出现表面裂缝或深层裂缝。尤其在水库大坝、渠道等工程中, 太阳辐射

和环境气温的波动都会加剧这种影响。其次，水文条件变化显著。在高水位冲刷或水流长期浸泡的作用下，混凝土结构表层易受到侵蚀或反复渗透，导致内部孔隙扩大，从而引发裂缝。再次，干湿交替循环是另一关键因素。在部分工程中，混凝土长期处于时干时湿的环境中，体积反复膨胀和收缩，久而久之形成疲劳裂缝。由此可见，环境条件是裂缝发生的重要外部推动力，若缺乏有效的温控与防护措施，裂缝的不可避免性将大大增加。

（三）施工与结构因素

施工工艺与结构设计往往是影响裂缝产生的直接原因。首先，浇筑工艺不当极易诱发裂缝。在大体积混凝土浇筑过程中，若未能分层分块合理安排，或振捣不均，容易形成冷缝、离析或孔隙，进而削弱整体强度，最终以裂缝形式表现出来。其次，约束应力是施工阶段不可忽视的因素。当混凝土因温度变化或收缩变形受到外部结构或地基的约束时，应力无法释放，最终以裂缝的形式释放能量。此外，结构受力集中也会成为裂缝的源头。例如在坝体转角、闸墩根部或孔口位置，受力复杂且不均，极易在荷载作用下形成应力集中区，从而产生裂缝。如果设计阶段未充分考虑这些薄弱环节，或者缺乏相应的结构加固与应力释放措施，裂缝必然会频繁出现^[2]。由此可见，科学的施工工艺与合理的结构设计，是降低裂缝风险的关键所在，如图1所示。



图1 混凝土裂缝成因分类示意图

二、混凝土裂缝的危害与评价

（一）对结构安全性的影响

混凝土裂缝最直接的危害在于对结构安全性的削弱。水利工程中常见的裂缝一旦产生，不仅破坏了整体结构的完整性，还可能造成应力重新分布，使局部构件承受的荷载超过设计限值。当裂缝不断扩展和加深时，坝体、堤防或渠道等结构就会出现渗漏通道，水流通过裂缝冲刷内部材料，导致结构密实性下降，渗透压力增大，进而引发渗漏、管涌等危险现象。在某些情况下，裂缝甚至可能引起结构整体的失稳与破坏，带来严重的安全隐患。例如，大坝出现纵向贯穿裂缝时，坝体抗滑稳定性显著降低，在洪水或地震等极端荷载作用下极易导致工程事故。因此，裂缝不仅仅是表面的瑕疵，而是威胁结构安全的潜在灾害源，其对工程稳定性的重要性必须引起高度重视^[3]。

（二）对耐久性的影响

除了对结构安全性的直接威胁外，裂缝对混凝土耐久性的破坏更加隐蔽且长期存在。裂缝的出现为外部侵蚀介质提供了通道，水分、氧气以及氯离子、硫酸盐等腐蚀性物质能够顺利进入

混凝土内部，造成钢筋锈蚀和混凝土碳化。钢筋锈蚀不仅降低其截面有效面积，还会因锈胀效应产生更大的膨胀应力，使裂缝进一步扩展，从而形成恶性循环。此外，在水利工程长期服役过程中，裂缝的存在加速了冻融循环破坏，尤其在寒冷地区，当水分进入裂缝后反复冻融，混凝土表层剥落、内部孔隙增大，导致结构逐渐劣化。耐久性下降最终表现为结构承载力衰减、使用寿命缩短以及维护成本大幅增加。由此可见，裂缝不仅影响当下的使用功能，还直接决定了工程未来几十年的服役性能，是制约水利工程可持续运行的重要隐患。

（三）裂缝检测与评价方法

由于裂缝对结构安全性与耐久性的危害显著，科学的检测与评价尤为关键。常用方法包括超声波检测、裂缝宽度监测和渗透试验等。超声波检测利用波速在裂缝处的衰减与反射特性来判断裂缝的深度与分布情况，适用于较深层或隐蔽裂缝的识别。裂缝宽度监测则多通过裂缝计或光学显微镜等工具实现，能够精确记录裂缝的宽度、长度及发展趋势，为工程管理者提供量化数据支撑。渗透试验则通过压力水作用于混凝土表面，观察渗水情况，以评价裂缝的贯通性与渗透风险。此外，近年来还发展了基于数字图像处理的非接触式监测技术以及光纤传感技术，能够实现实时、自动化的裂缝监控，为裂缝发展趋势的预警提供更加可靠的依据^[4]。通过多种检测方法的综合应用，可以全面评价裂缝的性质、程度及对结构的影响，从而为制定合理的修复与防治措施提供科学依据。

三、防治裂缝的材料与结构措施

（一）优化配合比设计

在混凝土配合比设计中，合理控制水灰比是减少裂缝的重要手段。研究表明，当水灰比由0.55降低至0.40时，混凝土的抗拉强度提高约18%，干缩率下降近25%，显著降低了早期裂缝风险。使用低水化热水泥可以有效减缓水化反应释放的热量，从而减小内部温度梯度。例如在某水利枢纽工程中，采用中热硅酸盐水泥后，浇筑块体最高中心温度比普通硅酸盐水泥降低12℃，有效避免了大面积温度裂缝。同时，外加剂的应用也起到关键作用，减水剂可在保持工作性能的同时降低需水量，膨胀剂则能补偿收缩应变。据工程试验数据显示，掺入3%膨胀剂的混凝土其收缩率下降了近40%，裂缝发生率显著减少。因此，优化配合比不仅是材料科学问题，更是防裂设计中的核心环节^[5]。

（二）新型材料应用

随着新型建材的发展，纤维混凝土、膨胀剂和矿物掺合料在裂缝防治中的应用愈加广泛。纤维混凝土因掺入钢纤维、聚丙烯纤维或玄武岩纤维而显著提升抗裂性能，纤维能在微裂缝萌生阶段进行有效桥接，延缓裂缝扩展。据试验数据表明，掺入1.0%聚丙烯纤维的混凝土，抗弯强度提高了22%，裂缝宽度降低了45%。膨胀剂通过水化反应生成钙矾石，在硬化过程中产生适度膨胀，可抵消部分收缩变形，尤其适合大体积水工结构。矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉和硅灰则能改善混凝土微观结构，减少毛

细孔隙，提升抗渗性。以某大坝为例，采用30% 粉煤灰取代部分水泥后，28天抗渗系数提高了1.6倍，裂缝发生率降低约35%。由此可见，新型材料的合理使用是提高水工混凝土抗裂性能的重要途径^[6]。

（三）结构优化措施

除了材料层面的改善，合理的结构设计同样在防裂中起到关键作用。伸缩缝的合理布置能够有效释放混凝土温度应力和干缩应力，防止应力集中导致贯穿裂缝。例如在一座拱坝工程中，通过将伸缩缝间距由25米缩短至15米，裂缝数量减少了近40%。此外，加强钢筋布置也是有效措施，特别是在应力集中部位采用双层双向钢筋网或配置抗裂钢筋，可以大大提高结构整体抗拉性能。实测数据显示，钢筋率由0.7% 提高至1.0% 时，裂缝控制宽度由0.35mm 降低至0.18mm，抗裂效果明显。合理设置约束释放区、避免尖锐转角及截面突变，也能有效改善结构受力条件，降低裂缝发生概率。由此，结构优化与材料措施相辅相成，是水利工程裂缝控制不可或缺的一环。如表1 所示。

表1 不同防裂措施的效果对比

防裂措施	技术要点	裂缝减少率（%）	性能提升效果	工程实例效果
优化配合比设计	控制水灰比、低水化热水泥、外加剂	30 - 45	抗拉强度提高15 - 20%，收缩率下降20 - 30%	大坝中心温度降低12℃，裂缝率下降40%
纤维混凝土	掺入聚丙烯或钢纤维	40 - 55	抗弯强度提高20% 以上，裂缝宽度降低40 - 50%	裂缝数量明显减少，抗裂耐久性提高
膨胀剂与矿物掺合料	膨胀补偿、粉煤灰、矿渣粉等	25 - 35	抗渗性提高1.5 倍，收缩变形减小30%	裂缝发生率下降30 - 40%
结构优化（缝与钢筋布置）	缩短伸缩缝间距，加强钢筋配置	35 - 50	裂缝控制宽度降低40 - 50%	裂缝减少近40%，结构稳定性提升

数据表明，综合运用配合比优化、新型材料及结构优化措施，裂缝减少率普遍超过30%，其中纤维混凝土与合理钢筋布置效果尤为显著，对水利工程安全性和耐久性提升具有重要意义。

四、施工与后期养护的防裂措施

（一）施工工艺优化

在混凝土施工过程中，合理的工艺控制是防止裂缝产生的前提。分层分块浇筑能够有效减少水化热集中释放带来的温度裂缝，尤其在大体积混凝土中，常采用“斜面分层”与“跳仓法”浇筑，以降低内外温差。温控措施方面，常通过预冷骨料、掺加

冰水或在浇筑区设置冷却水管来降低混凝土初始温度，使浇筑温度控制在15 ~ 20℃之间，从而减小温度应力。振捣工艺同样重要，若振捣不足易导致混凝土离析、孔隙增多，强度不足而引发裂缝；若振捣过度，则会出现泌水与分层^[7]。因此在施工中应严格控制振捣时间与间距，确保结构致密性与均匀性。

（二）养护措施

养护是混凝土强度和抗裂性能形成的重要环节。保湿养护可避免早期失水干缩，常用的措施包括覆盖麻袋、塑料薄膜或喷洒养护剂，使混凝土表面保持湿润。覆盖保温则在昼夜温差或季节变化较大的环境中尤为关键，可采用草帘、岩棉被等材料，延缓温度梯度形成。对于大体积混凝土，循环冷却水养护效果显著，例如在坝体内部埋设冷却水管道，利用水流带走水化热，可将核心温度降低8 ~ 10℃，有效避免内部裂缝产生。此外，养护时间的控制也十分重要，通常不少于14天，特殊工程甚至延长至28天，以确保水化反应充分进行。若在早期阶段未能保证科学养护，极易造成不可逆裂缝，对结构长期性能产生不利影响。养护措施的系统实施不仅能减少早期裂缝，还能提高混凝土密实度和耐久性^[8]。

（三）监测与管理

施工与养护过程中，监测与管理是保证防裂效果的最后一道关口。裂缝监控系统可通过传感器与数据采集仪实时记录裂缝宽度、发展速度和温度湿度变化，为工程管理提供科学依据。近年来，光纤传感与数字图像技术的应用显著提高了裂缝监测的精度和自动化水平。在管理层面，质量控制应标准化与制度化，从原材料进场、配合比调整到施工工艺和养护环节都需严格把关。通过建立完善的施工质量验收制度与裂缝应急处理机制，能够实现对裂缝的早发现、早处理，最大限度降低其对结构安全与耐久性的影响。

五、结语

水利工程中混凝土裂缝问题普遍且复杂，其成因涉及材料特性、环境作用及施工结构因素，危害表现为安全性下降与耐久性劣化。通过系统分析与数据对比可知，优化配合比、新型材料应用、合理结构设计以及科学施工与养护措施均能显著降低裂缝发生率，提升工程整体性能。同时，裂缝检测与监测技术的发展为及时评估与防治提供了有力支撑。未来应加强智能监测与大数据分析应用，以实现裂缝防控的精细化与长效化。

参考文献

[1] 马鹏,王汴歌,翟晋浩,等. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治 [J]. 河南水利与南水北调, 2018, 47(01): 44-45.
[2] 刘冬华. 水利施工工程中混凝土裂缝的防治技术 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(12): 77-79.DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.12.024.
[3] 李彤. 论混凝土裂缝防治技术在土木工程中的重要性 [J]. 黑龙江科技信息, 2016, (16): 253.
[4] 江建军. 水利工程施工中混凝土裂缝的原因分析及防治 [J]. 信息化建设, 2016, (06): 11.
[5] 郑淑峰. 水利工程施工中混凝土裂缝防治技术 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2016, 25(02): 15-16.
[6] 潘葵敏. 水利工程施工中混凝土裂缝的种类与防治措施分析 [J]. 企业技术开发, 2015, 34(21): 162-163.
[7] 弋瑞. 水利工程施工中混凝土裂缝控制技术分析 [J]. 工程建设与设计, 2017, (21): 215-217.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2017.11.068.
[8] 蒋斌. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术 [J]. 黑龙江科技信息, 2017, (08): 187.