

水利工程混凝土施工中裂缝成因分析与防治对策

梁朋 谢蒙蒙

河南省水利第二工程局集团有限公司 河南 郑州 450004

摘要: 混凝土作为水利工程中最主要的建筑材料之一,其结构完整性与耐久性直接关系到工程的安全运行与使用寿命。然而,在实际施工及运行过程中,混凝土结构常出现不同程度的裂缝问题,严重影响其承载能力、抗渗性能及耐久性。本文系统分析了水利工程混凝土裂缝的主要成因,将其归纳为材料因素、施工工艺因素、环境因素及结构设计因素四大类,并深入探讨了各类裂缝的形成机理。在此基础上,从原材料控制、配合比优化、施工工艺改进、温控防裂措施、养护管理及结构设计优化等方面,提出了针对性的综合防治对策。研究表明,裂缝的产生是多种因素耦合作用的结果,必须采取“预防为主、防治结合”的综合策略,才能有效控制裂缝的发生与发展,保障水利工程的质量与安全。

关键词: 水利工程;混凝土;裂缝成因;温控防裂;防治对策;耐久性

引言

水利工程是国家基础设施的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、供水、发电、航运等多重功能。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、水闸、渠道、渡槽、隧洞衬砌等水利结构中。然而,混凝土是一种典型的脆性复合材料,其内部存在微观缺陷,在内外应力作用下极易产生裂缝。裂缝不仅影响结构的外观,更重要的是会削弱混凝土的承载能力,降低其抗渗性和耐久性,为水、氯离子、二氧化碳等侵蚀性介质提供通道,加速钢筋锈蚀和混凝土劣化,严重时甚至导致结构失效,威胁工程安全。尤其在水利工程中,结构长期处于水环境或干湿交替环境中,裂缝的危害更为突出。因此,深入研究水利工程混凝土裂缝的成因,并制定科学有效的防治对策,对于提升工程质量、延长工程寿命、保障人民生命财产安全具有重要的理论意义和工程价值。本文旨在系统梳理裂缝成因,构建分类体系,并提出一套贯穿设计、材料、施工、养护全过程的综合防治技术路线。

1 水利工程混凝土裂缝的主要类型与成因分析

1.1 材料因素引起的裂缝

1.1.1 水泥水化热引起的温度裂缝

这是大体积混凝土(如重力坝、闸墩等)中最常见、危害最大的裂缝类型。水泥水化反应是放热过程,尤其在早期(1-3天)放热量大且集中。由于混凝土导热性差,内部热量积聚导致温度急剧升高(可达50-70℃甚至更高),而表面散热快,温度较低,从而在结构内部形成显著的温度梯度。这种不均匀的温度场导致混凝土内部产生压应力,表面产生拉应力。当表面拉应力超过混凝土

的抗拉强度极限时,便会产生表面裂缝^[1]。后期,随着混凝土整体降温,若受到基础或相邻结构的约束,还会产生贯穿性或深层裂缝。

1.1.2 混凝土收缩引起的裂缝

混凝土在硬化过程中会发生体积收缩,主要包括塑性收缩、干燥收缩和自收缩。(1)塑性收缩:发生在混凝土终凝前的塑性阶段。此时,混凝土表面水分蒸发速率大于内部泌水上升速率,导致表层失水收缩。若收缩受到内部未凝固混凝土的约束,便会在表面形成不规则的龟裂。(2)干燥收缩:混凝土硬化后,内部吸附水和毛细孔水逐渐蒸发,导致体积减小。干燥收缩是长期过程,受环境湿度、构件尺寸、骨料性质等影响。当收缩变形受到外部约束(如基础、钢筋)或内部约束(如不同部位收缩不均)时,会产生拉应力,导致开裂。(3)自收缩:高强、低水胶比混凝土中,由于水泥水化消耗内部水分,导致毛细孔负压增大,从而引起体积收缩。这种收缩与外界湿度无关,在早期即可发生,是高强混凝土开裂的重要原因。

1.1.3 原材料质量问题

骨料含泥量过高会削弱骨料与水泥浆体的粘结力,并增加需水量,导致收缩增大。骨料级配不良会导致混凝土和易性差,易离析泌水,形成薄弱界面。不当使用或质量不合格的减水剂、缓凝剂等,可能导致混凝土凝结时间异常、泌水离析或与水泥不相容,从而诱发裂缝。水泥的矿物组成(如C3A、C3S含量高)、细度、安定性不合格等,均会影响水化热、收缩及体积稳定性。

1.2 施工工艺因素引起的裂缝

1.2.1 施工组织不当

一是分层分块不合理：大体积混凝土浇筑时，若分层厚度或分块尺寸过大，会加剧内部温升和温度梯度。二是浇筑间歇时间过长：层间或块间施工缝处理不当，新旧混凝土结合不良，形成薄弱面，在应力作用下易开裂。三是施工缝、后浇带设置不当：未能有效释放收缩应力或温度应力。

1.2.2 振捣不密实

振捣不足会导致混凝土内部存在蜂窝、孔洞、不密实等缺陷，形成应力集中点；过度振捣则会引起离析，粗骨料下沉，砂浆上浮，同样削弱结构的整体性。

1.2.3 模板与支架问题

一是模板刚度不足或支撑不牢：在混凝土侧压力或自重作用下产生变形，导致结构几何尺寸偏差，甚至开裂。二是过早拆模：混凝土强度未达到要求即拆除模板，使其过早承受荷载或暴露于不利环境中，易产生裂缝。

1.2.4 养护措施不到位

养护是保证混凝土强度发展和控制收缩的关键环节。养护不及时、时间不足或方法不当（如未覆盖保湿、未进行温控养护），会导致混凝土表面水分过快蒸发，加剧塑性收缩和干燥收缩，是表面裂缝产生的直接原因。

1.3 环境因素引起的裂缝

1.3.1 温度变化

除水化热外，外界环境温度的剧烈变化（如昼夜温差、季节温差）也会在混凝土结构中引起温度应力。对于暴露在外的薄壁结构（如渡槽、渠道衬砌），这种影响尤为显著。

1.3.2 湿度变化

环境湿度过低会加速混凝土水分蒸发，增大干燥收缩；湿度过高虽能减缓收缩，但若与干湿循环交替，则会加剧混凝土的疲劳损伤。

1.3.3 冻融循环

在寒冷地区，混凝土孔隙中的水结冰膨胀，产生巨大的内应力。反复的冻融循环会逐渐破坏混凝土的内部结构，导致表面剥落、开裂。

1.4 结构设计因素引起的裂缝

1.4.1 结构约束过强

基础对上部结构的约束、不同结构构件之间的刚度差异，都会限制混凝土的自由变形（收缩、温度变形），从而在约束部位产生较大的拉应力，导致开裂。

1.4.2 配筋不合理

一是钢筋间距过大：无法有效控制混凝土的收缩裂缝。二是保护层过厚：表面混凝土在收缩时缺乏钢筋的有效约束，易产生宽而深的裂缝。三是构造钢筋不足：

在应力集中区域（如孔口、转角处）未配置足够的构造钢筋来分散应力。

1.4.3 未充分考虑地基不均匀沉降

地基处理不当或荷载分布不均，导致结构产生不均匀沉降，从而在结构内部产生附加应力，引发结构性裂缝。

2 水利工程混凝土裂缝的综合防治对策

2.1 优化混凝土原材料与配合比设计

防治裂缝应从材料源头抓起，通过科学选材与配合比优化，从根本上提升混凝土的抗裂性能。在水泥选择上，应优先采用水化热较低的品种，如中热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥，以有效控制早期温升。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、降低水化热总量，还能通过火山灰反应改善混凝土的微观孔隙结构，提高密实度与后期强度，并显著抑制干燥收缩。高效减水剂的合理应用则可在保证良好工作性的前提下，大幅降低水胶比和单位用水量，从而减少因水分蒸发引起的收缩变形^[2]。骨料作为混凝土的骨架，其级配应尽可能连续，以提高堆积密度、减少胶凝材料用量；同时必须严格控制含泥量和有害杂质含量，确保骨料与水泥浆体之间形成牢固的粘结界面。最终，配合比设计应通过系统的试验验证，在满足强度、耐久性、施工性等基本要求的同时，将低热、低收缩作为核心优化目标，实现性能的综合平衡。

2.2 强化施工过程控制

施工是将设计与材料转化为实体的关键阶段，其精细化管理是裂缝控制的实践保障。针对大体积混凝土，必须制定科学的浇筑方案，合理划分浇筑层高与块体尺寸，采用薄层短间歇、均匀上升的浇筑策略，以利于热量散发和应力释放。在混凝土入模后，振捣作业必须做到均匀、充分且不过度，确保混凝土内部密实无缺陷，避免因蜂窝、离析等质量问题形成薄弱环节。模板系统的设计与安装应经过严格计算，确保其具有足够的强度、刚度和稳定性，防止在混凝土侧压力作用下发生变形。拆模时间的确定应以同条件养护试块的实测强度为依据，严禁为赶工期而过早拆模，以免结构在强度不足时承受过大应力或暴露于不利环境。此外，施工缝、后浇带等构造措施的设置位置与处理工艺，必须严格遵循设计意图和规范要求，确保其能有效发挥释放变形应力的功能。

2.3 实施全过程温控防裂措施

对于大体积混凝土结构，温控防裂是裂缝防治的核心任务，必须贯穿于施工全过程。在混凝土拌制阶段，可通过预冷原材料（如使用冷却水、对骨料喷淋冷水）来有效降低入仓温度，为后续温控奠定基础。浇筑完成后，应

立即在混凝土内部预埋冷却水管网络,通过通入低温循环水,主动导出内部积聚的水化热,从而削减温峰、减小内外温差。与此同时,必须对混凝土表面实施保温保湿措施,如覆盖草帘、保温被或泡沫塑料板,以减缓表面散热速率,避免因内外温差过大而产生表面拉应力^[3]。现代工程中,可引入基于分布式光纤测温的智能温控系统,对混凝土内部温度场进行实时、连续监测,并根据监测数据动态调整冷却水流量和保温策略,实现温控过程的精准化与智能化,将温度应力控制在安全阈值之内。

2.4 加强养护管理

养护是混凝土从塑性状态向稳定硬化状态转变过程中不可或缺的环节,其质量直接决定了混凝土的最终性能。养护工作必须做到“及时、充分、持续”。通常在混凝土终凝后(约浇筑后8至12小时)即应开始养护,防止早期水分过快散失。养护时间应根据工程重要性、结构特点及环境条件确定,对于大体积混凝土或重要水工结构,养护期不应少于28天。养护方法应多样化并因地制宜,可采用蓄水养护、覆盖湿麻袋或草帘洒水养护、喷涂养护剂,或在低温环境下采用蒸汽养护等方式,核心目标是维持混凝土表面始终处于湿润状态,为其强度发展和体积稳定创造良好条件。

2.5 优化结构设计

结构设计阶段的前瞻性考虑是裂缝控制的根本。设计人员应在充分理解混凝土材料特性的基础上,通过合理的构造措施来适应其变形行为。在结构长度较大或存在几何突变的部位,应科学设置伸缩缝、沉降缝或后浇带,为混凝土的收缩和温度变形提供释放通道,避免应力过度累积。配筋设计应注重裂缝控制功能,在易裂区域(如结构表面、孔口周边、转角处)配置足够数量和合理间距的温度-收缩钢筋,采用小直径、密间距的布筋方式,能更有效地约束混凝土的微观裂缝,将其宽度控制在允许范围内^[4]。此外,必须高度重视地基处理,对软弱或不均匀地基采取换填、桩基、强夯等加固措施,确保地基承载力满足要求且沉降均匀,从源头上消除因不均匀沉降引发结构性裂缝的风险。

2.6 裂缝的后期处理

尽管采取了多种预防措施,工程实践中仍难以完全杜绝裂缝的产生。因此,对已出现裂缝的科学评估与及

时处理同样重要。处理方案应根据裂缝的性质、宽度、深度、走向及其对结构安全性与使用功能的影响程度来确定。对于宽度小于0.2毫米的微细表面裂缝,通常采用表面封闭法,使用环氧树脂、聚合物水泥基涂料等材料进行涂刷,以恢复其防水性和耐久性。对于宽度较大、深度较深甚至贯穿的裂缝,则需采用压力灌浆法,通过高压将低粘度、高渗透性的环氧树脂或聚氨酯浆液注入裂缝内部,使其充分填充并固化,从而恢复结构的整体性和防水性能。若裂缝已严重影响到结构的承载能力,则必须采取结构加固措施,如粘贴碳纤维布、外包型钢或施加体外预应力等,以提升结构的安全储备。

3 结语

水利工程混凝土裂缝的产生是材料、施工、环境和设计等多因素交织作用的复杂过程。其中,由水化热引起的温度裂缝和由各种收缩引起的收缩裂缝是最为普遍和关键的问题。有效的裂缝防治不能依赖单一措施,而必须构建一个覆盖工程全生命周期的综合防控体系。该体系的核心在于:首先,通过优选原材料和优化配合比,从本质上提升混凝土的抗裂性能,实现源头控制;其次,在施工全过程中严格执行规范,特别是对大体积混凝土实施精细化的温控和科学的养护管理,确保过程受控;再次,在结构设计阶段就充分考虑裂缝控制,通过合理的构造措施释放或分散应力,体现设计引领;最后,运用现代监测技术对关键部位进行长期健康监测,并对已出现的裂缝进行科学评估和及时修复,形成闭环管理。只有将“防”与“治”有机结合,将理论研究与工程实践深度融合,才能从根本上提升水利工程混凝土结构的抗裂性、耐久性和安全性,为国家水安全和经济社会可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]贺关清.水利工程中混凝土裂缝产生原因及防治措施研究[J].现代工程科技,2025,4(13):157-160.
- [2]常旭东,何鑫,孙西文.水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J].水泥,2025,(09):116-119.
- [3]高玉龙.水利工程施工中混凝土裂缝防治技术应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(28):184-186.
- [4]张大海.水利施工工程中混凝土裂缝措施控制技术探讨[J].水泥,2025,(07):146-149.