

水利水电工程施工中的混凝土裂缝防治技术

黄小林

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 水利水电工程是关乎国计民生的基础性工程, 混凝土则是其核心构筑材料, 而裂缝问题是施工过程中最常见且危害深远的质量隐患。本文结合水利水电工程施工特点, 分类阐述三种主要混凝土裂缝的形成机理、形态特征及产生时间规律, 在此基础上从优化混凝土配合比、控制混凝土温度、规范浇筑及振动工艺以及选择合适养护措施四个维度, 提出针对性的裂缝防治技术方案, 以期为水利水电工程混凝土施工质量控制提供参考。

关键词 水利水电工程; 混凝土裂缝防治技术; 混凝土配合比; 混凝土温度

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.014

0 引言

在水利水电工程建设中, 混凝土以其优异的力学性能及耐久性成为修建大坝、水电站等水利设施的首选材料。然而, 混凝土裂缝会直接破坏混凝土结构的完整性, 继而引发渗漏、钢筋锈蚀等一系列问题, 这些问题直接威胁水利水电工程的安全运行。因此, 加强研究混凝土裂缝防治技术, 对于保障水利水电工程的稳定性及安全性具有现实意义。

1 水利水电工程施工中混凝土裂缝的类型

1.1 温度裂缝

在水利工程项目建设过程中, 混凝土施工部分极易出现温度裂缝, 对于水利工程危害性较高^[1], 温度裂缝的出现同水泥水化反应过程中释放的大量热量直接相关, 混凝土浇筑后, 水泥与水发生化学反应, 这一过程会持续产生热量, 对于大坝等大体积混凝土结构, 由于其断面尺寸巨大且一次性浇筑方量多, 热量累积效应尤为显著。由于混凝土本身导热性能较差, 热量无法迅速散发到外部环境中, 导致结构内部温度明显高于表面温度。内部处于受热膨胀状态, 表面却因热量散失较快而温度相对较低, 这种内外温差会在混凝土内部形成温度梯度。温度梯度带来的直接后果是产生温度应力——内部压应力与表面拉应力并存, 当表面混凝土承受的拉应力超过其自身的抗拉强度时, 便从表面萌生裂缝并向内部延伸。

1.2 收缩裂缝

混凝土浇筑后, 内部多余的水分不断向表面迁移并蒸发到空气中, 毛细孔中的水分减少导致毛细孔压

力增大, 进而引起混凝土体积收缩, 这一过程被称为干燥收缩。与此同时, 水泥水化反应不断消耗拌和水, 水化产物的绝对体积小于反应前水泥与水的总体积, 由此产生的收缩被称为自生收缩, 两种收缩效应叠加, 使混凝土在硬化期间持续缩减体积。与此同时, 收缩裂缝的形成与约束条件密切相关混凝土结构通常与地基、模板、钢筋或已浇筑的相邻块体连为一体, 这些外部约束限制了混凝土的自由收缩^[2]。在大体积混凝土结构中, 这种约束问题更为突出, 水坝基础混凝土受到基岩的强约束, 坝体内部先浇混凝土对后浇块也形成约束, 当收缩变形受到约束时, 拉应力更容易集中并引发裂缝。收缩裂缝的形态多表现为表面细而浅的网状或龟裂状分布, 裂缝宽度通常较小, 但分布密度较高。

1.3 沉陷裂缝

混凝土在浇筑后的初凝至终凝期间仍处于塑性状态, 内部结构尚未形成足够的强度来抵抗外部变形, 此时若地基发生不均匀沉降、模板支撑体系产生松动或下沉、钢筋网片发生移位, 混凝土内部便会产生相对运动。这种运动在混凝土不同部位之间形成拉应力或剪应力, 当应力超过塑性混凝土的极限变形能力时, 随即产生裂缝。沉陷裂缝的形成位置及受力状态具有一定的规律性, 地基不均匀沉降引起的裂缝多出现在结构断面变化较大、荷载分布不均或地基承载力差异明显的部位^[3]。对于大体积混凝土而言, 由于单次浇筑方量大且自重荷载显著, 地基承受的压力更为集中, 若坝基处理不到位或存在软硬不均的地质条件, 将明

作者简介: 黄小林 (1976-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

显增加不均匀沉降风险, 容易在坝体底部或坝肩等约束较强的部位引发沉陷裂缝。此外, 混凝土分层浇筑时, 若下层混凝土已初凝而尚未终凝时进行上层浇筑, 两层之间的结合面也容易出现沉陷裂缝, 这类裂缝通常呈穿透性或半穿透性, 裂缝宽度较大且方向性较为明确。

2 水利水电工程混凝土裂缝防治技术措施

2.1 优化混凝土配合比

混凝土配合比的设计方案直接决定了材料内部的先天抗裂能力, 水泥用量越大, 水化反应释放的热量就越集中, 结构内部的温度峰值随之攀升, 导致内外温差引发的拉应力容易超过材料自身的抗拉强度。调整水泥及矿物掺合料的比例, 能削减水化热总量, 延缓热量释放的速度。粉煤灰、矿渣粉等掺合料在混凝土中起到填充作用, 改变浆体的微观结构, 抑制硬化过程中体积收缩。优化配合比是多种材料之间的协同配合, 使混凝土在满足强度要求的前提下, 获得更低的水化热、更小的收缩率以及更高的抗裂韧性。

对于水坝大体积混凝土浇筑而言, 减少水泥用量并掺加矿物掺合料是最直接的降热防裂手段, 水坝大体积混凝土极易因水化热积聚导致内外温差过大产生温度裂缝。因此, 在满足水坝设计强度、抗渗性及耐久性要求的前提下, 掺入优质粉煤灰、矿渣粉或硅灰等矿物掺合料替代部分水泥, 可显著降低水化热峰值, 规避大体积混凝土的温度裂缝风险。而选用低热水泥是水坝大体积混凝土浇筑中另一项关键降热措施, 该类水泥中高放热的铝酸三钙及硅酸三钙含量较低, 而放热较慢的硅酸二钙含量较高, 能延缓水坝大体积混凝土的升温速率, 为坝体热量散发争取更充裕的时间窗口, 尤其适用于浇筑坝体基础、坝身等核心厚实部位。在水坝大体积混凝土浇筑中, 降低水化热的同时掺加抗裂纤维, 可从微观层面提升材料的抗裂韧性, 弥补大体积混凝土抗拉强度低、易开裂的短板。在水坝溢洪道、隧洞衬砌等关键部位掺入聚丙烯纤维或钢纤维, 这些纤维在大体积混凝土中形成三维随机支撑网络, 当坝体因温度应力、干缩应力产生拉应力时, 纤维跨越裂缝两侧传递荷载、分担部分应力, 从而阻止微裂缝扩展为宏观裂缝, 保障坝体结构的完整性及防渗性。由此可见, 水坝大体积混凝土浇筑中, 配合比优化的各项措施各有侧重又相互配合, 共同构筑起水坝大体积混凝土裂缝防治的第一道防线, 为水坝工程的长期稳定运行提供保障。

2.2 控制混凝土温度

水泥水化反应属于放热过程, 热量在结构内部不断累积, 而表面与空气接触后散热较快, 这种温度分布的不均匀性直接导致内表温差。控制原材料温度可以从源头降低混凝土的初始热量, 而分层分块浇筑策略改变了热量聚集的模式, 较薄的浇筑层有利于热量及时散发, 避免内部温度持续攀升。通水冷却技术在混凝土内部埋设循环水管, 主动导出积聚的热量, 从而控制温度峰值的出现时间^[4]。控制温度的目的是让混凝土内部各点的温度变化尽可能平缓, 避免急剧的升降产生过大的温度梯度, 从而减少因温度变形受阻而产生的拉应力。

水坝大体积混凝土浇筑体量巨大且结构厚实, 水泥水化释放的热量易在内部积聚形成内外温差, 进而产生温度应力引发裂缝, 原材料预冷是从源头降低水坝大体积混凝土初始温度的核心手段, 水坝浇筑所用粗骨料体量庞大, 经过风冷或水冷工艺处理后, 温度可稳定降至 10℃ 以下减少骨料自身携带的热量; 拌和水中部分采用碎冰替代, 结合水坝大体积混凝土单方用量大的特点, 每立方米混凝土加冰量可达 20 kg ~ 40 kg, 利用冰的融化潜热快速吸收水化反应初期释放的大量热量, 从源头遏制内部温升。除此之外, 水坝工程的骨料堆场需搭设大型遮阳棚, 避免阳光长时间直射导致骨料升温, 骨料输送皮带也需采取全覆盖隔热措施, 防止预冷后的骨料在输送过程中回温, 为后续浇筑奠定基础。同时, 结合水坝结构设计, 设置横缝、纵缝或施工缝, 将庞大的坝体大体积混凝土分割成 30 m ~ 50 m 的小块体, 既能切断热量在坝体内部的传递路径, 又能释放温度约束应力, 避免因整体体积过大以及应力集中引发裂缝。在此基础上, 水坝大体积混凝土浇筑需配套采用智能通水冷却技术, 这是精准控制坝体内部降温速率以及防止裂缝的关键手段, 在混凝土浇筑过程中预埋温度传感器及循环水管, 传感器实时采集坝体内部不同深度、不同部位的温度数据, 并同步传输至控制系统; 系统根据实测温度以及预设目标温度差值自动调节冷却水的流量、流速以及进水温度, 将坝体内部降温速率严格控制在 0.5℃/d ~ 1.0℃/d 的安全范围内, 避免降温过快产生温度应力, 从根本上规避温度裂缝风险, 保障水坝长期安全运行。

2.3 控制浇筑及振捣速度

浇筑及振捣的速度安排直接影响混凝土在成型过程中的均匀性, 浇筑速度过快时, 新拌混凝土在短时间内大量堆积, 下层混凝土在上层重压下产生变形,

而上下层之间的硬化进度差异容易引发沉降不均。分层浇筑能够使每一层混凝土在相对稳定的条件下完成初步沉降,避免一次性堆积过高导致的内部变形集中现象。浇筑速度及振动速度之间存在着联动关系,前者决定了混凝土的供给节奏,后者负责消除供给过程中带入的空气及局部不均匀性,合理的速度安排使混凝土在硬化前获得均匀致密的结构状态,减少因沉降、离析或气泡滞留引发的内部缺陷。

控制浇筑速度是水坝大体积混凝土防止温度集中及冷缝产生的关键,水坝大体积混凝土仓面面积大且浇筑方量集中,浇筑速度过快时,单位时间内进入仓面的混凝土方量过大,水化热在坝体局部迅速积聚,同时大量浆体在短时间内覆盖下层,无法在振捣过程中充分上浮排出气泡,影响水坝抗渗性能。此外,过快的浇筑速度会使水坝模板侧压力急剧增大,水坝模板多承受大体积混凝土的侧向推力,超出设计承载范围时可能引发模板变形甚至爆模,影响坝体成型质量。浇筑速度应结合水坝坝体截面尺寸、大体积混凝土初凝时间及现场气温条件综合确定,一般控制在每小时 $0.5\text{ m} \sim 1.0\text{ m}$ 的上升高度范围内,以避免因浇筑过快产生冷缝或温度集中区域。上层混凝土必须在下层混凝土初凝之前完成覆盖,否则两层之间会形成冷缝,破坏坝体结构整体性,影响抗冲抗渗能力。振捣操作应遵循“快插慢拔”的原则,振捣点间距不超过振捣棒作用半径的 1.5 倍,通常为 $30\text{ cm} \sim 40\text{ cm}$,漏振会导致水坝大体积混凝土内部残留大量空气,形成蜂窝状薄弱面影响结构强度;过度振捣则会使粗骨料下沉、浆体上浮,产生离析现象引发沉缩裂缝。判断振捣时间以混凝土表面泛出均匀浆体且无明显气泡溢出为准,一般每个点持续振捣 $20\text{ s} \sim 30\text{ s}$ 。在混凝土初凝之前,约在首次振捣后 1 h 至 2 h 之间进行二次振捣,消除水坝大体积混凝土已形成的沉缩裂缝。

2.4 选择合适的养护措施

养护阶段的环境条件决定了混凝土硬化过程中水分及温度的保持程度,水分蒸发速度直接关系到表面收缩裂缝的产生概率,表层失水过快时毛细孔内的水膜变薄形成负压,收缩变形受到内部约束后便产生拉裂。覆盖保湿材料能降低表面水分向空气中散失的速度,使表层及内部的水分分布趋于均衡^[5]。及时覆盖保湿养护是水坝大体积混凝土抑制干缩裂缝的基础手段,契合其体量庞大、水化热持续释放、表面易失水的特点,混凝土初凝后应立即覆盖土工布、节水保湿养护膜或湿麻袋,使表面持续处于湿润状态。而确定

养护时间需要结合水泥品种以及结构类型,一般结构不少于 14 天,大体积混凝土则需延长至 21 天以上,这一时间跨度的设定基于混凝土强度增长与收缩变形趋于稳定的客观规律。对于高空作业面或大坡度表面,喷涂成膜养护剂提供了替代方案,高分子成膜养护剂喷洒后在混凝土表面形成致密保护膜,保水率可达到 90% 以上,从而抑制干缩裂缝的形成。温度养护及保湿养护需要同步推进,尤其是在大体积混凝土以及寒冷地区施工条件下,闸墩、大坝等厚大结构拆模后表面散热速度远快于内部,容易形成反向温度梯度并引发温度裂缝。立即包裹保温被或粘贴聚苯乙烯泡沫板,能减缓表层热量散失,缩小内表温差,防止寒潮袭击或昼夜温差过大导致表面温度骤降开裂。拆模时机同样影响裂缝生成概率,过早拆模会导致混凝土表面失水过快或承受自重荷载而产生变形,应依据混凝土强度发展及环境温度综合确定拆模时间,一般侧模在混凝土强度达到 2.5 MPa 以上方可拆除,承重模板则需达到设计强度要求。合理选择养护措施使混凝土在硬化期间获得稳定的水热环境,减少因干湿交替及温度波动引发的裂缝问题。

3 结束语

水利水电工程混凝土裂缝防治是一项贯穿材料选择、施工控制以及后期养护的技术工作。在实际工程施工中,混凝土裂缝的形成受地质条件、环境因素等多种复杂因素影响,不存在统一的防治模式。施工单位应结合工程实际情况,因地制宜地制定个性化的裂缝防治方案,严格落实各项技术措施,加强施工全过程的质量管控,及时发现并处理施工中出现的各类隐患,不断优化施工工艺。同时,应加强研究混凝土裂缝防治技术,结合新型材料以及智能施工技术进一步提高裂缝防治的科学性。

参考文献:

- [1] 王昕. 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(33):202-204.
- [2] 常磊金. 水利工程施工中混凝土裂缝防治技术分析[J]. 中国设备工程,2025(S2):264-266.
- [3] 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.
- [4] 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(07):74-76.
- [5] 肖兵. 解析水利水电工程施工中混凝土裂缝处理技术[J]. 长江技术经济,2022,06(S1):83-85.