

水利工程混凝土裂缝成因分析与防控施工技术研究

武 庆

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

【摘 要】：水利工程混凝土结构常处大体积强约束及干湿交替环境，裂缝会引发渗漏钢筋锈蚀与承载力降低，影响工程耐久性与运行安全。在归纳温度干缩塑性收缩沉降及荷载裂缝特征基础上，从材料施工环境设计四方面剖析成因机理，提出原材料优选与双掺配比优化全过程温控精细化浇筑振捣保温保湿养护构造抗裂与后浇带合理布设等综合防控技术并结合工程验证有效性。实施四位一体防控体系可显著抑制裂缝发展提升水工混凝土抗渗及抗侵蚀能力，对同类水利工程建设与质量管理具有参考价值。

【关键词】：水利工程；混凝土裂缝；成因分析；防控技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.081

引言

早期水工混凝土温控防裂专著指出大体积混凝土开裂主要受水泥水化热升温基础约束及内外温差控制，需从配合比入仓温度通水冷却与表面保温全过程设防。工程结构裂缝控制经典著作亦阐明当温度收缩变形受约束产生的拉应力超过混凝土同龄期抗拉强度即开裂，应坚持抗放结合并重视材料减缩与构造释缝。上述研究表明水工混凝土裂缝是材料施工环境及结构多因素耦合结果，系统成因分析与针对性施工防控技术研究对减少病害保障水利工程长效安全具有重要意义。

1 水利工程混凝土裂缝类型及特征

1.1 常见裂缝分类及表现特征

水利工程混凝土裂缝依据成因与形态可划分为多个类型，各自表现差异明显。温度裂缝多出现在大体积混凝土浇筑后的升温与降温阶段，早期表现为表层不规则细纹，后期受内外温差驱动可发展为深层甚至贯穿裂缝，走向常与结构约束方向垂直。干缩裂缝则集中在养护初期，因表层水分快速蒸发、体积收缩受内部混凝土限制而形成，多为平行于短边的细密网状纹路，宽度较均匀，深度一般不超过保护层厚度。塑性收缩裂缝发生于浇筑后数小时内，混凝土尚未硬化时因表面失水过快产生，呈中间宽两端细的龟裂状，长度从几十厘米到数米不等。沉降裂缝源于骨料下沉或地基不均匀沉降，多沿钢筋分布方向延伸，裂缝边缘常有轻微错台。荷载裂缝由外部静动力荷载超限引发，走向与主拉应力方向一致，常见于梁板跨中、坝体孔洞周边等应力集中区域。化学裂缝以碱骨料反应最为典型，伴随胶体吸水膨胀使混凝土表面出现地图状不规则开裂，常伴有白色钙质析出物。

1.2 典型水工结构裂缝发育规律

不同类型水工建筑物的裂缝分布与其受力特点和环境条

件密切相关，重力坝坝体常在基础约束区出现竖向表层裂缝，由于坝体混凝土降温收缩受基岩限制所致，若温控不当易发展为贯穿性结构缝。拱坝裂缝多集中于坝肩附近，受拱端推力与温度变化共同影响，呈斜向或弧形分布，对坝体整体性威胁较大。溢洪道底板及边墙裂缝多与水流方向平行，除温度与收缩因素外，高速水流冲刷引起的表面磨损会加速裂缝扩展，严重时可导致底板掀翻。输水隧洞衬砌裂缝以环向为主，多由围岩变形压力或混凝土收缩引起，纵向裂缝则常与施工缝处理不当有关，渗水现象在两类裂缝中均较普遍。水闸底板因地基软硬不均易发生横向贯穿裂缝，闸墩两侧常出现对称分布的竖向温度裂缝。渠道衬砌裂缝多呈纵向延伸，尤其在昼夜温差大的地区，受基土冻胀与混凝土收缩联合作用，裂缝间距与宽度随环境湿度降低而增大。这些规律为针对性防控提供了重要依据。

2 混凝土裂缝成因分析

2.1 材料组成与配合比设计缺陷

混凝土原材料品质与配合比合理性直接决定其抗裂性能，水泥水化热过高是大体积混凝土开裂的核心诱因，部分工程为追求早期强度选用高标号早强水泥，导致内部升温过快，与表层形成显著温差，拉应力超过抗拉强度后产生温度裂缝。骨料级配不良同样影响显著，粗骨料粒径偏小或间断级配会增加水泥浆用量，进而提高水化热总量与收缩值，细骨料含泥量过高则会削弱骨料与水泥石界面黏结力，诱发微裂纹扩展。掺合料与外加剂选用不当也会埋下隐患，粉煤灰掺量不足难以有效抑制水化热，过量使用又会导致早期强度偏低、表面碳化加快；减水剂与水泥适应性差时，易出现泌水或坍落度损失过快，造成振捣不匀与局部薄弱区。配合比设计中水胶比控制失衡尤为关键，水胶比偏大虽能改善和易性，却会加剧干燥收缩与孔隙率，降低抗渗性与抗拉强度，为裂缝发育提供通道。这些材料层面的缺陷往往在施工前已埋下风险，需通过精细化选材与配

比优化从源头规避。

2.2 施工工艺控制不到位

施工过程中的操作偏差是裂缝产生的直接推手,浇筑环节的问题最为突出,分层厚度过大导致散热路径延长,内部热量积聚加剧温差效应,间歇时间过长则易在新旧混凝土界面形成冷缝,成为应力集中点。振捣作业不规范同样危害显著,漏振会造成局部蜂窝麻面,过振则引发骨料下沉、浆体上浮,形成表面收缩裂缝与内部疏松区。养护措施的缺失或滞后常被忽视,混凝土终凝后未及时覆盖保湿,表层水分在干燥多风环境下快速蒸发,收缩应力超过早期抗拉强度便会产生干缩裂缝,尤其在昼夜温差大的季节,养护龄期不足会进一步削弱表层抗裂能力。模板工程的不规范操作也不容忽视,拆模时间过早使混凝土尚未达到足够强度便承受自重与外部荷载,支撑体系刚度不足则可能导致模板变形,引发结构性拉裂。此外,施工缝处理马虎,如未凿毛清理或未铺设同强度等级砂浆垫层,会使新旧混凝土黏结力下降,在后续收缩或荷载作用下沿缝开裂。

2.3 环境条件与边界约束影响

外部环境 with 结构约束条件的叠加作用是裂缝扩展的重要驱动力,温度变化是最活跃的环境因素,水利工程施工周期长,常经历四季温差与寒潮冲击,混凝土内部温度随环境波动产生膨胀收缩循环,当变形受到约束时便产生温度应力。大体积混凝土的内外温差尤为突出,内部水化热积聚形成高温区,表层受气温影响温度偏低,温差导致的温度梯度会使表层产生拉应力,超过极限值时出现表面裂缝。湿度环境的剧烈变化同样关键,干燥多风天气加速混凝土表层水分蒸发,若补水不及时,会因干燥收缩产生网状裂缝,而在水位变动区,干湿交替作用会引发混凝土反复膨胀收缩,加速既有裂缝的扩展。基础约束是不可忽视的结构边界条件,坝体、底板等大体积结构浇筑在基岩或老混凝土上,新浇混凝土的收缩变形受到刚性基础的强烈限制,当收缩拉应力超过混凝土抗拉强度时,便会形成垂直于约束方向的贯穿裂缝。此外,地基不均匀沉降也会对上部结构产生附加拉应力,尤其在软土地基或回填土地段,沉降差异导致结构开裂。

2.4 结构设计不合理与构造缺陷

设计方案的科学性直接影响混凝土结构的抗裂能力,结构断面突变是常见的设计缺陷,坝体孔洞、闸墩牛腿等部位因几何形状改变形成应力集中区,在温度或荷载作用下易产生局部裂缝。配筋设计不当也会降低抗裂性能,钢筋直径过大或间距过宽难以有效限制混凝土收缩变形,而钢筋保护层厚度不足则会使表层混凝土在收缩或温度变化下更易开裂,同时加速钢筋锈蚀膨胀引发的顺筋裂缝。伸缩缝与后浇带设置不合理是另一

突出问题,间距过大导致温度收缩变形累计超过混凝土极限拉伸值,宽度不足则无法有效吸收变形,后浇带封闭时间过早会使残余收缩应力无法释放。构造措施缺失同样不容忽视,部分工程未在易裂部位设置温度筋或抗裂钢筋网片,导致表层混凝土缺乏约束;施工缝位置选择不当,如设在弯矩最大处或剪力集中区,会显著降低结构整体性与抗裂能力。此外,对复杂地质条件下的基础处理设计考虑不足,未能有效消除地基不均匀沉降风险,也会为后续裂缝发育埋下隐患。

3 混凝土裂缝防控施工关键技术

3.1 原材料优选与配合比优化技术

针对材料缺陷引发的裂缝风险,需从源头实施精细化管理。优先选用中低热硅酸盐水泥,通过降低水化热总量减缓内部温升速率,避免温差拉应力超标。采用双掺技术提升混凝土抗裂性能,优质粉煤灰与磨细矿渣粉等量替代部分水泥,既减少胶凝材料水化热,又改善骨料与浆体界面过渡区结构,增强密实度与韧性。严格控制骨料质量,粗骨料选用连续级配碎石,剔除针片状颗粒与超径石,细骨料采用中粗河砂,含泥量控制在规范限值内,降低收缩变形基数。优化外加剂复配方案,选用与水泥适应性良好的缓凝型高效减水剂,延缓水化热释放峰值,搭配适量引气剂引入微小封闭气泡,缓冲内部膨胀应力。配合比设计遵循低水胶比原则,在满足泵送与和易性前提下减少单位用水量,通过适配调整砂率与胶材用量,确保混凝土极限拉伸值不低于设计要求,从材料层面构建抗裂基础。

3.2 全过程温控防裂施工技术

为应对环境与约束导致的温度裂缝,需实施全周期温度管控。浇筑前采取预冷措施,对粗骨料搭棚遮阳并喷淋冷水降温,拌合水添加碎冰降低入仓温度,避开午间高温时段施工,从源头削减基础温升。浇筑过程中强化分层控制,采用薄层摊铺工艺,每层厚度控制在三十厘米以内,缩短层间间歇时间避免冷缝,通过自然散热降低内部热量积聚。大体积混凝土埋设冷却水管系统,采用循环冷却水降低内部温度峰值,通水流量与水温根据实时监测数据动态调整,确保内外温差始终处于安全阈值内。表面保温与养护协同发力,浇筑完成后立即覆盖保温被或泡沫板,根据气温变化动态调整保温层厚度,寒冷季节采用综合蓄热法维持表层温度稳定。建立温度监测网络,在混凝土内部埋设测温传感器,实时采集温度场数据,发现温差异常及时启动应急调控措施,实现温度应力的动态平衡。

3.3 施工工艺精细化控制技术

针对施工操作不当引发的裂缝,需推行全流程标准化作业。浇筑环节严格执行分层布料规程,控制混凝土自由下落高度不超过两米,避免骨料分离与砂浆流失,采用斜面分层推进

方式确保各处密实度均匀。振捣作业坚持快插慢拔原则,振捣棒插入间距不超过其作用半径一点五倍,每点振捣时间控制在二十秒至三十秒,直至表面泛浆无气泡溢出,杜绝漏振与过振现象。养护工序实施精细化管理,混凝土终凝后立即覆盖保湿,采用土工布与塑料薄膜双层防护,保持表面持续湿润,养护龄期不少于十四天,大体积混凝土延长至二十八天以上。模板工程严格把控拆模时机,依据同条件试块抗压强度报告确定拆模时间,侧模拆除时确保混凝土棱角不受损伤,承重模板待强度达到设计值后方可拆除,支撑体系保留足够缓冲期。施工缝处理执行标准化流程,接缝面凿毛深度不小于一厘米,清除浮浆与松动石子,浇筑前铺设同配比水泥砂浆垫层,确保新旧混凝土黏结牢固。

3.4 结构构造优化与抗裂增强技术

为解决设计缺陷带来的开裂隐患,需在施工中落实构造抗裂措施。科学设置变形缝系统,严格按设计间距布置伸缩缝与后浇带,缝宽与填充材料符合规范要求,后浇带保留时间不少于四十二天,待主体结构收缩基本稳定后再行封闭。强化配筋抗裂构造,在坝体表层、底板易裂区域增设温度钢筋网片,钢筋直径与间距经计算确定,确保能有效约束混凝土收缩变形,

保护层中增设抗裂钢丝网提升表层抗拉能力。优化施工缝布局,避开结构弯矩最大与剪力集中部位,优先设置在受力较小且便于施工的区域,接缝面做成凹凸形糙面增强咬合力。针对应力集中部位采取局部增强措施,在闸墩牛腿、坝体孔洞转角处增设斜向构造钢筋,分散集中应力,基础部位设置滑动层减小地基约束反力。加强预埋件周边处理,管道穿越混凝土部位增设加强钢筋环,防止局部应力集中引发放射状裂缝,通过系统性构造优化提升结构整体抗裂韧性。

4 结语

水利工程混凝土裂缝防控是融合材料、结构与施工的系统工程,明确多因素耦合开裂机理并落实原材料优化、全过程温控、工艺精细化及构造抗裂等措施,可显著遏制裂缝萌生与发展。裂缝控制需贯穿于设计、施工及运维全生命周期,通过源头减量、过程管控与末端治理相结合,方能从根本上提升结构耐久性与服役安全性。面向未来,可进一步深化智能温度场实时监测、自感知预警系统与绿色抗裂功能材料的应用研究,推动防裂技术向数字化、低碳化升级,持续完善水工混凝土全链条防控体系,为高质效水利基础设施建设提供坚实技术支撑。

参考文献:

- [1] 陆虎.水利工程混凝土裂缝防治处理策略[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):205-207.
- [2] 朱必飞.水利工程施工中混凝土温控与裂缝控制技术研究[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(4):219-221.
- [3] 娄军委,郑建花.水利工程混凝土施工裂缝成因分析与智能温控防裂技术[J].智慧中国,2025,(11):53-54.
- [4] 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.
- [5] 张正洋.水利工程中混凝土裂缝控制的技术应用探讨[J].中国水泥,2024,(4):70-72.
- [6] 阿合买提·哈司木.水利工程施工混凝土裂缝成因分析及控制措施[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(3):199-201.
- [7] 周秋露.水利工程施工中混凝土裂缝控制策略探讨[J].工程技术研究,2024,9(1):103-105.