水利工程中的水工混凝土裂缝成因与控制对策

付世帆
汉江润北工程咨询（湖北）有限公司　湖北　十堰　442700

摘　要：水工混凝土是水利工程主体结构的核心材料，裂缝是影响工程防渗、结构稳定与服役寿命的主要质量病害。为有效防控混凝土开裂问题，本文依托水利工程现场实际，系统划分温度裂缝、干缩裂缝、沉降裂缝、受力及耐久性裂缝四类常见病害，从材料性能、配合比、施工工艺、环境条件及结构约束等方面剖析裂缝核心成因。结合工程施工与运维需求，构建从原材料管控、配比优化、标准化施工、结构优化的事前预防体系，同时细化不同开度裂缝的检测评估、封闭灌浆及结构补强等事后修复技术。

关键词：水工混凝土；裂缝类型；成因分析；预防控制；修复对策

引言：水利工程多为露天大体积混凝土结构，长期承受温差变化、干湿交替、地基沉降及结构荷载等多重作用，混凝土开裂问题普遍存在。裂缝不仅会破坏结构整体性，引发渗漏、表层剥落等病害，还会逐步诱发钢筋锈蚀，降低工程耐久性，严重时威胁水利设施运行安全。为此，本文系统梳理水工混凝土裂缝类型与特征，深入分析开裂诱因，制定分级预防与靶向修复对策，对提升水利工程施工质量、保障结构长期稳定运行具有实际工程意义。

1 水工混凝土裂缝的主要类型及特征

水工混凝土在浇筑及服役阶段，受温度变化、材料收缩、基础变形、结构受力等因素作用，会形成不同类型裂缝。各类裂缝的形成条件、外观形态、分布位置和发展规律差异显著，结合工程现场情况，常见裂缝分为四类，特征如下：（1）温度裂缝的形态与分布特征。温度裂缝在大体积坝体、闸室底板、墩墙等厚大结构较为多见，可分为表层裂缝与深层贯通裂缝。浇筑初期水化热集聚，内外温差大，易生成浅表网状裂纹；后期内部温降收缩受基础约束，则产生纵横贯通裂缝。（2）干缩裂缝的外观与发展规律。干缩裂缝主要出现在外露坡面、渠道衬砌、护岸等混凝土表层，多为发丝状、细密网状，长短杂乱，无固定走向。裂缝集中出现在养护干燥阶段，由表层水分快速蒸发造成，成型之后整体趋于稳定，不再大幅延伸，仅随环境干湿交替出现微小开度变化。（3）沉降裂缝的产生部位与形态特点。沉降裂缝来自骨料沉降或者基础不均匀沉降，多出现在变截面、基础交接、新旧混凝土结合位置，以斜向裂缝为主，少量为竖向裂缝，裂缝宽度自上而下增大。裂缝大多在混凝土初凝至硬化阶段快速形成，地基沉降稳定后，裂缝形态便基本固定。（4）受力裂缝与耐久性裂缝的特征区别。受力裂缝产生于荷载超限或受力不均，分布在梁板受拉区、闸墩受力节点，裂缝与受力方向垂直，贯通性强、开度大，会随荷载循环持续扩展。耐久性裂缝受冻融、水流冲刷、水质侵蚀影响，多为表层细裂缝，开度小、发展缓慢，长期作用会造成表层剥落，降低混凝土密实程度[1]。

2 水工混凝土裂缝主要成因分析

2.1 水工混凝土裂缝产生的材料成因

水工混凝土由水泥、砂石、外加剂等材料拌合而成，材料品质、配合比参数及自身性能缺陷是混凝土开裂的基础性内因，也是工程裂缝频发的主要原因，具体如下：（1）原材料品质不达标。大体积水工结构若采用高水化热水泥，内部热量集中易形成内外温差，诱发温度裂缝。砂石骨料含泥量、杂质超标会降低浆体粘结强度，使混凝土内部形成细微孔隙；骨料级配紊乱、粒径偏差较大，会降低混凝土和易性与整体均匀性，成型后局部易产生开裂缺陷。（2）配合比设计不合理。现场施工为适配泵送与浇筑进度，常随意增大水胶比和水泥用量。水胶比过大会使硬化阶段多余水分蒸发形成大量毛细孔隙，加剧干缩变形；水泥用量偏高会增大水化热，提升结构温差应力。同时砂率取值不当、粗细骨料配比失衡，会降低混凝土体积稳定性，造成收缩变形不均并产生裂缝。（3）外加剂与掺合料使用不当。外加剂与水泥适配性差、掺量控制不准，会直接影响混凝土硬化质量。减水剂掺量过多易引发离析、泌水，造成表层疏松开裂；膨胀剂掺量不足无法抵消收缩变形，过量则会出现膨胀开裂。粉煤灰、矿粉等掺合料配比不合理，会降低混凝土后期强度与抗变形能力，增加开裂概率。

2.2 水工混凝土裂缝产生的施工与环境成因

在原材料合格的前提下，不规范施工、不合理施工

组织及复杂外部环境，是诱发、加剧混凝土裂缝的主要外因，对结构整体性影响突出，具体成因如下：（1）施工工艺操作不规范。浇筑速度过快、分层厚度超标，易造成内部气泡滞留、骨料沉降不均，形成内部空隙缺陷。振捣漏振、欠振会导致密实度不足、局部疏松；过振会引发骨料下沉、表层砂浆过厚，诱发后期干缩裂缝。此外，拆模时间过早、受力不均，会损伤未硬化混凝土结构，产生结构性裂缝。（2）养护措施落实不到位。养护不足是现场裂缝产生的重要原因。浇筑后未及时覆盖保湿、养护时长不足，会造成表层水分快速流失，干湿梯度差异过大，引发表层干缩裂缝。高温未降温保湿、低温未保温防冻，会进一步加剧温差变形，降低混凝土整体抗裂能力。（3）自然环境条件影响。水利工程多露天布置，长期面临冻融、暴晒、干湿交替等工况。温度反复变化使混凝土持续热胀冷缩，循环应力会拓展原有细微裂缝；干湿交替环境不断加剧收缩与膨胀变形，持续破坏混凝土结构稳定性，加速裂缝发展。（4）结构约束与地基变形影响。水工混凝土与岩基、旧混凝土连接部位存在刚性约束，硬化收缩、温度变形受限制时，内部拉应力超过混凝土抗拉强度即产生约束裂缝[2]。

3 水工混凝土裂缝的事前预防控制对策

3.1 严格把控原材料进场质量检验

原材料质量是混凝土抗裂的基础，应落实进场检验与批次抽检制度，杜绝不合格材料投入现场施工。（1）严控胶凝材料质量。优先选用低水化热、性能稳定的低热硅酸盐水泥，禁止使用受潮结块、过期水泥。进场核验强度、水化热、安定性检测报告，并按批次复检。搭配粉煤灰、矿粉等掺合料替代部分水泥，降低水化热，改善混凝土收缩性能，减少大体积结构温差裂缝。（2）规范骨料筛选与检验。控制砂石含泥量、杂质含量与级配指标，粗骨料选用质地坚硬、级配连续碎石，细骨料使用洁净中砂，剔除淤泥、风化颗粒。含泥量严格控制在规范限值以内，根据工程条件选配骨料粒径，保证混凝土成型均匀。（3）把控外加剂适配性与质量。结合施工温度、浇筑工艺、结构类型选用减水剂、缓凝剂、膨胀剂，进场前完成水泥适配试验，防止出现离析、泌水。按规范抽检外加剂有效组分，不得使用过期、性能衰减产品，避免混凝土硬化异常引发开裂。

3.2 优化水工混凝土配合比设计方案

配合比直接决定混凝土抗裂水平，需结合水工工况调整参数，兼顾强度、和易性与体积稳定性，减小收缩变形。（1）合理控制水胶比与胶凝材料用量。在满足施工和易性前提下尽量降低水胶比，减少水分蒸发带来的收缩孔隙。大坝、闸底板等大体积构件适当减少水泥用量，以矿物掺合料替代，降低水化热峰值，缓解内外温差应力。（2）优化砂率与骨料配比。依据浇筑部位、泵送条件确定合理砂率，砂率偏高会增大砂浆占比，加大干缩风险；砂率偏低易造成和易性不足、振捣不实。优化粗细骨料搭配，提高骨料骨架密实度，减小整体收缩。（3）精准调控功能性掺料用量。结合环境温度、结构约束条件确定膨胀剂、抗裂剂掺量，依靠微膨胀效应抵消部分收缩应力。同步调整缓凝剂掺量，防止初凝过快形成冷缝，避免硬化异常诱发裂缝。

3.3 规范现场施工工艺流程与操作标准

施工不规范是现场裂缝的主要人为诱因，执行标准化作业可减少施工缺陷带来的开裂问题。（1）标准化开展浇筑与振捣作业。大体积混凝土采用薄层连续浇筑，控制浇筑速度与分层厚度，避免热量堆积和骨料沉降不均。振捣遵循快插慢拔，做到不漏振、不过振，保证混凝土密实，防止内部空隙、表层砂浆过厚留下开裂隐患。（2）落实全过程养护管控。初凝后及时采用土工布、薄膜覆盖保湿。高温时段加强洒水遮阳；低温环境做好保温防护，防止冻胀。养护时长满足规范要求，避免表层水分过快流失产生干缩、温度裂缝。（3）严控拆模与工序衔接。依据试块强度确定拆模时间，禁止过早拆模、暴力拆模。做好新旧混凝土结合面处理，工序衔接紧凑，防止间隔时间过长造成结合面粘结失效。

3.4 优化结构设计，降低结构约束应力

约束应力过大容易产生约束型裂缝，在设计阶段优化构造，能够从源头降低开裂风险。（1）合理设置结构分缝与后浇带。超长及大体积水工结构设置伸缩缝、沉降缝、后浇带，释放收缩与温度应力，避免刚性约束形成贯通裂缝，分缝间距、后浇带尺寸及浇筑时间严格执行设计要求。（2）优化结构截面与配筋设计。尽量规避截面突变造成的应力集中，闸墩、底板、墙体等关键部位增设构造钢筋，依靠钢筋约束混凝土变形，提升抗拉抗裂能力，抵御温度及收缩应力。（3）弱化基础刚性约束。在混凝土与岩基、旧混凝土接触面设置缓冲或滑动层，削弱基础对上部结构变形的约束作用，释放温缩、干缩产生的拉应力，提升整体抗裂稳定性[3]。

4 水工混凝土裂缝的事后治理与修复对策

4.1 裂缝检测、监测与风险评估方法

裂缝修复前的检测评估是精准治理的前提，可避免盲目施工导致的修复不彻底、资源浪费等问题，为后续修复方案制定提供数据支撑。（1）现场精细化检测。针对水工结构表层及内部裂缝，采用裂缝宽度仪、深度检

测仪、超声波检测仪等设备开展全面检测，精准测定裂缝开度、深度、长度、走向及分布范围，明确裂缝属于稳定型或发展型。重点排查坝体、闸室底板、渠道衬砌等关键部位裂缝，记录裂缝与结构受力、渗水情况的关联特征。（2）长期动态监测。对大型水利主体结构的深部裂缝、贯通裂缝，布设固定监测点位，定期跟踪监测裂缝开度、长度变化情况，掌握裂缝发展规律。在汛期、高低温交替等特殊时段加密监测频次，判断裂缝是否存在持续扩张、结构变形加剧等问题。（3）安全风险评估。结合检测监测数据，对照水利工程质量评定标准，对裂缝危害等级进行划分。结合结构受力状态、渗水情况、周边环境，评估裂缝对结构防渗性能、承载性能和耐久性能的影响，区分轻微、中度、重度病害，匹配对应的修复治理方案。

4.2 细微裂缝的封闭与防渗处理技术

细微裂缝多为表层发丝状裂纹，开度通常小于0.2mm，无结构性破坏风险，但易引发水分、有害物质侵入，加速混凝土老化，需采取封闭防渗处理。（1）表面清理处理。采用钢丝刷、高压水枪清理裂缝表层浮灰、松散砂浆及污渍，保证裂缝表面干燥洁净，去除老化、疏松的混凝土表层杂质，确保修复材料与基体紧密结合。（2）表层封闭施工。针对浅层细微裂缝，采用环氧树脂、聚氨酯防渗涂料等柔性材料进行涂刷封闭。沿裂缝走向均匀涂刷两遍至三遍，覆盖裂缝周边一定范围的混凝土表面，形成完整防渗保护膜，阻断外界水分和侵蚀介质渗入，防止裂缝进一步拓展。

4.3 中度裂缝的灌浆加固修复工艺

中度裂缝开度在0.2mm至0.5mm之间，多为浅层或半贯通裂缝，存在轻微渗水、结构密实度不足问题，需通过灌浆填充实现加固防渗双重效果。（1）开槽埋管处理。沿裂缝走向开凿浅槽，清理槽内松散混凝土，埋设灌浆嘴并固定，封堵裂缝表面两端及周边缝隙，避免灌浆过程中浆液渗漏、溢出，保障灌浆压力稳定。（2）压力灌浆施工。根据工程水环境选用适配浆液，干燥结构选用环氧树脂浆液，潮湿、渗水结构选用聚氨酯堵漏浆液。采用低压慢速灌浆方式，待浆液充分填满裂缝空隙、均匀溢出后停止灌浆，静置固化，填充裂缝内部孔隙，粘结开裂混凝土基体，恢复结构整体性。

4.4 严重裂缝的结构补强与整改措施

严重裂缝开度大于0.5mm，多为贯通性裂缝，伴随结构变形、渗水严重等问题，直接影响结构承载安全，需采取结构补强整改措施。（1）局部凿除重建。对破损严重、开裂贯通的混凝土局部结构，凿除疏松开裂的混凝土基体，清理完整坚实的基层界面，重新支模浇筑高强度抗裂混凝土，修补结构缺损部位。（2）外部补强加固。针对主体结构受力裂缝，采用粘贴碳纤维布、外包钢板、增设钢筋网片喷射混凝土等方式加固。通过外部补强结构分担原有结构荷载，约束裂缝变形，彻底解决结构受力开裂问题，提升水工结构整体承载能力和稳定性[4]。

结束语：本文通过对水工混凝土裂缝的类型特征、形成机理及防控修复技术开展系统性分析，明确混凝土开裂是材料、施工、环境、结构设计多因素耦合作用的结果。裂缝防控需坚持源头治理，严格把控原材料质量，优化配合比与结构设计，规范现场浇筑、养护等关键工序。同时需结合裂缝病害程度，采取分级检测、精准处置的修复方式，实现细微裂缝防渗封闭、中度裂缝灌浆加固、严重裂缝结构补强。

参考文献

[1]赵纬君.水利工程施工中的混凝土裂缝控制技术探索[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2025,(11):158-161.

[2]孙化存.水利工程混凝土施工裂缝成因及防治措施研究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(3):042-044.

[3]解朋飞.水利工程混凝土裂缝成因分析及防治措施[J].中国科技期刊数据库工业A,2026,(5):083-086.

[4]李英.水利工程施工中的混凝土裂缝成因分析及其控制措施研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2025,(3):021-024.