水利水电工程中混凝土重力坝裂缝成因与防渗修复技术研究

周黄杰

浙江鸿翔水利建设有限公司 浙江 嘉兴 314400

【摘　要】：混凝土重力坝因断面大、适应性强，在水利水电工程中应用广泛。坝体开裂后库水沿裂隙下渗，溶蚀胶凝材料并抬升扬压力，削弱抗滑稳定。施工期水化热集中释放形成内外温差，运行期又受基础变位、水位波动及冻融交替作用，裂缝难以避免。当前修补多凭经验，防渗工艺适用边界尚不清晰。基于此，本文将结合工程实际情况，区分裂缝成因差异，梳理适配的防渗修复技术路径，为重力坝养护加固提供参考。

【关键词】：水利水电工程；混凝土重力坝；裂缝成因；防渗修复技术

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.086

引言

重力坝运行年限一长，坝体混凝土在持续水头、温度梯度和冻融交替的反复作用下，往往出现不同开度和深度的裂隙。这些缝隙一旦贯通，库水沿缝渗入，不仅带走水泥颗粒形成溶蚀通道，还会削弱坝体整体性，给结构安全埋下隐患。工程上通常依据裂缝宽度、埋深以及是否随温度开合，选用不同的封堵工艺。因此，水利水电工程中混凝土重力坝裂缝成因与防渗修复技术进行深入研究极为重要。

1 水利水电工程中混凝土重力坝裂缝成因

（1）混凝土水化热温度应力作用：大体积混凝土浇筑是重力坝施工的核心工序，大批量水泥浆料固化过程中会持续释放水化热能，厚重的坝体结构密闭性强，内部热量难以快速散发，内外温度梯度差值显著。坝体内部高温区域产生体积扩张趋势，外部表层结构与自然环境直接接触，散热效率高、收缩形变速度更快。当温差引发的拉伸作用力超过混凝土本体的抗裂承受极限时，坝体浅层区域便会滋生无规律裂纹。这类问题集中出现在工程浇筑及初期养护阶段，若温控、保温、散热管控措施不完善，初始细微裂纹会随环境温度波动持续拓展延伸。

（2）坝基不均匀沉降变形影响：混凝土重力坝依靠坝基岩体承载全部结构自重与水体荷载，基底地质构造的完整性直接决定坝体受力稳定性。天然河床坝基普遍存在岩体破碎、岩层软硬交错、局部空洞裂隙等原生地质问题，不同区域基底岩土的压缩变形能力存在明显差异。大坝投入运行蓄水后，长期恒定的自重压力与水体推力会促使坝基各区域产生不均等的沉降形变。刚性混凝土坝体无法适配基底的差异化变形，会持续受到拉伸、剪切复合作用力，最终诱发深层裂缝甚至贯通性裂隙，打乱坝体原始受力平衡，威胁结构整体安全。

（3）外部水环境荷载循环作用：河道型水库水位随季节调度、汛期调控呈现规律性涨跌，让坝体长期处于动态交变荷载工况下。高水位运行阶段，迎水坝面承受高强度静水压力与水流冲击，内部混凝土被持续挤压。水位回落之后，外部荷载快速消散，坝体内部应力瞬间释放并重新分布。长期往复的应力切换会造成混凝土结构疲劳损伤，原本闭合的微裂隙反复开合、逐步延伸。同时，坝体下游墙面频繁经历干湿交替环境，表层混凝土材质性能持续衰减，加速裂缝萌生发育，最终形成分布规整的纵横结构性裂缝。

（4）环境冻融与风化侵蚀损伤：多数水利枢纽坐落于山地温差显著区域，年度及昼夜温度交替会形成频繁的冻融循环效应。坝体表层混凝土孔隙极易滞留积水，低温环境下水分结冰膨胀，对孔隙内壁产生挤压破坏，反复冻融作用会造成表层混凝土疏松起砂、开裂脱落。长期的自然风化、紫外线辐射及大气氧化作用，会持续损耗坝体表层材质性能，降低混凝土密实度与抗拉强度。另外，库区水体含有的微量侵蚀性离子，会缓慢腐蚀混凝土胶凝组分，弱化骨料与砂浆的粘结强度，促使初始微裂纹逐步发育为危害性结构裂缝。

1.5 施工工艺与材料管控缺陷

施工阶段的操作不规范、材料管控不严，是重力坝非结构性裂缝产生的主要人为诱因。混凝土拌合配比把控不当，骨料杂质含量超标、级配搭配不合理、水胶比失衡，都会大幅降低混凝土成型后的抗裂能力与整体强度。现场浇筑作业中，分层浇筑厚度超标、振捣疏密不均、工序间隔时长过久，容易形成内部空洞、蜂窝麻面及施工冷缝等原生缺陷。后期养护阶段保湿、保温措施不到位，混凝土表层水分快速流失，极易引发干缩裂纹。这类施工缺陷会在长期运行荷载作用下持续扩张，逐步演变为影响大坝运行安全的核心病害。

2 水利水电工程中混凝土重力坝裂缝的防渗修复技术分析

（1）表面封闭防渗技术：对于缝宽不足 0.3mm、深度较浅且已趋于稳定的发丝裂缝，一般不做开槽处理，直接在坝面做封闭层。施工时先将缝口周边混凝土打磨干净，剔除浮浆和松动骨料，再批刮改性环氧胶泥或聚合物水泥基涂料，干膜厚度控制在 1.2 至 1.5mm 之间，养护 7 天后粘结强度可达 2.5MPa 以上，整体抗渗等级能做到 P12。这种做法工序简单、上坝作业面小，适合坝面浅表裂缝的批量处理；但封闭层仅作用于表面，坝体内部裂隙并未充填，若后续坝体变形偏大，涂层容易被拉裂脱落，因此多作为辅助防渗手段配合其他工艺使用。

（2）开槽嵌缝密封技术：缝宽在 0.3 至 2mm 之间、随季节温度变化有明显开合的渗水裂缝，单纯表面封闭难以持久，通常沿缝开凿沟槽后填入柔性密封材料。槽型多采用V形或U形，断面尺寸约20mm×20mm，清槽后填入聚硫或聚氨酯密封膏，外侧再用环氧砂浆做保护层。密封膏的断裂伸长率一般要求大于 300%，可适应裂缝±2mm 范围内的反复伸缩，不至于因温度变化被拉断。该做法的长处在于材料柔性好，能跟随裂缝变形而不失效，坝面外露的活动渗水缝用得较多；不足也很明显，沟槽深度有限，对埋深超过 500mm 的贯穿性裂缝，仅靠表层嵌缝无法封堵内部过水通道。

（3）化学压力灌浆技术：深层或贯穿性渗水裂缝是重力坝防渗修复中的难点，化学压力灌浆是目前最常用的解决手段。其原理是通过注浆嘴将低黏度化学浆液压入裂缝内部，浆液在缝隙中扩散、固结，从而充填空腔、恢复密实度。改性环氧树脂浆液的初始黏度通常控制在 30 至 300mPa·s，能够渗入 0.1mm 级的微细缝隙；注浆嘴沿缝布设，间距取 250 至 300mm，注浆压力维持在 0.2 至 0.4MPa，达到压力后稳压 5 至 10 分钟，确保浆液充分填充。固结体 28 天抗压强度不低于 35MPa，灌浆结束后做压水检查，透水率要求小于 0.05Lu。化学灌浆防渗补强效果可靠，但材料成本和施工管控要求都比较高，多用于关键坝段的深层裂缝处理。

（4）超细水泥灌浆技术：超细水泥灌浆以粒径不大于 10μm 的超细水泥为主要注浆材料，浆液黏度可做到 50mPa·s 以下，对 0.1mm 以上的裂缝具有较好的可灌性。与化学浆材相比，超细水泥价格更低，长期耐水老化性能也更优，在大体积坝体的中宽裂缝处理中应用广泛。施工采用分段注浆，压力控制在 0.3 至 0.8MPa，单段灌注时间不少于 40 分钟，结石体 28 天抗压强度可达 20MPa 以上，与原坝体混凝土的力学指标较为接近。工程检测表明，该工艺灌浆饱满度可达 98%左右；不足之处在于对 0.1mm 以下的极细发丝裂缝，水泥颗粒仍难以渗入，这类缝隙通常需要配合化学灌浆联合处理。

（5）复合防渗加固技术：实际工程中，坝体病害往往不是单一类型，表层缝、深层贯穿缝和局部应力集中可能同时存在，这时单一工艺难以兼顾，需要采用复合方案。常见做法是“内部灌浆＋表层嵌缝＋外表面防护”三层组合，个别应力集中部位还会加设限裂钢筋，单根主筋长度约 4.5m，用以约束裂缝继续扩展。施工顺序上先做内部压力灌浆封堵深层过水通道，再沿缝开槽嵌缝处理表层变形，最后整体涂刷高分子防护涂层，形成由内到外的多层防渗体系。从已实施的工程案例看，采用复合工艺处理后，对应坝段的渗漏量可降低 90%以上，防渗和抗变形能力都能得到提升；缺点是工序多、综合投入大，一般仅用于病害较严重的重点坝段，且需要提前做专项设计。

3 水利水电工程中混凝土重力坝裂缝的防渗修复技术应用策略

（1）实施精细化低压注浆防渗修复：针对重力坝表层发育的微细渗水裂缝，可采用精细化低压注浆工艺开展修复作业，该工艺可有效规避高压施工工况对原有完好混凝土结构的损伤，适配水工建筑物日常轻微病害治理场景。施工对象主要为缝宽 0.2～0.5mm 的非结构性裂隙，现场作业严格把控 0.2～0.4MPa 的注浆压力与 1.5～2.0L/min 的注浆速度，搭配水胶比 0.45～0.55 的复合水泥浆液，兼顾浆液流动渗透能力与后期固结强度。施工前期需打磨清理裂缝表层松散碎屑与污渍，封闭缝隙端口形成密闭施工空间，遵循自下而上、稀浆先导的作业原则，待缝隙浆液饱满无气泡溢出后稳压收尾。浆液固化成型后，固结体抗压强度超 30MPa、粘结强度不低于 2.5MPa，可彻底填充表层渗水通道，修复混凝土密实性，从根源解决坝体浅层渗漏问题，适配大坝长期常态化养护作业。

（2）加强深层高压固结注浆加固防渗：对于缝宽超过 0.5mm、深度突破 500mm 的深层贯通裂缝，以及坝基结合面存在的渗流缺陷，常规浅表修复工艺难以根治隐患，需采用高压固结注浆工艺同步实现结构加固与深层止水。施工采用 42～50mm 孔径钻孔，按照 1.0～1.5m 梅花式布孔方式布设注浆孔，施工压力稳定在 1.5～2.5MPa，保障浆液向深部岩体全方位扩散。工程可选用超细水泥浆液或水泥-水玻璃双液浆，后者初凝时长可控调整至 30～60s，可快速封堵高水

压、大流量的深层渗流通道。作业时钻孔深度需穿透裂缝发育层位，依托高压推力让浆液充分充填坝体内部裂隙与坝基松散空洞，胶结破碎岩体。固化后的结构渗透系数可降至 1×10^{-7}cm/s 以下，有效削减坝基扬压力，强化坝体结构整体性，抑制深层裂缝持续拓展，适用于大坝结构性病害大修治理。

（3）开展表层嵌缝密封防渗处理：表层嵌缝密封工艺主要用于处理坝面裸露、无深层延伸趋势的温度裂缝与干缩裂缝，是坝体表层防渗防护的基础性工艺，核心作用是封堵浅表渗水通道，阻隔外部水体侵入结构内部。该工艺适配 0.2～2.0mm 宽度的表层裂缝，施工阶段需对裂缝进行规整开槽，控制开槽宽度 30～50mm、深度 40～60mm，彻底清除槽内积水、粉尘及疏松物料，保证密封材料与混凝土基面紧密贴合。施工选用的聚氨酯、聚硫柔性密封材料，断裂伸长率不低于 300%、拉伸强度≥1.0MPa，可自适应混凝土温度形变，避免裂缝开合造成密封层脱落失效。嵌缝作业需一次性连续完成，压实平整后养护 72h 以上确保完全固化，成型后的密封结构可承受 0.3MPa 表层水压力，有效阻挡库水与雨水渗入裂隙，减缓混凝土侵蚀老化速度，稳固坝体表层防渗性能。

（4）加强坝体防渗涂层整体防护：防渗涂层防护属于主动预防性养护技术，主要针对坝体表层风化严重、微孔密集、细微裂纹多发的区域，通过在结构表层构建连续无断点的防护膜，阻断水体渗透路径，延缓混凝土材质劣化进程。施工现场多采用环氧树脂、丙烯酸聚氨酯等高性能防腐防渗涂料，整体涂层厚度控制在 1.2～2.0mm，分 2 至 3 次分层涂刷，单次涂刷厚度不超过 0.8mm，规避涂层厚薄不均引发的空鼓、开裂问题。成型涂层粘结强度可达 3.0MPa 以上，抗渗等级高于 P12，可在-20℃～60℃温差环境下稳定工作，具备优良的抗冻融、抗风化、抗水体腐蚀性能。施工前需对坝体基面打磨找平、去污除尘，保障基面平整度达标后再分层施工，固化后形成完整防护体系，有效封堵表层微孔与微裂隙，降低渗水概率，显著延长混凝土结构服役周期，适配老旧坝体翻新与日常防渗养护工作。

（5）实施排水系统优化辅助防渗：大坝防渗治理并非单一依赖裂缝封堵作业，排水体系的优化升级是降低结构渗压、巩固防渗成效的核心配套手段，可以从水力学角度弱化水体对裂缝的冲刷和渗透破坏。运维改造过程中，需系统规整坝体排水孔与坝基排水廊道体系，统一将排水孔孔径规范为 50～80mm，孔距设置为 2.0～3.0m，定期清理疏通堵塞的排水通道，保障渗流水体顺畅排出。同时，可增设浅层排水盲管与防渗垫层，搭建分层分级的立体排水体系，快速导排渗入坝体的积水，将坝基扬压力稳定在规范允许范围。经优化改造后，坝体排水效率可提升 30%以上，有效降低裂缝内部静水压力，减少往复渗流对裂隙的拓展作用，杜绝修复后二次渗漏问题。该技术可与各类封堵工艺组合应用，构建封堵结合导排的综合防渗体系，全面提升重力坝长期运维安全水平。

总而言之，重力坝运行中出现裂缝并不鲜见，其背后往往不是单一原因在起作用。混凝土在温度反复升降中产生胀缩，材料自身徐变和收缩又放大了这种变形，加上浇筑振捣、养护环节的疏漏，以及上游水体长期静压和渗流侵蚀，几方面因素交织，裂缝便由细微逐渐延伸，最终形成渗水路径，坝体挡水效能和结构安全都会受到牵连。裂缝深浅、走向各异，修补手段自然不能一概而论。表层细密裂缝做封闭处理即可，贯穿坝段的深层缺陷则需灌浆充填，必要时配合结构加固，不能只堵表面而忽视内部损伤。目前不少修复方案短期止水效果明显，但经历数年水位循环和温度交变后，修补部位再次开裂的情况时有发生。今后有必要把防裂意识前移到设计施工阶段，对已修补坝段坚持长期观测，积累真实工况下的材料老化数据，逐步摸索更耐久的处理办法。

参考文献：

[1] 姜伟.混凝土重力坝坝体裂缝监测与修复技术研究[J].江西建材,2026,(3):158-160.

[2] 熊昊冠,何静.混凝土重力坝坝踵裂缝水力劈裂效应数值模拟[J].水利科学与寒区工程,2026,9(2):6-9.

[3] 张晶.碾压混凝土重力坝温度应力裂缝分析及预应力锚索加固研究[J].江西建材,2025,(10):378-380+383.

术,2025,9(9):51-53.

[4] 张建伟,刘佳冰,黄锦林,等.基于扩展有限元法的混凝土重力坝裂缝扩展仿真研究[J].广东水利水电,2023,(5):8-14.

[5] 曲芳美.混凝土重力坝裂缝静动力稳定性分析[D].大连理工大学,2020.