

水利工程混凝土病害成因及现场处置技术探讨

赵念怡

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：水工混凝土长期在复杂水环境下服役，各类病害频发，直接制约水利工程安全运行和使用周期。结合当前水利工程运维发展现状，本文从施工、环境、运维三方面梳理混凝土病害核心成因，突破传统修补技术局限，聚焦各类新型轻量化、实操性现场处置技术，总结病害治理关键思路，为水利工程混凝土病害常态化处置、长效运维提供可行的技术参考。

关键词：水利工程；混凝土；病害成因；现场处置技术

引言

国内水利基建存量持续增长，多数水工混凝土工程逐步进入病害高发运维阶段。混凝土长期受水流冲刷、温湿度波动、水质侵蚀及荷载作用，易产生各类结构病害。传统事后修补模式存在滞后性、修复效果差、反复返修等问题。贴合现代智慧水利运维发展需求，精准溯源病害成因、推广高效低成本的现场处置技术，对提升工程耐久性、降低运维成本、保障水利设施稳定运行具备重要现实价值。

1 水利工程混凝土病害整体概况

现代水利工程混凝土结构的服役环境具备复合型、持续性特点，病害不再是单一问题导致的局部破损，而是多因素叠加形成的结构性、耐久性问题^[1]。当前水利混凝土病害主要分为表面缺陷、内部结构损伤、渗透类病害、结构变形病害四大类，各类病害相互关联、相互诱发，呈现出扩散速度快、隐蔽性强、反复出现的特征，区别于早期水利工程简单的表面破损问题。从工程运维实际来看，早期建设的水利工程因施工工艺标准偏低、运维体系不完善，病害问题更为突出，新建工程也会因环境复杂、精细化施工不到位出现新型病害。随着水利运维向常态化、精细化、智能化转型，病害治理核心已经从单纯的破损修补，转变为成因溯源、现场快速处置、长效防控的一体化模式。现阶段很多工程存在重建设、轻运维的问题，病害排查不及时、处置方式老旧，导致小型病害持续扩大，逐步发展为影响工程结构安全的重大隐患。同时，水环境恶化、极端天气频发，进一步加剧混凝土结构损伤，传统处置技术已经无法适配现代工程运维需求。基于当下水利工程发展趋势，系统梳理病害成因，优化升级现场处置技术，能够有效解决工程运维中的实际痛点，提升混凝土结构整体稳定性，延长水利工程整体服役周期。现阶段智慧水利建设逐步普

及，自动化监测、常态化巡检体系逐步落地，对混凝土病害治理的时效性、精准性要求持续提升，传统粗放式治理模式已完全无法适配现代化工程管理体系，倒逼现场处置技术不断迭代升级。

2 水利工程混凝土病害主要成因

2.1 施工阶段工艺与管控缺陷

施工环节的各类不规范操作，是混凝土后期出现病害的基础诱因，也是现阶段很多新建工程病害产生的主要原因。原材料管控不到位会直接影响混凝土基础性能，骨料级配失衡、含泥量超标，水泥、外加剂适配性不足，都会造成混凝土成型后密实度不均匀、整体强度不达标。浇筑作业过程中，分层浇筑厚度不合理、振捣频次和深度把控不当，会让混凝土内部产生空隙、气泡残留，形成蜂窝、麻面、空洞等初始缺陷。施工接缝处理不规范，新旧混凝土结合面清理不到位、粘接处理工序缺失，会造成接缝位置整体性不足，后期在外力作用下率先出现开裂、渗水问题。后期养护工作的缺失同样关键，养护时长不足、温湿度管控不当、拆模时间不合理，会导致混凝土收缩不均匀，产生早期表面裂缝。现代化施工中，部分项目为追赶工期，简化精细化施工流程，隐蔽工程质量排查不到位，这些施工阶段的隐性问题的，都会在工程服役过程中逐步显现，发展为各类结构性病害。现阶段多数施工现场的质量管控仍依赖人工经验，智能化质控设备使用率偏低，原材料复检、工序验收等关键环节容易出现漏检、抽检不严的情况，大量细微施工缺陷无法在建设期整改，为后期混凝土病害多发埋下长期隐患。

2.2 复杂外部环境叠加侵蚀作用

水利工程混凝土结构全程暴露在自然水环境中，外部环境的持续侵蚀是病害扩散发展的核心诱因，且现代环境变化让侵蚀问题更加复杂。温度与冻融循环作用影

响显著,昼夜温差、四季温度交替变化,让混凝土持续出现收缩、膨胀变形,长期反复作用会破坏内部结构整体性,产生表层龟裂、脱落。寒冷地区的冻融循环,会让混凝土内部孔隙积水结冰膨胀,逐步撑裂内部结构,造成表层剥落、骨料外露。水体与土壤中的化学侵蚀持续存在,河道、地下水含有的硫酸盐、氯离子等有害物质,会逐步渗透混凝土内部,发生化学反应,造成内部结构疏松、体积膨胀,引发开裂损伤^[2]。同时,现阶段工业污染、水体富营养化加剧,水环境中腐蚀性物质浓度提升,进一步加快混凝土老化损伤速度。长期风吹日晒、干湿交替的环境,也会持续消耗混凝土表层性能,降低结构耐久性,让微小病害持续扩大。近些年极端天气发生频次增多,短时高温、强降雨、大幅降温等异常气候交替出现,打破了常规环境侵蚀规律,混凝土结构经受的环境应力持续增大,病害发展速度相比往年明显加快,大幅缩短混凝土正常使用周期。

2.3 运行运维与荷载长期影响

工程服役期间的持续荷载作用与运维管理疏漏,是病害持续恶化、反复出现的关键因素。水利混凝土结构长期承受水流冲刷、水压挤压、水流脉动冲击,属于持续性交变荷载,长期作用下会让混凝土内部微观损伤不断累积,逐步形成贯通性裂缝和结构松动。泄洪、输水等工况下,高速挟沙水流会对混凝土过流面产生磨蚀、空化冲击,长期磨损会造成表层混凝土脱落、结构变薄,降低整体承载能力。运维管理层面,多数基层水利工程缺乏常态化病害排查机制,微小病害无法及时发现处置,持续发展为严重病害。日常运维监测手段落后,依赖人工肉眼排查,无法识别混凝土内部隐蔽损伤,导致病害处置滞后。此外,部分工程长期超负荷运行,闸门启闭、水位频繁升降,会进一步增加结构荷载压力,加速病害发展。老旧工程运维资金、技术投入不足,返修处置不彻底,也会造成病害反复复发,影响工程稳定运行。目前基层水利运维体系普遍存在人员技术能力不足、巡检频次不规范、隐患台账更新不及时等问题,病害治理缺乏系统性规划,普遍存在治标不治本的问题,造成病害反复返修、持续恶化。

3 水利工程混凝土现场新型处置技术

3.1 混凝土表面缺陷快速处置技术

针对混凝土表面蜂窝、麻面、表层剥落、轻微龟裂等常见浅层缺陷,现阶段主流采用轻量化、快速化现场处置技术,适配工程不停工、快速修复的运维需求。处置前期需完成表层清理作业,采用高压水枪、机械打磨方式,彻底清除表层松散混凝土、污渍、浮灰,保证修

复基面平整坚实,无杂物残留。针对浅层细微龟裂,采用新型渗透型修复材料,直接喷涂于裂缝表面,材料可渗透混凝土表层孔隙,固化后填充微观空隙,封闭表层裂缝,阻断外界水汽、腐蚀性物质渗入,避免裂缝持续扩张。针对蜂窝、麻面、表层脱落等破损问题,采用聚合物砂浆薄层修补技术,区别于传统普通砂浆,新型聚合物砂浆粘接强度更高、收缩性更小、耐久性更强,现场调配后直接分层涂抹于破损基面,找平压实即可完成修复^[3]。施工过程中无需大面积凿除原有结构,减少对原有混凝土结构的二次损伤,施工流程简单、作业周期短,适配现场快速处置需求。修复完成后,只需做好短期保湿养护,即可达到使用标准,有效解决传统表面修复易脱落、易开裂的问题,适配现代水利工程常态化快速维保需求。当前基层水利运维普遍追求低成本、零停工修复模式,该类轻量化表面修复工艺无需大型机械设备,单人即可完成基础作业,适配河道、水闸、小型坝体等多数水工构筑物的现场维保场景,适配现阶段水利常态化巡检修复的工作节奏。

3.2 混凝土裂缝分级处置技术

裂缝是水利混凝土最普遍的病害类型,不同宽度、深度、走向的裂缝危害差异较大,现阶段现场处置采用分级分类处置模式,精准适配不同裂缝的修复需求,提升处置性价比和修复效果。按照裂缝尺寸分为细微表层裂缝、中等深度裂缝、贯通性结构裂缝三类,实施差异化处置。宽度小于0.2毫米的表层细微裂缝,采用新型密封胶喷涂封闭技术,利用材料的高渗透、高粘接性能,封闭裂缝通道,阻隔外部侵蚀介质,防止裂缝进一步发展,无需开槽处理,施工效率高。宽度0.2至0.5毫米的中等裂缝,采用开槽嵌缝修复技术,现场使用小型切割机沿裂缝开设规整凹槽,清理槽内松散杂物后,填充柔性止水嵌缝材料,表层涂抹密封材料压实封闭,适配混凝土伸缩变形特性,避免裂缝再次开裂。宽度大于0.5毫米的深层、贯通性裂缝,采用低压低速化学灌浆技术,区别于传统高压灌浆,低压灌浆不会对原有结构造成二次挤压损伤,将专用灌浆材料注入裂缝内部,材料固化后可完全填充裂缝空隙,恢复混凝土结构整体性和承载能力。整套分级处置技术针对性强、操作简便,适配各类水利现场作业场景,兼顾修复质量和施工效率,是目前水利裂缝处置的主流新型技术。分级处置模式摒弃了以往一刀切的修复方式,杜绝小裂缝大修复、大裂缝轻处理的不合理施工问题,有效节约运维耗材与人工成本,契合现代水利精细化、节约化的运维发展要求。

3.3 混凝土渗漏与脱空处置技术

渗漏、衬砌脱空是水工混凝土隐蔽性极强的病害，多出现于坝体、隧洞、闸室衬砌结构，传统处置方式存在排查不准、修复不彻底的问题，现阶段采用精准定位、靶向处置的新型现场技术。渗漏处置首先采用简易无损检测方式定位渗漏通道和渗水点位，针对表层点状、线状渗水，采用快速止水堵漏技术，使用新型速效堵漏材料，直接封堵渗水点位，快速阻断表层渗水。针对内部深层渗漏、压力渗水，采用分段化学灌浆止水技术，根据渗漏范围布置灌浆孔，采用低压匀速灌浆方式，让灌浆材料充分渗透内部渗漏孔隙，固化后形成整体止水结构，从根源解决内部渗水问题。针对隧洞、坝体衬砌脱空病害，先通过现场探测确定脱空区域、脱空厚度，小型浅层脱空采用超细水泥基回填灌浆技术，材料流动性强、填充密实度高，可充分填满脱空空隙。大面积深层脱空采用水泥-化学复合灌浆技术，结合两种材料的优势，提升填充密实度和结构粘接性，固化后可让衬砌与基层形成整体结构，消除脱空隐患^[4]。整套技术无需大面积破除结构，精准靶向处置，有效解决隐蔽病害修复不彻底的行业痛点，适配现代水利精细化运维要求。无损探测搭配靶向灌浆的组合工艺，能够精准锁定隐蔽病害范围，避免盲目施工造成的资源浪费，大幅提升隐蔽病害一次性修复成功率，适配存量水利工程提质运维的核心需求。

3.4 混凝土结构老化与侵蚀修复加固技术

针对长期化学侵蚀、冻融老化、荷载损伤导致的混凝土结构疏松、强度下降、表层碳化等病害，现阶段采用新型无创加固、性能提升型处置技术，替代传统厚重加固方式，实现轻量化、长效化修复。对于表层碳化、结构疏松的混凝土区域，先通过机械打磨清除全部老化疏松层，露出坚实基层后，涂刷新型碳化防护涂层，阻断二氧化碳、腐蚀性水体渗透，阻止混凝土持续老化，同时提升表层密实度和抗侵蚀能力。对于冻融损伤、磨损导致的结构表层破损、强度衰减问题，采用纤维增强复合材料粘贴加固技术，区别于传统加厚混凝土、粘贴钢板的加固方式，该材料重量轻、强度高、耐腐蚀，现

场粘贴于混凝土受损结构表面，可快速提升结构整体抗拉、抗冲刷能力，不会增加结构自重负担。针对钢筋锈蚀引发的混凝土胀裂损伤，先彻底清除锈蚀部位松散混凝土，对钢筋做钝化防护处理后，采用高韧性修补材料回填修复，最后整体涂刷防腐防护层，阻断氯离子等侵蚀介质，从源头抑制钢筋再次锈蚀。整套修复加固技术适配现代水利工程长效运维需求，修复后结构耐久性大幅提升，可有效降低后期病害复发概率，减少重复运维成本^[5]。这类轻量化无创加固技术适配老旧水利工程改造升级场景，不改变原有结构外形和荷载参数，兼容各类老旧混凝土结构改造，是现阶段水利工程提质增效、延长服役年限的核心实用技术。

结语

水利工程混凝土病害由施工管控、外部环境、运维荷载多重因素共同引发，现代工程病害普遍具备复合型、隐蔽性、反复性特点，传统修补工艺已难以适配下水利运维发展需求。依托现代化水利运维理念，各类快速处置、分级修复、精准堵漏、轻量化加固的现场技术，可有效解决混凝土各类病害问题。后续病害治理需转变被动修补思路，落实源头防控、精准处置、长效防护模式，持续优化处置工艺，提升混凝土结构稳定性，保障水利工程长期安全运行。

参考文献

- [1]崔立策.水利工程中混凝土浇筑的质量控制与检测技术探讨[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025,(9):063-066.
- [2]祝剑勇.水利混凝土结构现场无损检测技术研究[J/OL].中国科技期刊数据库工业B,2026,(6):071-074.
- [3]张剑.水利工程施工中控制混凝土裂缝的技术研究[J].工程与建设,2023,37(6):1775-1777.
- [4]梅群.水利工程施工混凝土裂缝成因分析及控制措施[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024,(1):0160-0162.
- [5]陈海青.大体积混凝土在水利工程中的应用探讨[J].中华传奇(上旬),2022,(4):0055-0057.