

灌区渠系工程老化病害成因及修复技术探讨

张文平

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7094

[摘要] 灌区渠系是农田水利基础设施体系的核心组成部分,长期服役过程中受自然环境、岩土特性、水流作用及运维体系等多重因素耦合影响,普遍出现结构破损、防渗失效、渠体失稳等各类老化病害问题,直接制约灌区输水效率与服役稳定性,影响区域农业灌溉保障能力。为系统厘清渠系工程病害演化机制,本文从自然环境侵蚀、水力荷载作用、岩土体劣化、运维体系缺陷四个维度深入剖析渠系工程老化病害的核心成因,结合当前水利工程前沿技术成果,针对性探讨新型防渗加固、复合结构修复、智能化微创治理、生态协同修复等先进技术的应用原理与适配场景。研究立足工程长效服役需求,整合多维度病害治理思路,可为老旧灌区渠系提质改造、病害精准治理及工程耐久性提升提供理论支撑与技术参考,具备较强的工程应用价值与学术研究意义。

[关键词] 灌区渠系; 老化病害; 成因机制; 修复技术

中图分类号: S274 文献标识码: A

Causes and Repair Technologies of Aging-Induced Damages in Irrigation Canal Systems

Wenping Zhang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] As a core component of farmland water conservancy infrastructure, irrigation canal systems suffer from widespread aging-induced damages including structural failure, invalid anti-seepage performance and canal body instability under the coupled effects of natural environment, geotechnical properties, water flow action, operation-maintenance systems and other factors during long-term service. Such problems directly restrict water conveyance efficiency and service stability of irrigation districts, and impair regional agricultural irrigation guarantee capacity. To systematically clarify the damage evolution mechanism of canal projects, this paper analyzes the primary causes of aging-induced damages from four dimensions: natural environmental erosion, hydraulic load action, geotechnical mass deterioration and defects in operation-maintenance systems. Combined with cutting-edge technical achievements in current water conservancy projects, the application principles and applicable scenarios of advanced technologies are discussed pertinently, including new anti-seepage reinforcement, composite-structure rehabilitation, intelligent minimally-invasive treatment and eco-collaborative restoration. Oriented toward the long-term service requirements of projects, this study integrates multi-dimensional damage treatment ideas. It provides theoretical support and technical references for quality improvement renovation, precise damage control and durability enhancement of aged irrigation canal systems, and possesses favorable engineering application value and academic research significance.

[Key words] irrigation canal system; aging-induced damage; cause mechanism; repair technology

1 引言

灌区渠系作为粮食生产的基础性水利载体,承担着农田输水、配水与调水的核心功能,其结构完整性与运行稳定性直接关系到农业水资源利用效率与区域粮食安全保障水平。我国多数大中型灌区建设年限久远,渠系工程长期处于不间断服役状态,在复杂外部环境与长期荷载耦合作用下,工程结构逐步出现功

能与结构性老化损伤,各类病害持续累积且呈现多元化、复杂化发展特征。现阶段传统修复技术存在治理单一、耐久性不足、适配性较差等短板,难以满足现代化灌区长效运维的发展需求。

2 灌区渠系工程主要老化病害类型

2.1 渠体防渗结构破坏失效

灌区是保障我国农业生产的重要水利基础设施,其稳定运行可为农业生产提供可靠的水源。目前,我国灌区存在设施老化、灌溉利用率低下等问题,渠系防渗结构是控制输水渗漏损失、保障渠系运行效能的核心构造,也是老化病害最为集中的部位。现有灌区渠系多采用混凝土衬砌、预制板衬砌、土工膜防渗等常规防渗形式,长期服役过程中,防渗层会持续出现开裂、起砂、剥落、脱空等损伤问题,各类损伤会逐步形成贯通性渗流通道,彻底破坏渠体防渗体系的完整性。防渗结构破损后,渠水会通过结构缝隙渗入渠基与渠坡土体内部,不仅大幅提升输水渗漏损耗,降低灌区水资源利用效率,还会持续冲刷、软化下部岩土体,间接诱发渠基沉降、边坡失稳等次生病害。

2.2 渠基土体劣化与不均匀沉降

渠基作为渠系结构的承载基础,其岩土体稳定性直接决定渠系整体结构安全。长期输水工况下,渠基土体持续处于干湿交替、渗透浸泡的复杂环境中,原生岩土结构会逐步发生劣化变形,细颗粒土体在渗流作用下不断流失,导致渠基土体孔隙率增大、密实度下降。对于膨胀土、粉质黏土等特殊岩土渠基,土体遇水膨胀、失水收缩的往复变形特性会持续扰动上部衬砌结构,引发渠体局部隆起、凹陷及不均匀沉降问题。渠基不均匀沉降会直接造成衬砌结构受力失衡,产生贯通性结构性裂缝,同时会改变渠系原有水力断面形态,导致局部水流流速异常、冲刷作用加剧,形成病害恶性循环,持续削弱渠系工程的承载与输水性能。

2.3 渠坡结构失稳与表层坍塌

渠坡属于渠系工程中非常关键的一种防护结构,而在老旧灌区中,边坡失稳、表层坍塌这类结构性病害频繁发生。渠坡土体长时间受到渠水浸泡、地下水位波动、降雨入渗等多重因素的影响,使得土体的抗剪强度持续不断地衰减,而结构稳定性也在不断下降。在灌溉期的时候,渠水持续浸润渠坡,这导致土体含水率大幅提高,在自重荷载增加的同时,岩土体的黏聚力显著降低,而在非灌溉期,渠坡土体快速失水收缩,表层结构容易出现松散开裂的情况,反复进行干湿循环会持续破坏渠坡的整体结构。与此同时,长期输水产生的侧向水压力会对渠坡产生持续挤压作用,扰动边坡的应力平衡状态,进而引发表层土体滑移、局部坍塌、整体滑坡等病害。这些病害会减少渠系有效过水断面,阻碍正常输水流程,严重时会致使渠系阻断,影响灌区整体灌溉调度秩序。

2.4 渠系淤积与附属设施老化损毁

在渠系输水的时候会一直有泥沙、秸秆、生活垃圾等杂物被裹挟着,长时间累积就会形成渠体淤积的毛病,这会大大降低渠系输水的能力、调蓄的能力。自然环境中生长出来的水草、藻类等水生植物会附着在渠壁和渠底上,会让淤积堵塞的情况变得更严重,还会改变原有的水力运行状况。而且,闸门、跌水、涵洞、护坡等渠系附属配套设施长时间暴露在自然环境里,由于风化、锈蚀、水流冲刷等作用,会出现构件锈蚀、结构变形、启闭失灵、防护层脱落等老化的问题。附属设施的功能失效会让渠系水量调控的精度下降、水流分布不均匀,会加大局部水力冲刷

与淤积的问题,让渠系整体运行协调性大幅降低,各类次生病害会持续滋生蔓延。

3 灌区渠系工程老化病害多元成因机制

3.1 自然环境多场耦合侵蚀作用

自然环境中的多场耦合侵蚀乃是引发渠系工程出现老化病害的基础因素,温度、水文、气象等环境因子反复作用会持续削弱工程结构性能。冷暖交替所引发的温度应力会使混凝土衬砌、预制板等结构产生反复胀缩变形,逐渐衍生出细微裂缝并且持续扩大,低温冻融环境下渠基土体水分冻结膨胀,产生的冻胀力会直接破坏衬砌结构完整性,致使板块隆起、断裂脱落。降雨入渗会持续冲刷渠坡表层土体,同时提高渠基土体含水率,弱化岩土体力学性能,干湿循环、冻融循环的耦合作用会加快结构材料老化与岩土体劣化。另外,大气风化、紫外线照射等长期作用会让防渗材料、防护构件老化脆化,逐渐丧失原有防护与防渗功能,从外部持续侵蚀渠系工程结构体。

3.2 水力荷载持续冲刷与渗流破坏

水流荷载的长期作用是渠系病害持续发育的核心动力因素,动态水流产生的冲刷、磨蚀与渗流作用会持续损伤工程结构。渠系输水过程中,含沙水流会对渠壁、渠底产生持续磨蚀作用,逐步磨损衬砌防护层与结构表层材料,长期作用下会造成结构厚度缩减、表层剥落。水流流速分布不均引发的局部紊流、涡流会加剧局部冲刷力度,掏空渠坡与渠基周边土体,诱发结构悬空、塌陷隐患。同时,渠水通过结构细微裂缝、接缝缝隙持续渗入渠基,形成长期渗流作用,渗流会不断带走土体细颗粒,造成渠基土体架空、密实度降低,逐步引发不均匀沉降与结构变形。

3.3 工程岩土体固有性能劣化演变

渠系工程所处场地的岩土体固有特性,是病害滋生的内在基础性条件,岩土体自身性能的劣化演变直接决定渠系结构稳定性。多数老旧灌区渠系建设时期岩土勘察精度有限,部分渠段选址于软弱土、膨胀土、湿陷性黄土等特殊岩土区域,此类岩土体本身力学性能较差,遇水易变形、强度衰减快,长期服役过程中极易发生结构劣化。渠基土体在长期浸泡、荷载作用下,原生结构持续破坏,土体颗粒重组、孔隙发育,整体承载性能与抗渗性能不断下降。同时,岩土体与工程结构材料的适配性缺陷会逐步凸显,土体变形与结构变形无法协同适配,持续产生附加应力,诱发衬砌开裂、结构错位等病害,推动渠系工程老化损伤持续加剧。

3.4 运维管理体系长效性缺失

运维管护机制不完善、养护措施滞后是渠系病害快速发展、反复滋生的重要人为因素。我国灌区渠系具有线路长、覆盖范围广、点位分散的特点,多数基层灌区存在运维经费不足、管护人员短缺、技术手段落后等问题,常态化巡检、预防性养护工作难以有效落实。渠系局部出现细微裂缝、表层破损、轻微淤积等初期病害时,无法及时开展修复治理,微小病害持续累积、扩展,逐步演变为结构性、功能性重度病害。同时,传统运维模式

多采用被动式治理方式,缺乏智能化监测与预判机制,无法精准掌握渠系结构运行状态与病害演化规律,养护治理的针对性、时效性不足,长期带病运行的状态大幅缩短了渠系工程服役年限。

4 灌区渠系工程前沿修复治理技术体系

4.1 高性能复合防渗加固技术

高性能复合防渗加固技术是针对渠系防渗破损、结构弱化问题的前沿治理手段,相较于传统单一衬砌修复技术,具备防渗性能优、耐久性强、适配性广的优势。该技术依托高分子复合防渗材料与改性混凝土材料,构建多层复合防渗结构,通过优化材料配比,提升结构抗冻融、抗冲刷、抗老化性能。针对老旧渠系衬砌开裂、脱空病害,可采用聚合物水泥基复合涂层进行表层修复,涂层能够渗透填充结构细微裂缝,形成致密的防渗防护层,同时与原有结构形成牢固粘结整体,有效阻断渗流通道。对于破损严重的渠段,可采用土工复合膜与改性混凝土衬砌复合结构重构防渗体系,结合闭孔泡沫板、止水铜片、聚氨酯密封胶多重止水工艺优化接缝处理,彻底解决传统结构接缝渗漏难题,大幅提升渠系防渗完整性与结构耐久性。

4.2 非开挖式微创修复技术

非开挖式微创修复技术是适配老旧灌区改造的前沿绿色技术,可在不破坏原有渠系主体结构、不中断输水运行的前提下完成病害治理,有效弥补传统开挖修复施工量大、扰动性强、工期冗长的短板。该技术依托紫外光固化、翻转式原位固化、高分子注浆微创加固等工艺,针对渠基脱空、结构裂缝、接缝渗漏、表层破损等病害开展精准治理。其中高分子注浆加固技术可通过低压注浆方式,将改性高分子浆液注入土体孔隙与结构裂缝中,浆液快速固结后填充脱空区域、胶结松散土体,提升渠基密实度与结构整体性,同时不会扰动原有渠系结构与周边环境。紫外光固化技术可实现渠壁破损表层的快速固化修复,施工效率高、结构贴合性好,能够有效适配各类异形渠段的修复需求,适配现代化灌区低扰动、高效率的改造需求。

4.3 渠基岩土体改良稳定技术

针对渠基土体劣化、不均匀沉降、渠坡失稳等根源性病害,岩土体改良稳定技术可从底层优化渠系承载基础,实现病害源头治理。前沿改良技术以物理改良与化学改良协同结合为核心,通过换填稳定性优、抗剪强度高的改性岩土材料,替换渠基软弱劣化土体,同步布设智能排水降噪系统,有效疏导渠基渗透水,降低土体含水率,规避干湿循环与渗流破坏带来的土体劣化问题。化学改良通过掺入土壤固化剂、高分子改性材料,改变土体内部结构,提升土体抗渗性、抗变形能力与结构强度,从根本上解决膨胀土、软弱土渠基变形失稳难题。同时结合柔性护坡、三维土工网垫等生态加固结构,优化渠坡应力分布,提升渠坡整体稳定性,实现渠基、渠坡协同加固,杜绝沉降、坍塌等次生病害复发。

4.4 智能化监测与精准运维技术

智能化监测与精准运维技术是实现渠系病害主动防控、长效治理的核心前沿手段,依托物联网、传感监测、大数据分析等现代信息技术,构建全时段、全覆盖的渠系运行监测体系。通过在渠系关键点位布设渗压传感器、位移传感器、裂缝监测传感器,实时采集渠基渗流、结构变形、裂缝发展等核心数据,依托大数据算法实现病害演化趋势的动态预判,精准识别早期隐蔽性病害。基于监测数据构建渠系运维决策体系,针对性制定预防性养护与精准修复方案,改变传统被动治理的运维模式。同时结合数字孪生灌区技术,搭建渠系三维可视化模型,动态模拟渠系水力运行状态与结构应力变化,实现病害治理的精准化、运维管理的智能化,全面提升渠系工程长效服役能力。

4.5 生态协同修复治理技术

生态协同修复技术兼顾渠系结构安全、运行效能与生态保护需求,是当前灌区改造领域的绿色前沿技术,突破了传统硬质修复技术生态性不足的局限。该技术采用生态混凝土、透水改性衬砌等绿色建材替代传统硬质衬砌材料,在保障结构防渗、抗冲刷性能的基础上,提升渠系水体交换能力与生态适配性。针对渠系淤积、水生生态失衡问题,采用生态清淤、微生物净化技术替代传统机械清淤,精准清除渠系淤积杂物的同时,维护渠水生态平衡。结合乡土植被护坡、生态格网防护等工艺,构建复合型生态防护体系,既能够加固渠坡结构、防控边坡坍塌,又可以改善渠系生态环境,实现工程结构安全、水资源高效利用与生态环境保护的协同发展,适配现代水利绿色可持续发展理念。

5 结语

灌区渠系工程老化病害是自然环境、水力作用、岩土特性、运维管理多维度因素耦合作用的结果,病害类型多元、演化机制复杂,且存在明显的渐进性、叠加性特征。水利工程的老化失修已成为水利管理工作的一个突出问题,需要相关水利人员从全方位、多角度出发,将建设、改造、维修、养护和强化管理有机结合起来,既要逐步采取有力措施对现有问题加以处理,又要放手搞好水利工程设施的管理,使各项水利工程都能发挥其自身的工程效益,进而为农业生产提供更好地服务。

[参考文献]

- [1]许鸿兴,王玲.大型渠道衬砌结构病害防治及修复技术研究[J].水利科技与经济,2026,32(06):89-93.
- [2]王发来.老旧灌区改造工程新旧结构衔接施工技术研究[J].工程技术研究,2026,11(13):112-114.
- [3]何武全.新时期农田渠道防渗工程技术优化与应用探析[J].中国农村水利水电,2024,(09):156-160.

作者简介:

张文平(1992--),男,汉族,甘肃武威人,研究生,现有职称,工程师,研究方向:水利。