

冻土区渠道衬砌结构冻胀破坏机理及防渗抗冻技术研究

刘铁刚

黑龙江省中部引嫩工程和江东灌涝区管护中心，黑龙江 齐齐哈尔 161006

DOI:10.61369/WCEST.2026010001

摘 要： 处于冻土区域的渠道工程在长期运行阶段，会受到低温气候条件、冻融往复作用以及水分迁移现象等多重因素影响，渠道衬砌结构极易产生冻胀类损伤，具体呈现出裂缝开展、结构错台以及水体渗漏等病害问题，对工程整体安全性能与防渗功能发挥造成严重干扰，依托冻土区独有的自然环境特点，论文从水分迁移规律、土体冻结膨胀特性以及结构-土体耦合作用等维度，剖析渠道衬砌冻胀破坏的内在机制，结合实际工程案例探究防渗抗冻相关技术的应用成效，为冻土区渠道工程的设计优化与运维管控提供理论和实践参考。

关 键 词： 冻土区；渠道衬砌；冻胀破坏；防渗抗冻；综合技术体系

Research on Frost Heaving Damage Mechanism and Anti-Seepage and Frost-Resistant Technology for Canal Lining Structures in Permafrost Regions

Liu Tiegang

Central Nenjiang River Diversion Project and Jiangdong Irrigation and Waterlogging Area Management and Protection Center, Qiqihar, Heilongjiang 161006

Abstract： Canal projects located in permafrost regions are subject to multiple factors during long-term operation, including low-temperature climatic conditions, freeze-thaw cycles, and moisture migration phenomena. These factors make canal lining structures highly susceptible to frost heaving damage, manifesting as cracks, structural misalignment, and water leakage. These issues significantly compromise the overall safety and anti-seepage functionality of the project. Drawing on the unique natural environmental characteristics of permafrost regions, this paper analyzes the internal mechanisms of frost heaving damage to canal linings from dimensions such as moisture migration patterns, soil freezing expansion characteristics, and structure-soil coupling effects. It explores the application effectiveness of anti-seepage and frost-resistant technologies through practical engineering cases, providing theoretical and practical references for the design optimization and operation and maintenance management of canal projects in permafrost regions.

Keywords： permafrost regions; canal lining; frost heaving damage; anti-seepage and frost resistance; comprehensive technology system

引言

我国北方寒冷及高寒地带是冻土区的主要分布范围，此类区域承担着农业灌溉供水与水资源合理调配的重要职能，在低温外界环境、冻融交替效应及水分迁移过程等因素的作用下，渠道衬砌结构在服役周期内往往会出现冻胀破坏问题，进而引发裂缝发育、结构隆起与水体渗漏等病害，大幅降低工程运行安全水平与实际使用寿命，当前相关研究大多聚焦于冻土工程领域的共性规律，针对渠道衬砌冻胀破坏机理以及防渗抗冻技术的系统化研究尚存在欠缺，开展更为深入的分析与归纳总结工作具有现实必要性。

一、冻土区渠道工程及衬砌结构特点

（一）冻土区自然环境与冻融特征

冻土区的自然条件呈现出低温主导、年内温差悬殊、冻结持续时间久、冻融交替活动活跃等鲜明特点，冬季阶段地表温度会长期维持在 0℃ 以下区间，土体冻结深度伴随气温降低而逐步加大，土体孔隙内部的液态水逐步凝结为冰晶体，引发土体体积的

大幅扩张，土体冻结进程中，温度梯度分布、毛细传输效应与基质吸力的协同作用，会推动未冻结区域的水分持续向冻结锋面方向运移，进而大幅增强土体冻胀的作用效果^[1]。春季气温回升进入解冻阶段后，土体内部冰晶逐步消融，原有土体结构架构遭到破坏，孔隙占比随之提升，土体自身强度与承载能力出现明显下降，极易诱发不均匀沉降与变形问题，冻融循环的长期反复作用，不仅会改变土体自身的物理力学指标参数，还会造成地基承

载性能的持续性衰减，导致渠道衬砌结构始终处于不稳定的工作状态，该因素是诱发冻土区渠道工程各类病害的关键环境条件，对渠道工程的安全稳定运行形成长期潜在威胁。

（二）渠道衬砌结构类型及工程特性

为提升渠道输水效率、控制输水过程中的渗漏损耗，冻土区渠道工程通常选用混凝土衬砌、浆砌石衬砌以及复合式衬砌等结构方案。该类衬砌结构具备良好的整体性能，防渗效果与耐久性表现突出，能够有效减少输水环节的水量渗漏损失，还可在一定范围内抵御水流冲刷作用与外界环境的侵蚀影响，但从结构受力的基本特性分析，衬砌所用材料普遍具有较高刚度，结构自身的变形协调能力存在局限，对地基产生的不均匀变形适应能力欠佳，当衬砌下方土体因冻胀或融沉作用出现差异性变形时，衬砌结构内部极易形成应力集中现象，衬砌板块边缘与接缝位置表现尤为明显，裂缝开展、结构错台等破坏问题极易发生，最终造成衬砌结构整体稳定性与防渗效能的大幅削弱。

（三）冻土区渠道运行中存在的主要问题

在长期运行工况下，受冻胀作用与冻融循环的反复影响，冻土区渠道衬砌结构普遍存在不同程度的病害损伤，具体体现为衬砌板块开裂破损、局部区域隆起变形、结构接缝损坏失效以及渠道渗漏量显著上升等问题。衬砌裂缝与接缝破坏不仅会降低结构整体完整性，还会成为水分渗入衬砌下部土体的通道，造成地基土体含水率呈现周期性波动变化，进一步加剧土体冻胀作用效应，最终形成“渗漏—冻胀—破坏”的恶性循环模式，此类工程病害若未能得到及时有效治理，破坏范围将持续扩展，不仅会严重削弱渠道防渗性能与输水效率，还会大幅增加工程运行维护的难度与管理成本投入，对渠道工程长期安全稳定运行产生持续性的负面影响。

二、渠道衬砌结构冻胀破坏机理分析

（一）冻胀形成的水分迁移机制

土体冻胀的本质是低温环境作用下，土体内部液态水持续向冻结锋面迁移并凝结形成冰晶体的物理过程，该现象的发生需要同时具备低温环境条件、可被冻结的水源供给以及适宜的土体结构特征三个要素，冻土区渠道在运行过程中，衬砌结构难以避免存在微裂缝、接缝间隙或施工遗留缺陷，渠道内水体与地下水可通过渗透方式进入衬砌下部土体，为土体冻胀提供持续稳定的水源补给，在温度梯度的驱动作用下，未冻结区域的水分在毛细力与基质吸力的共同作用下不断向冻结区域汇聚，促使冰晶体持续生长并逐渐形成冰透镜体，最终引发土体体积的显著膨胀。土体冻胀量可简化采用下式表达：

$$\Delta h = \alpha \cdot w \cdot H$$

式中， Δh 为土体冻胀量， α 为冻胀系数， w 为土体含水率， H 为冻结深度，由该式可知，土体含水率越高、冻结深度越大，冻胀变形的表现就越显著，而渠道渗漏问题正是加剧衬砌冻胀破坏的关键诱因。

（二）土体冻胀膨胀与衬砌结构受力特征

当衬砌下部土体发生冻结体积膨胀时，冻胀产生的作用力会通过地基土体传递至渠道衬砌结构，对衬砌施加明显的竖向顶推作用力与水平向挤压作用力。在冻胀作用初期阶段，衬砌结构可依靠自身刚度与整体性能抵御一定程度的变形，但随着冻胀作用力的持续增大，结构内部会逐步形成拉应力集中区域，衬砌板块边缘、接缝部位以及结构固有薄弱区域的应力集中现象更为突出，当冻胀引发的附加应力超出衬砌材料自身的抗拉或抗弯强度限值时，衬砌结构就会出现裂缝开展、表面翘曲甚至整体抬升等破坏现象，除此之外，土体不均匀冻胀还会造成衬砌结构受力分布状态失衡，引发局部区域应力过载，加速衬砌结构的损伤进程与防渗性能退化，这也是渠道衬砌工程病害发生的核心力学诱因^[2]。

（三）冻融循环作用下的累积破坏效应

冻融循环对渠道衬砌结构造成的破坏具有显著的累积性与渐进性特点，其危害影响在短周期内往往不易被察觉，但经过长期反复作用后，结构破坏程度会出现快速加剧的趋势。在土体冻结阶段，冻胀作用会对衬砌结构形成反复的荷载施加效应；进入土体融化阶段后，冰晶消融导致土体强度大幅下降，局部区域产生融沉变形，衬砌结构因此失去原有的稳定支撑条件，冻胀与融沉的反复交替作用，使衬砌结构长期处于拉压交变应力的作用环境中，逐步产生疲劳损伤，结构原有微裂缝持续扩展并相互连通，最终形成贯穿性裂缝并引发结构失稳问题，与此同时，冻融循环还会加速衬砌材料性能劣化，造成混凝土抗冻耐久性下降，进一步削弱渠道衬砌结构的整体稳定性，该作用机制是冻土区渠道工程长期运行过程中必须重视的破坏因素。

三、冻土区渠道衬砌结构防渗抗冻技术

（一）防渗措施对冻胀破坏的影响

防渗手段是管控冻土区渠道衬砌冻胀破坏的核心技术路径，技术应用的核心目标在于阻断水分侵入衬砌下部土体，从根源上削减冻胀现象发生所需的水源基础。渠道投入运行后，衬砌结构若存在裂缝发育、接缝闭合不严或局部破损等问题，水体便会通过渗透途径进入地基土体，造成土体含水率大幅上升，进而推动冻结过程中水分迁移运动与冰晶生长进程，基于这一特性，构建连续且完整的防渗系统，能够有效控制土体含水率的波动幅度，缓解冻胀作用带来的负面影响，现有常用防渗技术包含混凝土防渗衬砌、复合防渗构造以及防渗膜与衬砌结构的协同布设，在此基础上通过提升衬砌材料的密实程度、改进施工工艺细节、加强接缝止水环节处理，可增强防渗结构的整体性能与耐久品质，进而实现对冻胀破坏发展趋势的有效抑制。

（二）抗冻结构设计与材料改进

在冻土区渠道工程建设与运维工作中，单纯依托防渗措施无法彻底消除冻胀作用的影响，科学合理的抗冻结构设计与衬砌材料性能改良同样占据关键地位。通过优化衬砌结构的具体形式，可增强其对地基变形的适应能力，比如在衬砌结构内部针对性设置伸缩缝、沉降缝或柔性连接构造，使结构在冻胀作用下拥有一

定的变形缓冲空间，规避应力集中引发的结构破损问题，在衬砌结构下方增设缓冲层或柔性垫层，能够有效分散冻胀应力，降低冻胀力直接作用于衬砌结构的强度水平，衬砌材料性能对工程抗冻效果起到直接决定作用，选用抗冻性能优异的混凝土原料、在材料中掺入抗冻外加剂或引气剂，可提升材料自身的抗冻融能力与耐久性能，减轻冻融循环造成的结构性能劣化问题，以此延长渠道衬砌结构的服役年限。

（三）保温与排水综合技术应用

保温与排水相关技术是冻土区渠道衬砌防渗抗冻技术体系的重要补充，对于减轻冻胀破坏危害具有突出作用，在衬砌结构下方或两侧位置设置保温层，能够有效阻隔低温向地基土体的传导，减小土体冻结深度与冻结持续时长，压缩冻结作用影响范围，从而降低冻胀变形量，目前常用保温材料涵盖聚苯板、泡沫混凝土等轻质保温品类，这类材料具备施工便捷、保温性能稳定的优势，配套完善的排水系统能够及时排出衬砌下部及周边土体中的富余水分，控制土体含水率的波动范围，营造不利于冻胀现象发生的土体环境^[3]。

四、冻土区渠道衬砌防渗抗冻综合技术体系与工程应用

（一）防渗抗冻技术的综合设计思路

冻土区渠道工程受区域自然条件制约作用显著，衬砌冻胀破坏的内在机理具有复杂性特征，仅依靠单一技术手段难以达成长期有效的防治目标，基于此，在工程设计与升级改造环节，需遵循“防水为核心、抗冻为辅助、全方位综合治理”的技术路线，将防渗、抗冻、保温、排水等多项技术措施进行系统性整合运用。立足冻胀现象的形成机理，通过强化衬砌结构的防渗性能，减少水分向地基土体的补给量；结合抗冻结构专项设计，提升衬砌结构对冻胀变形的适应水平；在此前提下，通过设置保温层控制土体冻结深度，搭配合理的排水系统调节土体含水状态，从温度场与水分场两个层面共同削弱冻胀作用强度，综合技术体系的搭建需充分考量区域冻土类型、土体冻结深度、渠道运行模式及后期维护条件，实现各项技术措施的协同配合，提升渠道工程的整体安全性能与耐久品质。

（二）典型工程应用效果分析

黑龙江省三江平原灌区渠道工程受季节性冻土分布与高地下

水位双重因素影响，工程初期运行阶段，渠道混凝土衬砌普遍出现裂缝开展、结构错台及水体渗漏等病害，冻融循环作用对工程安全运行造成明显负面影响，针对此类问题，该工程后续改造工作中采用以混凝土防渗衬砌为主体、衬砌下部增设保温层并配套完善排水系统的综合防渗抗冻技术方案，通过强化衬砌接缝止水工艺处理，有效减少渠道运行期间的渗水量，显著降低地基土体含水率的波动幅度，工程运行实践数据表明，综合技术措施实施后，渠道衬砌冻胀破坏程度得到明显缓解，裂缝数量与渗漏现象大幅减少，结构整体稳定性与输水效率实现有效提升^[4]。相似的应用成效在甘肃省引大入秦工程部分高寒渠段同样得到验证，该工程通过布设复合防渗衬砌结构并配合保温与排水技术手段，有效缓解高寒地区冻胀作用对渠道衬砌结构的不利影响，取得了良好的工程应用成效。

（三）技术推广与优化建议

冻土区渠道衬砌防渗抗冻综合技术体系在实际工程应用中展现出良好的适用性与推广价值，但受不同区域自然条件与工程条件差异的影响，技术应用效果在各地存在一定区别。工程实践经验表明，在技术推广过程中，需充分结合推广区域的冻土类型、土体冻结深度、气候特征及渠道运行方式，根据实际情况选定适宜的防渗抗冻技术组合方案，科学确定结构形式与材料参数指标，避免盲目照搬单一工程的技术模式，在渠道运行管理阶段，需强化对衬砌结构变形、裂缝发育及渗漏情况的长期跟踪监测，建立动态化的维护与评估机制，及时开展养护维修作业，防止局部病害进一步扩展蔓延^[5]。

五、结语

冻胀破坏是影响冻土区渠道衬砌结构安全性能与耐久品质的主导因素，该现象的发生与土体水分迁移运动、土体冻结体积膨胀及冻融循环持续作用存在密切关联，通过分析冻土区自然环境条件与渠道运行的基本特点，系统阐述衬砌结构冻胀破坏的内在机理，并从防渗、抗冻、保温及排水等多个维度提出对应的技术防治手段，工程实践案例表明，构建系统化的防渗抗冻综合技术体系，能够有效减轻冻胀破坏带来的危害，提升渠道结构的稳定性与运行安全性，相关研究成果可为冻土区渠道工程的设计优化、病害防治及长期运行管理工作提供技术参考。

参考文献

- [1] 韩国库. 季节性冻土区新型渠道保温防渗防冻胀研究 [D]. 甘肃农业大学, 2018.
- [2] 郭富强. 北方季节性冻土区渠道保温防冻胀机理与应用研究 [D]. 内蒙古农业大学, 2019.
- [3] 郭明. 浅埋地下水模袋混凝土衬砌渠道冻胀破坏仿真及优化设计研究 [D]. 西北农林科技大学, 2022.DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2022.001060.
- [4] 李理想. 寒区衬砌渠道水力-抗冻胀双优断面设计方法研究 [D]. 西北农林科技大学, 2022.DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2022.000447.
- [5] 王正一. 季节冻土区双膜复合衬砌渠道防滑抗冻胀性能研究 [D]. 石河子大学, 2023.DOI:10.27332/d.cnki.gshzu.2023.001257.