

高寒地区渠道冻胀破坏机理及防治措施分析

蒲 鹏

新疆兵团水科院(有限公司) 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要: 高寒地区输水渠道受特殊环境条件影响, 冻胀损毁问题突出, 直接制约工程服役安全与使用效益。本文分析高寒地区渠道冻胀破坏机理, 阐述土质、水分、温度及力学机制对冻胀病害的作用。梳理气候、地质、渠道结构施工及运行管理四类核心影响因素。从结构优化设计、材料改进应用、排水系统布设、常态化运行管理四个方面, 提出针对性的高寒地区渠道冻胀破坏综合防治措施, 为渠道防冻胀工程实践提供参考。

关键词: 高寒地区; 渠道冻胀; 破坏机理; 防治措施

引言

高寒地区低温环境易引发渠道土体冻胀, 造成结构破损、稳定性下降等问题, 制约灌区渠道工程安全运行与长效使用。本文系统分析高寒地区渠道冻胀破坏机理, 梳理土质、水分、温度、力学及气候、地质、施工、运行等各类影响因素, 针对性从结构优化、材料改进、排水管控、运行管理方面提出防冻胀防治措施, 为高寒地区渠道工程冻胀病害治理与工程运维提供参考。

1 高寒地区渠道冻胀破坏机理

1.1 土质对冻胀的影响

土质是高寒地区渠道冻胀的核心影响因素, 土体颗粒组成、矿物成分与结构特征的差异, 会直接改变土体冻胀特性, 主导渠道冻胀病害的发生与发展。土体颗粒粗细直接决定冻胀强度, 细粒土冻胀性显著更强, 粗粒土冻胀性相对较弱。细粒土粒径小、比表面积大, 水分吸附和聚集能力突出, 土体冻结过程中会出现水分富集现象, 产生较大冻胀力, 引发渠道土体冻胀变形。黏土矿物的种类和理化性质也会影响土体冻胀效果, 部分黏土矿物具备吸水膨胀属性, 土体吸水后产生膨胀形变, 冻结作用会进一步加剧土体变形幅度, 加重渠道结构的冻胀破坏。土质各项基础特性相互叠加、共同作用, 是高寒地区渠道冻胀病害产生的主要内在诱因, 直接把控渠道土体冻胀变形程度, 决定渠道冻胀结构破坏的整体状况与发展规律。

1.2 水分条件与冻胀关系

水分是渠道产生冻胀的必要条件, 高寒地区渠道基土水分主要来源于地下水、地表水和大气降水。当渠道基土含水量达到临界数值时, 低温环境会使土体水分发生液固相变, 水分固化后体积膨胀 9%, 进而引发土体冻

胀^[1]。基土水分补给状态直接决定冻胀的发育程度, 持续性水分补给可持续为土体冻结提供水分, 加重渠道冻胀病害。水分迁移运动是影响渠道冻胀的核心因素, 土体冻结过程中, 未冻结区域水分会定向向冻结锋面迁移汇聚, 在冻结锋面形成高含水量聚集层。该土层含水量显著升高, 水分相变冻结后体积膨胀幅度大幅提升, 使土体局部冻胀量增加, 加剧渠道整体冻胀变形。在高寒地区渠道运行过程中, 水分补给与水分迁移共同作用, 进一步扩大冻胀破坏范围与破坏程度, 是造成高寒地区渠道冻胀损伤、影响渠道结构稳定性的主要诱因之一。

1.3 温度作用下的冻胀过程

温度是引发渠道冻胀的直接因素。高寒地区冬季低温条件下, 渠道基土会产生冻结现象, 环境温度低于 0℃时, 土体内部水分凝结, 形成冰晶体。低温持续作用会使冰晶体持续生长、扩张, 对周边土体产生挤压作用, 进而形成冻胀力。冻胀力大小由温度变化速率和土体冻结深度决定, 温度变化速率越快, 土体冻结深度越大, 冻胀力越大, 渠道土体冻胀效果越显著。春季气温回升后, 冻结土体开始消融, 土体内部冰晶体逐渐融化, 冻胀力随之衰减、消失。土体完成冻融循环后, 渠道基土原有内部结构遭到破坏, 土体整体强度降低, 结构稳定性下降。渠道基土稳定性失效后, 会产生不均匀沉陷、形态变形等病害, 直接破坏渠道结构完整性, 降低渠道运行稳定性, 对渠道工程正常使用和结构安全造成持续性的不利影响。

1.4 冻胀破坏的力学机制

渠道冻胀破坏的力学机制由冻胀力对渠道衬砌的作用与土体内部应力应变变化共同构成。冻胀力属于体积力, 可直接作用于渠道衬砌结构, 引发衬砌结构变形与损伤。当冻胀力超出衬砌自身抗拉强度时, 衬砌结构会

出现断裂破损。衬砌各部位承受的冻胀力存在差异,会产生不均匀变形,进而造成衬砌错台、隆起及开裂问题。土体在冻胀作用下,内部应力应变平衡状态被打破,会产生持续性塑性变形^[2]。冻胀作用消退后,土体塑性变形无法自主恢复,形成永久残余变形。残余变形会改变渠道土体原有结构形态,破坏渠道基础稳定性,持续加剧渠道衬砌结构损坏,最终导致渠道整体冻胀破坏,影响渠道正常使用功能。

2 影响高寒地区渠道冻胀破坏的因素

2.1 气候因素

气候因素是高寒地区渠道冻胀破坏的重要外部条件,冬季气温、冻结历时、气温日较差等气候参数对渠道冻胀存在显著影响,冬季气温直接决定土体冻结深度,气温越低,渠道基土冻结深度越大,土体产生的冻胀量随之增大,冻结历时会作用于渠道基土冻胀变形发展过程,冻结历时越长,渠道基土冻胀变形发展越充分,渠道结构遭受的破坏程度相应加重,气温日较差会改变渠道基土的温度状态,气温日较差较大时,渠道基土持续承受反复冻融循环作用,冻融交替作用会改变土体内部结构,土体自身力学性能逐步衰减,土体结构发生损伤,冻融循环的持续作用会加快渠道基土的破坏进程,进一步削弱渠道整体受力条件,降低渠道结构稳定性,在高寒地区渠道运行过程中,各类气候参数相互作用,共同推动渠道基土冻胀发展,诱发渠道出现冻胀破坏问题。

2.2 地质因素

地质条件对渠道冻胀破坏也有重要影响,渠道沿线的地质构造、土层分布和地下水位等地质因素决定渠道基土的性质和水分状况,渠道经过地质构造复杂地段,土体空间分布存在差异,土体不均匀程度提升,增大渠道冻胀破坏发生概率^[3]。土层分布改变基土物质组成,不同土层颗粒组成、密实状态存在区别,土层组合调整土体储水与导水能力,改变基土冻胀基础条件,地下水位控制渠道基土含水量水平,地下水位抬升增加基土可冻结水分,基土含水量上升,土体冻胀能力随之增强,地下水位变化造成渠道不同区段基土含水量差异,形成不均匀冻胀,土层分布、地质构造与地下水位产生耦合作用,改变渠道断面各处土体冻胀响应特征,加剧渠道结构受力失衡,提高渠道整体冻胀破坏风险,各类地质要素共同作用,为高寒地区渠道冻胀破坏提供内在基础。

2.3 渠道结构与施工因素

渠道的结构形式和施工质量对冻胀破坏也有一定影

响,不同渠道结构形式对冻胀力的抵抗能力存在差异,U形渠道可适配土体冻胀变形,缓解衬砌部位的应力集中现象,具备相对更优的抗冻胀性能,结构形式会改变衬砌与基土之间的接触受力状态,直接调整渠道结构承受冻胀作用的响应结果。施工质量同样为渠道抗冻胀能力的重要影响因素,渠道衬砌混凝土强度达不到设计要求,衬砌厚度出现偏差,伸缩缝布设参数不符合工程要求,均会弱化渠道整体抗冻胀性能,施工环节形成的各类缺陷会改变衬砌受力传递路径,放大冻胀作用带来的结构效应,促使衬砌内部产生附加应力,提升渠道发生冻胀破坏的概率,渠道结构选型与施工控制效果相互关联,共同决定衬砌体系抵御冻胀作用的实际水平。

2.4 运行管理因素

渠道的运行管理状况对冻胀破坏也有不可忽视的影响,冬季渠道运行阶段的水位管控水平直接作用于基土水分条件,水位控制不当会让渠道基土长期维持饱和状态,土体内部水分含量上升,渠道冻胀量随之增大,进一步加大冻胀破坏发生的可能性。渠道清淤、维修及保养工作落实不及时,会造成渠道内部杂物持续堆积,衬砌部位出现损伤,杂物堆积会挤占渠道过水断面,干扰渠道排水功能发挥,衬砌破损会破坏衬砌结构完整性,改变衬砌与基土之间的受力传递关系,削弱渠道整体抗冻胀能力,运行管理环节产生的各类问题会互相叠加,改变渠道原有工作条件,加剧冻胀作用对衬砌结构的损伤,提升高寒地区渠道出现冻胀破坏的风险。

3 高寒地区渠道冻胀破坏防治措施

3.1 渠道结构优化设计

一是选择合理的渠道断面形式,结合高寒地区气候与地质条件选用抗冻胀性能优异的渠道断面形式,U形渠道具备良好水力条件与较强抗冻胀能力,可在高寒地区推广使用,弧形底梯形渠道同样具备工程适用性,该断面形式能够降低渠道边坡承受的冻胀力,提升渠道整体结构稳定性^[4]。二是设置合理的衬砌结构,选用塑料薄膜、复合土工膜等柔性衬砌材料,柔性衬砌材料可适配土体冻胀变形,减少衬砌裂缝及结构破坏现象,同步完成伸缩缝的合理布设,伸缩缝间距依据渠道冻胀量与衬砌材料性能确定,伸缩缝间距不宜取值过大,保障衬砌受冻胀作用时可以实现自由伸缩。三是加强渠道基础处理,对渠道基础实施换填处置,替换冻胀性较强的原有土层,回填砂砾石、碎石等冻胀性弱的物料,以此降低渠道冻胀量,还可在渠道基础内部布设聚苯乙烯泡沫板等隔热层,阻隔外部热量向渠道基土传导,放缓土体冻结速率,减小土体产生的冻胀力,通过断面选型、衬砌

设置、基础处理三方面协同实施,完成渠道结构优化。

3.2 材料改进与应用

(1) 研发新型防冻胀材料,推进高性能混凝土、纤维增强混凝土等新型防冻胀材料的研发工作,该类材料具备较高的强度与韧性,可以提升对冻胀力的抵抗效果,在混凝土内部掺入相应剂量的引气剂,能够改善混凝土的和易性,提升混凝土抗冻性能,强化衬砌材料自身抵御冻胀作用的能力。(2) 合理选用保温材料,将泡沫板、岩棉板等保温材料铺设于渠道衬砌表层,减少渠道热量散失,提升渠道基土温度,实现冻胀量的降低,保温材料铺设厚度需要结合区域气候条件以及渠道防冻相关要求确定,厚度参数匹配实际工况才能发挥保温防冻的实际效果。(3) 应用土工合成材料,土工合成材料可实现反滤、排水、隔离功能,服务于渠道防冻胀工作,在渠道基础位置铺设土工布,阻挡土颗粒发生流失,维持渠道基础结构稳定,土工布同时发挥排水作用,降低渠道基土内部含水量,土体含水量下降能够直接缩减冻胀量,三类材料技术手段相互配合,从材料性能、保温隔热、土体水分调控多个维度减轻冻胀对渠道工程产生的不利影响。

3.3 排水措施

第一,完善渠道排水系统,沿渠道线路布设标准化排水设施,结合场地地形、地质及气象条件,明确排水沟深度与间距参数,保证排水通道畅通,快速疏导渠道周边积水,有效降低区域地下水位,减少渠道基土储水量,从根源弱化土体冻胀的基础条件。第二,设置盲沟排水结构,在渠道基础内部布设纵向盲沟,填充碎石、砾石等透水性能良好的物料,通过透水结构排出基土内部积水,缩减渠道整体冻胀量,结合渠道走向与现场冻胀分布情况确定盲沟布设形式,保障排水体系适配渠道防冻胀的核心施工及运行需求^[5]。第三,落实渠道防渗与排水协同施工,渠道衬砌采用高防渗性能材料,同步配套布设排水孔与排水管,统筹兼顾防渗与排水两项功能,及时排出渗入基土的水体,避免水分在基土内部聚集留存,通过防渗阻水与主动排水相结合的方式,全面管控基土含水量,抑制土体冻胀破坏问题,切实提升高寒地区渠道工程运行的整体稳定性与结构耐久性。

3.4 运行管理措施

(1) 严控渠道运行水位,冬季渠道运行阶段,需科学调控渠道水位参数,杜绝渠道基土长期处于饱和含水状态,通过实施间歇性供水的运行模式,有效降低渠道基土整体含水量,从源头缩减基土冻胀形变数值,规避持续积水引发的冻胀破坏问题,稳定渠道基础结构状态。(2) 强化渠道巡查与常态化维护,建立固定的渠道巡查机制,定期开展渠道全方位排查工作,精准排查渠道衬砌裂缝、错台等各类病害问题,对发现的破损衬砌结构及时开展修复处置,保障渠道衬砌结构完整、密封良好。同步清理渠道内部堆积杂物与淤积土体,疏通输水排水通道,保障渠道输水、排水功能正常运转,避免淤积杂物加重渠道运行负荷与病害风险。(3) 落实渠道冬季专项防护工作,在冬季低温天气来临前,提前完成渠道防护筹备工作,通过布设保温防护、挡风防护等相关设施,减少渠道本体热量流失,缓解低温环境对渠道结构的影响,有效降低渠道冻胀破坏发生率,全面提升渠道冬季运行的稳定性与安全性。

结语

高寒地区渠道冻胀破坏由土质、水分、温度等内在条件和气候、地质、施工运行等外部因素共同引发,冻融循环作用会破坏渠道土体结构和衬砌体系,影响渠道正常服役。通过优化渠道结构、改良工程材料、完善排水体系、规范运行管理等举措,可有效防控渠道冻胀病害。多措并举的防冻胀治理方式,能够切实提升高寒地区渠道结构稳定性与服役寿命,保障区域水利工程长效安全运行。

参考文献

- [1] 聂成元,熊伟,郑宝平,等.大型灌区渠道冻胀特性分析及防治措施研究[J].甘肃水利水电技术,2025,61(1):43-48.
- [2] 廖文刚.高寒地区水利渠道冻胀破坏机理及防冻胀改良措施研究[J].工程与技术研究,2025,8(17):124-126.
- [3] 赵晨曦,于洋,王亚男,等.寒区渠道衬砌施工与防冻技术研究[J].土木工程,2025,14(8):1907-1912.
- [4] 王志军.扬水渠道工程设施混凝土冻胀分析及防冻技术研究[J].水上安全,2024,(24):193-195.
- [5] 朱彦凯.渠道砌体冻害分析与冻胀防治技术研究[J].河南水利与南水北调,2023,52(2):85-87.