

淤地坝溢洪道冻胀破坏的防治措施

秦凯林 梁家伟

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

摘要:淤地坝作为黄土高原水土保持的关键设施,其溢洪道在冬季易因冻胀破坏导致结构失稳。防治措施需从材料、结构及管理三方面综合施策:优先采用低水灰比引气抗冻混凝土,掺入引气剂提升抗冻性;对基底冻胀性土层进行砂砾石置换,置换深度需达冻深以下;冬季停灌后彻底排空积水,设置盲井或暗管降低地下水位;对已损结构采用聚乙烯塑料胶泥灌缝修复,坡面铺设土工膜隔水层,结合聚苯乙烯保温板减少冻深。

关键词:淤地坝;溢洪道;冻胀破坏;防治措施

引言:在黄土高原水土保持体系中,淤地坝溢洪道是调节库容、保障坝体安全的核心结构。但受区域冬季极端低温影响,溢洪道基础土体冻胀作用显著,常引发混凝土开裂、错台及整体失稳等破坏,严重威胁工程运行安全。现有防治措施多依赖单一技术手段,难以系统性应对冻胀-温变耦合作用。本文聚焦寒冷地区淤地坝溢洪道,从材料抗冻、结构防胀、排水控温及智能监测维度提出综合防治策略,为提升工程耐久性提供技术参考。

1 淤地坝溢洪道冻胀破坏机理分析

1.1 冻胀破坏的成因

(1) 环境因素:低温持续时间越长,溢洪道混凝土及基土内部水分冻结越充分,冻胀作用累积效应越显著;冻融循环频率高时,材料因反复冻融产生疲劳损伤,抗冻性能逐步衰减;降水渗透会增加基土及混凝土内部含水率,为冻胀提供充足水源,尤其在冬季融雪或雨雪交替天气,水分持续渗入易加剧冻胀破坏。(2) 材料因素:混凝土抗冻性直接决定其抵御冻胀的能力,若混凝土密实度不足、孔隙率过高或未添加抗冻剂,冻结时内部水分膨胀易导致结构开裂;基土类型影响冻胀敏感性,黄土具有大孔隙、强湿陷性,冻结时水分迁移现象明显,冻胀量较大,而砂砾石透水性好、颗粒间隙大,冻胀作用相对较弱,但细颗粒含量过高时仍会发生冻胀。(3) 结构因素:溢洪道断面形式不合理,如陡坡段过陡、弯道半径过小,易导致水流冲刷不均,局部积水引发冻胀;排水系统设计缺陷,如排水孔布置稀疏、堵塞或排水坡度不足,无法及时排出渗透水,使水分在结构内部积聚,加速冻胀破坏^[1]。

1.2 冻胀破坏的力学机制

(1) 水分迁移与冰胀力作用:在温度梯度影响下,基土及混凝土内部水分向冻结区迁移,逐渐凝结成冰,体积膨胀产生冰胀力;当冰胀力超过材料极限抗拉强度

时,会引发混凝土开裂、基土隆起,破坏结构完整性。

(2) 混凝土与基土的界面应力分布:混凝土与基土的线膨胀系数、冻胀量存在差异,冻结时两者变形不协调,界面处产生附加应力;若界面结合不紧密或存在空隙,应力集中现象加剧,易导致界面剥离,削弱结构整体承载能力。(3) 冻胀变形导致的结构开裂模型:冻胀变形使溢洪道结构产生不均匀位移,在薄弱部位(如伸缩缝、施工缝)形成拉应力;随着冻融循环次数增加,裂缝不断扩展,从表面向内部延伸,最终导致结构功能失效。

1.3 典型破坏模式

(1) 表面剥蚀与裂缝扩展:混凝土表面因冻融循环出现酥松、剥落现象,表层骨料暴露;同时,冻胀产生的拉应力使裂缝沿水流方向或横向发展,裂缝宽度随冻融次数增加而扩大,影响结构防渗性能。(2) 基础不均匀沉降与整体失稳:基土冻胀隆起后,春季融化时易发生融沉,导致溢洪道基础不均匀沉降;若沉降量差异较大,结构产生倾斜、错位,严重时引发整体失稳,无法正常宣泄洪水。(3) 附属设施的冻胀损伤:闸门与闸槽间隙处水分冻结,产生冰胀力导致闸门卡阻,无法正常启闭;启闭机基础因冻胀变形发生位移,影响机械传动精度,甚至造成设备损坏,威胁溢洪道运行安全。

2 淤地坝溢洪道冻胀破坏防治技术体系

2.1 抗冻设计优化措施

2.1.1 结构形式改进

(1) 采用宽浅式断面减少冻深影响:相较于深窄式断面,宽浅式断面可降低水流流速,减少局部积水现象,同时增大断面散热面积,降低冬季结构内部温度梯度,减缓水分冻结速率;此外,宽浅式断面能减少结构竖向尺寸,缩短冻深对基础的影响范围,降低基土冻胀导致的结构变形风险,尤其适用于北方寒冷地区冻胀敏感区域。(2) 设置柔性伸缩缝与分缝止水结构:根据溢

洪道长度与冻胀变形量,合理划分伸缩缝间距(一般控制在10-15m),采用橡胶止水带或遇水膨胀止水条构建柔性止水体系;柔性伸缩缝可适应冻胀产生的不均匀变形,避免刚性连接导致的结构开裂,同时止水结构能阻断水分渗入缝内,防止冻融循环对缝体的侵蚀,提升结构防渗与抗冻性能^[2]。

2.1.2 材料性能提升

(1) 抗冻混凝土配比优化:在混凝土配合比中掺入3%-5%的引气剂,形成均匀分布的微气泡(直径0.05-0.2mm),可缓冲水分冻结时的体积膨胀压力,降低混凝土内部孔隙水压力;选用低热硅酸盐水泥,减少水化热释放,避免混凝土浇筑后因内外温差过大产生温度裂缝,同时提升混凝土密实度,将抗冻等级提高至F200以上(适用于严寒地区),增强材料抵御冻融循环的能力^[3]。(2) 基土换填与压实:对溢洪道基础范围内的冻胀性土(如黄土、粉质黏土)进行换填处理,选用砂砾石、碎石等非冻胀性土料,换填深度不小于当地最大冻深(一般为1.2-1.5倍冻深);换填后采用重型压路机分层压实,控制压实度不低于96%,减少基土孔隙率,降低水分迁移通道,从根本上减弱基土冻胀效应。

2.2 排水与隔热措施

2.2.1 排水系统设计

(1) 基底设置排水盲沟与反滤层:在溢洪道基础底部沿水流方向设置纵向排水盲沟,盲沟断面尺寸采用30cm×40cm(宽×高),内填级配碎石,顶部铺设双层反滤层(第一层为20cm厚粗砂,第二层为15cm土工布);排水盲沟间距控制在8-10m,末端接入集水井,可及时排出基底渗透水,降低地下水位,减少水分向冻结区迁移,削弱冻胀力产生的水源条件。(2) 侧墙布置排水孔与集水井:在溢洪道侧墙距基础顶面50cm处,按梅花形布置排水孔,孔径为50mm,孔距2-3m,孔内设置透水管并包裹土工布;排水孔外侧连接横向排水管,最终汇入边坡底部的集水井,通过水泵定期抽排,可有效排出侧墙渗透水,避免侧墙内部积水冻结导致的结构开裂,保障侧墙稳定性。

2.2.2 隔热保温层应用

(1) 聚苯乙烯泡沫板(EPS)或挤塑板(XPS)铺设:在溢洪道基础顶面、侧墙外侧及底板表面铺设隔热保温层,选用密度 $\geq 20\text{kg/m}^3$ 的EPS板或抗压强度 $\geq 250\text{kPa}$ 的XPS板,厚度根据当地冻深确定(一般为10-15cm);保温层接缝处采用热熔焊接,顶部铺设5cm厚水泥砂浆保护层,可阻断外界低温向结构内部传递,降低结构冻结深度,减少冻胀变形量。(2) 表面覆盖土工

膜或植被保护层:在溢洪道底板保温层顶部铺设HDPE土工膜(厚度 $\geq 1.5\text{mm}$),土工膜接缝采用双缝热熔焊接,增强防渗性能;对于边坡部位,可在保温层外侧种植耐寒草本植物(如紫花苜蓿),形成植被保护层,既能减少雨水直接冲刷,又能通过植被根系固定土体,同时利用植被覆盖的隔热作用,辅助减缓冻胀破坏^[4]。

2.3 施工质量控制要点

(1) 混凝土浇筑与养护工艺:混凝土浇筑前需清除基土表面冻结层,浇筑温度不低于5℃;低温季节(日平均气温低于0℃)施工时,采用热水拌合(水温 $\leq 80\text{℃}$)、骨料预热(温度 $\geq 5\text{℃}$)等措施,保证入模温度 $\geq 10\text{℃}$;浇筑完成后,及时覆盖塑料薄膜与阻燃棉被养护,养护时间不少于14天,避免混凝土早期受冻产生微裂缝,确保混凝土强度与抗冻性能达标。(2) 基土处理与回填压实标准:基土换填前需对原地基进行碾压处理,压实度 $\geq 94\%$;换填土料进场前需进行冻胀性试验,确保为非冻胀性土料;分层回填时,每层虚铺厚度控制在30cm,采用20t重型压路机碾压,碾压次数不少于6遍,每分层完成后及时检测压实度,合格后方可进行下一层施工,避免因基土压实不足导致后期融沉变形。

(3) 伸缩缝与止水带安装精度控制:伸缩缝施工前需清理缝内杂物,止水带安装时采用专用夹具固定,确保中心线与伸缩缝中心线偏差 $\leq 5\text{mm}$;止水带接头采用热接工艺,搭接长度 $\geq 10\text{cm}$,焊接后进行气密性试验(气压 $\geq 0.05\text{MPa}$,保压30min无泄漏);伸缩缝填缝材料选用聚氨酯密封胶,施工时确保胶体饱满、表面平整,避免因止水带安装偏差或填缝不密实导致的渗水冻胀问题,保障伸缩缝止水效果。

3 淤地坝溢洪道冻胀破坏防治措施的适用性与优化建议

3.1 不同气候区的适应性分析

(1) 严寒地区(如东北)与季节冻土区(如黄土高原)的差异:严寒地区年均低温持续时间长(超过180天)、冻深大(1.5-2.5m),需强化隔热与抗冻双重措施,优先选用XPS保温板(抗压性强、隔热效果优于EPS),抗冻混凝土等级需提升至F250以上,同时增加排水盲沟密度(间距缩短至6-8m),避免深层冻胀;季节冻土区(冻深0.8-1.5m)冻融循环频繁但低温强度较低,可采用EPS保温板结合植被保护层,抗冻混凝土等级选用F200即可,基土换填深度控制在1.2倍冻深,兼顾经济性与抗冻性。此外,黄土高原地区需重点解决基土湿陷性问题,换填时可掺入5%-8%石灰改良土,提升基土稳定性,减少融沉变形。(2) 短历时强冻胀与长历时弱

冻胀的应对策略：短历时强冻胀（如寒潮引发的快速冻结）易导致结构瞬时应力集中，需加强结构柔性缓冲能力，可将伸缩缝间距缩小至8-10m，采用高弹性橡胶止水带（伸长率 $\geq 400\%$ ），同时在混凝土表面涂刷聚氨酯抗冻涂料（厚度 $\geq 2\text{mm}$ ），减少表面剥蚀；长历时弱冻胀（如北方冬季持续低温）易引发累积性损伤，需优化排水系统，增设自动抽排装置（水位超过设计值时自动启动），并在保温层外侧铺设镀锌钢板保护层（厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ），防止保温层老化失效，延长结构使用寿命。

3.2 长期维护管理建议

（1）定期检查排水系统畅通性：每年春季融冻后（3-4月）和秋季冻前（10-11月）各开展1次排水系统检查，采用内窥镜检测排水孔堵塞情况，对堵塞的透水管及时更换；每3年清理1次集水井与排水盲沟，清除淤积的泥沙与杂物，确保排水坡度不小于3‰，避免因排水不畅导致水分滞留，加剧冻胀破坏。（2）冬季前对伸缩缝进行密封处理：每年10月下旬（冻结前1个月）对伸缩缝进行维护，清除缝内老化的填缝材料，重新灌注聚氨酯密封胶（灌注深度 \geq 缝宽的2倍），并在缝口粘贴自粘式防水卷材（宽度 $\geq 30\text{cm}$ ）；对止水带破损部位，采用专用修补胶（粘结强度 $\geq 2\text{MPa}$ ）修复，防止水分渗入缝内冻结，延长伸缩缝止水寿命。（3）建立冻胀监测预警系统：在溢洪道关键部位（如底板中部、侧墙顶部）布设温度传感器（测量范围 -30℃ - 50℃ ，精度 $\pm 0.5\text{℃}$ ）与位移计（测量范围 0 - 50mm ，精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ），数据实时传输至监控平台；设定预警阈值（如冻胀位移超过 10mm 、温度低于 -15℃ 持续7天），达到阈值时自动发送预警信息，便于管理人员及时采取应急措施（如浇筑热水融冻、覆盖保温被），避免冻胀损伤扩大^[5]。

3.3 技术创新方向

（1）新型抗冻材料研发：研发石墨烯改性抗冻混凝土，将石墨烯粉末（掺量 0.03% - 0.05% ）掺入混凝土中，利用石墨烯的高导热性与高强度特性，提升混凝土抗冻性（抗冻等级可达F300以上）与抗压强度（提高 15% -

20% ），同时降低混凝土孔隙率（减少 8% - 12% ），减少水分迁移通道；此外，开发环保型生物基抗冻剂（如植物提取物改性剂），替代传统氯盐类抗冻剂，避免对土壤与地下水造成污染，适应生态保护需求。（2）智能温控与主动防冻技术：在混凝土内部植入碳纤维电加热丝（电阻率 $\leq 15\Omega \cdot \text{m}$ ），冬季低温时通过智能温控系统（设定温度 $\geq 5\text{℃}$ ）自动通电加热，防止混凝土内部冻结；或在保温层中掺入相变材料（如癸酸-月桂酸复合相变材料，相变温度 0℃ - 5℃ ），利用相变过程中释放的热量维持结构温度稳定，减少能耗；同时结合物联网技术，实现加热系统与监测系统联动，根据结构温度与位移数据动态调整加热功率，提升主动防冻的精准性与经济性。

结束语

淤地坝溢洪道冻胀破坏防治是一项需长期关注且系统施策的工程课题。本文提出的综合防治措施，涵盖抗冻材料应用、结构柔性设计、排水体系优化及智能监测预警等关键环节，经实践验证可有效降低冻胀破坏风险，延长工程使用寿命。未来需进一步结合区域气候特征与地质条件，深化冻胀机理研究，推动新材料、新技术在防治工程中的集成应用，同时强化全生命周期维护管理，以保障淤地坝在复杂环境下的长期安全稳定运行。

参考文献

- [1]顾富星.结合模型实验对溢洪道泄流的验证分析[J].陕西水利,2023,(11):18-19.
- [2]刘华亮.某淤地坝除险加固中新建溢洪道设计方案探究[J].陕西水利,2021,(12):176-178.
- [3]王建.某淤地坝工程中新建溢洪道工程地质评价分析[J].陕西水利,2021,(11):142-144.
- [4]杨冬梅.淤地坝建设管理中存在的问题与应对措施[J].工程地质学,2020,(09):81-83.
- [5]惠起萍.淤地坝溢洪道冻胀破坏的防治措施[J].城镇建设,2024,(01):27-28.