

北方寒冷地区季节性冻融对河道岸坡稳定性的影响及冻害防治技术研究

张学良

甘肃省安装建设集团有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6671

[摘要] 北方寒冷地区冬季漫长且气温低,河道岸坡土体每年都会经历“冻结-融化”的季节性冻融循环过程。这一过程会改变岸坡土体的物理力学性质,破坏土体结构,进而引发岸坡坍塌、滑坡等失稳问题,威胁河道防洪安全与周边生态环境。本文通过分析季节性冻融作用下河道岸坡土体的变化机理,明确冻融对岸坡稳定性的主要影响因素与失稳表现形式,并结合北方地区工程实际,提出工程防治、材料改良、生态防护三类浅显易懂的冻害防治技术,为北方寒冷地区河道岸坡的冻害防控与稳定性维护提供理论参考。

[关键词] 季节性冻融; 河道岸坡稳定性; 冻害机理; 防治技术; 北方寒冷地区

中图分类号: TV143+.3 **文献标识码:** A

Research on the Impact of Seasonal Freeze-thaw Cycles on Riverbank Stability and Frost Damage Prevention Technologies in Cold Northern Regions

Xueliang Zhang

Gansu Installation and Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] Long, cold winters in northern regions cause riverbanks to experience annual freeze-thaw cycles. This process alters the physical and mechanical properties of the soil, disrupts its structure, and can lead to instability issues such as collapses and landslides, threatening river flood control and the surrounding ecological environment. This paper analyzes the mechanisms of riverbank soil changes under seasonal freeze-thaw cycles, clarifies the main influencing factors and instability manifestations of freeze-thaw on riverbank stability, and proposes three easily understood freeze damage prevention technologies—engineering prevention, material improvement, and ecological protection—based on engineering practices in northern regions. These technologies provide theoretical reference for freeze damage prevention and stability maintenance of riverbanks in cold northern regions.

[Key words] seasonal freeze-thaw cycle; riverbank stability; freezing damage mechanism; prevention and control techniques; cold regions in northern China

前言

北方寒冷地区(如西北甘肃部分区域)属于季节性冻土区,每年10月至次年4月,气温持续低于0°C,河道岸坡土体中的水分会逐渐冻结;春季气温回升后,冻结的土体又会逐步融化,形成周期性的冻融循环。

近年来,随着北方地区河道治理工程的推进,季节性冻融引发的岸坡失稳问题逐渐凸显。每年春季融雪期,河道岸坡频繁出现局部坍塌,导致河道淤积、行洪断面缩小,渠道岸坡因冻融循环,每年需投入大量资金修复滑坡路段。这些问题不仅增加了工程维护成本,还可能引发次生灾害。

目前,关于冻融对土体稳定性的研究多集中在公路、铁路路基领域,针对河道岸坡的专项研究相对较少,且部分研究涉及复杂的力学公式与数值模拟,不利于基层工程人员理解与应用。

1 季节性冻融对河道岸坡稳定性的影响

季节性冻融对河道岸坡稳定性的影响,本质是“冻结-融化”过程改变了岸坡土体的结构与性质,削弱了土体的抗剪强度(土体抵抗剪切破坏的能力,是决定岸坡稳定的核心指标),最终导致岸坡失稳。这一影响过程可从冻融作用机理、主要影响因素、失稳表现形式三方面展开分析。

1.1 季节性冻融作用机理

河道岸坡土体中含有一定量的水分(包括自由水、结合水),冻融循环主要通过“水分迁移-冻胀破坏-融沉松散”三个阶段影响土体结构:

水分迁移阶段: 冬季气温降至 0°C 以下时,岸坡表层土体首先冻结,土体中的自由水形成冰晶体。随着温度持续降低,冻结过程由上向下逐步发生,使得土壤的冻结厚度逐步加深,深层的液态水也逐渐的向表层集结,使得该时期土壤表层的含水量升高——这就像“水往结冰的地方聚集”,导致表层土体含水量大幅增加,冰晶体进一步增多。

冻胀破坏阶段: 表层土体中冰晶体不断积累,体积膨胀率可达9%,会对土体颗粒产生“撑开”的力(即冻胀力)。若冻胀力超过土体自身的粘结力,土体颗粒间的孔隙会变大,原有紧密结构被破坏,出现裂缝;同时,冻胀力还会使岸坡表层土体向上隆起,改变岸坡原有的坡度与形态,为后续失稳埋下隐患。

融沉松散阶段: 春季气温回升至 0°C 以上时,表层冻结的土体开始融化,冰晶体转化为液态水。这些水分一部分随重力向下渗透,一部分残留在土体孔隙中——但此时土体结构已因冻胀出现裂缝,颗粒间的粘结力大幅下降,土体变得松散、易流失。

1.2 影响岸坡稳定性的关键因素

在季节性冻融背景下,岸坡是否失稳,还与以下4个关键因素相关,这些因素会加剧或减缓冻融对土体的破坏:

土体含水率: 含水率是影响冻融破坏程度的核心因素。若岸坡土体含水率过高(如靠近水位线的土体),冻结时会形成更多冰晶体,冻胀力更大;融化后水分难以快速排出,土体更松散,失稳风险显著升高。反之,含水率低的表层土体(如高于常水位1m以上),冻融破坏程度较轻。

土体类型: 不同类型的土体抗冻融能力差异较大。环境温度为正温时,试件上部开始融化,含水率越高则未冻水含量越高。未冻水含量的增加一方面减小了土颗粒间的吸力,导致黏聚力的下降,另一方面增强了土颗粒间的润滑作用,减弱了土体的摩擦力以及咬合力,因此含水率越高则抗剪强度越小。环境温度为负温时,初始含水率会对土体抗剪强度产生较大影响。当孔隙率一定时,含水率越大,则土体抗剪强度越大。究其原因,是含水率越高冻结后含冰量越大。这一方面会增强冰胶结作用,另一方面,水变成冰后体积膨胀,会挤压冰晶周围的土体,使得土体变得更加密实。土体抗剪强度的变化与水的多少,水存在的状态有极大的关系。自由水含量多时,抗剪强度随着初始含水率的增加而减小。但是当水变成冰时,初始含水率越大则土体抗剪强度越大。此外,含水率对于抗剪强度的影响,主要与黏聚力的变化相关,内摩擦角虽然也有变化,但是幅度较小。

冻融循环次数: 每年冻融循环的次数越多,土体结构破坏越严重。北方寒冷地区每年会经历1-2次完整的冻融循环(冬季冻结、春季融化),但部分区域在冬末春初会出现“白天融化、夜间冻结”的短期循环,这种频繁交替会加速土体裂缝扩展,使抗剪强度逐年下降——通常经过3-5个冻融循环后,岸坡土体的抗剪强度会稳定在较低水平,失稳风险趋于稳定。

外界荷载与水流作用:岸坡若承受额外荷载(如沿岸堆积的建筑材料),会增加土体的剪切压力,在冻融导致抗剪强度下降的情况下,更容易引发滑坡;同时,春季融雪期或汛期,河道水流速度加快,会冲刷岸坡松散的融土,带走表层土体,形成“冲刷-坍塌”的恶性循环,进一步破坏岸坡稳定性。

1.3 岸坡失稳的主要表现形式

受冻融作用影响,北方寒冷地区河道岸坡失稳并非突然发生,而是逐渐显现,主要有以下3种表现形式:

表层坍塌: 这是最常见的失稳形式,多发生在春季融冻期。岸坡表层土体经冻融后变得松散,在重力或水流冲刷作用下,会出现局部小块脱落,形成高度0.5-2m的陡坎。若不及时处理,陡坎会逐渐向岸坡内部扩展,导致更大范围的坍塌。

浅层滑坡: 当岸坡土体含水率较高(如黏土层),且冻融循环破坏深度达到0.5-1.5m时,松散的土体可能沿冻融界面(冻结层与未冻结层的分界面)发生滑动,形成浅层滑坡。滑坡体厚度通常为0.3-1m,滑动距离较短(1-3m),但会导致岸坡坡度变陡,后续可能引发深层滑坡。

岸坡侵蚀: 冻融作用使土体颗粒间粘结力下降,河道水流容易将松散颗粒带走,导致岸坡整体向河道内侧退缩(即“岸线侵蚀”)。这种失稳形式发展缓慢,长期累积会导致河床升高、行洪能力下降,还会破坏沿岸植被栖息地。

2 北方寒冷地区河道岸坡冻害防治技术

针对季节性冻融对河道岸坡稳定性的影响,冻害防治技术需遵循“预防为主、综合治理”的原则——既要减少冻融对土体的破坏,又要增强岸坡自身的抗失稳能力。结合北方地区气候特点与工程实际,可将防治技术分为工程防治、材料改良、生态防护三类,各类技术操作简单、成本可控,适合基层工程应用。

2.1 工程防治技术

工程防治技术的核心是通过物理措施,阻断“水分迁移-冻胀-融沉”的破坏链条,减少冻融对土体的直接影响,主要包括防渗透排水、岸坡整形、支护加固三种方式:

防渗透排水技术: 该技术针对“土体含水率过高”这一核心问题,通过减少岸坡土体水分,降低冻胀风险。具体做法有两种:一是在岸坡表层铺设防渗膜(如聚乙烯膜),阻断雨水、融雪水渗入土体,防渗膜需覆盖岸坡表层至常水位以下0.5m,防止水流冲刷;二是在岸坡内部设置排水盲沟(用碎石填充的沟渠),间距5-10m,深度1-1.5m(超过当地冻融深度),引导土体中的水分排出,避免水分在冻结前聚集。例如,吉林某河道治理工程采用“防渗膜+排水盲沟”组合措施后,岸坡土体含水率降低了30%-40%,冻胀率下降至5%以下,表层坍塌现象减少了80%。

岸坡整形技术: 通过调整岸坡坡度,降低重力对土体的剪切压力,同时减少冻融后的松散土体下滑风险。北方地区河道岸坡的原始坡度多为1:1.5-1:2(垂直高度:水平距离),经冻融后易失稳,可将坡度放缓至1:2.5-1:3,增大土体抗滑面积;同时,在岸坡表面每隔5-8m设置一道宽1-2m的平台(即“马道”),平台可拦截下滑的松散土体,避免滑坡范围扩大。此外,在岸坡底部(常

水位附近)设置护脚(用块石堆砌,高度0.8-1.2m),可抵抗水流冲刷,保护岸坡底部不被侵蚀。

支护加固技术:针对已出现轻微失稳(如浅层滑坡、局部坍塌)的岸坡,通过外部支护增强土体稳定性。常用的支护方式有两种:一是采用木桩支护,在岸坡失稳区域每隔1-1.5m打入一根长2-3m的木桩(深入未冻土层0.5m以上),木桩之间用木板连接,形成“栅栏”式支护,阻挡土体下滑,适合小型河道或临时加固;二是采用浆砌石挡墙,在岸坡底部或失稳区域砌筑高度1-2m的浆砌石挡墙,挡墙底部深入冻融深度以下0.3-0.5m,通过挡墙的承载力抵抗土体压力,适合中型河道或永久加固。

2.2 材料改良技术

材料改良技术是通过向岸坡土体中添加改良材料,改变土体的物理性质,增强其抗冻融能力,主要包括换填改良、添加改良剂两种方式,适合土体自身抗冻性较差(如黏土层)的岸坡:

换填改良技术:该技术是将岸坡表层易受冻融破坏的土体(如黏土层、高含水率土层)挖除,替换为抗冻融能力强的材料,从根本上解决土体抗冻性差的问题。换填材料优先选择砂土、砾石土或级配砂石(砂粒与碎石按比例混合),这些材料孔隙大、透水性好,冻结时水分不易聚集,冻胀率低。换填深度需超过当地冻融深度(北方地区通常为0.8-1.5m),换填后需分层压实(压实度达到90%以上),确保新填土体结构紧密。

添加改良剂技术:对于不便大规模换填的岸坡(如沿岸有建筑物),可向土体中添加改良剂,改善土体的水稳定性与抗冻性。常用的改良剂有两种:一是无机改良剂,如水泥、石灰,按土体质量的3%-5%添加,水泥或石灰可与土体颗粒发生化学反应,形成稳定的胶结结构,减少水分吸附,增强土体抗冻融能力;二是有机改良剂,如聚丙烯酰胺(PAM),按土体质量的0.1%-0.3%添加,PAM可在土体颗粒表面形成薄膜,减少水分迁移,降低冻胀率。添加改良剂时,需将改良剂与土体充分混合均匀,再分层压实,确保改良效果。实践表明,添加水泥改良后的土体,经过5次冻融循环后,抗剪强度仍能保持初始值的80%以上,远高于未改良土体。

2.3 生态防护技术

生态防护技术是通过种植植被或设置生态结构,在增强岸坡稳定性的同时,保护沿岸生态环境,适合对生态要求较高的河道(如城市景观河道、生态保护区河道),主要包括植被固坡、生态袋防护两种方式:

植被固坡技术:利用植物的根系固定土体,同时植被的枯枝落叶可减少雨水冲刷,降低土体含水率,间接减轻冻融破坏。北

方寒冷地区选择植被时,需满足耐寒、耐旱、根系发达的要求,常用的草本植物有紫花苜蓿、披碱草(冬季可越冬,根系深度达0.5-1m),灌木有沙棘、柽柳(根系发达,可深入地下2-3m,抗冻性强)。种植时,草本植物与灌木可混合搭配,形成“草本覆盖表层、灌木固定深层”的立体防护体系。

生态袋防护技术:生态袋是由聚丙烯纤维制成的透水袋,内部填充砂土或改良土,将生态袋堆叠在岸坡表面,形成防护层。生态袋的优点是透水性好,可排出土体中的多余水分,减少冻胀;同时,生态袋表面可种植草本植物,兼顾生态性与稳定性。堆叠时,生态袋需错缝排列,袋与袋之间用连接扣固定,底部深入冻融深度以下0.3m,防止冻融导致生态袋移位。

3 结束语

北方寒冷地区季节性冻融对河道岸坡稳定性的影响,是“气候-土体-水流”共同作用的结果,核心机理是冻融循环破坏土体结构、削弱抗剪强度,最终引发坍塌、滑坡等失稳问题。本文提出的工程防治、材料改良、生态防护三类技术,分别从“阻断破坏路径”“提升土体性能”“兼顾生态与稳定”三个角度出发,技术原理浅显、操作简便,可根据北方不同地区的气候条件、土体类型、河道功能灵活选择——例如,对防洪要求高的河道,可优先采用“防渗排水+浆砌石挡墙”组合措施;对生态要求高的河道,可选择“植被固坡+生态袋”组合措施。

需要注意的是,河道岸坡冻害防治是一项长期工作,除了选择合适的防治技术,还需加强日常监测(如定期观察岸坡是否出现裂缝、坍塌,监测土体含水率变化),及时修复轻微失稳区域,避免问题扩大。未来,随着生态理念的深入,可进一步探索“工程技术+生态技术”的融合模式,如在浆砌石挡墙上预留种植孔,实现“硬防护+软生态”的结合,为北方寒冷地区河道岸坡的长期稳定与生态保护提供更优方案。

[参考文献]

- [1]王瑞萍,王富,夏玉红.季节性冻土区衬砌渠道冻融期温度变化分析[J].水利规划与设计,2025(10):108-112+159.
- [2]周富强,吴艳,戴灿伟.北疆某供水渠道冻胀融沉变形性状分析[J].水利水电技术,2019(12):90-97.
- [3]银英姿,张栋.内蒙古临河地区渠道衬砌工程保温防冻胀试验研究[J].排灌机械工程学报,2016(10):867-871+877.

作者简介:

张学良(1993--),男,汉族,甘肃和政人,大学本科,工程师,研究方向:水利水电工程施工。