

宁夏季冻区骨干输水衬砌渠道冻害调查与原因分析

蒋佳莉, 陆立国, 朱洁, 牛家永
(宁夏回族自治区水利科学研究院, 银川 750021)

摘要:【目的】总结宁夏骨干输水衬砌渠道冻害现状, 分析造成渠道冻害问题频发的主要原因。【方法】在对宁夏引黄灌区骨干渠道深入调研的基础上, 总结冻害现状及特征规律, 量化分析了不同影响因素对冻害影响程度。【结果】梯形断面主要发生错台、整体脱空、滑塌及开裂, 弧底梯形断面主要发生坡脚、渠底开裂以及错台, 弧形坡脚梯形断面主要发生坡脚开裂以及拱起破坏; 渠道不同位置处的最大冻融深度随着地下水位埋深的增大而增大, 地下水位埋深对最大冻融深度影响的敏感程度顺序为: 渠顶>1/2 渠坡>渠底; 各月平均地面冻深呈现阴坡>渠底>阳坡, 冻结速率阴坡最大, 阳坡与渠底冻结速率大小不一; 东西走向阴坡冻深为阳坡的 1.3~2.4 倍不等, 渠底位置冻深最大, 阴坡坡脚次之; 南北走向阴坡坡脚冻深为阳坡的 1.1~2.0 倍不等, 渠底位置处冻深最小; 不同结构型式对冻胀量不均匀程度影响: 梯形>弧形坡脚梯形>弧底梯形渠道。【结论】破解宁夏引黄灌区骨干渠道冻害破坏严重的问题, 仍需从解决高地下水位影响、混凝土材料性能提升、纵缝设置不规范突出问题出发, 开展符合区域实际特点的滤透式衬砌结构优化研究, 混凝土干湿、冻融、盐渍化交互影响机理研究、混凝土强度及抗老化性能提升相关研究, 建立贴合实际的力学分析模型, 规范混凝土衬砌板合理设缝位置, 并进一步明晰填充材料选用对衬砌变形规律的影响。

关键词: 宁夏季冻区; 骨干渠道; 渠道冻害; 影响因素

中国分类号: TVS277

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023382

蒋佳莉, 陆立国, 朱洁, 等. 宁夏季冻区骨干输水衬砌渠道冻害调查与原因分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 149-155.

JIANG Jiali, LU Ligu, ZHU Jie, et al. Investigation and Cause Analysis of Freezing Damage in the Main Water Conveyance Lining Channel in Ningxia Seasonal Freezing Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 149-155.

0 引言

【研究意义】我国地域辽阔, 冻土分布广泛, 冻土面积占陆地面积的 75%, 季冻区分布面积占陆地面积的 53.5%^[1]。在广大季冻区开展工程建设, 冻土问题不可避免, 且我国季冻区分布东西跨度大, 地区气候差异较大, 工程环境复杂, 由此带来的工程建设问题差异性较大。开展宁夏季冻区引黄灌区骨干输水衬砌工程相关研究, 对减少渠道渗漏量、提高输水效率、充分利用水资源、延长工程寿命周期, 保障灌区农业生产安全意义重大^[2-3]。【研究进展】围绕季冻区渠道衬砌冻胀问题大量学者开展相关研究^[4-5], 从渠道冻胀原型监测方面开展了 U 型、梯形等不同结构型式衬砌破坏特征及规律分析研究; 从室内模型试验方面开展了考虑温度梯度、外部荷载、封闭或开放系统、冻融循环次数等不同影响因素下一维土柱冻胀变形机理探究及基于相似理论开展时间、几何、温度缩尺下渠道衬砌冻胀破坏特征规律研究^[6-10], 同时借助扫描电镜、核磁共振、CT 扫描等技术开展了膨胀土、湿陷性黄土等特殊土质

下冻胀问题微观结构及破坏机理探究^[11-13]; 从数值模拟研究方面开展了考虑太阳辐射、盐渍化、冰盖输水、水分补给等工况下渠道水分场、温度场、应力应变场变化规律探究^[14-17]; 运用材料力学及弹性力学方法构建了不同结构型式下考虑基土与衬砌结构接触方式的力学模型^[18-20], 至此, 逐步系统、全面地开展了对季冻区渠道衬砌破坏特征、机理的识别与探究, 相继提出基土换填、增设苯板保温或风光能蓄热增温、膜料防渗、金属格宾和塑料土工格栅石笼排水防渗、结构优化处理等措施以达到削减冻胀、适应冻胀、增强抵抗冻胀能力。【切入点】宁夏作为西北地区季冻区省份, 骨干渠道衬砌工程经过多年的推广应用, 衍生出梯形、弧底梯形、弧形坡脚梯形等主要衬砌结构型式, 其冻胀破坏规律各异, 缺乏对冻胀破坏原因的归纳总结, 目前尚未系统提出引发本地区渠道冻胀问题频发不同影响因素下定量结论。【拟解决的关键问题】为系统梳理宁夏引黄灌区骨干输水衬砌工程冻胀问题, 针对以上典型衬砌结构型式开展调查研究, 明晰不同类型衬砌结构型式主要冻胀破坏特征, 总结导致季冻区宁夏引黄灌区渠道衬砌冻胀问题频发的主要原因, 系统提出关键影响因素下一些定量结论, 并结合地区实际提出今后亟待解决的问题和研究方向, 为季

收稿日期: 2023-08-22 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2022AAC03722)

作者简介: 蒋佳莉(1994-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为渠道防渗冻胀。E-mail: 549875927@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

冻区同类渠道衬砌工程建设与设计提供借鉴与指导。

1 灌区概况

宁夏引黄灌区由青铜峡灌区、沙坡头灌区、固海扬水灌区、盐环定扬水灌区、红寺堡扬水灌区构成，地理位置如图 1 所示。根据 2022 年实地调研，各大灌区骨干渠道基本情况如表 1 所示。据统计，目前宁夏引黄灌区骨干渠道总长度 1 957.87 km，其中青铜峡灌区渠道总长占比最大，为 53.49%，沙坡头灌区、固海扬水灌区、盐环定扬水灌区、红寺堡扬水灌区占比依次为 18.51%、10.54%、9.02%、8.44%。

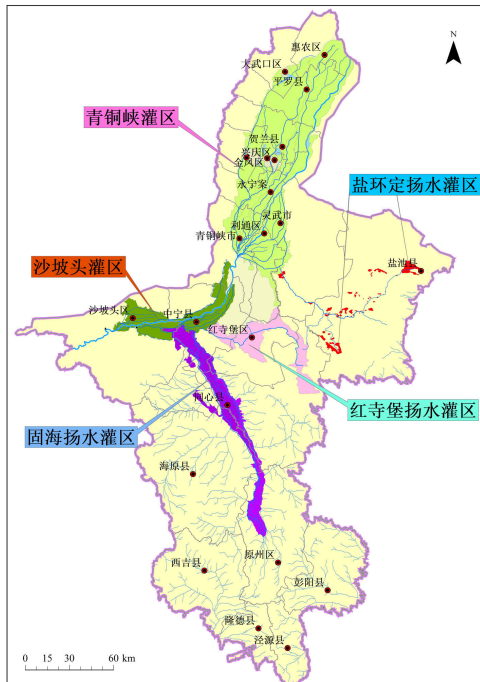


图 1 宁夏引黄灌区分布示意

Fig.1 Distribution of Yellow River diversion irrigation area in Ningxia

表 1 宁夏引黄灌区骨干渠道基本情况

Table 1 Basic status of the backbone channels in the Yellow River diversion irrigation area of Ningxia

灌区	骨干渠道长度/km	砌护长度/km	砌护率/%
青铜峡灌区	河西灌区	823.57	561.02
	河东灌区	223.6	207.42
沙坡头灌区	河北灌区	198.74	189.38
	河南灌区	163.63	122.77
固海扬水灌区	206.39	206.39	100.00
盐环定扬水灌区	176.73	176.73	100.00
红寺堡扬水灌区	165.21	165.21	100.00
合计	1 957.87	1 628.92	83.20

选取灌域范围最大、骨干渠道长度最长的青铜峡灌区开展渠道冻害实地调研，灌区内骨干渠道衬砌结构型式主要为梯形、弧形坡脚梯形渠道以及部分未砌护段落。灌区内不同灌域各类衬砌型式占比分布如图 2 所示，其中弧形坡脚梯形衬砌渠道长度最长，为 619.35 km，梯形及未砌护衬砌渠道分别为 220.97、186.86 km。弧形坡脚梯形渠道在汉延渠灌域内分布占比最大，为 77.04%，梯形断面及未砌护

段落落在渠首灌域及唐徕渠灌域内占比分布较大，分别为 70.76%、27.61%。

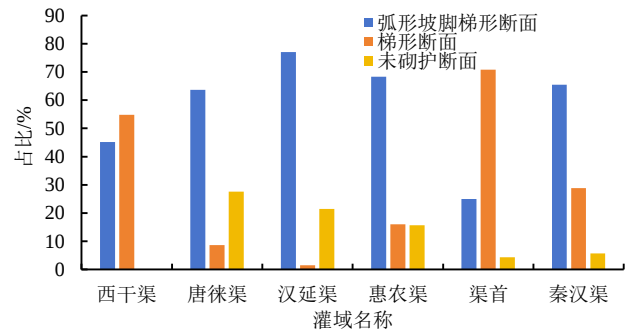


图 2 青铜峡灌域内渠道衬砌型式分布

Fig.2 Distribution of channel lining types in Qingtongxia irrigation area

2 宁夏骨干输水衬砌渠道现场调查研究

对宁夏骨干输水衬砌渠道冻胀现状进行调查分析，调查内容包括砌护地点、结构型式、建设规模、建设时间、流量大小、材料类型、渠道走向、土质、挖填方状况、冬季是否积水、破坏现状、破坏原因、运行状况等内容。调查发现渠道衬砌均出现不同程度的破坏，主要表现为：鼓胀及裂缝、隆起架空、滑塌、整体上抬等。

梯形断面主要破坏类型有：错台、整体脱空、滑塌及裂缝，实地调查破坏现状如图 3、图 4 所示。一般预制混凝土板易发生错台、整体脱空及滑塌。梯形渠道冻胀破坏表现为：①错台多发生在衬砌板相接处，产生原因多与接缝材料老化破坏有关，加之衬砌板两侧不均匀形变，水分进入间隙加剧了冻胀位移量，板与板间整体性差，当把作用力简化为铰接点时^[21]，此时为自由度数量多于约束数量的几何可变体系，最终形成错台；②整体脱空多发生在渠顶或渠坡板上部，滑塌多发生在渠坡板中下部。产生原因多与坡顶施工密实度不够有关，而滑塌多与渠底地下水位高，水分变幅区间大导致渠道中下部冻融循环频次高，渠基土体抗剪强度和整体稳定性不足；③现浇混凝土板易发生裂缝，裂缝多出现在渠底中部或渠坡板距离渠底 1/4~1/3 位置处，产生原因与梯形渠道受力特征有关，衬砌板内弯矩过大导致拉裂破坏；④预制混凝土衬砌板破坏程度高于现浇板，产生原因与预制混凝土板自结构有关、其整体性差，接缝位置易产生破坏等有关，这与已有结论一致^[22-27]。

渠底梯形断面主要破坏类型为坡脚、渠底裂缝以及错台，实地调查破坏现状如图 5 所示。坡脚裂缝主要出现在距渠底 1/3 处，较梯形断面边坡板裂缝位置偏上，产生原因主要为底部弧形段可视为两端具

有弹性支座的无铰反拱状结构，受力以轴向压力为主，由于其反拱设计，断面连续变化坡脚不至突变，坡板与底板相互强约束，导致其法向冻胀力减小，其弯矩最大处产生拉裂发生破坏。在地下水埋深较大地区，渠底裂缝数量及宽度均明显增多，裂缝位置下移，距渠底约 1/4~1/5 处，产生原因主要是地下水位埋深大，水分迁移补给变化区间大，渠基土冻胀破坏显著，另外，冻融期内反复冻融，渠基土在冻胀融沉和地下水对衬砌板剥蚀共同作用下，裂缝扩展数量及宽度有所增加，甚至在多年运行渠道渠底纵缝处出现错台等严重破坏，形成破坏—渗漏—破坏加剧的恶性循环，最终出现较大冻胀位移量。这与已有研究结论一致^[28-30]。

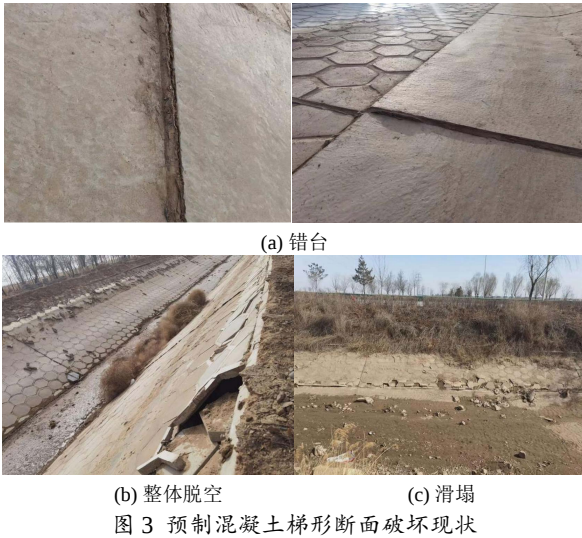


图3 预制混凝土梯形断面破坏现状



图4 现浇混凝土梯形断面破坏现状

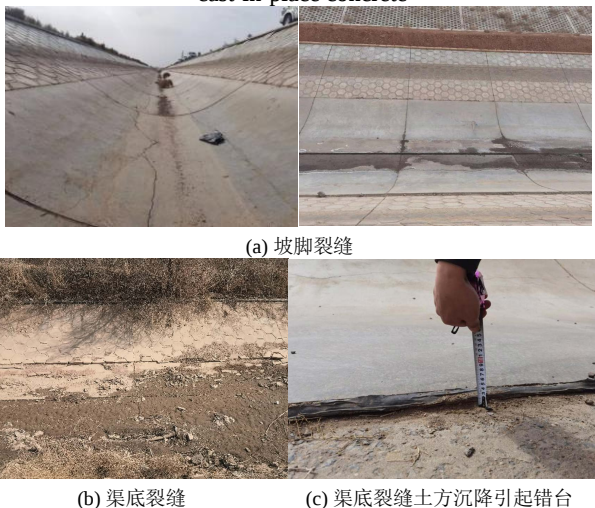


图5 弧底梯形断面破坏现状

弧形坡脚梯形断面主要破坏类型为坡脚处裂缝以及拱起破坏，实地调查破坏现状如图 6 所示。坡脚裂缝主要分布在距渠底 1/3~1/4 处，产生原因主要是渠基土受到较强的基土冻胀力及坡板与底板的约束力作用，因弯矩过大产生弯折裂缝，同时有些边坡板纵缝设置长度过长，易在跨中形成裂缝，导致坡脚裂缝与边坡板纵缝处裂缝共同发育形成贯通裂缝，破坏严重。拱起破坏主要出现在坡脚与渠底交界位置，且多发生在阴坡一侧，主要表现为鼓胀隆起现象^[18,31]。产生原因主要是阴阳两侧渠基土长期水分分布不均匀，导致长期阴坡及渠底产生累积冻胀变形及法向冻胀力偏大，虽反拱设计能达到一定自调整作用，但作用有限，渠基土阴坡坡脚位置水分集聚，长期扬压作用使得拱起破坏严重。

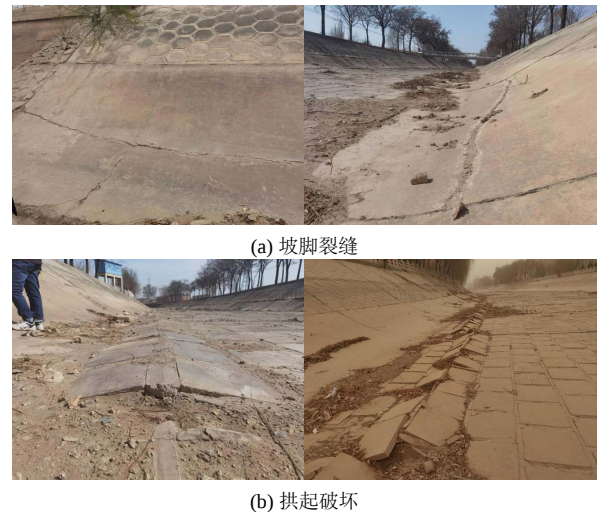


图6 弧形坡脚梯形断面破坏现状

Fig.6 Damage status of trapezoid section of curved slope foot

3 宁夏骨干输水衬砌渠道冻胀原因分析

土质及密度、环境温度及地温、初始含水率及冻结速率、渠道走向、衬砌结构型式及材料、分缝位置、接触方式等是影响渠道冻胀破坏的主要因素^[32-39]。根据宁夏水利科学研究院多年监测成果，结合本次实地调研，将影响宁夏骨干输水衬砌工程冻胀破坏主要原因总结如下：

1) 土质。根据宁夏引黄灌区骨干渠道土质调查，粉质壤土占 63.3%、粉质黏土占 10%，砂壤土占 23.3%、细砂占 3%^[37]。基土基本上为表层粉质壤土、粉质黏土和砂壤土，根据《渠系工程抗冻胀设计规范》（SL23-2006）均属强冻胀性土，为衬砌渠道产生冻胀提供了有利先决条件。

2) 水分及地下水位影响。宁夏各大灌区每年大致从 10 月 20 日陆续开始历经 1 个月冬灌，渠基土含水率在冬灌结束后明显增加，基本维持在 25%~35%，远超冻土起始冻结含水率。另外，11 月中下旬气温

在0℃以下,渠基土发生原位冻结,在地下水位较高渠段,水分迁移集聚至冻结锋面,加剧冻胀破坏。选取典型梯形渠道衬砌开展不同地下水位埋深对冻深和融深影响规律分析(图7),结果表明:渠道不同位置处的最大冻融深度随着地下水位埋深的增大而增大,地下水埋深从0.5 m增加至4.0 m,渠顶、渠坡与渠底位置最大冻深平均增长率分别7.92%、7.04%、1.75%,最大融深平均增长率分别10.71%、8.38%、1.96%,因此地下水位埋深对最大冻融深影响的敏感程度顺序为:渠顶>1/2渠坡>渠底,这主要是由于地下水埋深越大,渠基土上部受基质吸力作用含水率越小,则等效导热系数越大而等效定压热容相对越小,其最大冻融深对地下水埋深影响越敏感,但其值也受土质、含盐量等因素影响^[15]。宁夏引黄灌区地下水位的变化随农业灌溉周期出现3次峰值,其中在冻融期内,地下水位埋深在冬灌后达到全年最高,平均埋深0.5~0.7 m,按照此规律特征,对渠道不同位置处最大冻融深影响深度分别为0.7~1.1、0.5~0.7 m,此深度范围内渠基土始终有源源不断的水分补给,给渠道冻胀破坏提供了必备条件。

3) 地温。根据中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)引黄灌区近20年气象数据分析,年平均气温10.6℃,以每年11月一次年3月作为冻融期进行统计,近20年冻融期平均气温-0.78℃,11月平均气温2.75℃,12月平均气温-4.47℃,1月平均气温-6.92℃,2月平均气温-2.14℃,3月平均气温6.04℃。将引黄灌区多年实测不同深度平均地温监测结果、平均地面冻深及最大地面冻深结果绘制如图8所示。

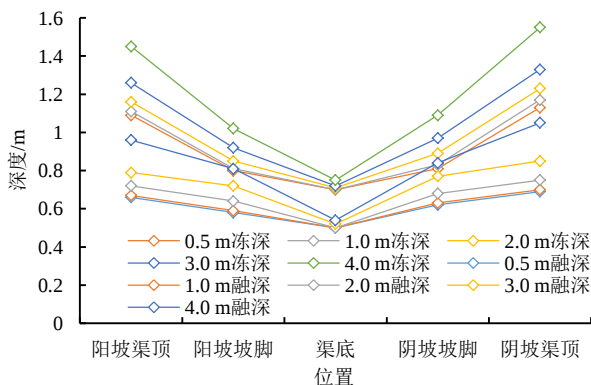


图7 梯形渠道衬砌不同地下水位埋深对最大冻深和融深影响
Fig.7 Influence of different groundwater depth on maximum freezing depth and melting depth of trapezoidal channel lining

根据多年地温、气温监测结果显示:灌区地温与气温变化不同步,且随着土壤深度的增加,地温滞后气温变化期也越长。多年平均气温在11月中下旬进入0℃以下,而多年平均地温在12月以后土壤深度40 cm范围内才低于0℃,出现冻结;多年平均气温在2月进入0℃以上,但2月中下旬以后土壤深度80

cm范围以下土体才回缓解冻,灌区冬季平均气温低,渠基土冻结时间长,是导致渠道冻胀的重要诱因。根据多年地面冻深实测结果显示:宁夏引黄灌区冻融期内各月平均地面冻深呈现阴坡>渠底>阳坡,从各月冻结速率上看,阴坡最大,阳坡与渠底冻结速率大小不一。各月最大冻深为各月平均冻深1.05~1.40倍不等,其中阴坡为1.16~1.40倍,渠底为1.07~1.31倍,阳坡为1.05~1.40倍。阴阳坡及渠道不同位置处冻深分布不均匀,尤其是12月一次年2月地温影响周期内各位置处冻结速率不一致,造成渠道冻胀破坏差异性较大。

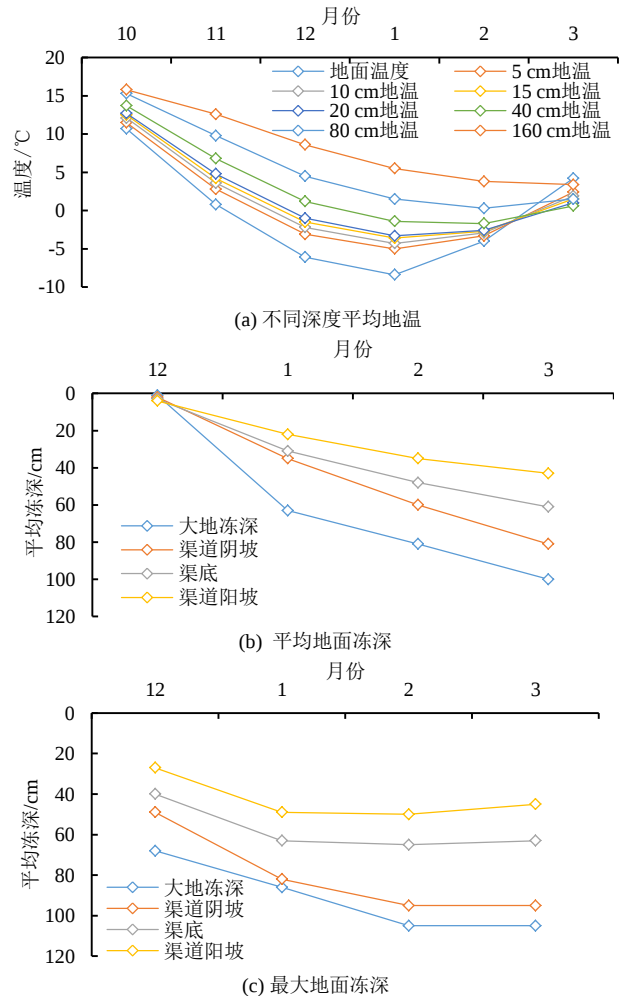


图8 宁夏引黄灌区多年实测结果

Fig.8 The measured results in Ningxia irrigation area of Yellow River diversion

4) 渠道走向。选取宁夏引黄灌区内典型东西、南北走向渠道开展了不同衬砌结构不同位置处冻深监测(图9)。东西走向渠道阴阳两侧水平对应位置处冻深差距较大,阴坡冻深为阳坡冻深的1.3~2.4倍不等,两侧冻深最大相差44 cm;除阴坡渠顶位置外,阴坡坡脚冻深最大,阴坡坡脚冻深均大于阳坡坡脚冻深,为阳坡坡脚的1.1~2.4倍不等。南北走向渠道阴阳两侧水平对应位置处冻深差距不大,两侧冻深最大相差26 cm,渠底位置处冻深最小,阴坡坡脚为阳坡坡脚的1.1~2.0倍不等。这主要是由于东西

走向渠道，阴阳两侧受太阳辐射空间效应和昼夜更替时间累积效应叠加，导致其内部温度梯度及水分冻结速率不同步，其两侧冻深差异大，而南北走向渠道，由于遮蔽程度不及东西走向，相应地其累积效应较小，导致两侧冻深差异不大。

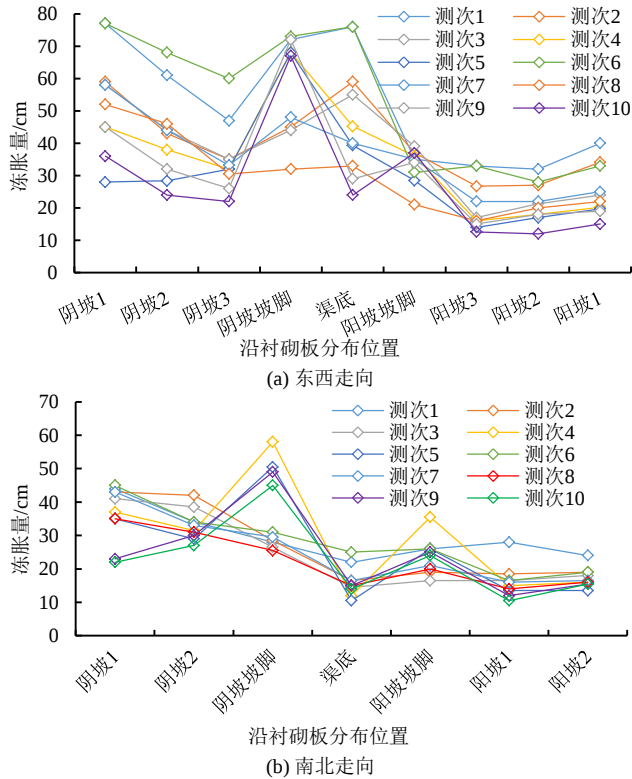


图9 不同渠道走向对冻深影响结果

Fig.9 Influence of different channel direction on freezing depth

5) 结构型式及材料。定义冻胀不均匀系数 K 值为相邻两测点的冻胀量差值与其间距的比值，选取不同结构型式下不均匀系数 K 值变化情况绘制（图10）。实测结果表明，梯形渠道冻胀量分布最不均匀，弧形坡脚梯形渠道次之，弧底梯形渠道最优。其中梯形渠道不均匀系数 K 值最大为 104.84×10^{-3} ，弧形坡脚梯形渠道及弧形底梯形渠道分别为 20.94×10^{-3} 、 6.79×10^{-3} ，按照其位置分布规律来看， K 值最大值均分布在梯形及弧底梯形渠道渠底，弧形坡脚梯形渠道坡脚位置处。同时根据调查结果显示：预制混凝土板破坏程度普遍高于现浇混凝土板，预制混凝土板易出现滑塌。采用土工布、塑膜等防渗材料衬砌时，全断面衬砌防冻胀效果优于非全断面衬砌。

6) 渠道积水。宁夏引黄灌区因冬灌结束后渠道内少量积水无法排出，加之冬灌结束较晚，此时宁夏灌区气温已降至 0°C 以下，导致渠内积水；同时在部分渠道段落渠底设置长宽均 1 m 、高 0.5 m 的格宾石笼作为排水通道，在非冬灌期可作为排水设施，但在冬灌期由于渠道水压较大，致使水分从该排水通道渗出，造成渠堤基土的含水率明显增大，冻胀量增大。冬灌停水后，渠道外侧的水通过格宾透水通

道进入渠道后，使得渠道部分段落有一定的积水，造成混凝土基础、部分现浇混凝土渠底、直开口混凝土底板等位置的混凝土表面因冻融产生表面混凝土冻胀剥蚀，此现象每年发生，剥蚀深度逐年增加，久而久之破坏加剧（图11）。

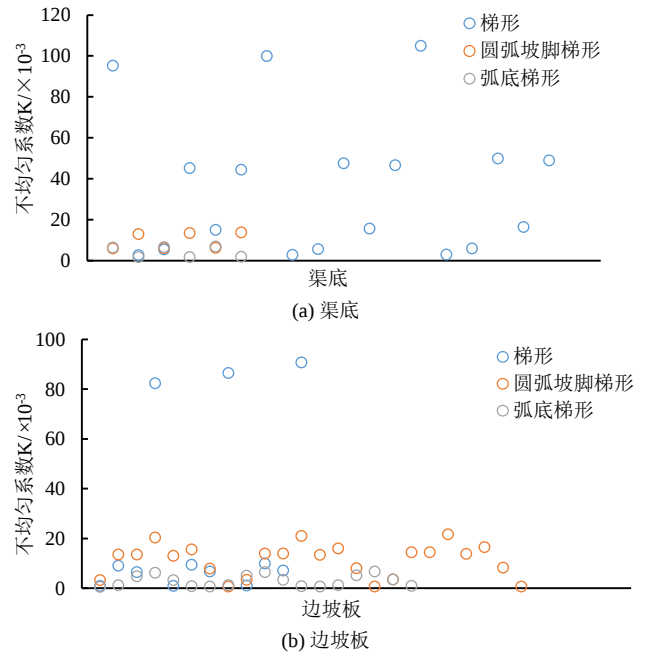


图10 不同结构衬砌型式不均匀分布系数 K 值变化情况

Fig.10 The variation of the uneven distribution coefficient K value of different structure lining types

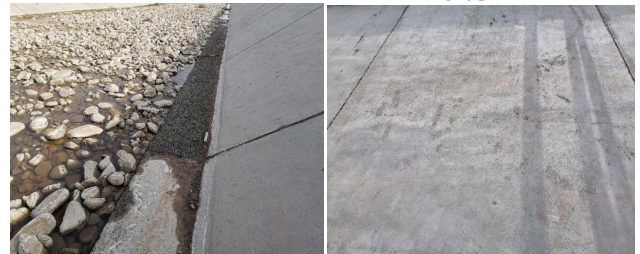


图11 渠道积水引起裂缝

Fig.11 Water in the channel caused cracks

7) 施工质量。部分渠道因施工质量较差发生冻胀破坏，如：填土密实度达不到设计要求，土体孔隙率大，在混凝土自重及土壤固结过程中，容易产生较大沉降，特别是不均匀沉降，容易造成现浇混凝土坡面拉裂。同时目前现浇混凝土采用商品混凝土普遍存在水灰比大。水灰比过大，混凝土拌合物中水泥颗粒相对较少，颗粒间距离较大，水化生产的胶体不足以填充颗粒间的空隙，此外，过多的水分蒸发后留下较多的水孔，使混凝土强度降低。并且浆体稠度变稀，流动性增强的同时黏聚性和保水性变差，导致骨料的下沉速度变快，混凝土拌合物易产生分层、离析和泌水，影响混凝土的强度和耐久性，造成混凝土衬砌结构断面发生破坏。

8) 纵缝设置不规范。根据《灌溉渠道衬砌工程技术规范》（DB64/T811-2012）规定现浇混凝土纵

横伸缩缝设置的间距为 3~5 m, 但近年来新修现浇混凝土渠道衬砌坡面或坡脚的混凝土出现不同程度的裂缝或断裂, 其中一个原因就是现浇混凝土缺少纵向(水平)伸缩缝。如西干渠银川城市段现浇混凝土坡长 5.59 m、红寺堡三干渠部分段落渠底现浇混凝土圆弧段长 5.30 m, 没有设置纵向伸缩缝, 均出现了不同程度的裂缝或断裂。而惠农渠(永宁段王太)2018 年砌护工程, 坡面 20~30 cm 厚的现浇混凝土, 由于在坡面中间设置了纵向缝, 混凝土几乎没有出现裂缝。

4 结 论

1) 梯形断面主要发生错台、整体脱空、滑塌及裂缝, 弧底梯形断面主要发生坡脚、渠底裂缝以及错台, 弧形坡脚梯形断面主要发生坡脚处裂缝以及拱起破坏。

2) 渠道不同位置处的最大冻融深度随着地下水位埋深的增大而增大, 地下水位埋深对最大冻融深度影响的敏感程度顺序为: 渠顶>1/2 渠坡>渠底。

3) 宁夏引黄灌区冻融期内各月平均地面冻深呈现阴坡>渠底>阳坡, 从各月冻结速率上看, 阴坡最大, 阳坡与渠底冻结速率大小不一。各月最大冻深为各月平均冻深 1.05~1.40 倍不等, 其中阴坡为 1.16~1.40 倍, 渠底为 1.07~1.31 倍, 阳坡为 1.05~1.40 倍。

4) 东西走向阴坡冻深为阳坡的 1.3~2.4 倍不等, 渠底位置冻深最大, 阴坡坡脚次之; 南北走向阴坡坡脚为阳坡的 1.1~2.0 倍不等, 渠底位置处冻深最小。

5) 不同结构型式对冻胀量不均匀程度影响: 梯形>弧形坡脚梯形>弧底梯形渠道, 最大不均匀程度梯形及弧底梯形渠道在渠底, 弧形坡脚梯形渠道在坡脚。

5 建 议

1) 引黄灌区地下水位埋深较浅地区, 应结合渠道走向在衬砌渠道不同位置推荐深度范围内换填非冻胀性或弱冻胀性土; 同时明晰高地下水位下, 格宾石笼透水体大小位置、适用工况及排水措施优化设计, 形成适应区域实际特点的滤透式衬砌结构, 推进解决高地下水位冻胀问题频发。

2) 对混凝土输水衬砌渠道, 需开展混凝土衬砌结构盐渍化侵蚀规律特征以及干湿、冻融、盐渍化交互作用下机理及防治措施处置研究; 混凝土衬砌最优水灰比、不同类型纤维掺量对混凝土强度性能提升及模袋混凝土耐老化性能提升相关研究, 是符合宁夏区域实际特点的现实需求。

3) 骨干输水衬砌渠道宜优选弧底梯形, 同时也应结合工程实际等因素综合选型, 不论梯形、弧形坡脚梯形、弧底梯形渠道都应重点加强阴坡及渠底部施工管理、质量把控。

4) 需进一步建立贴合实际的渠道衬砌板力学分析模型, 以往研究中, 将衬砌与基土作用力简化为均匀分布或线性分布力, 这与实际情况出入较大^[37,40], 需进一步深化开展水分、温度及土质不同时空分布特征下, 冻胀力冻结力变化特征规律相关研究。

5) 开展混凝土衬砌板合理设缝位置及填充材料选用对衬砌变形规律研究。目前相关规范仅对现浇混凝土纵横伸缩缝缝设置的间距做出规定, 但结合不同结构型式下不同类型衬砌板, 应明确不同设缝位置冻胀影响规律及最佳组合布置方式^[35], 以及考虑聚氯乙烯塑料胶泥、石油沥青聚氨脂等接缝材料在冻融循环作用下影响规律研究^[41], 可为合理设缝提供理论指导。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 何鹏飞, 马巍. 我国寒区输水工程研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 182-194.
- [2] 王瑗, 盛连喜, 李科, 等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 10-14.
- [3] 张国军, 陆立国. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 105-108.
- [4] 吕步锦. 宁夏引黄灌区小型 U 形混凝土衬砌渠道冻胀监测与数据分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [5] 张如意, 姜海波. 季节冻土区梯形混凝土衬砌渠道冻胀预测研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 147-152.
- [6] 汪恩良, 刘风波, 刘兴超, 等. 考虑温控模式对非饱和土冻结规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1 247-1 258.
- [7] 王玉龙, 常立君, 李舒洁. 冻融循环作用下土覆荷载对盐渍土盐迁移及变形规律的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(2): 142-153.
- [8] 谢嘉豪, 李建东, 王旭等. 冻融循环作用对 F1 加固黄土强度与微观结构的影响研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 1-8[2023-12-19] <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20220616001>.
- [9] 汪恩良, 刘兴超, 常俊德. 静冰力学模型试验的相似比尺问题探讨[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 417-421.
- [10] 汪恩良, 姜海强, 韩红卫, 等. 冻融模型相似性分析及试验验证[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 333-340.
- [11] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387-392.
- [12] 谷琪, 王家鼎, 司冬冬, 等. 不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1 187-1 192.
- [13] 唐丽云, 黄涛, 汪卫兵, 等. 冻融循环下土石混合体-混凝土界面剪切特性及孔隙结构演化特征试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(5): 1 954-1 969.
- [14] 江浩源, 王正中, 刘铨鸿, 等. 考虑太阳辐射的寒区衬砌渠道水-热-力耦合冻胀模型与应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 589-602.
- [15] 李宏波. 盐渍土地基整体式渠道衬砌冻融响应机理及模型研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [16] 朱洁, 陈胖胖, 王军. 冬季引水明渠冰盖生长的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(11): 1 692-1 695, 1 730.
- [17] 陈辉, 张延亿, 马吉刚, 等. 不同降雨类型下高地下水位渠道性态数值模拟研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 126-129, 136.
- [18] 余晓敏, 石自堂, 冯楚桥. 弧形坡脚梯形渠道衬砌冻胀破坏断裂力

- 学模型及应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 91-94, 145.
- [19] 李翠玲, 唐少容, 王红雨. 整体式U形渠道混凝土衬砌结构冻胀破坏力学模型[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 148-151, 155.
- [20] 肖旻, 王正中, 刘铨鸿, 等. 考虑冻土与结构相互作用的梯形渠道冻胀破坏弹性地基梁模型[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1 229-1 239.
- [21] 申向东, 张玉佩, 王丽萍. 混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 80-85.
- [22] 肖旻, 熊志豪, 王正中, 等. 接触面法一切向应力非线性分布的梯形渠道冻胀力学模型[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 152-158.
- [23] 李宗利, 姚希望, 张锐, 等. 考虑基土不均匀冻胀的梯形渠道混凝土衬砌弹性地基梁力学模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 114-121.
- [24] 江浩源. 考虑太阳辐射的衬砌渠道冻胀计算模型与应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [25] 王希尧. 论梯形渠道的冻胀破坏[C]. 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983.
- [26] 姜宗科, 莫腾飞, 张晓红, 等. 模袋混凝土衬砌梯形渠道冻胀适应性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 74-80.
- [27] 李爽, 王正中, 高兰兰, 等. 考虑混凝土衬砌板与冻土接触非线性的渠道冻胀数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 497-503.
- [28] 马丹妮. 大尺度弧底梯形渠道冻胀破坏机理的再剖析[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [29] 赵晓磊, 王红雨. 弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型研究[J]. 水利科技与经济, 2019, 25(4): 1-7.
- [30] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 18-23.
- [31] 芦琴, 刘计良, 王正中, 等. 弧形坡脚梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 213-217.
- [32] 张如意, 姜海波, 王正成. 寒冷地区输水渠道冻胀破坏链式分析及减灾研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1 607-1 614.
- [33] 刘旭东, 王正中, 陈立杰. 渠道冻胀敏感性数值模拟分析[J]. 节水灌溉, 2010(5): 18-21, 27.
- [34] 肖旻, 熊志豪, 吴浪, 等. 高地下水位冻土区弧形底拱梯形渠道冻胀力学分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 104-110.
- [35] 江浩源, 王正中, 王羿, 等. 大型弧底梯形渠道“适缝”防冻胀机理及应用研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 947-959.
- [36] 吴文杰, 姜国辉, 杨璐宇. 沈阳苏家屯地区渠基土冻结条件下温度场及位移场分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 95-98, 107.
- [37] 张晨, 王羿, 韩孝峰, 等. 考虑接触损伤效应的衬砌渠道冻胀过程数值模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S2): 188-193.
- [38] 王绪存, 吴荣, 于国兴, 等. 扬黄渠道冻胀破坏的原因及预防措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(9): 30-35.
- [39] 王福升, 陆立国. 盐环定扬水干渠冻胀原型试验观测与防治措施[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 71-77.
- [40] 孙洪宝, 姜宗科, 安亚强. 考虑古德曼接触的梯形渠道冻胀有限元模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 135-139.
- [41] 寇宗树, 郝海军, 褚春成. 高寒地区隧道渗漏水原因及预防措施[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(11): 247-249.

Investigation and Cause Analysis of Freezing Damage in the Main Water Conveyance Lining Channel in Ningxia Seasonal Freezing Area

JIANG Jiali, LU Ligu, ZHU Jie, NIU Jiayong

(Water Conservancy Research Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this paper is to summarize the current situation of frost damage in Ningxia's backbone water transmission lining channels and analyze the main reasons for the frequent occurrence of channel frost damage problems, 【Method】 On the basis of in-depth research on the backbone channels of Ningxia Yellow Diversion Irrigation Area, the current situation and characteristics of frost damage were summarized, and the impact of different influencing factors on the degree of frost damage was quantitatively analyzed. 【Result】 The trapezoidal section mainly experienced misalignment, overall detachment, collapse and cracking. The trapezoidal section at the bottom of the arc mainly experienced cracking at the slope toe and at the bottom of the channel, as well as misalignment. The trapezoidal section at the curved slope toe mainly experienced cracking at the slope toe and arching failure. The maximum freeze-thaw depth at different positions of the channel increased with the increase of groundwater level burial depth. The sensitivity order of the influence of groundwater level burial depth on the maximum freeze-thaw depth was: channel top>1/2 channel slope>channel bottom. The average ground freezing depth in each month showed that shady slopes > canal bottoms > sunny slopes. The freezing rate was the greatest on the shady slopes, and varies on the sunny slopes and the bottom of the channels. The freezing depth of the East-West trending shady slope varied from 1.3 to 2.4 times of the sunny slope, with the highest freezing depth at the bottom of the channel and the second highest at the shady slope toe. The freezing depth at the North-South slope toe varied from 1.1 to 2.0 times that of the sunny slope, with the lowest freezing depth at the bottom of the channel. The influence of different structural types on the uneven degree of frost heave: trapezoidal > curved slope toe trapezoidal > curved bottom trapezoidal channel. 【Conclusion】 To solve the serious frost heave failure of the backbone channels in Ningxia Yellow Diversion Irrigation Area, it is still necessary to start from cracking the outstanding problems such as severe frost heave at the bottom of the channel, the impact of high groundwater levels, and the improvement of concrete material performance. We need to carry out research on structural optimization of permeable lining in line with the actual characteristics of the region, research on the interaction mechanism of concrete drying and wetting, freezing and thawing, and salinization, and research on the improvement of concrete strength and anti-aging performance. We need to establish a practical mechanical analysis model, standardize the reasonable joint positions of concrete lining plates, and further clarify the impact of filling material selection on the deformation law of the lining.

Key words: Ningxia seasonally frozen areas; backbone channels; channel freezing damage; influencing factor

责任编辑：赵宇龙