

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2024.01.20

## 考虑预制混凝土“设缝”作用的梯形 渠道冻胀机制影响研究

王春霞<sup>1</sup>, 葛建锐<sup>2,3,4</sup>, 王正中<sup>3,4</sup>, 江浩源<sup>3,4</sup>, 张亚新<sup>2</sup>, 郑健<sup>2</sup>, 肖旻<sup>5</sup>

(1. 临夏回族自治州水利科学研究院, 甘肃 临夏 731100; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 西北农林科技大学 旱区寒区水工程安全研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 5. 江西科技师范大学 土木工程学院, 江西 南昌 330038)

**摘要:** 寒区衬砌渠道输水能力下降主要是由常年冻融作用下衬砌结构发生冻胀破坏所致, 针对渠道衬砌结构冻胀破坏问题提出渠坡板纵向设缝的抗冻措施与数值分析方法。本文通过将渠道衬砌板与冻土视为整体处理的方法构建混凝土衬砌渠道热力耦合冻胀模型, 以甘肃省景泰灌区某混凝土衬砌渠道为研究对象, 考虑不同设缝措施与纵缝填充的接触本构对3种工况进行抗冻影响因素分析。结果表明: 渠底深部基本不受渠道整体几何边界的影响, 但渠道边界尺寸和基土热流分布均对基土上部温度场变化具有显著影响。渠道阴坡、渠底和阳坡最大冻深分别为86.3、67.5、58.2 cm。通过合理设缝措施可使渠道阴坡法向冻胀力降低40.7%、底板冻胀量减小63.5%、切向冻胀力降低43.8%, 使渠道断面冻胀分布趋于均匀, 且模型分析与实测结果相符, 表明本文构建模型的合理性。研究结果可为长距离输水渠道数值计算提供理论依据。

**关键词:** 热力耦合; 冻胀; 衬砌结构; 设缝; 预制混凝土; 梯形渠道

中图分类号: TV67

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)01-0170-07

## Frost heave mechanism of trapezoidal canals considering the effect of joint setting in precast concrete

WANG Chunxia<sup>1</sup>, GE Jianrui<sup>2,3,4</sup>, WANG Zhengzhong<sup>3,4</sup>, JIANG Haoyuan<sup>3,4</sup>,  
ZHANG Yaxin<sup>2</sup>, ZHENG Jian<sup>2</sup>, XIAO Min<sup>5</sup>

(1. Water Conservancy Research Institute of Linxia Hui Autonomous Prefecture, Linxia 731100, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Water Engineering Safety Research Center for Arid & Cold Regions, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. School of Civil Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The decrease of water transport capacity of lined canals in cold regions is mainly caused by frost heave failure of lining structure under freeze-thaw action. In view of this problem, the control measure of longitudinal joint setting in the canal plate was proposed and the numerical analysis was conducted. A thermal coupling frost heave model of concrete lined channel was constructed by treating the canal lining plate and frozen soil as a whole. Taking a concrete lined canal in Jingtai Irrigation District of Gansu Province as the research object, the influencing factors of frost resistance under three conditions were analyzed based on the contact constitutive of different joint construction measures and longitudinal joint filling. The results show that the depth of the bottom of the channel is not affected by the overall geometric boundary of the canal, but both the size of the canal boundary and the heat flow distribution of the subsoil have signifi-

收稿日期: 2023-06-16; 修回日期: 2023-09-24

基金项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(U2003108、51735379); 甘肃省自然科学基金项目(23JRR831); 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-051); 兰州理工大学博士科研启动项目(2022062105)

作者简介: 王春霞(1979—), 女, 甘肃临夏人, 学士, 高级工程师, 研究方向为渠系工程抗冻胀数值模拟研究。

通讯作者: 葛建锐(1987—), 男, 山西阳泉人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为水工结构抗冻机理研究。

cant effects on the temperature field of the upper subsoil. The maximum freezing depth of the shady, bottom and sunny slopes of the canal are 86.3, 67.5 and 58.2 cm, respectively. Reasonable joint arrangement can reduce the normal frost heave force of the shady slope by up to 40.7%, the frost heave quantity of the bottom plate by up to 63.5%, and the tangential frost heave force by up to 43.8%, so that the frost heave distribution of the canal section tends to be uniform, and the model analysis is consistent with the measured results, indicating that the model established in this paper is reasonable. The results can provide a basis for the numerical calculation of long-distance water conveyance canals.

**Key words:** thermal coupling; frost heave; lining structure; joint; precast concrete; trapezoidal channel

## 1 研究背景

输水渠道作为主要的引、调水结构在北方灌区应用普遍,而我国北方多为季节性冻土区,长期冻融循环作用使渠道衬砌结构发生冻胀破坏,导致渠系水利用率低于 63%<sup>[1-2]</sup>,其破坏形式主要表现为衬砌产生裂缝、出现变形、滑落和冰冻破坏等现象<sup>[3-5]</sup>。因此,针对寒区混凝土衬砌渠道抗冻措施及相关机理研究亟待深入。

寒区渠道破坏主要与基土、地下水位、温度等因素有关,探明寒区渠道冻胀机理和相关防治措施是解决渠道冻害问题的关键。王正中等<sup>[6-7]</sup>、申向东等<sup>[8]</sup>分别针对梯形渠道和弧底梯形渠道断面,采用结构力学法建立了不同断面渠道简支梁稳定性力学模型,得出渠道断面衬砌板内力分布状态,并给出渠道抗冻优化方案。刘倩等<sup>[9]</sup>通过合理假设,对模袋混凝土渠道混凝土受冻特点进行了计算分析,并得到了这种结构的薄弱位置。李宗利等<sup>[10]</sup>、肖旻等<sup>[11]</sup>和何鹏飞等<sup>[12]</sup>考虑冻土与结构之间的相互作用本构,基于弹性地基 Winkler 理论,提出了渠道衬砌与冻土相互作用的弹性地基模型和地基板模型。江浩源等<sup>[13]</sup>采用二维数值方法,针对弧底梯形渠道断面考虑不同纵缝分布组合,得到渠道结构冻胀力、冻胀位移分布规律及坡板设置纵缝的优化断面。Li 等<sup>[14-15]</sup>、Liu 等<sup>[16]</sup>、Jiang 等<sup>[17]</sup>通过数值模拟对梯形渠道冻胀破坏机理进行探究,较准确地得到了渠道冻结过程中温度、水分和冻胀分布规律。数值模拟是考虑水热力等多因素耦合作用的普遍方法,但上述模型构建复杂,计算成本较高,此外也缺乏系统的监测工作。

基于此,以甘肃省景泰灌区输水渠道衬砌结构在冻胀作用下的不均匀变形为研究对象,考虑渠基土冻胀的“冷胀热缩”传质传热过程,将冻结稳定后的渠道衬砌板与冻土视为整体处理,应用商业软件 COMSOL Multiphysics 5.2 构建了渠道冻胀有限元模型,为削减衬砌板冻胀变形提出渠道坡板、底板合理

设置纵缝的抗冻措施。研究渠道结构力学性质随不同设缝措施的变化规律,并对比验证了渠道衬砌板无设缝与设缝的抗冻性能,该研究成果可为寒旱区长距离输水渠道提供设计理论依据与安全保障。

## 2 渠道冻胀模型的建立

### 2.1 基本假设

寒区输水渠道在越冬期承受持续低温作用,考虑衬砌设缝后基土与结构相互作用的变形特点,结合冻胀变形过程中微观演变过程<sup>[17]</sup>,构建渠道冻胀有限元模型,为缩短模型计算时长,考虑渠道基土中水分迁移过程和衬砌结构冻胀变形的耦合作用<sup>[10,13,17-19]</sup>,本文模型主要假设如下:

(1) 根据相关文献研究,假定渠道基土为各向同性均匀连续体;

(2) 将渠道冻胀过程视为二维平面应变问题,暂不考虑沿长度方向温度变化的影响;

(3) 由于在冻融循环过程中,渠道基土与混凝土衬砌结构之间冻结强度较大,暂不考虑衬砌脱离的工况;

(4) 渠道基土在冻胀过程中受环境负温、地下水位、太阳辐射和土质等诸多因素影响,而当具体工程中土壤性质和水分含量确定时,最终冻结温度是导致冻胀的主要影响因素。

### 2.2 热传导方程

在我国西北季节性冻土区,越冬期寒冷漫长,可将整个冻结过程视为渠道基土缓慢热传导过程,根据 Liu 等<sup>[16]</sup>、Jiang 等<sup>[17]</sup>和王羿等<sup>[20]</sup>已有研究成果结合傅里叶传热定律及热量守恒方程,热传导控制方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

$$(x, y) \in A$$

式中:  $T$  为计算土体温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  为土体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda_x, \lambda_y$  分别为冻土沿  $x, y$  向的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $x, y$  为三维平面坐标轴,  $\text{m}$ ;  $Q$  为基土

热源项,  $W$ ;  $C_p$  为土体等效热容量,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $A$  为渠道的计算区域;  $Q = L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}$ ,  $L_f$  为冰—水相变潜热, 取  $333 \text{ kJ/kg}$ ;  $\rho_i$  为基土中冰密度,  $kg/m^3$ ;  $\theta_i$  为基土总含冰量,  $m^3/m^3$ 。

模型边界条件为:  $T(L, t) = T_L$ , 其中  $L$  为结构受冻边界。

基土中总含冰量由两部分(基土中原位孔隙冰含量和水分迁移成冰量)构成, 其控制方程见公式(2)、(3)、(4):

$$\Delta \theta_i = \Delta \theta_{in} + \Delta \theta_{out} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_{in}}{\partial t} = -\frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta_{out}}{\partial t} = \frac{\rho_w}{\rho_i} (\nabla \cdot v) \quad (4)$$

式中:  $\theta_w$  为基土中原位水含量,  $m^3/m^3$ ;  $\theta_{in}$ 、 $\theta_{out}$  分别代表原位孔隙冰含量和水分迁移成冰量,  $m^3/m^3$ ;  $v$  为水分迁移速度,  $m/s$ 。

### 2.3 力学本构方程

根据已有研究<sup>[17]</sup>可知, 冻土可视为冷胀热缩材料, 渠道衬砌板冻胀变形是由基土中初始含水和水分迁移后冻结成冰引起的。本文考虑水分迁移作用引起的基土体积变化, 以温差影响下的材料的线膨胀系数来表示, 即得到低温环境下水工结构基土应力—应变的控制方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = f_x \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = f_y \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = E(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}) - \mu(\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}) \\ \sigma_y = E(\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}) - \mu(\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}) \\ \tau_{xy} = \frac{E(\varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xy0})}{1 + \mu} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  为基土沿  $x$ 、 $y$  向的正应力分量,  $MPa$ ;  $\tau_{xy}$  为基土切应力分量,  $MPa$ ;  $f_x$ 、 $f_y$  为外力,  $N$ ;  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  为基土沿  $x$ 、 $y$  向的正应变分量,  $m/m$ ;  $\varepsilon_{x0}$ 、 $\varepsilon_{y0}$  为基土沿  $x$ 、 $y$  向的冻胀线应变分量,  $m/m$ ;  $E$  为基土弹性模量,  $MPa$ ;  $\mu$  为土体泊松比。

## 3 有限元模型及参数选取

### 3.1 构建有限元模型

本文研究模型以甘肃省景泰灌区某混凝土衬砌渠道为研究对象, 通过课题组调研可知: 渠道底宽约为  $200 \text{ cm}$ , 坡比为  $1:1.5$ , 地下水埋深距渠顶约为

$200 \text{ cm}$ , 渠道尺寸如图 1 所示。通过构建渠道冻胀模型并对渠道衬砌板进行不考虑设缝, 坡脚处设缝、底板中心设缝和距坡底  $1/3$  处设缝、底板中心设缝 3 种工况的数值模拟计算, 拟探明不同设缝条件下渠道衬砌板抗冻规律。根据文献研究<sup>[20]</sup>, 原型渠道监测概况如表 1 所示。

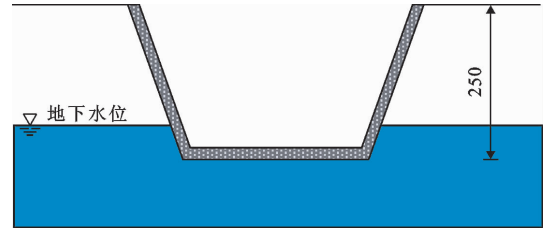


图 1 景泰灌区混凝土渠道横断面示意图(单位:  $cm$ )

表 1 景泰灌区监测渠道基本参数

监测位置	渠基土质	基土冻深 $h/cm$	基土冻胀量 $\Delta h/cm$	基土冻胀率 $\eta/\%$
渠阴坡		71	5.0	7.04
渠底	粉质壤土	59	4.4	7.46
渠阳坡		46	3.7	8.04

### 3.2 确定模型边界条件

模型中渠道上表面采用热对流边界, 控制方程如式(7):

$$n(\lambda \Delta T) = h_c(T_{air} - T) \quad (7)$$

式中:  $n$  为渠道上边界法向向量;  $T_{air}$  为环境温度,  $^{\circ}C$ ;  $T$  为地表温度,  $^{\circ}C$ ;  $h_c$  为环境与渠道外边界对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ; 沿渠底向  $4.5 \text{ m}$  处为基土稳定正温层, 取渠基土模型下边界温度条件为  $12 \text{ }^{\circ}C$ ; 根据现场实测数据, 景泰灌区冬季渠顶平均风速为  $1.9 \text{ m/s}$ , 渠底为  $1 \text{ m/s}$ ;  $\lambda$  为材料导热系数,  $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

灌区环境温度取 2015—2017 年当地实测月平均温度, 如图 2 所示。灌区环境温度与混凝土衬砌的对流换热系数与结构表面风速  $v_f$  相关, 可根据式(8)计算<sup>[20]</sup>:

$$h_c = 3.06v_f + 4.11 \quad (8)$$

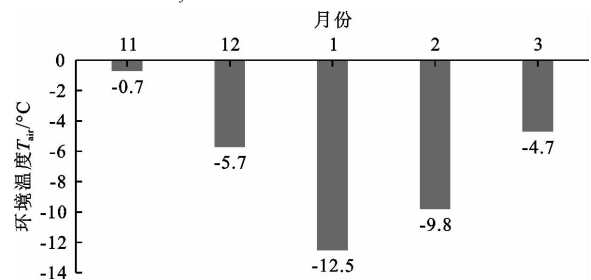


图 2 景泰灌区 11—3 月当地月平均气温

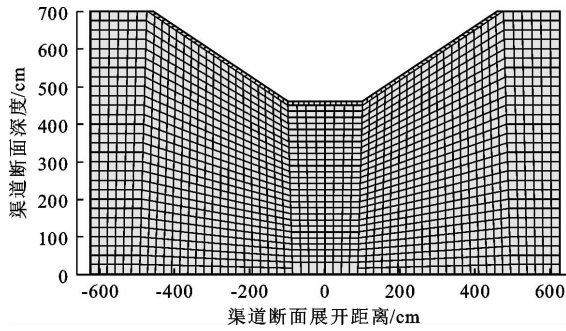


图 3 渠道模型计算尺寸与网格单元

模型尺寸及其网格按照矩形映射边界进行划分,如图 3 所示。其中横、纵坐标表示渠道尺寸。取甘肃省景泰灌区当地最冷月平均气温作为原型渠道衬砌板表面边界温度,左右边界近似取为绝热边界,沿渠底向 4.5 m 处为基土稳定正温层,取下边界温度为 12 °C,渠顶向左右延伸 150 cm,将渠道模型左右边界设为固定边界,即设定渠道水平位移为 0,渠底下边界施加 z 方向约束。渠道衬砌板分缝采用弹性薄层单元,并考虑 3 种渠道工况的抗冻设缝措施,如表 2 所示。

表 2 模型计算工况分类

分类	模型计算工况
工况 1	衬砌板不设缝结构
工况 2	衬砌板坡脚设缝、底板中心设缝
工况 3	衬砌板距坡底 1/3 处设缝、底板中心设缝

### 3.3 模型相关参数选取

本模型将渠道基土视为各向同性均匀连续体<sup>[21]</sup>,暂不考虑模型纵向与横向变形差异<sup>[22-24]</sup>,导热系数  $\lambda_f = 1.987 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ ,渠基中孔隙水冻结成冰后导致土体冻胀变形,其中冻结成冰含量由基土中原位孔隙冰含量和水分迁移成冰量构成,模型计算中将渠道基土冻胀视为“冷胀热缩”传质传热过程,当基土线膨胀系数在温度低于冰点时可依据环境温度与冻胀率关系进行计算,冻土线膨胀系数统一取为  $\eta/T$ ,其中  $\eta$  为基土冻胀率,模型材料参数如表 3 所示。

表 3 材料力学参数

分类	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	弹性模量 $E / \text{Pa}$	线膨胀系数 $\alpha / \text{°C}^{-1}$	泊松比 $\mu$
未冻土 <sup>[15]</sup>	1.320	$1.5 \times 10^7$	0	0.375
冻土	1.956	$4.6 \times 10^7$	$\eta/T$	0.356
衬砌混凝土	1.575	$2.4 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{-5}$	0.165

## 4 渠道冻胀变形和应力变化规律

### 4.1 基土温度场变化规律

对模型进行温度场计算分析,得到工况 2 与工况 1 温度场分布规律变化。通过对比分析可以说明衬砌板坡脚设缝与不设缝结构对渠道基土温度场影响不显著,因此本文只给出不设缝渠基土结构温度场变化图(图 4)。从图 4 中可以看出,渠道阴坡、阳坡和渠底等温线从上到下逐渐变疏,表明渠基土有上部温度梯度较大下部较小的趋势,且越靠近渠底温度等值线越趋于平直线,表明渠底深部基本不受渠道整体几何边界的影响,但渠道边界尺寸和基土热流分布均对基土上部温度场变化具有显著影响。模型整体计算结果与已有研究基本接近<sup>[13]</sup>,整体呈阴坡冻深较大、阳坡较小的趋势,其中阴坡、渠底和阳坡最大冻深分别为 86.3、67.5、58.2 cm。

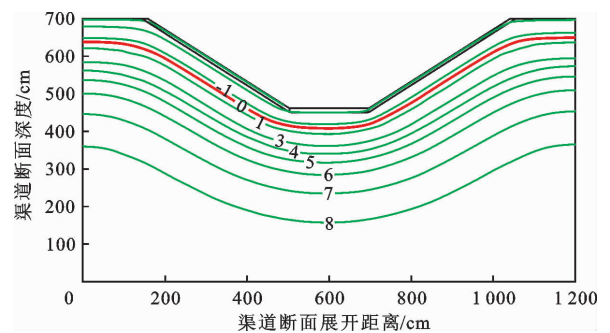


图 4 不设缝渠道温度等温线分布图(单位:°C)

### 4.2 渠道抗冻“设缝”措施计算分析

4.2.1 位移场分析 为了探明渠道衬砌板冻胀位移分布规律,在渠道模型混凝土衬砌板阴坡、阳坡和渠底分别选取 9 个测点作为研究对象。具体布置情况详见图 5、表 4 所示。

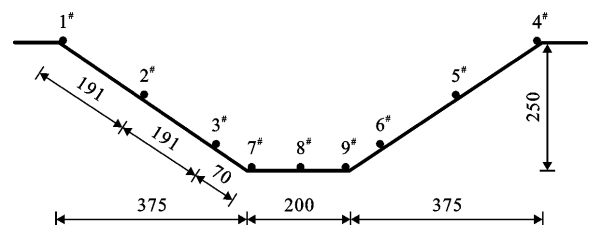


图 5 景泰灌区渠道监测点布置图(单位:cm)

图 6 为原型渠道监测<sup>[22]</sup>和 3 种模拟工况沿渠道坡板的冻胀量展开对比图,通过对比分析可得到本文模型计算结果和监测结果规律基本一致,渠基土和衬砌结构都是坡板向内、底板向上产生冻胀变形。由于构筑梯形渠道改变了渠基土原始水分分布、受力状态、阴阳坡效应等因素,使渠道衬砌板在

基土冻胀作用下产生不均匀变形。通过对比3种工况结果可得到,在衬砌板坡脚设缝使冻胀变形分布相对更均匀(即工况2),对比衬砌板不设缝结构(即工况1)冻胀量最大减小了43%,对比衬砌板距坡底1/3处设缝结构(即工况3)最大减小了61%,因此从减小衬砌冻胀变形角度应优先选择工况2措施。

表4 渠道监测点位统计表

监测点位	距渠顶位置/cm	分类
1#	0	
2#	106.5	阴坡
3#	211.3	
4#	0	
5#	106.5	阳坡
6#	211.3	
7#	250	渠底
8#	250	
9#	250	

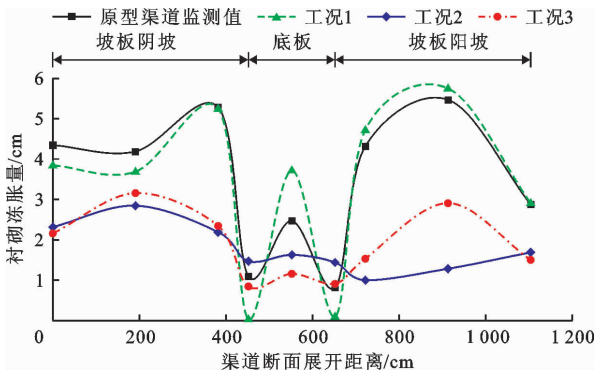


图6 3种工况沿渠道坡板冻胀量对比图

4.2.2 应力场分析 图7为3种抗冻措施渠道衬砌板法向冻胀力对比图。通过在衬砌板坡脚设缝(即工况2)和衬砌板距坡底1/3处设缝(即工况3)后法向冻胀力数值明显减小,表现为衬砌板冻胀力呈有效减小的趋势。工况2比工况1使阴坡法向冻胀力最多降低40.7%,工况3可降低37.4%。

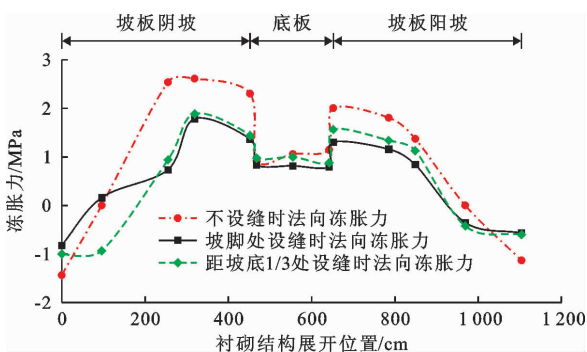


图7 渠道抗冻措施法向冻胀力对比图

图8为3种抗冻措施渠道衬砌板切向冻胀力对比图。采取工况2和工况3后切向冻胀力数值也显著减小,表现为衬砌板冻胀力呈有效减小的趋势。工况2比工况1使切向冻胀力最多降低43.8%,工况3比工况1最多降低25.6%,这种规律与已研究结果相符<sup>[15]</sup>。

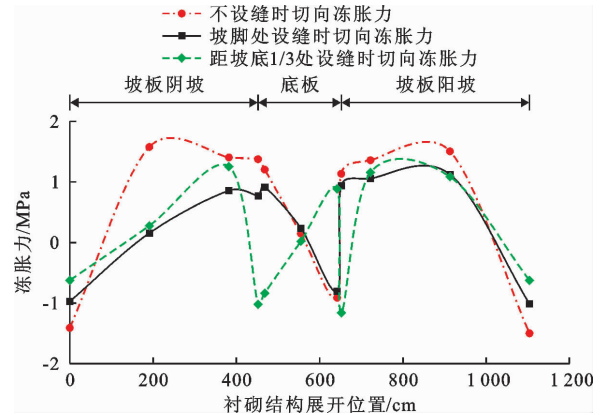


图8 渠道衬砌板抗冻措施切向冻胀力对比图

### 4.3 渠道底板设纵缝措施计算分析

结合甘肃省景泰灌区衬砌渠道工程对渠道底板设纵缝措施进行计算分析。根据文献研究<sup>[13,15,17]</sup>,混凝土衬砌渠道冻胀破坏往往出现在渠底中心,基于设缝措施的思路,针对渠底底板设置纵缝以削减其冻胀变形,实现渠道底板抗冻胀的效果。图9为2种模拟工况下渠道底板冻胀变形分布图,通过在渠道底板中心处、坡脚处设缝(工况2)后实现了削减部分冻胀变形的效果,相比不设缝(工况1)渠道底板中心冻胀量最多减小63.5%,坡板冻胀量最多减小55.8%,证明了设缝措施抗冻胀效果的显著性。

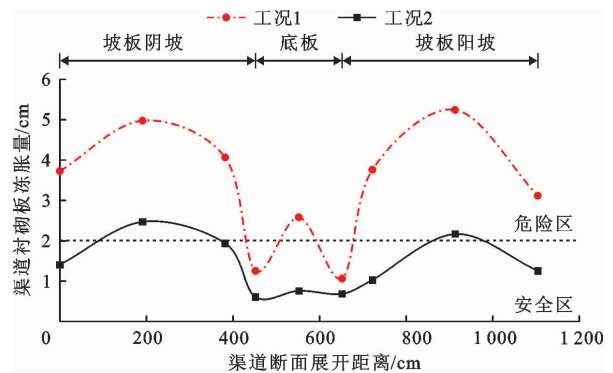


图9 渠底抗冻措施冻胀量对比图

## 5 讨论

江浩源等<sup>[13]</sup>提出大型渠道“适缝”抗冻胀概念,通过计算渠道不同分缝的冻胀变形及受力分布,得到了渠道抗冻纵缝的合理布设规律。Jiang等<sup>[17]</sup>从

渠道水力要素出发,结合渠道冻胀工程力学模型对寒区弧底梯形渠道进行优化设计,为寒区弧底梯形渠道抗冻设计提供了借鉴思路。王羿等<sup>[20]</sup>基于冻土冻胀理论,充分考虑气温、冻前含水、地下水埋深及土体渗流特性间的耦合作用,建立了温-土-水相互作用模型。刘铨鸿等<sup>[25]</sup>构建了寒区模袋混凝土护岸渠道冻胀数值分析模型,提出模袋混凝土冻胀破坏的 3 个不同表现阶段,并对渠道在不同砌护形式下的应力三场结果进行分析,但部分模型构建过于复杂,计算过程较为繁琐且收敛性出现不一致等问题仍需进一步改进。

事实上,当前研究成果多为渠道在冻胀过程下的静态破坏机理<sup>[19,26-27]</sup>,较少针对渠道在完整运行周期下冻融破坏的动态机理的研究;并且在计算过程中考虑因素单一,未能综合考虑温、水、土及结构等多因素动态耦合作用下的渠道冻融破坏发展规律,故多以封闭或半封闭系统进行计算,导致数值计算结果往往与工程实际不符,因而研究成果往往缺乏合理性与准确性。如何更加合理地构建温度、水分、基土、结构等多因素动态耦合作用下的渠道冻胀模型,更准确地得到混凝土衬砌与基土之间的相互作用规律和结构破坏判断准则,有待进一步深入研究。本文以渠道衬砌结构在冻胀作用下的不均匀变形为研究对象,考虑渠道基土冻胀的“冷胀热缩”传质传热过程,将冻结稳定后的渠道衬砌板与冻土视为整体处理,应用 COMSOL 构建了渠道冻胀有限元模型,为削减衬砌板冻胀变形提出了渠道坡板、底板合理设置纵缝的抗冻措施。通过研究渠道结构力学性质随不同设缝措施的变化过程,对比验证了渠道衬砌板无设缝与设缝的抗冻性能,该研究成果可为寒旱区长距离输水渠道提供设计理论依据与安全保障。

## 6 结 论

根据本文构建的渠道冻胀模型计算得到了衬砌结构温度、冻胀应力和变形的分布规律,并对比验证了渠道衬砌板 3 种措施的抗冻性能。

(1)结合温度场数值分析,表明渠道基土有上部温度梯度较大下部较小的趋势,其中阴坡、渠底和阳坡冻结深度分别为 86.3、67.5、58.2 cm,且越靠近渠底温度等值线越趋于平直线,整体呈阴坡冻深较大、阳坡较小的趋势。

(2)通过渠道衬砌结构冻胀量计算分析可知,在衬砌板坡脚设缝使冻胀变形分布相对更均匀,比衬砌板不设缝结构冻胀量最多减小了 43%,比衬砌板距

坡底 1/3 处设缝结构冻胀量最多减小了 61%,因此从减小衬砌冻胀变形角度应优先选择工况 2 措施。

(3)对比应力场数值分析,通过在衬砌板坡脚设缝和衬砌板距坡底 1/3 处设缝后法向冻胀力数值明显减小,工况 2 比衬砌板不设缝结构使阴坡法向冻胀力最多降低 40.7%,工况 3 可降低 37.4%,即表明渠道衬砌板设缝措施抗冻效果显著。

## 参考文献:

- [1] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 88-96.
- [2] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1203.
- [3] 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.
- [4] 蔡正银,朱锐,黄英豪,等. 冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 915-923.
- [5] 蔡正银,朱洵,张晨,等. 高寒区膨胀土渠道边坡性能演变规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 21-50.
- [6] 王正中,江浩源,王羿,等. 旱寒区输水渠道防渗抗冻胀研究进展与前沿[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 120-132.
- [7] 王正中,刘少军,王羿,等. 寒区弧底梯形衬砌渠道冻胀破坏的尺寸效应研究[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 803-813.
- [8] 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.
- [9] 刘倩,申向东,薛慧君,等. 模袋混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型及应用[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(12): 1072-1076 + 1099.
- [10] 李宗利,姚希望,李云波,等. 冻胀反力系数在渠道衬砌冻胀弹性地基梁模型中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 97-106.
- [11] 肖旻,王正中,吴浪,等. 基于双参数弹性地基梁理论的梯形渠道冻胀力学模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 71-78.
- [12] 何鹏飞,候光亮,董建华,等. 梯形渠道衬砌冻胀破坏弹性地基板模型[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 91-100.
- [13] 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.
- [14] LI Shuangyang, ZHANG Mingyi, TIAN Yibin, et al. Experimental and numerical investigations on frost damage mechanism of a canal in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 116: 1-11.
- [15] LI Shuangyang, LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, et al.

- Centrifuge and numerical modeling of the frost heave mechanism of a cold-region canal[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(4): 1113-1128.
- [16] LIU Quanhong, WANG Zhengzhong, LI Zhanchao, et al. Transversely isotropic frost heave modeling with heat - moisture - deformation coupling[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(5): 1273-1287.
- [17] JIANG Haoyuan, GONG Jiawei, WANG Zhengzhong, et al. Analytical solution for the response of lined trapezoidal canals under soil frost action[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 107: 815-833.
- [18] 葛建锐,牛永红,王正中,等. 考虑冰盖生消和冰-结构-冻土协同作用的渠道弹性地基梁模型[J]. *水利学报*, 2021, 52(14): 215-228.
- [19] JIANG Haoyuan, LIU Quanhong, WANG Zhengzhong, et al. Frost heave modelling of the sunny - shady slope effect with moisture - heat - mechanical coupling considering solar radiation[J]. *Solar Energy*, 2022, 233: 292-308.
- [20] 王羿,刘瑾程,刘铨鸿,等. 温-水-土-结构耦合作用下寒区梯形衬砌渠道结构形体优化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(8): 645-654.
- [21] 姜海波,李琳,李志强. 季节冻土区渠道水分迁移规律及冻胀特性试验研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2): 92-97.
- [22] 汪盼. 景电干渠换填及断面优化防冻胀措施研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [23] 朱锐,蔡正银,黄英豪,等. 冻融过程对高寒区渠道基土力学特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(14): 108-116.
- [24] 葛建锐,王正中,牛永红,等. 冰盖输水衬砌渠道冰冻破坏统一力学模型[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 90-98.
- [25] 刘铨鸿,郭明,王正中,等. 寒区河湖与灌排渠道模袋混凝土护岸冻胀破坏机理[J]. *水利学报*, 2022, 53(2): 1-13.
- [26] BAI Ruiqiang, LAI Yuanming, PEI Wansheng, et al. Investigation on frost heave of saturated - unsaturated soils[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(11): 3295-3306.
- [27] JIANG Haoyuan, LI Lixiang, WANG Zhengzhong, et al. Anti-frost heave design method for a parabolic canal based on the hydraulic optimal solution set in seasonally frozen regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 193: 103433.

(上接第 169 页)

- [21] ASSAAD J J, ISSA C A. Bond strength of epoxy-coated bars in underwater concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2012(30): 667-674.
- [22] 谢越韬. 自密实混凝土填充性能及堆石混凝土界面微观特性研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [23] 谢越韬,王易阳,周虎,自密实混凝土间隙通过性试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(12): 27-31.
- [24] 吴伟,相福壮,丁建彤,等. 配比组成对大流态水下不分散混凝土的性能影响[J]. *四川水力发电*, 2022, 41(4): 81-84.
- [25] 徐仁豪. 水下不分散混凝土不分散性与流动性协同发展[D]. 石家庄:石家庄铁道学院, 2022.
- [26] 张晓雪. 水下抗分散混凝土制备及性能研究[J]. *建筑施工*, 2023, 45(10): 2041-2045.
- [27] PICANDET V, RANGEARD D, PERROT A, et al. Permeability measurement of fresh cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(3): 330-338.