灌溉水源与输配水系统

文章编号: 1672 - 3317 (2023) 12 - 0099 - 09

## 考虑太阳辐射的梯形渠道冻胀模拟 分析与衬砌分缝设计优化

王建有<sup>1</sup>, 梁太利<sup>1</sup>, 逯林方<sup>2</sup>, 王 娟<sup>1</sup>, 石鹏超<sup>1</sup> (1.郑州大学 水利与交通学院, 郑州 450001; 2.赵口引黄灌区二期工程建设管理局,河南 开封 475008)

摘 要:【目的】针对缺乏渠表温度数据而难以准确分析渠道冻胀破坏的缺陷,提出一种考虑太阳辐射的温度边界 条件。【方法】考虑太阳辐射的角度及效率对梯形渠道阴阳坡温度的影响,结合混凝土表面的增温计算方法建立了 梯形渠道混凝土衬砌表面增温计算模型,将梯形渠道表面增温计算结果与当地日最低气温结合后的温度作为温度边 界条件。利用有限元软件 ABAQUS, 以赵口引黄灌区梯形渠道为研究对象, 对其温度、应力和变形场进行模拟分析, 并对渠道阴坡坡脚处、距坡脚1/3处2种衬砌分缝优化方案进行分析。【结果】计算冻深和开裂位置与工程实际情 况吻合较好,且渠道衬砌在距坡脚 1/3 处分缝防冻胀效果更好。【结论】基于此温度边界条件可较好模拟无渠表温 度数据的梯形渠道冻胀破坏情况,模拟结果与工程实际吻合较好,可为梯形渠道防冻胀设计提供参考。 关键词:梯形渠道;渠道冻胀;太阳辐射;衬砌设计 中图分类号: TV672 OSID: 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022687

王建有,梁太利, 逯林方, 等. 考虑太阳辐射的梯形渠道冻胀模拟分析与衬砌分缝设计优化[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 99-106, 180.

WANG Jianyou, LIANG Taili, LU Linfang, et al. Simulation Frost Heaving of Trapezoidal Channel and Optimization of Lining Seam Design with Solar Radiation in Considerations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 99-106, 180.

#### 0 引 言

【研究意义】渠道衬砌工程因造价低、输水效率 高、施工简单、易于管理等优点,已成为中国农业节 水措施中应用最广泛的工程[1]。但是由于我国冻土分 布十分广泛,多年冻土区和季节性冻土区面积分别占 全国陆地面积的 21.5% 和 53.5%, 这些地区纬度跨度 较大, 气候复杂多样, 使得各地的渠道使用寿命差别 巨大<sup>[2]</sup>。尤其是北方严寒地区,由于冬季气候寒冷且 低温持续时间长,导致渠道衬砌工程普遍存在严重的 冻胀破坏问题。太阳辐射是地表热量的主要来源,是 影响渠道冻胀破坏的主要因素,因渠道走向、结构型 式、所处位置等因素,使渠道各部位接受到的太阳辐 射量不同,从而产生了不对称的冻胀状态。因此探究 太阳辐射对渠道冻胀破坏的影响具有重要意义。【研 究进展】许多学者都对此进行了研究。屈春来等<sup>[3]</sup>采 用红外热成像仪获取不同时刻太阳辐射下的渡槽表 面温度变化情况,并利用 COMSOL 软件分析了太阳

收稿日期: 2022-12-15 修回日期: 2023-09-08 基金项目:国家自然科学基金项目(52179145);河南省赵口引黄灌区二 期工程引黄灌区渠道衬砌冻胀破坏模拟及防控措施研究科研项目 (ZKEQ-QDCQMNFK)

辐射作用下渡槽温度场、应力场和变形场的变化规律。 娄宗科等<sup>[4]</sup>基于动态变化的上下温度边界条件,利用 COMSOL 软件模拟了冻结期渠基土的冻胀过程,得 出了渠基土的冻胀量。张海晨等<sup>[5]</sup>基于水热力三场耦 合理论,利用 COMSOL 软件模拟分析了梯形渠道的 温度场、应力场和位移场。李敬军等<sup>[6]</sup>基于扩展有限 元方法 XFEM, 在温度应力作用下对渠道表面裂纹的 产生位置进行了预测,并模拟了裂纹的扩展形式和破 坏状态。李爽等[7]、高凤等<sup>[8]</sup>分别建立了符合渠基土 与混凝土接触面冻结特性的渠道冻胀模型,利用 ABAQUS 软件模拟分析了渠道的温度场、应力场。 温彤等<sup>[9]</sup>基于热力耦合理论,利用 ABAOUS 软件对 小U形渠道进行了温度场、应力场和变形场的分析。 然而上述研究成果都是通过参考监测数据赋予渠道 衬砌温度边界来近似考虑太阳辐射,但对无表面温度 监测的渠道衬砌工程并不适用。对于无表面温度监测 的渠道衬砌工程,潘特<sup>[10]</sup>、石娇等<sup>[11]</sup>未考虑太阳辐射 对渠道冻胀的影响,在温度边界条件的设定上,直接 假定渠表温度等同于大气温度,采用月平均大气温度 进行赋值计算。王正中等[12]提出了一种考虑太阳辐射 的第三类边界条件,基于此分析了太阳辐射对衬砌渠 道冻胀量及冻胀力的影响。江浩源等[13]提出了一种考 虑太阳辐射、衬砌板间热辐射和环境热辐射的热通量

作者简介:王建有(1977-),男。正高级工程师,博士,主要从事水工 建筑物的安全性检测与评价研究。E-mail: wangjianyou@zzu.edu.cn

<sup>©《</sup>灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

边界条件,并分析了渠道温度场、水分场和变形场发 展变化的不对称、不同步规律。【切入点】然而,目 前有关太阳辐射作用下渠道温度场边界条件的研究 尚比较少。【拟解决的关键问题】鉴于此,本文通过 考虑太阳辐射的角度及效率对梯形渠道阴阳坡温度 的影响,提出了东西走向太阳辐射增温修正系数 k, 并结合混凝土表面的增温计算方法建立了梯形渠道 混凝土衬砌表面增温计算模型,将梯形渠道表面增温 计算结果与当地日最低气温结合后的温度作为温度 边界条件。利用有限元软件 ABAQUS,以赵口引黄 灌区梯形渠道为研究对象,对其 2020 年 11 月 1 日— 2021 年 1 月 24 日 85 d 的温度、应力和变形场进行模 拟分析,并对渠道阴坡坡脚处、距坡脚 1/3 处 2 种衬 砌分缝优化方案进行分析。

### 1 材料与方法

#### 1.1 梯形渠道混凝土衬砌表面增温计算模型

太阳辐射的能量中,一部分到达地表前被大气吸收;另一部分能量到达地表后,又有一部分被吸收, 余下部分则被反射,其中被地表吸收的能量引起了地 表温度的升高。设在单位时间内单位面积上,渠道水 平表面的太阳辐射能为*S*,其中被混凝土吸收的部分 为*R*。渠道水平表面的太阳辐射增温可通过下式进行 计算<sup>[14]</sup>:

$$R=\alpha S, \qquad (1)$$

$$S=S_0(1-bn), \qquad (2)$$

$$\beta = 21.8 + 13.5 v_{\alpha},$$
 (3)

$$\Delta T_{\alpha} = R/\beta_{\circ} \tag{4}$$

式中: R 为混凝土表面吸收的太阳辐射能( $kJ/(m^2 h)$ ); a 为吸收系数,混凝土表面的  $a\approx 0.65$ ; S、 $S_0$ 分别为 多云天气、晴天的太阳辐射能( $kJ/(m^2 h)$ ); n为 平均云量; b 为云量修正系数。 $\beta$  为混凝土表面对流 放热系数( $kJ/(m^2 h \cdot C)$ );  $v_a$ 为平均风速(m/s);  $\Delta T_a$ 为渠道水平表面的太阳辐射增温(C)。 渠道由于受走向、坡比、断面形式等地形因素的 影响,导致阴坡和渠底的太阳辐射增温比阳坡小。为 分析这部分增温差异,提出东西走向太阳辐射增温修 正系数 *k*,即渠坡、渠底板表面的太阳辐射增温与渠 道水平表面的太阳辐射增温的比值。渠坡、渠底板表 面的太阳辐射增温可通过下式进行计算:

$$k=\eta k', \tag{5}$$

$$k' = \begin{cases} \left(\theta_{\max} - \theta_i\right) / \theta_{\max}, \quad (\theta_{\max} > \theta_i) \\ 0, \quad (\theta_{\max} \le \theta_i) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\theta_{\rm max} = 66^{\circ}34' - \theta_{\rm s}, \qquad (7)$$

$$\theta_{i} = \begin{cases} \tan^{-1}[H/(3L+2B)], & (i=1) \\ \tan^{-1}[H/(L+B)], & (i=2) \\ \tan^{-1}(H/B), & (i=3) \end{cases}$$
(8)

$$\eta = \sin \alpha_i,$$
 (9)

$$\Delta T' = k \Delta T_{\alpha} \circ \tag{10}$$

式中: k 为东西走向太阳辐射增温修正系数; k'为角 度系数,实际可曝晒角度与理论可曝晒角度的比值;  $\theta_{max}$  为冻结期最大日照高度角,与纬度和日期有关 (°);  $\theta_s$ 为工程所在地纬度(°);  $\theta_i$ 为渠道最小 日照入射角(°); H 为渠道深度(m); L 为渠道 阴坡、阳坡水平方向投影宽度(m); B 为渠底宽度 (m)。如图1所示,阳坡、底板和阴坡分别以 E、F、 G 为作为控制点,由于阴坡的遮挡,当太阳高度升至 A 高度时阳坡开始接收太阳辐射,即太阳入射角大于  $\theta_1$ 时阳坡开始接收太阳辐射,即太阳入射角大于  $\theta_2$ 时底 板开始接收太阳辐射,即太阳入射角大于  $\theta_2$ 时底 板开始接收太阳辐射,即太阳入射角大于  $\theta_3$ 时阴坡开始 接收太阳辐射,即太阳入射角大于  $\theta_3$ 时阴坡开始

(°); ΔT'为渠坡、渠底板表面太阳辐射增温(℃)。



图1 东西走向梯形渠道太阳辐射规律



## 1.2 有限元模型的建立

## 1.2.1 渠道概况

以赵口引黄灌区石岗分干1+050梯形渠道(图2)

为研究对象,该渠道位于河南省开封市通许县,东西 走向,地处季节性冻土区,渠基土中粉黏粒的质量占 比大于 15%,为强冻胀性、强融沉性土。渠道采用 C25 现浇混凝土衬砌, 衬砌厚度为 10 cm, 渠深 2.2 m, 渠底宽 4.0 m, 坡比 1:2。渠道在 2021 年 1 月份出 现了衬砌开裂现象, 根据气象资料(图 3), 2020 年 12 月 12 日以后, 工程所在地气温骤降, 日平均气温 均在零度以下, 温度远低于历年温度水平, 在 2020 年 12 月 14-22 日, 2020 年 12 月 29 日-2021 年 1 月 10 日,2021 年 1 月 14—19 日先后经历 3 次强降 温天气。地质及试验人员于 2021 年 1 月 24 日在现场 开展了揭露土质、样品采集、现场及室内试验工作, 经现场勘测:裂缝面位于渠道阴坡衬砌,渠道阴坡有 27 cm 左右的冻结层,阳坡未见冻结层。



图 3 通许县 2020 年 11 月 1 日—2021 年 1 月 24 日大气温度

Fig.3 Atmospheric temperature in Tongxu County from November 1, 2020 to January 24, 2021

### 1.2.2 有限元模型基本假设

1) 土体均匀连续分布, 且为各向同性弹性体。

- 2)渠道混凝土衬砌是线弹性材料。
- 3)渠道冻胀变形问题简化为平面应变问题。

1.2.3 有限元模型及参数选取

有限元模型建模时,取渠底衬砌中点为整体坐标 原点,渠道断面向两侧沿伸3m作为模型左右边界, 渠底向下取5m作为模型下边界。冻土层网格进行加 密处理。渠道有限元网格划分见图4。





Fig.4 Shigang Fengan 1+050 channel grid division

在瞬态传热条件下,温度场的计算与密度、导热 系数和比热容有关,查阅文献[15]对其进行取值,见 表 1。材料的力学参数按文献[15]选取,见表 2、表 3。 根据工程现场勘测已得的渠道土体含水率,并依据文 献[16]得出土体冻胀率,见表 4一表 6。假定冻土在负 温条件时为冷胀热缩材料,取冻土线膨胀系数为 *ŋ/T*<sup>[17]</sup>。

表1 材料热力学参数表

 Table 1
 Table of material thermodynamic parameters

材料	密度/(kg m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	比热容/ (J kg <sup>-1</sup> ℃ <sup>-1</sup> )
混凝土	2 400	1.28	970
未冻土	1 650	1.54	2 050
冻土	1 650	2.40	1 320
填缝材料	1 300	1.21	1 050

表 2 冻土材料力学参数表

Table 2	Table of	mechanical	parameters of	f frozen	soil	materials

		•				
温度 T/℃	0	-1	-2	-3	-5	
弹性 模量 <i>E/</i> Pa	1.1×10 <sup>7</sup>	1.9×10 <sup>7</sup>	2.6×10 <sup>7</sup>	3.3×10 <sup>7</sup>	4.6×10 <sup>7</sup>	
泊松比μ	0.373	0.33	0.33	0.33	0.33	
表 3 其他材料力学参数表						

Table 3 Table of mechanical parameters of other materials

		-	
材料	弹性模量 E/Pa	泊松比μ	线膨胀系数 α/℃ <sup>-1</sup>
混凝土	$2.8 \times 10^{10}$	0.167	1.1×10 <sup>-5</sup>
未冻土	$1.1 \times 10^{7}$	0.373	0
填缝材料	2.0×10 <sup>5</sup>	0.450	0

表 4	渠道阴坡土体冻胀率	
-----	-----------	--

 Table 4
 Frost heaving rate of soil on shady slope of channel

					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	r · · ·			
距渠底坡脚/m	0.6	1.1	1.5	2.1	2.6	3.1	3.7	4.2	4.8
土质	中粉质壤土	轻粉质砂壤土	重粉质壤土	轻粉质砂壤土	轻粉质砂壤土	中粉质壤土	轻粉质砂壤土	重粉质砂壤土	重粉质砂壤土
土体含水率/%	35.1	28.4	27.5	26.6	11.2	8.3	7.8	21	16.2
土体冻胀率 η/%	4.41	3.94	3.86	3.79	0	0	0	3.28	0

表 5 渠道阳坡土体冻胀率

T-1-1- 5	Encode la construcción de succes	-f :1		- f - 1 1
Table 5	Frost neaving rate	of som on	sunny slope	of channel

距渠底坡脚/m	1.4	2.1	2.3	3	3.2	3.6	4.1
土质	轻粉质壤土	粉质黏土	中粉质壤土	重粉质壤土	重粉质砂壤土	重粉质砂壤土	轻粉质砂壤土
土体含水率/%	22.2	38.1	22.6	27.4	18.5	12.3	9.3
土体冻胀率 η/%	3.40	4.60	3.44	3.86	3.02	0	0
	表 6 渠底板土	上体冻胀率		(2)、式(3	)得出 <i>S</i> 和 <i>B</i> 分	分别为 528.22	$kJ/(m^2 h)$

Table 6 Frost heaving r	ate of channel floor soil
-------------------------	---------------------------

1/1:6 1:古(1) 25.1	土质	轻粉质壤土
土体含水率/% 35.1	土体含水率/%	35.1
土体冻胀率 η/% 4.41	土体冻胀率 η/%	4.41

1.2.4 边界条件及渠基土与衬砌接触行为的设定

分析温度场时,渠道初始预定义场温度取第一天 日平均气温,即 2020 年 11 月 1 日平均气温。渠道上 表面温度边界条件取梯形渠道表面增温计算结果与 当地日最低气温结合后的温度。

梯形渠道水平表面增温:石岗分干渠道位于河南 省开封市通许县,地处北纬 34°11′45″—35°01′20″之 间。依据文献[14],计算得出石岗分干渠道冻结期月 平均晴天太阳辐射能 *S*<sub>0</sub>为 611.37 kJ/(m<sup>2</sup> h)。根据 工程气象资料,得知当地平均云量 *n*为 0.2,2020年 11月1日—2021年1月24日平均风速*v*<sub>a</sub>为 2.39 m/s,

根据文献[14],得出云量修正系数 b 为 0.68,结合式

(2)、式(3)得出 S 和 β 分别为 528.22 kJ/(m<sup>2</sup> h)、
 54.14 kJ/(m<sup>2</sup> h ℃)。最终根据式(1)、式(4)得
 出梯形渠道水平表面增温为 6.34 ℃。

梯形渠道阴阳坡和底板表面增温:在得出梯形渠 道水平表面增温的基础上,考虑太阳辐射的角度及效 率对梯形渠道阴阳坡温度的影响。石岗分干渠道地处 北纬 34°11′45″—35°01′20″之间,根据式(7)得出冻 结期最大日照高度角 $\theta_{max}$ 为 31°,根据式(8)得出 $\theta_3$ 、  $\theta_2$ 、 $\theta_1$ 分别为 26.60°、15.00°、5.93°,根据式(8)得出 $\theta_3$ 、  $\theta_2$ 、 $\theta_1$ 分别为 26.60°、15.00°、5.93°,根据式(6)得 出为  $k'_3$ 、 $k'_2$ 、 $k'_1$ 分别为 0.145、0.516、0.808。又根 据图 1 所示, $a_3$ 、 $a_2$ 、 $a_1$ 分别为 4.5°、31.0°、57.5°, 根据式(5)、式(9)得出 $k_3$ 、 $k_2$ 、 $k_1$ 为 0.011、0.266、 0.681,最终根据式(10)得出渠道阴坡增温为 0.07 ℃, 底板增温为 1.69 ℃,阳坡增温为 4.32 ℃。石岗分干 梯形渠道的上表面温度边界条件,图 5 所示。



图 5 石岗分干 1+050 渠道上表面温度边界



分析变形、应力场时,初始预定义场温度取温度 场计算结果,渠道衬砌施加重力荷载,左右边界约束 *x*方向、下边界约束*x、y*方向。

渠基土与衬砌接触行为通过 ABAQUS 主菜单中的 Interaction 菜单进行设定。渠基土与衬砌接触行为 主要体现在法向接触和切向接触上。法向接触采用 Normal Behavior 中的 "Hard" Contact, 切向接触采用 Tangential Behavior 中的 Penalty。

# 2 结果与分析

## 2.1 温度场结果分析

从大气温度变化曲线(图3)可以看出,在2020年11月1日—2021年1月24日共经历了3次强降温阶段,分别是2020年12月14—22日,2020年12月29日—2021年1月10日和2021年1月14—19日。

由温度场结果(图 6、图 7)可知,在第一次降 温时间段内,冻土最大冻深出现在 2020 年 12 月 22 日,此时所达到的冻深:阴坡为13.6 cm,渠底为6.7 cm,阳坡没有出现冻深。

在第二次降温时间段内,最大冻深出现在 2021 年 1 月 10 日,此时所达到的冻深: 阴坡为 22.9 cm, 渠底为 12.4 cm,阳坡为 8.0 cm。

在第三次降温时间段内,最大冻深出现在 2021 年1月19日,此时所达到的冻深:阴坡为28.0 cm, 渠底为16.0 cm,阳坡没有出现冻深。

当在 2021 年 1 月 20—24 日,此时渠道冻深趋于 稳定状态,在 2021 年 1 月 24 日,此时的阴坡冻深为 29.0 cm, 渠底冻深为 14.0 cm, 阳坡没有出现冻深。 在渠道阴坡出现冻胀裂缝后,地质与试验人员于 2021 年 1 月 24 日在现场进行了勘测工作:渠道阴坡有 27 cm 左右的冻结层,阳坡未见冻结层。由此可见,现 场勘测结果与温度场模拟结果吻合较好。

温度场结果表明,温度场呈不对称分布,阳坡的 温度明显大于阴坡,温度分布规律决定了冻深情况, 这与现场勘测的阴坡冻深大于阳坡的规律相吻合,并 结合现场勘测结果可知,数值结果与实际结果冻深最 大差异为2cm。



(a) 2020年12月22日温度场云图



(b) 2021 年 1 月 10 日温度场云图



#### (c) 2021 年 1 月 19 日温度场云图



(d) 2021 年 1 月 24 日温度场云图图 6 渠道温度场云图Fig.6 Channel temperature field cloud diagram





灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com

 Implify
 2.2 变形、应力场结果分析

依据上述温度场结果,选取相同时刻的基土法向 冻胀变形分布曲线(图8)和衬砌上下表面应力分布 曲线(图9),来分析渠道变形、应力场的变化规律。

由变形场结果可知,在前2次降温阶段内,随着 冻结时间的推移,基土的法向冻胀变形量逐渐增大, 当到达第二次降温结束时刻,即2021年1月10日, 基土的法向冻胀变形量最大达到了0.9 cm,超过了 渠系工程抗冻胀设计规范规定的最小允许法向位移 量<sup>[18]</sup>0.5 cm,由此可知,阴坡衬砌在第二次降温阶段 内有极大可能发生破坏,且破坏位置位于距渠底坡脚 1/3 处。



(b) 衬砌下表面最大压应力分布曲线

图9 渠道衬砌上下表面应力分布曲线

Fig.9 Stress distribution curve of upper and lower surface of channel lining

在基土冻胀作用下,渠道衬砌将向上隆起,使其 上表面主要承受拉应力,下表面主要承受压应力。由 应力场结果可知,在第二次降温结束时刻,即 2021 年1月10日,阴坡衬砌上表面的最大拉应力已经远 超 C25 混凝土的极限抗拉强度 1.78 MPa,而此时的 衬砌下表面的最大压应力,并未超过 C25 混凝土的极 限抗压强度 16.7 MPa。由此可知,阴坡上表面衬砌在 第二次降温阶段内会发生破坏,且破坏位置位于距渠 底坡脚 1/3 处。

工程经历强降温天气后,工程人员在 2021 年 1 月发现阴坡衬砌出现开裂,位置位于距坡脚 1/3 处。 由此可见,工程开裂情况与变形、应力场模拟结果相 吻合。

变形、应力场结果表明,在太阳辐射作用下,基 土法向冻胀量与衬砌应力由阴坡、渠底板至阳坡依次 递减,阴阳坡差异明显,且工程开裂情况与变形、应 力场模拟结果相吻合。

## 3 衬砌分缝设计优化

为了使本工程衬砌结构能有效适应渠基土的冻

胀,采取两种分缝方案对本工程衬砌结构进行设计优化,即阴坡衬砌分别在坡脚处分缝(图 10 (a))和 距坡脚 1/3 处分缝(图 10 (b))。

2 种分缝方案的应力场结果见图 10 所示。随着 冻结时间的推移,当到达第二次降温结束时刻,即 2021 年 1 月 10 日,此时方案一(图 10 (a))和方 案二(图 10 (b))的第一主应力均远小于 C25 混凝 土的极限抗拉强度。由此可见,方案一与方案二的衬 砌结构均能有效适应渠基土的冻胀,且距坡脚 1/3 处 分缝相较于坡脚处分缝而言,在距坡脚 1/3 处分缝的 衬砌结构,能更好的适应渠基土的冻胀。



图 10 2 种分缝方案的衬砌应力场云图 Fig.10 Lining stress field cloud diagram of two slit schemes

## 4 讨 论

由于我国北方严寒地区复杂的环境、气候等条件, 导致渠道衬砌工程普遍存在严重的冻胀破坏问题,威 胁其输水能力和安全保证。为解决渠道冻胀破坏问题, 近些年,众多学者对渠道冻胀数值模型进行了研究。 渠道温度场的边界条件是渠道冻胀数值模型中的核 心研究内容,太阳辐射是影响渠道温度场的主要因素, 是设定温度场边界条件不可或缺的因素,然而目前有 关考虑太阳辐射的边界条件的研究较少。已有研究中, 王正中等<sup>[12]</sup>、江浩源等<sup>[13]</sup>均通过考虑太阳辐射作用下 渠坡的实际光照时间,来分析太阳辐射对渠坡温度的 影响,本文通过考虑太阳辐射作用下渠坡的实际光照 角度与太阳辐射效率,来分析太阳辐射对渠坡温度的 影响。且王正中等<sup>[12]</sup>、江浩源等<sup>[13]</sup>将太阳辐射分别简 化为第三类边界条件、热通量边界条件,本文将太阳 辐射简化为温度边界条件。将此温度边界条件应用于 工程实例进行验证,结果表明,此温度边界条件可以 较好地模拟无渠表温度数据下的梯形渠道冻胀破坏 情况,计算冻深和开裂位置与工程实际情况吻合较好。 并且此温度边界条件的获取也更加容易,仅需要获取 当地大气温度和太阳辐射能就可以得到,克服了无渠 表实测温度难以准确模拟渠道冻胀的缺陷,使无表面 温度监测的渠道冻胀破坏模拟分析更加简便科学。

本文并未考虑渠道表面接受的太阳辐射一天内 的变化幅度,后续进一步研究可通过利用太阳辐射模 型或光线追踪法等<sup>[19]</sup>,计算不同时刻内渠道表面接受 的太阳辐射;此外本文建立的梯形渠道混凝土衬砌表 面增温计算模型仅适用于东西走向渠道,未考虑太阳 辐射对南北走向渠道阴阳坡温度的影响。以上问题均 有待进一步的研究。

## 5 结 论

1)将梯形渠道表面增温计算结果与当地日最低

气温结合后的温度作为温度边界条件应用到赵口引 黄灌区梯形渠道,并对渠道温度场进行模拟分析,分 析结果与实际冻深吻合较好。

 2)对渠道应力场和变形场进行模拟分析,得出 阴坡表面衬砌破坏位置与实际情况基本一致。

3)通过对两种分缝方案进行模拟分析,表明渠 道衬砌在距坡脚 1/3 处分缝防冻胀效果更好。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- 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.
   WANG Zhengzhong, JIANG Haoyuan, WANG Yi, et al. Research progresses and frontiers in anti-seepage and anti-frost heave of canals in cold-arid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 120-132.
- [2] 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.

HE Pengfei, MA Wei. Study of canals in cold regions of China: Achievements and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 182-194.

- [3] 屈春来, 吴照正, 程方. 太阳辐射下矩形渡槽热力耦合特性分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 159-162, 145.
   QU Chunlai, WU Zhaozheng, CHENG Fang. Analysis of thermal coupling characteristics of rectangular aqueduct under solar radiation[J].
   Water Resources and Power, 2022, 40(7): 159-162, 145.
- [4] 娄宗科,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.
   LOU Zongke, MO Tengfei, ZHANG Xiaohong, et al. Research on adaptability of using molded bagged concrete to ameliorate heave in trapezoidal concrete channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 74-80.
- [5] 张海晨,李振,张茂林,等. 寒旱区梯形渠道衬砌冻胀破坏数值模拟[J]. 人民黄河, 2019, 41(3): 156-160.
  ZHANG Haichen, LI Zhen, ZHANG Maolin, et al. Numerical simulation study on frost heaving damage of trapezoidal channel concrete lining in cold and arid area[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 156-160.
- [6] 李敬军, 贺向丽, 邱流潮, 等. 基于热力耦合的砼衬砌渠道冻胀开裂数值模拟[J]. 计算力学学报, 2019, 36(2): 278-283.
  LI Jingjun, HE Xiangli, QIU Liuchao, et al. Thermomechanical coupled model for frost heaving cracking of concrete lined channel[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(2): 278-283.
- [7] 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.
  LI Shuang, WANG Zhengzhong, GAO Lanlan, et al. Numerical simulation of canal frost heaving considering nonlinear contact between concrete lining board and soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 497-503.
- [8] 高凤,娄宗科,肖旻.考虑接触行为的 U 型渠道冻胀数值模拟[J]. 长江科学院院报,2020,37(1):161-165.

GAO Feng, LOU Zongke, XIAO Min. Numerical simulation of frost heave damage of U-shaped canal considering interaction between

concrete lining board and soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(1): 161-165.

- [9] 温彤, 王红雨. 整体式小 U 形渠道混凝土衬砌结构冻胀破坏数值模 拟研究[J]. 陕西水利, 2018(3): 231-233.
   WEN Tong, WANG Hongyu. Study on numerical simulation of frost heaving failure of monolithic small U-shaped channel concrete lining structure[J]. Shaanxi Water Resources, 2018(3): 231-233.
- [10] 潘特.季冻区渠道不同厚度聚苯板保温与防冻胀效果数值模拟研究[J]. 东北水利水电, 2021, 39(7): 40-42, 72.

PAN Te. Numerical simulation of insulation and anti-frost heave effect of polystyrene plate with different thickness in seasonal frozen area[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2021, 39(7): 40-42, 72.

[11] 石娇,张希栋,甄志磊,等.基于温度-应力耦合的冻土地区渠道衬 砌防冻胀效果及适应性评价[J].长江科学院院报,2022,39(3): 131-136,142.

SHI Jiao, ZHANG Xidong, ZHEN Zhilei, et al. Evaluating the effectiveness and adaptability of anti-frost-heaving materials for channel lining in frozen earth areas based on temperature-stress coupling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(3): 131-136, 142.

- [12] 王正中,芦琴,郭利霞.考虑太阳热辐射的混凝土衬砌渠道冻胀数 值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 455-460.
  WANG Zhengzhong, LU Qin, GUO Lixia. Numerical simulation of frost heave of concrete lining channel by taking consideration of radiation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 455-460.
- [13] 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.
   JIANG Haoyuan, WANG Zhengzhong, LIU Quanhong, et al. Frost heave modeling with thermos-hydro-mechanical coupling for lined canal in coldregions considering solar radiation and its application[J].
   Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 589-602.
- [14] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[15] 郭利霞. 渠道冻胀力学模型及有限元分析[D]. 杨凌: 西北农林科技 大学, 2007.

GUO Lixia. Establishment of mechanics models and finite element analysis of frost heaving canal[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.

- [16] 魏烈珊. 土体冻胀的数理分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2001, 37(1): 30-33.
- [17] 郭利霞,王正中,李甲林,等. 梯形与准梯形渠道冻胀有限元分析[J]. 节水灌溉, 2007(4): 44-47, 50.
  GUO Lixia, WANG Zhengzhong, LI Jialin, et al. Finite element analysis on frost-heaving of channel with trapezoidal or quasi-trapezoidal cross section based on ANSYS software[J]. Water Saving Irrigation, 2007(4): 44-47, 50.
- [18] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范: SL 23-2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [19] JIN F, CHEN Z, WANG J T, et al. Practical procedure for predicting non-uniform temperature on the exposed face of arch dams[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2 146-2 156.

production in eastern Henan province. In this paper we analyze the migration of salt in the plough layer and its relationship with geochemistry of both surface water and groundwater at different seasons. [Method] The experiment was conducted in areas adjacent to the National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu. We measured salt content, depth of groundwater table, as well as surface water runoff from 2010 to 2020. The relationship between salt content and these environmental factors was calculated using the descriptive statistics and Piper figure analysis method. [Result] The increased salt content in the top 0~20 cm soil layer was mainly induced by the increased precipitation. The maximum electric conductivity of the topsoil layer occurred between October and November, but it is linearly correlated to precipitation in August (y=0.794 3x+126.65,  $R^2=0.631$  3, P<0.05). The content of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> and electric conductivity of water in the topsoil layer and the 0~100 cm soil layer, as well as depth of the shallow groundwater table in 2020 was significantly higher than those in 2015 (P<0.05). We also found that the leachate from the topsoil was geochemically similar to that of the shallow groundwater and the surface runoff in 2020, indicating that the soluble salt in the topsoil was related to both surface water and subsurface water. [Conclusion] The electric conductivity of water in the topsoil layer and the 0~100 cm-depth soil layer in October was both positively correlated to precipitation and the depth of the groundwater table, suggesting that salt in the topsoil was hydraulically connected to soluble salt in the surface water and the subsurface water. Key words: salt migration; soil soluble salt; soil conductivity; topsoil; water environment

责任编辑: 白芳芳

#### (上接第106页)

## Simulation Frost Heaving of Trapezoidal Channel and Optimization of Lining Seam Design with Solar Radiation in Considerations

WANG Jianyou<sup>1</sup>, LIANG Taili<sup>1</sup>, LU Linfang<sup>2</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, SHI Pengchao<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhaokou Yellow Diversion Irrigation District Phase II Project Construction Administration, Kaifeng 475008, China)

**Abstract: [**Objective**]** Frost and heaving are natural hazards faced by water channels in temperate and boreal regions. In this paper we proposed a model to simulate frost and heaving of trapezoid channels by considering the effect of solar radiation. The simulated results were used to optimize the lining seam. **[**Method**]** The simulation was based on the software ABAQUS. We first calculated the influence of angle and efficiency of solar radiation on the temperature of the two slopes of the channel, and then used this to estimate the temperature change in the concrete lining surface. This, combined with the lowest daily temperature, was used as a boundary condition of the trapezoidal channel in numerical simulation. The model was applied to the trapezoidal channel in the Zhaokou Yellow Diversion Irrigation district. The temperature, stress and deformation field simulated by the model were used to optimize two kinds of lining joints, one was at the toe of the shadow slope and the other one was at a position 1/3 (of the slope length) from the toe. **[**Result**]** The simulated freezing depth and cracking position are in good agreement with the measured data. The channel linings for mitigating frost swelling was more effective when the seam was 1/3 away from the slope foot. **[**Conclusion **]** Using the temperature boundary condition calculated by the proposed method, the model can accurately simulate the destruction of trapezoidal channels by frost heave. The simulation results are in good agreement with empirical data, which can help channel design to mitigate the adverse effect of frost and heave on trapezoidal channels in temperate and boreal regions.

Key words: trapezoidal channel; channel frost heaving; solar radiation; lining design

责任编辑:赵宇龙