

# 接触面法 - 切向应力非线性分布的梯形 渠道冻胀力学模型

肖旻<sup>1</sup>, 熊志豪<sup>1</sup>, 王正中<sup>2,3</sup>, 吴浪<sup>1</sup>, 崔浩<sup>1</sup>, 杨晓松<sup>4</sup>

(1. 江西科技师范大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 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; 3. 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; 4. 塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

**摘要:** 针对开放系统下的寒区梯形渠道, 考虑衬砌各点地下水补给条件的横向差异提出非线性分布法向冻胀力的计算方法, 通过引入冻土与衬砌接触界面切向相互作用的 Winkler 假设导出非线性分布切向冻胀力的计算方法, 进而构建接触面法 - 切向应力非线性分布的梯形渠道冻胀力学模型。以塔里木灌区某梯形渠道为例, 分析了不同地下水埋深  $w$  对各截面弯矩的影响规律。结果表明: 地下水埋深越浅, 则衬砌板截面弯矩分布的不均匀性越强, 最大弯矩的量值迅速呈非线性增大, 坡板危险截面位置约在距坡脚 30% ~ 42% 坡板长处, 底板危险截面在渠底中部附近, 与调查结果相符。同时分析了顶盖板约束下不同接触面切向刚度 ( $k_p$ ) 对各截面切向位移及切向冻胀力分布的影响规律。结果表明: 切向位移及切向冻胀力均自坡顶向坡脚处逐渐增大, 在坡顶处为零, 在坡脚处达到最大值。 $k_p$  较小时, 截面切向位移及切向冻胀力趋于线性分布; 随着  $k_p$  的增大, 两者逐渐偏离线性分布, 且  $k_p$  越大两者非线性分布越明显。研究结果可为寒区梯形衬砌渠道抗冻设计提供参考。

**关键词:** 梯形渠道; 冻土; 冻胀; 力学模型; Winkler 假设; 非线性分布

中图分类号: TV67

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0152-07

## Frost-heaving mechanical model of trapezoidal canal considering non-linear distribution of normal/tangential stress on interface

XIAO Min<sup>1</sup>, XIONG Zhihao<sup>1</sup>, WANG Zhengzhong<sup>2,3</sup>, WU Lang<sup>1</sup>, CUI Hao<sup>1</sup>, YANG Xiaosong<sup>4</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang 330013, China; 2. Water Engineering Safety Research Center for Arid & Cold Regions, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

**Abstract:** For trapezoidal canals in open water transfer systems, a novel method for calculating the distribution of non-linear normal frost-heaving force was proposed considering the horizontal difference of distance to groundwater table of each test point. Then Winkler assumption of the tangential force on the interface of frozen soil and lining was introduced to derive a calculation method of the distribution of non-linear tangential ad-freezing force. Eventually, a frost-heaving mechanical model of trapezoidal canal considering non-linear distribution of normal/tangential stress on the interface was constructed. Taking a trapezoidal canal in Tarim Irrigated Area as an example, the influence of groundwater table buried depth  $w$  on the distribution of section moment of concrete lining was analyzed by this model. The results show that the smaller the  $w$  is, the more non-linearly and rapidly the maximum value of section moment increa-

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-10-10

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0405100); 国家自然科学基金项目(U2003108, 51641903, 51869029); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201801); 江西省教育厅科技项目(GJJ190621); 江西科技师范大学博士科研启动基金项目(2019BSQD11)

作者简介: 肖旻(1987-), 男, 江西赣州人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为冻土工程。

通讯作者: 王正中(1963-), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为冻土工程。

ses with heterogeneous distribution; sections of slope plate which are vulnerable to frost-heaving damage are located at the positions of 30% - 42% slope plate length away from the slope toe, and those of the bottom plate are in the periphery of the bottom center, these findings are consistent with the field investigation results. A parameter analysis was carried out on the tangential displacement of each section and tangential ad-freezing force with different tangential stiffness coefficient of contact interface  $k_p$ . The results indicate that the magnitude of both tangential displacement and tangential ad-freezing force gradually increase from the slope top to toe, which is zero on the slope top and maximum on the slope toe. when  $k_p$  is small, both the tangential displacement and tangential ad-freezing force show the tendency of linear distribution; as  $k_p$  gradually increases, both of them gradually deviate from linear distribution, and the larger the  $k_p$ , the more non-linear the distribution. The study can provide references for frost-heaving resistance design of trapezoidal canals in cold regions.

**Key words:** trapezoidal canal; frozen soil; frost heave; mechanical model; Winkler assumption; non-linear distribution

## 1 研究背景

渠系工程对中国北方旱寒地区经济社会发展具有重要意义,其中主要输水设施为衬砌渠道。这些地区普遍存在的土体冻胀现象常导致渠道出现严重破坏。为避免因设计缺陷引起衬砌体抗冻胀性能不足而导致的破坏,并为渠道抗冻胀设计提供便捷、实用的方法,众多学者对渠道冻胀机理与力学模型进行了广泛研究<sup>[1-5]</sup>。

王希尧<sup>[6]</sup>通过对辽宁省巴林左旗二龙灌区试验场的原型观测认为,渠坡基土冻胀量近似呈“上小下大”的三角形分布,在坡脚处达到最大值,并初步明确了冻胀条件下梯形渠道衬砌所受荷载种类及分布规律。李甲林等<sup>[7]</sup>指出冻胀条件下梯形渠道承受的各类荷载均是相互依存、相互影响的,同时采用法向冻胀力与切向冻结力的线性分布假设,以切向冻结约束失效为极限状态构建了梯形渠道冻胀力学分析的结构力学模型。申向东等<sup>[8]</sup>、肖旻等<sup>[9]</sup>提出了预制板衬砌梯形渠道冻胀力学分析方法。宋玲等<sup>[10]</sup>对冬季输水工况梯形渠道的冻胀力学分析方法进行了探讨,指出此时坡板的冻胀破坏表现出非垂直、非全周冻拔的特征。唐少容等<sup>[11]</sup>构造了“三拼式”小U形渠道的冻胀力学分析框架,对衬砌直线段倾角的合理取值范围提出了建议。葛建锐等<sup>[12]</sup>建立了冰盖输水工况下梯形渠道冻胀力学模型。由此可见,渠道冻胀力学分析的相关研究近年来发展迅速,且已由初期的线性法向冻胀力模型研究过渡到考虑衬砌各点水分补给条件不同所导致的法向冻胀力非线性分布情形的研究,更加符合实际。

然而,已有模型中大多数仍保留冻土 - 衬砌接触面切向冻结力呈线性分布的假设,与工程实际不

尽相符。而切向冻结力分布是否准确关系到截面轴力计算的准确性进而影响到抗裂验算的合理性。鉴于此,本文在现有模型<sup>[7-12]</sup>基础上,认为冻土 - 衬砌界面切向应力与相对位移成正比,即切向服从 Winkler 假设<sup>[13-14]</sup>,结合不同衬砌板端部约束条件及板间相互作用力计算结果,求解以截面切向位移为基本未知量的平衡微分方程,进而可确定切向冻结力分布,从而避免采用线性分布假设,将其纳入模型一体化求解,可使模型更加合理、完备。

## 2 模型的建立

本文研究对象为开放系统现浇梯形渠道<sup>[7,9,15]</sup>,认为对特定气象、土质条件下的具体工程,衬砌板所受冻胀力的横向差异源于断面各点不同的水分补给条件,衬砌板至地下水水位的距离是决定冻胀率的主要因素<sup>[16-19]</sup>。

### 2.1 基本假设

基于现有模型<sup>[7-12,16-17]</sup>及工程实际,作出如下假设:

(1) 渠道纵向尺寸远大于其横向尺寸,力学分析考虑平面应变情形。

(2) 衬砌冻胀变形为小变形,且均在线弹性范围内,可应用叠加原理。

(3) 冻土与衬砌接触面切向相互作用满足 Winkler 假设<sup>[13-14]</sup>,即接触面切向应力与相对位移成正比。

图 1 为梯形渠道断面示意图及冻胀力学分析简图。对含顶板约束的典型断面,并考虑坡脚处板间相互约束,将衬砌板视为受法向冻胀力和板间相互作用力的简支梁。图 1 中下标  $m$  代表阴坡,  $s$  代表阳坡,  $e$  代表底板; 阴坡坡顶及坡脚、底板两侧、阳坡坡脚及

坡顶分别标记为 A、B、C、D、E、F。阴坡、阳坡坡板采用的坐标系均以坡顶为原点,自坡顶指向坡脚处为  $x$  轴正方向,垂直坡板指向渠槽一侧为  $y$  轴正方向;底板坐标系以阴坡坡脚为原点,自阴坡坡脚指向阳坡坡脚为  $x$  轴正方向,垂直底板向上为  $y$  轴正方向。 $q_m(x)$ 、 $q_s(x)$ 、 $q_e(x)$  为阴、阳坡及底板法向冻胀力分布,Pa; $\tau_m(x)$ 、 $\tau_s(x)$ 、 $\tau_e(x)$  为阴、阳坡及底板切向冻胀力分布,Pa;阴、阳坡板在坡顶处受到顶盖板的法向约束力分别为  $N_{Ay}$ 、 $N_{Fy}$ ,N;  $N_{Bx}$ 、 $N_{Ex}$  为底板对坡板的顶推力,  $N_{By}$ 、 $N_{Ey}$ 、 $N_{Cx}$ 、 $N_{Cy}$ 、 $N_{Dx}$ 、 $N_{Dy}$  为板间其余相互作用力, N,以上各力均以预设方向为正; $w$  为渠顶相应的地下水位,m;  $h$  为断面深度,m;  $\theta$  为坡角,(°);  $l_i$  为坡板长,m;  $l_e$  为底板长,m;  $d$  为板厚,m。

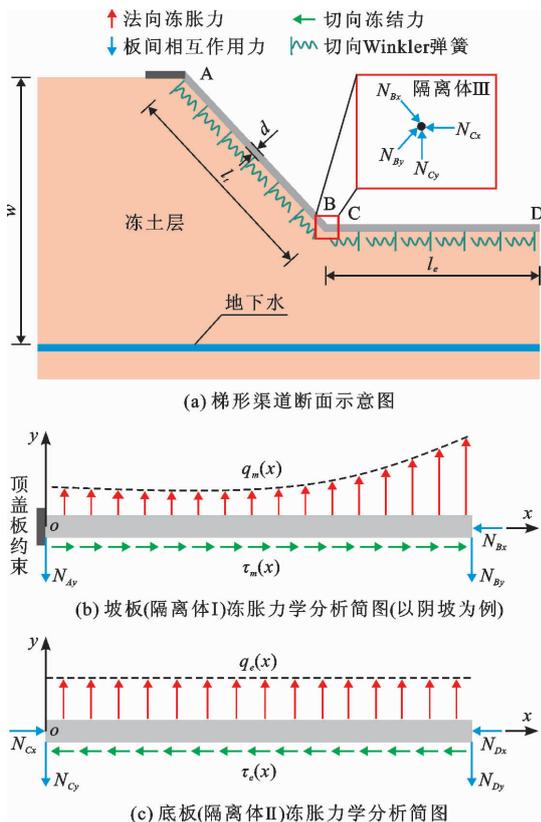


图1 梯形渠道断面示意图及冻胀力学分析简图

### 2.2 法向冻胀力

参考文献[7]、[16]~[23],因衬砌各点至地下水埋深的距离不同,各点基土冻胀率与地下水水位间有如下关系:

$$\eta(x) = a \cdot e^{-b \cdot z(x)} \quad (1)$$

式中: $\eta(x)$  为各点基土冻胀率,%;  $z(x)$  为各点相应的地下水水位,m; $a$ 、 $b$  为由当地气象、土质等条件决定的经验系数; $e$  为自然常数。

结合文献[7]、[18]、[24],衬砌各点法向冻胀

力  $q(x)$  可由公式(2) 计算:

$$q(x) = 0.01E_f \cdot a \cdot e^{-b \cdot z(x)} \quad (2)$$

式中: $E_f$  为冻土层弹性模量,Pa。对坡板而言,有如下几何关系: $z(x) = w - x \cdot \sin \theta$ 。

### 2.3 坡顶法向约束力与板间相互作用力

将公式(2) 所得  $q(x)$  作为外荷载施加到衬砌板上可计算阴坡、阳坡坡顶法向约束力及板间相互作用力。为便于叙述,引入如下记法: $k_1 = 0.01E_f \cdot a \cdot e^{-bw}$ ;  $k_2 = l_i/bh$ ;  $f(t) = (e^{t \sin \theta} - 1)/(b \sin \theta)$ ,其中  $t$  为引入的虚拟量。

(1) 坡板(隔离体 I)。以阴坡坡板为例,取隔离体 I(图1(b)) 为分析对象,由静力平衡条件可分别计算  $N_{Ay}$ 、 $N_{By}$  如下:

$$\begin{cases} N_{Ay} = (1/l_i) \int_0^{l_i} q_m(x)(l_i - x) dx \\ N_{By} = (1/l_i) \int_0^{l_i} q_m(x)x dx \end{cases} \quad (3)$$

将公式(2) 代入公式(3) 可得:

$$\begin{cases} N_{Ay} = k_1 k_2 [f(l_i) - 1] \\ N_{By} = k_1 k_2 \{ e^{bh} - [f(l_i)/l_i] \} \end{cases} \quad (4)$$

类似地可计算阳坡坡板对应的作用力  $N_{Ey}$ 、 $N_{Fy}$ 。

(2) 底板(隔离体 II)。取隔离体 II(图1(c)) 为分析对象,考虑到渠道底板所受冻胀力为均匀分布,故令  $q_e(x) = q_e$ 。依据静力平衡条件可计算  $N_{Cy}$ 、 $N_{Dy}$  如下:

$$N_{Cy} = N_{Dy} = \frac{1}{2} q_e l_e \quad (5)$$

(3) 坡脚处连接结点(隔离体 III)。以阴坡坡脚处板间连接结点为分析对象(图1(a)),由静力平衡条件可分别计算  $N_{Bx}$ 、 $N_{Cx}$  如下:

$$\begin{cases} N_{Cx} = N_{Cy} \cot \theta + N_{By} \sec \theta \\ N_{Bx} = N_{Cy} \sec \theta + N_{By} \cot \theta \end{cases} \quad (6)$$

类似地以阳坡坡脚处板间连接结点为分析对象可分别确定  $N_{Dx}$ 、 $N_{Ex}$ 。

### 2.4 切向冻胀力

此处切向冻胀力是指顶推力及板间相互作用力作用下冻土-衬砌板接触面有相对位移趋势时引起的切向反力。衬砌板为薄板且冻胀作用下其弯曲程度通常较小,故因其自身弯曲引起的接触面相对位移远小于顶托力(对坡板而言)及不对称板间相互作用力(对底板而言)的作用效果,故不考虑衬砌板自身弯曲的影响。

(1) 坡板切向冻胀力。以阴坡为例,坡板切向冻胀力计算简图如图2所示。将坡把板视为一侧受

轴向集中力作用、底部受一维切向约束的矩形梁。在顶推力  $N_{Bx}$  作用下衬砌板有沿渠坡上滑的趋势,故切向冻结力应自坡顶沿衬砌板底面指向坡脚处。因衬砌板为薄板结构,各截面正应力视为均匀分布<sup>[25-26]</sup>,下同。

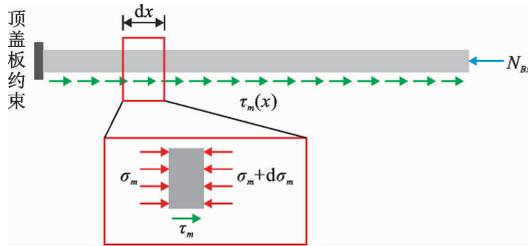


图 2 坡板切向冻结力计算简图(以阴坡为例)

应用微段分析法,取图 2 中微段  $dx$  为分析对象,有  $x$  轴方向的平衡微分方程如下:

$$d\sigma_m(x)/dx + \tau_m(x)/d = 0 \quad (7)$$

式中: $\sigma_m(x)$  为各截面正应力,Pa;  $\tau_m(x)$  为切向冻结力分布,Pa;  $d$  为板厚,m。

为构建以截面切向位移  $u_m(x)$  为基本未知量的控制方程,引入如下本构关系:

$$\sigma_m(x) = E_c \cdot [du_m(x)/dx] \quad (8)$$

式中: $u_m(x)$  为截面切向位移,m;  $E_c$  为混凝土的弹性模量,Pa。对公式(8) 两侧同时求导,则有:

$$d\sigma_m(x)/dx = E_c \cdot [d^2u_m(x)/dx^2] \quad (9)$$

依据 Winkler 假设,即接触面切向应力与相对位移成正比但方向相反,则有:

$$\tau_m(x) = -k_p \cdot u_m(x) \quad (10)$$

式中: $k_p$  为接触面切向刚度,kN/cm<sup>3</sup>。

将公式(9)、(10) 代入公式(7) 可得阴坡板截面切向位移控制微分方程为:

$$\begin{cases} d^2u_m(x)/dx^2 - \mu_m^2 u_m(x) = 0 \\ \mu_m = [k_p/(E_c \cdot d)]^{1/2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mu_m$  为特征系数。

方程式(11) 为二阶齐次线性常系数微分方程,其通解如下:

$$u_m(x) = c_1 \cdot \sinh(\mu_m \cdot x) + c_2 \cdot \cosh(\mu_m \cdot x) \quad (12)$$

有顶盖板约束时,通解式(12) 应当满足的边界条件为:当  $x = 0$  时, $u_m(0) = 0$ ;当  $x = l_e$  时, $\sigma_m(l_e) = -N_{Bx}/d$ 。无顶板约束时,通解式(12) 应当满足的边界条件为:当  $x = 0$  时, $\sigma_m(0) = 0$ ;当  $x = l_e$  时, $\sigma_m(l_e) = -N_{Bx}/d$ 。负号表示顶推力作用下在坡脚处坡板受到压力。引入上述边界条件即可求解微分方程式(11),将求得的解代入公式(10) 可得衬砌板底部切向冻结力分布。

(2)底板切向冻结力。图 3 为底板切向冻结力计算简图。由于阴、阳坡差异, $N_{Cx}$ 、 $N_{Dx}$  的大小有所不同,即底板两端出现不对称板间相互作用力。此时渠道底板与基土接触面将存在相对位移趋势从而产生切向冻结力  $\tau_e(x)$ ,其方向自阳坡坡脚处指向阴坡坡脚处。应用与坡板类似的方法可导出以截面切向位移  $u_e(x)$  为基本未知量的控制微分方程,限于篇幅,不再赘述。该微分方程通解应满足如下边界条件:当  $x = 0$  时, $\sigma_e(0) = -N_{Cx}/d$ ;当  $x = l_e$  时, $\sigma_e(l_e) = -N_{Dx}/d$ 。

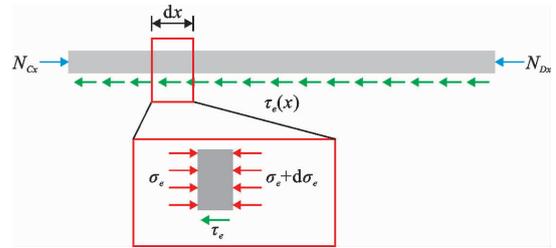


图 3 底板切向冻结力计算简图

### 2.5 截面内力计算

基于前述计算结果,可进一步对截面内力进行计算。

(1) 轴力。对坡板而言,以阴坡为例,其各截面轴力  $N_m(x)$  可通过下式计算:

$$N_m(x) = \int_0^x -\tau_m(x) dx \quad (13)$$

对底板而言,各截面轴力  $N_e(x)$  可通过下式计算:

$$N_e(x) = \int_0^x \tau_e(x) dx - N_{Cx} \quad (14)$$

$\tau_m(x)$ 、 $\tau_e(x)$  以与图 2、图 3 中所示同向为正。

(2) 弯矩。对坡板而言,各截面弯矩  $M_m(x)$  可通过下式计算:

$$M_m(x) = \frac{k_1}{bh} x(x - l_e) [f(x) - 1] \quad (15)$$

由上式可见, $M_m(0) = M_m(l_e) = 0$ ,这与已有研究及理论预测相符。

对底板而言,各截面弯矩  $M_e(x)$  可通过下式计算:

$$M_e(x) = \frac{1}{2} q_e x(x - l_e) \quad (16)$$

### 2.6 计算流程

综合以上分析,可总结计算流程如下:

(1)通过文献调研、模型试验或原型观测确定经验系数  $a$ 、 $b$ ,从而依据公式(2) 可确定冻胀力荷载分布。

(2)将公式(2) 作为外荷载施加到衬砌结构上,由隔离体 I 和隔离体 II 的力矩平衡可确定坡板在顶

部受到盖板施加的约束力  $N_{Ay}$ 、 $N_{Fy}$  及其余板间相互作用力在  $y$  轴方向的分量  $N_{By}$ 、 $N_{Cy}$ 、 $N_{Dy}$ 、 $N_{Ey}$ ，再依据隔离体 III 的静力平衡条件可进一步得到  $x$  轴方向的分量  $N_{Bx}$ 、 $N_{Cx}$ 、 $N_{Dx}$ 、 $N_{Ex}$ 。

(3) 应用 2.4 小节所述方法,可以得到阴坡、阳坡及渠底衬砌板底部所受的切向冻结力  $\tau_m(x)$ 、 $\tau_s(x)$ 、 $\tau_e(x)$ 。

(4) 应用 2.5 小节所述方法,可以确定衬砌板各截面的轴力与弯矩。

(5) 依据工程力学方法,参考文献[7]、[27]可进行抗裂验算及结构稳定性校核。

### 3 算例分析

以新疆维吾尔自治区塔里木灌区某梯形渠道为例进行计算与分析。该渠道采用 C25 混凝土衬砌,板厚为 0.1 m,地下水水位约为 3 m,土质为壤土。底板长度为 1.5 m,断面深度为 1.8 m,坡角为  $45^\circ$ 。参照文献[7]、[18],经验系数  $a$ 、 $b$  分别取值为 44.326、1.1。混凝土弹性模量为 22 GPa。其余参数值见表 1。条件具备时,所需参数应由当地现场试验数据拟合获取,本文结合参考文献取值。冻土层弹性模量按冬季最低温度取值,这是偏安全的。

表 1 实例渠道计算参数取值<sup>[7,18,25,27]</sup>

参数	阴坡	渠底	阳坡
冻土层弹性模量 $E_f/\text{MPa}$	14.29	12.90	11.58
冻土层最低温度 $T/^\circ\text{C}$	-11.9	-9.6	-7.6
接触面切向刚度 $k_p/(\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3})$	0.57	0.51	0.47

#### 3.1 地下水埋深对衬砌板截面弯矩的影响

对塔里木灌区渠道冻害的调查<sup>[17]</sup>表明,局部弯矩过大导致的衬砌板鼓胀、隆起甚至开裂、折断是冻胀破坏的主要类型。截面弯矩计算是判断衬砌是否发生冻胀破坏及估算衬砌板易开裂范围的关键。对

地下水浅埋的开放系统渠道,主要关注地下水补给条件对衬砌板各截面弯矩分布的影响。

图 4 为不同地下水埋深  $w$  (即渠顶相应地下水水位)时阴坡坡板及底板截面弯矩分布。由图 4 可见, $w$  不同时截面弯矩分布的总体变化趋势大致相同,表现为坡板中下部较大、上部较小,底板则中部较大、两侧较小;坡板截面弯矩最大值即危险截面位置约在沿坡面距离坡脚 30%~42% 坡板长处,底板危险截面位置在底板中部附近,与现场调查及已有研究确定的易开裂范围基本相符<sup>[7,18]</sup>,表明估算结果的合理性。此外,地下水补给条件对截面弯矩的量值有显著影响。随着地下水埋深变浅,截面弯矩的量值迅速呈非线性增大,表明地下水埋深越浅,衬砌板因局部弯矩过大而导致冻胀破坏的风险越大,与工程实际相符。

#### 3.2 切向刚度 $k_p$ 对衬砌板截面弯矩的影响

图 5 为不同切向刚度  $k_p$  时坡板截面切向位移及坡板切向冻结力分布。由图 5(a)可见,不同切向刚度  $k_p$  时,阴坡衬砌各截面切向位移的总体趋势变化不大,呈非线性、不均匀分布;由于顶盖板约束,渠坡板顶端切向位移为零,自坡顶向坡脚处逐渐增大,在坡脚处达到最大值,均为压缩位移且在线弹性范围内。此外,不同切向刚度  $k_p$  对各截面切向位移分布有明显的影 响。当  $k_p$  较小时,各截面切向位移趋于线性分布;随着  $k_p$  的增大,截面切向位移逐渐偏离线性分布,且  $k_p$  越大非线性越明显。同时当切向刚度  $k_p$  增大时,各截面切向位移总体呈减小趋势,这与理论预测相符。由图 5(b)可见,不同切向刚度  $k_p$  时渠坡板底部切向冻结力量值自坡顶到坡脚处逐渐增大,坡顶处为零,在坡脚处达到最大值。当  $k_p$  较小时,切向冻结力趋于线性分布,与已有模型根据工程经验采用的简化假设相符;而随着  $k_p$  的增大,切向冻结力逐渐偏离线性分布,且  $k_p$  越大则偏离越大,此时切向冻结力呈明显的非线性分布,线性分布假设将不再适用。

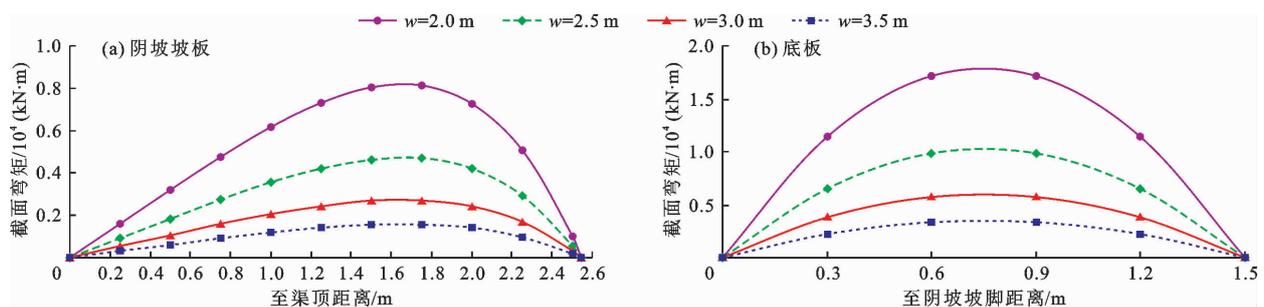


图 4 不同地下水埋深  $w$  时渠道阴坡坡板及底板截面弯矩分布

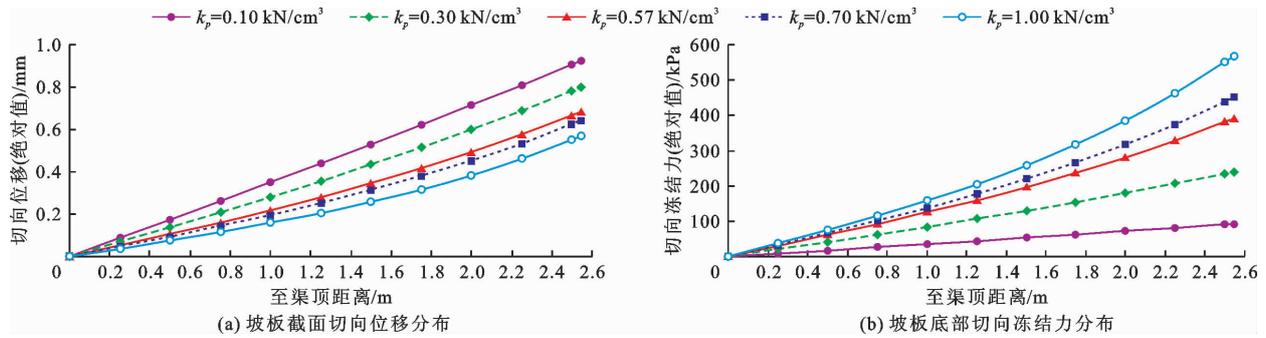


图 5 不同切向刚度  $k_p$  时坡板截面切向位移及坡板底部切向冻结力分布

## 4 讨论

王正中<sup>[28]</sup>以切向冻结约束失效为极限状态同时采用法向冻胀力与切向冻结力的线性分布假设构建了梯形渠道冻胀力学模型,随后弧形底梯形渠道<sup>[29]</sup>、预制板衬砌梯形渠道<sup>[8]</sup>以及三拼式小 U 形渠道<sup>[11]</sup>等其他典型断面型式渠道的类似模型也相继建立。但是由于衬砌结构发生冻胀破坏时并不总是能够到达切向冻结约束失效的极限状态,此类模型往往是偏保守的<sup>[27]</sup>。为此,肖旻等<sup>[9]</sup>针对特定地区的特定气象、土质条件下的具体工程,考虑开放系统下槽形断面各点地下水补给条件的横向差异,采用二阶段法导出了法向冻胀力非线性分布的梯形渠道冻胀力学模型,但该模型中的切向冻结力分布仍采用的是线性分布假设,与实际并不相符。李宗利等<sup>[30]</sup>通过假设切向冻结力与法向冻胀力成正比,得到了梯形渠道衬砌板切向冻结力分布的非线性规律,但未充分论证该假设的合理性。何鹏飞等<sup>[26]</sup>将切向冻结力的影响引入控制方程构建了考虑切向摩擦阻的梯形渠道 Winkler 弹性冻土地基梁模型,其切向冻结力分布的表达式隐含了衬砌板各点同时到达屈服强度的假设,这与实际不符,且未考虑衬砌板自身弯曲的影响。Jiang 等<sup>[31]</sup>在此基础上借鉴赵明华等<sup>[32]</sup>的研究引入衬砌板自身弯曲的影响,构建了考虑法-切向变形耦合效应的梯形渠道冻土地基梁模型,并导出非线性的切向冻结力分布规律,但计算过程繁琐且存在前后模型不一致的问题,即将非耦合模型预先计算的结果作为边界条件引入耦合方程组求解,显然是不完备的。

实际上,由于衬砌板通常较薄且冻胀条件下板的弯曲变形一般也较小,因而切向冻结力引起的弯矩往往可以忽略;同时相对于坡脚处的顶推力(针对坡板)和底板两侧不对称板间相互作用力(针对底板)的作用效果而言,衬砌板自身弯曲引起的接

触界面切向反力也是可以忽略的。在此基础上,本文构建了更加简便、实用的接触面法-切向应力非线性分布的梯形渠道冻胀力学模型。需要指出的是,本文模型没有考虑冻土与结构间的相互作用而是直接获取法向冻胀力分布,计算结果仍然是偏保守但也是偏安全的。考虑到该分布是否合理直接影响到最终结果的准确性,如何更加合理、便捷地确定法向冻胀力分布,既避免如早期结构力学模型那样过于简单,又避免如弹性地基模型那样过于复杂,还有待进一步深入研究。

## 5 结论

(1)在现有模型的基础上,考虑地下水补给条件的横向差异提出了非线性分布法向冻胀力的计算方法,并引入渠基冻土与衬砌板间接触界面切向相互作用的 Winkler 假设导出非线性分布切向冻结力的计算方法,进而构建了接触面法-切向应力非线性分布的梯形渠道冻胀力学模型。

(2)该模型提出的切向冻结力分布计算方法对一侧受集中力作用一侧自由(无顶盖板)、一侧受集中力作用一侧受约束(有顶盖板)以及两侧均受集中力作用(底板)等不同杆端约束条件具有良好的通用性。同时也避免了已有模型需要预先假定切向冻结力分布的不足,更加符合实际。

(3)以新疆维吾尔自治区塔里木灌区某梯形渠道为例分析了不同地下水埋深(即渠顶地下水水位)  $w$  对衬砌板截面弯矩分布的影响规律。结果表明:地下水埋深越浅,则截面弯矩分布的不均匀性越强,最大弯矩的量值迅速呈非线性增大。同时分析了不同接触面切向刚度  $k_p$  对截面切向位移以及衬砌板底部接触面切向冻结力分布的影响。结果表明:当  $k_p$  较小时,截面切向位移及切向冻结力趋于线性分布;随着  $k_p$  的增大,两者逐渐偏离线性分布,且当  $k_p$  越大时非线性分布越明显。

## 参考文献:

- [1] 程传胜,田军仓,王斌,等.旱寒地区U形玻璃钢和混凝土渠道抗冻胀性能的研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(6):173-177.
- [2] 安鹏,邢义川,张爱军,等.“冻土-衬砌结构”非线性问题的简化算法与渠道结构优化[J].水资源与水工程学报,2017,28(4):193-198+204.
- [3] 赵彦琳,吉晔,张宏,等.聚苯板和聚氨酯板渠道保温防冻胀效果及经济性分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):197-201.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王希尧.关于渠道衬砌冻害的初步分析[J].水利水电技术,1979(9):39-42.
- [7] 李甲林,王正中.渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [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] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.开放系统预制混凝土梯形渠道冻胀破坏力学模型及验证[J].农业工程学报,2016,32(19):100-105.
- [10] 宋玲,欧阳辉,余书超.混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J].农业工程学报,2015,31(18):114-120.
- [11] 唐少容,王红雨.三板拼接式小型U形混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型[J].农业工程学报,2016,32(11):159-166.
- [12] 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.
- [13] 黄义,何芳社.弹性地基上的梁、板、壳[M].北京:科学出版社,2005.
- [14] SELVADURAL A P S. Elastic analysis of soil - foundation interaction[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [15] 马巍,王大雁.冻土力学[M].北京:科学出版社,2014.
- [16] QIN Zipeng, LAI Yuanming, YAN Tian, et al. Frost-heaving mechanical model for concrete face slabs of earthen dams in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 91-98.
- [17] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.考虑地下水位影响的现浇混凝土梯形渠道冻胀破坏力学分析[J].农业工程学报,2017,33(11):91-97.
- [18] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等.土的冻结作用与地基[M].北京:科学出版社,2006.
- [19] 李安国,李浩,陈清华.渠道基土冻胀预报的研究[J].水资源与水工程学报,1993,4(3):17-23+33.
- [20] 甘肃省渠道防渗抗冻试验研究小组.甘肃省渠道防渗抗冻试验研究报告[R].兰州:甘肃省水利厅,1985.
- [21] 山西省渠道防渗工程技术手册编委会.山西省渠道防渗工程技术手册[M].太原:山西科学技术出版社,2003.
- [22] 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):1229-1239.
- [23] 盛岱超,张升,贺佐跃.土体冻胀敏感性评价[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):594-605.
- [24] 木下诚一.冻土物理学[M].王异,张志权,译.长春:吉林科学技术出版社,1985.
- [25] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.考虑冻土双向冻胀与衬砌板冻缩的大型渠道冻胀力学模型[J].农业工程学报,2018,34(8):100-108.
- [26] 何鹏飞,马巍,穆彦虎,等.考虑冻胀力和冻结力作用的梯形渠道衬砌冻胀破坏弹性地基梁模型[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4148-4157.
- [27] 王正中,肖旻.渠道冻胀工程力学[M].北京:中国水利水电出版社,2022.
- [28] 王正中.梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J].农业工程学报,2004,20(3):24-29.
- [29] 王正中,李甲林,陈涛.弧底梯形渠道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.
- [30] 李宗利,姚希望,杨乐,等.基于弹性地基梁理论的梯形渠道混凝土衬砌冻胀力学模型[J].农业工程学报,2019,35(15):110-118.
- [31] 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.
- [32] 赵明华,马宾辉,罗松南,等.考虑底面摩阻效应的弹性地基梁微分算子级数法[J].水利学报,2011,42(4):469-476.