

# 弧底梯形复合衬砌渠道冻胀破坏力学模型及其求解

郑源, 汤骅, 姜海波

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

**摘要:**针对弧底梯形断面渠道,考虑复合土工膜和渠基土壤的摩擦力,通过分析复合衬砌渠道的冻胀破坏机理,指出弧底梯形复合衬砌渠道坡板可简化为在冻胀力、冻结力、摩擦力共同作用下的悬臂梁,整个衬砌体属于压弯组合变形结构。通过适当的假设和简化,建立了弧底梯形复合衬砌渠道冻胀破坏力学模型,分别求出渠道坡板和弧形底板内力表达式,并对衬砌板的厚度进行验算。对比混凝土渠道,加入复合土工膜后,衬砌体产生允许范围内的冻胀位移量,使渠基土壤对衬砌体的有效冻胀力和有效冻结力减小,改善了衬砌体本身的受力状态,起到防冻胀破坏的作用,揭示了复合衬砌渠道防冻胀破坏的机理;对比梯形渠道,认为弧底梯形渠道坡板与底板整体结构性更强,反拱作用明显,更有利于渠道的防冻胀破坏。

**关键词:**复合衬砌;弧底梯形断面渠道;冻胀破坏;力学模型;冻胀力

**中图分类号:**TV672      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2015)01-0061-06

**Research on mechanics models of frost-heaving damage on composite lining trapezoidal canal with arc-bottom//**  
ZHENG Yuan, TANG Hua, JIANG Haibo( College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China )

**Abstract:** The composite lining canal is a kind of lining form which combine compound geomembrane and concrete lining structure. In order to improve the performance of the canal of anti-freezing expansion damage, aimed at the lining trapezoidal canal with arc-bottom, the friction of the compound geomembrane and the concrete lining structure are considered. By analyzing the damage mechanism of frost-heaving on the concrete lining of the channel with arc-bottom section, it has been indicated that the slope lining is seen as a cantilever beam under the function of frost-heaving force, frozen force and the friction. Further, it has been found that the slope lining plate and the bottom lining plate are combined deformation members under the loads of bending and compressing. The mechanics models of frost-heaving damage of composite lining canal with arc-bottom are built. The internal forces of the canal slope lining plate and the canal bottom lining plate with arc-bottom are solved and the thickness of the lining plates are assessed. Compared with the concrete canal, the tangential force of constraint of the lining canal is reduced by adding the compound geomembrane because of a number of allowable displacements of frost heave. The stress condition of the lining structure itself is improved, and the distribution of the frost-heave capacity is more balanced. These have played an important role in anti-freezing expansion damage and have disclosed the mechanism of frost-heaving damage. Compared with the trapezoidal canal, the integration of the lining canal with arc-bottom combined with the slope lining plate and the bottom lining plate is better because of its anti-arching effect is obvious and it's of more benefit to anti-freezing expansion damage. To sum up, this study provides some theory basis for the technology of anti-freezing expansion damage of the compound lining canal.

**Key words:** composite lining; trapezoidal canal with arc-bottom; frost-heaving damage; mechanics models; frost-heave force

我国对水资源的需求非常大,而水资源紧缺、浪费现象又十分严重,导致我国面临越来越严峻的农业用水危机,节水措施已成为保持农业持续发展所需解决的重要问题<sup>[1]</sup>。渠道衬砌防渗技术是我国

应用最普遍的节水措施之一,其减少的渗流量高达90%<sup>[2]</sup>。但是在我国季节冻土区存在着土体冻融现象,导致渠道衬砌体因土体冻胀而出现破坏现象,从而降低甚至达不到防渗节水效果。因此,要重点

进行渠道防冻胀研究,关键是要研究渠道衬砌体在冻胀时的受力情况,从力学角度对渠道的冻胀破坏进行分析,揭示渠道冻胀破坏的机理,为渠道防渗、防冻胀技术提供科学依据。

研究表明,混凝土衬砌结构产生的冻胀破坏是由衬砌材料抗拉强度低的内部原因和冻胀变形被约束的外部原因共同造成的<sup>[3-5]</sup>。有研究人员分析了混凝土衬砌渠道的力学特性并进行了内力计算,但并没有考虑复合衬砌渠道中土工膜与渠基土壤的相互作用<sup>[6-10]</sup>。在衬砌结构"可以有一定冻胀位移量"的设计标准和"削减或消除冻胀"的防冻胀设计原则上加入复合土工膜<sup>[11-12]</sup>,在冻胀作用下衬砌体将会在复合土工膜和渠基土壤接触面产生一定的冻胀位移量,使得衬砌体的变形约束减小,从而达到渠道衬砌抗冻胀破坏的目的。笔者曾分析过U形复合衬砌渠道冻胀破坏的力学特征,但将衬砌坡板看作为简支梁,没有考虑到坡板与底板整体性强的特点<sup>[13]</sup>。在刚性混凝土衬砌体冻胀力学模型基础上,建立了复合衬砌渠道弧底梯形断面的冻胀破坏力学模型,进行内力计算,对复合土工膜在衬砌体结构破坏中的影响进行了探讨,分析了影响渠道冻胀破坏的因素,揭示了季节性寒冷冻土区渠道的冻胀机理。

1 力学模型的建立

在有水分补给的条件下,季节性寒冷冻土区的土体将在温度梯度和水分迁移的影响下发生冻结和冻胀,体积随之增大并产生冻胀量。若无外界约束,冻胀量将能够自由释放。但土体的自由冻胀被衬砌体约束,反之土体将会对衬砌体产生约束反力。垂直于衬砌体的冻胀力称作法向冻胀力,平行于衬砌体的力称作切向冻胀力。复合衬砌结构在产生一定程度的冻胀位移量后,作用在衬砌体上的有效冻胀力与有效冻胀力将在土工膜与土壤摩擦力的作用下减小,再与重力、底板与坡板相互约束力共同作用达到平衡。根据以上冻胀破坏的特征及原因,在建立力学模型时作出相应的假设和简化。

1.1 模型基本假设及简化

- a. 将渠基冻结土壤和混凝土衬砌板均视为弹性材料,且混凝土板的弹性模量远大于冻土的弹性模量。
- b. 渠基土壤的固结已经全部完成,不考虑未冻结冻土的压缩效应。
- c. 渠道衬砌体的切向冻胀力在弧形底板上线性分布,在弧形底板底部的值为零;渠道衬砌体的法向冻胀力在弧形底板由阴坡向阳坡减小。切向冻结

力和法向冻胀力在坡板上沿着坡板轴线线性分布,在坡板与弧形底板连接处达到最大值,在顶部为零。

d. 渠道衬砌体在坡底处坡板与弧形底板相互约束,在坡顶处呈自由变形,将衬砌坡板看作悬臂梁。

e. 将混凝土板和复合土工膜看成黏结的整体,在底板顶推力作用下,其与冻结土壤之间产生冻胀位移量时存在摩擦力。摩擦力在弧形底板底部的值为零,沿坡板线性分布。

1.2 渠道断面图、受力图、坡板及底板计算简图

1.2.1 断面图

弧底梯形复合衬砌渠道断面如图1所示(设渠道坡板长为 $L$ ,弧底中心角为 $2\alpha$ ,弧底半径为 $R$ ,衬砌板厚为 $b$ )。

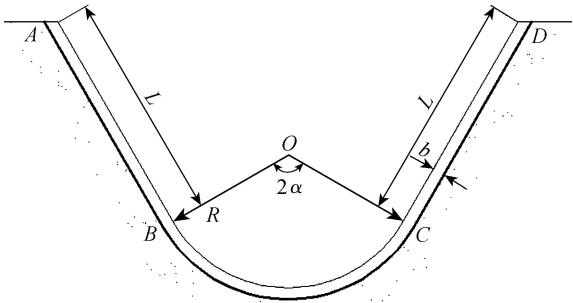


图1 弧底梯形复合衬砌渠道断面

1.2.2 受力图

渠道冻结后,衬砌体在法向冻胀力、冻结力、摩擦力、衬砌板的相互约束力及衬砌体的重力作用下保持平衡。渠道坡板阴坡与阳坡的计算简图相同,只是其上作用荷载数值不同(对阳坡的有关外力及反力在相关变量符号右上角加撇以示区别)。渠道受力情况如图2所示(设最大法向冻胀力为 $q_0$ ,最

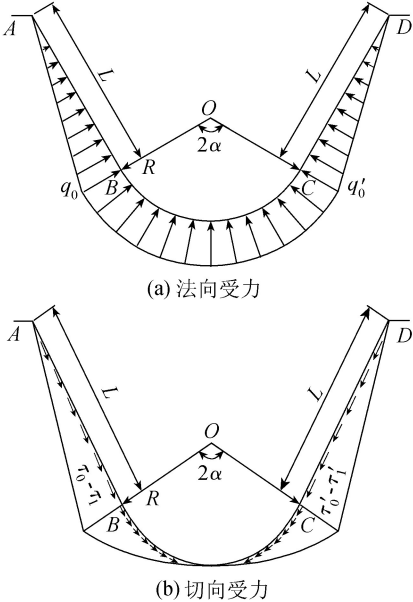


图2 弧底梯形渠道受力情况示意图

大切向冻结力为  $\tau_0$ , 摩擦力为  $\tau_1$ )。根据分析和假设得

$$\frac{q'_0}{q_0} = \frac{\tau'_1}{\tau_1} = \frac{T'}{T} = m \tag{1}$$

渠道在达到冻胀极限平衡状态时,渠道阴坡衬砌板与渠基冻结土壤之间的冻结力达到最大值  $\tau_0$ , 其大小由温度、土壤含水量、土质等因素决定,属于已知反力。最大摩擦力与最大法向冻结力线性相关。根据假设并由受力图建立静力平衡方程。

渠道受力图上的未知力只有  $q_0$ , 列出竖向受力平衡方程如下:

$$\begin{aligned} \sum Y = 0 \tag{2} \\ -\rho gb(2L + 2R\alpha) + \frac{L}{2}(q_0 + q'_0)\cos\alpha + \\ \int_0^\alpha 2q'_0 R\cos\theta d\theta - \frac{L}{2}(\tau_0 + \tau'_0)\sin\alpha + \\ (\tau_1 + \tau'_1)L\sin\alpha + \int_0^\alpha \frac{2(q_0 - q'_0)R\theta}{\alpha}\cos\theta d\theta - \\ \int_0^\alpha \frac{(\tau_0 - \tau_1 + \tau'_0 - \tau'_1)R\theta}{\alpha}\sin\theta d\theta = 0 \tag{3} \end{aligned}$$

其中  $\tau_1 = \mu q_0$   
式中  $\mu$  为土工膜与土壤摩擦因数。由式(1)~(3)联立求出渠道在冻胀破坏作用下达到极限平衡状态时的  $q_0$ 、 $\tau_1$ , 进一步求解各内力。

### 1.2.3 坡板计算简图

根据以上分析,将坡板视为悬臂梁(如图3所示),其受力作用包括沿切向线性分布的冻结力、沿坡板线性分布的法向冻胀力、重力、沿切向分布的摩擦力,以及弧形底板与坡板之间的约束力。 $R_{By}$ 、 $R_{Bx}$ 、 $M_B$  表示弧形底板对坡板的约束力。

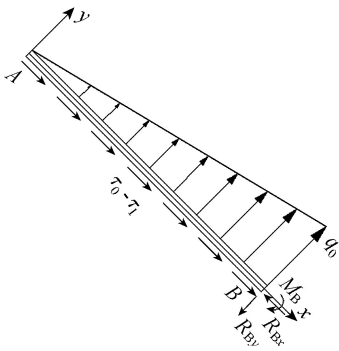


图3 渠道坡板计算简图

### 1.2.4 弧形底板计算简图

渠道弧形底板两端的约束反力因阴坡阳坡往往不相等,这里选取阴坡弧形底板即中心线以左的部分(图4)进行计算。图4中  $N$ 、 $M$ 、 $Q$  表示坡板对底板的约束力, $N_0$ 、 $M_0$ 、 $Q_0$  表示求解截面内力。

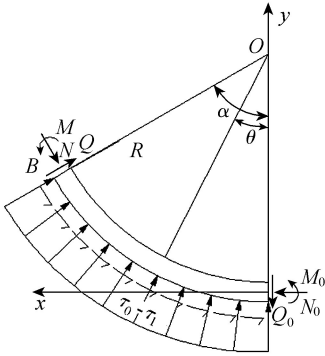


图4 弧形底板计算简图

## 2 力学模型求解

### 2.1 渠道坡板内力计算

坐标系如图3所示。

a. 支座处反力计算式如下:

$$R_{By} = \frac{q_0 L}{2} - \rho gbL\cos\alpha \tag{4}$$

$$R_{Bx} = \frac{\tau_0 L}{2} - \frac{\tau_1 L}{2} + \rho gbL\sin\alpha \tag{5}$$

$$M_B = -\frac{q_0 L^2}{6} + \frac{\rho gbL^2\cos\alpha}{2} + \frac{\tau_0 bL}{4} - \frac{\tau_1 bL}{4} \tag{6}$$

b. 任意截面的轴压力计算式如下:

$$N(x) = \frac{\tau_0 x^2}{2L} - \frac{\tau_1 x^2}{2L} + \rho gbx\sin\alpha \tag{7}$$

c. 任意截面的弯矩计算式如下:

$$M(x) = \frac{\tau_0 bx^2}{4L} - \frac{\tau_1 bx^2}{4L} + \frac{\rho gbx^2\cos\alpha}{2} - \frac{q_0 x^3}{6L} \tag{8}$$

最大弯矩截面

$$x_0 = \frac{\tau_0 b}{q_0} - \frac{\tau_1 b}{q_0} + \frac{2L\rho g b\cos\alpha}{q_0} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} M_{\max} = M(x_0) = & \frac{\tau_0 bx_0^2}{4L} - \frac{\tau_1 bx_0^2}{4L} + \\ & \frac{\rho gbx_0^2\cos\alpha}{2} - \frac{q_0 x_0^3}{6L} \end{aligned} \tag{10}$$

d. 任意截面剪力计算式如下:

$$Q(x) = \frac{q_0 x^2}{2L} - \rho gbxc\cos\alpha \tag{11}$$

各内力分布如图5所示。图5结果表明:坡板轴力单调函数在坡板底部产生最大值;坡板弯矩和剪力在坡板内取得极值,极值位置与参数的取值有关。图中规定正负号按轴力拉正压负、弯矩下侧受拉为正、剪力以隔离体顺时针转动为正。

### 2.2 渠道底板内力计算

以弧底中心处(见图4)为坐标原点,根据静力平衡条件,由  $\sum X = 0$  可得与中心线成  $\theta$  角处的轴力为

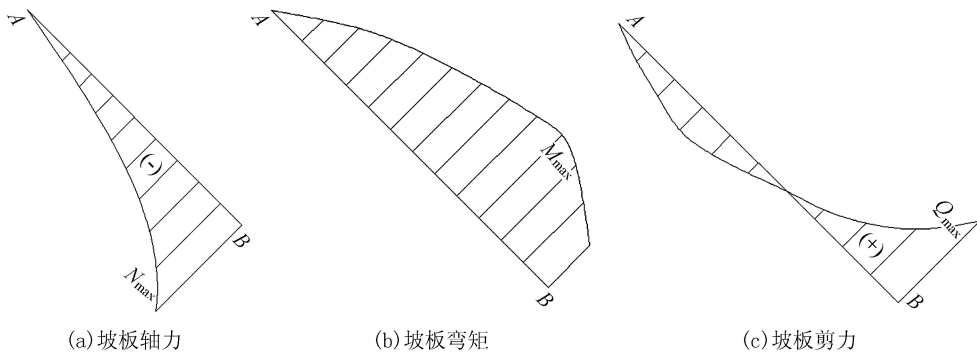


图5 渠道坡板内力示意图

$$\begin{aligned}
 N_{\theta} = & N \cos(\alpha - \theta) + Q \sin(\alpha - \theta) + \sin \theta \int_0^{\alpha-\theta} \rho g b R d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(q_0 - q'_0) R (\varphi + \theta)}{2\alpha} \sin \varphi d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{q_0 + q'_0}{2} R \sin \varphi d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(\tau_0 - \tau_1) R (\varphi + \theta)}{\alpha} \cos \varphi d\varphi \quad (12)
 \end{aligned}$$

由  $\sum M = 0$ , 可得与中心线成  $\theta$  角处的弯矩为

$$\begin{aligned}
 M_{\theta} = & -M + Q R \sin(\alpha - \theta) - N R [1 - \cos(\alpha - \theta)] - \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(\tau_0 - \tau_1) R^2 (\varphi + \theta)}{\alpha} [1 - \cos \varphi] d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{q_0 + q'_0}{2} R^2 \sin \varphi d\varphi - \int_0^{\alpha-\theta} \gamma b R^2 \sin \varphi d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(q_0 - q'_0) R^2 (\varphi + \theta)}{2\alpha} \sin \varphi d\varphi \quad (13)
 \end{aligned}$$

由  $\sum Y = 0$ , 可得与中心线成  $\theta$  角处的剪力为

$$\begin{aligned}
 Q_{\theta} = & Q \cos(\alpha - \theta) - N \sin(\alpha - \theta) + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(q_0 - q'_0) R (\varphi + \theta)}{2\alpha} \cos \varphi d\varphi + \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{q_0 + q'_0}{2} R \cos \varphi d\varphi - \\
 & \int_0^{\alpha-\theta} \frac{(\tau_0 - \tau_1) R (\varphi + \theta)}{\alpha} \sin \varphi d\varphi - \\
 & \cos \theta \int_0^{\alpha-\theta} \rho g b R d\varphi \quad (14)
 \end{aligned}$$

弧形底板内力如图6所示。由图6可以看出:

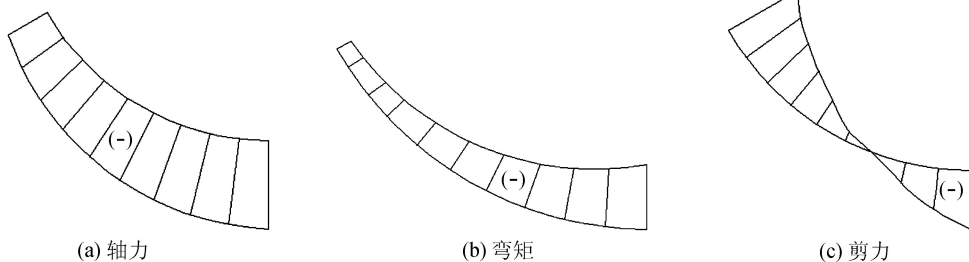


图6 弧形底板内力示意图

弧形底板轴力和剪力为单调函数;弯矩受拉侧在弧形底板内表面,体现了弧形底板的反拱作用。图中规定正负号按轴力拉正压负、弯矩下侧受拉为正、剪力以隔离体顺时针转动为正。

### 2.3 混凝土衬砌板厚度验算

混凝土衬砌板最大弯矩处的最大拉应变是否超过允许值决定了衬砌板是否胀裂;在此过程中,将坡板和弧形底板视为压弯构件,一般不考虑剪力的影响。

a. 渠道衬砌坡板:坡板最大弯矩处拉应力最大,其最大拉应力计算式如下:

$$\sigma_0 = \frac{6M(x_0)}{b^2} - \frac{N(x_0)}{b} \quad (15)$$

其中  $x_0$  按式(9)计算。抗裂条件验算:

$$\frac{\sigma_0}{E_c} \leq \varepsilon_t \quad (16)$$

式中  $E_c$ 、 $\varepsilon_t$  分别为 C20 混凝土的极限拉应变及弹性模量,可查相关手册得到。

b. 渠道衬砌弧形底板:弧形底板最大弯矩处拉应力值最大,其最大拉应力计算式如下:

$$\sigma'_0 = \frac{6M(\theta_0)}{b^2} - \frac{N(\theta_0)}{b} \quad (17)$$

抗裂条件同式(16)。

### 3 应用实例

某弧底梯形渠道,由 C20 混凝土构成,材料密度  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ,边坡板长  $L = 3.5 \text{ m}$ ,弧底半径  $R = 3.24 \text{ m}$ ,衬砌板厚  $b = 0.15 \text{ m}$ ,坡角  $\alpha = 33.69^\circ$ 。渠床

土壤为粉质壤土,土工膜与土壤摩擦角为 $5.33^{\circ}$ ,阴坡、阳坡冻土层最低温度分别为 $-15^{\circ}\text{C}$ 、 $-12^{\circ}\text{C}$ ,需判断该衬砌结构是否会发生冻胀破坏。 $\text{C20}$ 混凝土的极限拉应变 $\varepsilon_t=1.0\times 10^{-4}$ ,弹性模量 $E_c=260\text{ GPa}$ 。

### 3.1 复合衬砌形式结构计算

**步骤1** 最大切向冻结力计算。由经验公式得 $\tau_0=c+mt=-9.4\text{ kPa}$ ( $c$ 、 $m$ 与土质、水分等有关, $c$ 取 $0.4$ , $m$ 取 $0.6$ )。

**步骤2** 复合衬砌渠道最大法向冻胀力、摩擦力计算。由式(1)~(3)可得 $q_0=7.08\text{ kPa}$ , $\tau_1=0.66\text{ kPa}$ 。

**步骤3** 复合衬砌渠道坡板内力计算及冻胀破坏判断。按式(9)计算得 $x_0=3.15\text{ m}$ ,按式(7)计算得 $N(x_0)=18.63\text{ kN}$ ,按式(8)计算得 $M(x_0)=5.05\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。按式(15)计算得 $\sigma_0=1.22\text{ MPa}$ ,而混凝土板的极限拉应力 $\sigma_t=\varepsilon_t E_c=2.6\text{ MPa}$ , $\sigma_0<\sigma_t$ ,所以坡板不会发生冻胀破坏。

**步骤4** 复合衬砌渠道弧底板内力计算及冻胀破坏判断。经计算,最大弯矩发生在弧形底部, $\theta_0=0^{\circ}$ , $N(\theta_0)=30.95\text{ kN}$ , $M(\theta_0)=10.29\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;同理,最大拉应力 $\sigma'_0=2.43\text{ MPa}$ , $\sigma_0<\sigma_t$ ,所以弧形底板不会发生冻胀破坏。

### 3.2 素混凝土板衬砌形式结构计算

**步骤1** 最大法向冻胀力计算。素混凝土衬砌体在不考虑摩擦力情况下对应的冻胀力 $q_{01}=7.27\text{ kN}$ 。

**步骤2** 坡板内力计算及冻胀破坏判断。计算得:最大弯矩截面 $x_{01}=3.08\text{ m}$ , $N(x_{01})=18.87\text{ kN}$ , $M(x_{01})=5.25\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;最大拉应力 $\sigma_{01}=1.27\text{ MPa}$ , $\sigma_{01}<\sigma_t$ ,衬砌坡板不会发生冻胀破坏,与实际情况相符。

**步骤3** 弧形底板内力计算及冻胀破坏判断。最大弯矩发生在弧形底部, $\theta_{01}=0^{\circ}$ , $N(\theta_{01})=32.76\text{ kN}$ , $M(\theta_{01})=9.89\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;同理,最大拉应力 $\sigma'_{01}=2.53\text{ MPa}$ , $\sigma'_{01}<\sigma_t$ ,弧形底板不会发生冻胀破坏,与实际情况相符。

### 3.3 计算结果分析

计算结果表明,坡板弯矩最大值在坡板顶部往下 $2/3$ 处偏下,弧形底板弯矩最大值在中心线附近,则衬砌板容易在此处产生冻胀破坏现象,这与实际工程情况吻合。

复合衬砌渠道与素混凝土板渠道相比,作用于衬砌体的最大有效冻胀力和有效切向约束力分别减小了 $2.6\%$ 和 $7\%$ ,坡板与弧形底板抗拉强度分别提高了 $3.9\%$ 和 $4\%$ ,该结果表明复合衬砌渠道通过允许一定的冻胀位移量使作用于衬砌体的有效冻胀力和有效切向约束力减小,从而提高抗拉强度,达到防

冻胀的目的。

## 4 结 论

**a.** 渠道的冻胀破坏是在土质、水分、温度等因素共同作用下的复杂过程。通过适当假设,根据渠道冻胀破坏的特征和规律,建立弧底梯形复合衬砌渠道冻胀力学模型,将渠道冻胀破坏表达为最大切向冻结力的函数,切向冻结力可根据经验或试验确定,将渠道冻胀破坏过程简单量化。

**b.** 加入复合土工膜后,衬砌体在冻胀力作用下将向上滑动,从而产生一定的冻胀位移量,使渠基土壤对衬砌体的有效冻胀力和有效冻结约束减小,衬砌体内力值减小,抗裂强度提高,达到复合衬砌渠道防冻胀破坏的目的。当渠坡板与弧底板发生较大冻胀错位时,渠坡板可能发生滑动失稳。在实际工程中应加强复合防渗衬砌渠道坡板和弧形底板之间的伸缩缝管理,或使用整体现浇结构,以防止滑动失稳。

**c.** 弧底梯形复合衬砌渠道的弧形底板反拱作用明显,与梯形断面渠道相比,其变形恢复能力与抗冻胀破坏能力明显增强。

## 参考文献:

[1] 肖旻,贺兴宏,李寿宁. 梯形渠道混凝土衬砌冻胀破坏的力学模型探讨[J]. 东北水利水电,2010(10):58-61. (XIAO Min, HE Xinghong, LI Shouning. Discussion on mechanical model of frost swelling destroyfor concrete lining of trapezoid channel [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2010 (10): 58-61. (in Chinese))

[2] 李安国. 我国渠道防渗工程技术综述[J]. 防渗技术, 2000,6(1): 1-4,16. (LI Anguo. The reviewed of canal seepage control engineering technology in China [J]. Technique of Seepage Control,2000, 6(1): 1-4,16. (in Chinese))

[3] 王正中. 梯形渠道混凝土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. (WANG Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heavingdamage of concrete lining trapezoidal open canal [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(3):24-29. (in Chinese))

[4] 刘旭东. 混凝土衬砌渠道抗冻胀技术措施及其机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.

[5] 艾树衡,陈清芬,余祥全,等. 混凝土及膜料复合渠道防渗技术的研究[J]. 防渗技术,1996,2(3):9-12. (AI Shuheng, CHEN Qingfen, YU Xiangquan, et al. Study of technique for canal seepage prevention by composite of concrete and membrane [J]. Technique of Seepage Prevention, 1996,2(3):9-12. (in Chinese))

- [6] 李甲林. 渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [7] 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.
- [8] 李超. 弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀力学模型及数值模拟[D]. 石河子:石河子大学, 2010.
- [9] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道混凝土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. (WANG Zhengzhong, LI Jialin, CHEN Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):18-23. (in Chinese))
- [10] 刘旭东, 王正中, 闫长城, 等. 基于数值模拟的双层薄膜防渗衬砌渠道抗冻胀机理探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):29-35. (LIU Xudong, WANG Zhengzhong, YAN Changcheng, et al. Exploration on anti-frost heave mechanism of lining canal with double films based on computer simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):29-35. (in Chinese))
- [11] 姜海波, 侍克斌. 坝坡复合土工膜防渗体的抗滑稳定分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6):15-18. (JIANG Haibo, SHI Kebin. Stability analysis against slide of anti-seepage structure indam slope with composite geomembrane [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(6):15-18. (in Chinese))
- [12] 姜海波, 侍克斌, 刘亮. 复合土工膜与粗粒料的摩擦特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(3):86-89. (JIANG Haibo, SHI Kebin, LIU Liang. Experimental research on friction characteristics between compsite geomembrane and coarse-grained materials [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(3):86-89. (in Chinese))
- [13] 郑源, 汤骅, 姜海波. U形复合衬砌渠道冻胀破坏力学模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(11):80-84. (ZHENG Yuan, TANG Hua, JIANG Hai-bo. Research on mechanics models of forst heaving damage of composite linling U-shape canals [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11):80-84. (in Chinese))

(收稿日期:2013-10-14 编辑:高建群)

(上接第36页)

- [7] 顾德华, VERHAGEN H J, van de VEN M. 碎石聚氨酯护坡应用的初步研究[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线 (2008-02-19). <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200802-178>.
- [8] LOCK M C, van der GEEST H G, LAZONDER C. Early colonization of algal communities on polyurethane bonded aggregate: a field and laboratory study [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 56:438-442.
- [9] ROBERT C. Breakers lose their punch to PUR [J]. Modern Plastics Worldwide, 2006, 83(6):166.
- [10] 戴林军. 堆石坝面膜防渗结构聚氨酯无砂混凝土垫层工程特性[D]. 南京:河海大学, 2012.
- [11] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000:466-470.
- [12] 陈晓龙, 赵强, 王惠明. SJ—601 水泥改性剂的性能及应用[J]. 工业建筑, 2003, 33(6):49-51. (CHEN Xiaolong, ZHAO Qiang, WANG Huiming. Properties and applications of SJ-601 cement modifying agent [J]. Industrial Architecture, 2003, 33(6):49-51. (in Chinese))
- [13] 郑木莲. 多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J]. 交通运输工程学, 2006, 16(4):41-47. (ZHENG Mulian. Permeability coefficient and test method of porous concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 16(4):41-47. (in Chinese))
- [14] 马威. 多孔混凝土透水基层材料设计研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- [15] SL352—2006 水工混凝土试验规程[S].
- [16] 且尔宁 W. 土木工程师用水泥化学与物理性能[M]. 曾镜鸿, 译. 北京:中国建筑工业出版社, 1987.

(收稿日期:2014-10-30 编辑:熊水斌)

(上接第60页)

- [6] 田伟平, 李惠萍, 高冬光. 沿河路基冲刷机理与冲刷深度[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(4):39-42. (TIAN Weiping, LI Huiping, GAO Dongguang. Scour depth and mechanism of highway subgrade along river[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4):39-42. (in Chinese))
- [7] 马保成, 田伟平, 李家春. 山区沿河公路水毁危险性评价方法的研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3):224-229. (MA Baocheng, TIAN Weiping, LI Jiachun. Assessment of flood-damage hazard of highway along river in mountainous areas[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3):224-229. (in Chinese))
- [8] 郝伟. 关于堤防道路功能分类的思考[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5):47-50. (HAO Wei. Reflections on function classification of levee road [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2013, 11(5):47-50. (in Chinese))

(收稿日期:2013-11-01 编辑:周红梅)