

# 整体式 U 形渠道不同断面结构抗冻胀性研究

王玉宝<sup>1,2</sup>, 王 亮<sup>1,2</sup>, 程森浩<sup>1,2</sup>, 胡战峰<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省桃曲坡水库灌区管理局, 陕西 铜川 727031)

**摘 要:** 针对倾角与渠道衬砌抗冻胀性定量关系存在不足的问题, 以河套灌区 D80 整体式 U 形渠道为例, 结合力学模型和数值模拟, 分析不同条件下适用于当地冻胀环境的整体式 U 形渠道断面结构。结果表明: 倾角越小渠道越窄深, 渠顶水平冻胀量越大, 渠底应力越大; 反之, 倾角越大渠道越宽浅, 渠底竖向冻胀量越大。渠基土冻胀性、渠道混凝土衬砌强度和厚度对渠道抗冻胀性影响较大。对于亚黏土基土, 选择 0.07 m 厚衬砌, 10° 倾角为宜; 对于粉土基土, 选择 0.08 m 厚衬砌, 13° 倾角为宜。

**关 键 词:** U 形渠道; 力学模型; 数值模拟; 冻胀

中图分类号: S 277; TV 698.26

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)09-1341-07

## Study on Frost Heave Resistance of Different Section Structures of U-Shaped Canal

WANG Yu-bao<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>1,2</sup>, CHENG Sen-hao<sup>1,2</sup>, HU Zhan-feng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Taoqupo Reservoir Irrigation Management Bureau of Shaanxi Province, Tongchuan 727031, China. Corresponding author: WANG Liang, E-mail: w\_133084845@163.com)

**Abstract:** Aiming at the insufficient quantitative relationship between the obliquity and frost heave performance of canal lining, the mechanical model and numerical simulation were combined to study suitable U-shaped canal cross-section structure for local frost heave environment under different conditions, taking the D80 U-shaped canal as an example in Hetao irrigation district, Inner Mongolia. The results show that the smaller the obliquity and the narrower and deeper the canal, the greater the horizontal frost heave at the top of canal and the larger the stress at the bottom of canal. Conversely, the larger the obliquity and the wider and shallower the canal, the greater the vertical frost heave at the bottom of canal. The frost heave property of foundation soil and strength and thickness of concrete lining have a great effect on the frost heave resistance of canal. For loam soil, it is appropriate to choose 0.07 m thick lining, 10° obliquity, and for silt soil, choose 0.08 m thick lining, 13° obliquity.

**Key words:** U-shaped canal; mechanical model; numerical simulation; frost heave

在我国东北、西北和华北寒冷地区, 渠道工程普遍存在着严重的冻害问题。冬季土体水分迁移冻结, 体积膨胀, 渠道衬砌在较大冻胀力下, 发生鼓胀、开裂、隆起架空和滑塌等破坏, 不仅缩短渠道使用寿命, 降低防渗性能, 而且影响灌区的正常运行<sup>[1]</sup>。

近年来, 相关学者对土体冻胀研究逐渐成熟, 采用水-热-力三场耦合模型模拟土体冻胀过程<sup>[2-3]</sup>; Lai 等<sup>[4]</sup>和 He 等<sup>[5]</sup>通过冻胀试验和数值模拟, 探究了粉土和亚黏土在寒冷环境下的冻胀表现; Liu 等<sup>[6]</sup>通过数值模拟, 指出 U 形渠道衬砌在冻胀作用下的变形破坏情况; 高靖<sup>[7]</sup>、高凤<sup>[8]</sup>

通过数值模拟分析衬砌受力的不均匀程度、渠道冻结力和冻胀力变化的离散程度,推导出渠道适宜倾角范围.上述模型仅对 U 形渠道进行结构计算,未针对不同土质、混凝土衬砌等因素提出定量关系,此外,缺少力学模型与数值模拟对渠道抗冻胀性的结合分析.

本文首先建立整体式 U 形衬砌渠道冻胀破坏力学模型,通过反算得到极限状态下倾角与切向冻结力的关系;然后运用 COMSOL Multiphysics 软件对不同倾角断面结构进行模拟,分析应力和冻胀量的变化规律,优化倾角取值;最后在考虑抗冻胀性和占地面积的条件下,找到适应于当地冻胀环境的 U 形渠道断面结构.

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究拟以 D80 整体式 U 形渠道为例展开研究,其断面形式如图 1 所示.

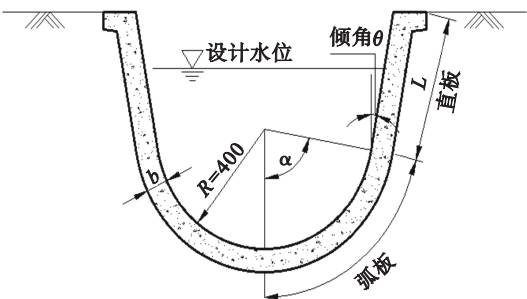


图 1 D80 断面结构 (mm)  
Fig. 1 D80 sectional structure

1.2 研究方法

1.2.1 力学模型

力学模型基于以下假设:冻胀力对称分布,两侧均以最不利的阴坡计算;冻土的弹性模量远小于混凝土的弹性模量,只考虑土体对衬砌板施加冻胀力并提供被动冻结约束<sup>[9]</sup>.如图 2 所示,法向冻胀力  $q$  在直板处呈线性分布,直板与弧板相接处与基土牢固冻结,该点的法向冻胀力为最大值,并在圆弧段均匀分布;切向冻胀力  $\tau$  沿直板线性分布,在直板与弧板相接处取得最大值,且随半圆心角  $\alpha$  的增大呈线性递减,在渠底处为零<sup>[9]</sup>.

建立平衡方程(考虑渠道自重):

$$\sum F_y = Lq\cos\alpha + 2qR\sin\alpha + 2F\sin\alpha - L\tau\sin\alpha - 2\left(\frac{R\tau\sin\alpha}{\alpha} - R\tau\cos\alpha\right) - 2\gamma b(L + R\alpha) = 0, \quad (1)$$

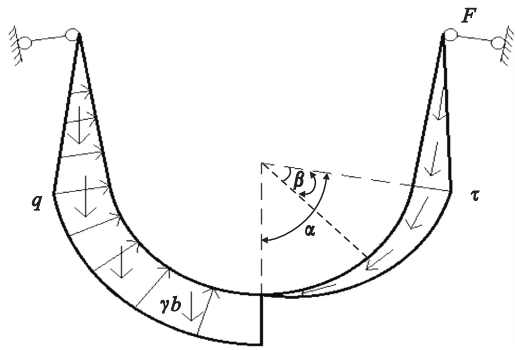


图 2 整体式 U 形渠道受力图  
Fig. 2 Force diagram of U-shaped canal

$$\sum F_x = 0. \quad (2)$$

求解式(1),得冻胀力:

$$q = \frac{\frac{2R\tau(\sin\alpha - \alpha\cos\alpha)}{\alpha} + \tau L\sin\alpha + 2F\sin\alpha + 2b\gamma(L + \alpha R)}{2(R\sin\alpha - 0.5L\cos\alpha)}. \quad (3)$$

式中: $R$  为弧板半径; $L$  为直板长度; $\tau$  为切向冻胀力; $b$  为混凝土衬砌厚度; $\gamma$  为混凝土容重.负温度下渠基土和渠道衬砌冻结为一个整体,衬砌和基土在冻胀作用下共同发生位移,而渠道衬砌上下部分发生位移不协调,渠基土为阻止这种位移趋势而产生了法向冻胀力  $F$ ,将此力简化为作用于渠顶的铰支座,支座力为  $F$ ,如图 2 所示,则有

$$F = L\left(\frac{q}{10} - \frac{3\gamma b\cos\alpha}{8}\right) + \frac{qR^4(\cos\alpha - 1)^2 + qLR^3\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4}\right)}{2\sin\alpha\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4}\right)}. \quad (4)$$

直板和弧板弯矩可由式(5),式(6)计算:

$$M_L = \frac{qx^3}{6L} - Fx - \frac{x^2bt}{2L} - \frac{\gamma bx^2\cos\alpha}{2}, \quad (5)$$

$$M_\beta = -M_F - M_\tau + M_q - M_G. \quad (6)$$

直板和弧板轴力可由式(7),式(8)计算:

$$F_{N直} = \frac{\tau x}{3} + \gamma bx\sin\alpha, \quad (7)$$

$$F_{N弧} = \frac{\beta\tau(2\alpha - \beta)}{2\alpha} + \left(\frac{qL}{2} - F - \gamma bL\cos\alpha\right)\sin\beta + \left(\frac{\tau L}{3} + \gamma bL\sin\alpha\right)\cos\beta + b\gamma(\cos(\alpha - \beta) - \cos\alpha). \quad (8)$$

渠道混凝土衬砌视为受压受弯构件,由于混凝土抗拉强度小,以极限拉应力作为破坏指标,拉应力计算式为

$$\sigma_1 = \left(\frac{6M_{\max}}{b^2}\right) + \frac{F_N}{b}. \quad (9)$$

式中： $M_{\max}$  为渠道弯矩的极大值； $F_N$  为该点轴力。当混凝土衬砌处于极限状态时，衬砌出现开裂并逐渐造成破坏。以混凝土抗拉强度为抗裂标准，计算衬砌各倾角下不同混凝土等级、厚度的极限抗冻胀倾角，计算结果见图 3。

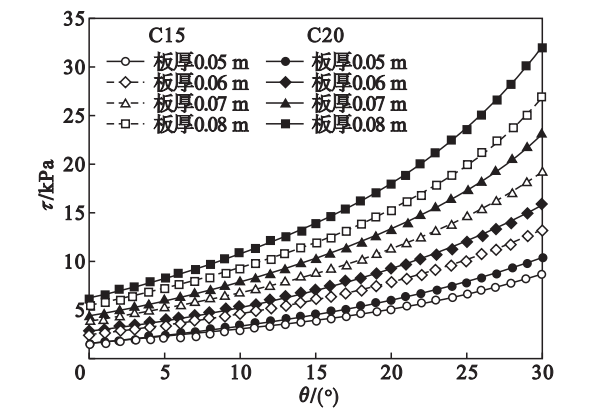


图 3 极限切向冻结力与倾角关系  
Fig. 3 Relation of tangential limit freezing force and obliquity

根据图 3 极限切向冻结力 - 倾角的关系进行公式拟合，提出整体式 U 形渠道极限切向冻结力 - 倾角计算公式，见式 (10)，确定系数范围为 0.993 7 ~ 0.999 5。

$$t_{\max} = m_0 e^{n_0 \theta} \tag{10}$$

式中： $\theta$  为渠道倾角； $m_0, n_0$  为与混凝土土质相关的拟合系数，取值见表 1。

表 1 极限切向冻结力公式拟合系数  
Table 1 Fitting coefficients of tangential limit freezing force formula

板厚/m	C15		C20	
	$m_0$	$n_0$	$m_0$	$n_0$
0.05	1.64	0.056	1.76	0.061
0.06	2.69	0.053	2.98	0.056
0.07	4.01	0.052	4.49	0.054
0.08	5.56	0.051	6.31	0.053

注：C 表示混凝土强度等级，下同。

以河套灌区亚黏土和粉土为渠基土，最大切向冻结力与土壤温度密切相关，在 -15℃ 以内可根据式 (11) 计算<sup>[9]</sup>：

$$\tau = c + m |t| \tag{11}$$

式中： $t$  为土壤最低温度； $c, m$  为与土质有关的系数，取值见表 2。

1.2.2 数学模型

土体冻胀过程基于以下假设：土颗粒为刚性体，在冻结过程中土颗粒不变形；土壤各向处于局部热平衡状态，即局部输出输入热流相

等，温度梯度不发生变化；土质均匀，为各向同性材质。根据以上假设，建立数学耦合方程，当温度低于冻结温度时，冻结土壤的传热方程可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\left( c_p + L \rho_w \frac{\partial \theta_i}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) \tag{12}$$

式中： $c_p$  为质量恒压热容； $\lambda$  为导热系数； $L$  为相变潜热； $T$  为温度。土壤中的水以液态水和冰的形式存在。在负温度下，水分迁移方程表示为

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} = \nabla [ K(\theta_u) \nabla \theta_u + K(\theta_u) ] - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \tag{13}$$

式中： $\theta_u$  为非饱和土壤冻结时的未冻水含量； $\theta_i$  为冰含量； $K(\theta_u)$  为土壤导湿系数，随未冻水量降低呈指数关系减小<sup>[11]</sup>，亚黏土和粉土导湿系数分别由式 (14) 和式 (15) 表示。

$$K(\theta_i) = 2.9657 \cdot \theta_{ul}^{11.2593} \tag{14}$$

$$K(\theta_2) = 2.4135 \cdot \theta_{u2}^{11.5865} \tag{15}$$

冻结过程中，已冻土中部分水变成冰，其余的水仍保持未冻状态，冻土中的未冻水、冰与负温度保持动态平衡关系<sup>[11]</sup>，如式 (16) 所示：

$$\frac{\theta_u}{\theta_i} = \left( \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^B, T < T_{\text{ref}} \tag{16}$$

式中： $T_{\text{ref}}$  为土壤中未冻水的冻结温度； $B$  为与土质因素有关的经验常数，取值见表 2。引入 Heaviside 阶梯函数对土体在冻结区和未冻结区的物理参数进行表述，冻结锋面在  $[-d, d]$  区间内可以平滑过渡，表达式为

$$H = \begin{cases} 1, & T \geq d; \\ \frac{3T}{4d} - \frac{T^3}{4d^3} + \frac{1}{2}, & -d < T < d; \\ 0, & T \leq -d. \end{cases} \tag{17}$$

则土体导热系数和质量恒压热容分别表示为

$$\lambda = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) H(T, d), \tag{18}$$

$$c_p = c_f + (c_u - c_f) H(T, d). \tag{19}$$

式中：下标 f 和 u 分别表示冻结区和未冻结区。

应力场方程为<sup>[10]</sup>

$$Fv + \nabla \sigma = 0, \tag{20}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [ \nabla u + (\nabla u)^T ], \tag{21}$$

$$\sigma = \sigma_0 + C(\varepsilon - \varepsilon_{\text{in}}). \tag{22}$$

式中： $v, u$  为位移矢量； $\sigma$  为正应力； $\varepsilon_{\text{in}}$  为温度应变； $\sigma_0$  为初始应力； $C$  为弹性矩阵。

水分逐渐从未冻结区向冷端迁移，形成冰透镜体，随着体积膨胀引起土壤冻胀变形<sup>[6]</sup>，则冻胀引起的应变增量可以表示为

$$\varepsilon = (T - T_{\text{ref}})^{-1} \times \begin{bmatrix} (\theta_u + \theta_i - n_s)/2 & 0 & 0 \\ 0 & (\theta_u + \theta_i - n_s) & 0 \\ 0 & 0 & (\theta_u + \theta_i - n_s)/2 \end{bmatrix}.$$

(23)

式中, $n_s$  为土壤孔隙率. 冻土强度与温度紧密相关,冻土弹性模量  $E$  和温度  $T$  之间的相关性可由经验公式<sup>[11]</sup>表示:

$$E = a_0 + b_0 |T|^{0.6}.$$

(24)

式中, $a_0$  和  $b_0$  为经验系数,取值见表 2.

根据实地勘测以及文献[12–13]选取河套灌区土壤参数,见表 2.

表 2 土壤参数		
Table 2 Parameters of soil		
参数	粉土	亚黏土
$c/\text{kPa}$	0.4	0.4
$m/(\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.6	0.4
$a_0$	68	11.4
$b_0$	75	35
$B$	0.47	0.56
$\eta/\%$	4	2.5
$\lambda_u/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.39	0.90
$\lambda_t/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.86	1.46
$c_u/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2 166	2 718
$c_t/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1 639	2 065

材料计算参数根据文献[6]设定,如表 3 所示.

表 3 材料参数			
Table 3 Material parameters			
材料	导热系数	比热容	密度
	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
混凝土	1.58	970	2 400
水	0.6	4 200	1 000
冰	2.2	2 100	900

1.2.3 有限元模型

D80 整体式 U 形渠道有限元网格划分如图 4 所示.

初始值:土体初始温度为  $6\text{ }^\circ\text{C}$ ,含水率为 0.3.左右边界指定横向位移为 0,下边界指定竖向位移为 0,上边界为自由边界.左右边界和下边界为绝热边界(零热梯度);上边界表面热通量为牛顿冷却定律方程<sup>[10]</sup>,如式(25)所示:

$$n(\lambda \nabla T) = h_c (T_{\text{amb}} - T).$$

(25)

式中: $h_c$  为对流传热系数; $T_{\text{amb}}$  为外界环境温度.选取河套灌区临河站 2017 年 11 月至翌年 2 月的气象温度作为渠道外界环境温度,如图 5 所示.

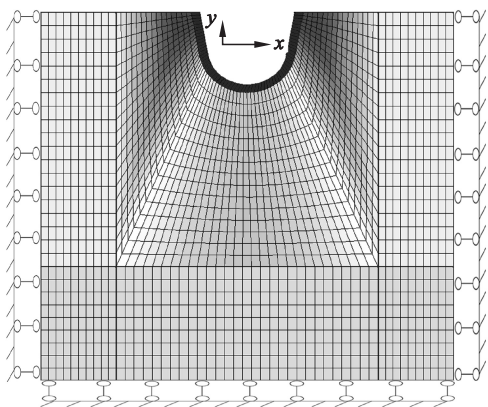


图 4 U 形渠道网格  
Fig. 4 U-shaped canal meshing

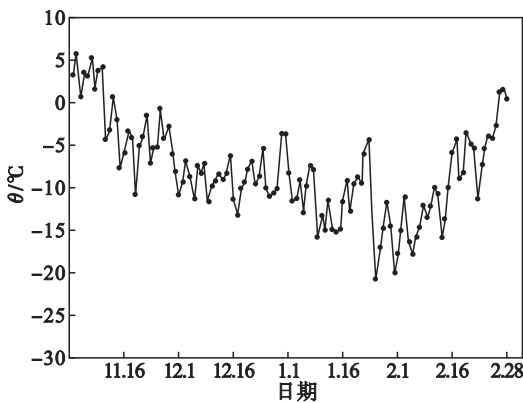


图 5 临河站日平均温度(2017. 11—2018. 03)  
Fig. 5 Average daily temperature of Linhe Station

2 结 果

2.1 力学模型计算

取  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  为土壤达到的最低温度,联立式(10)和式(11)求解得到极限状态下,整体式 U 形渠道的极限抗冻胀倾角,计算结果见表 4. 极限抗冻胀倾角与土壤冻胀性正相关;与渠道衬砌厚度和强度负相关;同一厚度下,混凝土强度增大,倾角减小,其减小程度基本不变.

表 4 极限抗冻胀倾角				
Table 4 Limit anti-frost heave obliquities				
厚度/m	亚黏土		粉土	
	C15	C20	C15	C20
0.05	25°	22°	33°	29°
0.06	16°	14°	24°	21°
0.07	10°	7°	18°	15°
0.08	5°	2°	13°	9°



2.2 数值模拟

图 6 所示为可以看出温度在近地表土层变化大,到达一定深度后趋于稳定;渠坡冻深较大,渠底冻深较小,最大冻深位于距渠顶 1.2 m 处,与实际观测值一致.

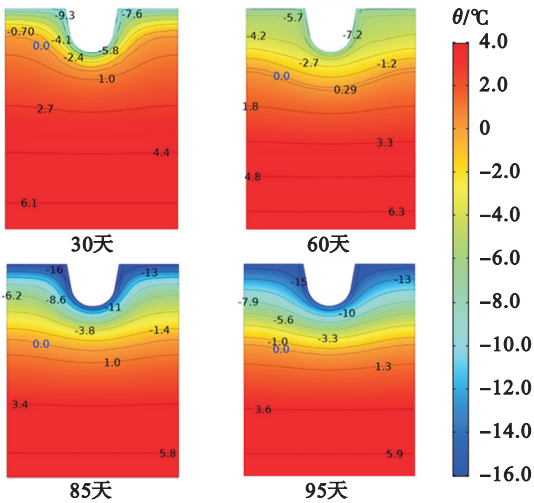


图 6 温度场  
Fig. 6 Temperature field

图 7 所示为第 85 天亚黏土基土渠道衬砌不同倾角断面下的应力分布及形变. 渠道衬砌内侧受压,外侧受拉,应力集中于渠底部;从渠底至渠顶,应力逐渐减小,倾角增大应力逐渐降低;随倾

角增大,直板向渠道内侧倾斜的程度逐渐减小,而弧板上抬趋势相对明显.

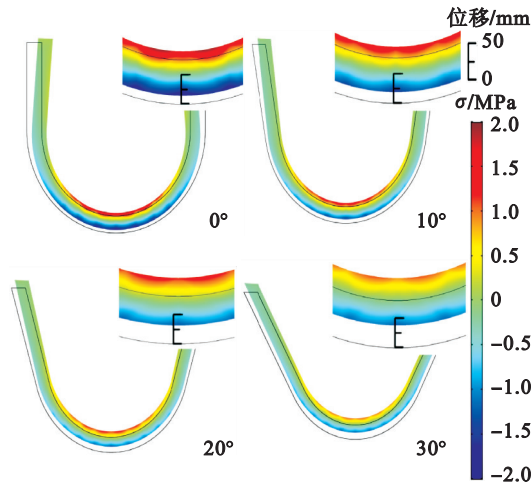


图 7 各断面应力及形变 (形变放大 10 倍)  
Fig. 7 Frost heaving stress and deformation in various sections ( magnification variable 10 times)

如图 8 所示,第 85 天粉土冻胀量均大于亚黏土;水平冻胀量随倾角增大而减小;直板沿渠顶方向水平冻胀量增量明显. 竖向冻胀量分布呈拱形,渠道衬砌呈上抬趋势,弧板上抬程度大于直板;倾角越大,竖向冻胀量越大;倾角减小,竖向冻胀量曲线趋于水平,弧板与直板各点差异逐渐减小.

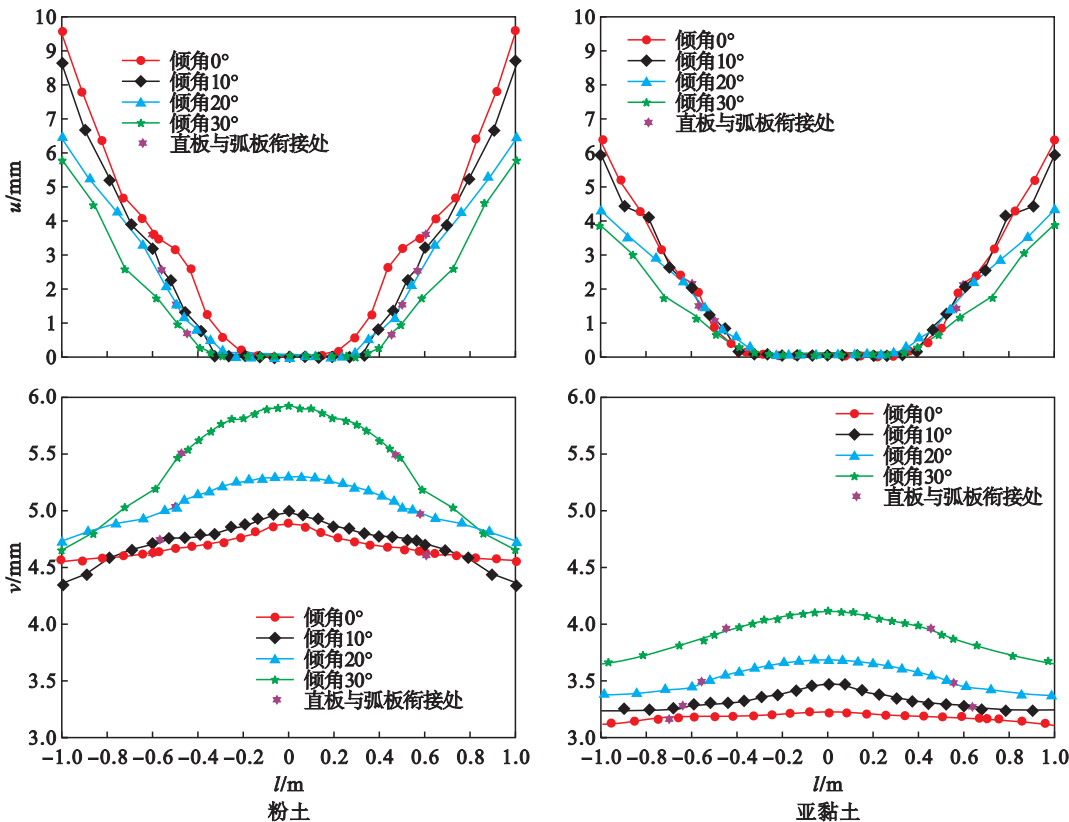


图 8 粉土和亚黏土水平冻胀量 ( $u$ ) 及竖向冻胀量 ( $v$ ) 对比  
Fig. 8 Comparison of horizontal frost heave ( $u$ ) and vertical frost heave ( $v$ ) between silt and loam

如图 9 所示,正值表示压应力,负值表示拉应力. 倾角从 0°到 10°,粉土、亚黏土最大拉和压应力分别减小了 22. 8%, 26. 3% 和 24. 6%, 23. 6%; 从 10°到 20°, 分别减小了 10. 2%, 9. 8%, 和

18. 1%, 16. 2%; 从 20°到 30°, 分别减小了 8. 2%, 8. 9% 和 11. 4%, 10. 5%. 表面倾角增大, 最大拉、压应力值逐渐削弱, 但削弱程度随着倾角的增大而减小.

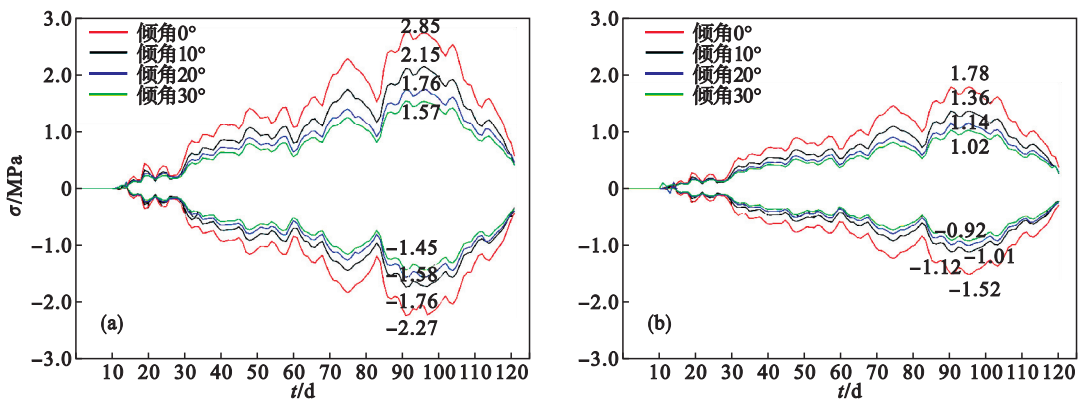


图 9 渠底应力对比  
Fig. 9 Comparison of frost stress at the bottom of canal  
(a)—粉土; (b)—亚黏土.

3 讨 论

倾角选择适当, 不仅可以依靠渠道结构削弱冻胀力, 而且节约施工和维护成本. 在 10°~20°范围内显著削减了水平冻胀量和竖向冻胀量; 同时应力削减程度相对较大, 抗冻胀性提升迅速. 由图 10 可知, 相同土质下, 渠道衬砌随厚度增加, 抗冻胀性增量逐渐递减. 10°~20°范围面积增加趋势放缓, 占地面积适中, 此区间内倾角断面既能节约成本, 又具备一定抗冻胀能力. 综上所述, 整体式 U 形渠道亚黏土基土, 选择厚度 0.07 m, 倾角 10°; 粉土基土, 选择厚度 0.08 m, 倾角 13°.

倾角计算公式, 根据渠道衬砌的切向冻结力得到不同渠基土土质、混凝土衬砌强度和厚度下极限抗冻胀倾角, 简化倾角求解过程, 计算方便.

2) 整体式 U 形渠道衬砌渠底下表面最易被拉裂; 倾角越小渠道越窄深, 渠顶水平冻胀量越大, 渠底应力越大; 反之, 倾角越大渠道越宽浅, 渠底竖向冻胀量越大, 但渠道各点相对抬升较小, 渠道整体上抬, 不易破坏.

3) 整体式 U 型渠道设计倾角在 10°~20°范围内, 衬砌水平和竖向冻胀量较小, 抗冻胀性提升显著, 占地面积适中; 对于亚黏土基土, 选择厚度 0.07 m, 10°倾角断面结构; 对于粉土基土, 选择厚度 0.08 m, 13°倾角断面结构.

致谢 本文在计算、模拟及撰写过程中, 得到了王正中教授、姜宗科教授、张爱军教授、何武全副教授, 以及博士研究生王昇的宝贵建议和帮助, 在此表示感谢.

参考文献:

[ 1 ] 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. ( Zhang Guo-jun, Lu Li-guo. Important factors that influence lining canal frost heaving damage [ J ]. China Rural Water and Hydropower, 2012 ( 9 ) : 105 - 108. )  
[ 2 ] Zhou J Z, Li D Q. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil [ J ]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 72: 43 - 49.  
[ 3 ] Wei S, Cao X Y, Zhao G T, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of soil type and fineness on soil frost heave behavior [ J ]. Cold Regions Science & Technology, 2018, 148: 148 - 158.  
[ 4 ] Lai Y M, Wu D Y, Zhang M Y. Crystallization deformation of a saline soil during freezing and thawing processes [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 463 - 473.

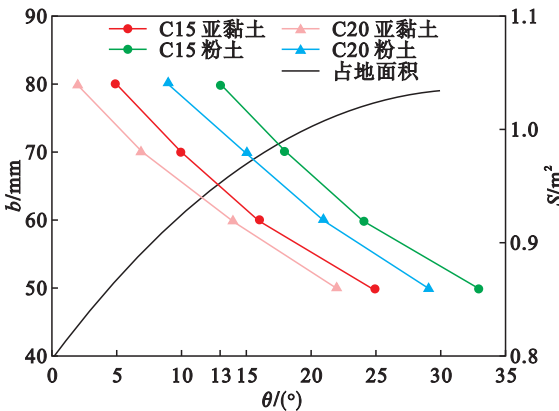


图 10 倾角影响因素对比  
Fig. 10 Comparison of affecting factors of obliquity

4 结 论

1) 提出整体式 U 形渠道极限切向冻结力 -

- 

- [12] Zhang Y, Zeng Q F, Mu G D, et al. A design for a novel open, intelligent and integrated CNC system based on ISO10303-238 and PMAC[J]. *Technical Gazette*, 2018, 2(25):470-478.
- [13] Gross J L, Yellen J, Zhang P. Handbook of graph theory [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013: 164-195.
- [14] Huang Y. Research on the improvement of Dijkstra algorithm in the shortest path calculation [C]//Advances in Engineering Research. Paris: Atlantis Press, 2017: 745-749.