

DOI: 10.11779/CJGE2022S2044

# 考虑冻胀及水力断面双优梯形最佳断面

徐虎城<sup>1</sup>, 刘雨昕<sup>2</sup>, 王 羿<sup>3</sup>, 韩孝峰<sup>3</sup>, 迪娜·吐尔孙阿力<sup>1</sup>

(1. 新疆额尔齐斯河投资开发(集团)有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 寒区梯形混凝土渠道衬砌易产生冻胀破坏, 在断面的设计过程中应同时兼顾抗冻胀和输水效率。采用冻土水热力耦合分析模型对梯形渠道进行冻胀破坏分析, 归纳其冻胀变形与应力分布规律。随即对渠道水力学设计参数和抗冻胀设计参数进行双目标优化, 参照渠道抗冻胀设计规范要求, 提出了寒区输水渠道的水力+抗冻胀双优设计断面。

**关键词:** 抗冻胀; 水力最佳; 梯形渠道; 水热力耦合

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0203-04

**作者简介:** 徐虎城(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事寒区水利工程施工与管理。E-mail: wangyimu@126.com。

## Double-optimization design of trapezoidal canals considering frost-heave resistance and hydraulic section

XU Hu-cheng<sup>1</sup>, LIU Yu-xin<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>3</sup>, HAN Xiao-feng<sup>3</sup>, DINA Tursun Ali<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Irtysh River Investment and Development (Group) Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2. College of Environment and

Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Geotechnical Engineering Department,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The linings of trapezoidal concrete canals in cold regions are prone to frost-heave damage, and both the frost-heave resistance and the water transport efficiency should be taken into account in the design of section. The frost-heave failure of a trapezoidal canal is analyzed by using the coupled analysis model for coupled heat-moisture-stress, and the frost-heave deformation and stress distribution are summarized. Then, the hydraulic design parameters and the anti-frost-heave design parameters of the canal are optimized with the two objectives. According to the requirements of the anti-frost-heave design code of the canal, the double-optimization design section of the water transport canal in the cold region is proposed.

**Key words:** frost-heave resistance; hydraulic optimization; trapezoidal canal; coupled heat-moisture-stress

## 0 引 言

北疆供水渠道在进行渠道设计时, 不仅仅要考虑经济最优和保证流量最优的问题, 还需要考虑渠道的冬季冻胀破坏。梯形渠道占中国输水渠道的比例较大, 应用较广。因此, 梯形渠道的冻胀问题受到了北方寒区广泛关注。王正中等<sup>[1-2]</sup>对梯形渠道冻胀模型进行了理论分析, 将梯形渠道考虑为在切向冻胀力、法向冻胀力的以及衬砌板约束下的简支梁, 王正中等<sup>[3]</sup>、刘旭东等<sup>[4]</sup>、李爽等<sup>[5]</sup>用数值模拟的方法模拟梯形断面形式下冻胀的规律, 得到了温度场, 位移场沿着渠道分布情况。

本文主要研究不同梯形断面情况下, 以北疆某供水工程总干渠退水渠段梯形渠道为例, 对该渠道用comsol进行数值模拟, 对不同的断面渠道进行参数化模拟, 得到最佳参数范围, 并结合水力最佳断面, 得到双优断面形式, 为寒区渠道设计提供参考。

## 1 力学模型的建立

### 1.1 基本假设

渠基土冻结时, 土体、水和冰之间的相互作用的微观结构及动态过程相当复杂, 目前很难准确模拟整个冻胀过程。为了便于分析, 对其进行适当的简化, 以便抓住影响冻结过程中及冻胀变形的特征, 主要假设如下<sup>[6]</sup>: ①根据现场及室内试验研究, 假设冻土是均匀连续各向同性体; ②尽管土的冻胀与其温度、水分、土质密切相关, 对具体工程当水分及土壤条件确定时土体最终冻胀主要取决于温度, 将水分迁移对冻土的体积影响, 以线膨胀系数表达; ③根据试验研究假定相变温度在同一种土中和同种外力条件下为常值, 即暂取相变温度为

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y321009, Y322008)

收稿日期: 2022-12-08

\*通信作者 (E-mail: yiwang@nhri.cn)

0℃<sup>[7]</sup>；④由于渠道为细长结构，不考虑长方向上土颗粒对温度的影响，选取平面应变问题进行模拟。

1.2 热传导方程

根据以上假设，将温度热传递视为二维瞬态热传递的过程，建立二维热传导控制方程：

$$\left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中  $T$  为温度； $\lambda_x$ ， $\lambda_y$  分别是冻土沿  $x$ ， $y$  方向的导热系数； $\rho$  为土体的密度； $c$  为土体的比热容； $t$  为时间。

1.3 本构方程

冻土属于冷胀热缩材料，冻土在冻结过程中水冻结成冰，除了原位水冻结体积膨胀，还有从未冻结区向冻结区迁移的水分冻结成冰，本文将原位水以及迁移水冻结成冰的体积膨胀以关于温度  $T$  的函数的线膨胀系数表示。因此，土体的本构方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu \sigma_y}{E} + \alpha(T - T_{\text{ref}}), \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu \sigma_x}{E} + \alpha(T - T_{\text{ref}}), \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1 + \mu)}{E} \tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_x$ ， $\varepsilon_y$  为正应变； $\gamma_{xy}$  为剪应变； $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  为正应力； $\tau_{xy}$  为剪应力； $E$  为弹性模量； $\mu$  为泊松比， $\alpha$  为混凝土或者冻土自由冻胀时的热膨胀系数； $T$  为计算温度； $T_{\text{ref}}$  为参考温度。

2 计算模型

2.1 原型概况

本文选择北疆地区某输水渠道退水渠段的梯形渠道（图 1）为研究对象，原型渠道的基本情况如表 1，2 所示，并对该模型渠道进行了冻胀模拟分析计算，因原型渠道各部位坡向，土质，水分不同，在模型边界设置时对阴阳破和渠堤分别对温度和土体冻胀率赋值。

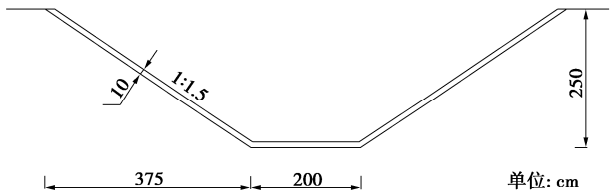


图 1 北疆输水渠道尺寸

Fig. 1 Sizes of a canal in Northern Xinjiang

2.2 有限元模型

有限元计算模型为：①原型梯形断面渠道冻胀数值模拟；②梯形断面渠道冻胀“参数化”断面渠道数值模拟。

表 1 渠道各部位的表面温度以及冻结期

Table 1 Surface temperatures and freezing periods of various parts of canal

部位	月平均表面温度/(℃)			冻结期、(月-日)
	12 月	1 月	2 月	
阴坡	-14.92	-18.85	-10.72	11-27—02-27
渠底	-14.56	-16.22	-9.15	11-27—02-26
阳坡	-12.55	-14.75	-10.54	11-27—02-27

表 2 原型渠道基本情况

Table 2 Basic information of prototype canal

部位	渠床土质	基土干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	冻深 $h$ /cm	冻胀量 $\Delta h$ /cm	冻胀率 $\eta$ /%
阴坡	砂砾石	1.80	171	5.0	2.92
渠底			159	4.4	2.77
阳坡			146	3.7	2.53

有限元模型如图 2 所示，选取各表面温度接近原型渠道，渠道两边设置为热绝缘边界，下边界为固定温度边界取 10℃，阴坡边界温度取冻结期平均值 -14.8℃，渠底温度取 -13.3℃，阳坡温度为 -12.6℃。几何模型如图 2 所示，渠底长 2.0 m，渠坡的横向长度为 3.75 m，坡比为 1.5，基础底面向下取 2.5 m，左右边界取 0.75 m。模型将衬砌板与冻土作为一个整体进行数值模拟，力学的边界设置时，左右边界设置为辊支撑，底部设置指定位移 0。

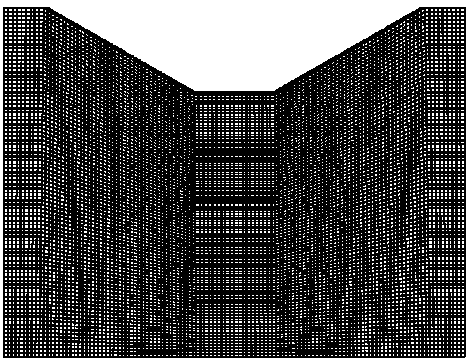


图 2 梯形断面有限元网格图

Fig. 2 Finite element grids of trapezoidal canal section

2.3 参数取值

参考文献[5]中线膨胀系数按照  $\eta/T_{\text{min}}$  取值， $\eta$  为冻胀率， $T_{\text{min}}$  为相应部位月平均表面温度的最小值。由式（2），将  $T - T_{\text{ref}}$  看成 1℃，那么可以将线膨胀系数  $\alpha$  考虑跟温度  $T_{\text{min}}$  相关的函数，数值上与冻胀率相等。未冻土与混凝土的导热系数参考文献[3]，冻土的导热系数与土体的未冻水含量相关，冻土融土导热系数比与未冻水含量相关<sup>[9]</sup>，模型渠道的未冻水含量选取 19.4%，因此冻土的导热系数为未冻土导热系数的 0.9 倍。

3 计算结果分析

3.1 温度场

图 3 可以看出: 接近于渠底的温度分布接近于一组平行的直线, 0℃等温线以上, 由于未冻水冻结导致剧烈相变, 该区域导热系数小, 因此等温线较密集, 温度梯度比较小; 0℃等温线以下, 导热系数较大, 等温线较稀疏。阴坡冻深为 162 cm, 渠底冻深为 146 cm, 阳坡的冻深为 141 cm。与表 3 模型试验较符合, 最大相对误差为 8.2%。

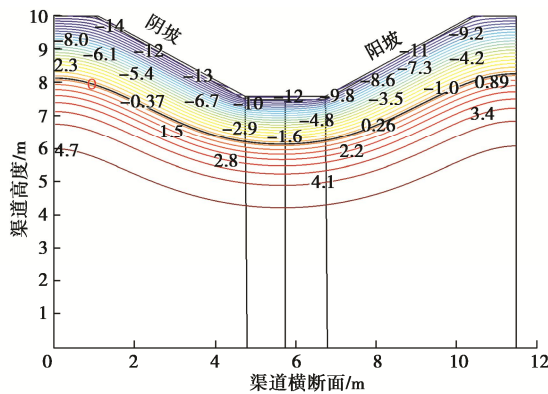


图 3 渠道温度场分布  
Fig. 3 Distribution of temperature field of canal

表 3 材料热力学参数

Table 3 Thermodynamic parameters of materials				
介质	弹性模量 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\nu$	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C})$	线膨胀系数 $\alpha / ^\circ\text{C}^{-1}$
混凝土	$2.4 \times 10^{10}$	0.167	1.580	$1.1 \times 10^{-5}$
冻土	$4.6 \times 10^7$	0.330	1.188 <sup>[9]</sup>	阴坡 2.92%、渠底 2.77%、阳坡 2.53%
未冻土	$1.5 \times 10^7$	0.375	1.320	0

3.2 位移场

如图 4 所示的是模拟得到的结果与试验结果进行对比, 模型试验结果冻胀量边坡较大, 渠底较小。模型试验的冻胀量整体比模拟冻胀量大, 因为模型试验所用的衬砌板受到边坡的约束较大, 且衬砌板厚度小于模拟设定厚度。模拟得到渠底冻胀量比较平缓而试验得到的渠底中间部位冻胀量大而两边小, 模拟设定的衬砌板是整体现浇型板, 在冻胀力的作用下容易产生整体变形; 而模型试验的衬砌板分布较为离散。

3.3 “参数化” 位移场模拟结果

根据梯形断面的设计规范要求, 应满足: ①渠道边坡系数应不小于允许最小边坡系数, 应不大于允许最大边坡系数,  $1 \leq m \leq 2$ 。②渠道的宽深比应满足规

范给定的要求,  $0.8 < b/h < 3.5$ 。

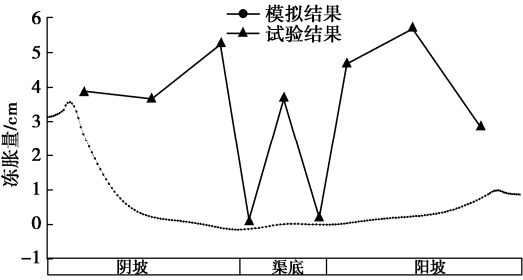


图 4 法向冻胀量比较

Fig. 4 Comparison of normal frost-heave quantity

根据要求, “参数化” 分析模拟了宽深比  $\beta$  一定时, 不同边坡比的渠道断面冻胀量情况; 和边坡比一定时, 不同宽深比的渠道断面冻胀量情况。

由图 5, 宽深比一定时, 边坡比越小, 渠坡的法向冻胀量越大;  $m=2$  时, 左侧阴坡法向冻胀量最大为 5.2 cm, 阳坡为 1.7 cm。  $m=1$  时, 阴坡法向冻胀量最大值为 3.3 cm。由图 6, 边坡比一定时, 宽深比对法向冻胀量影响不大。

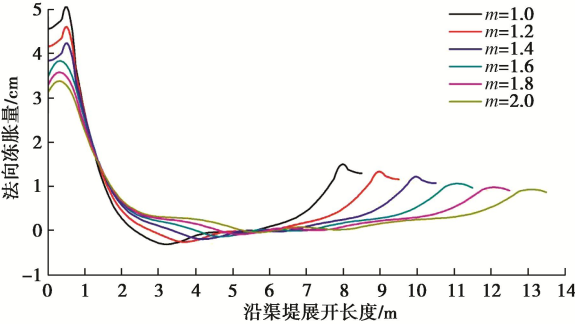


图 5 不同坡比法向冻胀量比较

Fig. 5 Comparison of normal frost-heave quantity under different slopes

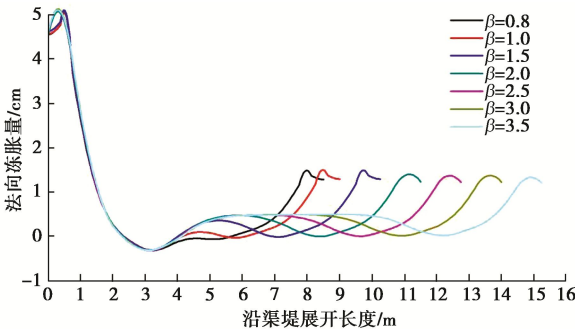


图 6 不同宽深比法向冻胀量比较

Fig. 6 Comparison of normal frost-heave quantity under different breadth depth ratios

4 水力最佳断面

从设计角度考虑水力最佳断面通常是指过水流量一定, 所要求的过水断面面积最小, 也就是所需要的材料最少, 施工且最方便<sup>[12]</sup>。或者是过水断面面积一

定, 所通过的流量最大。

考虑最小冻胀量, 所以采用边坡比为 2 的冻胀断面。水力学中考虑流量一定, 过水断面面积最小可采用以下公式计算宽深比<sup>[13]</sup>:

$$\beta=2(\sqrt{1+m^2}-1) \quad (3)$$

将相关参数代入式 (3), 可得到考虑水力冻胀最优宽深比为 2.472。

## 5 结 语

本文利用 comsol 有限元软件, 对北疆供水渠道以及渠基土冻胀破坏规律进行有限元分析, 与试验数据对比, 基本与试验数据相似。对不同坡比以及不同宽深比的渠道进行有限元模拟分析, 发现坡比影响冻胀量的大小, 坡比越大, 渠道冻胀量越小。理论分析受力情况易得坡比越大越能释放变形, 符合实际。再结合水力最佳断面的公式, 可以得到最佳宽深比。最终的断面形式能有效的防止冻胀, 且满足水力断面要求。为北疆地区渠道防冻胀断面设计提供了理论支撑。

## 参考文献:

- [1] 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. (WANG Zheng-zhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 24 - 29. (in Chinese))
- [2] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 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. (WANG Zheng-zhong, LI Jia-lin, CHEN Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 18 - 23. (in Chinese))
- [3] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 1 - 7. (WANG Zheng-zhong, LIU Xu-dong, CHEN Li-jie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 1 - 7. (in Chinese))
- [4] 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 Xu-dong, WANG Zheng-zhong, YAN Chang-cheng, et al. Exploration on anti-frost heave mechanism of lining canal with double films based on computer simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 29 - 35. (in Chinese))
- [5] 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 Zheng-zhong, GAO Lan-lan, 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. (in Chinese))
- [6] 陈立杰, 王正中, 刘旭东, 等. 高地下水位灌排渠道衬砌结构抗冻胀数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(9): 66 - 70. (CHEN Li-jie, WANG Zheng-zhong, LIU Xu-dong, et al. Simulation analysis of channel frost heave under high groundwater level[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(9): 66 - 70. (in Chinese))
- [7] 柯洁铭. 人工冻土冻胀数值模拟分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2004. (KE Jie-ming. Numerical Simulation of Artificial Freezing Method Induced Soil Frost Heave[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004. (in Chinese))
- [8] 李安国, 陈瑞杰, 杜应吉, 等. 渠道冻胀模拟试验及衬砌结构受力分析[J]. 防渗技术, 2000(1): 5 - 16. (LI An-guo, CHEN Rui-jie, DU Ying-ji, et al. Simulation test of canal frost heave and stress analysis of lining structure[J]. Technique of Seepage Control, 2000(1): 5 - 16. (in Chinese))
- [9] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental Study on Water Migration in Frozen Soil[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [10] 渠道防渗工程技术规范: GB50288-1999. [S]. (Technical specification for seepage control engineering of canals: GB50288-1999. [S]. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范: SL 18—2004[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technique specification for seepage prevention engineering on canal: SL 18—2004[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))
- [12] 吕宏兴. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. (LÜ Hong-xing. Hydraulics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002. (in Chinese))

(编校: 孙振远)