

DOI: 10.11779/CJGE2022S2044

考虑冻胀及水力断面双优梯形最佳断面

徐虎城¹, 刘雨昕², 王 昊³, 韩孝峰³, 迪娜·吐尔孙阿力¹

(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: 寒区梯形混泥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: wangyimutou@126.com。

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

XU Hu-cheng¹, LIU Yu-xin², WANG Yi³, HAN Xiao-feng³, DINA Tursun Ali¹

(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^[1-2]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结力、法向冻胀力的以及衬砌板约束下的简支梁, 王正中等^[3]、刘旭东等^[4]、李爽等^[5]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主要特征, 主要假设如下^[6]: 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°C^[7]; 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; λ_x , λ_y 分别是冻土沿 x , y 方向的导热系数; ρ 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 ε_x , ε_y 为正应变; γ_{xy} 为剪应变; σ_x , σ_y 为正应力; τ_{xy} 为剪应力; E 为弹性模量; μ 为泊松比, α 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_{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坡和渠堤分别对温度和土体冻胀率赋值。

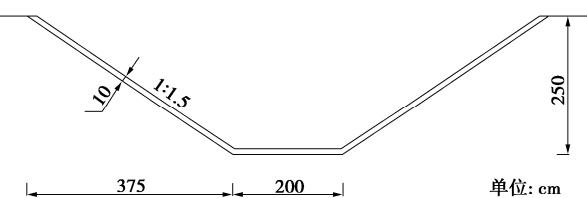


图 1 北疆输水渠道尺寸

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/(°C)			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 ⁻³)	冻深 h/cm	冻胀量 $\Delta h/\text{cm}$	冻胀率 $\eta/\%$
阴坡			171	5.0	2.92
渠底	砂砾石	1.80	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°C, 阴坡边界温度取冻结期平均值 -14.8°C, 渠底温度取 -13.3°C, 阳坡温度为 -12.6°C。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。

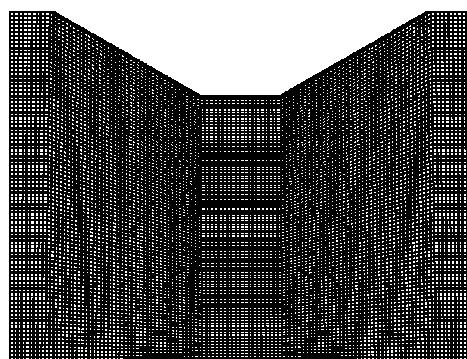


图 2 梯形断面有限元网格图

Fig. 2 Finite element grids of trapezoidal canal section

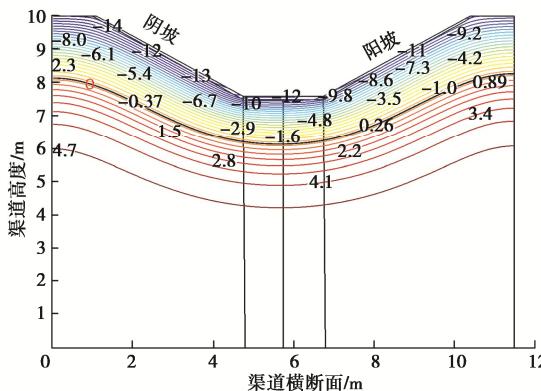
2.3 参数取值

参考文献[5]中线膨胀系数按照 η/T_{\min} 取值, η 为冻胀率, T_{\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°C, 那么可以将线膨胀系数 α 考虑跟温度 T_{\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^[9], 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°C 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°C 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%。



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^[13]:

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

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. 梯形渠道砼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. 弧底梯形渠道砼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]. 水力学报, 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 Xun-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)