

季节性冻土区引水暗渠的临界埋深数值分析

陈武¹, 董元宏², 李双洋¹, 徐湘田¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 在季节性冻土地区, 输水暗渠受低温作用, 不但引起混凝土结构的冻胀破坏, 还将影响暗渠内的引水水体温度, 导致水体结冰及暗渠阻塞. 因此, 需要对季节性冻土地区的暗渠结构在不同埋深情况下的温度场进行数值计算, 确定其临界埋深. 通过瞬态温度场的导热微分方程, 采用迦辽金法推导出温度场的二维有限元公式, 根据甘肃引洮工程的工程地质勘探报告及施工设计图纸, 建立了暗渠数值计算模型. 通过数值分析可知: 埋深越大, 对渠体结构的冻胀影响越小, 低温季节时, 地表低温对引水运行的影响也越小; 通过对低温季节环境下的回归拟合分析, 得出该地区季节性冻土中引水暗渠的临界埋深为 3.31 m.

关键词: 季节性冻土; 暗渠; 临界埋深; 数值分析

中图分类号: TV672; TU445

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)03-0065-05

我国是总体缺水的国家, 水资源分布很不均匀, 南方水资源丰富, 北方水资源缺乏. 为解决缺水、用水和供水的矛盾, 我国先后建成了一批调水工程, 如引滦入津、引黄入晋、引黄济青、引额济乌和东深供水等. 虽然在以往的设计、施工及运行过程中已取得了许多成功的经验, 但对渠道在冬季低温环境下运行特性的研究还见之甚少^[1-4]. 在季节性冻土地区, 暗渠输水过程中会遇到低温环境条件下导致本身混凝土结构的冻胀破坏; 并且通过低温传递和对流作用, 影响其结构内的引水水体温度, 造成水体结冰及阻塞. 因此通过对暗渠温度场的数值计算, 确定暗渠结构的临界埋深, 避免暗渠在运行期间冻胀破坏以保障正常输水.

1 暗渠模型的建立

1.1 控制方程及其有限元公式

基于资料文献, 土体在冻结和融化过程中热传导项远大于对流项(约 2~3 个数量级), 故在计算中忽略了对流、质量迁移等其他作用, 只考虑土骨架和介质水的热传导及冰水相变作用, 其传热控制方程可简化为如下形式^[5-6]:

$$C_e^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: C_e^* 为土层的体积热容; T 为土层温度; λ_e^* 为土层的导热系数. 对于含水介质中相变潜热问题采用显热容法进行处理, 假设模型中含水介质相变发生在温度区间 $(T_m + \Delta T)$. 当建立等效体积热容时, 应考虑温度间隔 ΔT 的影响, 同时假设介质在已冻、未冻时的体积热容 C_f 和 C_u 及导热系数 λ_f 和 λ_u 不取决于温度, 因此简化构造出 C_e^* 和 λ_e^* 的表达式如下:

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40730736, 40821001); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN301)

作者简介: 陈武(1984-), 男, 湖南安化人, 博士研究生, 主要从事寒区岩土工程理论研究及数值分析.

E-mail: chenwu19841018@163.com

$$C_e^* = \begin{cases} C_f, & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ C_u, & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_e^* = \begin{cases} \lambda_f, & T < (T_m - \Delta T) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)], & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ \lambda_u, & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: L 为含水介质单位体积相变潜热。

固定边界上的边界条件为: $T|_A = T_0$; $\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_a - T)$; $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_A = q$, 其中: A 为边界; α 为对流换热系数; T_a 为环境温度; n 为各边界的法向矢量; q 为热流密度。初始条件为: $T|_{t=0} = T_0$ 。

由于本问题在数学上是一个强非线性问题, 无法得到解析解, 故采用数值计算取得数值解, 应用迦辽金法可得到该问题的有限元计算公式

$$M \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + KT = F - q \quad (4)$$

$$\text{式中: } M_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} C^* N_i N_j d\Omega; K_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} \lambda^* \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \sum \int_{\Gamma_2^e} \alpha N_i N_j d\Gamma_2; F_i = \sum \int_{\Gamma_2^e} \alpha T_a N_i d\Gamma_2; q_i = \sum \int_{\Gamma_3^e} q N_i d\Gamma_3.$$

1.2 模型计算区域

对暗渠临界埋深高度的数值计算采用具有相变问题的冻土二维温度场计算模型。由于取水点水库的温度资料缺失, 故暂不考虑引水水体温度对暗渠结构温度场的影响。根据设计图纸以及现场的施工情况, 计算模型宽度取 40 m, 深度为天然地表以下 40 m, 考虑到模型的对称性, 为减少计算量以及提高计算精度, 以暗渠中心线为对称轴取其一半为计算区域(图 1)。填土层边坡坡度为 1:0.75, 垫层厚 1.5 m。同时假定暗渠及各土层分层均匀, 各向同性, 根据甘肃引洮供水工程的地质勘探报告及设计施工图纸, 各材料参数见表 1^[7-8]。

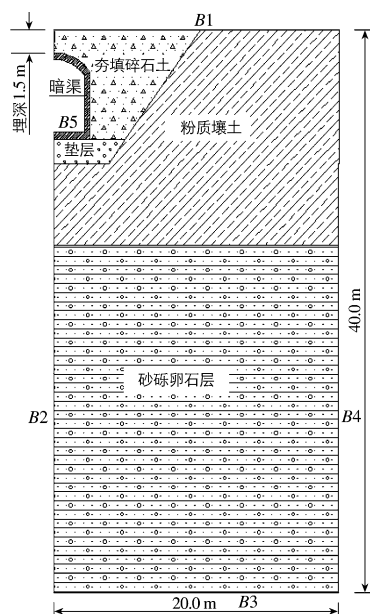


图 1 暗渠计算区域

Fig. 1 Calculation area of culverts

表 1 暗渠及土层各介质的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of the culvert and the soil medium

土 层	导热系数 λ_f / (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	体积热容 C_f / (10 ⁶ J · m ⁻³ · °C ⁻¹)	导热系数 λ_u / (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	体积热容 C_u / (10 ⁶ J · m ⁻³ · °C ⁻¹)	单位体积相变潜热 L / (10 ⁷ J · m ⁻³)
混凝土结构	2.330	2.409	2.330	2.4094	0
粉质壤土层	1.875	2.070	1.655	2.210	2.62
暗渠填层	1.980	1.913	1.919	2.227	2.04
砂砾土垫层	3.050	1.995	2.180	2.785	6.03
砂砾卵石层	1.824	1.846	1.474	2.099	3.77

根据当地气候资料, 天然地表(B1)的温度按下式变化:

$$T_n = 8.0 + 15 \sin \left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \quad (5)$$

式中: t_h 为时间变量, 当 $\alpha_0 = 0$ 时, $t_h = 0$ 对应的初始时间为 2009 年 7 月 15 日, 可通过调整 α_0 来改变 $t_h = 0$ 对应的初始时间。

暗渠与空气($B5$)的对流换热系数 $^{[9]}\alpha$ 为 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.取地温($B3$)梯度 $^{[10]}$ 为 $0.03\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$, $B2$ 为对称边界, $B4$ 为绝热边界.

2 数值计算及分析

采用平面4节点单元对图1所示的暗渠计算区域进行单元划分,即有限元模型及网格划分(图2).计算中针对渠顶埋深1.5、2.0、2.5和3.5 m情况下的暗渠模型进行了数值分析,通过数值计算找到在该季节性冻土地区暗渠的临界埋深.数值分析模型以暗渠施工前稳定温度场为初始条件,在暗渠施工完成后,打破了原有的热平衡,将形成新的稳定温度场,图3为不同埋深情况下的稳定温度场.季节性冻土地区从每年11月底开始,沿地表向地层深处冻胀,到3月初开始融化.通过温度数值计算分析可知原地表土层的最大冻土深度约1.5 m,这与实际勘测数据相符.

通过对不同埋深条件的温度场分布图对比分析可知:冬天低温时,在渠体部分的负温都随着埋深的加大有所上升,在埋深1.5 m时,1月份 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 等温线位于渠体部分,并随着时间的推移而下移,2月份达到最低温,从3月初开始回升,并在渠顶处有一段时间的负温圈;当埋深到2.5 m时,1月份 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 等温线位于渠体顶部土层,但是随着时间变化有所下移,在暗渠弧顶处出现负温区,2月份时该区域温度达到最低值($-1.37\text{ }^\circ\text{C}$).到4月份冻胀将近结束的时候,在渠体附近形成了一个融化核,融化核深度也随着埋深的加大而有所上升.图4为暗渠稳定温度场的低温条件下渠顶位置随时间的温度分布曲线图.可见,各工况下最低温度发生在2月份,因此只需要保证2月份渠顶最低温度不小于 $0\text{ }^\circ\text{C}$,即可保证渠体全年在正温环境下运行.当埋深3.5 m时,渠顶最低温度已经达到了 $0.35\text{ }^\circ\text{C}$,满足运行条件.通过对渠顶最低温度在各埋深条件下的回归拟合分析发现(图5),该季节性冻土地区暗渠的临界埋深为3.31 m,这样即可满足渠顶全年最低温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$.

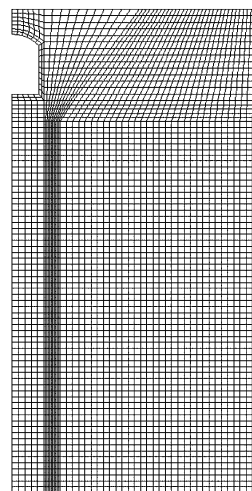


图2 有限元模型及网格划分

Fig. 2 Finite element model and the meshes

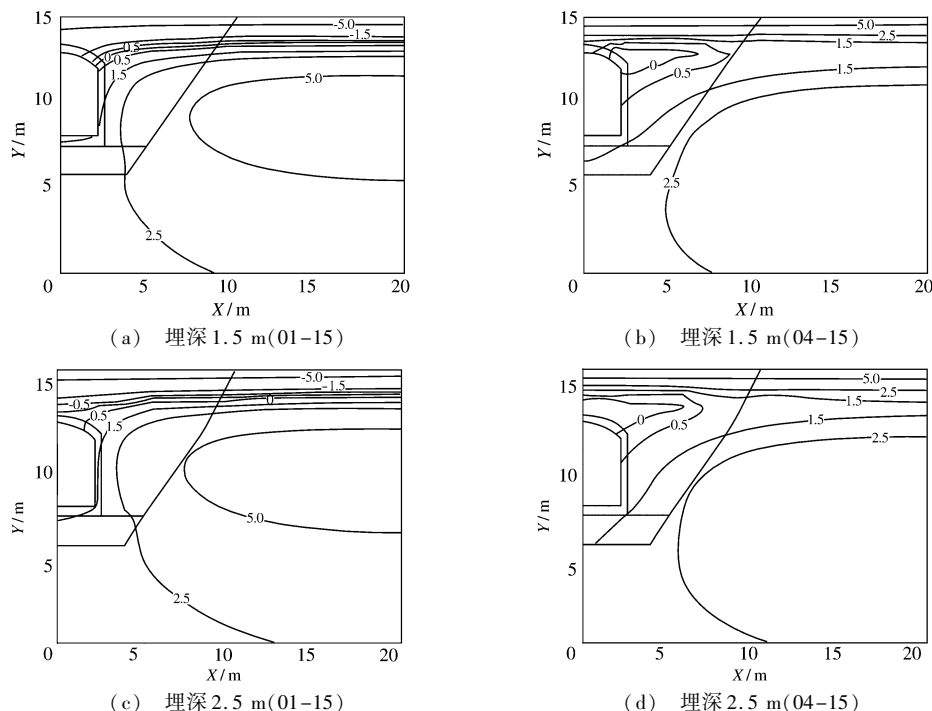


图3 暗渠建成后的稳定温度场

Fig. 3 The steady temperature distribution of the culvert

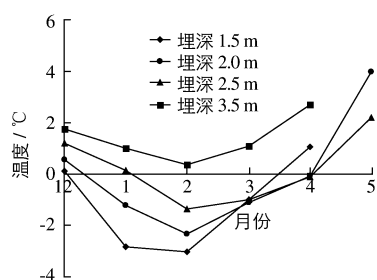


图4 渠顶随月份最低温度值分布曲线

Fig. 4 The minimum temperature distribution curves of the top channel with the month

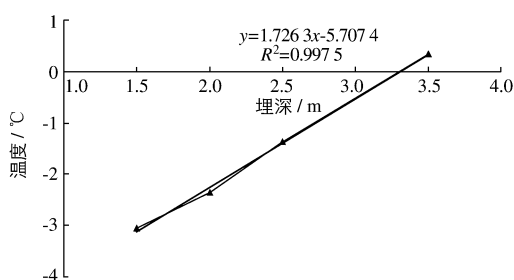


图5 渠顶最低温度随埋深变化回归拟合曲线

Fig. 5 The regression curve of the lowest temperature at the top channel with the depth changes

3 结 语

通过瞬态温度场的导热微分方程,采用迦辽金法推导出温度场的二维有限元公式.根据甘肃引洮工程的工程地质勘探报告及施工设计图纸,建立了季节性冻土地区的暗渠温度数值计算模型.通过数值分析可知,埋深越大,低温对渠体结构的冻胀影响越小,地表低温对引水运行的影响也越小.通过对低温季节环境下的回归拟合分析可知,该季节性冻土地区引水暗渠的临界埋深为 3.31 m,说明在此埋深以上,即可保证渠体全年在正温环境下运行,为暗渠的低温输水运行提供了可行性保证;同时分析结果也可为同类地区输水暗渠的设计及施工提供一定的科学依据.

参 考 文 献:

- [1] LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHANG Shu-juan, et al. Study of methods to control frost action in cold regions tunnels[J]. ASCE Journal of Cold Regions Engineering, 2003, 17(4): 144-152.
- [2] LAI Yuan-ming, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1): 89-96.
- [3] TAYLOR G S, LUTHIN J. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 545-555.
- [4] LAI Yuan-ming, LIU Song-yu, WU Zi-wang, et al. Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(1): 43-49.
- [5] 赖远明, 张明义, 李双洋. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (TAO Wen-quan. Numerical transfer heat[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese))
- [7] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen ground[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [8] SL 23-2006, 渠系工程抗冻胀设计规范[S]. (SL 23-2006, Design code for anti-frost-heave of canal and its structure[S]. (in Chinese))
- [9] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 133-134. (ZHANG Zheng-rong. Heat transfer[M]. Beijing: China Higher Educational Press, 1989: 133-134. (in Chinese))
- [10] LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, YU Wen-bing, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 323-332.

Numerical analysis of the critical buried depth of the culvert in seasonally frozen ground regions

CHEN Wu¹, DONG Yuan-hong², LI Shuang-yang¹, XU Xiang-tian¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In seasonally frozen ground regions, low-temperature condition would cause frost heave damage to the concrete configuration of the culvert and change the water temperature, which would result in water freezing and block. Therefore, it is necessary to determine the critical buried depth of the culvert in seasonally frozen ground regions. In this study, a numerical model for culverts in seasonally frozen ground is established by using transient heat transfer equation and Galerkin method. According to the engineering geological prospecting and construction design of the Taohe River Water Diverting Project in Gansu Province, the critical buried depth of the culvert is calculated. The numerical analysis shows that larger buried depth has less frost heave influence on the configuration and that the lower surface temperature in cold seasons has less influence on water diverting. According to fitting analysis, the critical buried depth of culvert is 3.31 m in this seasonally frozen ground region.

Key words: seasonally frozen ground; culvert; critical buried depth; numerical analysis

“十一五”国家科技支撑计划课题“震损水库安全评估与应急处置技术研究” 中期总结及专家咨询会在南京召开

2011年7月14日,由南京水利科学研究院承担的“十一五”国家科技支撑计划课题“震损水库安全评估与应急处置技术研究”中期总结及专家咨询会在南京召开。课题负责人、大坝中心副总工盛金保主持会议,南京水科院科研处处长戴济群代表主持单位讲话。参加会议的有南京水利科学研究院、水利部大坝安全管理中心、中国水利水电科学研究院,长江水利委员会长江科学院、南京水利水文自动化研究所、南京大学、河海大学、江苏南大先腾信息产业有限公司等单位的专家和参研人员,共计30余人。

与会专家在认真听取五个专题的研究进展和成果汇报后,进行了咨询和讨论,对课题所取得的阶段研究成果给予了充分肯定,并提出了建议。课题各参研单位还对照课题任务要求,就专题以及子题之间的研究内容、存在的问题及下一阶段工作进行了讨论与部署。会议顺利完成了预定任务,取得圆满成功。

摘自南京水利科学研究院网站