

寒区封闭引水渡槽中水温变化预测分析

陈武^{1*}, 刘德仁^{1,2}, 董元宏³, 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, 兰州 730000; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730000; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075)

摘要: 甘肃引洮供水工程由于两条供水管线末端均不具备建设大型调蓄设施的工程条件, 通过延长总干渠供水时间来解决调蓄不足的问题必须考虑冬季输水。针对这一实际问题, 根据传热传质理论, 建立了流固耦合对流换热三维数值模型, 通过数值计算结果与室内模型试验结果进行对比研究, 验证了数值模型的可靠性, 表明其模型可用于对寒区封闭性渡槽内部水体在低温环境条件下的温度变化进行了预测分析。分析结果表明, 虽然渡槽内水温与渡槽内的流量、入口水温、流速及环境温度等因素有关, 但由于该渡槽结构及保温措施设计合理, 并且有效控制水体在渡槽内的运行时间, 水温降低幅度并不大, 保证了在低温季节时水体在渡槽运行过程中水温不低于 0℃, 可有效防止渠体在寒区低温运行时结构冻害及冰灾现象的产生, 进一步确保了封闭性渡槽的冬季输水安全。可为其它寒区引水工程的合理设计及安全运营提供科学参考。

关键词: 流固耦合, 模型, 温度, 寒区, 渡槽, 引水工程, 数值研究

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.011

中图分类号: TV91

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0069-07

陈武, 刘德仁, 董元宏等. 寒区封闭引水渡槽中水温变化预测分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 69-75.

Chen Wu, Liu Deren, Dong Yuanhong, et al. Prediction analysis on water temperature in closed aqueduct in cold regions[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 69-75. (in Chinese with English abstract)

0 引言

我国是总体缺水的国家, 南北水资源分布很不均匀, 目前解决地域性缺水问题的主要有效手段是采取跨流域调水等工程措施, 先后建成了一大批调水工程, 如南水北调、引滦入津、引黄入晋、引黄济青、引额济乌和东深供水等。其中甘肃省引洮供水工程(其中洮为甘肃洮河, 简称引洮工程)是甘肃省规划建设的大型跨流域调水工程, 其重点为了解决本省中部干旱地区城镇生活及工业用水、农村人畜饮水、生态环境用水及兼有灌溉等综合功能, 但由于两条供水管线末端均不具备建设大型调蓄设施的工程条件, 只能通过延长总干渠供水时间来解决调蓄不足的问题, 因此需要考虑冬季输水, 保证引水工程在低温环境下的安全运行。引洮总干渠从总体设计上以地下工程为主, 隧洞及暗渠长度占线路总长的 98.2%, 另外还包括渡槽 6 座, 全长 1.66 km, 设计采用箱形结构以实现封闭, 槽身外侧采用聚氨脂保温板保温, 提高混凝土抗渗与抗冻标号。渠体全程运行采用全封闭无压引水, 除了能有效解决调蓄不足的问题的同时可保证水质不受污染, 保障供水安全; 同时还能有效减少蒸发及其它因

素的水量损失。

目前国内外关于寒冷地区路基、及隧道的低温效应等方面进行了大量的研究, 其中对青藏高原的路基及隧道工程在考虑空气流动条件下的低温特性研究较为成熟, 这些研究成果已成功应用于青藏铁路的建设及安全运营^[1-6]。关于水库水温分布规律利用不同研究手段开展了大量的研究, 取得了较丰富的成果^[7-11], 为整个引水工程沿线水温运行安全提供了重要初始依据。蒋红等对长引水隧洞对水温影响进行了试验研究分析^[12]; 李然等在考虑温度场与流场的相互影响作用下, 建立水电站引水发电系统引水隧洞三维水温预测数值模型, 并在利用原型观测资料验证模型的基础上, 对拟建的锦屏二级引水隧洞的水温进行预测分析^[13]; 对于寒区输水渠道及河流的冰情问题方面, Zufelt 和 Ettema^[14]建立了一维冰水耦合运动的非恒定流模型, 该模型基于多相流理论, 并考虑了冰块动量对冰塞厚度的影响, 可以模拟初始冰塞厚度和封开河期的水位变化; 高霁生与靳国厚等根据寒冷地区输水渠道的冰情建立了冰情预报数学模型, 可以预测渠道的水流特性、水温沿程分布、冰花流量、冰盖形成、冰盖下冰花的传输和堆积、冰盖的热力学增厚和融化^[15-16]。Hopkins 和 Tuthill 在矩形水槽中用方法模拟了拦冰栅与冰的相互作用^[17]; M·Jasekatal 建立了冰下过流量的数学模型, 并对加拿大 Dawson 市附近 Yukon 河段的冰期过流量进行了估算^[18]; 王晓玲等建立了三维非稳态欧拉两相流模型, 对引水渠道中水内冰演变展开了研究, 通过数值计算方法模拟分析了不同引水流量下温度及冰体积分数的沿程分布^[19]; 在寒区引水工程中的渠体冻胀

收稿日期: 2011-06-03 修订日期: 2011-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (Nos. 41171060, 41101068, 40821001); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: 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与数值分析研究。兰州 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, 730000。

破坏现象严重,造成渠道渗漏,致使渠系水利用率低,李学军^[20-21],王正中^[22-24]等针对渠道冻胀防治和抗冻胀设计问题进行了大量的研究,许四法^[25]等对农用水渠防渗土工膜的变形和温度应力问题进行了研究。通过国内外研究现状表明,对于寒区引水工程而言,渠体在冬季输水过程中在低温环境下不仅可能导致渠体结构的冻胀破坏和渠系水渗漏,而且还会通过低温热传递和对流换热作用,影响其结构内的引水水体温度,极易造成水体冰冻及阻塞,而无法保障引水工程的正常运行。可见渠体结构及水体的温度特性对渠体引水安全尤为重要,但目前对在冬季低温环境下渡槽的运行温度特性研究见之尚少。因此对北方寒冷地区封闭性渡槽在冬季低温环境下运行温度特性的探讨研究极具重要意义,对制定渠体切合实际的引水运行方案可提供有力的科学依据。

本文针对这一实际问题,根据热传导和湍流力学的基本理论,建立了流固对流换热问题的三维数值模型,对寒区封闭性渡槽中水体在低温环境条件下的温度变化进行了分析研究。

1 封闭引水渡槽模型

1.1 模型控制方程

封闭渡槽模型的混凝土及外层保温材料区域仅考虑热传导作用,控制方程为

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_e \nabla^2 T \quad (1)$$

式中, λ_e 为固体导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; C_e 为固体体积热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; t 为时间, s ; T 为温度, $^\circ C$; ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, x 、 y 、 z 为直角坐标系的 3 个坐标方向。

由于采用工程全封闭无压引水,取水点在水库深处取水,在此忽略空气的自然对流换热影响,仅考虑空气在水体流动时的被迫对流换热作用,假设渡槽内流体为不可压缩流体,密度为常数,且温度的变化对流体的流动无影响。流体热传输数学控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程、 k 方程及 ε 方程^[26]。

连续性方程

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

脉动动能 k 方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho k \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

耗散率 ε 方程

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \varepsilon \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

湍流黏性系数方程

$$\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (6)$$

能量方程

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \frac{\partial (v_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\lambda_a}{c_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

式中, v_i 、 v_j 分别为 i 、 j 方向的流体流动速度, m/s ; x_i 、 x_j 为坐标分量; i 、 $j=x, y, z$; μ 为流体的动力黏度系数, $Pa \cdot s$, 仅与流体的物性有关; μ_t 为流体的湍流黏性系数, $kg/(m \cdot s)$, 取决于流动状态; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为流体压强, Pa ; k 为脉动动能, m^2/s^2 ; ε 为脉动动能的耗散率, m^2/s^3 ; T 为温度, $^\circ C$; σ_k 、 σ_ε 、 σ_T 、 $c_{1\varepsilon}$ 、 $c_{2\varepsilon}$ 、 c_μ 为控制方程中的无量纲经验常数^[27-28], 分别取 1.0、1.30、0.90、1.44、1.92、0.09; λ_a 为流体的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; c_p 为流体定压比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

模型中各介质物理及热参数见表 1。

表 1 介质物理及热参数

Table 1 Physical and thermal parameters of various media in model

名称	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	导热系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
保温层	45.0	1400	0.024
混凝土	2500.0	970.0	1.27
水	998.2	4182.0	0.6
空气	1.225	1006.43	0.0242

1.2 边界条件

1) 流体入口边界: 定义为速度入口边界条件。即给定入口流速和入口水温, k 、 ε 值根据经验公式确定

$$\begin{aligned} v_x|_{A1} &= v_{x0}; v_y|_{A1} = v_{y0}; v_z|_{A1} = v_{z0}; T|_{A1} = T_0 \\ k|_{A1} &= k_0 = 0.01 \times (v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2) / 2; \\ \varepsilon|_{A1} &= \varepsilon_0 = c_\mu^3 k_0^3 / l \end{aligned} \quad (8)$$

式中, v_{x0} 、 v_{y0} 、 v_{z0} 为 3 个坐标方向的初始速度, m/s ; T_0 为入口流体的初始温度, $^\circ C$, 其下标符号 0 表示为入口初始值; $A1$ 表示为入口边界, l 是湍流长度标尺, 按混合长度理论计算。

2) 流体出口边界: 假设出口边界流动与换热均已充分发展, 即

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial n}|_{A2} &= 0; \frac{\partial v_y}{\partial n}|_{A2} = 0; \frac{\partial v_z}{\partial n}|_{A2} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial n}|_{A2} &= 0; \frac{\partial k}{\partial n}|_{A2} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial n}|_{A2} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $A2$ 表示为出口边界, n 为边界上的方向矢量。

3) 固壁边界

$$\begin{aligned} v_x|_{A3} &= 0; \quad v_y|_{A3} = 0; \quad v_z|_{A3} = 0; \quad k|_{A3} = 0; \\ \varepsilon|_{A3} &= 0; \quad T|_{A3} = T_{s0} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, T_{s0} 为固壁温度边界初始值, $^{\circ}\text{C}$; $A3$ 表示为固体壁面边界。

其中流-固耦合界面, 定义固体界面对于黏性流体为无滑移边界, 考虑到流体温度与固体温度连续, 则有

$$T|_{A3^+} = T|_{A3^-} \quad (11)$$

式中, $A3^-$ 为流固耦合界面的接触界面的固体面, $A3^+$ 为接触界面的流体面。

其中流体耦合界面定义流体界面对于黏性流体为移动边界, 考虑到流体界面之间温度与速度连续, 则有

$$T|_{A4^+} = T|_{A4^-}; \quad v|_{A4^+} = v|_{A4^-} \quad (12)$$

式中, $A4$ 为流体界面之间耦合接触面, +、- 表示耦合界面对应的 2 个接触面。

流体计算域外为混凝土衬砌, 壁面粗糙影响采用设计值, 即粗糙率为 0.015。

由于以上方程组具有强非线性, 无法求得解析解, 因此采取数值方法进行求解。

1.3 数值计算方法

有限体积法 (finite volume method, 简称 FVM) 由于其计算效率高而在计算流体力学 (简称 CFD) 领域的研究得到了广泛应用, 其中有限体积法又称为控制体积法 (control volume method, CVM), 其基本计算思路是: 将计算区域划分为网格, 并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积; 将待解微分方程 (控制方程) 对每一个控制体积积分, 从而得出一组离散方程。为了求出控制体积的积分, 必须假定 θ (离散方程中的因变量未知数) 值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法看来, 有限体积法属于加权余量法中的子域法, 从未知解的近似方法来看, 有限体积法属于采用局部近似的离散方法。有限体积法的基本方法就是子域法加离散。

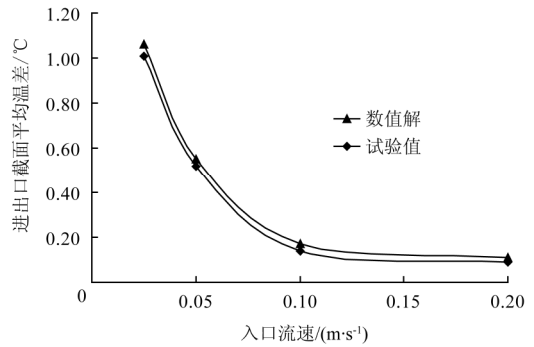
文中采用有限体积法进行时间和空间上的离散, 动量项、能量项、湍动能及湍动耗散率项的离散格式均采用一阶迎风格式, 压力项离散采用 Standard 格式。本文采用 SIMPLE 算法。

2 模型验证

为更有效研究封闭渡槽在低温环境下的温度变化过程, 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的科研人员根据相似原理进行了封闭渡槽模型试验, 依据渡槽的施工设计图, 制作了几何相似比为 1/20 渡槽试验模型, 即模型尺寸宽 \times 高为 22 cm \times 20 cm, 壁厚 2.5 cm, 渡槽模型长度为 10.0 m, 如图 1 所示。然后利用室内环境箱模拟实际现场低温环境, 研究渡槽在各种工况下的进出口温度变化。采用上述数学计算模型, 在相同的几何尺寸和物理参数条件下对试验模型工况进行了数值模拟计算。在环境温度-10.0 $^{\circ}\text{C}$ 、进口水温为 14.5 $^{\circ}\text{C}$ 及不同入口流速情况下, 模型试验结果及数值计算结果如图 2 所示。



图 1 渡槽模型试验现场图
Fig.1 Aqueduct model test



注: 入口水温 14.5 $^{\circ}\text{C}$, 环境温度-10 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 2 进出口温差随入口速度变化图

Fig.2 Relationship between inlet-outlet temperature difference and inlet velocity

通过图 2 数据对比分析可知, 数值模拟与试验结果两者值非常接近, 在环境温度及入口水温一定的情况下, 在各不同进口流速情况下的进出口温差值及变化趋势基本吻合, 两者之间的最大相对误差为 5.1%, 表明数值模拟结果真实可靠, 可用来对封闭渡槽在实际低温环境下引水过程中的沿程温度变化进行预测分析。

3 工程模型应用

在建引洮供水一期工程总干渠以隧洞—暗渠 (渡槽) —隧洞相衔接的布置型式为主, 其中共计有柳林沟、宗丹沟、东峪沟、秦祁河、白土坡河及阳阴峡等渡槽 6 座, 全长 1.66 km, 其中以阳阴峡渡槽最长为 402.31 m, 最短为白土坡河渡槽 165.0 m。渡槽设计采用箱形结构以实现封闭, 槽身混凝土厚度为底部 35 cm、腹部 30 cm、顶部 25 cm, 同时提高混凝土抗渗与抗冻标号, 槽身外侧采用 50 mm 聚氨脂保温板保温。根据施工设计图要求, 渡槽截面净高 4.0 m, 净宽 4.40 m, 纵向坡度为 1/1 300, 渡槽混凝土粗糙率为 0.015。设计最大流量为 36.0 m³/s, 最大设计流速为 2.275 m/s。因此采用上述渡槽水温预测模型, 考虑保温层、衬砌混凝土层及流体的传热特性, 对在建引洮工程的渡槽内水温的变化情况进行了预测研究。

3.1 计算模型及网格划分

以渡槽外侧保温层作为计算区域外边界, 根据渡槽空间坐标建立沿纵向中轴线对称的三维数值计算模型,

在笛卡尔坐标系下划分计算网格, 将求解区域划分为六面体网格。沿纵向全长 450 m, 网格间距为 1.0 m。横断面网格不均匀划分, 在流体区域网格适当加密, 固体传热区域网格间距相对较宽, 模型生成网格数为 234 万个。计算区域及网格划分如图 3 所示。

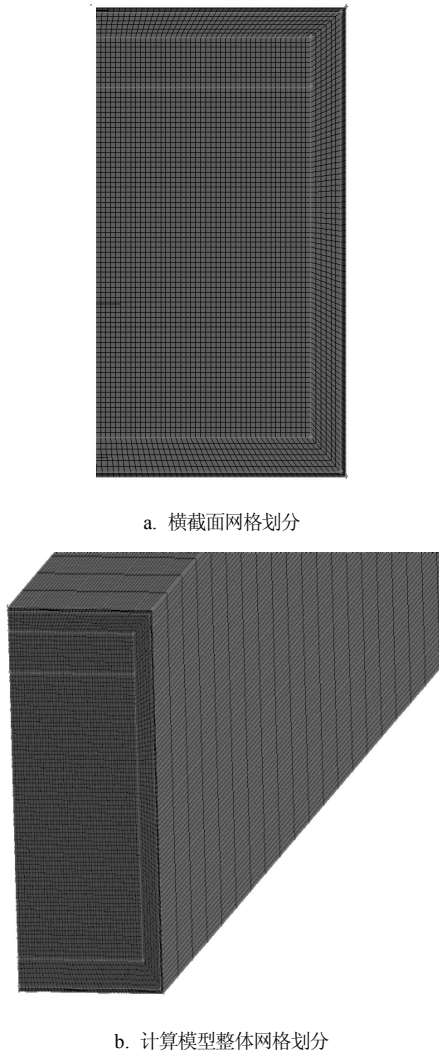


图 3 渡槽数值计算模型及网格划分
Fig.3 Numerical model and mesh for aqueduct

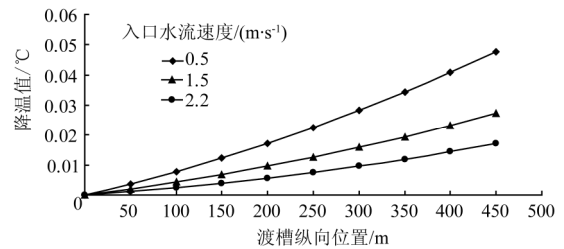
3.2 初始条件

入口流速根据渡槽设计引水流量计算, 分别取 2.2、1.5 及 0.5 m/s 3 种工况, 分别对应于引水工程最大设计流速, 正常运行流速及夜间用水量骤降的情况。入口水温采用低温季节时水库取水位置深度的水温, 通过温度数采仪在取水水库区监测采集, 根据试验数据可知, 水库取水处最低温度发生 3 月份, 日平均最低水温为 3.0℃。根据供水区气候资料分析可知, 渡槽外侧最低环境温度发生在 1 月份, 而水库温度未达到温度最低值, 为 5.0℃, 即将环境温度分别取 -10.0℃、-20.0℃、-30.0℃ 3 种极端情况, 而入口温度分别取 3.0℃及 5.0℃ 2 种对应的极端情况。

3.3 计算结果与分析

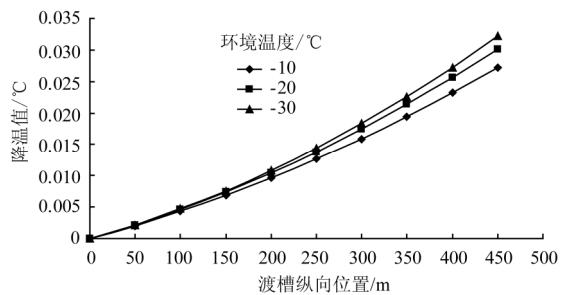
采用文中数值分析模型, 对封闭性渡槽在低温环境下进行了温度变化及降温特性进行了数值计算预测。图

4a 为当入口水温 3.0℃, 环境温度 -10.0℃ 条件下在不同入口流速情况时渡槽沿程水体的降温值。从图中可以看出随着入口流速的增大, 引水在渡槽中的逗留时间越短, 温度降低值越小。图 4b 为在入口水流流速 1.5 m/s, 入口水温 3.0℃, 渡槽沿程纵向各截面在不同环境温度条件下的水体降温曲线图。通过图 4 数据表明, 在一定入口条件下, 渡槽中引水温度随着环境温度的降低, 截面平均降温值也随着有所增大; 而环境温度及入口水流速度一定的条件下, 入口水体温度越大, 降温值同时也增大, 在环境温度 -10.0℃, 入口速度 1.5 m/s 条件下沿程截面随不同入口水温的降温变化情况如图 4c 所示。通过入口水温与出口截面平均水温得出各工况下渡槽内水体的进出口降温值, 如表 2 所示。



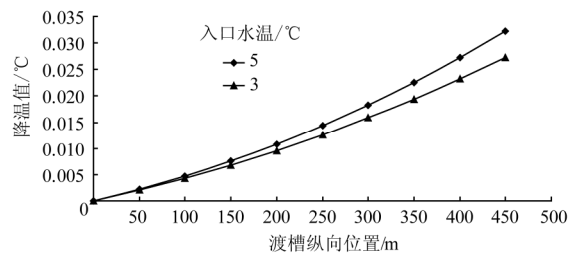
注: 入口水温 3.0℃, 环境温度 -10℃。

a. 不同入口流速



注: 入口水温 3.0℃, 入口水流速度 1.5 m/s。

b. 不同环境温度



注: 环境温度 -10.0℃, 入口水流速度 1.5 m/s。

c. 不同入口水温

图 4 渡槽沿程截面在不同流速、环境温度及入口水温条件下的降温变化图

Fig.4 Temperature reductions of cross-sections along the aqueduct under different velocities, ambient and inlet water temperatures

表 2 封闭渡槽各工况下出口水温降低值计算结果

Table 2 Calculation results of outlet water temperature reductions for cases of closed aqueduct

入口水温/℃	入口流速/(m·s ⁻¹)	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	壁面环境温度/℃	水温降低值/℃
3.0	0.5	7.70	-10	0.048
3.0	0.5	7.70	-20	0.053

续表

入口水温/ °C	入口流速 (m·s ⁻¹)	流量 (m ³ ·s ⁻¹)	壁面环境温度 /°C	水温降低值/ °C
3.0	0.5	7.70	-30	0.057
3.0	1.5	23.10	-10	0.027
3.0	1.5	23.10	-20	0.030
3.0	1.5	23.10	-30	0.032
3.0	2.2	33.88	-10	0.017
3.0	2.2	33.88	-20	0.021
3.0	2.2	33.88	-30	0.024
5.0	0.5	7.70	-10	0.054
5.0	0.5	7.70	-20	0.059
5.0	0.5	7.70	-30	0.067
5.0	1.5	23.10	-10	0.032
5.0	1.5	23.10	-20	0.036
5.0	1.5	23.10	-30	0.041
5.0	2.2	33.88	-10	0.022
5.0	2.2	33.88	-20	0.029
5.0	2.2	33.88	-30	0.037

渡槽内水体的降温特性与渡槽外围的环境温度、入口水体温度、入口流速等多种因素有关, 降温的原因是因为水体温度与环境温度之间的温差造成对流换热, 水体温度通过混凝土低温壁面散热, 渡槽内外温差越大, 对流散热越强, 渡槽内水体的热量散发越多; 同时, 也与水体在渡槽内逗留时间的长短有关系, 通过渡槽的时间越短, 水体散热时间也较短, 水体降温值相应较小。但是通过各种工况下的数值模拟及数据分析可知, 由于封闭性渡槽混凝土壁面外侧敷设了保温材料, 有效阻止外部冷能向混凝土层及内部水体的侵入, 较大程度上阻隔了内外两者之间的热交换效应。通过表 2 可以看出, 各种工况下的最终降温值都很小, 降温值分别在 0.017~0.067°C 之间, 其中降温最大值发生在入口温度 5°C, 环境温度 -30°C, 水流速度为 0.5 m/s 的情况下, 其降温值为 0.067°C 左右, 可知在水体流速较小, 而外界环境温度最恶劣情况下, 为渡槽引水运行的最不利工况。通过各条件下的降温数据分析表明渡槽的水温降低并不是很大, 这是因为与水的热容量比较大、结构内部的过流量大、水流的滞留时间较短、及保温材料的温度特性等因素相关联。

通过结果分析无论是 1 月份环境温度最低时还是 3 月份水库温度即入口处水温最低时, 水流通过渡槽结构时, 水温均不低于 0°C。因此, 根据该工程设计方案, 可以满足封闭渡槽的冬季输水要求。

4 结论

本文建立了低温环境下封闭渡槽的三维水温预测数值模型, 在利用室内模型试验结果对该数值模型进行有效验证的基础上, 对在建的引洮工程引水渡槽的沿程温度变化情况进行了预测分析, 渡槽内水温的降温值与渡槽流量的大小、环境温度的大小、入口水温、入口水流速等因素有直接的影响, 通过数值计算结果表明, 当渡槽中水的入口速度越小, 环境温度越低, 为渡槽实际引

水运行中的最不利工况, 其沿程降温幅度将达到最大值 0.067°C。引洮工程由于渡槽保温材料的敷设, 有效阻止了内部水体的散热, 降温幅度得到有效控制。该工程渡槽的所占的总体比例较小, 总长仅为 1.66 km, 同时渡槽内径大, 水流在渡槽内部滞留时间较短, 水的体积热容量大, 以上因素导致水温降低并不太明显, 降温幅度在 0.017~0.067°C 之间, 因此, 在低温季节供水运行时, 保证了水体通过渡槽结构时水温能维持正温运行, 确保了封闭性渡槽的冬季输水需要。文中分析结果并可为其它寒区引水工程的合理设计及安全运营提供科学参考。

[参 考 文 献]

- [1] 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: 31—235.
- [2] Lai Yuanming, Zhang Xuefu, Yu Wenbing, 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.
- [3] Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qing-Tibet railway under climatic warming[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(6): 598—604.
- [4] Mingyi Zhang, Yuanming Lai, Zhiqiang Liu, et al. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai Tibetan railway embankment with different structures in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42(3): 237—249.
- [5] Mingyi Zhang, Yuanming Lai, Wenbing Yu, et al. Laboratory investigation of the heat transfer characteristics of a trapezoidal crushed-rock layer under impermeable and permeable boundaries[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2006, 19(4): 251—264.
- [6] Mingyi Zhang, Yuanming Lai, Zhihua Gao, et al. Influence of boundary conditions on the cooling effect of crushed-rock embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 44(3): 225—239.
- [7] 朱伯芳. 库水温度估算[J]. *水利学报*, 1985, 16(2): 12—21.
- [8] Harleman D R F. Hydrthermal analysis of lakes and reservoirs[J]. *J of Hydr Div, ASCE*, 1982, 108(3): 301, 325.
- [9] 高学平, 赵耀南, 陈弘. 水库分层取水水温模型试验的相似理论[J]. *水利学报*, 2009, 40(11): 1374—1380.
Gao Xueping, Zhao Yaonan, Chen Hong. Similarity theory of water temperature test model for selective withdrawal from reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(11): 1374—1380. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡平, 刘毅, 唐忠敏, 等. 水库水温数值预测方法[J]. *水利学报*, 2010, 41(9): 1045—1053.
Hu Pin, Liu Yi, Tang Zhong min, et al. Numerical prediction of water temperature in reservoir[J]. *Journal of Hydraulic*

- Engineering, 2010, 41(9): 1045—1053. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郗志红, 吴鑫淼, 郑旌辉, 等. 一种基于人工神经网络的水库水温分层模式判别方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 204—208.
- Qie Zhi hong, Wu Xin miao, Zheng Jing hui, et al. A discriminating method of reservoir water temperature layering model based on artificial neural networks[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(3): 204—208. (in Chinese with English abstract)
- [12] 蒋红, 卢红伟. 长引水隧洞对水温影响的实验研究[J]. 四川水力发电, 1997, 16(1): 73—78.
- Jiang Hong, Lu Hongwei. Experimental study on water temperature of long power tunnel[J]. Sichuan Water Power, 1997, 16(1): 73—78. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李然, 李克锋, 邓云, 等. 深埋长引水隧洞对电站下游水温的影响[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 588—592.
- Li Ran, Li Kefeng, Deng Yun, et al. Influence of long and deep buried diversion tunnel on water temperature in downstream of hydro-power plant[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 588—592. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zufelt J E, Ettema R. Fully coupled model of ice-jam dynamics[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(1): 24—41.
- [15] 高霁生, 靳国厚, 吕斌秀. 南水北调中线工程输水冰情的初步分析[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 96—101.
- Gao Pei sheng, Jin Guo hou, Lu Bin xiu. Preliminary study on ice regime in the Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 11: 96—101. (in Chinese with English abstract)
- [16] 靳国厚, 高霁生, 吕斌秀. 明渠冰情预报的数学模型[J]. 水利学报, 1997, 28(10): 1—9.
- Jin Guo hou, Gao Pei sheng, Lu Bin xiu. Ice regime forecast model in open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(10): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [17] Hopkins M A, Tuthill A M. Ice booms simulation and experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 16(3): 138—155.
- [18] Jasekatal M, Muste M, Ettema R. Estimation of Yukon River discharge during an ice jam near Dawson City[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28(5): 856—864.
- [19] 王晓玲, 张自强, 李涛, 等. 引水流量对引水渠道中水内冰演变影响的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 1307—1312.
- Wang Xiaoling, Zhang Ziqiang, LI Tao, et al. Numerical simulation of diversion water flux effect on frazil ice evolution in diversion channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 1307—1312. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李学军, 费良军, 李改琴. 大U型混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 13—17.
- Li Xuejun, Fei Liangjun, Li Gaiqing. Model of coupled heat-fluid transport of U-shape canal lining with concrete during seasonal freezing and thawing stage[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 29(8): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李学军, 费良军, 任之忠. 大型U型渠道渠基季节性冻融水分运移特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1383—1387.
- Li Xuejun, Fei Liangjun, Ren Zhizhong. Soil moisture transfer in the base of U-shape canal with concrete lining in the process of seasonal freezing and thawing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1383—1387. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 Zhengzhong. 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 with English abstract)
- [23] 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 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王正中, 芦琴, 郭利霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1—7.
- Wang Zhengzhong, Lu Qin, Guo Lixia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole day[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [25] 许四法, 张豪. 农业灌溉水渠防渗土工膜的温度敏感性及其张拉力评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 7—11.
- Xu Sifa, Zhang Hao. Experiment and evaluation on temperature sensitivities and tensile forces of anti-seepage geomembrane of farmland irrigation canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 333—361.
- [27] Launder B E Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269—289.
- [28] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 113—142.

Prediction analysis on water temperature in closed aqueduct in cold regions

Chen Wu^{1*}, Liu Deren^{1,2}, Dong Yuanhong³, Xu xiangtian¹

(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. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co.Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Large water storages and diversion facilities can not be constructed at the ends of the two transportation lines of the Water Diversion Project from Tao River (WDP) in Gansu Province because of limit of engineering conditions. To solve this problem, water delivery time of the main channel has to be prolonged to winter. Based on the practical engineering condition and related heat and mass transfer theories, a three-dimensional numerical model for fluid-solid coupled convective heat transfer was established and validated by laboratory test result. The water temperature variation within the closed aqueduct under low-temperature condition in cold regions was predicted by solving the numerical model. The numerical results showed that the water temperature within the aqueduct was determined by the flow capacity, inlet water temperature, flow velocity, ambient temperature and et al. However, because of the effective design of the aqueduct, rational application of insulation and control of water flow time, the decrease of the water temperature was not obvious, and the water temperature in the aqueduct could be kept above 0°C, which ensured water supply in cold seasons. The study in this paper provides scientific reference for optimization design and safe operation of the other water diversion projects in cold regions.

Key words: fluid structure interaction, models, temperature, cold region, aqueduct, water diversion project, numerical study