

引洮工程封闭渡槽输水期间热力耦合分析

陈武¹, 张东², 李双洋¹, 张明义¹, 裴万胜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. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 引洮工程位于甘肃省季节性冻土地区, 基于甘肃引洮供水工程沿线封闭渡槽在全年正常输水运行时的环境温度条件, 根据传热学及有限元基本理论, 建立了寒区封闭渡槽热力耦合分析的有限元数值模型, 对其全年正常运行过程中的温度及热应力分布规律进行了数值研究. 结果表明: 在全年正常输水运行条件下, 引洮工程封闭渡槽在长期运行过程中由于水温和气温所造成的温差均能在渡槽截面的横向、竖向及纵向产生很大的拉应力, 其值均超过了混凝土的抗拉强度(1.43 MPa), 且全年大部分时间内渡槽壁面内外的温差都很大, 在渡槽腹板和底板都将产生较大拉应力, 因而存在一定的开裂风险, 会在渡槽的长期运行中留下安全隐患, 应引起设计、施工及运营部门的重视.

关键词: 寒区; 封闭渡槽; 热力耦合; 热应力

中图分类号: TV672+.3; TV315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2012)03-0020-06

引洮供水工程是甘肃省规划建设的大型跨流域调水工程, 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, 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. 工程总干渠总体设计以地下工程为主, 以隧洞-暗渠(渡槽)-隧洞相衔接的布置型式为主, 其中渡槽6座, 全长1.66 km, 设计采用箱形混凝土封闭结构. 引洮工程供水区气候属北温带温和干旱、半干旱区, 受地形及纬度影响, 区域内气候具有较明显的分带性, 总体特征是降水少, 气候干燥, 夏季不热, 冬季寒冷, 日照时间长, 气温日差大. 根据供水区气象统计资料, 其年均气温6~10℃, 历年极端最高气温37.8℃, 极端最低气温-29.6℃, 多年平均风速1.1~3.2 m/s, 多年平均日照时间2 131~2 666 h, 稳定超过0℃的活动积温2 000~3 500℃, 10℃以上的积温1 000~3 000℃.

甘肃引洮供水工程自九甸峡水库深层取水, 而冬季水库通常运行于较高水位, 水温相比外界气温要高很多, 水体在封闭干渠中流动时沿程温度变化幅度并不大, 从而在箱型封闭渡槽内外壁面形成较大的温度梯度, 致使槽身横向结构产生较大的温度应力, 但渡槽作为输水结构不能出现较大裂缝^[1-4]. 因此, 寒区封闭渡槽的热力耦合效应在整个输水过程中产生的相应危害是寒区水利工程建设和水资源开发利用必须考虑的一个重要因素.

针对这一实际问题, 本文根据传热学及力学的基本理论, 建立了封闭渡槽的热力耦合数值模型, 对寒区封闭渡槽热力特性进行数值研究.

1 渡槽计算模型控制方程

对于处于运行期的渡槽, 槽身混凝土的水化热经过天然散热, 其热效应可忽略不计; 渡槽取沿程等截面

收稿日期: 2011-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (Nos. 41171060, 41101068, 50976120, 40821001); 冻土工程国家重点实验室自主项目 (SKLFSE-ZY-03)

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与数值分析.

E-mail: chenwu19841018@163.com

结构,渡槽外壁裸露于空气中,假定槽身具有相同的温度边界条件,封闭渡槽的温度只在横截面方向变化,取渡槽 1/2 跨长(6.0 m)作为研究对象,建立热力耦合有限元数值分析模型^[5],其热传导方程为:

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

式中: T 为温度; λ_e 和 C_e 分别为混凝土的导热系数和比热容。

固定边界上的边界条件^[6]为:第1类热边界条件, $T|_{\Gamma_1} = T_0$;第3类热边界条件, $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = h(T_a - T)$;其中 h 为对流换热系数, Γ 为边界, T_a 为环境温度, n 为各边界的法向矢量.初始条件为: $T|_{t=0} = T_0$.

应用迦辽金法可得到该问题的有限元计算公式:

$$\mathbf{M} \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{K}T = \mathbf{F} \quad (2)$$

$$M_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} C_e N_i N_j d\Omega \quad (3)$$

$$K_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} \lambda_e \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega + \sum \int_{\Gamma_2} h N_i N_j d\Gamma_2 \quad (4)$$

$$F_i = \sum \int_{\Gamma_2} h T_a N_i d\Gamma_2 \quad (5)$$

当渡槽截面温度发生变化时会由于热变形而产生线应变:

$$\varepsilon_0 = \alpha(T - T_0) \quad (6)$$

式中: α 为混凝土材料的线膨胀系数; T 为壁面某一点现时的温度值, T_0 为初始温度场。

其中热膨胀只产生线应变,剪切应变为零,根据能量法可得出有限元计算方程为:

$$\mathbf{K}u = \mathbf{F}_{\varepsilon_0} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{K} = \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T D \mathbf{B} t d\Omega$; $\mathbf{F}_{\varepsilon_0} = \sum_e \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T D \varepsilon_0 d\Omega$,其中 \mathbf{B} 为应变矩阵, t 为单元厚度。

2 封闭渡槽热力耦合数值分析

2.1 数值计算模型及边界条件

采用寒区封闭渡槽三维热力耦合有限元数值模型,对引洮供水工程中渡槽的温度及热应力进行数值研究.根据工程设计图纸,渡槽深度 H 为4.0 m,宽度 B 为4.4 m,右侧混凝土壁厚为0.55 m,下端壁厚为0.50 m,上端壁厚为0.25 m.主要考虑水体在全年正常运行过程中水温与环境温度之间温差对渡槽的温度及受力影响,暂不考虑渡槽阴阳面的气温差异,考虑到模型在几何及温度荷载的对称性,以封闭渡槽横截面中线为对称轴取其一半为计算区域,有限元计算模型如图1所示,有限元模型划分网格单元28 750个.同时假定渡槽壁面各向同性,材料均匀,槽身采用C30号混凝土^[7],弹性模型 $E = 31 \text{ GPa}$,导热系数 $\lambda_e = 1.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,泊松比 $\mu = 0.167$,混凝土线膨胀系数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}$.

在被空气围绕的槽身外表壁面上,发生由太阳辐射引起的热交换以及与空气对流换热引起的热效应,由于目前无法对两种热交换进行适合的定量定性方面参数的确定^[8],可根据附面层理论将其当作第1类温度边界来处理^[9].

故根据引洮工程沿线当地气候资料及混凝土附面层热效应,外壁全年温度变化条件采用如下公式:

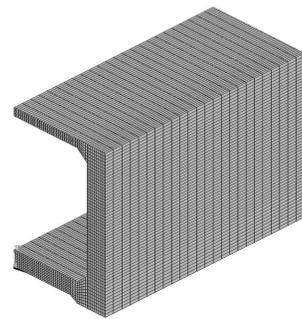


图1 渡槽有限元计算模型及网格划分
Fig. 1 Aqueduct finite element and mesh model

$$T_n = 6.0 + \Delta T + 15 \sin\left(\frac{2\pi}{8640} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0\right) \quad (8)$$

式中: ΔT 为太阳辐射效应对壁面的温度增量,上壁面取 2.5°C ,侧壁面取 1.5°C ,底部取 1.0°C ; t_h 为时间变量,当 $\alpha_0=0$ 时, $t_h=0$ 对应的初始时间为2010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。

全年沿程运行水体温度可近似为水库深层温度,通过对取水口水库的水温监测,全年水库取水口水温变化为:

$$T_n = 8 + 5 \sin\left(\frac{2\pi}{8640} t_h + \frac{\pi}{6} + \alpha_0\right) \quad (9)$$

引洮供水工程全程封闭输水,忽略渡槽内空气的自然换热对流影响,气温近似为水温,渡槽内壁空置壁面及渡槽内壁与水接触界面的对流换热系数分别为 $h_1=6.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[10], $h_2=600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[11]。

2.2 数值计算及结果分析

根据甘肃引洮供水工程渡槽运行水温和气候环境条件及结构特点,建立了封闭渡槽全年运行时的有限元热力耦合数值模型,通过水库取水口水温及气温数据对比发现,水温对外界环境气温的反应滞后2个月左右,即气温最低发生在每年1月份,而水温在1月为 5.51°C ,到每年3月份达到最低值 3.0°C 左右(见表1)。

表1 渡槽全年运行期的温度参数对照

Tab.1 Temperature parameter comparison of the aqueduct in operation period

| 日期 | 内壁水温 | 外壁面温度 | | | 壁面温差 | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | | 上壁面 | 左右壁面 | 下壁面 | 上壁面 | 左右壁面 | 下壁面 |
| 07-15 | 10.50 | 23.50 | 22.50 | 22.00 | 13.00 | 12.00 | 11.50 |
| 08-15 | 12.33 | 21.50 | 20.50 | 20.00 | 9.17 | 8.17 | 7.67 |
| 09-15 | 13.00 | 16.02 | 15.02 | 14.52 | 3.02 | 2.02 | 1.52 |
| 10-15 | 12.33 | 8.52 | 7.52 | 7.02 | -3.81 | -4.81 | -5.31 |
| 11-15 | 10.51 | 1.02 | 0.02 | -0.48 | -9.48 | -10.48 | -10.98 |
| 12-15 | 8.01 | -4.47 | -5.47 | -5.97 | -12.48 | -13.48 | -13.98 |
| 01-15 | 5.51 | -6.50 | -7.50 | -8.00 | -12.01 | -13.01 | -13.51 |
| 02-15 | 3.68 | -4.51 | -5.51 | -6.01 | -8.19 | -9.19 | -9.69 |
| 03-15 | 3.00 | 0.96 | -0.04 | -0.54 | -2.04 | -3.04 | -3.54 |
| 04-15 | 3.66 | 8.45 | 7.45 | 6.95 | 4.79 | 3.79 | 3.29 |
| 05-15 | 5.49 | 15.96 | 14.96 | 14.46 | 10.47 | 9.47 | 8.97 |
| 06-15 | 7.98 | 21.46 | 20.46 | 19.96 | 13.48 | 12.48 | 11.98 |

注:表内温度值均指日平均温度。

通过对表1数据分析发现,渡槽在全年正常运行过程中,槽身壁面温差始终存在,每年6月初到7月底与12月初到1月底这两个时间段的壁面内外温差处于全年最大值,而每年3月与9月这两个时间段的壁面内外温差处于全年较小值,总体来看,由于水温对外界气温影响的滞后效应,造成槽身内外壁面在渡槽全年运行过程中大部分时间里都存在较大温差,其温差值在 $2.0 \sim 14.0^\circ\text{C}$ 之间变化。

根据文中的温度控制方程及确定的边界条件,计算了渡槽全年运行期间的温度场,由于渡槽混凝土壁面厚度为 $0.25 \sim 0.55 \text{ m}$,因此在其年温度变化曲线条件下,运行到第2年整个渡槽壁面的温度分布就已趋于稳定,渡槽每年6月15日和12月15日输水运行时的渡槽壁面温度分布见图2。

由图2可看出,渡槽外表壁面在运行期间由于气温和太阳辐射等影响,夏天温度很高,冬季气温却很低,而渡槽内壁温度主要受水体运行温度的影响,但由于水温沿程降幅变化很小,导致结构存在着较大的壁面温差.其温差值也可取表1中所示的水温与外壁面温度之间的温差值,即忽略运行水体的沿程降温效应,渡槽内壁面温度近似等同于沿程水体温度。

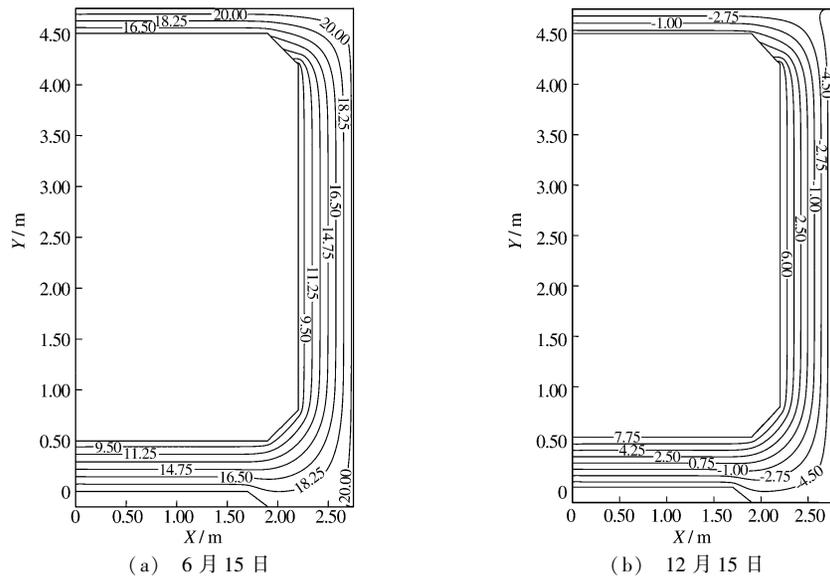


图2 渡槽输水运行期间的横截面温度分布(单位:°C)

Fig.2 Temperature distribution of the aqueduct cross-section during operation (unit: °C)

通过对渡槽运行期间渡槽壁面温度场的数值计算,确定了渡槽壁面的温度分布以及所造成的内外壁面温差值,将其温度计算结果作为下一步热应力分析的初始条件,也是分析混凝土渡槽热应力分布的初始必要条件.建立热应力有限元分析模型,在端部支座处采用竖向及纵向位移约束,渡槽跨中截面处采用对称约束.由于在渡槽纵向方向温度变化情况不予考虑,渡槽1跨12 m的各个截面的温度分布相同,槽身轴向各截面热应力分布趋势也大体一致,图3为跨中截面3个方向的应力分布,图中数值正为拉应力,负为压应力.

由图3可见,夏季高温与冬季低温环境所造成的壁面内外温差值不大,但其温度分布则相反,夏季是外壁温度高于内壁温度,而冬季却是内壁高于外壁温度,因此在渡槽截面3个方向的应力分布特征也是截然相反,在冬季造成渡槽壁面内压外拉,而夏季则是内拉外压.

通过对渡槽全年正常运行温度环境进行的热应力数值计算分析,得到了渡槽结构的热应力分布规律,但由于混凝土的抗压性能较强,抗拉强度相对较小,因此重点分析了渡槽运行期间壁面温差所产生的拉应力值,其计算结果见表2.

表2数值计算结果表明,在每年的初春和初秋,其3个方向的拉应力值在0.40~0.99 MPa之间,对结构的正常运行还不会构成安全隐患,但由于外界环境气温对水温影响的反应时间相对滞后,造成全年大部分时间里封闭渡槽的内外温差很大,在槽身内外壁面产生了大于自身抗拉强度的拉应力值,到每年的6月及12月达到最大值,其各个方向的值均在2.74~4.18 MPa,极易导致混凝土开裂,随着裂缝的发展,最终将给渡槽的输水安全造成极大影响.

表2 温度应力数值计算结果

Tab.2 Numerical calculation results of thermal stress

| 日期 | 应力方向 | 最大拉应力值/MPa | 最大拉应力位置坐标/m | 较大拉应力分布区域 | 日期 | 应力方向 | 最大拉应力值/MPa | 最大拉应力位置坐标/m | 较大拉应力分布区域 |
|-------|------|------------|------------------|-----------|-------|------|------------|------------------|-----------|
| 06-15 | 横向 | 3.15 | $x=1.83; y=0.50$ | 底板内侧 | 03-15 | 横向 | 0.99 | $x=1.64; y=0.50$ | 底板外侧 |
| | 竖向 | 2.76 | $x=2.20; y=0.88$ | 腹板内侧下部 | | 竖向 | 0.57 | $x=2.75; y=0.97$ | 腹板外侧下部 |
| | 纵向 | 2.74 | $x=1.90; y=0.50$ | 腹板与底板内侧 | | 纵向 | 0.68 | $x=1.70; y=0.00$ | 腹板与底板外侧 |
| 12-15 | 横向 | 4.18 | $x=1.64; y=0.50$ | 底板外侧 | 09-15 | 横向 | 0.46 | $x=1.83; y=0.50$ | 底板内侧 |
| | 竖向 | 2.77 | $x=2.75; y=0.97$ | 腹板外侧下部 | | 竖向 | 0.41 | $x=2.20; y=0.88$ | 腹板内侧下部 |
| | 纵向 | 2.76 | $x=1.70; y=0.00$ | 腹板与底板外侧 | | 纵向 | 0.40 | $x=1.90; y=0.50$ | 腹板与底板内侧 |

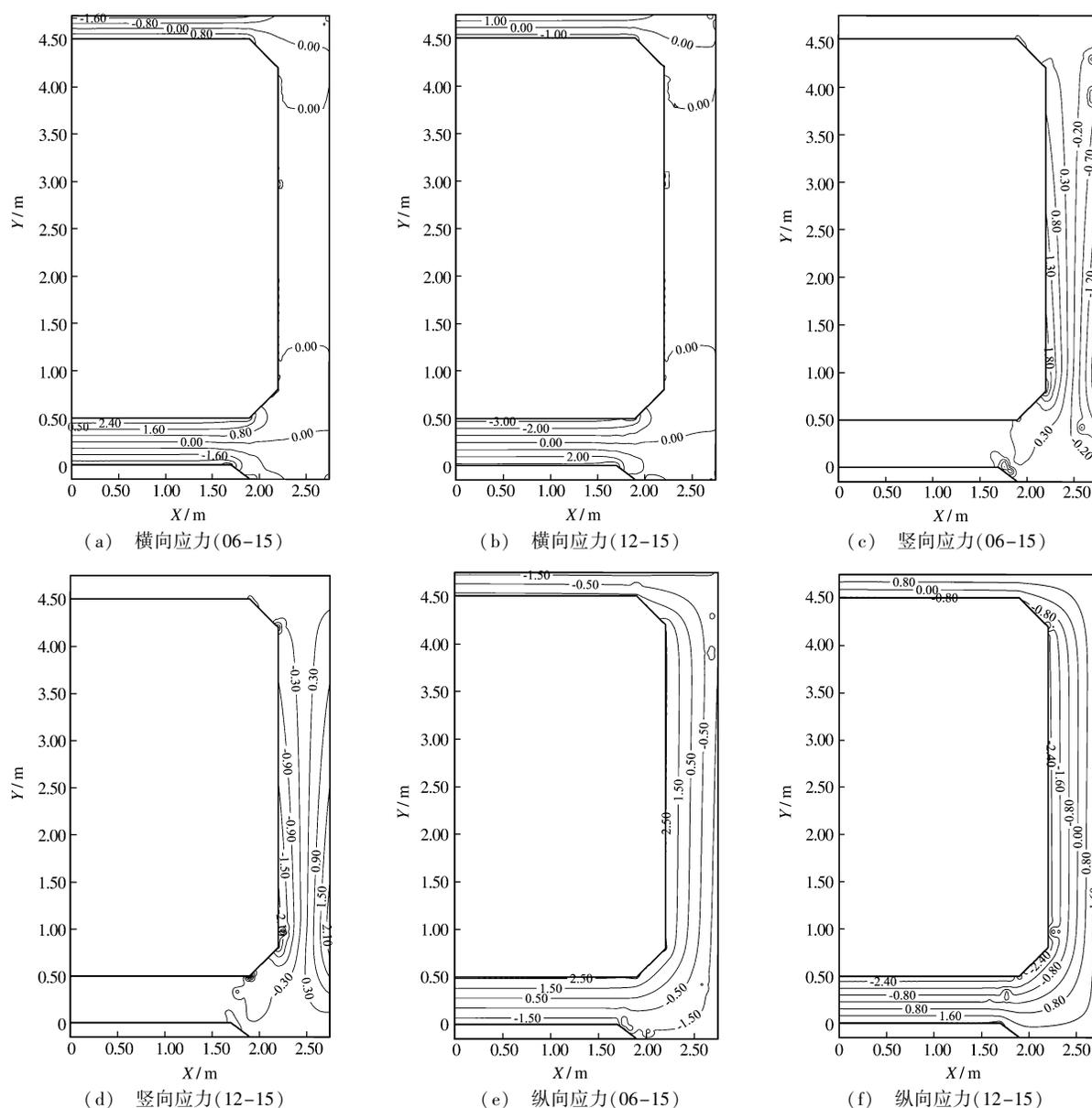


图3 渡槽输水运行期间的横截面应力分布(单位: MPa)

Fig.3 Stress distributions of the aqueduct cross-section during operation (unit: MPa)

3 结 语

根据传热学及有限元的基本理论,针对甘肃引洮输水工程沿线的气候资料及设计方案,建立了寒区封闭渡槽结构在正常运行后的热力耦合模型,通过对渡槽运行期间温度和应力的数值计算分析可得出以下初步结论:寒区封闭渡槽在长期运行过程中由于水温和气温所造成的温差均能在渡槽截面的横向、竖向及纵向产生很大的拉应力,其值均超过了混凝土的抗拉强度,而且渡槽全年大部分时间内壁面内外的温差很大,在渡槽腹板和底板都将出现较大拉应力,特别是每年的冬季与夏季,各个方向的温度拉应力值在 2.74 ~ 4.18 MPa,远大于 C30 号混凝土的抗拉强度设计值 1.43 MPa。因而存在一定的开裂风险,会在渡槽的长期运行中留下安全隐患,这应当引起设计、施工及运营有关部门的极大重视,采取相应的防治措施。

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. (LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [2] BRONCO F A, MENDES P A. Thermal actions for concrete bridge design[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2313-2331.
- [3] 王潘绣, 赵海涛, 黄冬辉. 暴雨降温作用下大型U型渡槽运行期温度场分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(9): 79-81. (WANG Pan-xiu, ZHAO Hai-tao, HUANG Dong-hui. Temperature field analysis of large U-type aqueduct under action of storm cooling[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(9): 79-81. (in Chinese))
- [4] 冯晓波, 夏富洲, 王长德, 等. 南水北调中线大型渡槽运行期温度场的计算[J]. 武汉大学学报, 2007(4): 25-28. (FENG Xiao-bo, XIA Fu-zhou, WANG Chang-de, et al. Calculation of temperature field of large-scale concrete aqueduct during operation period[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007(4): 25-28. (in Chinese))
- [5] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (WANG Xu-cheng, SHAO Min. The basic principles and numerical methods in finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (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 heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese))
- [7] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (ZHU Bo-fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [8] 宋书卿, 王长德, 冯晓波, 等. 空心渡槽的温度应力研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(11): 86-88, 90. (SONG Shu-qing, WANG Chang-de, FENG Xiao-bo, et al. Research on thermal stress of cavity aqueduct[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(11): 86-88, 90. (in Chinese))
- [9] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1998, 10(1): 8-14. (ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 10(1): 8-14. (in Chinese))
- [10] SAETTA A, SCOTTA R, VITALIANI R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(3): 446-457.
- [11] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. (ZHANG Zheng-rong. Heat transfer[M]. Beijing: China Higher Educational Press, 1989. (in Chinese))

Coupled thermo-mechanical analysis of a closed aqueduct of the Gansu Tao Diversion Project during operation

CHEN Wu¹, ZHANG Dong², LI Shuang-yang¹, ZHANG Ming-yi¹, PEI Wan-sheng¹

(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. Gansu Research Institute of Survey and Design of Water Conservancy & Hydropower, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Gansu Tao Diversion Project (GTDP) is located in seasonally frozen soil regions in Gansu Province, China. Based on the environmental temperature conditions for the closed aqueduct along the GTDP under normal water running, and according to the basic theory of heat transfer and finite element, a thermo-mechanical coupling numerical model for the closed aqueduct in cold regions is established to study numerically temperature and thermal stress distributions of the aqueduct for a whole year. The results show that the horizontal, vertical and longitudinal tensile stresses on the cross-section of the closed aqueduct resulted from water and air temperature difference exceed concrete tensile strength in the long-run process. Furthermore, the temperature difference between inside and outside walls of the closed aqueduct is relatively large so that a larger tensile stress will appear in more than half a year. Therefore, a certain cracking and security risk will exist in the long run. The design, construction and operation departments should be greatly focusing on such issues. It is hoped that the analysis results in this study can provide a scientific basis for effective design and safety maintenance of water supply aqueducts in other cold regions.

Key words: cold region; closed aqueduct; thermo-mechanical coupling; heat stress