

# 混凝土箱形渡槽日照高温下结构安全研究

季日臣<sup>a,b</sup>, 严娟<sup>a</sup>, 苏小凤<sup>a</sup>

(兰州交通大学 a. 土木工程学院; b. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:** 在分析箱形渡槽产生日照温差及温度应力的基础上, 利用 ANSYS 有限元软件对某渡槽日照温差及温度应力进行了有效的仿真模拟, 结果表明: 日照温差作用下, 在混凝土箱形渡槽槽身内表面无论沿纵向和横向都将产生可观的温度应力, 其值均已超过混凝土的抗拉设计强度。所以, 在箱形渡槽槽身结构设计中, 对日照温差作用产生的温度应力必须予以重视, 在设计中应配置适当的温度钢筋。

**关键词:** 水工结构; 箱形渡槽; 日照温差; 温度应力; 有限元软件

**中图分类号:** TV 121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0090-03

## Structural Safety Research of Concrete Box Aqueduct Under Solar Radiation with High Temperature

Ji Rì chēn<sup>a,b</sup>, YAN Juan<sup>a</sup>, SU Xiaofeng<sup>a</sup>

(Lanzhou Jiaotong University, a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The temperature difference and thermal stress of a box aqueduct under the solar radiation was simulated using the finite element software ANSYS. The results indicated that the considerable thermal stresses occur along the longitudinal and transverse directions of the inner surface of the concrete box aqueduct, and the average value of the thermal stresses exceeds the design tensile strength of concrete. Therefore, the thermal stress generated by the solar radiation should be considered in the design of body structure of box aqueduct, and temperature reinforcement needs to be configured during the design process.

**Key words:** hydraulic structure; box aqueduct; solar radiation; thermal stress; finite element software

在太阳照射下, 混凝土箱形渡槽的向阳外表面温度变化较大, 而背阳外表面温度变化较小, 且槽身的内表面与水流接触, 其温度接近于水温, 基本保持恒定, 从而使渡槽结构内产生较大的温度梯度, 即沿高度方向和板厚方向各纤维层的温度是不同的。当材料热胀冷缩, 作用产生的温度变形受到结构内部纤维约束和超静定约束时, 会在横向和纵向产生比较大的温度应力。

随着大跨度预应力箱形渡槽的建造数量不断增加, 温度效应及其对箱形渡槽结构的影响越来越受到人们广泛关注和, 国内外学者对钢筋混凝土箱梁桥的温度场和温度应力作了不少有益的研究与探讨<sup>[1-8]</sup>, 并取得了相应的成果, 积累了许多经验, 使得其计算理论逐步得到完善。但是, 各国规范规定的温度场(即温度梯度)模式选取方式有所不同, 甚至国内的《铁路桥规》<sup>[9]</sup>和《公路桥规》<sup>[10]</sup>在选取温度梯度模式上也截然不同, 以至于在同条件下按照不同规范规定的温度梯度进行计算, 结果在某些控制截面上会出现温度应力反号

的情况。如果温度梯度模式选用不当, 即使增大温度设计值, 也不能保证结构的抗裂性。另一方面, 渡槽箱身为流动的水体, 与箱梁桥的温度边界条件有很大的不同, 所以研究渡槽温度场时, 不能照搬箱梁桥温度场和温度应力的分析方法。目前因此工程界急需一套符合箱形渡槽日照温度边界特点的温度场和温度应力计算理论。本文在总结国内外温度场和温度应力研究成果的基础上, 根据箱形渡槽温度边界条件的特点, 通过有限元分析软件 ANSYS 对某箱形渡槽日照温度场和温度应力进行计算, 给出了其温度场和温度应力的分布规律。

## 1 渡槽的热传导方程

渡槽一般为狭长等截面结构, 可以近似地认为沿槽身长度方向(纵向)的温度分布是均匀的, 其温度沿槽身长度方向是常数, 即  $\partial T / \partial z = 0$ , 则横向温度场可以看作二维的平面问题, 这一假定已经被许多研究学者所证实。本文选择箱梁横

收稿日期: 2013-05-11 修回日期: 2013-09-06 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1029.041.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10902045); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1139)

作者简介: 季日臣(1969), 男, 山西朔州人, 教授, 博士, 主要从事水工结构设计理论与实践。E-mail: JIRICHEN@126.com

通讯作者: 严娟(1987), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: yanjuan\_well@163.com

截面建立二维模型来进行分析,其热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为混凝土的导温系数( $\text{m}^2/\text{h}$ ), $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$ ;  $\lambda$ 为混凝土导热系数( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $c$ 为混凝土的比热( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $\rho$ 为混凝土的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\theta$ 为混凝土的绝热温升( $^\circ\text{C}$ )。

处于运行期的渡槽,经过天然散热,水化热温升完全消失以后,结构的温度完全取决于气温、日照和箱内水体的影响。此时 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ ,故热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

## 2 渡槽热传导问题的定解条件

虽然上述热传导方程表达了物体的温度与时间、空间的关系,但满足热传导方程的解有无限多个。为了确定物体内部温度分布的情况,还必须引入边值条件(初始条件和边界条件),与微分方程联立求解。

(1) 初始条件。初始条件是指初始瞬时( $t=0$ )导热物体内部的温度分布,即:

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z) \quad (3)$$

(2) 边界条件。温度边界条件在传热学上分为四类,而在水工箱形渡槽中只有其中的第一类边界条件和第三类边界条件。

a. 第一类边界条件:混凝土表面的温度  $T$  是时间  $t$  的已知函数,即:

$$T(t) = f(t) \quad (4)$$

槽身混凝土与水接触,内表面温度等于水温,即  $T_{\text{混凝土}} = T_{\text{水}}$ 。

b. 第三类边界条件:当混凝土与空气接触时,表面热流量与混凝土表面温度  $T$  和气温  $T_a$  之差成正比,即:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \beta(T - T_a) - \alpha S = 0 \quad (5)$$

式中: $n$ 为槽身外法线方向; $\beta$ 为混凝土表面换热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ );  $\alpha$ 为混凝土表面日辐射热量吸收系数; $S$ 为日辐射强度( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

## 3 计算实例

### 3.1 实例概况

深圳水库渡槽横跨沙湾公路和深圳水库库尾,设计流量为  $24 \text{ m}^3/\text{s}$ ,过流断面为  $4.2 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ ,总长度为  $530 \text{ m}$ ,渡槽设计为  $48 \text{ m}$  跨度的预应力混凝土箱形槽身。这是我国水利工程建筑中首次在混凝土箱形渡槽中配置预应力钢束来提高结构跨度和抗裂防渗性能的水工构筑物。箱梁全高  $4.9 \text{ m}$ ,全宽  $5.0 \text{ m}$ ,顶板厚  $0.3 \text{ m}$ ,腹板厚  $0.4 \text{ m}$ ,底板厚  $0.4 \text{ m}$ ,顶板宽  $6.4 \text{ m}$ ,顶板两侧悬臂长  $0.7 \text{ m}$ 。工程所在地夏季某日在不同时刻的气温和太阳辐射强度见表 1。

混凝土材料的各个参数为:混凝土热膨胀系数  $\alpha$  为  $0.00001$ ,表面日辐射热量吸收系数  $\alpha_s$  为  $0.65$ ,热传导系数  $\lambda$  为  $2.94 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,比热  $c$  为  $880 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,混凝土弹性模量  $E$  为  $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.167$ ,剪切变形模量  $G_c$  为  $1.38 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,密度  $\rho$  为  $2500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。混凝土表面换热系数  $\beta$  见表 2。

表 1 不同时刻的气温和各边界太阳辐射强度

Table 1 Air temperature and solar radiant intensity in different times

时间	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
气温( $^\circ\text{C}$ )	28	29.1	30.2	31.9	33.6	34.3	34.9	35.7	36.5	34.8	33.1	31.3	29.5
顶板/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	20	134	325	560	787	951	1009	950	789	570	348	170	61
翼缘/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	8	29	51	71	87	98	101	98	87	71	50	28	8
东腹板/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	68	210	309	336	312	271	175	102	90	87	71	50	28
西腹板/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	27	51	72	86	95	106	165	261	315	326	301	169	25
底板/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	8	29	51	71	87	98	101	98	87	71	50	28	8

表 2 混凝土表面换热系数

Table 2 The heat transfer coefficient of concrete surface

部位	顶板	腹板及翼缘外侧	底板及翼缘下侧	箱内
$\beta/(\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	20.5	17.3	16.5	12.5

### 3.2 ANSYS 计算模型的建立

利用 ANSYS 对箱形渡槽二维平面温度场进行瞬态分析,选用四边形单元来划分网格。四边形单元采用 PLANE13,这种单元是热-应力耦合单元,便于热与结构的耦合场分析计算。分析模型由 1 146 个单元和 1 391 个节点所组成。计算温度应力时,在原有平面模型的基础上,把平面单元 PLANE13 拉伸成实体单元 SOLID5。实体单元是等截面简支静定体系,渡槽长  $48 \text{ m}$ ,渡槽在长度方向上共分为 24 个单元。在 ANSYS 软件中,渡槽纵向为  $Z$  轴,横截面在  $X-Y$  平面,且横截面的高度方向(竖向)为  $Y$  轴,宽度方向(横向)为  $X$  轴。把原平面单元上的

线荷载转换成实体单元上的面荷载,即可通过原温度场的平面单元建立的温度应力得实体单元,见图 1。

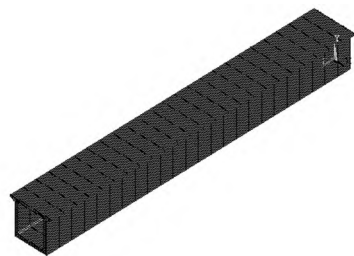


图 1 渡槽有限元模型

Fig. 1 FEM of aqueduct

### 3.3 温度场计算结果

图 2 给出了箱形渡槽在中午 14:00 的温度等值线图。可看出,箱形渡槽的日照温差分布比较复杂,温度呈外高内低的趋势。从箱形渡槽各板的温度分布来看,顶板温度变化最剧

烈,腹板次之,底板最小。顶板外表面大约在中午 14:00 左右出现最高温度,则此时形成最大竖向温差,温差呈二次曲线分布;东腹板外表面大约在上午 11:00 左右出现最高温度,西腹板外表面大约在 15:30 左右出现最高温度,此时腹板内外表面形成最大横向温差,温差呈二次曲线分布;底板外表面大约在 15:00 左右出现最高温度,温差呈二次曲线分布。

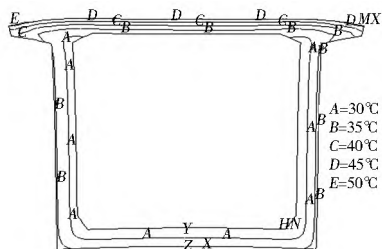


图 2 14:00 箱形槽身的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of box aqueduct at 14 o'clock

### 3.4 温度应力计算结果

筒支箱形渡槽槽身的纵向温差应力,因没有纵向外约束,故只有纵向自约束应力。而箱形槽身横向温差应力包含横向自约束应力和横向框架约束应力两部分。下面给出了渡槽槽身温度应力分布云图和计算结果表,见图 3 图 9 和表 3。



图 3 顶板 Z 方向应力变化

Fig. 3 Variation of stress in the Z direction at the top plate

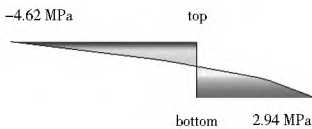


图 4 顶板 X 方向应力变化

Fig. 4 Variation of stress in the X direction at the top plate

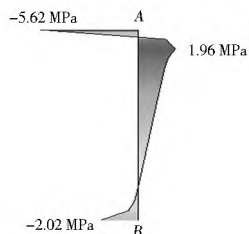


图 5 腹板 Z 方向应力变化

Fig. 5 Variation of stress in the Z direction at the web plate

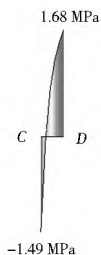


图 6 西腹板 Z 方向应力变化

Fig. 6 Variation of stress in the Z direction stress at the west web plate

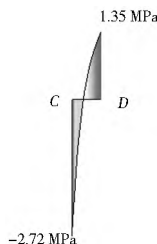


图 7 西腹板 Y 方向应力变化

Fig. 7 Variation of stress in the Y direction stress at the west web plate

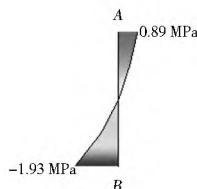


图 8 底板 Z 方向应力变化

Fig. 8 Variation of stress in the Z direction stress at the bottom plate

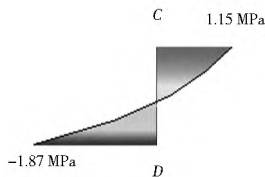


图 9 底板 X 方向应力变化

Fig. 9 Variation of stress in the X direction stress at the bottom plate

表 3 箱形渡槽槽身温度应力计算结果

Table 3 Calculated results of thermal stress of the box aqueduct

位置	最大温差时刻方向	图号	受压位置	最大压应力值/MPa	受拉位置	最大拉应力值/MPa
顶板	Z 方向	图 3	上缘	- 5.62	下缘	1.94
	X 方向	图 4	上缘	- 4.62	下缘	2.94
槽身高度	Z 方向	图 5	上缘	- 5.26	—	—
西腹板厚度	Z 方向	图 6	外侧	- 1.49	内侧	1.68
	Y 方向	图 7	外侧	- 2.72	内侧	1.35
底板厚度	Z 方向	图 8	外侧	- 1.93	内侧	0.89
	X 方向	图 9	外侧	- 1.87	内侧	1.15

## 4 结语

本文运用有限元分析理论建立平面分析模型,借助有限元软件对渡槽日照温度作用效应进行了仿真模拟,得出如下结论。

(1) 箱形渡槽的日照温度分布比较复杂,温度呈外高内低的趋势。从箱形槽身各板的温度分布来看,顶板温度变化最剧烈,腹板次之,底板最小。顶板外表面大约在中午 14:00 左右出现最高温度,东腹板外表面大约在上午 11:00 左右出现最高温度,西腹板外表面大约在 15:30 左右出现最高温度,底板外表面大约在 15:00 左右出现最高温度。

(2) 截面宽度方向最大拉应力出现在顶板下缘,截面高度方向最大拉应力出现在腹板内壁处,截面槽身长度方向最大拉应力出现在腹板内壁角隅处。

(下转第 109 页)

## 参考文献(References):

- [1] 孙寿. 水泵汽蚀及其防护[M]. 北京: 水利水电出版社, 1987. (SUN Shou. Cavitation And Protection of Pump[M]. Beijing: Water Conservancy And Hydropower Press, 1987. (in Chinese))
- [2] 梁在朝. 工程湍流[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999. (LIANG Zai chao. Engineering Turbulence[M]. Wuhan: Huazhong University of Science And Technology Press, 1999. (in Chinese))
- [3] Kline S J, et al. The Structure of Turbulent Boundary Layers [J]. J. Fluid Mech, 1967, 30: 74-773.
- [4] 何国庚, 梁柱. 平壁对空泡运动的影响[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1998, 13(4): 447-453. (HE Guogeng, LIANG Zhu. Effects of Flat Wall on Bubble Motion[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(4): 447-453. (in Chinese))
- [5] 是勋刚. 湍流[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994. (SHI Xugang. Turbulence[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1994. (in Chinese))
- [6] 邓军, 杨永全, 沈焕荣, 等. 水流含沙量对磨蚀的影响[J]. 泥沙研究, 2000, (4): 65-68. (DENG Jun, YANG Yongquan, SHEN Huanrong, et al. Influence to Abrasion of Sediment Concentration[J]. Journal of Sediment Research, 2000, (4): 65-68. (in Chinese))
- [7] 林建忠. 湍流的拟序结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. (LIN Jiang zhong. Coherent Structure of Turbulence[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993. (in Chinese))
- [8] 林建忠. 湍流动力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000. (LIN Jiang zhong. Turbulence Dynamics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 吴持恭. 水力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (WU Chigong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))
- [10] 刘士和, 刘江, 罗秋实, 等. 工程湍流[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (LIU Shi he, LIU Jiang, LUO Qiu shi, et al. Engineering Turbulence[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [11] 刘宇陆. 湍流相干结构的机理研究(Ⅰ)[J]. 应用数学和力学, 1996, (3): 189-195. (LIU Yu lu. On the Mechanism of Turbulent Coherent Structure(Ⅰ)[J]. Applied Mathematics And Mechanics, 1996, (3): 189-195. (in Chinese))
- [12] 周光炯. 流体力学(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000. (ZHOU Guang jiong. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Beijing Press, 2000. (in Chinese))
- [13] 冯汉民. 水泵学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1981. (FENG Hanmin. Pump[M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1981. (in Chinese))
- [14] 中国市政工程西南设计研究院. 给水排水设计手册(第二版)[K]. 北京: 中国建筑出版 2000. (Southwest China Municipal Engineering Design and Research Institute. Water Supply And Drainage Design Manual[K]. Beijing: Chinese Architectural, 2000. (in Chinese))
- [15] Jianzhong Lin, Liping Shen, Zexuan Zhou. The Effect of Coherent Vortex Structure In the Particulate Two-phase Boundary Layer On Erosion[J]. Wear, 2000, (6): 10-16. (in Chinese)

(上接第 92 页)

(3) 日照温差作用下混凝土箱形渡槽槽身内表面将产生可观的温度拉应力, 其值已超过混凝土的抗拉设计强度。所以, 建议在箱形渡槽槽身结构设计中应配置适当的温度钢筋, 以预防日照温差产生的温度应力的破坏作用。

## 参考文献(References):

- [1] 赵顺波, 胡志远, 李晓克. 大型多纵梁式钢筋混凝土渡槽结构受力试验研究[J]. 水力发电学报, 1999, 18(3): 42-51. (ZHAO Shunbo, HU Zhiyuan, LI Xiaoke. The Experiment Research of Reinforced Concrete Aqueduct with Multiple Longitudinal Beam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999, 18(3): 42-51. (in Chinese))
- [2] 季日臣, 陈尧隆. 大型多纵梁矩形渡槽结构静力计算方法研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 80-84. (JI Riqi, CHEN Yaolong. The Study on Static Structure Calculation Methods of Large Rectangle Aqueduct with Longitudinal Beams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(4): 80-84. (in Chinese))
- [3] 季日臣, 夏修身, 陈尧隆. 骤然降温作用下混凝土箱形渡槽横向温度应力分析[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 50-52. (JI Riqi, XIA Xiu shen, CHEN Yaolong. The Analysis of Transverse Thermal Stress of Concrete Box Aqueduct under Falling Temperature[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 50-52. (in Chinese))
- [4] 王长德, 冯晓波. 水工渡槽的温度应力问题[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 7-11. (WANG Chang de, FENG Xiaobo. Thermal Stress Question of Hydraulic Aqueduct[J]. Journal of Wuhan University, 1998, 31(5): 7-11. (in Chinese))
- [5] 竺慧珠, 陈德亮, 管枫年. 渡槽[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 42-46. (ZHU Huizhu, CHEN De liang, GUAN Fengnian. Aqueducts[M]. Beijing: Water Resource and Hydroelectric Engineering Publish, 2005: 42-46. (in Chinese))
- [6] 张云海, 李乔. 桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法的研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 49-52. (ZHANG Yuehai, LI Qiao. The Calculation Methods Research of Bridge Thermal Force and Stress under Solar Radiation[J]. Journal of China Highway, 2004, 17(1): 49-52. (in Chinese))
- [7] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 83-88. (XIANG Haifan. High Bridge Structure Theory[M]. Beijing: People Traffic Publish, 2001: 83-88. (in Chinese))
- [8] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991: 94-100. (LIU Xingfa. Thermal Stress Analysis of Concrete Structure[M]. Beijing: People Traffic Publish, 1991: 94-100. (in Chinese))
- [9] TB 10002. 3-2005, 铁路桥涵设计规范[S]. (TB 10002. 3-2005, Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S]. (in Chinese))
- [10] JTG D60 2004, 公路桥涵设计通用规范[S]. (JTG D60 2004, Code for Design on Highway Bridge and Culvert[S]. (in Chinese))