

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0096

马虎迎,石明星,严娟,等.高海拔地区日照对箱式渡槽热力效应分布研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):156-164,171. MA H Y, SHI M X, YAN J, et al. Impacts of sunshine on thermal distribution of box aqueduct in high altitude areas[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 156-164, 171. (in Chinese)

高海拔地区日照对箱式渡槽热力效应分布研究

马虎迎¹, 石明星^{2,3,4}, 严娟⁵, 陈茜⁶

(1. 兰州石化职业技术学院, 兰州 730060; 2. 兰州交通大学, 兰州 730000;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 四川现代职业学院, 成都 610207; 6. 甘肃土木工程科学研究院有限公司, 兰州 730020)

摘要:为研究高海拔地区日照对箱式渡槽的热力效应分布特征,为箱式渡槽结构的设计和施工提供指导,根据热传导理论及水工渡槽的温度边界条件对某高海拔地区箱式渡槽利用 ANSYS 进行了日照辐射的热力分布仿真分析,得出其各壁板总体温度呈外高内低的二次曲线分布状态,壁板温度应力表现为外表面受压内表面受拉分布状态,横向与竖向最大温度拉应力分别出现于顶板内侧与腹板内侧,最大温度压应力出现于顶板与腹板外侧,各壁板内外表面的温度应力呈先增后减趋势。因此,在进行箱式渡槽结构的设计和施工中通过配置温度钢筋、施加横向预应力或增加表面隔热措施来改善渡槽在日照作用下的热力分布状态,保证结构安全运行。

关键词:日照;箱式渡槽;温度;边界条件;温度应力

中图分类号:TV672.3;TV315 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impacts of sunshine on thermal distribution of box aqueduct in high altitude areas

MA Huiying¹, SHI Mingxing^{2,3,4}, YAN Juan⁵, CHEN Xi⁶

(1. Lanzhou petrochemical college of vocational Technology, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Sichuan Modern Vocational College, Chengdu 610207, China; 6. Gansu Civil Engineering Scientific Research Institute Co., Ltd, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The impacts of sunshine on thermal distribution of box-type aqueducts in high-altitude areas provide guidance for the design and construction of box-type aqueduct structures. The ANSYS is used in this study for a high-altitude box-type aqueduct, based on the heat conduction theory and the temperature boundary conditions of hydraulic aqueducts. The simulations of thermal distributions of the solar radiation show that the temperature of each wall is higher outside and lower inside with a quadratic distribution. The temperature stress of the wall is under expansion for the inner surface and under compression for the outer surface. The vertical maximum tensile stress appears on the inside of the top plate and the inside of the web. The maximum temperature compressive stress appears on the outside of the top plate and the web. The temperature stress on both inner and outer surfaces of each wall increases firstly and then decreases. Therefore, installation of temperature steel bars, lateral pre-stressing or surface heat insulation measures should be provided to improve the stress state of the

收稿日期:2018-09-20 修回日期:2019-03-20 网络出版时间:2019-04-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190329.1609.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(51768037);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1139);兰州市委组织部创新创业项目(2017-RC-52;兰州石化土木工程技术协调创新中心)

作者简介:马虎迎(1987—),男,甘肃天水人,讲师,主要从事水工结构与桥梁结构方面的教学和科研工作。E-mail:1057946278@qq.com

通信作者:石明星(1983—),男,甘肃兰州人,讲师,博士研究生,主要从事结构方面的教学和科研工作。E-mail:shimx@mail.lzjtu.cn

aqueduct under the action of sunlight, and to make sure the safe operation of the structure, in the design and construction of the box aqueduct structure.

Key words: sunshine; box aqueduct; temperature; boundary condition; temperature stress

随着经济的发展,渡槽常设计为箱式结构。在高海拔地区日照辐射强烈,混凝土是热的不良导体,封闭式薄壁预应力混凝土结构在日照辐射作用下,使其产生不均匀温度场,即随时间和空间位置的不同以及日照入射角的变换混凝土结构的温度分布随之变化,非日照面温度低于日照面,极易产生较大内外温差^[1],使混凝土结构产生裂缝和不规则翘曲变形,这在预应力混凝土结构中是不允许的。

日照辐射作用下,混凝土渡槽各壁面与周围介质实时进行着辐射与对流换热作用^[2],混凝土渡槽在太阳辐射作用下,内表面因与水流接触,温度基本稳定,且接近水温^[3-4],而向背阳表面的温度变化差异较大,从而使渡槽横纵向纤维层的温度不同,产生受材料纤维及结构约束作用的温度变形和温度应力。冯晓波等^[5]简化了渡槽温度边界条件,并对简化的温度边界条件计算方法的正确性进行了验证。季日臣等^[6-8]根据箱形渡槽温度边界特点,得到日照温度梯度分布模式,推导出渡槽温度应力计算公式并采用有限元软件进行了模拟验证。刘德仁等^[9-10]对寒区封闭渡槽的冬季安全运行进行了模型试验及保温研究。李玉河等^[11]仿真分析了不同截面渡槽的温度效应,并对比了各自的优缺点。李书群等^[12]研究了太阳辐射对运行期温度应力的影响及温控措施。梁飞等^[13]对受寒潮作用的早龄期箱形渡槽温度效应进行了分析研究。崔浩朋等^[14]模拟研究了运行期大型矩形渡槽在太阳辐射作用下的温度分布。宋书卿^[15]通过对南水北调河北某段渡槽截面的研究,得出了太阳幅射是渡槽产生温差的主要因素,并提出采用空腔渡槽结构可以有效减少温度梯度,进而可以有效的降低温度应力。宋田^[16]采用 Midas FEA 分析拟合了渡槽在日照作用下的温差曲线,并得出温度应力变化分布规律。李辉等^[17]针对新疆寒区温度变化特点,采用 ANSYS 软件分析了某渡槽的温度效应。

国内外学者已深入研究了类似箱形渡槽结构箱梁的温度效应分布规律^[18-25]。Sallal R Abid、Kim S H 等^[26-27]经试验研究推导出日照作用下箱梁竖向及横向最大温度梯度计算经验公式。董旭等^[28]通过研究波形钢腹板箱梁日照温度分布规律,得到温度梯度计算模型及温差效应。张建荣等^[29]分析了

影响箱梁挠度、变形及应变的太阳辐射吸收系数,并给出了等效温差。赵人达、季伟强等^[30-31]对箱梁日照温度边界条件及换热系数进行了研究,并采用有限元软件进行了分析。赵文斌、郑宏利等^[32-34]对寒旱大温差区的箱梁温度效应及影响也做出了较深入的研究。

本文根据渡槽在日照作用下的特有温度边界条件并借鉴箱梁温度效应分析方法,对某一运行期高海拔区渡槽的温度效应进行分析研究,给出其温度热力分布规律。

1 日照特点及传热学方程

日照辐射受地理纬度的影响较大,纬度越低,太阳入射角越大,日照辐射的路径越短,辐射越强,反之辐射越弱^[35],高海拔地区(西北地区为主)日照时数具有明显的地域性和季节性,年日照时数呈“两边少、中间多”分布状态,最长达 3 435.2 h,最少为 1 551.1 h,年平均日照时数大约在 1 500~3 400 h 之间,甘青新交界区为日照时数高值区,四季的分布格局与年分布基本一致,冬季最少为 270~720 h,夏季最多为 520~1 010 h,春季为 440~920 h,秋季为 280~840 h^[36]。

夏季日照作用下,温度沿槽体纵向的分布基本接近,故槽体纵向温差可不考虑,由此可将复杂的三维温度分布场简化为横竖向二维温度场($\partial T/\partial z=0$),即

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

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

运行期渡槽的混凝土基本不再产生水化热,渡槽温度分布取决于水温及外界环境条件,此时 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$,故传热学方程为

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

2 水工渡槽定解条件

为确定槽体各时刻 t 的温度分布,须引入渡槽

的初始条件和边界条件,并与传热学方程联立求解^[37]。

(1)初始条件

$t=0$ 时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

满足水工渡槽的温度边界条件如下:

a. 第一类边界条件。结构表面温度 T 是时间 t 的已知函数,即

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

b. 第三类边界条件。混凝土与环境大气接触时

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

考虑日照后的边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta \left[T - \left(T_a + \frac{\alpha_s S}{\beta} \right) \right] \quad (6)$$

式中: n 为槽身外法线方向; β 为渡槽表面换热系数 [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]; α_s 为日照辐射吸收率; S 为日照辐射强度 (W/m^2)。

3 计算实例

3.1 基本资料

某渡槽为箱式混凝土结构,呈南北走向布置,长 1.66 km,净高净宽分别为 4.0、5.0 m,顶板、腹板、底板厚分别为 25、30、35 cm,纵坡为 1/1300,糙率 0.014。渡槽地处海拔高区,辐射强度大、日照长、温差变化大。

3.2 温度荷载计算

假定渡槽表面光滑,混凝土均质、各向同性。C30 混凝土参数如下:密度 $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=3.1 \times 10^4 \text{ MPa}$,比热 $c=880 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ C)$,导热系数 $\lambda=1.74 \text{ W/(m} \cdot ^\circ C)$,泊松比 $\mu=0.167$,线膨胀系数 $\alpha=1.0 \times 10^{-5}$,日照辐射吸收率 $\alpha_s=0.65$ 。

对流换热系数与辐射换热系数在分析混凝土结构日照效应时是不可忽略的,换热系数与结构所在地的海拔及朝向有密切关系,随着海拔的升高,风速增大^[38],空气密度减小,透明度增加,日照辐射增强^[39],国内外学者在混凝土结构日照效应分析中,基于实测数据得出混凝土结构表面的换热系数均与风速呈正相关变化^[29-32,41-43]。

3.2.1 对流换热系数

对流换热系数在分析混凝土渡槽温度分布时是不可忽略的,本文采用 Kyle Buick 公式^[40]

$$\text{顶板外表面 } \beta_t = 3.83v + 4.67 \quad (7)$$

$$\text{底板外表面 } \beta_b = 3.83v + 2.17 \quad (8)$$

$$\text{腹板外表面 } \beta_e = 3.83v + 3.67 \quad (9)$$

$$\text{渡槽内表面 } \beta_i = 3.5 \quad (10)$$

式中: v 为风速, $v=2.5 \text{ m/s}$,则对流换热系数见表 1。

表 1 渡槽不同部位对流换热系数

Tab.1 Convection heat transfer coefficients

单位: $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

部位	顶板	腹板	底板	箱内
β	14.245	13.245	11.745	3.5

3.2.2 辐射换热系数

若仅认为结构表面与大气间存在热交换,槽内流动水体不进行热交换,则辐射换热系数 β_r 是时刻变化的,且是表面温度 T 和环境温度 T_a 的函数,但环境温度 T_a 在 $20^\circ C$ 至 $50^\circ C$ 间时,辐射换热系数 β_r 的变化较小,因此为便于本文的分析计算,取 $\beta_r=6.00 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ C)$ 。

3.2.3 综合换热系数

综合换热系数 $\beta = \beta_c + \beta_r$,计算结果见表 2。

表 2 不同部位综合换热系数

Tab.2 Comprehensive heat transfer coefficients

单位: $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

部位	顶板	腹板	底板	箱内
β	20.245	19.245	17.745	9.5

3.2.4 综合气温

由于热交换在渡槽各壁面存在差异,从而使顶板温度最高,底板温度较接近大气温度且变化一致,而腹板温度介于顶板与底板间,又因其内表面为第一类水工渡槽边界条件,因此渡槽内表面温度选取接近该地日平均气温的水温 $14^\circ C$ 。综合气温由下式计算

$$T_{sz} = T_a + \frac{\alpha_s S}{\beta} \quad (11)$$

式中: T_{sz} 为综合气温 ($^\circ C$)。

查阅当地气象资料,选取夏季某日气温较高的几个时刻进行研究,其气象数据见表 3 至表 5。

表 3 不同时刻环境温度

Tab.3 Environmental temperatures at different times

单位: $^\circ C$

时间	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
温度	17	20	24	27	29	28	25	21	19

表 4 不同时刻各边界太阳辐射强度

Tab. 4 Solar radiation intensities at each boundary at different times

单位: W/m²

部位	时间								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
顶板	325	602	823	931	968	944	906	713	540
底板	52	77	90	96	101	98	85	74	50
东腹板	309	346	312	267	173	105	88	69	41
西腹板	70	88	96	111	169	227	258	296	261

表 5 不同时刻各边界的综合气温值

Tab. 5 The integrated temperatures at each boundary at different times

单位: °C

部位	时间								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
顶板	27.435	39.328	50.424	56.891	60.079	58.309	54.089	43.892	36.338
底板	18.905	22.821	27.297	30.516	32.700	31.590	28.114	23.711	20.831
东腹板	27.436	31.585	34.538	36.018	34.843	31.546	27.972	23.330	20.385
西腹板	19.364	22.972	27.242	30.749	34.708	35.667	33.714	30.997	27.815

3.3 ANSYS 计算模型的建立

本文采用 ANSYS 中的热-力耦合四边形单元 PLANE13 建立平面二维有限元模型,分析求解在日照作用下封闭箱式渡槽的温度效应, X、Y 轴分别为横向与竖向,气温选取夏季温度较高的某日 10 时到 18 时的实测温度,单元划分见图 1。

3.4 温度场计算结果

由 ANSYS 分析计算结果可知,由于渡槽外表面温度受环境气温和太阳辐射影响较大,开始升温时,外表面较高,随着辐射强度的增强,内表面温度随之逐渐升高,这反映出混凝土的热传导具有滞后性,槽体表现出外高内低的温度分布状态,15 时左右槽体呈现最大温差分布,各时刻的渡槽壁板最大

内外温差见表 6。渡槽横向典型温度分布见图 2。

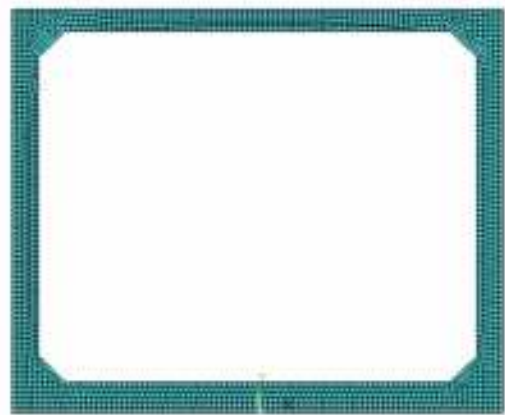


图 1 箱式渡槽截面单元划分

Fig. 1 Box aqueduct section unit division map

表 6 不同时刻壁板最大内外温差

Tab. 6 Differences between the maximum internal and external wall temperatures at different times

单位: °C

部位	时间								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
内外温差	6.226	15.412	22.081	27.893	32.313	33.965	33.304	29.921	25.25

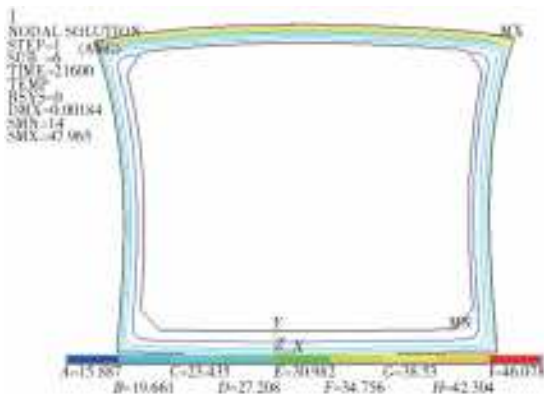


图 2 典型横向温度分布

Fig. 2 Typical lateral temperature profile

由各壁板历时变化的内外温度分布曲线可以看出,顶板因受太阳直射的影响温度变化最剧烈,底板温度变化最小,腹板温度介于顶板与底板间。东、西腹板分别在 12、16 时显现最高温度,处于最大横向温差分布状态。东腹板在达到最高温度前,西腹板温度低于东腹板温度,西腹板表面温度 12 时后开始升高,随之腹板表面温差逐渐递减。各壁板的内外温差均为二次曲线分布,且槽体的最大温差出现在 15 时左右,渡槽横向温度变化历时曲线见图 3。

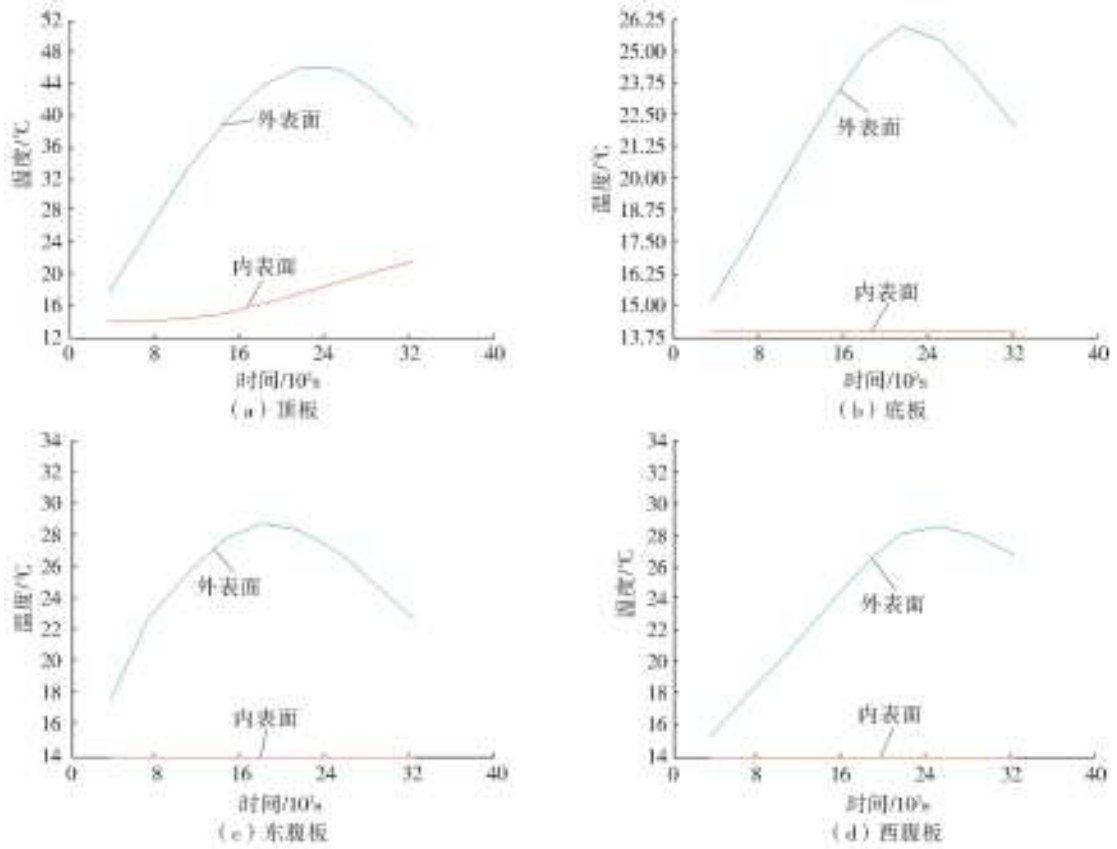


图 3 横向温度变化历时曲线
Fig. 3 Lateral temperature change duration curves

3.5 温度应力计算结果分析

由分析计算结果得,壁板温度应力表现为外表面受压内表面受拉的分布状态,横向与竖向最大温度拉应力分别出现于顶板内侧与腹板内侧,最大温

度压应力出现于顶板与腹板外侧,渡槽 X、Y 向温度应力分布见图 4。沿渡槽 X、Y 向各时刻的最大温度应力见表 7,由表 7 可知,渡槽内外表面的最大拉、压应力在不同时刻出现。

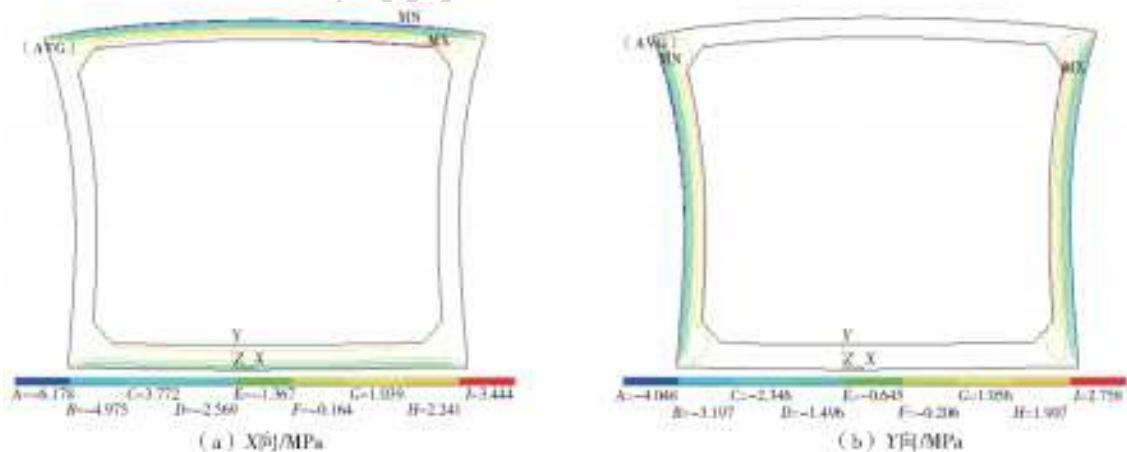


图 4 X、Y 向温度应力分布等值线
Fig. 4 X、Y directional temperature stress distribution

由各壁板历时变化的内外温度应力曲线可以看出,随着辐射强度以及环境温度的增强,顶板、底板外表面 X 向的压应力与腹板外表面 Y 向的压应力逐渐增大,达到最大值后逐渐减小;顶板、底板内表面拉应力以及腹板拉应力的变化趋势与外表面压应力的变化趋势一致,即先增后减。该变化规律进而

说明了箱形渡槽在日照辐射作用下,箱形渡槽的横向约束影响了横向纤维的非线性变形,纵向约束影响了纵向纤维的非线性变形,从而导致箱形渡槽外部受压、内部受拉的应力分布状态,图 5 为渡槽各壁板温度应力横向变化历时曲线,图 6 为渡槽各壁板温度应力分布。

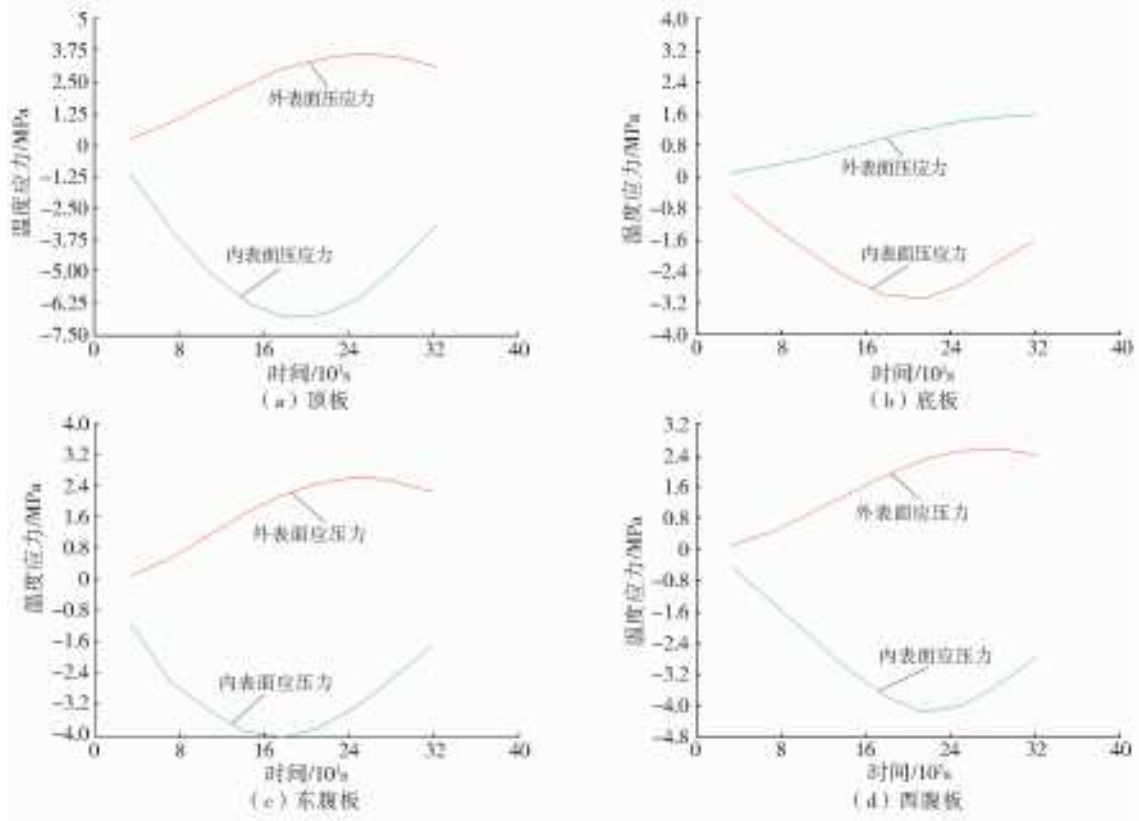


图5 壁板温度应力横向变化历时曲线

Fig. 5 Lateral changes of wall plate temperature stress

表7 各时刻 X、Y 向最大温度应力

Tab. 7 X,Y directional maximum temperature stress at each moment 单位:MPa

时刻	X 向		Y 向	
	拉应力	压应力	拉应力	压应力
10:00	0.443	-1.306	0.248	-1.181
11:00	1.340	-3.491	0.870	-2.714
12:00	2.264	-5.251	1.652	-3.544
13:00	3.125	-6.501	2.382	-4.196
14:00	3.750	-7.066	2.914	-4.371
15:00	4.045	-6.779	3.183	-4.473
16:00	4.170	-6.117	3.196	-4.218
17:00	4.159	-4.884	2.907	-3.58
18:00	3.839	-3.424	2.734	-2.787

4 结论

借助有限元软件,建立高海拔地区箱式混凝土渡槽的二维平面模型,并对其在考虑日照、热辐射与热对流时的热力效应进行了有限元仿真模拟,得出如下结论。

(1) 渡槽横向温度总体呈内低外高分布,15 时左右为最大温差分布状态,各壁板的内外温差均为二次曲线分布。由各壁板随时间变化的内外温度分布曲线来看,顶板因受太阳直射的影响其温度变化最剧烈,底板因不受太阳直射的影响其温度变化最

小,东、西腹板介于顶板与底板之间,东、西腹板分别在 12、16 时左右出现最高温度,东腹板在达到最高温度前,西腹板温度低于东腹板温度。

(2) 在渡槽横断面上温度应力总体呈现外部受压、内部受拉,横向与竖向最大拉应力分别位于顶板内侧与腹板内侧,最大压应力分别位于顶板与腹板外侧,各壁板内外表面的拉应力与压应力均呈先增后减的变化趋势。

(3) 绝大多数时刻渡槽的横向温度应力大于 1.43 MPa,超过混凝土抗拉强度设计值,会使渡槽表面出现裂缝,这对用于输水结构的安全运行及耐久性造成极大的危害,故而在设计高海拔地区箱形渡槽时,必须重视日照、热辐射与热对流等作用对渡槽结构的影响,通过配置温度钢筋、施加横向预应力或增加表面隔热措施来减小此危害。

参考文献(References):

[1] 高飞,陈潘,翁顺,等.非均匀日照条件下结构的三维温度场分析[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):1-6. (GAO F, CHEN P, WENG S, et al. Analysis of 3D temperature distribution of a structure subject to nonuniform solar radiation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(4): 1-6. (in Chinese)) DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.04.001.

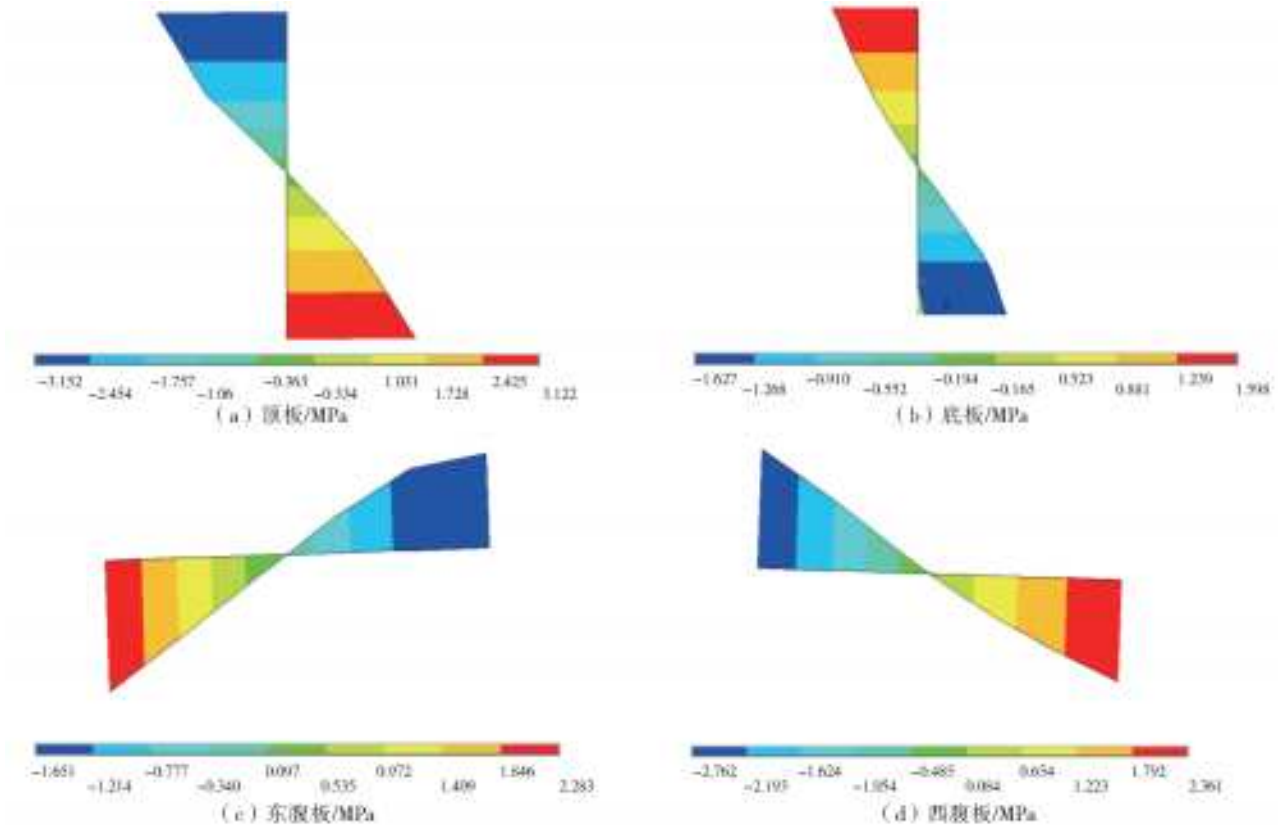


图 6 各壁板温度应力分布

Fig. 6 Temperature stress distributions of each wall

- [2] 顾斌, 陈志坚, 陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 950-955. (GU B, CHEN Z J, CHEN X D. Simulation analysis for solar temperature field of concrete box girder based on meteorological parameters [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2012, 42(5): 950-955. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.05.028.
- [3] 竺慧珠, 陈德亮, 管枫年. 渡槽[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHU H Z, CHEN D L, GUAN F N. Aqueduct[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005. (in Chinese))
- [4] 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 W, LIU D R, DONG Y H, 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) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.011.
- [5] 冯晓波, 王长德, 夏富洲. 沙河-大郎河箱基渡槽温度作用计算分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 98-101, 197. (FENG X B, WANG C D, XIA F Z. Calculation of the temperature action of Sha River-Dalang River box foundation aqueduct[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 98-101, 197. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.023.
- [6] 季日臣, 唐艳. 混凝土箱形渡槽日照温度场及纵向温度应力研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(4): 7-11. (JI R C, TANG Y. The solar radiation temperature field and lengthways thermal stress analysis of concrete box aqueduct[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(4): 7-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2009.04.002.
- [7] 季日臣, 唐艳, 何俊. 混凝土箱形渡槽日照温度场仿真分析[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(6): 5-9. (JI R C, TANG Y, HE J. Simulation analysis of solar radiation temperature field for concrete box aqueduct[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(6): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2010.06.002.
- [8] 陈茜, 季日臣. 日照作用下箱型渡槽温度场与温度应力研究[J]. 人民长江, 2014, 45(增2): 128-130. (CHEN X, JI R C. Analysis of the solar radiation temperature field and thermal stress of concrete box aqueduct[J]. Yangtze River, 2014, 45, (S2): 128-130. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.s2.040.
- [9] 刘德仁, 张东, 张世民. 北方寒冷地区封闭渡槽粘贴聚氨酯板提高保温效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 70-75. (LIU D R, ZHANG D, ZHANG S M. Increase insulation effect of polyurethane board pasting on closed aqueduct surface in cold regions[J]. Transactions of

- the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 70-75. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2013. 09. 010.
- [10] 刘德仁,杨成. 寒冷地区无压输水渡槽冬季运行模型试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(4): 56-59. (LIU D R, YANG C. Model study of non-pressure water delivery flume operation in cold[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(4): 56~59. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1001-4373. 2013. 04. 01.
- [11] 李玉河,吴泽玉. U型和矩形渡槽温度应力对比分析[J]. 人民长江, 2008, 39(16): 67-68. (LI Y H, WU Z Y. Comparison analysis of thermal stress of U-shaped and rectangular aqueduct[J]. Yangtze River, 2008, 39(16): 67-68. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnkj. 1001-4179. 2008. 16. 022.
- [12] 李书群,和秀芬. 南水北调中线沿河渡槽运行期温度影响及对策[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(3): 22-24. (LI S Q, HE X F. Temperatuer influence and countermeasure in the Minghe aqueduct in the Middle Route Project of the Souht-to-North Water Transfer [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(3): 22-24. (in Chinese)) DOI:10. 13476 /j. cnki. nsbdqk. 2006. 03. 009.
- [13] 梁飞,季日臣. 寒潮期间早龄期箱形渡槽的温度效应分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 128-130. (LIANG F, JI R C. Temperture effect analysis of early age of box aqueduct during clod wave [J]. Yellow River, 2017, 39(4): 128-130. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2017. 04. 027.
- [14] 崔浩朋,刘洋,赵宁. 大型矩形混凝土渡槽运行期太阳辐射温度场模拟研究[J]. 河南科技学院学报, 2014, 42(1): 67-72. (CUI M H, LIU Y, ZHAO N. Study on temperature field of huge concrete aqueducts in operation period under solar radiation[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2014, 42(1): 67-72. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-7516. 2014. 01. 013.
- [15] 宋书卿. 特大型空心渡槽运行期温度应力研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (SONG S Q. The study of huge hollow aqueducts thermal stress in running phase[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [16] 宋田. 连续刚构渡槽温度场及温度应力分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. (SONG T. Analysis of temperature field and thermal stress on continuous rigid frame aqueduct [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. Y2377451.
- [17] 李辉,刘建军. 新疆北疆寒区渡槽温度应力的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009, 27(5): 642-645. (LI H, LIU J J. The thermal stresses influence of aqueduct structure in cold area of north Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2009, 27(5): 642-645. (in Chinese)) DOI: 10. 13880/j. cnki . 65-1174/n . 2009. 05. 008.
- [18] 姚刚,余志给,杨阳,等. 单室箱梁电热器养护温度场及温度应力分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 109-114. (YAO G, YU Z J, YANG Y, et al. Study on temperature field and temperature stress of single-cell box girder cured with electric heater[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 109-114. (in Chinese)) DOI:10. 15951/j. tmgxcb. 2018. 03. 012.
- [19] 游华明. 福州地区混凝土箱梁板厚及竖向温度梯度研究[J]. 公路交通科技, 2017, 33(5): 63-71. (YOU H M. Study on thickness of concrete box girder slab and vertical temperature gradient in Fuzhou area [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(5): 63-71. (in Chinese)) DOI: 10. 13607/j. cnki. gljt. 2017. 05. 013.
- [20] 聂利英,刘明坡,朱倩,等. 基于实测的混凝土箱梁底板温度梯度研究[J]. 重庆交通大学(自然科学版), 2017, 36(10): 8-14. (NIE L Y, LIU M P, ZHU Q, et al. Bottom plate temperature gradients of concrete box-girder based on the measured data[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(10): 8-14. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-0696. 2017. 10. 02.
- [21] 施威. 沅江大桥混凝土箱梁日照温度场与温度应力研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(4): 59-63. (SHI W. Study of solar temperature field and temperature stress for box girder of Yuanjiang River bridge [J]. World Bridges, 2016, 44(4): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671- 7767. 2016. 04. 013.
- [22] 高大峰,黄旭,陈凯旋,等. 预应力混凝土连续箱梁桥温度效应研究[J]. 公路工程, 2016, 41(2): 80-83. (GAO D F, HUANG X, CHEN K X, et al. Research on temperature effects for prestressed concrete continuous box-girder bridges[J]. Highway Engineering, 2016, 41(2): 80-83. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-0610. 2016. 02. 018.
- [23] 杨璐,王志坤,于永彬. 预应力混凝土箱型梁温度效应下耦合应力分析[J]. 混凝土, 2015(10): 139-143. (YANG L, WANG Z K, YU Y B. Sequentially coupled thermal stress analysis of the prestressed concrete box girder[J]. Concrete, 2015(10): 139-143. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2015. 10. 034.

- [24] 彭友松,朱晓文,强士中. 混凝土箱梁温度应力三维分析[J]. 铁道学报,2009,31(3):116-121. (PENG Y S, ZHU X W, QIANG S Z. Three dimensional analyses of thermal stresses in concrete box-girders[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(3): 116-121. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2009.03.021.
- [25] 陈权,王丽娟,张元海,等. 连续箱梁的日照温差应力计算研究[J]. 公路交通科技,2009,26(8):99-104. (CHEN Q, WANG L J, ZHANG Y H, et al. Study on calculation of sunshine thermal stress in continuous box-girders[J]. Technology of Highway and Transport, 2009, 26(8): 99-104. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2009.08.020.
- [26] ABID S, TAYSI N, OZAKCA M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders[J]. Construction & Building Materials, 2016, 106(C): 523-532. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.144.
- [27] KIM S H, PARK S J, WU J, et al. Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015(112): 80-92. DOI:10.1016/j.jcsr.2015.04.016.
- [28] 董旭,邓振全,李树忱,等. 大跨波形钢腹板箱梁桥日照温度场及温差效应研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 230-238. (DONG X, DENG Z Q, LI S C, et al. Research on sun light temperature field and thermal difference effect of long span box girde with corrugated steel webs[J]. Engineering Mechanical, 2017, 34(9): 230-238. (in Chinese)) DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.09.0727.
- [29] 张建荣,周元强,林建萍,等. 太阳辐射对混凝土箱梁温度效应的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(11): 1479-1484. (ZHANG J R, ZHOU Y Q, LIN J P, et al. Solar radiation affection on concrete box girder temperature effect[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences), 2008(11): 1479-1484. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0253-374X.2008.11.005.
- [30] 赵人达,王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 52-61. (ZHAO R D, WANG Y B. Studies on temperature field boundary conditions for concrete box-girder bridges under solar radiation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 31(2): 138-144. (in Chinese)) DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.007.
- [31] 季伟强,吴定俊,李奇. 混凝土箱梁桥日照温度场有限元分析与辐射换热系数研究[J]. 结构工程师, 2015, 31(2): 138-144. (JI W Q, WU D J, LI Q. The finite element analysis for temperature field of concrete box girder bridge and study on radiating heat transfer coefficient[J]. Structural Engineers, 2015, 31(2): 138-144. (in Chinese)) DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2015.02.019.
- [32] 赵文斌,刘建勋,张戎令,等. 大温差、干寒地区日照对混凝土箱梁的影响规律[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 137-142. (ZHAO W B, LIU J X, ZHANG R L, et al. Effect of sunlight on concrete box girder in arid and cold region with large temperature difference [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 137-142. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20160899.
- [33] 郑宏利. 寒旱区正交异性板连续钢箱梁桥日照温度场研究[J]. 钢结构, 2017, 32(6): 52-58. (ZHENG H L. Research on sunlight temperature field of continuous steel box girder bridge with orthotropic plates in cold and arid region[J]. Steel Construction, 2017, 32(6): 52-58. (in Chinese)) DOI:10.13206/j.gjg201706009.
- [34] 孙维刚,陈永瑞,刘来君,等. 寒冷地区混凝土箱梁温度场研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(7): 962-967. (SUN W G, CHEN Y R, LIU L J, et al. Study of temperature field of concrete box girder in cold area[J]. Journal of Hefei University of technology, 2015, 38(7): 962-967. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2015.07.019.
- [35] 封志明,郑海峡,杨艳昭. 基于 GIS 气候资源区域化问题研究—以甘肃省为例[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 89-96. (FENG Z M, ZHENG H X, YANG Y Z. Study on the zonal digitization of agricultural climateresources based on GIS; Case study of Gansu Province[J]. Scientia Geographica Sinica(in Chinese), 2004, 24(4): 89-96. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2004.04.010.
- [36] 陈少勇,张康林,邢晓宾,等. 中国西北地区近 47 a 日照时数的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1142-1152. (CHEN S Y, ZHANG K L, XING X B, et al. Climatic change of sunshine duration in Northwest China during the last 47 years[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1142-1152. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.07.011.
- [37] 季日臣,严娟,苏小凤. 混凝土箱形渡槽日照高温下结构安全研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 90-92, 109. (JI R C, YAN J, SU X F. Turctural safty research of concrete box aqueduct under solar radiation with high temperature[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 90-92. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.j.1201.2013.06090.

(下转第 171 页)

- [7] 杨宇. 底流消能工水流结构区气体迁移扩散试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017. (YANG Y. Experimental study on gas migration and diffusion of water flow structure in underflow energy dissipator. [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [8] 张格. 异型宽尾墩的水力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHANG G. Study on hydraulic characteristics of shaped wide-tailed pier[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] 孙伦. 新疆某水电站拦河枢纽下游消能防冲试验研究. [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017. (SUN L. Experimental study on energy dissipation and erosion prevention of the downstream of a hydropower station in Xinjiang [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017. (in Chinese))
- [10] 徐振坤, 郭毅. 中低水头枢纽坝下局部冲刷问题的初探[J]. 中国水运, 2016(10): 172-175. (XU Z K, GUO Y. Preliminary study on local scour under the dam of medium and low head[J]. China Water Transport, 2016(10): 172-175(in Chinese))
- [11] 陈娟, 潘秀华, 张正扬. 平原地区人工景观湖水力模型试验与研究[J]. 江苏水利, 2018(10): 34-40. (CHEN J, PAN X H, ZHANG Z Y. Experimental and research on hydrodynamic model of artificial landscape lake in plain area[J]. Jiangsu Water Conservancy 2018(10): 34-40(in Chinese))
- [12] 李国栋, 李珊珊, 牛争鸣. 表孔、底孔联合泄洪流场数值模拟与冲刷趋势分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3): 26-34. (LI G D, LI S S, NIU Z M. Numerical simulation of surface outlet and bottom outlet joint flood discharge energy dissipation and scour trend analysis[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2016, 48(3): 26-34. (in Chinese))
- [13] 南京水利科学研究所, 水利水电科学研究院. 水工模型试验(第二版)[M]. 水利电力出版社 1985: 339-340. (Nanjing Hydraulic Research Institute, Institute of Water Resources and Hydropower Research. Hydraulic Model Test (Second Edition)s[M]. Water Resources and Electric Power Press, 1985: 339-340. (in Chinese))

(上接第 164 页)

- [38] 高庆龙. 基于空间分布的建筑节能气象参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. (GAO Q L. Research on weather data for building energy efficient based on the space distribution[D]. Xian: Xi'an Architecture & Technology University, 2011. (in Chinese))
- [39] 翁笃鸣, 孙治安. 中国可能太阳直接辐射的气候计算及其分布特征[J]. 南京气象学院学报, 1987, 10(1): 9-19. (WEN D M, SUN Z A. Research on weather data for building energy efficient based on the space distribution[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1987, 10(1): 9-19. (in Chinese)) DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1987.01.02.
- [40] KYLE BUICK. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981. (KYLE B. Effect of solar radiation on the bridge structure[M]. Beijing: China Railway Press, 1981. (in Chinese))
- [41] MIRAMBELL E, AGUADO A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(9): 2388-2409. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:9(2388).
- [42] VITALIANI R, SAETTA A, SCOTTA R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 446-457. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:3(446).
- [43] MOORTY S, ROEDER C W. Temperature dependent bridge movements[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(4): 1090-1105. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:4(1090).