文章编号:1672-3031(2022)02-0104-08

多泥沙淤积对高混凝土拱坝温度应力的影响研究

李松辉[1], 肖宏武[2], 雒翔宇[1], 李 萌[2]
(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司, 陕西 西安 713200)

摘要: 在黄河等多泥沙河流上修建高混凝土拱坝, 泥沙淤积对库水温必会产生一定影响, 进而影响大坝稳定温度场及温度应力。基于上述问题, 以泾河下游峡谷出口东庄水库230 m级高混凝土拱坝为研究对象, 利用库水温计算方法和大坝仿真分析法, 通过考虑坝前有无淤沙的工况, 分析不同淤沙情况下的大坝水库水温、稳定温度场和温度应力。结果表明, 与坝前无泥沙淤积工况比较, 坝前泥沙淤积时可提高库底水库水温, 从而提高坝体稳定温度场、降低坝体温度应力。从温控防裂方面反映出库底淤沙对坝体稳定的有利作用, 该研究成果可为多泥沙河流坝体温控设计提供一定的参考意义。

关键词: 多泥沙淤积; 水库水温; 稳定温度场; 温度应力
中图分类号: TV642 **文献标识码**: A **doi**: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200259

1 研究背景

水库通过蓄水成库后, 水库水温的变化受到多方面因素的影响, 主要受来水水量与水温、运行调度方式的影响, 但本质上是水体的热量运动问题。水库水温年内的分布变化, 均是热量平衡下的热传导形成的。上游水库水温分布直接影响到大坝运行期稳定(准稳定)温度场的分布情况。尤其是对于较薄的坝体结构而言, 由于坝体上下游方向较薄, 上游水库水温分布对运行期稳定(准稳定)温度场的影响更大。特别是对于坝体基础约束区, 上游库底水温将直接影响到大坝的基础温差和混凝土允许最高温度, 从而影响到大坝的温控设计[1-3]。

水库水温的变化主要受到环境、气象、运营期淤沙的影响。而对于淤沙较为严重的水库设计中, 淤沙对温控设计的影响作用常常被忽略, 造成设计不准确等不利因素。由于黄河的含沙量巨大, 目前其河流上所建设的大坝淤沙问题均较为严重, 泥沙淤积高度可达到百米以上。淤沙问题对于坝体运营期的影响主要包括淤沙荷载、淤沙引发的温度荷载、库容量变化等[4-5]。其中大坝淤沙问题引发的混凝土坝温控防裂是工程运营安全的重要问题之一[6]。根据研究发现泥沙淤积达到一定高度将会对大坝的水库水温、稳定温度及温度应力造成一定的影响[7-10]。因此淤沙对于水库水温、坝体温度温度场、坝体温度应力的影响不容忽视。例如黄河上东庄水利枢纽地处陕西省礼泉县泾河下游峡谷出口处, 为大(1)型Ⅰ等工程, 该工程是黄河水沙调控体系的重要支流水库, 坝型为双曲拱坝, 最大坝高为230 m。根据多年的工程实测分析可知, 年均含沙量为144 kg/m^3, 实测最大含沙量高达1428 kg/m^3, 泥沙淤积通常在百米以上。

基于上述问题, 本文以该水利枢纽为研究对象, 就无泥沙淤积和有泥沙淤积条件下该高拱坝的水库水温、稳定温度场和温度应力进行了数值仿真计算。探索分析淤沙问题对大坝温度应力影响的规律特征。从温控防裂角度阐明坝前淤沙对混凝土坝结构的影响作用, 从而对于工程中淤沙处理及

收稿日期: 2020-12-23; 网络首发时间: 2021-08-16
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210813.1553.002.html
基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC0406704); 陕西省水利科技项目(2019slkj-B2); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(ss0145b932017)
作者简介: 李松辉(1979-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事混凝土坝温控防裂关键技术研究。E-mail: lish@iwhr.com
通讯作者: 雒翔宇(1989-), 博士, 工程师, 主要从事混凝土坝温控防裂关键技术研究。E-mail: luo_xy@iwhr.com

大坝温度场分析提供一定的依据。

2 计算方法

淤沙对混凝土温控防裂的影响分析需要从三方面计算：淤沙对水库水温的影响分析、水库水温对混凝土坝温度场的影响分析、混凝土坝温度应力的分析。因此将基于水库水温计算方法、混凝土温度场计算方法、混凝土温度应力计算方法分析泥沙淤积对混凝土坝运营期温控防裂的影响。

(1)由于淤沙导致的库水温计算，本文将分析淤沙导致的整个库水温变化情况，不仅考虑了库区的水文气象要素，还考虑了水库建成后的运行情况，根据一个微元的垂直向、水平向、短波辐射热、扩散作用及水体升温吸热的热量运动，给定初始条件和边界条件后，库水温的控制方程如式(1)所示[11-12]：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=\left\{\frac{1}{A}\left[\left(D_m+E\right)\frac{\partial A}{\partial y}+A\frac{\partial E}{\partial y}\right]-\nu\right\}\frac{\partial T}{\partial y}+\left(D_m+E\right)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{q_i}{A}\left(T_i-T\right)+\frac{0.001\left(1-\alpha\right)\varphi_0}{c}e^{-k\left(y_s-y\right)}\left(\frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial y}+k\right) \tag{1}$$

式中：c为水的比热；ρ为水的密度；T为水的温度；v为水的流速；q_i为入库水流单位高度的流量；T_i为入库水流的温度；q_0为出库水流单位高度流量；$R(y)$为高度y处的短波辐射热；k为辐射热的衰减系数；$A(y)$为y高程库面积；D_m为水分子扩散系数；E为水的紊动扩散系数(本文根据入库流量定义)；φ_0为水面吸收的太阳能；α为小于1.0的系数。

(2)温度场计算方法：在计算获取的水库水温后需要计算混凝土温度场，在温度场的计算中可以认为是均匀、各向同性体，其满足式(2)的微分方程[13]：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{1}{a}\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau}-\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)=0 \tag{2}$$

边界条件是：

$$T=\bar{T} \tag{3}$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=q \tag{4}$$

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

式中：τ为时间，h；λ为导热系数；a为导温系数$a=\lambda/c\rho$，m^2/h；θ为绝热温升；$q=q(\tau)$为第二类边界条件；β为第三类边界上的表面放热系数。

式(3)表示坝体表面温度就是水库水温；式(4)表示混凝土表面需要给出热流量，当q=0时为绝热边界；式(5)表示坝体与水库中水的接触传热特征。

利用上述的热平衡方程结合不同的边界条件进行计算分析。根据方程，利用现有的有限元程序及计算网格，即可实现考虑边界条件的混凝土温度场仿真分析。

(3)应力场计算方法：通常情况下，混凝土的仿真分析将考虑自生材料的时效变化因素[14]。某一时段内的应变增量表示为：

$$\left\{\Delta\varepsilon_n\right\}=\left\{\Delta\varepsilon_n^e\right\}+\left\{\Delta\varepsilon_n^c\right\}+\left\{\Delta\varepsilon_n^T\right\}+\left\{\Delta\varepsilon_n^0\right\}+\left\{\Delta\varepsilon_n^s\right\} \tag{6}$$

式中：$\left\{\Delta\varepsilon_n\right\}$、$\left\{\Delta\varepsilon_n^e\right\}$、$\left\{\Delta\varepsilon_n^c\right\}$、$\left\{\Delta\varepsilon_n^T\right\}$、$\left\{\Delta\varepsilon_n^0\right\}$、$\left\{\Delta\varepsilon_n^s\right\}$为不同影响因素的应变增量。

由物理方程、几何方程和平衡方程进行整体的单元集成，可得整体平衡方程：

$$\left[\boldsymbol{K}\right]=\left\{\Delta\delta_n\right\}=\left\{\Delta P_n\right\}^L+\left\{\Delta P_n\right\}^C+\left\{\Delta P_n\right\}^T+\left\{\Delta P_n\right\}^0+\left\{\Delta P_n\right\}^S \tag{7}$$

式中：$\left[\boldsymbol{K}\right]$为混凝土刚度矩阵；$\left\{\Delta\delta_n\right\}$为位移增量；$\left\{\Delta P_n\right\}^L$、$\left\{\Delta P_n\right\}^C$、$\left\{\Delta P_n\right\}^T$、$\left\{\Delta P_n\right\}^0$、$\left\{\Delta P_n\right\}^S$为不同因素引起的荷载增量，本文主要研究温度荷载影响。

本研究中主要分析温度因素引起的载荷增量，在进行温度荷载分析时需要考虑混凝土基本的发

热、散热过程外，需要通过第三类边界条件考虑水库水温对坝体的影响。

3　多泥沙淤积对混凝土坝的影响

基于上述第二节的理论计算泥沙对水库水温的影响，从而进一步分析对混凝土坝温度应力的影响。本研究所用的拱坝模型为混凝土拱坝，坝体拱型为抛物线，顶拱拱冠梁厚度为11.50 m，底拱拱冠梁厚度为49.50 m，拱坝厚高比0.215。水文气象、环境、库水特征均以监测、设计结果为准。在考虑淤沙的计算过程中，对于淤沙高程范围内的边界条件进行了适当修改，主要包括浑水层面的热力学影响因素[13]。

水库水温计算信息如表1所示，水库的形状参数包括水库库容、水库深度、水库水位–库容–面积关系等。表2为某水库水位–面积–库容关系特征值。式(1)中各项参数通过表1、表2、表3分析确定。不同月份来水的流量、含沙量及水温如表3所示，计算所需的热力学参数如表4所示。

表1　东庄水库水位信息

水位	数值/m
正常蓄水位	789
汛期限制水位	780
死水位	756
设计洪水位	799.21
校核洪水位	803.29

表2　东庄水库特殊水位–面积–库容关系

水位/m	面积/km^2	库容/亿m^3
656.00	3471.126550	0.703242
658.00	3694.401920	0.774659
704.00	12255.174860	4.347636
706.00	12644.020590	4.596641
756.00	27775.724260	14.367967
780.00	38331.600960	22.302732
788.00	42321.970010	25.518173
790.00	43684.134840	26.378561
798.00	48802.820370	30.085589
800.00	50020.881050	31.073931

表3　东庄水利枢纽上游来水水温、流量、含沙量

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
水温/℃	0.1	3.6	8.5	14.5	17.9	22.0	22.7	21.7	18.5	14.1	4.5	0.8	12.4
水量/亿m^3	0.49	0.64	1.00	0.80	0.89	0.95	2.78	3.54	2.46	1.69	1.04	0.65	16.92
水量占全年/%	2.90	3.80	5.90	4.71	5.27	5.62	16.41	20.91	14.54	9.99	6.16	3.81	100.0
沙量/亿t	0.000	0.000	0.003	0.010	0.057	0.132	0.861	1.053	0.229	0.025	0.003	0.000	2.37
沙量占全年/%	0.01	0.02	0.15	0.43	2.41	5.56	36.25	44.35	9.63	1.06	0.11	0.01	100.0
含沙量/(kg/m^3)	0.31	0.76	3.51	12.96	64.28	138.7	310.0	297.7	92.91	14.90	2.52	0.41	140.3

表4　混凝土热力学参数

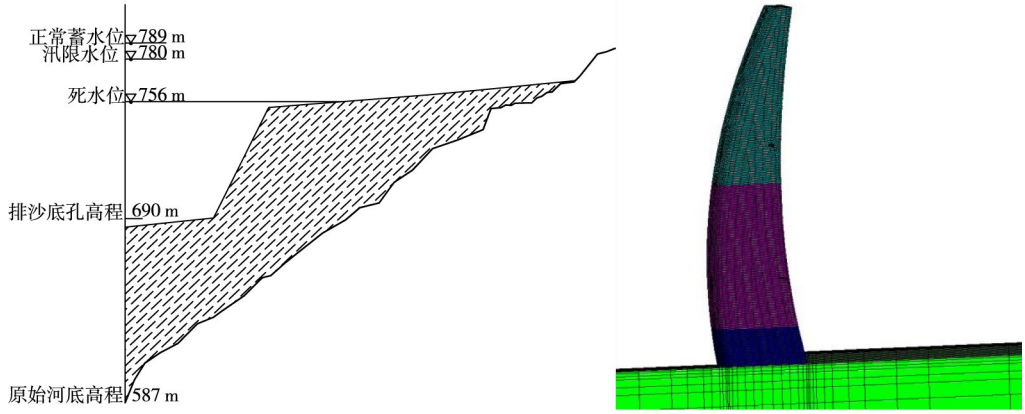
弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数×10^{-6}	绝热温升/℃	导热系数/(kJ/(m·h·℃))
39	0.167	5.1	20	8.0

本研究的淤沙形态及坝体计算模型如图1所示。

3.1　多泥沙淤积对水库水温的影响　本文采用自主研发软件NAPRWT计算库水温。计算工况如表5所示，表6为计算结果。

图2和图3为清水工况和泥沙淤积工况水库水温计算结果，表6为各高程年平均水库水温，数值分析模拟年内运行水位为正常蓄水位789.0 m。上游库表面水温受气象水文条件及水库运行条件的影响，年平均表面水温为12.9 ℃。但是随着水深的增加，由于泥沙淤积可最高提升库底水库水温8.7 ℃。从高处750米以下开始出现差距，而且随着水深的增大，差距越来越大。同时可以发现，不同淤沙高程对水库水温的影响差距主要集中于高程为640 m到750 m范围内。

3.2　多泥沙淤积对大坝稳定温度场的影响　大坝运行多年后水化热影响消除后，坝体内部温度趋于稳定，稳定温度场是确定封拱温度和允许最高温度的重要依据。本文以水库水温数值计算成果、坝址气温和水温资料以及电站运行期的调水模式为边界条件对该枢纽工程的稳定温度场进行了计算，



（a）库前淤沙形态示意图　　（b）本研究中数值计算模型图

图1　淤沙形态及计算模型

表5　计算工况

工况	上游水位/m	坝踵高程/m	上游淤积高程/m	上游坝前淤沙高度/m	备注
GK1	789.0	574.0		0.0	清水工况
GK2	789.0	574.0	690.0	116.0	淤积工况
GK3	789.0	574.0	705.0	131.0	淤积工况

表6　特殊高程平均水库水温计算结果　　（单位：℃）

高程	GK1	GK2	GK3
坝顶高程	12.9	12.9	12.9
泥沙淤积高程705	9.2	10.5	9.4
泥沙淤积高程690	8.7	12.1	9.8
弱约束区	7.6	14.0	13.9
强约束区	7.6	13.9	13.8

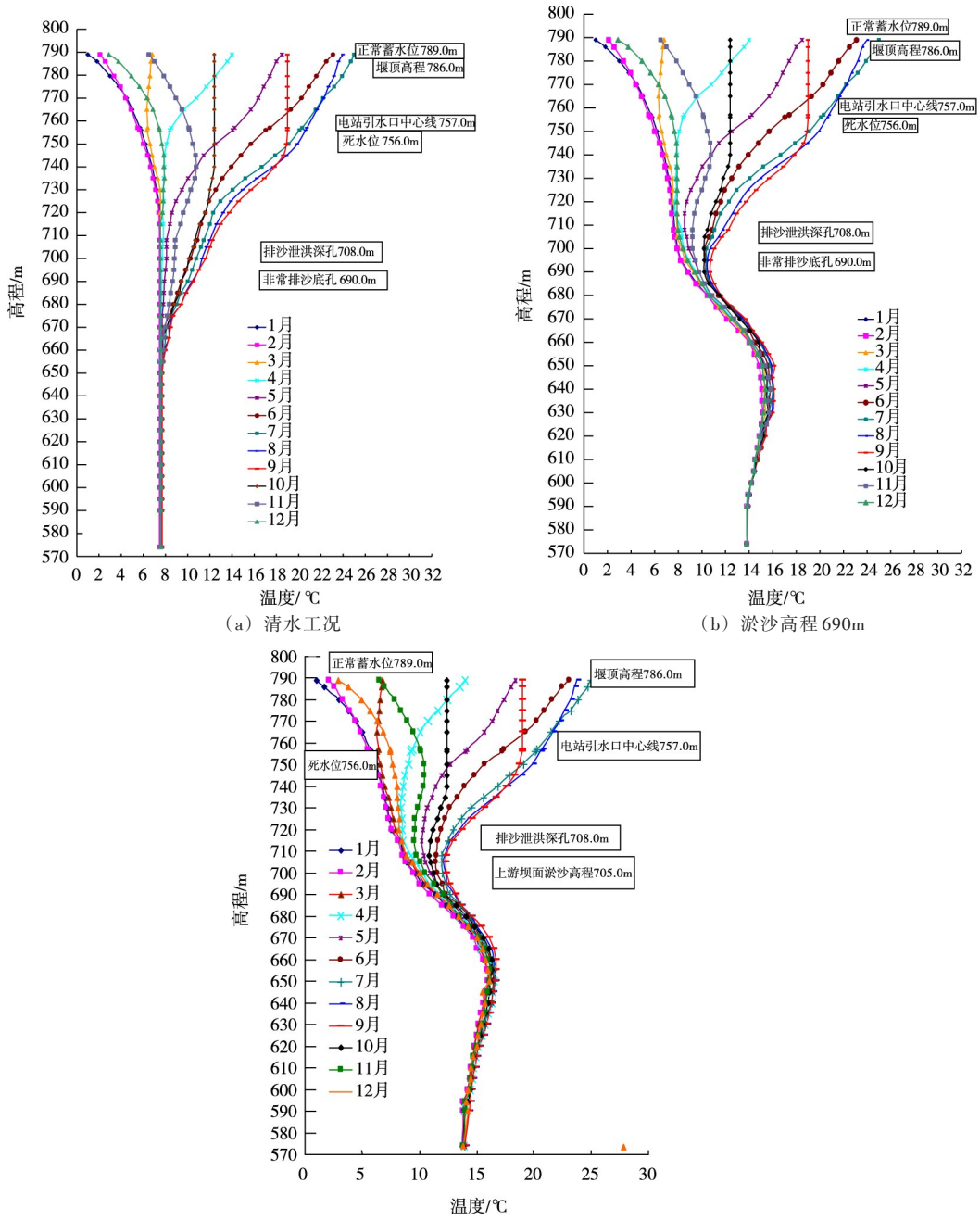
分析结果如图4所示。

从图4可以看出，库水温采用不考虑坝前淤积条件下计算温度场，在拱冠梁坝段的基础约束区内，稳定温度自上游至下游为7.6 ℃～11.9 ℃，中心为10.0 ℃；弱约束区内稳定温度自上游至下游为7.6 ℃～10.4 ℃，中心部位稳定温度为9.9 ℃；自由区（594.0～789.0 m）内稳定温度自上游至下游为7.6 ℃～10.4 ℃，内部为9.5 ℃；自由区（789.0～803.0 m）内稳定温度自上游至下游为12.8 ℃～10.4 ℃，内部为11.1 ℃。

库水温采用坝前淤积至高程690.0 m下计算温度场，在拱冠梁坝段的基础约束区内，稳定温度自上游至下游为13.8 ℃～12.1 ℃，中心为13.1 ℃；弱约束区内稳定温度自上游至下游为13.8 ℃～12.4 ℃，弱约束区中心部位稳定温度为13.2 ℃；自由区（598.0～705.0 m）内稳定温度自上游至下游为15.6 ℃～10.4 ℃，坝体中心部位的稳定温度为12.3 ℃；自由区（789.0～803.0 m）内稳定温度自上游至下游为12.8 ℃～10.4 ℃，中心为11.1 ℃。

库水温采用坝前淤积至高程705.0 m下计算温度场，在拱冠梁坝段的基础约束区内，稳定温度自上游至下游为13.9 ℃～12.1 ℃，中心为13.2 ℃；弱约束区内稳定温度自上游至下游为14.0 ℃～12.4 ℃，弱约束区中心部位稳定温度为13.0 ℃；自由区（598.0～705.0 m）内稳定温度自上游至下游为15.6 ℃～10.4 ℃，中心为13.0 ℃；自由区（789.0～803.0 m）内稳定温度自上游至下游为12.8 ℃～10.4 ℃，中心为11.1 ℃。

本文将各高程的平均稳定温度值统计如图5和表7所示，由表7可知，705 m高程以下泥沙淤积可提高稳定温度3.5 ℃，自由区稳定温度差距较小。同时结果显示淤沙对于下游面的影响较小。



（a）清水工况　（b）淤沙高程690m

（c）淤沙高程705m

图2　不同工况各月水库水温计算结果

3.3　多泥沙淤积对温度应力的影响　基于3.2节的温度计算结果，将采用三维有限元法分析运行期水库清水与泥沙淤积对大坝温度应力场的影响，不同工况均采用同一温控条件。表8为坝前清水条件和泥沙淤积条件下最大应力结果。从表8、图6和图7可知，清水工况强约束区最大应力3.15 MPa，泥沙淤积工况最大应力2.65 MPa，泥沙淤积导致稳定温度升高，温度应力降低0.50 MPa。从计算结果可以看出，泥沙淤积会减小大坝的温度应力值。

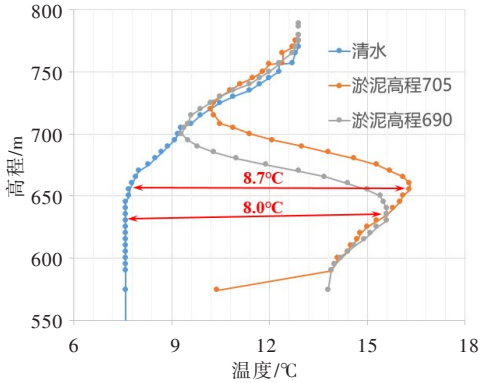
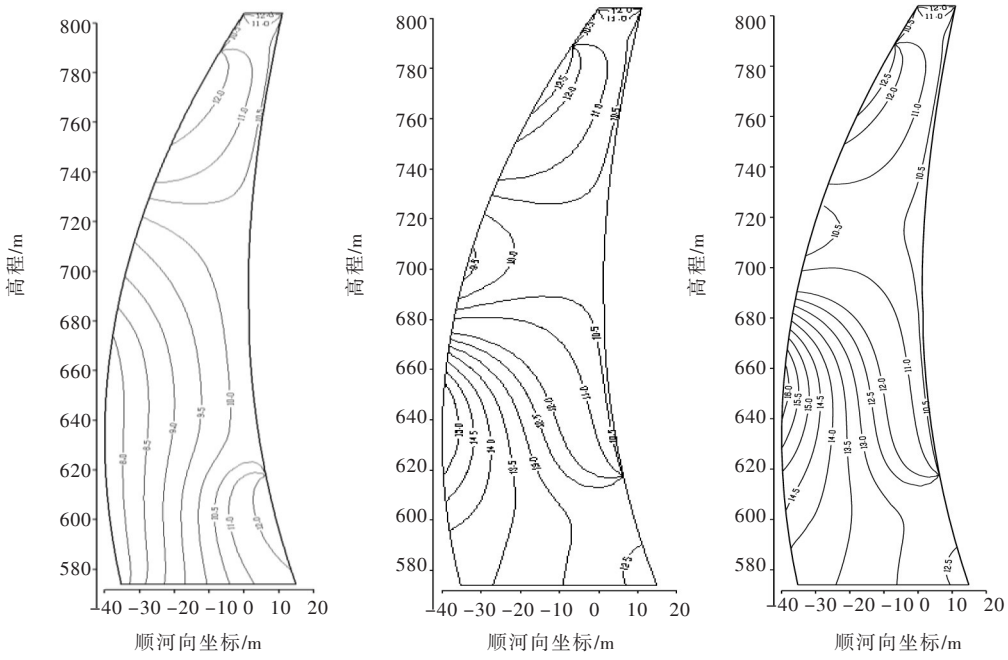


图3　不同工况下多年平均水温计算结果



（a）清水工况　（b）淤沙高程690m　（c）淤沙高程705m

图4　温度场计算结果

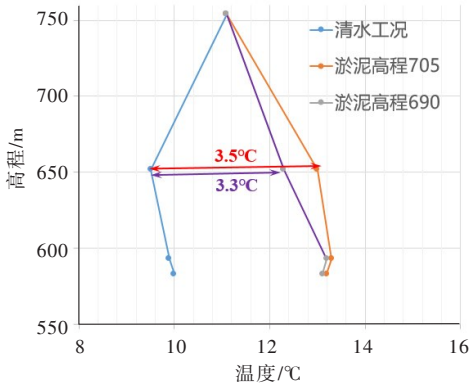


图5　大坝温度稳定温度场平均温度值对比

表7　不同工况下不同部位的稳定温度计算结果　（单位：℃）

部位	高程/m	GK1稳定温度	GK2稳定温度	GK3稳定温度
强约束区	578.0~588.0	10.0	13.1	13.2
弱约束区	588.0~598.0	9.9	13.2	13.3
自由区	598.0~705.0	9.5	12.3	13.0
自由区	705.0~803.0	11.1	11.1	11.1

表8　不同水库条件下大坝温度应力对比

工况说明	库底多年平均水温/℃	大坝温度/℃	大坝应力/MPa
清水水库	7.6	10.5	3.15
泥沙淤积690m	12.4	13.1	2.69
泥沙淤积705m	13.9	13.3	2.65

本文分析研究了不同高度淤沙对坝体温度应力的影响。淤沙高度分别为131 m和116 m情况下，水库水温的影响高度范围变化区域达到90 m。淤沙越高水温影响值越大，同时对于坝体稳定温度场的提升越大，从而体现出淤沙高程较大时，可以大幅度降低坝体最终的温度应力。

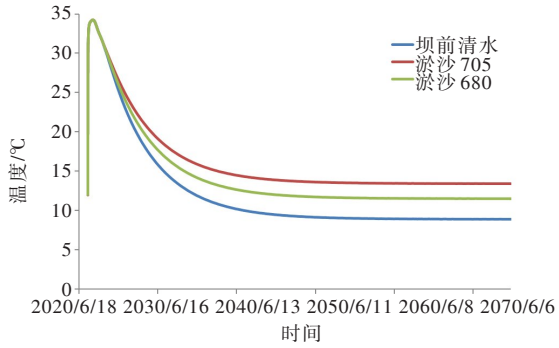


图6　温度过程线

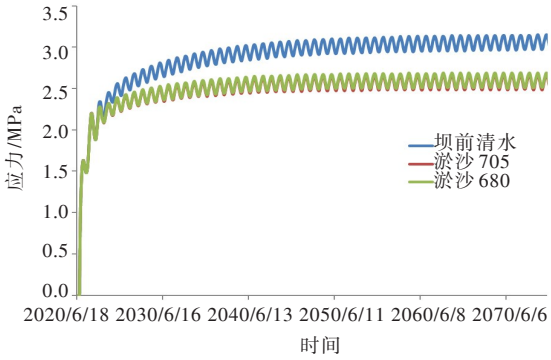


图7　应力过程线

4　结论

本文基于水库水温、混凝土坝温度场、混凝土坝温度应力，采用有限元方法计算分析了泥沙淤积对混凝土温度应力的影响。分析结果表明：

(1)泥沙淤积可直接导致库底水温最高提高8.7 ℃，进一步计算坝体温度场可以发现，坝前清水条件下大坝十年运行期强约束区温度为10.0 ℃，坝前多泥沙条件下大坝十年运行期强约束区温度可达13.1 ℃。坝前淤沙可提高坝体结构的最低温度值。

(2)由于泥沙淤积，坝体稳定温度场的提高，可以认为泥沙淤积某种程度上降低了基础温差。计算结果表明坝前清水条件下大坝十年运行期强约束区顺河向应力为2.84 MPa，坝前多泥沙条件下大坝十年运行期强约束区顺河向应力为2.53 MPa。顺河向应力比清水条件下低0.31 MPa。同时研究发现，淤沙高程越高，对应力的减小作用越大。

(3)多泥沙河流修建高混凝土坝，由于泥沙淤积将对大坝水库水温、稳定温度及温度应力造成一定的影响，从温度控制角度考虑，泥沙淤积可提高库底的水库水温，对大坝上游面库底具有一定的保温作用，从而提高稳定温度场，减少基础温差，降低温度应力，故库前泥沙淤积对温控防裂具有有利因素，但是坝前淤积将大幅减少库容，增大淤沙荷载，因此运营期淤沙高程的确定需要权衡考虑淤沙荷载、温度应力的影响作用。

参　考　文　献：

[1] 丁宝瑛，胡平．对三峡大坝下游坝面管的温度场、温度荷载与温度应力的研究[J]．水力发电，1991(8)：38-41．

[2] 王国秉，胡平．混凝土坝稳定温度场和准稳定温度场的三维有限元分析[J]．水利水电技术，1989(11)：29-35．

[3] 张国新，刘毅，刘有志，等．高混凝土坝温控防裂研究进展[J]．水利学报，2018，49(9)：1068-1078．

[4] 张国新，刘毅，李松辉，等．“九三一”温度控制模式的研究与实践[J]．水力发电学报，2014，33(2)：179-184．

[5] 王京，孙双科，汪星，等．某重力坝工程泄洪排沙底孔的运行方式研究[J]．中国水利水电科学研究院学报，2020，18(6)：455-461．

[6] 李松辉，张国新，刘毅，等．大体积混凝土防裂智能监控技术及工程应用[J]．中国水利水电科学研究院学报，2018，16(1)：9-15．

[7] 金鑫鑫，张建华，张国新．某大孔口水闸底板施工温控数值模拟[J]．中国水利水电科学研究院学报，2019，17(5)：365-370．

[8] 赵泽湖，周秋景，牟荣峰，等．混凝土拱坝通水冷却同仓混凝土温差对坝体应力的影响[J]．中国水利水电科学研究院学报，2019，17(2)：110-117．

[9] 王进廷，唐庆，杜修力．库底非饱和淤砂层对高拱坝地震反应的影响[J]．水利水电科技进展，2007(2)：22-25．
[10] 王进廷，唐庆，杜修力．库底饱和淤积砂层对高拱坝地震反应的影响研究[J]．水力发电学报，2006(2)：11-15
[11] 国家能源局．NB/T 35092—2017混凝土坝温度控制设计规范[S]．北京：中国电力出版社，2017．
[12] 丁宝瑛，胡平，黄淑萍．水库水温的近似分析[J]．水力发电学报，1987(4)：17-33．
[13] 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．
[14] 张国新．SAPTIS：结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]．水利水电技术，2013，44(1)：31-35，44．

Study on the influence of sediment deposition on temperature stress of high concrete arch dam

LI Songhui[1]，XIAO Hongwu[2]，LUO Xiangyu[1]，LI Meng[2]
(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing* 100038，*China*；
2. *Shaanxi Dongzhuang Water Control Project Construction Co．Ltd，Xi'an* 713200，*China*)

Abstract：Sediment deposition is one of the factors affecting the temperature control and crack prevention of concrete dams. When high concrete arch dams are built on muddy rivers such as the Yellow River，sediment deposition will certainly affect the water temperature of the reservoir，and then affect the stable temperature field and temperature stress of the dam. Based on the above problems，this study takes a 230m high concrete arch dam downstream of Jinghe River as the research object. The numerical analysis of reservoir water temperature and the finite element simulation calculation method are used to simulate and analyze the dam reservoir water temperature，stable temperature field and temperature stress under different working conditions by considering whether there is silt in front of the dam. The results show that compared with the condition without sediment deposition in front of the dam，the water temperature at the bottom of the reservoir increases when the sediment is deposited in front of the dam，which improves the stable temperature field of the dam body and reduces the temperature stress of the dam body. From the perstpective of temperature control and crack prevention，the favorable effect of silt on dam stability is reflected. The research results can provide some reference for the load design of dam body in the river with sediment.
Keywords：heavy sedimentation；reservoir water temperature；stable temperature field；temperature stress

(责任编辑：王学凤)