

桑郎碾压混凝土拱坝温度场仿真分析

张怀芝, 何蕴龙, 彭云枫

(武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 利用三维有限元法,对桑郎碾压混凝土拱坝进行了全过程仿真分析.分析中考虑了混凝土绝热温升随龄期的变化、分层浇筑和夏季停工渡汛等影响因素,得出了温度场分布及其随时间的变化规律.

关键词: 碾压混凝土拱坝; 热学参数; 温度场; 仿真分析

中图分类号: TV642.2:TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1009-640X(2007)04-0043-06

Simulation analysis for temperature field of Sanglang RCC arch dam

ZHANG Huai-zhi, HE Yun-long, PENG Yun-feng

(College of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The whole process simulation analysis of Sanglang RCC arch dam is done with 3D finite element method (FEM). The factors, such as the change of adiabatic temperature with age of concrete, concrete placing by layer, work suspension on account of flood in summer, are considered in the analysis. The change laws of temperature field with time and its distributions are provided in the calculation results.

Key words: RCC arch dam; thermal parameter; temperature field; simulation analysis

虽然碾压混凝土的绝热温升较常态混凝土小,但由于碾压混凝土坝施工速度快,施工中层面间歇时间短,易产生较大的内外温差,会对拱梁的分载及变位产生较大影响,甚至产生危害性较大的温度裂缝.本文根据碾压混凝土拱坝薄层浇筑连续上升的施工特点,借助于 ADINA 有限元程序,采用三维有限元法计算了桑郎碾压混凝土拱坝温度场,可为设计与施工中采取何种温控措施提供参考依据,同时也为分析混凝土温度应力和开裂危险性奠定基础.

1 计算原理

1.1 热传导方程

根据热量平衡原理,温度升高所吸收的热量必须等于从外面流入的净热量与内部水化热之和.一般三维问题,瞬态温度场变量 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标系求解域 Ω 中满足固体热传导基本方程:

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

收稿日期: 2007-01-17

作者简介: 张怀芝(1983-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事水工结构及高坝设计. E-mail: huaizhi1983@163.com

式中:导温系数 $a = \lambda / (c\rho)$ (m^2/h), λ 为导热系数 ($\text{kJ}/(\text{mh} \cdot ^\circ\text{C})$), c 为比热 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), ρ 为密度 (kg/m^3); T 为温度函数; θ 为混凝土绝热温升 ($^\circ\text{C}$); t 为时间 (h).

1.2 初始条件和边界条件

热传导方程建立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.因此,还必须知道初始条件和边界条件.

(1) 初始条件 在初始瞬时,温度场是坐标 (x, y, z) 的已知函数 $T_0(x, y, z)$, 即当 $t=0$ 时

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$$

大多数情况下,初始瞬时的温度分布可以认为是常数,即当 $t=0$ 时

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = \text{常数}$$

(2) 边界条件 温度场的边界条件主要有以下四种:

第一类边界条件:混凝土表面温度 T 是时间 t 的已知函数,即 $T(t) = \varphi(t)$. 混凝土与水接触时,表面温度等于已知的水温.

第二类边界条件:混凝土表面热流量是时间 t 的已知函数,即: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \Phi(t)$, n 为表面外法线方向.若表面是绝热的,则有: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

第三类边界条件:经过混凝土表面的热流量与混凝土表面温度 T 和气温 T_a 之差成正比,即: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a)$, β 为表面放热系数 ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$). 这类边界条件表达了混凝土与流体(如空气)接触时的传热条件.实际中多为这类边界条件.

第四类边界条件:当两种固体接触良好时,接触面上温度和热流量都是连续的,即 $T_1 = T_2$, $\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}$, λ_1, λ_2 分别为两种固体的导热系数.

2 参数敏感性分析

影响坝体温度场的因素有很多,其中主要有混凝土绝热温升、浇筑层间间歇时间、边界情况、混凝土浇筑层厚度、混凝土入仓温度及表面放热系数等.在数值仿真计算前,首先研究拱坝温度场对这些因素的敏感性.

2.1 混凝土绝热温升

在坝体温度场仿真计算中,混凝土水化热的影响比较大.温升曲线一般选用 $\theta = \theta_0 \tau / (\tau + n)$, 其中, θ_0 为最终绝热温升; τ 为混凝土龄期; n 为绝热温升达到一半时混凝土的龄期.为进一步分析 θ 对大体积混凝土内部温度分布的影响规律,简化取图 1 所示的碾压块为研究对象.碾压块与坝肩及下层混凝土接触面为绝热边界条件,上下游及上表面与空气接触.放热系数 β 为 $1200 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$, 三向导热系数 λ 为 $270 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$, 导温系数 a 为 $0.125 \text{ m}^2/\text{d}$, 入仓温度及气温都为 15°C , 分别取 n 为 1 d、2 d 和 3 d, 形成 3 组比较方案.

该简化模型综合考虑了气温、水化热温升、浇筑温度等因素.图 2 给出了不同 n 情况下拱冠梁处中心点 30 d 内温度变化曲线.可见, n 越小,早期放热越快,温差越大,一定间歇期内散发的热量也较多.因此, n 值对绝热温升曲线影响较

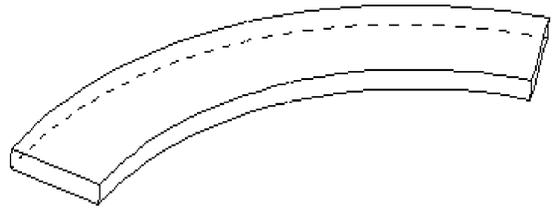


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Computational model

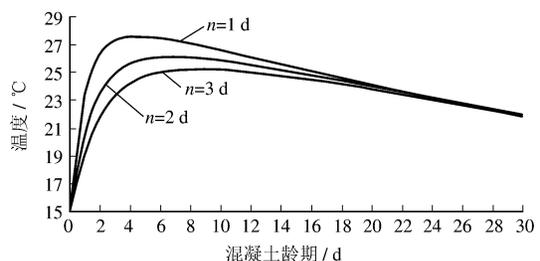


图 2 拱冠中心点 30 d 内温度变化曲线

Fig. 2 Temperature variation curves in the center of crown cantilever during 30 d

大,也就会对温度场仿真分析结果产生影响.

2.2 浇筑层间间歇时间

混凝土浇筑层之间的间歇时间如果短于每层最高温度出现的时间,水化热未能及时有效地散发,使得浇筑块最高温度和高浇筑块最高温度相当,在高温季节尤为不利.如间歇时间过长,混凝土表面遇寒潮时就会在短时间内产生很大的温差梯度,也将导致新老混凝土弹性模量差异较大.因此,必须严格进行温控,否则非常容易产生裂缝.

2.3 气温

气温对混凝土拱坝温度分布的影响非常明显,季节性的温度变化可影响大体积混凝土稳定温度场,对薄拱坝等结构的不稳定温度场影响也比较大;不规则的气温变化如寒潮,则会大大影响混凝土表面温度变化及内外温差.

2.4 混凝土浇筑层厚度

取上面简化模型例子,混凝土温升曲线 $n=2$ d,外界气温 T_a 分别为 15°C 和 20°C ,其他参数不变.计算得出距上边界 2 m 处某点温度历程曲线 1 和曲线 2,以及距上边界 1.5 m 处某点温度历程曲线 3 和曲线 4(见图 3).由图 3 可见,如果浇筑间歇期小于 7 d,则周围环境温度对离边界 1.5 m 范围内影响较明显,超过 2 m 深度处的混凝土温度受外界影响略小.所以单从温度场来看,在浇筑过程中,每次浇筑层厚度小于 2 m,有利于散热.考虑到具体施工过程及模板工艺,桑郎拱坝工程浇筑层厚度为 3 m.

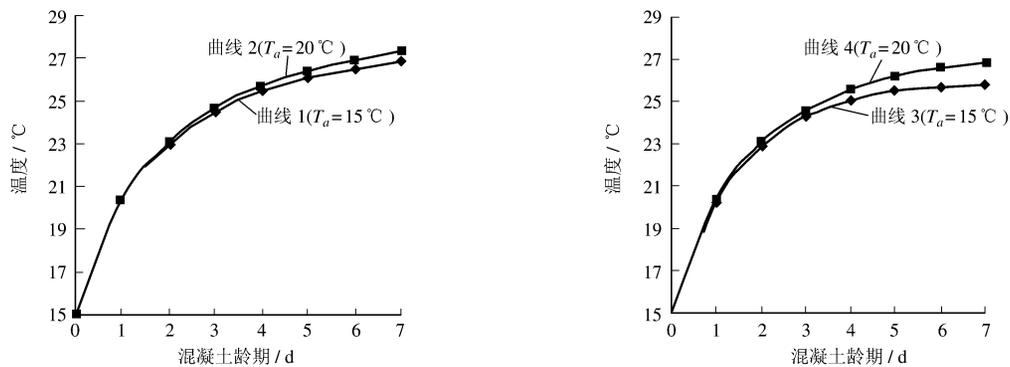


图3 拱冠不同深度处的温度历程曲线

Fig. 3 Curves of time-temperature at different depths of crown cantilever

2.5 混凝土入仓温度

取上面简化模型例子,其他条件不变的情况下,入仓温度提高 1°C ,6 d 后 1.5 m 深处的混凝土温度仍提高 0.5°C .桑郎拱坝施工快、间歇期较短,因此,必须注意混凝土入仓温度的控制.

2.6 混凝土表面放热系数

混凝土表面放热系数是一个比较复杂的量,它取决于风速、表面粗糙度和表面是否有保温材料.在同等外界气温条件下,放热系数越大,混凝土早期放热越大,但一般对最高温升影响不大.

3 桑郎拱坝仿真计算及成果分析

桑郎碾压混凝土拱坝位于贵州省望谟县桑郎镇上游 4 km 的“V”型狭谷河段,控制集水面积 650 km^2 ,多年平均流量 $10.7\text{ m}^3/\text{s}$,水库正常蓄水位 $\nabla 505\text{ m}$,最高校核洪水位 $\nabla 505.36\text{ m}$,总库容 1.480 亿 m^3 .该拱坝为变圆心双曲拱坝结构,坝顶高程 $\nabla 507.0\text{ m}$,坝高 90 m,坝体剖面顶宽 5 m,底宽 17.5 m,其厚高比为 0.194,属薄拱坝.坝顶弧长 123.115 m,坝顶中心角 92.815° .采用坝顶溢流,溢流段布置在坝中部,堰顶高程 $\nabla 500\text{ m}$,设 3 扇 5 m(高) \times 8 m(宽)弧形工作闸门,溢流净宽 24 m,最大泄洪流量 $596\text{ m}^3/\text{s}$,单宽流量 $24.8\text{ m}^3/\text{s}$,自由跌落水垫消能.

3.1 三维仿真计算

整个有限元模型建立在笛卡尔坐标系下,参照同类型工程的经验,有限元模型的范围为大坝上游、下游、左右岸拱端及底部地基取 1 倍坝高.按坝体的实际体型进行建模,并考虑了溢流堰的开口型式,但不考虑具体的溢流堰形状,采用 8 节点 6 面体等参单元对坝体及基础进行有限元离散.三维有限元整体网格模型见图 4.单元总数共计 16 064 个,其中坝体单元 11 902 个,节点总数共计 21 341 个.

依据桑郎拱坝材料的试验资料,温度场计算采用的热学参数试验值见表 1,采用的混凝土绝热温升计算式为 $\theta = 18\tau / (2 + \tau)$ ($^{\circ}\text{C}$).

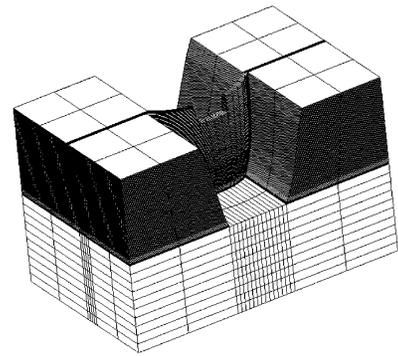


图 4 三维有限元模型

Fig. 4 3D finite element model

表 1 坝体和坝基材料的热学参数

Tab. 1 Thermal parameters of dam and foundation

材 料	导温系数 $/(m^2 \cdot d^{-1})$	导热系数 $/(kJ \cdot d^{-1} \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	比 热 $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	表面放热系数 $/(kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	线膨胀系数 $/(10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1})$
坝体混凝土	0.1	216	0.9	1 200	9
基 岩	0.1	243	0.9	1 200	10

施工期从下往上逐层浇筑混凝土时,上下游边界暴露于大气中,为第三类边界条件.施工停碾渡汛时,与水接触部分按月平均水温取值;蓄水初期上游面与水接触部分按月平均水库水温取值;半年后按不同高程水温取值;下游面与尾水接触部分按尾水水温取值,即与水接触部分按第一类边界条件,但其值随水库运行方式而改变.沿坝轴线向左右两侧的散热是次要的,可按绝热条件处理,属于第二类边界条件.坝顶暴露面随浇筑高度上升,当渡汛过水时,属第一类边界条件,否则属第三类边界条件.

施工中采用薄层碾压,连续浇筑.浇筑 0.3 m 碾压,连续浇筑 10 层间歇.浇筑与间歇时间之和为 7 d.施工混凝土的入仓温度取当月平均气温;初期采用塑料管中通天然河水冷却 20 d,约束区水管布置为 1.5 m \times 1.5 m (水平 \times 垂直),脱离约束区为 1.5 m \times 3.0 m (水平 \times 垂直),长 200 m,蛇形布置,管中水流速控制在 0.6 m/s 左右,对应通水流量约为 1.2 m³/h,封拱灌浆前,对坝体进行二期通水,水温控制在 12 $^{\circ}\text{C}$,通水天数控制在 40 ~ 60 d.根据实测资料,大气温度为 $T_a = 19.1 + 5.6\cos[0.0172(\tau - 196)]$ ($^{\circ}\text{C}$).

3.2 计算成果分析

3.2.1 特征点温度随时间分布规律 从某些有代表性的部位取出一些特征点,来反映混凝土温度的变化历程.取拱冠梁中线上 6 个特征点,高程分别为 $\nabla 73.5$ m, $\nabla 55.5$ m, $\nabla 34.5$ m, $\nabla 19.5$ m, $\nabla 10.5$ m 和 $\nabla 4.0$ m,对其温度变化进行分析.从温度变化过程线(见图 5)可以看出,由于混凝土水化放热,混凝土浇筑后温度迅速上升,当温度达到最大值后有所下降,随着上面新混凝土的浇筑,温度又有所回升.这是由于新老混凝土间的热量传递,新浇筑块温升速度快,在短期内就超过了较老混凝土的温度,产生热量“倒灌”现象.

从图 5 可以看出,混凝土浇筑完 30 d 后(2009 年 4 月 30 日)基本达到了稳定温度场.这时外界气温不高,可立即进行封拱灌浆.高程 $\nabla 73.5$ m 处的特征点的稳定温度场的最高温度比前期浇筑的最大温升高,原因是此处坝体薄,受外界气温影响大.混凝土绝热温升小,只有 18 $^{\circ}\text{C}$,而气温较高,平均为 20.5 $^{\circ}\text{C}$.高程 $\nabla 19.5$ m 处的特征点,在浇筑 300 d 后,温升超过了前期浇筑的最高温升,而后温度变化较小.原因是当浇筑到坝高 28 m 时停工渡汛,受气温影响明显.由于温度“滞后”现象,在刚渡汛后温度较高,同时,新浇混凝土的热量“倒灌”也使温度升高.到达稳定温度场后,由于距离坝体表面较远,该点温度受外界影响减弱,温度变幅小.其余各点,由于距离坝体表面远,散热条件不利,受气温影响小,到达稳定温度场的时间长,且温度变化幅度小.

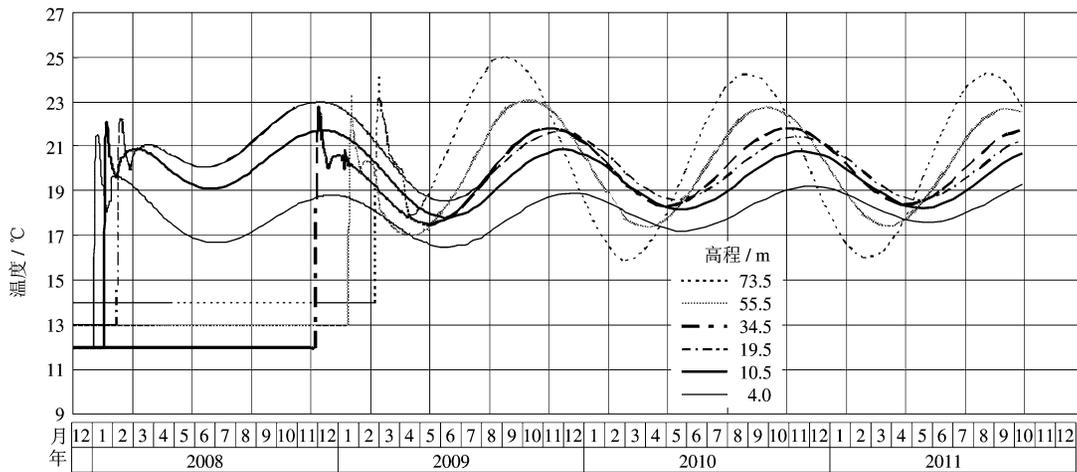
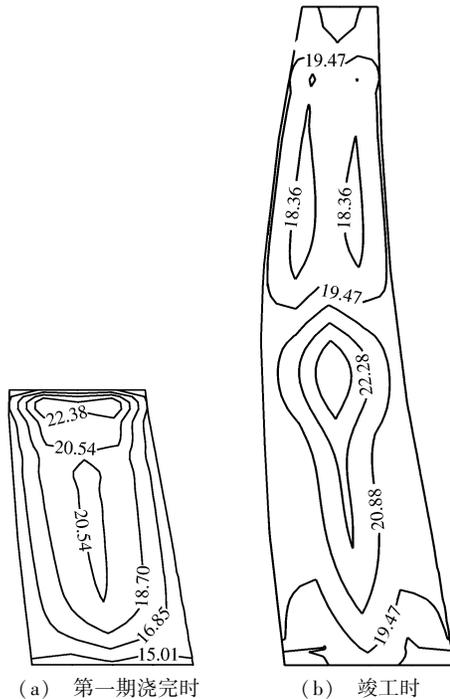


图5 拱冠梁中线上特征点温度过程线

Fig.5 Curves of time-temperature in the center of crown cantilever

3.2.2 拱冠梁截面和表面温度变化规律 第一期混凝土浇筑完时,拱冠梁剖面温度等值线见图6(a).可见,坝体温度分布为内高外低,最高温度23.5℃.竣工时的拱冠梁剖面温度等值线见图6(b),底部和上部温度较低,中上部温度外高内低;中部温度相对较高,表现为内高外低.这是由于上部坝体薄,散热快,温度较低.中上部坝体在冬季浇筑,气温影响显著,竣工时春季温度较高,造成了中上部温度外高内低.底部由于浇筑时间较长,散热相对比较充分,温度较低.由于大坝浇筑到1/3坝高时,停工渡汛,气温比较高,加之温度“滞后”现象,渡汛后,坝体温度仍较高,同时又浇筑新混凝土,而此处坝体较厚,散热不利,使得中部温度偏高,并且内高外低.坝体拱冠梁剖面和上下游坝面温度包络图见图7~9.



(a) 第一期浇完时 (b) 竣工时

图6 拱冠梁温度等值线图(单位:℃)
Fig.6 Temperature contour curves of crown cantilever (unit: ℃)

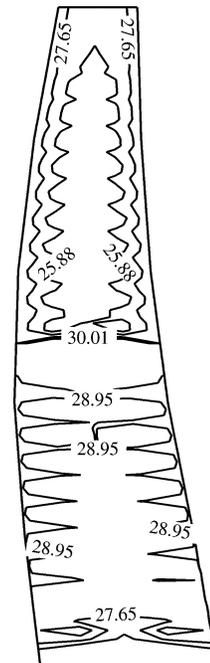


图7 拱冠梁最高温度包络图(单位:℃)
Fig.7 Max temperature envelope diagram of crown cantilever (unit: ℃)

图7表明,坝内温度较外部低,坝中部温度高.究其原因,碾压混凝土的绝热温升小(只有18℃),并进行了初期通水冷却;而外部受气温影响显著,温度最大值较大.渡汛后老混凝土本身温度较高,同时又新浇混凝土

土,加之坝体较厚,散热不利,造成坝体中部成为高温区.从上下游坝面温度包络图看,低温区分布在坝下部,高温区则分布在中部和上部,但温差很小.除在低温季节浇筑的坝底温度最大值(24.3℃)较小外,坝面大部分区域为27.8℃.

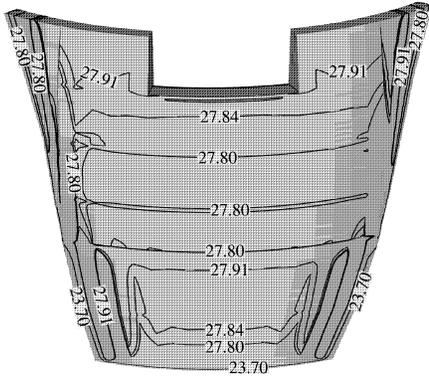


图8 上游坝面最高温度包络图(单位:℃)

Fig. 8 Max temperature envelope diagram of upstream dam face (unit: °C)

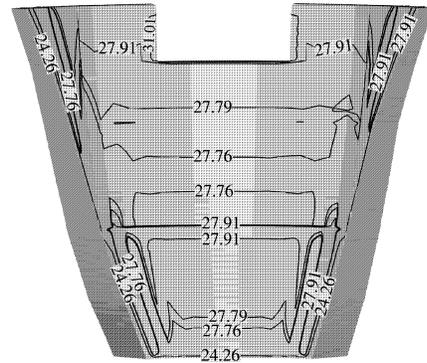


图9 下游坝面最高温度包络图(单位:℃)

Fig. 9 Max temperature envelope diagram of downstream dam face (unit: °C)

4 结 语

(1) 温度场仿真分析表明,坝体整体温升不高.坝体下部温度较低,最高温度为24.3℃;中部及上部温度较高,最高为30℃,出现在渡汛后新浇筑的坝体附近.因此,建议夏季停工渡汛后,要对老混凝土表面通水降温,尽量在低温的情况下浇筑薄层新混凝土.

(2) 在材料一定的情况下,当浇筑坝体强约束区时,如坝体与基岩接触部位、新老混凝土衔接处等,要注意温度控制,尽量在低温季节浇筑,有利于防止开裂.

参 考 文 献:

- [1] 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: 8-44, 122-245.
- [2] 郭之章, 傅 华. 水工建筑物的温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 7-66.
- [3] ADINA. Theory and Modeling Guide Voluem II: ADINA-T[Z]. ADINA R&D Inc, 2004.
- [4] 彭成佳, 兰春杰, 杨家修, 等. 普定碾压混凝土拱坝温度场仿真研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1): 88-93.
- [5] 刘光廷, 胡 昱, 王恩志, 等. 石门子碾压混凝土拱坝温度场实测与仿真计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 539-542.
- [6] 张晓飞, 李守义, 陈尧隆. 碾压混凝土拱坝温度场仿真分析[J]. 红水河, 2006, 25(1): 58-61.
- [7] 懂羽蕙, 屈俊童. 大体积混凝土温度场的仿真分析[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2004, 9(5): 87-91.
- [8] Abifadel Nassim, Johnson Daniel. Evolution of Temperatures in Roller Conerete Dams: Case Study Stagecoach Dam[J]. **Dam Engineering**, 1992, (3): 38-47.