

# 龙开口碾压混凝土重力坝温度与应力仿真分析

卢吉<sup>1</sup>, 潘坚文<sup>2</sup>, 徐小蓉<sup>2</sup>, 杨剑<sup>3</sup>, 王进廷<sup>2</sup>

- (1. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南昆明 650214;  
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;  
3. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:**采用有限单元法对龙开口碾压混凝土坝9号泄流中孔坝段施工期和运行期的温度场、应力场进行了全过程仿真分析, 应力计算考虑了坝体自重、静水压力、温度荷载、随龄期而变化的混凝土弹性模量、混凝土徐变等因素。仿真结果表明: 坝体泄流孔口在施工期形成了3~4 MPa的高拉应力, 但运行期后应力减小至2 MPa; 坝体上部由于在夏季浇筑温度较高, 温降后形成的大温差产生了较高拉应力, 但10 a后应力状态改善; 大坝除坝踵处出现应力集中外, 整体压应力水平小于2 MPa; 孔口附近及大坝整体的应力状态是基本安全的。

**关键词:**碾压混凝土坝; 有限元法; 温度仿真; 应力仿真; 龙开口水电站

**中图分类号:**TV642.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2016)03-0078-05

**Simulation of temperature and stress fields of Longkaikou RCC Gravity Dam**//LU Ji<sup>1</sup>, PAN Jianwen<sup>2</sup>, XU Xiaorong<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>3</sup>, WANG Jinteng<sup>2</sup> (1. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The finite element method was used to simulate the temperature and stress fields of the ninth discharge section of the Longkaikou Roller-Compacted Concrete (RCC) gravity dam throughout the process of the construction and operation periods. The gravity load, hydrostatic pressure, temperature load, change of Young's modulus with age, and creep effect of concrete were considered in the calculation of the stress field. The results show that high tensile stresses of 3 to 4 MPa occur near the discharge orifice in the construction period, but decreases to 2 MPa in the operation period. High tensile stress also occurs in the upper portion of the dam due to the high pouring temperature in summer and a large temperature drop after construction, but the stress state will be improved after 10 years of operation. The compression stress of the dam is less than 2 MPa, except for higher compression stress at the dam heel due to stress concentration. The stress states near the discharge orifice and in the dam body indicate that the dam is basically safe.

**Key words:** RCC dam; finite element method; temperature simulation; stress simulation; Longkaikou Hydropower Station

龙开口水电站位于云南省大理州鹤庆县, 是金沙江中游8个梯级水电站的第6级, 坝址地处干热河谷气候区。水库正常蓄水位为1 298.00 m, 总库容为5.07亿m<sup>3</sup>。拦河大坝为碾压混凝土重力坝, 最大坝高119.00 m, 坝顶长768.00 m<sup>[1]</sup>。坝后式厂房共布置5台混流式水轮发电机组, 单机容量360 MW, 总装机1 800 MW。该工程施工过程中克服了停工、深槽处理<sup>[2]</sup>等重大困难, 于2012年11月25日实现下闸蓄水, 2013年5月30日顺利实现坝前水位抬升至正常蓄水位。蓄水安全鉴定报告中明确指出“坝体混凝土实测最高温度超温范围、超温

率和超温幅度均较大, 蓄水后混凝土内部的较高温度可能导致坝体出现裂缝”。

龙开口水电站是典型的碾压混凝土(RCC)重力坝。RCC坝是一种以分层填筑、振动碾压方式密实的混凝土坝<sup>[3]</sup>, 具有水泥用量少、绝热温升较低的优点, 但大量掺用粉煤灰, 后期水化热温升持续时间长<sup>[4]</sup>。RCC坝分层浇筑上升速度快, 因而施工过程中层面散热不够<sup>[5]</sup>。另外, 季节变化<sup>[6]</sup>、寒潮<sup>[3]</sup>等也是引发裂缝的重要原因。因此, 重视温度应力和温度控制问题, 对坝体温度场和应力变形进行仿真计算分析是十分必要的。自国外引入有限元时间

过程分析法<sup>[7-8]</sup>以来,我国朱伯芳院士针对温度应力计算提出了分区异步长解法<sup>[9]</sup>、考虑水管冷却效果的混凝土等效传导方程<sup>[10]</sup>等方法,三维有限元浮动网格法<sup>[11]</sup>和广义约束矩阵法<sup>[12]</sup>也常用于温度仿真。清华大学建立了混凝土坝分层浇筑的温度及应力计算的有限元平台,并成功应用于乌江彭水<sup>[3]</sup>、石门子<sup>[13]</sup>等大坝。本文采用通用软件 MSC-Patran 进行前处理,采用 ABAQUS 进行计算和后处理,对龙开口坝体在施工期的温度场和应力场进行三维有限元精细仿真,并预测 10 a 运行期的温度和应力分布,分析大坝的安全稳定性。

1 计算模型

1.1 有限元网格

针对龙开口大坝 9 号泄流中孔坝段进行全过程温度和应力场仿真分析,其建基面高程为 1 212.5 m,坝顶高程为 1 303.0 m,坝高 90.5 m。共划分了 162 353 个单元,127 022 个节点,有限元网格边长为 0.5~2.5 m(图 1)。

1.2 混凝土应力计算公式

应力仿真考虑了混凝土弹性模量随时间的增长及徐变度。混凝土弹性模量增长公式<sup>[14]</sup>为

$$E = E_0(1 - e^{-at^b}) \tag{1}$$

式中: $E_0$  为最终弹性模量; $a$  为待定系数; $b$  为时间指数; $t$  为时间。

根据试验分析结果,混凝土徐变度  $C(t, \tau)$  与持荷龄期  $t-\tau$  的关系用指数公式<sup>[4,14]</sup> 表达为

$$C(t, \tau) = C_1(\tau)(1 - e^{-k_1(t-\tau)}) + C_2(\tau)(1 - e^{-k_2(t-\tau)}) \tag{2}$$

其中

$$C_1(\tau) = C_1 + D_1/\tau^{m_1}$$

$$C_2(\tau) = C_2 + D_2/\tau^{m_2}$$

式中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  为碾压或常态混凝土的 8 个徐变拟合系数。

允许拉应力采用下式<sup>[4]</sup>估算:

$$[\sigma] = k\varepsilon_p E_c / (\gamma_d \gamma_0) \tag{3}$$

式中: $k$  为考虑混凝土极限拉伸试验离散性的折减系数,取 0.75; $\gamma_0$  为结构重要性系数,取 1.1; $\gamma_d$  为正常使用极限状态短期组合结构系数,取 1.5; $\varepsilon_p$  为

混凝土极限拉伸值; $E_c$  为混凝土弹性模量。

1.3 温度仿真方法

在大坝施工期和运行期温度仿真中,混凝土绝热温升过程采用单指数模型<sup>[15]</sup>。模型中分时段通水冷却效果<sup>[15-16]</sup>与冷却水管布置、冷却水温、通水流量和时长等因素有关,与空气接触的混凝土仓面和迎水面分别考虑环境空气温度和水温的变化。9 号坝段按照实际施工情况分 45 仓逐仓浇筑,以坝体混凝土温度监测数据为基础进行大坝温度场反演。

1.4 混凝土材料参数

坝体混凝土分碾压混凝土(R)和常态混凝土(C),详细分区如图 2 所示(未考虑薄层变态混凝土)。表 1 为地基岩体与坝体混凝土的热力学参数,表 2 为坝体混凝土弹性模量增长系数和允许拉应力,表 3 为坝体碾压和常态混凝土徐变拟合系数。

表 1 地基岩体与坝体混凝土热力学参数

| 材料类型     | 比热容/<br>(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 热导率/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 绝热温升/<br>℃ |
|----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|------------|
| 基岩       | 0.970                                           | 8.38                                          | 2 710                        |            |
| R1       | 0.964                                           | 7.92                                          | 2 447                        | 22         |
| R2       | 0.989                                           | 7.87                                          | 2 448                        | 22         |
| R3       | 0.975                                           | 8.16                                          | 2 454                        | 24         |
| R4       | 0.975                                           | 8.16                                          | 2 454                        | 20         |
| C1       | 0.917                                           | 7.75                                          | 2 514                        | 30         |
| C5、C7、C9 | 0.895                                           | 7.00                                          | 2 464                        | 32         |

表 2 地基岩体与坝体混凝土力学参数

| 材料类型     | $E_0$ /GPa | $a$     | $b$     | $[\sigma]$ /MPa |
|----------|------------|---------|---------|-----------------|
| 基岩       | 24         |         |         |                 |
| R1       | 41.4       | 0.191 1 | 0.541 6 | 1.49            |
| R2       | 43.6       | 0.210 6 | 0.570 0 | 1.72            |
| R3、R4    | 48.1       | 0.329 6 | 0.431 3 | 1.99            |
| C1       | 42.8       | 0.491 1 | 0.464 4 | 1.72            |
| C5、C7、C9 | 46.2       | 0.733 5 | 0.386 4 | 2.49            |

表 3 坝体混凝土徐变拟合系数

| 混凝土类型    | $C_1$ | $D_1$  | $m_1$ | $K_1$ | $C_2$ | $D_2$ | $m_2$ | $K_2$ |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R1       | 0.27  | 82.04  | 0.7   | 1.02  | 1.21  | 85.17 | 0.60  | 0.03  |
| R2、R3、R4 | 0.18  | 102.24 | 0.8   | 0.90  | 2.15  | 71.57 | 0.63  | 0.03  |
| C1       | 0.37  | 95.10  | 0.8   | 0.70  | 8.07  | 29.44 | 0.70  | 0.03  |
| C5、C7、C9 | 0.84  | 28.24  | 0.6   | 1.06  | 1.44  | 44.32 | 0.40  | 0.03  |

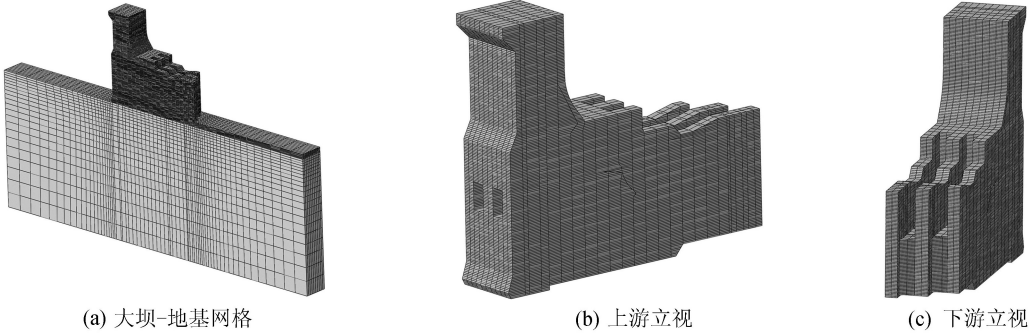


图 1 9 号泄流中孔坝段有限元模型

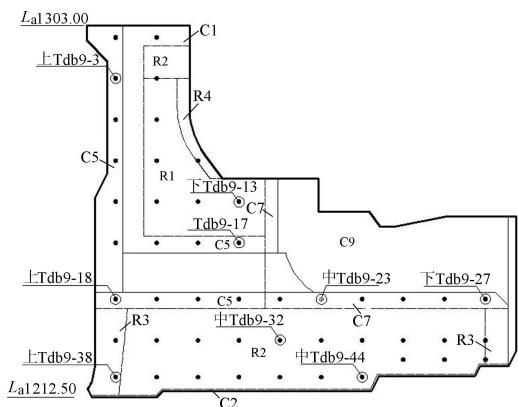


图2 混凝土分区及温度计分布

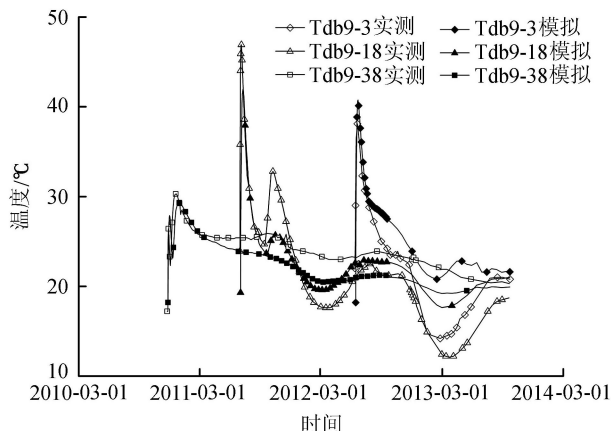
## 1.5 计算荷载

坝体应力计算主要考虑坝体自重、库水水压、温度荷载3项荷载。自重根据大坝的浇筑过程动态加载,水压根据水库水位动态变化,温度场反演结果作为温度荷载。应力计算按照坝体实际浇筑过程进行温度-应力顺序耦合计算,其中混凝土弹性模量随时间变化,并考虑大坝坝体在运行期的长期徐变变形。

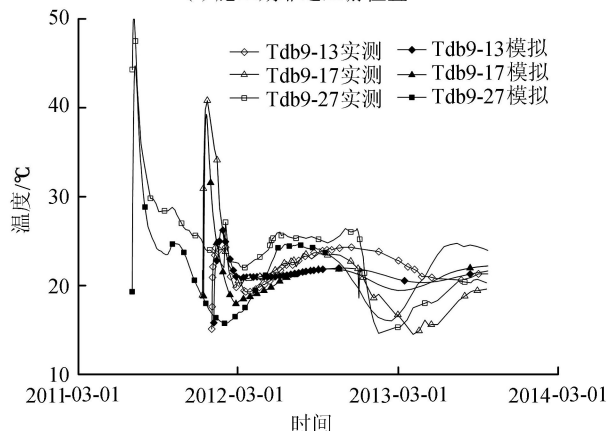
## 2 计算结果和分析

### 2.1 温度场反演结果

9号坝段在10个高程处共埋设了47支温度计



(a) 施工期靠近上游位置

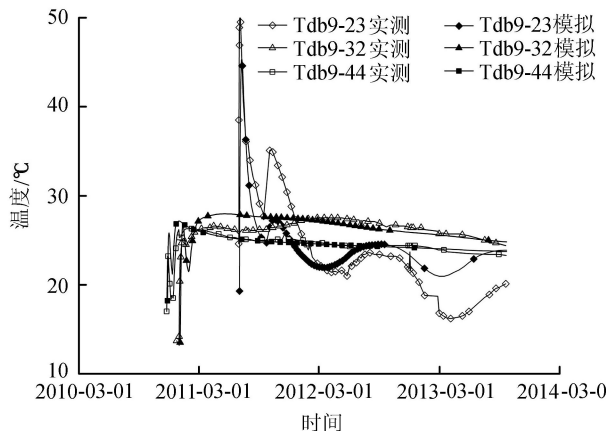


(c) 施工期靠近下游位置

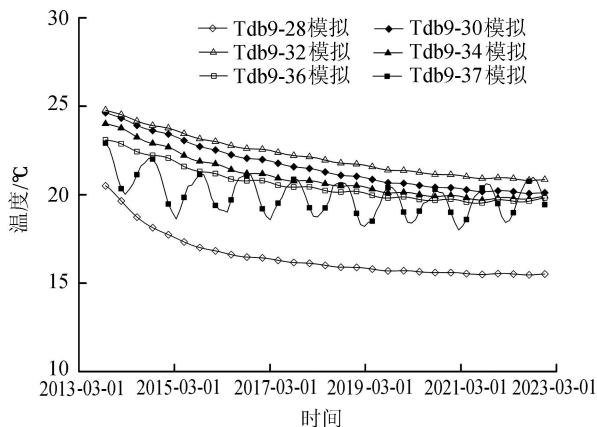
(图2),分别布置在靠近坝面上游、下游、坝体内3处典型位置。施工期温度时程反演结果与实测温度对比如图3所示,从温度变化趋势、最高温、温降时长等多方面可以看出温度场反演结果与实测数据吻合良好。在浇筑过程中,夏季部分测点最高温度超过 $50^{\circ}\text{C}$ ,后在冷却水、层面散热等作用下,下降到约 $25^{\circ}\text{C}$ ,温差较大;坝体内部混凝土在一段时间内保持较高温度(图3(b)),浇筑完成1个月后,坝体中上部仍存在 $33.3^{\circ}\text{C}$ 的高温区域(图4(a));1a后,坝体内温度明显下降,最高温仅为 $25.9^{\circ}\text{C}$ (图4(b));10a后,即2022年12月,整个坝体温度场趋于稳定,温度降到 $20\sim 22^{\circ}\text{C}$ (图3(d)、图4(c))。

### 2.2 应力场结果及分析

9号坝段于2010年11月19日开始浇筑,2012年8月15日浇筑到坝顶。由于其为泄流中孔坝段,因此特别关注孔口附近的应力状态。通过观察施工浇筑时应力云图演化过程,发现当2012年3月浇筑到1271.5m高程时,孔口附近出现 $3.8\text{MPa}$ 的较大拉应力(图5),超过了 $1.99\text{MPa}$ 的混凝土允许拉应力。取该坝段上游面作为投影断面,得到孔口附近的最大主应力等值线演变过程如图6所示。待浇筑到坝顶时孔口附近仍有 $3.4\text{MPa}$ 的较大拉应力。施



(b) 施工期坝体中部



(d) 10a运行期

图3 温度时程反演结果及与实测值的对比

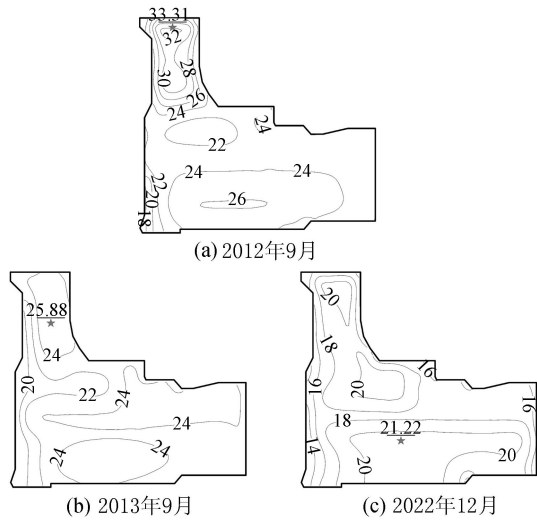


图4 9号坝段温度分布(单位:℃)

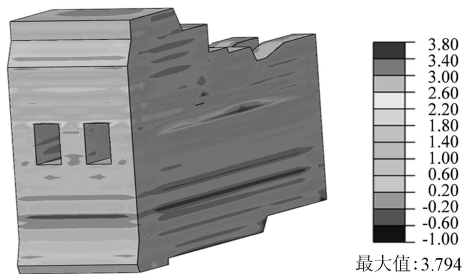


图5 9号坝段浇筑过程中的最大主应力云图(单位:MPa)

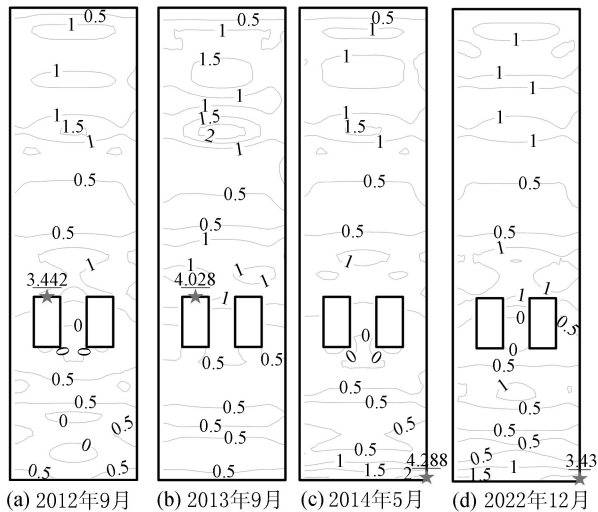


图6 9号坝段上游孔口附近最大主应力演变(单位:MPa)

工期结束后,应力值缓慢减小,10 a后孔口处应力约2 MPa,应力状态显著改善。

取坝体中间断面作大坝刚浇筑完成时的最大和最小主应力图(图7(a)(b)),可看到施工刚结束时坝体上部的拉应力较大,最高超过3 MPa。坝体上半部分浇筑时间为夏季,浇筑温度较高,出现50℃以上的高温,此时短期温降后混凝土内部仍有30℃左右,该部位形成的高拉应力可能主要是温度荷载产生的。再取穿过左孔的中间断面作大坝运行10 a后的最大和最小主应力分布图(图7(c)(d)),可看

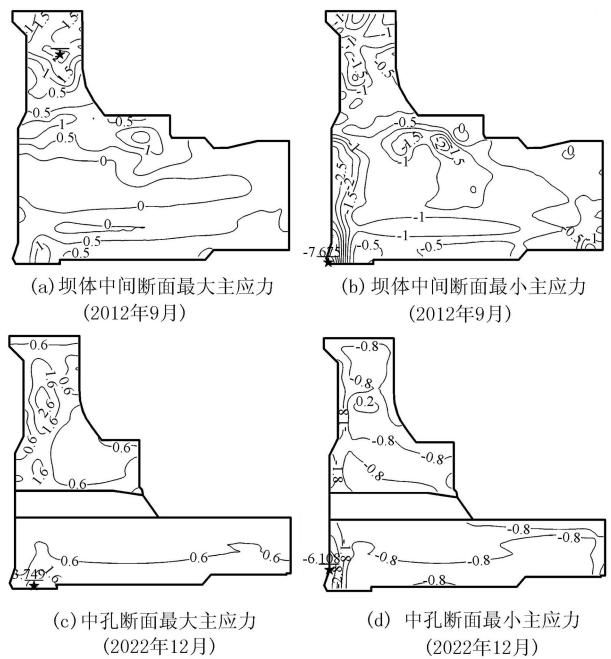


图7 9号坝段应力分布(单位:MPa)

到坝体上部仍存在2.6 MPa的小范围高应力区,这是因为上部坝体的高温尽管由于通水冷却迅速降低,但温差达15~25℃,残余温度应力无法得到释放。从最小主应力图可知,除坝踵处应力集中产生了6~7 MPa的较大压应力外,大坝整体压应力水平小于2 MPa,满足大坝混凝土压应力要求。根据工程实际,龙开口大坝在建设运行过程中未检测到泄流孔口附近和坝体上部出现明显的裂缝,混凝土高温产生的微裂缝均已得到及时处理。本文的温度仿真基于实测数据已得到验证,但由于坝体内未埋设足够的应变计,因而应力计算结果无法与实际情况对比,存在一定的误差。

### 3 结 语

龙开口碾压混凝土坝9号泄流中孔坝段在施工期的温度场反演结果与实际监测资料吻合良好,刚浇筑完成时上部形成33.3℃的高温区,但10 a后坝体内部温度趋于稳定,下降到约22℃。泄流孔口附近在施工期存在3~4 MPa的拉应力,运行期之后应力状态显著改善,高拉应力消失。由于坝体上部在夏季浇筑温度过高,混凝土温度达到50℃以上,形成了小范围较高的拉应力区,10 a后减小至2.6 MPa。大坝除坝踵处应力集中产生了6~7 MPa的较高压应力外,整体压应力水平较低,小于2 MPa。因此,由温度场和应力场仿真结果分析,9号坝段在运行期是较安全的。

### 参考文献:

[1] 张之平,任成功.龙开口水电站工程建设综述[J].水力

- 发电, 2013, 39 (2): 1-4. (ZHANG Zhiping, REN Chenggong. Entire process summary on the construction of Longkaikou Hydropower Station Project[J]. Water Power, 2013, 39(2): 1-4. (in Chinese))
- [2] 叶建群,熊立刚,陈国良,等. 龙开口水电站坝基深槽处理设计[J]. 水力发电, 2013, 39 (2): 28-31. (YE Jianqun, XIONG Ligang, CHEN Guoliang, et al. Design of deep trench treatment in dam foundation of Longkaikou Hydropower Station[J]. Water Power, 2013, 39 (2): 28-31. (in Chinese))
- [3] 唐欣薇,李鹏辉,张楚汉. 碾压混凝土重力坝温度场与应力场全过程仿真分析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24 (3): 50-53. (TANG Xinwei, LI Penghui, ZHANG Chuhan. Entire process simulation of temperature and stress fields for RCC dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24 (3): 50-53 (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] 朱伯芳,许平. 碾压混凝土重力坝的温度应力与温度控制[J]. 水利水电技术, 1996, 27 (4): 18-25. (ZHU Bofang, XU Ping. The temperature stress and temperature control of roller-compacted concrete gravity dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1996, 27 (4): 18-25. (in Chinese))
- [6] 黄淑萍,胡平,岳耀真. 观音阁水库碾压混凝土大坝温度应力仿真计算研究[J]. 水力发电, 1996, 22(7): 40-44. (HUANG Shuping, HU Ping, YUE Yaozhen. The simulation of temperature stress on Guanyingge RCC Dam [J]. Water Power, 1996, 22(7): 40-44. (in Chinese))
- [7] WILSON E L. The determination of temperatures within mass concrete structures: a report of an investigation[R]. Berkeley: University of California, 1968.
- [8] 李守义,张金凯,张晓飞. 碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] 朱伯芳,许平. 混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法[J]. 水力发电, 1996, 22(1): 38-43. (ZHU Bofang, XU Ping. Zone-merged algorithm and zoned different-step-length algorithm in the concrete simulation calculation [J]. Water Power, 1996, 22 (1): 38-43 (in Chinese))
- [10] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报, 1991, 22 (3): 28-34. (ZHU Bofang. Equivalent equation of heat conduction in mass concrete considering the effect of pipe cooling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22 (3): 28-34. (in Chinese))
- [11] 陈尧隆,何劲. 用三维有限元浮动网格法进行碾压混凝土重力坝施工期温度场和温度应力仿真分析[J]. 水利学报, 1998, 29(增刊1): 1-5. (CHEN Yaolong, HE Jing. Simulation on temperature and thermal stress distribution of RCC gravity dam during construction by using 3-D FEM floating mesh method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(Sup1): 1-5. (in Chinese))
- [12] 姜冬菊,张子明,王德信. 计算温度应力的广义约束矩阵法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 29-32. (JIANG Dongju, ZHANG Ziming, WANG Dexin. Generalized constraint matrix method for calculation of temperature stresses [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(1): 29-32. (in Chinese))
- [13] 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. (LIU Guangting, HU Yu, WANG Enzhi, et al. Analysis and measurement of the temperature field in the Shimenzi RCC Arch Dam [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42 (4): 539-542. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985, 16(9): 54-61. (ZHU Bofang. The elastic modulus, creep degree and stress relaxation coefficients of massive concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16(9): 54-61. (in Chinese))
- [15] 杨剑. 基于“数字大坝”的高拱坝真实形态研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.  
(收稿日期: 2015-05-17 编辑: 郑孝宇)
- +++++
- (上接第 77 页)
- [13] 冯小香,李丹勋,张明. 枢纽船闸引航道口门区三维水流数值模拟应用研究[J]. 水运工程, 2012(1): 122-126. (FENG Xiaoxiang, LI Danxun, ZHANG Ming. Application research on 3D flow numerical model in entrance area of ship lock approach channel [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1): 122-126. (in Chinese))
- [14] 卢文蕾,戈龙仔. 枢纽泄水闸开启方式对通航条件的影响[J]. 水运工程, 2011(4): 126-131. (LU Wenlei, GE Longzai. Influence of opening modes of hydro-junction's release sluice on navigation condition [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(4): 126-131. (in Chinese))
- [15] LI Y S, ZHAN J M. An efficient three-dimensional semi-implicit finite element scheme for simulation of free surface flows [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1993, 16: 187-198.
- [16] SMAGORINSKY J S. General circulation experiments with the primitive equations [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91: 99-164.
- [17] BRUFAU P, GARCIA P, VAZQUEZ-CENDON M E. Zero-mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flow over dry irregular topography [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 45(10): 1047-1082.
- [18] JAWAHAR P, KAMATH H. A high-resolution procedure for Euler and Navier-Stokes computations on unstructured grids [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 164 (1): 165-203.  
(收稿日期: 2015-04-08 编辑: 骆超)