

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.04.002

# 三河口高碾压混凝土拱坝基础垫层 混凝土温控措施研究

赵玮,王栋

(陕西省水利电力勘测设计研究院,陕西西安710001)

**摘要:**三河口拱坝为国内第二高碾压混凝土双曲拱坝,坝高141.5 m,工程建设难度大,其突出特点为河谷较宽,坝体方量大,研究拱坝垫层混凝土的浇筑温度、浇筑时机及温控措施,是保证垫层混凝土浇筑质量,以及确定垫层以上大坝碾压混凝土填筑时段的重要基础。通过5个不同方案的研究分析,确定了垫层混凝土浇筑采取控制浇筑温度为14℃,并采取通水冷却温控措施,水管间距为1.0 m×1.0 m,通水温度为20℃,也确定了垫层混凝土上部碾压混凝土在10月15日之前填筑为宜,可以为其他工程拱坝设计提供有价值的参考。

**关键词:**三河口;基础垫层;碾压混凝土(RCC);高拱坝

**中图分类号:**TV642.4;TV544

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1144(2023)04-0010-05

## Research on Concrete Temperature Control Measures for Foundation Cushion of Sanhekou High RCC Arch Dam

ZHAO Wei, WANG Dong

(Shaanxi Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Electric Power, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

**Abstract:** Sanhekou arch Dam is the second highest RCC double-curvature arch dam in China, with a height of 141.5 m. The engineering construction is difficult, and its prominent features are wide river valley and large square volume of dam body. Analyzing the pouring temperature and timing of arch dam cushion concrete and the temperature control measures of dam foundation cushion concrete can ensure the pouring quality of cushion concrete. And the important basis for determining the filling time period of RCC dam above cushion. Methods through the research and analysis of 5 different schemes, it is determined that the pouring temperature of the bedding concrete should be controlled at 14℃, and the cooling temperature control measures should be taken. The distance between the water pipes should be 1.0 m×1.0 m, and the temperature of the water flow should be 20℃. It is also determined that it is appropriate to fill the RCC on the upper part of the bedding concrete before October 15. It can provide valuable reference for other engineering arch dam design.

**Keywords:** Sanhekou; foundation cushion; Roller Compacted Concrete(RCC); high arch dam

三河口碾压混凝土抛物线拱坝坝顶高程为646.0 m,坝底高程504.5 m,坝基开挖底部河谷跨度约105 m,设计最大坝高141.5 m,拱冠梁剖面坝顶宽9.0 m,坝底厚37.0 m。大坝体型采用双曲拱坝,大坝厚高比0.29,坝顶宽度9 m,坝基最大宽度37 m。大坝坝体为三级配的C25碾压混凝土,坝基

设2.0 m厚C25常态混凝土垫层,垫层混凝土总方量约6000 m<sup>3</sup>,设计分为5块浇筑,每块垫层顺水流方向长度37 m,宽度约21 m~25 m。

三河口坝址多年平均温度为12.8℃,其中1月多年平均温度为1.2℃,7月多年平均温度为24.2℃,各月平均气温详见表1。根据现场混凝土

收稿日期:2023-03-08

修稿日期:2023-04-15

基金项目:2015年陕西省水利科技计划项目“三河口水利枢纽工程拱坝建基面优化研究”(2015slkj-16)

作者简介:赵玮(1974—),男,硕士,正高级工程师,主要从事水利水电工程设计与研究工作。E-mail:349250197@qq.com

试验,三河口拱坝垫层混凝土热力学指标详见表2。

表1 三河口坝址各月多年平均气温统计表

单位:℃

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	全年平均
平均气温	1.9	3.5	8.3	14.0	18.1	21.6	23.8	23.3	18.3	13.4	8.0	3.3	13.1

表2 三河口拱坝垫层混凝土热力学指标汇总表

序号	比热 $/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	导温系数 $/(m^2 \cdot h^{-1})$	导热系数 $/(kJ \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	表面放热系数 $/(kJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	线胀系数 $/(10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1})$	泊松比
大坝基础垫层 常态混凝土	0.96	0.00389	10.6	42	7.75	0.167

## 1 计算分析模型设计

研究三河口高拱坝基础垫层混凝土温控措施,是保证垫层混凝土浇筑质量,以及确定垫层以上大坝碾压混凝土填筑时段的重要基础。研究基础垫层混凝土温控的重点是低温和高温季节的混凝土浇筑问题,特别是位于基础强约束区的混凝土浇筑温度控制。因此,如何解决好大坝垫层混凝土施工时段、施工进度与混凝土温度控制措施之间的问题,需进行深入地仿真计算分析研究。

混凝土绝热温升和弹性模量计算方法:

混凝土绝热温升  $T(^\circ C)$  与龄期  $\tau$  拟合关系式:

$$\theta(\tau) = \frac{31.5\tau}{1.25 + \tau} \quad (1)$$

混凝土弹性模量  $E(GPa)$  与龄期  $\tau$  拟合关系式:

式:

$$E(\tau) = \frac{36.5\tau}{(8.5 + \tau)} \quad (2)$$

三河口拱坝温度场与温度应力仿真计算采用三维有限元法,地基所取范围为沿坝体的上下游、左右岸及底部均延伸1.5倍坝高。计算坐标系:顺水流方向为  $Y$  方向,向下游为正;坝高方向为  $Z$  方向,向上为正;沿左、右岸方向为  $X$  方向,指向右岸为正。大坝基础垫层混凝土厚度2.0 m,基础垫层单元2 000个,节点3 025个,计算模型见图1、图2。

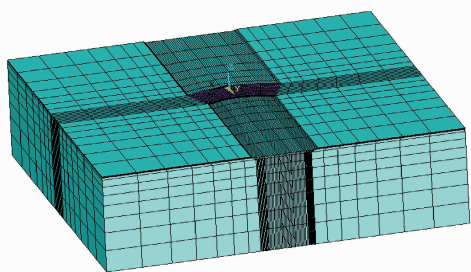


图1 三河口拱坝坝基整体计算模型图

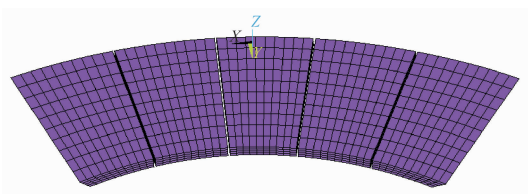


图2 三河口拱坝坝基层计算模型图

## 2 研究方案和设计控制标准

### 2.1 研究方案

三河口拱坝基础垫层混凝土计划7月20日开始施工,结合大坝基础混凝土入仓特点,垫层混凝土施工按D-3→D-1→D-5→D-2→D-4顺序进行施工,基础垫层分区见图3。

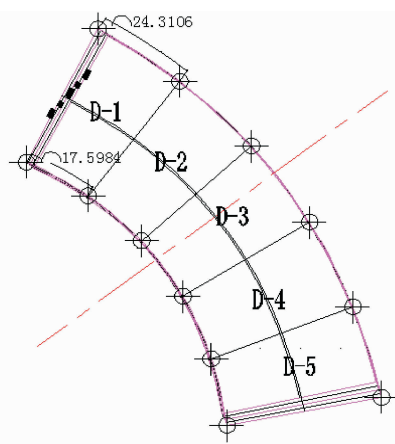


图3 大坝基础垫层分区图

三河口拱坝基础垫层具体工期安排及施工方法见表3。

研究三河口拱坝垫层混凝土浇筑方案如下:

方案1:混凝土浇筑采取自然入仓方式,浇筑温度为月平均气温。

方案2:混凝土浇筑采取自然入仓方式,浇筑温度为月平均气温,并采取通水冷却温控措施,水管间

表 3 三河口拱坝河床坝段垫层混凝土施工特性及计划工期统计表

区号	高程/m	计划工期	方量/m <sup>3</sup>	强度/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	入仓设备	浇筑方法	备注
D-1~D-5 坝段	504.50	07-20—07-21			搅拌罐车/装载机		基础找平层
D-3	504.5~506.5	07-22—07-26	1500	112	胎带机+长臂反铲	平铺法	
D-1	504.5~506.5	07-27—07-31			胎带机+长臂反铲	平铺法	
D-5	504.5~506.5	08-01—08-05			胎带机+长臂反铲	平铺法	
D-2	504.5~506.5	08-06—08-10			胎带机+长臂反铲	平铺法	
D-4	504.5~506.5	08-11—08-15			胎带机+长臂反铲	平铺法	

距 1.0 m × 1.0 m, 通水温度为 20℃。

方案 3: 混凝土浇筑采取控制浇筑温度为 18℃, 并采取通水冷却温控措施, 水管间距为 1.0 m × 1.0 m, 通水温度为 20℃。

方案 4: 混凝土浇筑采取控制浇筑温度为 16℃, 并采取通水冷却温控措施, 水管间距为 1.0 m × 1.0 m, 通水温度为 20℃。

方案 5: 混凝土浇筑采取控制浇筑温度为 14℃, 并采取通水冷却温控措施, 水管间距为 1.0 m × 1.0 m, 通水温度为 20℃。

温控计算分析方案汇总见表 4。

表 4 三河口拱坝基础垫层温控计算分析方案汇总表

计算方案	浇筑温度	冷却水管	通水温度
方案 1	月平均气温	无	无
方案 2	月平均气温	有	20℃
方案 3	18℃	有	20℃
方案 4	16℃	有	20℃
方案 5	14℃	有	20℃

## 2.2 温度控制标准

根据《混凝土重力坝设计规范》, 当基础约束区混凝土 28 d 龄期的极限拉伸值不低于  $0.85 \times 10^{-4}$  时, 对于施工质量均匀、良好, 基岩与混凝土的变形模量相近, 短间歇均匀上升浇筑的浇筑块, 基础容许温差可采用表 5。

表 5 常态混凝土基础容许温差 单位:℃

距基础面 高度 $h$	浇筑块长边长度 $l$ (m) 时基础容许温差				
	17 m 以下	17 m ~ 20 m	20 m ~ 30 m	30 m ~ 40 m	40 m 至 通仓长块
0.0l ~ 0.2l	26 ~ 25	25 ~ 22	22 ~ 19	19 ~ 16	16 ~ 14
0.2l ~ 0.4l	28 ~ 27	27 ~ 25	25 ~ 22	22 ~ 19	19 ~ 17

三河口拱坝底宽 37 m, 位于 30 m ~ 40 m 之间, 故本次温控计算所取基础容许温差为 16℃ ~ 19℃。准稳定温度场坝体内部平均温度为 13.5℃, 根据坝

底宽度插值计算得出本工程容许最大温度值为 30.4℃。结合工程重要性, 基础垫层混凝土内外温差控制为 16.0℃, 混凝土浇筑块容许最高温度为 30.0℃。

## 2.3 应力控制标准

根据三河口拱坝坝体混凝土弹性模量和极限拉伸值计算的允许拉应力见表 6。

表 6 常态混凝土 28 d 和 90 d 龄期允许拉应力

混凝土等级	极限拉伸值 / $\times 10^{-4}$		弹性模量 /GPa		温度应力 控制指标/MPa	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
大坝基础垫层 常态混凝土	0.94	1.10	28.0	33.35	1.60	2.22

## 3 大坝准稳定温度场计算成果分析

根据三河口拱坝基础垫层施工进度安排及混凝土热力学参数和外界气温等基础资料, 对大坝的准稳定温度场采用有限元进行了仿真计算, 1 月份的准稳定温度场见图 4, 7 月份的准稳定温度场见图 5, 准稳定温度场计算结果符合一般规律。从图可以看出, 大坝坝体内部稳定温度为 13.5℃ 左右。

## 4 非稳定温度场计算成果分析

根据混凝土热力学参数和大坝施工进度安排, 对三河口碾压混凝土拱坝基础垫层进行了全过程温度场有限元仿真计算。计算结果得到了不同方案在基础垫层不同坝段的最高温度值, 5 种计算方案最高温度、稳定温度、最大温差、基础容许温差值详见表 7。

从计算成果可以看出:

(1) 方案 1、方案 2 和方案 3 在 D-3、D-1、D-5、D-2、D-4 的最大温差均大于基础容许温差 (16.0℃ ~ 19.0℃), 不满足温控设计要求。

(2) 方案 4 控制浇筑温度为 16℃, 并采取通水冷却措施, 在 D-5、D-2、D-4 最大温差为 18.4℃, 接近于基础容许温差的极大值。

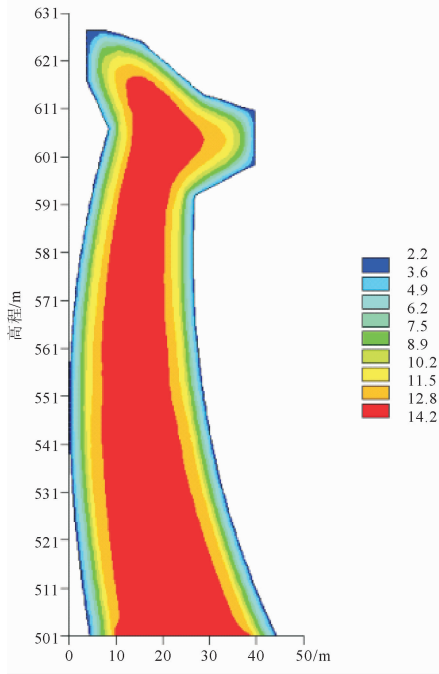


图 4 大坝 1 月份准稳定温度场云图(单位:℃)

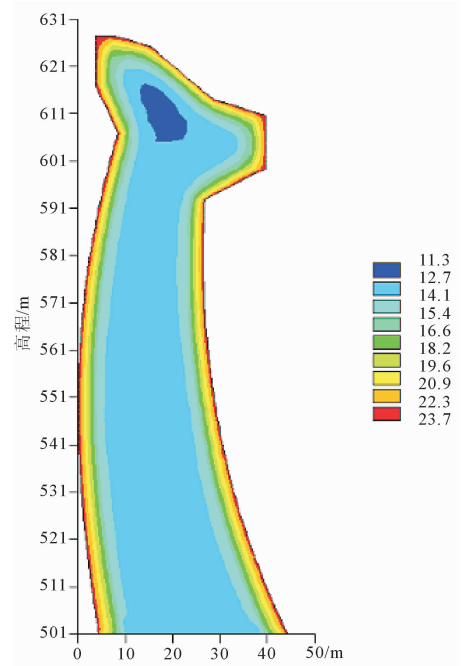


图 5 大坝 7 月份准稳定温度场云图(单位:℃)

表 7 5 种计算方案最高温度、稳定温度、最大温差、基础容许温差值

单位:℃

计算方案	最高温度和允许温度	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	最高温度	43.6	44.1	43.6	43.4	43.0
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	最大温差	30.1	30.6	30.1	29.9	29.5
	基础容许温差	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0
方案 2	最高温度	38.5	39.1	38.7	38.6	38.7
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	最大温差	25.0	25.6	25.2	25.1	25.2
	基础容许温差	16.0~19.0	12.0~14.5	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0
方案 3	最高温度	32.6	32.9	33.0	33.2	33.2
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	最大温差	19.1	19.4	19.5	19.7	19.7
	基础容许温差	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0
方案 4	最高温度	31.3	31.6	31.9	31.9	31.9
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	最大温差	17.8	18.1	18.4	18.4	18.4
	基础容许温差	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0
方案 5	最高温度	30.0	30.3	30.4	30.5	30.5
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
	最大温差	16.5	16.8	16.9	17.0	17.0
	基础容许温差	16.0~19.0	12.0~14.5	16.0~19.0	16.0~19.0	16.0~19.0

(3) 方案 5 控制浇筑温度为 14℃,并采取通水冷却措施,最高温度 30.5℃,基本满足温控设计要求,故方案 5 为温控设计推荐方案。

## 5 应力场计算成果分析

根据三河口水库工程碾压混凝土拱坝温度场仿

真计算结果,分别对 5 种方案进行了温度徐变应力仿真计算。温度应力是温度变化引起的应力,主要包括温差、徐变和自生体积变形产生的应力。由于计算成果数据量很大,整理成果时进行了必要的简化。基础垫层于 9 月 1 日、9 月 15 日、10 月 1 日、10 月 15 日、11 月 1 日不同坝段最大应力值见表 8—表 12。

表 8 9 月 1 日基础垫层最大应力值 单位:MPa

计算方案	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	1.67	1.67	1.66	1.70	1.48
方案 2	0.92	0.96	0.99	1.15	1.32
方案 3	0.60	0.62	0.68	0.84	1.01
方案 4	0.52	0.54	0.60	0.75	0.92
方案 5	0.44	0.45	0.52	0.67	0.84

表 9 9 月 15 日基础垫层最大应力值 单位:MPa

计算方案	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	1.70	1.71	1.71	1.77	1.67
方案 2	0.98	0.99	1.00	1.07	1.05
方案 3	0.60	0.61	0.65	0.72	0.71
方案 4	0.51	0.54	0.56	0.62	0.62
方案 5	0.43	0.46	0.48	0.54	0.53

表 10 10 月 1 日基础垫层最大应力值 单位:MPa

计算方案	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	1.99	2.03	1.98	2.08	1.95
方案 2	1.27	1.25	1.22	1.33	1.27
方案 3	0.89	0.96	0.92	0.99	0.92
方案 4	0.81	0.89	0.85	0.91	0.84
方案 5	0.73	0.81	0.78	0.83	0.75

表 11 10 月 15 日基础垫层不同坝段最大应力值 单位:MPa

计算方案	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	2.30	2.28	2.20	2.37	2.24
方案 2	1.58	1.52	1.45	1.62	1.56
方案 3	1.20	1.23	1.16	1.32	1.25
方案 4	1.11	1.16	1.09	1.24	1.17
方案 5	1.02	1.08	1.02	1.17	1.09

表 12 11 月 1 日基础垫层不同坝段最大应力值 单位:MPa

计算方案	D-3	D-1	D-5	D-2	D-4
方案 1	2.94	2.81	2.67	2.96	2.85
方案 2	2.25	2.06	1.94	2.26	2.21
方案 3	1.92	1.78	1.69	2.01	1.95
方案 4	1.83	1.71	1.63	1.94	1.88
方案 5	1.74	1.64	1.56	1.87	1.82

从计算成果可以看出,各方案基础垫层最大拉应力出现在混凝土浇筑后 7 d~14 d 天左右,且最大拉应力值差异较大,方案 5 拉应力值最小。由于 11 月份外界气温相对较低,内外温差大,因此,11 月 1 日 5 个方案的温度应力最大值均比其他时间的大。在 9 月 1 日、9 月 15 日、10 月 1 日,方案 5 的温度应力均小于 0.9 MPa。10 月 15 日方案 5 最大温度应力为 1.17 MPa,小于垫层混凝土 28 d 龄期的允许应力 1.60 MPa,混凝土垫层不会产生裂缝。11 月 1 日方案 5 最大温度应力值为 1.87 MPa,大于垫层混凝土 28 d 龄期的允许应力 1.60 MPa(本工程混凝土安全系数为 1.65),混凝土垫层产生裂缝风险很大。因此,经计算分析,认为在 10 月 15 日之前浇筑垫层上部碾压混凝土为宜。

## 6 结论及建议

根据 5 个方案的计算研究分析结果,方案 5 最高温度和最大应力满足要求,因此,方案 5 为推荐方案,所采取的温控措施为推荐温控措施。根据温控计算分析和实际,10 月 15 日之前填筑碾压混凝土为佳。

根据工程实际,结合计算分析,在 7 月、8 月份浇筑垫层常态混凝土时,宜采用仓面喷雾,流水养护和搭遮阳棚等措施,以降低外界气温的影响。另外,在低温季节来临之前,对已浇混凝土上、下游面采用砂卵石进行回填,以提高混凝土表面温度值。

三河口拱坝为国内第二高碾压混凝土双曲拱坝,大坝混凝土方量超过 100 万  $\text{m}^3$ ,为国内同类大坝混凝土体积第一,工程建设难度大。为确保大坝安全可靠、施工方便,大坝基础垫层混凝土的施工控制极为关键,通过研究分析,确定了垫层混凝土浇筑采取控制浇筑温度为  $14^\circ\text{C}$ ,并采取通水冷却温控措施,水管间距为  $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ,通水温度为  $20^\circ\text{C}$ ,确定了垫层混凝土上部碾压混凝土在 10 月 15 日之前填筑为宜,可以为其他工程拱坝设计提供有价值的参考。

### 参考文献:

- [1] 张金凯,李守义,吴忠明,等.考虑昼夜温差的碾压混凝土坝温度场仿真分析[J].西安理工大学学报,2008,24(3):311-315.
- [2] 王毅鸣,苏岩,邓毅国.天花板水电站拱坝建基面选择及优化调整研究[J].水力发电,2011,37(6):9-12.

- 2022.
- [3] 张成良,李 珍,叶丹勇,等. 偏压连拱隧道二衬开裂加固措施及实施效果分析[J]. 工程勘察,2021,49(6):7-13.
- [4] 刘 凡. 浅埋偏压连拱隧道管棚作用机理与支护参数优化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [5] 邵 康. 滑坡地段隧道局部加固结构研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [6] 徐春红,简庆华,徐华兴. 连拱隧道管棚超前支护受力特性及加固效果研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016,12(12):119-122.
- [7] 段 军,王 宾. 双连拱隧道洞口段围岩失稳的加固技术研究[J]. 西部探矿工程,2020,32(9):183-185,188.
- [8] 张成良,李 珍,叶丹勇,等. 偏压连拱隧道二衬开裂加固措施及实施效果分析[J]. 工程勘察,2021,49(6):7-13.
- [9] Kong Faochoo, Lu Dechun, Du Xiuli, et al. Displacement analytical prediction of shallow tunnel based on unified displacement function under slope boundary [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods, 2019,43(1):183-211.
- [10] Metje N, Chapman D N, Rogers C D F, et al. An optical fiber sensor system for remote displacement monitoring of structures-prototype tests in the laboratory [J]. Structural Health Monitoring, 2008,7(1):51-63.
- [11] Moffat R, Sotomayor J, Beltran J F. Estimating tunnel wall displacements using a simple sensor based on a Brillouin optical time domain reflectometer apparatus [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015,75:233-243.
- [12] 程崇国,郭 军. 公路隧道衬砌裂缝处治对策[J]. 公路交通技术,2017,33(6):95-98,104.
- [13] 吴梦军,张永兴,刘新荣. 公路隧道病害处治技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,20(5):967-971.
- [14] 肖中林,曲家新. 凿槽嵌拱处治隧道裂损衬砌技术[J]. 中华民居,2011,39(11):50-51.
- [15] 刘学增,桑运龙,包浩杉. 叠合式套拱加固带裂缝隧道衬砌受力机理分析[J]. 土木工程学报,2013,46(10):127-134.
- [16] 穆富江. 喷射 UHTCC 力学性能及其加固应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [17] 侍军浩. 偏压荷载作用下隧道衬砌裂损失稳规律及 FRP 加固方法对比分析[D]. 石家庄铁道大学,2022.
- [18] 朱明勇,耿 欧,孙 倩,等. 内粘钢板法加固盾构隧道衬砌管片的力学性能试验研究[J]. 特种结构,2022,39(2):9-14.

(上接第 14 页)

- [3] 闫超君,孙林松. 基于应变能与模糊贴近度的拱坝体形稳健优化设计[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):37-40.
- [4] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002:156-198.
- [5] 张晓飞,李守义,陈尧隆. 碾压混凝土拱坝温度场计算的浮动网格法[J]. 土木工程学报,2006,39(2):126-129.
- [6] Li Shouyi, Ren Jinke, Wu Zhongming, et al. Simulation of temperature field - RCC arch dam [J]. International Water Power and Dam Construction,2008,60(4):16-18.
- [7] Li Shouyi, Zhang Jinkai, Wang Ting. Effect of Pouring Temperature on Temperature Stress of RCC Gravity Dam [C]//Guo Maozu, Zhao Liang, Wang Lipo. Fourth International Conference on Natural Computation ICNC 2008. Piscataway, NJ 08855-1331, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society,2008:355-359.
- [8] Ren Jinke, Li Shouyi, Zhao Lijuan, et al. Research on the effect of cooling pipe of RCC gravity dam [J]. Dam Engineering,2008,19(1):29-38.
- [9] Zhang Xiaofei, Li Shouyi, Chen Yaolong. Optimization of geometric shape of Xiamen arch dam [J]. Advances in Engineering Software, 2009,40(2):105-109.
- [10] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method [J]. Advances in engineering software, 2001,32(9):677-682.
- [11] Li Shouyi, Chen Yaolong, Li Jiahong, et al. The new method of arch dam stress calculation and the application of GTSTRUDL CAE/CAD system [J]. Advances in Engineering Software,2000,31(4):303-307.