

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.014

练迪, 黄耀英, 张倩, 等. 岩基上混凝土浇筑块施工期最高温度均匀化调控[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 86-91. (LIAN Di, HUANG Yao-ying, ZHANG Qian, et al. Uniformity control of highest temperature of concrete block on rock foundation during construction[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 86-91.)

岩基上混凝土浇筑块施工期最高温度均匀化调控

练迪¹, 黄耀英¹, 张倩², 徐佰林¹, 景继¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江勘测规划设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 最高温度是混凝土坝温度控制的重要指标。浇筑仓最高温度过高会导致后期降温幅度大, 而浇筑仓最高温度过低对混凝土早期力学性能增长有一定影响。实际施工过程中, 高温季节浇筑混凝土常出现最高温度超标问题, 低温季节浇筑混凝土又常出现最高温度过低的问题。但目前工程单位对最高温度过低的问题关注较少, 所以调控施工措施保证浇筑仓最高温度在一个合理范围的研究具有重要意义。结合高温季节岩基上混凝土浇筑块, 综合应用数值计算、均匀设计和神经网络技术, 通过优选通水参数, 探讨混凝土浇筑块最高温度均匀化调控的方法。算例分析表明, 对混凝土浇筑块最高温度的均匀化调控是可行的, 且可保证混凝土块正台阶形温度分布, 满足实际施工过程中接缝灌浆的要求。

关键词: 最高温度; 浇筑仓; 通水参数; 温度调控

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)04-0086-06

浇筑仓最高温度是混凝土坝温度控制的重要指标。浇筑仓最高温度过高, 会导致基础温差和内外温差过大, 后期降温幅度大, 容易引起温度裂缝。浇筑仓最高温度过低, 会导致混凝土早期力学性能发展较慢, 对混凝土早期抗裂不利, 且对混凝土横缝的张开也会有较大影响^[1-2]。目前, 工程单位十分重视浇筑仓最高温度超标的问题, 但对浇筑仓最高温度过低不够重视, 而在低温季节浇筑混凝土时, 常常容易出现浇筑仓最高温度过低的情况。所以通过调控施工措施保证混凝土浇筑块最高温度在一个合理的范围内具有重要的意义。

朱伯芳提出小温差、早冷却、缓慢冷却的通水原则可以减小自生应力、提高抗裂安全度^[3]。一些高混凝土坝在该通水原则基础上, 通过在垂直向设置已灌区、待灌区、同冷区、过渡区、盖重区、浇筑区进行温度控制, 使各灌区温度及温降幅度形成合适的温度梯度, 以保证垂直向正台阶形温度分布, 达到良好的温控防裂效果^[4-5]。本文基于西南某实际工程施工条件, 建立岩基上混凝土浇筑块模型, 探讨混凝土浇筑块最高温度均匀化调控过程。

1 最高温度均匀化调控基本原理

1.1 组合指数式水管冷却等效热传导模型

利用水管冷却等效热传导法进行混凝土温度场仿真计算时, 可将冷却水管看成负热源, 从平均意义上考虑水管冷却的效果, 绝热温升采用朱伯芳院士^[6]提出的组合指数型绝热温升表达式:

$$\theta(\tau) = \sum_{i=1}^n \theta_i (1 - \exp(-m_i \tau)) \quad (1)$$

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209124); 三峡大学研究生科研创新基金资助项目

作者简介: 练迪(1991—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事大坝安全监控研究。E-mail: liandi1991@163.com

由此,可推导得多档通水的组合指数型水管冷却热传导方程^[7-8]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + (T_{0j} - T_{wj}) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \theta_i \frac{\partial \psi_i}{\partial t} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = p_j \exp(-p_j t) \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial t} = \frac{m_i}{m_i - p_j} (m_i \exp(-p_j t - (m_i - p_j)t) - p_j \exp(-p_j t - (m_i - p_j)t_j)) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为混凝土温度; t 为时间; a 为混凝土导温系数; T_{0j} 为第 j 档通水工况起始时刻的混凝土平均温度; T_{wj} 为第 j 档通水工况的进口水温; θ_i 和 m_i 为组合指数式绝热温升参数; p_j 为第 j 档通水工况的水冷参数。

本文采用 Visual Fortran 编制了求解水管冷却等效传导方程的有限元程序。

1.2 最高温度均匀化调控步骤

本文提出结合均匀设计和 BP 神经网络模型,优选通水参数进行混凝土浇筑块最高温度均匀化调控。均匀设计和 BP 神经网络的基本原理见文献[9-10],以下介绍最高温度均匀化调控的主要步骤:

(1) 根据实际工程施工条件,确定一期控温阶段、一期降温阶段、中期控温阶段通水参数取值范围。

(2) 利用数值方法获得神经网络学习样本。设置通水参数取值水平,利用均匀设计方法构造各阶段通水参数的取值组合。然后建立混凝土浇筑块三维有限元模型,加载每组参数取值,进行温度场仿真计算,获得各取值组合下中间浇筑仓的温度特征值。最后,将温度特征值作为输入,对应的参数取值组合作为输出,组成学习样本。

(3) 利用该神经网络学习样本对 BP 神经网络模型进行训练,获得较好的神经网络模型,然后以目标温度值输入已训练好的神经网络模型中,优选出通水参数组合,载入有限元模型中进行计算,获得中间浇筑仓的特征温度,根据目标温度,对优选的中间浇筑仓的通水参数进行微调。

(4) 将调整后的通水参数载入有限元模型中,计算各浇筑仓的温度特征值,然后根据目标温度,对各浇筑仓通水参数进行调整,获得各浇筑仓最优通水参数。

2 实例分析

2.1 三维有限元模型

以西南某大坝混凝土浇筑块为例,建立三维有限元模型,剖面图如图 1 所示。该模型由基岩和大坝混凝土浇筑块两部分组成,共 10 个混凝土浇筑仓,每个浇筑仓层厚 3 m,分 6 个坯层浇筑,每个坯层厚 0.5 m,尺寸为 50 m×20 m×30 m(长×宽×高),上游、下游以及地基均取 5 倍坝高即 150 m^[11]。

(1) 计算基本参数。混凝土浇筑块采用中热水泥混凝土,其顶面保持裸露,表面放热系数为 $1.005 \times 10^3 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,上下游面浇筑 5 d 后覆盖 3 cm 保温板,表面放热系数为 $2.06 \times 10^2 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ^[12];混凝土浇筑块导温系数为 $0.081 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$;导热系数为 $184.9 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。在浇筑仓内铺设 PE 冷却水管通水冷却降温,冷却水管外径 32 mm,长 300 m,导热系数为 $39.84 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。通水冷却分为一期控温 and 一期降温、中期控温 3 个阶段和对应的通水温分别为 8°C , 15°C 和 15°C ,通水流量 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(2) 初始条件。从 6 月 1 号开始浇筑,浇筑温度均取 12°C ,间歇时间均为 7 d。基岩底面温度为 20°C ,

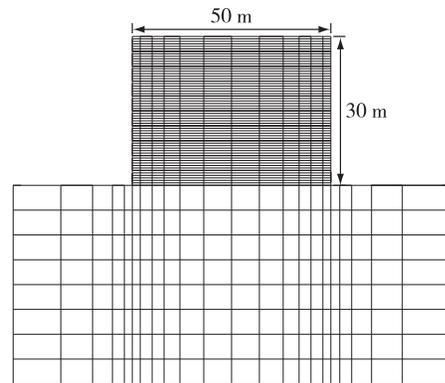


图 1 三维有限元模型剖面

Fig. 1 Three-dimensional finite element model

表面初始温度为浇筑起始时刻环境温度。

(3) 边界条件。计算边界包括混凝土顶面、横缝面及上下游表面,第一仓混凝土底面与基岩接触。基岩底面及其四周、混凝土块计算域横缝面均取为绝热边界,其余边界为第三类边界条件,环境气温参照西南某大坝坝址区气温资料,表达式为 $22.74 + 8.25\cos(\frac{\pi}{180}(\Delta t - 45))$ (Δt 为实际浇筑日期离起始浇筑日期的天数)。

2.2 最高温度均匀化调控过程

(1) 根据实际施工资料,选定一期控温阶段通水流量变化范围为 40~70 L/min,通水时长变化范围为 10~15 d,一期降温阶段通水流量变化范围为 20~50 L/min,通水时长变化范围为 15~26 d,中期控温阶段通水时长变化范围为 14~25 d,本文根据文献[9]中给出的均匀设计的拟水平法得到 $U_{12}(6^3 \times 12^2)$ 混合水平均匀设计表,其中一期控温通水流量、通水时长、一期降温通水流量取值水平均为 6,一期降温通水时长、中期控温通水时长取值水平数为 12,设计 12 组通水流量、通水时长取值组合见表 1。

表 1 设计工况

Tab. 1 Design working conditions

工况	一期控温		一期降温		中期控温时长/d	工况	一期控温		一期降温		中期控温时长/d
	通水流量/ (L·min ⁻¹)	温通水 时长/d	通水流量/ (L·min ⁻¹)	温通水 时长/d			通水流量/ (L·min ⁻¹)	温通水 时长/d	通水流量/ (L·min ⁻¹)	温通水 时长/d	
1	40	11	26	23	25	7	58	13	20	25	19
2	40	12	38	19	24	8	58	15	32	21	
3	46	14	50	15	23	9	64	10	44	17	17
4	46	15	26	24	22	10	64	11	20	26	16
5	52	10	38	20	21	11	70	13	32	22	15
6	52	12	50	16	2 018	12	70	14	44	18	14

(2) 结合均匀设计的 12 组通水流量、通水时长取值组合,进行温度场仿真计算,获得浇筑块中间仓的温度特征值。根据图 1 可知第 5 浇筑仓即为浇筑块的中间浇筑仓,因此以表 2 中各工况下第 5 浇筑仓特征温度值,联合表 1 中的各设计工况的通水参数,获得神经网络学习样本。

表 2 第 5 浇筑仓特征温度值

Tab. 2 Characteristic values of temperature of fifth concrete placing area

设计工况	最高温度/℃	最高温度达到龄期/d	降温结束温度/℃	中期控温温度变化范围/℃
1	27.24	5.50	22.59	21.25~22.59
2	27.24	5.50	22.47	21.33~22.47
3	27.12	5.50	22.09	21.19~22.10
4	27.12	5.50	21.08	20.10~21.08
5	27.02	5.25	22.81	21.83~22.81
6	27.02	5.25	22.53	21.77~22.55
7	26.94	5.25	21.95	20.80~21.95
8	26.94	5.25	21.01	20.33~21.01
9	26.88	5.25	23.07	22.44~23.08
10	26.88	5.25	22.25	21.42~22.25
11	26.83	5.25	21.23	20.70~21.23
12	26.83	5.25	21.42	21.01~21.47

(3) 以训练样本中最高温度、降温结束温度、中期控温温度变化值作为输入,对应工况的通水参数作为

输出,建立3层BP神经网络模型进行训练。假定最高温度控制值为27℃,降温结束目标温度为22℃,中期控温温度变化1℃,输入已训练好的神经网络模型,优选出第5浇筑仓的通水参数取值组合如表3所示,并将参数取值载入有限元模型进行仿真计算得到第5仓的温度特征值:最高温度27.00℃,最高温度达到龄期5.25d,降温结束温度21.92℃,中期控温温度变化范围21.06~21.92℃。由以上温度特征值可知,第5仓的降温结束温度偏低,所以应减少一期降温的通水时长使降温结束温度升高到目标温度22℃,调整结果见表3。

表3 优选第5浇筑仓通水参数组合及调整后的参数组合

Tab.3 Optimization of parameter combination of fifth concrete placing area and parameter combination after adjusting

一期控温通水流量/ (L·min ⁻¹)	一期控温通水时长/d	一期降温通水流量/ (L·min ⁻¹)	一期降温通水时长/d	中期控温时长/d
53.5/53.5	12.5/15.0	34.2/34.2	20.5/20.0	20/20

注:表中“/”前后的数值分别为优选的参数值和调整后的参数值。

(4)将调整后的参数组合载入到有限元模型中进行仿真计算,得到各浇筑仓的特征温度值(见表4)。根据表4可知,第1仓的最高温度过低,降温结束温度过高,第2仓和第3仓的最高温度过低,第10仓的降温结束温度过高,所以应对其相应的通水参数进行微调,应降低第1仓的一期控温的通水流量、延长一期控温通水时长,并加大一期降温阶段的通水流量、延长一期降温的通水时长,降低第2仓和第3仓的一期控温阶段的通水流量,加大第10仓的一期降温的通水流量并延长一期降温的通水时长,微调结果见表5。

表4 各浇筑仓温度特征值

Tab.4 Characteristic values of temperature of every concrete placing area

浇筑仓	最高温度/ ℃	最高温度 出现龄期/d	降温期结 束温度/℃	中期控温 温度变化/℃	浇筑仓	最高温度/ ℃	最高温度 出现龄期/d	降温期结 束温度/℃	中期控温 温度变化/℃
1	26.56	5.25	22.91	22.39~23.48	6	27.02	5.25	22.02	21.16~22.09
2	26.78	5.25	21.93	21.28~22.49	7	27.03	5.25	22.07	21.19~22.07
3	26.86	5.25	21.86	21.05~21.86	8	27.05	5.25	22.08	21.24~22.08
4	26.94	5.25	22.96	21.51~22.96	9	27.03	5.25	22.06	21.53~22.00
5	27.00	5.25	22.00	21.14~22.05	10	26.98	5.25	23.00	22.00~23.35

表5 浇筑仓通水参数微调

Tab.5 Cooling measures after minor adjusting

浇筑仓	一期控温通水流量/ (L·min ⁻¹)	一期控温通水时长/d	一期降温通水流量/ (L·min ⁻¹)	一期降温通水时长/d	中期控温时长/d
1	38.0	15.0	50.0	25	20
2	43.0	12.5	34.2	20	20
3	45.0	12.5	34.2	20	20
10	53.5	12.5	45.0	25	20

(5)将调整后的通水参数载入有限元模型进行仿真计算,得到各浇筑仓温度特征值(见表6)。并在图2中绘制浇筑块典型时刻的垂直向温度变化。

表6 各浇筑仓温度特征值

Tab. 6 Characteristic values of temperature of every concrete placing area

浇筑仓	最高温度/ ℃	最高温度 出现龄期/d	降温期结 束温度/℃	中期控温 温度变化/℃	浇筑仓	最高温度/ ℃	最高温度 出现龄期/d	降温期结 束温度/℃	中期控温 温度变化/℃
1	26.86	5.25	22.00	21.65~23.00	6	27.02	5.25	22.02	21.16~22.09
2	26.96	5.25	21.93	21.07~22.15	7	27.03	5.25	22.07	21.19~22.07
3	26.99	5.25	21.93	21.07~21.93	8	27.05	5.25	22.08	21.24~22.08
4	26.96	5.25	22.96	21.51~22.96	9	27.03	5.25	22.00	21.53~22.00
5	27.00	5.25	22.00	21.14~22.05	10	26.98	5.25	22.18	21.78~22.49

分析各浇筑仓的温度特征值可知,最高温度平均值为27.00℃,标准差为0.048,降温结束温度平均值为22.11℃,标准差为0.13,中期控温温度变化范围大约为1℃;且根据垂直向温度图可知沿浇筑高度浇筑块自下而上进行不同阶段的通水冷却,温度随高度逐渐上升,且随着龄期的增长,各部位依次达到中期控温目标值22℃,满足实际施工过程中接缝灌浆的要求。由此可见该方法不仅能实现最高温度均匀化调控,且通过对后期通水降温温度的均匀化调控,能保证垂直向正台阶形温度分布。

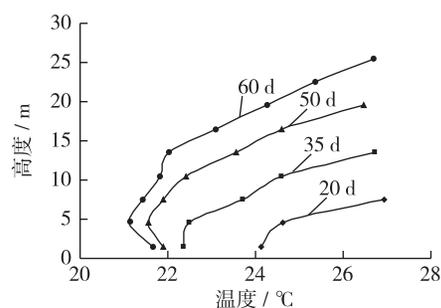


图2 典型时刻垂直向温度变化

Fig. 2 Vertical temperature variation in typical moment

3 结 语

本文以西南某大坝岩基上的浇筑块为例,探讨优选通水措施进行最高温度均匀化调控。

(1) 针对混凝土浇筑块各浇筑仓最高温度应在合理范围,本文提出结合数值计算、均匀设计理论和BP神经网络模型进行最高温度均匀化调控的方法并详细说明调控步骤。

(2) 结合西南某大坝岩基上的浇筑块,建立最高温度均匀化调控神经网络模型,输入温度目标值,优选出通水参数组合,载入有限元模型中进行温度场仿真计算,得到各浇筑仓温度特征值,与目标值进行对比,据此对通水参数进行调整,获得各浇筑仓最优通水参数。调控结果分析表明,该方法不仅能满足最高温度均匀化要求,且能保证浇筑块正台阶形温度分布。

参 考 文 献:

- [1] 林继庸. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIN Ji-yong. Hydraulic structure[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))
- [2] SL 319—2005 混凝土重力坝设计规范[S]. (SL 319—2005 Design specification for concrete gravity dams[S]. (in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 小温差早冷却缓慢冷却是混凝土坝水管冷却的新方向[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 43-49. (ZHU Bo-fang. Pipe cooling of concrete dam from earlier age with smaller temperature difference and longer time[J]. Water Resources and Hydropower, 2009, 40(1): 43-49. (in Chinese))
- [4] 周政国. 溪洛渡水电站混凝土双曲拱坝温度控制施工技术[J]. 中国农村水利水电, 2013(3): 137-144. (ZHOU Zheng-guo. Temperature control and construction technology of Xiluodu concrete hyperbolic arch dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(3): 137-144. (in Chinese))
- [5] 朱伯芳, 吴龙坤, 张国新, 等. 混凝土坝初期水管冷却方式研究[J]. 水力发电, 2010(3): 31-35. (ZHU Bo-fang, WU Long-kun, ZHANG Guo-xin, et al. Research on the initial pipe cooling method of concrete dam[J]. Water Power, 2010(3): 31-35. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 混凝土热力学性能随龄期变化的组合指数公式[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 1-7. (ZHU Bo-fang. Compound

- exponential formula for variation of thermal and mechanical properties with age of concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 1-7. (in Chinese))
- [7] 田开平, 郑晓辉, 黄耀英, 等. 基于光纤传感技术的低热水泥混凝土温度监测及热学参数反演[J]. *水力发电*, 2014, 40(4): 50-53. (TIAN Kai-ping, ZHENG Xiao-hui, HUANG Yao-ying, et al. HBC concrete temperature monitoring and thermal parameter inversion based on optical fiber sensing technology[J]. *Water Power*, 2014, 40(4): 50-53. (in Chinese))
- [8] 黄耀英, 周宜红, 周建兵. 水管冷却热传导计算模型能量分析[J]. *水利水运工程学报*, 2012(1): 78-81. (HUANG Yao-ying, ZHOU Yi-hong, ZHOU Jian-bing. Energy analysis of a pipe cooling thermal conduction calculation model[J]. *Hydro-Science Engineering*, 2012(1): 78-81. (in Chinese))
- [9] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 1994. (FANG Kai-tai. *Orthogonal and uniform experimental design* [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese))
- [10] 史峰, 王小川, 郁磊. Matlab神经网络30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. (SHI Feng, WANG Xiao-chuan, YU Lei. *Matlab neural network 30 case analysis*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 黄耀英, 沈振中, 吴中如, 等. 混凝土坝及坝基分析中截取边界的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2007(4): 9-13. (HUANG Yao-ying, SHEN Zhen-zhong, WU Zhong-ru, et al. Intercepting boundary influence in analyzing concrete dam and its rock foundation size[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2007(4): 9-13. (in Chinese))
- [12] 程中凯, 李金河, 黄耀英, 等. 基于光纤测温的混凝土坝上下游表面苯板保温效果反馈[J]. *水力发电*, 2013(7): 43-46. (CHENG Zhong-kai, LI Jin-he, HUANG Yao-ying, et al. Insulation effect feedback of polystyrene board on upstream and downstream surfaces of concrete dam based on optical fiber temperature measurement[J]. *Water Power*, 2013(7): 43-46. (in Chinese))

Uniformity control of highest temperature of concrete block on rock foundation during construction

LIAN Di¹, HUANG Yao-ying¹, ZHANG Qian², XU Bai-lin¹, JING Ji¹

(1. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China*; 2. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China*)

Abstract: The highest temperature is an important index in temperature control of the concrete dam. The highest temperature of the concrete placing area can not be too high nor too low. If the highest temperature is too high, it would cause the larger cooling rate; if the highest temperature is too low, it would have certain effects on early mechanical properties of concrete. During actual construction, the highest temperature may be too high in the high temperature season and too low in the low temperature season. But engineering units pay less attention to the over-low temperature at present. So it is of great significance to adjust cooling measures to ensure the appropriate highest temperature for concrete placing. Thus, a method combined with numerical calculation, uniform design and neural network is used to optimize the cooling measures, which can make sure the uniformity control of the highest temperature. Analyses of calculation examples show that this method is not only feasible but also can ensure appropriate temperature distribution in order to meet the requirements of joint grouting in actual construction process of concrete dams.

Key words: highest temperature; concrete placing area; cooling measures; temperature control