

闸墩混凝土结构温控防裂措施 智能优选研究

黄耀英,丁月梅,吕晓曼,徐佰林

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

[摘要] 闸墩混凝土温控防裂是一个与温控措施和材料参数相关的复杂多因素系统优选问题,本文尝试已知混凝土热力学材料参数情况下的温控措施优选,将闸墩混凝土结构内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值作为输入,闸墩表面保温效果、浇筑温度、通水水温、通水时间作为输出,建立了温控措施优选的神经网络模型,采用均匀设计原理进行温控参数组合,并采用水管冷却有限元法仿真分析含冷却水管的闸墩混凝土结构温度场和徐变应力场,获得样本进行学习,以此训练好的网络描述结构主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值与不同温控措施的非线性关系。将合适的结构主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值输入训练好的网络,可自动优选出温控防裂措施。算例分析表明,本文建立的温控措施优选神经网络模型是可行的。

[关键词] 闸墩;表面保温;通水冷却;浇筑温度;智能优选

[中图分类号] TV315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)03-0059-05

1 前言

大量工程实践表明,水闸闸墩、渡槽槽壁、泄洪洞衬砌混凝土等准大体积混凝土在施工期经常会出现裂缝。为此,工程单位采用改善混凝土抗裂性能、预冷骨料、表面保温和养护、通水冷却等措施进行温控防裂。研究表明,对于闸墩混凝土,如果初期保温效果过强,在拆模时,受环境气温影响的冷击现象明显;如果采取通水冷却来减小内外温差,虽然能降低混凝土内部的温度,但降温速率过快,同样会引起严重裂缝。针对大体积混凝土,朱伯芳^[1]提出了“小温差、早冷却、缓冷却”的通水理念,但对闸墩混凝土来说,由于通水冷却主要目的是控制最高温度,因此小温差、早冷却、缓冷却的通水理念有时并不适用。近年朱伯芳等^[2]提出了一个改善混凝土抗裂能力的新理念——混凝土的半熟龄期,

即混凝土绝热温升、强度等达到其最终值一半时的龄期,它代表绝热温升和强度增长的速度。分析表明^[2],如果混凝土绝热温升的半熟龄期太小,内部温度上升太快,以致天然散热和人工冷却还没有来得及充分发挥作用时,混凝土温度已上升到最高,随后将产生较大的降温幅度和温度应力。由于很多闸墩混凝土结构采用泵送混凝土,而泵送混凝土放热量和放热速率一般较常态混凝土大,即泵送混凝土的半熟龄期一般较小,这导致试图通过加大通水流量和降低通水温度等措施来控制最高温度的效果不甚明显。其实,闸墩混凝土温控防裂取决于浇筑温度、环境气温、表面保温效果、水管间距、通水水温、通水流量、通水时间等温控措施,同时还取决于绝热温升、弹性模量、强度参数和徐变度等材料参数的增长速率,它是一个复杂的多因素系统优选问题。但目前闸墩混凝土温控防裂文献多是单个

[收稿日期] 2013-09-24

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51209124)

[作者简介] 黄耀英,1977年出生,男,湖南郴州市人,博士,副教授,主要从事大坝安全监控及数值计算方面的科研工作;

E-mail: huangyaoying@sohu.com

温控因素的敏感性分析^[3,4],少有多个温控因素的优选分析,为此,本文探讨基于均匀设计原理的神经网络模型优选温控因素。

2 基本原理

2.1 温度场和徐变应力场仿真分析原理

水管冷却效果的模拟是含冷却水管混凝土结构温度场仿真分析的一个难点。目前,混凝土工程上对水管冷却效果的分析主要有两种计算模型:水管冷却有限元法和水管冷却等效热传导法。水管冷却有限元法是在水管附近布置密集的有限元网格,以反映水管附近很大的温度梯度,采用迭代法计算水管水温与混凝土进行热交换而导致沿程水温逐渐增大,从而获得温度场;水管冷却等效热传导法是把冷却水管看成热汇,在平均意义上考虑水管冷却的效果,不需要在水管附近布置密集的有限元网格,采用通常的网格即可获得温度场。水管冷却有限元法的计算原理和水管冷却等效热传导法计算原理在文献[5, 6]中有详细的叙述,本文不再赘述。对于闸墩混凝土结构,采用水管冷却有限元法仿真计算的温度场更符合实际情况,为此,本文采用 Visual Fortran 编制了水管冷却有限元法仿真分析程序^[7]。

获得含冷却水管的闸墩混凝土结构的温度场计算结果后,再进行徐变应力场仿真分析。混凝土结构徐变应力场仿真分析原理在文献[5, 6]中有详细的叙述,本文不再赘述。本文采用 Visual Fortran 编制了混凝土结构徐变应力场仿真分析程序^[7]。

2.2 基于均匀设计的神经网络模型优选闸墩混凝土温控措施

关于均匀设计的基本原理在文献[8]有较详细的阐述,本文不再赘述。

闸墩混凝土温控防裂取决于浇筑温度、环境气温、表面保温效果、水管间距、通水水温、通水流量、通水时间等温控措施,同时还取决于绝热温升、弹性模量、强度参数和徐变度等材料参数,它是一个复杂的多因素系统优选问题。由于过多的因素进行联合优选难度很大,本文尝试已知混凝土热力学材料参数情况下的温控措施优选。考虑到混凝土开裂与否间接取决于最高温度和降温速率等,而直接取决于混凝土结构的主拉应力,本文主要分析闸墩混凝土结构的主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线的关系。以下介绍基于均匀设计的神经网络

模型优选温控防裂措施的思路,其主要分为3个步骤。

1)利用数值方法产生神经网络的学习样本。

a. 设置待优选浇筑温度、表面保温效果、通水水温、通水流量、通水时间等温控措施的取值水平,利用均匀设计方法在待优选参数 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的可能取值空间中构造参数取值组合,形成待优选参数若干个取值集合。b. 分别建立闸墩混凝土温度场和徐变应力场仿真分析有限元模型,把每一个待优选参数的取值集合输入闸墩混凝土温度场仿真计算模型,进行温度场仿真计算,然后进行徐变应力场仿真计算,并获得闸墩混凝土结构内部和表面关键点的第一主应力过程线,由此获得内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值 $R_{in} = \left(\frac{[\sigma]_{\tau} - (\sigma_{1\tau})_{in}}{[\sigma]_{\tau}} \right)_{min}$, $R_{sur} = \left(\frac{[\sigma]_{\tau} - (\sigma_{1\tau})_{sur}}{[\sigma]_{\tau}} \right)_{min}$, 其中, $[\sigma]_{\tau}$ 为随龄期 τ 增长的抗拉强度; $(\sigma_{1\tau})_{in}$ 为内部主拉应力历时曲线; $(\sigma_{1\tau})_{sur}$ 为表面主拉应力历时曲线。c. 将闸墩混凝土关键点的 R_{in} 、 R_{sur} 作为输入,待优选参数 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 可能的取值作为输出,组成学习样本。

2)利用该样本集对神经网络进行训练,获得较为合理的神经网络模型。基于均匀设计原理的神经网络模型如图1所示。

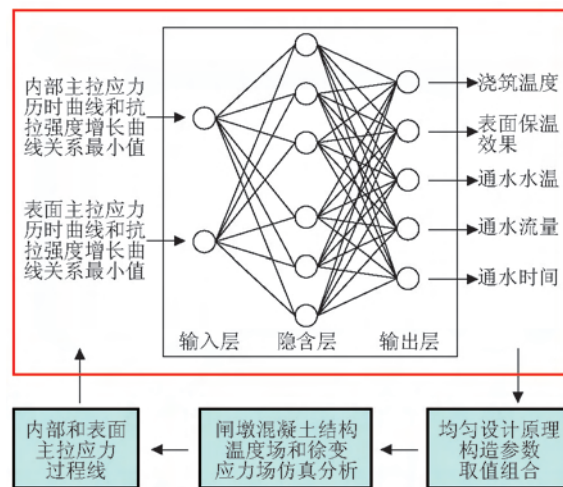


图1 基于均匀设计原理的神经网络模型

Fig.1 Neural network model based on uniform design principle

3)根据设计要求和工程经验确定合适的内部

和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关

系的最小值 $R_{in}^{opt} = \left(\frac{[\sigma]_t - (\sigma_{1r})_{in}}{[\sigma]_t} \right)_{min}^{opt}$ 、 $R_{sur}^{opt} =$

$\left(\frac{[\sigma]_t - (\sigma_{1r})_{sur}}{[\sigma]_t} \right)_{min}^{opt}$, 然后, 将确定的合适值 R_{in}^{opt} 和 R_{sur}^{opt}

输入训练好的神经网络模型, 即能优选出合理的浇筑温度、表面保温效果、通水水温、通水流量、通水时间等温控措施。最后, 根据工程实际情况以及工程经验等, 对优选出的温控措施略作调整, 然后指导实际温控防裂。

3 实例分析

淮河干流某进(退)洪闸工程共有5孔, 单孔净宽8 m, 闸墩高8.5 m, 闸室顺水流方向长15.5 m, 中墩厚1.2 m, 底板厚1.4 m, 采用泵送混凝土。闸体混凝土浇筑时间集中在2—4月。

3.1 优选因素的确定

假设闸墩立模时间为7 d, 在闸墩混凝土拆模后, 间歇1 d覆盖表面保温材料, 在闸墩正中间布设冷却水管(钢管)进行通水冷却, 水管垂直间距为1 m。由于泵送混凝土绝热温升半熟龄期较小, 其半熟龄期仅为1.5 d, 以致水管通水流量对闸墩混凝土的温度和应力相对不敏感, 根据工程经验, 通水流量取为24 m³/d。经综合分析, 拟对闸墩立模7 d内的表面保温效果、浇筑温度、通水水温、通水时间共4个温控因素进行优选。

3.2 有限元模型

采用水管冷却有限元法模拟水管冷却效果, 即在冷却水管周围布置密集的网格, 采用空间六面体8结点等参单元, 对典型中闸墩、冷却水管、闸底板及计算域进行网格剖分, 共剖分单元11 860个, 结点14 321个, 有限元模型见图2。

3.3 计算荷载及参数

对闸底板和闸墩进行施工期温度场仿真分析时, 混凝土绝热温升为 $\theta(\tau) = 51.6\tau / (1.5 + \tau)$, 其余热学参数则参考室内和该工程周边同类水闸工程给定; 环境气温采用该水闸工程所在地区的多年月平均气温; 对闸底板和闸墩进行施工期应力场仿真分析时, 考虑自重、温度荷载以及徐变度等, 混凝土弹性模量为 $E(\tau) = 40\,400\tau / (3.5 + \tau)$ MPa, 热膨胀系数 $\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 抗拉强度为 $\sigma_0(\tau) = 3.8\tau / (4.7 + \tau)$ MPa,

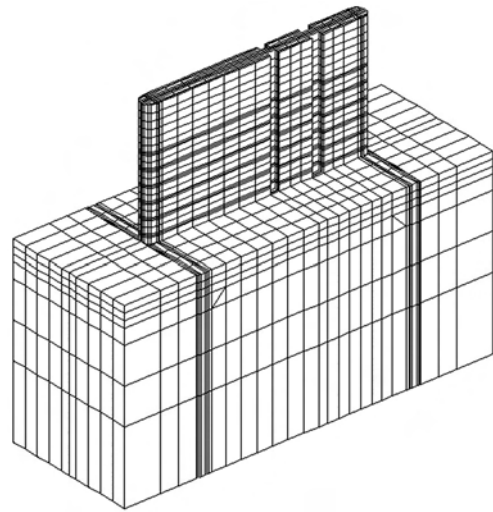


图2 闸墩有限元模型

Fig.2 Sluice pier finite element method (FEM) model

混凝土8参数徐变度为 $C(t, \tau) = (0.0016 + 62.6833\tau^{-0.6294}) [1 - e^{-0.3615(t-\tau)}] + (2.3562 + 51.881\tau^{-0.6036}) [1 - e^{-0.0134(t-\tau)}] \times 10^{-6} / \text{MPa}$, 其中 t 为时间。

3.4 温控参数取值范围

根据水闸施工的工程经验及该工程实际条件, 选定通水水温为12~18 °C, 通水时间为3~6 d, 闸墩立模7 d内的表面放热系数为5~60.5 kJ/(m·h·°C), 浇筑温度为15~21 °C; 采用均匀设计方法对这4个温控因素进行组合, 温控参数水平数均取4, 即通水水温取12 °C、14 °C、16 °C、18 °C, 通水时间取3 d、4 d、5 d、6 d, 表面放热系数取5 kJ/(m·h·°C)、23.5 kJ/(m·h·°C)、42 kJ/(m·h·°C)、60.5 kJ/(m·h·°C), 浇筑温度取15 °C、18 °C、21 °C、24 °C; 依据均匀设计原理, 给出了16组不同组合。

3.5 学习样本准备

结合均匀设计方法组合的温控参数, 先采用水管冷却有限元法进行闸底板和闸墩施工期温度场仿真分析, 然后进行徐变应力场仿真分析, 其中, 底板浇筑后间歇20 d开始闸墩混凝土浇筑, 闸墩混凝土浇筑后, 仿真分析30 d, 初期计算时间步长为0.25 d, 后期计算时间步长为0.5 d。由此获得闸墩内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值 R_{in} 、 R_{sur} , 共获得16个学习样本(见表1)。由分析可见, 表面保温效果强, 拆模时将在表面产生较大的拉应力, 该拉应力甚至大于同龄期下的抗拉强度。

表1 学习样本

Table 1 The learning samples

序号	通水水温 / $^{\circ}\text{C}$	通水时间 /d	表面放热系数 / $\text{kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	浇筑温度 / $^{\circ}\text{C}$	R_{in}	R_{sur}
1	12	3	5	21	0.153	-0.574
2	12	4	42	15	0.321	0.257
3	12	5	23.5	18	0.235	0.528
4	12	6	60.5	24	0.034	0.24
5	14	3	60.5	18	0.239	0.195
6	14	4	23.5	24	0.092	0.147
7	14	5	42	21	0.15	0.215
8	14	6	5	15	0.301	-0.281
9	16	3	23.5	15	0.312	0.576
10	16	4	60.5	21	0.161	0.158
11	16	5	5	24	0.08	-0.611
12	16	6	42	18	0.238	0.177
13	18	3	42	24	0.075	0.135
14	18	4	5	18	0.198	-0.504
15	18	5	60.5	15	0.307	0.113
16	18	6	23.5	21	0.149	0.292

3.6 神经网络模型训练

将表1中 R_{in} 、 R_{sur} 作为输入,通水水温、通水时间、表面放热系数和浇筑温度作为输出,建立神经网络模型。为较好地防止计算过程出现“过拟合”等问题,在进行网络训练前,对数据进行了“归一化”处理。采用三层back propagation(BP)神经网络进行训练,其中隐含层神经元数目采用10个,经过2000次学习训练后,自动结束并获得网络模型。

3.7 温控措施智能优选

根据水闸工程经验,确定合适的内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值分别为 $R_{\text{in}}^{\text{opt}}=0.3$ 、 $R_{\text{sur}}^{\text{opt}}=0.5$;将其代入训练好的网络模型,优选出的温控参数“反归一化”处理后,通水水温、通水时间、表面放热系数、浇筑温度分别为 15.12°C 、 3.71d 、 $17.93\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 、 14.99°C ,再根据工程实际情况以及工程经验等,对优选出的温控措施略作调整,如为便于施工人员具体操作,将通水水温、通水时间、表面放热系数、浇筑温度四舍五入取整数等,由此确定的温控措施为通水水温为 15°C 左右,连续通水时间为 4d 左右,表面保温后放热系数为 $20\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 左右,浇筑温度控制在 15°C 左右。由此可见,通水水温并非越低越好,而

通水时间也并非越长越好;表面保温宜适中,过强的表面保温将在拆模时引起很大的拉应力,而较弱的表面保温将在初期的表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线的关系值较小,易引起早龄期开裂;由于泵送混凝土绝热温升半熟龄期较小,适当降低浇筑温度对控制混凝土拉应力有利。

4 结语

1) 闸墩混凝土温控防裂是一个复杂的多因素系统优选问题,考虑到过多的因素进行联合优选难度很大,本文尝试已知混凝土热力学材料参数情况下的温控措施优选,即将闸墩混凝土结构内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值作为输入,闸墩表面保温效果、浇筑温度、通水水温、通水时间作为输出,建立了温控措施优选的神经网络模型,给出了基于均匀设计原理的神经网络模型优选温控措施的步骤。

2) 结合某水闸工程,展示了本文建立的温控措施优选神经网络模型,将合适的内部和表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线关系的最小值输入训练好的网络,可自动优选出合理的温控防裂措施。分析表明,对于闸墩混凝土,通水水温并非越低越好,而通水时间也并非越长越好;表面保温宜适中,过强的表面保温将在拆模时引起很大的拉应力,而较弱的表面保温将在初期的表面主拉应力历时曲线和抗拉强度增长曲线的关系值较小,易引起早龄期开裂;由于泵送混凝土绝热温升半熟龄期较小,适当降低浇筑温度对控制混凝土拉应力有利。

参考文献

- [1] 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):44-50.
- [2] 朱伯芳, 杨萍. 混凝土的半熟龄期——改善混凝土抗裂能力的新途径[J]. 水利水电技术, 2008, 39(5):30-35.
- [3] 杨接平. 倒丁字形混凝土结构温控防裂技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [4] 吴新立. 泵送混凝土水闸寒冬季施工期裂缝机理与抗裂措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [6] 朱伯芳. 混凝土坝理论与技术新进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [7] 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]. 水运工程学报, 2012(1):78-81.
- [8] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Intelligent optimization of temperature control and crack prevention measures for sluice pier concrete structure

Huang Yaoying, Ding Yuemei, Lv Xiaoman, Xu Bailin

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] To the sluice pier concrete, temperature control and crack prevention is a complex and multi-factor problem of system optimization related to temperature control measures and material parameters. This paper tries optimal temperature control measures with the known concrete material thermodynamics parameters, takes minimum values of the relationships between the sluice pier concrete structure's internal/surface principal tensile stress duration curve and tensile strength growth curve as inputs and the sluice pier superficial heat preservation effect, pouring temperature, pipe cooling temperature and duration time as outputs, establishes the neural network model of the optimal temperature control measures, takes the uniform design principle to have the temperature control parameter combination, adopts the pipe cooling finite element method (FEM) to simulate and analyze the temperature field and creep stress field of the sluice pier concrete structure with cooling pipe, and gets samples to train network to describe the nonlinear relationship between the relationship's minimum value of the structure's principal tensile stress duration curve and tensile strength growth curve and different temperature control measures. Inputting the appropriate relationship's minimum value of structure's the principal tensile stress duration curve and tensile strength growth curve to the trained network, it can automatically select the optimal temperature control measures. The example shows that the neural network model of the optimal temperature control measures is feasible.

[Key words] sluice pier; superficial heat preservation; water cooling; pouring temperature; intelligent optimization

(上接 58 页)

ratio of side span to main span, the auxiliary piers in the side span and the anchorage system of stay cables etc, and the key design parameters are pointed out, and also their reasonable values are proposed. The results show that as compared to the suspension bridge with the same main span, the cable-stayed bridge has greater structural stiffness, and becomes more stable under the static and dynamic wind action, and consequently becomes a favorable structural system for super long-span bridges whose main span exceeds 1 000 m; the super long-span cable-stayed bridge becomes more aerostatically and aerodynamically stable under the cases that the girder depth is increased, the girder width is decreased, the inverse Y-shaped tower is used, the tower's height is increased, the side span is shortened, the auxiliary piers are installed in side span and the stayed cables are partially earth-anchored.

[Key words] super long-span cable-stayed bridge; aerostatic stability; aerodynamic stability; design parameter