

# 寒潮作用下大型水闸施工期温控防裂仿真分析

由国文<sup>1</sup>, 郭磊<sup>2</sup>, 陈守开<sup>2</sup>

(1. 南水北调工程建设监管中心, 北京 100038; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:**针对大型混凝土水闸因体积庞大进行寒潮影响下的温控防裂仿真计算时精度较低的问题,提出了子母模型联合反馈修正算法,有限元计算过程中在空间上和时间上进行加密,每完成一次子模型的计算,将结果反馈至母模型。于曹闸工程实例分析表明:5℃及10℃温差区间寒潮冷击对结构表面温度影响较大,对内部影响较小,导致表面开裂,采取适当保温措施即可防裂;该计算结果可满足工程要求,提高了计算速度,证明了算法的合理性。

**关键词:**大型水闸;温控防裂;寒潮;子模型法;仿真分析

**中图分类号:**TV66 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)03-0071-04

**The simulation study on temperature control and crack prevention of large sluice under cold wave strike during construction**//YOU Guowen<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>2</sup>, CHEN Shoukai<sup>2</sup>(1. Construction Supervision Center of the South to North Water Diversion Project, Beijing 100038, China; 2. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** The simulation of temperature control and crack prevention of large sluice under cold wave strike has low accuracy due to huge volume. To overcome this shortcoming, it is proposed a sub-master model correction algorithm. During the process of finite element calculation, the model was encrypted in space and time, and the results could be fed back to master model when the sub model finished the computations. The result of engineering example in Yucao Sluice showed that the influence on temperature of surface concrete is greater than internal concrete under cold wave of 5°C and 10°C, which leads to concrete crack; thus, taking appropriate measures can prevent crack. The result satisfied the need of construction and improved the speed of computations, which implies that the algorithm is reasonable.

**Key words:** large sluice; temperature control and crack prevention; cold wave; sub-model method; simulation study

水闸是水利工程中的一种重要水工建筑物,大型混凝土水闸体积一般比较庞大,由于施工和结构上的需要而常进行大块浇筑,内部易产生大量水化热,因混凝土的弱导热性而导致内外温差,受寒潮影响将引起开裂,故进行温控防裂仿真计算是十分必要的<sup>[1-4]</sup>。国内外学者对水闸施工过程进行了大量的仿真研究,王振红等<sup>[5]</sup>采用三维有限单元法考察了施工期某水闸闸墩温度场、应力场的时空变化规律;马跃峰等<sup>[6-8]</sup>对裂缝成因、温控措施进行了研究,并采用遗传算法对水闸混凝土水管冷却温度场的计算参数进行了反演分析,用于后续工程反馈仿真计算;朱岳明等<sup>[9]</sup>用三维有限元仿真计算方法,对二河水闸施工期混凝土的温度场和应力场进行了多方案的计算分析。上述研究都采用普通的有限元计算方法,对大型水闸结构而言,体积大,且寒潮一般作用于混凝土表层,为保证表层温度和应力的计算精

度,需进行非常精细的网格剖分工作,这不仅加大了剖分网格的难度,同时还会使整体网格数量成倍增长,从而大幅增加计算机存储量和计算耗时,为此,本文在子模型法基础上提出了子母模型联合反馈修正算法,以期提高仿真计算精度,为工程设计提供理论依据。

## 1 计算方法

### 1.1 有限元子模型法原理

目前,混凝土温度场计算主要采用有限元隐式解法<sup>[10]</sup>,需要对计算域进行空间域和时间域的离散,每一时步温度场和应力场的计算结果都受上一步计算结果(时步初始条件)和该时步的边界条件的影响。将有限元子模型法<sup>[11-12]</sup>应用于混凝土随时间变化的温度和应力的求解时,可将子模型区域的计算步长和网格密度适当加密至足以满足精度要求。

基金项目:国家自然科学基金(51109081)

作者简介:由国文(1971—),男,黑龙江海伦人,高级工程师,硕士,主要从事水利工程质量管理工作。E-mail:yougw@mwr.gov.cn

假设母模型计算从时间  $\tau_n$  到  $\tau_{n+1}$  的计算结果精确解为  $F_{n+1}$ , 记下一步计算的近似解为  $F_{n \rightarrow n+1}$ , 则在子模型计算时, 就需要加密时间步, 即把时间区域  $(\tau_n, \tau_{n+1})$  离散成若干个时间子步  $(\tau_n, \tau_{n1}, \tau_{n2}, \dots, \tau_{n+1})$ 。在时间子步内, 每计算一步子模型后就反馈并修正母模型(母模型计算时不加密), 然后再反馈修正子模型的下一步计算。如图 1 所示, 从  $\tau_n$  到  $\tau_{n1}$  的计算结果为  $F_{n1}$ , 从  $\tau_{n1}$  到  $\tau_{n2}$  的计算结果为  $F_{n1 \rightarrow n+1}$ , 然后反馈到子模型的下一步计算, 即从  $\tau_{n1}$  到  $\tau_{n2}$  的时步计算, 依次类推, 从而减小了母模型在子域范围内的误差, 提高了子模型的计算精度。在空间域上, 因加密后的子模型计算精度要高于母模型, 故每完成一次子模型的计算, 就将结果反馈至母模型。

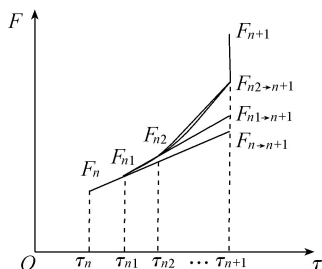


图 1 时间步长误差修正

## 1.2 子母模型联合反馈修正算法

根据上述分析, 提出子母模型联合反馈修正算法, 如图 2 所示。就温度场而言, 采用该算法, 可将每一步计算精度更高的子模型温度场计算结果反馈到母模型, 以提高母模型在子域内下一步温度场的计算精度。就应力场而言, 利用反馈修正后的温度增量计算温度应力, 其精度显然高于没有加密时间步和网格的母模型计算结果。此外, 该算法可以根据实际需要, 考虑是否对温度场或应力场进行时间步的加密计算, 具有较好的适应性, 如浇筑早期混凝土, 由于温度变化剧烈, 则考虑对时间步进行加密, 而进入准稳定期时, 则无需加密时间步。此算法与未修正的子模型法相比, 在计算量上基本没有变化,

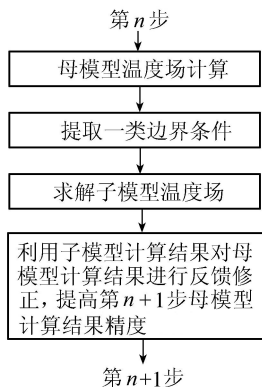


图 2 子母模型联合反馈修正算法

但是计算结果的精度则有很大的提高。

## 2 实例分析

于曹闸工程位于河南省安阳市, 为大体积水闸, 地处半湿润地区, 冬季寒冷干燥, 夏季湿润炎热, 温度变化幅度较大。闸室共分五联, 边孔和中间孔各为一联, 其他两孔各为一联, 相邻两联之间设缝墩, 中墩和缝墩厚均为 2.3 m, 总宽度为 83.8 m; 边墩采用直墙结构, 厚 1.15 m。闸室采用 C25 钢筋混凝土, 底板为 C15 混凝土。

### 2.1 模型及参数设置

计算区域进行单元划分时, 考虑闸墩表面附近受外界影响较大, 早期温度梯度和应力梯度可能较大, 设置相对较薄的单元, 由外向内网格逐渐变粗, 计算网格如图 3 所示。仿真计算时, 地基四周侧面及底面均取为绝热边界。施工期从下往上逐层浇筑混凝土时, 底板、闸墩四周有模板, 为普通的第三类放热边界; 混凝土上表面为裸露的第三类放热边界。应力计算时基础四周取为法向约束, 基础底面为全约束, 其他地方为自由面。

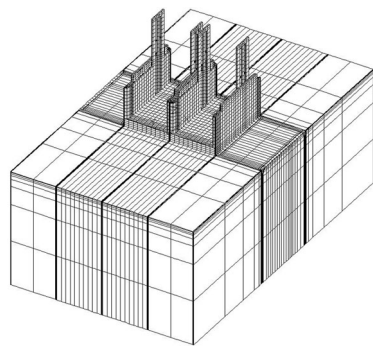


图 3 模型整体计算网格

计算过程中, 先取地温初值为多年平均气温, 再单独计算在地表气温变化影响下地基的非稳定温度场, 并将经过长达 30 a 时间过程的仿真计算所形成的温度场、应力场作为上部结构仿真计算时的地基初始条件。为考察不同寒潮的影响, 设计 3 种工况。

**a. 工况 1:** 10 月初开始第一批垫层施工, 垫层与底板之间间歇 10d; 闸底板混凝土与闸墩混凝土分开浇筑, 间歇 15 d。计算时, 浇筑温度取浇筑时的气温加 2.5℃, 且不超过 28℃。底板和闸墩浇筑 2 d 后均遭遇为期 5 d、降温 5℃ 的寒潮冷击。

**b. 工况 2:** 底板和闸墩浇筑 2 d 后遭遇为期 5 d、降温 10℃ 的寒潮冷击, 以考虑大幅度寒潮降温对闸墩和底板混凝土温度和应力的影响, 其他同工况 1。

**c. 工况 3:** 在遭遇工况 1 所述的寒潮时, 模板外贴有厚 2.5 cm 的聚乙烯苯板, 其他情况同工况 1。

以各季平均气温为限制值, 将各月平均气温拟

合成一条余弦曲线,如图4所示,拟合后的计算公式为

$$T_a = 15.76 + 14.3 \cos \left[ \frac{\pi}{6} (t - 6.95) \right] \quad (1)$$

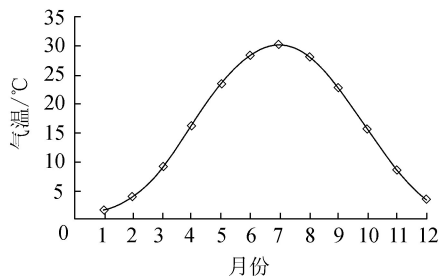


图4 月平均气温拟合曲线

初始混凝土配合比由工地试验室提供,相关计算参数见表1。

## 2.2 计算结果与分析

为便于分析,选取两个特征点,分别为中墩内部点和中墩表面点,计算结果见图5和图6。

**a. 温度场结果分析。**从图5可知,3个工况中墩内部点温度变化规律一致,且相差不大,这是中墩厚度达2.3 m和混凝土弱导热性所致。相比内部点,表面点工况1在浇筑后5 d内温降7.47°C,工况2温降11.85°C,工况3温降仅4.86°C,且在寒潮来

临时刻没有突然的大幅度降温。可见温降幅度和保温措施对表面温度变化的影响很大。

**b. 应力场结果分析。**从图6(a)可以看出,内部点因受寒潮影响较小,各工况均未超出允许抗拉强度;而从图6(b)可知,寒潮冷击下,表面混凝土快速温变将导致很大的拉应力。表面点工况1在浇筑后2~8 d(图中27~33 d)内产生的最大拉应力为1.58 MPa,超过即时允许抗拉强度(1.13 MPa),抗裂安全度仅1.18;工况2浇筑后2~8 d内产生的最大拉应力达2.05 MPa,超过允许抗拉强度(1.86 MPa),抗裂安全度不足1,仅温度应力即可致裂,且寒潮后3 d的拉应力也超过允许抗拉强度;工况3由于采取了保温措施,表面点尽管受寒潮影响,但拉应力仍控制在允许范围。故在寒潮期间进行保温,可有效减小寒潮对混凝土表面温度和应力的影响。

## 3 结语

寒潮一般作用于混凝土表层,为保证表层温度和应力的计算精度,需进行非常精细的网格划分工作,这不仅加大了划分网格的难度,同时还会使整体网格数量成倍增长,从而大幅增加计算机存储量和计算耗时,子母模型联合反馈修正算法能够较好地

表1 混凝土特性计算参数

混凝土	热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热扩散率 $a / (10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	线胀系数 $\alpha / 10^{-6} \text{K}^{-1}$	绝热温升 $\theta_0 / ^\circ\text{C}$	弹性模量 $E_0 / \text{GPa}$	自生体积变形 终值 $\varepsilon_0 / 10^{-6}$
C15	2.688	902	1.167	1.00	28.67	22.560	35
C25	2.688	902	1.175	1.08	41.16	31.205	60

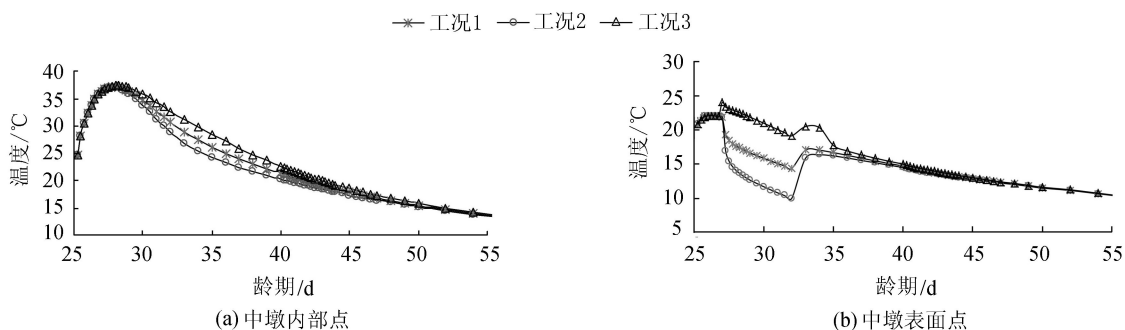


图5 计算温度历时曲线

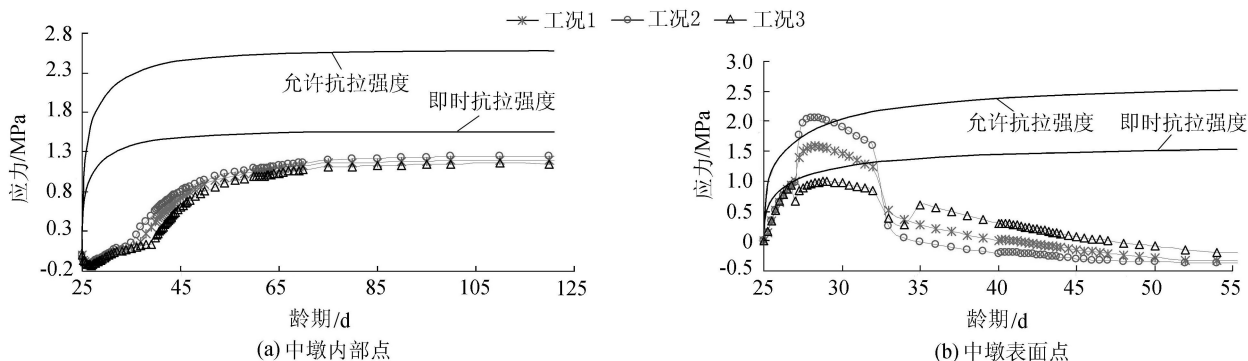


图6 计算应力历时曲线

解决这一矛盾,应用于曹闸工程证明了其合理性。

于曹闸工程实例计算寒潮冷击对闸体混凝土结构温度场和应力场的影响结果表明,寒潮对结构表面温度影响较大,而对内部影响较小,这种影响导致了较大内外温差,从而引起较大的表面应力而致裂。表面保温减少了寒潮对表层混凝土的影响,减小了开裂的几率。

## 参考文献:

[1] 郭磊,汪伦焰,许庆伟. 倒虹吸管身冬季施工温控仿真分析及应用实例[J]. 农业工程学报,2010,26(7):175-177. (GUO Lei, WANG Lunyan, XU Qingwei. Simulation and application on concrete temperature control measures for inverted siphons in winter [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(7):175-177. (in Chinese))

[2] 郭念春,马殿君,徐艳军. 沙颍河郑埠口枢纽工程节制闸闸墩裂缝成因分析[J]. 水运工程,2000,8(8):89-92. (GUO Nianchun, MA Dianjun, XU Yanjun. A cause analysis of crack in the pier of check gate of Zhengbukou Junction Project on the Shaying River [J]. Port & Waterway Engineering,2000,8(8):89-92. (in Chinese))

[3] 王敬莲,贵秋明. 新河大闸铺盖裂缝成因及防渗处理措施[J]. 湖南水利,1998(5):25-26. (WANG Jinglian, GUI Qiuming. Study on causes of blanket cracks and seepage treatment measures in the Xinhe Sluice [J]. Hunan Water Resources,1998(5):25-26. (in Chinese))

[4] 李长城,张晓园,马有国. 水闸破坏与修复及法泗闸的整险加固[J]. 中国农村水利水电,2000(6):36-38. (LI Changcheng, ZHANG Xiaoyuan, MA Youguo. The damage and respair of sluice and the reinforcement of Fasi Sluice [J]. China Rural Water and Hydropower,2000(6):36-38. (in Chinese))

[5] 王振红,朱岳明,于书萍,等. 水闸闸墩施工期温度场和应力场的仿真计算分析[J]. 天津大学学报,2008,41(4):476-481. (WANG Zhenhong, ZHU Yueming, YU Shuping, et al. Simulation and analysis of temperature field and stress field of sluice pier concrete during construction [J]. Journal of Tianjin University,2008,41(4):476-481. (in Chinese))

[6] 马跃峰,朱岳明,刘有志. 闸墩“枣核形”裂缝成因机理和防裂方法研究[J]. 水电能源科学,2006,24(2):40-43. (MA Yuefeng, ZHU Yueming, LIU Youzhi. Study on mechanism of formation and control method for prevention from concrete crack similar to Chinese Date Core in sluice piers[J]. Water Resources and Power,2006,24(2):40-43. (in Chinese))

[7] 马跃峰,朱岳明. 闸墩内部水管冷却和表面保温措施的抗裂作用研究[J]. 水利学报,2006,37(8):963-967. (MA Yuefeng, ZHU Yueming. Effect of internal cooling pipes and external heat preservation on prevention from

concrete cracking during construction of sluice pier [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(8):963-967. (in Chinese))

[8] 马跃峰,朱岳明,刘有志,等. 姜唐湖退水闸泵送混凝土温控防裂反馈研究[J]. 水力发电,2006,32(1):33-35. (MA Yuefeng, ZHU Yueming, LIU Youzhi, et al. Feedback study of temperature control and crack prevention of Jiangtanghu pump concrete sluice during construction [J]. Water Power,2006,32(1):33-35. (in Chinese))

[9] 朱岳明,杨接平,吴健,等. 淮河入海水道二河新建水闸混凝土温控防裂研究[J]. 红水河,2005,24(2):5-11. (ZHU Yueming, YANG Jieping, WU Jian, et al. Study on temperature control and crack prevention of Erhe new sluice on Huai River canal diverting flood into see [J]. Hongshui River,2005,24(2):5-11. (in Chinese))

[10] 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,1998:200-230.

[11] GIGLIO M. FEM submodelling fatigue analysis of a complex helicopter component [J]. International Journal of Fatigue,1999,21:445-455.

[12] PAPANIKOS P, MEGUID S A, STJEPANOVIC Z. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of dovetail joints in aeroengine discs [J]. Finite Elements in Analysis and Design,1998,29:173-186.

(收稿日期:2014-03-03 编辑:熊水斌)

## · 简讯 ·

### 《水利水电科技进展》再次被 Scopus 数据库收录

荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)公布了2015年收录的期刊源名单,由河海大学主办的《水利水电科技进展》继续被 Scopus 数据库收录。Scopus 数据库是 Elsevier 公司于2004年推出的多学科文摘索引型数据库,是目前全球最大的文摘和引文数据库,能为科研人员提供一站式获取科技文献的平台。来自世界各地不同领域著名科学家组成的甄选委员会指导 Scopus 收录内容的甄选,以确保其广泛而公正收录世界各国的重要期刊。在我国,期刊被 Scopus 数据库收录俗称进入了 Ei 的扩展版。目前,Scopus 总计收录全世界期刊、商业期刊、会议论文集等 34 280 多种。其中收录中国期刊共计 894 种(中国大陆 712 种;中国台湾 113 种;中国香港 59 种;中国澳门 1 种。在此,凡中国期刊与美国、英国、德国、荷兰、新加坡等协作出版的,均按中国期刊加以统计)。

(本刊编辑部供稿)