

宝应泵站肘形进水流道混凝土温度应力仿真计算

许 朴 朱岳明

(河海大学水工结构研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 根据宝应泵站的实际施工过程和现场环境 ,采用三维非稳定温度场和应力场有限元仿真程序 ,对该泵站肘形进水流道混凝土施工全过程的温度场和应力场进行时空动态仿真分析 ,分析了施工期泵站肘形进水流道混凝土结构裂缝产生的原因 ,提出相应的防裂措施。

关键词 宝应泵站 ;肘形进水流道 ;混凝土结构 ;仿真分析 ;温度应力

中图分类号 :TV675 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2007)05-0056-03

Numerical simulation of concrete thermal stress in elbow-shaped inlet channel of Baoying Pumping Station//XU Pu ,ZHU Yue-ming Institute of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on the real construction process and field environment of Baoying Pumping Station , a spatial-temporal dynamic numerical simulation of concrete temperature and stress field in the elbow-shaped inlet channel during the whole construction process of the pumping station was performed by use of FEM program . The causes of cracking in concrete structure in the elbow-shaped inlet channel during the construction process were analyzed , and some crack control measures were proposed .

Key words :Baoying Pumping Station ; elbow-shaped inlet channel ; concrete structure ; numerical simulation ; thermal stress

宝应泵站是南水北调东线一期工程第一个施工的泵站 ,该泵站肘形进水流道采用泵送混凝土施工 ,结构形式复杂。根据以往的工程经验 ,施工期进水流道肘部四周的混凝土极易出现裂缝。针对这一典型问题 ,笔者利用三维有限元技术对该泵站肘形进水流道结构混凝土进行了施工期温度场和应力场的仿真计算分析。在充分考虑混凝土结构构造、材料、施工、气温、风速等因素的基础上 ,按现拟混凝土浇筑施工方案 ,计算分析混凝土的温度和应力状态随时间、空间的变化规律 ,并综合分析施工期起控制性作用的进水流道底板、顶板、墙体和肘部异形结构等典型部位混凝土结构裂缝出现的可能性 ,判断可能出现的开裂时间 ,分析施工期泵站混凝土结构的裂缝成因 ,提出相应的防裂措施。

1 计算原理

1.1 非稳定温度场的基本理论

在混凝土计算域 R 内任何一点处 ,不稳定温度场 T 必须满足热传导控制方程 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

$(\forall (x,y,z) \in R)$

(1)

式中 : T 为温度 , $^{\circ}\text{C}$; a 为热扩散率 , m^2/h ; θ 为混凝土绝热温升 , $^{\circ}\text{C}$; t 为时间 , d ; τ 为龄期 , d 。

温度场有限元计算方法见文献 [1]。

1.2 徐变应力场的基本理论

混凝土在复杂应力状态下的应变增量常常包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、干缩应变增量和自生体积应变增量 ,因此有

$$\Delta \epsilon_n = \Delta \epsilon_n^e + \Delta \epsilon_n^c + \Delta \epsilon_n^T + \Delta \epsilon_n^s + \Delta \epsilon_n^0 \quad (2)$$

式中 : $\Delta \epsilon_n^e$ 为弹性应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^c$ 为徐变应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^T$ 为温度应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^s$ 为干缩应变增量 ; $\Delta \epsilon_n^0$ 为自生体积应变增量。

应力场的有限元计算方法见文献 [1]。

2 进水流道混凝土温度场和应力场仿真分析

2.1 力学和热学参数

混凝土配合比和相关参数主要由施工方提供 ,部分参考文献 [1]。具体见表 1。

根据施工现场实测混凝土温度 ,利用遗传算法反演 [2] 得到混凝土的绝热温升和表面放热系数 ,这样与施工现场的实际情况就可能更加吻合。具体数据见表 2。

表1 混凝土各材料掺量和特性参数

材料	质量/ kg	热导率 λ / (W·(m·℃) ⁻¹)	比热容 c / (kJ·(kg·℃) ⁻¹)	热胀系数 α / (10 ⁻⁵ ·m·℃ ⁻¹)
水	130.18	0.600	4.187	
水泥	280.47	1.276	0.536	1.85(水泥浆)
粉煤灰	71.01	1.276	0.536	1.85(水泥浆)
外加剂	3.55	1.276	0.536	1.85(水泥浆)
砂	783.43	3.083	0.745	0.86
石子	1127.81	2.908	0.708	0.86
总计	2396.45	2.479	0.875	1.03

表2 混凝土表面放热系数 β 反演结果 kJ·(m²·h·℃)⁻¹

有风			无风		
表面裸露	钢模板	草袋覆盖	表面裸露	木模板	竹胶模板
24.90	24.90	7.47	20.42	12.79	11.88

混凝土绝热温升表达式为 $\theta = 45.37 \times (1 - e^{-0.3689\tau^{0.9569}})$ ℃,弹性模量的拟合值^[1]为 $E = 43.94 \times (1 - e^{-0.40\tau^{0.34}})$ GPa,抗拉强度的拟合关系式为 $R = 2.73 \times (1 - e^{-0.069\tau^{1.279}})$ MPa,自生体积变形为 $\epsilon_v = 171.50 \times (1 - e^{-0.162\tau^{0.716}})$ 。

2.2 有限元计算模型

本文计算时对称地取肘形流道边墩一侧的结构部分,计算网格见图1。

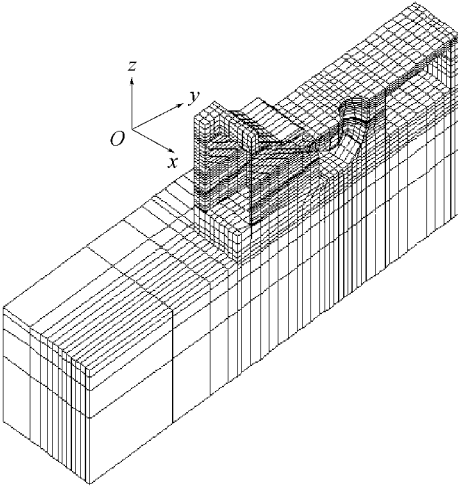


图1 有限元计算网格及其坐标系

在温度场计算时,假定计算域泵站基础底面及四周、计算域对称面均为绝热边界,其他面为热量交换边界。在应力场计算时,假定计算域泵站基底面为铰支座,四周为连杆支撑,计算域对称面也为连杆支撑。

2.3 仿真计算方案和施工进度

在计算时,按现拟混凝土浇筑施工方案(见表3)进行仿真计算,环境温度按多年月平均气温进行拟合,流道口由于有帘子遮挡,流道内气温比外界环境温度高2℃左右,故在计算时流道内气温在环境温度的基础上再加2℃。

表3 泵站进水流道施工进度

高程/m	施工时段
-7.70 ~ -7.10	2004-01-04T09 ~ 2004-01-04T13
-7.10 ~ -6.60	2004-01-04T13 ~ 2004-01-04T18
-6.60 ~ -6.10	2004-01-04T18 ~ 2004-01-04T23
-6.10 ~ -5.60	2004-01-04T23 ~ 2004-01-05T05
-5.60 ~ -5.10	2004-01-05T05 ~ 2004-01-05T10
-5.10 ~ -4.60	2004-01-05T10 ~ 2004-01-05T15
-4.60 ~ -4.30	2004-01-05T15 ~ 2004-01-05T19
-4.30 ~ -4.00	2004-01-05T19 ~ 2004-01-05T24
-4.00 ~ -0.50	2004-01-06T20 ~ 2004-01-07T11

2.4 仿真结果整理和分析

仿真分析需要回答如下问题:温度和应力最大值出现的时间、部位。回答问题最好的方法就是典型剖面的温度及应力分布图(给出最大值出现部位)和关键点温度及应力的历时曲线(给出最大值出现的时间)^[3]。本文的结果即用上述表示方式。

2.4.1 温度场计算成果分析

图2为泵站流道中心剖面浇筑3d后的温度等值线分布,图3为边墩典型点温度历时曲线。

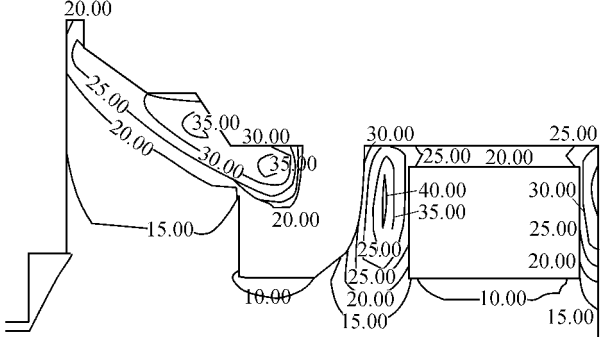


图2 流道中心剖面温度分布(单位:℃)

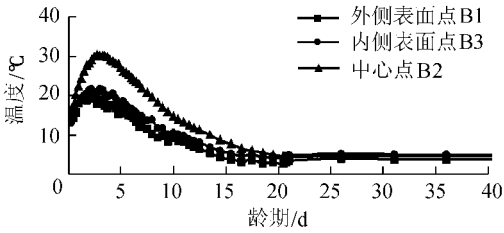


图3 边墩典型点温度历时曲线

根据仿真计算结果和图2、图3可得到如下结论:

- a. 温度场的分布由表及里温度逐渐增大,靠近外表面的温度梯度比较大,内部的温度梯度相对较小,其原因在于外表面混凝土直接与外界相对低温空气接触,其热量散失较快,而内部混凝土散热途径阻塞,热量积压。因此,早期温度拉应力主要发生在结构的表面,从而导致泵站混凝土结构表面先产生裂缝,而后期逐渐向结构内部扩展。
- b. 整个流道出现两个高温区,一个位于流道上弧段,另一个位于流道下弧段,最高温度达到

41.48℃,这是因为该两个部位混凝土的方量都比较大,绝热温升所产生的热量很大,热量积压而形成。

c. 一般混凝土浇筑后,由于水化热的作用导致温度急剧上升,并在3~5d达到峰值,而后由于混凝土的表面散热,混凝土内部温度慢慢下降,下降的速度由快到慢。

d. 本工程施工期在冬季,外界气温较低,这样可能造成比较大的内外温差,以边墩部位混凝土为例,在混凝土内部温度达到峰值时内外温差达到最大,约为15.33℃。因此,应特别注意早期混凝土的保温和养护。宝应工程中施工时所采用的草袋覆盖表面保温和流道口封堵这两项措施是合理的。

2.4.2 应力场计算结果分析

图4为泵站流道中心剖面浇筑3d后的应力等值线分布,图5为边墩典型点应力历时曲线,图6为流道下弧段典型点应力历时曲线。

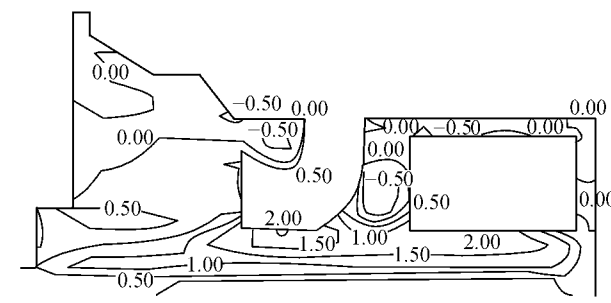


图4 流道中心剖面应力分布(单位:MPa)

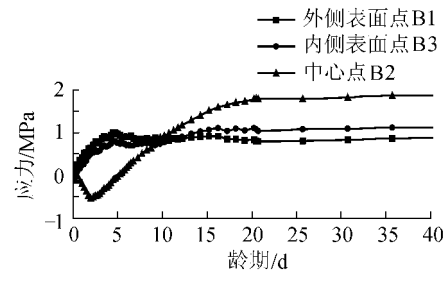


图5 边墩典型点应力历时曲线

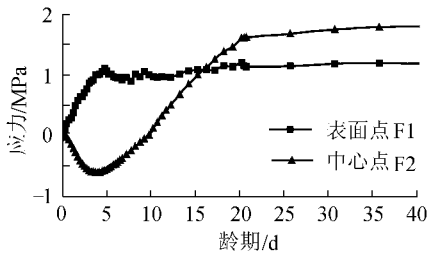


图6 流道下弧段典型点应力历时曲线

根据仿真计算结果和图4~6对泵站混凝土的应力场进行分析,得到如下结论:

a. 由图4应力场分布可以发现,在靠近底板附近区域拉应力比较大,最大达到2.01MPa,其原因在于进水流道在底板浇筑后1个月才开始浇筑,此时,底板混凝土和上层新浇混凝土的弹性模量相差很

大,且进水流道大部分结构较薄且长,致使底板附近新浇混凝土受底板的变形约束大。

b. 边墩中心部位早期一般表现为压应力,随后混凝土降温收缩,拉应力逐渐增大,且边墩长达24m,受底板约束较大,同时混凝土自身约束能力也大,因此后期拉应力较大,但并未超过混凝土的允许抗拉强度。边墩外侧表面早期拉应力值相对较大,最大达到1.03MPa,而且早期混凝土抗拉强度小,故边墩外侧表面有可能出现早期表面裂缝。

c. 流道上弧段部分混凝土体积相对较大,因而其内部混凝土的水化热温升也相对较高。混凝土内部温度较高,而外部环境温度相对较低,从而形成了较大的内外温差。但由于该部位位于进水流道的顶部,混凝土温度变形和自生体积变形主要受其自身及其临近混凝土结构的约束,因此该部位产生的拉应力并不大。

d. 流道下弧段混凝土相对较厚,整个进水流道的最高温度就出现在这个部位,且外部环境温度较低,从而形成了较大的内外温差,因此,其内侧表面早期拉应力值相对较大,可能会出现早期表面裂缝。后期,混凝土温度逐渐降低,但内部混凝土的降温幅度远大于表面,结构内部收缩变形大,从而产生拉应力。与早期混凝土不同的是,后期混凝土除自身相互约束外,底板对其约束作用增强,当约束作用与降温收缩变形叠加后,可能会产生很大的拉应力。

3 结 语

上部混凝土必须浇筑在下部“老”混凝土上,新老混凝土的初始条件不同,物理力学性能也不同,混凝土之间变形不一致,相互约束,产生温度应力。在底板附近,温度应力主要受底板的约束条件控制;在脱离底板约束的部位,温度应力主要受混凝土内部非线性温度场控制。因此,减小约束条件、降低内外温差和降低混凝土发热量是减小温度应力的主要措施之一。

泵站进水流道混凝土的开裂主要出现在早期(即混凝土浇筑完的前5d)结构表面。在这期间,混凝土由于水化反应温度升高,造成内外温差加剧,产生比较大的拉应力,加上此时混凝土的抗拉强度比较小且不稳定,很容易出现裂缝。而到了后期,由于混凝土自身抗拉强度的增加,虽然混凝土的拉应力有一定升高,但还是小于其抗拉强度。

基于上述分析,对宝应泵站混凝土施工提出以下建议:①做好混凝土早期的保温工作(草袋覆盖表面混凝土,模板内衬一定厚度的保温材料),以减少混凝土表面放热系数,从而控制表层(下转第64页)

3 测量系统应用

随着海洋资源的不断开发利用,人类在近海的活动日益加强,如海上采油平台及输油管线、深水防波堤、跨海大桥和大型港口等近海建筑物迅速发展。然而,大型建筑物的建成将使其附近海域的波浪、水流条件发生改变。波浪作用下大型墩柱周围局部冲刷问题和舰船甲板上浪问题均需在波浪港池或水槽中进行模型试验研究。笔者应用计算机波高测量系统在波浪水槽中布置了 20 个波高测量点进行试验研究,取得了很好的试验研究成果,测量数据界面如图 4 所示,波高测量系统的测量精度可达 0.3% ~ 0.5%。在波高数据处理中,可采用阈值设定和调节功能,根据波高数据测量和处理的需要设定不同的阈值。



图 4 测量数据界面

4 结 语

在水利堤防工程、护岸工程、围垦工程、港口工程、风暴潮灾害防治、海洋资源开发利用等方面的科学研究中,通常不能用理论的方法得到精确解,需要应用模型试验来模拟波浪,研究波浪对结构物的作用,需要进行波高的测量和分析,计算机波高测量系统的成功应用较好地解决了这一难题,因此得到了广泛应用。

参考文献:

[1] SJT301—88 波浪模型试验规程(试行) [S].
[2] 蔡守允,周益人,谢瑞,等.河流海岸模型测试技术 [M]. 北京:海洋出版社,2004.
[3] 蔡守允,谢瑞,韩世进,等.多功能智能流速仪 [J]. 海洋工程,2004,22(2):83-86.
[4] 蔡守允,雷学锋,魏延文.河工模型试验测量与控制系统 [J]. 水利水运科学研究,1999(4):402-408.
[5] 蔡守允,魏延文,汪亚平,等.VSMS 系统在潮滩水沙测量中的应用 [J]. 水利水运工程学报,2001(2):67-70.
[6] 蔡守允,王昕,周灵杰,等.三峡工程坝区泥沙模型试验测量与控制系统 [J]. 水利水电技术,2002,33(10):48-50.
[7] 蔡守允,魏延文,雷学锋.LGY-III 型智能测沙颗粒分析仪 [J]. 海洋工程,1999,17(4):49-54.
[8] 蔡守允,戴杰,张定安,等.水利工程模型试验的压强和总力测量系统 [J]. 水资源与水工程学报,2006,17(2):36-38.
[9] 蔡守允,戴杰,张定安,等.大型模型试验水沙循环调制设备及控制系统 [J]. 海洋工程,2006,24(2):118-122.

(收稿日期 2006-07-26 编辑:高建群)

(上接第 58 页)

混凝土的温度梯度^[4,5];②在允许条件下提高流道内的气温;③设法减少混凝土的自生体积变形(优选水泥品种和配合比,加膨胀剂);④进行合理的施工分缝或设置后浇带。

参考文献:

[1] 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.
[2] 朱岳明,刘勇军,谢先坤,等.确定混凝土温度特性参数的试验与反演分析 [J]. 岩土工程学报,2002,24(2):714-717.
[3] 张国新,罗健,杨波,等.鱼筒河 RCC 拱坝的温度应力仿真分析及温控措施研究 [J]. 水利水电技术,2005(5):26-29.
[4] 龚召熊,张锡祥,肖汉江,等.水工混凝土的温控与防裂 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
[5] 朱岳明,贺金仁,石青春.龙滩高碾压混凝土重力坝仓面长间歇和寒潮冷击温控防裂分析 [J]. 水力发电,2003,29(5):6-9.

(收稿日期 2006-10-16 编辑:高建群)

