

船闸底板大体积混凝土 时变温度场数值模拟分析

徐可¹, 韩时琳¹, 王超²

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中诚国际海洋工程勘察设计有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对施工期大体积混凝土温度场时变性, 结合遗传算法对绝热温升参数进行反演, 选取对时变温度场敏感度较大的单位质量水泥最终放热量 Q_0 和实常数 n 作为反演对象并求得最优解。基于实测环境参数及反演结果, 建立了 ANSYS 三维有限元传热模型, 数值模拟结果与实测数据对比表明, 水化热温度场时效模式更能准确地模拟工程实际。时变温度场与温差变化规律分析结果表明: 大体积混凝土分层浇筑施工的温度峰值跟层厚与浇筑间隔等有关, 且不一定位于各层中心; 温度峰值历时曲线和里表温差历时曲线发展规律相似, 可近似用于温控时间节点的参考。

关键词: ANSYS; 大体积混凝土; 数值模拟; 反演分析; 时变温度场

中图分类号: TU 528.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0113-06

Numerical simulation and analysis of time-varying temperature field of lock floor mass concrete

XU Ke¹, HAN Shi-lin¹, WANG Chao²

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

2. China Integrity International Oceanengineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: Aiming at discussing the time-varying characteristics of massive concrete in the construction period, we use Genetic Algorithm to inverse the parameters and achieves optimal solutions of adiabatic temperature rise, which is the major impact on the adiabatic temperature rise of mass concrete, i. e., the unit mass of cement the final heat Q_0 and the real constant n . Based on the actual measurement of environmental parameters and inversion results, we establish the three-dimensional finite element heat-transfer model of ANSYS. Comparing the results of numerical simulation and measured data, we know that the temperature field of hydration heat aging model can accurately simulate the engineering practice more. The results of time-varying temperature field and temperature variation show that the mass concrete layered construction peak temperature is related to the thick and pouring interval, and not necessarily occurs in the center of each layer; The development of temperature peak duration curves is similar to the temperature difference duration curve, thus it may serve as reference for the node time of temperature controlling.

Key words: ANSYS; mass concrete; numerical simulation; inverse analysis; time-varying temperature field

温度应力引起的大体积混凝土开裂一直是水工建筑物施工中常见的问题^[1], 受到工程界和学术界重点关注。裂缝影响建筑物正常使用, 甚至危及到结构安全, 由于实际施工温控技术限制与施工条件要求, 使预测大体积混凝土结构温度场

愈显重要^[2]。施工期大体积混凝土材料特性与其温度场具有明显的时变性, 传统的温度分析往往忽略其影响。因此, 针对施工期大体积混凝土温度场时变性, 通过对绝热温升参数反演^[3], 得到混凝土生热率方程, 建立更符合实测资料的三维

收稿日期: 2014-01-03

作者简介: 徐可(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

有限元传热模型^[4]，对施工期大体积混凝土时变温度场与温差进行分析是非常必要的。

1 基本理论

1.1 时变温度场

假定混凝土为连续介质，考虑影响因素的时变效应，三维非稳定时变温度场方程为：

$$c(\tau) \frac{\partial^2 [\rho(\tau)T(\tau)]}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial \tau} \left[k_x(\tau) \frac{\partial T(\tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y \partial \tau} \left[k_y(\tau) \frac{\partial T(\tau)}{\partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial z \partial \tau} \left[k_z(\tau) \frac{\partial T(\tau)}{\partial z} \right] + \frac{\partial Q(\tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中： $c(\tau)$ 为比热； $\rho(\tau)$ 为密度； $T(\tau)$ 为给定的温度函数； $k_x(\tau), k_y(\tau), k_z(\tau)$ 分别为混凝土材料沿 x, y, z 方向的热传导系数，混凝土假定为各项同性材料，在任意时刻 τ ，取三值相等； $Q(\tau)$ 为某时刻 τ 单位体积混凝土的放热量。

定义初始条件和边界条件，通过上式可确定混凝土温度场的持续变化过程。绝热条件下混凝土水化热作用使温度上升的速率为：

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{Q(\tau)}{c(\tau)\rho(\tau)} = \frac{Wq(\tau)}{c(\tau)\rho(\tau)} \quad (2)$$

式中： θ 为绝热温升；混凝土比热由于受时间、温度变化影响小， $c(\tau)$ 取均值； W 为单位体积混凝土中水泥用量（ kg/m^3 ）； $q(\tau)$ 为单位质量水泥产热的时间函数，表达式如下：

$$q(\tau) = \frac{Q_0 n}{(n + \tau)^2} \quad (3)$$

1.2 反分析

反分析提供两类功能：给定模型结构的系统辨识问题，在模型结构已知情况下确定模型中参数的参数辨识。大体积混凝土早期时变温度场模拟过程十分复杂，部分参数对瞬态温度场敏感性大，不能通过简单经验取值或公式计算得到，而反演参数能达到一定的精度要求。温度场反分析计算的微分方程组为：

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(\tau) \\ T = g(x) & \tau = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 & \tau > 0, x \in \Gamma_2 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \beta(T - T_a) & \tau > 0, x \in \Gamma_3 \end{cases} \quad (4)$$

温度反分析目标函数如下所示：

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{i,j} - \bar{T}_{i,j})^2 \quad (5)$$

式中： $T_{i,j}$ 和 $\bar{T}_{i,j}$ 分别为第 i 时刻第 j 点的温度计算值和实测值； m 和 n 分别为测试次数和测试点数。

2 工程概况及有限元模型建立

2.1 工程概况

某双线船闸工程设计吨位2 000 t，闸室有效尺寸280 m × 34 m × 4.5 m（长 × 宽 × 门槛水深）。下闸首为整体坞式结构，施工过程中先在底板预先设置两条1.5 m长的施工宽缝，后期缝合，船闸底板分成3段。本文选取下闸首二线上游中底板为计算研究对象，模型尺寸为20 m × 17.5 m × 7.5 m，实际施工分4层浇筑，每层浇筑厚度依次为2, 1.5, 3.1, 0.9 m，属于大体积混凝土构件。

2.2 结构模型建立

模型建立以竖直向上为 Y 正向，顺水流向下为 X 正向，垂直水流方向由二线指向一线为 Z 正向。工程部位地基为中风化及微风化花岗岩，岩性较好，计算范围取2.5倍工程结构尺寸大小。有限元模型见图1，模型材料参数见表1。

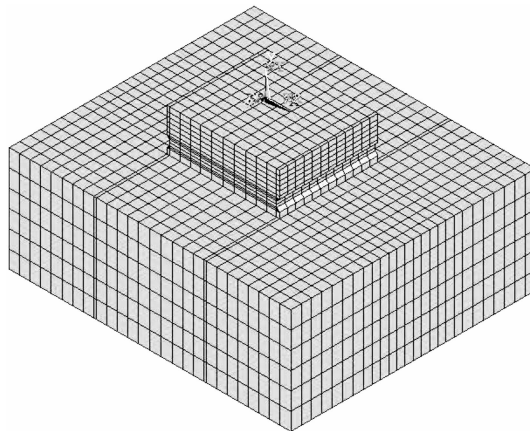


图1 下闸首底板及基岩有限元模型

表1 模型材料参数

材料参数	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热 $c/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1})$	导热系数 $\lambda/[\text{kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1})]$
混凝土	2 459.86	0.955 4	9.540 8
基岩	2 680.00	0.708 0	10.467 0

2.3 边值条件

大体积混凝土浇筑后,由于受到本身材料矿物质、边界条件、外部环境等多种时变因素影响,结构内部温度变化具有瞬态性。为简化模型,环境参数通常认为空气对流系数 β 为常数,但气温受太阳辐射影响发生变化,见图2。

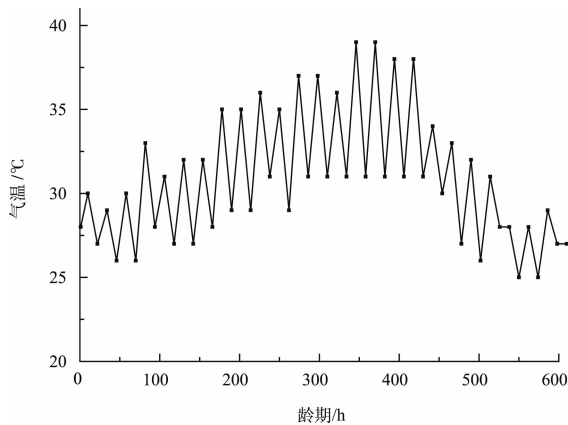


图2 施工期历时平均气温

混凝土初始温度采用各层的浇筑初温。地基温度根据不同的深度确定:5 m以上为实时气温,12 m以下取当地年均气温17.4 °C,深度为两者之间采用插值法取值。混凝土地面与基岩接触,温度已知,按第1类边界条件处理;基岩4个侧面及底面为绝热状态,为第2类边界条件;混凝土4个侧面、上表面和基岩未被混凝土覆盖的上表面与空气存在热对流,属于第3类边界条件。

2.4 施工过程的模拟

为模拟大体积混凝土实际浇筑工序及环境特征,在模拟混凝土浇筑的过程中,先建立浇筑完毕后的整个混凝土结构模型,通过ANSYS内置的“生死单元”先将所有的混凝土单元杀死,即回到浇筑过程的初始状态。根据浇筑进度,激活相应的已浇筑的单元进行计算,如此循环,直至模型全部浇筑完毕。

3 绝热温升参数反演分析

3.1 反演对象

常见的绝热温升函数有指数式、双曲线式和复合指数式3种。对比实测资料,确定本模型采用双曲线式。实际温度场计算中以混凝土绝热温升 θ 表示水化热程度,但ANSYS提供温度荷载施加不能直接定义绝热温升规律,只能通过混凝土单位时间单位体积的生热率来实现,并通过水泥双曲线式生热率公式间接得到混凝土生热率 H_{gen} 。

双曲线式水泥水化热公式:

$$Q_{(t)} = \frac{Q_0 \tau}{n + \tau} \quad (6)$$

上式求导,得到水泥生热率,如式(3)所示。

混凝土绝热温升规律:

$$Q_{(\tau)} = q_{(\tau)} (W + kF) = \theta_{(\tau)} c\rho \quad (7)$$

于是得到混凝土生热率:

$$H_{gen} = \frac{Q_0 n (W + kF)}{(n + \tau)^2} \quad (8)$$

式中: τ 为龄期; k 为混合材影响系数,若含粉煤灰取0.25; F 为外加剂含量(kg/m^3)。

在三维时变温度场计算中,混凝土绝热温升参数、导温系数、表面放热系数等影响温度场变化,绝热温升参数采用反演得到,其他参数实验室测量得到,选取对时变温度场敏感度相对较大的单位质量水泥最终放热量 Q_0 和实常数 n 作为反演对象。

3.2 遗传算法实施过程

反分析的基本过程可以简述为:先由一个二进制数表示的模型参数自由组合成为一个基本模型,全部参数用许多串联在一起的二进制代码组成的字符代表,根据目标函数设定的所有限制条件和取舍规则,不断进行迭代优化计算,保存上一代最优个体,根据终止条件来决定迭代的停止与否,从而得到最优解。

按照实际工程经验,单位质量水泥的最终放热量 Q_0 和实常数 n 取值区间分别为[310,350]和[15,25]。选定T17,T54,T87共3个不同浇筑层中间附近测点在稳定时刻温度实测值,分别为

39.6, 47.1, 50.6 ℃, 包含 10 个种群个体, 50 代遗传数目, 代沟为 0.9。

3.3 参数反演结果分析

迭代计算过程见图 3~6。

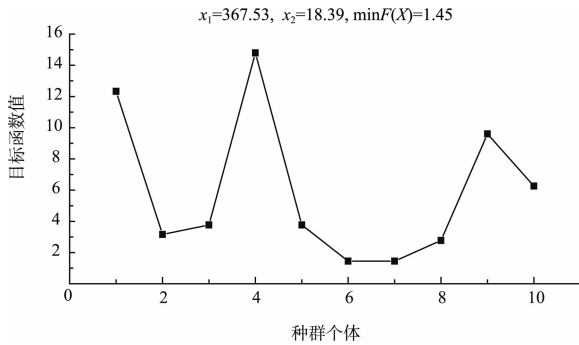


图3 初始种群的目标函数值分布

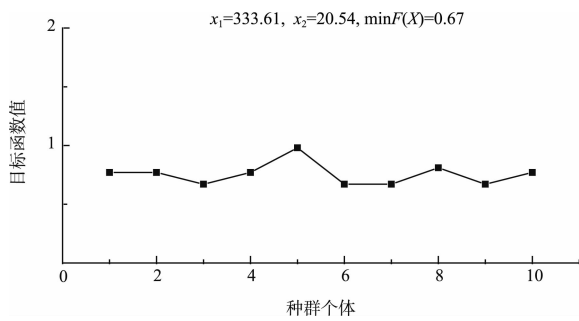


图4 迭代15次后的目标函数值分布

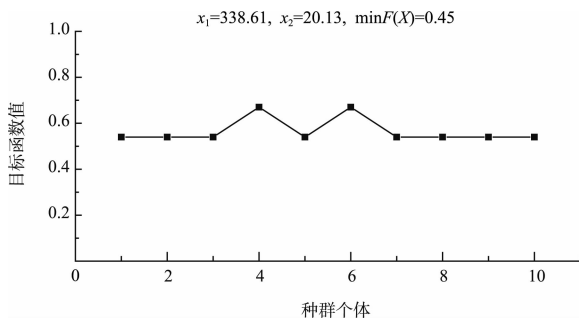


图5 迭代25次后的目标函数值分布

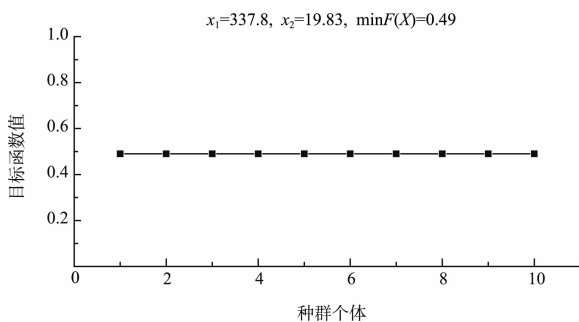


图6 迭代50次后的目标函数值分布

50次迭代的种群目标函数均值的变化和最优解的变化见图7。

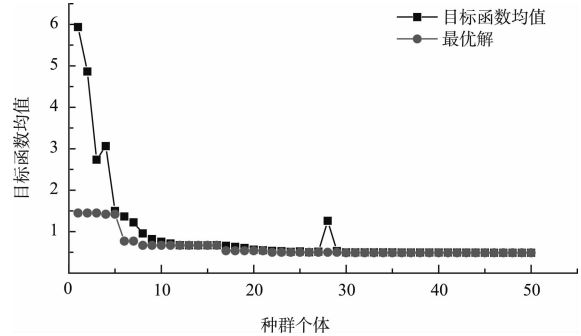


图7 种群目标函数均值和最优解

50次迭代反演后, 目标函数取最优值为单位质量水泥最终生热量 Q_0 反演值 $x_1 = 337.8$, 实常数 n 反演值 $x_2 = 19.83$ 。此时, 混凝土生热率随时间的变化规律见图8, 表达式为:

$$H_{gen} = \frac{337.8 \times 19.83 \times (W + kF)}{(19.83 + \tau)^2} \quad (9)$$

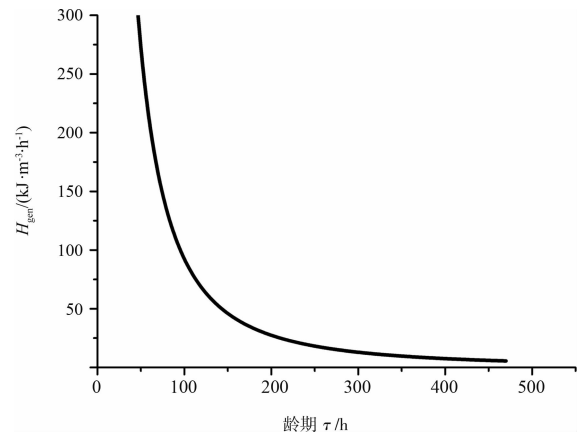


图8 混凝土历时生热率规律

4 时变温度场分析

4.1 温度场验证

部分温度计测点实测值与对应位置 ANSYS 模拟结果对比见图9, 除前期小部分计算值与实测值出现偏离以外, 后期大部分数据吻合较好。初步分析其原因是: 浇筑前期温度测点尚未完全被混凝土覆盖, 此时测值接近气温; 混凝土浇筑的数值模拟过程是瞬间完成的。后期 ANSYS 模拟结果与实测温度吻合程度较好, 说明通过遗传算法对参数进行反演, 能更加有效地模拟施工期混凝土水化热时变温度场。

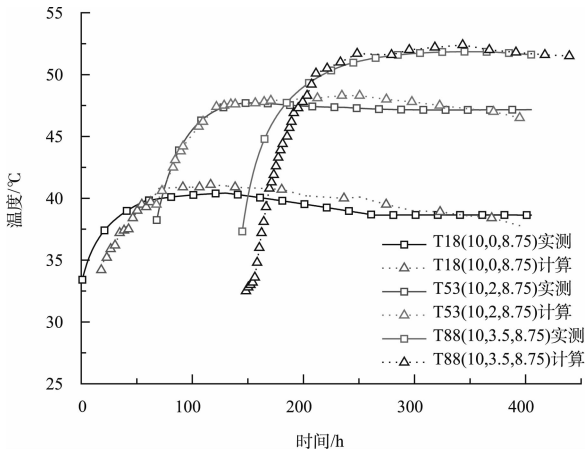


图 9 实测值与计算值的温度历时曲线

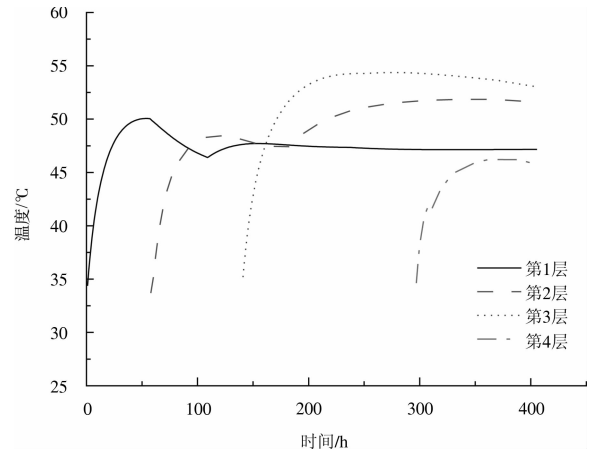


图 11 浇筑各层温度峰值历时曲线

4.2 时变温度场结果分析

从各浇筑层中心点温度历时曲线(图 10)可知,不同混凝土浇筑厚度、施工间歇使各层中心点温度峰值及变化发展规律不同。各浇筑层温度通常在 2~4 d 左右达到第 1 个峰值,随后混凝土传热、对流散热降温。若受后浇筑块体水化热影响较大,温度随之回升。不同浇筑厚度及施工间歇对混凝土温度场影响不同:第 3 层浇筑厚度最大(3.1 m),温度峰值最高;第 4 层浇筑厚度最小(0.9 m),浇筑间歇最长(156 h),温度峰值最小。说明混凝土浇筑厚度和施工间歇影响水化热、各层间传热和浇筑层与空气对流散热的程度。

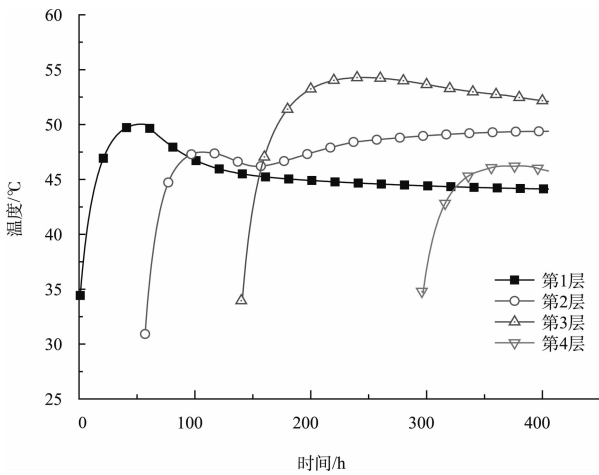


图 10 浇筑各层中心节点温度历时曲线

比较分析图 10 和 11 可知,浇筑各层中心点与浇筑各层温度峰值点温度发展规律相似。但由于施工时混凝土搅拌不均匀、浇筑分层间的热传递、施工间歇等因素影响,使第 1,2,3 层分别在时间点 110,192,300 h 后温度峰值较相应层内中心温度大,说明后浇筑层水化热放热使前浇筑层温度峰值略有增大,各层温度峰值不一定位于相应中心节点位置。

由混凝土温度峰值历时曲线(图 12)可见:受每浇筑层水化热及后浇筑层放热传热影响,施工期大体积混凝土出现 3 个温度峰值,最大值出现在 276 h,达 54.37 °C。混凝土里表温差及混凝土表面与大气温差呈锯齿状(图 13),前者明显高于后者,故里表温差为本大体积混凝土温控研究对象,最大里表温差^[5]于 273 h 为 24.54 °C,应加强对混凝土的后期养护并采取相应的温控措施。温度峰值和最大温差均出现在第 3 层,表明混凝土浇筑厚度对结构体温度峰值和里表温差影响较大。温度峰值历时曲线和里表温差历时曲线发展规律相似,两者最大值出现时间相近。因此,温度峰值历时曲线可近似用于温控时间节点的参考。

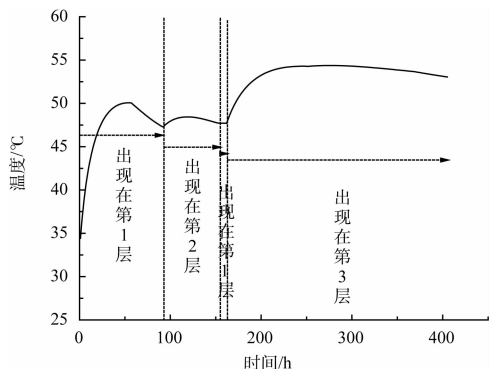


图 12 混凝土温度峰值历时曲线

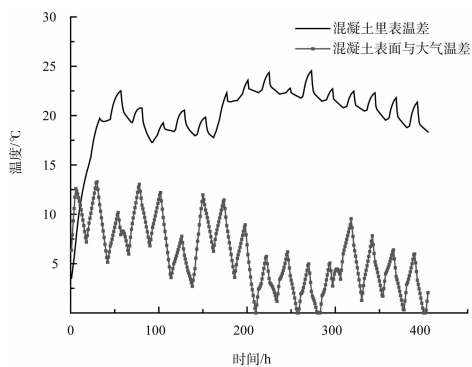


图 13 混凝土温差历时曲线

5 结论

1) 基于实测资料建立 ANSYS 三维有限元传热模型, 结合遗传算法反演得到混凝土生热率公式, 进而模拟施工期时变温度场的方法是可行的, 计算结果是可靠的。

2) 混凝土浇筑厚度和施工间歇影响水化热、各层间传热和浇筑层与空气对流散热的程度。浇筑层厚度越大、浇筑间歇越短则温度峰值越大。

3) 施工期大体积混凝土各层温度峰值位置不一定位于各层中心, 后浇筑层水化热放热使前浇筑层温度峰值略有增大。

4) 里表温差明显高于混凝土表面与大气之间的温差, 是大体积混凝土温控防裂的主要研究对象。温度峰值曲线的最大值与温差的最大值出现时间相近, 温度峰值历时曲线可为温控的实施提供时间参考。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温控应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

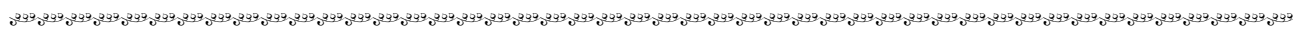
[2] 彭立海. 大体积混凝土温控与防裂[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.

[3] 马跃峰, 肖志乔, 朱岳明. 基于遗传算法的泵站混凝土热学参数反演分析[J]. 水电能源科学, 2005, 23 (6): 31-33.

[4] 刘宁, 张剑, 赵新铭. 大体积混凝土结构热学参数随机反演方法初探[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 114-120.

[5] JTS 202-1—2010 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 106 页)

参考文献:

[1] 肖大选. 长江南京以下 12.5 m 深水航道建设工程暨一期工程简介[J]. 水运工程, 2012(11): 1-5.

[2] 吴道文, 杜德军, 夏云峰, 等. 通州沙西水道治理对主航道整治效果的影响动床模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

[3] 闻云呈, 夏云峰. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程总平面方案优化[J]. 水运工程, 2013(3): 1-10.

[4] 杜德军, 夏云峰, 吴道文, 等. 通州沙和白茆沙 12.5 m

深水航道整治工程方案试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 1-9.

[5] 张世钊, 吴道文, 夏云峰, 等. 长江澄通河段通州沙西水道河道整治一期工程潮汐河工模型定床试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

[6] 张玮, 倪兵, 陈乾阳, 等. 长江澄通河段通州沙西水道整治工程对分流比影响研究[J]. 水道港口, 2013 (1): 39-44.

(本文编辑 郭雪珍)