

文章编号:1673-2049(2015)05-0081-08

基于遗传算法的大体积混凝土热力学参数反演分析

喻正富¹, 张筱雨², 刘来君², 陈永瑞²

(1. 云南普宣高速公路建设指挥部, 云南 宣威 655400; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为准确快速确定混凝土热力学参数中难以确定的绝热温升、导热系数、表面放热系数及反应速度, 以云南普立大桥散索鞍支墩基础大体积混凝土施工实测温度为基础, 采用遗传算法进行混凝土热力学参数的反演分析, 并根据反演参数建立三维有限元模型预测后续混凝土施工中的温度场, 然后通过混凝土内部实测温度及应力验证预测结果。最后依据预测结果, 在混凝土浇筑早期采用表面降温, 内部布设冷却水管的措施有效减小了内外温差并防止了裂缝产生。结果表明:混凝土内部温度达到峰值时表面拉应力最大值为 1.5 MPa, 出现表面裂缝的可能性较小;混凝土浇筑 3 d 后, 抗裂指数都在 1.5 以上, 一般不会产生裂缝;基于反演参数的温度场计算值与实测值吻合良好。

关键词:桥梁工程;大体积混凝土;温控防裂;热力学参数;反演分析;遗传算法

中图分类号:U445

文献标志码:A

Inverse Analysis of Mass Concrete Thermal Parameter Based on Genetic Algorithm

YU Zheng-fu¹, ZHANG Xiao-yu², LIU Lai-jun², CHEN Yong-rui²

(1. Headquarter of Puxuan Expressway, Xuanwei 655400, Yunnan, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to accurately and efficiently determine concrete thermal parameters, such as adiabatic temperature rise, the thermal conductivity, the surface heat transfer coefficient and reaction speed, which were difficult to be obtained, the genetic algorithms were applied in inverse analysis of concrete thermal parameters according to the measured temperature during the mass concrete construction in Puli bridge vice cable saddle pier foundation, Yunnan Province. Meanwhile, three-dimensional finite element model was established to predict temperature field in follow-up concrete construction and verified by the measured temperature and stress. Finally, according to the predicted results, surface cooling and cooling water pipes inside can effectively reduce the temperature difference between inside and outside, and prevent cracks in early stage after concrete pouring. The results show that the surface maximum tensile stress is 1.5 MPa when internal temperature of concrete reaches peak value, that means none possibility of cracks. After concrete pouring 3 d, crack resistance index is greater than 1.5, that indicates few possibility of cracks. The calculation value of temperature field coincides well with the measured value based on the inverse parameters.

收稿日期:2015-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51408040);云南省交通运输厅科技项目(云交科 2013(A)02)

作者简介:喻正富(1963-),男,云南通海人,高级工程师,E-mail:yzf21706@163.com。

Key words: bridge engineering; mass concrete; temperature control and crack prevention; thermal parameter; inverse analysis; genetic algorithm

0 引言

在桥梁工程施工中,大型承台、锚碇等都属于大体积混凝土。大体积混凝土在水泥水化升温的初期容易出现内高外低的温差,在内约束作用下形成表面裂缝;在超大体积混凝土降温阶段由于混凝土的收缩在外约束作用下容易导致贯穿裂缝,贯穿裂缝会严重影响结构的性能,破坏结构的整体性、耐久性等^[1]。针对大体积混凝土温控防裂这一课题,各国学者做了大量的研究工作。

通过数值模拟可以有效地预先判断在施工过程中可能出现的温度应力分布不均匀所导致的薄弱环节,提前做好裂缝控制工作^[2],网格法能够有效地模拟混凝土块在温度应力作用下的开裂发展过程^[3]。运用数值模型分析混凝土早期水化反应时的热力学状态应当考虑连续浇筑、材料、徐变和热学边界条件等非线性因素^[4],同时大体积混凝土应力场仿真计算中,混凝土的弹性模量、徐变变形均与温度有关,温度场和应力场存在耦合现象^[5]。计算模型表面边界条件的差异、温度场的分布存在着规律性的变化,边界条件相同时,温度分布存在着对称性,边界条件不同时,温度分布存在着非对称性,并且基础沿厚度方向的中心截面具有对称性^[6]。

大体积混凝土裂缝产生的原因主要包括混凝土自身热学和力学性能及外部环境^[7]。浇筑温度极大地影响材料的热学和力学性质以及结构的温升、温度应力和开裂,养护条件对温度、应力和开裂有显著影响^[8]。大体积混凝土内部温度场时变状态与浇筑温度密切相关^[9]。

水化热是引起大体积混凝土早期裂缝产生的主要原因,大体积混凝土温控抗裂应该遵循“抗放兼施”的原则^[1],混凝土在冷却过程中重点关注最高温度控制,温度变化率协调控制与异常温度控制^[10]。浇筑时合理分层,控制浇筑温度,埋设冷却水管和表面绝热^[11],浇筑完成以后做好冷却和保温能有效防止温度裂缝产生^[12]。大体积混凝土施工全过程监测内部温度的变化至关重要,并根据温度变化调整施工工艺对预防裂缝产生具有显著效果^[13]。

以往研究主要从大体积混凝土水化热有限元分析及裂缝预测、温度裂缝产生的原因、温控防裂措施 3 个方面展开。通过有限元分析预测水化热温度及

混凝土开裂位置及可能性是提出温控防裂措施的前提,而计算分析结果可靠性依赖于混凝土热力学参数的准确性。目前大多数计算分析采用的混凝土热力学参数来源于实验室或规范值。由于实际施工过程中混凝土配合比的变化或某些随机因素的扰动,规范值或试验值与实际相差较大,同时在现场测定混凝土热力学参数难度较大且成本高昂。通过混凝土立方体试件温升试验,测得试件各代表点不同时刻的温度,通过反演分析求得混凝土 1 个或多个温度特性参数^[14],但仍属于试验测定的方法。

针对这一问题,本文提出根据施工现场测得的温度数据,通过遗传算法反演分析得到能够反映混凝土实际热学性能的参数,并以此建立三维有限元模型,通过反馈分析验证反演参数及计算模型的准确性,根据模型计算模拟施工过程中混凝土内部温度场的变化,为提出合理应对措施指导后续施工提供依据。

1 分析方法

1.1 不稳定温度场理论

在计算域 R 内任何一点处,不稳定温度场 $\theta(x, y, z, t)$ 须满足热传导方程,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \Delta \theta}{\partial f} \quad (1)$$

式中: θ 为温度; a 为导温系数; $\Delta \theta$ 为混凝土绝热温升; t 为时间; f 为龄期。

1.2 水管冷却温度场计算原理

根据傅里叶热传导定律及热量平衡条件,可以得到水管沿程的水温增量 $\Delta \theta_{wt}$,即

$$\Delta \theta_{wt} = \frac{-\lambda}{c_w d_w q_w} \iint \frac{\partial \theta}{\partial n} ds \quad (2)$$

式中: q_w , d_w , c_w 分别为冷却水的流量、比热容和密度; λ 为导热系数; n 为混凝土与水管之间混凝土面的外法线; ds 为面积积分。

1.3 混凝土应力场理论

混凝土在复杂应力状态下的应变增量 $\Delta \mathbf{X}_n$ 包含弹性应变增量、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

$$\Delta \mathbf{X}_n = \Delta \mathbf{X}_n^e + \Delta \mathbf{X}_n^c + \Delta \mathbf{X}_n^t + \Delta \mathbf{X}_n^s + \Delta \mathbf{X}_n^o \quad (3)$$

式中: $\Delta \mathbf{X}_n^e$ 为弹性应变增量; $\Delta \mathbf{X}_n^c$ 为徐变应变增量; $\Delta \mathbf{X}_n^t$ 为温度应变增量; $\Delta \mathbf{X}_n^s$ 为干缩应变增量; $\Delta \mathbf{X}_n^o$

为自生体积应变增量。

1.4 遗传算法

遗传算法产生于群体遗传学和生物进化论,由 Holland 等创立,遗传算法是模拟自然界生物进化过程与求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术,因其解决不同非线性问题的鲁棒性、全局最优性、不依赖于问题模型的特性、可并行性及高效率,正引起越来越多的研究及应用热潮。

遗传算法的基本原理是模仿自然界“物竞天择,适者生存”的演化法则,先将问题参数编码为染色体,然后用迭代的方法进行选择、交叉以及变异等运算完成种群中染色体的信息交换,最终得到满足优化目标的染色体。在该算法中,染色体代表的值数组或数据往往是由一维的串结构数据来表达,串上每个位置对应基因的取值。基因串组成了染色体,称为基因型个体,种群是由一定数量的个体组成,种群中个体数目的大小称为种群大小,而个体对自然环境的适应程度称为适应度^[15]。

2 参数反演分析

2.1 模型的建立

本文以云南普立大桥为依托工程,普立大桥主桥为双塔单跨钢箱梁悬索桥,主缆分跨为 166 m+628 m+166 m。散索鞍支墩基础长 24 m,宽 21 m,高 6 m,浇筑的混凝土为 6 048 m³。锚锭各部位的分层浇筑厚度如图 1 所示。

通过 MIDAS/FEA 建立散索鞍支墩基础的 1/4 有限元模型,整体坐标系沿基础长度方向为 x 轴,沿宽度方向为 y 轴,沿高度方向为 z 轴。温度场分析中的边界条件为:基岩外表面为绝热,绝热温度为 20 ℃,属于第 2 类边界条件;混凝土外表面与大气接触,为第 3 类边界条件。应力场分析中的边界条件为:基岩的底面按照固定支座处理,模型在长度方向上为 Oxz 面对称,模型在宽度方向上为 Oyz 面对称。网格划分利用映射网格法,六面体单元。图 2 为鞍部基础 1/4 有限元模型,图 3 为模型散热面。

鞍部基础混凝土温度测点在高度方向布置在每层混凝土中间,3 层共布置 27 个测点,本文中使用的测点平面布置如图 4 所示。利用遗传算法对影响混凝土温度场的最终绝热温升 θ_0 、反应速度 v 、导热系数 λ 以及表面放热系数 β 四个参数进行反演,在混凝土内部 λ 和 β 对温度场的影响较小,所以在反演过程中可以先利用测点 3,4,5 反演出最终绝热温升 θ_0 、反应速度 v ,然后利用测点 1,2,3 反演出导热

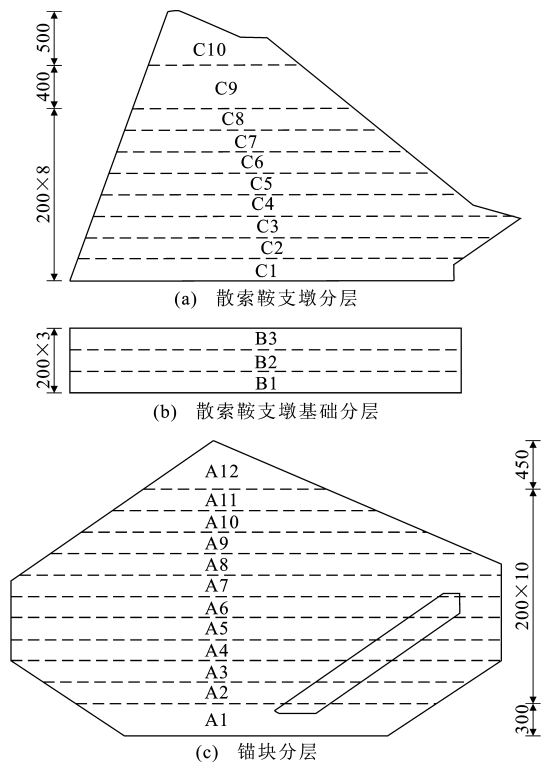


图 1 分层浇筑厚度示意(单位:cm)

Fig. 1 Schematic Diagrams of Layered Pouring Thickness (Unit:cm)

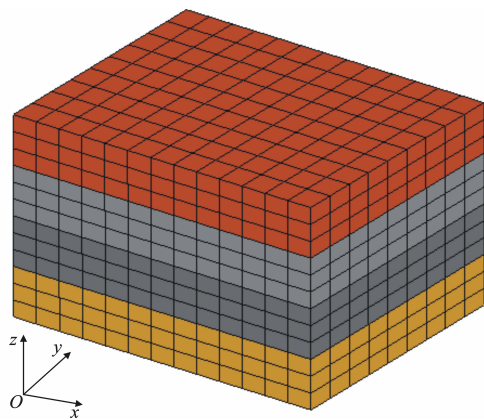


图 2 鞍部基础 1/4 有限元模型

Fig. 2 1/4 Finite Element Model of Saddle Foundation

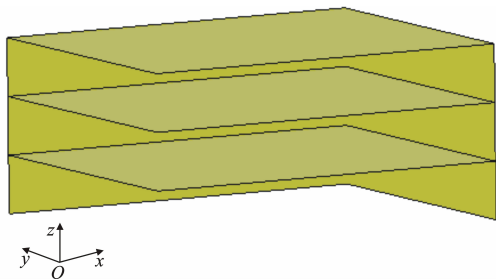


图 3 模型散热面

Fig. 3 Radiating Surface in Model

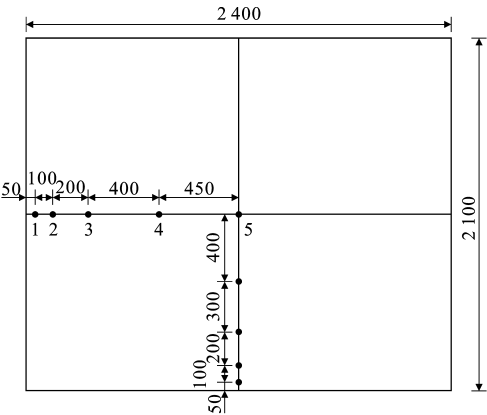


图 4 散索鞍支墩温度测点布置(单位:cm)

Fig.4 Arrangement of Temperature Measuring Point in Vice Cable Saddle Pier (Unit:cm)

表 1 普立大桥散索鞍支墩 C30 混凝土配合比

Tab.1 Mix Proportions of C30 Concrete of Vice Cable Saddle Pier in Puli Bridge

| 材料 | 水泥 | 粉煤灰 | 砂 | 小石 | 中石 | 大石 | 水 | 外加剂 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 用量/(kg·m ⁻³) | 314 | 104 | 859 | 151 | 504 | 353 | 159 | 6.27 |

表 2 材料的物理力学参数

Tab.2 Physical and Mechanical Parameters of Material

| 材料种类 | 导热系数/ [kJ·(m·h·℃) ⁻¹] | 比热容/ [kJ·(kg·℃) ⁻¹] | 重度/(kN·m ⁻³) | 线膨胀系数/ 10 ⁻⁵ ℃ ⁻¹ | 泊松比 | 弹性模量/MPa |
|---------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--|------|---------------------|
| C30 混凝土 | 反演参数 | 0.978 | 25 | 1 | 0.18 | 3.0×10 ⁴ |
| 基岩 | 13 | 0.784 | 26 | 1 | 0.20 | 10.0 |

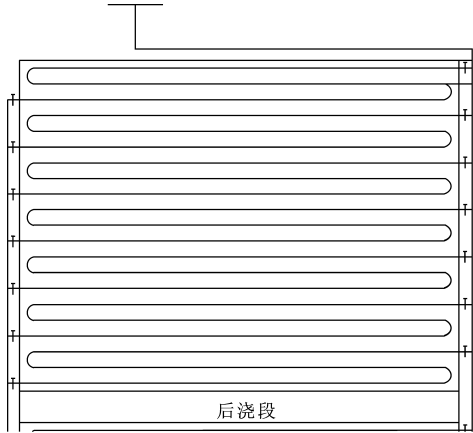


图 5 冷却水管布置

Fig.5 Arrangement of Cooling Water Pipe

表 3 冷却水相关参数

Tab.3 Relative Parameters of Cooling Water

| 比热容/ [kJ·(kg·℃) ⁻¹] | 密度/(g·m ⁻³) | 入口温度/℃ | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------|-------|-------|
| | | 第 1 层 | 第 2 层 | 第 3 层 |
| 426.853 | 9.806 65 | 22.9 | 26.6 | 24.9 |

图 6 为散索鞍支墩基础第 2 层浇筑后环境温度变化曲线。由图 6 可知,散索鞍支墩附近环境昼夜

系数 λ 和表面放热系数 β 。

2.2 反演分析

散索鞍部基础采用 C30 混凝土,其配合比和基岩的物理力学参数如表 1,2 所示。施工采用混凝土适度表面保温和内部水管降温的温控防裂措施,即钢模板外面贴塑料保温板,基础内部布置冷却水管。图 5 为冷却水管布置,表 3 为冷却水相关参数。

冷却水管直径为 0.038 m,对流系数为 371.67 W·(m²·℃)⁻¹,每层混凝土中各布置 2 层。温控方案中冷却水管设计流量为 4.5 m³·h⁻¹。现场施工严格按照设计图纸布设冷却水管,并安排专人控制冷却水管流速,依据现场实测结果,计算时冷却水管的流量取平均流量 4 m³·h⁻¹。

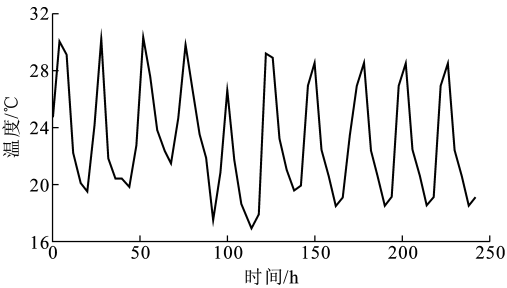


图 6 散索鞍支墩基础第 2 层浇筑后环境温度变化曲线

Fig.6 Change Curve of Environmental Temperature After Pouring the Second Layer of Vice Cable Saddle Pier Foundation

温差接近 20℃。由于采取有效的表面保温措施,混凝土表面温度波动幅度不超过 3℃,远小于内外温差值,故反演分析时认为环境温度基本稳定,不考虑环境温度对反演结果的影响。

2.2.1 反演参数及目标函数

在温度场分析中,主要物理力学参数包括混凝土的比热容 c 、密度 ρ 、导热系数 λ 、表面放热系数 β 以及混凝土的绝热温升 $\Delta\theta$ 。这些参数中比热容 c 、密度 ρ 可以由室内试验得到且满足计算精度要求,一般不予反演分析。绝热温升 $\Delta\theta$ 受到水泥种类和

用量以及实验室环境与施工环境差异的影响,难以确定;导热系数 λ 受混凝土密实性、材料成分的随机性以及骨料岩性的影响,难以确定;表面放热系数 β 受表面保温层的厚度、太阳辐射等因素的影响,需要反演分析。因此,本文基于遗传算法反演参数 $\Delta\theta$, λ 以及 β ,其中绝热温升模型 $\theta(\tau)$ 采用指数模型,即

$$\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-v\tau}) \quad (4)$$

式中: τ 为时间变量。

采用最小二乘法估算热力学参数,即将有限元计算的温度值与现场实测值的误差平方作为参数反演的目标函数 $J(X)$,即

$$J(X) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [T(x_i, y_i, z_i, \tau_j) - T_m(x_i, y_i, z_i, \tau_j)]^2 \quad (5)$$

式中: T 为测点温度计算值; T_m 为测点温度实测值; M 为测点个数; N 为测点次数。

2.2.2 反演分析结果

根据现场 27 个典型测点的实测温度,利用 MATLAB 语言编写遗传算法程序,由工程经验及实践得反演参数的范围为: $20 \text{ kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1} \leq \lambda \leq 80 \text{ kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, $40 ^\circ\text{C} \leq \theta_0 \leq 65 ^\circ\text{C}$, $0.3 \text{ d} \leq v \leq 1.1 \text{ d}$ 。反演过程中的相关参数定义如下:最大遗传迭代次数为 50,种群数量为 50,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.01。每进行 1 次迭代,根据适应度的大小对种群中的每个个体进行排序,并记录适应度最大的个体。最大绝热温升与反应速度、导热系数与表面放热系数的进化过程如图 7,8 所示。

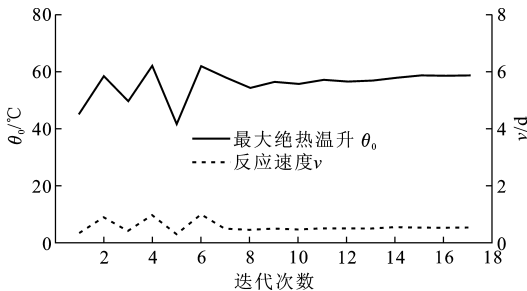


图 7 最大绝热温升与反应速度进化过程曲线
Fig. 7 Evolution Course Curves of Maximum Adiabatic Temperature Rise and Reaction Speed

最大绝热温升和反应速度在经过 17 次迭代后趋于稳定,另外,导热系数和表面放热系数也在经历 16 次迭代后达到收敛,从而得出最终反演分析结果为:最终绝热温升 $\theta_0 = 58.6 ^\circ\text{C}$,反应速度 $v = 0.54 \text{ d}$,导热系数 $\lambda = 10.07 \text{ kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,表面放热系数 $\beta = 70 \text{ kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

为了验证本文遗传算法得到的反演参数值的正

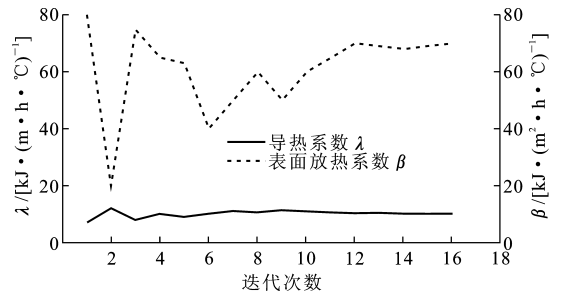


图 8 表面放热系数与导热系数进化过程曲线
Fig. 8 Evolution Course Curves of Surface Heat Transfer Coefficient and Thermal Conductivity Coefficient

确性和算法的可靠性,将其代入温度场分析模型中进行验证,得到的温度计算值与实测值见图 9,10。

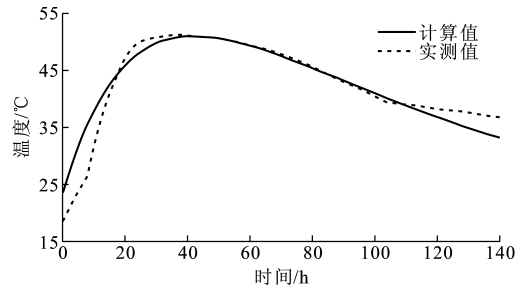


图 9 测点 2 反演温度计算值与温度实测值
Fig. 9 Calculation Results and Measured Results of Inverse Temperature for Measuring Point 2

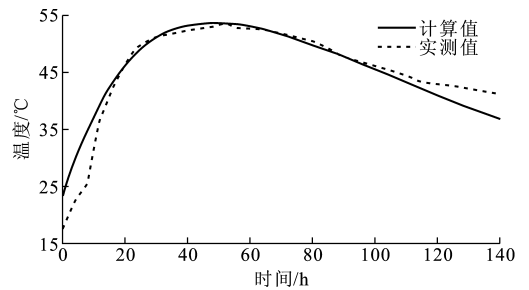


图 10 测点 5 反演温度计算值与温度实测值
Fig. 10 Calculation Results and Measured Results of Inverse Temperature for Measuring Point 5

由图 9,10 可知,混凝土反演参数计算的温度值与实测值相差很小,拟合效果良好,而且反演的收敛速度很快。因此,验证了计算模型及反演参数的可靠性。

3 反馈分析

根据反演分析所得到的混凝土热力学参数,对后续混凝土层施工期混凝土温度场及应力场进行仿真计算分析。为防止昼夜温差对混凝土表面的影响,对其表面采取适当的保温措施,仿真计算考虑其受昼夜温差的影响。

3.1 温度计算结果分析

图 11,12 分别为第 1 层和第 2 层测点 1 与测点 5 的温度历时曲线。由图 11,12 可以看出,在表面保温和内部降温措施下,鞍部基础混凝土表面散热能力减弱,内部温升幅度减小,内外温差显著降低。混凝土在浇筑完成 50 h 左右内部温度达到峰值 53.8 ℃,经水管冷却之后,温度缓慢降至 31.7 ℃。在浇筑第 2 层混凝土时,第 1 层混凝土测点 5 温度先逐渐上升至 35.8 ℃,然后缓慢降低并达到稳定温度 31.5 ℃。从测点 1,5 温度历时曲线可以看出,内部最高温度 57.3 ℃,表面最高温度 44.6 ℃,内外温差约为 12 ℃,冷却水管消峰减差效果明显。

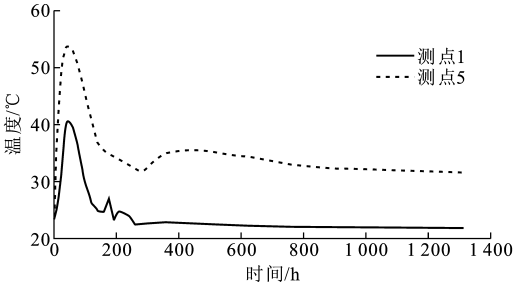


图 11 第 1 层测点 1 与测点 5 的温度历时曲线

Fig. 11 Temperature Time History Curves of Measuring Point 1 and Measuring Point 5 in the First Layer

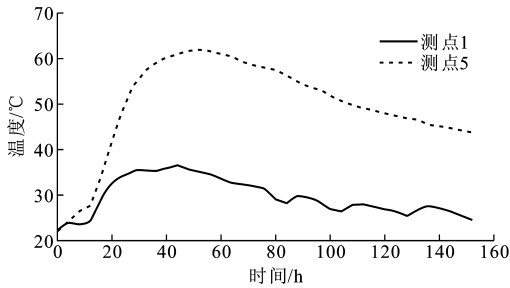


图 12 第 2 层测点 1 与测点 5 的温度历时曲线

Fig. 12 Temperature Time History Curves of Measuring Point 1 and Measuring Point 5 in the Second Layer

经过 15 d 的间隙浇筑,第 2 层混凝土在浇筑 64 h 后,测点 1 的温度为 37.6 ℃,测点 5 的温度为 60.4 ℃,此时内外温差达到最大值 23 ℃,需要及时调整冷却水管流量的大小;浇筑第 2 层混凝土时内部温度降温速率比第 1 层的小,且第 2 层的稳定温度整体比第 1 层要高一些。因此,在浇筑后续混凝土层时应该加强表面保温和内部冷却水管降温的措施,以减小内外温差,防止开裂。由于表面混凝土层受昼夜温差的影响,测点 1 的温度随气温波动,但波动幅度不超过 3 ℃。

3.2 应力计算结果分析

在鞍部基础混凝土温度徐变应力分析中,将计

算温度作为温度荷载施加至结构上,并考虑混凝土自重的影响,通过分析具有代表性特征点的应力历程曲线来研究基础内部的应力场分布,以便采取恰当的温控防裂措施。

通过温度抗裂指数 i 来预测混凝土内部发生裂缝的几率。温度抗裂指数 i 是指混凝土的容许应力与实际产生应力间的比值,一般应满足如下规定:防止裂缝产生时 $i > 1.5$,限制裂缝发生时 $1.2 < i \leq 1.5$,限制有害裂缝的发生时 $0.7 < i \leq 1.2$ 。

特征点平面和立面布置如图 13 所示,其中,特征点 1 在距混凝土侧面 0.5 m 处,特征点 2 在混凝土中心部位,而特征点 3 在混凝土的表面位置。

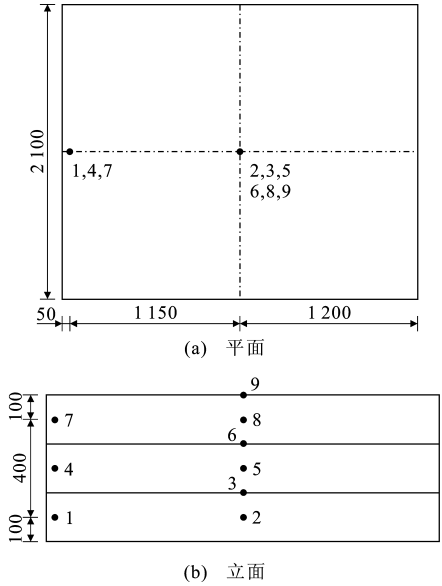


图 13 特征点布置(单位:cm)

Fig. 13 Arrangements of Characteristic Points (Unit:cm)

通过应力场的仿真分析,各特征点的最大主拉应力历程曲线及抗裂指数见图 14,15。由图 14,15 可以看出,由于早期内外温差的原因,特征点 1 初期拉应力接近为 0,特征点 3 表现为最大拉应力。在内部温度达峰值时早期表面拉应力达到最大值 1.5 MPa,没有超过当时容许抗拉强度,早期由表及里型裂缝发生的可能性较小。随着温度的降低,混凝土结构整体收缩逐渐变为主导,特征点拉应力增大到 9 d 左右时达到最大值 1.6 MPa。第 1 层混凝土浇筑完 15 d 时(第 2 层混凝土浇筑),混凝土应力陡然变大、波动,产生的主要原因是受上层新浇筑混凝土的重力、膨胀以及昼夜温差影响。此时,特征点 1 的抗裂指数 $i=2$,混凝土表面产生裂缝的概率最大。

由图 15 还可以看出:当抗裂指数 $i=20$ 时,混凝土内部应力为压应力;在基础第 1 层混凝土浇筑后 1 310 h 内,尽管特征点 1 的抗裂指数较小,但其

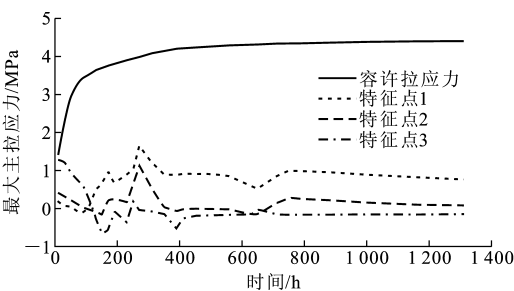


图 14 特征点 1~3 最大主拉应力历时曲线
Fig. 14 Time History Curves of Maximum Principal Tensile Stress of Characteristic Points 1-3

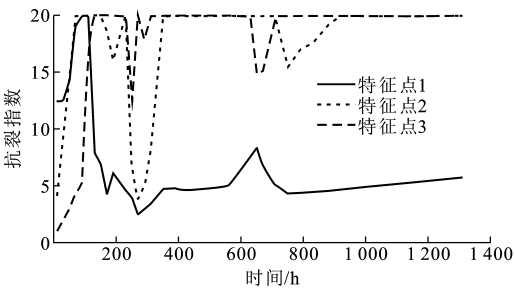


图 15 特征点 1~3 抗裂指数
Fig. 15 Crack Resistance Indexes of Characteristic Points 1-3

表 4 混凝土在不同龄期时内部最大主拉应力

Tab. 4 Maximum Principal Tensile Stress in Different Ages of Concrete

| 龄期 | | 10 h | 20 h | 2 d | 3 d | 5 d | 10 d | 20 d | 30 d | 50 d |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 最大主拉应力/MPa | 第 1 层 | 1.37 | 1.94 | 1.64 | 1.12 | 0.95 | 0.93 | 1.15 | 1.04 | 0.98 |
| | 第 2 层 | 1.83 | 2.08 | 2.80 | 2.17 | 1.04 | 1.37 | 1.38 | 1.14 | 1.01 |
| | 第 3 层 | 1.59 | 1.68 | 2.29 | 2.04 | 1.46 | 1.37 | 1.17 | 1.12 | 1.02 |
| 容许拉应力/MPa | | 1.41 | 1.93 | 2.94 | 3.26 | 3.59 | 3.91 | 4.25 | 4.33 | 4.39 |
| 抗裂指数 | 第 1 层 | 1.03 | 0.99 | 1.79 | 2.91 | 3.78 | 4.20 | 3.70 | 4.16 | 4.48 |
| | 第 2 层 | 0.76 | 0.87 | 1.05 | 1.51 | 3.45 | 2.85 | 3.08 | 3.80 | 4.35 |
| | 第 3 层 | 0.89 | 1.15 | 1.28 | 1.60 | 2.46 | 2.85 | 3.63 | 3.87 | 4.30 |

法反演分析混凝土热力学参数具有足够的可靠性。

(2)混凝土在浇筑 50 h 时,内部温度达到峰值 53.8 ℃,经水管冷却作用后温度降至 31.7 ℃,冷却水管消峰减差效果明显。基于反演参数的有限元模型可准确地预测温度场分布情况和峰值,依据预测结果在混凝土浇筑早期采用表面降温和内部布设冷却水管的措施可有效地减小内外温差,以防止裂缝的产生。

(3)由于早期内外温差的影响,在混凝土内部温度达峰值时表面拉应力达到最大值 1.5 MPa,未超过容许抗拉强度。每层混凝土浇筑 3 d 后,抗裂指数都在 1.5 以上,大于防止裂缝发生的最小值 1.5,故混凝土内部在 3 d 后一般不会产生裂缝。

(4)在工程施工中,采用基于遗传算法反演分析

最大主拉应力没有超过容许拉应力,因此混凝土产生裂缝的可能性较小,可以说在此期间混凝土不会开裂,而且在浇筑后期特征点 1~3 的抗裂指数都较大且相对稳定,所以在整个运营期间第 1 层都不太可能产生裂缝。表 4 中给出了基础混凝土在浇筑后各龄期混凝土内部的最大主拉应力。

在混凝土浇筑 10 h 时,基础第 2 层内部最大主拉应力为 1.83 MPa,超出了容许拉应力,抗裂指数为 $i=0.76$,大于限制有害裂缝产生的最小值 0.7,此时混凝土内部可能产生限制裂缝。由表 4 可知,每层混凝土浇筑 3 d 后,抗裂指数都在 1.5 以上,大于防止裂缝发生的最小值 1.5,所以混凝土内部在 3 d 以后一般不会产生裂缝。

4 结 语

(1)根据现场实测混凝土内部水化热反应的温度,应用遗传算法反演分析混凝土热力学参数,得出最终绝热温升 $\theta_0=58.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,反应速度 $v=0.54\text{ d}$,导热系数 $\lambda=10.07\text{ kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,表面放热系数 $\beta=70\text{ kJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。基于反演参数预测后浇混凝土温度场与实测值吻合良好,说明遗传算

大体积混凝土热力学参数简单易行且计算效率高,可以大幅降低实验室和现场测量的难度和费用,因此具有较高的实用性和经济性。

参考文献:
References:

[1] 江昔平,王社良,段述信,等.超大体积混凝土温度裂缝产生机理分析与抗裂控制新对策[J].混凝土,2007(12):98-102.
JIANG Xi-ping, WANG She-liang, DUAN Shu-xin, et al. Mechanism Analysis of Temperature Crack Appear of Super Mass Concrete and New Methods of Anti-rack[J]. Concrete, 2007(12):98-102.

[2] 杜平,刘书贤,谭广柱,等.基于四维温度场理论的大体积混凝土数值分析[J].辽宁工程技术大学学报:

- 自然科学版,2012,31(4):526-530.
- DU Ping, LIU Shu-xian, TAN Guang-zhu, et al. Numerical Analysis of Mass Concrete Based on the Theory of Four Dimensional Temperature Field[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2012,31(4):526-530.
- [3] 刘杏红,周创兵,常晓林,等. 大体积混凝土温度裂缝扩展过程模拟[J]. 岩土力学,2010,31(8):2666-2670,2676.
- LIU Xing-hong, ZHOU Chuang-bing, CHANG Xiao-lin, et al. Simulation of Mass Concrete Temperature Cracking Propagation Process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(8):2666-2670,2676.
- [4] HATTEL J H, THORBORG J. A Numerical Model for Predicting the Thermomechanical Conditions During Hydration of Early-age Concrete [J]. Applied Mathematical Modelling, 2003,27(1):1-26.
- [5] 刘海成,宋玉普,吴智敏. 考虑温度影响的大体积混凝土应力场分析方法[J]. 大连理工大学学报,2005,45(1):121-127.
- LIU Hai-cheng, SONG Yu-pu, WU Zhi-min. An Analytical Method for Stress Field of Massive Concrete Considering Temperature Effect[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005,45(1):121-127.
- [6] 杨秋玲,马可栓. 大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(2):261-263.
- YANG Qiu-ling, MA Ke-shuan. Analysis of Massive Concrete 3-dimensional Finite Element Hydrated Heat Temperature Field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(2):261-263.
- [7] 丁宝瑛,王国秉,黄淑萍,等. 国内混凝土坝裂缝成因综述与防止措施[J]. 水利水电技术,1994(4):12-18.
- DING Bao-ying, WANG Guo-bing, HUANG Shu-ping, et al. A Review on Causes of Cracking in Domestic Concrete Dams and Preventive Measures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1994(4):12-18.
- [8] 张子明,郭兴文,杜荣强. 水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):12-16.
- ZHANG Zi-ming, GUO Xing-wen, DU Rong-qiang. Analysis of Hydration Heat-induced Stresses and Cracks in Massive Concrete Walls[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002,30(5):12-16.
- [9] 李潘武,曾宪哲,李博渊,等. 浇筑温度对大体积混凝土温度应力的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(5):68-71.
- LI Pan-wu, ZENG Xian-zhe, LI Bo-yuan, et al. Influence of Placement Temperature on Mass Concrete Temperature Stress[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011,31(5):68-71.
- [10] 林 鹏,李庆斌,周绍武,等. 大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J]. 水利学报,2013,44(8):950-957.
- LIN Peng, LI Qing-bin, ZHOU Shao-wu, et al. Intelligent Cooling Control Method and System for Mass Concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(8):950-957.
- [11] 迟培云,钱 强,高 昆. 大体积混凝土开裂的起因及防裂措施[J]. 混凝土,2001(12):30-32.
- CHI Pei-yun, QIAN Qiang, GAO Kun. Cracking Cause and Method of Preventing Cracking of Mass Concrete[J]. Concrete, 2001(12):30-32.
- [12] 张 湧,刘 斌,贺拴海,等. 桥梁大体积混凝土温度控制与防裂[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(3):43-46.
- ZHANG Yong, LIU Bin, HE Shuan-hai, et al. Temperature Control and Anti-crack of Massive Concrete in Large Bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(3):43-46.
- [13] 叶 雯,杨永民. 大体积混凝土施工温度监测及其温度应力分析[J]. 混凝土,2008(9):104-107.
- YE Wen, YANG Yong-min. Temperature Monitor and Temperature Stress Analysis of Big Bulk Concrete Structure[J]. Concrete, 2008(9):104-107.
- [14] 朱岳明,刘勇军,谢先坤. 确定混凝土温度特性多参数的试验与反演分析[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):175-177.
- ZHU Yue-ming, LIU Yong-jun, XIE Xian-kun. Determination of Thermal Parameters of Concrete by Reverse Analysis of Test Results[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(2):175-177.
- [15] 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.