

化子闸泵站施工期混凝土温度应力反分析

许 朴

(上海友为工程设计有限公司, 上海市 200093)

摘 要: 根据化子闸泵站施工现场的实测温度资料, 基于大体积混凝土结构温度场有限元精细仿真分析模型与遗传优化算法对泵站泵送混凝土的热学参数进行反演分析, 得到混凝土热学特性参数; 然后以实际施工情况对全计算域进行反馈分析。结果表明, 计算值和实测值比较接近, 很好地反映了施工期混凝土实际的温度变化过程, 可指导实际施工。化子闸泵站工程的温控防裂措施起到了预期的防裂作用, 达到了较好的防裂效果。

关键词: 化子闸泵站; 反分析; 遗传优化算法; 热学参数; 温度应力场; 泵站泵送混凝土

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0182-05

Inverse Analysis on Temperature Stress of Concrete during Construction of Huazizha Pumping Station

Xu Pu

(Shanghai Youwei Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the measured temperature data in the construction site of Huazizha Pumping Station, the thermal parameters of pumping station to pump the concrete are inversely analyzed by the finite element fine simulation analysis model of temperature field of mass concrete structure and the genetic optimization algorithm to obtain the thermal characteristic parameters of concrete. And then the feedback analysis on the whole calculation domain is carried out according to the actual construction situation. The result shows that the calculation value is closer to the measured value, which reflects the actual temperature change process of concrete during construction period better so as to guide the practical construction. The temperature control and crack prevention measures of Huazizha Pumping Station Project have played the expected anti-cracking role and achieved a good anti-cracking effect.

Keywords: Huazizha Pumping Station; inverse analysis; genetic optimization algorithm; thermal parameters; temperature stress field; pumping station to pump concrete

0 引 言

化子闸泵站工程是姚江东排分洪工程梯级接力泵站(3级)之一, 设计排涝流量为 $150 \text{ m}^3/\text{s}$, 采用4台竖井贯流泵—列布置, 单泵流量 $37.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 位于宁波市灵山村。泵站站身为整底板布置, 不设永久缝, 平面尺寸为 $45.2 \text{ m} \times 47.4 \text{ m}$ (垂直水流向宽度 $\times$ 顺水流向长度), 底板厚度为 $2.00\sim 4.46 \text{ m}$, 进出水流动墩墙厚 $1.60\sim 2.00 \text{ m}$, 采用C30泵送混凝土浇筑^[1]。

由于混凝土内水泥水化反应及热传导能力的差异, 在浇筑初期, 泵站的底板、墩墙结构内部的温度分布基本表现为内部高, 表面相对低, 导致混凝土结

构内不同部位变形不同。同时, 泵站流道墩墙为复杂异形结构, 相互之间约束大, 且顺水流向厚度也有较大变化, 则渐变区间及较厚部位表面易产生较大拉应力进而发生开裂。浇筑完成后温降阶段, 受基础或下部“老”混凝土约束, 混凝土温降收缩变形产生拉应力, 降温幅度越大, “老”混凝土弹模越高, 则温降拉应力越大。由于泵站墩墙、流道直接浇筑在底板“老”混凝土上, 且其结构长度远大于厚度变形约束, 结构整体收缩产生拉应力就很大, 很容易出现结构内部贯穿性裂缝^[2-3]。

由于泵站混凝土施工边界条件复杂, 影响混凝土热学特性参数(绝热温升、表面放热系数及水管通水冷却效应等)因素也较多, 不确定性较强, 应进行施工期混凝土浇筑过程及一段时间内其温度的现场观测跟踪并最大限度地实时进行反分析研究来指导

收稿日期: 2024-02-21

作者简介: 许朴(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事城市水利工程设计工作。

实际的施工期温控防裂^[4]。因此,基于大体积混凝土温度应力场的有限元精细仿真计算与遗传优化算法,本文对化子闸泵站施工期已浇筑混凝土现场实测温度资料进行反演分析得到表面放热系数、绝热温升等重要热学参数;并根据实际施工情况对化子闸泵站工程全计算域进行温度应力场反馈仿真计算,分析施工期泵站混凝土结构温度及引起的温度应力变化特性、温控防裂措施实际效果及改进措施。

1 计算原理

1.1 非稳定温度场^[5]

计算域 R 内,混凝土不稳定温度场满足热传导控制方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (\forall (x, y, z) \in R)$$

式中: T 为计算域内混凝土温度; α 为导温系数; θ 为绝热温升,随混凝土龄期变化; t 为计算时间; τ 为混凝土龄期。

1.2 徐变温度应力场^[5]

复杂应力状态下,混凝土应变增量通常满足如下表达式:

$$\{\Delta \varepsilon_n\} = \{\Delta \varepsilon_n^e\} + \{\Delta \varepsilon_n^c\} + \{\Delta \varepsilon_n^T\} + \{\Delta \varepsilon_n^s\} + \{\Delta \varepsilon_n^0\}$$

式中: $\{\Delta \varepsilon_n^e\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^c\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^T\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^s\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_n^0\}$ 分别为弹性、徐变、温度干缩、自生体积变形应变增量。

1.3 遗传优化算法

遗传优化算法是一种概率搜索算法,为达尔文生物进化理论基础上的仿生算法,具体自适应性、全局优化性的特点,能够很好地处理目标函数多峰值、变量离散性大、搜索范围狭小呈凹形等优化问题^[4]。算法优选实现过程步骤为:编码→初始化过程→适应度函数构造→算子选择→算子交叉→算子变异^[6-7]。

2 化子闸泵站工程反分析

2.1 计算模型及基础资料

2.1.1 计算模型

对化子闸泵站其中两孔离散建模成有限元计算网格模型,单元总数为 76 024 个,节点总数为 88 096 个,坐标原点选择在进口处流道, X 轴顺水流方向为正, Z 轴竖直向上为正, Y 轴正向指向左岸(右手螺旋法则),见图 1。

非稳定温度场有限元计算时,地基底面及四周

边面采用绝热面边界,上表面为散热面边界。结构施工缝、永久分缝等未浇筑前为散热面边界,浇筑后为绝热面边界。结构对称面为绝热结构面,除了对称面采用绝热面边界外,其他均采用散热面边界。

徐变温度应力场有限元计算时,结构对称面及地基底面、四周设置为法向约束外,其他表面均设置为自由边界。

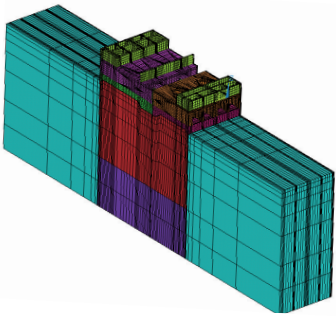


图 1 有限元计算模型网格

2.1.2 现场温控措施实施方案

化子闸泵站底板及墩墙属于大体积混凝土,施工中采用温控措施如下:(1)考虑在钢筋混凝土中掺抗裂纤维,以增强结构抗裂、抗裂耐磨性能,预计提升混凝土抗拉强度 20%;(2)底板和墩墙内采用水管通水冷却的方案降低底板及侧墙混凝土水化反应产生的温升;(3)部分墩墙采用空箱内设混凝土砌块的结构,降低混凝土水化热;(4)底板和墩墙垂直、顺河向分别布置两道后浇带(厚 800 mm),减少施工期的基础约束长度;(5)夏季浇筑采用深井水或加冰拌制混凝土,并对粗骨料进行喷水冷却等措施;(6)冬季浇筑做好混凝土表面的保温工作和大体积混凝土的养护。

2.1.3 特征点布置

据温度场分布规律,选取 4 个特征位置布置温度测点,具体位置坐标和示意图 2。

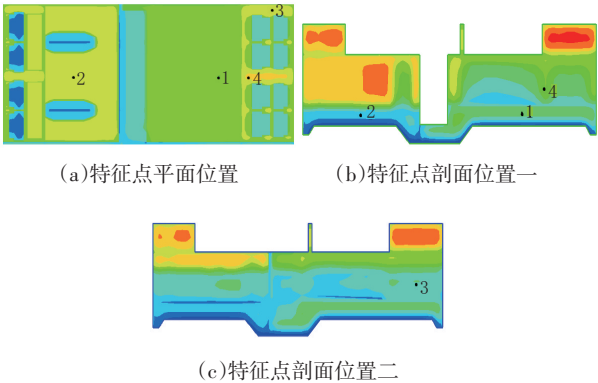


图 2 特征点位置示意

2.2 反演分析

采用不同的温控参数和边界条件(不同浇筑块的通水流量和通水天数,对流道上、下层以及顶部墙体采取不同规格保温材料覆盖)对化子闸泵站的温度场进行反演计算,选取最符合实际情况的试算工况作为最优反演工况,从而确定、验证混凝土热学参数和边界条件。反演工况如下:各浇筑块初温根据实测初始温度的平均值进行赋值;流道底板和流道主体结构采用等效冷却方式模拟通水冷却效果。实际冷却水管措施为:采用直径约 4.24 cm 的预埋钢管

通水冷却,钢管壁厚 2.5 mm,冷却水采用深井地下水(水温在 15~20℃);流道薄壁段水管布置密度大致为 0.8 m×0.8 m(水平间距×竖直间距),渐变段水管布置较稀疏,大致为 1.2 m×0.8 m(水平间距×竖直间距)。

最优反演工况下,各特征测点非稳定温度场仿真计算值与实测温度值对比见图 3。从图 3 可以看出,各特征测点温度的变化过程吻合程度很好,且温度反演计算值和实测温度值也比较接近,误差基本在 2%~5%。

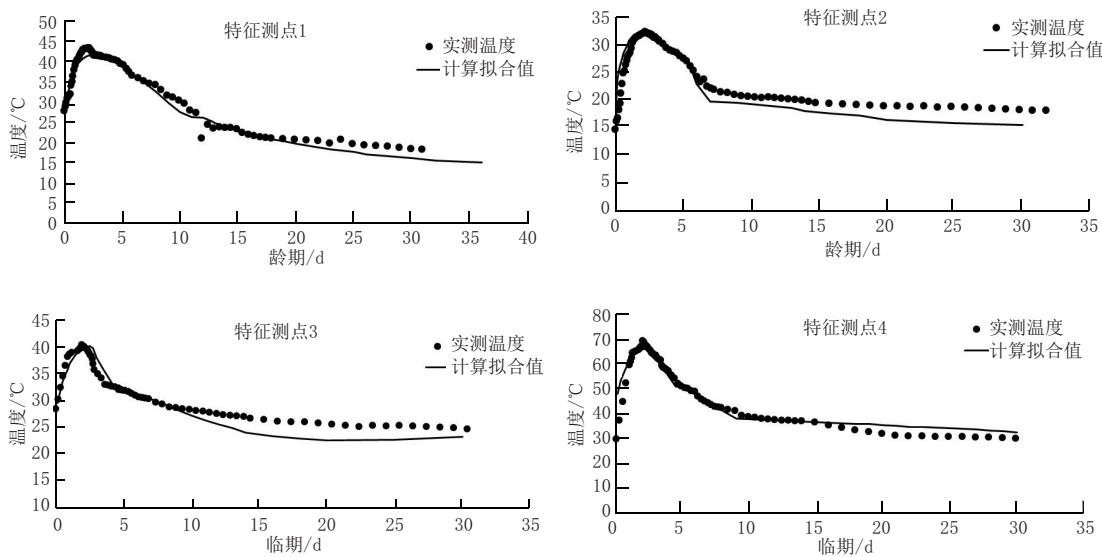


图 3 实测温度与反演温度计算值的比较

本次反演计算获得的混凝土绝热温升如下:

C25 绝热温升 θ :

$$\theta(\tau)=38\times(1-e^{-0.95\tau^{0.84}})^{\circ}\text{C}$$

C30 绝热温升 θ :

$$\theta(\tau)=51.3\times(1-e^{-0.69\tau^{0.56}})^{\circ}\text{C}$$

其他热学参数详见表 1,表面散热系数、水管冷却措施的削峰力度、温降速率见表 2。

表 1 混凝土热学参数

项目	导热系数/ ($\text{kJ}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$)	比热/ ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	导温系数/ ($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	线胀系数/ ($10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	最终弹性 模量/GPa
C25	6.58	0.93	31.1	9.50	0.167	2 261	28
C30	10.82	0.89	52.9	8.90	0.167	2 316	35

2.3 反馈分析

根据确定的相关热学边界条件及实际工程施工过程中的环境变化情况,对化子闸泵站计算模型进行混凝土施工温度应力场的仿真计算。计算结果详见图 4~图 6。

根据反馈分析结果可知:底板是 1 月份浇筑完成的,当时环境温度较低,因此混凝土的水化反应历时较长,且有水管通水冷却措施,总体水化放热量较小。由温度包络图可见,泵站混凝土底板内部最高温度达到 45.0℃,大部分区域最高温度在 40~43℃。

底板内部最大拉应力为 2.8 MPa,底板外壁表面局部小范围区域最大拉应力达到 3.8 MPa。由温度历时曲线图可见,底板内部基本在 2 d 达到温度峰值,木模板拆除后,内部温度逐步降低,特征点 1、2 所处位置未出现早龄期拉应力超标现象。

泵站两侧墩墙在 4 月份浇筑完成,由温度包络图可见,侧墩墙内部混凝土内部最高温度为 40℃,大部分区域最高温度在 33~37℃,这是因为侧墩墙内部采用部分预制砌体代替了现浇混凝土,减少混凝土用量进而降低了墩墙结构整体水化热量。内部最

表 2 化子闸泵站温控措施参数					
浇筑块	表面散热系数/ [kJ/(m ² ·d·℃)]		水管冷却 削峰 力度/ ℃	温降速率/ (℃·d ⁻¹)	
	龄期/d	采用值		龄期/d	采用值
垫层	0~7	150	—	—	—
出水流道底板	0~3	100	3	3~11	1
	3~7	150	—	—	—
	>7	500	—	—	—
进水流道底板	0~7	150	—	3~5	3
	>7	500	—	—	—
底板后浇带	0~7	150	—	—	—
	>7	500	—	—	—
侧墩墙	0~7	150	8	3~5	8
	>7	500	—	—	—
出水流道	>0	100	10	3~5	8
进水流道	0~7	150	2	2~5	16
	>7	500	—	6~10	3
出水流道 0 m 高程以上	0~7	150	—	—	—
	>7	500	—	—	—
进水流道 0 m 高程以上	0~7	150	—	—	—
	>7	500	—	—	—
流道后浇带	0~7	150	—	—	—
	>7	500	—	—	—

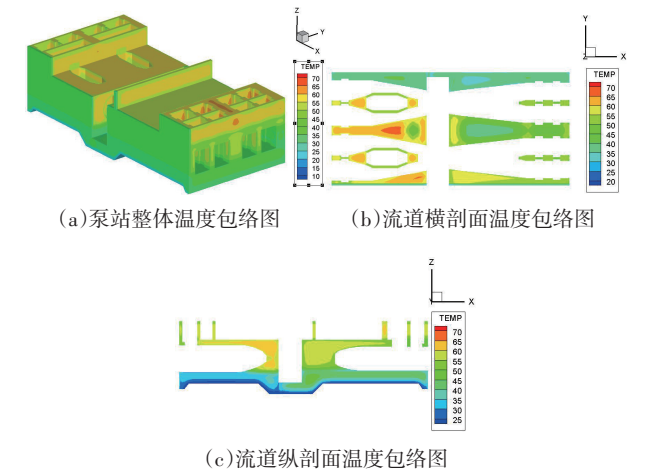


图 4 化子闸泵站温度包络图(单位:℃)

大拉应力最大为 2.3 MPa,侧墩墙表面局部小范围(后浇带附近)最大拉应力达到了 4.0 MPa。由温度和应力历时曲线图可见,侧墩墙内部 2 d 左右达到温度峰值,早龄期拉应力未出现超标现象。

泵站流道混凝土是在 7—8 月份浇筑,环境温度较高,混凝土的水化反应充分且迅速,水化放热量大且集中,温度峰值也随之升高。流道内部大部分区域最高温度超过 55℃,局部甚至达到 70℃,表面最高温度也超过 55℃。在水管冷却和表面早龄期木模板保温的作用下,虽然混凝土内部温度较高,但早龄期内外温差不大,内部混凝土最大拉应力基本在

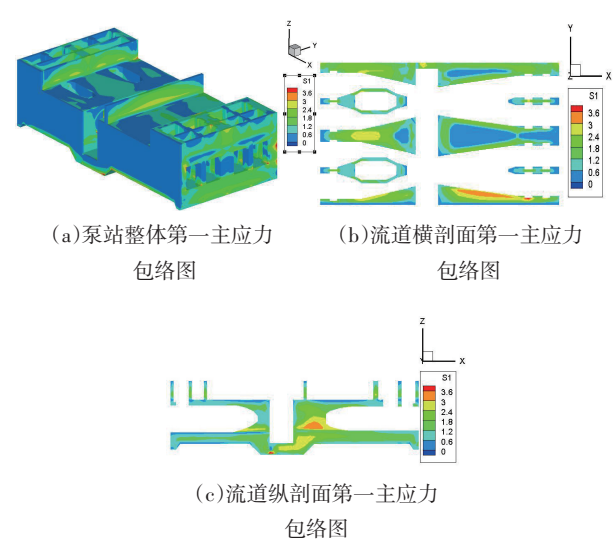


图 5 化子闸泵站应力包络图(单位:MPa)

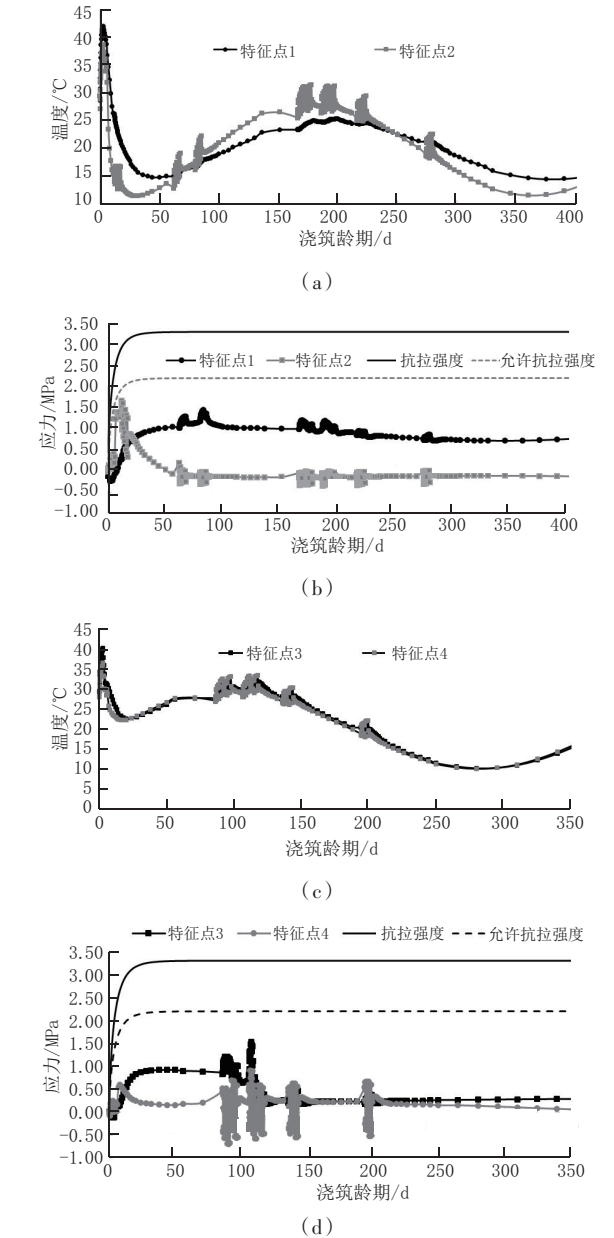


图 6 化子闸泵站特征点温度-应力历时曲线

3.0 MPa 以下,局部拉应力达到 3.5 MPa,流道表面局部(门槽、直角转弯处等小范围区域)最大拉应力达到了 4.0 MPa。由温度-应力历时曲线图可见,流道内部在 2 d 左右达到温度峰值,早龄期拉应力同样未出现超标现象。

3 结 论

(1)除部分墩墙体外,化子闸泵站底部和流道大部分区域的混凝土拉应力未超过抗拉强度(抗拉强度为 3.0 MPa)。对于少数超过抗拉强度的区域(主要在少量表层区域),考虑到化子闸泵站 0.00 m 高程以下部位混凝土掺了改性高纯聚丙烯纤维,可提高混凝土约 20% 的抗裂能力,预计抗拉强度可提高为 3.6 MPa。此外,纤维和钢筋可将较大的可见裂缝转化为多条微小的不可见微裂缝。所以,截至目前,并没有发现肉眼明显可见的裂缝。施工期一共模拟了 500 d,即从第一仓大体积混凝土浇筑一直到运行前。根据仿真计算结果,预计在运行前,内部混凝土拉应力不会超过抗拉强度(考虑纤维则抗拉强度为 3.6 MPa),混凝土满足强度要求,内部不会产生深层或贯穿性裂缝。

(2)化子闸泵站局部表层混凝土拉应力超过抗拉强度,主要原因可能是拆模后内外温差、温降幅度和温降速度都较大,从而导致表面拉应力骤升。另

外,上层混凝土浇筑引起上下层之间变形不协调也是引起层间混凝土应力变大的原因,但其拉应力超过允许值的范围限定在新老浇筑块接触面一定深度区间,不会深入到内部。

(3)总体来看,化子闸泵站的温控防裂措施(低温季节浇筑、设置后浇带、水管冷却、早龄期保温等)起到了预期的防裂作用,达到了较好的防裂效果。

(4)施工期温度应力场的反分析对泵站混凝土温控防裂研究具有实际应用价值,在现场条件复杂或者缺乏试验数据的情况下,是切实可行的获取热学参数进而进行仿真计算的方法。

参考文献:

- [1] 许朴. 化子闸泵站施工期混凝土温控防裂技术分析[J]. 浙江水利科技, 2021(6): 43-47.
- [2] 许朴, 朱岳明, 贲能慧. 倒 T 型混凝土薄壁结构施工期温度裂缝控制研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 969-975.
- [3] 潘源. 泵闸工程大体积混凝土结构裂缝控制关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(4): 153-156.
- [4] 许朴, 朱岳明, 贲能慧. 宝应泵站流道混凝土施工期温度场的反分析[J]. 水力发电, 2008(2): 29-31.
- [5] 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.
- [6] 张晓绩, 戴冠中, 徐乃平. 一种新的优化搜索算法——遗传算法[J]. 控制理论与应用, 1995(6): 265-273.
- [7] 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.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

