

徐州刘山北泵站大体积混凝土 施工期温控防裂应用研究

杨翠萍¹, 孟广清¹, 石方建¹, 张智沛², 孙巧荣², 强 晟²

(1. 徐州市水务局, 江苏 徐州 221018; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:徐州刘山北泵站大体积混凝土由于泵站结构形式复杂等因素而导致施工期容易开裂,采用埋置式冷却水管模型的三维有限元计算程序,对该泵站的大体积混凝土结构在施工期的温度场和应力场进行仿真计算。结果表明,针对大体积混凝土内外温差和泵站本身结构的复杂性,忽视采用温控措施将导致多个区域混凝土表面产生超抗拉强度的拉应力。通过尝试多种温控和结构优化调整综合措施,最终能将施工期拉应力降至抗拉强度以下以避免开裂。工程最终防裂效果理想,所采取措施可为类似工程提供参考。

关键词:泵站; 大体积混凝土; 温控防裂; 施工期; 应力

中图分类号:TV544

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)07-0049-05

Research and application on temperature control and crack prevention measures of mass concrete during construction period in Xuzhou Liushan North Pumping Station

YANG Cuiping¹, MENG Guanqing¹, SHI Fangjian¹, ZHANG Zhipei², SUN Qiaorong², QIANG Sheng²

(1. Xuzhou Water Conservancy Bureau, Xuzhou 221018, Jiangsu;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu)

Abstract: Due to the complicated structure of the pumping station, the mass concrete of Xuzhou Liushan North Pump Station is easy to crack during the construction period. The temperature field and the stress field of the mass concrete structure of the pumping station during the construction period were simulated through three-dimensional finite element calculation program using embedded cooling water pipe model. The results showed that in view of the difference between internal and external temperature in the mass concrete and the complexity of the pumping station, failure to use temperature control measures would result in tensile stresses exceeding the tensile strength of concrete in multiple surface areas. By using a variety of temperature control and structural optimization adjustment measures, the tensile stress during construction could be reduced below the tensile strength to avoid cracking. The project had an excellent anti-cracking effect and the measures could provide a reference for similar projects.

Key words: pumping station; mass concrete; temperature control and crack prevention; construction period; stress

1 研究背景

徐州刘山北泵站为一座中型泵站,永久建筑物

混凝土使用年限为 50 年,横河向并列布置有 5 台机组,站身段顺河向长度 29.55 m,横河向 29.30 m,站身段无纵缝和横缝。泵站水泵机组中心距

收稿日期:2019-04-29

作者简介:杨翠萍(1965—),女,本科,高级工程师,主要从事工程建设管理工作。

5.0/5.1 m,变截面底板最小厚度 1.2 m,最大厚度 3.19 m。进水流道边墩厚为 1.2 m,中墩厚为 1.0 m。进水流道肘部和出水流道驼峰处分别存在约 2 m 厚的大体积混凝土。此外,站身段还存在多处长墙体,厚度有 0.6 m、0.8 m、1.0 m 不等。出水流道墩墙厚度渐变,从 4 m 左右渐变至 1.2 m 或 1 m。混凝土标号为 C30,绝热温升终值较高;流道结构形式复杂,薄壁墩墙较多,且不设纵缝和横缝,施工期极易产生裂缝。因此,在施工前需要进行仿真计算,并需预先提出合理的防裂措施。

对于大体积混凝土的温控防裂研究,国内外已经取得了较大进展。针对施工期的温控防裂研究,前人主要做了以下探索:张瀚等^[1]采用考虑徐变影响的时变温度应力计算有限单元法对碾压混凝土坝施工期的温度场和应力场仿真分析;颌志强等^[2]以精细化仿真分析为手段,系统分析了影响堆石坝面板温度应力时空分布特性和温控防裂措施的影响;潘希强等^[3]采用三维有限元仿真模拟分析与跟踪反馈分析相结合的手段,对大坝进行动态跟踪反馈分析,并提出施工期温控优化措施与建议;由国文等^[4]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;刘启波等^[5]采用考虑冷却水管离散模型的温度场应力场有限元仿真计算方法,研究了超长底板新型水闸结构混凝土的防裂方法。

本文主要运用埋置式冷却水管模型^[6-7]的三维非稳定温度场和应力场有限元^[8-9]的计算程序,研究了刘山北泵站的大体积混凝土结构在施工期的温度场和应力场的分布规律,分析其应力特征,并通过尝试采取系列综合的防裂措施,避免了开裂现象,保障了工程质量,可为以后的类似工程提供参考。

2 计算模型和边界条件

考虑结构的对称性,取泵站的一半(两孔半)进行建模和仿真计算。泵站的有限元模型如图 1 所示,单元总数为 122778 个,节点总数为 145009 个。坐标原点位于进口处垫层底部,原点在横河向位于 5 个机组段的中心线上。Z 轴竖直向上,X 轴指向水流方向,Y 轴按右手螺旋法则指向左岸。

温度场仿真计算中,地基的四周和底面为绝热边界,上表面为散热边界。结构对称面为绝热边界。施工临时缝面、结构永久缝面当未被覆盖时为

散热边界,覆盖后为绝热边界,其他表面均为散热边界。

应力场仿真计算中,地基的四周和底面施加法向约束,上表面为自由边界。结构对称面施加法向约束,结构永久缝面为自由边界,其他表面为自由边界。

3 计算参数和浇筑分块

徐州市多年平均气温 14.48℃,最高月平均气温 27.1℃(7 月),最低月平均气温 0.4℃(1 月),当地多年月平均气温见表 1。

计算时,将多年月平均气温拟合成一条余弦曲线:

$$Ta(t) = 14.48 + 13.35 \times \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - 7.0)\right] \quad (1)$$

式中, τ 为月份。

参照刘山北泵站地质资料施工图知,底板以下地基材料主要为含砂壤土和中粗砂,由于缺乏实测的地质热学参数,参照工程经验选取热学参数,力学参数来自地质报告,详见表 2。

刘山北泵站采用 C30 混凝土进行浇筑,混凝土施工配合比及热力学参数见表 3;采用经验公式并结合实际工程施工经验获得混凝土其他热力学参数见表 4。

绝热温升 θ (℃) 的计算公式如下:

$$\theta(\tau) = 51.4 \times (1 - e^{-0.44\tau^{0.73}}) \quad (2)$$

式中, τ 为龄期(d)。

根据图纸和实际施工进度安排,将泵站沿高度方向分为 7 个浇筑块自下而上依次浇筑,分层分块示意图如图 2 所示。第一层混凝土于 2018 年 9 月 20 日浇筑,各层浇筑间歇期 20 d。

在泵站进水流道处布置冷却水管,冷却水管采用直径 4.0 cm 的钢管,水管的布置密度初步设定为 1.0 m × 1.0 m (水平间距 × 竖直间距)。通水冷却时采用常温水进行冷却,混凝土水化热温度峰值前单根水管流量为 120 m³/d,温度峰值后,根据温降速率要求,逐步减小流量。混凝土浇筑时就开始通水冷却,通水时长为 14 d。泵站进水流道水管布置如图 3 所示。

4 仿真计算结果分析

刘山北泵站特征剖面和特征点示意图如图 4 所示,为了便于考察结构内部的最高温度和最大拉

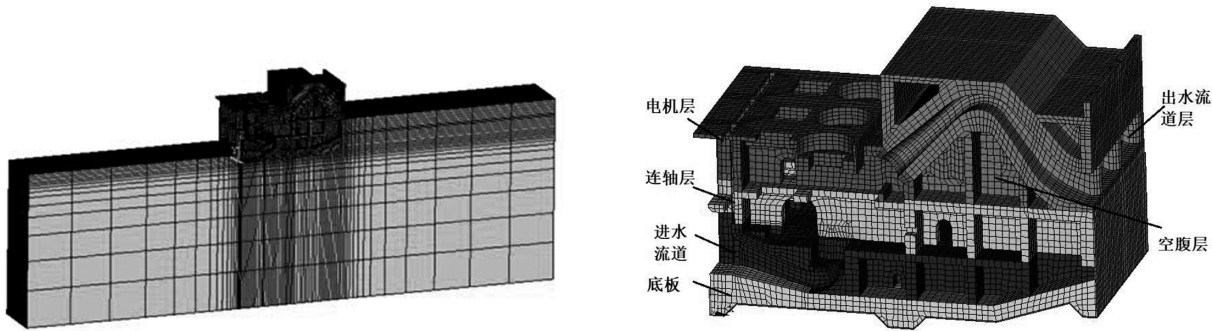


图 1 泵站的有限元模型

表 1 当地多年月平均气温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
实测值(℃)	0.4	2.7	8.0	15.1	20.6	25.0	27.1	26.3	21.7	15.7	8.5	2.6
拟合值(℃)	1.5	5.0	11.0	17.9	23.9	27.4	27.4	23.9	17.9	11.0	5.0	1.6

表 2 地基热力学参数

地质	导热系数 λ (kJ/(m·h·℃))	比热 c (kJ/(kg·℃))	导温系数 a (m ² /h)	线胀系数 α (10 ⁻⁶ /°C)	最终弹性模量 E_0 (MPa)	密度 ρ (kg/m ³)	泊松比 μ
含砂壤土 1	2.41	1.91	0.0012	8.0	19.44	2030	0.30
中粗砂	4.06	0.699	0.0028	8.0	27.40	2020	0.3
含砂壤土 2	2.41	1.91	0.0012	8.0	28.20	2000	0.30

表 3 C30 混凝土配合比和热学参数

施工配比	单位	水	水泥	粉煤灰+矿粉	外加剂	砂	石灰石子	总计
重量	kg	147	290	80	9.32	722	1080	2329.30
占比	%	6.35	12.45	3.43	0.40	31	46.37	100
导热系数 λ	kJ/(m·h·℃)	2.16	4.59	4.59	4.59	11.10	13.92	10.91
比热 c	kJ/(kg·℃)	4.19	0.54	0.54	0.54	0.75	0.78	0.98

表 4 C30 混凝土热力学参数

混凝土 标号	导热系数 λ (kJ/(m·h·℃))	比热 c (kJ/(kg·℃))	导温系数 a (m ² /h)	线胀系数 α (10 ⁻⁶ /°C)	泊松比 μ	密度 ρ (kg/m ³)	最终弹模 E_0 (GPa)
C30	10.906	0.982	0.00477	0.86	0.167	2329	32

应力,在应力较大的特征剖面进行了切片。为了显示典型关键位置的温度和应力随龄期的发展历时过程,在泵站易裂部位的表面和内部选取特征点 1 和特征点 2。

限于文章篇幅,仅对初始工况和最佳措施工况

进行计算结果分析,具体优化过程工况略去。

工况 1(初始工况):混凝土自然入仓,无水管冷却,无温控防裂措施。

工况 2(最佳措施工况):①在工况 1 基础上,通过增设门洞的方式,减小墙体长度;②连轴层以下

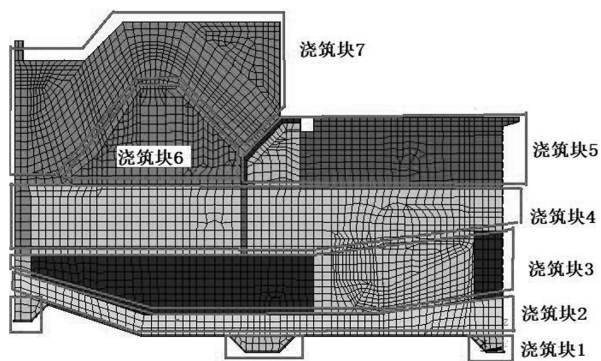


图2 浇筑分层分块示意图

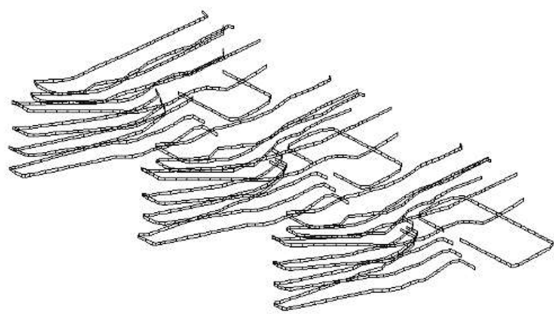


图3 泵站进水流道水管布置

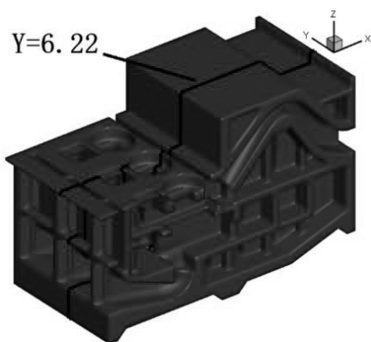


图4 特征剖面 and 特征点示意图

(包括连轴层)浇筑层外边墙混凝土在龄期 30 d 后回填土;③考虑冬季封闭结构孔口挡风保温措施,此外各浇筑层拆模后都立即覆盖保温材料,保温至第 2 年 3 月;④对进水流道拉应力超标区域,加密水管布置,加密到 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。

工况 1 和工况 2 在 $y = 6.22\text{ m}$ 处(即流道中心剖面)的温度包络图和应力包络图如图 5~6 所示。特征点的各个工况的温度和应力历时曲线图如图 7~8 所示,图中的应力均为第一主应力。

由工况 1 的计算结果可见,对于底板以上浇筑层,混凝土厚度最大处为进水流道肘部,此处温度最高。对于进水流道,肘部拉应力最大,如果在龄

期 7d 拆除肘部木模板,表面点 1 的拉应力骤升,最大拉应力达 3.5 MPa ,早龄期就超过了混凝土的抗拉强度,延迟拆模则可以确保肘部应力安全。进水流道层和空腹层的拉应力超标区域都集中在横向和纵向墩墙,主要原因是由于墩墙结构薄而长,而两边结构混凝土较厚,当冬季混凝土收缩时,截面面积最小处产生的拉应力最大。

由工况 2 的计算结果可见,在多项防裂措施综合作用下,进水流道表面和内部的特征点的温度峰值分别降为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大拉应力分别降为 1.9 MPa 、 2.8 MPa 。外边墙表面和内部的最大拉应力分别降为 2.8 MPa 、 1.8 MPa ,均低于抗拉强度(3.0 MPa)。

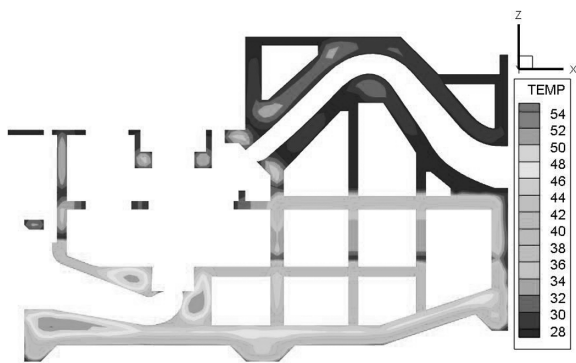
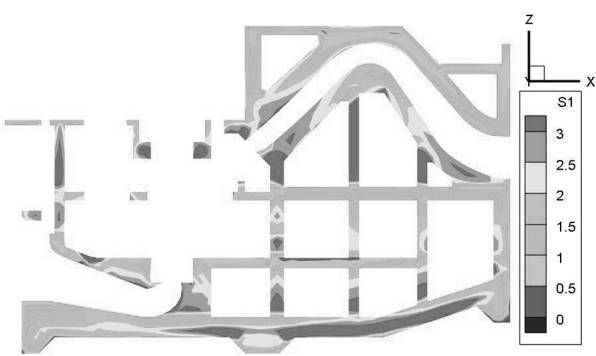
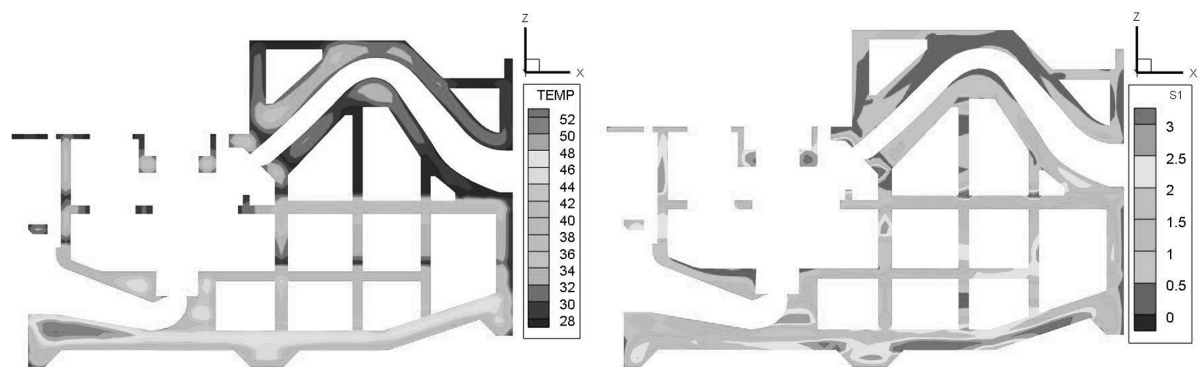
(a) $Y = 6.22\text{ m}$ 处温度包络图($^{\circ}\text{C}$)(b) $Y = 6.22\text{ m}$ 处应力包络图(MPa)

图5 工况 1 流道中心剖面包络图



(a) $Y=6.22\text{m}$ 处温度包络图($^{\circ}\text{C}$) (b) $Y=6.22\text{m}$ 处应力包络图(MPa)

图 6 工况 2 流道中心剖面包络图

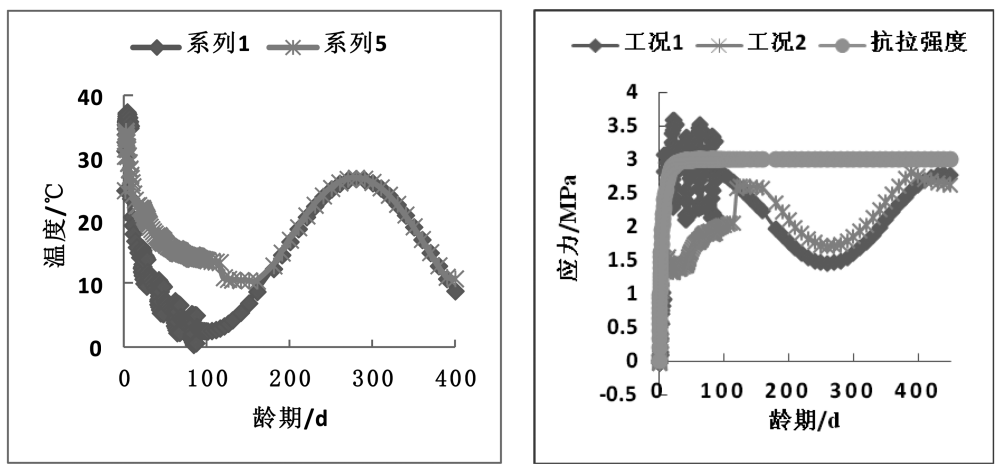


图 7 特征点 1 的温度和应力历时曲线对比图

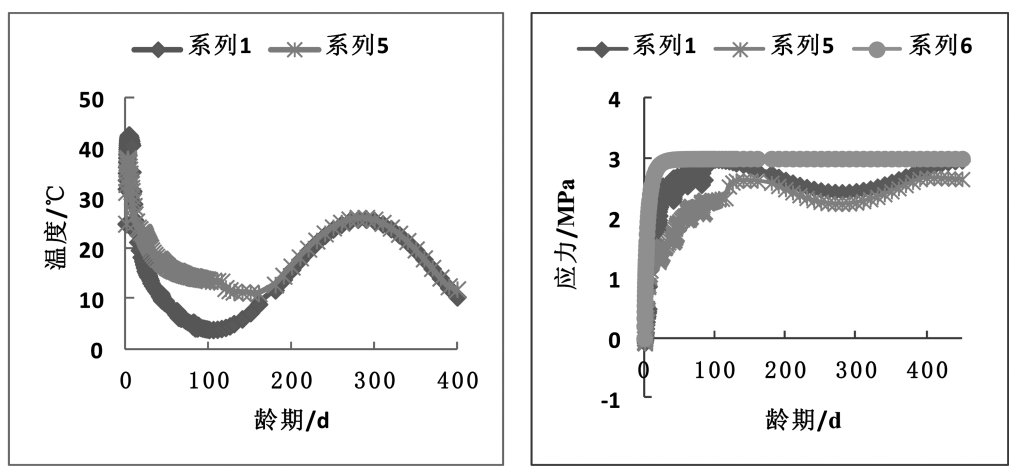


图 8 特征点 2 的温度和应力历时曲线对比图

5 应用效果

采取防裂措施执行后,取得了理想的防裂效果。本工程的大体积混凝土在 2018 年 9 月~2019 年 1 月浇筑,在 2018~2019 年冬季经历了多次寒潮侵袭,最低气温达到零下 10°C 。由于温控防裂措施合理,截至 2019 年 3 月中旬时,底板、进水流道、出水流道这些易裂的重要部位均未发现肉眼可见

裂缝;混凝土成型质量得到了有效提升。

6 结论

(1)刘山北泵站结构复杂,且全站主体结构不分缝,浇筑块尺寸长,防裂难度大。在施工前对其进行温控仿真计算,并提出合理可行的防裂措施建议,是十分必要的。

(下转第 57 页)

(上接第 53 页)

(2) 泵站结构的温控重点和难点是:底板、进水流道墩墙、出水流道墩墙;一般采取水管冷却 + 表面保温的综合温控措施可取得较好的防裂效果。

(3) 本文基于仿真分析提出的综合温控防裂措施的工况实施合理有效,可供类似工程参考。

参考文献:

- [1] 张瀚,陈建康,赵泽鹏,等.大温差地区碾压混凝土重力坝施工期温控防裂技术研究[J].中国农村水利水电,2018(12):161-164+168.
- [2] 颀志强,张振杰,董芸,等.基于数值仿真的堆石坝面板施工期温控防裂方法研究[J].水利水电技术,2018,49(S1):33-41.
- [3] 潘希强,刘有志,胡平,等.藏木水电站大坝混凝土施工期温控防裂标准与措施动态优化分析[J].河海

大学学报(自然科学版),2015,43(04):300-306.

- [4] 由国文,郭磊,陈守开.寒潮作用下大型水闸施工期温控防裂仿真分析[J].水利水电科技进展,2015,35(03):71-74.
- [5] 刘启波,魏林坚,强晟,等.新型超长底板水闸混凝土结构施工期温控防裂研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2011,33(02):1-4.
- [6] 强晟,张杨.大体积混凝土施工期温度场和应力场的仿真算法研究[M].南京:河海大学出版社,2013.
- [7] 左正,胡昱,李庆斌.含水管混凝土温度场分析方法进展[J].水力发电学报,2018,37(07):74-90.
- [8] 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,1999.
- [9] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2009.