

泵闸流道混凝土结构温度场三维仿真分析及温控措施优化

汪玮昕

(中交水利水电建设有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要:为解决泵闸流道异形混凝土结构容易产生温度裂缝的问题,基于航塘港南延伸整治工程的实践,依据热传导理论,建立泵闸流道混凝土结构温度场计算模型并进行三维仿真分析。针对计算成果,制定了调整冷却通水管路、调整通水参数、改进混凝土特性和施工条件以及设置后浇带的温控优化措施。对比温度场模型的计算反馈值与实测值,并检查现场混凝土实体质量,结果表明,温度场模型仿真算法可靠、温控优化措施有效,因此认为该模型可成熟地运用于后续工程施工过程。

关键词:泵闸流道;异形混凝土结构;温度场模型;温控优化措施

中图分类号: TV523

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0274-07

0 引言

近年来,高性能泵送混凝土由于其具有浇筑速度快、施工方便、节约人力等优点,被越来越多地应用于泵站、水闸等水利工程中。然而,对于泵闸流道结构,由于其结构复杂,很多部位在作为大体积混凝土浇筑的同时,也是薄壁混凝土结构,而且受外界约束条件较多,加之泵送混凝土本身具有水化反应快、绝热温升高的特点^[1],施工过程中极易产生较大的温度应力。如果不能有针对性地采取温控措施,则混凝土结构中极易出现裂缝,甚至是贯穿裂缝^[2],影响泵站的防渗性能和整体性能。目前行业内对于泵闸流道结构混凝土温控措施的专门研究并不深入,通常作为普通大体积混凝土结构进行处理,温控效果不理想,对于施工过程的指导意义有限。本文基于航塘港南延伸整治工程的泵闸流道施工实践,建立泵闸流道混凝土结构温度场计算模型并进行三维仿真分析^[3-6],针对计算成果提出温控优化措施,为今后的泵闸施工作业过程提供指导。

1 工程概况

航塘港南延伸整治工程位于上海市奉贤区,紧邻杭州湾,是处于上海浦东片区南排重要的口门之

一,工程建成后除满足防洪排涝等基本功能外,还可以有效提升河网水质,改善水环境并用于规划通航。工程等级为Ⅰ等,主要建筑物为1级水工建筑物。其中,泵站采用4流道单向排涝,顺水流方向长33 m,垂直水流方向长26.3 m。流道底高程为-3.4~-1.7 m,顶高程为1.5~2.9 m,为变截面结构,由矩形段、圆弧段和渐变段组成,流道典型断面结构如图1所示。流道混凝土强度为C35,抗渗等级为W6,混凝土工程量合计达1 200 m³,全部采用泵送混凝土施工。

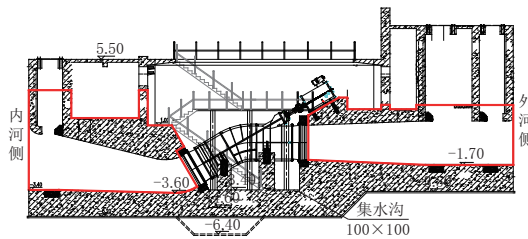


图1 流道典型断面结构示意图(单位:m)

2 计算原理

2.1 热传导方程

混凝土在拌合完成后,就会发生水泥的水化反应,使得混凝土内部温度随着时间的推移而发生变化。这一问题可描述为具有内部热源的热传导问题,根据热传导理论可推导出相应的平衡方程。这种混凝土内部的不稳定温度场 $T(x,y,z,t)$ 在混凝土结构的温度影响区域 R 内的变化应符合如下热传导方程^[7]:

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

收稿日期: 2023-02-22

作者简介: 汪玮昕(1988—),男,本科,高级工程师,从事水利工程施工技术研究。

$$\alpha=\frac{\lambda}{c\rho}$$

(2)

式中: θ 为混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; λ 为混凝土的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ 为混凝土的密度, kg/m^3 ; c 为混凝土的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2.2 考虑水管冷却和绝热温升的热传导方程

在此基础之上,将混凝土考虑成外表绝热的圆柱体模型时,绝热温升变化如下式:

$$\theta(\tau)=\theta_0\psi(\tau)$$

(3)

$$\psi(\tau)=\sum e^{-p(\tau-0.5\Delta\tau)}\Delta f(\tau)$$

(4)

因此,一般条件下,混凝土平均温度为:

$$T=T_w+(T_0-T_w)\phi(t)+\theta_0\psi(t)$$

(5)

式中: T 为混凝土平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为初始温度, $^{\circ}\text{C}$; T_w 为进口处水温, $^{\circ}\text{C}$; θ 为混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 为初始绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, h 。

对以上计算结果求偏导数,得到外表绝热的混凝土柱体在水管冷却和绝热温升作用下的温度上升速率为:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=(T_0-T_w)\frac{\partial \phi}{\partial t}+\theta_0\frac{\partial \psi}{\partial t}$$

(6)

如果外边界不绝热,通过外边界也存在热量流动,则热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+(T_0-T_w)\frac{\partial \phi}{\partial t}+\theta_0\frac{\partial \psi}{\partial t}$$

(7)

3 有限元仿真模型及计算条件

3.1 有限元仿真模型的建立

考虑泵站流道东西两侧均为泵站边墩结构,且流道混凝土与部分墩墙一起浇筑施工,因而选择流

道与部分墩墙共同建立有限元模型,坐标系以内河侧到外河侧的顺河向为 y 轴正方向,以从左岸到右岸方向为 x 轴正向,以铅直向为 z 轴,用8节点6面体单元进行空间离散,流道与边墙共划分出14 964个单元,如图2所示。

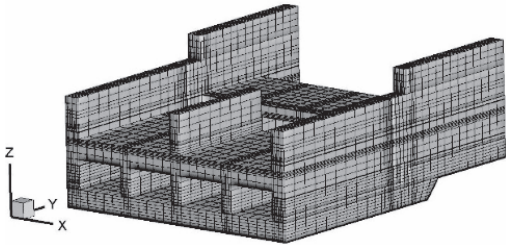


图2 泵站流道及墩墙有限元模型

3.2 有限元计算参数

3.2.1 温度场分析边界条件

参考《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)^[6]附录G,根据不同保温材料的类型选定相应的放热系数,可计算得到不同施工阶段所采用的表面放热系数。在进行泵站流道温度场分析时,泵站主体的混凝土底板已浇筑并养护完成,故作为不产热只传热的自由散热边界进行处理,放热系数取 $70.000\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。流道内部、墩墙四周为覆盖有木模板的散热边界,经计算得等效放热系数为 $27.541\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$;边墩外侧模板拆除后为覆盖有保温板的散热边界,放热系数计算得 $5.259\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$;顶面为有土工布的散热边界,放热系数取 $20.000\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。计算分析过程中所用的泵站流道混凝土主要热学和力学参数如表1所示。

表1 泵站流道混凝土主要热学和力学参数表

材料名称	比热容/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	表面放热系数/ $\text{kJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	线胀系数/ $(10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C})$	导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K}^{-1})]$	弹性模量/ GPa
泵站混凝土上表面	0.97	20	2 400	6.0	1.28	34
泵站混凝土侧面	0.97	27.541	2 400	6.0	1.28	34

3.2.2 气温计算

泵站流道浇筑时间计划为6月,气温最高值出现在14:00左右,进行计算时,气温可以按照如下公式进行近似计算:

$$T(\tau)=T_a+\frac{A}{2}\times\cos\left[\frac{\pi}{12}(t-14)\right]$$

(8)

式中: T_a 为混凝土浇筑当月的日平均气温,取 30°C ; A 为混凝土浇筑当月的日气温变化幅度,取 6°C 。

3.2.3 绝热温升计算

施工开始前,在实验室内采用强度为C35、抗渗等级为W6,且与流道混凝土相同配合比、相同原材

料、相同外加剂的混凝土制作试块,并测定混凝土绝热温升。

对实验测定数据进行拟合显示,混凝土水化热绝热温升曲线采用如下双曲线型公式:

$$T=\frac{\theta_0\tau}{n+\tau}$$

(9)

式中: θ_0 为最终绝热温升,取 54.00°C ; n 为拟合参数,取0.5125。

4 流道温度场仿真模型计算

4.1 流道温度场计算方案

流道计划浇筑时间在2020年6月。根据现场情

况设浇筑当时气温为 32℃,并对四种不同的方案开展仿真计算,设置四种温控方案如表 2 所列。

表 2 温度场计算方案

方案编号	冷却水管间距/m	通水时间/d	通水温度/℃	通水流量/(m ³ ·h)	表面放热系数kJ/(m ² ·h·℃)
Case0	不通水	/	/	/	70(不保温)
Case1	1.0	一期 14	15	4.0	20
Case2	1.0	一期 3	15	4.0	20
		二期 11	20	1.0	
Case3	1.5	一期 3	15	4.0	20
		二期 11	20	1.0	

注:为便于计算,设置表中冷却水管的水平间距与垂直间距相同。

4.2 流道计算模型特征节点

在进行仿真计算时,可以通过选取模型中的部分特征节点来分析温度发展变化规律。本文选取流道第一节(含流道边墩、流道中墩、流道顶板)的特征节点来进行计算和分析,特征节点汇总信息及在模型中的位置如图 3 所示。

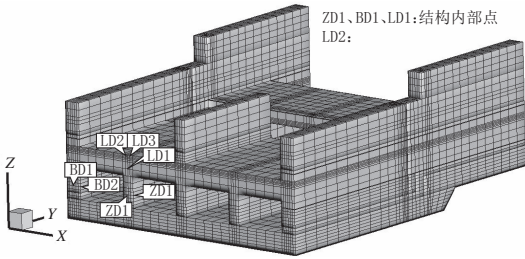


图 3 流道特征点分布图

4.3 温度场计算结果

流道中各特征点的计算结果汇总如表 3 所示。

表 3 流道特征点计算结果

特征点	最高温度/℃	最大内外温差/℃	最高温度龄期/d	最大温差龄期/d	前期平均降温速率/(℃·d ⁻¹)	停止通水温度/℃
Case0(BD1~2)	72.21	30.44	3.3	3.6	2.38	/
Case0(ZD1~2)	71.15	29.07	3.2	3.5	2.26	/
Case0(LD1~3)	74.47	33.22	3.7	4.5	1.76	/
Case1(BD1~2)	65.02	14.4	1.8	2.1	6.65	24.9
Case1(ZD1~2)	62.87	11.58	1.7	1.8	6.56	23.4
Case1(LD1~3)	67.24	17.28	2.1	2.7	5.82	33.1
Case2(BD1~2)	65.02	14.4	1.8	2.1	6.07	26.2
Case2(ZD1~2)	62.87	11.58	1.7	1.8	6.02	24.3
Case2(LD1~3)	67.24	17.28	2.2	2.7	5.1	34.2
Case3(BD1~2)	67.12	16.1	2.0	2.3	4.83	27.8
Case3(ZD1~2)	65.47	16.1	1.8	2.0	4.73	25.6
Case3(LD1~3)	69.19	18.75	2.2	2.7	4.25	36.0

由计算结果可以看出:

(1)Case0 的不通水、不保温方案中,各特征点最

高温度和最大内外温差相比通水保温方案明显偏高。Case0 方案中各特征点平均最高温度达到了 72.61℃,平均最大内外温差达到了 30.91℃,混凝土养护过程中会出现较大的温度应力。因此,在流道施工过程中,虽然各部位的混凝土浇筑方量并不很大,但仍有必要进行通水冷却,并在混凝土表面采取保温措施。

(2)对比 Case1 方案与 Case2 方案,Case2 方案采用了两期通水,而 Case1 方案全过程只采用了通一期 15℃的冷却水。两者最高温度和最大内外温差均相同,但采用 Case2 方案的两期通水降温,成本上更加经济,且 Case1 方案中,混凝土前期平均降温速率更快,更容易在混凝土内部产生内应力,因而在流道施工时,更适合采用两期通水降温的方案。

(3)对比 Case2 方案与 Case3 方案,两方案除冷却水管间距不同外,其他条件均相同,但 Case2 方案中混凝土各特征点平均最高温度相比 Case3 方案降低了 2.2℃,最大内外温差平均降低了 2.6℃。因而在施工条件允许的情况下,应尽可能按照 Case2 方案进行冷却水管的布置。

针对以上计算结果,进一步绘制前 14 d 温度过程线和温度云图(按 Case2 方案)如图 4 和图 5 所示。

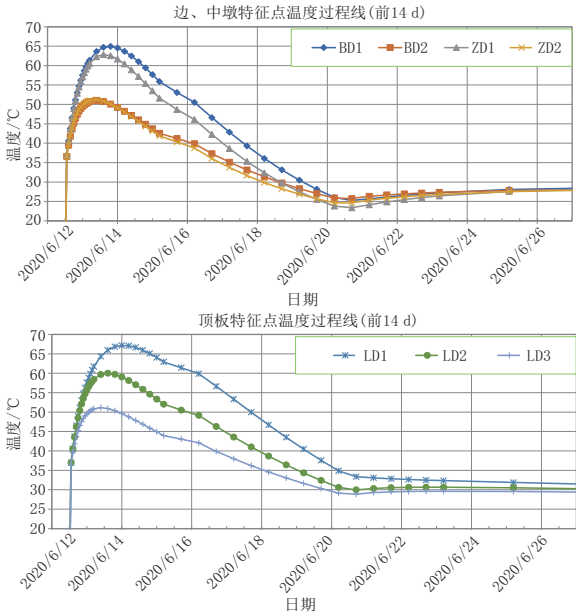


图 4 Case2 流道特征点温度过程线

分析以上温度过程线和温度云图,可以看出:

(1)流道顶板混凝土最高温度达 67.24℃,内外最大温差达 17.28℃,明显高于流道中墩和边墩部位的混凝土最高温度和最大温差。此外,流道顶板的混凝土最高温度出现在 2.2 d,相比中墩和边墩晚了 0.5 d 左右,流道顶板的混凝土最大温差出现在 2.7 d,

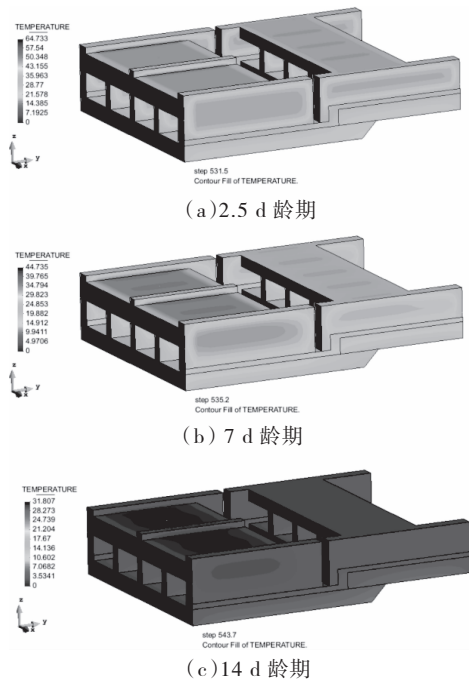


图5 Case2方案流道温度云图

相比边墩晚了 0.6 d,相比中墩晚了 0.9 d。产生这种结果的主要原因是由于顶板混凝土厚度较厚,表面散热相比边墩和中墩较慢,如果不采取针对性的措施,边墩和中墩的混凝土内部已经进入降温收缩过程,而顶板混凝土仍在升温膨胀的过程中,混凝土各层之间温度梯度变大,容易产生较大的温度应力。

(2)由于流道混凝土相比常规大体积混凝土结构,总体浇筑方量较小,散热界面较多,因而温度下降速率较快,流道各部位特征点温度过程线在 10 d 左右已经降至平稳,顶板和边墩、中墩混凝土降温速率均超过了 $5^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

(3)由流道温度云图可见,2.5 d 龄期时,流道混凝土与底板混凝土颜色差异较大,此时新浇筑的流道墩墙混凝土已处于温降期,与原底板的混凝土存在温度差,会产生相应的温度应力,新浇筑的墩墙受拉,原底板混凝土受压,因而需要采取一定的措施,避免应力超过混凝土的抗拉强度。随着混凝土养护时间的推移,7 d 龄期时,新老混凝土色差减小,温度差减小;14 d 龄期时,新老混凝土温度几乎一致。

(4)根据温度云图显示,流道混凝土温度最高位置出现在表面积大的外表面,如顶板与墩墙侧面,呈现中心温度稍高、四周温度低的椭圆形分布规律,混凝土内部温度梯度较大,是最容易出现温度裂缝的部位。14 d 龄期时,混凝土内部温度分布基本均匀。

4.4 应力场计算结果

针对 Case2 方案的温度场计算结果,进一步进行相应的应力场计算和研究,顺河向应力最大值及其对应龄期总结如表 4 和图 6、图 7 所示。

表 4 各特征点最大顺河向应力汇总表

特征点	最大顺河向应力 /MPa	出现龄期 /d
BD1	1.93	7.7
BD2	1.86	7.2
LD1	1.68	121

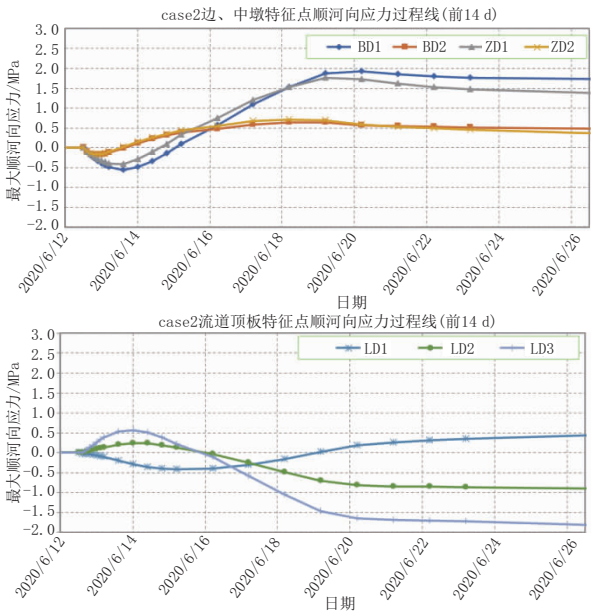


图6 Case2 流道特征点应力过程线

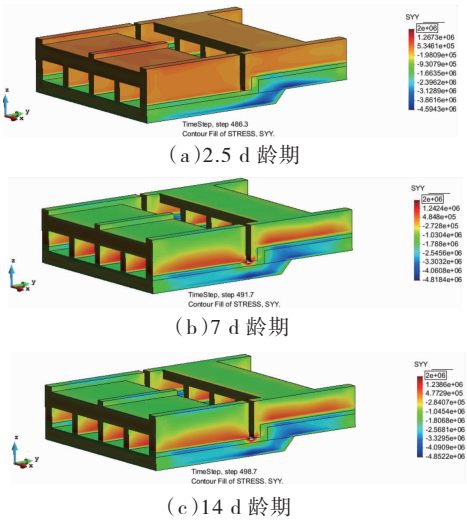


图7 Case2方案流道应力云图

从应力过程线和应力云图可以看出,最大拉应力出现在流道边墩位置,其应力强度没有超出即时抗拉强度。新、老混凝土接触部分应力分布规律表现为:接触面附近新混凝土外表面受拉,而老混凝土外表面受压,形成半椭圆形的拉、压应力区,且应力水

平沿高程分别向上下递减。

5 流道混凝土温控指标

参考《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)^[7]中大体积混凝土温控指标的要求,结合本项目混凝土的设计参数以及温度模拟计算结果,确定本项目流道结构采用的温控指标如下:

(1)控制混凝土入仓温度在 30℃ 以内,早期最高温度控制在 68℃ 以内,即保证混凝土在入模温度基础上的温升值不大于^[8]38℃;

(2)流道浇筑及养护过程中,混凝土浇筑体内外温差应控制在 25℃ 以内;

(3)前 7 d 龄期内单日混凝土浇筑体的降温速率不大于 4.0℃/d,7~14 d 龄期内混凝土浇筑体的降温速率不大于 2.0℃/d;

(4)拆除混凝土保温覆盖层时,混凝土浇筑体表面与大气温差控制在 20℃ 以内。

6 流道混凝土浇筑时的温控措施优化

根据 4.3 节选定的 Case2 流道混凝土冷却方案,结合现场施工实际情况,可做进一步优化。

6.1 调整冷却通水管路

由于顶板混凝土的最高温度和内外最大温差明显高于流道中墩和边墩部位,且出现时间更晚,因而对冷却水管进行调整。施工中分别设置边中墩冷却管路和顶板冷却管路,两条管路互不相通。边中墩冷却管路水平相邻间距设为 1.3 m,仅设置在墩墙正中位置,上下间距为 1.5 m(原 Case2 方案中均为 1.0 m),顶板冷却管路水平相邻间距设为 1.0 m,并在顶板温度最高的部位增设一排冷却水管,以提高顶板冷却降温效果,同时延缓边中墩最高温度和内外最大温差出现的时间,布置方案如图 8、图 9 所示。

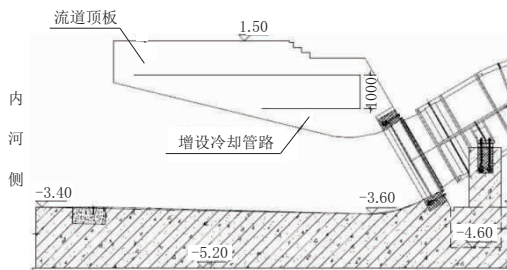


图 8 流道顶板冷却水管布置(单位:mm)

6.2 调整通水参数

混凝土在浇筑完成后的硬化过程中,由于水泥水化反应产生的水化热,会使得混凝土内部温度发生变化。在混凝土温升期间,应当积极通入冷却水,

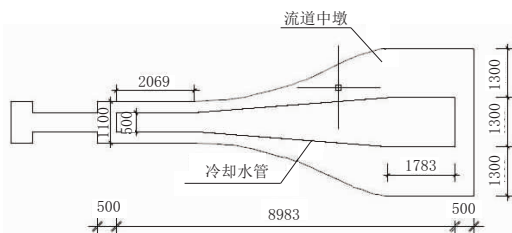


图 9 流道中墩冷却水管布置(单位:mm)

以降低混凝土的温升,减小混凝土内外部的温差。而在混凝土的温降期间,则应控制温降速率,减小混凝土内部的温度梯度,减小内部应力。从本文 4.3 节的计算分析可以看出,流道各特征点温降均超过了 5℃/d,因而对二期通水温度进行调整。温升期间依然采用 15℃ 的冷却水进行降温,温降期间则将进、出水口的冷却水混合后再进行冷却,控制通入的冷却水温在 25℃ 左右。此外,计算显示,边墩和中墩的最高温度和最大温差均出现在 2 d 左右,顶板的最高温度和最大温差出现在 2.5~3.0 d。考虑到混凝土内部达到最高温度后,会出现短暂的温度滞涨时间,因而选择将边墩和中墩的二期冷却时间调整为 2.5 d,调整后的通水方案见表 5。进、出水口冷却水混合现场实施图如图 10 所示。

表 5 调整后的流道通水方案

方案编号	部位	冷却水管间距/m	通水龄期/d	通水温度/℃	通水流量/(m ³ ·h)
Case2	边、中墩	1.3~1.5	0~2.5	15	4.0
			2.5~14	25	1.0
	顶板	1.0	0~3	15	4.0
			3~14	25	1.0



图 10 进、出水口冷却水混合

6.3 改进混凝土特性和施工条件

根据本文 4.3 节的计算分析可以看出,流道顶板与墩墙侧面,以及与浇筑完成的底板新老混凝土交界面,是最容易出现温度应力集中的部位,对于这些部位的混凝土可以掺入高纯度的聚丙烯纤维,以提高混凝土的抗裂性能。高纯度聚丙烯纤维掺量可以按照 1 m³ 混凝土掺入 1 kg 进行控制。此外,由于计算时按照夏季 32℃ 的高温浇筑混凝土进行计算,流道各特征点最高温度全部都在 60℃ 以上,因而降低

混凝土入仓温度,也是降低混凝土最高温度的有效方法之一。经测算,在混凝土拌合时,采用加 10%冰水拌合的方法,运输过程中采用草席覆盖罐车,并及时洒水冷却的方法,可降低混凝土入仓温度 2℃左右。此外,在施工现场,也可以采用篷布遮挡、仓面洒水降温等手段,有效降低混凝土入仓温度。实际实施场景如图 11、图 12 所示。



图 11 加冰水拌合



图 12 仓面洒水降温

6.4 设置后浇带

航塘港工程中,流道长度为 33 m,流道边墩与上下游边墩、翼墙连接为整体。为有效减少混凝土温降过程中底板的约束,减小温度收缩应力,选择将流道边墩分成两段浇筑。在流道中部设置两道 800 mm 厚的后浇带,待浇筑完成一段时间后,再使用掺有一定量膨胀剂的混凝土将其连为整体,由此可以通过减少施工期的基础约束长度来防止出现温度裂缝。

7 计算结果及温控效果验证

为验证温度场算法的有效性和可行性,选取流

道实际浇筑温度场进行反馈验算。航塘港工程流道实际浇筑日期为 6 月 13 日,浇筑开始时间选在早晨,浇筑时气温为 25℃。通水方案及温控措施按照本文第 6 节内容执行。施工中流道混凝土共分为 J01~J08 八个温度测区(见图 13),每个测区布设 8 个测点(见图 14),采取自动化监测,测温频率为 20 min/次,同时实时监测气温及水管进、出口水温,并根据实际需要,通过加冰降温或进出口冷却水混合的方法实时调整通水温度。

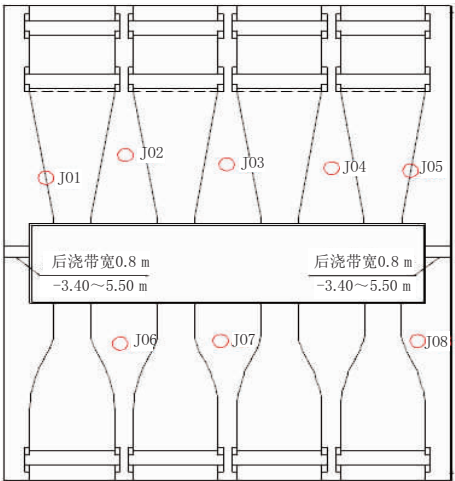


图 13 后浇带及温度测区设置示意图

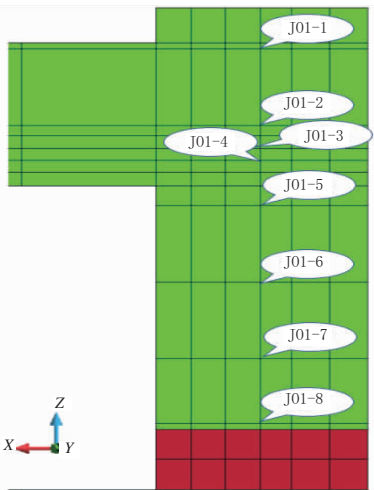


图 14 泵站流道 J01 测区温度测点布置图

表 6 泵站流道 J01 测区典型特征点温度反馈与实测对比

	特征点	最高温度 /℃	最高温度龄期 /d	最大温差 /℃	最大温差龄期 /d	前 7 d 单日最高温降速率 / (℃·d ⁻¹)	后 7 d 单日最高温降速率 / (℃·d ⁻¹)	停止通水温度 /℃
反馈值	J01-1	55.1	1.8			3.8	0.5	27.2
	J01-2	58.4	1.9	14.1	2.2	3.7	0.5	28.1
	J01-5	58.8	1.9			3.9	0.4	28.5
	J01-6	58.6	2.0			3.7	0.4	28.3
实测值	J01-1	60.0	1.9			3.4	1.8	27.3
	J01-2	60.1	2.0	17.7	2.5	3.3	1.8	32.4
	J01-5	70.1	2.1			3.6	1.9	33.8
	J01-6	28.3	1.9			3.7	1.9	33.7

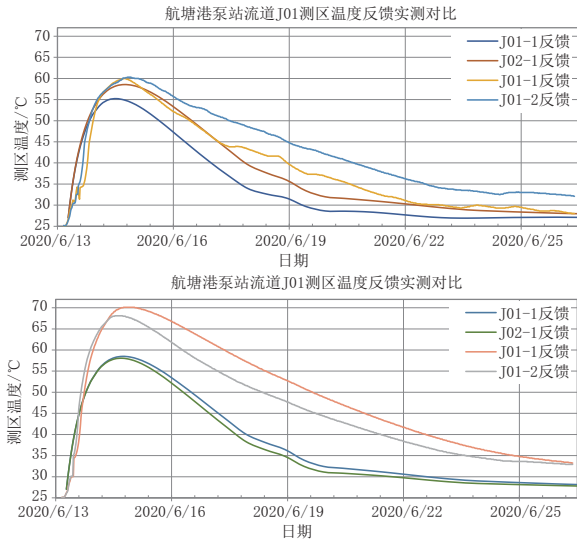


图 15 泵站流道 J01 测区典型特征点温度过程线反馈与实测对比
以泵站流道 J01 测区为例,通过测区内典型特征点 J01-01、J01-02、J01-05、J01-06 的温度反馈值与实测值的对比发现,反馈值与实测值的变化趋势、最高温度龄期基本相同。现场通过加冰块和进出水口混合的方式调节冷却水水温,存在一定的偏差。尤其在高温季节施工,前期冷却水温度很难长时间保持 15℃,使得实测最高温度略高于反馈温度。考虑到现场温控条件存在限制,总体上认为模型的反馈计算结果与实际过程接近。此外,现场混凝土浇筑完成拆模后发现,流道浇筑效果良好,混凝土外观平整、光洁、密实,整个流道结构无贯穿裂缝(见图 16),有效防止了温度裂缝的产生,达到了预期的目的。

8 结 语

本文基于航塘港南延伸整治工程的施工实践案例,建立了泵闸流道有限元仿真模型,进行了对流道



图 16 泵站流道实体混凝土质量

混凝土结构温度场的理论计算和分析。根据计算和分析成果,有针对性地提出了温控优化措施。对比温度场模型计算成果与施工现场温度,变化过程接近,试验拟合参数可靠,说明温度场仿真算法效果好,可用于后续工程混凝土结构温度场的理论计算。此外,针对计算结果采取的温控优化措施满足了混凝土温控指标的要求,降低了流道结构混凝土开裂风险,是泵站混凝土温度裂缝控制的有效手段。

参考文献:

- [1] 程井,魏李威,张玉鑫,胡晓辉.基于水化度的泵送混凝土升温模型及参数反演[J].水利水电科技进展,2021,41(2):75-81.
- [2] 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.
- [3] 江敏敏,蔡新,郭兴文,等.泵站施工期温控防裂敏感性分析研究[J].水利水电技术,2020,51(2):105-112.
- [4] 郭高贵,许朴.泵闸工程施工期温度应力数值仿真分析[J].城市道桥与防洪,2016(2):166-168.
- [5] 李硕,李同春,孙永明,等.三洋港水闸底板水管冷却温控措施优化研究[J].水利水电技术,2015,46(3):65-69.
- [6] SL 191—2008,水工混凝土结构设计规范[S].
- [7] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].
- [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.

《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com