

舟岱跨海斜拉桥主塔承台大体积海工混凝土温度场管道冷却优化

Kexin Chen

上海城建职业学院 上海

【摘要】本研究考虑了大体积海洋混凝土的复杂海上施工环境长江三角洲跨海大桥 DSSJ03 标段斜拉桥主塔承台浇筑工艺宁波舟山港。采用 MIDAS/Civil 有限元软件方法对温度场进行分析 ZT4 号主塔承台大体积海工混凝土的流动模拟与优化冷却水管的流速、进水温度，以及优化原有管道冷却方案。与实际监测的混凝土水化热温度数据相比，施工过程中，优化后的管道冷却方案冷却速度控制在 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 以内，应力安全系数高，有效降低了海洋温度应力的影响主塔盖顶混凝土。此外，位于主塔盖顶的大体积海洋混凝土部分产生裂缝恶劣海上环境下施工的可靠性下降，对海洋混凝土浇筑施工质量提出了更高的要求。复杂的海上环境得到改善。

【关键词】 跨海斜拉桥；大体积混凝土温度场；管道冷却优化

【收稿日期】 2024 年 9 月 25 日 **【出刊日期】** 2024 年 11 月 22 日 **【DOI】** 10.12208/j.met.20240004

Pipe Cooling Optimization of the Mass Marine Concrete Temperature Fields for the Main Tower Cap of the Zhoudai Sea-crossing Cable-stayed Bridge

Kexin Chen

Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai

【Abstract】 This study considered the complex offshore construction environment of the mass marine concrete pouring processes for the main tower cap of the sea-crossing cable-stayed bridge in the DSSJ03 bid section of the Ningbo Zhoushan Port. A MIDAS/Civil finite element software method was used to analyze the temperature field of the mass marine concrete of the No. ZT4 main tower cap, for the purpose of simulating and optimizing the flow velocity and inlet water temperatures of the cooling water pipes, as well as to optimize the original pipe cooling scheme. It was found that when compared with the actual monitoring temperature data of the hydration heat during the construction process, the cooling rate of the optimized pipe cooling scheme had been controlled within $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$, with a high stress safety factor. This had effectively reduced the impacts of temperature stress of the marine concrete of the main tower cap. In addition, the generation of cracks in the mass marine concrete sections located in the harsh offshore environment was decreased, and the construction quality of the marine concrete poured into the complex offshore environment had been improved.

【Keywords】 Sea-crossing Cable-stayed Bridge; Mass Concrete Temperature Field; Pipe Cooling Optimization

介绍

舟岱跨海斜拉桥海上施工环境相当严重。具体来说，大体积海洋混凝土段的施工过程中主塔封顶是在夏季进行的，经常受到此类影响，台风、强烈日照、大风等恶劣气象环境条件白天和夜间的温差。此外，温度应力大体积混凝土浇筑过程中水化热引起的状况无法容易控制，导致温度裂缝的形成。大

体积混凝土主塔承台已在海上完成搅拌，海上混凝土连续浇筑已持续长期以来，人们一直认为，确保海洋混凝土桥梁建设项目的关键在于防止温度的形成主塔帽的大体积海洋混凝土出现裂缝。

目前，有两个降低混凝土水化热温度的常用方法。其中一种是预冷法，降低混凝土原材料的温度。

另一种是后冷法，即在混凝土浇筑过程中，水泥的

注：本文于 2023 年发表在 Engineering Advances 期刊 3 卷 4 期，为其授权翻译版本。

水化热通过冷却水降低。1931年,上述后冷却方法首次应用于美国奥怀希大坝。俄勒冈州(美国)。此外,1936年,内华达州胡佛大坝的建设管理人员美国等也采用了这种方法,并取得了明显的降温效果^[1]。然后,通过数值模拟分析了热供水区混凝土的应力和温度梯度,研究发现水管间距对混凝土温度场的影响大于供水温度。观察发现,增加水管间距有效地降低了混凝土的温度,以及管道冷却系统引起的温度应力^[2]。Kim^[3]提出了一种线单元基于内部流动理论的冷却管道系统模型,用于计算温度变化并将结果与其他实验结果进行比较。丁^[4]结合采用复合单元法(CEM)和遗传算法(GA)进行模拟大体积混凝土温度场的数值模拟与反馈分析。结果表明:这种方法既有效又可行。朱伯芳认为冷却水管是负面的热源,并提出了考虑水管冷却系统影响的计算公式在一定程度上考虑了这一点^[5]。随后,提出了一种新的理论来处理小温度差异,以及混凝土坝中水管的早期和缓慢冷却。本文提出的方法比传统的水管冷却方法^[6]。一种智能温控方法及系统,用于汽车发动机的冷却水管冷却。大体积混凝土材料的水冷却是由林鹏^[7]建立的,并已成为对防止混凝土坝施工过程中混凝土开裂具有重要意义。王新刚等^[8]对水管冷却各因素进行了敏感性研究认为,水管系统的布局设计以及冷却水温度,管道直径、管道间距和冷却水流量是影响水冷却过程的有效性。

先前的研究对混凝土管道冷却技术做出了许多贡献温度场。然而,由于影响温度场的因素复杂,这方面的理论研究较少。复杂海上环境下混凝土温度应力。因此,考虑到复杂舟岱跨海大桥海洋混凝土施工近海环境斜拉桥,本研究分析了温度场仿真分析结果主塔盖顶大体积海工混凝土。冷却水管系统布置,优化了进水管水流速度、水温,前提是仅需考虑初始冷却,优化方案经试验验证施工监测数据以达到最佳控制效果。

1 项目背景

跨海大桥主体为宁波舟山港主航道,为三塔钢箱梁斜拉桥,主塔最大高度172m,主塔尺寸为78×2×187×2×550×2m。主墩承台均为整体式六边形承台,外形尺寸分别为51×32m(横×纵,下同)、38×25m、33×25m。承台海工混凝土施工时混凝土直接浇筑在钢护筒内,混凝土浇筑后浇筑在承台上。

浇筑分两阶段完成,内部布置冷却水管系统,外部覆盖土工布进行保温。

本次研究选取具有代表性的ZT4号承台作为研究对象,ZT4号承台外形尺寸为51×32m,厚度为6.5m,承台分两层浇筑,第一层为ZT4号承台,第二层为ZT4号承台。第一次浇筑厚度2m;第一次浇筑量2726.6m³;第二次浇筑厚度4.5m;第二次浇筑量6134.85m³。施工温度监测过程中,选择在瓶盖1/4结构中嵌入温度传感器来收集监测水化热效应数据,重点关注中心温度和表面温度。

2 海上施工环境分析及水化热计算参数

2.1 海上施工环境分析

舟岱跨海大桥海上施工环境条件斜拉桥的施工非常艰难。例如,大型海洋平台的组装过程主塔盖的混凝土部分是在夏季建造的,而且经常伴随台风、强降水等恶劣气象环境条件阳光充足,昼夜温差大。甚至更多严重的是,主塔盖的大体积混凝土是在海上搅拌的,海上混凝土连续浇筑持续了很长时间。桥位位于浙江东北部沿海水域,属亚热带季风气候,气温高温、高湿,冬季温暖,夏季凉爽。夏秋季节的台风、冬季的大风等气象灾害春季时常出现海雾、连绵降雨等天气现象。桥梁项目区域风速在4米/秒以上,年平均风速为4.7至6.8米/秒之间。10米高度的百年一遇基本风速为42.3米/秒。每年5月至11月,项目区还可能受到热带气旋的影响,尤其是7月至9月。根据本研究的分析,环境影响主塔承台海工混凝土施工的因素如下:

(1) 温度:温度差异被确定为导致混凝土温度裂缝形成^[9]。气象局编写的年度报告舟山市气象局显示,项目建设期间,晴天气温较高,月极端最高气温可能达到38℃,加上阴雨天数较长,极端最低气温达19.6℃。

(2) 风速:风速与热交换密切相关空气中固体表面的系数。气象数据显示,9月份风速达到16.7米/秒,平均风速8.4米/秒,说明表面热交换速率处于较高水平。

(3) 日照:太阳辐射对海洋温差的影响主塔帽混凝土施工段不应忽视。施工期间昼夜温差气象数据显示,64年间9月份的昼夜变化最高达到18℃。主塔封顶施工于9月份进行,现场环境由于受场地环境因素的影响,该区域地质条件复杂。基于舟山气象

局平均气温实测及统计分析九月，本研究模拟施工环境温度设定为27°C。

2.2 海工混凝土水化热计算参数分析

(1) 承台C40海工混凝土配合比：承台位于海洋环境空气湿度大，腐蚀性离子含量高包括 cl^- ；对耐久性和耐腐蚀性要求较高。因此，承台结构选用海洋混凝土。

然后，根据低峰值指标水化热值，最大温差出现较晚内表面和外表面；以及混凝土良好的抗拉性能，适当的优化后水灰比经常数确定为0.35调整粉煤灰含量和水灰比等参数。混合料本研究采用的比例设计如表1所示。

表 1 混凝土配合比设计

原料	水泥 $Kg \cdot m^{-3}$	粉煤灰 $Kg \cdot m^{-3}$	矿物粉末 $Kg \cdot m^{-3}$	河砂 $Kg \cdot m^{-3}$	碎石 $Kg \cdot m^{-3}$	添加剂 $Kg \cdot m^{-3}$	水 $Kg \cdot m^{-3}$
混合比例	126	155	139	721	1082	29.2	122

3 C40 最优温度场模型的建立海工混凝土管道冷却帽

3.1 有限元模型的建立

本研究采用 MIDAS/civil 有限元软件模拟了承台 C40 大体积海工混凝土结构温度场变化计算效率和分析精度兼顾。

3.2 冷却水管道系统水温 T_w 的计算

在本研究中，从先前的相关研究中获得了两种 T_w 的计算方法研究结果^[12]。其中包括近似水温法和数值水温法温度法。在本研究中，采用近似水温法计算过程中采用的参数以及整个长度的平均水温水管系统中的水温取为水管的水温。

3.3 管道冷却系统基本控制措施

浇筑完成后，大体积海工混凝土的升温速率主塔顶温度下降速度很快，在 48 小时左右达到峰值温度，之后温度开始下降。结构本身的冷却很慢，不利于结构安全，因此需要布置冷却水管冷却。通过降低混凝土内部的最高温度，大型可以避免结构的温度应力。初始冷却一般在混凝土浇筑完成后立即进行。此时弹性模量缓慢上升，且温度得到有效控制。

3.4 承台 C40 海工混凝土管道冷却系统布置方案

顶盖厚6.5米，分两层浇筑，浇筑间隔14天。冷却水管是温控方案的主要冷却措施。第一帽层厚度较小，布置两层冷却水管。上下管错开，上下管间距

(2) 混凝土的比热容与热导率：组分的容量和热导率、组分的质量百分比采用加权平均法估算C40海工混凝土的强度。

(3) 海上混凝土浇筑施工环境温度：该桥施工时间为9月，平均气温为27°C。考虑各种气温的影响，考虑风速、太阳辐射等因素，根据计算公式^[10]计算得到C40海工混凝土的理想浇筑温度 $T_0=28^\circ C$ 。

(4) 绝热温升计算值：基于第三边界条件下，假设海洋混凝土结构之间没有热交换和外部，没有发生热量损失，胶凝材料的水化热换算成混凝土的温度值，然后计算绝热温升可按照文献^[11]中的方法进行估算。本研究计算混凝土绝热温升为56°C。

也左右管间距为1m，第二层浇筑厚度为4.5米，已经接近极限。因此，内部烟雾很难迅速消散。散热方面，需要在内部布置多层冷却水管，以实现有效的冷却效果。冷却水管的对流系数计算如下参考前人相关研究^[13]提出的计算模型。在初始阶段帽顶混凝土温控方案设计、冷却水管布置提出了一种基于有限元仿真计算的针对建议的布局。

影响水管降温效果的因素有：

- 1) 管道类型（金属、塑料、壁厚等）；
- 2) 管道直径；
- 3) 管道间距；
- 4) 进水温度；
- 5) 水流量。

前三个因素是根据经济性、施工方法和需要避免因空隙过多而损害混凝土结构的强度管道取代混凝土材料。因素 4 和 5 是施工期间唯一可调整的参数冷却系统的运行。

3.5 优化分析

3.5.1 管径及管距优化

(1)管道直径：本研究发现，与其他因素相比，管径对冷却效果的影响较小。如果管径过小，冷却范围趋于缩小，影响冷却效果。此外，如果管径太大，钢材成本也会增加，冷却效果没有显著改善。因此，适当的管道直径的选择基于工程实践、经济成本、冷却效果和其他因素^[14]。

(2) 管道间距: 前期相关研究结果表明, 管道间距水管是影响最大的因素。例如, 水管布局层数太少会影响散热效率, 层数过多又会导致更换过量的混凝土与水管, 导致结构强度降低。因此, 考虑到盖帽尺寸, 采用四层管冷却布置与原方案不同, 管道间距维持在1m。

3.5.2 进水温度优化分析

混凝土升温初期, 采用直接冷却水降温效果。冷却水温度选择10°C、20°C、30°C进行比较目的, 以及不同冷却水温度对冷却效果的影响对温度场进行了分析。然后针对选定的不同进气道进行有限元计算上述冷却水管的温度, 以及典型的内部最大本研究选择温度进行分析。

可以看出, 在相同浇筑温度下, 较低的冷却水温度越高, 混凝土内部最高温度越低例如, 当水温下降10°C时, 最高内部温度降低了约3°C。此外, 冷却速度加快, 最大内表面和外表面之间的温差减小, 不利在一定程度上降低了水化热对混凝土的影响。因此, 该方法可以认为是一种有效的冷却措施。然而, 随着冷却水的减少温度, 混凝土最高温度与冷水逐渐增多, 容易导致水管周围产生局部拉应力以及新的温度裂缝的产生。因此考虑降低水温的经济成本, 选择冷却水温度为20°C。

3.5.3 冷却水流动分析

在本研究中, 混凝土产生的水化热通过冷却水与管壁之间的热交换。观察到, 冷却水的体积越大, 管壁的水流量越大, 热交换率越大。可增加冷却水量及管壁厚度, 提高冷却效果^[15]。冷却水的湍流状态。分析了冷却水流量的影响本研究中, 水流量分别为2.5m³/h、3.0m³/h、3.5m³/h和4.0m³/h为优化过程选定的参数。最大时程曲线不同流速下混凝土内部的温度。

从图中可以看出, 随着进水量的增加, 混凝土浇筑过程中, 混凝土温度不断降低, 当浇筑量由2.5m³/h变为3.5m³/h时, 降温效果明显, 浇筑温度已降低6小时后, 降温效果约为5°C。然后, 随着流量的增加, 降温效果趋于稳定, 不同流量条件下温度场的变化趋势观察到的速率大致相同。因此, 在考虑冷却的前提下考虑到效果和温控成本, 本实验选择入口流量为3.5m³/h学习。

综上所述, 从保证控温效果, 并给予考虑到经

济和时间成本, 选择了蛇形管冷却布局, 管径0.042m, 管间距1m, 入口温度20°C, 流量3.5m³/h, 并交错分布。

3.6 施工监测成果分析

由以上分析可知, 该桥承台段C40海工混凝土施工温控措施参数为: 优化前进水温度30°C、水流量2.5m³/h, 优化后进水温度为20°C、水流量3.5m³/h。优化完成后的温度计算与实测结果见图1。由上图可见: (1) 承台混凝土施工过程中, 内部温度场突然升高, 并在48h后达到峰值, 管道降温效果在2~3天内明显, 计算值与实测值变化趋势大致相同; (2) 与中心温度相比, 承台表面温度下降更为明显。此外, 受海上昼夜温差大及台风等环境因素影响, 海工混凝土表面温度首先趋于稳定, 与环境温度接近, 研究区由于混凝土导热性较差, 虽然在中心段布置了冷却水管, 但冷却速度仍然较小, 温度下降较慢;

(3) 混凝土温度应力状况在允许范围内, 安全系数较高。

4 结论

本研究得出以下结论:

(1) 大体积混凝土内部中心点温度较高, 冷却率较低, 由于承台混凝土表面积大, 散热面积大以及低温。此外, 受环境条件的影响, 冷却速度高于混凝土内核点, 容易导致过大的温差和裂缝造成的温度应力条件已成为混凝土表面很明显。

(2) 冷却水管系统参数对冷却效果影响较大混凝土的影响。因此, 本研究确定合理选取系统最优值, 有利于保证混凝土结构。

参考文献

- [1] Anish M, Kanimozhi B, Ramachandran S. Experimental study of cooling water pipe circuits by theoretical and numerical analysis in a reactor vault [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2017:1-4.
- [2] Adek Tasria, Anita Susilawatib. Effect of material of post-cooling pipes on temperature and thermal stress in mass concrete [J]. *Structures*, 2019, 35(none):204-212.
- [3] Myers, T. G., Fowkes, N. D., Ballim, et al. Modeling the Cooling of Concrete by Piped Water [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(12):1375-1383.

- [4] Shenghong Chen, Su P, Shahrour I. Composite element algorithm for the thermal analysis of mass concrete Simulation of cooling pipes [J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2011, 47(5):536-542.
- [5] Ding J, Chen S. Simulation and feedback analysis of the temperature field in massive concrete structures containing cooling pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2):554-562.
- [6] Zhu BF. Early Cooling with Small Temperature Differences and Slow Cooling as the New Directions of Water Pipe Cooling for Concrete Dams [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, (1): 44-50.
- [7] Lin P, Li QB, Zhou SW et al. Intelligent Temperature Control Method and System for Water Cooling of Mass Concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(8): 950-957.
- [8] Wang XG, Zhang W, Fan SG, et al. Research on the Layout of Cooling Water Pipes for Mass Concrete based on MIDAS [J]. *Port Engineering Technology*, 2010, 47(6): 42-45.
- [9] Zhu BF. *Temperature Stress and Temperature Control of Mass Concrete*; Beijing, China Electric Power Press, 1999, (03).
- [10] Lin XM. A Study of the Temperature Control of the Mass Concrete of Lianhua Avenue Landscape. Bridge [J]. *The World of Building Materials*, 2018, 39(05): 12-14.
- [11] Wang WF and Feng Z. The Optimization of Temperature Control Measures for Concrete with High Hydration Heat based on Cap Monitoring [J]. *Highway*, 2019, 64(05): 121-125.
- [12] L He, et al. Structure optimization of a heat pipe-cooling battery thermal management system based on fuzzy grey relational analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022.

版权声明：©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS