

大体积混凝土水化热冷-孔混合温控方案研究

谭 钊¹, 黄 杨¹, 谢 磊¹, 孟栋梁², 孙天岳², 杨孟刚²

(1. 中铁北京工程局集团有限公司, 北京市 102308; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 大体积混凝土在浇筑过程中易因水化热积聚而引发温度裂缝。为避免冷水管与预应力孔道的空间布置冲突问题,以新建珠海至肇庆高铁某特大桥为研究对象,创新性提出了冷-孔(冷水管-预应力筋孔道)混合温控方案,即利用0#块上层加宽截面的预应力孔道作为通水冷却通道,联合内部冷水管协同温控。基于MIDAS FEA NX 2022软件建立了三维水化热有限元模型,系统分析了冷水管关键参数及预应力孔道通水数量对温控效果的影响规律,并确定了最优参数。与无温控方案相比,采用混合温控方案可使核心最大温度降低22%、温效主拉应力降低50%。该桥现场温度监测数据验证了有限元分析模型的正确性和提出的冷-孔混合温控方案的有效性。

关键词: 大体积混凝土; 水化热; 冷-孔混合温控方案; 有限元分析

中图分类号: U441.5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0028-07

Study on Temperature Control Scheme of Mixing Cooling Pipes and Prestressed Ducts for Hydration Heat of Mass Concrete

TAN Zhao¹, HUANG Yang¹, XIE Lei¹, MENG Dongliang², SUN Tianyue², YANG Menggang²

(1. China Railway Beijing Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102308, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Mass concrete is prone to thermal cracking during the pouring process due to the accumulation of hydration heat. To avoid the spatial layout conflicts between cooling pipes and prestressed ducts, taking a specific large bridge on the newly constructed Zhuhai - Zhaoqing High-speed Railway as the research subject, a mixed temperature control scheme of Cooling-Duct (cooling pipe - prestressed tendon duct) is innovatively proposed, which is to use the prestressed ducts in the widened upper section of the 0# block as water-cooling channels, jointing the internal cooling pipes for collaborative temperature control. Based on MIDAS FEA NX 2022 software, a three-dimensional hydration heat finite element model is established to systematically analyze the influence of key parameters of cooling pipes and the amount of water flowing through prestressed ducts on temperature control effects, and the optimal parameters are determined accordingly. Compared with the no-temperature-control scheme, the use of mixed temperature control scheme can reduce the maximum core temperature by 22% and the principal tensile stress induced by temperature effects by 50%. The on-site temperature monitoring data from the bridge validate the accuracy of the finite element analysis model and confirm the effectiveness of the proposed Cooling-Duct mixed temperature control scheme.

Keywords: mass concrete; hydration heat; cooling-duct mixed temperature control scheme; finite element analysis

0 引 言

大体积混凝土由于其水化放热集中且散热路径长,易导致结构内部形成“核心高温—表层低温”显著温度梯度,从而产生较大温度应力并引发裂缝^[1]。

因此,在保证施工适应性与控制成本的前提下,如何有效抑制大体积混凝土的水化热^[2],已成为大跨度桥梁施工中的技术关键。

当前温控技术大致可划分为被动式温控与主动式温控两大核心类别^[3]。分层浇筑和保温覆盖等被动措施虽能在一定程度上缓解表层散热速率,但对降低核心区温度效果有限;而预埋冷水管主动温控技术通过循环冷却水直接带走混凝土内部水化热,是解决大体积混凝土核心高温问题的有效手段^[4]。林鹏等^[5]开发了智能通水控温系统以实现精准温控,但其冷却路径单一且散热效率不足。王丽等^[6]

收稿日期: 2025-12-12

基金项目: 湖南省自然科学基金(2025JJ60274); 中铁北京工程局集团有限公司重点课题(ZJSG-3-技合-2024-012)

作者简介: 谭钊(1990—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁施工工作。

通信作者: 孟栋梁(1991—), 男, 博士, 副教授, 从事高铁桥梁研究工作。电子信箱: mengdl@csu.edu.cn

验证了通水冷却与预应力张拉的协同防裂效果,但仅将预应力作为被动补偿手段。蔡鹏等^[7]证实冷却水管可显著降低拉应力,但未结合预应力孔道辅助控温。Aguilar-López 等^[8]发现预埋管道会影响温度场分布,但未提出具体与冷水管协同的温控方案。因此,现有研究表明利用预应力孔道作为通水冷却通道尚未见报道。

本研究以新建珠海至肇庆高铁某特大桥主墩 0# 块为工程背景,创新性提出冷-孔(冷水管-预应力筋孔道)混合温控方案,利用 0# 块上层加宽截面的预应力孔道作为通水冷却通道,联合内部冷水管协同温控。基于 MIDAS FEA NX 2022 建立了三维水化热有限元模型,系统评估了冷水管通水时间、流速、初始水温以及布置间距对温度场与应力场的耦合影响规律和预应力孔道通水数量对温控效果的影响,提出了混合温控方案的最优参数,并结合现场实测数据验证了其温控效果。

1 工程概况与数值模拟

1.1 工程概况

本文以新建珠海至肇庆高铁某特大桥为背景,该桥全长 450 m,跨径布置为 114.9 m+230 m+114.9 m。主桥为预应力混凝土连续箱梁,采用 C50 混凝土,单箱双室截面,顶宽 14.3 m,底宽 11.2 m(加宽段顶宽 17.9 m,底宽 15.7 m),直腹板结构。桥型布置如图 1 所示。0# 块立面图及其截面构造如图 2 所示,其截面最小尺寸均大于 3 m,属于大体积混凝土施工范畴,根据设计要求分两层进行浇筑。

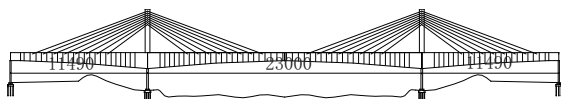


图1 桥型布置图(单位:cm)

1.2 有限元模型

考虑 0# 块结构对称性,采用 MIDAS FEA NX 2022 软件建立 1/4 实体模型。模型包含第一层浇筑体(下层,高度 7.0 m)、第二层浇筑体(上层,高度 5.5 m)及桥塔底部(高度 0.7 m)分别建立实体,均采用混合网格(六面体主导)模拟,网格尺寸 0.5 m,确保计算精度与效率平衡。0# 块的有限元模型见图 3。

混凝土各组成材料热力学参数见表 1。根据材料占比,可计算混凝土整体导热系数、比热容、传热系数、土工布的总传热系数以及钢模板的总传热系数。

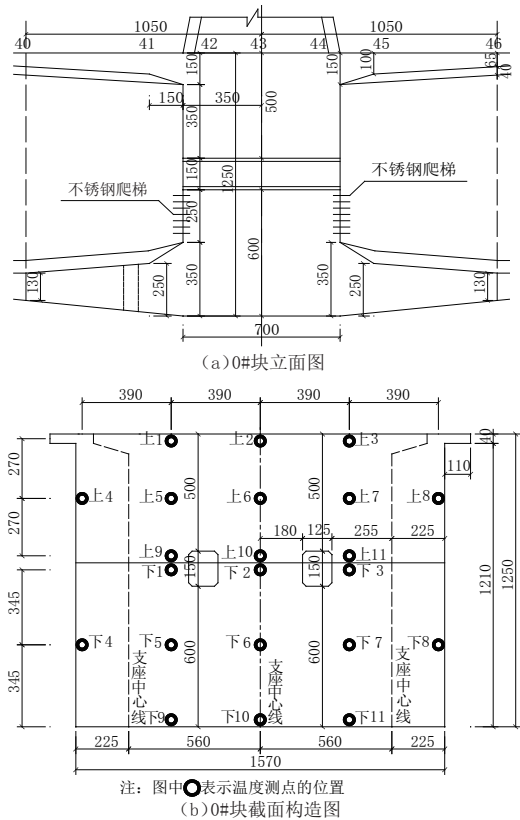


图2 0#块立面图及其截面构造图(单位:cm)

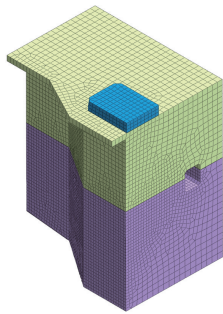


图3 0#块有限元模型示意图

表1 每方混凝土材料用量与各组成材料的热力学参数

材料名称	水泥	粉煤灰	河砂	碎石	拌合水
用量/(kg·m ⁻³)	425	75	676	1 103	146
导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	2.218	0.23	3.082	2.908	0.600
比热容/ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	0.536	0.920	0.745	0.708	4.187

混凝土的导热系数为:

$$\lambda=0.01\times(17.49\times2.218+27.82\times3.082+45.39\times2.908+6.01\times0.6+3.09\times0.23)=2.608\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})=9.390\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})$$

混凝土的比热容为:

$$C=0.01\times(17.49\times0.536+27.82\times0.745+45.39\times0.708+6.01\times4.187+3.09\times0.92)=0.902\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

珠海地区的年平均最大风速为 3.64 m/s,由此求得混凝土在空气中的传热系数为:

$$\beta_u = 63.021 \text{ 2} + 0.64 \times (76.612 \text{ 4} - 63.021 \text{ 2}) = 71.72 \text{ [kJ/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C)]}$$

土工布的导热系数为 $0.04 \sim 0.06 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$, 因此, 考虑土工布的总传热系数为:

$$\beta_1 = 1/[0.9 \times 103/(0.04 \times 3.6) + 1/71.72] = 49.52 \text{ [kJ/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C)]}$$

钢模板的导热系数为 $58 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 因此, 考虑钢模板的总传热系数为:

$$\beta_1 = 1/[6 \times 103/(58 \times 3.6) + 1/71.72] = 71.57 \text{ [kJ/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C)]}$$

1.3 0#块无温控措施温度场模拟

为分析无冷水管布置的温控效果, 选取了水化热温度峰值和温效主拉应力峰值作为关键评价指标, 开展了水化热仿真分析。受篇幅限制, 选取图 2(b) 中的 4 个代表性位置点 (1~4) 的数据进行分析, 其水化热温度时程与温效主拉应力时程分别见图 4 和图 5。

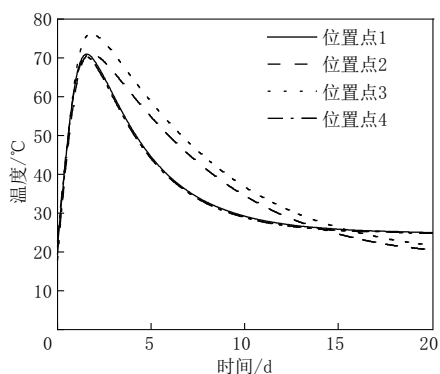


图4 0#块无温控水化热温度时程

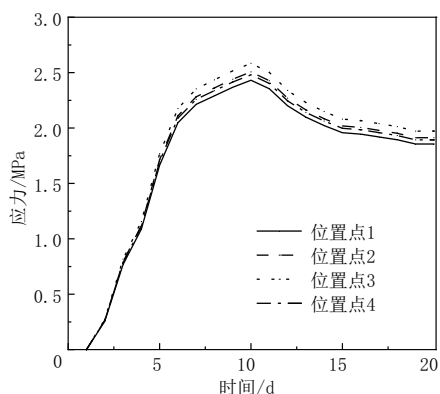


图5 0#块无温控温效主拉应力时程

由图 4 和图 5 可知, 在无温控情况下, 所有位置点的水化热温度均在第 3 天达到峰值, 且超过了《大体积混凝土施工标准》(GB/T 50496—2018)^[9] 规定的 65°C 限值; 在浇筑后的第 7 天, 所有位置点的混凝土温效主拉应力超过了规范规定的 2.0 MPa 限值, 存在开裂风险。此外, 位置点 3 的水化热温度峰值和温

效主拉应力峰值最大, 为最不利位置, 有必要采取温控措施。

2 冷-孔混合温控方案与参数敏感性分析

考虑到该桥 0#块的上部预应力孔道多且密集, 在布置冷水管时, 其布置路径常与预应力孔道冲突。而利用预应力孔道冷却通水不仅可以减少 0#块上部的冷却水管用量, 且 0#块支点侧面采用加厚截面设计, 为预应力孔道的合理布设提供了有利的结构条件。因此本文创新性提出冷-孔 (冷水管-预应力孔道) 混合温控方案, 在预埋冷却水管降温的基础上, 同时利用腹板预应力孔道, 以实现温控效能与经济成本的协同优化。为确定方案的最优参数, 本节针对冷水管参数和预应力孔道通水数量展开分析。

2.1 冷水管参数敏感性分析

冷水管温控效果主要由通水时间、布置间距、冷却水流速以及初始水温等参数共同决定。

水泥水化热释放一般呈先快后慢规律, C50 混凝土 (水泥 425 kg/m^3) 3 d 水化热释放量占总量超 60%^[10-11]。为满足规范要求, 同时考虑到通水冷却时间必须兼顾冷却效果和经济性, 通水时间取值范围为 1~4 d。

管内水流态决定散热效率, 根据流体力学, 雷诺数 $Re > 4\,000$ 时为紊流状态^[12], 散热效率是层流的 3~5 倍。为保证冷却水紊流应使得通水速度大于 0.08 m/s 。其中, 雷诺数计算如下:

$$Re = \frac{vd}{p} \quad (1)$$

式中: v 为通水速度; d 为水管直径; p 为水的运动黏度, 为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

冷水管通水速度越快, 冷却效果通常越好, 但在冷却水温恒定的条件下, 流速过大会增大冷水管管壁与周边混凝土的温差, 进而在水管周围产生较大温度梯度。因此通水流速范围为 $0.11 \sim 0.41 \text{ m/s}$ 。

冷却水初始水温也是决定散热效率的关键因素。根据传热学牛顿冷却公式^[13], 冷水管散热功率为:

$$Q = hA\Delta T \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数; A 为换热面积; ΔT 为冷却水与混凝土温差。 ΔT 越大, 表明散热越强, 但是过大的初始冷却水温度会导致管道周边的温度梯度过大, 从而导致应力集中甚至出现裂缝。因此, 综合考虑散热效率和管道周边的应力控制, 初始冷却水温

度范围为 12~21 ℃。

冷水管层间距决定了冷却覆盖范围与冷却均匀性,是冷水管布置的核心参数之一。间距过小会导致相邻管道冷却范围重叠,局部区域温度过低,温度梯度增大;间距过大则冷却覆盖不足,管道之间形成高温区,降温效果减弱。为兼顾 0#块截面尺寸和散热效率,管道层间距考虑为 0.6~0.9 m。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[14],C50 混凝土 3 d 抗拉强度标准值为 1.5 MPa、7 d 为 2.2 MPa。为满足规范要求,本节考虑在腹板预应力孔道全部通水的情况下,探究通水时间、布置间距、冷却水流速以及初始水温等关键参数对冷水管温控效果的影响,为工程参数优化提供理论支撑。

2.1.1 通水时间

为探究通水时间对 0#块水化热以及温效主拉应力峰值的影响,考虑流速为 0.11 m/s,初始冷却水温为 15 ℃,冷却管层间间距为 0.8 m,研究了通水天数的变化对 0#块水化热温度及主拉应力随时间变化规律的影响,结果见图 6。

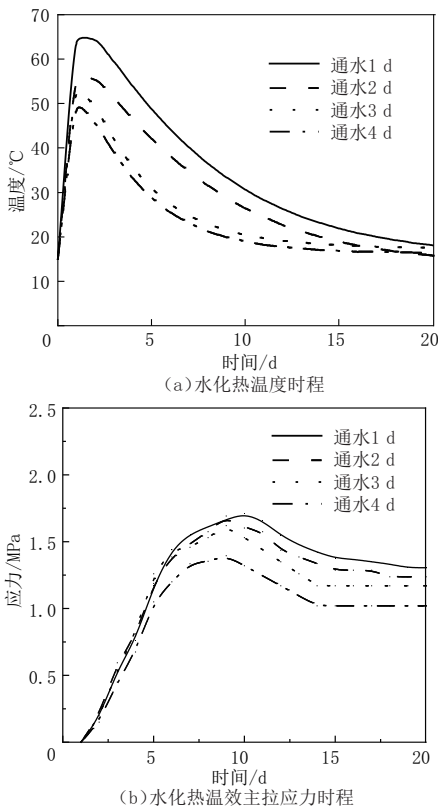


图 6 冷却时间的影响

观察图 6(a)可以得出,随着通水周期的延长,混凝土内部的温度峰值呈现出明显的下降趋势,表明延长通水能有效抑制温升。当通水时长从 1 d 延长至 3 d 时,降温效果尤为显著,温度峰值降幅约 10 ℃;

而通水时长超过 3 d 时,降温效果则明显减弱。这一现象表明,通水时长过长会造成冷却效率下滑,因此在实际施工过程中,需科学调控冷水管的通水时长,以提升其降温效能。对于本研究对象而言,最佳通水时间为 3 d。

2.1.2 冷却水流速

在冷却水温 15 ℃、管距 0.8 m 及通水 3 d 的定值条件下,分析了流速在 0.11~0.41 m/s 范围内变化时,0#块的水化热温度及主拉应力历程,具体计算结果见图 7。

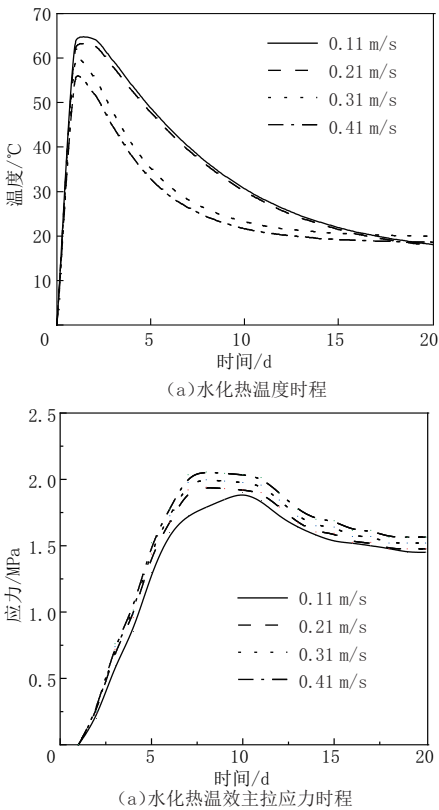


图 7 冷却水流速的影响

分析图 7(a)可知,加大冷却水流量可有效“削峰”,流速每提升 0.1 m/s 对应约 1 ℃的温降。但结合图 7(b)发现,这同时也带来了通水期主拉应力增大的弊端。其物理机制在于:高流速显著提升了管内的换热效率,造成管道附近区域冷却过快,而远端热量传导滞后,这种局部急剧的温差(高温梯度)最终转化为更高的拉应力峰值。为保障冷水管内冷却水保持紊流状态,同时防止管道附近产生过大的局部温差,本文建议冷水管的通水速度宜控制在 0.21 m/s 及以下。

2.1.3 冷却水初始水温

图 8 绘出了通水时间为 3 d、流速为 0.11 m/s、管内层间距为 0.8 m 以及冷却水初始水温为 12~21 ℃

时冷水管对温度场及应力场的影响规律。从图8(a)的分析结果能够看出,冷却水初始温度越低,混凝土的温度峰值也随之越低,降温成效越突出。然而图8(b)显示,当冷却水温较高时(不小于 18°C),水化热温度会超过 65°C ,不满足规范要求。此外,通水期间主拉应力峰值会大于 2 MPa ,引发开裂风险。

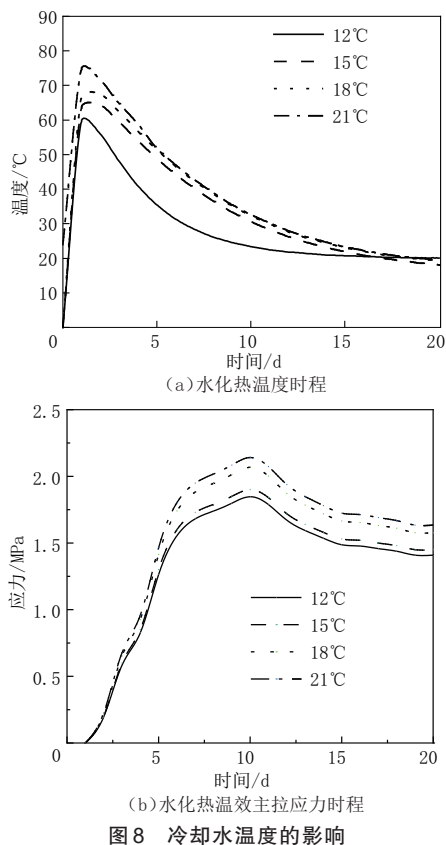


图8 冷却水温度的影响

综合上述分析结果可得,合理下调冷却水温度,不仅能显著压低混凝土温度升高峰值,且能缩减养护过程中的中期与后期阶段的应力最大值。为兼顾温控效果与应力控制要求,建议冷却水温不高于 15°C 。

2.1.4 冷水管层间距

图9绘出了在冷却水初始温度 15°C 、流速 0.21 m/s 和通水时间 3 d 条件下,不同管道间距对温度场及应力场的影响规律。由图9(a)可知,管道间距越小,混凝土水化热温度峰值略微降低,冷却效果越好。此外,图9(b)显示,冷水管间距对主拉应力峰值影响较小,间距减小会轻微降低主拉应力峰值。

考虑到冷水管间距对水化热温度峰值影响较小,建议管道层内间距控制在 0.8 m ,对于厚度较小、温度峰值较低的区域,可放宽至 1.0 m ,以节省材料成本。

2.2 预应力筋孔道温控方案设计

预应力孔道通水数量布置较少时,可能会达不

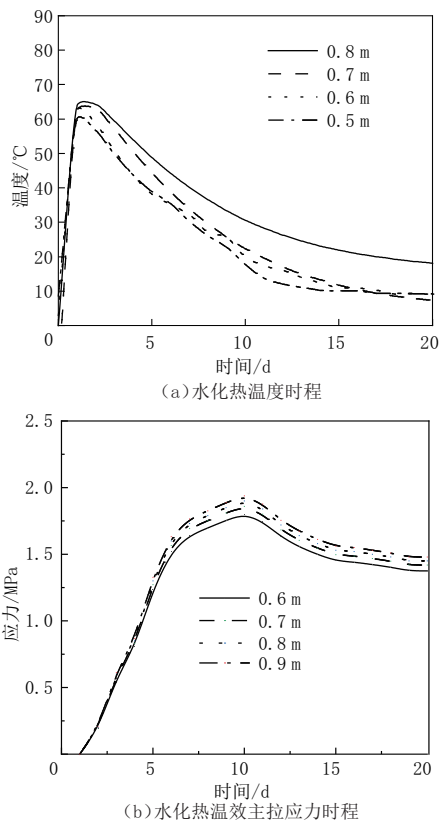


图9 冷水管间距的影响

到规范要求的温控指标;布置过多可能会导致管壁在短期内内外温差较大,从而导致混凝土开裂。基于此,本节针对预应力孔道的通水数量开展了参数化分析。预应力孔道通水示意图10,其中实心圆圈为0#块上层可通水的孔道。

结合前文的分析结论,设定冷水管的通水时长为 3 d 、冷却水初始温度为 15°C 、通水速率为 0.21 m/s ,且冷水管层间布设间距为 0.8 m 。基于上述参数条件,进一步探究了预应力孔道不同通水数量对温控成效的作用规律,相关分析结果见图11。

图11(a)绘出了预应力孔道通水数量分别为总孔道数的 100% 、 75% 和 50% 时的位置点3温度时程。结果表明,通水孔道数量越少,降温效果越差,当通水孔道数量为 100% 时可以在 3 d 内迅速降温并达到规范要求。此外,由图11(b)可知不同孔道数量通水的混凝土水化热温效主拉应力时程,结果表明孔道通水数量越大,主拉应力峰值越大,不过即便预应力孔道实现全量通水,混凝土产生的主拉应力峰值仍不会超过 2 MPa ,不存在开裂隐患,符合相关规范的控制标准。

3 冷-孔混合温控方案效果验证

为实现0#块浇筑期间快速降温与应力控制的双

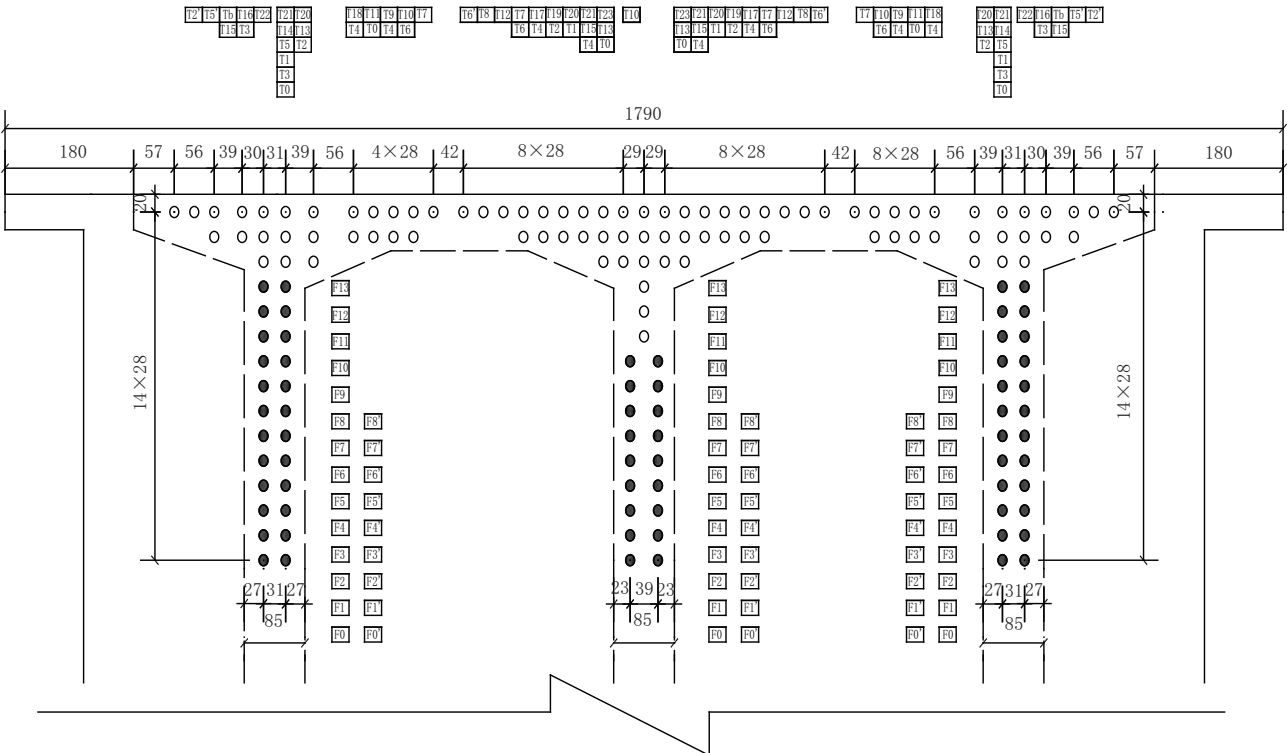


图 10 预应力孔道通水示意图(单位:cm)

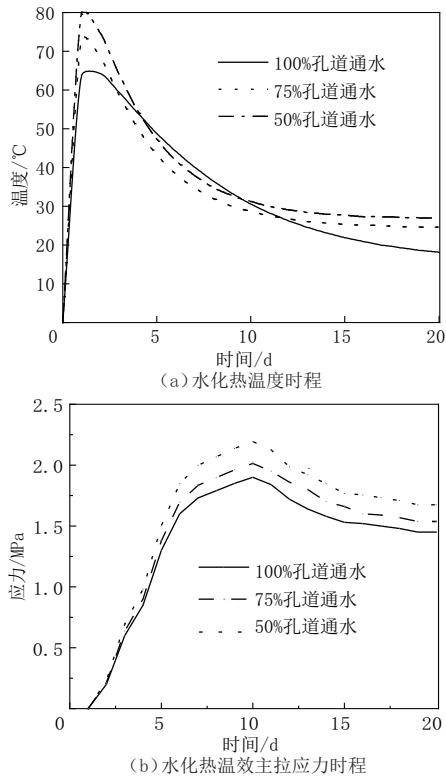


图 11 预应力孔道通水数量的影响

重目标,本节基于第二节的参数分析结果,为冷-孔(冷水管-预应力筋孔道)混合温控方案设计了最优参数。其中将通水时长设定为3 d,0#块的全部预应力孔道均投入冷却通水作业,冷水管与预应力筋孔道的冷却水流速统一设定为0.21 m/s,冷却水初始温度统一调控为15℃。

考虑到过人孔道上方混凝土厚度较小(约5.5 m),理论上来说水化热温度峰值会相对较低,而过人孔道下方混凝土厚度较大(约7.0 m),水化热积聚更严重。若采用等间距布置,可能出现上部过度冷却而下部冷却不足的问题。为了避免过度冷却导致材料浪费与应力集中,本节设计了分层差异化布置方案。该方案过人孔道上方共布设6层冷水管,采用等间距布置,层间距维持基准值0.8 m;过人孔道下方通过局部加密强化核心高温区的散热效果,上部5层维持0.8 m间距以覆盖中层区域,下部2层缩小至0.5 m,通过局部加密强化核心高温区的散热效果。冷水管的布置细节见图12。

为验证提出的冷-孔混合温控方案的有效性,开展了水化热仿真分析与现场温度监测。受篇幅限制,选取图2(b)中位置点3的水化热温度峰值及温效主拉应力峰值作为关键评价指标,对比了现场温度监测与有限元模拟结果,见图13和图14。水化热温度峰值出现在第3 d,计算值为61℃,实测值为56℃,误差为8.2%;混凝土温度应力峰值出现在第10 d,计算值为1.42 MPa,实测值为1.45 MPa,误差为2.1%。与无温控方案相比,核心最大温度降低22%,温效主拉应力降低了50%,温度峰值和温度应力均满足控制指标要求。

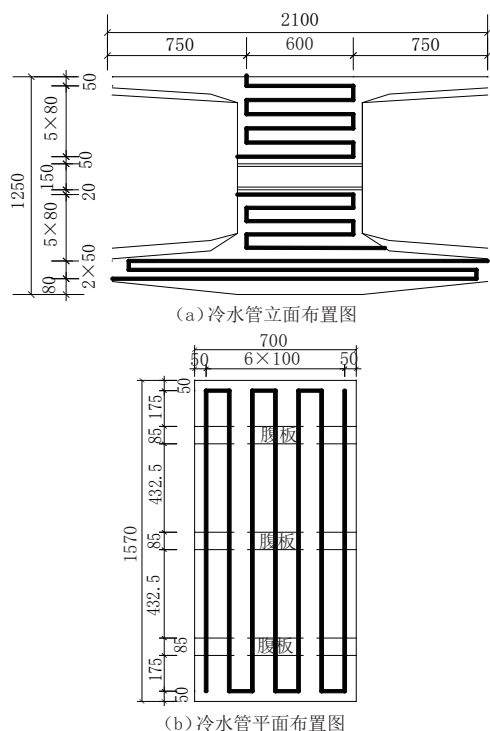


图12 冷水管优化布置方案(单位:cm)

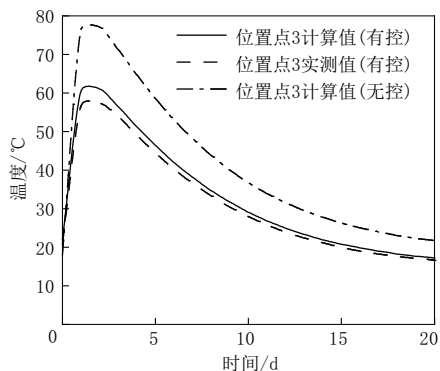


图13 0#块上层浇筑水化热温度时程

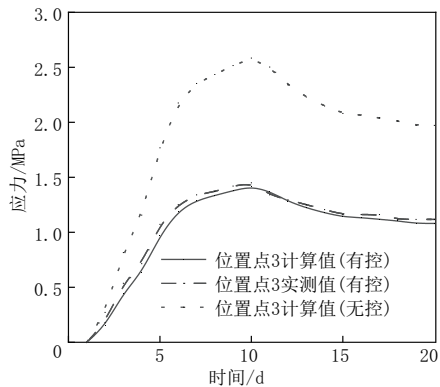


图14 0#块上层浇筑温效主拉应力时程

4 结 论

本文以新建珠海至肇庆高铁某特大桥主墩0#块

为工程背景,创新性提出了冷-孔(冷水管-预应力筋孔道)水化热混合温控方案,建立了三维水化热有限元模型,系统分析了冷水管关键参数(通水时间、流速、初始水温、布置间距)和腹板预应力孔道数量对温度和应力的影响规律,提出了该方案的优化参数,并开展了现场温度监测。主要结论如下:

(1)冷-孔混合温控方案利用0#块上层腹板预应力孔道作为冷却通道,结合内部冷水管差异化分层布置(具体参数为:通水时间3 d、通水流速0.21 m/s、初始水温15℃,布置间距0.8 m),避免了冷水管与预应力孔道的空间冲突,节约了成本。

(2)冷-孔混合温控方案的温控效果显著。与无温控方案相比,核心最大温度降低22%,温效主拉应力降低了50%,各项温控指标均满足要求。

(3)现场温度监测结果与计算值较接近,验证了有限元模拟的正确性和本文所提出的冷-孔水化热混合温控方案的有效性。

参考文献:

- [1] 汪建群,魏桂亮,刘杰,等.跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J].桥梁建设,2020,50(3):25-31.
- [2] 李之达,孙绪涛.考虑冷水管的大体积混凝土水化热初期温度场研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(6):1-7.
- [3] 耿鸣山,林尔姬,吕建兵,等.大体积混凝土承台的水化热分析及温控研究[J].混凝土,2021(9):50-55.
- [4] 王军,郝宪武,李峰,等.考虑冷水管的混凝土水化热温度场的有限元分析[J].广西大学学报(自然科学版),2013,38(4):929-935.
- [5] 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.
- [6] 王丽,邓继,徐纯霞,等.大体积混凝土温控和预应力协同防裂措施[J].江苏水利,2022(7):6-10;15.
- [7] 蔡鹏.大体积承台混凝土浇筑温控技术研究[J].城市道桥与防洪,2025(5):291-294;304.
- [8] Aguilar-López J P, Warmink J J, Schielen R M J, et al. Piping erosion safety assessment of flood defences founded over sewer pipes[J]. European journal of environmental and civil engineering, 2018, 22(6): 707-735.
- [9] GB/T 51028—2015 大体积混凝土温度测控技术规范[S].
- [10] 张智晖.预应力混凝土箱梁时变温度场及其效应研究[D].西安:长安大学,2010.
- [11] 刘效平.冬季施工大体积混凝土水化热温控措施与研究[J].公路,2017(5):132-135.
- [12] 李治勤.高等流体力学[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
- [13] 邓元望,袁茂强,刘长青.传热学[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [14] GB 50010—2015 混凝土结构设计规范[S].