

嘉陵江特大桥 9# 墩承台混凝土浇筑温度效应分析及影响因素敏感性研究

宣晓东¹, 刘鹏¹, 欧阳华²

(1.中交一公局第八工程有限公司, 天津市 300000; 2.中交一公局桥隧工程有限公司, 湖南长沙 410114)

摘要:以龙溪嘉陵江大桥 9# 墩承台施工为实例工程, 首先验证了埋设冷却水管对降低混凝土温度具有显著效果; 然后分析了冷却管通水量、冷却管管径、冷却管间距等因素对降低混凝土温度作用效果的敏感性; 最后针对上述研究结论得到了冷却水管埋设的最优方案, 并验证了最优方案下混凝土应力、法向裂缝比率与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的符合性。

关键词:深水大跨径桥梁; 大体积混凝土; 温度应力; 冷却水管

中图分类号: U412

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)01-0091-06

0 引言

在深水大跨径桥梁建设中, 需要大尺寸桥墩承台来承担大跨高墩桥梁的承载力、结构稳定和结构整体刚度等要求^[1-4]。然而, 混凝土在浇筑后因水化凝结而在短时间内产生大量的水化热^[5], 且混凝土热传导性较差, 致使混凝土内外温差较大(通常可达 20~50 ℃)^[6-8], 产生内外应力差, 在混凝土塑性收缩过程中最终产生裂缝^[9], 影响混凝土构件的力学性能和使用寿命。因此, 在深水大跨径桥梁的大体积承台混凝土浇筑施工前, 研究实例工程在施工方案下的水化放热过程、影响因素与影响效应, 并针对性地提出温控措施, 对于减小大体积承台混凝土温度应力裂缝, 保证桥梁施工、运营安全具有十分积极的意义。

目前, 常见的控制大体积承台混凝土温度应力裂缝的工程措施主要有 3 类^[10-12]: (1) 采用工程措施促进混凝土内、外部的热传递, 常见的措施主要有预埋冷却水管道法; (2) 直接降低混凝土内外温差, 主要的方法有采用冰水拌和; (3) 优化施工原材料, 包括外掺添加剂等措施。其中, 预埋冷却水管道法是最常用、最直接有效的方法。

本文以重庆市三环线合川到长寿段龙溪嘉陵江大桥 9# 墩承台施工为实例工程, 研究冷却管管径、冷却管间距、冷却管通水量等因素对降低实例工程 9# 墩承台混凝土温度及温度应力的作用规律, 并研

究设计方案冷却水管布设的合理性。

1 实例工程概况

1.1 实例工程简介

龙溪嘉陵江特大桥为重庆市三环高速合川至长寿段的控制性工程, 连接了合川、北碚、渝北、长寿等大中城市, 为重庆高速集团合川公司与合川区政府合建项目, 投资金额为 37 890 万元。龙溪嘉陵江特大桥于合川区下游的龙洞沱河段跨越嘉陵江, 道路等级为双向 4 车道高速公路 + 双向 4 车道市政路 + 人行道, 设计速度为 80 km/h (高速)、40 km/h (市政), 桥梁宽度为 43.5 m, 跨径布置为 3 × 30 m + 4 × 30 m 预应力混凝土 T 梁 + 108 m + 200 m + 108 m 预应力混凝土连续刚构 + 5 × 30 m + 5 × 30 m + 4 × 30 m 预应力混凝土 T 梁, 桥梁全长 1 053 m。下部结构主墩、过渡墩及引桥 6 号墩采用实体墩, 桩基础; 其余引桥墩采用柱式墩, 桩基础; 桥台采用肋板台, 桩基础。

1.2 主跨 9# 墩承台设计

主桥 9# 主墩采用整体基础, 承台为圆端形, 平面尺寸 44.5 m × 14.5 m × 5 m, 桩基采用 19 根直径 2.8 m 的钻孔灌注桩, 按嵌岩桩设计。承台的冷却水管平、立面布设见图 1。

1.3 混凝土重要参数

大体积混凝土配合比设计原则是配制出绝热温升小、抗拉强度较大、极限拉伸变形能力较大、热强比小、线胀系数小^[5], 自生体积变形最好是微膨胀, 至少是低收缩的混凝土。混凝土配合比按照低砂率、低坍落度、低水胶比、掺高效减水剂和高性能引气剂、

收稿日期: 2020-05-26

作者简介: 宣晓东(1983—), 男, 学士, 工程师, 从事路桥工程技术工作。

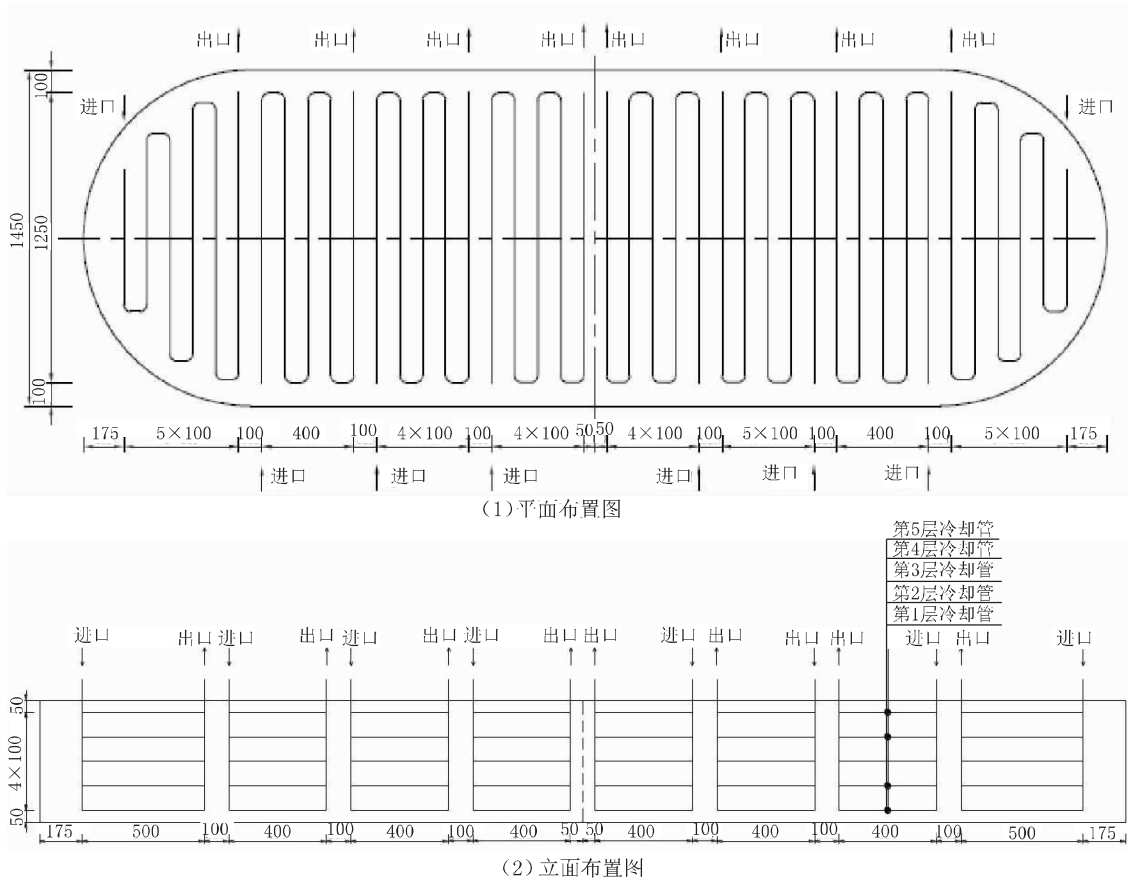


图1 嘉陵江特大桥9#墩承台冷却水管平、立面布置图(单位:cm)

高粉煤灰掺量的设计原则进行设计。

实例工程承台基础构造尺寸大,承台采用C35混凝土。对承台大体积混凝土进行温控计算,混凝土配合比见表1。

表1 9#承台基础C35混凝土配合比 单位:kg/m³

水泥	粉煤灰	矿粉	砂	石	水	外加剂
369	65	0	712	1 113	165	5.6

1.4 承台施工过程介绍

实例工程位于西部山区河流段,桥位处历年最高水位为208.500 m,最低水位为185.100 m,最大水位差为23.4 m,水深可达28~50 m,属于内河大型深水基础。为克服大水位差、大水深、年际冲淤位置变化大、夏季汛期暴雨集中等不利自然条件,创造施工环境,实例工程采用钢吊箱围堰型式。实例工程封底混凝土底标高186.70 m,厚2.5 m,采用C30水下封底混凝土。

同时,实例工程9#墩承台高度为5 m,承台混凝土标号为C35,浇筑总方量为996.35 m³。

1.5 监测点布置方案

实例工程监测点布置方案如下:

(1)沿竖直方向共分为上、中、下3层,每层均布

设24个测点,每层测点布设位置均一致。

(2)所有测点均绑扎在骨架钢筋上。

(3)每个测点上布设1个测温仪和2个应变计。因此,实例工程共设置72个测点、72个测温仪和144个应变计。

2 三维模型建立及验证

对大体积混凝土而言,混凝土开裂最主要的原因是干缩和温度应力。混凝土的凝结和硬化是水泥与水之间发生化学和物理变化的结果^[3]。大体积混凝土浇筑后由于水泥水化放热作用,将经历诱导期、升温期、降温期和稳定期4个阶段^[6],在这4个阶段中,混凝土的体积亦随温度的升降而相应膨胀或收缩,各块混凝土体积变化受到约束时就会产生温度应力,如果该应力超过混凝土的抗裂能力,混凝土就会开裂。

为研究承台浇筑施工过程中冷却管的降温效果,以及冷却管设置参数变化对冷却效果的具体影响,本文考虑借助迈达斯软件FEA 版块建立三维有限元模型进行对比分析。

2.1 基本方程

2.1.1 绝热温升计算

水化热函数采用朱伯芳院士提出的三参数指数

函数的形式^[6],绝热温升 $T(t)$ 为:

$$T(t) = \frac{WQ}{C\rho} (1 - e^{-mt}) \quad (1)$$

式中: W 为单位体积混凝土的胶凝材料用量; Q 为单位质量水泥产生的水化热,C35 混凝土水化热为 375 kJ/kg; C 为混凝土的比热容,C35 混凝土的比热容取 0.90~0.95; ρ 为混凝土密度,C35 混凝土密度为 2 500 kg/m³; m 为浇筑混凝土系数,实例工程取 0.35; t 为混凝土龄期。

经计算,实例工程混凝土的最大绝热升温值为 59.76 °C。

2.1.2 弹性模量

混凝土弹性模量 $E(\tau)$ 随时间 τ 的增长曲线采用四参数双指数形式^[7],表达式如下:

$$E(\tau) = E_0 + E_1(1 - e^{-\alpha\tau^\beta}) \quad (2)$$

式中: E_0 为混凝土初始弹性模量; E_1 为混凝土弹性模量增加量,即混凝土最终弹性模量与初始弹性模量之差; α 、 β 分别为与弹性模量增长速率相关的 2 个参数。

2.1.3 徐变度

根据文献[13],混凝土徐变度 $C(t, \tau)$ 按照下式取值:

$$C(t, \tau) = C_1(1 + 9.20\tau^{-0.45})(1 - e^{-0.30(t-\tau)}) + C_2(1 + 1.70\tau^{-0.45})(1 - e^{-0.005(-\tau)}) \quad (3)$$

2.2 主要技术参数

2.2.1 混凝土物理力学参数

承台混凝土设计强度为 C35,封底混凝土为 C30,混凝土强度参考值按经验取值,结果见表 2。

表 2 混凝土物理力学性能参数值

类型	弹性模量 /MPa	泊松比	重度 / (kN·m ⁻³)	热膨胀系数
C30 封底混凝土	30 000	0.2	25.6	1 × 10 ⁻⁵
C35 承台混凝土	31 500	0.2	25.6	1 × 10 ⁻⁵

2.2.2 模型主要计算参数

水冷管采用直径 40 mm 钢管。水冷管通水时间为 10 d,冷却水管流量为 1 m³/h。模型中用到的计算参数还有:封底混凝土的强制温度 15 °C、混凝土入模温度 25 °C;另外,由于承台施工期间环境温度变化难以推测,根据工程建设区域施工前 1 年(2018 年)7 月份气温情况,采用正弦函数来模拟 1 d 内的温度变化,其中温度最高值为 40 °C,最低值为 24 °C。模型主要计算参数见表 3。

2.3 三维模型建立

采用迈达斯软件建立三维有限元模型,并采用

表 3 模型主要计算参数表

部位	水化热参数取值			浇筑温度 / °C
	热传导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容 / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	对流换热系数 / (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	
C30 封底混凝土	2.7	1 150	4.170	20
C35 承台混凝土	2.6	1 176	4.174	15.4
冷暖管		4 200	371	

四边形网格划分计算区域。三维模型建立结果见图 2。

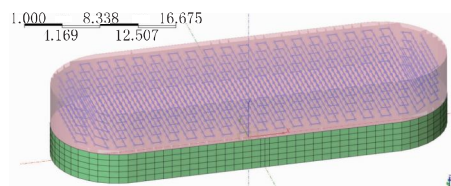


图 2 三维模型建立与网格划分

2.4 三维模型计算结果验证

取 35# 测点(位于中层)为代表,分析实例工程在设计方案下,施工过程中温度值及应力值变化比较,比较结果见图 3。

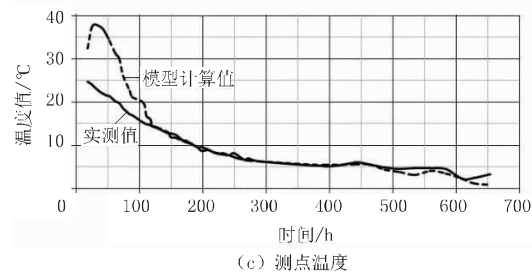
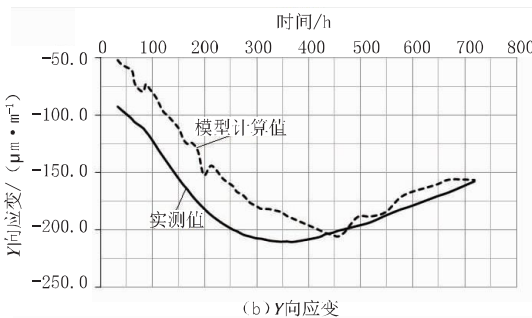
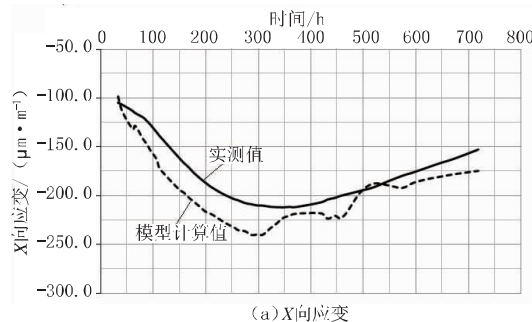


图 3 实例工程计算精度对比图

经过大量实测数据分析,在 2 275 组实测、计算数据中(包括应变、温度),计算误差在 10% 以内的数据 1 744 组,占比为 76.7%;计算误差在 20% 以内的数据共 1 899 组,占比为 83.5%。可见本文数值计

算结果与实例工程实测结果较为相似,能够很好地反映真实情况。

3 三维模型计算结果分析

3.1 冷却管降温效果分析

采用有冷却管、无冷却管 2 种模型进行建模分析,定量判断冷却管的降温效果。经数模计算分析,承台水化热在前 240 h 变化较明显,之后趋于稳定。因此本文选择 50 h、140 h、220 h 作为典型时段进行分析。为更好地观察混凝土内部温度分布情况,只取承台部分区域进行展示分析,计算结果见图 4。

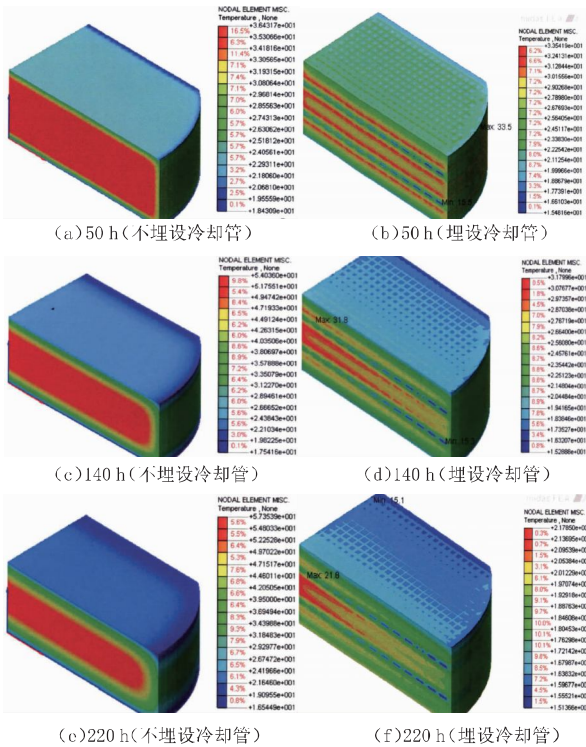


图 4 冷却管降温效果过程云图

由图 4 可知:

(1)在不埋设冷却管情况下,混凝土内部温度升温迅速,降温缓慢,直到 215 h 才达到最大温度(47.2℃)。埋设冷却管后,混凝土内部温度升温迅速,但由于冷却管作用,混凝土内部温度快速下降;在 79.2 h 达到最大温度 26.8℃,比不埋设冷却管工况提早了 135.8 h,大幅减少了混凝土高温持续时期,同时最大温度也减少了 20.4℃。埋设冷却管后,对混凝土外部温度也略有影响,但影响相对较小。

(2)埋设冷却管后,混凝土内外最大温差由 28.8℃下降至 15.2℃,减少了 13.6℃,有效缓解了混凝土内外温度应力差值。

(3)配置冷水管后,混凝土内温度明显变均匀。混凝土内部,尤其是冷却管周边区域温度下降明显。埋设与不埋冷却管的不同工况下,冷却管降温

效果对比统计见表 4、图 5。

表 4 冷却管降温效果对比统计

是否埋设冷却管	混凝土位置	最大温度/℃	最大温度出现时间/h	前 220 h 平均温度/℃	混凝土内外最大温差/℃	最大应力/MPa
否	混凝土外部	24.65	79.2	21.6	28.8	2.39
	混凝土内部	57.18	215.0	47.2		
是	混凝土外部	21.86	46.0	16.8	15.2	0.66
	混凝土内部	33.65	85.2	26.8		

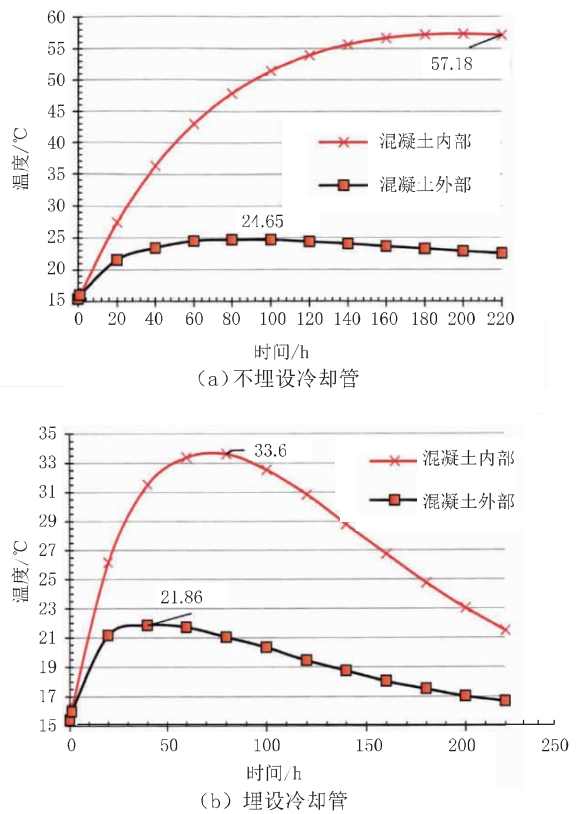


图 5 冷却管降温效果统计对比图

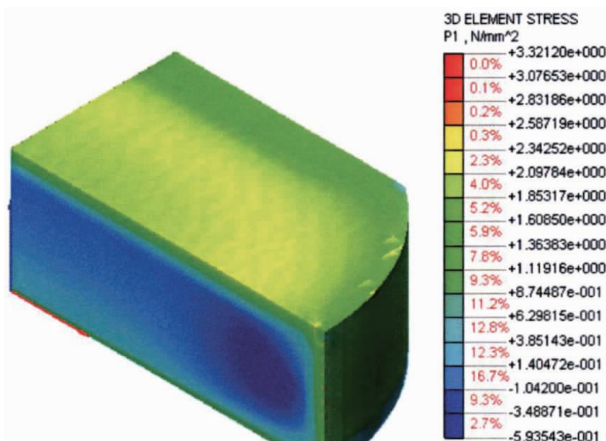
以 140 h 为代表,有冷却管、无冷却管 2 种模型下的承台混凝土最大应力云图见图 6;2 种模型下的承台混凝土最大主应力变化过程见图 7。分析可知:

(1)设置冷却水管前,实例工程最大应力达到 2.39 MPa,远大于 C35 混凝土最大拉应力 1.52 MPa 的临界要求,且在浇筑后 220 h 时还呈缓慢增大趋势,如此将持续造成承台混凝土开裂。

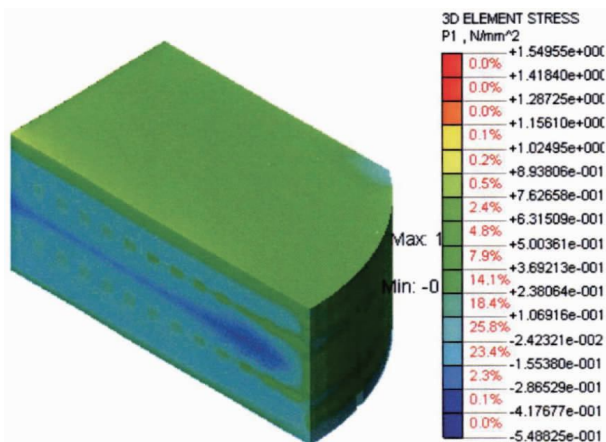
(2)设置冷却水管后,由于冷却管有效减小了混凝土内部温度,从而大幅减小了混凝土内部应力。在图 7 工况下,混凝土内部最大应力由 2.39 MPa 减小为 0.66 MPa,远小于 1.52 MPa 的临界要求。

3.2 冷却水流量影响

维持冷却水管管径为 40 mm 不变,设置通水量分别为 0.5 m³/h、1.0 m³/h、1.5 m³/h、2.0 m³/h 的 4 组对比方案。取模型中间点为研究对象,在不同冷却水



(a) 不埋设冷却管



(b) 埋设冷却管

图6 混凝土浇筑140h时最大应力云图分布情况

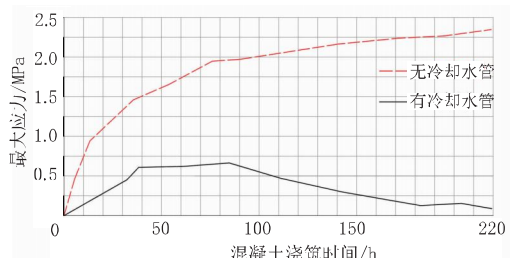


图7 混凝土最大应力变化过程

流量下,研究该点温度变化过程,见图8。由图8可知:

(1)冷却水管流量越大,冷却效果越好。在4种流量工况下,最大温度分别为27.3℃、26.8℃、26.5℃、26.3℃。

(2)在升温阶段(0~90h),混凝土内部水化热上升迅速,增大冷却水管流量对实例工程最大温度影响十分微弱。在降温阶段(90~220h),增大冷却水管流量可以略微降低温度,但是降低幅度十分有限。当通水量由0.5m³/h增大至2.0m³/h时,流量增大了1.5m³/h,增大了4倍,但是最大温度仅下降了1℃。

(3)综合来看,冷却水流量的增加对整体降温效果作用有限,且增大冷却水流量对水泵等机械设备要求较高,耗材增加大,性价比较低。因此,建议实例

工程仍维持1.0m³/h的设计流量。

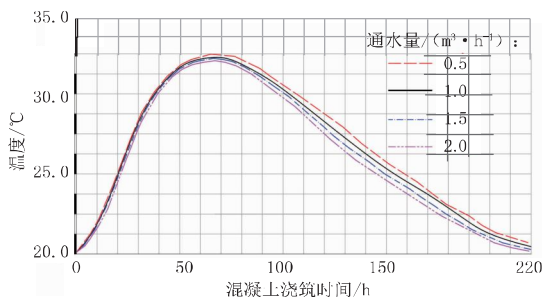


图8 不同冷却水流量下温度变化过程

3.3 管径影响

维持冷却水通水量为1.0m³/h,设置管径分别为35mm、40mm、45mm、50mm的4组对比方案。仍取模型中间点为研究对象,在不同管径下,研究该点温度变化过程,见图9。由图9可知:

(1)4组工况下,最大温度分别为26.9℃、26.8℃、26.7℃、26.7℃。可见增大管径,对实例工程温度下降有微弱作用。同时,在降温阶段(90~220h),增加管径对混凝土温度的降低作用略大于升温阶段(0~90h)。

(2)考虑到管径增大对降低混凝土温度作用影响较小,且预埋冷却水管道管径过大对施工要求较高,存在施工风险,因此建议维持40mm管径方案。

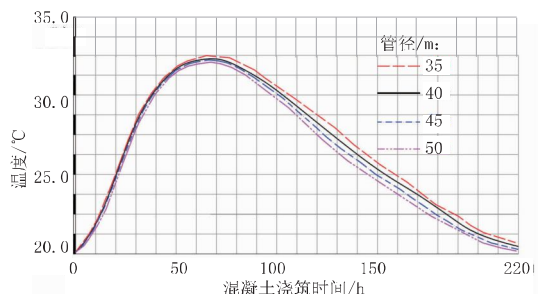


图9 不同管径下温度变化过程

3.4 管道竖向间距影响

经论证,在保证工程结构稳定性和施工可行性前提下,实例工程冷却水管的最小竖向间距为1.0m。维持冷却水通水量为1.0m³/h,管径为35mm,分别设置冷却水管间距为1.0m、1.5m、2.0m、3.0m的4组对比方案,取模型中间点为研究对象,在不同管道间距下,研究该点温度变化过程,见图10。由图10可知:

(1)4组工况下,最大温度分别为26.8℃、33.7℃、37.1℃、42.7℃,最大温度出现时间依次为70.1h、88.4h、93.6h和122.2h。可见管道竖向间距能显著降低混凝土内部温度,同时能减小混凝土升温时间。

(2)合理减小管道间距能有效降低混凝土水化热温度,小间距的冷却水管道布设降温优势明显。设

计方案中已经采用了最小竖向间距, 布置合理。

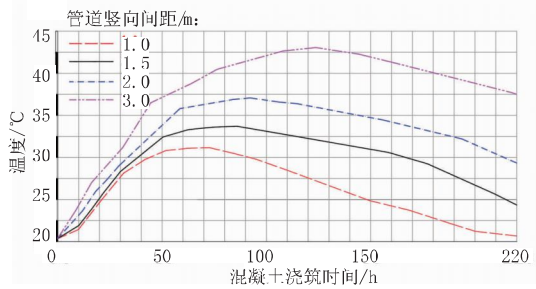


图 10 不同管道间距下温度变化过程

3.5 推荐方案与规范符合性分析

经上述分析,认为设计方案(采用埋设冷却水管方案,水冷管采用直径 40 mm 钢管;水冷管通水时间为 10 d,冷却水管流量为 1 m³/h,竖向间距设为 1.0 m)即为最优推荐方案。推荐方案计算结果符合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)要求,分析过程如下:

(1)最大应力。设置冷却水管后,由于冷却管有效减小了混凝土内部温度,从而大幅减小了混凝土内部应力,最大应力由 2.39 MPa 减小为 0.66 MPa,满足规范中小于 1.52 MPa 的临界要求。

(2)混凝土裂缝比率(法向)。法向裂缝比率 = 输出容许应力 / 产生应力,在保证通水的情况下裂缝比率最小值应大于 1.0。经计算,实例工程在 220 h 时,承台混凝土法向裂缝比率最小值为 5.0,满足要求。

混凝土法向裂缝比率分布云图见图 11。

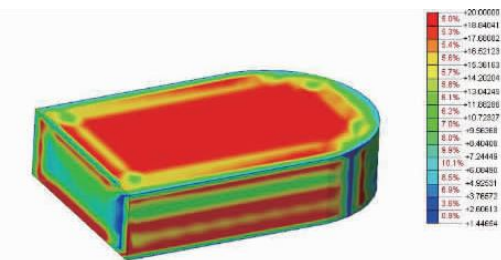


图 11 承台混凝土法向裂缝比率分布云图

4 结 语

(1)配置冷水管后,混凝土内温度明显变均匀,降温效果明显,混凝土内外最大温差由 28.8 ℃ 下降至 15.2 ℃,减少了 13.6 ℃;最大应力由 2.39 MPa

下降至 0.66 MPa。

(2)冷却水通过量和管径增大对混凝土温度下降作用十分微弱,且管径增大会影响混凝土结构整体性。

(3)减小管道竖向间距可以有效降低混凝土温度,小间距的冷水管竖向布置降温效果明显,在工程造价、设备性能允许且保证混凝土整体稳定性的前提下,应尽可能减小管道竖向间距。

(4)经研究,设计方案的排水管布设为最优方案。在设计工况下,混凝土内部最大温度为 26.8 ℃,最大应力为 0.66 MPa (满足小于 1.52 MPa 的规范要求),且混凝土法向裂缝比率均大于 5.0(满足规范大于 1.0 的要求),说明设计方案合理、可行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MUHAMMAD N A, KIM J-S, LEE Y, et al. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device[J].Cement and Concrete Research, 2015, 39: 154-164.
- [3] KRAJGINOVIC D,SILVA M A G.Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 18(7): 551-562.
- [4] HILLERBORG A,MODEER M. Analysis on crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J].Cement and Concrete Research, 2016, 6: 773-782.
- [5] 李杰,张其云.混凝土随机损伤本构关系[J].同济大学学报(自然科学版),2011,29(10): 1135-1141.
- [6] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第 2 版.北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 李庆斌,卿龙邦,管俊峰.混凝土裂缝断裂全过程受黏聚力分布的影响分析[J].水利学报,2017, 43(1): 31-36.
- [8] 高杰.福州琅岐闽江大桥承台大体积混凝土水化热分析与温控研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [9] BANERJEE S,MULESHKOV A. Analytical solutions for steady seepage into double-walled cofferdams [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 118(3):525-539.
- [10] SUNIRMAI B. Design charts for double-walled cofferdams [J]. Journal of Geotechnical Engineering,2013,119(2):214-222.
- [11] 刘沐宇,汪峰,丁庆军.双掺粉煤灰和矿粉大体积混凝土水化放热规律研究[J].混凝土,2010(1): 21-26.
- [12] 熊华飞.一次性浇筑厚尺寸承台大体积混凝土温控防裂研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [13] 高学振.大跨径连续刚构桥零号块水化热温度效应及温控措施研究[D].西安:长安大学,2015.

(上接第 74 页)

- [5] 李跃,罗申生,张健峰,等.广州新光大桥建设概况[J].中外公路, 2007, 27(1):86-91.
- [6] 唐康.海鸥式刚架系杆拱桥拱脚刚结点应力优化研究[D].四川成

都:西南交通大学,2010.

- [7] 徐升桥,任为东,刘春彦.新光大桥的设计与施工[J].铁道勘察, 2007(Z1):63-71.