

大体积混凝土承台水化热分析与控制

——以某产业园工程为例

胡佳鑫, 王江营, 李世雄
(湖南省第六工程有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 为研究混凝土内部水化热分布情况,以某产业园工程大体积混凝土承台为研究对象,介绍了相关施工工艺和措施,并采用有限元软件建立三维仿真模型,研究了冷凝管的降温效果。结果表明:1)混凝土表面达到最高温度时的龄期约为2 d,之后降温较快,而混凝土中心区域在龄期范围为3~4 d时才达到峰值温度;2)在管内径为30 mm的管道中通入0.8 m/s的冷凝水时,冷凝管降温效果较好,混凝土内表温差均能控制在25℃以内,混凝土表面产生的拉应力小于混凝土的抗拉强度;3)混凝土龄期2 d后宜在其表面加盖毛毡,延缓表面混凝土的降温速度,控制内外温差。

关键词: 大体积混凝土承台; 水化热; 管冷效果; 有限元分析

中图分类号: TU755.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0024-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.09.116

Analysis and control of hydration heat of the massive concrete pile cap

——Based on the project of a industrial park

HU Jiaxin, WANG Jiangying, LI ShiXiong
(Hunan No. 6 Engineering Co., Ltd., Changsha 410015, Hunan, China)

Abstract: In order to study the hydration heat of concrete, focusing on a massive concrete pile cap of an industrial park project, this paper introduced relevant construction techniques and control measures, and built a three-dimensional model by finite element analysis to study the effect of cooling pipe. The results showed that the concrete surface takes about 2 days to reach the highest temperature but then cools quickly, while the core of concrete takes 3~4 days. Moreover, injecting 0.8 m/s water into a pipe with an inner diameter of 30 mm has a better cooling effect. The temperature difference between the surface and the interior of concrete can be controlled within 25℃, making the tensile stress on the concrete surface lower than the tensile strength. It is advisable to cover the concrete surface with felt after the age of 2 days, to delay the cooling of surface concrete and control the temperature difference between the surface and the interior.

Key words: massive concrete pile cap; hydration heat; cooling effect; finite element analysis

大体积混凝土施工是工程项目建设中的重要环节。水泥水化过程会产生较多的热量,构件表面通过与空气接触散热较快,从而造成构件内外温差较大,在构件表面产生拉应力,导致裂缝的产生。而裂缝的继续发展、扩张,甚至在整个结构构件的贯穿,影响结构安全性与耐久性^[1]。因

此,为确保工程质量满足要求,在施工前对大体积混凝土水化热的影响参数进行分析,并据此采取针对性措施,避免构件的开裂。

随着计算机科学技术的发展,数值模拟方法大规模应用于工程领域。王龙等^[2]以某跨海大桥承台大体积混凝土为研究背景,通过研究其内部温度梯

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 湖南建工集团科技攻关项目(JGJTK2022-52)

作者简介: 胡佳鑫(1996—),男,工程师,一级建造师,从事工程施工技术管理工作。

度的分布情况, 揭示其水化热的发展规律, 据此对管冷参数进行优化, 发现质量流率为 1 500 kg/h 时可达较好的管冷效果; 王修山等^[3]对大体积混凝土水化过程的温度和应变规律进行研究, 发现浇筑温度和绝热温升增大了混凝土第一主拉应力、增加了开裂的可能性, 且管冷能明显降低混凝土的内外温差, 但混凝土内部存在应力集中现象, 可能导致其内部产生微裂缝; 黄泽钦等^[4]对大体积混凝土的研究结果表明, 在选取合理的参数情况下, 数值仿真结果可信用度高, 误差不超过 10%, 经济高效, 可为工程实践提供指导。

本文依托某产业园项目, 通过选取具有代表性的承台, 采用数值模拟方法分析管冷效果, 确定施工管冷参数, 以期为大体积混凝土施工提供一定的参考。

1 工程概况

某产业园项目基础形式为桩-筏基础, 采用 C35P8 商品混凝土。混凝土承台编号为 CT1~CT16, 其中 CT10~CT16 承台均为大体积混凝土。CT16 承台平面尺寸为 12.2 m×12.2 m, 深度为 2.5 m, 局部深度因钢柱埋深的要求, 达到了 3.5 m, 一次性浇筑方量约为 340 m³, 如图 1 所示。此类承台浇筑混凝土时, 为防止钢管柱上浮或位移, 先进行局部钢柱埋深部分的浇筑, 再完成混凝土承台浇筑等工作。

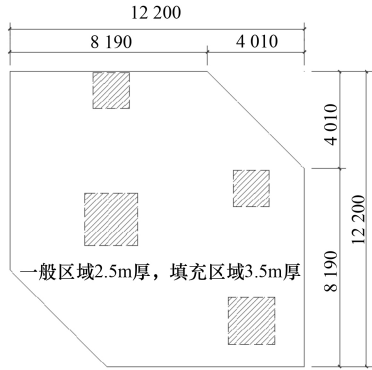


图1 承台厚度分区示意

mm

2 模型建立及参数设置

2.1 模型建立

利用有限元软件 Midas Gen 模拟大体积混凝土水化热情况。选取 CT16 承台作为模拟对象, 并在承台模型四周及底部建立地基土模型, 如图 2 所示。模型共有 10 055 个节点、8 828 个实体单元。

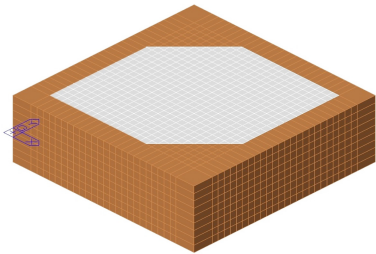


图2 实体有限元模型

2.2 参数设置

2.2.1 材料特性

CT16 承台和地基土计算参数如表 1 所示, 大气温度 15 ℃ 为浇筑与养护期间的平均温度, 浇筑温度假定稍高于大气温度, 为 20 ℃, 其余参数根据配合比与相关规范进行选取。

为了准确描述混凝土抗压、抗拉强度随龄期增长的变化规律, 采用美国混凝土结构设计规范 ACI 318-05 中混凝土抗压强度随龄期变化的公式, 对应的材料抗拉强度, 根据计算程序, 由已定义的材料抗压强度发展函数获得。材料抗压强度发展公式:

$$f_c(t) = \frac{t}{a + bt} f_c(28)$$
 (1)

式中: $f_c(t)$ 为龄期 t 时的抗压强度, MPa; $f_c(28)$ 为混凝土 28 d 龄期时的抗压强度, MPa; a 、 b 为常数, 分别取值为 4.5、0.95; t 为龄期, d。

2.2.2 边界条件

模型在边界条件中设置约束边界、固定温度条件、对流边界 3 个边界条件组。在约束边界中, 设定模型四周与底面为固定约束, 限制 3 个方向

表1 模型计算参数

模型构件	比热容/ [kJ·(kg·℃) ⁻¹]	热导率/ [kJ·(m·h·℃) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)	对流系数/ [kJ·(m ² ·h·℃) ⁻¹]	抗压强 度/MPa	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	泊松比	线膨胀系 数/10 ⁻⁵	水泥含量/ (kg·m ⁻³)
CT16 承台	1.047	9.63	2 400	50.232	35	3.15	0.2	1	255
地基土	0.837	7.12	1 800	—	—	—	0.2	1	—

(X 、 Y 、 Z) 的移动。在固定温度条件中, 设定地基土温度为大气平均温度值 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 混凝土初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在对流边界中, 参照《建筑施工手册》(第五版) 的取值, 设定混凝土表面保温对流系数为 $50.232\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2.2.3 管冷参数

根据《大体积混凝土温度测控技术规范》(GB/T 51028—2015), 混凝土 t 时段冷凝放热量计算公式:

$$Q_t = C_{co}\rho V_{co}\Delta T \quad (2)$$

$$Q_{cool} = k_c Q_t \quad (3)$$

$$m_w = \frac{Q_{cool}}{C_w (T_{out} - T_{in})} \quad (4)$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{m_w}{\pi v_w t_c \rho_w}} \times 10^3 \quad (5)$$

式中: Q_t 为水冷期间混凝土散热量, kJ ; C_{co} 为混凝土的比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 取值为 $1.047\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为混凝土的重力密度, kg/m^3 , 取值为 $2400\text{ kg}/\text{m}^3$; V_{co} 为混凝土体积, m^3 , 取值为 340 m^3 ; ΔT 为 t 时段内混凝土的温差, $^{\circ}\text{C}$, 假定温差为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; Q_{cool} 为冷凝水带走的总热量, kJ ; k_c 为总热量中被水冷凝带走的热量系数, 取值为 0.3 ; m_w 为冷凝水总质量, kg ; C_w 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 取值为 $4.18\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; T_{out} 为冷却水出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为冷却水进口温度, $^{\circ}\text{C}$; d 为冷凝管内径, mm ; m_w 为冷凝水总质量, kg ; v_w 为冷凝水流速, m/s , 取值为 $0.8\text{ m}/\text{s}$; t_c 为混凝土通水冷凝时间, s , 取值为 $5.4 \times 10^5\text{ s}$; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 , 取 $1000\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

通过计算, 至少需要采用内径为 30 mm 的冷凝管进行管冷降温, 故假定冷凝管径为 30 mm 进行分析。冷凝管平面布置如图 3 所示, 在距离承台底 1.25 m 的位置布置单层冷凝水管, 水平间距为 1.5 m 。

3 管冷效果数值分析

3.1 温度情况

3.1.1 温度时程云图

图 4 为不同龄期时的承台温度分布。由图 4 可知: 混凝土核心区温度分布不均匀。当混凝土龄期为 10 h 时, 混凝土刚开始水化放热, 整个承

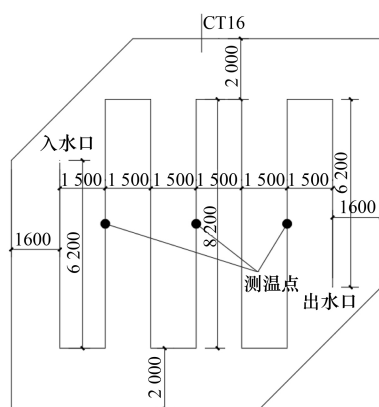


图 3 冷凝水管布置 mm

台受热均匀, 混凝土承台内外温差不大; 当混凝土龄期为 45 h (即约 2 d) 时, 混凝土表面温度达到最高, 约为 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而混凝土内部升温较快, 达到了 $52\text{ }^{\circ}\text{C}$; 随着龄期进一步增加, 当混凝土龄期为 80 h (即 $3\sim 4\text{ d}$) 时, 混凝土核心区继续升温, 内部温度达到峰值, 约为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而混凝土表面温度下降至约 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 当混凝土龄期为 150 、 350 、 500 h 时, 混凝土水化热持续减少, 混凝土内部温度下降较快, 混凝土内表温差减小。

3.1.2 温度时程分析

选取有无管冷时混凝土中心与对应表面位置进行温度时程分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 前 20 h 冷凝管的降温效果不明显。相比无冷凝管, 有冷凝管的混凝土中心区域最高温度低约 $6\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。混凝土中心与表面温差如图 6 所示。由图 6 可知: 混凝土最大温差出现在龄期为 $70\sim 240\text{ h}$ ($3\sim 10\text{ d}$) 时段, 且均超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据《大体积混凝土施工规范》(GB 50496—2018) 要求, 混凝土内表温差不应大于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于无冷凝管的承台, 其内表最大温差达到了 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且在龄期范围为 $70\sim 240\text{ h}$ 时, 其温差均大于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 存在开裂的风险。

3.2 应力情况

选择同一位置混凝土表面进行应力时程分析, 结果如图 7 所示, 其中正值为拉应力, 负值为压应力。由图 7 可知: 龄期前 30 h , 混凝土表面先产生压应力, 再产生拉应力, 拉应力峰值出现时间与混凝土内部最高温度出现时间一致。对于无冷凝管的混凝土承台, 在龄期为 $80\sim 100\text{ h}$ ($3\sim 4\text{ d}$) 时, 其表面拉应力达到或超过了混凝土的容许抗拉强度, 说明此时极易发生混凝土破坏性裂

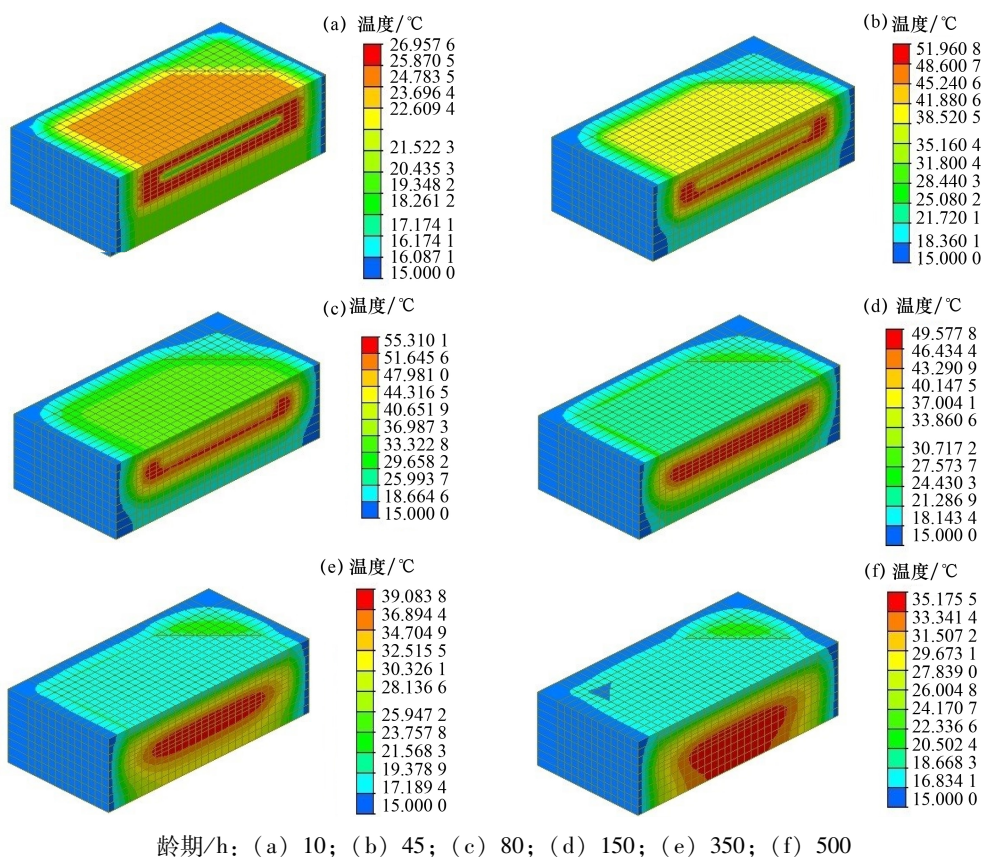


图 4 不同龄期时承台温度分布

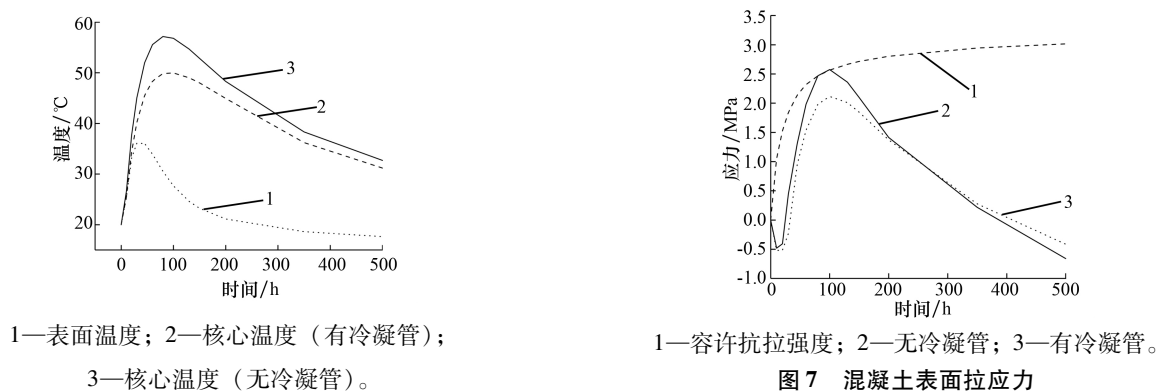


图 5 温度时程曲线

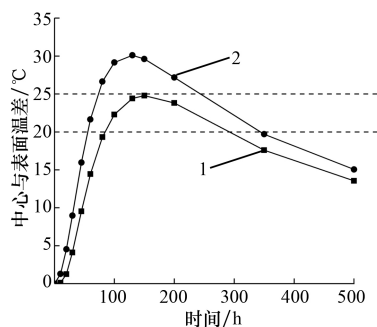


图 6 混凝土中心与表面温差

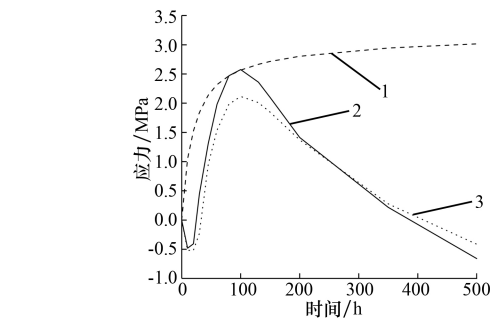


图 7 混凝土表面拉应力

缝。对于有冷凝管的混凝土承台, 其拉应力均小于混凝土容许抗拉强度, 其峰值拉应力相比无冷凝管的混凝土承台拉应力低约 0.5 MPa。分析其原因, 冷凝管吸收了大量热量, 起到减小混凝土内表温差的作用, 使得有冷凝管的混凝土承台表面拉应力始终未超容许抗拉强度。

4 大体积混凝土施工控制

4.1 施工控制措施

4.1.1 管冷降温

通过对比分析有无冷凝管时的大体积混凝土温

度和表面拉应力相关数据可知,通入上述参数的冷凝水效果较好,能够起到控制混凝土内表面温差过大,防止大体积混凝土开裂。依据 GB/T 51028—2015 中第 6.3 节内容及相关工程经验,设计单层水管,采用 DN40 的 PVC 管作为冷凝管,冷凝管流速、间距等参数按照上述取值,并等间距设置 3 处测温点。

4.1.2 配合比设计

在确保混凝土性能符合设计与规范要求的前提下,优选原材料,即采用 P. O. 42.5 水泥,粗骨料采用连续级配碎石,细骨料尽可能采用中砂;同时,结合掺粉煤灰和矿渣粉的双掺工艺,降低单位体积混凝土中的水泥含量,从源头上减少水泥水化放热。另外,在混凝土中添加适量高性能抗裂防水膨胀剂,有助于减少混凝土裂缝的产生。采用混凝土配合比如表 2 所示。

表 2 C35P8 混凝土配合比

材料	配合比	用量/(kg·m ⁻³)
水泥	1.000	255.0
砂	3.810	972.0
石	3.330	848.0
水	0.630	160.0
粉煤灰	0.160	41.0
矿粉	0.200	50.0
外加剂	0.038	9.7

4.1.3 浇筑与振捣

大体积混凝土浇筑采用“斜面分层法”施工,即采用“斜向分层、一次到底、梯级浇筑、逐渐倒退”的方式进行混凝土浇筑。按照自然流淌坡度(约为 1:6)进行施工,每层浇筑厚度约为 500 mm,以充分留出散热面散热。施工时,在下一层混凝土初凝前浇筑上一层混凝土,振捣棒插入下层不少于 50 mm,以避免层层浇筑之间施工缝的产生。振捣棒遵循“快插慢拔、均匀振捣”的原则进行振捣,采用“行列式”移动,且移动间距不大于振捣棒作用半径的 1.5 倍,即 30~40 cm。

4.1.4 养护

对已浇筑完成的大体积混凝土,在终凝前、收平拉毛后 2 h 左右时,在其表面用一层塑料薄膜保湿覆盖,混凝土养护时间不少于 14 d;同时,为避免混凝土内外温差过大,养护期间始终保持混凝土表面微热潮湿状态。

4.2 现场实施效果

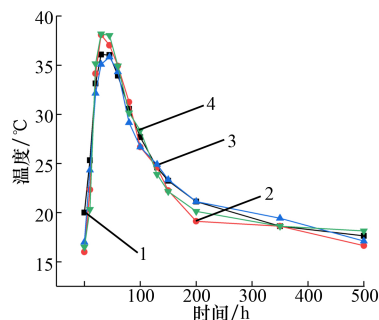
为了保证实施效果,提前准备好满足要求的两台水泵,其中一台作为备用设备保证稳定供水,并利用降水井中的水作为循环冷凝水。现场实施时,冷凝管与承台底筋安装同步进行,且尽可能地利用承台支撑钢筋进行架设,并绑扎牢固,接头严封避免渗水。安装完毕后,首先进行试压,并通入一段时间冷凝水,无渗漏且出水稳定后方可使用。浇筑混凝土时,避免混凝土直接浇筑在冷凝管上冲断水管,且当浇筑的混凝土面接近水管时,适当放慢浇筑速度,避免浮力造成水管破坏。当混凝土初凝后,便开始通水。通水完成,采用与混凝土同配合比的水泥浆进行堵孔,待出水口有稳定浆液流出且无气泡时,方可停止压浆,并切除露出承台的多余水管。此外,在养护过程中按照相关要求实时记录测温点处温度。

按照上述介绍的技术措施实施后,该承台及其他采取同样技术措施的大体积混凝土承台未见有害的结构性裂缝,养护完成后表面效果较好,如图 8 所示。



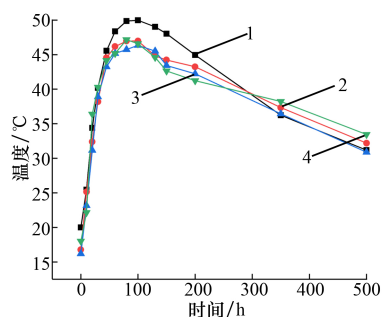
图 8 现场实施情况

将现场实测数据进行汇总,如图 9、10 所示。由图 9、10 可知:承台表面最高温度约为 38.1℃,出现在龄期第二天;承台内部最高温度约为 46.7℃,出现在龄期第四天,实测数据与数值分析数据较为吻合。



1—数值模拟; 2—测温点 1; 3—测温点 2; 3—测温点 3。

图 9 承台表面实测温度时程曲线



1—数值模拟; 2—测温点 1; 3—测温点 2; 4—测温点 3。

图 10 混凝土中心实测温度时程曲线

5 结 论

(1) 在保证混凝土强度满足要求的前提下,从源头上降低水泥水化热,减少水泥用量。此外,应当合理安排施工,采用斜面分层浇筑,尽可能留出散热面;浇筑完毕后,保持混凝土表面微热潮湿的状态,养护时间不得少于 14 d。

(2) 管冷降温是一种相当高效的减少混凝土内外温差的方式,应当控制好冷凝水的通水时间与流量,充分利用场地原有水资源,且在施工前,可以借用数值模拟的方法,分析管冷效果,以确

定适合的管冷参数。

(3) 通过数值分析结果与现场实测结果可知,混凝土表面达到最高温度时龄期约为 2 d,之后降温较快;而混凝土内部约在龄期 4 d 时才达到峰值温度。为了避免混凝土内外温差过大,产生较大的拉应力裂缝,宜在龄期 2 d 后在承台表面加盖毛毡,延缓混凝土表面的降温速度,或者适当增大冷凝水流量,加快混凝土内部区域降温。

参考文献:

- [1] 陈东,魏天酬,吴鑫,等. 大体积混凝土早期温度应力有限元数值模拟研究[J]. 广东建材,2021,37(12):1-3.
- [2] 王龙,鲁乃唯,王柏文. 大体积混凝土承台水化热分析及管冷参数优化[J]. 工程建设,2019,51(4):1-5;17.
- [3] 王修山,侯宁. 水管冷凝对大体积混凝土温度应力的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品,2019(8):15-18.
- [4] 黄泽钦,王培旭. 大体积混凝土水化热温度应力裂缝控制的试验及有限元仿真分析[J]. 工程建设,2017,49(12):24-29.
- [7] 吴立晴,邵国栋,盛寒柯,等. 螺旋锚在软黏土中上拔承载力计算与数值模拟分析[J]. 低温建筑技术,2021,28(10):120-124.
- [8] 陈斌,朱照清,冯炳,等. 地基螺旋锚抗拔承载性能原位试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(5):71-74;132.
- [9] 许宏发,吴华杰,郭少平,等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2002(5):10-12.
- [10] 屈讼昭,郭咏华,王仪,等. 大锚片螺旋锚在粉质黏土中上拔受力性能的原位试验研究及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3655-3668.

(上接第 23 页)