

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.004

基于热流耦合算法的大体积混凝土水管冷却仿真分析

司 政, 王三禄, 王正鑫, 辛兰芳

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 水管冷却是大体积混凝土最为有效、使用最为广泛的温控防裂措施,而水管参数对冷却效果影响显著。本文以某混凝土重力坝的4个浇筑层为研究对象,采用热流耦合算法,对影响水管冷却效果的主要参数进行定量分析。研究结果表明:通水水温由20℃减小至8℃过程中,水温每降低1℃,混凝土最高温度降低约0.30℃。通水流量从0.9 m³/h增大至1.2 m³/h过程中,流量每增加0.1 m³/h,混凝土最高温度降低约0.33℃;通水流量从1.2 m³/h增大至1.5 m³/h过程中,流量每增加0.1 m³/h,混凝土最高温度降低约0.28℃。水管间距小,通水水温低,通水流量大时冷却效果较好,采用双循环水管布置形式时冷却效果较好。实际工程中应综合考虑这些参数以确定最佳冷却方案。

关键词: 大体积混凝土; 水管冷却; 热流耦合算法; 冷却效果

中图分类号: TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)03-0270-06

Simulation analysis of mass concrete with cooling pipes based on heat-fluid coupling method

SI Zheng, WANG Sanlu, WANG Zhengxin, XIN Lanfang

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048 China)

Abstract: Pipe cooling is the most effective and widely used temperature control and crack prevention measures for mass concrete, with pipe parameters having a significant effect on the cooling effect. In this paper, taking four concrete pouring layers in a gravity dam as the research object, heat-fluid coupling method is used to quantitatively analyze the influence of main pipe parameters on the cooling effect, with the quantitative effect of pipe parameters obtained. The results show that water temperature decrease from 20℃ to 8℃, and that every one-degree drop in water temperature will decrease by about 0.30℃ of the maximum temperature of concrete. Water flow increases from 0.9 m³/h to 1.2 m³/h, and each 0.1 m³/h increase in water flow will decrease by about 0.33℃ of the maximum temperature of concrete. Water flow increases from 1.2 m³/h to 1.5 m³/h, and each 0.1 m³/h increase in water flow will decrease by about 0.29℃ of the maximum temperature of concrete. It also shows that cooling effect is better when the pipe spacing is smaller, water temperature is lower and water flow is larger, and that the cooling effect is better when the layout of the double circulation is adopted. These parameters should be considered to find the optimal cooling scheme in practical engineering.

Key words: mass concrete; pipe cooling; heat-fluid coupling method; cooling effect

20世纪90年代,朱伯芳院士提出了计算含有冷却水管的大体积混凝土温度场的“等效算法”^[1,2],并被广泛用于实际工程中。随着现代计算技术的发展,该方法的缺点也越来越突出:①不能精细模拟水管处的混凝土温度;②不能考虑冷却水的沿程温升。

为解决这一实际工程问题,许多科研人员对水管冷却模拟方法和计算方法进行了专门的研究。刘宁和刘光廷^[3]将混凝土中冷却水管所在单元视为子结构来模拟水管冷却效应,并编制了相应的计算程序TECOP;朱岳明等^[4]基于有限单元迭代算法,提出

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409207,51609200,51409208);中国博士后科学基金资助项目(2015M582765XB);西安理工大学科技创新计划资助项目(2016CX24)

作者简介: 司政,男,副教授,博士,研究方向为水工结构应力及温度应力研究。E-mail:sz123hlz@163.com

了一种数学上完全严密的新算法,并利用有限单元法的并行计算技术及子结构技术来降低计算规模,提高计算精度;朱伯芳^[5]用4种复合算法进行水管冷却仿真计算,并给出了各个算法的适用范围;强晟等^[6]将混凝土分为非线性温度区(A区)、线性温度区(B区)、管内流体区(水区)来计算含冷却水管混凝土温度场,解决了计算精度和效率的协调问题;王海波等^[7]将P型有限元法用于含冷却水管混凝土温度场计算,并编制了相应的P型自适应有限元计算程序;张胜利等^[8,9]提出了不用逐个节点进行耦合的新方法来模拟混凝土与冷却水之间的对流换热;张超等^[10]将并层单元与热流耦合精细计算结合,编制了相应的前、后处理程序,极大地降低了单元规模并提高了计算效率。

实际工程中影响冷却效果的水管参数有很多,为了找出既符合温控要求,又经济合理的冷却方案,必须对这些参数进行具体仿真分析。马涛^[11]采用等效算法对水管冷却参数进行了仿真分析,得出这些参数对冷却效果的定性影响。本文基于热流耦合算法,对影响水管冷却效果的主要参数:水管间距、通水流量、通水水温、水管布置形式进行仿真分析,得出这些参数的定量影响效果,以期为类似工程水管冷却方案的选取提供参考。

1 热流耦合算法

1.1 计算思路

计算含冷却水管的大体积混凝土温度场时,混凝土温度 T 的基本求解方程为:

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

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; α 为导温系数, m^2/d ; t 为时间, d ; θ 为绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; x, y, z 为坐标轴。

在计算混凝土温度场时,热流耦合算法依然采用式(1)的热传导方程。计算冷却水管的效果时,假设冷却水管中的水流为一维定常流,混凝土与水管内水体之间的热量交换关系方程为:

$$\frac{\partial m}{\partial t} \rho \frac{\partial T}{\partial s} + \Gamma h_f (T_f - T_s) = 0 \quad (2)$$

$$T(0, t) = T_{in} \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial m}{\partial t}$ 为水管内水体的质量流速, m/s ; ρ 为水管内水体的密度, kg/m^3 ; Γ 为与温度 T 相对应的广义扩散系数; h_f 为膜层散热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_f 为水管内水体的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为与水管外壁接触的混凝土温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为进水口水温, $^{\circ}\text{C}$; s 为流体流线坐标方向。

在计算中,混凝土与冷却水间的热交换则通过耦合混凝土实体节点和热流管单元附加节点来模拟,其基本求解方程为:

$$C\dot{T} + \mathbf{K}T = Q \quad (4)$$

式中, T 为热流管单元节点温度向量; \dot{T} 为热流管单元节点温度梯度向量; \mathbf{K} 为热传导矩阵; C 为比热容矩阵。

1.2 冷却水管的模拟

在 ANSYS 平台上,借助其参数化设计语言二次开发出含冷却水管的大体积混凝土温度场仿真计算程序。进行温度场仿真计算时,混凝土和冷却水管分别采用 SOLID70 单元、FLUID116 单元进行离散。把混凝土实体单元节点与同一位置的 FLUID116 单元附加节点耦合,即把混凝土实体单元节点 K、L 作为主节点,热流管单元节点 I、J 作为附加节点进行耦合,如图 1 所示。

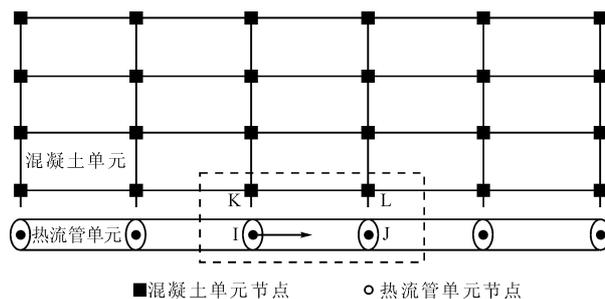


图 1 单元耦合示意图

Fig. 1 Diagram of element coupling

2 基本资料

以某混凝土重力坝的 4 个浇筑层为分析模型,每个浇筑层尺寸为 $18.0 \text{ m} \times 10.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ 。基础范围为建基面向下取 12.0 m ,并向上、下游各取 18.0 m ,坝体及水管有限元模型如图 2 所示。计算时边界条件的选取:地基地面及 4 个侧面为绝热边界,坝体与地基的接触面按第四类边界条件固-固边界处理;地基与空气接触的面以及坝体 4 个侧面按第三类边界条件固-气边界处理,每个浇筑层的上表面在未浇筑上一层混凝土时按第三类边界条件固-气边界处理。浇筑期间外界气温为 $22.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,基岩初始温度为 $15.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,每个浇筑层间歇期为 7 d ,计算总时间为 28 d 。混凝土的绝热温升计算公式如式(5)所示,材料的热力学参数如表 1 所示。

$$\theta(\tau) = \theta_0 (1 - e^{-a\tau^b}) \quad (5)$$

式中: $\theta(\tau)$ 为混凝土绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 为混凝土最终绝热温升, $^{\circ}\text{C}$, 根据实际工程的混凝土热学参数试验确定最终绝热温升为 $26.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$; τ 为混凝土龄期, d ; a, b 为常数, 本文计算时取 $a=0.254, b=0.886$ 。

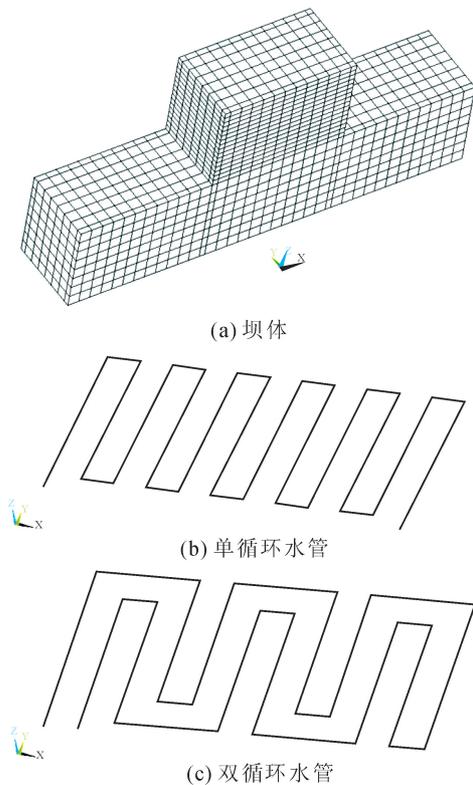


图2 坝体及水管有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pipe and dam

表1 材料的热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters of material

材料名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{kJ} \cdot$ $\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热/($\text{kJ} \cdot$ $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
水	1000	51.84	4.187
混凝土	2400	223.608	0.95
冷却水管	948	38.88	0.88

3 影响冷却效果的主要因素分析

本文在计算和分析水管间距、通水温度、通水流量对冷却效果的影响时,采用单循环水管布置形式,如图2(b)所示。

对坝体混凝土无水管冷却和有水管冷却分别进行仿真分析。采用水管冷却时,水管间距为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,混凝土浇筑后立即通水冷却,通水水温为 15°C ,通水流量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。浇筑层第一层中心点温度历时如图3所示。

从图3可以看出:无水管冷却时混凝土在第8天达到最高温度 34.57°C ;有水管冷却时混凝土在第4天达到最高温度 28.49°C ,混凝土最高温度降低 6.08°C 。第一层中心点离水管距离较近(0.75 m),因此冷却效果显著。从混凝土达到最高温度起到第28d止,无水管冷却时混凝土温度平均降幅为

$0.29^\circ\text{C}/\text{d}$,有水管冷却时混凝土温度平均降幅为 $0.48^\circ\text{C}/\text{d}$,采用水管冷却大大加快了混凝土的温降速率。

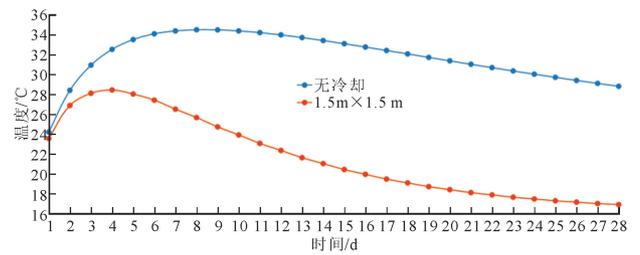


图3 有、无水管冷却第一层中心点温度历时曲线

Fig. 3 Temperature duration curves of the center point of the first layer with and without pipe cooling

3.1 水管间距

3.1.1 水平间距

对冷却水管水平间距的影响进行研究时,水管水平间距分别采用 1.0 m 、 1.5 m 和 2.5 m ,垂直间距均为 1.5 m 。为了实现三种方案的对比研究,对水管水平间距为 1.0 m 、 1.5 m 和 2.5 m 的三种方案重新剖分网格并重建水管单元。混凝土浇筑后立即通水冷却,通水水温 15°C ,通水流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$,浇筑层第一层中心点温度历时如图4所示。

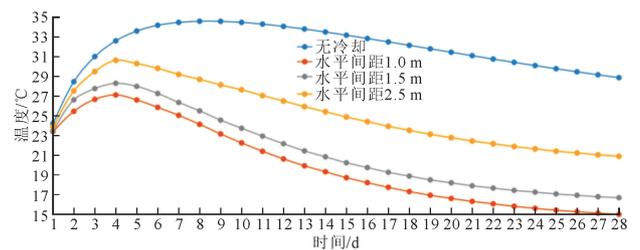


图4 不同水管水平间距下第一层中心点温度历时曲线

Fig. 4 Temperature duration curves of the center point of the first layer with different pipe horizontal spacing

由图4可以看出:与无水管冷却的计算结果相比,冷却水管水平间距采用 1.0 m 、 1.5 m 和 2.5 m 时,混凝土最高温度依次可降低 7.46°C 、 6.08°C 和 4.05°C 。水管水平间距越小,混凝土冷却效果越显著。采用水管冷却时,从混凝土达到最高温度起到第28d止,三种方案中心点温度降幅分别为 12.09°C 、 11.59°C 和 9.72°C ,水管水平间距越小,温度降幅越大。

图5为混凝土第一层中心点最高温度随水管水平间距变化图。从图5可以看出:水管水平间距由 2.5 m 减小至 1.5 m 时,混凝土最高温度降低 2.29°C ;由 1.5 m 减小至 1.0 m 时,混凝土最高温度降低 1.38°C 。

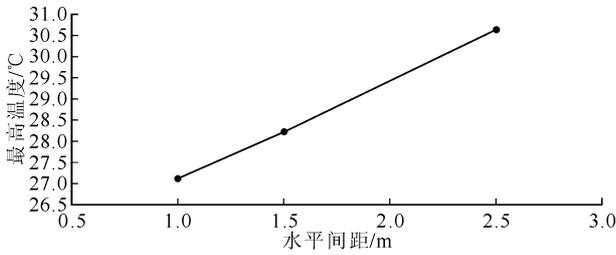


图5 混凝土最高温度随水管水平间距变化图
Fig. 5 Chart of the maximum temperature of concrete variation with pipe horizontal spacing

3.1.2 垂直间距

对冷却水管垂直间距的影响进行研究时,水管垂直间距分别采用 1.0 m,1.5 m,3.0 m,水平间距均为 1.5 m。为了实现三种方案的对比研究,对水管垂直间距为 1.0 m 和 3.0 m 的两种方案重新剖分网格并重建水管单元。混凝土浇筑后立即通水冷却,通水水温为 15℃,通水流量为 1.5 m³/h,浇筑层第一层中心点温度历时如图 6 所示。

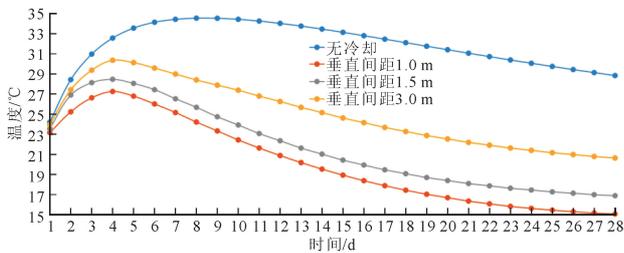


图6 不同水管垂直间距下第一层中心点温度历时曲线
Fig. 6 Temperature duration curves of the center point of the first layer with different pipe vertical spacing

由图 6 可以看出:与无水管冷却的计算结果相比,冷却水管垂直间距采用 1.0 m、1.5 m 和 3.0 m 时,混凝土最高温度依次可降低 7.29℃、6.08℃和 4.19℃。水管垂直间距越小,混凝土冷却效果越显著。采用水管冷却时,从混凝土达到最高温度起到第 28d 止,三种方案中心点温度降幅分别为 12.19℃、11.58℃和 9.73℃,水管垂直间距越小,温度降幅越大。

图 7 为混凝土第一层中心点最高温度随水管水平间距变化图。从图 7 可以看出:水管水平间距由 3.0 m 减小至 1.5 m 时,混凝土最高温度降低 1.89℃;由 1.5 m 减小至 1.0 m 时,混凝土最高温度降低 1.21℃。

由冷却水管水平与垂直间距对冷却效果的影响分析可知,水管间距越小,混凝土最高温度就越低,达到最高温度后降温幅度也越大,冷却效果也就越好。虽然减小水管间距可以明显的提高冷却效果,但是整个工程的水管总长度却大大增加,相应的冷却成本和工程造价也随之提高,所以,在选取冷却水管间距时,不仅要考虑冷却效果,亦要兼顾资源消耗

及工程造价。另外,还要结合混凝土施工要求,在不同的部位选择不同的水管间距。

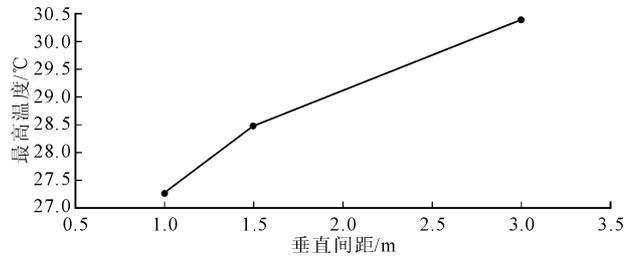


图7 混凝土最高温度随水管垂直间距变化图
Fig. 7 Chart of the maximum temperature of concrete variation with pipe vertical spacing

3.2 通水水温

对通水水温的影响进行研究时,各方案的冷却水温分别采用 10℃、15℃和 20℃。水管间距均为 1.5 m×1.5 m,通水流量为 1.5 m³/h,混凝土浇筑后立即通水。浇筑层第一层中心点温度历时如图 8 所示。

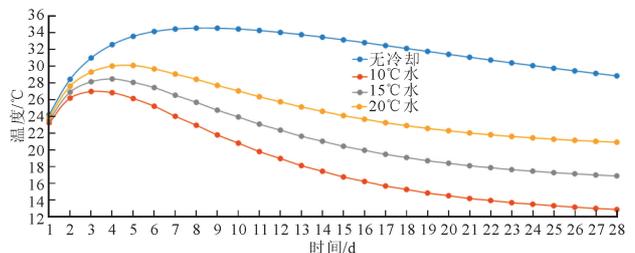


图8 不同通水温度下第一层中心点温度历时曲线
Fig. 8 Temperature duration curves of the center point of the first layer with different water temperatures

从图 8 可以看出:与无水管冷却的计算结果相比,冷却水温采用 10℃、15℃和 20℃时,混凝土最高温度分别可降低 7.56℃、6.08℃和 4.47℃。通水水温越低,冷却效果越显著。采用水管冷却时,从混凝土达到最高温度起到第 28d 止,三种方案中心点温度降幅分别为 14.08℃、11.58℃和 9.17℃,通水温度越低,温度降幅越大。

图 9 为混凝土第一层中心点最高温度随通水水温变化图。

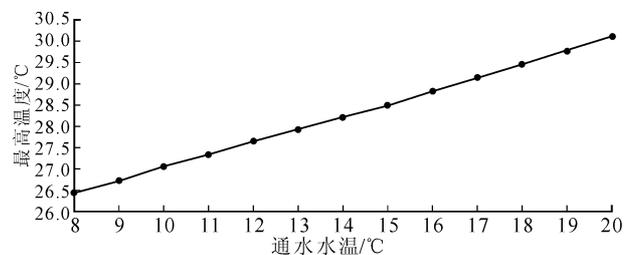


图9 混凝土最高温度随通水水温变化图
Fig. 9 Chart of the maximum temperature of concrete variation with water temperature

从图9可以看出:通水水温从20℃减小至8℃过程中,水温每降低1℃,混凝土最高温度降低约0.30℃。

3.3 通水流量

选择通水流量时不仅要考虑冷却效果,而且要兼顾冷却的成本。据计算,在其它各种条件相同时,紊流较层流需要的冷却时间可缩短25%^[12]。这就要求通水冷却时要选择足够大的流量,使冷却水管内的水成紊流状。

实际工程中广泛采用直径为 3.2×10^{-2} m的水管进行通水冷却,水管直径 $r = 3.2 \times 10^{-2}$ m时,管内水流成紊流状的临界流量为 $0.31 \text{ m}^3/\text{h}$ 。对通水流量的影响进行研究时,各方案的通水流量分别采用 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。水管直径 $r = 3.2 \times 10^{-2}$ m,水管间距均为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,通水水温15℃,混凝土浇筑后立即通水冷却。浇筑层第一层中心点温度历时如图10所示。

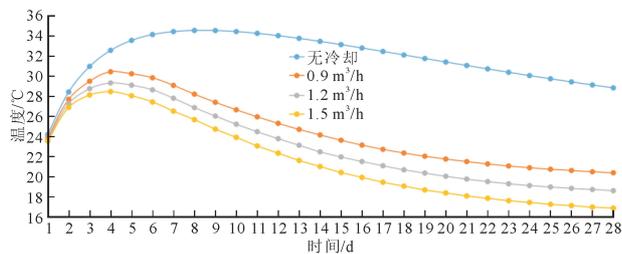


图10 不同通水流量下第一层中心点温度历时曲线

Fig. 10 Temperature duration curves of the center point of the first layer with different flow rates

由图10可以看出:与无水管冷却的计算结果相比,冷却水流量采用 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混凝土最高温度分别可降低 $4.11 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5.22 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $6.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通水流量越大,冷却效果越显著。采用水管冷却时,从混凝土达到最高温度起到第28d止,三种方案中心点温度降幅分别为 $10.04 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10.71 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $11.58 \text{ }^\circ\text{C}$,通水流量越大,温度降幅越大。

图11为混凝土第一层中心点最高温度随通水流量变化图。从图11可以看出:通水流量从 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 过程中,流量每增加 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$,混凝土最高温度降低约 $0.33 \text{ }^\circ\text{C}$;通水流量从 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大至 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 过程中,流量每增加 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$,混凝土最高温度降低约 $0.28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水管直径不变,通水流量越大,管内水流速度越大,单位时间内带出的混凝土内部的热量也越多。但是当通水流量增大到 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 后,管内水流速度过大,单位时间内吸收混凝土内部热量的速率反而降低,混凝土最高温度的降幅也就相应的减小。

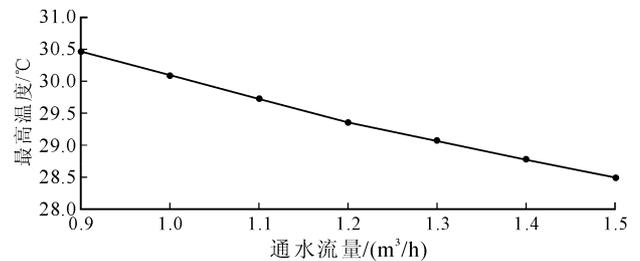


图11 混凝土最高温度随通水流量变化图

Fig. 11 Chart of the maximum temperature of concrete variation with flow rate

通水流量越大,混凝土最高温度越低,相应的冷却效果也越好。但是,流量也不能过大,因为流量增大后,不仅会增大水头损失,而且会使配套的制冷设备利用效率降低,同时还会加大冷却成本。根据工程实践经验,通水冷却时采用临界流量的3~4倍为宜^[11],当水管直径为 $r = 3.2 \times 10^{-2}$ m时,通水流量采用 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 可以达到最佳冷却效果。

3.4 水管布置形式

对冷却水管间距、通水水温以及通水流量的影响进行计算研究时,冷却水管均采用单循环布置形式。分析单循环和双循环水管布置形式^[13]对混凝土冷却效果的影响时,水管间距为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,通水水温15℃,通水流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$,混凝土浇筑后立即通水。浇筑层第一层中心点温度历时如图12所示。

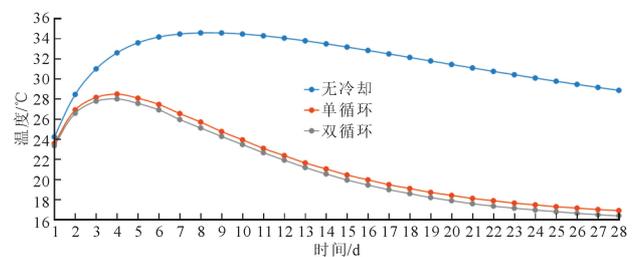


图12 不同水管布置形式下第一层中心点温度历时曲线

Fig. 12 Temperature duration curve of the center point of the first layer with different pipe arrangements

由图12可以看出:采用双循环水管布置形式时,混凝土最高温度比采用单循环水管冷却时低 $0.48 \text{ }^\circ\text{C}$,因此双循环水管布置形式的冷却效果较好,第28d时混凝土的温度也较低。经计算,单层双循环水管长度为 116.5 m ,而单层单循环水管长度为 124.5 m ,单层双循环水管比单层单循环水管长度小 8 m ,可知在实际工程中采用双循环布置比采用单循环布置更经济。因此,提倡在实际工程中采用双循环水管布置形式。

4 结 语

本文采用热流耦合算法,精确模拟水管周围的

混凝土温度,并考虑冷却水的沿程升温,分析了水管间距、通水流量、通水温度、水管布置形式对冷却效果的影响。根据计算分析可知,通水水温由 20℃减小至 8℃过程中,水温每降低 1℃,混凝土最高温度降低约 0.30℃。通水流量从 0.9 m³/h 增大至 1.2 m³/h 过程中,流量每增加 0.1 m³/h,混凝土最高温度降低约 0.33℃;通水流量从 1.2 m³/h 增大至 1.5 m³/h 过程中,流量每增加 0.1 m³/h,混凝土最高温度降低约 0.28℃。水管间距小,通水流量大,通水水温低时冷却效果较好,采用双循环水管布置形式时冷却效果较好,但是会增加施工难度和工程成本。因此,实际工程中需根据具体工况综合考虑各参数的影响,以便找出既符合温控要求,又经济合理的水管冷却方案。

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: 中国水利水电出版社, 2012.
- [2] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却 [J]. 水利学报, 2010, 41(5): 505-513.
ZHU Bofang. On pipe cooling of concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 505-513.
- [3] 刘宁, 刘光廷. 水管冷却效应的有限元子结构模拟技术 [J]. 水利学报, 1997(12): 43-49.
LIU Ning, LIU Guangting. Sub-structural FEM for the thermal effect of cooling pipes in mass concrete structures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(12): 43-49.
- [4] 朱岳明, 徐之青, 贺金仁, 等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法 [J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 19-22.
ZHU Yueming, XIU Zhiqing, HE Jinren, et al. A calculation method for solving temperature field of mass concrete with cooling pipes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(2): 19-22.
- [5] 朱伯芳. 混凝土坝水管冷却仿真计算的复合算法 [J]. 水利水电技术, 2003, 31(11): 47-50.
ZHU Bofang. Compound methods for computing the effect of pipe cooling in concrete dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 31(11): 47-50.
- [6] 强晟, 吴超, 朱振决. 含冷却水管的混凝土温度场复合单元新算法 [J]. 水利学报, 2015, 46(6): 739-747.
QIANG Sheng, WU Chao, ZHU Zhenyue. A new composite element algorithm for the temperature field of concrete containing cooling pipe [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 739-747.
- [7] 王海波, 王仁坤. 水管冷却混凝土温度场计算的三维 P 型有限元法 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(2): 122-129.
WANG Haibo, WANG Renkun. 3D p-version hierarchical finite element method for calculation of concrete cooling pipe temperature field [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(2): 122-129.
- [8] 张胜利. 含有冷却水管的大体积混凝土温度场有限元分析 [D]. 湖北: 三峡大学, 2015.
ZHANG Shengli. Finite element analysis of temperature field of massive concrete with cooling pipe [D]. Hubei: China Three Gorges University, 2015.
- [9] 燕乔, 张胜利. 基于 ANSYS 的冷却水与混凝土对流换热模拟 [J]. 人民长江, 2015, 46(5): 50-53.
YAN Qiao, ZHANG Shengli. Simulation study of convective heat transfer effect between cooling water and concrete in ANSYS [J]. Yangtze River, 2015, 46(5): 50-53.
- [10] 张超, 段寅, 刘杏红, 等. 基于并层单元的大体积混凝土水管冷却温度场热-流耦合精细计算 [J]. 工程力学, 2014, 31(12): 147-154.
ZHANG Chao, DUAN Yin, LIU Xinghong, et al. The precise heat-fluid coupling method of mass concrete with cooling pipes based on layer-merged element [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 147-154.
- [11] 马涛. 混凝土坝冷却水管初期冷却效果研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
MA Tao. Study on initial cooling effect of pipe cooling for concrete dam [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [12] 杨磊. 混凝土坝施工期水管冷却降温及温控优化研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
YANG Lei. Study the drop of temperature during construction by cooling pipes built-in concrete dams and optimize of temperature control measures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [13] 张超, 常晓林, 刘杏红. 大体积混凝土冷却水管设计形式的优化 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(3): 276-282.
ZHANG Chao, CHANG Xiaolin, LIU Xinghong. Optimization of cooling pipe layout in mass concrete during construction period [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(3): 276-282.

(责任编辑 周 蓓)