

水管冷却在墩墙混凝土结构中的应用

刘有志 朱岳明 吴新立 刘桂友

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 借助于混凝土水管冷却温度场严密算法及现场实验反演得出的计算参数,对姜唐湖退水闸闸墩施工期现场水管冷却的仿真效果进行了对比分析.分析结果表明,冷却水管具有明显的导热降温作用,可达到防止混凝土早期开裂的目的.

关键词 温控防裂 水管冷却 水闸 仿真计算

中图分类号:TV315

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2005)06-0654-04

墩墙结构是一种典型的混凝土结构,广泛分布于水闸、涵洞、挡土墙以及各种在混凝土基础板上的墙体结构中.在墩墙结构中,裂缝的出现主要有两方面的原因:一方面是由于底板或基础的约束作用引起的.刚开始时墩墙温度呈上升趋势,产生的是压应力;当混凝土温度下降时,由于底板对降温收缩变形的强约束作用,墩墙内就会出现较大的拉应力,当超过混凝土的即时抗拉强度时,便会出现由里及表的裂缝,且常常是贯穿性的.墩墙的基础温差愈大愈有可能出现这样的裂缝^[1].另一方面,由于混凝土为不良导体,墩墙内外由于散热快慢不一样也会引起较大的内外温差,这将引起混凝土温度变形的自约束,通常有 3 种情况:(a)在混凝土刚浇不久,由于表面散热作用,内部温度比表面温度上升得快,形成一种内外温差;(b)当温度下降时,外部温度比内部温度下降快而导致的内外温差;(c)当遇寒潮冷却或混凝土遇到大的昼夜温差时,表面温度骤降引起内外温差变化.由于内外温差应力大多是短期温度变化所致,与长期的温度缓慢变化所致的应力相比较,拉应力会大些,更易造成裂缝.对于早期混凝土而言,由于其抗拉强度不高,当墩墙混凝土刚刚浇筑完 2~3 d 时,尽管整个墙体还处在温升过程中,工程实际中出现了裂缝甚至是贯穿性裂缝^[2],这时裂缝出现的原因主要就在于早期墩墙内外温差过大,而自生体积收缩也可能是其原因之一^[3].

从以上墩墙结构裂缝的开裂机理可以发现,若尽早降低施工期混凝土早期的内部温度,不但可以有效降低混凝土早期的内外温差,同时将降低后期墩墙的整体基础温差.

1 基本理论

1.1 不稳定温度场计算原理^[4]

根据变分原理,三维非稳定温度场问题的求解可取如下泛函:

$$K(T) = \iiint_{R_t} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{S_t^3} \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T}{2} - T_a \right) T dS \quad (1)$$

式中: R_t ——计算域; T ——温度; a ——导温系数; λ ——导热系数; β ——表面散热系数; T_a ——环境温度; t ——时间; θ ——绝热温升; τ ——龄期; S_t^3 ——第三类边界条件域.

由泛函的驻值条件 $\frac{\delta I}{\delta T} = 0$ 以及对时间域的向后差分,可得温度场有限元计算的支配方程

$$\left[H + \frac{1}{\Delta t_n} R \right] T_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} R T_n + F_{n+1} = 0 \quad (2)$$

式中: H ——热传导矩阵; R ——热传导补充矩阵; T_n, T_{n+1} ——结点温度列阵; F_{n+1} ——结点温度荷载列阵; n ——时间序数; Δt ——时间步长.由已知的上一时刻的 T_n ,可计算出下一时刻的 T_{n+1} .

1.2 水管冷却温度场的迭代求解计算原理

“水管冷却问题”是一个边界非线性问题,必须采用迭代解法逐步逼近真解.实际工程中冷却水管常为蛇形弯管,开始计算时假定整个冷却水管的沿程水温均等于冷却水管的入口温度.利用隐式支配方程式(2),先求得温度场的近似解,然后利用热量等效原理,严格沿着这些弯管的走向进行数值积分,从而求得水管的沿程水温.重复上述过程,直到混凝土温度场和冷却水温都趋于收敛解,即迭代结束.具体算法可见文献[5,6].

2 姜唐湖退水闸水管冷却温控防裂效果分析

2.1 工程概况

姜唐湖退水闸工程位于安徽省霍邱县,是淮河防洪体系的一个重要组成部分.1号闸墩于2005年1月9日开始浇筑,施工期间工地最低温度达-11℃,平均风速约为1.0m/s,闸墩主体全部采用泵送混凝土进行浇筑.施工期温控防裂工作是该工程的一个难点.

2.2 现场实验及反馈分析结果

选用先浇筑的1号闸墩作为实验对象,并对其全部施工过程进行严格模拟,仿真计算所用参数(风速、气温、浇筑温度等)均采用实测资料.同时,在闸墩的典型部位共安置了8个特征点进行温度的现场测试,并以此为依据采用遗传算法^[7,8]反演分析.反演参数主要包括:塑料膜和土工膜共同作用的表面散热系数 β_1 (含风速影响),闸底板混凝土表面散热系数 β_2 (含风速影响),竹胶模板(含挡风薄膜)表面散热系数 β_3 ,闸墩表面散热系数 β_4 (含风速影响)和绝热温升指数式的3个参数 θ , a , b .

图1和图2分别为现场温度测点位置和计算单元网格图.水管采用外径3.5cm的钢管,在高程方向水管按0.5m一层进行布置,共12层.闸墩混凝土完全覆盖完水管后即开始通水,通水时间为5.5d.反演得出的混凝土热力学特性参数见表1.

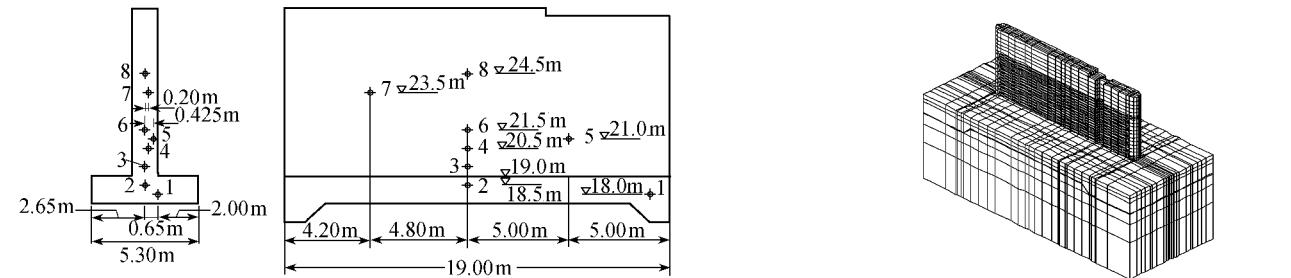


图 1 闸墩温度测点位置分布

Fig.1 Locations of thermometers in the sluice pier

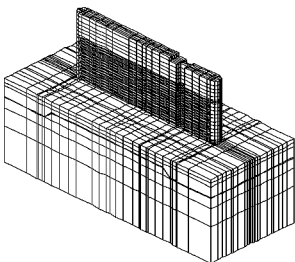


图 2 计算单元网格

Fig.2 Numerical element mesh

表 1 1号闸墩反演所得的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of sluice pier No.1 from back analysis

反演参数	θ	a	b	$\beta_1/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$	$\beta_2/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$	$\beta_3/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$	$\beta_4/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$
反演参数值	53.45	1.14	1.20	31.10	43.26	9.76	62.66

图3为测点1~4实测温度值和计算温度值的变化过程线,两者吻合较好(最大误差值均没超过3℃).这说明采用反演参数所得的计算值具有较高的可信度,可以用于指导后续闸段的温控防裂工作.

2.3 水管冷却效果仿真计算分析

利用1号闸墩水管冷却混凝土反演分析得出的特性参数,笔者对该闸墩的施工过程进行了反馈分析.为对比水管的冷却效果,同时还进行了上述闸墩未埋设冷却水管时温度及应力场计算.

2.3.1 水管冷却效果温度场对比分析

图4是采用水管冷却和不采用水管冷却所对应特征点的温度历时曲线对比(特征点T1,T2,T3分别对应反演测点3,5,7).图5(a)和图5(b)分别是采用水管和不采用水管时闸墩浇筑完3d时上下游向闸墩中间温度分布示意图.从各测点温度历时曲线和等值线不难看出:

- a. 尽管冷却水温采用温度较高(约为17℃)的地下水,但由特征点T1至T3的历时曲线可以看出,水管的削峰效果非常明显,测点处削峰值最大达到11.85℃.
- b. 特征点T4位于距最上一层水管1.25m未放水管的部位,其历时曲线表明该点受水管作用影响很小,

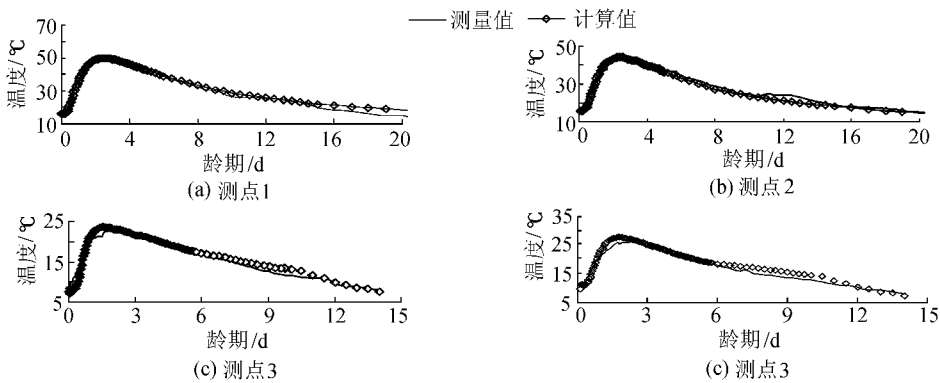


图 3 温度计测点的温度计算值和实测值的过程线比较

Fig.3 Comparison between calculated results and measured data of nodal temperature of thermometers

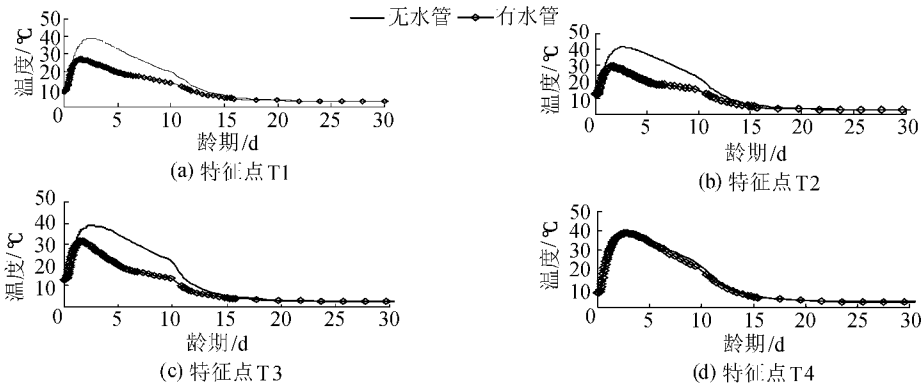


图 4 有水管和无水管特征点历时曲线对比

Fig.4 Comparison of temperature at typical nodes with and without pipe cooling

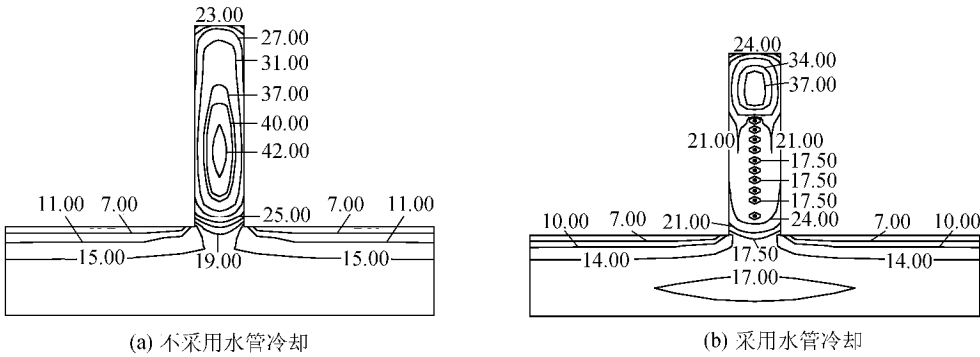


图 5 闸墩温度分布(单位:℃)

Fig.5 Temperature isoline of sluice pier

这主要是由于该特征点距水管较远且通水时间不长所致.这说明水管冷却效果仅局限于其冷却控制范围内的区域,若要取得较好的温降效果,建议其间距不应大于 1m,需要时可以进一步缩小.另外,也可通过降低冷却水温来达到目的,但要注意过冷的冷却水可能导致水管周围局部区域拉应力过大.

c. 由图 5 可知,闸墩有无冷却水管时,温度分布相差很大.(a)中闸墩中心形成一个明显的高温区,最高达 42.7℃,内外温差很大,很易导致较大表面拉应力.(b)中下部埋有水管的区域,温度降低幅度明显,内外温差也大幅度减小,这将有利的改善闸墩早期表面拉应力和后期内部拉应力.

2.3.2 水管冷却效果应力场对比分析

a. 由于混凝土浇筑完后的前 3d 主要以温升为主,内部温升快,外部温升慢,因此形成一个内外温差,这个温差使得外表面处的混凝土收缩变形受到内部混凝土约束,因此内部主要为压应力,外表面则体现为拉应力.

b. 图 6(a)中闸墩顶部未采用保温措施,最大拉应力达到 1.2 MPa(混凝土浇筑完 3 d 时允许抗拉强度为 0.72 MPa),说明若不采用一定的保温措施很难避免早期裂缝的产生;而在闸墩侧面,由于内外温差较大,采

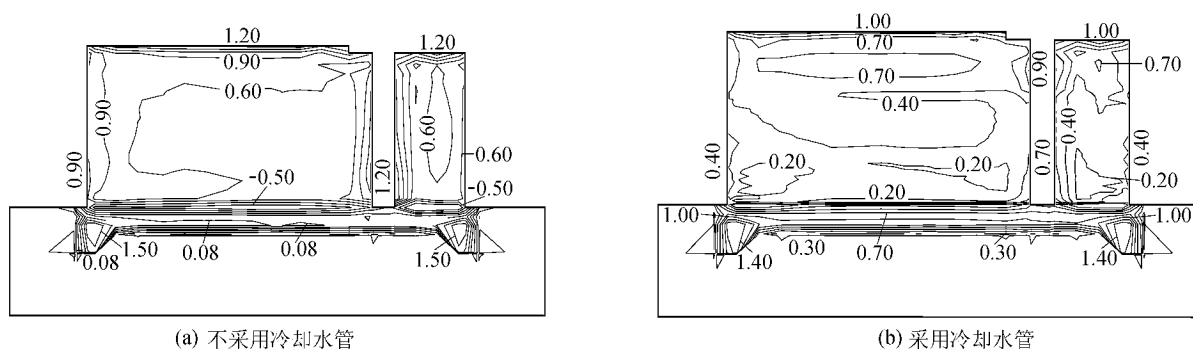


图6 闸墩浇筑3d后的表面应力分布(单位 MPa)

Fig.6 Stress distribution on the surface of sluice pier with or without adoption of pipe cooling at the time of 3 days after concrete placing

用竹胶模板保温后该区域拉应力达0.6 MPa,且随着内外温差加大将进一步增大,很容易引起表面开裂。

c. 图6(a,b)中采用水管冷却后,顶部未采用保温措施的区域拉应力也有1.0 MPa,而6.0 m(闸墩高度为9.0 m)以下采用冷却水管的区域表面拉应力有了明显的降低,拉应力都明显小于混凝土即时的允许抗拉强度。更为重要的一点是,由于此时水管仍在通水,内外温差将进一步减小,因此表面拉应力的增幅不会很大,甚至有可能减小,早期表面开裂的现象有望得到很好的解决。

3 结 语

a. 笔者就混凝土丁字形墩墙结构中施工期经常出现的开裂现象,分析了导致裂缝出现的原因及机理,认为基础温差、内外温差和收缩变形是造成该类结构裂缝出现的主导因素。早期表面裂缝的出现则主要是由于内外温差和自生体积收缩变形引起。

b. 混凝土水管冷却的现场实验及对比分析结果表明,低温季节浇筑的墩墙混凝土结构其内部布置冷却水管可以起到明显的导热降温作用。尤其是在混凝土浇筑早期,在外表面保温的前提下,内部采用水管冷却可有效减小内外温差和基础温差,从而达到减小应力数值预防早期表面开裂的目的。

c. 文中所采用的混凝土温度场水管冷却算法,可严格模拟蛇形弯管的走向,现场实验结果表明,该算法具有较好的计算精度。此外,水管冷却技术在墩墙混凝土结构中具有较好的可操作性,水管管距、管径大小及冷却水温均可随工程实际的不同灵活调整,因此值得推广应用。

参考文献:

- [1] 刘勇军. 水工混凝土温度与防裂技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [2] 邓进标. 水工混凝土建筑物裂缝分析及其处理[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1997. 33—35.
- [3] 朱岳明, 肖志乔, 吴健. 收缩应力在水工薄壁结构混凝土裂缝中的作用[J]. 红水河, 2004, 23(1): 55—59.
- [4] 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. 3.
- [5] 朱岳明, 张建斌. 碾压混凝土高温期连续施工采用冷却水管进行温控的研究[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 55—59.
- [6] 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.
- [7] 朱岳明, 王弘, 闪黎. 混凝土热学参数反问题求解的遗传算法[J]. 人民长江, 2004, 35(11): 55—57.
- [8] 朱岳明, 刘勇军, 谢先坤. 确定混凝土温度特性多参数的试验与反演分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 175—177.

Application of pipe cooling to pier-wall concrete structure

LIU You-zhi, ZHU Yue-ming, WU Xin-li, LIU Gui-you

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the help of the accurate numerical algorithm for pipe cooling temperature field of concrete structures and some characteristic parameters obtained from back analysis of in-situ test result, a comparative analysis was performed of in-situ pipe cooling of sluice piers in the Jiangtang Lake during their construction period. The result shows that the cooling pipe is of obvious effect in heat conduction and temperature reduction, and can be applied to prevention of concrete cracking at the early stage.

Key words: temperature control and crack prevention; pipe cooling; sluice; numerical simulation