

周公宅拱坝混凝土温控防裂水管冷却效果研究

刘有志¹ 朱岳明¹ 刘桂友¹ 徐建荣² 何明杰²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 采用改进的水管冷却温度场迭代算法,对周公宅拱坝 7 号典型岸坡坝段水管冷却的一期效果进行研究。重点分析水管层距、间距以及浇筑层厚度对坝体内部温度场和应力场分布造成的影响,同时指出岸坡坝段水管冷却时温控防裂的主要问题。最后得出了周公宅拱坝 7 号坝段施工期一期冷却时水管布置形式的优选方案及温控防裂措施。

关键词 大体积混凝土;水管冷却;有限单元法;温度场;仿真计算

中图分类号 TV315 文献标识码 B 文章编号 1006-7647(2006)02-0044-05

Effect of pipe cooling for temperature control and crack prevention of Zhougongzhai Arch Dam//LIU You-zhi¹, ZHU Yue-ming¹, LIU Gui-you¹, XU Jian-rong², HE Ming-jie²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China 2. East China Investigation and Design Institute under CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract : Based on the improved iteration algorithm for temperature field by pipe cooling, the effect of pipe cooling in the typical dam section No.7 along the slope of the Zhougongzhai Arch Dam in the first stage was investigated, with emphasis placed on the influences of horizontal and vertical spans of pipes and lift thickness on the stress field and temperature field of the dam body. Meanwhile, main problems on temperature control and crack prevention during pipe cooling were put forward. Finally, an optimal scheme for pipe layout during pipe cooling and measures for temperature control and crack prevention were obtained for the first construction stage of the dam section No.7 of the arch dam.

Key words mass concrete; pipe cooling; finite element method; temperature field; simulative computation

自 20 世纪 30 年代冷却水管在美国胡佛重力拱坝施工中首次得到应用以来,水管冷却在大体积混凝土施工中已得到广泛的应用,成为混凝土温控防裂的重要措施之一。水管冷却通常有一期冷却和二期冷却之分^[1]。一期冷却主要用于混凝土浇筑初期,通过冷却水管导出混凝土内部的热量,起削峰降温作用;二期冷却则是为满足工程接缝灌浆的需要,在拱坝封拱灌浆之前将坝内温度降至工程允许范围之内。此外,为控制浇筑块或混凝土结构内外温差的需要,也可进行三期冷却。坝体内采用水管冷却时,冷却效果的好坏受水管层距、间距、冷却水温等多种因素的影响,是一个难以预知的工程难题。而水管冷却效果的好坏对于坝体温控防裂工作往往起到决定性的作用,同时也将影响到坝体的施工质量及施工进度安排。因此,坝体施工前对水管布置方案冷却效果进行优化评估成为预防坝体开裂的一项必不可少的工作。

本文在文献[2]的基础上借助于现有改进的水

管冷却温度场迭代算法,较细致地对周公宅拱坝 7 号典型岸坡坝段水管冷却的一期效果进行了研究。

1 基本理论

1.1 不稳定温度场计算原理^[3]

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:

$$\begin{aligned} K(T) = & \iiint_{R_1} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. \frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) T \right\} dx dy dz + \iint_{S_1} \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{T}{2} - T_a \right) T ds \end{aligned} \tag{1}$$

式中: R_1 为计算域; T 为温度; a 为导温系数; λ 为导热系数; β 为表面散热系数; T_a 为环境温度; t 为时间; θ 为绝热温升; τ 为龄期; S_1 为第三类边界条件域。

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:

[H + 1/Δt_n R]T_{n+1} - 1/Δt_n RT_n + F_{n+1} = 0 (2)

式中:H为热传导矩阵;R为热传导补充矩阵;T_n和T_{n+1}为结点温度列阵;F_{n+1}为结点温度荷载列阵;n为时间序数;Δt为时间步长.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[4,5],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,迭代结束.具体算法见文献[6,7].

2 周公宅拱坝水管冷却效果及方案研究

2.1 工程背景

周公宅水库位于浙江省宁波市鄞州区境内,工程所在河流樟溪是甬江流域奉化江上的主要支流之一.周公宅大坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高125 m,位于周公宅村口下游约250 m处.大坝混凝土总方量57.66万m³,施工期温控工作量大.本文选取7号岸坡坝段作为计算坝段,分析采取不同水管冷却布置方案时大坝混凝土在施工期的温度应力状况,为混凝土温控措施方案的选取提供理论依据.

2.2 水管布置形式及方案

坝体内部冷却水管根据位置不同通常分别选用Φ25钢管(壁厚1.5~1.8 mm)或Φ32聚乙烯塑料管(PE管,壁厚2 mm).在仓面上按蛇形布置,冷却水管长度不大于250 m.7号坝段浇筑层厚采用1.5 m和2.0 m两种方案,层间歇时间为7~10 d,水管层距随浇筑层厚的变化而变化,每个浇筑层埋设1根水管,水管位于浇筑层的中心位置.根据工程实际情况选取7种典型工况(表1)进行分析,典型计算网格如图1所示.图2是网格横剖面水管布置示意图.

表1 周公宅大坝7号坝段水管布置形式及温降参数

工况	浇筑层厚/ m	水管布置形式		水温/℃	通水时间/ d	坝体中心点(142.5 m高程)一期通水期间			日平均 温降/℃	基础 温差/℃
		层距/m	间距/m			二次峰值/℃	最低温度/℃	内外温差/℃		
1	1.5					30.13		16.2		
2	1.5	1.5	1.0	15	20	23.32	15.41	6.3	0.72	11.4
3	1.5	1.5	1.5	15	20	26.07	19.44	8.9	0.60	12.4
4	1.5	1.5	2.0	15	20	26.68	21.21	9.9	0.49	12.9
5	2.0	2.0	1.0	15	20	23.89	15.42	7.5	0.70	12.4
6	2.0	2.0	1.5	15	20	26.95	19.94	9.7	0.58	13.3
7	2.0	2.0	2.0	15	20	27.52	22.46	10.5	0.46	14.1

注:工况1为无水管工况.

图.出于减小计算工作量的目的,圆形水管截面被近似为四边形.

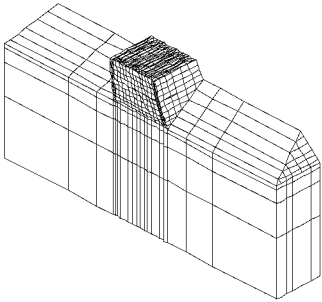


图1 7号坝段计算网格

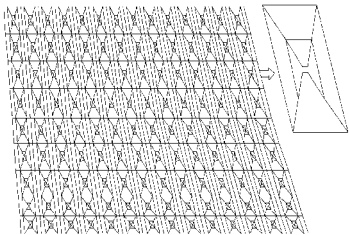


图2 7号坝段横剖面水管布置示意图

(层距×间距=1.5 m×1.5 m)

2.3 7号坝段的水管冷却效果分析

2.3.1 温度场结果分析

影响水管冷却效果的因素很多,如水管层距和间距、冷却水温、通水时间、流速、流量等等,笔者不便将其一一列出.下文主要分析水管通水时间、流速、流量均一致的前提下,水管层距、间距、浇筑层厚对冷却效果的影响.

2.3.1.1 层距对水管冷却效果的影响

水管层距是影响水管冷却效果的一项重要因素.7号坝段由于水管层距随浇筑层厚度而变化,因此这里层距对水管冷却效果的影响综合考虑了水管层距和浇筑层层厚的影响.

由表1不难得出如下结论:在水管间距相同的前提下,水管层距变化对水管的冷却效果产生了一定影响,但影响不明显.取工况3和工况6为例,水管层距由1.5 m变为2.0 m后,后者通水期间142.5 m高程中心特征点出现的最高温度仅比前者高出0.88℃,其平均温降速率也差异不大,而到计算时段

为止时两者的内外温差则基本相等。对比工况 2 和工况 5 及工况 4 和工况 7 均体现出类似规律。这一方面说明对于 7 号坝段而言,在间距相同的情况下水管层距及浇筑层厚度由 1.5 m 变为 2.0 m 对水管的最终冷却效果影响不大;另一方面也间接地表明,当通水时间达 20 d 时,水管周围半径 1.0 m 之内的区域均可达到较好的冷却效果。

2.3.1.2 间距对水管冷却效果的影响

与水管层距变化对冷却效果的影响相比,水管间距对水管冷却效果影响更为明显。由图 3 可以看出,当层距为 1.5 m 时,水管间距的变化导致多项温控指标参数均随之变化。首先,通水期间工况 2~4 在 142.5 m 高程中心特征点相对应的平均温降速率分别为 0.72 °C/d、0.60 °C/d 和 0.49 °C/d,其中工况 2 比工况 4 的温降速率增幅达 47.7%;其次,水管间距越大,通水结束后坝内中心特征点达到相对稳定状态的温度值就越高,内外温差也越大。到计算时段为止,分别采用上述 3 种水管布置方式时内外温差分别为 5.8 °C、9.4 °C 和 10.5 °C,而相对应的不采用水管冷却时其内外温差为 16.2 °C。此外,间距变化对于水管的削峰效果有明显的影响,水管间距分别为 1.0 m、1.5 m、2.0 m 时 142.5 m 高程中心点在通水期间出现的温度二次峰值分别为 23.32 °C、26.07 °C、26.68 °C,分别比不采用水管冷却时降低 6.38 °C、4.06 °C、3.45 °C。

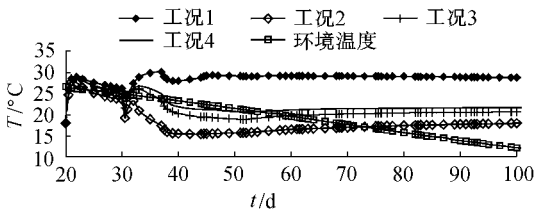


图 3 工况 1~4 中心特征点及环境温度历时曲线

图 4 是工况 2 和工况 4 在 154.20 m 高程的水平面温度场分布图。由于水管的冷却作用是一个由近及远的过程,因此沿着水管流向在水管两侧形成了非常明显的温度梯度。离水管越近,温度梯度越大;离水管越远,温度梯度越小。由于水管间距的不同,通水 20 d 后图 2 中温度值明显比图 3 中同一位置的温度低 2~3 °C,此现象也更清楚地表明水管间距的变化对水平面内温度场分布产生的影响是非常显著的,水管间距越小,则冷却效果越好。

2.3.2 应力场结果分析

2.3.2.1 水管层距对应力的影响

由前面的分析可知,在水管间距相同的前提下,单一的水管层距由 1.5 m 变为 2.0 m 时,其最终的冷却效果差异并不明显。而对应力变化曲线的研究也

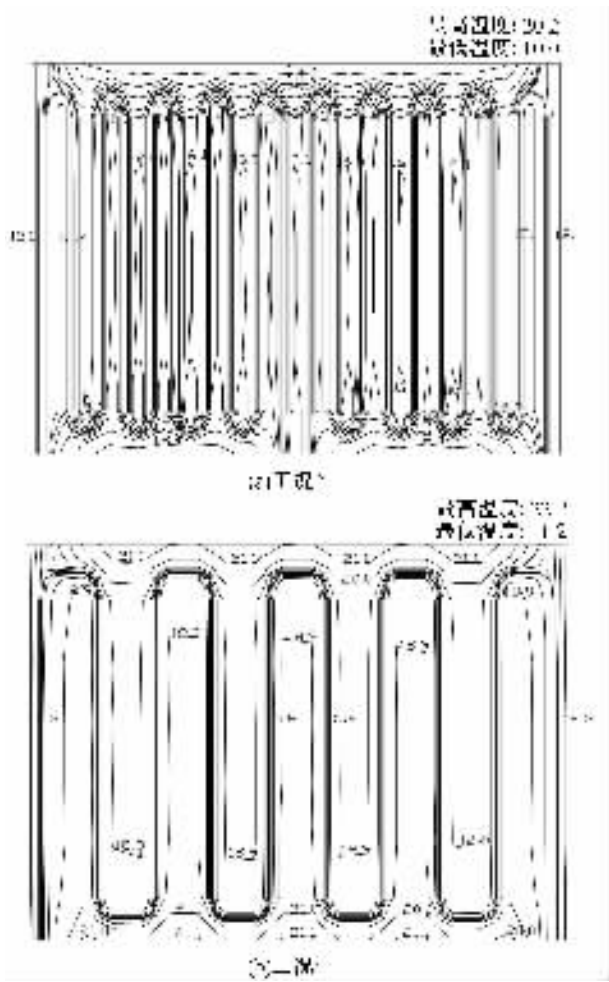


图 4 水管通水 20 d 水平剖面的温度场分布(单位: °C) 表明,浇筑层厚及水管层距变化导致的距水管较近混凝土中的应力变化并不明显,影响较大的是距水管较远处的混凝土,因为混凝土在浇筑完 3~4 d 后其水化放热已基本完成,而此时水管的冷却范围还无法达到该区域,因此浇筑层较厚或者水管层距较大时,距水管较远处的温升要更高些,产生的初始压应力相对也要大些。此后在水管冷却作用下,压应力逐渐变小,最终体现为少许拉应力。但总体而言,在采用水管冷却的前提下,单一的层距由 1.5 m 变为 2.0 m 对坝体内部后期应力分布造成的影响并不明显。

2.3.2.2 水管间距对应力的影响

水管间距对坝体内部应力分布的影响主要体现在其应力历程发生较大变化。图 5 是工况 2 和工况 4 坝体中心特征点的应力历时曲线对比图。由图 5

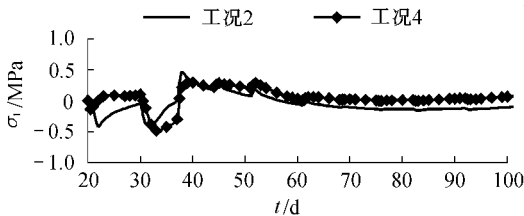


图 5 工况 2 和工况 4 中心特征点应力历时曲线

可以看出,在浇筑上一层混凝土之前(第30d),工况2比工况4的142.5m高程中心特征点降温更快(此时特征点为上表面中心点),因此工况2表现为压应力,而工况4中则出现少许拉应力。浇筑完上一层混凝土后特征点温度升高,工况2压应力在2d内由0.06MPa增加到0.40MPa,工况4中的拉应力也转化为压应力,但随后在上下两层水管的作用下,压应力又转化为拉应力。由于工况2的水管间距小于工况4,温降幅度更大,因此前者通水期间出现最大拉应力要大于后者。但水管停止通水后,由于工况2中的内外温差小于工况4,随着环境温度的降低,工况2中特征点后期的应力改善程度明显好于工况4中的同一特征点。笔者对比其他工况研究时发现均体现出类似规律,由此得出结论:水管间距越小时温降效果越好,后期坝内混凝土的应力分布状态也越好,水管间距过小时,通水期间混凝土中由于温降过快可能出现较大的拉应力。

图6是工况4和工况2的最大主应力分布图。由图6(a)可以看到,采用冷却水管后,坝体水管周围停止通水后的区域由于温度回升较明显而体现为压应力,中上部区域刚停水不久或正在通水的区域则表现为少许拉应力。坝体上下游表面出现的拉应力也很小。需要重点关注的区域位于坝体与地基相连的位置,因为该部位受多种因素的影响,应力较大,尤其是坝趾和坝踵处最大拉应力达到1.98MPa(混凝土28d的允许抗拉强度值约为1.98MPa),很容易引起坝体开裂。这主要是因为在地基对坝体的强约束作用下,混凝土向地基中导热以及水管作用下温降较大产生收缩而造成的。此外,基础温差和内外温差作用也是导致该部位拉应力较大的因素。图6(b)中坝体内部的应力分布与图6(a)类似,差别在于图6(b)中坝体高程148.50m以下区域(斜坡面上),上下游表面也出现较大拉应力,而坝趾和坝踵处的最大拉应力甚至达到2.16MPa。这是因为对于斜坡坝段而言,水管间距越小则早期温降越大,因此在坝趾和坝踵处出现的拉应力也相应增大,后期环境温度降低后,在内外温差和基础温差等多种因素的综合作用下,应力集中现象更为明显,并对整个斜坡面高程(148.5m)以下的表面应力状态产生影响,因此导致了上下游表面出现拉应力增大的现象。研究表明,当水管间距分别为2.0m和1.5m时应力集中对表层混凝土应力状态的影响相对减小。此现象可以说明对于边坡坝段而言,早期的温降不能太小,以免导致较大内外温差和基础温差,但也不宜太大,否则也会由于早期温降幅度过大而引起坝体产生较大的拉应力,不利于温控防裂。

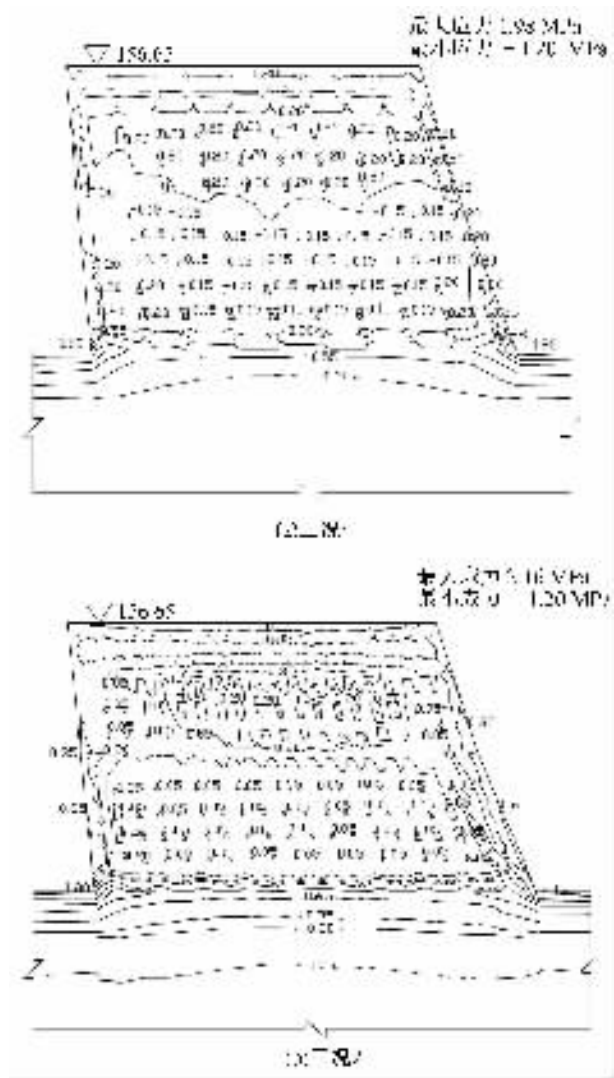


图6 $y = 2.0\text{m}$ 横剖面的第一主应力分布

因此,笔者建议对于像周公宅7号坝段这样的斜坡坝段,在初始浇筑温度得到控制的情况下,水管冷却时水管间距不要太小,间距取1.5m就可以达到较好的冷却效果。而水管间距为2.0m时,由于早期温降效果不如1.5m管间距的情况,因此随着环境温度的降低,内外温差将会较大,从而给表层混凝土的温控防裂带来不利影响,因此也不宜采用。对于在坝体与地基相连部位出现拉应力较大的现象,可采取以下防裂措施:①对于靠近基础的部位,通过适当降低混凝土的浇筑温度或者通过提前水管的通水开始时间来降低最大温升,从而减小坝体的内外温差和基础温差;②在坝体与地基相连的部位增设一基础垫层,并通过增强基础垫层的后期膨胀来达到降低坝基对坝体的强约束作用,这可采用外掺MgO等技术来实现;③对于岸坡基础坝段,将施工时间推迟到低温季节。

2.3.3 7号坝段水管布置方式选取

综合以上分析结果,坝段作为岸坡坝段,其温度和应力状态受水管层距、间距以及浇筑温度、环境温

度、通水时间、地基约束作用等多种因素的影响,在选取水管的布置形式时要综合考虑这些因素,根据7号坝段的工程实际状况及表1计算结果,当8月份开始施工时,建议水管的布置形式采用 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 或者 $2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,这两种布置形式的各项指标都能够满足工程温控防裂的需要。

2.4 “管壁裂缝”的影响因素及预防措施

采用冷却水管对坝体进行冷却时,由于冷却水温很低,而坝体混凝土浇筑温度较高,水化温升又很快,因此通水瞬间管壁上很容易由于温差较大而导致过大拉应力,冷却水温过低或者通水开始时间太晚都有可能产生“管壁裂缝”的产生。

取7号坝段的工况3为例(水管周边单元剖分如图2),冷却水温采用两种方式:15℃和河水(开始采用河水作为冷却水时水温为23.9℃),通水开始时间为混凝土浇筑完后1d。图7和图8分别是第三个浇筑层水管通水瞬间管壁上特征点的温度和应力历时曲线图。由图7可以看到,水温为15℃和采用河水作为冷却水时,通水瞬间温降分别为13.5℃和4.6℃,对应的瞬间拉应力分别为1.04 MPa和0.42 MPa(混凝土浇筑1d时的最大抗拉强度为0.39 MPa),显然,当采用15℃的河水作为冷却水时,很难避免“管壁裂缝”的出现。而采用河水则可大大降低“管壁裂缝”出现的可能性。当通水开始时间提前到混凝土浇筑完后0.5d时,对应的瞬间温差则为7.1℃和0.7℃,管壁上的瞬间应力分别为0.81 MPa和0.19 MPa(混凝土浇筑0.5d时的最大抗拉强度约为0.17 MPa)。

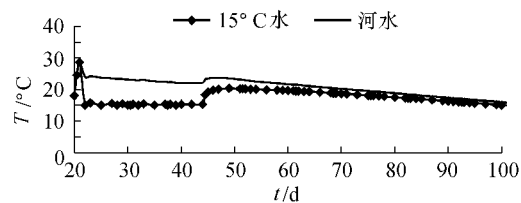


图7 水管壁上特征点温度历时曲线

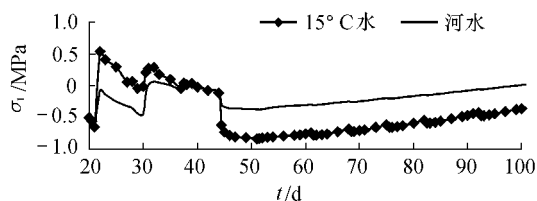


图8 水管壁上特征点应力历时曲线

由以上分析可以看到,坝体采用水管进行冷却时,水管水温不应太低,通水开始时间也不能太迟。合理的通水方法应该是:在有条件的情况下尽可能早通水,刚开始通水时冷却水温可以高一些,尤其是通水的前2d,此后再慢慢降低冷却水温。尽早通水

带来的另一个好处就是起到降低混凝土温升的效果,起削峰作用。

3 结 语

a. 本文采用改进的水管冷却迭代算法研究周公宅7号典型岸坡坝段的水管冷却效果,分析了水管层距和间距以及浇筑层厚等多种因素对水管冷却效果造成的影响,探讨了采用水管冷却时岸坡坝段的开裂机理,得出相应的温控指标并提出防裂措施。

b. 根据7个典型工况的计算结果,认为7号岸坡坝段可选取两种水管布置形式:层距 $\times$ 间距= $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 或 $2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。这两种水管布置形式均可满足坝体温控防裂的需要。

c. 岸坡坝段受控制基础温差的工程需要,传统的坝段冷却水管布置方式 $3.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 或 $3.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 有可能导致坝体一期冷却过后内部温度仍然相对偏高并引起较大的内外温差及基础温差,从而给温控防裂工作带来不利影响,同时还延长二期冷却的时间从而延缓工程进度,造成额外的经济损失,因此可能并不适合现在工程建设的需要,应作适当的修正。

d. 冷却水温和通水开始时间是导致坝体出现“管壁裂缝”的主要原因,预防的措施是采用合理的通水方式,条件允许时可以尽早通水。刚开始通水时水温应相对高一些,尤其是通水开始的头2d,此后再慢慢降低冷却水温。尽早通水带来的另一个好处就是可以最大限度地降低混凝土的温度峰值。

参考文献:

- [1] 龚召熊. 水工混凝土的温控与防裂[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 朱伯芳,蔡建波. 混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J]. 水利学报,1985(4):28-34.
- [3] 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.
- [4] 朱岳明,张建斌. 碾压混凝土坝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,2002(11):55-59.
- [5] 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.
- [6] 朱岳明,贺金仁,刘勇军,等. 龙滩水电站大坝混凝土温控防裂研究子题成果报告[R]. 南京:河海大学,2003.
- [7] 朱岳明,肖志乔,林志祥,等. 浙江华光滩水电站拱坝混凝土温控防裂研究[R]. 南京:河海大学,2003.

(收稿日期:2005-03-23 编辑:高建群)