

三峡工程大坝后期冷却通水最佳结束时机研究

周厚贵 舒光胜

(中国葛洲坝集团公司 湖北 宜昌 443002)

摘要:介绍三峡工程大坝后期冷却通水的计算方法和通水方案,并以泄洪坝段为例,根据混凝土无内热源的热传导方程和三峡工程具体情况确定的初始条件,推导出适合三峡工程的混凝土降温时间公式和对应的温度曲线、混凝土冷却中的任一时间的平均温度和对应的温度曲线,为掌握闷温时机、及时提供接缝灌浆部位提供了可靠依据。

关键词:三峡工程;泄洪坝段;后期冷却通水

中图分类号:TV315 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2002)02-0101-04

三峡工程大坝坝体混凝土的冷却通水分三期,即初期、中期、后期冷却通水。初期冷却通水主要是起削减坝体混凝土内部早期最高温升的作用,使其温度在设计允许的最高值范围内。中期冷却通水主要是减少混凝土的内外温差,使坝体减少或避免裂缝产生。后期冷却通水是岸坡接触灌浆或坝体接缝灌浆的部位,灌浆前通过后期冷却,达到设计要求的坝体接缝灌浆温度。后期通水一般采用 8~10℃ 制冷水(冬季江水温度低时亦可采用江水),通水流量不小于 18 L/min,将坝体内部温度冷却到设计要求的 14~17℃。三峡工程坝体各部位冷却的要求见表 1。本文以泄洪坝段为例,介绍后期冷却通水的计算方法和最佳结束时机的确定方法。

1 后期通水理论计算

表 1 三峡工程坝体冷却温度控制

Table 1 Control of cooling temperature for dam body in Three Gorges Project

坝块高程/m	温度/℃		坝块高程/m	下块温度/℃
	上块	中块		
建基面~60.0	14.0	15.0	建基面~25.5	15.0
60.0~71.5	14.0	16.0	25.5~36.5	15.5
71.5~80.5	14.0	16.0	36.5~48.2	16.0
80.5~95.5	14.5	16.5	48.2~60.0	16.0
95.5~109.5	15.0	17.0	60.0~71.5	16.5
109.5~116.0	15.0	17.0	75.0~83.5	17.0
116.0~132.0	16.0	17.0	83.5~95.5	17.0
132.0~136.5	16.0	17.0	95.5~98.5	17.0

1.1 通水时间计算

后期通水一般属无内热源的通水,混凝土的水化热反应趋于尾声。三峡工程坝体冷却水管呈蛇形布置,每一冷却水管所担负的冷却范围为一空心圆筒。因此,坝块的通水冷却变为若干叠合的空心圆筒的冷却。空心圆筒的内径为冷却管的直径 $2r_0$,圆筒的外径为当量圆直径 $2R$ $2R = 1.12S$ (S 为水平间距或垂直间距)。

假设混凝土初始平均温度为 T_{0m} ,通水水温为 T_{w1} ,边界条件 $\frac{\partial T}{\partial R} = \alpha$ (圆筒外边界), $T_s = T_{w1}$ (圆筒内边界),由热传导方程得

$$T_{m1} = T_{w1} + X(T_{0m} - T_{w1}) \tag{1}$$

式中 T_{m1} 为混凝土内部平均温度,℃; X 可通过 $\frac{\alpha t}{D^2} \frac{\lambda L}{C_w \rho_w q_w}$ 的值在文献 [1] 图 7-65 中查得。其中: α ——混凝土导温系数 m^2/h ; t ——通水时间 h ; D ——混凝土转化为当量圆筒直径 m ; λ ——混凝土导热系数 $kJ/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$; L ——单层冷却水管长度 m ; C_w ——水的比热 $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ_w ——水的表观密度 kg/m^3 ; q_w ——通水流量 m^3/h 。

据上述,假若坝块经中期通水后温度为 20℃,接缝灌浆前须进行后期冷却,冷却水温为 8℃,通水流量为 18 L/min,接缝灌浆温度为 14℃,则可计算出三峡工程大坝混凝土的降温曲线。

代入已知条件 $T_{m1} = 14^\circ\text{C}$, $\alpha = 0.003\,131\,\text{m}^2/\text{h}$, $D = 1.12 \times 1.5\,\text{m}$, $\lambda = 8.736\,\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$, $L = 250\,\text{m}$, $C_w = 4.186\,\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, $\rho_w = 1\,000\,\text{kg}/\text{m}^3$, $q_w = 18\,\text{L}/\text{min} = 1.08\,\text{m}^3/\text{h}$ 。由于 $\frac{R}{r_0} = (\frac{1.12 \times 1.5 \times 100}{2.54}) \cdot 2^{-1} = 132.3 \neq 100$,则导热系数 α' 须作变换,即 $\alpha' = \alpha \lg 100 / \lg (R/r_0) = 2 \times 0.003\,131 / \lg 132.2 = 0.002\,952$ 。

式(1)中 X 的值则可通过 $\alpha' t / D^2$ 和 $\lambda L / (C_w \rho_w q_w)$ 的值从文献[1]中查得。

$$\frac{\alpha' t}{D^2} = \frac{0.002\,952 t}{(1.12 \times 1.5)^2} = 0.001\,046 t \quad \frac{\lambda L}{C_w \rho_w q_w} = \frac{8.736 \times L}{4.186 \times 1\,000 \times 1.08} = 1.93 \times 10^{-3} L$$

最后计算并点绘出不同通水水温条件下的通水时间与冷却水管长度关系曲线,如图1所示。

若冷却管单组长 250 m,制冷水温为 8℃,通过计算或图1可知,坝块温度从 20℃降到 14℃需要 19.1 d。

上述计算和由计算得出的曲线图适合于三峡工程的一般性坝块,在后期通水时可以普遍应用。

1.2 坝块初始温度和最终温度的计算

后期通水的初始温度和最终温度可通过闷温测得,闷温时间为 3~5 d。若不通过闷温,根据以下公式亦可求得初始温度和最终温度。

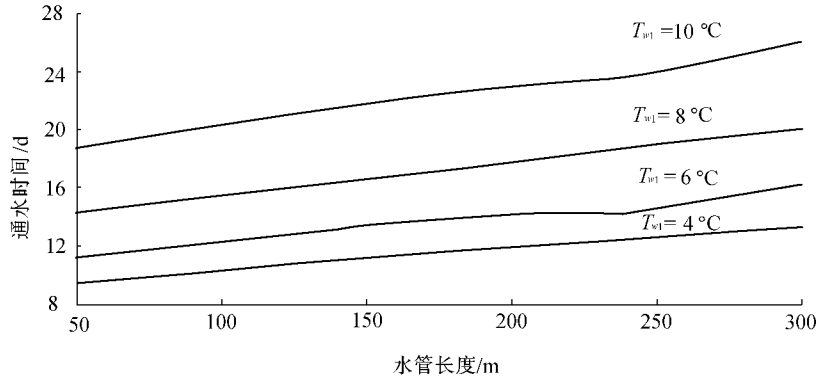


图1 不同通水水温下的通水时间与冷却水管长度关系曲线

Fig.1 Relation of watering time and length of cooling water pipe under different water temperatures

$$T_{0m} = T_{w1} + \frac{1}{Y} (T_{w2} - T_{w1}) \tag{2}$$

式中: T_{w1} ——冷却水管进口水温,℃; T_{w2} ——冷却水管出口水温,℃; Y —— $\alpha t / D^2$ 及 $\lambda L / (C_w \rho_w q_w)$ 的关系函数,其曲线见文献[1]。

将式(2)代入式(1)得

$$T_{m1} = T_{w1} + \frac{X}{Y} (T_{w2} - T_{w1}) \tag{3}$$

以式(3)来计算坝块的初始温度或通水后的任一时间的坝块内部平均温度。根据前述的边界条件,查文献[1]得 X, Y 值,代入式(3),得任一时间坝块内部平均温度方程

$$T_{m1} = T_{w1} + 1.8 (T_{w2} - T_{w1}) \tag{4}$$

则式(4)相应的温度曲线如图2所示。

由图2曲线可以查得,若进水温度为 8℃,通水流量为 18 L/min,当坝块的平均温度降为 14℃时,冷却水管的出水温度为 11.3℃。

2 后期冷却通水实施方案

2.1 水源

三峡二期工程泄洪坝段,由高程 79 m 系统供应制冷水,制冷水由一次风冷车间生产,出厂水温为 6~8℃,日产冷水可达 35 000 m³,能满足整个泄洪坝段上、中、下块两个灌区同时通水的用量。

2.2 管线布置

高程 79 m 系统的供(回)水管线沿高程 45 m 栈桥铺设至 13 号坝段坝趾转入基础廊道,分两支分别沿上、下游廊道按一进一回铺设,下游为回水管。横向廊道引橡皮管或支钢管供水,主供水管管径为 DN600 mm,供应左导墙坝段至泄洪坝段高程 40 m 以下的后期冷却通水。高程 40 m 至高程 72 m 的坝体内各层蛇形冷却管口引入双号导流底孔,底孔内主供水管线布置时不设回水管。所有冷却供水干管用聚苯乙烯泡沫瓦包裹保温,支管从干管中接 100 mm 的钢管,通过多头分叉支管用橡皮管与坝体蛇形冷却水管口相连,出水经回水管汇

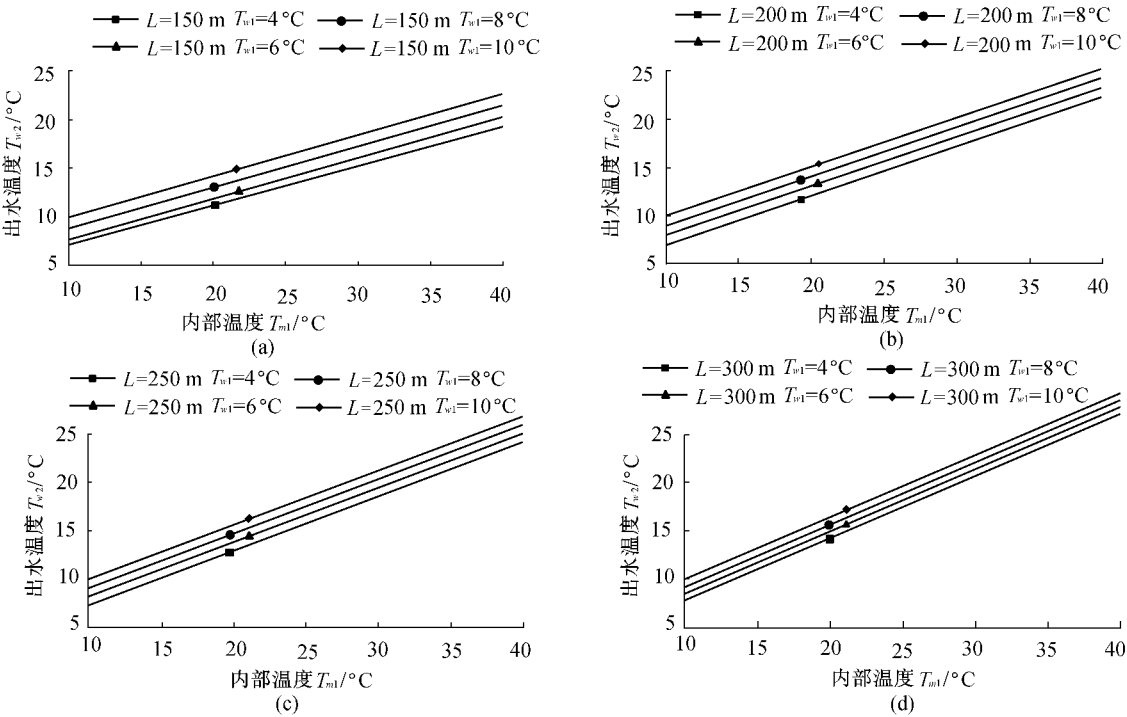


图 2 坝块内部平均温度曲线
Fig.2 Average temperature in dam block

到8号坝段下侧汇水池,由回水泵抽回到高程 79 m 系统.高程 72 m 廊道、高程 80.5 m 廊道和高程 116.5 m 廊道内冷却管亦按一进一回布置,其布置原则与基础廊道相同.

坝体预埋蛇形冷却水管一般为直径 2.54 cm 的黑铁管,在基础约束区按 1.5 m(浇筑层厚)×1.5 m(水管间距)布置,脱离约束区后按 2.0 m(浇筑层厚)×1.5 m(水管间距)布置,埋设时,水管距上游坝面 2~2.5 m,距下游坝面 2.5~3.3 m,水管距离接缝面、坝孔、洞周边 1.0~1.5 m,单根水管长度控制在 250 m 以内,蛇形管按接缝灌浆分区范围就近引入廊道或底孔内,引入廊道的水管间距不小于 1.0 m.

2.3 通水要求

正式通水前,先对冷却坝块的冷却管进行检查、疏通,并做好标识.在 0.2 MPa 水压作用下流量大于 15 L/min 的为通畅,用“○”表示,流量在 8~15 L/min 范围的为半通畅,用“⊗”表示,流量小于 8 L/min 为微通或不通,用“⊗”表示.对于微通或不通将视情况延长上下层冷却管的通水时间和加大流量.

通水前,先在各灌区选取三四组冷却管进行闷温,时间为 3 d,掌握坝体内部温度,以确定通水类型(江水或制冷水).原则上,坝体内部温度超过常温水达 5℃ 以上的,可以先通常温水降温到进出口水温持平,然后改用制冷水,将坝块降到接缝灌浆温度.冬季江水温度低于 10℃ 时直接用江水将坝块冷却到接缝灌浆温度.

坝体应保持连续通水,每月通水时间不少于 600 h,坝体混凝土与冷却水管间的温差不得超过 20~25℃.水管的通水流量不小于 18 L/min,通江水时应达到 20~25 L/min.后期冷却的部位,除待灌的灌区通水外,相邻的上部灌区 6~9 m 的压重混凝土亦同时冷却到接缝灌浆温度.对未结束中期通水的部位,如需进行接缝灌浆,可视情况直接用制冷水进入后期冷却.

通水期间每隔 2 d 变换一次进出水方向,并且每天对通水情况进行记录.内容包括各进水干、支管流量、压力、进回水温度、通水时间等.当坝体达到灌浆温度时,则停止通水.停水标准可采用前述计算方法确定,误差控制在 +1℃ 与 -2℃ 之间.通水前和通水过程中,加强对已埋仪器的观测,开始观测时,每 3 d 观测 1 次,接近或达到接缝灌浆温度期间,每 3 d 观测 2 次.通水过程闷温,每隔 30 d 左右抽样 1 次.闷温时间为 3~5 d,测温时用高压风将管内积水缓缓吹出并接于小桶内,随即用温度计测若干次,取其平均值作为闷温测值.

3 冷却通水效果

三峡工程泄洪坝段于 1999 年 12 月 1 日开始第一批后期冷却通水,通水水温为 7~8℃,流量为 16~18 L/

min ,12 月 20 日闷温 ,此时绝大部分坝块达到 12 ~ 15 ℃ ,个别点超出此范围 ,实际通水冷却的结果与理论计算的相吻合 .

应当说明的是 ,除所计算的这层冷却管通水外 ,同时还需至少上下层冷却管亦在冷却通水 ,并保证其通水历时 ,才能用上述算式计算出准确结果 .表 2 为代表性坝块的通水效果 .

表 2 典型坝块的通水效果
Table 2 Effect of watering on typical dam blocks

坝块	高程/m	水管长 /m	通水历时 /d	通水流量 (L · min ⁻¹)	进水温度 /℃	出水温度 /℃	初始温度 /℃	最终闷温温度 /℃
4—Ⅱ	10.4	252	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.0	21.0	14.0
4—Ⅱ	11.3	248	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.0	21.5	14.0
4—Ⅱ	12.8	255	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.5	21.5	15.0
19—Ⅰ	46.2	251	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.0	21.0	13.5
19—Ⅰ	47.7	245	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.0	21.0	13.5
19—Ⅰ	49.3	249	20	16 ~ 18	7 ~ 9	11.5	21.5	14.5
18—Ⅱ	52.1	240	18	18 ~ 20	7 ~ 9	11.0	20.5	13.5
18—Ⅱ	53.1	242	18	18 ~ 20	7 ~ 9	11.0	20.5	14.0
18—Ⅱ	54.7	248	18	18 ~ 20	7 ~ 9	11.0	20.0	13.5

4 结 论

本文介绍了三峡工程大坝后期通水计算方法、实施方案及效果 ,实际操作中可视接缝灌浆工期、坝体内部温度、坝块的形象等具体条件 ,使后期冷却通水达到适时、可靠、经济 ,特别是冬季 ,常温水的温度低 ,可以充分利用 .本文所给出的计算方法和降温曲线 ,可适用于条件相同或相似的工程 .

长江三峡工程大坝后期冷却通水的实践表明 ,后期冷却通水成功的关键在于 (a)切合实际地制定好供、回水方案 ,使制冷水可回收利用 (b)确定通水时间 ,以此确保接缝灌浆工期 (c)准确推算内部温度 ,掌握结束通水的最佳时期 (d)进水温度保持恒定 ,以免在冷却水管周围的混凝土内产生温度“ 拉锯 ”现象而影响通水效果 .

参考文献 :

[1] 梁润 . 施工技术 [M] . 第 2 版 . 北京 :水利电力出版社 ,1988.386 ~ 389.

Determination of Optimum Ending Time of Water Circulation for
Later Cooling of Dam in Three Gorges Project

ZHOU Hou-gui , SHU Guang-sheng

(China Gezhouba Construction Group Corporation , Yichang 443002 , China)

Abstract : A calculation method and a watering scheme for later cooling of the dam by water circulation in the Three Gorges Project are described in this paper. In addition , with a flood-discharging section of the dam as an example , formulas for determination of time of concrete temperature-drop and its corresponding temperature curve , and the average temperature at any time during the cooling of concrete and its corresponding temperature curve are deduced based on the initial conditions determined by the heat conduction equation for concrete without internal heat source and practical conditions of the Three Gorges Project , providing reliable data for handling of temperature keeping time and determination of locations for joint grouting.

Key words : Three Gorges Project ; flood-discharging section ; later cooling by water circulation