

# 库水温度估算方法探讨

兰仁烈

(水电部成都勘测设计院)

温度对拱坝的影响较大,甚至出现温度荷载大于水压力引起的应力。这种现象在一些北方地区修建薄型拱坝见之较多。

坝体蓄水以后,库水温度除对坝内平均温度带来改变外,由于上下游温差的不同,产生了温度梯度,有时它对坝体运行状态的影响程度比平均温度的影响还大。

外界温度主要是气温和水温。气温和水温的原始资料精确与否关系到温度应力的准确性。

气温和水温的变化与气候有直接关系。气候变化牵涉的因素很多,譬如地区及四季的不同,太阳辐射,日照长短,甚至一天之内就会出现很多变化,都会对天气带来影响。因而也带来气温的变化,所以要正确确定气温是一个较复杂的问题。

水温随气温而改变,水库水温不但随气温而改变,且改变的层次不同,随水库的深度不同而变化,也和气温一样有平均温度、有变幅。

水库水温既然随不同水深而改变,故对精确确定水温带来的困难比气温还要大,本文主要是讨论这个问题。

由于水温比气温还要难定,除了以上的影响因素外,水库的深浅,泥沙淤积量等都会带来影响。所以要解决水温,只有找出一般的规律,提出适当的数学模式加以运用。

新建一座水库,确定水温最好的办法是采用邻近水库的水温观测资料,利用这些资料作为基本数据能达到较高的精度要求。但是要做到这一点是不容易的。我国虽建了许多水库,但是有观测资料的不多,资料经过整理分析的更少,再加上水库分布不均给正确确定水温带来困难。

当前确定的水温计算式多采用统一的经验公式见文献[2]。不分地区采用同样的计算式,通过一些实测资料分析,出入较大。经过大量实测资料对比,南方和北方沿库深的平均温度、温度变幅、库底温度、相位差等有很多不同。

## 一、以平均气温估算库水温度

以年平均气温为基础看年气温变幅、库水表面水温变幅、库水表面平均水温、库底水温的变化规律。

水温依气温而变,但是并不同步,一般水温要滞后于气温,其气温的变幅南北方差值较大,笔者收集了国内外30多座坝的观测资料现将部分资料列于表1,以年平均气温

为基础,通过表1得年气温变幅、库水表面水温变幅,库水表面平均水温,库底水温等,其变化规律如图1。

表1 国内外水库实测温度统计表

水 库	国 别	坝高 (m)	空气温度 (°C)		库水温度 (°C)			备 注
			年平均气温	年气温变幅	表面平均	表面水温	库底平均	
					水温	变幅	温度	
丰满	中	90.1	5.1	22.1	11.8	14.3	6.0	
白山	中	149.5	5.4	19.3	11.7	10.5		
恒山	中	79.5	5.6	18.5	12*	12*		
云峰	中	117.7	6.1	18.0	10.5	13.3	4.5	
刘家峡	中	148	9.6	17.3	11		13	有异重流
官厅	中	46	9.9	15.2	12.2	13	11	有异重流
诺里斯	美	81	14	11.2	18.2	10.9	8	
海瓦西	美	94	14.2	10.3	19.2	10.9	6.4	
佛子岭	中	76	14.5	13.7	14.9	11.6	6.5	
方塔那	美	143	15.3	9.5	18.2	9.9	6.5	
响洪甸	中	84.5	15.3	12.2				
丹江口	中	97	15.9	12	18.8	9.8		
流溪河	中	78	17.0	12				
新安江	中	105	17.3	11.8	21.1	9.9	10.4	
南溪	中	63.5	19.2	10	20.2	9.1		
二滩	中	240	19.6	9.4	19.9*	8.8*	10.6*	
古田一级	中	55	19.8	9.1	19.7	8.8	13	库浅
枫树坝	中	91.5	20.6	9.0	24	8.2	12	
新丰江	中	105	21.7	7.4	21.4	7.9	12	
鲍尔德	美	221	22.3	11.7	19.5	7.4	12.8	

注:有\*者为设计值

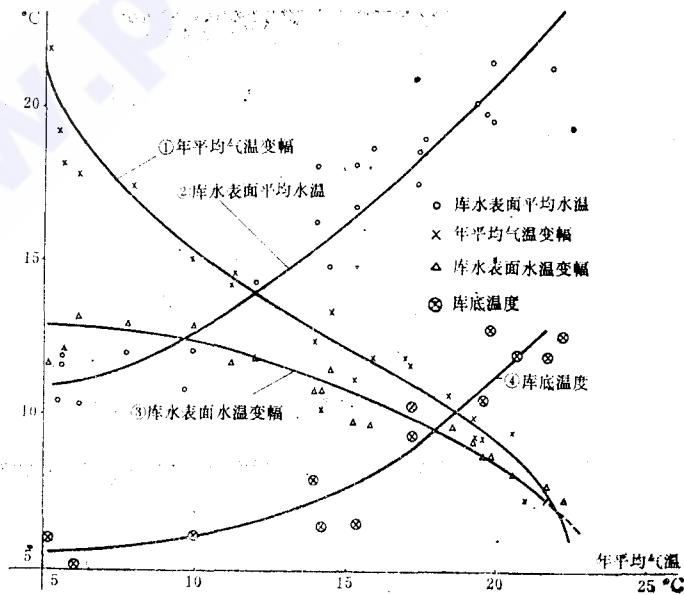


图1

1.从图1—①可看出,年平均气温变幅,北方大而南方小;在年平均气温5°C时,年气温变幅可达21°C,年平均气温20°C时变幅只有9°C。

表面水温变幅,见图1—③随着年平均气温而递减,也表现为北方大,南方小。年气温变幅与表面水温变幅相比,北方差值大,南方差值小。从图1可看出在年平均温度5°C时,差值8°C左右。在20°C时南方差值只有1°C左右,而且随年平均气温的增高而接近一致。从这里可以得出北方气温与水温的差值大,而南方当年平均气温20°C以后,变幅逐渐接近相等的规律。

表面水温随年平均气温的增高而增高。以表面平均水温而言,年平均气温在5°C时,表面平均水温在11°C左右,年平均气温在20°C时,表面平均水温在22°C左右,以差值而言前者大于后者,与年平均气温相比,前者有6°C,后者只有2°C左右。

库底温度,见图1—④,也和表面平均水温一样,随年平均气温的增高而增高。通过观测资料可以看出,年平均气温5°C时,库底温度在5.5°C左右,而在20°C时,底温增至11.5°C,有的高达13°C。

当已知年平均气温,在没有其他资料的情况下,可以从图1中查找出气温变幅、表面水温变幅,表面平均水温和库底水温。应该指出,由于积累的资料不多,曲线尚需进一步补充修正,由于该图是从实测资料得出的结果,具有代表性和规律性。

## 二、实测资料分析

### 1.年平均水温

通过大量资料分析,平均水温随水深而递减,其规律成曲线分布,图2是我国北方(年平均气温7.5°C左右),华中(年平均气温15.1°C左右),华南(年平均气温21.3°C左右)三地区,以表面平均水温为1.0向下递减的曲线图2。由图可见北方和华南的库水平均温度沿水深变化曲线吻合,如图2—①、2—③,而华中地区向内部收缩,

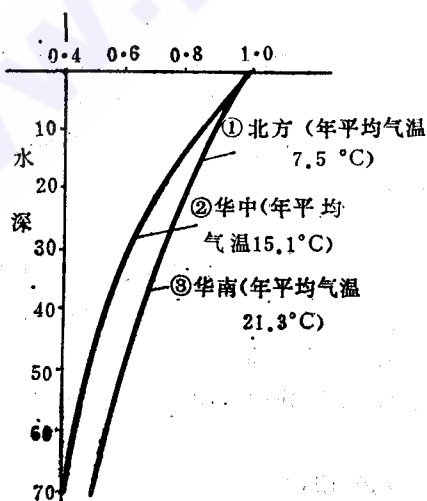


图2

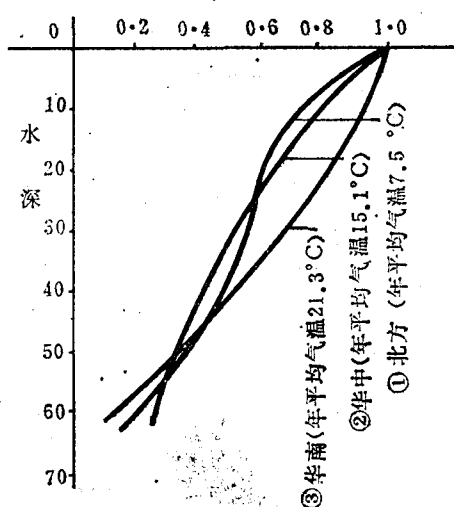


图3

递减较快,沿水深的平均温度变化不在同一曲线上,随着区间的不同而差异。

## 2. 水温变幅

水温变幅随水深改变,如果以表面水温变幅为1.0,在北方、华中、华南三区间的变幅如图3。

北方变化趋势如图3—①,华中如图3—②,华南如图3—③;三个区间的变化趋势不在同一曲线上。

通过上述分析,无论平均水深,水温变幅,如采用同一变化曲线则误差较大,分区间计算则较合理。

## 三、相位差

相位差的差值更大,沿水深的滞后时间如图4。

图4—①、4—②、4—③分别是北方、华中、华南库水沿水深相位差变化曲线。通过图4可以看出,华中滞后时间最大,北方次之,最小是华南。在华南,库表面水温变化后,在0.3个月即可影响到40m深处,而在华中地区几乎要三个月后才能达到此深度,以相位差而言采用统一的算式误差更大。

从统计资料看60m深以下,不再有大 的变化而成恒温,也不再随时间的延长有大的改变。

气温、水温以及相位差的变化趋势,也谈到北方及华中、华南各地水温的不同。笔者认为要精确得到水温各种变化的数据,最好按区间的温度资料进行分析。本文提供的数学计算式,主要以年平均气温为基础。分 $5\sim 12^{\circ}\text{C}$ ,  $12\sim 18^{\circ}\text{C}$ ,  $18\sim 23^{\circ}\text{C}$ 三个区间进行。年平均气温 $5\sim 12^{\circ}\text{C}$ 相当于我国东北,华北及西北部寒冷地区, $12\sim 18^{\circ}\text{C}$ 相当于华中地区, $18\sim 23^{\circ}\text{C}$ 多属于华南及西南地区。

### 1. 年平均水温

求沿库深的平均水温,必须要首先知道水库表面的年平均水温,年平均表面水温 $T_m(0)$ ,在没有资料时可从图1—②查得,当已知年平均气温,查图1—②上的对应点,从竖坐标上得出的温度即为表面平均水温,计算较简单。

有了表面平均水温,求沿水深的平均水温,笔者建议可按下列三式计算。

$$\text{第一区间 } T_m(y) = T_m(0) \times e^{-0.01057y} \quad (1)$$

$$\text{第二区间 } T_m(y) = T_m(0) \times (e^{-0.02y} + \sin 0.12y) \quad (2)$$

$$\text{第三区间 } T_m(y) = T_m(0) \times e^{-0.01057y} \quad (3)$$

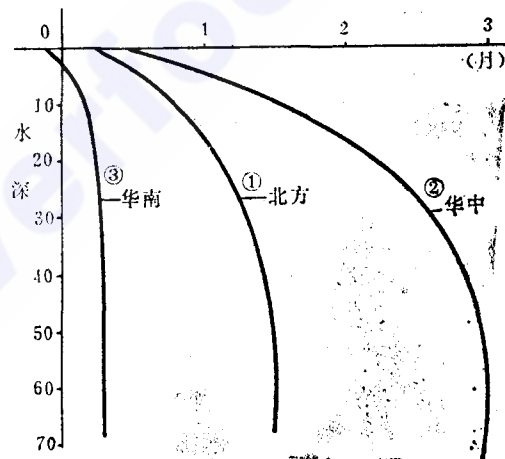


图4

此三式是按沿水深平均温度  $T_m(y)$  与水库表面平均温度的比值求出, 式中  $y$  是水深, 当表面平均水深已知后, 不同区间沿水深的平均水温即可用 (1) ~ (3) 式求出。但是必须指出此三式是在有效深度范围内运用。如在 60~70 m 深处以下, 假定库底温度是恒温, 不再变化, 与实际统计资料基本相同。

## 2. 库底温度

库底温度是一个复杂的问题, 影响因素较多, 例如水库深浅, 异重流的影响, 观测方法的不同等。通过资料的统计分析, 库底温度多在下列范围内, 第一区间 4~7°C, 第二区间 7~10°C, 第三区间 10~13°C。也可以从图 1—④曲线查得。在没有实测资料的情况下, 此办法可以采用。

这是一般情况下的结果, 如果遇到特殊情况, 例如坝前淤积较深引起库底温度提高, 需另作特殊情况处理。

## 3. 水温变幅

沿不同深度的变幅, 随水深而逐渐减弱, 至影响深度以下即逐渐消失。要求沿水库水深的变幅, 必须先知道库水表面的水深变幅  $T_2(0)$ , 当没有观测资料的情况下, 库水表面水温变幅可从图 1—③查得, 当已知年平均气温后, 即可找出与图 1—③的对应点, 从竖坐标上查出库水表面水温变幅  $T_2(0)$ , 有了表面水温变幅, 即可求出沿水深变幅  $T_2(y)$ 。笔者建议用下列三式计算沿水深的变幅。

$$\text{第一区间 } y < 40 \text{ m } \quad T_2(y) = T_2(0) \times (e^{-0.342y} + \sin 0.4y) \quad (4)$$

$$y > 40 \text{ m } \quad T_2(y) = T_2(0) \times [e^{-0.342y} + \sin 0.4y + \sin 0.9(40 - y)] \quad (5)$$

$$\text{第二区间 } T_2(y) = T_2(0) \times e^{-0.0223y} \quad (6)$$

$$\text{第三区间 } T_2(y) = T_2(0) \times e^{-0.0004y^2} \quad (7)$$

上列三式令  $T_2(0) = 1$ , 得出结果如图 3。

## 4. 相位差

从统计资料看, 三个区间差值比较大, 完全用一种相位差的表达式不合理。相位差最小是第三区间, 在收集资料中, 年平均气温在 20°C 以上, 出现负值, 例如鲍尔德坝的气温全部滞后于水温。枫树坝上部 10 m 亦滞后于水温。这些反常现象, 初步分析是气温下降后, 水温和气温不同步, 仍处于高温状态所致。

经过分析, 笔者认为, 每区存在不同的相位差沿水深  $\varepsilon(y)$  以三次抛物线表示比较合适, 经推导计算式如下:

$$\text{第一区间 } y < 50 \text{ m } \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 0.07725y - 0.001655y^2 + 0.0^41425y^3 \quad (8)$$

$$y \geq 50 \text{ m } \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 1.50 \quad \varepsilon_0 = 0 \sim 0.5 \quad (9)$$

$$\text{第二区间 } y < 50 \text{ m } \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 0.1168y - 0.00176y^2 + 0.0^5775y^3 \quad (10)$$

$$y \geq 50 \text{ m } \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 2.40 \quad \varepsilon_0 = 0 \sim 1.0 \quad (11)$$

$$\text{第三区间 } \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 0.02763y - 0.0^385y^2 + 0.0^5875y^3 \quad (12)$$

$$y \geq 50 \text{ m } \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + 0.35 \quad \varepsilon_0 = 0 \sim 0.25 \quad (13)$$

如果将三个区间的  $\varepsilon_0$  去掉, 得出结果如图 4 所示。

有了上列算式后, 可进行沿水深的平均温度、变幅、相位差的计算, 得出所需要的

各种数值。

#### 四、算 例

新丰江水库，设有效水深 70 m，年平均气温  $21.7^{\circ}\text{C}$ ，表面平均水温  $21.4^{\circ}\text{C}$ ，年气温变幅  $7.9^{\circ}\text{C}$ ，表面水温变幅  $7.4^{\circ}\text{C}$ ，求沿水深的平均温度、变幅和相位差。

解：由于年平均气温  $21.7^{\circ}\text{C}$  属第三区间，将表面平均水温及表面水温变幅各代入 (3)，(7) 式，求出沿水深的变化曲线如图 5。

将  $y$  值代入 (12)，(13) 式得相位差如图 6—③。

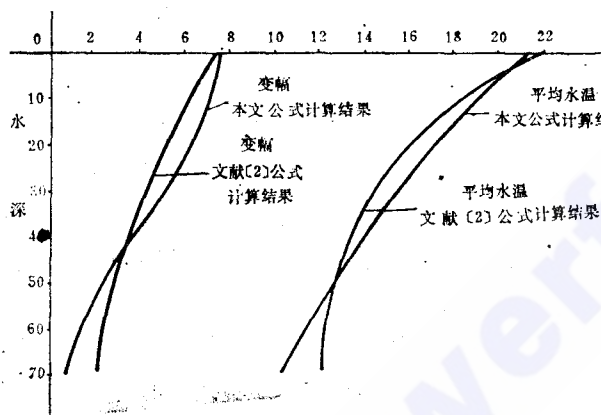


图 5

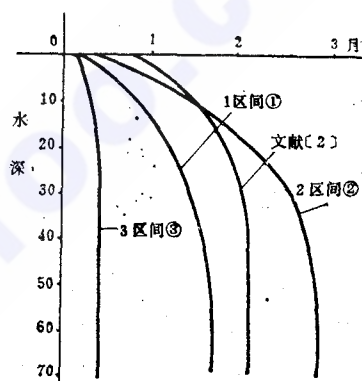


图 6

为了便于比较，将丰满（一区间），佛子岭（二区间）计算出供参考。另外也将文献〔2〕计算结果绘出供参阅。

从平均水温看（见图 5），本文建议的方法计算结果上部大下部小，文献〔2〕计算结果上部小下部大。

从水深变幅看，本文建议方法计算结果接近一条正弦曲线，文献〔2〕计算结果，接近一条指数函数逼近曲线。

相位差出入更大（见图 6）。仅从此点看采用一种算式出现的误差较大，以分区间计算为宜。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱伯芳，黎展眉，《拱坝温度荷载计算》，水利水电科学研究院，1983年  
 [2] 朱伯芳，库水温度估算，《水利学报》，1985年第2期