

# 拱坝温度荷载与温度应力的考虑

黎展眉

(贵州省水电厅, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:**介绍拱坝温度荷载的概念及值得注意的问题, 拱坝的温度荷载可以分解为三部分: 均匀温度变化  $T_m$ , 等效线性温差  $T_d$  及非线性温差  $T_n$ , 拱坝有封拱温度场、年平均温度场和变化温度场三个特征温度场, 其温度荷载可由特征温度场的相应值求得, 文章还介绍了用拱梁分载法计算拱坝温度应力, 同时论述了影响拱坝温度应力的一些因素, 包括封拱温度、坝体及基础弹模、坝体热胀系数及导温系数、坝体表面温差等。

**关键词:**拱坝; 温度荷载; 温度应力; 拱梁分载法

**中图分类号:**TV642.4+6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-7647(2001)05-0009-03

## 1 拱坝的温度荷载

### 1.1 拱坝温度荷载的概念

拱坝的温度荷载是指坝体封拱形成整体后的温度变化, 温度荷载是一种由于温度变化使坝体变形但又因拱坝超静定结构而受阻所产生的荷载, 它与作用在坝面上的水荷载有本质上的区别。

图1(a)表示拱圈某一截面上的温度变化, 阴影部分面积就是温度变化值, 即温度荷载, 可以分解为三部分: 均匀温度变化  $T_m$ , 等效线性温差  $T_d$  及非线性温差  $T_n$ , 分别见图1(d), (c), (b), 其中  $T_n$  将产生自生温度应力, 主要产生表面应力, 在作拱坝整体应力分析时, 可不予考虑,  $T_m$ ,  $T_d$  应按热传导理论计算并求它们的最不利组合, 详见我国 SD145-85《混凝土拱坝设计规范》及 SL25-91《浆砌石坝设计规范》, 简称规范公式, 图1所示温度荷载的计算公式为

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} T dx \quad (1)$$

$$T_d = \frac{12}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} T x dx \quad (2)$$

$$T_n = T - T_m - T_d x/L \quad (3)$$

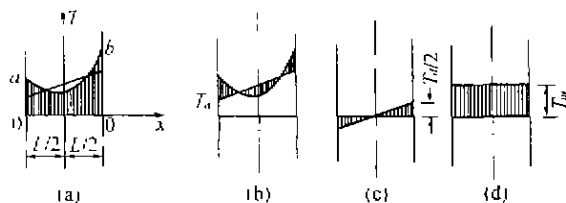


图1 拱圈截面上的温度变化

式中:  $L$  为坝体截面厚度, m;  $T$  为温度变化,  $^{\circ}\text{C}$ , 是坐标  $x$  的函数。

拱坝温度荷载可由封拱温度场、年平均温度场和变化温度场三个特征温度场的相应值求得,  $T_m$ ,  $T_d$  可由下式计算:

$$T_m = T_{m1} - T_{m0} + T_{m2} \quad (4)$$

$$T_d = T_{d1} - T_{d0} + T_{d2} \quad (5)$$

式中:  $T_{m0}$  为封拱时截面平均温度,  $T_{d0}$  为封拱时截面等效线性温差, 设封拱时实际温度为  $T_0$ , 以  $T = T_0$  代入式(1), (2), 即可算得  $T_{m0}$ ,  $T_{d0}$ ;  $T_{m1}$ ,  $T_{d1}$  为与坝体年平均温度场相应的  $T_m$  和  $T_d$ , 可按式计算:

$T_{m1} = \frac{1}{2}(T_{\text{上}} + T_{\text{下}})$ ,  $T_{d1} = T_{\text{下}} - T_{\text{上}}$ , 其中  $T_{\text{上}}$ ,  $T_{\text{下}}$  分别为截面上、下游表面年平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{m2}$ ,  $T_{d2}$  为与坝体变化温度场相应的  $T_m$ ,  $T_d$ , 变化温度场是指由于坝体表面温度变化所引起的温度变化,  $T_{m2}$ ,  $T_{d2}$  可按热传导理论求得, 已知参数包括上、下游表面温度年变幅、水温相位差、坝体截面厚度、温度变化周期、坝体导温系数等, 最高、最低月(或旬)平均气温发生的时间一般温升时取7月中旬, 温降时取元月中旬, 而  $T_{m2}$ ,  $T_{d2}$  最不利组合发生的时间一般滞后于上述气温极值时间1~1.5个月。

### 1.2 值得注意的几点

a.  $T_m$ ,  $T_d$  计算, 温升时按式(4), (5)求得; 由于变化温度场在时间上具有反对称性质, 温降时将  $T_{m2}$ ,  $T_{d2}$  反号, 代入式(4), (5)求得。

b. 求水下载面年平均水温及水温年变幅时, 所

用水深  $y$  是指该截面年平均水深, 而求水温相位差  $\varepsilon$  时所用水深  $y$  是指与温升或温降时间相应的某一时段(月或旬等)的截面平均水深, 也就是说, 变化温度场边界条件的取值应有时段或历时的概念, 例如校核水位加温升的组合时, 求温升荷载上、下游水位往往取与校核洪水相应的水位, 实际上校核洪水一般历时很短, 相应水位也历时短, 尤其下游水位消落较快, 如以校核洪水时的下游水深作为边界, 则因水深增大, 近底层  $T_{d2}$ ,  $T_{m2}$  将显著减少, 可能偏于不安全。表 1 列出了某混凝土高拱坝近底部三层两种组合下的  $T_m$ ,  $T_d$ 。从表中可见, 校核水位较正常水位只高出 3.35 m, 相应下游水位却增高了 30.07 m, 故校核组合下三个高程的  $T_m$ ,  $T_d$  均有所降低, 且  $T_d$  下降的幅度较大, 实际上洪水历时较短, 选取适宜的较低水位更合理些, 对于空库(或运行较低水位)时边界条件的确定也存在类似问题, 宜按空库历时的具体情况来合理选取。

表 1 某拱坝近底部两种组合下的  $T_m$ ,  $T_d$

| 高程/m | $T_m/^\circ\text{C}$ |           | $T_d/^\circ\text{C}$ |           |
|------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
|      | 正常水位 + 温升            | 校核水位 + 温升 | 正常水位 + 温升            | 校核水位 + 温升 |
| 200  | 3.28                 | 1.03      | 14.37                | 8.43      |
| 185  | 3.20                 | -0.27     | 13.97                | 5.16      |
| 165  | -0.95                | -1.18     | 3.99                 | 2.74      |

注: 正常水位 300 m, 相应下游水位 184 m; 校核水位 303.35 m, 相应下游水位 214.07 m。

c. 不少拱坝计算时令封拱的  $T_{d0}$  都为零,  $T_{d1}$  随着上游水深的增加而增加,  $T_{d2}$  一般也随上游水深的增加而增加, 且不大随坝厚的增加而衰减。由式(5)可知, 当  $T_{d0} = 0$  时, 在有足够水深的坝体中部及中下部, 合成后的  $T_d$  值是可观的, 其影响值得研究。表 2 列出了湖南索溪峪砌石拱坝温度荷载计算成果, 由表中可见, 顶层以下  $T_{m0}$  均小于年平均气温 16.8℃, 故  $T_m$  绝对值温降时小于温升; 又因  $T_{d0} = 0^\circ\text{C}$ , 温降时  $T_d$  绝对值也小, 但在温升时, 第 3 层以下的  $T_d$  值均很可观( $> 15^\circ\text{C}$ ), 且至底层并未随坝厚的增加而衰减。

表 2 索溪峪拱坝温度荷载

| 拱层号 | 高程/m | $T_{m0}/^\circ\text{C}$ | $T_{d0}/^\circ\text{C}$ | 温降                   |                      | 温升                   |                      |
|-----|------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|     |      |                         |                         | $T_m/^\circ\text{C}$ | $T_d/^\circ\text{C}$ | $T_m/^\circ\text{C}$ | $T_d/^\circ\text{C}$ |
| 1   | 420  | 17                      | 0                       | -10.8                | 0                    | 14.4                 | 0                    |
| 2   | 409  | 15                      | 0                       | -7.8                 | -0.7                 | 12.5                 | 6.1                  |
| 3   | 398  | 13                      | 0                       | -2.9                 | -1.0                 | 9.2                  | 12.0                 |
| 4   | 386  | 13                      | 0                       | -1.0                 | -1.4                 | 5.6                  | 15.9                 |
| 5   | 375  | 13                      | 0                       | -0.7                 | -0.8                 | 4.1                  | 17.4                 |
| 6   | 364  | 12                      | 0                       | 0.3                  | 0.3                  | 4.4                  | 17.8                 |
| 7   | 352  | 12                      | 0                       | 0.3                  | 1.5                  | 3.8                  | 17.6                 |
| 8   | 339  | 12                      | 0                       | 0.8                  | 4.6                  | 3.0                  | 15.1                 |

注: 年平均气温 16.8℃, 气温年变幅 11.45℃。

为了缓解这种情况, 有专家提出: 有条件的大型

工程, 也可以考虑采取工程措施, 控制  $T_{d0}$  等于或接近  $T_{d1}$ , 但实际上很难办到, 除了增加投资外, 其效果不易保证, 目前尚未听说已实施见效的工程实例。

d. 不少大中型拱坝为了缓解温降组合时的控制性拉应力, 有意降低封拱温度  $T_{m0}$ , 使其低于年平均气温(如上例索溪峪拱坝)甚至最低月平均气温, 这一现象又称“超冷”。当然, 这对于降低温降组合时的拉应力是有效的, 但在温升组合时很可能  $T_m$ ,  $T_d$  值都大, 形成大片的高压应力区, 个别部位的拉应力也可能较大, 这种应力状态也是不利的, 并且要做到“超冷”, 需相应的工程措施和足够的资金, 因此, 对  $T_{m0}$  的适宜取值需按技术、经济分析来定, 不一定越低越好。

## 2 拱坝的温度应力

### 2.1 拱梁分载法温度应力的计算

用拱梁分载法分析拱坝, 处理温度荷载时, 应使拱和梁都承受全部温度变化, 分别计算其初始变位, 然后协调其差值, 求出分载应力后, 拱应力还应叠加纯拱的初始温度应力; 梁为静定结构, 无初始温度应力, 梁的温度应力即为分载应力。

我们考察温升时  $T_m$ ,  $T_d$  引起的拱梁变位情况, 便可发现两者的拱、梁变位协调方向是有所不同的。对于  $T_m$  来说, 拱、梁的初始变位将为图 2(a) 所示的  $a$ ,  $b$  位置, 即梁除了竖向变位外, 其它变位为零, 而拱往上游变位。而对于  $T_d$  来说, 拱、梁初始变位一般将达到如图 2(b) 所示的  $a$ ,  $b$  位置, 即梁在拱的上游位置。在  $T_m$ ,  $T_d$  同时作用下, 因协调变位中  $T_m$ ,  $T_d$  的趋势相反, 在一定程度上可相互抵消某些影响, 以上是指由  $T_m$ ,  $T_d$  所引起的拱梁分载应力, 而  $T_m$ ,  $T_d$  各自的纯拱应力(即拱梁变位协调前拱的初始应力)叠加后, 某些部位符号一致的拱应力可能数值较大,  $T_m$ ,  $T_d$  所引起的纯拱应力, 一般拱冠及其附近上、下游面同号叠加, 拱端及其附近上、下游面异号叠加。

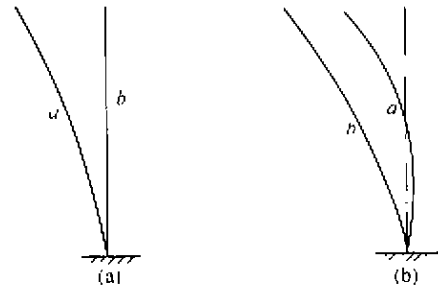


图 2 拱梁的初始变位

按规范公式合理计入  $T_m$ ,  $T_d$  后, 最大压应力在温升、温降组合下都可能发生, 空库温降时坝顶部位可能产生控制性拱向拉应力, 各种组合下, 顶层拱圈各部位, 各层拱圈的拱冠上、下游面, 拱冠梁底附近的上、下游面, 可能是拉、压应力的控制部位或高应

力区,应予以重视。一般温降组合时对坝头稳定不利,但在中上部位也可能温升组合时不利,宜具体分析。

我国早期修建的拱坝,不少采用美国垦务局的公式( $T_m = 57.57/(t + 2.44)$ ,  $t$  为拱厚)计算  $T_{m2}$ ,由于该经验公式没有考虑当地气候条件和水深的影响,只考虑坝厚一个因素,且不能计入  $T_d$ ,所得成果与基于热传导理论的规范公式差别很大,不能反映实际情况,且有时偏于不安全,最近 10 余年来兴建的拱坝,大都采用规范公式计算温度荷载,但有的小拱坝或早期修建的拱坝,采用经验公式计算,温度荷载偏小,往往也是运行中发生裂缝的原因之一。

## 2.2 影响拱坝温度应力的因素

影响拱坝温度应力的因素较多,主要有:

a. 封拱温度。我们考察计算  $T_m$ ,  $T_d$  的算式(4), (5), 不难看出,对于某一具体工程来说,年平均温度场和变化温度场当拱坝断面、材料已定时主要决定于当地气候条件,一般应视为不变的。我们可以人为影响或改变的只是封拱温度场的  $T_{m0}$  和  $T_{d0}$ 。如前所述,实际施工时要使  $T_{d0} \approx T_{d1}$  是很难办到的,一般令  $T_{d0} \approx 0$  接近实际情况。也就是说,我们能人为控制或影响的,主要为  $T_{m0}$ 。前已谈到,最好通过技术经济比较,合理选定  $T_{m0}$ ,不一定  $T_{m0}$  越低越合理。“超冷”现象大都是对大型工程而言,中小工程一般令  $T_{m0} = T_{m1}$ ,即封拱温度等于年平均气温。但是,无论大中小工程,实际施工的结果,往往是实际封拱温度高于设计封拱温度,严重的高出十几度。这正是不少拱坝产生裂缝的主要原因之一。因此,设计方面如何合理选定封拱温度,施工方面如何保证封拱温度不超过设计值,是很重要的问题。

b. 坝体及基础弹模。当坝体与基础弹模接近时,拱坝温度应力与坝体弹模近似呈线性关系。坝体弹模可通过试验求得,要考虑徐变影响时则复杂一些。坝基弹模较坝体弹模的求得要复杂得多。由于地基的不均匀性,试验成果的代表性需认真研究。坝体与坝基的弹模比直接影响应力分布的规律,但又很难弄准,这是影响拱坝应力及稳定分析成果的主要未知因素之一。

c. 坝体热胀系数、导温系数。拱坝温度应力与坝体热胀系数呈线性关系。导温系数是影响变化温度场  $T_{m2}$ ,  $T_{d2}$  的因素之一。对于整体上升、不设横缝的拱坝(如碾压混凝土拱坝或某些砌石拱坝),则还需坝体材料绝热温升、散热系数等资料。以上热学参数都可通过试验求得。

d. 坝体表面温差。坝体表面温差  $T_n$  虽不引起拱坝结构性的温度应力,但往往是坝体表面温度骤降时引起表面裂缝的主要原因。如滇西有两座砌石

拱坝,当地多年平均温差年变幅  $6.95^\circ\text{C}$ ,比华南地区还低。但两座坝先后因初冬气温骤降而发生裂缝。一座坝在一周之内气温骤降  $8.5^\circ\text{C}$ ,另一座坝在 10 d 左右时间坝下游表面温度下降约  $10^\circ\text{C}$ ,气温  $0 \sim -4^\circ\text{C}$  的低温持续约 1 个月。前一座坝还因长期空库加温降的作用导致上下游贯穿性裂缝,后一座坝因上游蓄满水,裂缝未贯穿,但下游面料石有几块裂穿。可见,坝体表面温差所引起的表面裂缝,有可能诱发与拱坝结构性裂缝叠加的坝体严重裂缝。

冬季拱坝上游表面的温度一般随水深的增加而增加,当库水位骤降时,也可能引起上游表面温度骤降而导致表面裂缝。如湘西某中型砌石拱坝因冷季放水涵管损坏库水位骤降 50 余 m 而诱发多条裂缝。又如浙江金坑砌石拱坝因停机放空水库检修,据观测资料,174 m 高程上游表面放水前后温降达  $7.13^\circ\text{C}$ ,这也是导致该坝贯穿性裂缝的因素之一。

## 3 结 语

温度荷载与温度应力在拱坝结构分析中占有重要地位,它往往是发生控制性应力、位移甚至裂缝的重要原因之一。与水荷载相比,温度荷载的确定更为复杂,且不易人为控制。温度应力的概念及解算也远较水荷载所产生的应力复杂。由于种种原因,特别是历史原因,人们对水荷载作用的感受比较明确、分析方法及观测手段都比较成熟,而对温度荷载及温度应力的分析计算,目前仍是不少拱坝修建中有待攻克的难关。

由上可知,影响拱坝温度应力的因素较多,主要有封拱温度、坝体及坝基弹模、坝体热胀系数、导温系数等,但要将这些原始资料确切定出是有相当困难的。考虑到这些因素不确定的影响,在设计上宜留有余地,以确保工程的安全和正常运用。如封拱温度不宜定得太低,实际上达不到时则不安全。另外,对某些影响较大又难于确定的因素必要时可作些浮值分析,使坝体设计能在一定范围内适应这些因素变动,如封拱温度、坝体与坝基的弹模比等。另外,坝体表面附近非线性温差往往也是引起表面裂缝的重要原因,不可忽视。而这部分温度应力在结构分析中未反映出来,除了注意坝体表面保温工作,防止冷季放空水库外,在设计上也须留有余地。再有,除了河谷周边地带外,坝顶以及拱冠附近上、下游面都可能是空库(或运行低水位)温升,温降组合的高应力区,应予以重视。总之,在拱坝设计,特别是优化设计中,应考虑种种因素的未知程度影响,在设计上多留些安全裕度,如坝顶不宜过薄,拱冠相对拱端也不宜过薄,在拱坝体形设计上,注意保持连续性,力求避免体形突变,尽量选择应力分布较好的体形,等等。

(收稿日期:2000-09-19 编辑:熊水斌)