

262878

水工結構应力分析丛书之十

混凝土坝的温度控制計算

潘家鋐 編著

8:3

上海科学技术出版社

514

3238;3

水工結構应力分析叢书之十

混凝土坝的溫度控制計算

潘家鏗 編著

上海科学技术出版社

878205

內 容 提 要

本書論述混凝土壩的溫度控制計算；除概述外，從解決溫度問題的措施，熱傳導原理和計算資料，澆筑溫度和最高溫升計算，分析到天然冷卻，人工冷卻，長期穩定溫度變場，以及關於壩壩溫度計算的總結，溫度應力計算等，並有數值解法舉例。本書可供水利工程設計人員及有關專業院校師生參考之用。

水工結構應力分析叢書之十

混 凝 土 壩 的 溫 度 控 制 計 算

潘 家 鈞 編 著

上海科學技術出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可証出093號

新華書店上海發行所發行 各地新華書店經售

上海勞動印刷廠印刷

*

開本850×1168 1/32 印張4 26/32 插頁2 字數113,000

1959年12月第1版 1959年12月第1次印刷

印數1—2,500

統一書號：15119 · 1351

定 價：(十二)0.74元

目 录

第一章	概述	1
第二章	解决混凝土温度问题的措施	3
第三章	热传导原理和计算资料	5
第四章	混凝土的浇筑温度和最高温升计算(一)	11
第五章	混凝土的浇筑温度和最高温升计算(二)	18
第六章	堤坝的天然冷却——数学解法	24
第七章	堤坝的天然冷却——数值解法	38
第八章	人工冷却——圆筒散热问题	45
第九章	长期稳定温度变场的计算	61
第十章	关于堤坝温度计算的总结	77
第十一章	温度应力计算	80
第十二章	数值解法举例	113
附录	贝塞尔函数表	136
参考文献		149

第一章 概述

混凝土堤坝的体积极为庞大,而且由于施工和结构上的需要,常常是大块地浇筑,这就引起了极为重要的温度控制和散热问题。

众所周知,水泥在硬化时,会发生很可观的水化热量,这些热量将使混凝土温度发生显著上升(譬如说,使用普通水泥和在一般浇筑速度下,混凝土的最高温度会比浇筑时高出 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$)。然后,由于混凝土和外界温差关系,这些热量逐渐散发出去,但混凝土导热性质极为不良,如果任其自然散发,往往需要较长时间,特别是厚的重力坝,有时会需要数十年甚至数百年的时间才会将水化热全部散发出去,而达到稳定状态。

混凝土的温度升高和降低,会引起什么问题呢?总的说来,温度变化将引起相应的体积变化,从而会发生裂缝或拉力。首先我们注意到水泥水化热的发生过程是很快的(常常在数天内即发生了90%),因此混凝土在浇筑后,会迅速升到很高温度,如浇筑间歇期不长,这些热量难望有效地散发,遂使混凝土内部温度与外界温度相差悬殊,温度梯度很陡,在表面极易引起巨大拉力和开裂现象。其次每块混凝土在温度升到最高后回降时,体积随之收缩,但底部受到基岩牵制,就会发生垂直的裂缝,各结构缝之间,会长期处在逐渐张开的过程中,在结构和防渗上均极不利。

对于拱坝来讲,温度问题更具有特殊重要意义。因为拱坝必须在结构缝中灌浆封拱后,才能起良好的拱的作用,若封拱时坝内热量远未散发,则灌浆后混凝土必继续收缩,将缝拉开,破坏拱的作用,而且除非预先埋有二期灌浆设备,是很难补救这些裂缝的。对于大断面的混凝土重力坝设有纵缝者,也是如此。

其次，我們注意到拱坝的温度应力，常甚可观，其重要性不亚于水压力，而且温度收缩荷载往往使拱坝中产生不可避免而极为不利的拉应力（坝体越厚，这种应力越大）。因此，如封拱时温度过高，则将来收缩后，即使不破坏拱的整体作用，亦会产生巨大的温度应力。

所以拱坝在灌浆封拱时，常在寒冷季节进行，而且要求坝内热量已相当地发散。但上面说过，混凝土天然散热性质很差，若不加处理，往往要等待很长时期后才可封拱，这当然拖迟了建设进度，不够合理。因之，就产生了人工冷却的必要性。

由此看来，大体积混凝土的降温散热计算，是极重要的一个问题。这方面的计算，要用到热传导学中的许多原理和公式，将于以后分节叙述。这里先谈一下温度控制计算的目的和所需资料。

一般讲来，温度控制计算的目的，是要解决或弄清楚下面几个问题：

1. 计算在各种条件下混凝土中温度的变化过程。

2. 根据温度计算结果，研究和确定下列各问题：（1）混凝土原料（水泥、掺合料、毛石……）的选择和配合；（2）浇筑厚度、程序和速度的确定；（3）各种降温措施（如骨料预冷、加冰拌和等）的研究和确定；（4）各种人工散热措施的研究和设计；（5）灌浆、封拱等措施时间的确定。

3. 根据温度计算结果，确定相应的温度应力，作结构强度核算。

进行温度控制计算，必须具备下列基本数据和资料：

1. 混凝土各成分（水泥、水、砂、粗骨料）的热学性质，配合比。

2. 坝体尺寸，浇筑过程、速度、措施、灌浆日期等。

3. 混凝土浇筑温度，当地气温、水温和其他有关的水文气象资料。

4. 各种人工散热措施的设计资料。

第二章 解决混凝土温度问题的措施

在研究各种热学计算问题前,我们先来看一下,要解决混凝土的降温散热问题,可以采取哪些方法?我们可以分类列举如下:

[甲]从减少混凝土发热量方面着手

1. 减少水泥用量。混凝土成分中,只有水泥会发热,因此减少水泥用量,就直接减少发热量和温度上升值,而且减少水泥用量对节约资材方面来讲,更具有极重要的意义,下面这些措施,是值得在每个工程中进行详细考虑和研究的(每立方公尺混凝土的水泥用量可低到180~120公斤):

①掺用掺合料。

②采用稠硬性混凝土。

③加大粗骨料粒径。

④采用加气剂、塑化剂。

⑤混凝土中放置大块毛石(毛石埋设率可达20~30%,最大可达50%)。

⑥分别按坝体各部分应力情况,采用不同标号的混凝土。

⑦进行详尽的混凝土配合试验,采用多级配的粗细骨料。

⑧设计中考虑后期强度。

2. 掺用大体积预制混凝土块。预制混凝土块可以很早制就,在浇筑时将其加入,其热量早已散失,故可解决部分发热问题,但不能节约水泥,而且施工中很不方便。

3. 采用低热(特种)水泥,主要是减少水泥中 C_3S 的成分。

[乙]从减低混凝土浇筑温度方面着手

其法有：

1. 混凝土原料进行預冷。最有效的是預冷粗骨料。冷却砂或水泥較为困难。
2. 用冷水或加冰拌制混凝土。
3. 实行夏季作业(在气温較高地区),防止在运送和入仓过程中、混凝土温度的迅速升高。

[丙]从加速散热过程方面着手

1. 减少浇筑层厚度,延长間歇时间。
2. 增加散热面积。如开槽,留寬縫等。
3. 降低散热面上的温度。如噴冷水,放冰块等。
4. 加設人工冷却措施。如在坝內預埋冷却水管,开冷却井等。

以上各种措施,有的效果大,有的小,有的代价貴,有的低,有的施工方便,有的困难,有的适宜于某工程,有的不宜,因此,如何針对一个具体的工程,进行詳細和全面的研究,决定适当的散热措施,乃是一个极为重要而复杂的问题,我們在本书中尚不能对这个问题进行全面的討論。但无论采取何种措施,都必須对混凝土中热傳导的情况有所了解。因此本书将仅限于散热及温度应力的数学計算和物理原理的敘述,掌握了这些工具,再加上經濟分析,則不难就每一工程研究各种措施的适宜性。

第三章 热传导原理和计算资料

关于温度变化过程的计算，是一个热传导学上的问题。我们首先简单介绍一些热传导学中的主要常数和原理。每一种物质具有几个热学上的性质，在我们的计算中，需要用到以下两个：

1. 比热 c 比热是指将单位质量的物质升高单位温度所需的热量，其单位为[大卡/公斤-度^①]。 c 并非一个常数，乃视温度不同而有改变的，因此更正确些应写为 $c = c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2$ (θ 为温度)。但由于坝内温度变化范围不大(通常不过几十度)，因此，常可令 c 为常数以简化计算(在别的高温热传导计算中就不允许这样做，例如烟囱的散热计算就是)。

2. 导热系数 k 图 1 中示一块材料，面积为 1，厚度也是 1，它的两面存在着 1 度温差(即温度梯度 $\frac{\partial\theta}{\partial x} = 1$)，则热量就将通过材料由高温面传向低温面。在每单位时间中传导过来的热量，称为该材料的导热系数 k ，单位为[大卡/公尺-小时-度]， k 在温度变化范围不大的情况下，也得视为常数。

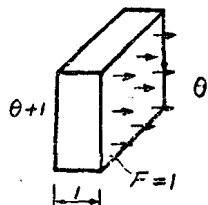


图 1.

3. 导温系数 a 在热传导计算中，我们常发现 c 或 k 并不是独立变数，而是以其组合形式出现的，即

$$\theta = f\left(\frac{k}{c\rho}\right)$$

式中 ρ 是材料的密度或容重(公斤/立方公尺)，其中的独立变数

① 在本书中温度一律以摄氏计。

表 1

材 料 名 称	容 重 ρ	k (大卡/公尺-小时-度)				c (大卡/公斤-度)			
		21.1°C	32.2°C	43.3°C	54.4°C	21.1°C	32.2°C	43.3°C	54.4°C
水	1000	0.516	0.516	0.516	0.516	1.000	1.000	1.000	1.000
普通、水泥		1.062	1.097	1.131	1.162	0.109	0.123	0.153	0.197
石英砂		2.653	2.651	2.640	2.636	0.167	0.178	0.190	0.207
玄武岩(卵塊石)		1.646	1.641	1.633	1.633	0.183	0.181	0.187	0.200
白云岩(卵塊石)		3.710	3.645	3.586	3.424	0.192	0.196	0.204	0.212
花岗岩(卵塊石)		2.509	2.500	2.494	2.479	0.171	0.169	0.175	0.185
石灰岩(卵塊石)		3.470	3.390	3.324	3.262	0.179	0.181	0.187	0.196
石英岩(卵塊石)		4.089	4.007	3.974	3.935	0.165	0.173	0.181	0.189
粗面岩(卵塊石)		1.617	1.627	1.639	1.645	0.183	0.185	0.191	0.193

$\frac{k}{c\rho}$ 可称为材料的导温系数, 以 a 記之, 单位是 (公尺²/小时), 即

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad (1)$$

普通混凝土的組成材料的 k 和 c 值可利用表 1 估算 (注意, 水泥的 k 及 c 值常可得自厂家資料, 最好不要用表列数值)。

利用表 1, 可大致估計混凝土的热学常数。例如設混凝土的組成为: 水泥 9.17%, 水 5.03%, 砂 22.0%, 花崗岩块石 63.8%, 則 (取温度为 32° 为准)

$$k = (0.516 \times 5.03 + 1.097 \times 9.17 + 22 \times 2.651 + 2.5 \times 63.8)$$

$$\div 100 = 2.306 \text{ (大卡/公尺-小时-度)}$$

$$c = (1.000 \times 5.03 + 0.128 \times 9.17 + 0.178 \times 22 + 0.169 \times 63.8)$$

$$\div 100 = 0.2090 \text{ (大卡/公斤-度)}$$

設混凝土容重 $\rho = 2400$, 則

$$a = \frac{k}{\rho c} = \frac{2.306}{2400 \times 0.209} = 0.00473 \text{ (公尺}^2\text{/小时)}$$

表 1 資料, 取自美国垦务局技术資料 (参考文献 4), 这表所列数据一般偏大些, 表 2 示得自其他工程或书籍中的一些資料。

表 2

資料来源	导热系数 k (大卡/小时-公尺-度)	比热 c (大卡/公斤-度)	导温系数 a (公尺 ² /小时)
苏联建筑法規第 2 卷 3 篇第 3 章表 (1).....	1.489	0.243	0.00247
雷可夫著“热傳导理論” 附录 VIII.....	0.992	0.216	0.00192
根据美国 Norris 等 17 个大坝采用数字平均	2.1	0.222	0.0038
我国新安江电站.....	1.76	0.21	0.0035
我国流溪河电站.....	2.30	0.209	0.0047

由表可見, 混凝土的比热彼此較接近 (在 0.21~0.24 之間),

但其导温系数(或导热系数)則相差很大,小的达 0.002, 大的达 0.005, 除了骨料性质不一致外, 在量测方面恐怕也难期准确。对于重要的工程, 导温系数必須经过試驗来决定, 若为初步估算, 則可取为 $\alpha = 0.0025 \sim 0.004$ 公尺²/小时之間。注意, 导温系数取得小些, 是偏于安全的。

其次, 我們研究一下水泥的发热特性, 一般讲, 1 公斤水泥在材龄为 t (小时) 内的全部散热量 Q_t 可以公式

$$Q_t = Q_0(1 - e^{-mt}) \quad (\text{大卡/公斤}) \quad (2)$$

表示之, Q_0 为 1 公斤水泥的最終发热量, m 表示水泥发热的快慢, 为水泥的特性之一(单位为 $\frac{1}{\text{小时}}$)。例如某种混合水泥的 $Q_0 = 60$ 大卡/公斤, $m = 0.01(\frac{1}{\text{小时}})$, 則在材龄为 1, 2, 3……天后的总发

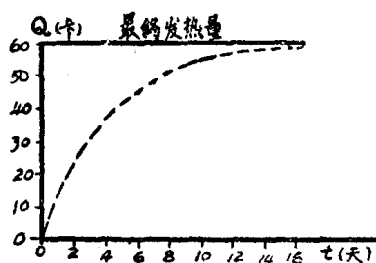


图 2

热量将如图 2 所示。由图可見, 在最初一周内大部分(80%)热量均已发生, 而在 10 天以后, 則 90% 的热量都发生了。

如果已知某种水泥在两个材龄时的发热总量(一般由試驗得出), 則即可計算 Q_0 及 m 两值。

如有更多的資料, 可用最小二乘法或平均法确定 Q_0 及 m 值。表 3 仅为一般指数, 系供参考(不可随意采用)。

表 3

水泥种类	表面率(平方厘米/克)	C ₃ S%	水化热(大卡/公斤)		
			3 天	7 天	28 天
早强水泥	2080	56	102	108	114
普通水泥	1770	48	79	86	91
中热水泥	1980	42	63	74	82
低热水泥	1980	20	44	52	65

我們要注意,采用低热水泥,发热量虽然較小,但散发的速度則也較慢。

最后我們导引热傳导的基本微分方程式。参考图 3,設在某物体中切出一小块元素 $dx dy dz$ 来看,該物体內各点温度均为 x 、 y 、 z 和 t 的函数,即 $\theta = \theta(x, y, z, t)$ 。設此物体有內热源,每小时每单位体积发生热量

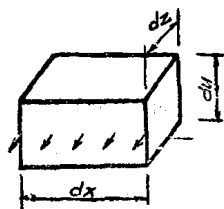


图 3

A (大卡/立方公尺-小时),則在絕热状态下,其温度上升率为 $\frac{A}{c\rho}$ (度/小时),此外,因为元素各面温度不等,热量要流入或流出元素,以 $dx dy$ 面上来講,当坐标为 z 处,該面上温度梯度为 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_z$, 流过該面的总热量为

$$k \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_z dx dy dt$$

而在 $z+dz$ 的面上,通过的热量为

$$k \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z+dz} dx dy dt$$

相抵后,元素內增加了热量

$$k \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z+dz} - \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_z \right] dx dy dt = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \cdot dx dy dz \cdot dt$$

因此将引起元素温度上升

$$d\theta = \frac{k}{c\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dt$$

或其上升率为

$$\frac{k}{c\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$$

同样,另外两个方向上的相应值为

$$a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{及} \quad a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}$$

于是我們可以写下热傳导的基本方程式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \theta + \frac{A}{c\rho} \quad (3)$$

如果采用圓柱坐标 (r, ϕ, z) 則为 (图 4)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \theta + \frac{A}{c\rho} \quad (4)$$

本书中的全部热傳导計算問題, 就是要在各种边界和起始条件下, 解决上述的基本微分方程式 (3) 或 (4)。

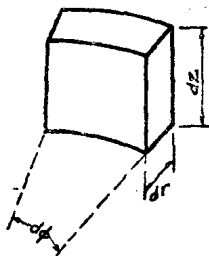


图 4

第四章 混凝土的澆筑溫度和 最高溫升計算(一)

混凝土在拌和后入倉時的溫度稱為澆筑溫度，可用下式計算：

$$\theta_p = \frac{\sum w \cdot c \cdot \theta}{\sum w \cdot c} \quad (5)$$

式中 θ_p ——澆筑溫度(度)；

w ——每立方公尺中各種成分的重量(公斤/立方公尺)；

c ——混凝土各種成分的比熱(大卡/公斤-度)；

θ ——混凝土各種成分在拌和時的溫度。

如無特殊處理，混凝土的澆筑溫度一般接近當地月平均溫度，因為主要成分，砂、石、骨料常接近月平均溫度^①。水溫則接近月平均水溫。水泥的溫度往往較高(例如有達 50°C)但所占比重不大。如在拌和時採取預冷措施，則 θ_p 可以大大低於氣溫，在計算中將有關的材料 θ 降低即可，如加冰拌和，則應計入冰的熔解吸熱影響。但是我們要注意，預冷拌和后，熱量會由外界倒流入混凝土中，因此澆筑時就會比拌和時升高一些，預冷得越多，倒灌現象也越快。這一點，在計算澆筑溫度時必須考慮及之，一般講來，在拌和時預冷 10°，在入倉後將回升 2~4°。

混凝土入倉後，溫度就開始變化，分析起來，有以下兩點原因：

1. 水泥水化熱開始發生，使混凝土溫度升高。
2. 混凝土澆筑溫度與外界溫度不同，熱量流動，引起溫度變化。

① 當然，當日氣溫高出月平均溫度時應採取一些簡單的防護措施。

关于水化热問題,根据上章說明,可以用式 $Q = Q_0(1 - e^{-mt})$ 表示。故在絕热状态下,水化热引起的混凝土温度上升值可以 $\theta = \theta_0(1 - e^{-mt})$ 代表。式中 θ_0 是指在絕热状态下、水化热能引起的最高混凝土温升, $\theta_0 = \frac{Q_0 w_0}{c\rho}$, w_0 代表每立方公尺中水泥含量(公斤/立方公尺)。例如,令 $Q_0 = 60$ 大卡/公斤, $w_0 = 240$ 公斤/立方公尺, $\rho = 2400$, $c = 0.20$, 則 $\theta_0 = \frac{60 \times 240}{2400 \times 0.20} = 30^\circ\text{C}$, 設澆搗时温度为 25°C , 則温度可以用式 $\theta = 25^\circ + 30^\circ(1 - e^{-mt})$ 代表。

但这是指絕热情况,实际上,混凝土温度一面在上升,一面也在不断散发(如混凝土拌和时經過預冷,則开始时还吸热,到其温度

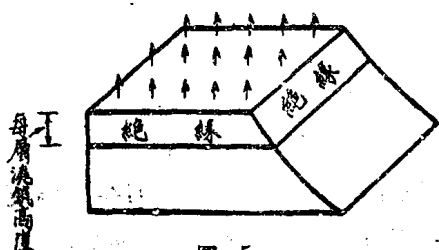


图 5

度高于外界温度后再散热)。研究图 5, 可知澆筑层高度常常远比平面尺寸为小(每层高度总在 $0.5 \sim 4.0$ 公尺之内, 而平面尺寸常达十数公尺以至数十公尺), 而散热

速率和断面尺寸平方成正比, 尤其是每层四周有模板圍护, 未拆模前, 是良好的絕緣层, 因此, 研究混凝土澆搗后的温度上升問題时, 我們常只考虑热量是从表面进出, 而认为其他四面为絕緣, 这可使問題簡化为单向情况, 而能方便地用数学方法来处理它。

我們首先研究这样一个問題, 設混凝土澆筑温度为 θ_p , 外界温度为 θ_a , 暫不計水化热問題, 試研究表面散热对混凝土内温度的影响。这里, 温度 θ 为 x 及 t 的函数(x 是某点离表面距离), 基本方程式为 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ 。起始条件和边界条件为 $t=0, \theta=\theta_p$; $x=0, \theta=\theta_a$ 。适合这些条件的解答是^①

① 在导引中, 假定混凝土是无穷厚的, 若混凝土厚度很小, 則式(6)不再适用, 应該用以后的式(14)。

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_p - (\theta_p - \theta_a) \left[1 - P\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right] \\ &= \theta_a - (\theta_a - \theta_p) P\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)\end{aligned}\quad (6)$$

这里, $P\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ 为机率积分值,

$$P\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} e^{-\beta^2} d\beta \quad (7)$$

将上式代入 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$, 可以証明符合基本方程式。至于它满足边界条件更是显然的 [因为 $P(\infty) = 1, P(0) = 0$]。机率积分值可在积分表 (如 Pierce 的 A short table of integrals) 中查到。

其次, 假定浇筑温度与外界温度一样, 仅考虑水化热影响, 则基本方程式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{A}{c\rho} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \theta_0 m e^{-mt} \quad (8)$$

边界条件是 $x=0, \theta=0$ (取浇筑温度为计算起点); 起始条件是 $t=0, \theta=0$; 适合这些条件的解答为

$$\theta = \theta(t, x) = \theta_0 \int_{t=0}^{t=t_1} m e^{-mt} P\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t_1-t)}}\right) dt \quad (9)$$

这个解答可从上一解答中推绎出来。因为設在 x 深处的一层, 当时間为 t 时, 水化热将使它升高 $\theta_0 m e^{-mt}$ 度, 根据上述解答, 这升高值在時間 t_1 时将变化 $\theta_0 m e^{-mt} P\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t_1-t)}}\right)$ 。因而从時間 $t=0$ 到 $t=t_1$ 間, 在 x 处的总的温度升高为

$$\theta_0 \int_0^{t_1} m e^{-mt} P\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t_1-t)}}\right) dt$$

因为热傳导方程式为綫性, 故适用叠加原理。我們說: 若浇筑温度为 θ_p , 外界温度为 θ_a , 水化热的最終絕热温升为 θ_0 , 則浇筑后時間为 t_1 、距离为 x 处的温度是