

# 大体积混凝土绝热温升试验新方法

朱伯芳

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 现有大体积混凝土绝热温升试验仪器只能进行 28 d 试验, 由于掺用粉煤灰较多, 实际上在 28 d 以后, 混凝土温度还将继续上升, 故有必要延长绝热温升测试时间。本文建议一种新的试验方法, 试件表面包裹保温层, 试验时间可延长至 180 d。

**关键词:** 大体积混凝土; 绝热温升; 试验方法

中图分类号: TV315

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2010)03-0037-03

## A new test method for determining the adiabatic temperature rise of mass concrete

ZHU Bofang

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The present test method for determining the adiabatic temperature rise of mass concrete can be used only for the early 28 d concrete age. Because big amount of fly ash is mixed in the mass concrete, the adiabatic temperature will rise appreciably after the age of 28 d. A new test method is suggested in this paper. The test specimen is covered with thermal insulating layer. The test time may be as long as 180 d.

**Key words:** mass concrete; adiabatic temperature rise; new test method

## 1 引言

绝热温升关系到大坝施工中的温度控制, 是大体积混凝土的一项重要性能, 目前一般只进行 28 d 龄期的绝热温升试验。现在常态混凝土坝掺用粉煤灰达到 30%, 碾压混凝土掺量达到 50%~60%, 因此混凝土水化作用推迟了。例如, 目前施工中的某特高拱坝, 混凝土掺粉煤灰 30%, 根据实际观测资料反分析, 在 28 d 以后, 混凝土绝热温升还有 6~8 之多, 这一部分温升在温控设计中没有考虑到, 以致在实际工程中造成一定被动。因此, 绝热温升试验只进行 28 d 显然是不够的, 最好进行 90~180 d。但现有仪器进行 28 d 以上的试验存在一定困难, 后期混凝土温度上升速度降低, 试验精度难以保证。本文建议一种新的试验方法, 试验时间可延长到 180 d。

## 2 混凝土绝热温升新的试验方法

如图 1(a)所示, 目前采用的绝热温升试验方法,

试件表面是裸露的, 试件内部温度  $T_1(t)$ , 试件外面试验箱内气温为  $T_2(t)$ , 当混凝土内部温度  $T_1(t)$  上升时, 调节试验箱内气温  $T_2(t)$ , 使它跟着  $T_1(t)$  而上升

$$T_2(t) = T_1(t) + T \quad (1)$$

目前要求误差  $|T| \leq 0.1$ , 当误差很小时, 可以认为  $T_2(t) = T_1(t)$ , 即混凝土处于绝热状态,  $T_1(t)$  即为绝热温升。当龄期  $\leq 28$  d 时,  $T_1(t)$  上升较快, 试验可顺利进行; 当  $> 28$  d 时,  $T_1(t)$  上升很慢, 难以保证试验精度, 另外占用试验设备时间太长, 也存在一些实际困难。

笔者建议一种新的试验方法如下: 如图 1(b)所示, 在混凝土试件外面包裹保温层(泡沫塑料制成的保温被、保温板或保温涂层), 试验箱内温度仍按式(1)控制, 但由于有了保温层, 即使  $T$  稍大一

收稿日期: 2009-12-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAB29B05)。

作者简介: 朱伯芳(1928—), 男, 中国工程院院士。

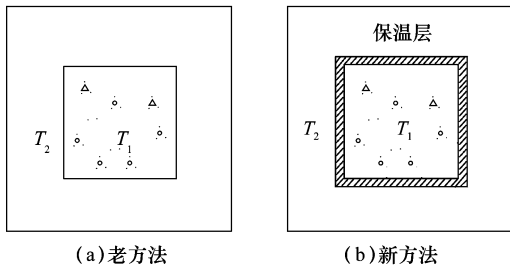


图 1 绝热温升试验方法

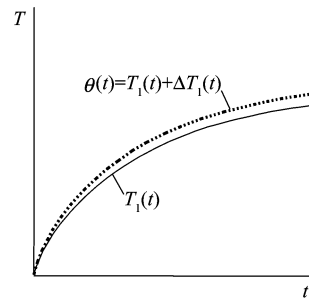


图 3 温度过程线

些，对混凝土温升  $T_1(t)$  的影响也小得多。

为了进一步提高试验精度，可用计算方法消除误差如下：

如图 2 所示，设试件第  $i$  个侧面的面积为  $A_i$ ，在正交方向通过  $A_i$  的单位面积热阻为

$$R_i = \frac{1}{h_i} + \frac{h_i}{\lambda_i} + R_o \quad (2)$$

式中， $h_i$  为保温层外表面散热系数； $R_o$  为保温层内表面与试件间隙的热阻；设保温层由若干层材料组成， $h_i$  和  $\lambda_i$  分别为其第  $i$  层的厚度和导热系数。

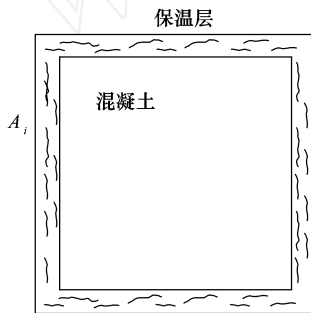


图 2 试件

由于有保温层，试件内部温度  $T_1(t)$  必然十分接近于均匀分布，故通过第  $i$  个侧面  $A_i$  的热流量为

$$q_i(t) = \frac{A_i [T_1(t) - T_2(t)]}{R_i} \quad (3)$$

从  $t=0$  开始，到时间  $t$  流出试件总热量为

$$Q(t) = \sum_i \frac{A_i}{R_i} \int_0^t [T_1(t) - T_2(t)] dt \quad (4)$$

由于热量  $Q(t)$  的流失而引起的温度变化为

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{1}{cV} \sum_i \frac{A_i}{R_i} \int_0^t [T_1(t) - T_2(t)] dt \\ &= \frac{1}{cV} \sum_i \frac{A_i}{R_i} [T_1(t_j) - T_2(t_j)] t_j \quad (5) \end{aligned}$$

式中， $c$ 、 $V$  分别为试件的比热、容重和体积。

如图 3 所示，混凝土实际的绝热温升为

$$\theta(t) = T_1(t) + T(t) \quad (6)$$

采用上述方法，试验精度得到极大提高，试验时间可根据需要适当延长。

具体方法有以下两种：方法 A，利用现有绝热温升试验仪，试件外面加以保温，试验箱内温度控制精度 0.1；方法 B，试件成型后，放置于保温箱内，箱内温度自动控制，温度控制精度放宽到 1，为保证试验精度，可加大试件外保温层的厚度。

以上两种试验方法都是可行的，考虑设备周转率等实际问题，方法 A 可用于常规试验，试验周期以不超过 90 d 为宜；方法 B 用于重要的碾压混凝土坝，试验周期可达半年。

### 3 试验方法讨论

$T$  是补偿试验过程中所散失热量的温差，可称为补偿温差。

骤然一看，似乎只要试验过程中  $T_1(t) - T_2(t) < 0.1$ ，即有试验误差 0.1，其实不然。如果计算中不考虑热量损失，直接以  $T_1(t)$  作为绝热温升  $\theta(t)$ ，那么试验误差不是  $T_1(t) - T_2(t)$ ，而是  $T$ 。

$T_1(t) - T_2(t)$  是瞬间温差，而  $T$  代表试验过程中累积损失的热量，当试验时间  $t$  较长时，其值可能很大，远远超过  $T_1(t) - T_2(t)$ 。

为了减小误差，从式 (5)、式 (6) 可以看出，有以下途径：(1) 减小  $T_1(t) - T_2(t)$ ；(2) 增加试件表面热阻，即加强保温；(3) 加大试件尺寸。

$T_1(t) - T_2(t)$  实际为时间  $t$  的函数，设在时间坐标上的平均值为  $(T_1 - T_2)_m$ ，则

$$T = b(T_1 - T_2)_m t \quad (7)$$

其中 
$$b = \frac{1}{cV} \sum_i \frac{A_i}{R_i} \quad (8)$$

设试件直径为  $D$ ，高度也为  $D$ ，且各侧面热阻相同，即  $R_i = R$ ，则  $A/V = (D^2 + D^2/2) / (D^3/4)$

$=6/D$ , 故

$$b = \frac{6}{cDR} \quad (9)$$

算例 1: 试件  $\phi 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ ,  $c = 0.980 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $\rho = 2450 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 裸露表面放热系数  $R = 20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , 分 5 种情况: (1) 试件表面裸露,  $R = 1/20$ ,  $b = 6/cDR = 6 \times 20 / (0.98 \times 2450 \times 0.40) = 0.1249 (1/\text{h}) = 3.00 (1/\text{d})$ ; (2) 试件外面包裹聚乙烯保温被, 厚度  $h = 1.5 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0.160 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $R = 1/20.0 + 0.015/0.160 = 0.14375 (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})/\text{kJ}$ ,  $b = 6 / (0.98 \times 2450 \times 0.40 \times 0.14375) = 0.0435 (1/\text{h}) = 1.043 (1/\text{d})$ ; (3) 试件外包挤塑型聚苯乙烯泡沫保温板, 厚度  $3 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0.108 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $R = 1/20 + 0.03/0.108 = 0.328 (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})/\text{kJ}$ ,  $b = 6 / (0.98 \times 2450 \times 0.40 \times 0.328) = 0.01905 (1/\text{h}) = 0.457 (1/\text{d})$ ; (4) 试件外包挤塑型聚苯乙烯泡沫保温板, 厚度  $10 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0.108 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $R = 1/20 + 0.10/0.108 = 0.976 (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})/\text{kJ}$ ,  $b = 6 / (0.98 \times 2450 \times 0.40 \times 0.976) = 0.00640 (1/\text{h}) = 0.1536 (1/\text{d})$ ; (5) 试件外包挤塑型聚苯乙烯泡沫板, 厚度  $h = 20 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0.108 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $R = 1.902 (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ }^\circ\text{C})/\text{kJ}$ ,  $b = 0.00328 (1/\text{h}) = 0.0788 (1/\text{d})$ 。计算结果见表 1。

表 1 算例 1, 补偿温度  $T$

试件表面状态	$b$ (1/d)	$(T_1 - T_2)_m$ /	试验时间 $t/\text{d}$				
			7	28	56	90	180
裸露	3.00	0.10	2.10	8.40	16.80	27.0	54.0
		0.05	1.05	4.20	8.40	13.50	27.0
		0.03	0.63	2.52	5.04	8.10	16.2
外包 1.5 cm 聚乙烯被	1.043	0.10	0.73	2.92	5.84	9.39	18.77
		0.05	0.37	1.46	2.92	4.69	9.39
外包 3 cm 聚苯乙烯被	0.457	0.10	0.32	1.28	2.56	4.11	8.23
		0.05	0.16	0.64	1.28	2.06	4.11
		0.30	0.96	3.83	7.68	12.33	24.68
外包 10 cm 聚苯乙烯板	0.1536	0.10	0.11	0.43	0.86	1.38	2.76
		0.20	0.22	0.86	1.72	2.76	5.53
		0.30	0.32	1.29	2.58	4.15	8.29
		0.50	0.54	2.15	4.30	6.91	13.82
外包 20 cm 聚苯乙烯板	0.0788	0.30	0.17	0.66	1.32	2.13	4.26
		0.50	0.28	1.10	2.21	3.54	7.09

作为试验方法, 在式 (6) 中直接测量的混凝土温度  $T_1(t)$  应占主导地位, 补偿温差  $T$  只能占很小比重。例如, 在结束试验时, 宜有  $T/T_1(t) < 0.15$ , 即  $T$  应大致小于 4, 根据这一要求, 从表 1 可

知, 对于表面裸露的试件, 只能进行 28 d 试验, 而且当  $(T_1 - T_2)_m = 0.03$  时, 28 d 的补偿温差  $T$  仍有 2.52。可见为了保证试验结果的精度, 对于裸露试件, 最好按式 (6) 计算绝热温升, 只有当补偿温差  $T < 0.2$  时, 才可以忽略  $T$ 。

如果试件外包 1.5 cm 聚乙烯保温被, 当  $(T_1 - T_2)_m = 0.05$  时, 可以做 56 d 试验, 90 d 试验也勉强可以做, 当然应按式 (6) 计算  $(t)$ , 如果试件外包 3 cm 聚苯乙烯板,  $(T_1 - T_2)_m = 0.05$ , 可做 180 d 试验。

用现有设备进行长龄期绝热温升试验, 占用仪器时间太长, 也可用简化设备进行试验, 试件外包 20 cm 聚苯乙烯泡沫板, 若  $(T_1 - T_2)_m = 0.50$ , 可进行 90 d 试验; 若  $(T_1 - T_2)_m = 0.30$ , 可进行 180 d 试验。

试验早期, 尤其是前 3 d, 混凝土绝热温升上升很快, 控制温差  $T_1(t) - T_2(t)$  难度大一些。到了后期, 绝热温升上升较慢, 控制  $T_1(t) - T_2(t)$  难度较小, 不同时间, 平均温差  $(T_1 - T_2)_m$  数值不同, 式 (7) 可改写为

$$T = b \sum_i (T_1 - T_2)_{m_i} t_i \quad (10)$$

算例 2: 试件外包 20 cm 聚苯乙烯板,  $b = 0.0788 (1/\text{d})$ ; 当  $t = 0 \sim 2 \text{ d}$  时,  $(T_1 - T_2)_m = 2$ ; 当  $t = 3 \sim 4 \text{ d}$  时,  $(T_1 - T_2)_m = 1$ ; 当  $t = 5 \sim 7 \text{ d}$  时,  $(T_1 - T_2)_m = 0.50$ ; 当  $t > 7 \text{ d}$  时,  $(T_1 - T_2)_m = 0.3$ 。由式 (10), 当  $t = 90 \text{ d}$  时,  $T = 2.55$ ; 当  $t = 180 \text{ d}$  时,  $T = 4.68$ 。试验可行。

从以上分析可见, 当试验时间较长时, 保持试验精度难度较大, 但在试件外面进行保温后, 进行 90 ~ 180 d 试验是可行的, 对于 180 d 以后的绝热温升, 其数值已较小, 必要时可用化学方法测定。

## 4 结 语

(1) 目前混凝土掺用粉煤灰较多, 绝热温升试验只进行 28 d 是不够的。

(2) 本文建议的绝热温升试验方法, 试验时间可以延长到 28 d 以上, 以便测出完整的温升过程线。例如, 粉煤灰掺量 30% 的常态混凝土可用 90 d, 掺量达 50% ~ 60% 的碾压混凝土可用 180 d。

(3) 试验精度可大大提高。

(4) 目前采用的试验方法, 只能进行 28 d 试验, 而且试验误差可能较大, 建议按照本文式 (6) 进行验算和修正。

(责任编辑 陈小敏)