

● 3.2.2 大体积混凝土温度应力计算

1. 大体积混凝土温度计算

1) 最大绝热温升(二式取其一)

$$T_h = (m_c + K \cdot F) Q / c \cdot \rho$$
$$T_{h(t)} = \frac{m_c \cdot Q}{c \cdot \rho} (1 - e^{-mt}) \quad (3-2)$$

式中：

T_h ——混凝土最大绝热温升(°C)；

m_c ——混凝土中水泥(包括膨胀剂)用量(kg/m³)；

F ——混凝土活性掺合料用量(kg/m³)；

- C ——混凝土比热，取 $0.97 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- ρ ——混凝土密度，取 $2400 (\text{ kg}/\text{m}^3)$ ；
- e ——为常数，取 2.718 ；
- T ——混凝土的龄期(d)；
- m ——系数，随浇筑温度改变，查表3-2。

表3-1 不同品种、强度等级水泥的水化热

水泥品种	水泥强度等级	水化热 Q ($\text{ kJ}/\text{kg}$)		
		3d	7d	28d
硅酸盐水泥	42.5	314	354	375
	32.5	250	271	334
矿渣水泥	32.5	180	256	334

表3-2 系数m

浇筑温度 (°C)	5	10	15	20	25	30
m(1/d)	0.295	0.318	0.340	0.362	0.384	0.406

2) 混凝土中心计算温度

$$T_{1(t)} = T_j + T_{h(t)} \cdot \xi_{(t)} \quad (3-3)$$

式中：

T_j ——混凝土浇筑温度(°C)；

$T_{1(t)}$ —— t 龄期混凝土中心计算温度(°C)；

$\xi_{(t)}$ —— t 龄期降温系数，查表3-3同时要
考虑混凝土的养护、模板、外加剂、
掺合料的影响。

表3-3 降温系数 ξ

浇筑层 厚度 (m)	龄期 t (d)									
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
1.0	0.36	0.29	0.17	0.09	0.05	0.03	0.01			
1.25	0.42	0.31	0.19	0.11	0.07	0.04	0.03			
1.50	0.49	0.46	0.38	0.29	0.21	0.15	0.12	0.08	0.05	0.04
2.50	0.65	0.62	0.57	0.48	0.38	0.29	0.23	0.19	0.16	0.15
3.00	0.68	0.67	0.63	0.57	0.45	0.36	0.30	0.25	0.21	0.19
4.00	0.74	0.73	0.72	0.65	0.55	0.46	0.37	0.30	0.25	0.24

3) 混凝土表层(表面下50~100mm处)温度

(1) 保温材料厚度(或蓄水养护深度)

$$\delta = 0.5hK_b \frac{\lambda_x(T_2 - T_q)}{\lambda(T_{\max} - T_2)} \quad (3-4)$$

式中:

δ ——保温材料厚度(m);

λ_x ——所选保温材料导热系数[W/(m·K)]查表3-4。

表3-4 几种保温材料导热系数

材料名称	密度 kg/m ³	导热系数 λ W/(m·K)	材料名称	密度 kg/m ³	导热系数 λ W/(m·K)
建筑钢材	7 800	58	矿棉, 岩棉	110~200	0.031~ 0.065
钢筋混凝土	2 400	2.33	沥青矿棉毡	100~160	0.033~ 0.052
水		0.58	泡沫塑料	20~50	0.035~ 0.047
木模板	500~700	0.23	膨胀珍珠岩	40~300	0.019~ 0.065
木屑		0.17	油毡		0.05
草袋	150	0.14	膨胀聚苯板	15~25	0.042
沥青蛭石板	350~400	0.081~ 0.105	空气		0.03
膨胀蛭石	80~200	0.047~ 0.07	泡沫混凝土		0.10

T_2 —— 混凝土表面温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_q —— 施工期大气平均温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

λ —— 混凝土导热系数, 取 $2.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

T_{\max} —— 计算的混凝土最高温度 ($^{\circ}\text{C}$) ; 计算时可取

$$T_2 - T_q = 15 \sim 20^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\max} - T_2 = 20 \sim 25^{\circ}\text{C};$$

K_b —— 传热系数修正值, 取 $1.3 \sim 2.0$, 查表3-5。

表3-5 传热系数修正值

	保温层种类	K_1	K_2
1	仅由容易透风的材料组成(如草袋、稻草板、锯末、砂子)	2.6	3.0
2	由易透风材料组成,但在混凝土面层上再铺一层不透风材料	2.0	2.3
3	在易透风保温材料上铺一层不透风材料	1.6	1.9
4	在易透风保温材料上下各铺一层不易透风材料	1.3	1.5
5	仅由不易透风材料组成(如油布、帆布、棉麻毡、胶合板)	1.3	1.5

K_1 值——一般刮风情况(风速小于4m/s)

K_2 值——刮大风情况。

(2) 如采用蓄水养护，蓄水养护深度。

$$h_w = \frac{xM(T_{\max} - T_2)K_b \lambda_w}{700T_j + 0.28m_c Q} \quad (3-5)$$

式中：

h_w ——养护水深度 (m)；

x ——混凝土维持到指定温度的延续时间，即蓄水养护时间 (h)；

M ——混凝土结构表面系数 (m^{-1})； $M = F / V$

F ——与大气接触的表面积 (m^2)；

V ——混凝土体积 (m^3)，

$T_{\max} - T_2$ ——般取 $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ；

K_b ——传热系数修正值；

700——折算系数 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ ；

λ_w ——水的导热系数，取 $0.58 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。

(3) 混凝土表面模板及保温层的传热系数。

$$\beta = \frac{1}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_q}} \quad (3-6)$$

式中：

β ——混凝土表面模板及保温层等的传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ；

δ_i ——各保温层材料厚度 (m) ;

λ_i ——各保温层材料导热系数 [W/(m·K)] ;

β_q ——空气层的传热系数, 取23 [W/(m²·K)]。

(4) 混凝土虚厚度。

$$h' = \frac{k\lambda}{\beta} \quad (3-7)$$

式中:

h' ——混凝土虚厚度 (m) ;

K ——折减系数, 取2/3;

λ ——混凝土导热系数, 取2.33 [W/(m·K)]

(5) 混凝土计算厚度。

$$H = h + 2h' \quad (3-8)$$

式中： H ——混凝土计算厚度 (m)；
 h ——混凝土实际厚度 (m)。

(6) 混凝土表层温度。

$$T_{2(t)} = T_q + \frac{4h'(H - h')[T_{1(t)} - T_q]}{H^2} \quad (3-9)$$

式中：

$T_{2(t)}$ ——混凝土表面温度 (°C)；

T_q ——施工期大气平均温度 (°C)；

h' —— 混凝土虚厚度 (m) ;

H —— 混凝土计算厚度 (m) ;

$T_{1(t)}$ —— 混凝土中心温度 (°C)

4) 混凝土内平均温度。

$$T_{m(t)} = \frac{T_{1(t)} + T_{2(t)}}{2} \quad (3-10)$$

2. 大体积混凝土温度应力计算

1) 地基约束系数

(1) 单纯地基阻力系数 C_{x1} (N/mm³), 查表3-6。

表3-6 单纯地基阻力系数 C_{x1} (N/mm³)

土质名称	承载力 (kN/m ²)	C_{x1} 推荐值
软黏土	80~150	0.01~0.03
砂质黏土	250~400	0.03~0.06
坚硬黏土	500~800	0.06~0.10
风化岩石和低强度素混凝土	5 000~10 000	0.60~1.00
C10以上配筋混凝土	5 000~10 000	1.00~1.50

(2) 桩的阻力系数。

$$C_{x2} = \frac{Q}{F} \quad (3-11)$$

C_{x2} —— 桩的阻力系数 (N/mm³) ;

Q —— 桩产生单位位移所需水平力 (N/mm) ;

当桩与结构铰接时
$$Q = 2EI \left(\frac{K_n D}{4EI} \right)^{3/4}$$

当桩与结构固接时
$$Q = 4EI \left(\frac{K_n D}{4EI} \right)^{3/4}$$

E —— 桩混凝土的弹性模量 (N/mm²) ;

I —— 桩的惯性矩 (mm⁴) ;

K_n —— 地基水平侧移刚度, 取 10^{-2} N/mm³

D —— 桩的直径或边长 (mm) ;

F —— 每根桩分担的地基面积 (mm²) 。

2) 大体积混凝土瞬时弹性模量

$$E_{(t)} = E_0 (1 - e^{-0.09t}) \quad (3-12)$$

式中：

$E_{(t)}$ —— t 龄期混凝土弹性模量 (N/mm^2)；

E_0 ——28d混凝土弹性模量 (N/mm^2)

e ——常数，取2.718；

t ——龄期 (d)。

3) 地基约束系数

$$\beta_{(t)} = \sqrt{\frac{(C_{x1} + C_{x2})}{h \cdot E_{(t)}}} \quad (3-13)$$

式中：

$\beta_{(t)}$ —— t 龄期地基约束系数 (mm^{-1})；

H ——混凝土实际厚度 (mm)；

C_{x1} ——单纯地基阻力系数 (N/mm^3)；

C_{x2} ——桩的阻力系数 (N/mm^3)；

$E_{(t)}$ —— t 龄期混凝土弹性模量 (N/mm^2)

4) 混凝土干缩率和收缩当量温差

混凝土干缩率

$$\varepsilon_{Y(t)} = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 M_2 \cdots M_{11} \quad (3-14)$$

式中： $\varepsilon_{Y(t)}$ —— t 龄期混凝土干缩率；

ε_Y^0 —— 标准状态下混凝土极限收缩值，取 3.24×10^{-4}

$M_1 M_2 \cdots M_{11}$ —— 各修正系数，查表3-7。

收缩当量温差

$$T_{Y(t)} = \frac{\varepsilon_{Y(t)}}{\alpha} \quad (3-15)$$

式中：

$T_{Y(t)}$ —— t 龄期混凝土收缩当量温差 ($^{\circ}\text{C}$)；

α —— 混凝土线性膨胀系数, 1×10^{-5} ($1/^{\circ}\text{C}$)。

5) 结构计算温差 (一般3d划分一区段)

$$\Delta T_i = T_{m(i)} - T_{m(i+3)} + T_{Y(i+3)} - T_{Y(i)} \quad (3-16)$$

式中：

ΔT_i —— i 区段结构计算温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

$T_{m(i)}$ —— i 区段平均温度起始值 ($^{\circ}\text{C}$)；

$T_{m(i+3)}$ —— i 区段平均温度终止值 ($^{\circ}\text{C}$)；

$T_{Y(i+3)}$ —— i 区段收缩当量温差终止值 ($^{\circ}\text{C}$)；

$T_{Y(i)}$ —— i 区段收缩当量温差起始值 ($^{\circ}\text{C}$)

6) 各区段拉应力

$$\sigma_i = \overline{E}_i \alpha \Delta T_i \overline{S}_i \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch}(\overline{\beta}_i L / 2)} \right] \quad (3-17)$$

式中：

σ_i —— i 区段混凝土内拉应力 (N/mm^2)；

\overline{E}_i —— i 区段平均弹性模量 (N/mm^2)；

\overline{S}_i —— i 区段平均应力松弛系数，查表3-8

表3-8 松弛系数 $S(t)$

龄期 t (d)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$S_{(t)}$	0.57	0.52	0.48	0.44	0.41	0.386	0.368	0.352	0.339	0.327

$\bar{\beta}_i$ —— i 区段平均地基约束系数；

L ——混凝土最大尺寸(mm)；

ch——双曲余弦函数。

到指定龄期混凝土内最大应力

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{(1-\nu)} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3-18)$$

7) 安全系数

$$K = \frac{f_t}{\sigma_{\max}}$$

式中： K ——大体积混凝土抗裂安全系数，应 ≥ 1.15 ；

f_t ——到指定龄期混凝土抗拉度设计值（ N/mm^2 ）。

3. 大体积混凝土平均整浇长度（伸缩缝间距）

1) 混凝土极限拉伸值

$$\varepsilon_p = 7.5 f_t \left(0.1 + \frac{\mu}{d} \right) 10^{-4} \frac{\ln t}{\ln 28} \quad (3-19)$$

式中：

ε_p ——混凝土极限拉伸值；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值 (N/mm^2)；

μ ——配筋率 (%)， $\mu = F_a / F_c$

d ——钢筋直径 (mm)；

\ln ——以e为底的对数；

t ——指定龄期 (d)；

F_a ——钢筋截面积 (m^2)；

F_c ——混凝土截面积 (m^2)。

2) 平均整浇长度(伸缩缝间距)

$$[L_{cp}] = 1.5 \sqrt{\frac{hE_{(t)}}{C_x}} \operatorname{arch} \left(\frac{|\alpha\Delta T|}{|\alpha\Delta T| - |\varepsilon_p|} \right) \quad (3-20)$$

式中:

$[L_{cp}]$ —— 平均整浇长度(伸缩缝间距)(mm);

h —— 混凝土厚度(mm);

$E_{(t)}$ —— 指定龄期的混凝土弹性模量(N/mm²);

C_x —— 地基阻力系数(N/mm³), $C_x = C_{x1} + C_{x2}$

arch —— 反双曲余弦函数;

ΔT —— 指定时刻的累计结构计算温差(°C)。

【例3.2】 现浇钢筋混凝土基础底板，厚度为0.8m，配置直径16带肋钢筋，配筋率0.35%，混凝土强度等级采用C30，地基为坚硬黏土，施工条件正常(材料符合质量标准、水灰比准确、机械振捣、混凝土养护良好)。试计算早期(15d)不出现贯穿性裂缝的允许间距。

解：考虑施工条件正常，由表3-7查得：

$$M_1, M_2, M_3, M_5, M_8, M_9 \text{ 均取 } 1, \quad M_4 = 1.42, M_6 = 0.93,$$

$$M_7 = 0.70, M_{10} = 0.42$$

混凝土经过15d的收缩变形(由式3-14)为

$$\begin{aligned}\varepsilon_{Y(15)} &= 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01 \times 15}) \times M_1 \times M_2 \times \cdots \times M_{11} \\ &= 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.15}) \times 1.42 \times 0.93 \times 0.70 \times 0.42 \\ &= 0.175 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

收缩当量温差：
$$T_{Y(15)} = \frac{\varepsilon_{y(15)}}{\alpha} = \frac{0.175 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-5}} = 1.75^\circ\text{C} \approx 2^\circ\text{C}$$

混凝土上、下面温升为 15°C ，由于时间短，养护较好，气温差忽略不计，混凝土的水化热温差经计算为 25°C ，则计算温差为 $\Delta T = 2 + 25 = 27^\circ\text{C}$

混凝土的极限拉伸，由式(3-19)代入，为

$$\begin{aligned}\varepsilon_p &= 7.5 f_t \left(0.1 + \frac{\mu}{d}\right) 10^{-4} \frac{\ln t}{\ln 28} \\ &= 7.5 \times 1.5 \left(0.1 + \frac{0.35}{16}\right) \times 0.813 \times 10^{-4} = 1.115 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

15d混凝土的弹性模量

$$E_{(15)} = 3.0 \times 10^4 \times (1 - e^{-0.09t}) = 3.0 \times 10^4 \times (1 - e^{-0.09 \times 15}) = 2.22 \times 10^4 \text{ MPa}$$

伸缩缝的最大允许间距由式(3-20)为

$$\begin{aligned}[L_{cp}] &= 1.5 \sqrt{\frac{hE_{(t)}}{C_x}} \operatorname{arch} \left(\frac{|\alpha \Delta T|}{|\alpha \Delta T| - |\varepsilon_p|} \right) \\ &= 1.5 \sqrt{\frac{800 \times 2.22 \times 10^4}{0.08}} \operatorname{arch} \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 27}{1.0 \times 10^{-5} \times 27 - 1.115 \times 10^{-4}} \\ &= 223.495 \times 10^2 \times 1.126 = 25\ 157 \text{ mm} \approx 26 \text{ m}\end{aligned}$$

由计算知，板的最大允许伸缩缝间距为26m。当板的纵向长度小于26m时，可以避免裂缝出现。否则则需在中部设置伸缩缝或“后浇缝”。当板下有桩基础时，计算阻力系数 C_x 时，应考虑桩基对基础底板的约束阻力。

【例3.3】 大型设备基础底板长90.8m、宽31.3m、厚2.5m，混凝土为C20，采用60d后期强度配合比，用32.5矿渣水泥，水泥用量 $m_c=280\text{kg}/\text{m}^3$ ，混凝土浇筑入模温度 $T_j=28^\circ\text{C}$ ，施工时平均气温为 25°C ，结构物周围用钢模板，在模板和混凝土上表面外包两层草袋保温，混凝土比热 $C=1.0\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 混凝土密度 $\rho = 2400\text{kg}/\text{m}^3$ 试计算总降温产生的最大温度拉应力及安全系数。

解 (1) 计算绝热温升值, 按式 $T_{h(t)} = \frac{m_c \cdot Q}{c \cdot \rho} (1 - e^{-mt})$

为简单计只计算3d、7d、28d的值。

$$T_{h(3)} = \frac{280 \times 180}{0.97 \times 2400} (1 - e^{-0.397 \times 3}) = 15.1^\circ\text{C},$$

$$T_{h(7)} = \frac{280 \times 256}{0.97 \times 2400} (1 - e^{-0.397 \times 7}) = 28.9^\circ\text{C}$$

$$T_{h(28)} = \frac{280 \times 334}{0.97 \times 2400} (1 - e^{-0.397 \times 28}) = 40.2^\circ\text{C}$$

(2) 混凝土中心温度计算, 按式 $T_{1(t)} = T_j + T_h \xi(t)$ 计算如下

$$T_{1(3)} = 28 + 15.1 \times 0.65 = 37.8^\circ\text{C}$$

$$T_{1(7)} = 28 + 28.9 \times 0.6 = 45.4^\circ\text{C}$$

$$T_{1(28)} = 28 + 40.2 \times 0.157 = 34.3^\circ\text{C}$$

(3) 混凝土表层温度。

两层草袋保温按6cm计，则保温层传热系数

$$\beta = \frac{1}{\sum \delta_i / \lambda_i + 1 / \beta_q} = \frac{1}{0.06 / 0.14 + 1 / 23} = 2.12$$

混凝土虚厚度

$$h' = \frac{k \cdot \lambda}{\beta} = \frac{2}{3} \times \frac{2.33}{2.12} = 0.734m$$

混凝土计算厚度

$$H = h + 2h' = 2.5 + 2 \times 0.734 = 4.0m$$

混凝土表层温度

$$\begin{aligned} T_{2(3)} &= T_q + \frac{4h'(H - h')[T_{1(3)} - T_q]}{H^2} \\ &= 25 + 4 \times 0.734 \times (4.0 - 0.734) \times (37.8 - 25) / 4.0^2 = 32.7^\circ C \end{aligned}$$

(4) 混凝土平均温度

$$T_{m(3)} = \frac{T_{1(3)} + T_{2(3)}}{2} = \frac{37.8 + 32.7}{2} = 35.2^\circ C$$

$$T_{m(7)} = 41.3^{\circ}\text{C} ; T_{m(3)} = 32.5^{\circ}\text{C}$$

(5) 混凝土干缩率和当量温差，按式

$$\varepsilon_{Y(t)} = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 \cdot M_2 \cdots M_{11}$$

则

$$\varepsilon_{Y(3)} = 0.1 \times 10^{-4} \quad T_{Y(3)} = 1^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon_{Y(7)} = 0.22 \times 10^{-4} \quad T_{Y(7)} = 2.2^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon_{Y(28)} = 0.79 \times 10^{-4} \quad T_{Y(28)} = 7.9^{\circ}\text{C}$$

(6) 结构计算温差，按式

$$\Delta T_i = T_{m(i)} - T_{m(i+3)} + T_{Y(i+3)} - T_{Y(i)}$$

$$\Delta T_1 = 28 - 35.2 + 1 = -6.2$$

$$\Delta T_2 = 35.2 - 41.3 + 2.2 - 1 = -4.9^\circ C$$

$$\Delta T_3 = 41.3 - 32.5 + 7.9 - 2.2 = 14.5^\circ C$$

(7) 计算各龄期的混凝土弹性模量，按式 $E_{(t)} = E_0 (1 - e^{-0.09t})$

$$E_{(3)} = 2.55 \times 10^4 \times (1 - e^{-0.09 \times 3}) = 0.603 \times 10^4 N / mm^2$$

$$E_{(7)} = 1.19 \times 10^4 N / mm^2$$

$$E_{(28)} = 2.34 \times 10^4 N / mm^2$$

(8) 地基约束系数，按式 $\beta_{(t)} = \sqrt{\frac{(C_{x1} + C_{x2})}{h \cdot E_{(t)}}}$ 取 $C_{x1} = 0.02$ 则

$$\beta_{(3)} = \sqrt{0.02 / 2500 \times 0.603 \times 10^4} = 3.65 \times 10^{-5} / mm$$

$$\beta_{(7)} = 2.59 \times 10^{-5} / mm$$

$$\beta_{(28)} = 1.85 \times 10^{-5} / mm$$

(9) 各区段拉应力, 按式 $\sigma_i = \overline{E}_i \alpha \Delta T_i \overline{S}_i \left[1 - \frac{1}{\text{ch}(\beta_i L / 2)} \right]$

各区段平均弹性模量

$$\overline{E}_1 = \frac{0 + 0.603 \times 10^4}{2} = 0.302 \times 10^4 N / mm^2$$

$$\overline{E}_2 = \frac{(1.19 + 0.603) \times 10^4}{2} = 0.897 \times 10^4 N / mm^2$$

$$\overline{E}_3 = \frac{(1.19 + 2.34) \times 10^4}{2} = 1.77 \times 10^4 N / mm^2$$

各区段平均应力松弛系数

$$\overline{s}_1 = \frac{1 + 0.57}{2} = 0.785$$

$$\overline{s}_2 = \frac{0.51 + 0.57}{2} = 0.54$$

$$\overline{s}_3 = \frac{0.335 + 0.51}{2} = 0.423$$

各区段平均地基约束系数

$$\overline{\beta}_1 = 3.65 \times 10^{-5} / mm$$

$$\overline{\beta}_2 = \frac{3.65 + 2.59}{2} \times 10^{-5} = 3.12 \times 10^{-5} / mm$$

$$\overline{\beta}_3 = \frac{1.85 + 2.59}{2} \times 10^{-5} = 2.22 \times 10^{-5} / mm$$

只计算拉应力

$$\begin{aligned}\sigma_3 &= 1.77 \times 10^4 \times 10^{-5} \times 14.5 \times 0.423 \times \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch}(90 \ 800 \times 2.22 \times 10^{-5} / 2)} \right] \\ &= 0.39 \text{ N / mm}^2\end{aligned}$$

(10) 混凝土内最大应力，按式 $\sigma_{\max} = \frac{1}{(1-\nu)} \sum_{i=1}^n \sigma_i$

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{1-0.15} \times 0.39 = 0.46 \text{ N / mm}^2$$

混凝土抗拉强度设计值取 1.1 N/mm^2 ，则安全系数

$$K = \frac{f_t}{\sigma_{\max}} = 1.1 / 0.46 = 2.4 > 1.15$$

满足抗裂条件，故知不会出现裂缝。

大型设备基础底板长 60m、宽 60m、厚 2m，混凝土为 C20，采用 32.5 普通硅酸盐水泥，水泥用量 $m_c = 300\text{kg}/\text{m}^3$ ，混凝土浇筑温度 $T_j = 30^\circ\text{C}$ ，施工时平均气温为 25°C ，结构物周围用钢模板，在模板和混凝土上表面外包两层草袋（共计 60mm）保温，混凝土比热 $C = 1.0\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，混凝土密度 $\rho = 2400\text{kg}/\text{m}^3$ 。修正系数 $M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdots M_{10} = 1.8$ 。试计算 0~3 天的计算温差 $\Delta T_{0,3}$ 。

(1) 绝热温升

$$T_{h(t)} = \frac{m_c Q}{c \rho} (1 - e^{-mt})$$

查表得 $Q_{(3)} = 250\text{kJ}/\text{kg}$ $m = 0.406$

$$T_{h(3)} = 22.01^\circ\text{C}$$

(2) 中心温度

$$T_{1(t)} = T_j + T_{h(t)} \cdot \xi(t)$$

查表得 $\xi = \frac{0.49 + 0.65}{2} = 0.57$

$$T_{1(3)} = 42.54^{\circ}\text{C}$$

(3) 表面温度

查表得草袋的导热系数为

$$\lambda = 0.14\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$\beta = \frac{1}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_q}} = 2.12$$

混凝土虚厚度

$$h' = k \frac{\lambda}{\beta} = 0.733\text{m}$$

混凝土计算厚度

$$H = h + 2h' = 3.47\text{m}$$

混凝土表面温度

$$T_{2(t)} = T_q + 4(T_{1(t)} - T_q) \frac{h'(H - h')}{H^2}$$

$$T_{2(3)} = 36.70^\circ\text{C}$$

(4) 平均温度

$$T_{m(3)} = \frac{42.54 + 36.70}{2} = 39.62^\circ\text{C}$$

(5) 收缩当量温差

$$\varepsilon_{Y(t)} = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdots M_{10}$$

$$\varepsilon_{Y(3)} = 1.72 \times 10^{-5}$$

$$T_{Y(3)} = 1.72^\circ\text{C}$$

(6) 结构计算温差

$$\Delta T_{i \sim i+3} = T_{m(i)} - T_{m(i+3)} + T_{Y(i+3)} - T_{Y(i)}$$

$$\Delta T_{0 \sim 3} = 30 - 39.62 + 1.72 - 0 = -7.9^{\circ}\text{C}$$

大体积混凝土基础底板，厚度为2.5m，在3d混凝土内部中心温度 52°C ，实测混凝土表面温度为 25°C ，大气温度为 15°C ，混凝土导热系数为 $2.3\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ，试求表面所需保温材料的厚度。