

11 大体积混凝土工程

11.1 混凝土温度变形值计算

在温度变化时,混凝土(砖砌体)结构的伸长或缩短的变形值与长度、温差成正比例关系,与材料的性质有关,可按下式计算:

$$\Delta L = L (t_2 - t_1) \alpha \quad (11-1)$$

式中 ΔL ——随温度变化而伸长或缩短的变形值 (mm);

L ——结构长度 (mm);

$t_1 - t_2$ ——温度差 (°C);

α ——材料的线膨胀系数,混凝土为 1.0×10^{-5} ; 钢材为 12×10^{-6} ; 砖砌体为 0.5×10^{-5} 。

【例 11-1】 现浇混凝土底板,长 45m,已知温差为 25°C,试求其温度产生的变形值。

【解】 温度变形值由式 (11-1) 得:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L(t_2 - t_1)\alpha = 45000 \times 25 \times 1.0 \times 10^{-5} \\ &= 11.25\text{mm} \approx 11.3\text{mm} \end{aligned}$$

故该底板的温度变形值为 11.3mm。

11.2 混凝土和钢筋混凝土极限拉伸计算

混凝土和钢筋混凝土的极限拉伸是指这种材料的最终相对拉伸变形。混凝土和钢筋混凝土的抗拉能力,很大程度取决于混凝土极限拉伸。混凝土的极限拉伸为 1.0×10^{-4} ,一般在 $(0.7 \sim 1.6) \times 10^{-4}$ 。混凝土的极限拉伸与配筋有关,工程实践证明,适当、合理的配筋(例如配筋细而密),可以提高混凝土的极限拉伸和抗裂性,钢筋混凝土不考虑徐变影响的极限拉伸值,可按以下经验公式计算:

$$\epsilon_{pa} = 0.5 f_t \left(1 + \frac{\rho}{d} \right) \times 10^{-4} \quad (11-2)$$

式中 ϵ_{pa} ——钢筋混凝土的极限拉伸;

f_t ——混凝土的抗拉设计强度 (N/mm²);

ρ ——截面配筋率 $\rho \times 100$,例如配筋率为 0.2%,则 $\rho = 0.2$;

d ——钢筋直径 (cm)。

【例 11-2】 钢筋混凝土筏式底板采用混凝土强度等级为 C25, $f_t = 1.3 \text{ N/mm}^2$, 配筋率 $\rho = 0.35$, 采用钢筋直径 $d = 16 \text{ mm}$, 试求钢筋混凝土底板的极限拉伸值。

【解】 底板的极限拉伸值由式 (11-2) 得:

$$\begin{aligned}\epsilon_{pa} &= 0.5 f_t \left(1 + \frac{\rho}{d} \right) \times 10^{-4} = 0.5 \times 1.3 \left(1 + \frac{0.35}{1.6} \right) \times 10^{-4} \\ &= 0.79 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

故钢筋混凝土筏式底板的极限拉伸值为 0.79×10^{-4} 。

11.3 混凝土热工性能计算

11.3.1 混凝土导热系数计算

混凝土导热系数指在单位时间内, 热流通过单位面积和单位厚度混凝土介质时混凝土介质两侧为单位温差时热量的传导率。它是反映混凝土传导热量难易程度的一种系数。导热系数以下式表示:

$$\lambda = \frac{Q\delta}{(T_1 - T_2) A\tau} \quad (11-3)$$

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

Q ——通过混凝土厚度为 δ 的热量 (J);

δ ——混凝土厚度 (m);

$T_1 - T_2$ ——温度差 ($^{\circ}\text{C}$);

A ——面积 (m^2);

τ ——时间 (h)。

当 $T_1 - T_2 = 1^{\circ}\text{C}$, $A = 1 \text{ m}^2$, $\tau = 1 \text{ h}$, $\delta = 1 \text{ m}$ 时, 则 $\lambda = Q$ ($1.16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)

上式 (11-3) 中导热系数要通过试验求得。但它决定于水泥、粗细骨料及水本身的热工性能, 如已知混凝土各组成材料的重量百分比, 并利用已知材料的热工性能表, 混凝土的导热系数亦可以加权平均法由下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{p} (p_c \lambda_c + p_s \lambda_s + p_g \lambda_g + p_w \lambda_w) \quad (11-4)$$

式中 λ 、 λ_c 、 λ_s 、 λ_g 、 λ_w ——分别为混凝土、水泥、砂、石子、水的导热系数 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$);

p 、 p_c 、 p_s 、 p_g 、 p_w ——分别为混凝土、水泥、砂、石子、水的每立方米混凝土所占的百分比 (%)。

影响导热系数的主要因素是骨料的用量, 骨料本身的热工性能、混凝土的温度及其含水量。密度小的轻混凝土和泡沫混凝土的导热系数小。含水量大的混凝土比含水量小的混凝土导热系数大 (表 11-1)。

不同含水状态混凝土的导热系数

表 11-1

含水量 (体积%)	0	2	4	8
λ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	1.28	1.86	2.04	2.33

一般普通混凝土的导热系数 $\lambda = 2.33 \sim 3.49 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; 轻混凝土的导热系数 $\lambda = 0.47 \sim 0.70 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

【例 11-3】 已知混凝土的配合比及有关材料的热工性能如表 11-2, 试求混凝土的导热系数。

混凝土配合比及有关材料热工性能					表 11-2	
混凝土组成材料	水	泥	砂	石	水	总 计
重量比 (kg)	275		834	1106	185	2400
百分比 (%)	11.46		34.75	46.08	7.71	100
材料导热系数 λ (W/m·K)	2.218		3.082	2.908	0.600	
比热 C (kJ/kg·K)	0.536		0.745	0.708	4.187	

【解】 由式 (11-4) 混凝土的导热系数为:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{1}{p} (p_c \lambda_c + p_s \lambda_s + p_g \lambda_g + p_w \lambda_w) \\ &= \frac{1}{100} (11.46 \times 2.218 + 34.75 \times 3.082 + 46.08 \times 2.908 + 7.71 \times 0.600) \\ &= 2.71 \text{ W/m} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

故混凝土的导热系数为 $2.71 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

11.3.2 混凝土比热计算

单位重量的混凝土, 其温度升高 1°C 所需的热量称为混凝土的比热, 其单位是 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。已知混凝土各组成材料的重量百分比, 混凝土的比热可由下式计算:

$$C = \frac{1}{p} (p_c C_c + p_s C_s + p_g C_g + p_w C_w) \quad (11-5)$$

式中 C 、 C_c 、 C_s 、 C_g 、 C_w ——分别为混凝土、水泥、砂、石子、水的比热 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$);

其他符号意义同前。

影响混凝土比热的因素主要是骨料的数量和温度的高低, 而骨料的矿物成分对比热影响很小。

混凝土的比热一般在 $0.84 \sim 1.05 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 范围内。

【例 11-4】 条件同例 11-3, 试求混凝土的比热。

【解】 由式 (11-5) 混凝土的比热为:

$$\begin{aligned}C &= \frac{1}{p} (p_c C_c + p_s C_s + p_g C_g + p_w C_w) \\ &= \frac{1}{100} (11.46 \times 0.536 + 34.75 \times 0.745 + 46.08 \times 0.708 + 7.71 \times 4.18) \\ &= 0.97 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

故, 混凝土的比热为 $0.97 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

11.3.3 混凝土热扩散系数计算

混凝土的热扩散系数 (又称导温系数) 是反映混凝土在单位时间内热量扩散的一项综

合指标。热扩散系数愈大,愈有利于热量的扩散。混凝土的热扩散系数一般通过试验求得,或按下式计算:

$$a = \frac{\lambda}{C\rho} \quad (11-6)$$

式中 a ——混凝土导温系数 (m^2/h);

λ ——混凝土的导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$);

C ——混凝土的比热 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$);

ρ ——混凝土的密度 (容重) (kg/m^3), 随骨料的比重、级配、石子粒径、含气量、混凝土配合比以及干湿程度等因素而变化, 其中影响最大的为骨料的性质。普通混凝土的密度约在 $2300 \sim 2450 \text{kg}/\text{m}^3$ 之间, 钢筋混凝土约在 $2450 \sim 2500 \text{kg}/\text{m}^3$ 之间; 新拌混凝土的密度经验值参见表 11-3。

新拌混凝土密度的经验数值

表 11-3

石子最大粒径 (mm)	10	20	25	40	50	80
普通混凝土 (kg/m^3)	2330	2370	2380	2400	2410	2430

影响导温系数的因素有骨料的种类和用量, 骨料密度小或用量多, 导温系数将加大。混凝土的导温系数一般在 $0.56 \times 10^{-6} \sim 1.68 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 之间。

【例 11-5】 条件同例 11-3, 试求混凝土的导温系数。

【解】 由式 (11-6) 混凝土的导温系数为:

$$\begin{aligned} &= \frac{\lambda}{C\rho} = \frac{2.71}{0.97 \times 2400} \\ &= 0.00116 \text{W} \cdot \text{m}^2/\text{kJ} = 1.16 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

11.3.4 混凝土热膨胀系数计算

混凝土的热膨胀系数系指线膨胀系数。混凝土线膨胀系数为单位温度变化导致混凝土单位长度的变化。混凝土的体积随着温度的变化而热胀冷缩。混凝土的体积膨胀率为其线膨胀系数的三倍。

混凝土的热膨胀系数亦可以按各组成材料的热膨胀系数加权平均值按下式计算:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_p E_p V_p + \alpha_s E_s V_s + \alpha_g E_g V_g}{E_p V_p + E_s V_s + E_g V_g} \quad (11-7)$$

式中 α_c ——混凝土的线膨胀系数;

α_p ——水泥石的线膨胀系数;

α_s ——砂的线膨胀系数;

α_g ——石子的线膨胀系数;

E_p ——水泥石的弹性模量;

E_s ——砂的弹性模量;

E_g ——石子的弹性模量;

V_p ——混凝土中水泥石的体积比;

V_s ——混凝土中砂的体积比 $V_s = 1 - V_p - V_g$;

V_g ——混凝土中石子的体积比 $V_g = 1 - V_p - V_s$ 。

水的膨胀系数约为 $210 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，高于水泥石的热膨胀系数十多倍，所以水泥石的线膨胀系数取决于它本身的含水量，变动范围在 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。一般取砂和石子相同的线膨胀系数，统称骨料的膨胀系数，变动范围在 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。

混凝土的热膨胀系数主要随粗骨料的性质和用量而变化，而与含水程度关系不大，烘干的和含饱和水的混凝土似乎有相等的热膨胀系数。

普通混凝土的热膨胀系数大约为 $(6 \sim 13) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，一般平均值为 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

混凝土常用骨料的热工性能见表 11-4。

各种混凝土的热工性能见表 11-5。

各种骨料的热工性能 (温度 20°C)

表 11-4

骨料种类	相对密度	导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	比热 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	热扩散系数 ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	热膨胀系数 ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
石英	2.635	5.175	0.733	2.70	10.2~13.4
花岗岩	—	291~3.08	0.716~0.787	—	5.5~8.5
白云岩	—	4.12~4.30	0.804~0.837	—	6~10
石灰岩	2.67~2.70	2.66~3.23	0.749~0.846	1.28~1.43	3.64~6.0
长石	2.555	2.33	0.812	1.13	0.88~16.7
大理石	2.704	2.45	0.875	1.05	4.41
玄武岩	2.695	1.71	0.766~0.854	0.75	5~75
砂岩	—	—	0.712	—	10~12

注：水的热膨胀系数为 $210 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

各种混凝土的热工性能

表 11-5

种类	骨 料		质量密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/m·K)	比热 (kJ/kg·K)	热扩散系数 (10 ⁻⁶ /℃)	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ m ² /s)	温度 范围
	细骨料	粗骨料						
重混凝土	磁铁矿		4020	2.44~3.02	0.75~0.84	0.784~1.036	8.9	≈300℃
	赤铁矿		3860	3.26~4.65	0.80~0.84	1.092~1.512	7.6	
	重晶石		3640	1.16~1.40	0.54~0.59	0.588~0.756	16.4	
普通 混凝土	—	石英岩	2430	3.49~3.61	0.88~0.96	1.568~1.736	12~15	10℃~30℃
	—	白云岩	2450	3.14~3.26	0.92~1.00	1.344~1.428	5.8~7.7	
	—	白云岩	2500	3.26~3.37	0.96~1.00	1.33~1.42	—	
	—	花岗岩	2420	2.56	0.92~0.96	—	8.1~9.1	
	—	流纹岩	2340	2.09	0.92~0.96	0.9242	—	
	—	玄武岩	2510	2.09	0.96	0.868~0.896	7.6~10.4	
	河砂	石	2300	2.09	0.92	0.70	—	
轻混凝土	河砂	轻石	600~1900	0.63~0.79	—	0.392~0.524	—	—
	轻砂	轻石	900~1600	0.50	—	0.364	7~12	
泡沫 混凝土	水泥—硅质系		500~800	0.22~0.24	—	0.252	8	—
	石灰—硅质系						7~14	

11.4 混凝土拌和温度和浇筑温度计算

11.4.1 混凝土拌和温度计算

混凝土的拌和温度, 又称出机温度, 计算方法有多种, 以下简介两种常用简便计算方法。

一、计算法

本法基本原理是: 设混凝土拌合物的热量系由各种原材料所供给, 拌和前混凝土原材料的总热量与拌和后流态混凝土的总热量相等, 从而混凝土拌和温度可按下式计算:

$$T_0 = \frac{C_s T_s m_s + C_g T_g m_g + C_c T_c m_c + C_w T_w m_w + C_w T_s w_s + C_w T_g w_g}{m_s + m_g + m_c + m_w + w_s + w_g} \quad (11-8)$$

式中 T_0 ——混凝土的拌和温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_s 、 T_g ——砂、石子的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_c 、 T_w ——水泥、拌和用水的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

m_c 、 m_s 、 m_g ——水泥、扣除含水量的砂及石子的重量 (kg);

m_w 、 w_s 、 w_g ——水及砂、石子中游离水的重量 (kg);

C_c 、 C_s 、 C_g 、 C_w ——水泥、砂、石子及水的比热容 (kJ/kg·K)。

上式若取 $C_s = C_g = C_c = 0.84 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $C_w = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 则化简得

$$T_0 = \frac{0.22 (T_s m_s + T_g m_g + T_c m_c) + T_w m_w + T_s w_s + T_g w_g}{0.22 (m_s + m_g + m_c) + m_w + w_s + w_g} \quad (11-9)$$

二、表格计算法

本法原理和假定同计算法, 其基本关系式可用下式表达:

$$T_0 \Sigma mC = \Sigma T_i mC \quad (11-10)$$

则

$$T_0 = \frac{\Sigma T_i mC}{\Sigma mC} \quad (11-11)$$

式中 T_0 ——混凝土的拌和温度 ($^{\circ}\text{C}$);

m ——各种材料的重量 (kg);

C ——各种材料的比热 (kJ/kg·K);

T_i ——各种材料的初始温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

式 (11-10) 等式的右侧, 是按各种原材料分别计算, 原材料用量可根据试验室提供的施工混凝土配合比; 材料温度可按实测资料或根据施工时的气温预估, 然后相加, 再按式 (11-11) 即可得出混凝土的拌和温度。为便于计算和检查, 可制成表格, 如本节例 11-7。

【例 11-6】 基础混凝土配合比为: 水泥 $m_c = 300 \text{ kg}$, 砂 $m_s = 626 \text{ kg}$, 石子 $m_g = 1270 \text{ kg}$, 水 $m_w = 180 \text{ kg}$, 砂含水量 $w_s = 5\%$, 石子含水量 $w_g = 1\%$, 经现场测试水泥和水的温度 $T_c = T_w = 25^{\circ}$, 砂的温度 $T_s = 30^{\circ}\text{C}$, 石子的温度 $T_g = 28^{\circ}\text{C}$, 已知水泥、砂、石子的比热 $C_c = C_s = C_g = 0.84 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的比热 $C_w = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 试求搅拌后混凝土拌

合物的温度。

【解】 砂中含水重量 $w_s = 626 \times 5\% = 31\text{kg}$

石子中含水重量 $w_g = 1270 \times 1\% = 13\text{kg}$

扣除砂、石子中含水量后应加水重 $m_w = 180 - 31 - 13 = 136\text{kg}$

根据已知条件, 混凝土的拌和温度由式 (11-9) 得:

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{0.22(T_s m_s + T_g m_g + T_c m_c) + T_w m_w + T_s w_s + T_g w_g}{0.22(m_s + m_g + m_c) + m_w + w_s + w_g} \\ &= \frac{0.22(30 \times 626 + 28 \times 1270 + 300 \times 25) + 25 \times 136 + 30 \times 31 + 28 \times 13}{0.22(626 + 1270 + 300) + 136 + 31 + 13} \\ &= \frac{18298.8}{663.12} = 27.6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

故知搅拌后混凝土的拌和温度为 27.6°C

【例 11-7】 条件同例 11-6, 试用表格计算法求搅拌后混凝土拌合物的温度。

【解】 将例 11-6 中有关数据制成表格形式列入表 11-6 中。

混凝土拌和温度计算表

表 11-6

材料名称	重量 m (kg) (1)	比热 C (kJ/kg·K) (2)	热当量 W_c (kJ/°C) (3) = (1) × (2)	温度 T_i (°C) (4)	热量 $T_i m C$ (kJ) (5) = (3) × (4)
水泥	300	0.84	252	25	6300
砂子	626	0.84	526	30	15780
石子	1270	0.84	1067	28	29876
砂中含水量 5%	31	4.2	130	25	3250
石中含水量 1%	13	4.2	55	25	1375
拌和水	136	4.2	571	25	14275
合 计	2376		2601		70856

注: 1. 表中配合比取自试验室提供实际资料。

2. 砂、石子的重量是扣除游离水分后的净重。

由表算结果再由式 (11-11) 可得出混凝土拌和温度为:

$$T_0 = \frac{\sum T_i m C}{\sum m C} = \frac{(5)}{(3)} = \frac{70856}{2601} = 27.3^\circ\text{C}$$

故知搅拌后混凝土的拌和温度为 27.3°C , 与算法相比相差仅 1%, 但较清楚易懂。

11.4.2 混凝土加冰拌和温度计算

在大体积混凝土施工中, 为了降低混凝土的浇筑入模温度和混凝土的最高温度, 减小内外温差, 控制降温温度收缩裂缝的出现, 常常采取将一部分拌和水以冰屑代替, 由于冰屑融解时要吸收 335kJ/kg 的潜热 (隔解热), 从而可降低混凝土的拌和温度, 此时可由下式计算:

$$T_0 = \frac{0.22(T_s m_s + T_g m_g + T_c m_c) + T_s w_s + T_g w_g + (1-P) T_w m_w - 80 P m_w}{0.22(m_s + m_g + m_c) + m_w + w_s + w_g} \quad (11-12a)$$

式中 P ——加冰率, 实际加水量的 %;

其他符号意义同前。

现以例 11-7、表 11-6 为例, 则式 (11-12a) 可改写为

$$T_0 = 0.257T_s + 0.439T_g + 0.099T_c + 0.204(1-P)T_w - 16.35P \quad (11-12b)$$

由上式 (11-12b) 分析可知, 在混凝土组成各种原材料中, 对混凝土拌和温度影响最大的是石子的温度, 其次是砂和水的温度, 水泥的温度影响最小, 因此, 降低混凝土拌和温度最有效的办法是降低石子的温度, 石子的温度每降低 1°C , 混凝土拌和温度约可降低 $0.4\sim 0.6^\circ\text{C}$ 。同时由式 (11-12b) 知, 在混凝土拌合水中以部分冰屑代替, 可有效降低混凝土的拌合温度, 根据国内外经验加冰率一般控制在 $25\%\sim 75\%$ 之间。

【例 11-8】 条件同例 11-7, 在拌和水中分别加入 25% 、 5% 和 75% 的冰屑, 试计算不加冰和加冰屑后混凝土的拌和温度。

【解】 由式 (11-12b) 不加冰 ($P=0$) 的混凝土拌和温度为:

$$\begin{aligned} T_0 &= 0.257T_s + 0.439T_g + 0.099T_c + 0.204(1-P)T_w - 16.35P \\ &= 0.257 \times 30 + 0.439 \times 28 + 0.099 \times 25 + 0.204(1-0) \times 25 - 16.35 \times 0 \\ &= 22.48 + 5.10 - 0 = 27.6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

当加冰率 $P=25\%$ 时:

$$\begin{aligned} T_0 &= 22.48 + 0.204(1-0.25) \times 25 - 16.35 \times 0.25 \\ &= 22.2^\circ\text{C} \end{aligned}$$

当加冰率 $P=50\%$ 时,

$$\begin{aligned} T_0 &= 22.48 + 0.204(1-0.50) \times 25 - 16.35 \times 0.50 \\ &= 16.9^\circ\text{C} \end{aligned}$$

当加冰率 $P=75\%$ 时:

$$\begin{aligned} T_0 &= 22.48 + 0.204(1-0.75) \times 25 - 16.35 \times 0.75 \\ &= 11.5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

由以上计算知, 混凝土拌和水中分别以 25% 、 50% 和 75% 的冰屑代替, 可降低混凝土拌和温度分别为 5.4°C 、 10.7°C 和 16.1°C 。

混凝土拌和水中加冰量亦可根据需要降低水温按下式计算:

$$X = \frac{(T_{w0} - T_w) \times 1000}{80 + T_w} \quad (11-13)$$

式中 X ——每吨水需加冰量 (kg);

T_{w0} ——加冰前水的温度 ($^\circ\text{C}$);

T_w ——加冰后水的温度 ($^\circ\text{C}$);

例如已知水温为 15°C , 需降低水温至 5°C , 则每吨水需加冰量为:

$$X = \frac{(15^\circ - 5^\circ) \times 1000}{80 + 5} = 117.6 \text{ kg/m}^3$$

11.4.3 混凝土浇筑温度计算

混凝土拌和出机后, 经运输平仓振捣等过程后的温度称为浇筑温度。混凝土浇筑温度受外界气温的影响, 当在夏季浇筑, 外界气温高于拌和温度, 浇筑后就比拌和温度为高, 如在冬季浇筑, 则恰相反, 这种冷量 (或热量) 的损失, 随混凝土运输工具类型、运输时

间、运转时间、运转次数及平仓、振捣的时间而变化, 根据实践, 混凝土的浇筑温度一般可按下式计算:

$$T_P = T_0 + (T_a - T_0) (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \cdots + \theta_n) \quad (11-14)$$

式中 T_P ——混凝土的浇筑温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 ——混凝土的拌和温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_a ——混凝土运输和浇筑时的室外气温 ($^{\circ}\text{C}$);

θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ... θ_n ——温度损失系数, 按以下规定取用:

(1) 混凝土装卸和运转, 每次 $\theta = 0.032$;

(2) 混凝土运输时, $\theta = At$, t 为运输时间 (min), A 如表 11-7 所列;

(3) 浇筑过程中, $\theta = 0.003t$, t 为浇筑时间 (min)。

混凝土运输时冷量 (或热量) 损失计算 A 值

表 11-7

项 次	运 输 工 具	混凝土容积 (m^3)	A
1	搅拌运输车	6.0	0.0042
2	自卸汽车 (开敞式)	1.0	0.0040
3	自卸汽车 (开敞式)	1.4	0.0037
4	自卸汽车 (开敞式)	2.0	0.0030
5	自卸汽车 (封闭式)	2.0	0.0017
6	长方形吊斗	0.3	0.0022
7	长方形吊斗	1.6	0.0013
8	圆柱形吊斗	1.6	0.0009
9	双轮手推车 (保温、加盖)	0.15	0.0070
10	双轮手推车 (本身不保温)	0.75	0.0100

【例 11-9】 夏季浇筑大体积筏板式基础, 混凝土原材料经预冷后, 混凝土拌和温度 $T_0 = 15^{\circ}\text{C}$, 气温 $T_a = 29^{\circ}\text{C}$, 装卸和运转 3min, 用开敞式自卸翻斗汽车运输 12min, 用吊车起吊容积 1.6m^3 长方形吊斗下料 10min, 平仓、振捣至混凝土浇筑完毕共 60min, 试求混凝土最后浇筑温度。

【解】 先求出各项温度损失系数值:

1. 装料、转运、卸料 $\theta_1 = 0.032 \times 3 = 0.096$

2. 自卸汽车运输 $\theta_2 = 0.0030 \times 12 = 0.0036$

3. 起吊方形吊斗下料 $\theta_3 = 0.0013 \times 10 = 0.013$

4. 平仓振捣混凝土 $\theta_4 = 0.003 \times 60 = 0.180$

$$\sum_{i=1}^4 \theta_i = 0.096 + 0.0036 + 0.013 + 0.180 = 0.293$$

故 $T_0 = 15 + (29 - 15) \times 0.293 = 19.1^{\circ}\text{C}$

如不计入第 4 项平仓、振捣时间

$$\sum_{i=1}^3 \theta_i = 0.096 + 0.0036 = 0.100 = 0.113$$

此时 $T_0 = 15 + (29 - 15) \times 0.113 = 16.6^{\circ}\text{C}$

11.5 混凝土水化热温升值计算

11.5.1 混凝土水化热绝热温升值计算

水泥水化过程中,放出的热量称为水化热。当结构截面尺寸小,热量散失快,水化热可不考虑。但对大体积混凝土,混凝土在凝固过程中聚积在内部热量散失很慢,常使温度峰值很高。而当混凝土内部冷却时就会收缩,从而在混凝土内部产生拉应力。假若超过混凝土的极限抗拉强度时,就可能在内部裂缝,而这些内部裂缝又可能与表面干缩裂缝联通,从而造成渗漏甚至破坏,所以对大体积混凝土的水化热问题应给予高度重视。

假定结构物四周没有任何散热和热损失条件,水泥水化热全部转化成温升后的温度值,则混凝土的水化热绝对温升值一般可按下式计算:

$$T_{(t)} = \frac{m_c Q}{C\rho} (1 - e^{-mt}) \quad (11-15)$$

$$T_{\max} = \frac{m_c Q}{C\rho} \quad (11-16)$$

式中 $T_{(t)}$ ——浇完一段时间 t , 混凝土的绝热温升值 ($^{\circ}\text{C}$);

m_c ——每立方米混凝土水泥用量 (kg/m^3);

Q ——每千克水泥水化热量 (J/kg), 可查表 11-8 求得;

每千克水泥水化热量 Q

表 11-8

品 种	水化热量 Q (J/kg)				
	225 号	275 号	325 号	425 号	525 号
普通硅酸盐水泥	201	243	289	377	461
矿渣硅酸盐水泥	188	205	247	335	

注: 火山灰水泥、粉煤灰硅酸盐水泥的发热量可参照矿渣硅酸盐水泥的数值。

C ——混凝土的比热在 $0.84 \sim 1.05 \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 之间, 一般取 $0.96 \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$;

ρ ——混凝土的质量密度, 取 $2400 \text{kg}/\text{m}^3$;

e ——常数 e 为 2.718;

t ——龄期 (d);

m ——与水泥品种比表面、浇捣时温度有关的经验系数, 由表 11-9 查得, 一般取 $0.2 \sim 0.4$;

T_{\max} ——混凝土最大水化热温升值, 即最终温升值。

计算水化热温升时的 m 值

表 11-9

浇筑温度 ($^{\circ}\text{C}$)	5	10	15	20	25	30
m ($1/\text{d}$)	0.295	0.318	0.340	0.362	0.384	0.406

为计算方便 e^{-mt} 及 $1 - e^{-mt}$ 值列于表 11-10 中, 可供查用。

$$\frac{1 - e^{-mt}}{e^{-mt}} \text{ 值}$$

表 11-10

浇筑 温度 (℃)	(m)	龄 期 (d)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0.295	0.256	0.446	0.587	0.693	0.771	0.830	0.873	0.906	0.930
		0.7445	0.554	0.4127	0.3073	0.2288	0.1703	0.1268	0.0944	0.0703
10	0.318	0.272	0.471	0.615	0.720	0.796	0.852	0.8920	0.921	0.943
		0.7276	0.5294	0.3852	0.2803	0.2039	0.1484	0.1080	0.0786	0.0572
15	0.340	0.288	0.493	0.639	0.743	0.817	0.870	0.907	0.934	0.953
		0.7118	0.5066	0.3606	0.2567	0.1827	0.1300	0.0926	0.0654	0.0469
20	0.362	0.304	0.515	0.662	0.765	0.836	0.886	0.921	0.945	0.962
		0.6963	0.4848	0.3376	0.2350	0.1637	0.1140	0.0793	0.0552	0.0385
25	0.384	0.319	0.536	0.684	0.785	0.853	0.900	0.932	0.954	0.968
		0.6811	0.4639	0.3160	0.2152	0.1466	0.0999	0.0680	0.0463	0.0316
30	0.406	0.334	0.556	0.704	0.803	0.869	0.913	0.942	0.961	0.974
		0.6663	0.4440	0.2958	0.1971	0.1313	0.0875	0.0583	0.0389	0.0259
浇筑 温度 (℃)	(m)	龄 期 (d)								
		10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	0.295	0.948	0.961	0.971	0.978	0.984	0.988	0.991	0.993	0.995
		0.0523	0.0390	0.0290	0.0216	0.0161	0.0120	0.0089	0.0066	0.0049
10	0.318	0.958	0.970	0.978	0.984	0.988	0.992	0.994	0.996	0.997
		0.0416	0.0303	0.0220	0.0160	0.0117	0.0085	0.0062	0.0045	0.0033
15	0.340	0.967	0.976	0.983	0.988	0.991	0.994	0.996	0.997	0.998
		0.0334	0.0238	0.0169	0.0120	0.0086	0.0061	0.0043	0.0031	0.0022
20	0.362	0.973	0.981	0.987	0.991	0.994	0.996	0.997	0.998	0.999
		0.0268	0.0187	0.0130	0.0090	0.0063	0.0044	0.0031	0.0021	0.0015
25	0.384	0.979	0.985	0.990	0.993	0.995	0.997	0.998	0.999	0.999
		0.0215	0.0146	0.0100	0.0068	0.0046	0.0032	0.0022	0.0015	0.0010
30	0.406	0.983	0.989	0.992	0.995	0.997	0.998	0.999	0.999	0.999
		0.0173	0.0115	0.0077	0.0051	0.0034	0.0023	0.0015	0.0010	

注：表中分母为 e^{-mt} 值；分子为 $1 - e^{-mt}$ 值。

11.5.2 混凝土水化热调整温升值计算

式 (11-15) 计算的水化热温度为绝热状态下的混凝土温升值，实际大体积混凝土并非完全处于绝热状态，而是处于散热条件下，上下表面一维散热，温升值比按绝热状态计算的要小；再不同浇筑块厚度与混凝土的绝热温升亦有密切关系，混凝土块厚度愈小，散热愈快，水化热温升值低，反之混凝土块厚度愈大，散热亦愈慢，当浇筑混凝土块厚度在 5m 以上，混凝土实际温升已接近于绝热温升。根据大量测试资料，不同浇筑块厚度与混凝土最终绝热温升的关系 ζ 如表 11-11 所示；不同龄期混凝土水化热温升曲线与浇筑厚度的关系如表 11-12。

不同浇筑块厚度与混凝土绝热温升的关系 (ζ 值)

表 11-11

浇筑块厚度 (m)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
ζ	0.36	0.49	0.57	0.65	0.68	0.74	0.79	0.82

不同龄期水化热温升与浇筑块厚度的关系

表 11-12

浇筑块厚度 (m)	不同龄期 (d) 时的 ζ 值									
	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	0.59	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

注: 本表适用于混凝土浇筑温度为 20~30℃ 的工程。

故此, 混凝土内部的中心温度按下式计算:

$$T_{\max} = T_0 + T_{(t)} \cdot \zeta \quad (11-17)$$

式中 T_{\max} ——混凝土内部中心最高温度 (℃);

T_0 ——混凝土的浇筑入模温度 (℃);

$T_{(t)}$ ——在 t 龄期时混凝土的绝热温升 (℃);

ζ ——不同浇筑块厚度的温降系数, $\zeta = T_m / T_n$, 按表 11-11 和表 11-12 查用;

T_h ——混凝土的最终绝热温升值 (℃);

T_m ——混凝土由水化热引起的实际温升 (℃)。

大体积混凝土的绝热温升与水泥的品种、用量和混凝土配合比有密切关系。因此可以通过选择合适的水泥品种和配合比, 使用减水剂、粉煤灰掺料、降低水泥用量、浇灌速度和拌合物温度, 以及采用人工冷却等措施来加以控制。

【例 11-10】 用 425 号矿渣水泥配制混凝土 $m_c = 275\text{kg}/\text{m}^3$, $Q = 335\text{J}/\text{kg}$, $C = 0.96\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$, $\rho = 2400\text{kg}/\text{m}^3$, 求混凝土最高水化热绝热温度及 1d、3d、7d 的水化热绝热温度。

【解】 (1) 混凝土最高水化热绝热温度:

$$T_{\max} = \frac{275 \times 335}{0.96 \times 2400} (1 - e^{-\infty}) = 39.98^\circ\text{C}$$

(2) 混凝土 1d、3d、7d 的水化热绝热温度:

$$T_{(t)} = 39.98(1 - 2.718^{-0.3t})$$

$$\text{当 } t=1 \quad T_{(1)} = 39.98(1 - 2.718^{-0.3 \times 1}) = 10.35^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = T_{(1)} - 0^\circ\text{C} = 10.35^\circ\text{C}$$

$$\text{当 } t=3 \quad T_{(3)} = 39.98(1 - 2.718^{-0.8 \times 3}) = 23.72^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = T_{(3)} - T_{(1)} = 13.37^\circ\text{C}$$

$$\text{当 } t=7 \quad T_{(7)} = 39.98(1 - 2.718^{-0.8 \times 7}) = 35.08^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_7 = T_{(7)} - T_{(3)} = 11.36^\circ\text{C}$$

【例 11-11】 设备基础底板长 60.8m、宽 30.5m、厚 3.0m, 采用 C20 混凝土, 每立方米混凝土水泥用量为 275kg, 采用 425 普通水泥, 水化热为 377kJ/kg, 混凝土浇筑温度为 24℃, 支模采用模板, 外包两层草垫, 混凝土比热 C 取 0.96kJ/kg·K, 试计算不同龄期时混凝土的内部温度。

【解】 混凝土的最终绝热温升由式 (11-16) 得:

$$T_h = \frac{m_c Q}{C_p} = \frac{275 \times 377}{0.96 \times 2400} = 45^\circ\text{C}$$

查表 11-12 的温降系数 ζ 可求得不同龄期的水热温升为:

$t = 3\text{d}$	$\zeta = 0.68$	$T_h \cdot \zeta = 45 \times 0.68 = 30.6^\circ\text{C}$
$t = 6\text{d}$	$\zeta = 0.67$	$T_h \cdot \zeta = 45 \times 0.67 = 30.2^\circ\text{C}$
$t = 9\text{d}$	$\zeta = 0.63$	$T_h \cdot \zeta = 45 \times 0.63 = 28.4^\circ\text{C}$
$t = 12\text{d}$	$\zeta = 0.57$	$T_h \cdot \zeta = 45 \times 0.57 = 25.7^\circ\text{C}$
⋮	⋮	⋮
$t = 30\text{d}$	$\zeta = 0.19$	$T_h \cdot \zeta = 45 \times 0.19 = 8.6^\circ\text{C}$

由式 (11-17) 得混凝土内部的中心温度为:

$$\begin{aligned} T_{(3)} &= T_0 + T_{(t)} \zeta = 24 + 30.6 = 54.6^\circ\text{C} \\ T_{(6)} &= 24 + 30.2 = 54.2^\circ\text{C} \\ T_{(9)} &= 24 + 28.4 = 52.4^\circ\text{C} \\ T_{(12)} &= 24 + 25.7 = 49.7^\circ\text{C} \\ &\vdots \\ T_{(30)} &= 24 + 8.6 = 32.6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

11.6 混凝土收缩值和收缩当量温差计算

11.6.1 各龄期混凝土收缩值计算

混凝土在水泥水化、胶凝、硬化及随后的碳化过程中以及水分蒸发, 必将引起体积的收缩, 将产生一定的收缩变形。

在标准状态下混凝土最终收缩 (即极限收缩) 量, 以结构相对收缩变形表示为:

$$\epsilon_y^0(\infty) = 324 \times 10^{-6} = 3.24 \times 10^{-4} \quad (11-18)$$

各龄期混凝土的收缩变形随许多具体条件和因素的差异而变化, 一般可用下列指数函数表达式进行收缩值的计算:

标准状态下混凝土任意龄期的收缩变形值为:

$$\epsilon_{y(t)}^0 = \epsilon_y^0 (1 - e^{-bt}) \times 10^{-4} \quad (11-19)$$

非标准状态下的混凝土任意龄期的收缩变形值为:

$$\epsilon_{y(t)} = \epsilon_y^0 (1 - e^{-bt}) \times M_1 \times M_2 \times M_3 \cdots \times M_n \quad (11-20)$$

式中

$\epsilon_{y(t)}^0$ ——标准状态下混凝土任意龄期 (d) 的收缩变形值;

ϵ_y^0 ——标准状态下的最终收缩值 (即极限收缩值), 取 3.24×10^{-4} ;

$\epsilon_{y(t)}$ ——非标准状态下混凝土任意龄期 (d) 的收缩变形值;

e ——常数, 为 2.718;

b ——经验系数, 取 0.01;

t ——混凝土浇筑后至计算时的天数 (d);

M_1 、 M_2 、 M_3 ... M_n ——考虑各种非标准条件, 与水泥品种细度、骨料品种、水灰比、水泥浆量、养护条件、环境相对湿度、构件尺寸、混凝土捣实方法、配筋率等有关的修正系数, 按表 11-13 取用。

混凝土收缩变形不同条件影响修正系数

表 11-13

水泥品种	M_1	水泥细度	M_2	骨料	M_3	水灰比	M_4	水泥浆量 (%)	M_5
矿渣水泥	1.25	1500	0.9	砂岩	1.9	0.2	0.65	15	0.9
快硬水泥	1.12	2000	0.93	砾砂	1.0	0.3	0.85	20	1.0
低热水泥	1.10	3000	1.0	无粗骨料	1.0	0.4	1.0	25	1.2
石灰矿渣水泥	1.0	4000	1.13	玄武岩	1.0	0.5	1.21	30	1.45
普通水泥	1.0	5000	1.35	花岗岩	1.0	0.6	1.42	35	1.75
火山灰水泥	1.0	6000	1.68	石灰岩	1.0	0.7	1.62	40	2.1
抗硫酸盐水泥	0.78	7000	2.05	白云岩	0.95	0.8	1.80	45	2.55
矾土水泥	0.52	8000	2.42	石英岩	0.8			50	3.03
t (d)	M_6	W (%)	M_7	\bar{r}	M_8	操作方法	M_9	$\frac{E_s A_s}{E_c A_c}$	M_{10}
1	$\frac{1.11}{1}$	25	1.25	0	$\frac{0.54}{0.21}$	机械振捣	1.0	0.0	1.0
2	$\frac{1.11}{1}$	30	1.18	0.1	$\frac{0.76}{0.78}$	手工振捣	1.1	0.05	0.85
3	$\frac{1.09}{0.98}$	40	1.1	0.2	$\frac{1}{1}$	蒸气养护	0.85	0.1	0.76
4	$\frac{1.07}{0.96}$	50	1.0	0.3	$\frac{1.03}{1.03}$	高压釜处理	0.54	0.15	0.68
5	$\frac{1.04}{0.94}$	60	0.88	0.4	$\frac{1.2}{1.05}$			0.2	0.61
7	$\frac{1}{0.9}$	70	0.77	0.5	$\frac{1.13}{-}$			0.25	0.55
10	$\frac{0.96}{0.89}$	80	0.7	0.6	$\frac{1.4}{-}$				
14~180	$\frac{0.93}{0.84}$	90	0.54	$\frac{0.7}{0.8}$	$\frac{1.43}{1.44}$				

注: 分子为自然状态下硬化, 分母为加热状态下硬化;

t ——混凝土浇筑后初期养护时间 (d);

W ——环境相对湿度 (%);

\bar{r} ——水力半径的倒数 (cm^{-1}), 为构件截面周长 (L) 与截面积 (A) 之比, $\bar{r} = \frac{L}{A}$;

$E_s A_s / E_c A_c$ ——配筋率;

E_s ——钢筋的弹性模量 (N/mm^2);

A_s ——钢筋的截面积 (mm^2);

E_c ——混凝土的弹性模量 (N/mm^2);

A_c ——混凝土的截面积 (mm^2)。

【例 11-12】 某现浇钢筋混凝土墙, 沿墙板纵向配筋率为 0.2%, 混凝土为 C20, 用矿渣水泥配制, 水灰比为 0.6, 骨料为花岗岩, 机械振捣, 保持良好的潮湿养护, 试计算龄期为 15d 的混凝土收缩变形值。

【解】 由已知条件和表 11-13 知, $M_1 = 1.25$, M_2 、 M_3 、 M_5 、 M_8 、 M_9 均为 1, $M_4 = 1.42$, $M_6 = 0.93$, $M_7 = 0.7$, $M_{10} = 0.95$, 则混凝土的收缩变形值为:

$$\epsilon_{y(15)} = 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.15}) \times 1.25 \times 1.42 \times 0.93 \times 0.7 \times 0.95 = 0.498 \times 10^{-4}$$

11.6.2 各龄期混凝土收缩当量温差计算

混凝土收缩当量温差是将混凝土干燥收缩与自身收缩产生的变形值, 换算或相当于引起等量变形所需要的温度, 以便按温差计算温度应力。

混凝土的收缩变形换成当量温差按下式计算:

$$T_{y(t)} = -\frac{\epsilon_{y(t)}}{\alpha} \quad (11-21)$$

式中 $T_{y(t)}$ ——任意龄期 (d) 混凝土收缩当量温差 ($^{\circ}\text{C}$), 负号表示降温;

$\epsilon_{y(t)}$ ——各龄期 (d) 混凝土的收缩相对变形值;

α ——混凝土的线膨胀系数, 取 1.0×10^{-5} 。

【例 11-13】 条件同例 11-12, 试计算龄期为 15d 的收缩当量温差。

【解】 由例 11-12 已计算得到: $\epsilon_{y(15)} = 0.498 \times 10^{-4}$, 将它代入式 (11-21) 得:

$$\begin{aligned} T_{y(t)} &= -\frac{\epsilon_{y(t)}}{\alpha} = \frac{0.498 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-6}} \\ &= -4.98 \approx -5^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

故 15d 龄期的收缩当量温差为 -5°C 。

11.7 各龄期混凝土弹性模量计算

混凝土的弹性模量是表示材料弹性性质的系数, 反映瞬时荷载作用下的应力应变性质。根据试验, 混凝土的弹性模量随着混凝土抗压强度和密度的增加而加大, 亦即混凝土的弹性模量随混凝土浇筑后龄期的增加而加大, 随龄期不同而变化。各龄期混凝土的弹性模量按下式计算:

$$E_{(t)} = E_c (1 - e^{-0.09t}) \quad (11-22)$$

式中 $E_{(t)}$ ——混凝土从浇筑后至计算时的弹性模量 (N/mm^2), 计算温度应力时, 一般取平均值;

E_c ——混凝土的最终弹性模量 (N/mm^2); 可近似取 28d 的混凝土弹性模量, 可按表 11-14 取用;

e ——常数, 为 2.718;

t ——混凝土从浇筑后到计算时的天数 (d)。

混凝土的抗拉弹性模量与抗压弹性模量之比值约为 0.96~0.97, 前者比后者略低一些, 由于两者比值接近于 1, 为了实用方便起见, 通常取两者相等。

混凝土的弹性模量 E_c

表 11-14

项 次	混凝土强度等级 (N/mm ²)	弹性模量 (N/mm ²)	项 次	混凝土强度等级 (N/mm ²)	弹性模量 (N/mm ²)
1	C7.5	1.45×10^4	7	C35	3.15×10^4
2	C10	1.75×10^4	8	C40	3.25×10^4
3	C15	2.20×10^4	9	C45	3.35×10^4
4	C20	2.55×10^4	10	C50	3.45×10^4
5	C25	2.80×10^4	11	C55	3.55×10^4
6	C30	3.0×10^4	12	C60	3.60×10^4

【例 11-14】 计算 C20 混凝土 15d 的弹性模量。

【解】 15d 的弹性模量为：

$$E_{(15)} = 2.55 \times 10^4 (1 - e^{-0.09 \times 15})$$

$$= 1.89 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

11.8 混凝土徐变变形和应力松弛系数计算

11.8.1 混凝土徐变变形计算

混凝土结构在外荷载等于常量的情况下，变形随时间缓慢增加的现象称徐变。徐变变形是微裂的压缩及颗粒间滑动而形成。它是在常量荷载作用下除了弹性变形外产生的一种非弹性变形。

不同材质的混凝土，因所处条件的差异具有不同的徐变特性。标准状态下，单位应力引起的最终徐变变形称为“徐变度”，以 C^0 表示，见表 11-15，它是混凝土加荷龄期和持续时间的函数。

标准极限徐变度

表 11-15

混凝土强度等级 (N/mm ²)	$C^0 \cdot 10^{-6}$	混凝土强度等级 (N/mm ²)	$C^0 \cdot 10^{-6}$
C10	8.84	C40	7.40
C15	8.28	C50	6.44
C20	8.04	C60~C90	6.03
C30	7.40	C100	6.03

当结构的使用应力为 σ 时，最终徐变变形为：

$$\epsilon_n^0(\infty) = C^0 \cdot \sigma \quad (11-23)$$

若无法预先知道使用应力，则 $\epsilon_n^0(\infty)$ 的计算可假定使用应力为混凝土抗拉或抗压强度的 1/2，即：

$$\epsilon_n^0(\infty) = C^0 \cdot \frac{1}{2} \cdot f \quad (11-24)$$

式中 $\epsilon_n^0(\infty)$ ——混凝土的最终徐变变形；

C_0 ——徐变度，按表 11-15 取用；

σ ——结构使用应力；

f ——混凝土的抗拉或抗压强度。

11.8.2 混凝土应力松弛系数计算

由于混凝土的徐变特性,混凝土结构的变形在常量的情况下,当应变不变化时,其内应力会随时间而逐渐衰减的现象称应力松弛。其原因也是由于颗粒滑动及微裂扩展而造成的。当结构变形不变时,其内部约束应力会因混凝土粘性滑动而产生“应力松弛”,这时变形变化引起的应力状态是非常重要的。其松弛系数一般可按以下经验公式计算:

$$S_{h(t)} = 1 - \frac{A_1}{\rho_1} (1 - e^{-\rho_1 t}) - \frac{A_2}{\rho_2} (1 - e^{-\rho_2 t}) \quad (11-25)$$

式中 A_1 、 ρ_1 、 A_2 、 ρ_2 ——分别为经验系数,其值为:

$$A_1 = 0.0237d^{-1}; \quad \rho_1 = 0.067419d^{-1}$$

$$A_2 = 3.45167d^{-1}; \quad \rho_2 = 9.4379d^{-1}$$

e ——常数,为 2.718。

由式 (11-25) 知混凝土的松弛系数,是荷载、时间的函数,数值小于 1,如图 11-1 所示。

按忽略混凝土龄期影响和考虑混凝土龄期及荷载持续时间,由式 (11-25) 计算得到的应力松弛系数 $S_{(t)}$ 和 $S_{h(t)}$ 分别列于表 11-16 和表 11-17 中,可供直接查用。

按弹性理论计算温度应力时,徐变所导致的温度应力的松弛,有益于防止裂缝的开展。徐变可使混凝土的长期极限抗拉值增加一倍左右,即提高了混凝土的极限变形能力。因此在计算混凝土的抗裂性时,应把徐变所导致的温度应力的松弛影响考虑进去,应再乘以应力松弛系数。

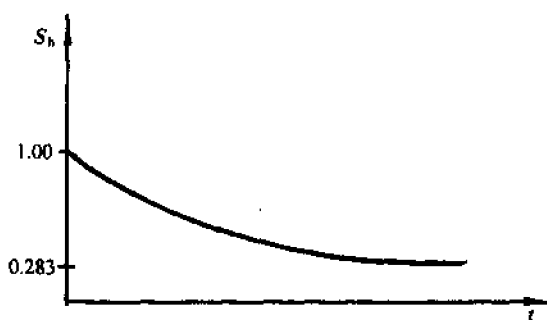


图 11-1 松弛系数与时间关系

混凝土的应力松弛系数

表 11-16

t (d)	0	0.5	1	2	3	6	7	9	10	12
$S_h(t)$	1.000	0.626	0.611	0.590	0.570	0.520	0.502	0.480	0.462	0.440
t (d)	15	18	21	24	28	30	40	60	90	∞
$S_h(t)$	0.411	0.386	0.368	0.352	0.336	0.327	0.306	0.288	0.284	0.280

注:本表为忽略混凝土龄期影响的松弛系数表,一般在简化计算中应用。

混凝土考虑龄期及荷载持续时间的应力松弛系数

表 11-17

时间 t (d)	3	6	9	12	15	18	21	27	30
$S_{(t)}$	0.186	0.208	0.214	0.215	0.233	0.252	0.301	0.570	1.00

11.9 大体积混凝土裂缝控制施工计算

大体积混凝土基础或结构由于温度收缩引起的应力, 其裂缝控制计算, 有以下两种情况和方法。

11.9.1 自约束裂缝控制计算

浇筑大体积混凝土时, 由于水化热的作用, 中心温度高, 与外界接触的表面温度低, 当混凝土表面受外界气温影响急剧冷却收缩时, 外部混凝土质点与混凝土内部各质点之间相互约束, 使表面产生拉应力, 内部降温慢受到自约束产生压应力。设温度呈对称抛物线分布 (图 11-2), 则由于温差产生的最大拉应力和压应力可由下式计算:

$$\sigma_t = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_{(t)} \alpha \Delta T_1}{1 - \nu} \quad (11-26)$$

$$\sigma_c = \frac{1}{3} \cdot \frac{E_{(t)} \alpha \Delta T_1}{1 - \nu} \quad (11-27)$$

式中 σ_t 、 σ_c ——分别为混凝土的拉应力和压应力 (N/mm^2);

$E_{(t)}$ ——混凝土的弹性模量 (N/mm^2);

α ——混凝土的热膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$);

ΔT_1 ——混凝土截面中心与表面之间的温差 ($^\circ\text{C}$);

ν ——混凝土的泊松比, 取 0.15~0.20。

由上式计算的 σ_c 如果小于该龄期混凝土的抗拉强度, 则不会出现表面裂缝, 否则则有可能出现裂缝。同时由上式知采取措施控制温差 ΔT_1 就可有效地控制表面裂缝的出现。大体积混凝土一般允许温差宜控制在 $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内。

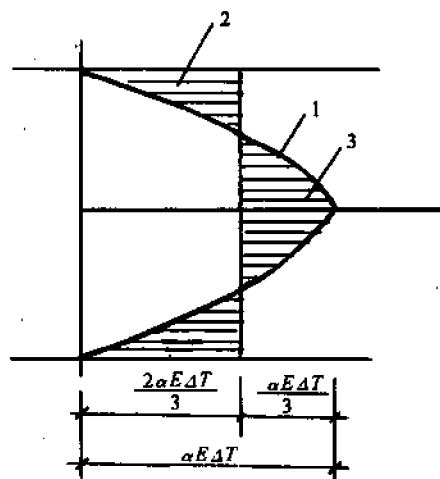


图 11-2 内部温差引起的温度应力

1—温度分布; 2—温度应力 (拉); 3—温度应力 (压)

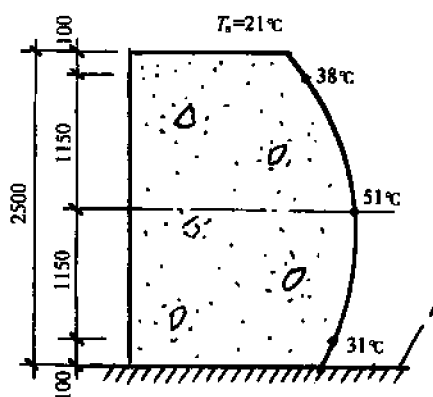


图 11-3 基础底板温差

1—地基面

【例 11-15】 大型设备基础底板, 厚度 2.5m, 采用 C20 混凝土浇筑后, 在 3d 龄期

测温如图 11-3, 试求其不考虑徐变松弛影响因内部温差引起的最大拉应力和压应力。

【解】 由题意, 取 $E_0 = 2.55 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\alpha = 1 \times 10^{-5}$, $\Delta T_1 = 51 - 38^\circ = 13^\circ\text{C}$, $\nu = 0.15$

由式 (11-22) 混凝土在 3d 龄期的弹性模量为:

$$\begin{aligned} E_{(3)} &= E_c(1 - e^{-0.09t}) \\ &= 2.55 \times 10^4(1 - 2.78^{-0.09 \times 3}) \\ &= 0.62 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

混凝土的最大拉应力由式 (11-26) 得:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{2}{3} \times \frac{E_{(t)} \alpha T_1}{1 - \nu} \\ &= \frac{2}{3} \times \frac{0.62 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-5} \times 13^\circ}{1 - 0.15} \\ &= 0.63 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

混凝土的最大压应力由式 (11-27) 得:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{1}{3} \times \frac{E_{(t)} \alpha \Delta T_1}{1 - \nu} \\ &= \frac{1}{3} \times \frac{0.62 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-5} \times 13^\circ}{1 - 0.15} \\ &= 0.32 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

故因内部温差引起的拉应力和压应力分别为 0.63 N/mm^2 和 0.32 N/mm^2 。

11.9.2 外约束裂缝控制计算

大体积混凝土基础或结构浇筑后, 由于水泥水化热使混凝土温度升高, 体积膨胀, 达到峰值后 (约 3~5d) 将持续一段时间, 因内部温度慢慢要与外界气温相平衡, 以后温度将逐渐下降, 从表面开始慢慢深入到内部, 此时混凝土已基本结硬, 弹性模量很大, 降温时当温度收缩变形受到外部边界条件的约束, 将引起较大的温度应力。一般混凝土内部温升值愈大, 降温值也愈大, 产生的拉应力也愈大, 如通过施工计算采取措施控制过大的降温收缩应力的出现, 即可控制裂缝的发生。外约束裂缝控制的施工计算按不同时间和要求, 分以下两个阶段进行。

一、混凝土浇筑前裂缝控制施工计算

是在大体积混凝土浇筑前, 根据施工拟采取的施工方法、裂缝控制技术措施和已知施工条件, 先计算混凝土的最大水泥水化热温升值、收缩变形值、收缩当量温差和弹性模量, 然后通过计算, 估量混凝土浇筑后可能产生的最大温度收缩应力, 如小于混凝土的抗拉强度, 则表示所采取的裂缝控制技术措施, 能有效地控制裂缝的出现; 如超过混凝土的允许抗拉强度, 则应采取调整混凝土的浇筑温度, 减低水化热温升值, 降低内外温差, 改善施工工艺和性能, 提高混凝土极限拉伸强度或改善约束等技术措施, 重新进行计算, 直至计算的降温收缩应力, 在允许范围以内为止, 以达到预防温度收缩裂缝出现的目的, 计算步骤和方法如下:

1. 计算混凝土的绝热温升值

混凝土的水化热绝热温升值, 一般按下式计算:

$$T_{(t)} = \frac{m_c Q}{C_p} (1 - e^{-mt}) \quad (11-28)$$

符号意义及计算方法同 11.5.1 一节式 (11-15)。

实际大体积混凝土基础或结构外表是散热的, 混凝土的实际温升低于绝热温升, 计算值偏于安全。

2. 计算各龄期混凝土收缩变形值

各龄期混凝土的收缩变形值 $\epsilon_{y(t)}$ 一般可按下式计算:

$$\epsilon_{y(t)} = \epsilon_y^0 (1 - e^{-bt}) \times M_1 \times M_2 \times M_3 \cdots \times M_n \quad (11-29)$$

符号意义和计算方法同 11.6.1 一节式 (11-20)。

3. 计算混凝土的收缩当量温差

混凝土收缩变形会在混凝土内引起相当大的应力, 在温度应力计算时应把收缩变形这个因素考虑进去, 为计算方便, 把混凝土收缩变形合并到温度应力之中, 换成“当量温差”按下式计算

$$T_{y(t)} = -\frac{\epsilon_{y(t)}}{\alpha} \quad (11-30)$$

符号意义和计算方法同 11.6.2 一节式 (11-21)。

4. 计算各龄期混凝土的弹性模量

变形变化引起的应力状态随弹性模量的上升而显著增加, 计算温度收缩应力应考虑弹性模量的变化, 各龄期混凝土弹性模量可按下式计算:

$$E_{(t)} = E_c (1 - e^{-0.09t}) \quad (11-31)$$

符号意义及计算方法同 11.7 一节式 (11-22)。

5. 计算混凝土的温度收缩应力

大体积混凝土基础或结构 (厚度大于 1m) 贯穿性或深进的裂缝, 主要是由平均降温差和收缩差引起过大的温度收缩应力而造成的。混凝土因外约束引起的温度 (包括收缩) 应力 (二维时), 一般用约束系数法来计算约束应力, 按以下简化公式计算:

$$\sigma = -\frac{E_{(t)} \alpha \Delta T}{1 - \nu_c} \cdot S_{(t)} R \quad (11-32)$$

$$\Delta T = T_0 + \frac{2}{3} T_{(t)} + T_{y(t)} - T_b \quad (11-33)$$

式中 σ ——混凝土的温度 (包括收缩) 应力 (N/mm^2)

$E_{(t)}$ ——混凝土从浇筑后至计算时的弹性模量 (N/mm^2), 一般取平均值;

α ——混凝土的线膨胀系数, 取 1.0×10^{-5} ;

ΔT ——混凝土的最大综合温差 ($^{\circ}\text{C}$) 绝对值, 如为降温取负值; 当大体积混凝土基础长期裸露在室外, 且未回填土时, ΔT 值按混凝土水化热最高温升值 (包括浇筑入模温度) 与当月平均最低温度之差进行计算; 计算结果为负值, 则表示降温;

T_0 ——混凝土的浇筑入模温度 ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{(t)}$ ——浇筑完一段时间 t , 混凝土的绝热温升值 ($^{\circ}\text{C}$), 按式 (11-28) 计算;

$T_{y(t)}$ ——混凝土的收缩当量温差 ($^{\circ}\text{C}$), 按式 (11-30) 计算;

T_h ——混凝土浇筑完后达到稳定时的温度, 一般根据历年气象资料取当年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$);

$S_{(t)}$ ——考虑徐变影响的松弛系数, 按表 11-17 取用, 一般取 0.3~0.5;

R ——混凝土的外约束系数, 当为岩石地基时, $R=1$; 当为可滑动垫层时, $R=0$, 一般土地基取 0.25~0.50;

ν_c ——混凝土的泊松比。

【例 11-16】 轧板厂大型设备基础混凝土采用 C20, 用 425 号矿渣水泥配制, 水泥用量为 $275\text{kg}/\text{m}^3$, 水灰比为 0.6, $E_c = 2.55 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$, $T_y = 9^{\circ}\text{C}$, $S_{(t)} = 0.3$, $R_{(t)} = 0.32$, 混凝土浇灌入模温度为 14°C , 当地平均温度为 15°C , 由天气预报知养护期间月平均最低温度为 3°C , 试计算可能产生的最大温度收缩应力和露天养护期间 (15d) 可能产生温度收缩应力及抗裂安全度。

【解】 由表 11-8 知, $Q = 335\text{J}/\text{kg}$, $C = 0.96\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$, $\rho = 2400\text{kg}/\text{m}^3$
混凝土 15d 水化热绝热温度及最大的水化热绝热温度为:

$$T_{(15)} = \frac{m_c Q}{C\rho} (1 - e^{-m}) = \frac{275 \times 335}{0.96 \times 2400} (1 - 2.718^{-0.3 \times 15}) = 39.54^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\max} = \frac{275 \times 335}{0.96 \times 2400} (1 - 2.718^{-\infty}) = 39.98^{\circ}\text{C}$$

由表 11-13 知, $M_1 = 1.25$, M_2 、 M_3 、 M_5 、 M_8 、 M_9 均为 1, $M_4 = 1.42$, $M_6 = 0.93$, $M_7 = 0.7$, $M_{10} = 0.95$

则混凝土的收缩变形值为:

$$\begin{aligned}\epsilon_{y(15)} &= \epsilon_y^0 (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times M_2 \times M_3 \cdots \times M_n \\ &= 3.24 \times 10^{-4} (1 - 2.718^{-0.15}) \times 1.25 \times 1.42 \\ &\quad \times 0.93 \times 0.7 \times 0.95 = 0.498 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

混凝土 15d 收缩当量温差为:

$$\begin{aligned}T_{y(15)} &= \frac{\epsilon_{y(t)}}{\alpha} \\ &= \frac{0.498 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-5}} = 4.98 \approx 5^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

混凝土 15d 的弹性模量为:

$$\begin{aligned}E_{(15)} &= E_c (1 - e^{-0.09t}) \\ &= 2.55 \times 10^4 (1 - 2.718^{-0.09 \times 15}) = 1.89 \times 10^4\end{aligned}$$

混凝土的最大综合温差为:

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_0 + \frac{2}{3} T_{(t)} + T_{y(t)} - T_h \\ &= 14 + \frac{2}{3} \times 39.98 + 9 - 15 = 34.65^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

则基础混凝土最大降温收缩应力为:

$$\sigma = - \frac{E_{(t)} \alpha \Delta T}{1 - \nu_c} \cdot S_{(t)} R$$

$$= -\frac{2.55 \times 10^4 \times 1 \times 10^5 (-34.65)}{1 - 0.15} \times 0.3 \times 0.32$$

$$= 0.97 < f_t = 1.1 \text{ N/mm}^2$$

$$K = \frac{1.1}{0.97} = 1.13 \approx 1.15 \quad \text{可以}$$

露天养护期间基础混凝土产生的降温收缩应力为:

$$\Delta T = T_0 + \frac{2}{3} T_{(t)} + T_{y(t)} - T_h$$

$$= 14 + \frac{2}{3} \times 39.54 + 5 - 3 = 42.36^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{(15)} = -\frac{1.89 \times 10^4 \times 1 \times 10^{-5} \times (-42.36)}{1 - 0.15} \times 0.30 \times 0.32$$

$$= 0.90 > 75\% \times 1.1 = 0.83 \text{ N/mm}^2$$

由计算知基础在露天养护期间混凝土有可能出现裂缝,在此期间混凝土表面应采取养护和保温措施,使养护温度加大(即 T_h 加大),综合温差 ΔT 减小,使计算的 $\sigma_{(15)}$ 小于 $0.83/1.15 = 0.72 \text{ N/mm}^2$,则可控制裂缝出现。

二、混凝土浇筑后裂缝控制施工计算

大体积混凝土浇筑后,根据实测温度值和绘制的温度升降曲线,分别计算各降温阶段产生的混凝土温度收缩拉应力,其累计总拉应力值,如不超过同期龄的混凝土抗拉强度,则表示所采取的防裂措施能有效地控制预防裂缝的出现,不致于引起结构的贯穿性裂缝;如超过该阶段时的混凝土抗拉强度,则应采取加强养护和保温(如覆盖保温材料、及时回填土等)措施,使缓慢降温和收缩,提高该龄期混凝土的抗拉强度、弹性模量发挥徐变特性等,以控制裂缝的出现,计算步骤和方法如下:

1. 计算混凝土绝热温升值

绝热状态下混凝土的水化热绝热温升值按下式计算:

$$T_{(t)} = \frac{m_c Q}{C_p} (1 - e^{-mt}) \quad (11-34)$$

$$T_{\max} = \frac{m_c Q}{C_p} \quad (11-35)$$

式中 T_{\max} ——混凝土的最大水化热绝热温升值 ($^\circ\text{C}$);

其余符号意义和计算方法同“11.5.1”一节式(11-15)。

2. 求混凝土实际最高温升值

根据各龄期的实际温升后的降温值及升降温曲线,按下式求各龄期实际水化热最高温升值:

$$T_d = T_n - T_c \quad (11-36)$$

式中 T_d ——各龄期混凝土实际水化热最高温升值 ($^\circ\text{C}$);

T_n ——各龄期实测温度值 ($^\circ\text{C}$);

T_0 ——混凝土入模温度 ($^\circ\text{C}$)。

3. 计算混凝土水化热平均温度

结构裂缝主要是由降温和收缩引起的,任意降温差(水化热温差加上收缩当量温差)

均可分解为平均降温差和非均匀降温差；前者引起外约束，是导致产生贯穿性裂缝的主要原因；后者引起自约束，导致产生表面裂缝。因此，重要的是控制好两者的降温差，减少和避免裂缝的开展。非均匀降温差一般都采取控制混凝土内外温差在 $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 以内。在一般情况下，现浇大体积混凝土在升温阶段出现裂缝的可能性较小，在降温阶段，如平均降温差较大，则早期出现裂缝的可能性较大。在施工阶段早期降温主要是水化热降温（包括少量混凝土收缩）其水化热平均温度可按下式计算（图 11-4）：

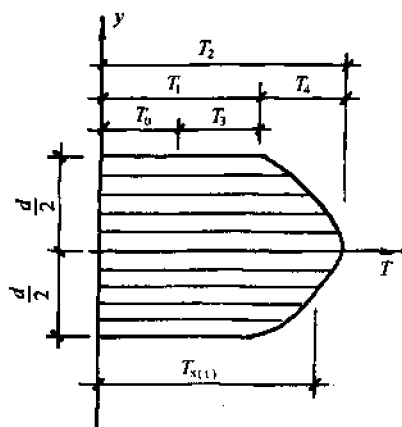


图 11-4 基础底板水化热引起的温升简图
d—大体积混凝土基础或结构厚度

$$\begin{aligned} T_{t(t)} &= T_1 + \frac{2}{3} T_4 \\ &= T_1 + \frac{2}{3} (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (11-37)$$

式中 $T_{t(t)}$ ——各龄期混凝土的综合温差 ($^\circ\text{C}$)；

T_1 ——保温养护下混凝土表面温度 ($^\circ\text{C}$)；

T_2 ——实测基础中心最高温度 ($^\circ\text{C}$)。

4. 计算混凝土基础或结构截面上任意深度的温差

混凝土基础或结构截面上的温差，常假定呈对称抛物线分布，则基础或结构截面上，任意深度处的温度，可按下式计算：

$$T_y = T_1 + \left(1 - \frac{4y^2}{d^2}\right) T_4 \quad (11-38)$$

式中 T_y ——基础或结构截面上任意深度处的温度 ($^\circ\text{C}$)；

d ——基础或结构的厚度；

y ——基础截面上任意一点离开中心轴的距离；

T_1 、 T_4 ——符号意义同式 (11-37)。

5. 计算各龄期混凝土收缩变形值、收缩当量温差及弹性模量

混凝土收缩变形值 $\epsilon_{y(t)}$ 、收缩当量温差 $T_{y(t)}$ 及弹性模量 E_t 的计算同“11.9.2.1 混凝土浇筑前裂缝控制的施工计算”。

6. 计算各龄期混凝土的综合温差及总温差

各龄期混凝土的综合温差按下式计算：

$$T_{(t)} = T_{x(t)} + T_{y(t)} \quad (11-39)$$

式中 $T_{(t)}$ ——各龄期混凝土的综合温差 ($^\circ\text{C}$)；

$T_{x(t)}$ ——各龄期水化热平均温差 ($^\circ\text{C}$)；

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

总温差为混凝土各龄期综合温差之和，即：

$$T = T_{(1)} + T_{(2)} + T_{(3)} + \cdots + T_{(n)} \quad (11-40)$$

式中

T ——总温差，即各龄期混凝土综合温差之和 ($^\circ\text{C}$)；

$T_{(1)}$ 、 $T_{(2)}$ 、 $T_{(3)} \cdots T_{(n)}$ ——各龄期混凝土的综合温差。

以上各种降温差均为负值。

7. 计算各龄期混凝土松弛系数

混凝土松弛程度同加荷时混凝土的龄期有关, 龄期越早, 徐变引起的松弛亦越大; 其次同应力作用时的长短有关, 时间越长, 则松弛亦越大, 混凝土考虑龄期及荷载持续时间影响下的应力松弛系数 $S_{(i)}$ 见表 11-17。

8. 计算最大温度应力值

弹性地基上大体积混凝土基础或结构各降温阶段的综合最大温度收缩拉应力, 按下式计算:

$$\sigma_{(i)} = -\frac{\alpha}{1-\nu} \left[1 - \frac{1}{\cosh \cdot \beta \cdot \frac{L}{2}} \right] \sum_{n=i}^n E_{i(i)} \Delta T_{i(i)} S_{i(i)} \quad (11-41)$$

降温时, 混凝土的抗裂安全度应满足下式要求:

$$K = \frac{f_t}{\sigma_{(i)}} \geq 1.15 \quad (11-42)$$

式中 $\sigma_{(i)}$ ——各龄期混凝土基础所承受的温度应力 (N/mm^2);

α ——混凝土线膨胀系数, 取 1.0×10^{-5} ;

ν ——混凝土泊松比, 当为双向受力时, 取 0.15;

$E_{i(i)}$ ——各龄期混凝土的弹性模量 (N/mm^2);

$\Delta T_{i(i)}$ ——各龄期综合温差 ($^{\circ}\text{C}$); 均以负值代入;

$S_{i(i)}$ ——各龄期混凝土松弛系数;

\cosh ——双曲余弦函数, 可由附录-附表 1-7 查得;

β ——约束状态影响系数, 按下式计算:

$$\beta = \sqrt{\frac{C_x}{H \cdot E_{(i)}}} \quad (11-43)$$

H ——大体积混凝土基础式结构的厚度 (mm);

C_x ——地基水平阻力系数 (地基水平剪切刚度) (N/mm^2), 可由表 11-20 查得;

L ——基础或结构底板长度 (mm);

K ——抗裂安全度, 取 1.15;

f_t ——混凝土抗拉强度设计值 (N/mm^2)。

以上两种计算公式是按底板为平面导出的, 大体积混凝土基础或结构底板截面复杂, 底板和上表面标高不一, 内部沟道纵横交错, 各处温度分布不均, 温度场复杂; 同时应力的分布还与所在地区气候环境条件、基础构造、配筋情况、约束状态、徐变情况等因素有关, 一些计算参数如约束系数、徐变系数、温差等都是根据试验或经验数据推算的, 因此很难以较准确的进行计算, 以上两种方法实际都是近似的计算方法, 裂控理论计算与实际情况会有一定的误差, 但仍不失为作为施工估量温度应力和采取措施的重要依据。同时从以上分析计算可知, 防止大体积混凝土基础或结构出现裂缝; 须保持混凝土内表温差或混凝土的综合温差 (混凝土最高平均温度与环境温差加收缩当量温差) 须低于同龄期混凝土拉应力所许可的温差; 再混凝土应具备这种特性, 即早期强度高而温峰值 (最高水化热温

升时的混凝土温度)要低,过温峰后降温要慢,内表温差要小。施工中宜结合工程结构具体情况和施工条件,通过计算采取简单、经济、有效的技术措施,以尽可能的避免有害裂缝的发生。

【例 11-17】 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 425 号矿渣水泥,水泥用量 $m_c = 280\text{kg}/\text{m}^3$,水泥发热量 $Q = 335\text{kJ}/\text{kg}$,混凝土浇筑入模温度 $T_0 = 28^\circ\text{C}$,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 $\rho = 2400\text{kg}/\text{m}^3$ 。混凝土浇筑后,实测基础中心 C 点逐日温度如表 11-18,升降温曲线如图 11-5,试计算总降温产生的最大温度拉应力。

C 测温点逐日温度升降表

表 11-18

日期	C ₁ 测点 ($^\circ\text{C}$)	日期	C ₁ 测点 ($^\circ\text{C}$)	日期	C ₁ 测点 ($^\circ\text{C}$)
1	38.0	11	43.5	21	35.7
2	50.5	12	42.5	22	35.4
3	52.0	13	41.5	23	35.0
4	51.7	14	40.5	24	34.8
5	50.5	15	39.5	25	34.5
6	49.5	16	38.5	26	34.0
7	48.5	17	38.0	27	33.5
8	47.0	18	37.5	28	32.5
9	46.0	19	36.5	29	32.3
10	45.0	20	36.2	30	32.0

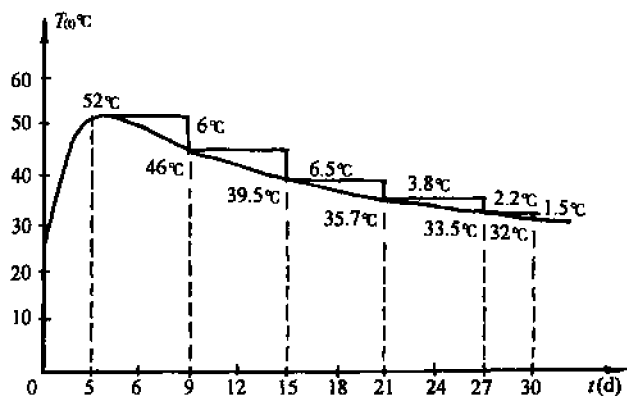


图 11-5 基础中心 C 点各龄期水化热升降温度曲线

【解】 (1) 计算绝热温升值

$$T_{\max} = \frac{m_c Q}{C\rho} = \frac{280 \times 335}{1.0 \times 2400} = 39.1^\circ\text{C}$$

(2) 计算实际最高温升值

为减少计算量,采取分段计算,由公式得:

$$T_{d(5)} = T_n - T_0 = 52^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C} = 24^\circ\text{C}$$

同样由计算得: $T_{d(9)} = 18^\circ\text{C}$

$$T_{d(15)} = 11.5^\circ\text{C}; \quad T_{d(21)} = 7.7^\circ\text{C}$$

$$T_{d(27)} = 5.5^{\circ}\text{C}; \quad T_{d(30)} = 4^{\circ}\text{C}$$

(3) 计算水化热平均温度

经实测已知 3d 的 $T_1 = 36^{\circ}\text{C}$; $T_2 = 52^{\circ}\text{C}$, 故由公式得:

$$T_{x(3)} = T_1 + \frac{2}{3}(T_2 - T_1) = 36 + \frac{2}{3}(52 - 36) = 46.7^{\circ}\text{C}$$

又知混凝土浇灌 30d 后, $T_1 = 27^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 32^{\circ}\text{C}$

$$\text{故} \quad T_{x(30)} = 27 + \frac{2}{3}(32 - 27) = 30.3^{\circ}\text{C}$$

水化热平均总降温差:

$$T_x = T_{x(3)} - T_{x(30)} = 46.7 - 30.3 = 16.4^{\circ}\text{C}$$

(4) 计算各龄期混凝土收缩值及收缩当量温差

取 $\epsilon_y^0 = 3.24 \times 10^{-4}$; $M_1 = 1.25$; $M_2 = 1.35$; $M_3 = 1.00$; $M_4 = 1.64$; $M_5 = 1.00$; $M_6 = 0.93$; $M_7 = 0.54$; $M_8 = 1.20$; $M_9 = 1.00$; $M_{10} = 0.9$; $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}$, 则 3d 收缩值为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{y(3)} &= \epsilon_y^0 \times M_1 \times M_2 \times \dots \times M_{10}(1 - e^{-0.01t}) \\ &= 3.24 \times 10^{-4} \times 1.25 \times 1.35 \times 1.00 \times 1.64 \times 1.00 \times 0.93 \times 0.54 \\ &\quad \times 1.20 \times 1.00 \times 0.9(1 - e^{-0.01 \times 3}) \\ &= 0.144 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

3d 收缩当量温差为:

$$T_{y(3)} = \frac{\epsilon_{y(3)}}{\alpha} = \frac{0.144 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-5}} = 1.44^{\circ}\text{C}$$

同样由计算得

$$\begin{aligned} \epsilon_{y(9)} &= 0.419 \times 10^{-4}; & T_{y(9)} &= 4.19^{\circ}\text{C} \\ \epsilon_{y(15)} &= 0.677 \times 10^{-4}; & T_{y(15)} &= 6.77^{\circ}\text{C} \\ \epsilon_{y(21)} &= 0.919 \times 10^{-4}; & T_{y(21)} &= 9.19^{\circ}\text{C} \\ \epsilon_{y(27)} &= 1.151 \times 10^{-4}; & T_{y(27)} &= 11.51^{\circ}\text{C} \\ \epsilon_{y(30)} &= 1.260 \times 10^{-4}; & T_{y(30)} &= 12.60^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

根据以上各龄期当量温差值, 算出每龄期台阶间每隔 6 (3) d 作为一个台阶的温差值, 见表图 11-6。

(5) 计算各龄期综合温差及总温差

各龄期水化热平均温差, 系在算出的水化热平均总降温差为 16.4°C 的前提下, 根据升降温曲线图 (图 11-5) 推算出各龄期的平均降温差值, 并求出每龄期台阶间的水化热温差值。为偏于安全计, 采用 3d 最高温度 52°C 与 30d 时 32°C 的温差值作为计算依据, 算出各龄期台阶 (同样以每隔 6d 作为一台

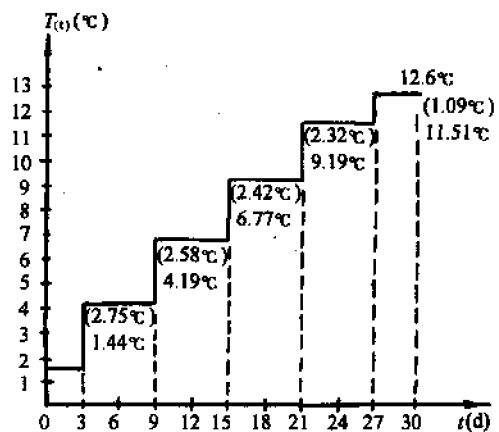


图 11-6 各龄期混凝土收缩当量温差

阶)的温差值,如图11-5所示。为考虑徐变作用,把总降温分成若干台阶式降温,分别计算出各阶段降温引起的应力,最后叠加得总降温应力。

$$T_{(9)} = 6.0 + 2.75 = 8.75^{\circ}\text{C}$$

$$T_{(15)} = 6.5 + 2.58 = 9.08^{\circ}\text{C}$$

$$T_{(21)} = 3.8 + 2.42 = 6.22^{\circ}\text{C}$$

$$T_{(27)} = 2.2 + 2.32 = 4.52^{\circ}\text{C}$$

$$T_{(30)} = 1.5 + 1.09 = 2.59^{\circ}\text{C}$$

总综合温差:

$$\begin{aligned} T_{(t)} &= T_{(9)} + T_{(15)} + T_{(21)} + T_{(27)} + T_{(30)} \\ &= 8.75 + 9.08 + 6.22 + 4.52 + 2.59 = 31.16^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

(6) 计算各龄期的混凝土弹性模量

$$\begin{aligned} E_{(3)} &= E_c(1 - e^{-0.09t}) = 2.55 \times 10^4(1 - e^{-0.09 \times 3}) \\ &= 0.603 \times 10^4 \text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

同样由计算得

$$E_{(9)} = 1.415 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

$$E_{(15)} = 1.889 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

$$E_{(21)} = 2.168 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

$$E_{(27)} = 2.325 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

$$E_{(30)} = 2.378 \times 10^4 \text{N/mm}^2$$

(7) 各龄期混凝土松弛系数

根据实际经验数据荷载持续时间 t , 按下列数值取用:

$$S_{(3)} = 0.186; \quad S_{(9)} = 0.214; \quad S_{(15)} = 0.233;$$

$$S_{(21)} = 0.301; \quad S_{(27)} = 0.570; \quad S_{(30)} = 1.000$$

(8) 最大拉应力计算

$$\text{取 } \alpha = 1.0 \times 10^{-5}; \quad \nu = 0.15; \quad C_x = 0.02 \text{N/mm}^2;$$

$$H = 2500 \text{mm}; \quad L = 90800 \text{mm}$$

根据公式计算各台阶温差引起的应力:

1) 9d (第一台阶): 即自第3d到第9d温差引起的应力:

$$\beta = \sqrt{\frac{C_x}{H \cdot E_{(t)}}} = \sqrt{\frac{0.2}{2500 \times 1.415 \times 10^4}} = 0.0000238$$

$$\beta \cdot \frac{L}{2} = 0.000024 \times \frac{90800}{2} = 1.09$$

查附录-附表1-7得 $\cosh \cdot \beta \cdot \frac{L}{2} = 1.665$, 代入公式得:

$$\begin{aligned} \sigma_{(9)} &= \frac{\alpha}{1 - \nu} \left[1 - \frac{1}{\cosh \cdot \beta \cdot \frac{L}{2}} \right] E_{(9)} \cdot T_{(9)} \cdot S_{(9)} \\ &= \frac{1.0 \times 10^{-5}}{1 - 0.15} \left(1 - \frac{1}{1.665} \right) \times 1.415 \times 10^4 \times 8.75 \times 0.214 \end{aligned}$$

$$= 0.124\text{N/mm}^2$$

同样由计算得

2) 15d (第二台阶): 即第 9d 至第 15d 温差引起的应力:

$$\sigma_{(15)} = 0.142\text{N/mm}^2$$

3) 21d (第三台阶): 即第 15d 至 21d 温差引起的应力:

$$\sigma_{(21)} = 0.135\text{N/mm}^2$$

4) 27d (第四台阶): 即第 21d 至 27d 温差引起的应力:

$$\sigma_{(27)} = 0.179\text{N/mm}^2$$

5) 30d (第五台阶): 即第 27d 至 30d 温差引起的应力:

$$\sigma_{(30)} = 0.188\text{N/mm}^2$$

6) 总降温产生的最大温度拉应力:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \sigma_{(9)} + \sigma_{(15)} + \sigma_{(21)} + \sigma_{(27)} + \sigma_{(30)} \\ &= 0.124 + 0.142 + 0.135 + 0.179 + 0.188 \\ &= 0.768\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

混凝土抗拉强度设计值取 1.1N/mm^2 , 则抗裂安全度:

$$K = \frac{1.1}{0.768} = 1.43 > 1.15 \quad \text{满足抗裂条件}$$

故知不会出现裂缝。

11.10 混凝土温度控制计算

11.10.1 保温法温度控制计算

混凝土采取保温养护, 有两种做法和涵义。一种是在冬季寒冷气温下, 为使混凝土不被冻坏, 而保持正常硬化, 或在寒潮作用下, 不出现温度陡降, 使混凝土急剧冷却 (或受冻), 而产生裂缝 (或冻伤), 因此对混凝土表面要采取保温措施, 混凝土的保温方法计算及要求参见 17 冬期施工一章。另一种是在春秋气温情况下, 为了减少混凝土内外温差, 延缓收缩和散热时间 (即使后期缓慢地降温), 使混凝土在缓慢的散热过程中获得必要的强度来抵抗温度应力, 同时降低变形变化的速度 (即使缓慢的收缩), 充分发挥材料的徐变松弛特性, 有效的削减约束应力, 使小于该龄期抗拉强度, 防止内外温差过大并超过允许界限 (一般为 $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$), 已导致开始出现温度裂缝, 而采取在混凝土裸露表面适当的覆盖保温材料。本节主要简介这一种保温计算。

保温法温控计算包括选定保温材料、计算保温材料需要的厚度。

其计算根据热交换原理, 假定混凝土的中心温度向混凝土表面的散热量, 等于混凝土表面保温材料应补充的发热量, 因而, 混凝土表面保温材料所需厚度可按式计算:

$$\delta_i = \frac{0.5h\lambda_i (T_b - T_a)}{\lambda (T_{\max} - T_b)} \cdot K \quad (11-44)$$

式中 δ_i ——保温材料所需厚度 (m);

h ——结构厚度 (m);

- λ_i ——保温材料的导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), 可按表 11-19 取用;
- λ ——混凝土的导热系数, 取 $2.3\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$;
- T_{\max} ——混凝土中心最高温度 ($^{\circ}\text{C}$);
- T_b ——混凝土表面温度 ($^{\circ}\text{C}$);
- T_a ——混凝土浇筑后 3~5d 空气平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);
- 0.5——指中心温度向边界散热的距离, 为结构厚度的一半;
- K ——传热系数的修正值, 即透风系数。对易于透风的保温材料组成取 2.6 或 3.0 (指一般括风或大风情况, 下同); 对不易透风的保温材料取 1.3 或 1.5; 对混凝土表面用一层不易透风材料, 上面再用容易透风的保温材料组成, 取 2.0 或 2.3。

各种保温材料的导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

表 11-19

材料名称	λ	材料名称	
木 模	0.23	甘蔗板	0.05
钢 模	58.00	沥青玻璃棉毡	0.05
草 袋	0.14	沥青矿棉	0.09~0.12
木 屑	0.17	油毡纸	0.05
炉 渣	0.47	泡沫塑料制品	0.03~0.05
干 砂	0.33	普通混凝土	1.51~2.33
湿 砂	1.31	加气混凝土	0.16
粘 土	1.38~1.47	泡沫混凝土	0.10
红粘土砖	0.43	水	0.58
灰砂砖	0.69~0.79	空 气	0.03

这种保温养护方法大多采取在表面护盖 1~2 层草袋 (或草垫、下同), 或一层塑料薄膜一层草袋。草袋要上下错开, 搭接压紧, 形成良好的保温层。根据实践, 如在模板四周盖二层草袋保温, 可使混凝土外表与气温差缩小到 10°C 以内。同时可减少混凝土表面热扩散, 充分发挥混凝土强度的潜力和松弛作用, 使应力小于抗拉强度; 另一方面能保持适度的湿养护 (或浇少量水湿润), 有利于水泥的水化作用顺利进行和弹性模量的增长; 前者可提高早期抗拉强度, 防止表面脱水; 后者可增强抵抗变形能力。通过大量工程实践证明, 保温养护对防止大体积混凝土基础出现有害深进或贯穿性温度收缩裂缝是有效的。

【例 11-18】 大体积混凝土基础底板, 厚度 $h=2.5\text{m}$, 在 3d 时混凝土内部中心温度 $T_{\max}=52^{\circ}\text{C}$, 实测混凝土表面温度 $T_b=25^{\circ}\text{C}$, 大气温度 $T_a=15^{\circ}\text{C}$, 混凝土导热系数 $\lambda=2.3\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 试求表面所需保温材料的厚度。

【解】 因 $T_{\max}-T_b=52-25=27^{\circ}\text{C}>20^{\circ}\text{C}$, 故需保温。

设用草袋保温, 其导热系数 $\lambda_i=0.14\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 属易透风的保温材料, 取 $K=2.6$ 保温材料的厚度, 由式 (11-44) 得:

$$\begin{aligned}
 \delta &= \frac{0.5h\lambda_i(T_b-T_a)}{\lambda(T_{\max}-T_b)} \cdot K \\
 &= \frac{0.5 \times 2.5 \times 0.14(25-15)}{2.3(52-25)} \times 2.6 \\
 &= 0.07\text{m} = 7\text{cm}
 \end{aligned}$$

故需用 7cm 厚草袋覆盖保温。

11.10.2 蓄水法温度控制计算

蓄水法进行温度控制系在混凝土终凝后,在结构表面蓄以一定高度的水,由于水具有一定的隔热保温效果(导热系数为 $0.58\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$),因而可在一定时间(7~10d)内,控制混凝土表面与内部中心温度之间的差值在 20°C 以内,使混凝土在预定时间内具有一定的抗裂强度,从而达到裂控目的。

计算系根据热交换原理,每 1m^3 混凝土在规定时间内,内部中心温度降到表面温度时放出的热量,等于混凝土结构物在此养护期间散失到大气中的热量,因而混凝土表面所需的热阻系数可按式计算:

$$R = \frac{XM(T_{\max} - T_b)K}{700T_0 + 0.28m_c Q_{(t)}} \quad (11-45)$$

式中 R ——混凝土表面的热阻系数 (k/W);

X ——混凝土维持到预定温度的延续时间 (h);

M ——混凝土结构物的表面系数 ($1/\text{m}$);

T_{\max} ——混凝土的中心温度 ($^\circ\text{C}$);

T_b ——混凝土的表面温度 ($^\circ\text{C}$);

K ——传热系数修正值,可取 1.3;

700——混凝土的热容量,即比热与密度之乘积 ($\text{kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$);

T_0 ——混凝土浇筑、振捣完毕开始养护时的温度 ($^\circ\text{C}$);

m_c ——每立方米混凝土的水泥用量 (kg/m^3);

$Q_{(t)}$ ——混凝土在规定龄期内水泥的水化热 (kJ/kg)。

按上式求得 R 值,即可按下式计算混凝土的表面蓄水深度:

$$h_w = R \cdot \lambda_w \quad (11-46)$$

式中 h_w ——混凝土表面的蓄水深度 (m);

R ——混凝土表面的热阻系数 (k/W),由式 (11-45) 计算求得;

λ_w ——水的导入系数,取 $0.58\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

式 (11-45) 中是令 $T_{\max} - T_b = 20^\circ\text{C}$ 进行计算。如施工通过测温,中心温度与表面温度之差大于 20°C 时,可采取提高水温或调整水深度进行处理。

蓄水深度,可根据不同水温按下式计算调整:

$$h'_w = h_w \cdot \frac{T'_b}{T_a} \quad (11-47)$$

式中 h'_w ——调整后的蓄水深度 (cm);

h_w ——按 $T_j - T_b = 20^\circ\text{C}$ 时计算的蓄水深度 (cm);

T'_b ——需要蓄水养护温度 ($^\circ\text{C}$),即 $T'_b = T_0 - 20$;

T_a ——大气平均温度 ($^\circ\text{C}$)。

【例 11-19】 高层建筑筏板式基础长 32m,宽 16m、厚 2.0m,采用蓄水法进行温度控制,要求保持混凝土内部中心温度与表面温度之差控制在 20°C 范围内,试求需蓄水深

度。

【解】 设温度控制的时间为 10d, 则

$$\begin{aligned} X &= 10 \times 24 = 240h \\ M &= \frac{F}{V} = \frac{2(32 \times 2) + 2(16 \times 2) + 32 \times 16}{32 \times 16 \times 2} \\ &= \frac{704}{1024} = 0.69(1/m) \\ T_{\max} - T_b &= 20^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

又设 $K=1.3$, $T_0=20^{\circ}\text{C}$, $m_c=300\text{kg}$

$Q_{(t)}=188\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ (低热水泥 7d 时的水化热值), 则混凝土表面的热阻系数由式 (11-45) 得:

$$\begin{aligned} R &= \frac{XM(T_{\max} - T_b)K}{700T_0 + 0.28m_cQ_{(t)}} \\ &= \frac{240 \times 0.69 \times 20 \times 1.3}{700 \times 20 + 0.28 \times 300 \times 188} = 0.144\text{kW} \end{aligned}$$

则, 混凝土表面的蓄水深度, 由式 (11-46) 得:

$$\begin{aligned} h_w &= R\lambda_w = 0.144 \times 0.58 \\ &= 0.084\text{m} = 8.4\text{cm} \quad \text{用 } 9\text{cm} \end{aligned}$$

故需蓄水深度为 9cm。

【例 11-20】 条件同例 11-19, 已知 $h_w=9\text{cm}$, 经实测 $T_0=55^{\circ}\text{C}$, $T_s=25^{\circ}\text{C}$, 现不采取提高水温措施, 而采取调整蓄水高度, 试求调整后的蓄水深度。

【解】 已知 $T'_b = T_0 - 20 = 55 - 25 = 30^{\circ}\text{C}$

调整后蓄水深度由式 (11-47) 得:

$$h'_w = h_w \frac{T'_b}{T_s} = 90.0 \times \frac{30}{25} = 10.8\text{cm} \quad \text{用 } 11\text{cm}.$$

故调整后的蓄水深度为 11cm。

11.11 混凝土和钢筋混凝土结构伸缩缝间距计算

合理设置伸缩缝 (包括沉降缝) 是防止混凝土和钢筋混凝土结构开裂的重要措施。钢筋混凝土结构的伸缩缝主要使结构不致由于周围气温变化、水泥水化热温差及收缩作用而产生有害裂缝。在现行《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89) 中, 对伸缩缝的设置虽有规定, 例如挡土墙、地下室墙壁等类结构, 对室内或土中钢筋混凝土允许间距为 30m, 混凝土为 20m; 对露天相应为 20m 和 10m。但是在某些情况下, 例如在建筑物中不宜设置伸缩缝或规范附注中允许通过计算或采取可靠措施扩大伸缩缝间距; 或施工中需要调整伸缩缝位置; 或结构在施工期处于不利的环境条件中, 常常需要对结构的伸缩缝间距进行必要的验算或计算。

地下钢筋混凝土 (或混凝土) 底板或长墙的伸缩缝间距可按式计算:

$$L_{\max} = 1.5 \sqrt{\frac{H \cdot E_c}{C_x} \operatorname{arch} \frac{|\alpha T|}{|\alpha T| - \epsilon_p}} \quad (11-48)$$

- 式中 L_{\max} ——板或墙允许最大伸缩缝间距；
 \bar{H} ——板厚或墙高的计算厚度或计算高度，当实际厚度或高度 $H \leq 0.2L$ 时，取 $\bar{H} = H$ ，即实际厚度或实际高度；当 $H > 0.2L$ 时，取 $\bar{H} = 0.2L$ ；
 L ——底板或长墙的全长；
 E_c ——底板或长墙的混凝土弹性模量，一般按表 11-14 取用；
 C_x ——反映地基对结构约束程度的地基水平阻力系数，可按表 11-20 取用。

地基水平阻力系数 表 11-20

项 次	地 基 条 件	C_x (N/mm ³)
1	软粘土	0.01~0.03
2	一般砂质土	0.03~0.06
3	坚硬粘土	0.06~0.10
4	风化岩、低强度混凝土垫层	0.60~1.00
5	C10 以上混凝土垫层	1.00~1.50

T ——结构相对地基的综合温差，包括水化热温差、气温差和收缩当量温差。当截面厚度小于 500mm 时，不考虑水化热的影响；

$$T = T_{y(t)} + T_2 + T_3$$

$T_{y(t)}$ ——收缩当量温差，由收缩相对变形求得：

$$T_{y(t)} = - \frac{\epsilon_{y(t)}}{\alpha_t}$$

α_t ——线膨胀系数，取 10×10^{-6} ；

$\epsilon_{y(t)}$ ——各龄期混凝土的收缩变形值，按下式计算求得：

$$\epsilon_{y(t)} = 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times M_2 \cdots \times M_n$$

t ——时间，由浇筑后至计算时的天数；

$M_1, M_2 \cdots M_n$ ——不同条件影响系数，按表 11-13 取用；

T_2 ——水化热引起的温差；

T_3 ——气温差；

α ——混凝土或钢筋混凝土的线膨胀系数，取 10×10^{-6} ；一般以降温与收缩共同作用为最不利状态，在公式中取绝对值 $|\alpha T|$ ；

ϵ_p ——混凝土的极限变形值，按 11-2 一节求得；

arch ——双曲线余弦函数的反函数，可从附录-附表 1-7 查得（已知 $\operatorname{arch} x$ ，求 $x = ?$ ），或用下式计算求得：

$$\operatorname{arch} x = \ln(x \pm \sqrt{x^2 - 1})$$

【例 11-21】 现浇钢筋混凝土矩形底板，厚度 1.2m，沿底板横向配置受力筋，纵向配置 $\phi 14$ 螺纹筋，间距 150mm，配筋率 0.205%；混凝土强度等级采用 C20，地基为坚硬粘土；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 11-13 查得: M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_5 、 M_8 、 M_9 均取 1, $M_4=1.42$ 、 $M_6=0.93$ 、 $M_7=0.70$ 、 $M_{10}=0.95$ 。

混凝土经 15d 的收缩变形 (由式 11-20) 得:

$$\begin{aligned}\epsilon_{y(15)} &= 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.15}) \times 1.42 \times 0.93 \times 0.70 \times 0.95 \\ &= 0.396 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

收缩当量温差:

$$T_{y(15)} = \frac{\epsilon_{y(15)}}{\alpha} = \frac{0.396 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-5}} = 3.96 \approx 4^\circ\text{C}$$

混凝土上下面降温 15°C , 混凝土的水化热绝热温升值按式 (11-15) 计算为 30°C , 则水化热平均降温差:

$$T_2 = 15^\circ + \frac{2}{3} \times 15^\circ = 25^\circ\text{C}$$

由于时间短、养护较好, 气温差忽略不计, 则混凝土遭受的总温差为:

$$T = T_{y(15)} + T_2 = 4 + 25 = 29^\circ\text{C}$$

混凝土的极限拉伸, 由公式 (11-2) 代入:

$$\begin{aligned}\epsilon_{pa(15)} &= \epsilon_{pa} \frac{\ln 15}{\ln 28} = \epsilon_{pa} \times 0.813 \\ &= 0.5 f_t \left(1 + \frac{\rho}{d} \right) \times 0.813 \times 10^{-4} \\ &= 0.5 \times 1.1 \left(1 + \frac{0.205}{1.4} \right) \times 0.813 \times 10^{-4} \\ &= 0.513 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

(\because C20 混凝土的 $f_t=1.1\text{N/mm}^2$, $\rho=0.205$, $d=1.4\text{cm}$)

考虑混凝土的抗拉徐变变形比抗压徐变变形大 1 倍, 即 $\epsilon_p=2\epsilon_{pa}=2 \times 0.513 \times 10^{-4} = 1.026 \times 10^{-4}$

15d 混凝土的弹性模量由公式 (11-22) 为:

$$\begin{aligned}E_{(15)} &= 2.55 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.09t}) \\ &= 2.55 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.09 \times 15}) \\ &= 1.89 \times 10^4 \text{N/mm}^2\end{aligned}$$

伸缩缝允许最大间距由公式 (11-48) 为:

$$\begin{aligned}L_{\max} &= 1.5 \sqrt{\frac{HE}{C}} \operatorname{arch} \frac{|\alpha T|}{|\alpha T| - \epsilon_p} \\ &= 1.5 \sqrt{\frac{1200 \times 1.89 \times 10^4}{80 \times 10^{-3}}} \\ &\quad \times \operatorname{arch} \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 25}{1.0 \times 10^{-5} \times 25 - 1.026 \times 10^{-4}} \\ &= 1.5 \times 17 \times 10^3 \times \operatorname{arch} 1.696 \\ &= 28560 \text{mm} \approx 28.6 \text{m}\end{aligned}$$

(查附录-双曲余弦表附表 1-7, $\operatorname{arch} x = 1.696$, $x = 1.12$)

(或由计算 $\operatorname{arch} 1.696 = \ln(1.696 + \sqrt{1.696^2 - 1}) = \ln 3.066 = 1.12$)

由计算知,板允许最大伸缩缝间距为 28.6m,板纵向长度小于 28.6m 可以避免裂缝出现,如超过 28.6m,则需在中部设置伸缩缝或“后浇缝”。

【例 11-22】 条件同例 11-21,将矩形底板配筋改为 $\phi 12\text{mm}$ 上下两层配置,配筋率为 0.4%,施工保证优质,提高抗拉强度 50%,并考虑混凝土抗拉徐变变形比抗压徐变变形大 1.5 倍,试计算早期 (15d) 不出现贯穿性裂缝的允许间距。

【解】 由题意 $f_t = 1.5 \times 1.1 = 1.65$, $\rho = 0.4$, $d = 1.2\text{cm}$

混凝土的极限拉伸为:

$$\begin{aligned}\epsilon_{pa(15)} &= 0.5 \times 1.65 \left(1 + \frac{0.4}{1.2} \right) \times 0.813 \times 10^{-4} \\ &= 0.894 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

考虑混凝土的抗拉徐变变形比抗压变形大 1.5 倍

$$\begin{aligned}\text{则 } \epsilon_p &= 2.5 \times \epsilon_{pa} = 2.5 \times 0.894 \times 10^{-4} \\ &= 2.24 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

伸缩缝允许最大间距由公式 (11-48) 得:

$$\begin{aligned}L_{\max} &= 1.5 \times \sqrt{\frac{1200 \times 1.8 \times 10^4}{80 \times 10^{-3}}} \times \operatorname{arch} \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 25}{1.0 \times 10^{-5} \times 25 - 2.24 \times 10^{-4}} \\ &= 1.5 \times 16.84 \times 10^3 \times \operatorname{arch} 9.62 \\ &= 74570\text{mm} \approx 75\text{m}\end{aligned}$$

由计算知,将底板配筋改细、加强配筋构造和质量控制,提高结构极限拉伸,不出现裂缝的间距可增至 75m。

【例 11-23】 地下箱形基础,底板已浇筑完毕,后浇侧墙,纵向长 60m,高 13m,壁厚 300mm,混凝土强度等级 C20,沿长墙纵向配置双层直径 10mm 构造钢筋,间距 150mm。采用大开挖施工,底板处于土中,长侧墙长期不回填土而处于大气中,长墙与基础有相对温差及收缩差,设平均降温差为 15°C ,平均收缩当量温差为 20°C ,试验算长墙的温度伸缩缝间距。

【解】 本工程为一般施工条件。

综合温差 $T = 15 + 20 = 35^\circ\text{C}$

构造配筋率 $\rho = 0.35\%$

混凝土的极限拉伸:

$$\begin{aligned}\epsilon_{pa} &= 0.5 f_t \left(1 + \frac{\rho}{d} \right) \times 10^{-4} \\ &= 0.5 \times 1.1 \left(1 + \frac{0.35}{1} \right) \times 10^{-4} \\ &= 0.74 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

考虑混凝土徐变为弹性变形一倍,总拉伸:

$$\epsilon_p = 2\epsilon_{pa} = 2 \times 0.74 \times 10^{-4} = 1.48 \times 10^{-4}$$

墙体计算高度 \bar{H} 的确定:

当墙体实际高度 $H \leq 0.2l$ 时, $\bar{H} = H$

本例 $H = 13 > 0.2l$ (0.2×60), 则取:

墙体计算高度 $\bar{H} = 0.2l = 0.2 \times 60 = 12\text{m}$, $C = 1000 \times 10^{-3}\text{N/mm}^2$ 。

允许最大伸缩缝间距:

$$\begin{aligned} L_{\max} &= 1.5 \sqrt{\frac{HE}{C_x}} \operatorname{arch} \frac{|\alpha T|}{|\alpha T| - \epsilon_p} \\ &= 1.5 \sqrt{\frac{1200 \times 2.55 \times 10^4}{1000 \times 10^{-3}}} \times \operatorname{arch} \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 35}{1.0 \times 10^{-5} \times 35 - 1.48 \times 10^{-4}} \\ &= 1.5 \times 17.5 \times 10^3 \times 1.147 \\ &= 30108\text{mm} \approx 30.1\text{m} < 60\text{m} \end{aligned}$$

在长侧墙中部需设一条伸缩缝或“后浇缝”，始可避免出现裂缝（本例情况，亦可应用于室外挡土墙、地下隧道、长通廊、长地沟等）。

【例 11-24】 条件同例 11-23，施工中采取减少收缩，减少水灰比，加强养护等措施，使墙和基础相对收缩温差减至 10°C ；同时加强混凝土材质和浇筑质量控制，提高混凝土抗拉能力 40%，试验算长墙的温度伸缩缝间距。

【解】 由题意知综合温差 $T = 15 + 10 = 25^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= 1.48 \times 10^{-4} + 1.48 \times 10^{-4} \times 0.4 \\ &= 2.04 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

伸缩缝间距

$$\begin{aligned} L &= 1.5 \times \sqrt{\frac{12000 \times 2.55 \times 10^4}{1000 \times 10^{-3}}} \times \operatorname{arch} \frac{1.0 \times 10^{-5} \times 25}{1.0 \times 10^{-5} \times 25 - 2.22 \times 10^{-4}} \\ &= 1.5 \times 17.5 \times 10^3 \times \operatorname{arch} 8.929 \\ &= 62475\text{mm} \approx 62.5\text{m} \end{aligned}$$

由计算知，施工采取有效综合技术措施降低综合温差，提高混凝土的抗拉强度，伸缩缝间距可达 62.5m 大于基础底板长度 60m，故全长可不设伸缩缝。

11.12 混凝土和钢筋混凝土结构位移值计算

地下混凝土或钢筋混凝土底板或长墙的位移值可按下列式计算:

$$U = \frac{\alpha T}{\beta \cosh \beta \cdot \frac{L}{2}} \sinh \beta x \quad (11-49)$$

当 $x = \frac{L}{2}$ 则

$$U = \frac{\alpha T}{\beta} \tanh \beta \cdot \frac{L}{2} \quad (11-50)$$

其中

$$\beta = \sqrt{\frac{C_x}{HE}}$$

式中

U ——地下结构任意一点的位移;

L ——底板或长墙的全长;

x ——任意一点的距离;

$\cosh \beta x$ 、 $\sinh \beta x$ ——双曲余弦、双曲正弦函数,可从附录-附表 1-7 查得;

其他符号意义同“11.11 混凝土和钢筋混凝土结构伸缩缝间距计算”。

采用式 (11-49) 除计算底板和长墙任意点位移外,还可用于验算裂缝开展宽度。

【例 11-25】地下室底板,平面为矩形,长 15m,厚 1.0m,落于坚实地基上,已知混凝土线膨胀系数 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$,弹性模量 $E = 1.93 \times 10^5 \text{N/mm}^2$,综合温差 $T = 32^\circ\text{C}$,地基水平阻力系数 $C_x = 6$,试求因温差产生的总位移。

【解】因温差产生的总位移由式 (11-50) 得:

$$\begin{aligned} U &= 2\alpha T \frac{1}{\beta} \cdot \tanh \beta \cdot \frac{L}{2} \\ &= 2\alpha T \sqrt{\frac{HE}{C_x}} \cdot \tanh \sqrt{\frac{C_x}{HE}} \cdot \frac{L}{2} \\ &= 2 \times 10 \times 10^{-6} \times 32.0 \times \sqrt{\frac{100 \times 1.93 \times 10^5}{6}} \times \tanh \sqrt{\frac{6}{100 \times 1.93 \times 10^5}} \times \frac{1500}{2} \\ &= 2 \times 10 \times 10^{-6} \times 32.0 \times 1.8 \times 10^3 \times \tanh \frac{1}{1.8 \times 10^3} \times \frac{1500}{2} \\ &= 1.15 \tanh 0.42 = 1.15 \times 0.39693 \\ &= 0.456 \text{cm} = 4.6 \text{mm} \end{aligned}$$

故,因温差产生的总位移为 4.6mm。

【例 11-26】地下钢筋混凝土筏板式基础,厚 1.5m,配置 $\phi 14 \text{mm}$ 钢筋,配筋率 $\rho = 0.136\%$,混凝土采用 C20,混凝土浇筑后,在龄期 15d 出现贯穿性裂缝,裂缝间距约 13m 左右,平均缝宽 2.0mm 左右,经检查该龄期抗拉强度为 $0.5 \sim 0.6 \text{N/mm}^2$,平均弹性模量 $E_{15} = 1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $C_x = 0.1 \text{N/mm}^2$,实测混凝土水化热最高温度(含浇筑温度)为 59.5°C ,至浇筑后 15d 时平均降水为 30°C ,试验算允许缩缝间距和裂缝开展宽度。

【解】(1) 计算极限拉伸值 ϵ_p

已知钢筋直径 $d = 14 \text{mm}$,配筋率 $\rho = 0.136$,抗拉强度 $f_t = 0.6 \text{N/mm}^2$,极限拉伸值由式 (11-2) 得:

$$\begin{aligned} \epsilon_{pa} &= 0.5 f_{-1} \left(1 + \frac{\rho}{d} \right) \times 10^{-4} \\ &= 0.5 \times 0.6 \left(1 + \frac{0.136}{1.4} \right) \times 10^{-4} \\ &= 0.329 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

考虑 15d 徐变变形为弹性变形的 0.5 倍,其极限拉伸应为:

$$\epsilon_{pa} = 1.5 \times 0.329 \times 10^{-4} = 0.493 \times 10^{-4}$$

(2) 计算平均温差

设底板的温度呈抛物线分布,其平均温差为:

$$T_1 = (59.5 - 30) \times \frac{2}{3} = 19.6^\circ\text{C}$$

(3) 计算收缩当量温差

取 $M_1 = M_2 = M_3 \cdots \cdots = M_{10} = 1$

15d 龄期的收缩变形值由式 (11-20) 得:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{y(15)} &= 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times M_2 \times M_3 \cdots \times M_{10} \\ &= 3.24 \times 10^{-4} \times (1 - e^{-0.01 \times 15}) = 4.5 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

收缩当量温差由式 (11-21) 得:

$$T_2 = \frac{\varepsilon_{y(15)}}{\alpha} = \frac{4.5 \times 10^{-5}}{10 \times 10^{-6}} = 4.5^\circ\text{C}$$

$$T = T_1 + T_2 = 19.6 + 4.5 = 24.1^\circ\text{C}$$

(4) 验算裂缝间距

可采用式 (11-48) 最大伸缩缝间距公式 (即允许不留伸缩时的裂缝间距) 进行验算:

$$\begin{aligned}L_{\max} &= 1.5 \sqrt{\frac{HE}{C_x}} \operatorname{arch} \frac{|\alpha T|}{|\alpha T| - \varepsilon_p} \\ &= 1.5 \times \sqrt{\frac{1500 \times 1 \times 10^4}{0.1}} \cdot \operatorname{arch} \frac{10 \times 10^{-6} \times 24.1}{10 \times 10^{-6} \times 24.1 - 0.493 \times 10^4} \\ &= 1.5 \times 1.224 \times 10^4 \operatorname{arch} 1.26 \\ &= 1.836 \times 10^4 \times 0.71 = 1.30 \times 10^4 \\ &= 13.0\text{m}, \text{与实际情况 } 13\text{m 左右相符。}\end{aligned}$$

(5) 验算裂缝开展宽度

应用式 (11-49) 板端最大位移公式, 可以求出该基础的裂缝开展宽度。即把裂缝处视作两块底板的板端, 裂缝宽度即为两个端点的位移之和, 则由式 (11-49) 得:

$$U = \frac{\alpha T}{\beta \cosh \beta} \frac{\sinh \beta x}{\frac{L}{2}}$$

当 $x = \frac{L}{2}$, 即在中间最大应力处开裂, 上式可改写为:

$$\begin{aligned}U &= \frac{\alpha T}{\beta} \cdot \tanh \beta \cdot \frac{L}{2} \\ &= \frac{\alpha T}{\sqrt{\frac{C_x}{HE}}} \cdot \tanh \sqrt{\frac{C_x}{HE}} \cdot \frac{L}{2}\end{aligned}$$

以 w 表示裂缝宽度, 则:

$$\begin{aligned}w = 2U &= 2 \times 10 \times 10^{-6} \times 24.1 \times 1.224 \times 10^4 \times \tanh 0.82 \times 10^{-4} \times \frac{13 \times 10^3}{2} \\ &= 5.89 \times \tanh 0.53 = 2.85\text{mm}\end{aligned}$$

由验算知, 裂缝宽度为 2.85mm, 比实际情况 2mm 左右略大一些, 这是因计算公式是在弹性假定条件下推导的, 实际上, 结构开裂后, 由于混凝土的徐变性质, 板端不可能完全回弹到计算位置, 故实际裂缝宽度一般比理论计算值小一些, 说明计算与实际是相符的。