

## 10-7 混凝土裂缝的形成和控制

混凝土结构物的裂缝可分为微观裂缝和宏观裂缝。微观裂缝是指那些肉眼看不见的裂缝，主要有三种，一是骨料与水泥石粘合面上的裂缝，称为粘着裂缝；二是水泥石中自身的裂缝，称为水泥石裂缝；三是骨料本身的裂缝，称为骨料裂缝。微观裂缝在混凝土结构中的分布是不规则、不贯通的。反之，肉眼看得见的裂缝称为宏观裂缝，这类裂缝的范围一般不小于 0.05mm。宏观裂缝是微观裂缝扩展而来的。因此在混凝土结构中裂缝是绝对存在的，只是应将其控制在符合规范要求范围内，以不致发展到有害裂缝。

### 10-7-1 混凝土裂缝产生的主要原因

混凝土结构的宏观裂缝产生的原因主要有三种，一是由外荷载引起的，这是发生最为普遍的一种情况，即按常规计算的主要应力引起的；二是结构次应力引起的裂缝，这是由于结构的实际工作状态与计算假设模型的差异引起的；三是变形应力引起的裂缝，这是由温度、收缩、膨胀、不均匀沉降等因素引起结构变形，当变形受到约束时便产生应力，当此应力超过混凝土抗拉强度时就产生裂缝。

当混凝土结构物产生变形时，在结构的内部、结构与结构之间，都会受到相互影响、相互制约，这种现象称为约束。当混凝土结构截面较厚时，其内部温度和湿度分布不均匀，引起内部不同部位的变形相互约束，这样的约束称之为内约束；当一个结构物的变形受到其他结构的阻碍所受到的约束称为外约束。外约束又可分为自由体、全约束和弹性约束。建筑工程中的大体积混凝土结构所承受的变形，主要是因温差和收缩而产生的。

建筑工程中的大体积混凝土结构中，由于结构截面大，水泥用量多，水泥水化所释放的水化热会产生较大的温度变化和收缩作用，由此形成的温度收缩应力是导致钢筋混凝土产生裂缝的主要原因。这种裂缝有表面裂缝和贯通裂缝两种。表面裂缝是由于混凝土表面和内部的散热条件不同，温度外低内高，形成了温度梯度，使混凝土内部产生压应力，表面产生拉应力，表面的拉应力超过混凝土抗拉强度而引起的。贯通裂缝是由于大体积混凝土在强度发展到一定程度，混凝土逐渐降温，这个降温差引起的变形加上混凝土失水引起的体积收缩变形，受到地

基和其他结构边界条件的约束时引起的拉应力,超过混凝土抗拉强度时所可能产生的贯通整个截面的裂缝。这两种裂缝不同程度上,都属有害裂缝。

高强度的混凝土早期收缩较大,这是由于高强混凝土中以 30%~60%矿物细掺合料替代水泥,高效减水剂掺量为胶凝材料总量的 1%~2%,水胶比为 0.25~0.40,改善了混凝土的微观结构,给高强混凝土带来许多优良特性,但其负面效应最突出的是混凝土收缩裂缝几率增多。高强混凝土的收缩,主要是干燥收缩、温度收缩、塑性收缩、化学收缩和自收缩。混凝土初现裂纹的时间可以作为判断裂纹原因的参考:塑性收缩裂纹大约在浇筑后几小时到十几小时出现;温度收缩裂纹大约在浇筑后 2 到 10d 出现;自收缩主要发生在混凝土凝结硬化后的几天到几十天;干燥收缩裂纹出现在接近 1 年龄期内。

**干燥收缩:**当混凝土在不饱和空气中失去内部毛细孔和凝胶孔的吸附水时,就会产生干缩,高性能混凝土的孔隙率比普通混凝土低,故干缩率也低。

**塑性收缩:**塑性收缩发生在混凝土硬化前的塑性阶段。高强混凝土的水胶比低,自由水分少,矿物细掺合料对水有更高的敏感性,高强混凝土基本不泌水,表面失水更快,所以高强混凝土塑性收缩比普通混凝土更容易产生。

**自收缩:**密闭的混凝土内部相对湿度随水泥水化的进展而降低,称为自干燥。自干燥造成毛细孔中的水分不饱和而产生负压,因而引起混凝土的自收缩。高强混凝土由于水胶比低,早期强度较快的发展,会使自由水消耗快,致使孔体系中相对湿度低于 80%,而高强混凝土结构较密实,外界水很难渗入补充,导致混凝土产生自收缩。高强混凝土的总收缩中,干缩和自收缩几乎相等,水胶比越低,自收缩所占比例越大。与普通混凝土完全不同,普通混凝土以干缩为主,而高强混凝土以自收缩为主。

**温度收缩:**对于强度要求较高的混凝土,水泥用量相对较多,水化热大,温升速率也较大,一般可达 35~40℃,加上初始温度可使最高温度超过 70~80℃。一般混凝土的热膨胀系数为  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,当温度下降 20~25℃时造成的冷缩量为  $2 \sim 2.5 \times 10^{-4}$ ,而混凝土的极限拉伸值只有  $1 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ ,因而冷缩常引起混凝土开裂。

**化学收缩:**水泥水化后,固相体积增加,但水泥-水体系的绝对体积则减小,形成许多毛细孔缝,高强混凝土水胶比小,外掺矿物细掺合料,水化程度受到制

约，故高强混凝土的化学收缩量小于普通混凝土。

当混凝土发生收缩并受到外部或内部约束时，就会产生拉应力，并有可能引起开裂。对于高强混凝土虽然有较高的抗拉强度，可是弹性模量也高，在相同收缩变形下，会引起较高的拉应力，而由于高强混凝土的徐变能力低，应力松弛量较小，所以抗裂性能差。

## 10-7-2 大体积混凝土裂缝控制的计算

### 10-7-2-1 大体积混凝土温度计算公式

1. 最大绝热温升（二式取其一）

$$(1) T_h = (m_c + k \cdot F) Q / c \cdot \rho$$

$$(2) T_h = m_c \cdot Q / c \cdot \rho (1 - e^{-mt}) \quad (10-43)$$

式中  $T_h$ ——混凝土最大绝热温升（℃）；

$m_c$ ——混凝土中水泥（包括膨胀剂）用量（kg/m<sup>3</sup>）；

$F$ ——混凝土活性掺合料用量（kg/m<sup>3</sup>）；

$K$ ——掺合料折减系数。粉煤灰取 0.25~0.30；

$Q$ ——水泥 28d 水化热（kJ/kg）查表 10-81；

不同品种、强度等级水泥的水化热 表 10-81

水泥品种	水泥强度等级	水化热 $Q$ (kJ/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

$c$ ——混凝土比热、取 0.97 [kJ/ (kg · K)]；

$\rho$ ——混凝土密度、取 2400 (kg/m<sup>3</sup>)；

$e$ ——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 10-82。

系数  $m$  表 10-82

浇筑温度 (℃)	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

$$T_{l(t)} = T_j + T_h \cdot \xi_{(t)}$$

式中  $T_{l(t)}$  —— $t$  龄期混凝土中心计算温度 (°C);

$T_j$  ——混凝土浇筑温度 (°C);

$\xi_{(t)}$  —— $t$  龄期降温系数、查表 10-83。

降温系数  $\xi$  表 10-83

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)

$$\delta = 0.5h \cdot \lambda_x (T_2 - T_q) K_b / \lambda (T_{\max} - T_2) \quad (10-45)$$

式中  $\delta$  ——保温材料厚度 (m);

$\lambda_x$  ——所选保温材料导热系数[W/(m·K)]查表 10-84;

几种保温材料导热系数 表 10-84

材料名称	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ [W/(m·K)]	材料名称	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ [W/(m·K)]
建筑钢材	7800	58	矿棉、岩棉	110~200	0.031~0.06
钢筋混凝土	2400	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 (°C);

$T_q$  ——施工期大气平均温度 (°C);

$\lambda$  ——混凝土导热系数, 取 2.33W/(m·K);

$T_{\max}$  ——计算得混凝土最高温度 (°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 1.3~2.0，查表 10-85。

传热系数修正值 表 10-85

	保温层种类	$K_1$	$K_2$
1	纯粹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易透风材料	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	纯粹由不易透风材料组成（如：油布、帆布、棉麻毡、胶合板）	1.3	1.5

注：1.  $K_1$  值为一般刮风情况（风速  $< 4\text{m/s}$ ，结构位置  $> 25\text{m}$ ）；

2.  $K_2$  值为刮大风情况。

2) 如采用蓄水养护，蓄水养护深度

$$h_w = x \cdot M (T_{\max} - T_2) K_b \cdot \lambda_w / (700T_j + 0.28m_c \cdot Q) \quad (10-46)$$

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 (1/m)， $M = F/V$ ；

$F$ ——与大气接触的表面积 ( $\text{m}^2$ )；

$V$ ——混凝土体积 ( $\text{m}^3$ )；

$T_{\max} - T_2$ ——一般取  $20 \sim 25 (^{\circ}\text{C})$ ；

$K_b$ ——传热系数修正值；

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

$\lambda_w$ ——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

$$\beta = 1/[\sum \delta_i / \lambda_i + 1/\beta_q] \quad (10-47)$$

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

$\delta_i$ ——各保温材料厚度 (m)；

$\lambda_i$ ——各保温材料导热系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]；

$\beta_q$ ——空气层的传热系数，取  $23[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 。

4) 混凝土虚厚度

$$h' = k \cdot \lambda / \beta \quad (10-48)$$

式中  $h'$ ——混凝土虚厚度 (m)；

$k$ ——折减系数，取 2/3；

$\lambda$ ——混凝土导热系数，取 2.33[W/(m·K)]。

#### 5) 混凝土计算厚度

$$H = h + 2h' \quad (10-49)$$

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

$$T_{2(t)} = T_q + 4 \cdot h' (H - h') [T_{1(t)} - T_q] / H^2 \quad (10-50)$$

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

$$T_m(t) = [T_1(t) + T_2(t)] / 2 \quad (10-51)$$

### 10-7-2-2 应力计算公式

#### 1. 地基约束系数

(1) 单纯地基阻力系数  $C_{x1}$  (N/mm<sup>3</sup>)，查附表 10-86

单纯地基阻力系数  $C_{x1}$  (N/mm<sup>3</sup>) 表 10-86

土质名称	承载力 (kN/m <sup>2</sup> )	$C_{x1}$ 推荐值
软粘土	80~150	0.01~0.03
砂质粘土	250~400	0.03~0.06
坚硬粘土	500~800	0.06~0.10
风化岩石和低强度素混凝土	5000~10000	0.60~1.00
C10 以上配筋混凝土	5000~10000	1.00~1.50

(2) 桩的阻力系数

$$C_{x2} = Q/F \quad (10-52)$$

式中  $C_{x2}$ ——桩的阻力系数 (N/mm<sup>3</sup>)；

$Q$ ——桩产生单位位移所需水平力 (N/mm)；

当桩与结构铰接时  $Q=2E \cdot I [K_n D / (4E \cdot I)]^{3/4}$

当桩与结构固接时  $Q=4E \cdot I [K_n D / (4E \cdot I)]^{3/4}$

$E$ ——桩混凝土的弹性模量 ( $N/mm^2$ );

$I$ ——桩的惯性矩 ( $mm^4$ );

$K_n$ ——地基水平侧移刚度, 取  $1 \times 10^{-2}$  ( $N/mm^3$ );

$D$ ——桩的直径或边长 ( $mm$ );

$F$ ——每根桩分担的地基面积 ( $mm^2$ )。

(3) 大体积混凝土瞬时弹性模量

$$E_{(t)} = E_0 (1 - e^{-0.09t}) \quad (10-53)$$

式中  $E_{(t)}$ ——龄期混凝土弹性模量 ( $N/mm^2$ );

$E_0$ ——28d 混凝土弹性模量 ( $N/mm^2$ ), 查附表 10-87;

混凝土常用数据 表 10-87

强度等级	弹性模量 $E$ ( $\times 10^4 N/mm^2$ )	强度标准值 ( $N/mm^2$ )		强度设计值 ( $N/mm^2$ )	
		轴心抗压 $f_{ck}$	抗拉 $f_{tk}$	轴心抗压 $f_c$	抗拉 $f_t$
C7.5	1.45	5	0.75	3.7	0.55
C10	1.75	6.7	0.90	5	0.65
C15	2.20	10	1.20	7.5	0.90
C20	2.55	13.5	1.50	10	1.10
C25	2.80	17	1.75	12.5	1.30
C30	3.00	20	2.00	15	1.50
C35	3.15	23.5	2.25	17.5	1.65
C40	3.25	27	2.45	19.5	1.80
C45	3.35	29.5	2.60	21.5	1.90
C50	3.45	32	2.75	23.5	2.00
C55	3.55	34	2.85	25	2.10
C60	3.60	36	2.95	26.5	2.20

$e$ ——常数, 取 2.718;

$t$ ——龄期 (d)。

(4) 地基约束系数

$$\beta_{(t)} = (C_{x1} + C_{x2}) / h \cdot E_{(t)} \quad (10-54)$$

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

$h$ ——混凝土实际厚度 ( $mm$ );

$C_{x1}$ ——单纯地基阻力系数 ( $N/mm^3$ ), 查表 10-86;

$C_{x2}$ ——桩的阻力系数 (N/mm<sup>3</sup>);

$E_{(t)}$ ——t 龄期混凝土弹性模量 (N/mm<sup>2</sup>)。

## 2. 混凝土干缩率和收缩当量温差

### (1) 混凝土干缩率

$$\varepsilon_{Y(t)} = \varepsilon_Y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 \cdot M_2 \cdots M_{10} \quad (10-55)$$

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

$\varepsilon_Y^0$ ——标准状态下混凝土极限收缩值, 取  $3.24 \times 10^{-4}$ ;

$M_1 \cdot M_2 \cdots M_{10}$ ——各修正系数, 查表 10-88。

修正系数  $M_1$ - $M_{10}$  表 10-88

水泥品种	M1	水泥细度 (cm <sup>2</sup> /g)	M2	骨料品 种	M3	W/C	M4	水泥浆 量(%)	M5
普通水泥	1.00	1500	0.92	花岗岩	1.00	0.2	0.65	15	0.90
矿渣水泥	1.25	2000	0.93	玄武岩	1.00	0.3	0.85	20	1.00
快硬水泥	1.12	3000	1.00	石灰岩	1.00	0.4	1.00	25	1.20
低热水泥	1.10	4000	1.13	砾岩	1.00	0.5	1.21	30	1.45
石灰矿渣水泥	1.00	5000	1.35	无粗骨 料	1.00	0.6	1.42	35	1.75
火山灰水泥	1.00	6000	1.68	石英岩	0.80	0.7	1.62	40	2.10
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	砂岩	0.90	-	-	50	3.03

初期养 护时值 (d)	M6	相对湿 度 W (%)	M7	L/F	M8	操作方法	M9	配筋率 $E_a F_a / E_b F_b$	M10
1~2	1.11	25	1.25	0	0.54	机械振捣	1.00	0.00	1.00
3	1.09	30	1.18	0.1	0.76	人工振捣	1.10	0.05	0.86
4	1.07	40	1.10	0.2	1.00	蒸汽养护	0.85	0.10	0.76
5	1.04	50	1.00	0.3	1.03	高压釜处理	0.54	0.15	0.68
7	1.00	60	0.88	0.4	1.20			0.20	0.61
10	0.96	70	0.77	0.5	1.31			0.25	0.55
14~18	0.93	80	0.70	0.6	1.40				
40~90	0.93	90	0.54	0.7	1.43				
≥90	0.93			0.8	1.44				

注: L——底板混凝土截面周长; F——底板混凝土截面面积;

$E_a$ 、 $F_a$ ——钢筋的弹性模量、截面积;  $E_b$ 、 $F_b$ ——混凝土弹性模量、截面积。

### (2) 收缩当量温差



$$T_{Y(t)} = \varepsilon_{Y(t)} / \alpha \quad (10-56)$$

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

$\alpha$  ——混凝土线膨胀系数,  $1 \times 10^{-5}$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ )。

### 3. 结构计算温差 (一般 3d 划分一区段)

$$\Delta T_i = T_{m(i)} - T_{m(i+3)} + T_{Y(i+3)} - T_{Y(i)} \quad (10-57)$$

式中  $\Delta T_i$  —— $i$  区段结构计算温差 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{m(i)}$  —— $i$  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 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 4. 各区段拉应力

$$\sigma_i = \overline{E}_i \cdot \alpha \cdot \Delta T_i \cdot \overline{S}_i \{1 - 1/\text{ch}(\overline{\beta}_i \cdot L/2)\} \quad (10-58)$$

式中  $\sigma_i$  —— $i$  区段混凝土内拉应力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

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

$\overline{S}_i$  —— $i$  区段平均应力松弛系数, 查表 10-89;

松弛系数  $S(t)$  表 10-89

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

$\overline{\beta}_i$  —— $i$  区段平均地基约束系数;

$L$  ——混凝土最大尺寸 (mm);

$\text{ch}$  ——双曲余弦函数。

### 5. 到指定期混凝土内最大应力

$$\sigma_{\max} = [1/(1-\nu)] \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (10-59)$$

式中  $\sigma_{\max}$  ——到指定期混凝土内最大应力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$\nu$  ——泊桑比, 取 0.15。

### 6. 安全系数

$$K = f_t / \sigma_{\max} \quad (10-60)$$

式中  $K$ ——大体积混凝土抗裂安全系数，应 $\geq 1.15$ ；

$f_t$ ——到指定期混凝土抗拉强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ )，查表 10-87。

### 10-7-2-3 平均整浇长度（伸缩缝间距）

#### 1. 混凝土极限拉伸值

$$\varepsilon_p = 7.5f_t (0.1 + \mu/d) 10^{-4} (\ln t / \ln 28) \quad (10-61)$$

式中  $\varepsilon_p$ ——混凝土极限拉伸值；

$f_t$ ——混凝土抗拉强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ )；

$\mu$ ——配筋率 (%)， $\mu = F_a/F_c$ ；

$d$ ——钢筋直径 (mm)；

$\ln$ ——以  $e$  为底的对数；

$t$ ——指定期龄期 (d)；

$F_a$ ——钢筋截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$F_c$ ——混凝土截面积 ( $\text{m}^2$ )。

#### 2. 平均整浇长度（伸缩缝间距）

$$[L_{cp}] = 1.5 \sqrt{h \cdot E_{(t)} / C_x} \cdot \text{arch} [|\alpha \cdot \Delta T| / (|\alpha \cdot \Delta T| - |\varepsilon_p|)] \quad (10-62)$$

式中  $[L_{cp}]$ ——平均整浇长度（伸缩缝间距）(mm)；

$h$ ——混凝土厚度 (mm)；

$E_{(t)}$ ——指定时刻混凝土弹性模量 ( $\text{N/mm}^2$ )；

$C_x$ ——地基阻力系数 ( $\text{N/mm}^3$ )， $C_x = C_{x1} + C_{x2}$ ；

$\text{arch}$ ——反双曲余弦函数；

$\Delta T$ ——指定时刻的累计结构计算温差 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 10-7-3 大体积混凝土控制温度和收缩裂缝的技术措施

为了有效地控制有害裂缝的出现和发展，必须从控制混凝土的水化升温、延缓降温速率、减小混凝土收缩、提高混凝土的极限拉伸强度、改善约束条件和设计构造等方面全面考虑，结合实际采取措施。

### 10-7-3-1 降低水泥水化热和变形

#### 1. 选用低水化热或中水化热的水泥品种配制混凝土，如矿渣硅酸盐水泥、

火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰水泥、复合水泥等。

2. 充分利用混凝土的后期强度，减少每立方米混凝土中水泥用量。根据试验每增减 10kg 水泥，其水化热将使混凝土的温度相应升降 1℃。

3. 使用粗骨料，尽量选用粒径较大、级配良好的粗细骨料；控制砂石含泥量；掺加粉煤灰等掺合料或掺加相应的减水剂、缓凝剂，改善和易性、降低水灰比，以达到减少水泥用量、降低水化热的目的。

4. 在基础内部预埋冷却水管，通入循环冷却水，强制降低混凝土水化热温度。

5. 在厚大无筋或少筋的大体积混凝土中，掺加总量不超过 20% 的大石块，减少混凝土的用量，以达到节省水泥和降低水化热的目的。

6. 在拌合混凝土时，还可掺入适量的微膨胀剂或膨胀水泥，使混凝土得到补偿收缩，减少混凝土的温度应力。

7. 改善配筋。为了保证每个浇筑层上下均有温度筋，可建议设计人员将分布筋做适当调整。温度筋宜分布细密，一般用  $\phi 8$  钢筋，双向配筋，间距 15cm。这样可以增强抵抗温度应力的能力。上层钢筋的绑扎，应在浇筑完下层混凝土之后进行。

(8) 设置后浇缝。当大体积混凝土平面尺寸过大时，可以适当设置后浇缝，以减小外应力和温度应力；同时也有利于散热，降低混凝土的内部温度。

### 10-7-3-2 降低混凝土温度差

1. 选择较适宜的气温浇筑大体积混凝土，尽量避开炎热天气浇筑混凝土。夏季可采用低温水或冰水搅拌混凝土，可对骨料喷冷水雾或冷气进行预冷，或对骨料进行覆盖或设置遮阳装置避免日光直晒，运输工具如具备条件也应搭设遮阳设施，以降低混凝土拌合物的入模温度。

2. 掺加相应的缓凝型减水剂，如木质素磺酸钙等。

3. 在混凝土入模时，采取措施改善和加强模内的通风，加速模内热量的散发。

### 10-7-3-3 加强施工中的温度控制

1. 在混凝土浇筑之后，做好混凝土的保温保湿养护，缓缓降温，充分发挥

徐变特性，减低温度应力，夏季应注意避免曝晒，注意保湿，冬期应采取措施保温覆盖，以免发生急剧的温度梯度发生。

2. 采取长时间的养护，规定合理的拆模时间，延缓降温时间和速度，充分发挥混凝土的“应力松弛效应”。

3. 加强测温 and 温度监测与管理，实行信息化控制，随时控制混凝土内的温度变化，内外温差控制在  $25^{\circ}\text{C}$  以内，基面温差和基底面温差均控制在  $20^{\circ}\text{C}$  以内，及时调整保温及养护措施，使混凝土的温度梯度和湿度不至过大，以有效控制有害裂缝的出现。

4. 合理安排施工程序，控制混凝土在浇筑过程中均匀上升，避免混凝土拌合物堆积过大高差。在结构完成后及时回填土，避免其侧面长期暴露。

#### **10-7-3-4 改善约束条件，削减温度应力**

1. 采取分层或分块浇筑大体积混凝土，合理设置水平或垂直施工缝，或在适当的位置设置施工后浇带，以放松约束程度，减少每次浇筑长度的蓄热量，防止水化热的积聚，减少温度应力。

2. 对大体积混凝土基础与岩石地基，或基础与厚大的混凝土垫层之间设置滑动层，如采用平面浇沥青胶铺砂、或刷热沥青或铺卷材。在垂直面、键槽部位设置缓冲层，如铺设  $30\sim 50\text{mm}$  厚沥青木丝板或聚苯乙烯泡沫塑料，以消除嵌固作用，释放约束应力。

#### **10-7-3-5 提高混凝土的极限拉伸强度**

1. 选择良好级配的粗骨料，严格控制其含泥量，加强混凝土的振捣，提高混凝土密实度和抗拉强度，减小收缩变形，保证施工质量。

2. 采取二次投料法，二次振捣法，浇筑后及时排除表面积水，加强早期养护，提高混凝土早期或相应龄期的抗拉强度和弹性模量。

3. 在大体积混凝土基础内设置必要的温度配筋，在截面突变和转折处，底、顶板与墙转折处，孔洞转角及周边，增加斜向构造配筋，以改善应力集中，防止裂缝的出现。