

# 早 龄 期 大 体 积 混 凝 土 温 度 应 力 与 裂 缝 的 关 系

杨碧华<sup>1</sup> 李惠强<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院 湖北 武汉 430074)

**摘 要** :温度裂缝严重危害大体积混凝土的结构安全. 目前, 对混凝土温度应力及裂缝的研究不断深入. 两个工程实例的研究表明, 因温度及干缩而产生的拉应力破坏可能发生在混凝土早龄期. 因此, 为防止大体积混凝土温度裂缝产生, 对温度和干缩应力与混凝土强度的验算应从混凝土产生温度应力的起点开始, 贯穿其应力发展的全过程.

**关键词** :早龄期大体积混凝土; 温度应力; 裂缝; 收缩

**中图分类号** :TU375.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-5730(2002)04-0076-02

目前, 人们对大体积混凝土温度裂缝的研究大都只考虑了混凝土后期强度与后期应力的关系. 通过对大体积混凝土强度及应力发展过程的研究, 发现其温度应力在早期有发生峰值的可能, 充分说明应力发展全过程研究对预防混凝土温度裂缝之必要性.

## 1 温度裂缝及产生机理

大体积混凝土因其体积很大, 水化产生的大量水化热无法在短时间内散失, 从而使其内部升温既快又高(图 1). 一般水化开始后 3~5 d 左右, 内部温度可达到最高值. 此时体积亦急剧膨胀. 随后, 由于水化产生的热量减少, 伴随热量的散失, 混凝土内外温度开始缓慢下降, 同时体积收缩.

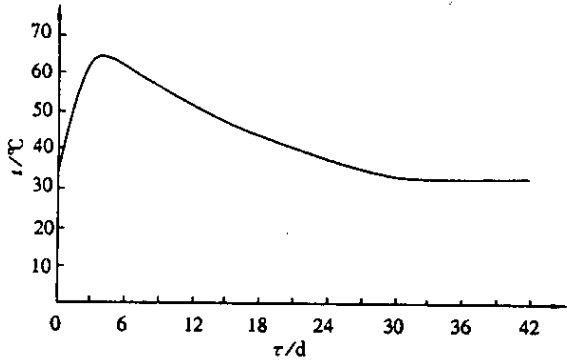


图 1 混凝土水化热升降温曲线

由于导热性差, 大体积混凝土内外降温速度明显不同, 内部降温很慢, 外部降温很快, 内外收缩程度也随之不同, 外部收缩大于内部收缩. 这种内外收缩的差异使得混凝土内部给外部提供了约束, 产生了外表的约束拉应力. 当内外温差过大时, 拉应

力超过混凝土抗拉强度, 混凝土产生表面裂缝, 这种表面裂缝给贯穿裂缝的形成提供了条件.

浇筑后升温过程中混凝土的弹性模量很低, 基本上处于塑性或弹塑性状态, 受到边界约束时产生的压应力很小. 而降温过程中, 弹性模量迅速增高, 约束产生的拉应力也随之增大, 且抵消前期压应力后还存在很大的剩余拉应力. 当剩余拉应力大于混凝土此时的抗拉强度时, 结构便出现内部收缩裂缝. 若与外表裂缝连接便会形成贯穿裂缝.

内部的水分蒸发散失也要引起混凝土体积收缩. 这种失水收缩过程总是由表及里逐步发展. 由于温度不均匀, 失水收缩变形也随之不均匀, 平均的失水收缩助长了温度变形引起的应力, 也可能导致混凝土开裂. 因此在温度应力计算中须考虑失水收缩因素.

## 2 早龄期混凝土抗拉力学性能的发展

混凝土抗拉力学性能早期变化较大, 强度随时间增长很快. 国内外曾有过一些研究成果, 根据大量试验表明, 前苏联水工科学院给出的强度随龄期变化的关系曲线较为合理, 其表达式为<sup>[1]</sup>

$$R_{\tau} = 0.8 R_{90} (\lg \tau)^{1/3}, \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为混凝土龄期(d);  $R_{\tau}$  为  $\tau$  龄期的抗拉强度;  $R_{90}$  为 28 d 龄期的抗拉强度. 混凝土不同龄期的弹性模量  $E_{\tau}$  随龄期变化的规律可用下式表示<sup>[2]</sup>

$$E_{\tau} = E_0 (1 - \beta e^{-\alpha \tau}), \quad (2)$$

式中,  $E_0$  为成龄期的弹性模量, 按规范取值;  $\beta$  和  $\alpha$  为经验系数,  $\beta = 1$ ,  $\alpha = 0.09$ .

3 混凝土温度应力

混凝土的降温过程是缓慢的,在降温过程中,随龄期的增长,混凝土弹性模量亦发生变化,收缩变形亦随时间逐渐增大。混凝土内部温降产生的温度应力在各龄期不同,同时考虑到徐变的影响,不同边界约束下混凝土的内部温降产生的温度应力值可按式(3)计算。为了计算方便,把混凝土失水收缩换算成收缩当量温差(也就是收缩产生的变形相当于引起同样变形所需要的温度差)纳入温度应力计算<sup>[1]</sup>,即

$$\sigma_{x\max}^* = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i = -\frac{\alpha}{1-\mu} \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch}\beta_i L/2}\right] \Delta T_i E_{(t)} H_{(t,\tau_i)} \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为混凝土线膨胀系数  $1.0 \times 10^{-5}$ ;  $\mu$  为泊松比,当基础为双向受力时取 0.15;  $L$  为基础的长度(mm);  $\Delta T_i$  为第  $i$  段降温差(含收缩当量温差);  $E_{(t)}$  为第  $i$  段降温时混凝土的弹性模量,按(2)式计算;  $H_{(t,\tau_i)}$  为第  $i$  段龄期  $\tau_i$  经过由  $t$  至  $\tau_i$  时间的应力松弛系数,  $t$  为由峰值温度降至环境温度的时间。按上式可计算出各种不同边界条件下新浇混凝土各龄期的应力变化,从而得到混凝土温度应力随龄期变化的近似曲线。

4 混凝土抗拉强度增长曲线与温度应力增长曲线

4.1 实例计算

根据几种不同边界条件,计算出两组大体积混凝土温度应力及抗拉强度值(表 1、图 2 及图 3)。

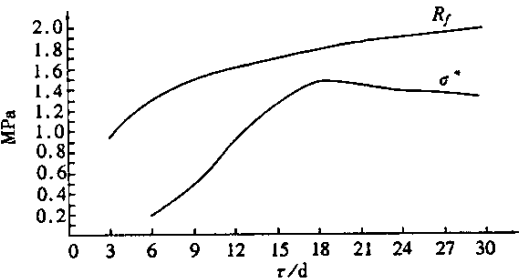


图 2 3.0 m 厚 C45 混凝土温度应力及抗拉强度随龄期变化曲线图

4.2 实例分析

根据以上两组曲线可看出,混凝土抗拉强度随龄期增长而增长,前期增长速度很快,而后期增长速度逐渐变慢,曲线也相对平缓,到 28 d 以后

增长趋势更加缓慢。

表 1 实例各项计算值

T/d	3.0 m 厚 C45			2.5 m 厚 C20		
	$R_f(\tau)$ /MPa	$E(\tau)/10^4$ N·mm <sup>-2</sup>	$\sigma^*$ /MPa	$R_f(\tau)$ /MPa	$E(\tau)/10^4$ N·mm <sup>-2</sup>	$\sigma^*$ /MPa
3	0.928	0.793		0.537	0.615	
6	1.286	1.39	0.197	0.744	1.08	0.162
9	1.473	1.86	0.45	0.853	1.443	0.307
12	1.599	2.21	0.91	0.926	1.717	0.411
15	1.694	2.48	1.25	0.98	1.926	0.458
18	1.769	2.69	1.46	1.02	2.085	0.462
21	1.831	2.85	1.45	1.06	2.21	0.477
24	1.884	2.96	1.37	1.09	2.30	0.462
27	1.92	3.05	1.37	1.11	2.37	0.487
30	1.96	3.13	1.31	1.14	2.43	0.509
33	—	—	—	1.16	2.47	0.521
36	—	—	—	1.18	2.5	0.533

与抗拉强度不同,温度应力值与诸多因素有关,曲线较复杂,一般在 15~21 d 左右会有一次峰值,后期应力值可能增大也可能会小于此峰值。

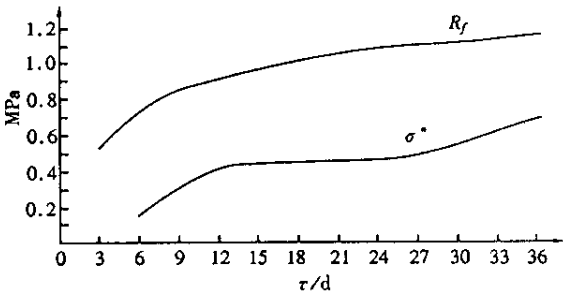


图 3 2.5 m 厚 C20 混凝土温度应力及抗拉强度随龄期变化曲线图

图 3 和图 2 中温度应力曲线有所不同,图 3 后期曲线向上趋势明显,从理论分析可以看出,低标号混凝土的水灰比较大,混凝土含水较多,失水干缩值要比高标号混凝土大得多。高标号混凝土水泥用量大,所以前期水泥水化温度高,温度应力较大,随着温度下降趋于平稳,其应力值逐渐变小。而低标号混凝土随龄期发展失水收缩增加,应力值有所增加。所以低标号混凝土前期虽不易因温降应力产生裂缝,但后期因失水收缩应力过大产生裂缝的可能性仍然存在。

可以看出,如果混凝土内部温度应力与抗拉强度较接近时,应力曲线与抗拉强度曲线在 30 d 以前是有可能相交的,所以在验算大体积混凝土是否能抵抗温度应力时,只选择龄期的第 30 d 作为抗裂验算点是不太可靠的,应该验算早龄期(一般 30 d 前)其应力和强度发展变化的全过程。

(下转第 81 页)

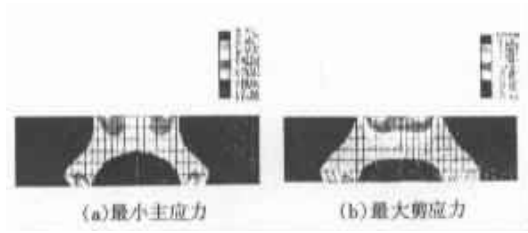


图 3 对角纵剖面应力分布图

参 考 文 献

[ 1 ] Reissner E. The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plate[ J ]. JAM ,1945 ,12 69 .

[ 2 ] Fossum , A. F. . Influence of rotatory inertia on steady-state crack propagation in a finite plate subjected to out-of-plane bending[ J ]. JAM ,1978 ,45( 1 ) :130 .  
[ 3 ] 曹志远 ,杨昇田 .厚板动力学理论及其应用[ M ].北京 :科学出版社 ,1983 .  
[ 4 ] Qian Gu , Bo Peng . Three-dimensional Finite Element Modeling and Nonlinear Analysis of Grouped Piles Thick Cap [ A ]. Theories and Applications of Structural Engineering [ C ]. 昆明 :云南科技出版社 ,2000 8 :453 - 458 .

Establishment of the Fundamental Dynamic Equation for Thick Pile-cap

GU Qian<sup>1</sup> PENG Bo<sup>2</sup> SUN Cheng-fang<sup>3</sup>

( 1. College of Civil Eng. & Architecture , WUT , Wuhan 430070 , China ;  
2. Hubei Eng. Consulting Co. , Wuhan 430071 , China ;  
3. Guangxi Univ. of Tech. , Liuzhou 545006 , China )

**Abstract** :Based on the dynamic theory for thick-plate structure , the dynamics problem about thick pile-cap is analyzed. The fundamental dynamic equations for thick pile-cap bearing vertical seismic load and vertical vibrating load are constructed , as well as the boundary conditions of stress and displacement , which lay a foundation for the dynamic calculation analysis of thick cap.

**Key words** thick pile-cap ; thick-plate structure ; dynamics ; basic equation

( 上接第 77 页 )

从应力计算假定中可以看出 ,混凝土的降温必须是均匀的 ,如果在早龄期混凝土遭受寒潮或大风袭击 ,突然大幅降温 ,内部温度梯度太大 ,此点的应力值也相应较大 ,混凝土产生裂缝的可能性大大提高 .同时 ,干燥会加剧混凝土收缩变形而增大其应力<sup>[ 3 ]</sup> .所以 ,在混凝土施工时 ,特别是大体积混凝土施工时 ,一定要做好保温保湿养护工作 ,让混凝土在较均匀降温和湿润的环境中逐渐增长其

抗拉和抗压强度 .

参 考 文 献

[ 1 ] 王铁梦 .大体积混凝土的瞬态温度场和温度收缩应力的计算机仿真[ J ].工业建筑 ,1990 ( 1 ) 37 - 42 .  
[ 2 ] 赵志缙 .高层建筑施工手册[ M ].上海 :同济大学出版社 ,1996 .  
[ 3 ] 朱伯芳 .大体积混凝土温度应力与温度控制[ M ].北京 :中国电力出版社 ,1998 .

Temperature Stress and Crack of the Early Age Mass Concrete

YANG Bi-hua<sup>1</sup> LI Hui-qiang<sup>1</sup>

( 1. College of Civil Eng. & Mechanics , HUST , Wuhan 430074 , China )

**Abstract** :Thermal crack is harmful to concrete structure . Research of the temperature stress and crack has got great progress . With two instances the failure maybe take place during the concrete early age is indicated . So concrete temperature stress , shrink stress and tensile strength should be monitored as soon as thermal stress coming into being and through out the whole process of tensile strength 's development .

**Key words** early age mass concrete ; temperature stress ; crack ; shrink