

混凝土热损伤试验研究

王振波¹,徐道远¹,王向东¹,姬秀文²

(1. 河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098 2. 南京建筑工程学院土木系,江苏 南京 210009)

摘要 利用电测及超声波测试技术测试了混凝土拱型试件制品前缘处热应变及热损伤,给出该结构在温度荷载作用下的热损伤试验结果.文中分析了温度荷载对混凝土结构的热损伤影响,并解释了混凝土热损伤破坏机理.试验成果为进行混凝土热损伤方向的理论研究及工程设计提供了依据.
关键词 混凝土 热损伤 试验
中图分类号 :TU375.1 30346.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2001)06-0094-05

混凝土结构内部产生裂缝,将破坏结构的整体性,从而影响结构物的安全,这一直是混凝土结构重要的研究课题.结构物运行期间裂缝的形成与扩展,温度作用是一个重要的因素.自 1958 年 L. M. Kachanov 提出有关材料损伤的简单模型以来,国内外一些学者将损伤理论应用于分析混凝土裂缝的形成和扩展,并已取得成效,认为损伤理论比较适用于分析混凝土的开裂成因及开裂过程,因为混凝土的开裂过程(即损伤发展过程)是连续的,并在很小的应力或应变下即已产生微裂缝,且裂缝扩展方向几乎和最大主应力方向垂直,而各种原生缺陷(微裂缝或微空隙)可作为初始损伤处理^[1].但所取得的研究成果几乎都是机械荷载下的损伤问题,有关温度荷载下的混凝土材料或混凝土结构的热损伤理论研究及试验研究的文献目前还不多见.作者用电测及超声波检测技术对一组受连续升温作用的混凝土拱型试件进行了试验,研究了混凝土结构温度荷载作用下的热损伤规律及缺口前缘裂缝萌生和发展的规律,并对混凝土的热损伤机理作了分析.试验成果与分析为进行混凝土热损伤方向的理论研究提供了参考依据.

1 试件设计及试验方案

试件设计成半圆拱,拱的下部连一横梁,整体成一自约束体系.圆拱外径 450 mm、内径 300 mm、底部横梁高 150 mm,试件侧向厚 200 mm.试件的材料配比为水泥:砂:碎石:水 = 1:1.8:3.6:0.5,水泥为 425[#] 普通硅酸盐水泥,砂为建筑黄砂,碎石粒径为 5 ~ 20 mm,试件共 3 个.

加载方式为拱内升温,热源为电加热板,为保证热源温度场均匀,将加热板放入预制的金属盒内,金属盒的形状与试件内拱相同,在金属盒外部再加上一层紫铜片,并在金属盒与紫铜片之间留有一定间隙.加热板通电生热后,热流穿过金属盒,再穿过间隙和紫铜片,再传递到混凝土试件内拱壁,以实现混凝土拱内表面温度场尽可能均匀.为使试件下部的横梁能起约束作用,在横梁上加一层隔热保温层,以防止热源热量传入横梁使横梁变形而松弛约束作用.试件两侧面也加隔热层,保证热源热量只向试件内拱面传送.试件外拱面则与空气自然接触.

拱内加热后,由于拱外壁边界为气温,拱内外壁形成温差,热量将经由内壁向外壁传递.同时拱内壁将因升温而变形,但由于拱脚处有不受升温影响的拉杆约束,因此必将使拱不断上凸而使拱外壁受拉,并最终在外拱壁中间部位某处开裂,且裂纹将向内壁延伸.为了控制裂缝萌生的位置及开裂方向,浇筑试件时在拱顶外侧中部预留一人工缺口,缺口深 50 mm,顶端为圆弧形.试件如图 1 所示.

为测量缺口顶端前缘的损伤及开裂情况,采用了超声和电测两种方法.前一方法是在缺口两侧对称布置 5 组测点(图 1),按文献[2]逐对用超声测试仪测量超声波速,以确定缺口顶端前缘因拱内升温导致发生微裂纹的损伤程度;后一方法从切口顶端开始,沿向下方向平行贴 5 片电阻应变片(图 2),并按电测原理测量因

拱内升温导致的应变片方向的拉伸应变,以分析该位置微裂纹萌生及是否开裂的情况.考虑到试件两侧微裂纹萌生及扩展的不均匀性,在试件两侧对称贴片以便取其平均值,故每个试件共贴 5 对 10 片工作片.在温度电测中补偿片是很重要的,它必需补偿掉由电阻片环境温度及电阻片因通电发热升温所引起的附加应变,而又使电阻片不会产生工作应变.笔者试验采取的方法是将补偿片虚贴在一混凝土薄片上,而混凝土薄片放在测点附近,并与试件一样置于保温层内.从而工作片所测得的仅为由温升而引起的试件变形产生的应变.应变测量采用 ZY01 型智能应变仪,10 个工作片自动扫描量测,采样速度为 3 点/s,应变仪的精度为 $\pm 0.1\%$,分辨率为 $10^{-6} \epsilon$.

温度为逐级升加,由触点温度计自动控制,每级持续 5 min,以便完成超声和应变测试.温度测点布置在试件内拱壁、外拱壁、缺口前缘及每一应变片处(图 2),触点温度计由相应位置保护层处钻孔插入,各点温度由仪器数字显示.

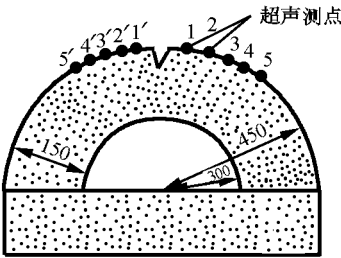


图 1 混凝土试件及超声测点布置

Fig.1 Concrete sample and arrangement of ultrasonic measurement points

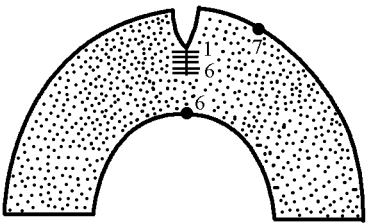


图 2 电阻片及温度测点布置

Fig.2 Arrangement of resistance gauges and temperature measurement points

2 试验过程及成果分析

2.1 超声测试

试验开始前先将 T 和 R 换能器置于人工缺口同一侧,选 5 点采用平测法分别读取测试的声时值.两个换能器内边缘弧线间距及声时测试结果见表 1.实测距离为 T 和 R 换能器之间的直线距离,可通过弧线间距计算得到.其计算式为

$$\bar{l}_{i0} = \sin[(\hat{l}_{i0}/900) \times 180/\pi] \times 900 \tag{1}$$

式中: $\bar{l}_{i0}$ ——T 和 R 换能器之间的直线距离; $\hat{l}$ ——T 和 R 换能器之间的弧线距离.

表 1 同侧声时测试结果

Table 1 Measured results of ultrasonic wave transmitting time

弧线间距/mm	直线测距/mm	实际测距/mm	实测声时值/ μs	波速/($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	平均波速/($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
100	99.8	101.3	26.4	3.84	3.82
150	149.4	150.9	39.3	3.84	
200	198.5	200.0	52.8	3.79	
250	246.9	248.4	65.3	3.80	
300	294.7	296.1	77.8	3.81	

再进行跨切口声时测量,以进行未加温时跨切口与不跨切口两种测试结果的比较.跨切口声时测量结果见表 2.

表 2 跨切口声时测试结果

Table 2 Measured results of ultrasonic wave transmitting time for span breach

弧线间距/mm	直线测距/mm	实际测距/mm	实测声时值/ μs	波速/($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	平均波速/($\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)
100	99.8	143.9	37.5	3.83	3.81
150	149.4	177.0	46.3	3.82	
200	198.5	217.8	57.5	3.79	
250	246.9	259.1	68.1	3.81	
300	294.7	302.2	79.4	3.81	

然后进行升温测试,温度荷载等级以拱型试件内外壁温度差 5℃为一级,超声测试结果见表 3(典型试件成果)。

表 3 温度荷载作用下声时测试结果

Table 3 Measured results of ultrasonic wave transmitting time under temperature loads					
温 差 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	测点 1 声时 值 $t_1/\mu\text{s}$	测点 2 声时 值 $t_2/\mu\text{s}$	测点 3 声时 值 $t_3/\mu\text{s}$	测点 4 声时 值 $t_4/\mu\text{s}$	测点 5 声时 值 $t_5/\mu\text{s}$
5	38.0	46.8	57.5	68.2	79.5
10	38.3	47.1	57.8	68.3	79.6
15	38.7	47.3	58.1	68.4	79.7
20	39.1	47.6	58.2	68.6	79.8
25	39.5	47.8	58.4	68.7	79.9
30	39.8	48.1	58.7	68.8	80.0
35	40.3	48.6	59.1	68.9	80.1
40	40.6	48.9	59.2	69.3	80.1
45	40.9	49.2	59.5	69.5	80.3
50	41.2	49.3	59.6	69.6	80.4
55	41.4	49.5	59.7	69.8	80.5

从表 1 和表 2 所给出的测试结果可以看出初始波速基本相同,说明并不因跨切口而影响波速.波速改变只会是超声波传播路径中的损伤而造成.因而用超声波测试混凝土结构的损伤是可行的.

根据声时测试结果可计算超声波的传播速度.理论上,混凝土材料未受损伤状态下的纵向波速为^[3]

$$v_l^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

(2)

受损伤状态下混凝土材料的纵向波速为

$$\tilde{v}_l^2 = \frac{\tilde{E}}{\tilde{\rho}} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

(3)

式中: v_l, E, ρ ——未受损混凝土材料的纵向波速、弹性模量和密度; μ ——泊松比; $\tilde{v}_l, \tilde{E}, \tilde{\rho}$ ——受损混凝土材料的纵向波速、弹性模量和密度.

损伤度可由式 $D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$ 进行计算.

根据文[3],泊松比可认为不随损伤而变化,且混凝土损伤前后的密度无明显的变化.将式(2),(3)代入损伤度计算式,则

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} = 1 - \frac{\tilde{v}_l^2}{v_l^2}$$

(4)

对应各级温度荷载损伤度的计算结果见表 4.

表 4 损伤度的计算结果

Table 4 Calculated results of concrete damage			
温差 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	波速 $\tilde{v}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	波速比 $(\tilde{v}/v_0)^2$	损伤量 D
5	3.787	0.989	0.011
10	3.757	0.972	0.028
15	3.718	0.952	0.048
20	3.680	0.933	0.067
25	3.643	0.914	0.086
30	3.615	0.900	0.100
35	3.571	0.878	0.122
40	3.544	0.865	0.135
45	3.518	0.853	0.147
50	3.493	0.841	0.159
55	3.480	0.834	0.166

超声测试损伤是基于温度荷载作用下超声波速的变化,为了能够得到试件上缺口前缘小范围内的损伤结果,表 4 中所取的波速为第一测点温度变化时所计算的波速.

图 3 给出的是本次试验的损伤度结果与 D. Sumarto 研究成果^[4]的比较,可看出两者所反映的损伤规律基本上是一致的。

2.2 应变测试

应变测试是在施加各级温度荷载时与超声测试同时进行的。

图 4(a)是缺口前缘混凝土材料的应变随温差的变化曲线,因 3 个试件差别不大(10% 以内),故取用 3 个试件的平均值。图中横坐标上所给出的温差是测点所测的温度与拱型试件内壁所测的温度之间的差值,所以图中的各条曲线所反映的是对应测点处材料的温差与应变的关系曲线。本次试验进行到前 3 片应变片损坏,即裂缝已在前 3 贴片处萌生为止。3 个试件前三处应变片均在温差为 45~55℃之间损坏。从图 4(a)上还可以看出,在温差小于 15℃时,混凝土的 ΔT 与 ϵ 的关系基本上是线性的,温差大于 15℃后则表现出明显的非线性特征,至损坏时经历了较大的温差。另从试验过程中观察到,萌生的微裂缝呈现出逐段的向前发展的态势。当按第一贴片处所确定的温差达 55℃时,第一、第二片应变片损坏,第三片并未损坏,表明裂缝尚未扩展到此处。图 4(b)给出的仍是混凝土材料的温差-应变曲线,但图中的横坐标所表示的温差是第一测点所测温度与内拱壁所测温度的差值,其他 4 条曲线所描述的是对应第一测点温差的同一时刻所测的各测点的应变。由于混凝土材料导温性能较差,所以在加温过程中,接近内壁测点(第五测点)处材料的温度要比较远测点(第一测点)处材料温度高,即同一时刻第一测点所测温差较大,第五测点所测温差就小,且第五测点所测温度与初始温度的差值(在此称为自身温差)较大,第一测点自身温差小。但从图 4(b)上明显看出,同一时刻所测的应变,第一测点应变最大而第五测点应变最小。这说明,在温度荷载作用下,试件的破坏取决于内外壁温差,而材料自身的温差并不是关键。

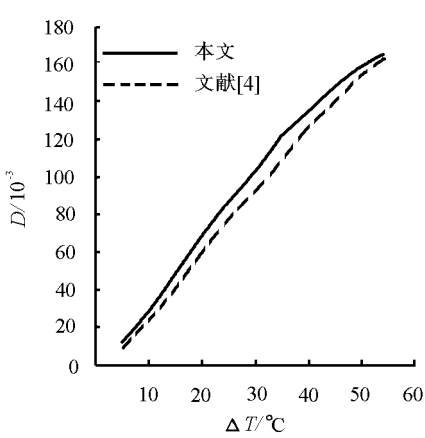


图 3 损伤试验结果
Fig.3 Tested result of concrete damage

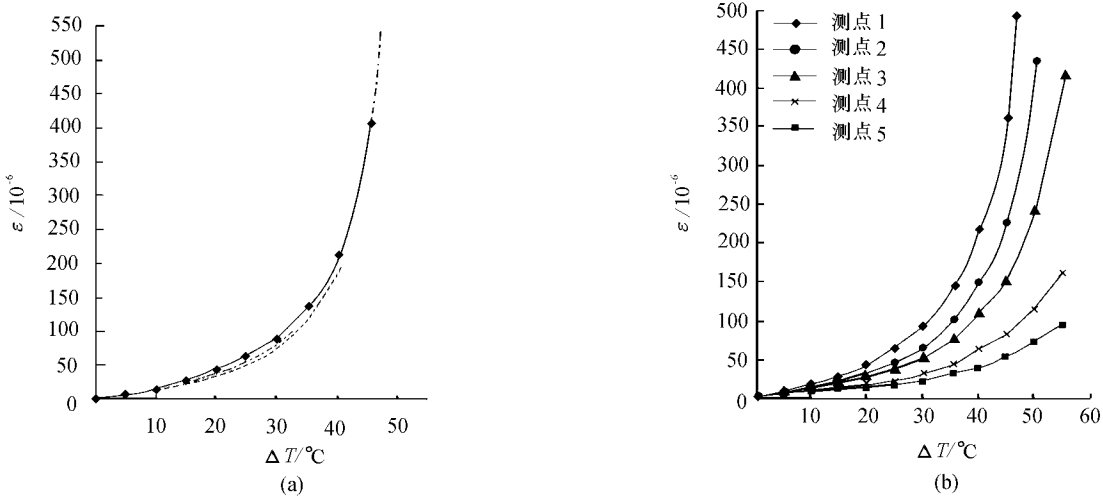


图 4 温差应变试验曲线
Fig.4 Temperature increment-strain tested curve

3 混凝土热断裂损伤破坏机理

混凝土在受到荷载作用之前,就已存在一定的微裂缝或微空隙,即存在初始损伤。混凝土受到热荷载作用后,损伤便开始发展,温差不大时损伤积累很缓慢,混凝土处于弹性状态,当温差达到一定的数值后,并经过一段时间的作用,裂缝萌生。萌生的微裂缝前缘处的混凝土材料则表现出断裂行为,微裂缝发生扩展,从此意义来说,混凝土温度荷载作用下的损伤积累与断裂都具有时间效应。

由于在温度荷载作用下裂缝是由温差引起的,且裂缝的发展是呈现间歇性的,即裂缝向前扩展了一段后便会停止,当继续增加的温差达到某一新的数值并作用一段时间后,裂缝将再次向前扩展。对于混凝土结构来说,温差只不过会产生局部区域性的裂缝,温差的连续变化才可能导致裂缝的不断扩展,并对结构产生危

害. 裂缝的出现使得混凝土结构中温度应力发生重分布, 高应力区的温度应力产生一定程度的松弛, 裂缝总是首先出现在高应力区, 但由于应力松弛, 混凝土结构损伤的发展在一定程度上受到抑制, 即混凝土结构的损伤度是随温差的增加而增加的, 但损伤速率是趋于平缓的.

4 结 论

- a. 采用电测与超声测试相结合的方法测试混凝土结构的温度损伤, 能够实现微观损伤的宏观测量.
- b. 混凝土的热损伤积累主要取决于温差的变化, 温度荷载作用下, 裂缝的扩展有明显的断裂行为, 并具有时间效应. 这对混凝土结构施工期温度裂缝如何控制将有所启迪.
- c. 通过混凝土结构热损伤试验研究, 分析混凝土热损伤破坏机理, 在此基础上可建立混凝土热损伤模型.

参考文献:

[1] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及应用 [M]. 北京 国防工业出版社, 1993. 3 ~ 12.
[2] 陕西省建筑科学研究院等. 超声法检测混凝土缺陷技术规程 [M]. 北京 中国计划出版社, 1992. 4 ~ 8.
[3] 勒迈特 J. 损伤力学教程 [M]. 倪金刚等译. 北京 科学出版社, 1996. 23 ~ 31.
[4] Sumarac D, Krasulja M. Damage of plain concrete due to thermal incompatibility of its phases [J]. International Journal of Damage Mechanics, 1998, 7 : 129 ~ 141.

Experimental Study on Concrete Thermal Damage

WANG Zhen-bo¹, XU Dao-yuan¹, WANG Xiang-dong¹, JI Xiu-Wen²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. Dept. of Civil Engineering, Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, Nanjing 210009, China)

Abstract The thermal strain at and thermal damage to the notch of the arch concrete specimen are tested by the electrometrical method and supersonic method, and the thermal damage to the specimen structure under thermal loads is described. The effect of thermal loads on thermal damage is indicated, and the failure mechanism of concrete thermal damage is analyzed. The results provide a foundation for theoretical research of concrete thermal damage and for engineering design.

Key words concrete ; thermal damage ; test