

# 连续变温下早龄期混凝土应变时变规律试验研究

秦煜<sup>a</sup>, 刘来君<sup>a</sup>, 支喜兰<sup>b</sup>, 张柳煜<sup>a</sup>

(长安大学 a. 公路学院; b. 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064)

**摘要:**针对早龄期混凝土开裂现象,为掌握其应变变化规律,通过日大气温度变化影响下早龄期混凝土应变随时间变化的模拟试验,采集试件的应变及重量数据,分析早龄期混凝土在日气温变化影响下的应变变化规律。研究表明:在日气温变化的升温和降温过程中,早龄期(3d内)混凝土均数次出现量级达 $100 \times 10^{-6}$ 的剧烈收缩,受到约束时可产生易使混凝土开裂的应力;不同水灰比混凝土之间的膨胀应变差值、收缩应变差值分别可达 $100 \times 10^{-6}$ 、 $200 \times 10^{-6}$ 。

**关键词:**混凝土;应变;时变规律;连续变温;早龄期

**中图分类号:**U444 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)02-0058-05

## Experimental Analysis of Time-Dependent Law of Early Age Concrete Strain Considering Continuous Temperature Variation

QIN Yu<sup>a</sup>, LIU Lai-jun<sup>a</sup>, ZHI Xi-lan<sup>b</sup>, ZHANG Liu-yu<sup>a</sup>

(a. School of Highway; b. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

**Abstract:** An experiment was carried out for the analysis of time-varying regularity of early-age concrete strain under the influence of free air temperature changes. The strain data and the weight of specimens were collected. It is found that the severe shrinkage of early age ( $\leq 3d$ ) concrete appears in the course of heating and cooling of daily temperature. And the magnitude of the severe shrinkage is  $100 \times 10^{-6}$ . The expansion strain difference is up to  $100 \times 10^{-6}$  for different water cement ratio concrete, and the shrinkage strain difference is up to  $200 \times 10^{-6}$ .

**Key words:** concrete; strain; time-dependent law; consecutive temperature variation; early age

混凝土桥梁构件早期开裂一直是业内关注的重要问题。受到自身或外界约束时,早龄期混凝土应变(由水化反应、收缩等内因和环境温度、湿度等外因产生)会产生应力,从而导致混凝土开裂,进而影响桥梁结构的耐久性,甚至安全性。现浇混凝土桥梁构件早期开裂现象尤为多见。

早龄期混凝土应变问题已有较多研究成果。Aitcin等提出混凝土自收缩主要发生在初凝至1d龄期内,之后自收缩增加速率趋于缓慢<sup>[1]</sup>。Nassif等认为对于非常低的 $w/c + p$ ,粉煤灰轻集料提高

了混凝土自收缩性能<sup>[2]</sup>。高小建等认为其他配合比参数不变时混凝土早期自收缩与水灰质量比的关系近似成二次方程<sup>[3]</sup>。张武满和孙伟<sup>[4]</sup>指出高性能混凝土早期自收缩随测试时间、砂率和针片状骨料含量的增加而增大,随骨料最大粒径的增大而减小。已有研究工作主要集中在混凝土早期收缩的影响因素<sup>[1,3-6]</sup>、收缩试验研究<sup>[7-8]</sup>、各种混凝土早龄期收缩特性<sup>[9-11]</sup>等。但早龄期混凝土在大气温度下应变随时间变化的试验研究尚未见报道。

通过早龄期混凝土应变随温度、时间变化的模

收稿日期:2010-10-15

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2009319812050);甘肃交通科技项目(2009-05)

作者简介:秦煜(1983-),男,博士生,主要从事混凝土桥梁时变效应研究,(E-mail) qqqqyyyyyq@163.com。

刘来君(通讯作者),男,博士,教授,博士生导师,(E-mail) liulj@chd.edu.cn。

拟试验,采集混凝土试件应变及重量变化数据,分析不同配合比混凝土在温度影响下的应变差异,探讨在日气温连续变化影响下早龄期混凝土应变随时间变化的规律。

## 1 试验方案设计

试验目的:通过中国北方(指淮河、秦岭和昆仑山以北的广大区域<sup>[12]</sup>)7月份日气温变化模拟环境下的应变试验,得出早龄期混凝土在日气温连续变化影响下的应变时变规律。受气候影响,夏季是中国北方桥梁施工的主要季节。故选取7月作为模拟试验的时间点。

表1 温度随时间变化历程

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
时间/h	—	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
温度/℃	18.5	21.3	24	26.8	29.5	32.3	35	32.3	29.5	26.8	24	21.3	18.5

1951—2000年间中国北方<sup>[12-13]</sup>7月平均日最高气温35℃,平均日最低气温18.5℃;夏季(6—8月)平均最高气温28.9℃,平均最低气温17.4℃。中国北方夏季(6—8月)日最低气温与最高气温出现时间之间相差10~12h,试验取12h。

5)环境箱内温度、试件应变数据采集周期为2min。应变数据采集持续2个历程,共计48h。在试验开始前、第1个24h结束、第2个24h结束等3个时间点,采集试件重量数据。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 原材料及配合比

水泥,采用陕西秦岭水泥厂生产的“秦岭”牌P.042.5普通硅酸盐水泥。细集料,采用乳山市徐家村砂场的中砂。粗集料,采用烟台市利龙石子厂的石灰岩碎石。减水剂,采用徐州市超力建筑材料有限公司生产的CUF-3引气缓凝高效减水剂。混凝土试件的配合比见表2。

表2 混凝土试件配合比

试件编号	水灰比	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				砂率/%	减水剂/(kg·m <sup>-3</sup> )
		水泥	水	细集料	粗集料		
A组	0.36	403	145	685	1 167	37	6.05
B组	0.44	330	145	712	1 213	37	4.95

注:1.混凝土配合比计算时按照密度法,密度为2 400 kg/m<sup>3</sup>。  
2.减水剂掺量按水泥用量的1.5%取用。

### 2.2 试验仪器及方法

试验仪器为长安大学公路学院支喜兰教授和胡

试验流程:

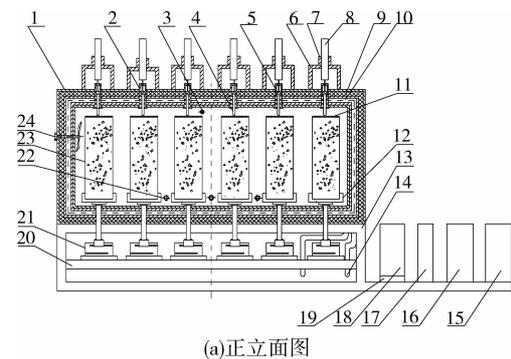
1)制作2组(每组6个)不同配合比的混凝土试件,规格尺寸为100 mm×100 mm×400 mm。

2)试件在养生室标准养护8 h后,即刻移入收缩变形测试仪环境箱内。

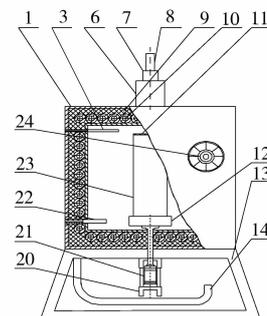
3)环境箱内温度设为18.5℃,在试件移入之前预热1 h。待试件移入后,保持环境箱内恒温18.5℃。恒温1 h之后,确定位移传感器初始值,开始模拟环境下的应变试验。

4)环境箱内温度随时间变化历程安排见表1,升温(降温)速率恒定为±1.4℃/h。一个完整的温度变化历程为T0~T12,共计24 h。

宗文自主研发的“材料收缩变形测试仪”,如图1所示。



(a)正立面图



(b)测立面图

图1 材料收缩变形测试仪

材料收缩变形测试仪由:(1)环境箱(1为图中编号,下同)、(2)套管、(3)温度传感器、(4)传导杆、(5)胶木垫、(6)位移传感器支架、(7)套管、(8)位移传感器、(9)保温层、(10)冷凝管、(11)玻璃垫板、(12)试件支架、(13)支架、(14)压缩机管、(15)打印机、(16)工业控制计算机、(17)A/D转换器、(18)压

销机、(19)减震垫、(20)横梁、(21)称重传感器、(22)加热带、(23)试件、(24)风扇联接构成。

环境箱的上顶面安装有6个位移传感器支架,每个支架上配置一个通过导线与A/D转换器相连接的位移传感器。其型号为WYD,位移测试分辨率达到万分之三,精度为 $0.1\ \mu\text{m}$ ,可确保测试结果的精度。位移传感器将接收到的位移信号转换成电信号输出到A/D转换器,后者将输入的电信号转换成数字信号输出到工业控制计算机。

环境箱底面的横梁固定在支架上。横梁上用螺纹紧固联接件安装有6个称重传感器,型号为BK-5系列。称重传感器通过导线与A/D转换器相连接。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 收缩应变分析

图2为以 $t_1$ 为零点的24 h内,A、B 2组试件应变随温度、时间的变化。试件放入养生室时间设为 $t_0$ ,时刻 $t_1 = t_0 + 9\ \text{h}$ (8 h 养生+1 h 恒温), $t_2 = t_1 + 24\ \text{h}$ 。图中应变数据为每组6个试件应变的算术平均值。膨胀应变为正值,收缩应变为负值。图3为以 $t_2$ 为零点的24 h内,A、B 2组试件应变随温度、时间的变化。

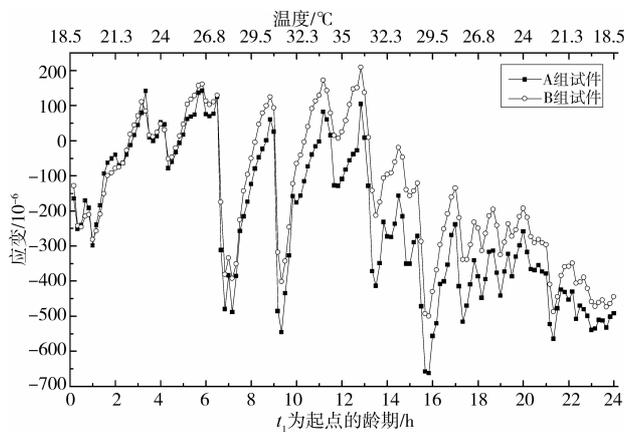


图2 时刻 $t_1$ 为起点的试件应变

由图2—3可见,第1个24 h内的收缩应变大于第2个24 h,但膨胀应变小于后者。这是因为随着龄期增长(水泥水化程度提高),混凝土中孔隙率减小,相同环境温度影响下混凝土的收缩应变减小、膨胀应变增大。

18.5~35 $^{\circ}\text{C}$ 升温过程中(即0~12 h之间),混凝土应变整体呈膨胀走势,但出现数次膨胀收缩交替变化,其中有2次剧烈收缩的应变差值(即1次剧烈收缩的应变变化幅度)可达 $600 \times 10^{-6}$ 以上,见图4。35~18.5 $^{\circ}\text{C}$ 降温过程中(即12~24 h之间),混

凝土应变整体呈收缩走势,并伴随着幅度较小的膨胀收缩交替且频次较高,但仍会出现较为剧烈的收缩,其应变差值可达 $500 \times 10^{-6}$ 以上,见图5。这主要是因为:1)混凝土内部温度对环境温度的响应过程为具有一定滞后性的热传导过程。2)混凝土中毛细孔水、吸附水、层间水散失引起的干燥收缩。而且环境温度升高将导致混凝土干燥收缩增大。因为温度越高,水泥石中托勃莫来石凝胶的层间水失去越多,水泥石收缩越大。3)混凝土中干燥收缩与温度的扩散速度不同。温度扩散速度比干燥扩散要快大约1 000倍。

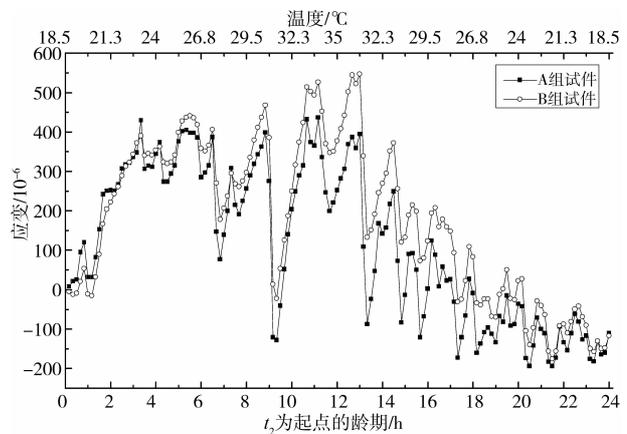


图3 时刻 $t_2$ 为起点的试件应变

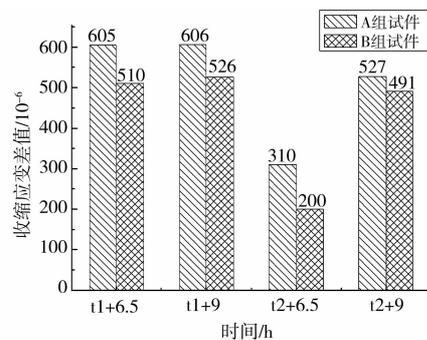


图4 升温过程中剧烈收缩应变

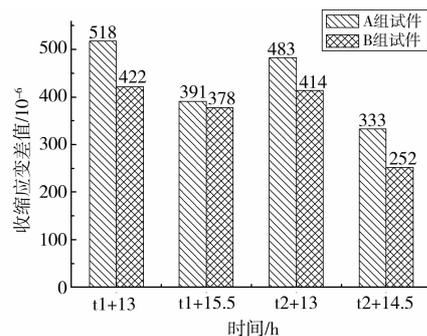


图5 降温过程中剧烈收缩应变

图2—3显示,混凝土并非在35℃(即温度最高点)膨胀应变达到最大,而是在最高温度过后约1h。在膨胀应变达到最大值后,将会出现降温过程中的第1次剧烈收缩。混凝土内部温度对环境温度是具有一定滞后性的热传导响应过程。响应过程取决于两个方面:1)作为驱动力的混凝土内外温差或温度梯度;2)表征混凝土热物性的导热系数或导温系数的大小。试验环境箱内升降温速率恒定,所以较低的导热系数导致混凝土内部温度对环境温度的滞后响应。

同时应注意到,在整个试验过程中,混凝土应变增加或减小的变化速率大致相同。这是受到试验环境箱内恒定升降温速率的影响。出现应变变化速率不相同的原因可能是环境箱内温度变化速率与混凝土中温度扩散速度的差值发生变化(水分散失等引起),从而混凝土内外温度梯度产生变化,导致应变变化速率改变。

### 3.2 混凝土重量变化

表3为各阶段试件的平均重量。 $w_0$ 为试验开始前各组试件重量的平均值。 $w_1$ 为 $t_1+24$ h时刻各组试件重量的平均值。 $w_2$ 为 $t_2+24$ h时刻各组试件重量的平均值。由 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 可知,混凝土试件重量减小。这是由于混凝土中的水和环境空气处于某一平衡状态,如果周围介质空气的湿度降低或温度升高,混凝土就会发生水分散失。存在于硬化水泥浆体中的水包括毛细孔水、吸附水、层间水和化学结合水。除化学结合水存在于水化反应的水化物晶体中不可散失外,其余3种水在环境湿度低于一定值时都可散失。

表3 试件混凝土重量 kg

试件编号	$w_0$	$w_1$	$\Delta_1 = w_1 - w_0$	$w_2$	$\Delta_2 = w_2 - w_1$	$\Delta_1 + \Delta_2$
A组	10.338	10.304	0.034	10.289	0.015	0.049
B组	10.215	10.178	0.037	10.158	0.020	0.057

表4为2组混凝土试件的重量变化率。可见,随着龄期增长,重量变化率减小。第1个24h的混凝土重量变化率大约是第2个24h的2倍。在相对湿度较大或湿混凝土开始干燥时,混凝土重量变化由毛细管水散失引起;在相对湿度较小时,重量变化是由于先后散失了吸附水和层间水。毛细管水与固相的联系力很小,吸附水、层间水与水泥石固相之间是物理吸附作用。所以随着混凝土不断干燥及水分散失难度增大,混凝土重量变化率会逐渐减小。

同时可看到,A组试件重量变化率小于水灰比相对较大的B组试件。这是因为水灰比小的混凝土

微观结构密实、毛细孔平均孔径小,不易与环境进行水分交换,水分散失难度较大。

表4 混凝土重量变化率

试件编号	$w_0$ /kg	$(\Delta_1/w_0)/\%$	$(\Delta_2/w_0)/\%$	$(\Delta_1 + \Delta_2)/w_0)/\%$
A组	10.338	0.33	0.15	0.48
B组	10.215	0.36	0.20	0.56

### 3.3 配合比的影响

由图2—3可见,相同水用量、砂率、减水剂掺量,不同水灰比的混凝土,应变随温度、时间变化规律基本相同。表5为2组试件应变的算术平均值。可见,水灰比越小,收缩应变越大、膨胀应变越小。这是因为水灰比较小的混凝土微观结构致密,平均孔径小;毛细孔径越小,内部相对湿度迅速降低,而产生越大的应力和收缩。

表5 应变的算术平均值

试件编号	第1个24h	第2个24h
A组	$-230 \times 10^{-6}$	$+116 \times 10^{-6}$
B组	$-147 \times 10^{-6}$	$+181 \times 10^{-6}$

注:“+”表示该值为膨胀应变,“-”表示该值为收缩应变。

表6为2组试件之间最大应变差值。 $\epsilon_A$ 、 $\epsilon_B$ 分别为A组、B组试件的应变。在温度最高点附近,不同水灰比混凝土之间的膨胀应变差值达到最大。在之后出现的降温过程中第1次剧烈收缩时,收缩应变差值达到最大。因为水灰比是影响早龄期混凝土应变的重要因素。用水量对混凝土收缩的影响比水泥用量更大。在用水量一定的条件下,混凝土干缩随水泥用量的增加而增大,但增大幅度较小。

表6 最大应变差值

类型	第1个24h		第2个24h	
	时间/h	$(\epsilon_A - \epsilon_B)/10^{-6}$	时间/h	$(\epsilon_A - \epsilon_B)/10^{-6}$
膨胀	12.5~13.0	-105	12.5~13.0	-152
收缩	13.0~13.5	-201	13.0~13.5	-221

## 4 结论

1)在3d龄期内,日气温变化影响下,混凝土多次出现量级达 $100 \times 10^{-6}$ 的剧烈收缩。以中国北方7月典型日气温(18.5℃~35℃)变化影响为例,剧烈收缩至少出现4次,应变差值可达 $600 \times 10^{-6}$ 以上。

2)随龄期增长,混凝土重量变化率明显减小。仅水灰比不同的2种混凝土,其应变随温度、时间变化的规律基本相同。但不同水灰比混凝土之间的膨

胀应变差值达  $100 \times 10^{-6}$  以上, 收缩应变差值达  $200 \times 10^{-6}$  以上。

3) 在受到自身或外界约束时, 剧烈收缩应变将会产生极易使混凝土开裂的应力。为减少混凝土桥梁构件早期开裂, 应高度重视日气温变化对早龄期混凝土应变的巨大影响。

#### 参考文献:

- [1] AITCIN P C, NEVILLE A M, ACKER P. Integrated view of shrinkage deformation [J]. *Concrete International*, 1997, 19(9):35-41.
- [2] NASSIF H, NAKIN S, MAQBOOL M. Effect of curing methods on early-age and drying shrinkage of high-performance concrete [C]//TRB 2003 Annual Meeting. Washington DC: National Research Council, 2003: 48-58.
- [3] 高小建, 巴恒静, 祁景玉. 混凝土水灰质量比与其早期收缩关系的研究 [J]. *同济大学学报*, 2004, 32(1):67-71.  
GAO XIAO-JIAN, BA HENG-JING, QI JING-YU. Study on relationship between water-cement mass ratio and early age shrinkage of concrete [J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(1):67-71.
- [4] 张武满, 孙伟. 粗骨料对高性能混凝土早期自收缩的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(4):631-636.  
ZHANG WU-MAN, SUN WEI. Effect of coarse aggregate on early age autogenous shrinkage of high-performance concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(4):631-636.
- [5] CHARRON J P, DENARI E E, BRÜHWILER E. Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses [J]. *Materials and Structures*, 2007, 40(3):269-277.
- [6] 詹树林, 钱晓倩. 起始养护时间对混凝土早期收缩的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(3):359-363.  
ZHAN SHU-LIN, QIAN XIAO-QIAN. Effect of beginning curing time on early age shrinkage of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(3):359-363.
- [7] 田倩, 孙伟, 缪昌文, 等. 高性能混凝土自收缩测试方法探讨 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 8(1):82-89.  
TIAN QIAN, SUN WEI, LIAO CHANG-WEN, et al. Study on the measurement of autogenous shrinkage of high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 8(1):82-89.
- [8] 黄海东, 向中富, 郑皆连. 混凝土结构早期非均匀收缩试验 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23(3):64-69.  
HUANG HAI-DONG, XIANG ZHONG-FU, ZHENG JIE-LIAN. Test of non-uniform shrinkage in concrete structure at early ages [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(3):64-69.
- [9] 杨文武, 钱觉时, 范英儒. 混凝土早期收缩性能试验研究 [J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2009, 26(1):81-85.  
YANG WEN-WU, QIAN JUE-SHI, FAN YING-RU. Experimental research on early age shrinkage of concrete by eddy current method [J]. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2009, 26(1):81-85.
- [10] ISSA M A, ALHASSAN M A, RAMOS J. Glass fiber reinforced latex-modified concrete using a volumetric mixer for production of overlays [J]. *ACI Concrete International Magazine*, 2007, 29(3):48-52.
- [11] TURCRY P, LOUKILI A, HAIDAR K, et al. Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(1):46-54.
- [12] 王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 中国北方地区 50 年来最高和最低气温变化及其影响 [J]. *自然资源学报*, 2004, 19(3):337-343.  
WANG LING, XIE XIAN-QUN, SU WEN, et al. Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern china over the second half of the 20th century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3):337-343.
- [13] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征及其突变性 [J]. *干旱区地理*, 2005, 28(2):176-182.  
GUO ZHI-MEI, MIAO QI-LONG, LI XIONG. Change characteristics of temperature in north china since recent 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(2):176-182.

(编辑 胡玲)