

文章编号:1673-2049(2011)02-0028-04

# 自密实混凝土自由收缩试验

陈峰<sup>1</sup>, 郑建岚<sup>2</sup>

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**进行了自密实混凝土的自由收缩试验,以粉煤灰掺量和混凝土龄期作为影响因素,研究其收缩的发展规律;基于试验数据,通过双曲线方程拟合了自密实混凝土自由收缩的计算式。研究结果表明:自密实混凝土自由收缩随混凝土龄期的增加而增大,后期自由收缩应变增长较缓慢;当粉煤灰质量掺量在40%时,各阶段的自由收缩应变都最小;拟合的自密实混凝土自由收缩计算式可以为自密实混凝土结构相关设计提供参考。

**关键词:**自密实混凝土;自由收缩;粉煤灰;掺量;应变;龄期

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Experiment on Free Shrinkage of Self-compacting Concrete

CHEN Feng<sup>1</sup>, ZHENG Jian-lan<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** Taking incorporation rate of fly-ash and age of concrete as influence factors, the experiment on free shrinkage was conducted in order to study the law of free shrinkage of self-compacting concrete. Based on the test data, the calculating formulae of free shrinkage of self-compacting concrete were put forward by hyperbolic equations. The research results show that free shrinkage of self-compacting concrete grows with age of concrete, and the growth gets slowly in the later. The free shrinkage strain in different stages is the smallest while the incorporation rate of fly ash is 40%. The calculating formulae of free shrinkage of self-compacting concrete can be taken as reference to design of self-compacting concrete structure.

**Key words:** self-compacting concrete; free shrinkage; fly ash; incorporation rate; strain; age

## 0 引言

随着混凝土技术不断发展,人们对混凝土的要求越来越高,希望其在保持优良力学性能的前提下能具有良好的工作性。自密实混凝土由于较低的水胶比以及掺入了外加剂和矿物掺合料使其具有很好的施工和填充性能<sup>[1-2]</sup>,从而在工程中得到越来越广泛的应用。但随着水胶比的降低,矿物细掺合料以及胶凝材料总量的增加,也引发了一系列收缩问题,

影响到了自密实混凝土的耐久性。这就说明,关于自密实混凝土收缩性能的研究是十分必要的;并且,若在加固工程中采用自密实混凝土作为修补材料,其与老混凝土紧密粘结的情况下,较大的收缩必然会导致约束收缩应力产生<sup>[3-4]</sup>,有可能引起修补层开裂<sup>[5-10]</sup>。而混凝土约束收缩的研究则必须建立在自由收缩的基础上,因此本文中笔者以粉煤灰自密实混凝土为材料,进行了不同配合比的自由收缩试验研究。

收稿日期:2011-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50878056);福建省自然科学基金项目(2010J05110)

作者简介:陈峰(1980-),男,福建福州人,讲师,工学博士,E-mail:knicks2000@163.com。

# 1 自由收缩试验

## 1.1 自密实混凝土配制

本文中是以粉煤灰的掺量为主要参数,根据《自密实混凝土设计与施工指南》(CCES 02—2004)的要求,配制了 5 组自密实混凝土。混凝土的原材料为 42.5 普通硅酸盐水泥、福建厦门嵩屿电厂 I 级粉煤灰、闽江中砂(细度模数为 2.6)、石灰岩碎石(粒径为 5~16 mm)以及萘系高效减水剂。控制胶凝材料总用量为  $550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,且石子、砂率、用水量固定不变,只改变粉煤灰的掺量。粉煤灰质量掺量分别为胶凝材料总用量的 20%、30%、40%、50%、60%,所制作的试件分别用 SCC1、SCC2、SCC3、SCC4、SCC5 来表示。

## 1.2 试验装置

自密实混凝土自由收缩试验是参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ 82—85)中的收缩试验进行的。自由收缩试验装置由钢架、两端粘有有机玻璃垫片的混凝土试件和 2 个千分表组成。试验采用钢板组合试模,并采用磁性表座将千分表固定在钢架的钢板上。为了更准确地测量收缩值,在混凝土两端中点处用 502 胶各粘 1 块尺寸为  $10\text{ mm}\times10\text{ mm}\times5\text{ mm}$  的有机玻璃垫片;为了减少摩擦,在钢架和混凝土之间垫 1 块有机玻璃板,再在有机玻璃板上铺 1 层塑料薄膜。

## 1.3 试验过程

根据自由收缩试验的每组配合比各制作了 3 个试件,试件尺寸为  $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times515\text{ mm}$ 。混凝土达到 1 d 龄期后,拆除试模,取出自密实混凝土自由收缩试件。用直尺量取试件两端面的中心位置,并作好标记,再在混凝土试件两端作有标记处用 502 胶各粘 1 块有机玻璃垫片(要确保在同一直线上);将自密实混凝土试件移至温度为  $(20\pm3)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为  $(60\pm5)\%$  的测试环境中。在试件两端架设千分表,测量 28 d 内的自由收缩应变。自密实混凝土自由收缩试验如图 1 所示。

# 2 试验结果分析

## 2.1 自由收缩应变

各自密实混凝土试件 3、5、7、14、21、28 d 龄期的自由收缩应变如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:

(1)不同粉煤灰掺量的自密实混凝土自由收缩应变都随混凝土龄期的增加而增大,但自由收缩应



图 1 自密实混凝土自由收缩试验  
Fig. 1 Experiment on Free Shrinkage of Self-compacting Concrete

表 1 自密实混凝土自由收缩应变  
Tab. 1 Free Shrinkage Strains of Self-compacting Concrete

试件编号	不同龄期(d)下自密实混凝土自由收缩应变/ $10^{-6}$					
	3	5	7	14	21	28
SCC1	192.04	266.79	328.93	451.26	514.36	554.12
SCC2	169.90	252.03	299.37	427.16	488.29	521.29
SCC3	159.22	216.50	276.38	361.82	441.46	478.35
SCC4	171.70	232.72	291.94	383.38	475.32	499.59
SCC5	192.38	250.63	298.20	404.99	480.72	521.52

变增长越来越缓慢。粉煤灰质量掺量为 20% 的自密实混凝土试件 SCC1 的 3、5、7、14、21 d 龄期的自由收缩应变分别为 28 d 自由收缩应变的 34.66%、48.15%、59.36%、81.44%、92.82%;试件 SCC2、SCC3、SCC4、SCC5 在 7 d 的自由收缩应变分别为 28 d 自由收缩应变的 56.17%、57.78%、58.43%、57.18%,可见,各自密实混凝土试件早期自由收缩发展都很快,7 d 的自由收缩应变已到达 28 d 自由收缩应变的近 60%。

(2)嵩屿 I 级粉煤灰掺量不同,自密实混凝土各阶段的自由收缩应变也不同,不同掺量粉煤灰的自密实混凝土试件各阶段自由收缩应变从大到小依次为 SCC1、SCC5、SCC2、SCC4、SCC3。其中,SCC3 的自由收缩应变最小,SCC1、SCC2、SCC4、SCC5 在 28 d 龄期时的自由收缩应变分别比 SCC3 增大了  $75.77\times10^{-6}$ 、 $42.94\times10^{-6}$ 、 $21.24\times10^{-6}$ 、 $43.17\times10^{-6}$ 。可见,当粉煤灰质量掺量小于 40% 时,随着粉煤灰掺量的增加,各阶段的自由收缩应变不断减小;当粉煤灰质量掺量大于 40% 时,随着粉煤灰掺量的增加,各阶段的自由收缩应变不断增大;当粉煤灰质量掺量在 40% 时,各阶段的自由收缩应变都最小。因此为控制自密实混凝土自由收缩,嵩屿 I 级粉煤灰最优掺量宜在 40% 左右。

(3)粉煤灰致密的玻璃态结构和坚固的保护膜决定了其具有较低的火山灰活性,早期水化缓慢。掺入粉煤灰相当于在早期用水量不变的情况下,降低水泥用量,导致早期胶凝体系中水化产物减少,降

低了化学收缩。粉煤灰中未水化颗粒填充在水泥水化产物的孔隙中,将原来的大孔分割成许多细小且互不连通的小孔,大大改善了水泥浆体的孔隙率和孔结构,使水泥浆体密实,减少了水分蒸发的可能性,降低了干燥收缩;未水化的粉煤灰还很好地发挥了微集料效应,起到抑制基体收缩的作用。此外,随着粉煤灰的水化,钙矾石的数量也会增多,在一定程度上补偿混凝土的收缩。当粉煤灰掺入过多时,由于粉煤灰的水化度低,未水化的粉煤灰颗粒多,粉煤灰与水化物之间只形成弱连接,将减小其对基体收缩的抑制作用,从而使得混凝土收缩反而增加,并且粉煤灰掺入过多也可能会影响混凝土拌和物的匀质性和稳定性,使得混凝土收缩增加。

## 2.2 收缩应变与龄期的关系

混凝土收缩应变与龄期关系的函数表达式,常用的有双曲线函数式、指数函数式和对数函数式<sup>[11]</sup>。对于高强混凝土收缩应变,采用指数函数形式所得的相关系数比较高,其形式如下

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{s,\infty} (1 - ae^{-bt}) \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{sh}(t)$ 为混凝土收缩应变值; $\epsilon_{s,\infty}$ 为实验室标准条件下的混凝土收缩终值; $a$ 、 $b$ 为试验常数; $t$ 为收缩时间。

中国建筑科学研究院“混凝土收缩与徐变的试验研究”专题组建议采用双曲线的形式,即

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{a+bt} \times 10^{-3} \quad (2)$$

图2为自密实混凝土各试件的自由收缩应变与龄期的关系,其中, $R$ 为相关系数。由图2可见,自密实混凝土的自由收缩应变受龄期的影响较大,随着龄期的增加而逐渐提高。其基本上呈双曲线关系趋势。参考中国建筑科学研究院建议的计算公式,根据试验结果,经数理统计非线性回归,可得各配合比自密实混凝土的试验常数 $a$ 、 $b$ 。

由此可见,自密实混凝土自由收缩采用双曲线函数进行拟合时,对应的相关系数都很接近于1,吻合程度较好;然而,粉煤灰掺量不同,试验常数也不同,粉煤灰质量掺量从20%增加到40%,试验常数 $a$ 从11.69增加到15.07,试验常数 $b$ 从1.4增加到1.56;但粉煤灰质量掺量从40%增加到60%,试验常数 $a$ 却从15.07减小到13.11,试验常数 $b$ 也从1.56减小到1.46。因此,随着粉煤灰掺量增加,试验常数 $a$ 、 $b$ 都是先增加,后减小,粉煤灰质量掺量在40%时,试验常数 $a$ 、 $b$ 达到最大。

## 3 结 语

(1)本文中通过自制试验装置对自密实混凝土

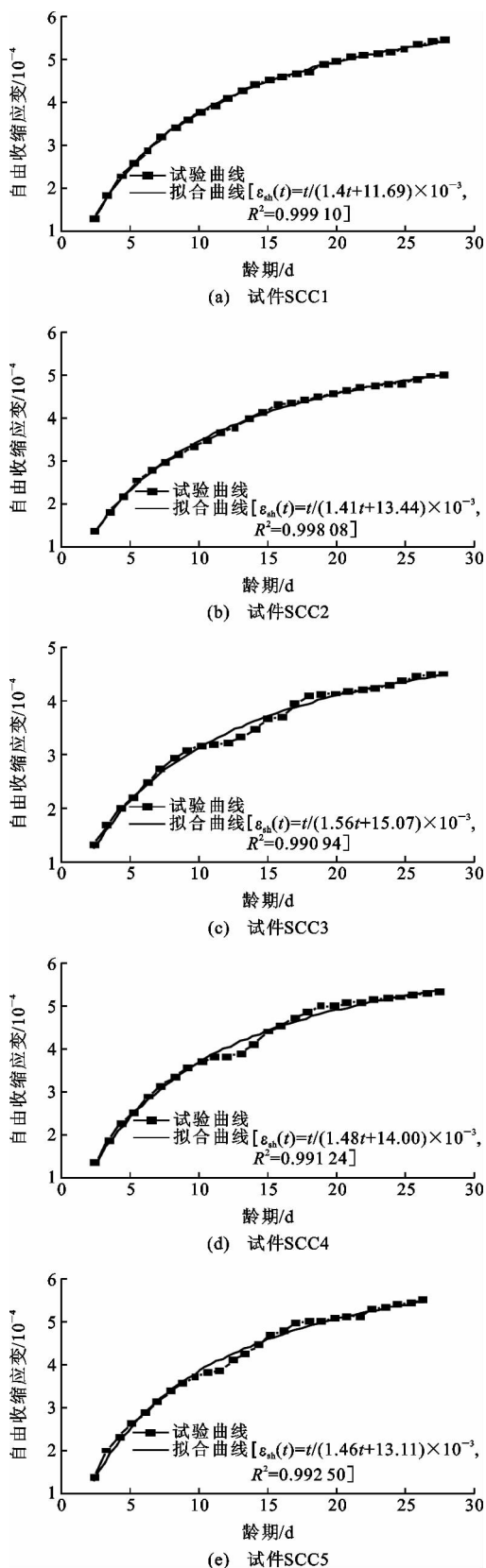


图2 各试件自由收缩应变与龄期的关系

Fig. 2 Relations Between Free Shrinkage Strains and Ages of Different Specimens

的自由收缩进行了试验研究,考察了5种不同粉煤

灰掺量对混凝土收缩的影响。试验结果表明:不同粉煤灰掺量的自密实混凝土自由收缩都随混凝土龄期的增加而增大,但后期自由收缩应变增长较缓慢;当粉煤灰质量掺量在40%时,各阶段的自由收缩应变都最小,可见,这个掺量对于控制收缩较为有利。

(2)通过对微观结构的研究,分析了粉煤灰的掺入对混凝土收缩的影响,并采用双曲线函数来拟合收缩与时间变化的关系,可为实际工程提供参考。不过受试验条件限制,本文试验量有限,还需更多试验来进一步研究其收缩性能,目前研究主要是为了揭示其发展规律。本文中仅采用了嵩屿Ⅰ级粉煤灰为原材料,其他品牌或不同等级粉煤灰的试验并未进行,其是否具有相同的结论还有待进一步深入研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 罗素蓉,郑建岚.自密实混凝土在加固工程中的应用研究[J].建筑材料学报,2006,9(3):330-336.  
LUO Su-rong,ZHENG Jian-lan. Study on the Application of Self-compacting Concrete in Strengthening Engineering[J]. Journal of Building Materials,2006,9(3):330-336.
- [2] SU N,HSU K C,CHAI H W. A Simple Mix Design Method for Self-compacting Concrete[J]. Cement and Concrete Research,2001,31(12):1799-1807.
- [3] MA Bao-guo,WEN Xiao-dong,WANG Ming-yuan, et al. Drying Shrinkage of Cement-based Materials Under Conditions of Constant Temperature and Varying Humidity[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,17(3):428-431.
- [4] PHILPPE T,AHMED L,KHALIL H,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.
- [5] 彭振斌,陈迎明,刘安邦.混凝土收缩机理及其诊治原理[J].混凝土,2003(3):30-31,55.  
PENG Zhen-bin,CHEN Ying-ming,LIU An-bang. The Mechanical of Concrete Compaction and Its Principle[J]. Concrete,2003(3):30-31,55.

- [6] 陈峰,郑建岚.自密实混凝土与老混凝土的粘结-滑移性能[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(6):56-60,85.  
CHEN Feng,ZHENG Jian-lan. Bond-slip Relationship Between Self-compacting Concrete and Old Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2010,30(6):56-60,85.
- [7] 吴智敏,张小云,张云国.自密实轻骨料混凝土配合比设计及基本力学性能试验[J].建筑科学与工程学报,2008,25(4):83-87.  
WU Zhi-min,ZHANG Xiao-yun,ZHANG Yun-guo. Mix Proportion Design and Basic Mechanical Property Experiment of Self-compacting Lightweight Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2008,25(4):83-87.
- [8] 于峰,牛荻涛,贺拴海.纤维复合材料约束混凝土柱的统一强度模型[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):70-74.  
YU Feng,NIU Di-tao,HE Shuan-hai. Unified Compressive Strength Model of FRP-confined Concrete Column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2010,30(2):70-74.
- [9] 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.
- [10] 薛伟辰,胡于明,王巍.预应力混凝土梁徐变性能试验[J].中国公路学报,2008,21(4):61-66.  
XUE Wei-chen,HU Yu-ming,WANG Wei. Experiment on Creep Behaviors of Prestressed Concrete Beams[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(4):61-66.
- [11] 梅明荣,葛世平,陈军,等.混凝土结构收缩应力问题研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(1):73-78.  
MEI Ming-rong,GE Shi-ping,CHEN Jun,et al. Study on Drying Shrinkage and Creep of Concrete Structures [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2002,30(1):73-78.