

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.129



# 早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土 拉伸徐变特性

赵人达, 成正清, 文甜, 徐腾飞, 原元, 李健

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**对早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性的把握,能够为受拉状态地聚物混凝土的应力解析及开裂预测提供重要的参数依据。采用自制混凝土拉伸徐变试验装置,通过恒定应力下的混凝土拉伸徐变试验获取混凝土比徐变、徐变增长速率等徐变特性,研究不同初始加载龄期(2、3、4 d)对低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变的影响。结果表明:高温密封养护可以使低钙粉煤灰基地聚物混凝土短时间内达到强度稳定状态;低钙粉煤灰基地聚物混凝土的拉伸徐变特性与普通水泥混凝土相似,试验初期阶段徐变增长速率较快,随持荷时间的增加,徐变增长速率迅速下降;在同一应力强度比下,初始加载龄期越大,比徐变越小,试验初期阶段的徐变增长速率也越小;相较于试验中期阶段与后期阶段,初始加载龄期对试验初期阶段的徐变影响更大。

**关键词:**早龄期;地聚物混凝土;拉伸徐变;初始加载龄期;比徐变

**中图分类号:**TU528.31 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0111-07

## Tensile creep characteristics of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete

Zhao Renda, Cheng Zhengqing, Wen Tian, Xu Tengfei, Yuan Yuan, Li Jian

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Understanding of the tensile creep behavior of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete can provide reference for stress analysis and crack prediction of tensile concrete. A self-design testing set-up was used to obtain the creep behaviors of concrete such as the creep and creep growth rate under the constant tensile stress. The effects of different initial loading ages (2d, 3d and 4d) on the behavior of tensile creep of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete were investigated. The results show that the condition of high temperature sealing curing can make the low-calcium fly ash-based geopolymer concrete reach the strength stability in a short time. The creep characteristics of the low-calcium fly ash-based geopolymer concrete are similar to those of the ordinary cement concrete. The initial

**收稿日期:**2019-05-02

**基金项目:**国家自然科学基金(51778531)

**作者简介:**赵人达(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事结构非线性分析及组合结构行为研究, E-mail:rendazhao@163.com。

**Received:**2019-05-02

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51778531)

**Author brief:** Zhao Renda (1961-), professor, doctoral supervisor, main research interests: structural nonlinear analysis and combined structure behavior, Email: rendazhao@163.com.

creep growth rate is faster, and it decreases rapidly with time. Under the same stress-strength ratio of applied load, the larger the initial loading ages, the smaller the specific creep, and the smaller the creep growth rate at the initial stage of loading. The initial loading age has greater effect on the initial stage of loading compared with the mid and final stages.

**Keywords:** early-age; geopolymers concrete; tensile creep; initial loading age; specific creep

低钙粉煤灰基地聚物混凝土 (Low calcium fly ash based geopolymer concrete, LCFA-GPC) 是指利用固体废弃物——粉煤灰与一定的碱激发剂混合, 辅以少量高炉矿渣, 经过高温养护加速固化后, 以硅-氧四面体与铝-氧四面体为凝胶体主要存在形式的新型建筑材料<sup>[1-2]</sup>, 相比传统普通水泥混凝土 (Ordinary portland cement concrete, OPC) 拥有优异的早期力学性能、热稳定性及耐腐蚀性<sup>[3-5]</sup>。地聚物混凝土的推广有利于节约资源、保护环境和促进可持续发展, 具有广阔的发展前景<sup>[6]</sup>。

与普通水泥混凝土类似, 低钙粉煤灰基地聚物混凝土的抗拉强度仅有其抗压强度的  $1/15 \sim 1/20$ , 加之存在与普通水泥混凝土相似的早期收缩特性<sup>[7-8]</sup>, 导致其早期开裂风险大, 对地聚物混凝土结构的使用寿命产生不利影响, 阻碍其工程应用。目前, 对混凝土结构早期应力的预测及对开裂风险的评估是工程界广泛关注的问题<sup>[9-11]</sup>, 而混凝土的拉伸徐变特性是影响混凝土早期开裂的重要因素之一<sup>[12]</sup>。徐变可以使被约束混凝土的拉应力得以松弛, 缓解开裂趋势, 只有当产生的净拉应力达到混凝土的抗拉强度极限时, 开裂才会发生<sup>[13-15]</sup>。有研究指出, 粉煤灰基地聚物混凝土相比较普通水泥混凝土拥有更小的早期收缩与受压徐变<sup>[16-17]</sup>, 高温密封养护同样能够减小地聚物混凝土的早期收缩量<sup>[18]</sup>,

这无疑有利于地聚物混凝土结构的早期抗裂, 但由于目前尚缺乏对地聚物混凝土拉伸徐变特性的研究, 因此仍不能全面掌握地聚物混凝土结构的早期抗裂性, 阻碍地聚物混凝土在实际工程中的推广应用。

通过自制混凝土拉伸徐变试验装置, 建立了混凝土拉伸徐变试验方法, 进行了低钙粉煤灰基地聚物混凝土早龄期拉伸徐变试验, 探讨了不同初始加载龄期对其拉伸徐变的影响。同步进行普通水泥混凝土拉伸徐变试验, 对比两类混凝土拉伸徐变特性。采用扫描电镜技术 (SEM) 对低钙粉煤灰基地聚物混凝土及普通水泥混凝土进行微观结构观测分析, 以便更加深刻地认识低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性。

## 1 试验

### 1.1 原材料

1) 粉煤灰、矿渣及水泥 粉煤灰 (FA) 产自四川成都博磊资源循环开发有限公司, I 级,  $45 \mu\text{m}$  筛余为 7.5%, 烧失量 2.3%; 矿渣 (SL) 作为钙源, 调节地聚物混凝土凝结时间并促进其早期强度发展; 普通水泥混凝土用水泥 (C) 采用拉法基 P. O. 42.5R 水泥。粉煤灰与矿渣的化学成分如表 1 所示。

表 1 粉煤灰和矿渣化学成分

Table 1 Chemical composition of fly ash and slag

类别	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SrO	%
粉煤灰	62.04	25.5	4.28	3.96	0.31	0.46			1.27	0.73	1.33	0.12	
矿渣	34.11	15.36	0.83	35.99		0.4	0.62	1.07	6.58	2.5	2.41	0.12	

2) 碱激发剂 碱激发剂采用水玻璃 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) 与氢氧化钠 (NaOH) 的复合激发剂。水玻璃产自广东佛山科凝新材料科技有限公司, 为无色黏稠液体, 模数 2.43, 其检测结果如表 2 所示。氢氧化钠产自四川成都科龙化工试剂厂, 为纯度  $\geq 98.0\%$  的固态

圆形颗粒, 通过加入城市自来水配置成 12 mol/L 的氢氧化钠溶液。

3) 集料 粗集料采用 5~16 mm 连续级配碎石, 细集料采用 II 区中粗机制砂。

表 2 水玻璃检测结果

Table 2 The test results of sodium silicate solution

项目	单位	标准	测试结果
波美度	°Bé	49~51	50
铁含量	%	≤0.02	0.008
密度(20℃)	(g·cm <sup>-3</sup> )	1.526~1.599	1.535
Na <sub>2</sub> O 含量	%	≥12.8	13.73
SiO <sub>2</sub> 含量	%	≥29.2	32.35
模数		2.2~2.5	2.43

## 1.2 制备方法与养护工艺

地聚物混凝土的制备与养护方法与普通水泥混凝土有较大差别,其主要设计参数包括碱激发剂与胶凝材料的质量比、碱激发剂中各组分的质量比和胶凝材料中各组分的质量比等。通过前期试验研究,综合考虑低钙粉煤灰基地聚物混凝土的基本力学性能与工作性能,选定粉煤灰-矿渣复合胶凝材料中的矿渣掺量为 10%,复合碱激发剂与粉煤灰-矿渣复合胶凝材料的质量比为 0.6:1,复合碱激发剂中水玻璃与氢氧化钠的质量比为 2.5:1。普通水泥混凝土采用 C50 混凝土,水胶比为 0.4。低钙粉煤灰基地聚物混凝土与普通水泥混凝土的具体配合比设计如表 3 所示。

表 3 混凝土配合比设计

Table 3 Mix design of LCFA-GPC and OPC kg/m<sup>3</sup>

类别	粉煤灰	矿渣	水泥	砂	碎石	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	水
LCFA-GPC	398.5	44.4		692.61	385.2	76.1	190.5	
OPC	69.7	69.7	557.6	530	795			279

低钙粉煤灰基地聚物混凝土的制备方法与养护工艺:预先制备复合碱激发剂,将氢氧化钠溶液与水玻璃充分混合;将粉煤灰、矿渣、粗细集料倒入经过润湿的混凝土搅拌机,搅拌 90 s,使其充分混合;继续边搅拌边加入复合碱激发剂,搅拌 90 s;继续搅拌两次,每次 90 s。将拌合物装入试模并振动密实两次,每次 120 s。试件浇筑完毕后,首先于室温下密封静置 24 h,24 h 后脱模并使用铝箔纸包裹试件后放入烘箱,再于 80℃密封养护 24 h。前期试验研究表明,高温密封养护可以极大地加速低钙粉煤灰基地聚物混凝土的强度发展,一天内即可达到最终强度的 90%左右,且在高温养护前先将试件于常温静置一段时间,可较好地解决地聚物混凝土后期

强度发展不稳定的问题。养护结束后,将试件置于实验室环境中。普通水泥混凝土采用标准养护方法进行养护。

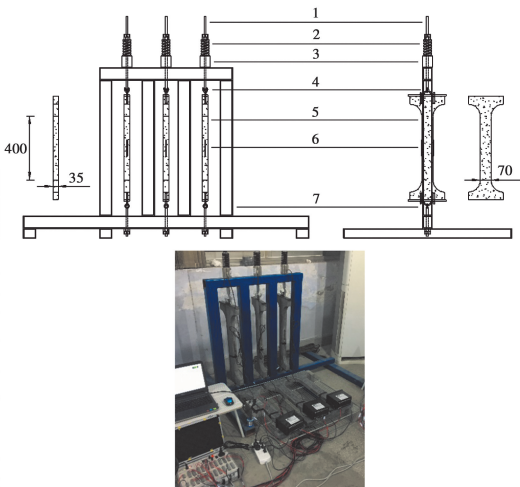
## 1.3 基本力学性能

为充分了解低钙粉煤灰基地聚物混凝土的基本力学特性、确定拉伸徐变试验荷载参数以及计算混凝土弹性应变,按国家标准 GB/T 50081—2002 测试低钙粉煤灰基地聚物混凝土与普通水泥混凝土 2、7、14、28 d 龄期的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,描绘其强度发展趋势;测试 2、28 d 龄期的轴心抗压强度和压缩弹性模量;拉伸弹性模量则是由拉伸徐变试验中的弹性应变阶段推算获得。

## 1.4 单轴拉伸徐变试验

1.4.1 试验参数 低钙粉煤灰基地聚物混凝土最早在 2 d 龄期时即具备较高的抗拉强度,单轴拉伸徐变试验的荷载水平以混凝土 2 d 龄期的劈裂抗拉强度为参考,采用应力强度比为 0.5。普通水泥混凝土的抗拉强度随龄期增长,其试验荷载水平以各加载龄期的劈裂抗拉强度为参考,采用应力强度比为 0.5。初始加载龄期分别选取 2、3、4 d 3 个龄期,加载至各试件达到 28 d 龄期时停止试验,研究低钙粉煤灰基地聚物混凝土的早龄期拉伸徐变特性。整个加载和持荷过程均在温度(21±1)℃、相对湿度 50%±5%的环境中进行。

1.4.2 单轴拉伸应变测试 为保证试件在持荷过程中截面受力均匀,设计哑铃型单轴拉伸试件,试件拉力均匀段的截面尺寸为 35 mm×70 mm,长 400 mm。单轴拉伸试验装置由加载装置和测量装置两部分组成,通过反力架固定拉伸试件,顶部万向安全扣保证试件处于单轴拉伸状态,通过弹簧加载方式控制荷载稳定,弹簧下的压力传感器控制荷载水平;由于荷载水平相对较低,单轴拉伸试件变形量较小,考虑到试验测量精度要求较高、数据采集量较大,采用应变片测量试件平均拉伸应变,应变片分别粘贴于拉伸试件中部两侧,由 TST3826F-L 静态应变测试分析系统自动记录数据,采集周期为 10 min。由于试件应变增长速率随持荷时间的增长逐渐放缓,数据处理的时间间隔可逐渐增大,试验初期每 2 h 选取一点,试验后期每 0.5 d 选取一点。拉伸徐变试验装置如图 1 所示。



注: 1.持荷螺杆; 2.弹簧; 3.压力传感器; 4.万向安全扣;  
5.单轴拉伸试件; 6.应变片; 7.反力架

图1 拉伸徐变试验装置(单位:毫米)

Fig.1 Test set-up of tensile creep (unit: mm)

试验过程中,试件外表面与空气直接接触,测量地聚物混凝土在单轴拉力作用下的总徐变应变。考虑到地聚物混凝土试件的徐变会导致应力松弛,持荷过程中需注意调整弹簧上部螺母以保证荷载恒定。每个加载龄期的徐变应变由3个平行试件的平均值反映,保证试验数据的可靠性。

拉伸徐变试验开始前进行预加载,获得试验设计荷载水平下的混凝土弹性应变,并计算其拉伸弹性模量。预加载结束后将拉力完全卸载,并重新加载至试验设计荷载,保持荷载稳定后开始试验。

1.4.3 非荷载作用下自由收缩应变测试 加载过程中试件除发生徐变外,会同时发生非荷载作用下的自由收缩。为了获得拉力作用下的徐变应变,必须从总应变中扣除非荷载作用下的自由收缩应变。无荷载作用试件的尺寸、养护条件以及数据采集方法与拉伸试件一致。

拉力作用下的徐变应变按式(1)计算。

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_{total} - \epsilon_{sh} - \epsilon_e \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{cr}$ 为拉伸徐变应变; $\epsilon_{total}$ 为总应变; $\epsilon_{sh}$ 为自由收缩应变; $\epsilon_e$ 为弹性应变。

## 2 结果与讨论

### 2.1 早龄期基本力学性能

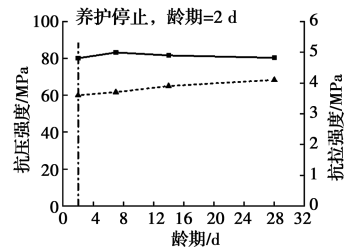
低钙粉煤灰基地聚物混凝土与普通水泥混凝土的基本力学性能及其抗压强度、抗拉强度发展曲线如表4和图2所示。

表4 混凝土基本力学性能

Table 4 Mechanical properties of the LCFA-GPC and OPC

类型	LCFA-GPC		OPC		
	2 d	28 d	2 d	7 d	
龄期	2 d	28 d	2 d	7 d	28 d
$f_{cc}/\text{MPa}$	80.1	80.3	27.8	48.5	56
$f_{ts}/\text{MPa}$	3.6	4.1	2.4	3.3	3.9
$f_{cp}/\text{MPa}$	50	50	18.5	32.5	42
$E_c/\text{GPa}$	34.9	35.6	17.4	27.8	33.5
$E_t/\text{GPa}$	36.2		18.2		

表4中: $f_{cc}$ 为立方体抗压强度; $f_{ts}$ 为立方体劈裂抗拉强度; $f_{cp}$ 为轴心抗压强度; $E_c$ 为压缩弹性模量; $E_t$ 为拉伸弹性模量。



注: —●— 抗压强度 —■— 抗拉强度

图2 低钙粉煤灰基地聚物混凝土强度发展曲线

Fig.2 Strength development curve of the LCFA-GPC

经过高温密封养护的低钙粉煤灰基地聚物混凝土材料强度发展迅速,短时间内即可获得稳定的压、拉强度与弹性模量。如表4所示,标准养护条件下的普通水泥混凝土早期强度发展明显慢于低钙粉煤灰地聚物混凝土,在28 d龄期时,其劈裂抗拉强度可基本达到与地聚物混凝土相同的水平。通过对比地聚物混凝土的压缩弹性模量和拉伸弹性模量,发现其拉伸弹性模量与压缩弹性模量基本相同,且不随混凝土龄期而变化。

综上,高温养护可以使低钙粉煤灰基地聚物混凝土力学性能迅速发展,在2 d龄期后可基本保持稳定;标准养护普通水泥混凝土力学性能随龄期增长变化较大。因此,在拉伸徐变试验阶段,试验参数均以地聚物混凝土2 d龄期时的基本力学性能测试值为基准进行设定,普通水泥混凝土以各加载龄期时的基本力学性能测试值为基准进行设定。各试件初始加载应力如表5所示。



表5 单轴拉伸试件初始加载应力

Table 5 Initial stress of uniaxial tensile test specimens

类型	LCFA-GPC		OPC	
龄期/d	2,3,4	2	3	4
抗拉强度/MPa	3.6	2.4	2.8	3.0
初始加载应力/MPa	1.8	1.2	1.4	1.5
初始加载荷载/kN	4.41	2.94	3.43	3.67

## 2.2 非荷载作用下的自由收缩

为保证与拉伸徐变试验的最早加载龄期相同,自由收缩应变自混凝土2 d龄期时开始测量。试验以2 d龄期混凝土试件为收缩初始状态,取2 d龄期时混凝土的收缩应变为0。低钙粉煤灰基地聚物混凝土的自由收缩应变如图3所示。

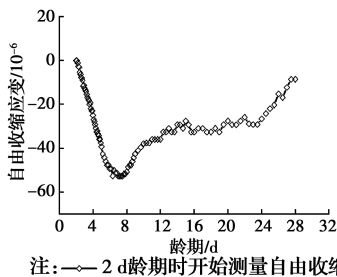


图3 低钙粉煤灰基地聚物混凝土自由收缩应变的经时变化  
Fig. 3 Time dependent change of free shrinkage strain of LCFA-GPC

为获取更优的地聚物混凝土基本力学性能,采用了高温密封养护方式。密封养护导致试件在试验开始阶段为含水状态,当试件暴露在实验室环境中后,失水迅速,发生较快速的干燥收缩,如图3所示,其收缩应变峰值约 $50 \mu\epsilon$ ,在7 d龄期时达到,这一值远小于常见的普通水泥混凝土的自由收缩应变( $200 \sim 700 \mu\epsilon$ )。7 d龄期后,地聚物混凝土试件发生收缩恢复现象,28 d龄期时,基本可恢复到试件的初始状态,个别试件甚至发生膨胀。

## 2.3 拉伸徐变

2.3.1 初始加载龄期对拉伸徐变的影响 采用比徐变(Specific creep)与徐变系数(Creep coefficient)进行徐变效应的描述。其计算方法为

$$C(t, \tau) = \epsilon_{cr} / \sigma(\tau) \quad (2)$$

$$\varphi(t, \tau) = C(t, \tau) \cdot E(\tau) \quad (3)$$

式中: $t$ 为混凝土龄期; $\tau$ 为混凝土初始加载龄期; $C(t, \tau)$ 为比徐变; $\sigma(\tau)$ 为初始加载应力; $\varphi(t, \tau)$ 为徐变系数; $E(\tau)$ 为初始加载龄期时混凝土的弹性模量。

如图4所示,初始加载龄期对低钙粉煤灰基地

聚物混凝土的拉伸徐变影响显著,初始加载龄期越大,拉伸徐变越小。2 d龄期加载试件的比徐变最大可达到 $100 \times 10^{-6} \text{ MPa}$ ,3 d及4 d龄期加载试件的徐变特征较2 d龄期加载试件有明显衰减,其最大比徐变为 $55 \times 10^{-6} \text{ MPa}$ 和 $34 \times 10^{-6} \text{ MPa}$ 。由于2 d龄期加载的试件从高温环境中取出后短时间内即施加荷载,在试件降温阶段,内部聚合反应仍在进行,相比较3 d和4 d龄期已在实验室环境放置至完全冷却的试件,2 d龄期加载的试件材料处于不完全稳定状态,拉伸徐变变形十分明显,且出现较长的线性变化段。相比较普通水泥混凝土可以看出,相同的初始加载龄期下低钙粉煤灰基地聚物混凝土比徐变明显大于普通水泥混凝土,但二者的拉伸徐变规律相似,试验初期阶段比徐变增长较快,试验后期阶段比徐变增长十分缓慢,比徐变曲线接近水平。

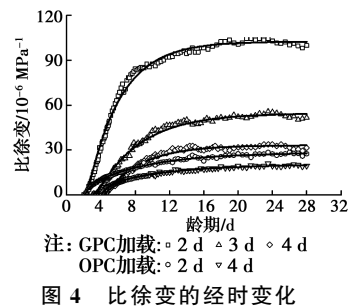


图4 比徐变的经时变化  
Fig. 4 Time dependent change of specific creep

低钙粉煤灰基地聚物混凝土的拉伸徐变应变与初始加载龄期呈现出较明显的非线性。取持荷时间为14 d的试件比徐变,其计算方法为

$$C_{14} = C(\tau + 14, \tau) - C(\tau, \tau) \quad (4)$$

如图5所示,低钙粉煤灰基地聚物混凝土在持荷时间相同的情况下,初始加载龄期越大,比徐变越小,且比徐变的减小速度也在衰减。试件在2 d龄期加载时比徐变最大,约为4 d龄期加载试件的3倍左右。与普通水泥混凝土进行比较,初始加载龄期对两种混凝土比徐变的影响规律相同,但地聚物混凝土的早龄期拉伸徐变明显大于普通水泥混凝土,比较2 d龄期加载的试件,地聚物混凝土的比徐变约为普通水泥混凝土的3倍。随初始加载龄期的增长,地聚物混凝土的比徐变减小速度更快,比较4 d龄期加载试件的比徐变,地聚物混凝土仅有普通水泥混凝土的1.5倍左右。需要注意的是,对于地聚物混凝土,高温密封养护导致其强度迅速发展,弹性模量也迅速稳定,因此,对于不同初始加载龄期的试件,其比徐变与徐变系数的比值是相同的;但对于普通水泥混凝土,由于在较早龄期阶段,其强度与弹

性模量均在不断发展,因此,在不同加载龄期情况下,其比徐变与徐变系数的比值是不同的。

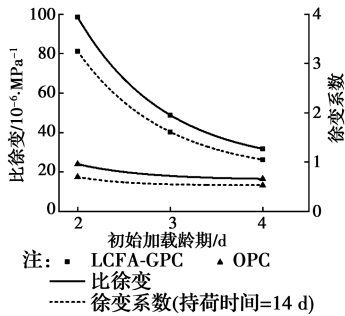


图5 低钙粉煤灰基地聚物混凝土与普通水泥混凝土的比徐变对比(持荷时间:14 d)

Fig. 5 Comparison of specific creep between LCFA-GPC and OPC (Duration: 14 d)

### 2.3.2 初始加载龄期对拉伸徐变增长速率的影响

为系统评价加载龄期对拉伸徐变的影响,定义徐变增长速率(Creep growth rate)为地聚物混凝土试件在单位持荷时间(d)内所完成的比徐变。选取3个试验阶段:0~3 d、4~14 d及15 d~卸载,比较其每个阶段内的平均徐变增长速率。如图7所示。初始加载龄期对试验初期阶段的徐变增长速率影响较大,2 d龄期加载试件的初期徐变增长速率达  $28 \times 10^{-6} / (\text{MPa} \cdot \text{d})$ 。随着初始加载龄期的增大,徐变增长速率的减小速度也在衰减。另一方面,图4中3条比徐变曲线在试验后期阶段互相平行,图7中的试验后期阶段平均徐变增长速率曲线也近乎一条无斜率直线,表明初始加载龄期主要影响试验初期阶段的徐变增长速率,而对试验中期阶段及后期阶段的徐变增长速率影响不大。

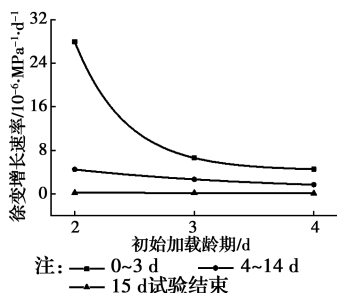


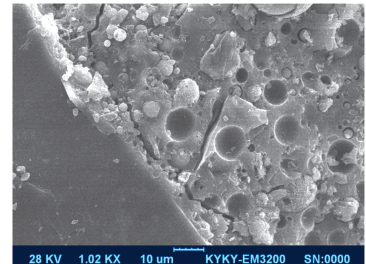
图6 初始加载龄期对低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变增长速率的影响

Fig. 6 Effect of initial loading age on tensile creep growth rate of LCFA-GPC

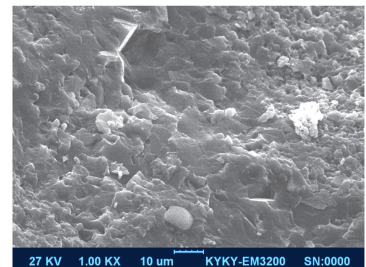
## 2.4 微观分析

采用扫描电镜技术(SEM)对初始加载龄期为2 d的低钙粉煤灰基地聚物混凝土与普通水泥混凝土

进行微观结构观测分析,如图8所示,可以清晰地看到地聚物混凝土界面存在尚未反应的粉煤灰球状玻璃体,碱激发粉煤灰产生的“N-A-S-H”凝胶<sup>[1]</sup>包裹在粉煤灰玻璃体周围,形成较为致密的界面结构,可以看出地聚物混凝土微观结构与普通水泥混凝土存在较明显的差别。同时,在地聚物砂浆与骨料结合面存在交界面裂缝等缺陷,这可能是高温养护导致的快速失水以及温度变化导致的骨料、砂浆变形性能差异引起的。胶凝结构的不同使得低钙粉煤灰基地聚物混凝土的拉伸徐变机理与普通水泥混凝土有较大的区别,混凝土的自身缺陷也会加速受拉损伤的发展,从而导致了低钙粉煤灰基地聚物混凝土在试验初期阶段的拉伸徐变增长速率较快,相同初始加载龄期下,地聚物混凝土拉伸徐变大于普通水泥混凝土的现象。



(a) LCFA-GPC



(b) OPC

图7 扫描电镜图

Fig. 7 SEM image of

## 3 结论

1) 低钙粉煤灰基地聚物混凝土经过高温密封养护后,短时间内即可获得较高的压、拉强度与稳定的弹性模量。其拉伸弹性模量与压缩弹性模量几乎相同,且不随混凝土龄期变化。

2) 初始加载龄期对低钙粉煤灰基地聚物混凝土的拉伸徐变影响显著,初始加载龄期越小,拉伸徐变越大。2 d龄期加载试件的比徐变明显高于3 d和4 d龄期加载的试件,且比徐变与初始加载龄期呈现出较明显的非线性。

3) 低钙粉煤灰基地聚物混凝土的拉伸徐变特性与普通水泥混凝土相似,但低钙粉煤灰基地聚物混凝土

土的拉伸徐变明显较大。试验初期阶段的徐变应变近线性变化,随着持荷时间的增加,徐变增长速率迅速衰减,发展到28d龄期时徐变增长速率几乎为零。

4)初始加载龄期对拉伸试验初期的徐变增长速率影响较大,初始加载龄期越小,试验初期阶段徐变增长速率越大;初始加载龄期对试验后期阶段徐变增长速率几乎没有影响,不同初始加载龄期试件的比徐变曲线在试验后期阶段接近平行。

#### 参考文献:

- [1] SHI C J, JIMÉNEZ A F, PALOMO A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(7): 750-763
- [2] NG C, ALENGARAM U J, WONG L S, et al. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 550-576.
- [3] RADLIŃSKA A, YOST J R, SALERA M J. Material properties of structurally viable alkali-activated fly ash concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(10): 1456-1464.
- [4] 赵素宁, 曲烈, 杨久俊, 等. 粉煤灰地聚物的力学性能及微观结构研究[J]. *粉煤灰*, 2010, 22(5): 3-6, 13. ZHAO S N, QU L, YANG J J, et al. Study of the mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer [J]. *Coal Ash China*, 2010, 22(5): 3-6, 13. (in Chinese)
- [5] BAKHAREV T. Geopolymeric materials prepared using class f fly ash and elevated temperature curing [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1224-1232.
- [6] MA C K, AWANG A Z, OMAR W. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 90-102.
- [7] HOJATI M, RADLIŃSKA A. Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 150: 808-816.
- [8] CASTEL A, FOSTER S J, NG T, et al. Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer concrete [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(5): 1619-1628.
- [9] KOVLER K, SIKULER J, BENTUR A. Restrained shrinkage tests of fiber-reinforced concrete ring specimens; effect of core thermal expansion [J]. *Materials and Structures*, 1993, 26(4): 231-237.
- [10] BENTZ D P, JENSEN O M, HANSEN K K, et al. Influence of cement particle-size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement-based materials [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, 84(1): 129-135.
- [11] 杨杨, 许四法, 叶德艳, 等. 早龄期高强混凝土拉伸徐变特性 [J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(7): 1124-1129. YANG Y, XU S F, YE D Y, et al. Tensile creep behavior of high strength concrete at early ages [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(7): 1124-1129. (in Chinese)
- [12] 黄国兴, 惠荣炎, 王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012. HUANG G X, HUI R Y, WANG X J. *Creep and shrinkage of concrete* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. WANG T M. *Control of cracking in engineering structure* [M]. second edition. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese)
- [14] KHAN I, XU T F, CASTEL A, et al. Early-age tensile creep and shrinkage induced cracking in internally restrained concrete members [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2018: 1-13.
- [15] 魏亚, 姚湘杰. 约束状态下混凝土拉伸徐变模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54(5): 563-567, 595. WEI Y, YAO X J. Tensile creep model for concrete subject to constant restraints [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2014, 54(5): 563-567, 595. (in Chinese)
- [16] HARDJITO D, WALLAH S E, SUMAJOUW D M J, et al. On the development of fly ash based geopolymer concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2004, 11-12: 467-472.
- [17] WALLAH S E, RANGAN B V. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties[R]. Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006: 1-97.
- [18] TEMPEST B. Engineering characterization of waste derived geopolymer cement concrete for structural applications [D]. Charlotte: Technology University of North Carolina at Charlotte, Ann Arbor, United States, 2010.