

文章编号:1007-9629(2022)02-0150-08

配合比对 PVA-FRCC 长期自生收缩性能的影响

王玉清¹, 刘 潇¹, 刘曙光^{2,*}, 孟苏牙拉吐¹

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:基于聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基复合材料(PVA-FRCC)试件的收缩试验,研究了纤维体积分数、水胶比、砂胶比对PVA-FRCC自生收缩性能的影响.结果表明:PVA纤维的掺入减小了水泥基材料的自生收缩,但效果有限;低水胶比/低砂胶比(LW/LS)组试件的自生收缩明显大于高水胶比/高砂胶比(HW/HS)组试件;水胶比在小范围内变化时,PVA-FRCC自生收缩随水胶比增大而增大,随砂胶比增大而降低;HW/HS组试件自生收缩占比(ϵ_a/ϵ_t)随龄期的增加而增大,LW/LS组试件 ϵ_a/ϵ_t 随龄期的增加先增大后降低;解除密封后,HW/HS组PVA-FRCC试件的总收缩仍有较大增长,LW/LS组试件则增长较少.

关键词:聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料;自生收缩;纤维体积分数;水胶比;砂胶比

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.006

Effect of Mix Proportion on the Long-Term Autogenous Shrinkage of PVA-FRCC

WANG Yuqing¹, LIU Xiao¹, LIU Shuguang^{2,*}, MENG Suyalatu¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. School of Mining and Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Based on the shrinkage experiment of polyvinyl alcohol fiber (PVA) reinforced cementitious composite (PVA-FRCC) specimens, the effects of the fiber volume fraction, water-binder ratio and sand-binder ratio on the autogenous shrinkage of the PVA-FRCC were studied. The results show that the addition of PVA fiber reduces the autogenous shrinkage of the cement-based materials, but the effect is limited. The autogenous shrinkage of low water-binder ratio / low sand-binder ratio (LW/LS) specimens is much larger than that of high water-binder ratio / high sand-binder ratio (HW/HS) specimens. When the water-binder ratio changes in a small range, the autogenous shrinkage of PVA-FRCC increases with the increasing of the water-binder ratio, and decreases with the increasing of the sand-binder ratio. With the increasing of the age, proportion of autogenous shrinkage (ϵ_a/ϵ_t) of HW/HS specimens increases, while ϵ_a/ϵ_t of the LW/LS specimens increases first and then decreases. After unsealing, the shrinkage of HW/HS specimens increases greatly, while that of the LW/LS specimens increases less.

Key words: polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite; autogenous shrinkage; fiber volume fraction; water-binder ratio; sand-binder ratio

收稿日期:2020-10-16; 修订日期:2020-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968056,51768051);内蒙古自治区科技成果转化专项资金资助项目(2019CG072);内蒙古自治区科技创新引导项目(KCBJ2018016)

第一作者:王玉清(1972—),女,内蒙古包头人,内蒙古工业大学教授,硕士生导师,硕士.E-mail:imutwyq@126.com

通讯作者:刘曙光(1960—),男,内蒙古赤峰人,内蒙古工业大学教授,博士生导师,硕士.E-mail:liusg6011@126.com

收缩是水泥基材料的一个重要性质,其中化学收缩与自收缩(也称自干燥)^[1]由于很难分离,故将二者合并统称为自生收缩^[2]。高性能水泥基材料的水胶比普遍较低,且高效减水剂的掺入使胶凝材料水化不充分,孔隙压力大,自生收缩增加,从而使总收缩增大^[3],易在构件中引起收缩裂缝。Zhang等^[4]指出高强混凝土的自生收缩是总收缩的重要部分,甚至是主要部分。Ma等^[5]认为高性能混凝土的自生收缩比普通混凝土大,易导致构件开裂,因此自生收缩成为限制高性能混凝土广泛应用的问题之一。

在高性能水泥基材料的自生收缩研究中,Saje等^[6]发现高性能混凝土的水胶比越小,其总收缩和自生收缩越大。Ma等^[5]研究发现高性能混凝土的自生收缩率随碳纤维掺量增加而降低。Meng等^[7]发现聚乙烯醇(PVA)纤维可显著降低材料的自生收缩。水亮亮^[8]研究表明掺加钢纤维可有效降低材料的收缩量。马一平等^[9]研究了低掺量聚丙烯纤维对水泥砂浆塑性收缩率的影响,结果表明聚丙烯纤维对水泥砂浆塑性收缩率有限制作用,且纤维参数对其影响较大。施韬等^[10]研究发现碳纳米管的掺入可有效抑制水泥基材

料的自生收缩。对于PVA纤维增强水泥基复合材料(PVA-FRCC),目前对其干燥收缩^[11]和总收缩^[12]有一定的研究,但对其自生收缩性能的研究鲜见报道。

基于此,本文研究了PVA纤维体积分数(φ_{PVA})、水胶比(m_w/m_b)、砂胶比(m_s/m_b)对PVA-FRCC自生收缩性能的影响,以期确定其较优配合比,并提出减缩抗裂措施,为PVA-FRCC的后续研究及工程应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

呼和浩特市冀东水泥厂生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥(C);鄂尔多斯达茂旗煤电厂生产的Ⅰ级粉煤灰(CA);包头明商环保科技有限公司生产的优质硅灰(SF);细骨料(S)为包头固阳县生产的粒径为75~109 μm 精选优质石英精粉;纤维为日本Kuraray公司生产的REC15型PVA纤维,其参数见表1;改性聚羧酸高效减水剂(WR)为Sika Visco Crete 3301E;水泥砂浆体系高效消泡剂(D);增稠剂(TA)主要成分为羟丙甲基纤维素。

表1 PVA纤维参数
Table 1 Parameters of PVA fiber

Fineness/dtex	Length/mm	Diameter/mm	Tensile strength/ MPa	Elongation/%	Elastic modulus/ GPa	Density/(g· cm^{-3})
15	12	0.04	1600	6	40	1.3

1.2 试件设计

本文试件不含粗骨料,故参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行设计,共设计12组尺寸为40 mm×40 mm×160 mm棱柱体试件,每组6个试件,其中3个试件进行密封,用于测试自生收缩,另外3个试件不密封,用于测试总收缩,测试结果均取平均值。同时,每组制作3个70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体试件,用于测试材料28 d标准养护条件下的立方体抗压强度 f_{cu} 。试件配合比设计中,考虑满足综合性能较优和高强、高应变硬化特性2种需求^[13],配置了高水胶比/高砂胶比(HW/HS)和低水胶比/低砂胶比(LW/LS)2类试件。PVA-FRCC的配合比见表2,表中:S-0-0.55-0.8(对照组)表示PVA纤维的体积分数为0%、水胶比为0.55、砂胶比为0.8的PVA-FRCC试件,其他类推;S-1.5-0.35-0.3和S-1.5-0.25-0.3为LW/LS组试件,其他试件为HW/HS组试件。

1.3 试验方法

收缩试验采用SP-175型立式砂浆收缩仪,读数仪

为数显千分表,测量精度为0.001 mm。收缩试验方法参考JGJ/T 70—2009进行。所有试件养护至48 h拆模,立即测量各试件的初始长度后,将需要密封的试件快速装入塑料袋进行真空密封,且非密封与密封试件同时放置于相同实验室环境中(环境温度为 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(30\pm 10)\%$)。待试件分批养护至龄期 $t_s=28, 56, 90, 140$ d时,对密封试件解除密封装置后立即进行自生收缩(ϵ_s)测试,同时测试与其对应的非密封试件总收缩(ϵ_t)。解除密封试件继续放置于实验室环境,并在解除密封后 $t'=1, 3, 5, 7, 14, 28, 56, 90, 140, 180, 270, 360$ d时测试其总收缩,总收缩对应的时间 t 为 t_s 与 t' 之和。

2 自生收缩性能分析

2.1 PVA纤维体积分数对自生收缩的影响

图1为不同PVA纤维体积分数PVA-FRCC试件的自生收缩和自生收缩占比(自生收缩/总收缩, ϵ_s/ϵ_t)。

由图1可见:PVA-FRCC的自生收缩随龄期的增加而增大,且由于前期水化反应剧烈,自生收缩前

表2 PVA-FRCC的配合比
Table 2 Mix proportions of PVA-FRCC

Specimen	$\varphi_{\text{PVA}}/\%$	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)								f_{cu}/MPa
		C	CA	SF	Water	S	WR	D	TA	
S-0-0.55-0.8	0	610.000	163.000	41.000	447.000	650.000	8.140	1.628	0.244	32.0
S-0.5-0.55-0.8	0.5	610.000	163.000	41.000	447.000	650.000	8.140	1.628	0.244	30.5
S-1.0-0.55-0.8	1.0	610.000	163.000	41.000	447.000	650.000	8.140	1.628	0.244	27.6
S-1.5-0.55-0.8	1.5	610.000	163.000	41.000	447.000	650.000	8.140	1.628	0.244	27.5
S-2.0-0.55-0.8	2.0	610.000	163.000	41.000	447.000	650.000	8.140	1.628	0.244	27.0
S-1.5-0.50-0.8	1.5	636.000	170.000	42.000	424.000	678.000	8.480	1.696	0.254	31.3
S-1.5-0.45-0.8	1.5	665.000	177.000	44.000	399.000	709.000	8.860	1.772	0.266	36.1
S-1.5-0.55-1.1	1.5	557.000	149.000	37.000	409.000	817.000	7.430	1.486	0.223	30.6
S-1.5-0.50-1.1	1.5	579.000	154.000	39.000	386.000	850.000	7.720	1.544	0.232	38.6
S-1.5-0.45-1.1	1.5	602.000	161.000	40.000	362.000	884.000	8.030	1.606	0.241	46.7
S-1.5-0.35-0.3	1.5	898.000	239.000	60.000	419.000	359.000	11.970	2.394	0.359	53.6
S-1.5-0.25-0.3	1.5	1 022.000	273.000	68.000	341.000	409.000	13.630	2.726	0.409	71.5

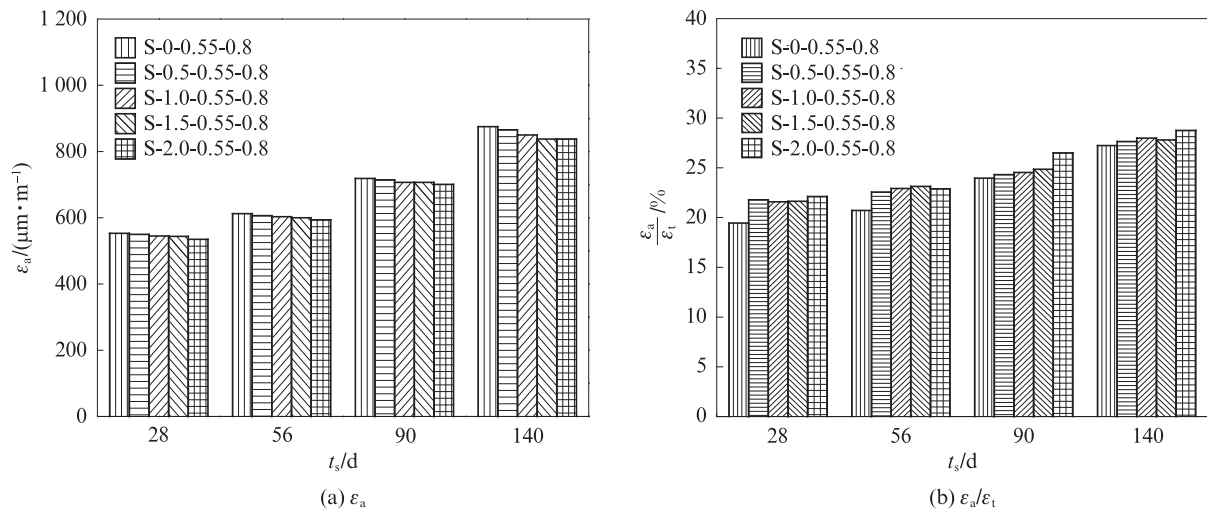


图1 不同PVA纤维体积分数PVA-FRCC试件的自生收缩和自生收缩/总收缩

Fig. 1 ϵ_s and ϵ_s/ϵ_t of PVA-FRCC specimens with different φ_{PVA}

期增长速率快而后期增长速率慢,5组试件28 d的自生收缩占140 d的63.2%~64.9%;与对照组相比,掺入PVA纤维后,PVA-FRCC的自生收缩和总收缩分别降低了2.5%~4.2%、9.3%~14.9%,可见PVA纤维对降低自生收缩的作用较小,而对降低总收缩的作用较大.分析其原因,PVA纤维对水泥基材料收缩的影响有以下几个方面:(1)纤维分散在水泥基材料中,阻碍了水泥浆凝结硬化时的回缩,自生收缩和总收缩均减小;(2)PVA纤维表面吸附大量的水,当水泥基材料内部相对湿度降低时,纤维通过释放自身吸附的水分延缓内部相对湿度的下降,起到内养护作用,从而促进水泥水化反应,自生收缩增大;(3)纤维的存在使纤维与水泥基材料间形成更多孔隙,增加了水分迁移的通道,有更多水分蒸发散失,干燥收

缩增大,从而使总收缩增大;(4)加入纤维后,水泥浆的有效水灰比降低,初始孔结构细化,毛细管张力增大,宏观收缩应力提高,自干燥增加,自生收缩增大;同时,有效水灰比的降低使得用于水化反应的水减少,毛细管连通性下降,阻碍了水分迁移,干燥收缩减小,总收缩减小;(5)加入纤维后,单位体积胶凝材料减少,化学收缩减小,自生收缩减小,但由于纤维体积分数较小,故此影响较小.综上,PVA纤维对水泥基材料自生收缩和总收缩的正、负影响同时存在,最终表现为PVA纤维对自生收缩和总收缩均有降低作用,但对降低自生收缩的作用较小,对降低总收缩的作用较大.

由图1(b)可见,试件的自生收缩占比(ϵ_s/ϵ_t)均随着龄期的增加而增大.原因是非密封情况下,前期试件的

干燥收缩与自生收缩均增长较快,但前者增长速率快于后者,且干燥收缩在总收缩中占比较高,对总收缩的影响更显著,其快速增长引起总收缩快速增长,故初期 ϵ_a/ϵ_t 较小;随着龄期的增加,虽然总收缩和自生收缩的增长速率均下降,但由于密封试件内部水分较充足,水化作用可以在较长时间内进行,中后期自生收缩的增长速率快于总收缩,故 ϵ_a/ϵ_t 增大.对于非密封试件,虽然还存在碳化收缩的影响,但与干燥收缩及自生收缩相比,其对总收缩影响甚微,且碳化作用对各非密封试件总收缩的影响一致,不会改变各组试件 ϵ_a/ϵ_t 的相对关系,故忽略其影响.相同龄期时,随PVA纤维体积分数的增大, ϵ_a/ϵ_t 增大,但增大幅度较小.

2.2 水胶比和砂胶比对自生收缩的影响

水胶比和砂胶比影响PVA-FRCC中各材料占比,从而影响水化反应量,引起化学收缩和自收缩发生改变;同时,水量改变会影响干燥收缩量,砂量的改变会使砂对水泥基材料收缩的阻碍作用发生变化^[4].不同水胶比、砂胶比PVA-FRCC试件自生收缩和自生收缩占比(ϵ_a/ϵ_t)见图2.由图2可见:随着龄期的增加,PVA-FRCC试件的 ϵ_a 增大;LW/LS组试件的 ϵ_a 和 ϵ_a/ϵ_t 在56~140 d龄期时均高于HW/HS组试件,与高性能混凝土自生收缩性能一致^[14-15],这是因为LW/LS试件水泥用量大,水化反应总量较大,引起的化学收缩较大,且由于水化反应消耗水较多,毛细管作用较强,干燥收缩也较大,且LW/LS试件砂的用量较少,其对自生收缩的阻碍作用较小.

由图2(a)可见,当砂胶比一定、水胶比在小范围内增大时, ϵ_a 增大.这是因为水胶比增大对

PVA-FRCC试件自生收缩有两方面的影响:(1)水胶比增大,所用胶凝材料减少,水化反应量减少, ϵ_a 减小;(2)水胶比增大,试件密实度降低,毛细管孔径增大,且PVA纤维的存在也使材料内部孔隙增加,对水分携带、运输作用增强,从而使水分向反应区迁移更加容易,同时PVA纤维通过释放自身吸附的水为周围胶凝材料提供水分,提高了胶凝材料的水化程度,产生较大的化学收缩,当外部水大量消耗时,毛细孔中的水分快速迁移供水泥进行水化反应,使自干燥增加.当水胶比在小范围内变化时,第2种作用更强,所以 ϵ_a 增大.这种现象在纯水泥材料中一般不会出现,但会在纤维增强水泥基复合材料中出现,其原因在于纤维的掺入改变了材料内部的孔隙结构,进而改变了水分运动的方式与程度,最终导致材料的收缩特性发生改变.另外,砂胶比一定、水胶比在小范围内增大时, ϵ_a 在早龄期时增加幅度较大;当砂胶比为0.8时,随着龄期的增加, ϵ_a 的增加幅度随水胶比增大而下降.这是因为前期水化反应较充分,水胶比对 ϵ_a 的影响较大,而到了后期,水化反应基本进行完毕,水泥石结构已形成,不易产生变形,水胶比对 ϵ_a 的影响下降.由于砂对水泥基材料早期收缩的限制作用,当水胶比一定时, ϵ_a 随砂胶比的增大而减小,且早龄期时影响较大.以28 d龄期为例,砂胶比由0.8提高到1.1时,水胶比为0.55、0.50、0.45试件的 ϵ_a 分别下降了23.53%、16.88%、25.07%.

由图2(b)可见:LW/LS试件的 ϵ_a/ϵ_t 随龄期增加呈先增大后降低的趋势,在28~56 d, ϵ_a 有一定的增长,但总收缩增长极其缓慢;后期 ϵ_a 增长速率下降较快, ϵ_a/ϵ_t 降低;HW/HS试件 ϵ_a/ϵ_t 随龄期的增加呈线性

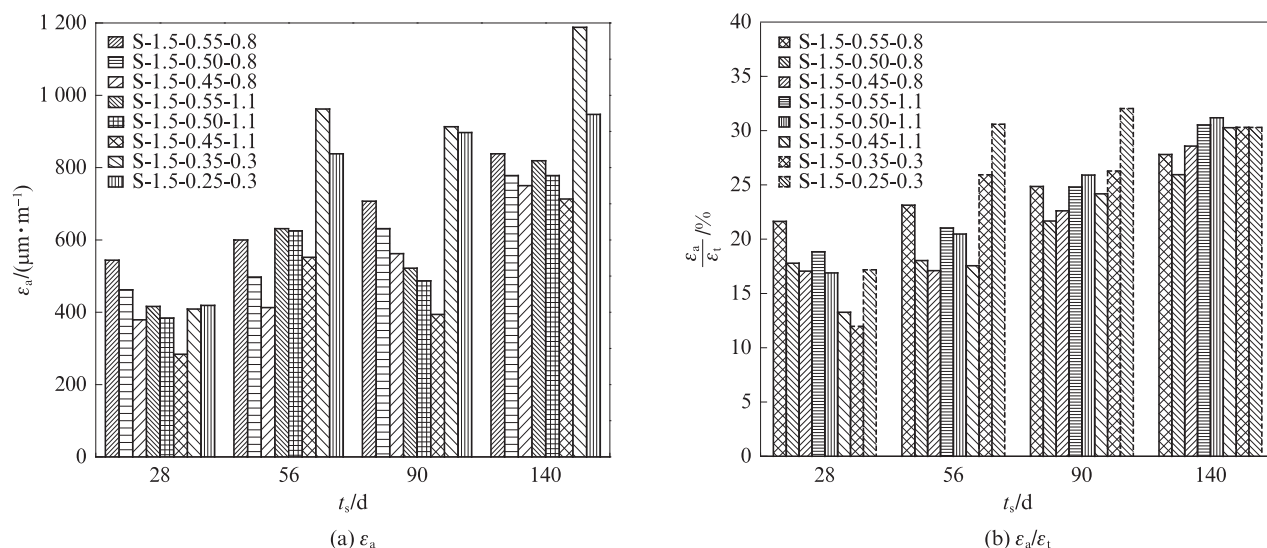


图2 不同水胶比、砂胶比PVA-FRCC试件自生收缩和自生收缩/总收缩
Fig. 2 ϵ_a and ϵ_a/ϵ_t of PVA-FRCC specimens with different m_w/m_b and m_s/m_b

增大;水胶比较小的试件 ϵ_a/ϵ_t 随龄期增加较快,水胶比较大的试件相反,这与文献[16]结论一致.分析其原因:水胶比较小试件的内部毛细孔隙率低、孔径小,早期水分无法快速向反应区迁移,导致反应区水量少,胶凝材料水化程度低,故 ϵ_a/ϵ_t 较小;中后期,试件中水分逐渐迁移,未水化的胶凝材料在较长时间内仍然可以缓慢吸收毛细管中的水分进行水化反应,后期水化反应量较大, ϵ_a/ϵ_t 较大.对于砂胶比较小的试件,其 ϵ_a/ϵ_t 早期相对较大、后期相对较小,砂胶比较大的试件正好相反.其原因为:早期砂胶比较大试件的单位体积胶凝材料较少,发生的化学收缩较小,且砂对材料内部水分迁移的阻碍作用较强,自干燥较小,故 ϵ_a 较小,且此时材料中水泥基相的弹性模量较小,砂对水泥基相收缩变形的约束作用较强,故早期 ϵ_a/ϵ_t 较小;随着龄期的增加,水泥基相的弹性模量逐渐增大,砂对收缩变形的约束作用降低, ϵ_a 的增长速率较快,故 ϵ_a/ϵ_t 增长较快.

2.3 自生收缩与水泥基材料强度的关系

已有混凝土收缩预测模型中收缩与材料强度存在一定关系^[17-19],故本文进行了二者之间关系的研究.图3为不同强度水泥基材料的自生收缩,图中水泥基材料强度基本涵盖了大部分实际工程的需要.由图3可见:相同龄期下,强度较大和较小的试件自生收缩 ϵ_a 较大,强度居中试件(S-1.5-0.45-1.1)的 ϵ_a 却最小;试件S-1.5-0.25-0.3的强度是S-1.5-0.55-0.8的2.60倍,但密封140 d时 ϵ_a 相差较小,前者的 ϵ_a 仅比后者高13.00%.这是因为强度居中的试件水胶比适中,砂胶比较大,故水化反应量适中,且较大的砂与PVA纤维有效地限制了其自生收缩;而强度较高的试件砂胶比较小,少量的砂无法有效限制水化反应

引起的自生收缩.

由上述试验结果及分析可知,强度的影响归根结底是配合比的影响.在实际应用中,根据具体工程的需要,通过合理选择配合比可取得较小收缩与较大强度的统一.

2.4 初始测试时间对自生收缩的影响

已有研究表明,低水胶比材料的收缩中自生收缩占比显著^[6,20],而本文试验中 ϵ_a/ϵ_t 在11.97%~32.03%,虽高于普通混凝土,但总体上 ϵ_a/ϵ_t 较小.实际工程中,试件自然干燥收缩非常严重,与密封试件相比,虽然自干燥有所增加,但由于供水化反应的水量减少,使化学收缩减少,所以自然环境中构件 ϵ_a/ϵ_t 可能更低.对本试验全过程和方法进行分析,出现以上现象的原因有以下2点:(1)本文试验中大部分试件水胶比较高,接近普通混凝土的水胶比,所以 ϵ_a/ϵ_t 较小;(2)本文试验方法参考JGJ/T 70—2009进行,对收缩的测试从初凝之后2 d开始,对前2 d之内发生的收缩未进行统计,而最初的2 d中材料水充足,自生收缩发生速率最快,故对最初2 d未进行收缩测试也造成了本次试验自生收缩的偏低.然而目前不同规范和标准对收缩初始测试时间的规定不同:GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定初始测试在拆模后标准养护3 d时进行;DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》规定初始测试时间为成型后带模养护2 d;JTJ E30—2001《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》规定带模标准养护到3 d时进行初始测试;RILEM联合会推荐标准规定标准养护(24±4) h拆模后立即进行初始测试;日本JIS-1129—2010《Methods of measurement for length change of mortar and concrete》规定试件成型后1 d进行初始测试;美国ASTM C157/C157M—2017《Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete》规定试件成型1 d后拆模,浸入23℃饱和石灰水中,放置30 min后测量试件初始长度^[14].各规范规定的初始测试时间普遍较晚且各不相同,导致试验结果不能真实反映材料的收缩性能,使不同研究结果间无法进行对比.高原等^[3]认为应该将混凝土凝结时间作为其收缩测量的初始时间,此时为混凝土由流态向固态的转变点,是混凝土膨胀变形向收缩变形转变的临界点,此后混凝土中将产生收缩应力.本文作者同意该观点,认为应将水泥基材料凝结时间作为其收缩初始测试时间,这样可测得超早期收缩应变,从而可测得全部收缩.

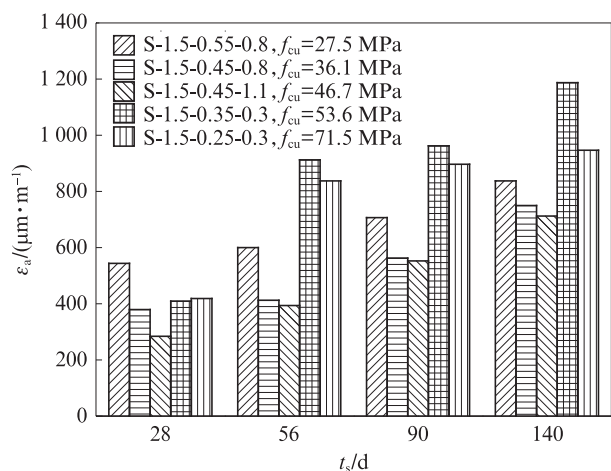


图3 不同强度水泥基材料的自生收缩

Fig. 3 ϵ_a of specimens with different strength of base material

3 解除密封后的总收缩发展

解除密封后试件的收缩-时间曲线见图4。由图4可见:解除密封后试件的总收缩发展经历了3个阶段,前期曲线斜率很大,说明在解除密封初期试件湿度仍较高,水分的快速蒸发导致大量干燥

收缩发生,使总收缩增加,随着时间的增加,收缩速率逐渐减小,最后趋于收敛;解除密封后,前期密封时间较长的试件总收缩均比非密封试件小,是因为长时间密封的试件前期水化反应耗水量较大,解除密封后发生的干燥收缩较少,因此其总收缩较小。

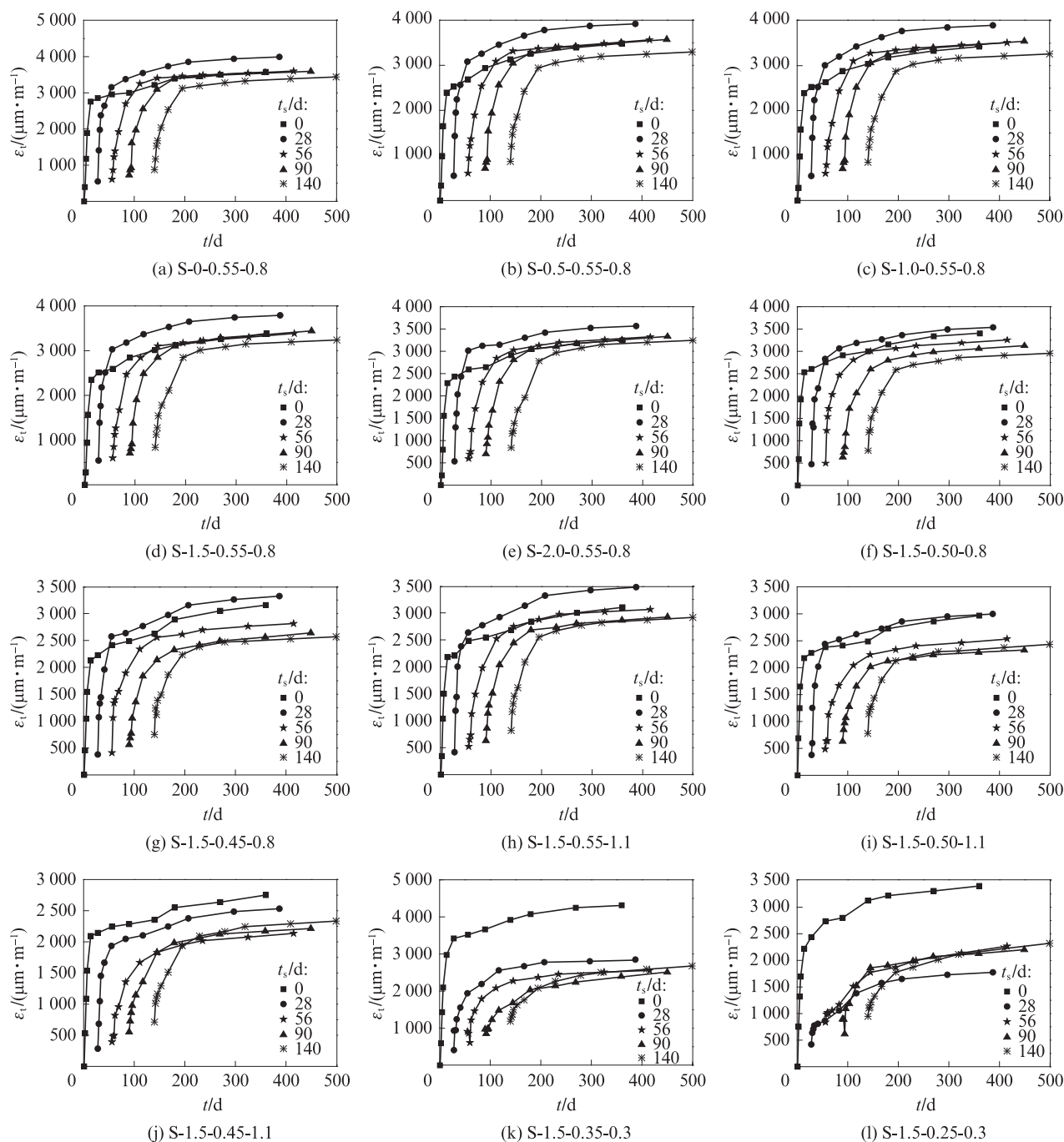


图4 解除密封后试件的总收缩-时间曲线
Fig. 4 ϵ_t - t curves of specimens after unsealing

由图4还可见,除S-1.5-0.45-1.1试件外,HW/HS试件在密封28 d、解除密封后60~360 d期间的总收缩均高于非密封试件。这可能是因为:密封试件在

前期密封28 d期间,水化反应比非密封试件更充足,产生了较大的自生收缩;水胶比较大时,解除密封后试件会在短时间内产生较大的干燥收缩,此时若试

件砂胶比不是足够大,砂对收缩的限制作用较弱,使其总收缩增大;非密封试件一直暴露于空气中,早期碳化作用产生的 CaCO_3 沉淀物充塞于毛细孔中,给内部水分迁移造成困难,阻碍了水分的蒸发,使干燥收缩和自干燥收缩均小于密封试件,故总收缩较小。LW/LS 的 2 组试件含水量较少,在密封期内大部分水用于水化反应,解除密封后干燥收缩较小,故解除密封后总收缩一直远小于非密封试件,前期密封 28、140 d 的 S-1.5-0.35-0.3 试件在解密封 360 d 时的总收缩分别是未密封试件的 65.8% 和 62.1%。由此可见,对于水胶比较小的试件,采取前期密封养护会大幅减小其总收缩。实际工程中,如在早期采取覆盖塑料膜等方法对材料进行一定时间的养护,将有效减小其总收缩,从而减轻收缩裂缝,且密封 28 d 与 140 d 对 PVA-FRCC 收缩的减小作用相差不多,故实际工程中在试件浇筑完毕后覆盖塑料膜养护 28 d 即可达到较好的减收缩效果。

4 结论

(1) 掺入 PVA 纤维可降低水泥基材料的自生收缩,但幅度较小,降低程度在 2.5%~4.2%;PVA 纤维对 PVA-FRCC 自生收缩的影响程度小于对总收缩的影响。

(2) 低水胶比/低砂胶比试件的自生收缩大于高水胶比/高砂胶比试件;当水胶比在小范围内变化时,PVA-FRCC 的自生收缩随水胶比的增大而增大,随砂胶比增大而降低;早龄期时水胶比与砂胶比对材料自生收缩的影响较大,晚龄期时影响较小。

(3) 高水胶比/高砂胶比试件自生收缩占比 (ϵ_a/ϵ_t) 随龄期的增加而提高,低水胶比/低砂胶比试件 ϵ_a/ϵ_t 随龄期的增加先提高后降低;水胶比较小或砂胶比较大的试件 ϵ_a/ϵ_t 增长速度较快,反之则较慢。本文中 PVA-FRCC 材料的自生收缩占比较小,主要原因是初始测试时间较晚。

(4) 水泥基材料强度较大或较小时,其自生收缩较大,可根据具体工程的实际需要,通过合理选择配合比可取得较小收缩与较大强度的统一。

(5) 解除密封后,高水胶比/高砂胶比试件仍可发生较大的总收缩,低水胶比/低砂胶比试件则总收缩较小。

参考文献:

[1] 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 Guoxing, HUI Rongyan, WANG Xiujuan. Creep and shrinkage of concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012. (in Chinese)

[2] 张君,侯东伟,高原.混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(9):1321-1324.

ZHANG Jun, HOU Dongwei, GAO Yuan. Uniform driving force for autogenous and drying shrinkage of concrete[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1321-1324. (in Chinese)

[3] 高原,张君,韩宇栋.混凝土超早期收缩试验与模拟[J].硅酸盐学报,2012,40(8):1088-1094.

GAO Yuan, ZHANG Jun, HAN Yudong. Tests and simulations on shrinkage of concrete at early-age[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8):1088-1094. (in Chinese)

[4] ZHANG J, HAN Y, GAO Y. Effects of water-binder ratio and coarse aggregate content on interior humidity, autogenous shrinkage, and drying shrinkage of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(1):184-189.

[5] MA R, GUO L P, YE S X, et al. Influence of hybrid fiber reinforcement on mechanical properties and autogenous shrinkage of an ecological UHPFRCC [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(5):04019032.

[6] SAJE D, SAJE F. Autogenous shrinkage development in HPC [C]// Proceedings of High Performance Materials in Bridges. Hawaii: American Society of Civil Engineers, 2003:11-20.

[7] MENG W, KHAYAT K H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(4):04018030.

[8] 水亮亮.超高性能混凝土抗压强度尺寸效应及收缩特性[J].建筑材料学报,2019,22(4):632-637.

SHUI Liangliang. Size effect of compressive strength and shrinkage characteristics of ultra high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 632-637. (in Chinese).

[9] 马一平,仇建刚,王培铭,等.聚丙烯纤维对水泥砂浆塑性收缩行为的影响[J].建筑材料学报,2005,8(5):499-507.

MA Yiping, CHOU Jiangang, WANG Peiming, et al. Effect of polypropylene fiber on the plastic shrinkage stress and plastic shrinkage ratio of mortar[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5):499-507. (in Chinese).

[10] 施韬,李泽鑫,李闪闪.碳纳米管增强水泥基复合材料的自收缩及抗裂性能[J].复合材料学报,2019,36(6):1528-1535

SHI Tao, LI Zexin, LI Shanshan. Autogenous shrinkage and crack resistance of carbon nanotubes reinforced cement based composites[J]. Acta Materialiae Composita Sinica, 2019, 36(6): 1528-1535. (in Chinese).

[11] 徐世烺,刘志凤.超高韧性水泥基复合材料干缩性能及其对抗裂能力的影响[J].水利学报,2010,41(12):1491-1496.

XU Shilang, LIU Zhifeng. Drying shrinkage behavior of ultrahigh toughness cementitious composites and its influence on anti-cracking capacity [J]. Shuili Xuebao, 2010, 41(12): 1491-1496. (in Chinese)

- [12] JUAREZ C A, FAJARDO G, MONRONY S, et al. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91:164-170.
- [13] 张君, 公成旭, 居贤春. 高韧性低收缩纤维增强水泥基复合材料特性及应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(12):1452-1461.
ZHANG Jun, GONG Chengxu, JU Xianchun. Characteristics of high ductility and low shrinkage engineered cementitious composite and its applications[J]. *Shuili Xuebao*, 2011, 42(12): 1452-1461. (in Chinese)
- [14] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(1):13-28.
CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18 (1) : 13-18. (in Chinese)
- [15] ZHOU S B, SHEN A Q, LIANG X Y, et al. Effect of water to cement ratio on autogenous shrinkage of pavement cement concrete and its mechanism analysis[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 8(1):7-12.
- [16] LUO X, CHEN B, WEI J, et al. Experimental study on shrinkage of sealed UHPC[C]//*Proceedings of 4th International Symposium on Ultra High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*. Kassel:Kassel University Press, 2016:1-9.
- [17] Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP model code 2010: Design code[S]. London:Thomas Telford Services Ltd., 2010.
- [18] GARDNER N J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete[J]. *Materials Journal*, 2001, 8(2):159-167.
- [19] BAZANT Z P, MURPHY W P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structure: Model B3[J]. *Materials and Structures*, 1995, 28:357-365.
- [20] ZHANG J, ZHANG J J, DING X P. Evaluation of shrinkage and fracture properties of internal cured 100-MPa ultrahigh-strength steel fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(11):06017016.