

# 应变硬化水泥基复合材料(SHCC) 抗压性能试验研究

胡春红<sup>1</sup>,高艳娥<sup>1</sup>,周 琼<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学土木工程学院,河南 焦作 454003;

2. 湖北省宜昌市夷陵区城市建设项目办公室,湖北 宜昌 443100)

**摘 要:**研究了不同龄期和不同性能 PVA 纤维对 SHCC 抗压性能的影响,获得了 SHCC 材料的压应力-应变全曲线及不同试件的抗压性能规律. 结果表明:随着龄期的增长,SHCC 抗压强度提高,变形性能有所下降;掺加纤维 2 制作的试件变形性能低于纤维 1 制作的试件,但强度相差不大. 研究成果可为此种材料在工程结构中的研究与应用提供理论依据.

**关键词:**SHCC;抗压性能;压应力-应变曲线;变形

**中图分类号:**TU52

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2013)05-0658-05

应变硬化水泥基复合材料(SHCC)通过在水泥砂浆基体中掺入一定量的 PVA 纤维而使该材料在拉伸荷载作用下的极限拉应变可达 5%~7%,几乎相当于钢材的塑性变形能力<sup>[1]</sup>,其优越的抗拉性能显著改变了传统水泥基材料的脆性特征,提高了材料的断裂韧性,且不降低其抗压强度,这对于解决水泥基材料由于脆性引发的诸多耐久性问题十分重要,近年来在国外被广泛研究与应用<sup>[2-3]</sup>.

国内各高校与科研机构于本世纪初开始对此种材料进行研究. 由于 SHCC 最突出的特征是在拉伸荷载作用下具有应变硬化和多微开裂特性,所以前期的研究主要针对 SHCC 的直接拉伸性能和抗弯性能展开<sup>[4-6]</sup>. 然而,抗压性能作为衡量水泥基材料基本性能的一项重要指标,在该方面的研究也必不可少. 近几年,国内已开始对其抗压性能进行研究. 文献[7]通过试验研究得出:PVA 纤维的加入使基体韧性大幅提高,试件的破坏模式由脆性破坏转变为延性破坏. 文献[8]通过试验研究得出:加入 PVA 纤维的水泥基复合材料的抗压强度与未加纤维的试件相比,提高幅度约为 10%;文献[9]主要研究了不同长径比与体积掺量的 PVA 纤维对棱柱体试件抗压强度的影响,结果表明:抗压强度随体积掺量的增加而略有降低,随长径比的增大而提高. 从整体上看,目前国内对 SHCC 抗压性能的研究还不够完善,相关理论也不成熟,因此笔者在课题组前期对 SHCC 单轴拉伸性能研究已有成果的基础上<sup>[10]</sup>,对不同参数的 SHCC 试件进行了抗压性能试验研究,所得结果可为此种材料的力学性能研究及工程应用提供理论依据.

## 1 试验材料与制作

### 1.1 试验材料

试验中采用普通硅酸盐水泥 P. O42. 5; I 级粉煤灰; EAST-SAF 高效减水剂,减水率为 15%~16%;普通自来水;不同产地的 PVA 纤维,性能见表 1.

### 1.2 试件制作工艺

首先将称量好的胶凝材料和普通河砂投入搅拌机

表 1 PVA 纤维性能参数

Tab. 1 The performance parameters of PVA fiber

纤维名称	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	长度 /mm
纤维 1	1.2	1 620	42.8	12
纤维 2	1.3	880~1 800	25~40	12

注:纤维 1 为 K-II REC15 型 PVA 纤维,价位较高;纤维 2 为高强高模 PVA 纤维,价位较低.

收稿日期:2013-02-25 修改稿日期:2013-09-03

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划基金资助项目(2011A560003);河南理工大学创新基金资助项目(2011-M-46)

作者简介:胡春红(1976-),女,河南项城人,博士,副教授,主要从事工程结构加固与修复方面的研究.

内,干拌 2 min,待其混合均匀后加水和适量的减水剂搅拌 4 min,以使砂浆基体具有良好的流动性和粘聚性,最后加入 PVA 纤维,高速搅拌 5 min. 搅拌结束后,纤维分散性良好,无结团现象. 所有试件都采用自制钢模成形,24 h 后拆模,放入标准养护室养护至试验龄期.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 SHCC 抗压全曲线分析

根据文献[10]的研究,采用纤维 1 制作的试件抗拉性能优越,其极限拉应变可达到 3% 以上,故此处对采用纤维 1 制作的试件进行了抗压性能试验研究,获得了压应力-应变曲线.

试验采用圆柱体试件,尺寸参考美国 ASTM C1018 规范为  $\Phi 75\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ,在 300 t 微机控制电液伺服万能材料试验机上进行单轴抗压试验,采用位移控制,加载速率为 0.02 mm/s;试验过程中采用 2 个数显千分表分别在试件两侧的对称位置测量压缩变形. 每组 3 个试件.

单轴受压状态下 SHCC 的压应力-应变全曲线可以全面反映此种材料各受力阶段的变形特点与破坏过程,包含了重要的力学指标,是结构设计和材料分析所必须的物理条件. 图 1(a)~(c)分别给出了 7 d、14 d 和 28 d 龄期下 SHCC 压应力-应变全曲线,图中 Y 代表试件类型为圆柱体, J 代表纤维 1, 数字 1、2、3 代表试件编号. 由图可以看出,曲线分为上升段和下降段. 根据试验结果,曲线上峰值应力对应的压应变均值分别为 0.018(7 d)、0.015(14 d)和 0.013(28 d),明显高于混凝土的 0.002. 因此,虽然 SHCC 的压应力-应变全曲线形状与普通混凝土抗压全曲线类似,都属于偏态的单峰曲线,但 SHCC 的塑性变形能力明显优于混凝土.

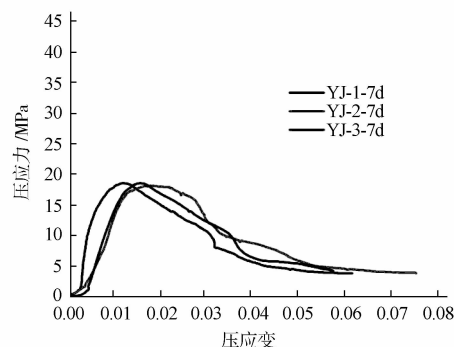
由图 1 还可以看出,峰值应力后,随着应变的增长应力缓慢下降,下降段坡度较为平缓,当应力下降到峰值应力的 25% 左右时,应力值基本保持不变,应变依然持续增加,极限压应变显著提高,表现出良好的塑性特征.

另外,试验结果表明圆柱体试件的 28 d 抗压强度接近 40 MPa,与普通混凝土相比无明显降低,这说明纤维不但提高了此种材料的变形能力,而且对强度具有无害性.

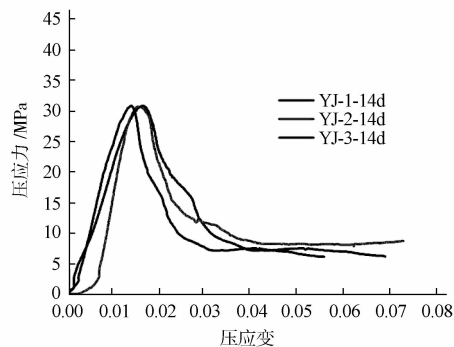
### 2.2 龄期对 SHCC 抗压强度及变形的影响

将每组 3 个圆柱体试件所得应力-应变曲线平均后集中于一图中,如图 2 所示,图中字母含义同图 1. 由图可以看出,随着龄期的增长,抗压强度不断提高,曲线上升段斜率逐渐增大,越来越陡峭;当外力荷载达到峰值应力后,压应力-应变曲线下下降段斜率也不尽相同,龄期较短时,下降段斜率较小,应力速度下降较为缓慢,随着龄期的增长,应力下降速度也加快. 由此可以说明抗压强度升高的同时延性有所降低.

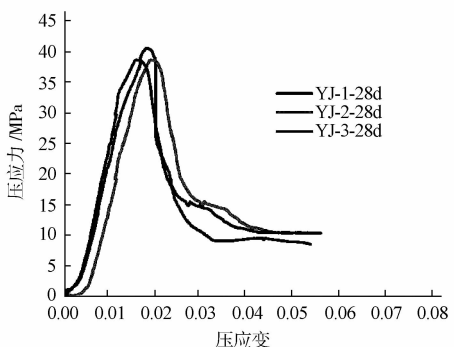
在抗压强度测试过程中,还制作了  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$  的棱柱体试件,先对该类试件进行抗折强度测试,然后在全自动数据采集处理抗压试验机上对折断后的一半试件进行抗压强度试验,此类试件受压面积为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ,因试件高度也为 40 mm,



(a) 7d 压应力-应变曲线



(b) 14d 压应力-应变曲线



(c) 28d 压应力-应变曲线

图 1 不同龄期下 SHCC 压应力-应变曲线

Fig. 1 Compressive stress-strain curves of SHCC

故此称为立方体试件抗压强度. 图3为不同龄期立方体试件抗压强度对比图, 图中L代表试件类型为棱柱体试件折断后的一半, 其它字母含义同图1. 由图可知随着龄期的增长, 其抗压强度不断提高.

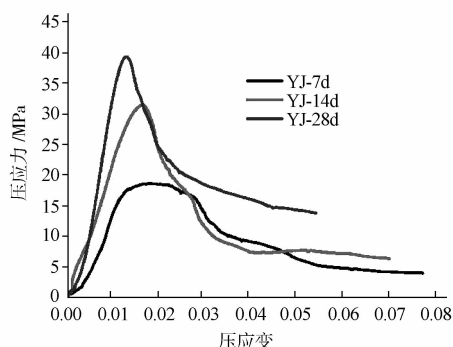


图2 不同龄期下圆柱体试件压应力-应变平均曲线

Fig. 2 The average compressive stress-strain curves of specimens at different age

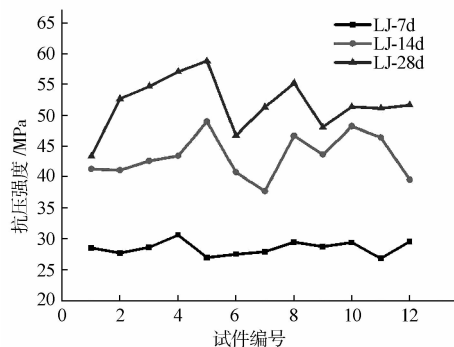


图3 不同龄期下立方体试件抗压强度对比图

Fig. 3 The compressive strength contrast of cube specimens at different ages

### 2.3 试件类型对 SHCC 抗压强度及裂缝发展的影响

根据试验结果, 不同龄期下, 圆柱体试件抗压强度平均值分别为 17.961(7 d)、30.733(14 d)和 38.485(28 d), 立方体试件抗压强度平均值分别为 28.537(7 d)、43.424(14 d)和 51.901(28 d). 可以看出, 当龄期相同时, 立方体试件抗压强度普遍比圆柱体试件抗压强度高, 这说明试件尺寸效应和形状效应对其抗压性能是有影响的, 尺寸越大, 高宽比越大, 测得的材料强度就越低. 同时, 由于立方体试件为抗折试验后的一半试件, 其受压面的尺寸大于受压面积, 伸出标准夹具以外的部分由于纤维的连接作用在受压过程中不能发生脆性断裂, 导致试件的横向变形受到约束, 使试验测得的抗压强度明显高于圆柱体抗压强度值.

另外, 试验过程中通过对不同类型试件的裂缝开展及破坏形态进行观察发现, 两者的裂缝发展情况与破坏模式也不尽相同. 在压缩荷载作用下, 圆柱体试件首先在顶部周围出现一些微裂缝, 然后随着荷载的增加, 试件最薄弱部位的纤维被拔出或拉断, 形成一条主裂缝, 荷载继续增加, 该裂缝宽度逐渐增加并沿一定角度向下扩展, 当延伸至距试件顶部约 1/3 位置时, 顶部其它部位一些裂缝相继扩展并延伸, 最终在荷载作用下, 宽度较大的裂缝贯通后产生斜向剪切破坏, 如图4所示. 立方体试件受压时, 首先在试件表面观测到较多微裂缝, 最终由于其中一条或多条裂缝宽度较大不能继续承载而宣告破坏, 如图5所示.

通过观察发现所有试件在峰值荷载时均能保持良好的完整性, 不会出现类似混凝土的坍塌破坏. 试验结束时可以观察到所有试件除了受压面中间的受压部分产生较大的压缩变形外, 试件整体性完好, 没有发现基体剥落和突然的破碎现象.

### 2.4 纤维性能对 SHCC 抗压强度及变形的影响

图6为不同纤维圆柱体试件压应力-应变曲线对比图(其中, YJ代表纤维1制作的试件, YG代表纤维2制作的试件), 由图可以看出, YG的抗压强度较高, 峰值应力后下降段较陡, 应力下降速度较快, 说明其变形性能较差. 在试件制作过程中发现, 加入纤维2时, 基体的引气效果不明显, 试件相对密实, 故强度较高; 但由于纤维2的抗拉性能低于纤维1(见表1), 试件中出现裂缝后, 纤维1的桥联作用优于纤维2, 使得试件开裂后能够承受更大的变形而不破坏, 提高了材料的韧性, 故 YJ 试件的强度虽略低, 但其韧性较好.



图4 圆柱体试件破坏形态图

Fig. 4 The failure mode of cylinder specimens

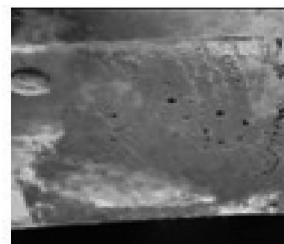


图5 立方体试件破坏形态图

Fig. 5 The failure mode of cube specimens

图7为立方体试件抗压强度对比图,由图也可看出,YG试件的强度均高于YJ试件.结果与圆柱体试件相同.

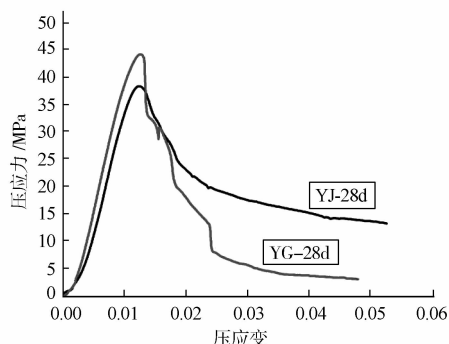


图6 不同纤维圆柱体试件压应力-应变曲线对比图

Fig. 6 Comparison of compressive stress-strain curves of cylinder specimens mixed with different fibers

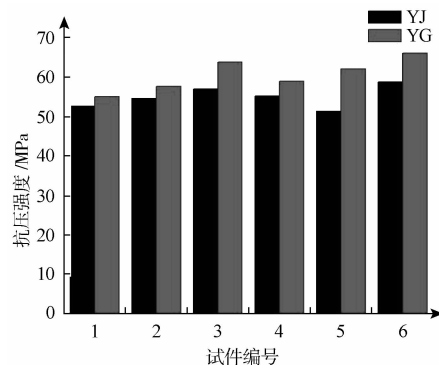


图7 不同纤维立方体试件抗压强度对比图

Fig. 7 Comparison diagram of compressive strength of cube specimens mixed with different fibers

试验过程中发现两类试件的裂缝发展情况也不相同:YG试件会首先在某一薄弱部位出现一条裂缝,随着荷载的增加,裂缝宽度越来越大,随后在这条主裂缝周围出现3—5条次裂缝,最后由于主裂缝宽度过大而宣告破坏;YJ试件虽然一开始也会先出一条裂缝,但随着荷载的增长,裂缝宽度几乎保持不变,同时在其周围一定间距处相继出现许多微小的裂缝,最后当荷载达到极限强度时,最薄弱位置处的裂缝逐渐变宽,直至试件破坏.

### 3 结 论

根据上述试验结果,可得结论如下:

(1)SHCC受压时,峰值应力对应的28d应变大约为0.013左右,明显高于混凝土的0.002,且压应力-应变全曲线峰值后表现出缓慢的下降过程,说明SHCC具有良好的压缩韧性.

(2)圆柱体试件的28d抗压强度接近40MPa,与普通混凝土相比无明显降低,说明此种材料不但提高了其压缩变形性能,而且对强度具有无害性.

(3)观察试件的破坏形态发现,圆柱体试件产生斜向剪切破坏;立方体试件表面能观测到较多微裂缝;所有试件在峰值荷载时均能保持良好的完整性,未出现突然性的坍塌破坏,具有塑性破坏特征.

(4)YG试件的抗压强度明显高于YJ试件,但变形性能相对较差,考虑到纤维2的成本较低,故可根据工程实际对材料韧性的要求选择使用.

### 参考文献 References

- [1] LI V C. Progress and applications of engineered cementitious composites[J]. Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531-536.
- [2] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [3] KOJIMA S, SAKATE N, KANDA T, et al. Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface application for mitaka-dam[J]. Concrete Journal, 2004, 42(5): 135-139.
- [4] 薛会青, 邓宗才, 李建辉. PVA纤维水泥基复合材料的抗拉性能及韧性研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2009, 30(1): 92-95.  
XUE Hui-qing, DENG Zong-cai, LI Jian-hui. Tensile performance and toughness of PVA fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2009, 30(1): 92-95.
- [5] 公成旭, 张 君. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 361-366.  
GONG Cheng-xu, ZHANG Jun. Tensile performance of high ductile fiber reinforced cementitious composite[J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 361-366.
- [6] 田砾, 毛新奇, 李晓东, 等. 应变硬化水泥基复合材料(SHCC)弯曲韧性研究[J]. 混凝土, 2006(11): 9-12.  
TIAN Li, MAO Xin-qi, LI Xiao-dong, et al. Flexural toughness of strain hardening cementitious composites (SHCC) [J]. Concrete, 2006(11): 9-12.
- [7] 徐世琅, 蔡向荣, 张英华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力-应变全曲线试验测定与分析[J]. 土木工程学报, 2009(11): 79-84.  
XU Shi-lang, CAI Xiang-rong, ZHANG Ying-hua. Experimental measurement and analysis of the axial compressive stress-strain curve of Ultra high toughness cementitious composites[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(11): 79-84.
- [8] 陈升平, 李素华. PVA纤维增强水泥基复合材料的性能试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(2): 108-112.  
CHEN Sheng-ping, LI Su-hua. Experimental Research on Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composite[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2011, 26(2): 108-112.
- [9] 陈婷. 高强高弹PVA纤维增强水泥基材料的研制与性能[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.  
CHEN Ting. Production and properties of cementitious composites with high-strength and high modulus PVA fiber reinforcement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [10] 胡春红, 赵铁军, 戎涛. 应变硬化水泥基复合材料(SHCC)抗拉性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(3): 102-106.  
HU Chun-hong, ZHAO Tie-jun, RONG Tao. EXPERIMENTAL RESEARCH ON TENSILE PERFORMANCE OF STRAIN HARDENING CEMENTITIOUS COMPOSITES (SHCC) [J]. Industrial Construction, 2012, 42(3): 102-106.

## Experimental research on the compressive performance of SHCC

HU Chun-hong<sup>1</sup>, GAO Yan-e<sup>1</sup>, ZHOU Qiong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. The urban construction project office of Yiling district, Yichang 443100, China)

**Abstract:** The influence of different fiber type on compressive performance of SHCC was researched and the compressive stress-strain full curves and performance rule of different specimens was obtained. The results show that deformation performance of SHCC reduced and compressive strength increased along with the growth of the ages; the deformation performance of SHCC with fiber 2 is lower than that of SHCC with fiber 1, but their strength was not significantly different. The experimental and analytical conclusion can provide a lot of theoretical bases for the research on the performances of SHCC.

**Key words:** SHCC; compression performance; compressive stress-strain curve; deformation