

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.018

# 玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线试验研究

赵高锦<sup>1</sup>, 赵卓<sup>2</sup>, 陈歆<sup>3</sup>, 张国荣<sup>3</sup>

(1. 红河州交通运输局公路工程质量监督站, 云南 蒙自 661100;

2. 韶关市公路局基本建设科, 广东 韶关 512000;

3. 苏交科集团股份有限公司 在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室, 江苏 南京 211112)

**摘要:** 玄武岩纤维是混凝土良好的增强增韧材料, 应力-应变全曲线是混凝土最基本的本构关系, 是钢筋混凝土结构分析中重要的物理方程。采用单轴压缩试验, 进行了玄武岩纤维混凝土单轴受压应力-应变全曲线研究, 开展了不同纤维掺量与矿物掺合料种类对各特征点应力-应变关系及全曲线本构参数的影响规律研究。研究表明, 玄武岩纤维可提高混凝土的韧性和破坏后的延性, 掺入玄武岩纤维后混凝土应力-应变全曲线峰值点、反弯点与临界剪切点处的应力均有所提高, 在纤维掺量为 0.10% 时最大, 各点对应的应变随玄武岩纤维掺量增加而增大, 在纤维掺量为 0.12% 时最大; 当纤维掺量为 0.12% 时, 玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线上段本构参数  $\alpha_a$  为 1.76, 下降段本构参数  $\alpha_d$  为 1.71; 掺入粉煤灰会进一步降低玄武岩纤维混凝土的脆性, 而磨细矿渣粉则相反。

**关键词:** 玄武岩纤维混凝土; 应力-应变全曲线; 本构方程; 初始切线模量; 峰值点; 反弯点; 临界剪切点  
**中图分类号:** TU528.572      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1144(2019)01-0103-05

## Experiments on Complete Stress-strain Curves of Basalt Fiber Reinforced Concrete

ZHAO Gaojin<sup>1</sup>, ZHAO Zhuo<sup>2</sup>, CHEN Xin<sup>3</sup>, ZHANG Guorong<sup>3</sup>

(1. Honghe Communications and Transportation Bureau Highway Engineering Quality Supervision Station, Mengzi, Yunnan 661100, China;

2. Capital Construction Section of Shaoguan Highway Bureau, Shaoguan, Guangdong 512000, China;

3. State Key Laboratory of Safety and Health for In-service Long Span Bridges, JSTI Group, Nanjing, Jiangsu 211112, China)

**Abstract:** Basalt fiber is a good reinforcement and toughening material for concrete, complete stress-strain curves are the most basic constitutive relations of concrete. It is an important physical equation in reinforced structure analysis. In this paper by using rigid components to improve the rigidity of the press, complete stress-strain curves tests of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) under uniaxial compression were conducted. Tests investigated effects of different fiber contents and mineral additions on stress-strain relationships of characteristic points and constitutive parameters of complete curves. Results indicate that basalt fiber can improve concrete deformability, toughness in service and ductility after failure. With 0.12% fiber content, the constitutive parameter  $\alpha_a$  of upward section in BFRC complete curves is 1.76 and that of downward section  $\alpha_d$  is 1.71. Fly ash would further reduce concrete brittleness, while slag has the opposite effects.

**Keywords:** basalt fiber reinforced concrete; complete stress-strain curve; constitutive equation; initial tangential modulus; peak point; inflection point; critical shear point

随着混凝土技术的发展, 纤维的掺入对混凝土性能影响规律的研究开展较多<sup>[1-4]</sup>, 其中玄武岩纤维具有较高的抗拉强度与弹性模量, 同时其与混凝土

密度相近、与混凝土间界面良好, 是良好的混凝土增强增韧材料。目前对玄武岩纤维力学性能的研究<sup>[5-14]</sup>较多, 发现在混凝土中掺入玄武岩纤维, 能

很好地提高混凝土的弯拉强度、抗裂能力、冲击韧性等。赵燕茹等<sup>[15]</sup>还研究了玄武岩纤维混凝土应力上升段的应力-应变关系。

目前对玄武岩纤维混凝土单轴受压下全过程应力-应变曲线的研究并不多见,但其是进行混凝土构件极限承载力分析和非线性全过程分析时必不可少的本构模型<sup>[16-17]</sup>。

因此,有必要对玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线开展试验研究,主要探索了玄武岩纤维不同体积掺量(0.08%、0.10%和0.12%)与矿物掺合料(单掺20%粉煤灰、复掺10%粉煤灰和10%磨细矿渣粉)对特征点应力-应变关系与全曲线本构参数的影响规律。研究进一步加深了对玄武岩纤维混凝土力学性能的了解,确定了玄武岩纤维混凝土的本构方程,为工程提供技术支持。

## 1 试验

### 1.1 原材料

(1) 水泥:哈尔滨水泥厂生产,天鹅牌 P·O 42.5;

(2) 粉煤灰:哈尔滨第三发电厂生产,Ⅱ级;(3) 磨细矿渣粉:S95级;(4) 粗集料:5 mm~20 mm连续级配玄武岩碎石;(5) 细集料:中砂;(6) 减水剂:聚羧酸 PCA 型;(7) 玄武岩纤维:四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司生产,直径 13  $\mu\text{m}$ ,长 20 mm,密度 2 800  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;(8) 水:普通自来水。

### 1.2 配合比设计

试验配合比见表 1 和表 2。经立方体抗压强度试验验证,各组配合比 28 d 强度等级为 C40。

表 1 混凝土配合比设计参数

组别	纤维体积掺量/%	粉煤灰掺量/%	磨细矿渣粉掺量/%
BF0	0.00	0	0
BF8	0.08	0	0
BF10	0.10	0	0
BF12	0.12	0	0
BF10-F	0.10	20	0
BF10-F-S	0.10	10	10

表 2 各组混凝土配合比

单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$

组别	不同材料用量						
	水泥	粉煤灰	磨细矿渣粉	水	粗集料	细集料	纤维
BF0	430	0	0	172	1169	629	—
BF8	430	0	0	172	1169	629	2.24
BF10	430	0	0	172	1169	629	2.80
BF12	430	0	0	172	1169	629	3.26
BF10-F	344	86	0	172	1169	629	2.80
BF10-F-S	344	43	43	172	1169	629	2.80

### 1.3 试验装置与方法

#### 1.3.1 试件制备

按照《纤维混凝土试验方法标准》<sup>[18]</sup>(CECS 13:2009),每组配合比按 100 mm × 100 mm × 300 mm 制作棱柱体试件各 6 个。搅拌时先将水泥与粗细骨料搅拌均匀,在此过程中分三批撒入玄武岩纤维,然后再加水 and 外加剂溶液继续搅拌,搅拌时间不少于 3 min,确保玄武岩纤维在混凝土中均匀分散,防止结团。混凝土振捣成型后标准条件养护至 28 d。

#### 1.3.2 试验装置

于试件中部竖直贴上应变片,与 DH 3818 静态应变测试系统相连。在 5 000 kN 压力机工作平台上安放力传感器、试件与垫块,后在试件四楞上方垫块处安放拉杆式磁力位移计,位移计与 WS-3811 数字式应变数据系统相连。试验装置示意图如图 1

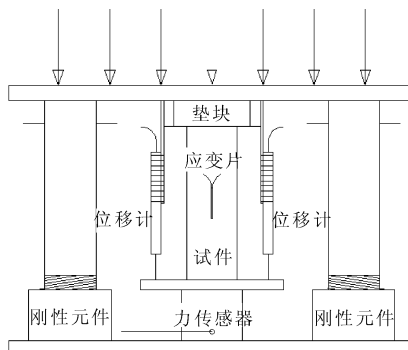


图 1 试验装置示意图

所示。

为解决压力机刚度不足的问题,在试验装置中引入了刚性组件。引入的刚性组件可协助吸收压力机快速释放的应变能,避免试件的瞬间脆性崩坏,从

而得到完整的应力-应变全曲线。另外,由图 1 可知,混凝土的应力由混凝土下方的力传感器测出,混凝土的应变由混凝土侧面的应变片和位移计测得。上述设备都是直接对混凝土的受力和反应状态进行测量,不与刚性组件发生关系。故刚性组件对混凝土试件的压缩无影响。压力机卸载刚度和刚性组件刚度之和大于试件荷载-变形曲线下降段的最大斜率(绝对值)且刚性组件在弹性范围内的压缩量大于试件试验所需要的变形量。

### 1.3.3 试验方法

试验前启动压力机以约破坏荷载的 40% 进行预压,加载速度取 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s,用应变片读数进行物理对中调整和受压稳定性调整,直至试件两边应变片读数相差  $\leq 15\%$  以及相邻两次加载两应变片平均值相接近为止。若应变片读数差别太大,则需要调整试件位置与荷载传递装置。调整后再次进行预压,直至对中完成。

开始正式加载后,应保持加载连续均匀,最大荷载前的加载速度控制在 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s,然后按其变形控制,取 0.1 mm/min ~ 0.2 mm/min。当试件临近破坏变形速度增快时,应停止调整试验机油门,直至试件表面被裂缝贯穿,如图 2 所示。图 2 可说明在刚性原件的辅助下,混凝土单轴受力过程符合预期,没有出现脆性崩坏。WS-3811 数字式应变数据采集系统在试验中全程工作,DH 3818 静态应变测试系统则在读数减小(应变片损坏)后停止读数直接保存。



图 2 表面被裂缝贯穿的试件

## 2 结果分析

通过对试验所得的应力-应变关系曲线中峰值点、反弯点、临界剪切点等特征点进行分析,进而对玄武岩纤维混凝土的本构方程进行拟合分析。

### 2.1 特征点分析

#### 2.1.1 峰值点

混凝土应力-应变全曲线的峰值点(一阶导为零的点)是混凝土破坏前承载能力和变形能力最直观的表现。各组玄武岩纤维混凝土峰值点应力与应变见图 3。试验条件下,掺入玄武岩纤维后,混凝土峰值应变随纤维掺量增大而提高,掺量为 0.12% 的玄武岩纤维混凝土峰值点应变较普通混凝土提高约 17%。掺入玄武岩纤维后峰值应力相较普通混凝土也有所提高,但未呈现出与纤维掺量正相关的特点。纤维掺量为 0.10% 时峰值应力最大,较普通混凝土提高约 14%。这是因为混凝土中的玄武岩纤维约束了混凝土的变形,一定程度上有改变了混凝土单轴受压的状态,同时其还有约束微裂纹扩展的作用,提高了混凝土的承载能力和变形能力。但是随着纤维掺量增大,部分纤维未能良好地分散,团聚的纤维在混凝土中形成薄弱区域,降低了混凝土内部结构的密实性,对混凝土承载能力不利。

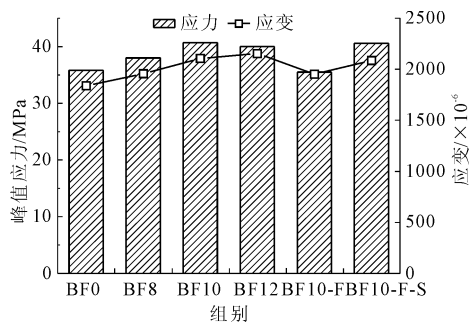


图 3 玄武岩纤维混凝土峰值点应力与应变

玄武岩纤维、磨细矿渣粉、粉煤灰三者复掺的混凝土较玄武岩纤维、粉煤灰二者复掺的混凝土峰值应力和应变更大。这是因为试验所用粉煤灰在 28 d 龄期时,二次水化还不充分,对混凝土承载能力贡献有限。而试验所用的磨细矿渣粉比粉煤灰更细,具有较好的活性,在微集料效应和二次水化作用耦合下,混凝土内部结构更密实,承载能力更高。

混凝土应力-应变全曲线上上升段中,曲线的模量越大,则在相同应变区间内混凝土韧性越大,即所吸收的能量越大。各组玄武岩纤维混凝土的初始切线模量与峰值割线模量见图 4。试验条件下,各组玄武岩纤维混凝土的峰值割线模量相近,而初始切线模量差异较明显。掺入玄武岩纤维后,混凝土的初始切线模量随玄武岩纤维掺量有所提高。掺入粉煤灰会降低初始切线模量,而掺入磨细矿渣粉则会提高初始切线模量。

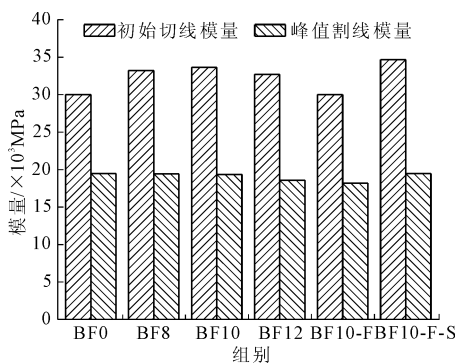


图 4 玄武岩纤维混凝土初始切线模量与峰值割线模量

### 2.1.2 反弯点

反弯点是混凝土应力-应变全曲线下阶段二阶导为零的点。应力-应变全曲线在过了峰值点后开始逐渐变陡,直至反弯点曲线才开始变得平缓。反弯点出现时残余应力和累积应变越大,则说明峰值后的应力快速下降段越平缓,混凝土延性越好。又因为反弯点是整个下降段模量绝对值的最大的点,所以该点的绝对模量能很好地反映被玄武岩纤维增韧后的混凝土的延性。

试验条件下,各组玄武岩纤维混凝土反弯点处残余应力与累积应变见图 5,反弯点绝对模量见图 6。随玄武岩纤维掺量增加,混凝土下降段变得更平缓,表现出了更好的延性。玄武岩纤维掺量为 0.12% 时,反弯点残余应力较普通混凝土提高约 13%,累积应变较普通混凝土高约 25%,绝对模量较普通混凝土低约 26%。由图 6 可见,相同纤维掺量下,掺粉煤灰的玄武岩纤维混凝土较不掺矿物掺合料的玄武岩纤维混凝土反弯点绝对模量更低,延性更好。但是,复掺粉煤灰和磨细矿渣粉的玄武岩纤维混凝土的延性变差,反弯点绝对模量较大,与未经纤维增强增韧的混凝土接近。

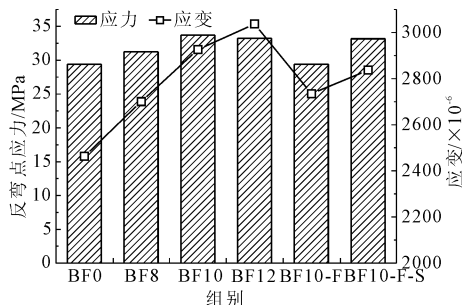


图 5 玄武岩纤维混凝土反弯点应力与应变

### 2.1.3 临界剪切点

临界剪切点是混凝土应力-应变全曲线下阶段

三阶导为零的点。普通混凝土在到达临界剪切点时,荷载由剪切面上的摩阻力、残余的粘接力来承担,而玄武岩纤维混凝土中除了上述两种力外,还有玄武岩纤维的正应力、剪应力及其与基体间的摩擦力,所以玄武岩纤维混凝土的全曲线临界剪切点残余应力和累积应变较普通混凝土有所提高。玄武岩纤维混凝土临界剪切点残余应力与累积应变见图 7。

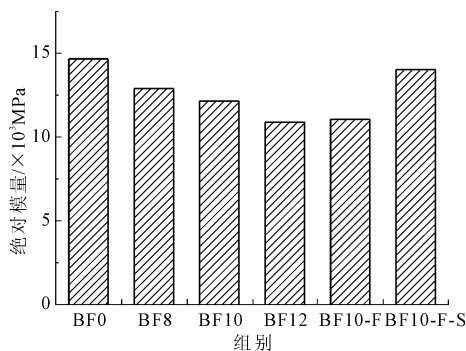


图 6 玄武岩纤维混凝土反弯点绝对模量

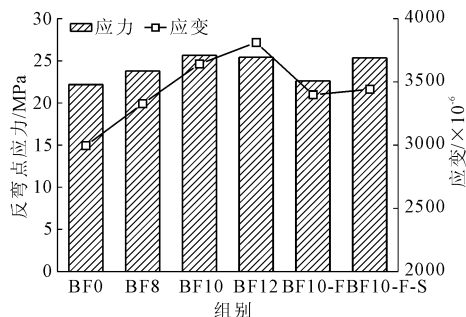


图 7 玄武岩纤维混凝土临界剪切点应力与应变

试验条件下,纤维掺量为 0.10% 时的玄武岩纤维混凝土的残余应力最大,比普通混凝土高 16%;而纤维掺量为 0.12% 时的玄武岩纤维混凝土累积应变最大,比普通混凝土高 27%;复掺玄武岩纤维与活性矿物掺合料的混凝土较同纤维掺量下普通玄武岩纤维混凝土的残余应变要低。

## 2.2 本构方程拟合

根据过镇海<sup>[16-17]</sup>提出的混凝土应力-应变本构方程,通过调整各组玄武岩纤维混凝土的本构参数,对各组无量纲化后的应力-应变散点图进行曲线进行拟合,见表 3。

$$\text{上升段: } y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 \quad (1)$$

$$\text{下降段: } y = \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_a, \alpha_d$  分别为曲线上升段、下降段参数。

表 3 玄武岩纤维混凝土本构参数

组别	BF0	BF8	BF10	BF12	BF10-F	BF10-F-S
$\alpha_a$	1.54	1.71	1.74	1.76	1.78	1.65
$\alpha_d$	2.52	2.07	1.90	1.71	1.81	2.35

按各自上升、下降段本构方程拟合后,试验各组 C40 玄武岩纤维混凝土无量纲应力-应变全曲线见图 8。从图 8 可见,随玄武岩纤维掺量增加,混凝土受压破坏前的韧性及破坏后的延性均有所提高。试验条件下,掺入粉煤灰能降低混凝土的脆性,而掺入磨细矿渣粉则会提高混凝土的脆性。

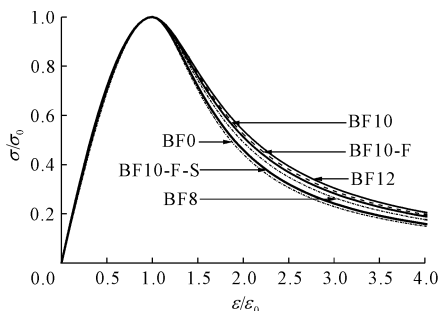


图 8 拟合后的玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线

### 3 结 论

(1) 玄武岩纤维能提高混凝土的韧性与延性。掺入玄武岩纤维后,混凝土应力-应变全曲线峰值点、反弯点与临界剪切点处的应力均有所提高,在纤维掺量为 0.10% 时最大;而以上各点对应的应变随玄武岩纤维掺量增加而增大,在纤维掺量为 0.12% 时最大。

(2) 掺入磨细矿渣粉能提高玄武岩纤维混凝土的承载能力,但是也增加了混凝土的脆性;而掺入粉煤灰则会降低玄武岩纤维混凝土的承载能力,但是增加了混凝土的延性。

(3) 掺入玄武岩纤维能降低混凝土应力-应变全曲线上段本构参数,提高其下降段本构参数,使混凝土破坏前的韧性及破坏后的延性均有所提高。纤维掺量为 0.12% 时,玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线上段本构参数  $\alpha_a$  为 1.76,下降段本构参数  $\alpha_d$  为 1.71。

#### 参考文献:

[1] 林家富. 基于 SEM 的玄武岩纤维混凝土力学性能及微

观结构研究[J]. 施工技术, 2018, 47(18): 97-101.

- [2] 张海鹏,陈 猛,白 帅,等. 层布式混杂纤维混凝土抗压及抗拉性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 131-135.
- [3] 寇佳亮,赵坤龙,张浩博. 高延性纤维混凝土拉压疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9): 17-25.
- [4] 姬小祥,张 帆,邵景干. 不同类型钢纤维混凝土力学性能室内试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 168-172.
- [5] 李为民,许金余,沈刘军,等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 135-142.
- [6] 张兰芳,尹玉龙,刘晶伟,等. 玄武岩纤维增强混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2834-2837.
- [7] Dhand V, Mittal G, Rhee K Y, et al. A short review on basalt fibre reinforced polymer composites[J]. Compos. B, 2015, 73: 166-180.
- [8] 王 钧,马 跃,张 野,等. 短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验与分析[J]. 工程力学, 2014, 31(S1): 99-102.
- [9] 成涛华,李玉香. 玄武岩纤维增强混凝土力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(1): 53-56.
- [10] 张向冈,秦文博,田 琦,等. 玄武岩纤维混凝土材料性能研究进展[J]. 混凝土, 2018(2): 94-97.
- [11] Jiang C, Fan K, Wu F, et al. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete[J]. Materials & Design, 2014, 58: 187-193.
- [12] 张长林. 短切玄武岩纤维混凝土配合比试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(3): 48-50.
- [13] Branston J, Das S, Kenno S Y, et al. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 878-886.
- [14] 吴 江,李玉香,陈雅澜,等. 短切玄武岩纤维增强混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2014(10): 99-102.
- [15] 赵燕茹,郭子麟,范晓奇,等. 玄武岩纤维混凝土应力应变关系及孔结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4142-4150.
- [16] 过镇海. 混凝土的强度与变形: 实验基础与本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [17] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [18] 纤维混凝土试验方法标准: CECS13: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.