

文章编号: 1001-4888(2023)04-0446-09

## 基于数字图像相关的玄武岩纤维 增强混凝土抗压实验研究\*

安茹, 陈国雄, 李源康, 符师桦

(海南大学 土木建筑工程学院, 海南海口 570228)

**摘要:** 制备不同玄武岩纤维(Basalt Fiber, BF)掺量的玄武岩纤维增强混凝土(Basalt fiber Reinforced Concrete, BFRC)试块, 结合数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法研究了BF对混凝土抗压特性的影响。结果表明, 混凝土中加入适量BF可以提高其抗压强度和劈裂抗拉强度, 但过量的BF会产生负面效果, 且BFRC的抗压强度与劈裂抗拉强度呈线性关系; 当BF掺量为0.6%时, 增强效果最佳, 其抗压强度比素混凝土增大24.40%, 劈裂抗拉强度比素混凝土增大38.84%。通过DIC方法获取试件抗压破坏的全场应变演化, 并通过应变场观察到微裂纹和宏观裂纹的发展过程。素混凝土微裂纹扩展路径单一, 且宏观裂纹扩展速度较快; 对于BFRC试件, 微裂纹出现在多个区域, 各区域微裂纹独自发展, 且宏观裂纹路径较为复杂。基于应变场特征将BFRC的压缩破坏过程分为微裂纹萌生、微裂纹扩展、宏观裂纹扩展3个阶段, 并分别讨论了BF在每个阶段的作用效果和机理。

**关键词:** 数字图像相关; 玄武岩纤维混凝土; 力学性能; 应变场演化; 裂纹扩展

**中图分类号:** TU528.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-209

### 0 引言

混凝土因具有成本低、施工简便、抗压强度高、耐久性好等特点, 而被广泛应用于工程建设中。然而, 普通混凝土抗拉强度低, 收缩变形大<sup>[1]</sup>, 在荷载作用下往往呈现出脆性破坏的特征。在混凝土中添加较低剂量的纤维可以改善混凝土的力学性能<sup>[2-7]</sup>。玄武岩纤维(Basalt fiber, BF)<sup>[8-9]</sup>是以玄武岩为原料生产的一种矿物纤维, 不会对环境造成污染。BF具有良好的耐腐蚀性、耐高温、成本低等诸多优点, 由其制备的玄武岩纤维混凝土(Basalt Fiber Reinforced Concrete, BFRC)具有延性和抗裂性能, 可以取代普通混凝土用于工程建设从而延长住宅、公路、桥梁、城市高架道路、地铁隧道等的使用寿命<sup>[10]</sup>。

有研究表明掺入一定量的BF可以提高混凝土的抗压强度<sup>[11-13]</sup>。Guo等<sup>[12]</sup>研究发现当掺入长度为12mm的BF时, BFRC的抗压强度在BF掺量为0.15%时达到最大值, 相比于普通混凝土强度提高了3.0%。Li等<sup>[13]</sup>报告称, 当耐碱BF掺量为0.1%时, 长度为20mm的耐碱BF对混凝土的抗压强度改善效果最好, 抗压强度增加了2.5%。Kirthika等<sup>[14]</sup>研究了长度为24mm的BF的掺入量对混凝土力学性能的影响, 结果表明, 当BF的掺量为0.5%时, BFRC表现出最高的抗压强度, 其抗压强度比不添加BF的混凝土提高了26.8%。然而, 也有研究表明, 与素混凝土相比, BF掺入量对混凝土抗压强度

\* 收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802080); 海南省自然科学基金项目(118QN182, 520CXTD433)

通信作者: 符师桦(1985-), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 混凝土结构或构件力学建模、土木工程材料力学行为、光学测量方法在土木工程中的应用。Email: fushihua@hainanu.edu.cn

没有任何显著影响<sup>[15]</sup>,甚至会降低混凝土的抗压强度<sup>[16]</sup>。在混凝土中掺入BF对抗拉强度<sup>[1,13,17]</sup>和抗弯强度<sup>[10,14,18]</sup>的提升效果要优于抗压强度。此外,相关研究<sup>[18-21]</sup>也表明BF的掺入能够对混凝土的抗渗性、抗收缩性、耐高温及抗冻性能产生积极的影响。

目前对于BFRC的宏观力学性能,如抗压、抗拉和抗弯强度的研究已较为充分。但由于研究方法的局限性,传统的混凝土实验方法无法获取试件加载过程中肉眼不可见裂纹的动态扩展行为。尤其对于BFRC的抗压性能研究而言,人们往往关注试件破坏后的裂纹形态,而对加载过程中裂纹的萌生方式及扩展行为研究甚少,难以获得BF对混凝土的增强效果在微裂纹演化阶段的作用机理。数字图像相关<sup>[22]</sup>(Digital Image Correlation, DIC)是一种可以获得试件表面全场位移的光测方法,近年来被广泛用于分析混凝土的表面应变演化过程,如对混凝土表面的裂纹进行精准定位<sup>[23-24]</sup>、观察混凝土裂纹的扩展路径<sup>[25]</sup>、获取裂纹长度变化<sup>[26-27]</sup>等。

本文旨在利用DIC方法研究在准静态加载过程中BF掺量对BFRC力学性能及破坏过程的影响。首先通过改变BF掺量,获取BF对BFRC抗压强度、劈裂抗拉强度的影响及2种强度之间的关系;然后通过DIC方法观测试件加载全过程的最大主应变场演化,获取不同BF掺量试件的裂纹扩展过程;最后基于应变场演化,将破坏过程分成微裂纹萌生、微裂纹扩展和宏观裂纹扩展3个阶段,并分析讨论BF在不同阶段的作用效果和机理。

## 1 实验

### 1.1 试块制备

试块制备的原材料包括P. O 42.5普通硅酸盐水泥、粉煤灰、细度模数为2.6的机制砂、粒径为5mm~15mm的连续级配碎石、减水率为30%的聚羧酸高性能减水剂、长度为30mm的BF和水。BF的物理力学性能指标见表1。

表1 玄武岩纤维物理力学性能指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of BF

长度/mm	单丝直径/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g}/\text{m}^3)$	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
30	7~15	2.63~2.65	91~110	3000~4800	2.4~3.0

本文以C30混凝土为对照,根据实验所设计的BF掺量,共浇筑6组试件,各组设计成分见表2。根据GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,抗压及劈裂抗拉试件为边长为100mm的立方体,每组制备6个试件。试件制备过程中对混合料搅拌充分,以保证纤维分布均匀且取向随机,浇筑成型的试件在温度 $(20\pm 3)^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ 的环境中静置24h后拆模,拆模过程中应注意保护试件的棱角部分,拆模完成后,对试件进行编号标记然后置于水中养护28d。

表2 BFRC设计成分(单位: $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Tab. 2 Mixed designs of BFRC (unit:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

试件编号	水	水泥	粉煤灰	砂	碎石	减水剂	玄武岩纤维	纤维体积分数
PC	170	290	65	880	950	8	0	0.0%
FC0.3	170	290	65	880	950	8	7	0.3%
FC0.6	170	290	65	880	950	8	14	0.6%
FC0.9	170	290	65	880	950	8	21	0.9%
FC1.2	170	290	65	880	950	8	28	1.2%
FC1.5	170	290	65	880	950	8	35	1.5%

### 1.2 实验步骤

采用液压伺服万能试验机进行立方体抗压实验,加载方式为位移控制,加载速率为0.1mm/min,加载过程中采集荷载和位移数据,采样频率为60Hz。加载前,对试块表面喷制分布均匀的黑白散斑,用于

后续的 DIC 处理。加载过程中,通过工业相机记录试块表面的散斑图像信息,相机分辨率为  $4096\text{pixel} \times 3000\text{pixel}$ ,曝光时间为  $25\text{ms}$ ,焦距为  $50\text{mm}$ 。相机距被检样品表面约  $70\text{cm}$ ,相机采样频率为  $5\text{fps}$ ,图像实物比例为  $13\text{pixel}/\text{mm}$ (即 13 个像素对应  $1\text{mm}$ )。加载结束后通过 DIC 分析所采集到的散斑图像,从而获取位移场和应变场信息。通过对图像进行 DIC 预分析,并综合考虑分析速度和精度,本文中 DIC 分析采用一阶形函数,子区大小为  $29\text{pixel} \times 29\text{pixel}$ ,计算步长为  $5\text{pixel}$ ,应变分析窗口为  $7 \times 7$  个计算点;为了获得 BFRC 的劈裂抗拉强度与立方体抗压强度之间的关系,劈裂抗拉实验过程中仅记录试件破坏时的强度,劈裂抗拉实验加载速率为  $0.02\text{MPa}/\text{s}$ 。由于劈裂抗拉并非本文重点,故仅记录最大荷载以获取劈裂抗拉强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 强度

实验获取的不同 BF 掺量下立方体试件抗压的荷载-位移曲线如图 1 所示。由图可以看出,不同 BF 掺量试件的线性阶段基本一致,但其峰值荷载和峰值位移差异明显。图 2 给出了不同 BF 掺量试件的平均抗压强度,由图可见平均抗压强度随 BF 掺量增大呈现出先增大后减小的趋势。在所有测试样中, BF 掺量为  $0.6\%$  时, BFRC 的抗压强度最大,相比于素混凝土,强度提高了  $24.4\%$ 。而当 BF 掺量超过  $0.6\%$  后, BFRC 的抗压强度急剧下降,在 BF 掺量为  $1.5\%$  时,比素混凝土降低了  $30.6\%$ 。

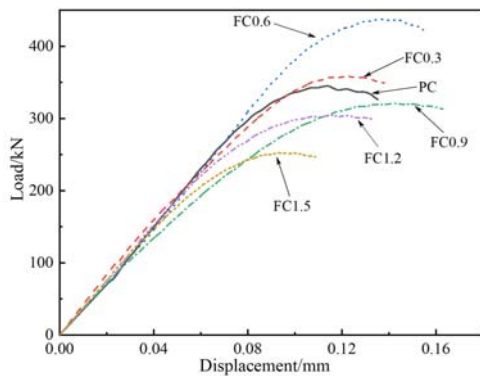


图 1 压缩荷载-位移关系曲线

Fig. 1 Compression load-displacement curves

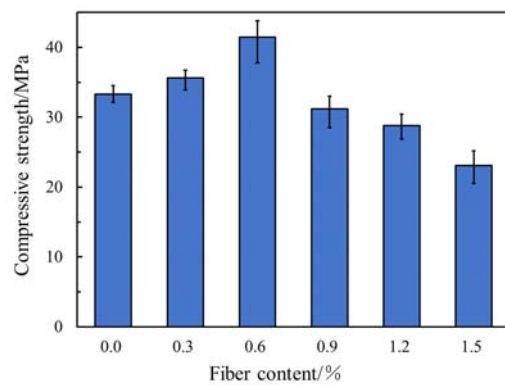


图 2 不同纤维掺量下的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of different fiber contents

不同 BF 掺量试件的平均劈裂抗拉强度如图 3 所示,与抗压强度趋势相似,劈裂抗拉强度随 BF 掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,在 BF 掺量为  $0.6\%$  时达到最大值。与抗压强度不同的是,当 BF 掺量在  $0.9\% \sim 1.5\%$  时,劈裂抗拉强度仍高于素混凝土,而抗压强度却低于素混凝土。在 BF 掺量为  $0.6\%$  时,劈裂抗拉强度比素混凝土增强了  $34.9\%$ ,其增强效果比抗压强度更显著。

尽管混凝土的力学性能可以通过实验确定,但是大规模实验会导致实验周期及经济成本的增加。为此,许多规范或研究基于各自的实验结果提出了混凝土抗压强度与劈裂抗拉强度之间的经验关系式。根据 ACI 318 (1999)<sup>[28]</sup>、AS 3600 (2001)<sup>[29]</sup>、CEB-FIP(1990)<sup>[30]</sup>与 Akid 等<sup>[5]</sup>提出的混凝土抗压强度  $f_c$  与劈裂抗拉强度  $f_t$  之间的经验关系式,由抗压强度可计算得到相应的劈裂抗拉强度,其结果与本文的对比如图 4 所示。由图可以看出,这些计算结果与本文均存在较大误差。考虑到这些经验关系式的形式均较为复杂,而实验结果显示出较好的线性特征,因此,本文采用简单明了的线性关系对实验结果进行拟合,拟合得到的关系式为  $f_t = 0.048 f_c + 1.82$ ,其拟合优度达  $0.97$ ,该式一方面比前述经验关系式更符合实验结果,另一方面形式简单、计算方便,更有利于工程中应用。

BF 的掺入对强度的影响是双面的。一方面,由于 BF 的抗拉强度很大,当 BFRC 受力时,BF 因水泥基体的变形和骨料的错动而受拉,同时 BF 可以阻碍试件内部裂纹的发展,从而提高试件强度<sup>[31]</sup>;另一方面,BF 的掺入容易导致基体中产生孔隙,尤其是在较高掺量下,BF 会发生缠绕和结团,引起较大的孔洞,从而导致强度降低<sup>[32-33]</sup>。上述两方面的综合作用效果取决于纤维掺量的多少,掺量较低时,增强

作用占主导作用,而掺量较高时,弱化作用占主导作用,因此,BFRC 的抗压强度和劈裂抗拉强度均随 BF 掺量的增多而呈现出先增大后减小的趋势。值得注意的是,BF 的掺入对劈裂抗拉强度的增强效果比抗压要明显,且较高 BF 掺量下的抗压强度更弱而劈裂抗拉强度则比素混凝土高。这是因为抗拉失效主要是水泥基体的破坏,而抗压失效通常是水泥基体和骨料界面的局部拉伸破坏<sup>[34]</sup>。将 BF 掺入到混凝土中,主要是与水泥基体混合,因此可增强水泥基体的强度,而对水泥基体与骨料间界面的影响较小。此外,BF 的长度较大,其抗压或抗弯的刚度可以忽略。BF 可以直接承受拉力从而提升抗拉强度,而在提升抗压强度上主要通过阻碍裂纹发展的形式体现。混凝土劈裂抗拉破坏时的裂纹宽度较大,裂纹处的 BF 均能充分受拉;而抗压破坏时裂纹宽度很小,裂纹处只有部分 BF 能充分受拉,因此,掺入 BF 对抗拉的增强效果比抗压更明显,类似现象也出现在其他纤维增强混凝土中<sup>[15]</sup>。

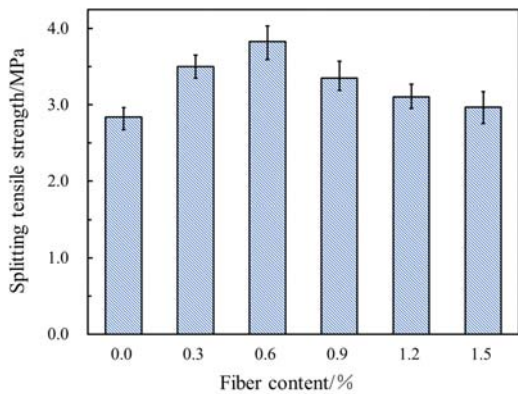


图 3 不同纤维掺量下的劈裂抗拉强度

Fig. 3 Splitting tensile strength of different fiber contents

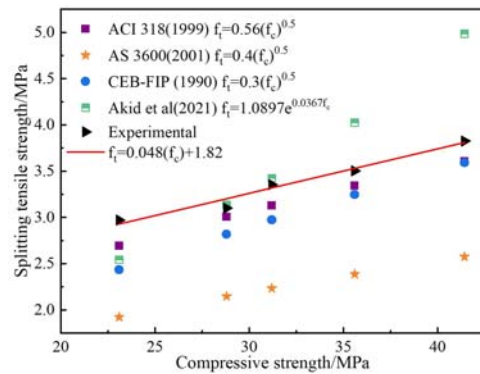


图 4 抗压强度和劈裂抗拉强度的关系

Fig. 4 Relationship between compressive strength and splitting tensile strength

### 2.2 应变演化过程

混凝土抗压性能明显优于抗拉性能,其破坏更多依赖于最大拉应变。当混凝土产生微裂纹时,应变场会出现明显的峰状;在抗压失效过程中,最大主应变的方向并不是水平或竖直的,且不同区域也是不一样的,相比于位移场,应变场分布能更直观地体现试件内部变形局部化的产生及发展的特点,故在用 DIC 研究混凝土变形行为时,往往对其第一主应变场进行分析<sup>[23,35]</sup>。在本文实验中,静态下 DIC 计算所得第一主应变噪声平均值为  $520\mu\epsilon$ , 标准差为  $550\mu\epsilon$ , 最大值为  $800\mu\epsilon$ 。本小节以力学性能最优的 FC0.6 试件为例,结合荷载-位移曲线,分析最大主应变场在不同荷载水平的演化规律。FC0.6 试件最

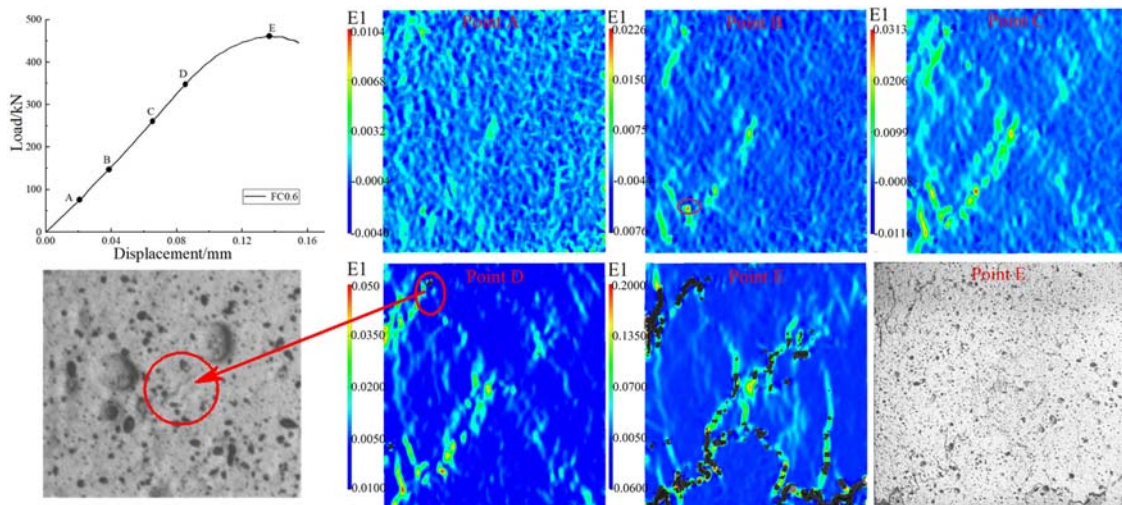


图 5 试件表面应变场随荷载水平的演化

Fig. 5 Evolution of strain field on specimen surface with load level

大主应变场随加载过程的演化如图 5 所示。在加载初始阶段(A 点),试件处于弹性变形范围,其最大主

应变场呈均匀分布状态,且数值较小;随着荷载增大至 B 点,试件表面在左侧出现应变集中,应变最大值(圆圈标记)约 0.022,超过了普通混凝土的峰值拉伸应变;随着荷载继续增大至 C 点,试件表面右侧出现应变集中,同时左侧最大应变超过 0.03;当荷载增大至 D 点时,应变云图右上方出现“破区”,这是由于该区域产生宏观裂纹,引起散斑变形不连续,变形前后子区产生退相关,因此无法进行 DIC 分析;当荷载增大至峰值 E 点时,应变云图“破区”明显增多,且均位于前期应变集中区域。从峰值荷载下的原始散斑图(图 5 Point E)可以明显看到试件表面形成的宏观裂纹。结合最终宏观裂纹形态,对照不同时刻下的应变集中区域,可以看出各时刻下应变集中区域均对应着最终的宏观裂纹。这是因为在试件表面形成宏观裂纹前局部已经形成了微裂纹,微裂纹区域在荷载作用下会产生应力集中,从而在应变云图上会出现应变集中区域,所以加载过程中首次应变集中区域可对应着微裂纹的萌生。

### 2.3 表面裂纹的萌生与扩展

不同 BF 掺量试件的裂纹随荷载水平的演化过程可用最大主应变场反映,如图 6 所示,其中第一列对应各试件微裂纹萌生(开始出现应变集中)时刻,最后一列对应各试件峰值荷载时刻。从图 6(a)可以看出,素混凝土试件的微裂纹首先出现在试件的左上角,随着荷载水平的升高,微裂纹于试件右下角生成,最后形成沿对角线方向贯通试件的主要裂纹路径。当荷载达到峰值荷载的 93% 时,试件表面开始产生宏观裂纹,随后在较短时间内宏观裂纹沿薄弱区域迅速扩展直至贯穿试件整个表面,试件随即失效,呈现出脆性破坏特征。当 BF 掺量为 0.3% 时,如图 6(b)所示,在较低荷载水平时试件右上区域开始出现微裂纹,随着荷载的增大,试件左上区域也出现微裂纹。随着荷载的继续增长,2 个区域的微裂纹相对独立发展,并形成各自对应的宏观裂纹,直到试件破坏。BF 掺量为 0.6%~1.2% 时试件的裂纹演化过程与 0.3% BF 掺量试件类似,如图 6(c)~(e)所示,均为多个区域产生微裂纹,各区域微裂纹相互影响不大,宏观裂纹路径较为复杂(相比素混凝土试件的单一裂纹路径),宏观裂纹的扩展速度较慢,这表明在混凝土中掺入纤维可以抑制宏观裂纹的增长,使得力在混凝土中的传递路径更为分散。1.5% BF 掺量试件的裂纹演化特征则与素混凝土相似,如图 6(f)所示,微裂纹开始萌生于试件左上区域,并沿对角线这一主要路径贯通试件,直至试件破坏。然而,1.5% BF 掺量试件的微裂纹产生的荷载水平要低于素混凝土,其宏观裂纹扩展速度也远低于素混凝土,表明 BF 在裂纹间的桥接作用会阻碍裂纹的扩展,这 2 个特点与 0.9%~1.2% BF 掺量试件相似。

### 2.4 损伤过程

如 2.2 节所述,试件在加载过程中最大主应变云图首次出现明显的应变集中区域对应着微裂纹的萌生,应变云图出现“破区”对应着宏观裂纹的产生。本文基于 DIC 分析所得到的这 2 个特征时刻,将立方体抗压过程划分为 3 个阶段:从试件加载开始至第一主应变云图出现明显的应变集中区域(各点应变均超过 0.003 且宽度达到 2mm),称为微裂纹萌生阶段;从应变云图出现应变集中到开始产生“破区”,称为微裂纹扩展阶段;从应变云图出现“破区”到荷载峰值,称为宏观裂纹扩展阶段。

不同 BF 掺量试件的各阶段分布如图 7 所示。微裂纹萌生时的荷载在素混凝土中表现出较高水平,掺入少量 BF 后出现明显下降,且随 BF 掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势,这是因为 BF 的掺入会在基体中产生孔隙<sup>[36]</sup>,因此促进了微裂纹的萌生。当 BF 掺量较少时,试件内部 BF 的间距较大,BF 对微裂纹萌生的阻碍作用无法平衡孔隙的负面影响;随着 BF 掺量的增加,试件内部 BF 的间距减小,BF 对微裂纹萌生和扩展的阻碍作用明显。与此同时,微裂纹的扩展主要受混凝土内部的纤维与水泥水化产物之间黏结力的影响,当纤维掺量较小时,较少的 BF 可能被大量的水泥水化产物包裹,从而会提升纤维与基体的黏结力,使得在微裂纹扩展的过程持续较长,BF 充分发挥了其抗拉强度高的优势,阻碍了裂纹的发展,提升了混凝土的强度;随着 BF 掺量的进一步增加,BF 发生缠绕和结团,形成较大孔洞,对微裂纹萌生产生明显的促进作用,从而使得微裂纹萌生的荷载水平降低。较多的纤维也阻碍了水泥水化产物的形成,从而使得 BF 与水泥砂浆不能有效地黏结,使得微裂纹的扩展过程迅速缩短直至形成宏观裂纹。

对于素混凝土,宏观裂纹产生后迅速沿对角线(最大切应力方向)贯穿试件随后失效,体现出明显的脆性破坏特征,宏观裂纹扩展阶段很短。对于掺入 BF 的混凝土,宏观裂纹扩展阶段均相对较长,这是

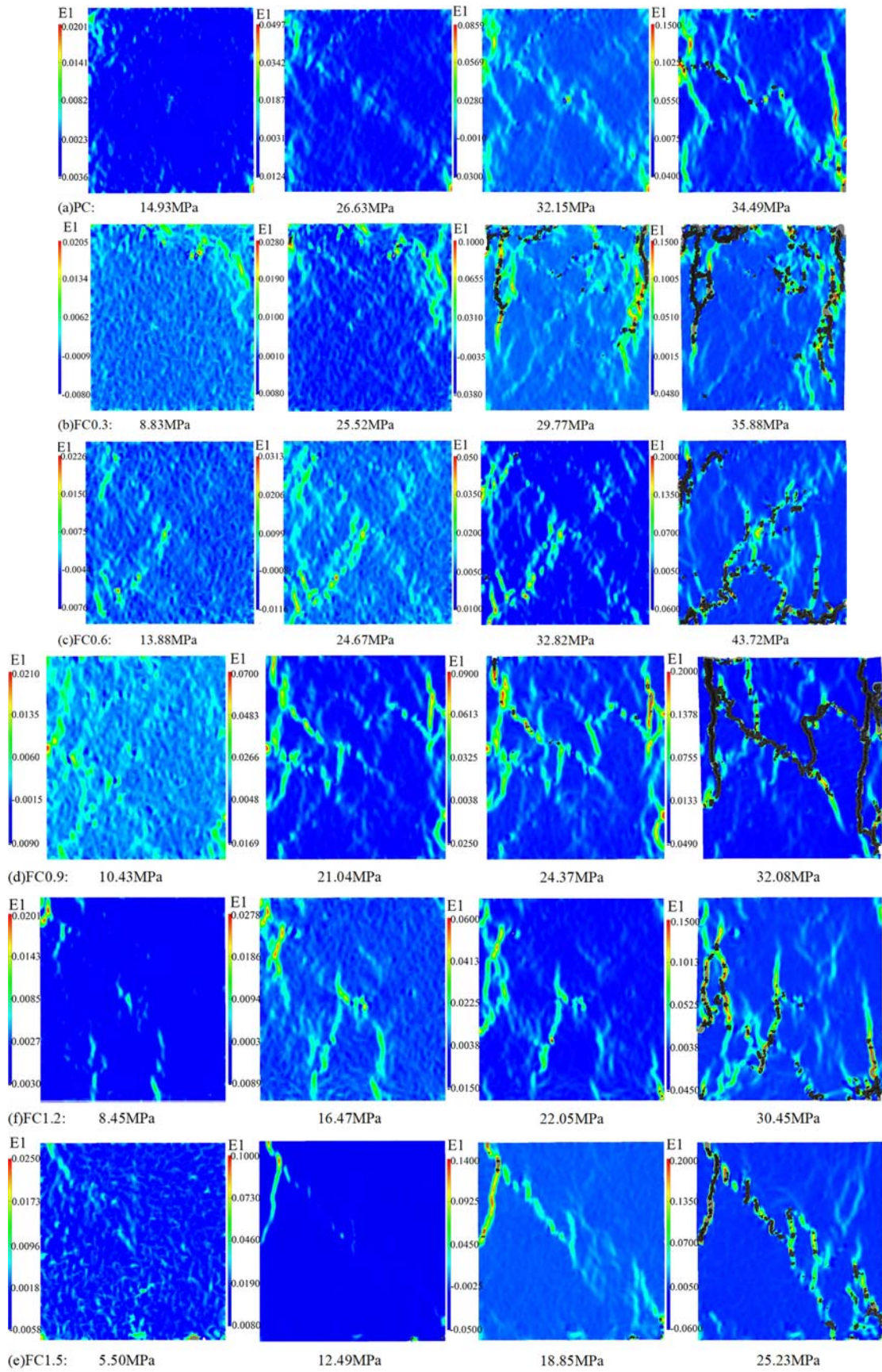


图 6 最大主应变场演化

Fig. 6 Evolutions of the maximum principal strain field

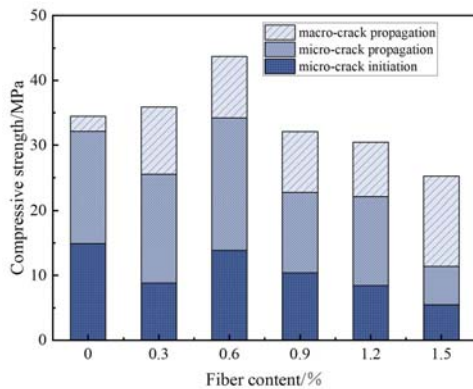


图7 不同纤维体积掺量下试件的破坏阶段

Fig. 7 Failure stages of specimens with different fiber volume contents

BFRC的力学性能、损伤机理和裂缝扩展行为进行了分析,结论如下:

(1) 在混凝土中加入适量BF可以提高抗压强度和劈裂抗拉强度,但过量的BF会产生负面效果,且BFRC的抗压强度与劈裂抗拉强度呈线性关系。当BF掺量为0.6%时,增强效果最佳,其抗拉强度比素混凝土增大24.40%,劈裂抗拉强度增大38.84%。

(2) 基于全场应变演化过程,获取了微裂纹和宏观裂纹的发展规律。素混凝土微裂纹扩展路径单一,且宏观裂纹扩展速度较快;对于BFRC试件,微裂纹出现在多个区域,各区域微裂纹独自发展,且宏观裂纹路径较为复杂。

(3) 基于DIC分析将BFRC的压缩破坏过程分为微裂纹萌生、微裂纹扩展、宏观裂纹扩展3个阶段,微裂纹萌生时的荷载随BF掺量的增加呈现出先增大后减小的趋势。BF的掺入对混凝土的增强主要体现在阻碍宏观裂纹的扩展。

#### 参考文献:

- [1] Abtahi S M, Sheikhzadeh M, Hejazi S M. Fiber-reinforced asphalt-concrete-a review[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 871-877.
- [2] 郝龙, 张磊, 高伟亮, 等. 钢纤维混凝土层裂强度的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(1):94-100 (HAO Long, ZHANG Lei, GAO Weiliang, et al. Experimental study of spall strength of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1):94-100 (in Chinese))
- [3] 邓明科, 刘华政, 马福栋, 等. 聚乙烯醇纤维改性高延性混凝土双面剪切实验及剪切韧性评价方法[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2):461-471 (DENG Mingke, LIU Huazheng, MA Fudong, et al. Double shear experiment of highly ductile concrete modified by polyvinyl alcohol and shear toughness evaluation method[J]. Acta Materialia Compositae Sinica, 2020, 37(2):461-471 (in Chinese))
- [4] Saradar A, Nemati P, Paskiabi A S, et al. Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: experimental and numerical assessment[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32:101732.
- [5] Akid A S M, Hossain S, Munshi M I U, et al. Assessing the influence of fly ash and polypropylene fiber on fresh, mechanical and durability properties of concrete[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2021, 33:1-11.
- [6] 贺晶晶, 师俊平, 王学志. 纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J]. 实验力学, 2017, 32(1):113-122 (HE Jingjing, SHI Junping, WANG Xuezhi. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural toughness[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):113-122 (in Chinese))
- [7] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6): 1060-1070 (WANG Zhenshan, LI Yakun, WEI Jun, et al. Experimental study on corrosion behavior and mechanical properties of basalt fiber concrete by chlorine attack[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35

因为宏观裂纹两侧相对位移较大,开裂处BF开始受拉,对宏观裂纹的扩展有明显的阻碍作用,试件破坏时宏观裂纹处的BF被拉断或拔出,故宏观裂纹扩展过程较缓<sup>[37]</sup>。在能量方面,由于BF的掺入,宏观裂纹扩展所需能量除了混凝土基体破坏所消耗的能量以外,还有BF变形(拉断或拔出)所消耗的能量,更大的耗能需求导致了更长的变形过程,因此,BF的掺入对混凝土的增强主要体现在阻碍宏观裂纹的扩展。

### 3 结论

本文在立方体抗压实验与劈裂抗拉实验基础上,结合DIC方法对不同BF体积掺量的

- (6):1060—1070 (in Chinese))
- [8] Chen A, Han X, Chen M, et al. Mechanical and stress-strain behavior of basalt fiber reinforced rubberized recycled coarse aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260:119888.
- [9] 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.
- [10] Arivalagan S. Study on the compressive and split tensile strength properties of basalt fibre concrete members[J]. *Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering*, 2012, 12(4):23—28.
- [11] Niaki M H, Fereidoon A, Ahangari M G. Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete[J]. *Composite Structures*, 2018, 191:231—238.
- [12] Guo Y, Hu X, Lv J. Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223:142—155.
- [13] Li M, Gong F, Wu Z. Study on mechanical properties of alkali-resistant basalt fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245:118424.
- [14] Kirthika S K, Singh S K. Experimental investigations on basalt fibre-reinforced concrete[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, 99(4):661—670.
- [15] Singh D, Senthil K, Emmanuel P C. Mechanical and durability properties of recycled aggregate self-compacting concrete along with basalt fibers[J]. *Recycled Waste Materials*, 2019(1):199—211.
- [16] Sarkar A, Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2020, 21(6):1726—1737.
- [17] 王钧, 马跃, 张野, 等. 短切玄武岩纤维混凝土力学性能实验与分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(增刊):99—102 (WANG Jun, MA Yue, ZHANG Ye, et al. Experimental research and analysis on mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(S):99—102 (in Chinese))
- [18] Jin M, Jiang L, Lu M, et al. Monitoring chloride ion penetration in concrete structure based on the conductivity of graphene/cement composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136:394—404.
- [19] Alaskar A, Albidah A, Alqarni A S, et al. Performance evaluation of high-strength concrete reinforced with basalt fibers exposed to elevated temperatures[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35:102108.
- [20] Haido J H, Tayeh B A, Majeed S S, et al. Effect of high temperature on the mechanical properties of basalt fibre self-compacting concrete as an overlay material[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268:121725.
- [21] Zhao Y R, Wang L, Lei Z K, et al. Study on bending damage and failure of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163:460—470.
- [22] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):305—325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):305—325 (in Chinese))
- [23] 谷柳凝, 宫文然, 邵新星, 等. 基于主应变场的混凝土全表面开裂特征实时测量与分析[J]. *力学学报*, 2021, 53(7):1962—1970 (GU Liuning, GONG Wenran, SHAO Xinxing, et al. Real time measurement and analysis of full surface cracking characteristics of concrete based on principal strain field[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(7):1962—1970 (in Chinese))
- [24] Zhao B, Lei D, Fu J, et al. Experimental study on micro-damage identification in reinforced concrete beam with wavelet packet and DIC method[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210:338—346.
- [25] Li W, Xiao J, Sun Z, et al. Failure processes of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(10):1149—1158.
- [26] Niu Y, Huang H, Zhang J, et al. Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPC) under bending by digital image correlation technique[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 125:105821.
- [27] Wang Y, Hu S, He Z. Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 112:102909.
- [28] Building Code Requirements for Structural Concrete: ACI318—99[S]. Michigan: American Concrete Institute, 1999.



- [29] Australian Standard for Concrete Structures: AS 3600—2001[S]. Sydney: Standards Association of Australia, 2001.
- [30] Design Code: CEB-FIP Model Code 1990[S]. London: Thomas Telford House, 1990.
- [31] 李瞳, 张晓东, 范锦泽, 等. 高吸水树脂玄武岩纤维混凝土力学性能实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(12): 29—33 (LI Tong, ZHANG Xiaodong, FAN Jinze, et al. Experimental study on mechanical properties of super absorbent resin basalt fiber concrete[J]. Fiber Reinforced Plastic Composite, 2019(12):29—33 (in Chinese))
- [32] Chen X F, Kou S C, Xing F. Mechanical and durable properties of chopped basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete and the mathematical modeling[J]. Construction and Building Materials, 2021, 298:123901.
- [33] Yang L, Xie H, Zhang D, et al. Acoustic emission characteristics and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete under tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2021, 312:125442.
- [34] Shi X, Park P, Rew Y, et al. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117316.
- [35] 金剑, 雷冬, 朱飞鹏, 等. 混凝土损伤应变与微裂纹的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(14):266—268 (JIN Jian, LEI Dong, ZHU Feipeng, et al. Experimental study of damage strain and microcrack on concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(14):266—268 (in Chinese))
- [36] Prakash R, Raman S N, Divyah N, et al. Fresh and mechanical characteristics of roselle fibre reinforced self-compacting concrete incorporating fly ash and metakaolin[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123209.
- [37] 杨立云, 林长宇, 张飞, 等. 玄武岩纤维对活性粉末混凝土受压破坏的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5): 483—489 (YANG Liyun, LING Changyu, ZHANG Fei, et al. Effect of basalt fiber on failure of reactive powder concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):483—489 (in Chinese))

## Experimental investigation of compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete by digital image correlation

AN Ru, CHEN Guoxiong, LI Yuankang, FU Shihua

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

**Abstract:** The influence of basalt fiber (BF) on compressive behavior was studied in basalt fiber reinforced concrete (BFRC) with various BF contents by using digital image correlation (DIC). The results showed that the incorporation of BF with appropriate contents elevated the compressive strength and splitting tensile strength of concrete while the incorporation of BF with excessive contents led to a negative effect. The compressive strength of BFRC showed a linear relationship with the splitting tensile strength. Under the optimal content of BF, the compressive strength is 24.40% higher than that of plain concrete and the splitting tensile strength is 38.84% higher than that of plain concrete. The evolutions of the strain field during the compressive processes of BFRC with various BF contents were obtained by DIC. The evolutions of micro-cracks and macro-cracks were observed via strain field. For plain concrete, the micro-cracks propagated principally in a single path and the macro-cracks expanded at a high rate. For BFRCs, the micro-cracks initiated and propagated respectively in several regions, and the macro-cracks expanded at low rates with complex paths. Based on the characteristic of the strain field, the failure process was divided into three stages: micro-crack initiation, micro-crack propagation, and macro-crack propagation. Also, the effect of BF on each stage was discussed.

**Keywords:** digital image correlation; basalt fiber concrete; mechanical properties; strain evolution; crack propagation