

# 玄武岩纤维掺量及掺入方式等对混凝土抗压强度及破坏形态的影响

李晓东,孟强,王文辉,王起台  
(兰州理工大学土木工程学院,730050)

**摘要:**为了研究纤维掺入方式和快速养护方式对玄武岩纤维混凝土(BFRC)抗压强度的影响规律,采用对照试验方法,每种方式设计五组配合比,并将试件养护7d和28d后进行抗压强度试验,得出最佳掺量值和最佳掺入方式。同时在最佳玄武岩纤维(BF)掺量下,对BFRC试件7d和28d试块裂缝出现及发展过程进行数据采集记录;基于素混凝土试件的破坏模式,对BFRC试件破坏形态进行描述。根据试件裂缝出现、发展及破坏时对应的荷载进行对比分析,得出 $6\text{ kg/m}^3$ 玄武岩纤维可以有效改善混凝土抗压强度及受压破坏变形。

**关键词:**玄武岩纤维混凝土;抗压强度;裂缝;破坏形态

**Abstract:** In order to study the influence of fiber mixing method and fast curing method on the compressive strength of basalt fiber reinforced concrete (BFRC), five groups of mixing ratios were designed for each method, and the compressive strength test was carried out after the specimens were cured for 7 d and 28 d, and the optimum mixing amount and the optimum mixing method were obtained. At the same time, under the optimum BF content, the crack occurrence and development process of BFRC test block in 7 d and 28 d were recorded. Based on the failure mode of plain concrete test block, the failure mode of BFRC test block was described. According to the comparative analysis of the corresponding loads when cracks appear, develop and destroy, it is concluded that  $6\text{ kg/m}^3$  basalt fiber can effectively improve the compressive strength and deformation of concrete.

**Key words:** BFRC; Compressive strength; Crack; Failure mode

中图分类号: TU528.572 文献标识码: A doi:10.19761/j.1000-4637.2019.04.055.04

## 0 前言

纤维混凝土是在混凝土中掺入适量纤维来控制混凝土的开裂,以提高混凝土的抗拉强度,并改善混凝土的综合性能<sup>[1-2]</sup>。玄武岩纤维(简称BF)是一种新型混凝土增强纤维材料,BF由天然火山岩矿石高温下抽丝而成,其超高的性价比受到土木工程领域的青睐<sup>[3-4]</sup>,其价格仅为碳纤维的1/10,且不会像钢纤维一样发生锈蚀<sup>[5-6]</sup>。BF的抗拉强度高、耐酸碱,可以与混凝土很好地相容,分散性好,可以代替钢筋等作为混凝土结构增强材料<sup>[7]</sup>。

目前,关于BF混凝土的研究,国内外学者做了许多研究,如王钧等<sup>[8]</sup>对体积掺量为0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3%、0.35%的短切玄武岩纤维混凝土分别进行了抗压、抗折、劈裂抗拉、轴心抗压等试验,最后得出C40混凝土中短切玄武岩纤维的最佳体积掺量范围为0.1%~0.2%。Dias、Thaumaturg等<sup>[9]</sup>

对掺入玄武岩纤维的增强聚合物混凝土进行了断裂韧度分析,结果表明:掺入玄武岩纤维的混凝土具有更好的抗断裂性能。

研究上述文献发现,对于玄武岩纤维混凝土的研究,国内外学者基本上采用的是单一纤维掺入方式并在普通养护方式下进行养护,仅通过研究纤维掺量对试件力学性能的影响,而关于纤维的掺入方式及养护方式对混凝土力学性能影响的研究较少。鉴于此,本文采用纤维包裹法和二次搅拌法两种掺入方式,探究最优纤维掺入方式,并按最优纤维掺入方式制成试块,进行80℃热水快速养护,测其抗压强度,再与普通养护方式下的试块进行强度对比,分析讨论养护方式对玄武岩纤维混凝土抗压强度的影响规律。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

水泥:甘肃某公司产P·O 42.5级水泥。

粗骨料:粒径5~20 mm的碎石。

细骨料:级配良好的水洗中砂,含泥量在允许

基金项目:甘肃省教育厅成果转化项目(2017D-03);甘肃省建设厅科技攻关项目(JK2017-21)。

范围内。

玄武岩纤维(BF):上海某公司生产的短切玄武岩纤维,其主要性能指标见表1。

表1 BF的主要性能指标

密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	拉伸强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂伸 长率/%	单丝直 径/ $\mu\text{m}$	使用温 度/°C
2.63	3 000	91	3.1	7	-269~650

## 1.2 试验方案

试验设备:小型混凝土搅拌机,混凝土专用振动台,混凝土压力试验机。

本试验主要研究养护方式和纤维掺入方式对玄武岩纤维混凝土(以下简称:BFRC)抗压强度的影响。参照JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,设计混凝土强度等级为C30,具体配合比设计见表2。

表2 试验用混凝土配合比 kg/m<sup>3</sup>

组别	BF掺量	水泥	石	砂	水
BFRC1	0	375	892	786	167
BFRC2	3	375	892	786	167
BFRC3	6	375	892	786	167
BFRC4	9	375	892	786	167
BFRC5	12	375	892	786	167

根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》的规定,试验采用尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体试件,并采用纤维包裹法和二次搅拌法两种不同的纤维掺入方式制备试件。纤维包裹法:先将纤维和水泥进行干拌,然后加入适量的水继续搅拌,待纤维和水泥结合后,依次放入粗骨料、细骨料并加入剩余的水进行搅拌;二次搅拌法:先将细骨料和纤维干拌1 min,然后放入骨料和水泥干拌3 min,最后加水搅拌均匀。按照表2的配合比,每种制备方式制作5组试件,每组制作6个试件。

试件制作完成后养护7 d,每组试件先取出3个进行抗压强度试验,其余试件养护至28 d再进行抗压强度试验;通过对比7 d和28 d抗压强度,得出最佳纤维掺入方式。以最佳纤维掺入方式再制备5组试件,每组制作6个试件;试件在20 °C室温下成型、抹面,成型24 h后脱模,脱模后放入80 °C的热水中养护,整个养护期间,箱内水温保持在80 °C。试件在养护箱内养护5 h后取出,并在20 °C室温下静置1 h,使试件冷却,分别测定试件的7 d和28 d抗压强度。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 BFRC抗压强度分析

不同纤维掺入方式及养护方式下,BFRC抗压强度试验结果见表3。

表3 抗压强度试验结果 MPa

组别	纤维包裹法		二次搅拌法		80 °C热水养护	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
BFRC1	27.65	37.33	26.26	35.04	33.28	35.64
BFRC2	31.36	39.11	28.80	37.89	36.27	37.23
BFRC3	32.58	42.67	31.76	40.23	40.08	41.55
BFRC4	31.70	41.78	29.78	38.78	38.88	40.74
BFRC5	31.52	37.78	28.76	37.21	38.14	38.12

由表3可知,用纤维包裹法掺入BF的试件,其7 d和28 d抗压强度均随BF掺量的增多呈先增加后减小的趋势,峰值出现在BF掺量为6 kg/m<sup>3</sup>时。当BF掺量超过6 kg/m<sup>3</sup>后,随着BF掺量的增加,试件的抗压强度降低。主要原因是:在BF的掺量较少时,BF可以均匀的分布于混凝土中,很好地阻止裂缝的发展;而当BF掺量过多时,在混凝土中的分散不再充分,导致其与混凝土基体的黏结力减小,使得试件的抗压强度有所降低。

由表3还可看出,用二次搅拌法下掺入BF的试件,其7 d和28 d抗压强度值也是掺量为6 kg/m<sup>3</sup>时达到最大。即二种BF掺入方式下,BF的最佳掺量均为6 kg/m<sup>3</sup>。

由表3中的试验结果还可以看出,BFRC试块在80 °C热水法养护方式下,其7 d抗压强度值明显高于普通养护方式下的抗压强度值;但80 °C热水法养护方式下的28 d抗压强度值与普通养护方式下试块的28 d抗压强度相比没有太大提高。这说明80 °C热水养护方式可以加快BFRC试件的水化热反应,使试块的早期强度快速提高,但随着养护时间的增加,水化热反应逐渐变缓,BFRC的抗压强度不再增加。由此,BFRC试块的28 d抗压强度可用其7 d抗压强度值来推定。

纤维的掺入方式,影响了纤维在混凝土中的分散情况。合理的掺入方式,可使纤维更好地分散在混凝土中,同时减少搅拌时间。图1和图2分别为两种掺入方式下BFRC试件7 d和28 d抗压强度对比图。

由图1可以看出,随着BF掺量的增多,BFRC试块的抗压强度呈先增大后减小的趋势,峰值出现在BF掺量为6 kg/m<sup>3</sup>时,此掺量下试块的7 d抗压强度达到最大值。由图1还可以看出,纤维包裹法

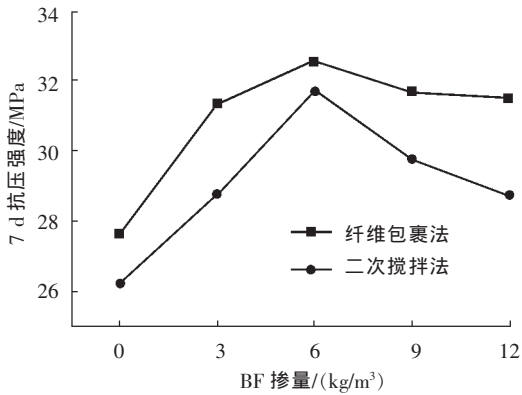


图1 各组试件 7 d 抗压强度测试结果

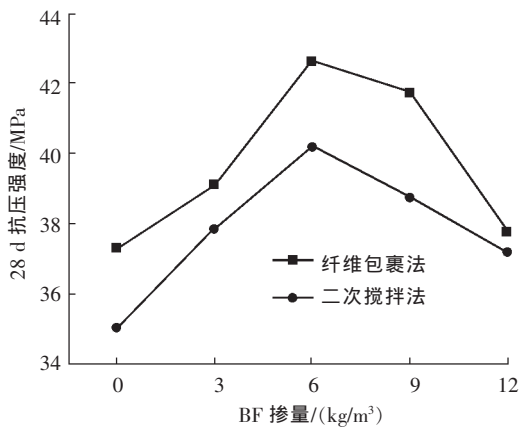


图2 各组试件 28 d 抗压强度测试结果

搅拌方式下制成的试块, 其 7 d 抗压强度整体上高于用二次搅拌法制备的 BFRC 试块。在纤维掺量为 6 kg/m<sup>3</sup> 时, 纤维包裹法比二次搅拌法制备的试件, 7 d 抗压强度提高了 9.6%。

由图 2 可以看出, 随着 BF 掺量的增多, BFRC 试块的抗压强度也是呈先增大后减小的趋势, 峰值也出现在 BF 掺量为 6 kg/m<sup>3</sup> 时, 在此掺量下试块的 28 d 抗压强度达到最大值。由图 2 还可以看出, 纤维包裹法搅拌方式下制成的试块, 其 28 d 抗压强度整体上高于二次搅拌法制备的 BFRC 试块。在纤维掺量为 6 kg/m<sup>3</sup> 时, 纤维包裹法比二次搅拌法制备的试件, 28 d 抗压强度提高了 18.9%。

由图 1 和图 2 可知, 采用纤维包裹法制成的试块, 无论是 7 d 还是 28 d 抗压强度均高于二次搅拌法制备的试块。可见, 纤维包裹法可以使玄武岩纤维更好地分散在混凝土中, 即纤维包裹法是玄武岩纤维的较佳掺入方式。

## 2.2 破坏形态分析

加载制度是试块破坏形态的主要影响因素之一, 混凝土试块的加载方式主要有两种: 荷载控制加载和位移控制加载。荷载控制加载方式下, 试块

的破坏速度快; 位移控制加载方式下, 试块的破坏速度相对较慢。加载速率的快慢, 直接影响所测试块的抗压强度<sup>[10]</sup>, 加载速率越快, 测得的抗压强度越高。本试验在混凝土压力机上加载, 手动控制加载速率在 0.5 MPa/s 左右, 直至试件破坏。

素混凝土的破坏通常属于脆性破坏<sup>[11]</sup>。由力学原理可知, 在临近破坏之前, 首先在试块中心高度, 且靠侧表面的位置出现竖向裂缝, 然后随着荷载的增加, 裂缝向两侧延伸直至角部, 最终四周混凝土剥落, 形成正倒相连的四棱锥形状; 其破坏形态如图 3 所示。

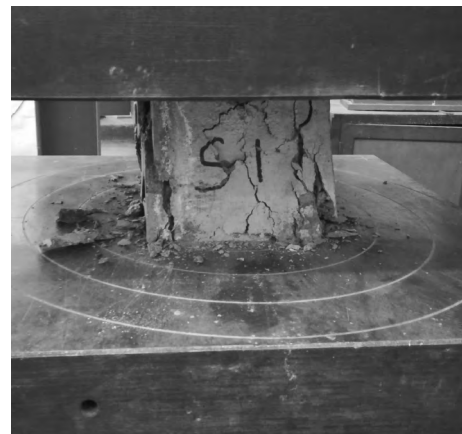


图3 素混凝土试块破坏形态

为了对比 BF 对混凝土试块的阻裂作用, 试验中分别记录了不同 BF 掺量下, 试块开始出现裂缝、裂缝加深、试块破坏, 这三种形态下对应的荷载。试块的三种破坏形态如图 4 所示。

由图 4 可见, BFRC 试块的破坏形态与素混凝土试块的破坏形态有相似之处, 但 BF 的掺入明显限制了试块裂缝发展, BFRC 试件破坏时没有形成素混凝土破坏时出现的四棱锥形状。每组试块均出现了图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 这三种破坏形态, 本次试验记录了每组试块出现这三种破坏形态时的相应荷载, 并将玄武岩纤维掺量为 6 kg/m<sup>3</sup> 时各组试件在养护 7 d 和 28 d 时三种抗压破坏形态对应的荷载列于表 4。

由表 4 可知, 与素混凝土相比, BFRC 试块养护 7 d 后, 出现裂缝时的荷载和试块破坏时的荷载分别提高了 101 kN 和 111 kN; 试块养护 28 d 后, 出现裂缝时的荷载和试块破坏时的荷载分别提高了 93 kN 和 123 kN。可见, BF 的加入有效延迟了裂缝的出现时间, 并且试件在出现裂缝后依靠与基体的拉拔力以及自身的抗拉性能, 使得 BFRC 可以继续工作, 即 BF 的掺入可以有效提高了 BFRC 的工作



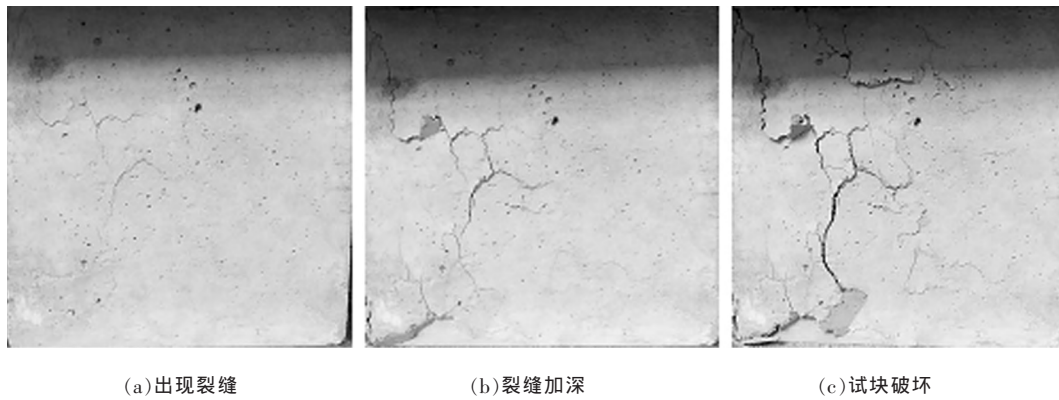


图4 BFRC试件抗压破坏的三种形态

表4 养护7 d和28 d试块三种破坏形态对应的荷载

kN

组别	养护7 d试块			养护28 d试块		
	出现裂缝	裂缝加深	试块破坏	出现裂缝	裂缝加深	试块破坏
BFRC1	584	607	622	784	809	838
BFRC2	651	671	705	835	862	879
BFRC3	685	702	733	877	933	961
BFRC4	664	681	713	822	871	938
BFRC5	659	675	709	791	803	849

性能。

### 3 结论

(1)随着BF掺量的增加,BFRC试块的抗压强度呈先增加后降低的趋势,当纤维掺量为 $6\text{ kg/m}^3$ 时,BFRC的抗压强度达到最大值,表明BF的最佳掺量为 $6\text{ kg/m}^3$ 。

(2)采用纤维包裹法搅拌方式制备的试块,无论是7 d还是28 d抗压强度均比采用二次搅拌法制成试块的抗压强度有所提高,表明纤维包裹法为较佳的纤维掺入方式。

(3)采用 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 热水养护后,试块的水化反应加快,7 d抗压强度增长较快,但28 d抗压强度几乎没有增加,因此,可以用 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 热水养护试件的7 d抗压强度来推定其相应的28 d抗压强度。

(4)BFRC试块的破坏形态与素混凝土试块的破坏形态有相似之处,但BF的掺入明显限制了试块裂缝的发展,BFRC试件破坏时没有形成素混凝土破坏时出现的四棱锥形状,表明BF的掺入有效提高了试块的延性。

#### 参考文献:

- [1] 杨雯雯.纤维混凝土力学性能及耐久性能试验研究[D].济南:山东大学,2012.
- [2] 金生吉,张健,王艳琴,等.短切玄武岩纤维增强混凝土抗劈拉力学性能研究[J].混凝土,2016(5):66-69.

[3] Xu Jinyu,Li Weimin,Huang Xiaoming,et al.Dynamic Constitutive Model of Basalt Fiber Reinforced Geopolymeric Concrete [J].Engineering Mechanics,2010,27(4):111-117.

[4] K.Zieliński, P.Olszewski. The impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar [J].Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology,2005,71(3):28-33.

[5] 许金余,李为民,黄小明,等.玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态本构模型[J].工程力学,2010,27(4):111-117.

[6] 徐海宾,邓宗才.预应力超高性能钢纤维混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2014(12):58-64.

[7] 王海良,袁磊,宋浩.短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[J].建筑结构,2013,43(S2):562-564.

[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):99-102,114.

[9] Dias D P,Thaumaturgo C.Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. Cement and Concrete Composites,2005,27(1):49-54.

[10] 高丹盈,付超云,赵利梅.加载速度对塑性混凝土强度的影响[J].人民黄河,2009,31(6):115-116.

[11] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003.

收稿日期:2018-10-30

作者简介:李晓东(1973-),男,副教授、博士。

联系电话:17693424487

E-mail:1102267067@qq.com