

不同配合比下玄武岩纤维水泥砂浆的流动度及力学性能

占玉林^{1,2}, 林金根¹, 斯睿哲², 高文银³, 程学强³

(1. 西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程材料研究所, 四川 成都 610031;
3. 四川康藏路桥有限责任公司, 四川 雅安 625000)

摘要: 为研究玄武岩纤维增强水泥砂浆(Basalt Fiber Reinforced Cement Mortar, BFRCM)在不同配合比下的流动度和力学性能,通过改变水灰比、长短纤维混掺比例及添加减水剂来改变配合比,设计了2种纤维长径比、7种玄武岩纤维体积分数、3种水灰比、3种减水剂质量分数共制备了14组BFRCM试样。研究了不同配合比下BFRCM的流动度、抗压强度及抗折强度,通过峰值荷载后BFRCM的荷载-位移曲线的归一化处理量化分析了试样断裂后BFRCM的断裂韧性。结果表明,BFRCM的流动度随着玄武岩纤维体积分数的增加、水灰比的降低、减水剂的减少以及短纤维占比的增加而降低。水灰比的增加对BFRCM的抗压强度影响较小,且会降低其抗折强度。减水剂的应用对BFRCM的抗压、抗折强度存在一定的负面影响。长短玄武岩纤维的混掺能够通过其协同效应有效提升BFRCM的抗压和抗折强度,然而过多的短纤维占比会减弱玄武岩纤维对BFRCM的增强效果。增加玄武岩纤维体积分数、提高水灰比均能在一定范围内提升BFRCM峰值荷载后的断裂韧性。然而,长短纤维混掺中短纤维占比的增加和减水剂的应用则对BFRCM峰值荷载后的断裂韧性产生负面影响。

关键词: 玄武岩纤维增强水泥砂浆; 流动度; 力学性能; 纤维协同增强效应

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

Fluidity and Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Cement Mortar at Different Mixing Ratios

ZHAN Yulin^{1,2}, LIN Jinggen¹, SI Ruizhe², GAO Wenyin³, CHENG Xueqiang³

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Institute of Civil

Engineering Materials, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Sichuan Kangzang Road and Bridge Co., Ltd., Ya'an 625000, China)

Abstract: To investigate the fluidity and mechanical properties of basalt fiber reinforced cement mortar (BFRCM) at different mixing ratios, the mixing ratio of BFRCM was adjusted by changing the water-cement ratio, the contents of water reducers, and the mixing ratios of long and short fibers. Fourteen groups of BFRCM samples were prepared by using 2 kinds of fiber aspect ratios, 7 kinds of basalt fiber volume dosages, 3 kinds of water-cement ratios, and 3 dosages of water-reducing agents. The fluidity, compressive strength, and flexural strength of the BFRCM at different mix ratios were analyzed, the load-displacement curve of the BFRCM after peak load was normalized, and the fracture toughness of the BFRCM after specimen fracture was quantitatively analyzed. The results show that the fluidity of the BFRCM decreases with increasing basalt fiber content, decreasing water-cement ratio, decreasing water reducer, and increasing short fiber proportion. The increase in the water-cement ratio has little effect on the compressive strength of the BFRCM but reduces its flexural strength. The application of the water-reducing agent has a certain negative impact on the compressive and flexural strength of the BFRCM. The blending of long and short basalt fibers can effectively improve the compressive and flexural strength of the BFRCM through its synergistic effect, but too much short fibers can weaken the strengthening effect of basalt fibers on the BFRCM. Increasing the content of basalt fiber and the water-cement ratio can improve the

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(52278220); 四川省科技计划(2021JDTD0012); 四川省留学回国人员科技活动项目(川人社办发[2021]29号)

第一作者: 占玉林(1978—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为混凝土及钢-混凝土组合结构桥梁。
E-mail: yulinzhan@swjtu.edu.cn

通信作者: 斯睿哲(1991—),男,助理研究员,哲学博士,主要研究方向为水泥基材料力学性能及耐久性。
E-mail: ruizhesi@swjtu.edu.cn



论文
拓展
介绍

fracture toughness of the BFRCM after peak load within a certain range. However, the increase in short fiber ratios and the application of water-reducing agents negatively affect the fracture toughness of the BFRCM after peak load.

Key words: basalt fiber reinforced cement mortar (BFRCM); fluidity; mechanical properties; fiber synergistic effect

玄武岩纤维是由火成岩在高温熔融后利用铂锗合金拉丝工艺制成的连续纤维^[1]。玄武岩纤维在抗拉强度以及与混凝土相容性方面和钢纤维相似,但是具有显著的耐腐蚀性和耐久性^[2-4]。与碳纤维相比,玄武岩纤维抗拉强度接近碳纤维,但生产价格仅为碳纤维的1/8~1/6^[5]。同时玄武岩纤维还是一种绿色环保材料,生产过程中无有害物质排出,Kogan等^[6]和Mconnell等^[7]在试验中发现玄武岩纤维对生物体无害,建议代替致癌的石棉纤维和玻璃纤维。目前有不少研究者考察了玄武岩纤维对混凝土的影响,且主要集中于流动性方面,大部分研究结果显示,随着玄武岩纤维体积分数的增大,混凝土流动性降低。成涛华等^[8]对不同长径比和体积分数的玄武岩纤维新拌混凝土的流动性进行了研究,发现当纤维体积分数达到0.2%时,纤维出现团聚现象,导致流动性急剧下降。Sadrmomtazi等^[9]发现当纤维体积分数为0.15%、硅灰质量分数为15%时,新拌混凝土流动性最差,且纤维呈现团聚状。李建^[10]研究表明,18mm的玄武岩纤维混凝土的流动性好于12mm的玄武岩纤维混凝土。赵碧华等^[11]研究了玄武岩纤维长度以及体积分数对水泥砂浆流动性的影响,结果表明,纤维体积分数和流动性成反比,当纤维体积分数相同时,18mm纤维水泥砂浆的流动性优于12mm。Ramakrishnan等^[12]研究发现当纤维体积分数小于0.5%时,玄武岩纤维混凝土的韧性随其体积分数增加而增大。Sun等^[13]、Wang等^[14]和Ramesh等^[15]发现玄武岩纤维可以显著提高混凝土的抗拉强度,并且抗拉强度随纤维体积分数的增加呈先上升后下降的趋势,即存在最优体积分数。近年来,少数研究者开展了玄武岩纤维对水泥砂浆性能的影响研究。如唐明等^[16]研究发现玄武岩纤维能使水泥砂浆的7d抗折强度最高增长2.91倍,并且纤维在砂浆中分散良好,在某些断面上仍有纤维连接,具有很好的抗裂性。何顺爱等^[17]测试了不同混掺情况下水泥砂浆的抗折强度和抗压强度,并利用压汞

法(MIP)测试水泥砂浆的孔结构,结果显示,双掺的孔隙率降低率高于单掺;单掺时,体积分数大于1.5%后抗折强度增长缓慢甚至出现倒退,双掺的抗折强度随体积分数的增长而持续升高。

然而,针对玄武岩纤维增强水泥砂浆(Basalt Fiber Reinforced Cement Mortar, BFRCM)流动度和力学性能的研究主要集中在不同玄武岩纤维体积分数,少数研究者还探索了混掺比例一定情况下不同长径比玄武岩纤维对砂浆性能的影响,对于综合考虑水灰比、减水剂用量和长短纤维的混掺比例等对BFRCM的流动度及力学性能的影响研究较少,因此,本文通过考虑水灰比、长短纤维混掺比例及减水剂用量等来改变配合比,研究不同配合比下BFRCM的流动度、抗压强度及抗折强度以及断裂后BFRCM的断裂韧性。

1 试验

1.1 原材料

试验采用2种长径比的玄武岩纤维,如图1所示,其物理力学性质见表1。水泥、砂、水和减水剂分别为P. O42.5普通硅酸盐水泥、河砂、自来水和高效聚羧酸减水剂,其中自来水为可以饮用的自来水。

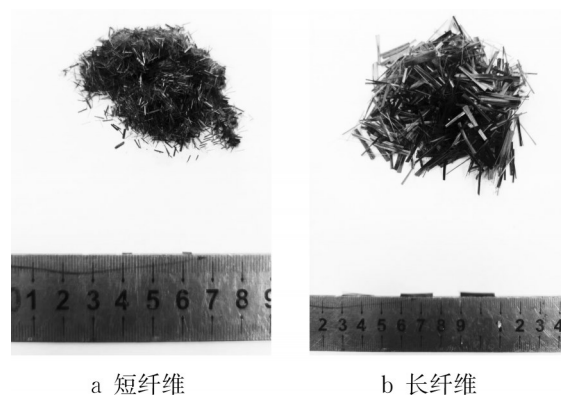


图1 玄武岩纤维

Fig. 1 Basalt fiber

表1 玄武岩纤维物理性能和力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of basalt fiber

长度/mm	直径/ μm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
3	13	2.65	85	4 200	3.1
16	13	2.65	85	4 200	3.1

1.2 试件制作

试验制作了14组砂浆试件,每组的水泥为

600g,砂为1200g,其他材料配合比见表2,编号为 $B_iW_jP_kS_l$,其中B表示玄武岩纤维,W表示水灰关系,P表示减水剂,S表示长短纤维的关系,下标*i*为玄武岩纤维体积分数,%;*j*为水灰比;*k*为减水剂质量分数,%;*l*为短纤维体积与长短纤维体积之和的比例,%。试件尺寸为40mm×40mm×160mm,制备流程如下:先低速干拌水泥和砂30s;再加水慢搅1min,并停30s;边加纤维边慢搅1.5min;最后快搅40s。测完砂浆的流动度后,将其浇筑到试模内,并在24h后拆模。拆模后的试件在标准养护室(温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为95%)进行养护。

表2 玄武岩纤维增强水泥砂浆的配合比

Tab. 2 Mixture proportions of BFRCM

编号	水/g	减水剂质量分数/%	玄武岩纤维体积分数/%	
			长	短
$B_0W_{0.45}P_0S_0$	270	0	0	0
$B_{0.1}W_{0.45}P_0S_0$	270	0	0.10	0
$B_{0.2}W_{0.45}P_0S_0$	270	0	0.20	0
$B_{0.5}W_{0.45}P_0S_0$	270	0	0.50	0
$B_{0.75}W_{0.45}P_0S_0$	270	0	0.75	0
$B_1W_{0.45}P_0S_0$	270	0	1.00	0
$B_{1.25}W_{0.45}P_0S_0$	270	0	1.25	0
$B_1W_{0.45}P_{0.1}S_0$	270	0.10	1.00	0
$B_1W_{0.45}P_{0.15}S_0$	270	0.15	1.00	0
$B_1W_{0.45}P_{0.1}S_{100}$	270	0.10	0	1.00
$B_1W_{0.45}P_{0.1}S_{20}$	270	0.10	0.80	0.20
$B_1W_{0.45}P_{0.1}S_{50}$	270	0.10	0.50	0.50
$B_1W_{0.4}P_{0.1}S_0$	240	0.10	1.00	0
$B_1W_{0.5}P_{0.1}S_0$	300	0.10	1.00	0

1.3 试验方法

根据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)采用跳桌设备进行砂浆流动度的测定,砂浆抗折强度和抗压强度根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)进行,抗折强度采用三点弯曲进行加载,跨距为100mm,加载速率为 $0.02\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$,通过在跨中底部安装位移传感器(linear variable differential transformer, LVDT)测定跨中挠度,抗压强度加载速率为 $2\text{kN}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 流动度分析

图2显示了砂浆流动度随纤维体积分数的变化,可以看出,纤维体积分数越大,流动度越低。当纤维体积分数为0.10%、0.20%、0.50%、0.75%、1.00%和1.25%时,与未掺纤维试样相比,流动度分别降低了8.0%、16.9%、24.9%、32.9%、34.1%

和41.3%。主要是因为纤维增加了其与水泥浆体的接触面积以及水泥浆的内部摩擦力,影响了砂浆的流动度。此外,随着玄武岩纤维含量的提高,砂浆内部的纤维间距减小,可能形成纤维搭接的网络结构,进一步降低了砂浆的流动度^[18]。

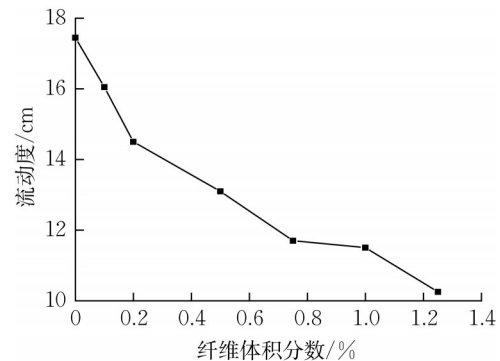


图2 纤维体积分数对玄武岩纤维增强水泥砂浆流动度的影响

Fig. 2 Effect of fiber contents on fluidity of BFRCM

图3为添加减水剂、改变水灰比后砂浆的流动度。可以看出,随着减水剂质量分数增加,砂浆流动度逐渐增加,这是由于减水剂能够降低水泥颗粒间的摩擦力从而提升砂浆流动度^[19]。当纤维体积分数为1.00%时,减水剂质量分数为0.10%和0.15%的砂浆流动度分别比无减水剂的砂浆提高了12.2%和14.0%,但过量的减水剂对流动度提升不大并且易造成离析现象。水灰比的增加也能有效提升砂浆流动度,当纤维体积分数为1.00%的砂浆水灰比从0.4提升到0.5时,流动度提升了18.38%。这是因为砂浆中含水量的增加能够增大水泥颗粒间的距离,使水泥颗粒及纤维分散性更好,从而增加砂浆流动度^[20]。

将不同长短的玄武岩纤维进行混掺会降低砂浆的流动性,不同混掺比例下砂浆的流动度如图4所示。可以看出,随着短纤维占比的增加,流动度逐渐降低。当长纤维全部被短纤维替代时,流动度从12.9mm降到11.45mm,下降了11.2%。这是因为相同质量的短纤维比长纤维具有更大的比表面积,增加了BFRCM内部的摩擦力,导致砂浆流动度的损失。

2.2 抗压强度分析

图5显示了玄武岩纤维体积分数对3d和28d龄期BFRCM抗压强度的影响。可以看出,玄武岩纤维能够在一定程度上提升3d龄期BFRCM的抗压性能,其中纤维体积分数为0.10%时,BFRCM的抗压

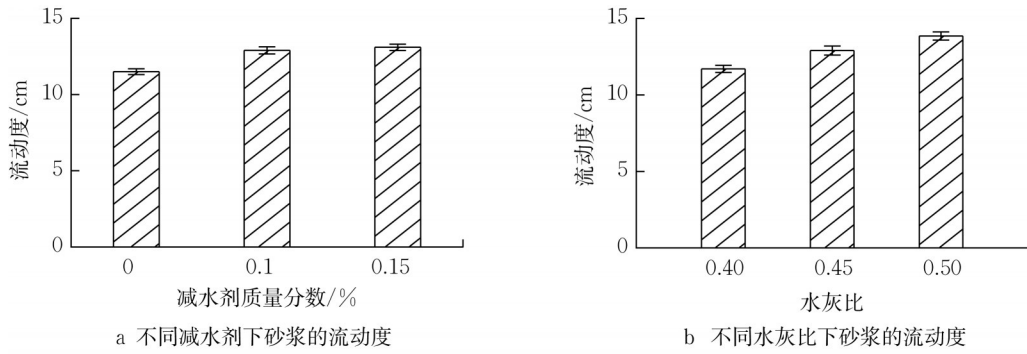


图 3 减水剂和水灰比对玄武岩纤维增强水泥砂浆流动度的影响

Fig. 3 Effect of water reducer content and water to cement ratio on fluidity of BFRCM

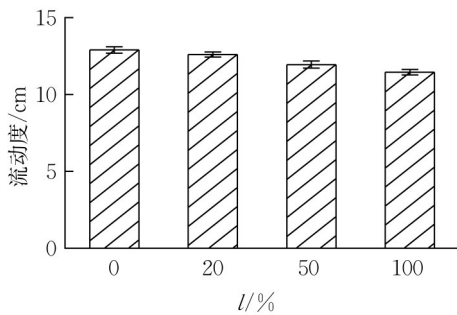


图 4 纤维混掺对玄武岩纤维增强水泥砂浆流动度的影响

Fig. 4 Effect of hybrid long and short fibers on fluidity of BFRCM

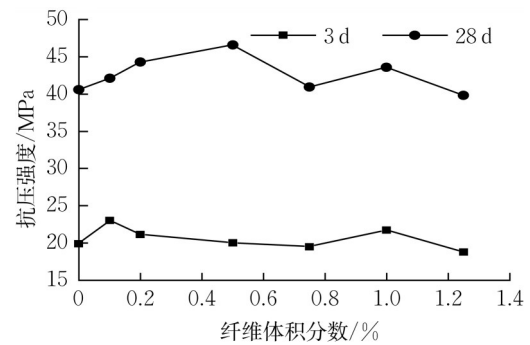


图 5 纤维体积分数对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of fiber contents on compressive strength of BFRCM

强度达到 23.0 MPa,与未掺纤维对照组相比增长了 15.6%,其对抗压强度的提升效果最为显著。纤维体积分数超过 0.10% 后,砂浆抗压性能没有明显提升。而对于 28d 龄期,随着纤维体积分数的增加,BFRCM 的抗压强度呈现先升后降的趋势。纤维体积分数为 0.50% 时达到最大抗压强度 46.6MPa,之后随着纤维体积分数的增加,砂浆的抗压强度开始下降。玄武岩纤维在砂浆内部形成网络结构,在砂浆受压过程中对横向变形产生约束作用,从而提供增强效果^[21-22]。然而纤维体积分数过多时 (>0.50%),会导致纤维聚团现象,同时纤维对砂浆流动度的负效应增加了砂浆内部的孔隙,从而增多了砂浆内部的缺陷并降低了纤维的传力作用,这就导致高纤维体积分数情况下,BFRCM 抗压性能的下降。

图 6 展示了水灰比对 BFRCM 抗压强度的影响。由图 6 可知,当 BFRCM 的水灰比从 0.4 增加到 0.5 时,其抗压强度变化不大,基本保持在相同水平。这说明在一定范围内,水灰比的变化对 BFRCM 抗压性能影响有限。

图 7 给出了减水剂对 BFRCM 抗压强度的影响。可以看出,减水剂的添加会导致砂浆抗压强度下降。

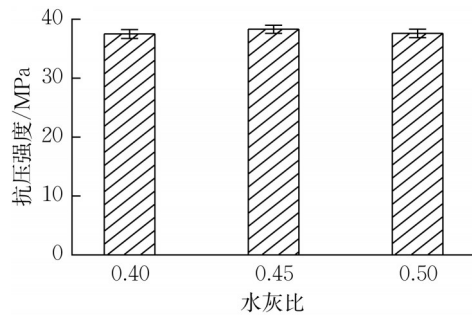


图 6 水灰比对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of water to cement ratio on compressive strength of BFRCM

当减水剂质量分数为 0.10% 时,砂浆的抗压强度由 43.6MPa 下降到 38.3MPa,降幅为 11.2%。然而当减水剂质量分数进一步增加到 0.15% 时,BFRCM 的抗压强度没有继续下降,其大小与减水剂质量分数为 0.10% 的试样相当。这表明减水剂对 BFRCM 的抗压性能有负面影响。

图 8 为不同混掺比例对 BFRCM 抗压强度的影响。当短纤维体积与长短纤维体积之和的比例小于 50% 时,BFRCM 抗压强度随短纤维占比的增加而

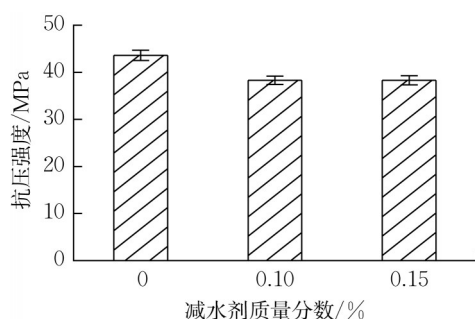


图7 减水剂对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗压强度的影响
Fig. 7 Effect of water reducer contents on compressive strength of BFRCM

增加。当短纤维体积与长短纤维体积之和的比例为100%时,BFRCM抗压强度呈下降趋势,其抗压强度与只掺长纤维的砂浆试样基本相同。与单一长度纤维相比,长短纤维混掺能够有效提升BFRCM的抗压性能。这是因为长短纤维分别对砂浆内部产生的宏观裂缝和微观裂缝起限制作用,因此长短纤维混掺的协同作用能够更有效地约束砂浆受压过程中的变形从而增强其抗压性能^[23]。

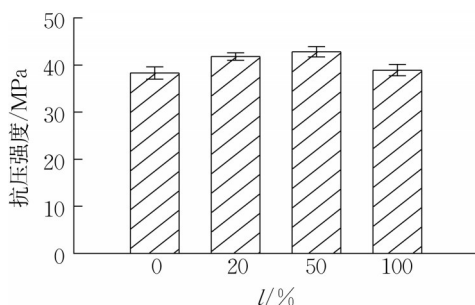
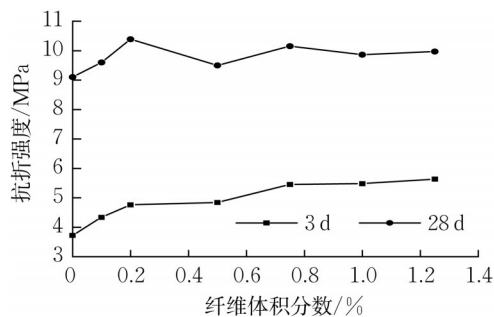


图8 纤维混掺对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗压强度的影响
Fig. 8 Effect of hybrid long and short fibers on compressive strength of BFRCM

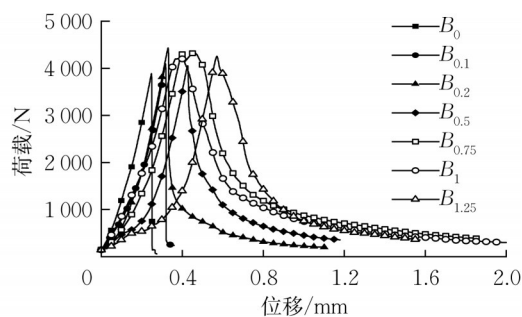
2.3 抗折强度分析

BFRCM抗折强度随纤维体积分数的变化如图



a 抗折强度随纤维掺量的变化

9a所示,3d抗折强度随玄武岩纤维体积分数的增加而增加,与未掺纤维的对照组相比, $B_{0.1}$ 、 $B_{0.2}$ 、 $B_{0.5}$ 、 $B_{0.75}$ 、 B_1 和 $B_{1.25}$ 分别增加了16.4%、28.0%、30.1%、46.5%、47.3%和51.3%。其中,纤维体积分数为0.10%~0.20%时,砂浆早期抗折强度显著提高,而当纤维体积分数继续增加时,其抗折性能的提升则相对缓慢。BFRCM抗折性能的提升主要是通过纤维的桥接作用。玄武岩纤维具有较高的抗拉强度,并且与砂浆中的水泥石有较好的黏结性,因此,在砂浆受到的荷载达到开裂荷载后,处于裂缝处的纤维能够有效传递裂缝两端基体间的荷载,并使开裂试样继续发挥作用,从而提升了砂浆的抗弯性能。28d抗折结果显示,在纤维体积分数不大于0.20%时,砂浆抗折性能仍呈显著增长趋势,然而当纤维体积分数进一步增加时,玄武岩纤维对砂浆抗折性能的提升效果有限。这是因为纤维体积分数过大时,由于其比表面积增加并且易聚团,导致水泥浆对纤维的包裹效果不佳,从而影响了纤维与基体间的黏结力,导致砂浆抗折性能不能随纤维体积分数的增加而持续增长。图9b展示了BFRCM的荷载-位移曲线。可以看出,不含纤维以及纤维体积分数为0.10%的试样达到开裂荷载后荷载迅速降低,说明其断裂呈脆性特征。而随着纤维体积分数的增加,试样在达到峰值荷载后强度损失变缓,表明其韧性和抗折强度得到了改善。当纤维体积分数较少时($<0.20\%$),试样产生开裂后,由于纤维桥接作用不足,无法有效抑制外部荷载导致的砂浆基体裂缝扩展,因此试样承载力急剧降低。当砂浆中纤维含量较高时,BFRCM开裂后纤维的桥接作用明显,并且限制了裂缝的进一步扩展,在裂缝扩展过程中,参与桥接作用的纤维逐渐增多,从而使荷载下降速度减缓。



b 28 d荷载-位移曲线

图9 纤维体积分数对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗折强度的影响
Fig. 9 Effect of fiber contents on bending strength of BFRCM

图 10a 给出了不同水灰比对 BFRCM 抗折性能的影响。随着 BFRCM 水灰比的增加,其抗折强度逐渐降低。当试样水灰比从 0.4 提高到 0.5 时,其抗折强度降低 20%。图 10b 为不同水灰比下 BFRCM 荷载-位移曲线。BFRCM 荷载-位移曲线上升阶段的斜率随着水灰比的增加而减小。该现象与水泥材料基体的刚度有关,水泥材料的刚度随着水灰比的

增加而降低。当水灰比过大时,混合料中的自由水体积增大,增加了水泥石结构中的孔隙导致其微结构趋向疏松从而降低了材料刚度,同时水泥石疏松的微结构使高水灰比试样的开裂荷载降低^[24]。另一方面,随着水灰比的增加,在试样达到峰值荷载后荷载的下降速度减缓,该现象表明纤维的桥接作用随水灰比的增加而增强。

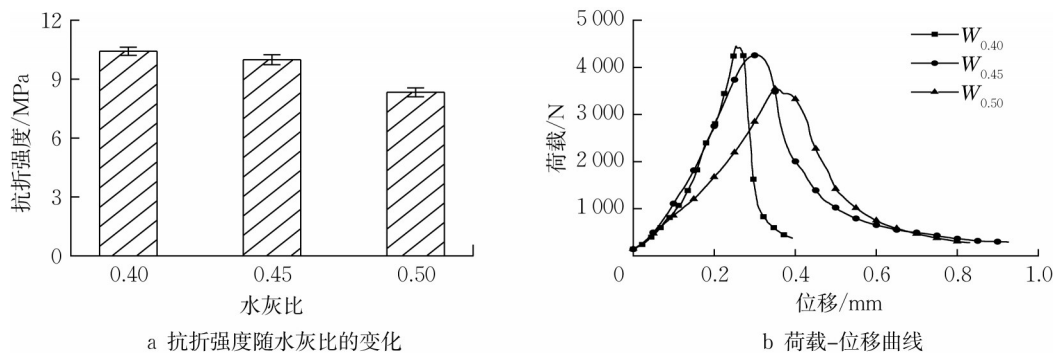


图 10 水灰比对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗折强度的影响

Fig. 10 Effect of water to cement ratio on bending strength of BFRCM

BFRCM 抗折强度随减水剂用量的变化如图 11a 所示,可以看出,添加质量分数为 0.10% 的减水剂后,BFRCM 的抗折强度略有提高。这是因为添加减水剂后 BFRCM 的流动性有所提升,改善浆体对纤维的包裹效果,增强纤维与基体间的黏结性能。然而,当减水剂质量分数增加到 0.15% 时,砂浆抗

折强度明显下降。这可能与减水剂质量分数为 0.15% 的试样出现离析现象有关,导致水泥浆体与纤维分散不均匀,削弱了纤维的桥接作用,从而使其抗折性能产生劣化。如图 11b 所示,随着减水剂用量的增加,BFRCM 的峰值位移逐渐减小,表明 BFRCM 的韧性随着减水剂的增加而降低。

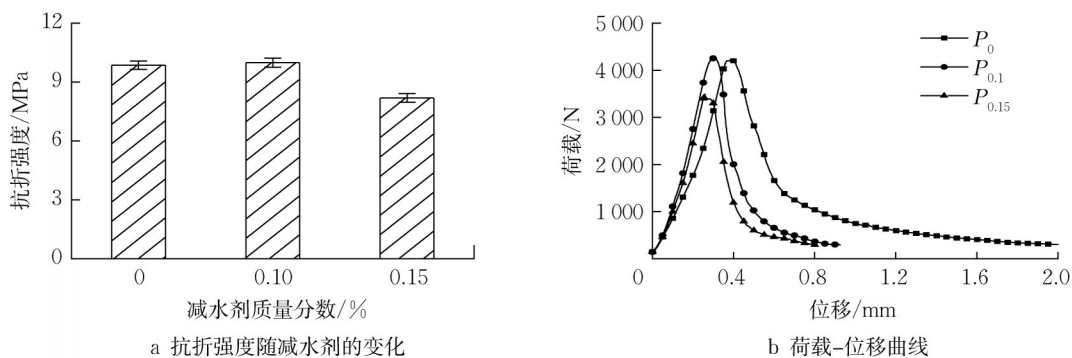


图 11 减水剂对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗折强度的影响

Fig. 11 Effect of water reducer content on bending strength of BFRCM

图 12a 为长短纤维混掺下 BFRCM 的抗折性能。可以看出,随着短纤维比例的增加,BFRCM 的抗折强度呈先升后降的趋势。短纤维体积与长短纤维体积之和的比例为 50% 时,抗折强度最高,与 100% 掺加长纤维的试样相比增加了 12.2%。然而,当短纤维体积与长短纤维体积之和的比例为 100% 时,砂浆的抗折强度显著下降。砂浆中的短纤维能够有效限制其内部微裂缝的萌生与扩展,而长纤维则对相

对较大的裂缝起到桥接作用。当利用长短纤维混掺的方法增强砂浆的抗折性能时,长纤维和短纤维能够对不同尺度的裂缝进行约束和桥接,从而减缓裂缝扩展。相反,当只掺短纤维时,对宏观裂缝的限制以及桥接作用极为有限,因此对抗折强度的增强效果并不明显。图 12b 表明,在不同混掺比例下,不同试样的荷载-位移曲线差异主要在于峰值荷载的差异,而曲线线型的差异较小。

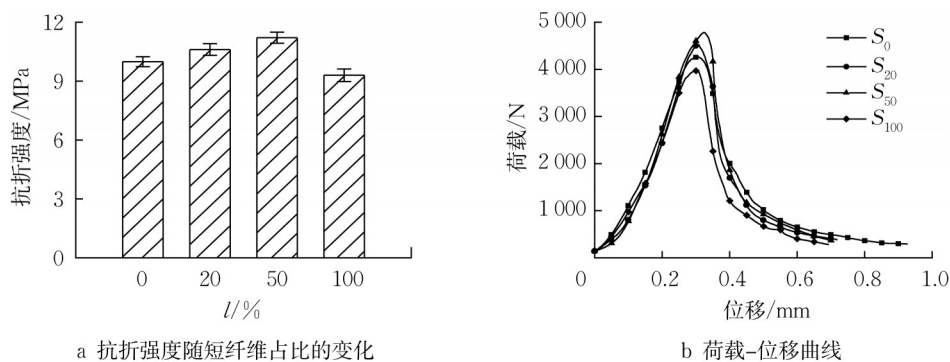


图12 纤维混掺对玄武岩纤维增强水泥砂浆抗折强度的影响
Fig. 12 Effect of hybrid long and short fibers on compressive of BFRCM

2.4 断裂性能分析

玄武岩纤维对水泥砂浆抗折性能的提升主要是通过其桥接作用减缓荷载作用下裂缝的扩展从而提高砂浆的韧性。为进一步分析玄武岩纤维对水泥砂浆抗折性能的影响,采用Fantilli等^[25]提出的断裂性能分析方法,量化分析BFRCM荷载-位移曲线峰值荷载后的性能特性。首先将BFRCM达到峰值荷载后的荷载进行归一化处理作为纵坐标,然后将峰值荷载后的位移(δ)与峰值荷载位移(δ_p)的差值作为横坐标绘制峰后曲线(如图13)。根据BFRCM荷载-位移曲线特性将横坐标中位移差($\delta - \delta_p$)的最大值取0.2mm。峰后曲线与坐标轴所围成的面积(A)与抗折强度的乘积可定义为砂浆峰值荷载后的断裂韧性参数(G_f),用来量化分析试样的断裂性能^[25]。在所有试样中,未掺玄武岩纤维和纤维体积分数为0.10%的试样其荷载达到峰值后迅速下降,导致参数 A 与 G_f 趋近于零,说明这些试样发生了脆性断裂,难以对其峰值荷载后的性能进行量化分析。

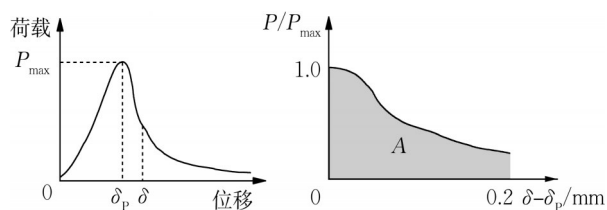


图13 断裂韧性参数计算示意

Fig. 13 Parameters for fracture toughness index calculation

图14为不同纤维体积分数的BFRCM断裂韧性参数。可以看出,随着水泥砂浆中纤维体积分数从0.20%提高到0.75%, G_f 显著增加,其增幅为188.0%。这说明在适宜的纤维体积分数范围内($<0.75\%$),纤维的桥接作用能够有效提升试样的

断裂韧性。但是当纤维体积分数超过0.75%后, G_f 增长缓慢,并在1.00%时达到峰值($G_f=1.463$),之后呈下降趋势。这可能是因为过高的纤维体积分数导致试样流动性降低,纤维分散性变差,并产生团聚现象,从而影响了纤维的桥接效果。

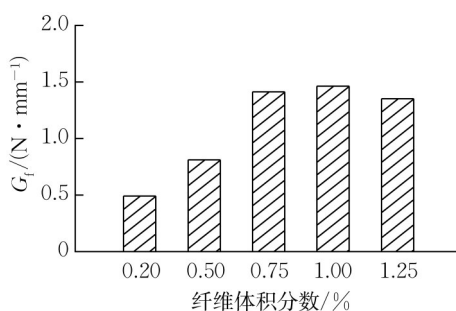


图14 纤维体积分数对玄武岩纤维增强水泥砂浆断裂韧性参数的影响

Fig. 14 Effect of fiber contents on fracture toughness index of BFRCM

图15为不同水灰比的BFRCM断裂韧性参数。由图中可见,当水灰比从0.40增加到0.45时, G_f 提升了107.5%,然而继续提高水灰比, G_f 变化不大。这说明较低的水灰比使纤维与基体间黏结力过强,导致试样发生断裂时纤维易随着裂缝的开展发生断裂而降低桥接效果。而较高的水灰比使纤维与基体间黏结力适中,有利于纤维在基体断裂瞬间转变为滑动拔出而发挥桥接作用。但当水灰比继续增加时, G_f 变化不大,这可能是因为过高的水灰比导致基体微结构松散而影响强度,但不影响试样开裂后的断裂韧性。

图16显示了不同减水剂质量分数的BFRCM断裂韧性参数。可以看出,减水剂的添加导致了 G_f 的降低,其原因与水灰比的影响类似,减水剂增加了水泥浆体的流动性从而使浆体对纤维的包裹性变好,

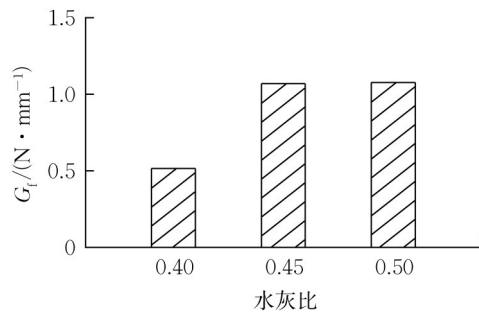


图 15 水灰比对玄武岩纤维增强水泥砂浆断裂韧性参数的影响

Fig. 15 Effect of water to cement ratio on fracture toughness index of BFRCM

增强了纤维与基体间的黏结力,导致基体断裂时纤维断裂而非滑动拔出的概率增加,从而降低了桥接效果。

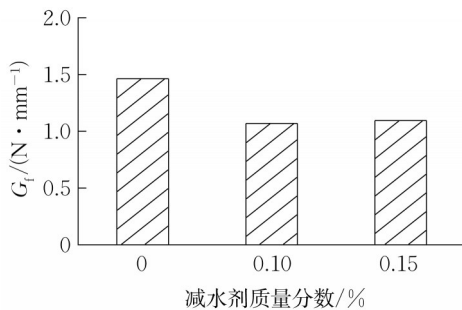


图 16 减水剂对玄武岩纤维增强水泥砂浆断裂韧性参数的影响

Fig. 16 Effect of water reducer contents on fracture toughness index of BFRCM

图 17 为不同混掺比例的 BFRCM 断裂韧性参数。可以看出,与抗折强度先升后降的趋势不同, G_f 随着短纤维含量的增加而逐渐降低。这与长短纤维对基体增强作用的差异有关。当试样达到峰值荷载后,基体裂缝尺寸较大,短纤维对宏观裂缝的桥接效果差导致基体宏观开裂后 G_f 值随着短纤维占比的增加而减小。然而在短纤维体积与长短纤维体积之和的比例为 50% 及以下时,其抗折强度持续提升(图 12),这说明长短纤维混掺时产生的协同增强效应主要作用于试样到达峰值荷载前。随着荷载的增加,基体中会开始产生微裂缝而没有明显的宏观裂缝,在这种情况下,短纤维能够有效地约束微裂缝的扩展,提升其抗折性能。在试样达到峰值荷载后,长纤维对宏观裂缝的桥接作用明显大于短纤维,从而提升峰值荷载后 BFRCM 的韧性。

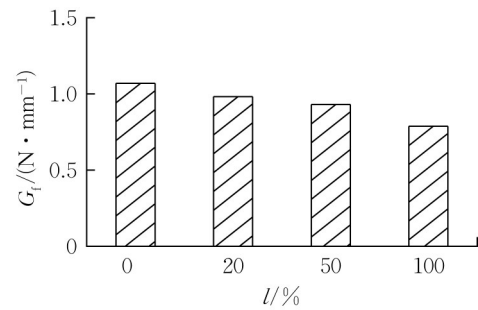


图 17 纤维混掺对玄武岩纤维增强水泥砂浆断裂韧性参数的影响

Fig. 17 Effect of hybrid long and short fibers on fracture toughness index of BFRCM

3 结论

(1) BFRCM 的流动性随着纤维体积分数的增加而降低。通过增大水灰比以及添加减水剂均会使 BFRCM 的流动性增加。而长短纤维的混掺对 BFRCM 的流动性有负面影响,短纤维比例的增加会导致试样流动性下降。

(2) 增大水灰比对 BFRCM 的抗压强度影响不显著,同时会降低其抗折强度,而添加减水剂对 BFRCM 的抗压和抗折强度影响较小,过高的减水剂质量分数对玄武岩纤维的增强效果产生负面影响。长短纤维混掺能够在水泥基体产生宏观破坏前显著地提升其抗压、抗折性能,长短纤维的协同作用对 BFRCM 有明显的增强作用,然而过多的短纤维占比会减弱玄武岩纤维对 BFRCM 的增强效果。

(3) 试样开裂后的断裂韧性受水灰比的影响较大,水灰比越高,断裂韧性越强。添加减水剂对试样的增韧效果不明显。当长短纤维混掺时,短纤维对宏观裂缝的桥接作用有限,因此短纤维比例越高,断裂韧性越低。

作者贡献声明:

占玉林:提出研究主题与论文思路。

林金根:实验开展与数据整理分析,论文撰写与修订。

斯睿哲:实验监管与指导,结果验证与核实,提出论文框架与论文修改。

高文银:技术咨询。

程学强:文字校对,稿件修订。

参考文献:

- [1] CORY H, HATEM M, ADEL E, *et al.* Use of basalt fibers for concrete structures [J]. Construction and Building

- Materials, 2015, 96(15): 37.
- [2] ZHU D J, LIU S, YAO Y M, *et al.* Effects of short fiber and pretension on the tensile behavior of basalt textile reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 96: 33.
- [3] ARSLAN M E. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement [J]. Construction & Building Materials, 2016, 114(1): 383.
- [4] SIM J, PARK C, MOON D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(6): 504.
- [5] 吴晓斌. 玄武岩纤维在土木工程中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1043.
WU Xiaobin. Application research progress of basalt fiber in civil engineering [J]. Silicate Bulletin, 2020, 39(4): 1043.
- [6] KOGAN F M, NIKITINA O V. Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action [J]. Environ Health Perspect, 1994, 102(5): 205.
- [7] MCONNELL E E, KANSTRUP O, MUSSELMAN R. Chronic inhalation study of size separated rock and slag wool insulation fibers in fischer 344/N[J]. Inhalat Toxicol, 1994, 6(6): 571.
- [8] 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.
CHENG Taohua, LI Yuxiang. Study on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete [J]. Concrete and Cement Products, 2017(1): 53.
- [9] SADRMOHTAZI A, TAHMOURESI B, SARADAR A. Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC) [J]. Construction & Building Materials, 2018, 162: 321.
- [10] 李建. 短切玄武岩纤维对矿渣粉煤灰混凝土力学性能和微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017(2): 727.
LI Jian. Effects of chopped basalt fiber on mechanical properties and microstructure of slag fly ash concrete [J]. Silicate Bulletin, 2017(2): 727.
- [11] 赵碧华, 刘永胜, 何松华, 等. 玄武岩纤维参数对水泥砂浆流动性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(7): 5.
ZHAO Bihua, LIU Yongsheng, HE Songhua, *et al.* The effects of basalt fiber parameter on the fluidity of cement mortar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(7): 5.
- [12] RAMAKRISHNAN V, TOLMARE N S, BRIK V B. Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete [EB/OL]. [2023-02-01]. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highway/NCHRP045_Final_Report.pdf.
- [13] SUN X, GAO Z, CAO P, *et al.* Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 58.
- [14] WANG D L, JU Y Z, SHEN H, *et al.* Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 464.
- [15] RAMESH B, ESWARI S. Mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete: an experimental study [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 2317.
- [16] 唐明, 杨欢. 玄武岩纤维增强水泥基复合材料研究[J]. 混凝土, 2010(5): 76.
TANG Ming, YANG Huan. Research on basalt fiber reinforced cementitious composites[J]. Concrete, 2010(5): 76.
- [17] 何顺爱, 郑召, 李玉香. 玄武岩纤维在水泥砂浆结构优化中的尺度效应[J]. 混凝土, 2016, 6: 110.
HE Shunai, ZHENG Zhao, LI Yuxiang. The scale effect of basalt fiber in the optimization of cement mortar structure [J]. Concrete, 2016, 6: 110.
- [18] WU Z M, SHI C J, HE W, *et al.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 8.
- [19] ZHANG K, PAN L S, LI J C, *et al.* How does adsorption behavior of polycarboxylate superplasticizer effect rheology and flowability of cement paste with polypropylene fiber [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 95: 228.
- [20] QIU J P, GUO Z B, YANG L, *et al.* Effects of packing density and water film thickness on the fluidity behavior of cemented paste backfill [J]. Powder Technology, 2020, 359: 27.
- [21] RALEGAONKAR R, GAVALI H, ASWATHA P, *et al.* Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 589.
- [22] 李福海, 高浩, 唐慧琪, 等. 短切玄武岩纤维混凝土基本性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 419.
LI Fuhai, GAO Hao, TANG Huiqi, *et al.* Basic properties and shrinkage model of chopped basalt fiber concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 419.
- [23] KHAN M, CAO M L. Effect of hybrid basalt fiber length and content on properties of cementitious composites [J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(10): 487.
- [24] 牛恒茂, 武文红, 邢永明, 等. 水灰比对PVA纤维增强水泥基复合材料性能和显微结构的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 1067.
NIU Hengmao, WU Wenhong, XING Yongming, *et al.* Effects of water/cement ratio on properties and microstructure of PVA fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Composite Materials, 2015, 32(4): 1067.
- [25] FANTILLI A P, SICARDI S, DOTTI F. The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar [J]. Construction and Building Materials, 2016, 139: 562.