

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.019

# 压剪作用下短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究

鲍 犇<sup>1</sup>, 姚华彦<sup>1</sup>, 白 冰<sup>2</sup>, 张明远<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**为研究短切玄武岩纤维混凝土压剪作用下的力学性能,文章以法向应力和纤维体积掺量为变化参数,制备立方体试件进行压剪试验。分析试件压剪破坏形态,获得压剪状态下剪切荷载-位移曲线,研究玄武岩纤维对混凝土剪切特性的影响规律。结果表明:短切玄武岩纤维的掺入能减缓混凝土裂缝的产生;随着法向应力的增大,试件的抗剪强度也逐渐提高;相同法向应力下,随着纤维掺量的增加,试件的抗剪强度先增后降;短切玄武岩纤维在体积掺量为 1.0% 时对混凝土的抗剪强度提升效果最佳。基于主应力空间的破坏准则可以较好地描述玄武岩纤维混凝土在压剪作用下的强度规律。提出的抗剪强度公式计算值与试验值吻合良好,可为工程应用提供参考。

**关键词:**玄武岩纤维;混凝土;压剪作用;抗剪强度;破坏准则;强度计算

**中图分类号:**TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)03-0426-07

## Experimental study on mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete under compression-shear action

BAO Ben<sup>1</sup>, YAO Huayan<sup>1</sup>, BAI Bing<sup>2</sup>, ZHANG Mingyuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete under compression-shear action, cubic specimens were prepared for compression and shear tests using normal stress and fiber volume fraction as variable parameters. The failure modes of the specimens under compression and shear were analyzed, and the shear load-displacement curves under compression and shear conditions were obtained. The influence of basalt fibers on the shear properties of concrete was discussed. The results show that the addition of chopped basalt fibers can slow down the generation of concrete cracks. With the increase of normal stress, the shear strength of the specimen gradually increases. Under the same normal stress, with the increase of fiber content, the shear strength of the specimen first increases and then decreases. When the volume fraction of chopped basalt fiber is 1.0%, the shear strength of concrete is best improved. The failure criterion based on the principal stress space can better describe the strength rule of basalt fiber reinforced concrete under compression-shear action. The calculated value of the shear strength formula proposed is in good agreement with the experimental value, which can provide a reference for engineering applications.

**Key words:** basalt fiber; concrete; compression-shear action; shear strength; failure criterion; strength calculation

收稿日期:2023-03-27;修回日期:2023-04-13

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(202004a07020027;202104h04020024)

作者简介:鲍 犇(1997—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

姚华彦(1979—),男,湖北罗田人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:yaohuayan@hfut.edu.cn.

## 0 引言

掺加纤维是提升混凝土的力学性能的重要途径之一。文献[1-2]表明,在混凝土中掺入纤维,能有效地提高结构强度和抗变形能力。不同学者针对不同类型的纤维混凝土开展了一些研究<sup>[3-5]</sup>。在研究混凝土的力学性能方面,目前主要关注的是纤维对混凝土抗压强度、抗裂(断裂)性能方面。在实际混凝土工程中,存在大量压剪复合受力对混凝土的破坏,研究纤维对混凝土压剪性能的影响也具有重要意义。

文献[6-7]对钢纤维再生混凝土试件进行压剪和直剪试验,试验结果表明,钢纤维对再生混凝土抗剪能力提升幅度较大;文献[8]表明聚乙烯醇纤维在改性高延性混凝土中起到桥联作用,使得试件发生具有延性特征的剪切破坏,且聚乙烯醇混凝土试件抗剪强度和峰值变形随着纤维体积分数增加而增大;文献[9]发现随着钢纤维体积分数的增加,钢纤维高强混凝土的抗剪强度逐渐提高,当混凝土基体强度较高时,提高纤维掺量增强试件抗剪强度效果减弱;文献[10]研究发现钢纤维混凝土的压剪强度与压应力和纤维掺量有关;文献[11]对不同纤维掺量超短钢纤维混凝土试块开展压剪破坏试验,发现钢纤维具有抗剪和止裂功效;文献[12]研究不同纤维种类和纤维体积对高强混凝土力学性能的影响,结果表明纤维的加入有效地改善混凝土抗剪强度和变形性能;文献[13]发现掺入适量的纤维能够提高混凝土的抗剪强度,且随着压应力比的增大,试件的抗剪强度呈增大趋势。

玄武岩纤维是一种新型无机纤维材料,因其具有弹性模量高、断裂强度大、耐高温、耐低温、耐腐蚀以及加工性能好等优点,逐渐成为混凝土增强领域的热点材料。目前有许多学者对玄武岩纤维增强混凝土力学性能进行了研究。文献[14]开展玄武岩纤维对早强混凝土各龄期劈裂拉伸强度试验,发现掺入玄武岩纤维可提高混凝土劈裂拉伸强度;文献[15]发现掺入适量的玄武岩纤维对早龄期混凝土的抗压、抗拉和抗折强度均有显著提升;文献[16]通过试验得出,玄武岩纤维的掺入,提升了混凝土的抗压和抗拉强度,并改善试件的延展性。

上述研究表明,在玄武岩纤维增强混凝土抗压和抗拉力学性能方面取得大量成果。虽然有学者对玄武岩纤维混凝土剪切性能进行了研究,但

是针对压剪复合受力方面的研究较少。为此本文主要开展短切玄武岩纤维混凝土压剪复合受力性能的研究,为玄武岩纤维混凝土在工程中的应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

本次试验水泥选用海螺 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,表观密度为 3 100 kg/m<sup>3</sup>。粗骨料为普通连续级配碎石,粒径为 4.75~26.50 mm,堆积密度为 1 610 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为 2 667 kg/m<sup>3</sup>。细骨料采用普通河砂,细度模数为 2.5,表观密度为 2 740 kg/m<sup>3</sup>,级配良好。粉煤灰采用 1 级粉煤灰,并选用 S95 矿粉保证拌合料的流动性。采用的短切玄武岩纤维如图 1 所示,其物理力学性能见表 1 所列。



图1 短切玄武岩纤维

表1 短切玄武岩纤维基本物理力学性能

单丝直径/ μm	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	断裂强度/ MPa	断裂延伸率/ /%	弹性模量/ GPa
17	2 650	2 360	2.73	86.6

### 1.2 试件制备

混凝土拌合物参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009),制备 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,混凝土中纤维体积掺量  $\varphi_f$  分别为 0.5%、1.0%、2.0%,并与不掺纤维混凝土进行对照试验。本文混凝土配合比基于 C30 强度混凝土基础上进行设计,具体配合比见表 2 所列。

搅拌采用 20 L 的混凝土搅拌机,首先分别加入粗集料、细集料和胶凝材料,干拌 30 s;然后将纤维人工均匀抛洒在搅拌机内,继续干拌 30 s,将水和外加剂加入到搅拌机内,持续湿拌 120 s 至搅拌均匀;其次将人工装模放置在振动台上振动 30 s,至试件内不再有气泡冒出;最后在试样成型 1 d 后脱模,放入标准养护室,养护至 28 d 后开展力学试验。

表 2 短切玄武岩纤维混凝土配合比

单位: kg/m<sup>3</sup>

玄武岩纤维	水	水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	外加剂
0	124	252	72	36	713	1 103	5.2
1.325	124	252	72	36	713	1 103	5.4
2.650	124	252	72	36	713	1 103	6.0
5.300	124	252	72	36	713	1 103	6.4

### 1.3 试验方法

本文试验采用合肥工业大学岩土实验室 IRSM-RC-1500 型岩石/混凝土单轴压剪仪。压剪试验加载示意图如图 2 所示。实施剪切时,法向应力  $\sigma$  保持恒定值,考虑 1、3、5、7 MPa 这 4 种情况。加载前将试件装入剪切盒内,利用手动控制将仪器的传力轴与剪切盒贴合,加装水平和轴向位移计。首先将法向应力加载到预定值,再施加水平剪切荷载至试件破坏。法向应力加载速率为 0.5 kN/s,剪切荷载采用位移控制,加载速率设为 0.18 mm/min。

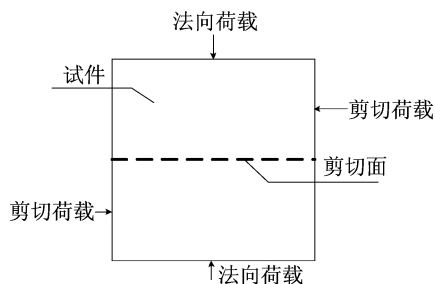


图 2 混凝土试件压剪试验加载示意图

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态

在不同法向应力和纤维掺量情况下,短切玄武岩纤维混凝土试件代表性的压剪破坏形态如图 3 所示。

试件的破坏形态与法向压力有一定的关系。从图 3a 可以看出:当法向应力为 1 MPa 时,混凝土沿试件中间被剪切成两部分,破坏过程迅速;当法向应力为 3 MPa 时,剪切过程中混凝土试件有碎屑掉落,形成剪切裂缝变宽,并伴随有斜裂缝的产生;当法向应力为 5 MPa 时,试件表面产生较多的裂缝,且因压剪作用下产生多条锯齿状裂缝,剪切破坏面周围剥落较为明显;当法向应力为 7 MPa 时,剪切破坏面有大量混凝土碎片剥落,在主裂缝周围产生较多细小斜裂缝。分析表明,随着法向应力的逐渐提高,试件破坏时更破碎。

玄武岩纤维的掺入对破坏形态也影响显著。

从图 3b 可以看出,对于素混凝土试件,剪切时伴随掉落大量混凝土碎渣,破坏剥落严重。而短切玄武岩纤维混凝土试件的表面剥落较轻微,产生的裂缝数量和宽度都小于素混凝土试件。玄武岩纤维的掺入能起到一定的阻裂增韧作用,减缓裂缝发展。

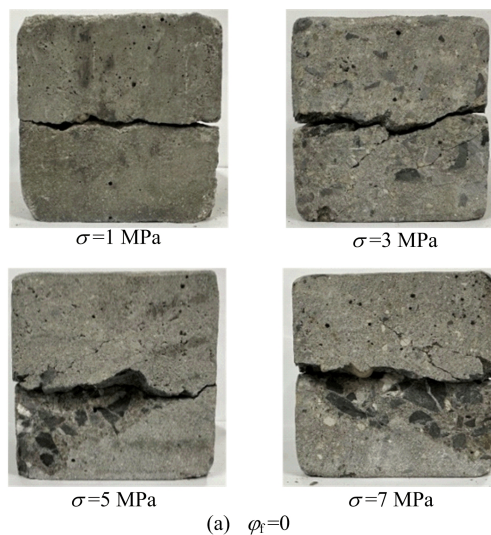
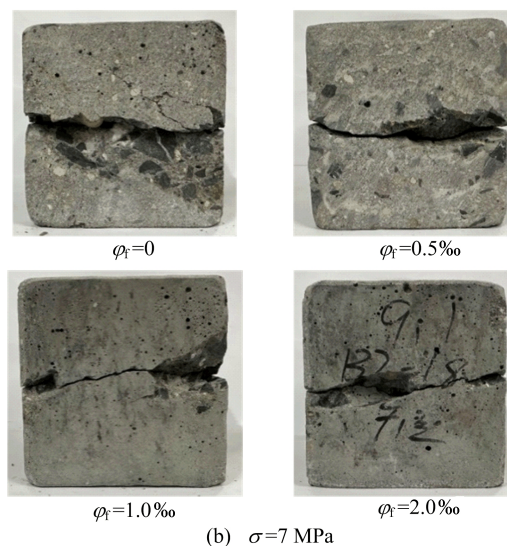
(a)  $\phi_f=0$ (b)  $\sigma=7\text{ MPa}$ 

图 3 短切玄武岩纤维混凝土压剪受力破坏形态

### 2.2 玄武岩纤维混凝土抗剪强度

基于压剪试验结果绘制玄武岩纤维混凝土试件的剪切荷载-位移曲线,如图 4 所示。

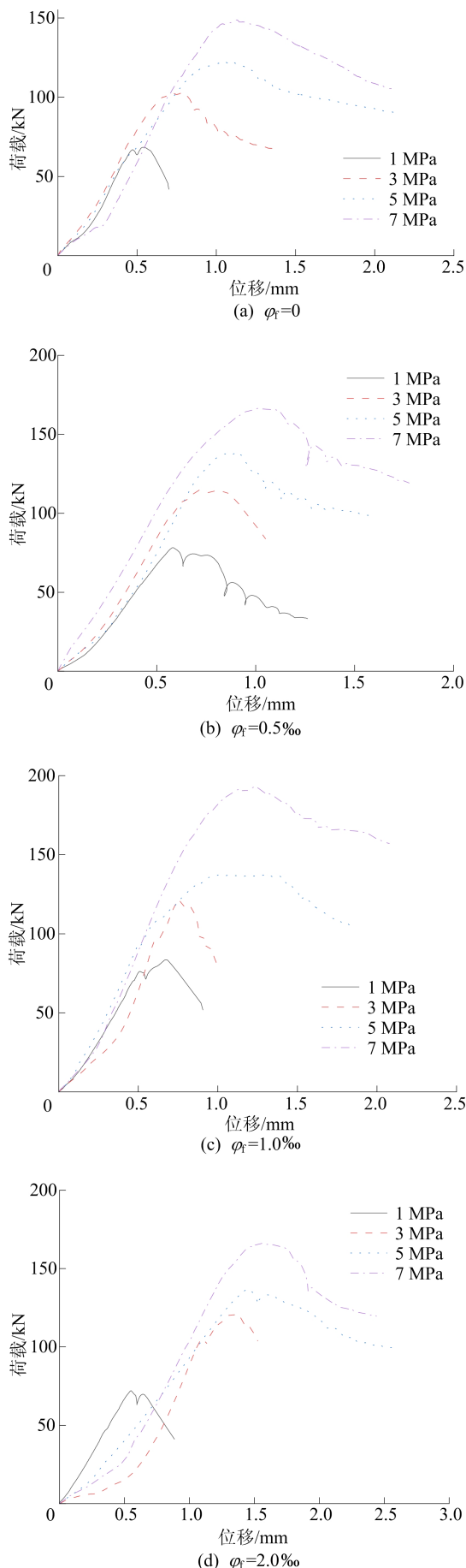


图 4 玄武岩纤维混凝土剪切荷载-位移曲线

随着法向应力的增加,素混凝土和玄武岩纤维混凝土抗剪强度也逐渐提高。混凝土抗剪强度随纤维掺量变化如图 5 所示。

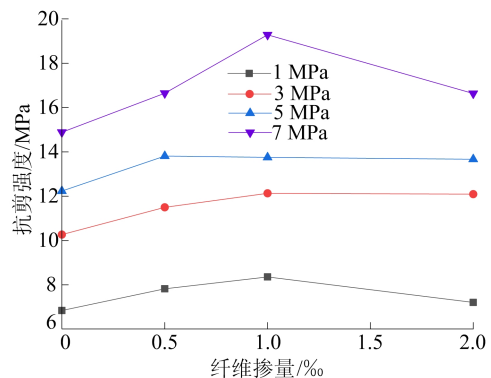


图 5 纤维掺量和法向应力对玄武岩纤维混凝土抗剪强度的影响

当法向应力相同时,随着纤维体积掺量增加,试件抗剪强度变化趋势整体呈现先上升再下降的趋势。其中当纤维掺量为 1.0‰时,对混凝土试件的抗剪强度提升效果较好,4 种法向应力作用下的剪切强度分别达到 8.36、12.13、13.75、19.28 MPa,相较于普通混凝土提升了 22.22%、18.11%、12.43%、29.57%。

短切玄武岩纤维能较好地提升混凝土剪切强度,这是由于纤维在水泥基体材料间起到良好桥接作用,纤维有着较高的抗拉强度,混凝土在剪切力作用下形成裂纹的过程中,纤维被拉动或拔出时可以承受拉力并分担部分外荷载,限制了剪切裂纹的形成与扩展,从而延缓试样剪切界面的扩展,增强了混凝土的抗剪性能,如图 6 所示。随着纤维掺量增加,对混凝土增强效果越明显。但过量的纤维在搅拌过程中容易产生结团或者分散不均,造成混凝土的一些缺陷,减弱短纤维增强混凝土力学性能的效果。

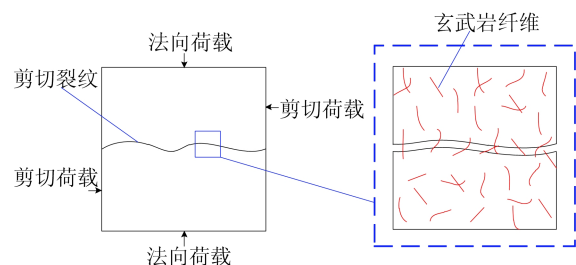


图 6 玄武岩纤维增强混凝土抗剪性能示意图

### 3 主应力空间破坏准则

研究混凝土复合受力性能时,破坏准则<sup>[17]</sup>是

重要分析内容,根据破坏准则可以分析混凝土在复合受力过程中的破坏规律。本试验基于主应力空间提出普通混凝土和短切玄武岩纤维混凝土压剪受力状态下的破坏准则。

当混凝土受到压剪作用时,其法向应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  可以通过下列公式转化成  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  3 个主应力,对应的计算公式为:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (3)$$

通过研究 3 个主应力之间的关系,能够得到压剪作用下的破坏准则方程。根据混凝土压剪复合受力特性,其  $\sigma_2=0$ ,即可简化  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的关系。参考相关文献[18],提出素混凝土和短切玄武岩纤维混凝土压剪复合受力主应力空间统一破坏准则方程,即

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = a_1 + a_2 \frac{\sigma_1}{f_c} \quad (4)$$

其中,  $f_c$  为混凝土立方体平均抗压强度。

在同一条件下同时制备  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  混凝土立方体抗压试件。在 28 d 标准养护龄期下的单轴抗压强度试验结果见表 3 所列。

表 3 玄武岩纤维混凝土立方体单轴抗压强度

纤维掺量/%	抗压强度/MPa	平均值/MPa
0	30.37	32.84
	32.34	
	35.80	
0.5	34.89	34.33
	34.25	
	33.84	
1.0	33.36	34.24
	34.26	
	35.09	
2.0	32.80	33.04
	34.76	
	31.55	

结合本文混凝土压剪试验数据,取每种掺量下试件的平均抗压强度  $f_c$  对  $\sigma_1/f_c$  和  $\sigma_3/f_c$  进行归一化处理,形成的曲线如图 7 所示。由图 7 可知,数据之间的离散性较小,呈现出较好的线性特征,得到素混凝土和短切玄武岩纤维混凝土主应力空间统一破坏准则线性回归方程如下:

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = -0.0834 - 0.5305 \frac{\sigma_1}{f_c} \quad (5)$$

拟合方程的相关系数  $R^2$  为 0.9651,说明与试验结果吻合较好。

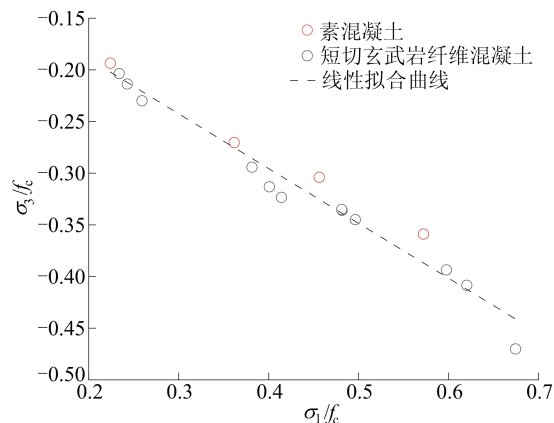


图 7 主应力空间破坏准则曲线

本文基于主应力空间提出的普通混凝土和短切玄武岩纤维混凝土在压剪复合受力下的统一破坏准则方程,表达式较为直观,具有较高的适用性,不仅适用于压剪复合受力试验,而且对于多轴受力表达可简化空间破坏包络面,便于分析和应用。

#### 4 玄武岩纤维混凝土剪切计算公式

为预测玄武岩纤维混凝土在压剪作用时的剪切性能,根据剪切试验结果,考虑不同纤维掺量和不同法向应力情况下,对混凝土抗剪强度进行拟合。其中玄武岩纤维混凝土法向应力与抗剪强度拟合曲线,如图 8 所示。

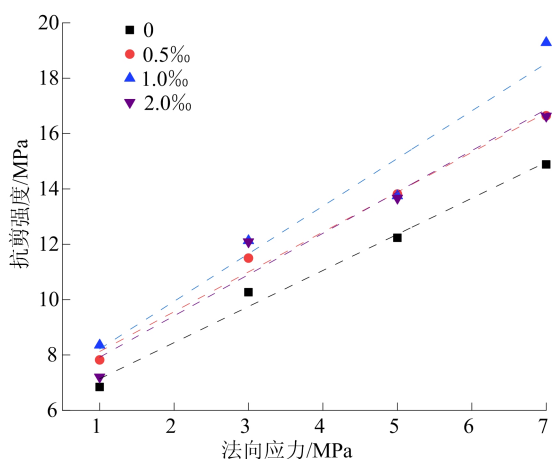


图 8 玄武岩纤维混凝土法向应力与抗剪强度拟合曲线

由图 8 可知,抗剪强度与法向应力拟合曲线呈线性关系,对应  $R^2$  都达到 0.9 以上,则列出对应的关系式为:

$$\tau = A_1\sigma + B_1 \quad (6)$$

其中:  $A_1$ 、 $B_1$  为待定系数;  $\sigma$  为法向应力。

纤维体积掺量与抗剪强度的拟合曲线如图 9 所示。

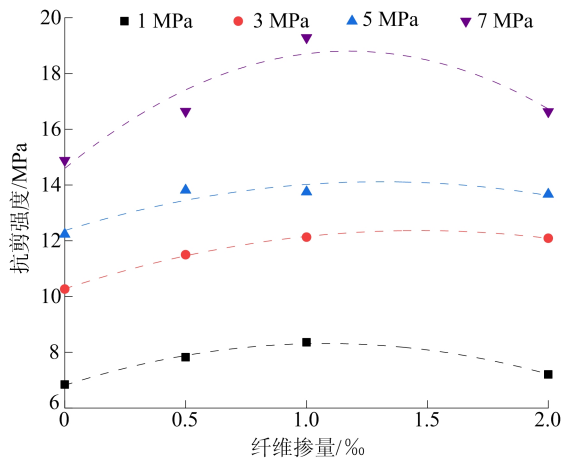


图 9 玄武岩纤维混凝土纤维掺量与抗剪强度拟合曲线

由图 9 可知,纤维掺量与抗剪强度拟合曲线呈二次抛物线关系,且拟合结果对应的误差系数  $R^2$  都达到 0.85 以上,满足拟合要求。则提出对应的关系式为:

$$\tau = A_2\varphi^2 + B_2\varphi + C \quad (7)$$

其中:  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C$  为待定系数;  $V$  为纤维体积掺量。

结合式(6)~(7)可以得到短切玄武岩纤维混凝土抗剪强度计算式,即

$$\tau_c = (A_1\sigma + B_1)(A_2\varphi^2 + B_2\varphi + C) \quad (8)$$

其中:  $\tau_c$  为短切玄武岩纤维混凝土的抗剪计算强度。参考文献[19-20],式(8)对试验数据进行数学回归分析得到计算公式为:

$$\tau_c = (0.570 2\sigma + 2.428 8) \times (-0.345 3\varphi^2 + 0.842 9\varphi + 2.331 3) \quad (9)$$

式(9)是由法向应力和纤维掺量对混凝土的抗剪强度影响系数两部分组成。经数学回归分析可知,短切玄武岩纤维混凝土剪切强度公式误差系数符合试验数据标准,公式  $R^2$  达到 0.959 3,大于 0.95,呈现出良好的拟合结果,满足计算公式构造要求。

短切玄武岩纤维混凝土抗剪强度计算值  $\tau_c$  与试验值  $\tau$  见表 4 所列,  $\tau_c/\tau$  的平均值为 1.00, 标准差为 0.002,且纤维混凝土的变异系数较小,数值仅为 0.002,可见计算结果和试验值吻合良好。经过短切玄武岩纤维混凝土抗剪强度公式得到的计算数值,可以代表在不同法向应力和不同纤维掺量情况下玄武岩纤维混凝土的抗剪强度,能为

工程应用提供参考。

表 4 短切玄武岩纤维混凝土抗剪强度计算值与试验值

法向应力/MPa	纤维掺量/%	$\tau$ /MPa	$\tau_c$ /MPa	$\tau_c/\tau$
1	0	6.84	6.99	1.02
	0.5	7.82	8.00	1.02
	1.0	8.36	8.48	1.01
	2.0	7.21	7.91	1.10
3	0	10.27	9.65	0.94
	0.5	11.50	11.04	0.96
	1.0	12.13	11.71	0.97
5	2.0	12.09	10.91	0.90
	0	12.23	12.31	1.01
	0.5	13.81	14.08	1.02
7	1.0	13.75	14.94	1.09
	2.0	13.67	13.92	1.02
	0	14.88	14.97	1.01
7	0.5	16.65	17.12	1.03
	1.0	19.28	18.16	0.94
	2.0	16.63	16.92	1.02

## 5 结 论

1) 压剪作用下,短切玄武岩纤维能起到一定的阻裂作用,试件自由面剥落较轻,减轻混凝土试件的破坏程度,抑制试件裂缝的产生与发展。

2) 随着法向应力的增大,玄武岩纤维混凝土的抗剪强度随之增大。随着纤维体积掺量的增加,混凝土的抗剪强度呈现先增后降的趋势。在体积掺量为 1.0% 时,短切玄武岩纤维对混凝土的整体剪切强度提升更为显著,提升幅度达到 20.56%。

3) 基于试验结果,采用主应力空间破坏准则分析玄武岩纤维混凝土在压剪应力状态下的强度,表明主应力空间破坏准则能较好地描述玄武岩纤维混凝土的强度规律。

4) 考虑法向应力和纤维掺量的影响,提出玄武岩纤维混凝土压剪作用下的抗剪强度计算公式,拟合值与试验值吻合良好。

## [参 考 文 献]

[1] 陶琦,付强,王悦石,等.玄武岩纤维混凝土工作特性受纤维掺量影响的反复受压试验研究[J].中国测试,2023,49(2):168-173.

[2] 尹俊红,纪艳春,赫中营,等.碳纤维混凝土力学性能研究[J].混凝土,2023(1):64-67,72.

[3] 郭丽萍,陈波,杨亚男.PVA纤维对混凝土抗裂与增韧效应影响的研究进展[J].水利水电科技进展,2015,35(6):

- 113-118.
- [4] 肖琦,郝帅,宁喜亮,等.纤维对混凝土抗冻耐久性的影响研究综述[J].混凝土,2018(6):68-71.
- [5] 黄加圣,杨鼎宜,朱振东,等.聚乙烯醇纤维混凝土耐久性性能试验研究[J].混凝土,2019(6):61-65.
- [6] 陈宇良,姜锐,陈宗平,等.复合受剪钢纤维再生混凝土破坏机理及强度计算[J].工程力学,2023,40(3):88-97,128.
- [7] 陈宇良,姜锐,陈宗平,等.钢纤维再生混凝土的直剪力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(9):984-990.
- [8] 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试验及剪切韧性评价方法[J].复合材料学报,2020,37(2):461-471.
- [9] 杨萌,黄承逵,刘毅.钢纤维高强混凝土抗剪性能试验研究[J].大连理工大学学报,2005,45(6):842-846.
- [10] 郭艳华,刘建红,李志业.钢纤维混凝土压剪破坏研究[J].建筑材料学报,2008,11(2):152-156.
- [11] 王志亮,杨文敬,吴立朋.超短钢纤维混凝土压剪破坏机理研究[J].铁道建筑,2011(4):145-148.
- [12] 高丹盈,朱海堂,汤寄予.纤维高强混凝土抗剪性能的试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(6):88-92,98.
- [13] 陈宇良,张绍松,徐金俊,等.压剪作用下PVA纤维再生混凝土力学性能试验研究[J].材料导报,2023,37(11):112-118.
- [14] 叶学华,许金余,聂良学.不同玄武岩纤维掺量的早强混凝土劈裂拉伸强度研究[J].硅酸盐通报,2015,34(6):1700-1704.
- [15] 王成,李曦彤,葛广华,等.玄武岩纤维掺量对塔里木灌区水工混凝土早龄期力学性能的影响[J].建筑结构,2022,52(增刊1):1037-1042.
- [16] 胡秀月,庞建勇,雷成祥.玄武岩纤维混凝土孔隙结构及在围压下渗透性能研究[J].复合材料科学与工程,2023(1):94-99.
- [17] YU Z P, TANG R, LI F R, et al. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio[J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123105.
- [18] 余振鹏,黄侨,赵志青,等.自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能[J].复合材料学报,2019,36(8):1984-1994.
- [19] 邓志恒,李作华,杨海峰,等.再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(5):174-180.
- [20] 杨海峰,杨超,蒋毅,等.钢纤维混凝土压-剪复合性能及损伤本构关系[J].工程力学,2023,40(4):144-151.

(责任编辑 吴 亮)

#### (上接第 425 页)

- [14] CHING J, PHOON K K, HU Y G. Efficient Evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2009, 135(6): 768-777.
- [15] RASHKI M, MIRI M, MOGHADDAM M A. Closure to "a new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point"[J]. Structural Safety, 2014, 46: 15-16.
- [16] OKASHA N M. An improved weighted average simulation approach for solving reliability-based analysis and design optimization problems [J]. Structural Safety, 2016, 60: 47-55.
- [17] 姬建,王乐沛,廖文旺,等.基于WUS概率密度权重法的边坡稳定系统可靠度分析[J].岩土工程学报,2021,43(8):1492-1501.
- [18] 朱大勇.边坡临界滑动场及其数值模拟[J].岩土工程学报,1997,19(1):65-71.
- [19] 朱大勇,周早生.边坡全局临界滑动场(GCSF)理论及工程应用[J].土木工程学报,1999,32(3):66-72.
- [20] ZHU D Y, LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(15): 1573-1590.
- [21] 朱大勇,李焯芬,姜弘道,等.基于滑动面正应力修正的边坡安全系数解答[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2788-2791.
- [22] 卢坤林,朱大勇,杨扬.边坡滑动面正应力构成及分布模式[J].岩土力学,2012,33(12):3741-3746.
- [23] 余国,谢谟文,郑正勤,等.基于GIS的边坡稳定性计算方法研究[J].岩土力学,2019,40(4):1397-1404,1412.

(责任编辑 吴 亮)