

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.01.012

海洋环境下玄武岩纤维混凝土的抗侵蚀及力学性能*

徐怀江^{1,2}, 吴秋祺¹, 张军², 洪太波², 薛松岭¹, 李家伟¹

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 灌云县公路事业发展中心, 江苏 连云港 222200)

摘要: 基于纤维混凝土契合当前海洋环境下混凝土服役的实际需求以及玄武岩纤维混凝土在海工类建筑物中的应用仍处于探索阶段。针对玄武岩纤维掺入海工混凝土后抗氯离子渗透性能以及力学抗裂性能的变化情况与作用机制展开研究; 采用体积外掺法将长度为12, 18, 24 mm的玄武岩纤维分别以0.1%, 0.2%, 0.3%的体积掺量掺入海工混凝土中, 就各纤维变量对混凝土电通量与混凝土拉压力学性能的影响展开分析。结果表明: 混凝土电通量随着纤维掺量的增大呈现先降后增趋势, 提升混凝土抗氯离子侵蚀性能的最佳掺量为0.1%~0.2%; 不同尺寸纤维相同掺量下混凝土抗氯离子性能与纤维长度成正比; 混凝土立方体抗压强度处于正增长趋势的纤维区间为0.1%~0.2%; 0.2%掺量下的18 mm纤维, 对混凝土劈裂抗拉强度提升幅度最大, 0.3%掺量下的12 mm纤维混凝土劈裂抗拉强度提升最小; 当掺入0.2%体积纤维时, 18, 24 mm玄武岩纤维混凝土拉压比增益最大, 体积掺量为0.3%时, 12 mm玄武岩纤维混凝土拉压比增益最大。

关键词: 玄武岩纤维; 海工混凝土; 抗氯离子渗透性能; 力学性能; 拉压比

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2024)01-0091-08

引用格式: 徐怀江, 吴秋祺, 张军, 等. 海洋环境下玄武岩纤维混凝土的抗侵蚀及力学性能[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 91-98.

Study on the Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete in Marine Environment

XU Huaijiang^{1,2}, WU Qiuqi¹, ZHANG Jun², HONG Taibo², XUE Songling¹, LI Jiawei¹

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Road Development Center of Guanyun County, Lianyungang 222200, China)

Abstract: Based on the fact that fiber reinforced concrete meets the actual needs of concrete service in the current marine environment and the application of basalt fiber reinforced concrete in marine engineering buildings is still in the exploratory stage, research is conducted on the changes and mechanisms of chloride ion penetration resistance and mechanical crack resistance after basalt fiber is added to marine engineering concrete. Using the volume addition method, basalt fibers with lengths of 12, 18, and 24 mm were added to marine concrete at volumes of 0.1%, 0.2%, and 0.3%, respectively. The influence of each fiber variable on the electrical flux and tensile and compressive mechanical properties of concrete was analyzed. The results show that the electrical flux of concrete decreases first and then increases with the increase of fiber content, and the optimal dosage to improve the chloride ion corrosion resistance of concrete is between 0.1% and 0.2%. The chloride ion resistance of concrete with the same dosage of fibers of different si-

* 收稿日期: 2023-09-24; 修订日期: 2023-11-19

作者简介: 徐怀江(1982—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 研究方向为道路桥梁工程, (E-mail)93502914@qq.com。

通信作者: 李家伟(1975—), 男, 江苏连云港人, 研究员级高级工程师, 研究方向为道路桥梁工程, (E-mail)2018000046@jou.edu.cn。

zes is directly proportional to the fiber length. The fiber range with a positive growth trend in the compressive strength of concrete cubes is between 0.1% and 0.2%. The 18 mm fiber with a 0.2% content has the greatest improvement in the splitting tensile strength of concrete, while the 12 mm fiber concrete with a 0.3% content has the least improvement in splitting tensile strength. When 0.2% volume fiber is added, the tensile compression ratio gain of 18, 24 mm basalt fiber reinforced concrete is the highest. When the volume content is 0.3%, the tensile compression ratio gain of 12 mm basalt fiber reinforced concrete is the highest.

Key words: basalt fiber; marine concrete; resistance to chloride ion penetration; mechanical properties; tension-compression ratio

0 引言

随着“一带一路”建设的不断推进,在相关基础设施建设尤其是港口及海洋工程建设中,混凝土材料应用量逐渐增大。然而,一方面由于混凝土材料受脆性缺陷的限制,在受荷过程中易出现变形开裂现象,另一方面由于普通钢筋混凝土处于海洋环境中易被氯离子侵蚀,从而影响海工结构的耐久性,因此,应用于海工类腐蚀环境中的混凝土结构,需有针对性地采用抗渗性能良好的建筑材料^[1]。提高混凝土的密实度和抗裂性,是改善海工混凝土结构工作性能的根本途径^[2]。

吴中伟^[3]提出复合化是水泥基材料高性能化的主要途径,纤维增强是核心。纤维材料发展至今,多应用聚丙烯纤维、玻璃纤维、钢纤维材料等结合混凝土作基体制成纤维增强混凝土材料,在混凝土工程中起到加固补强、提高耐久性等作用^[4]。刘素梅等^[5]、孙丽娟等^[6]分别在混凝土中掺入聚乙烯纤维、玻璃纤维来研究混凝土材料在海洋环境下抗氯离子侵蚀性能;王继博等^[7]通过应用麦秸秆等有机纤维来研究纤维与混凝土抗氯离子渗透性能间的变化规律;王晨飞等^[8]研究发现,海洋潮汐环境下聚丙烯纤维有助于改善混凝土抗氯离子侵蚀性能,干湿交替作用下混凝土裂缝附近氯离子含量和长期浸泡条件下没有明显差异;Beigi等^[9]研究表明,玻璃纤维、钢纤维和聚丙烯纤维的掺量与混凝土抗氯离子性能成反比关系,仅当玻璃纤维掺量为0.15%时,抗氯离子性能得到了提高,其余掺量下性能均降低;张俊芝等^[10]分析了混凝土氯离子扩散系数和掺加材料之间的关系,结果表明,当混凝土材料单独掺加火成岩纤维、粉煤灰时,氯离子扩散性能出现显著衰减,对应的时间衰减系数提升。

葛辉等^[11]通过将玻璃纤维掺入混凝土中提高了混凝土材料的抗弯性能;晏麓晖等^[12]研究了超高分子聚乙烯纤维与高强混凝土之间的黏结关系,表明聚乙烯纤维对高强混凝土具有阻裂、增韧效用。玄武岩纤维作为一种新型无机环保高性能纤维材料,具备强度高、耐磨性、耐腐蚀性良好等优异性能^[13]。发展至今也有部分学者^[14-15]针对玄武岩纤维对活性粉末混凝土的力学强度、泡沫混凝土的开裂展开过研究。但关于玄武岩纤维改善海工混凝土耐久性与力学性能方面的研究相对较少,因此基于玄武岩纤维混凝土材料契合海洋工程材料是未来的发展趋势^[16]。本文通过研究玄武岩纤维改善海工混凝土抗氯离子渗透性能以及力学性能的影响规律,分析玄武岩纤维对提高海工混凝土材料性能的作用机理,为玄武岩纤维应用于海工类混凝土建筑提供相应的理论依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:淮安楚州海螺水泥有限责任公司生产的P.O 42.5普通硅酸盐水泥。

粉煤灰:普通I级粉煤灰。

粗骨料:江苏海通建设工程有限公司通仁分公司生产的连续级配碎石,表观密度为 $2\ 719\ \text{kg}/\text{m}^3$,堆积密度为 $1\ 550\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

细骨料:江苏海通建设工程有限公司通仁分公司的天然河砂,中砂,细度模数2.6,表观密度为 $2\ 602\ \text{kg}/\text{m}^3$,堆积密度为 $1\ 440\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

水:实验室用水。

外加剂:采用高性能复合聚羧酸减水剂,减水率为27%。

玄武岩纤维:江苏天龙玄武岩连续纤维股份有

限公司生产的短切玄武岩纤维(见图 1),其规格参照表 1。



图 1 玄武岩纤维
Fig. 1 Basalt fiber

表 1 玄武岩纤维物理力学性能指标

Table 1 Physical mechanical properties of basalt fiber

项目	长度/ mm	单丝直 径/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	断裂强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂伸 长率/%
指数	12/18/24	17	2.7	2 430	84.5	3
指标	/	/	/	$\geq 2\ 000$	≥ 80	≥ 2.1

1.2 试件配合比

本试验配合比根据 JGJ 55—2019《普通混凝土配合比设计规程》设计。结合 JTS 257-2—2012《海港工程高性能混凝土质量控制标准》规范定义单掺高性能掺合料时,P. O 型普通硅酸盐混水泥基准下粉煤灰掺合料需控制在 20%~35% 区间内的要求,本试验的 C40 海工混凝土基准配合比确定最终粉煤灰掺量为 20%,确定水胶质量比为 0.41。以玄武岩纤维长度与掺量为设计变量,通过控制相同纤维尺寸下的不同掺量,针对试验结果进行相对独立的对比分析,研究不同变量的玄武岩纤维对海工混凝土抗氯离子性能的影响情况。试件配合比见表 2。

表 2 基准配合比

Table 2 Benchmark mix ratio kg/m^3

试件	水泥	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂
BF-0	346	86	734	1 073	177	4.75

注:本试验采用体积外掺法,纤维尺寸变量包括 12,18,24 mm,外掺纤维掺量为 2.7,5.4,8.1 kg/m^3 ,分别对应纤维体积率 0.1%,0.2%,0.3%。其中,BF-0 表示未掺玄武岩纤维的素混凝土试件,在上述配合比基础上分别参加 0.1%~0.3% 的玄武岩纤维,试件编号分别记为 BF-纤维尺寸-0.1%~BF-纤维尺寸-0.3%。

1.3 试验准备

1.3.1 试验器材 本试验利用多功能混凝土耐久性综合测试仪(见图 2)完成玄武岩纤维海工混凝土

电通量试验,依照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》保证试验仪器稳定输出 60 V 直流电压。试件侧身采用蜡脂密封,阴极溶液应用 3% 的 NaCl 溶液,阳极溶液应用 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液。



图 2 多功能混凝土耐久性综合测试仪

Fig. 2 Multifunctional concrete durability comprehensive test instrument

本试验利用 WHY-3000 微机控制全自动压力机(见图 3)完成玄武岩纤维混凝土立方体抗压试验。基于本次试验采用 C40 混凝土,立方体抗压强度介于 30~60 MPa。根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》5.0.4 规定,确定施加荷载速度为 0.5~0.8 MPa/s。试验期间严格保证控制台急停按钮处于松开状态,检查各机械限位位置。



图 3 WHY-3000 微机控制全自动压力机

Fig. 3 WHY-3000 microcomputer control automatic press

1.3.2 试件设计 根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,本试验通过测定电通量指标来确定混凝土抗氯离子渗透性能。设计强度为 C40 的 $\Phi 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体,纤维掺量为 0,0.1%,0.2%,0.3%;纤维长度 12,18,24 mm。GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定,一组试件电通量最大值和最小值与中间值之差均未超过中间值

15%,可记3个试件算术平均值为该组试件电通量试验结果测定值,经28 d龄期标准养护后开展混凝土电通量试验(见图4)。



图4 试件成模
Fig. 4 Mold tryout

2 电通量试验结果分析

玄武岩纤维理论上可以改善海工混凝土抗氯离子侵蚀,原因在于纤维对于混凝土内部孔隙结构进行改善,减少早期混凝土的收缩裂缝,抑制混凝土内部细微裂缝的发展,从而降低混凝土带裂缝工作时受氯离子侵蚀的可能性。基于此,针对不同种类、尺寸、掺量的纤维对改善混凝土抗氯离子侵蚀的性能研究工作才得以展开。本次试验在以玄武岩纤维为外掺纤维的基础上,分别将纤维尺寸与掺量作为海工混凝土抗氯离子侵蚀试验的单独变量,具体试验数据见表3。

表3 海工混凝土抗氯离子渗透试验结果

Table 3 Test results of chloride ion penetration resistance of marine concrete

纤维长度/mm	纤维掺量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	6 h 电通量/C	抗氯离子渗透增益比及均值/%	
素混凝土	0	836	/	
12	2.7	753	9.93	1.67
	5.4	821	1.79	
	8.1	892	-6.70	
18	2.7	743	11.12	4.70
	5.4	785	6.10	
	8.1	862	-3.11	
24	2.7	705	15.67	9.33
	5.4	753	9.93	
	8.1	816	2.39	

根据JTS 257-2—2012《海港工程高性能混凝土质量控制标准》规定,电通量法混凝土抗氯离子渗透性能最高限值为1 000 C。本试验玄武岩纤维混凝土电通量满足质量检验标准。

由表3中可以发现,混凝土电通量随着纤维掺量

的增加先下降后上升。具体表现为:随着纤维的应用,当掺入0.1%的12 mm纤维时,混凝土电通量降低到最低值753 C,相较于基准组混凝土抗氯离子渗透性能提高9.93%;18 mm和24 mm纤维电通量最低值对应掺量也为0.1%,此时电通量分别降低为743 C和705 C,混凝土抗氯离子渗透性能分别提高11.12%和15.67%。上述现象表明,随着纤维掺量的逐步增加,混凝土内掺入一定量的玄武岩纤维可以减少结构内氯离子渗透通道,提高材料抗氯离子侵蚀性能。当纤维掺量超过0.1%时,仪器测得电通量逐渐上升,该上升阶段表明混凝土内部渗透通道逐渐增加,材料抗氯离子渗透性能开始下降。当玄武岩纤维掺量为0.3%时,12 mm和18 mm纤维混凝土电通量相较于其他纤维掺量达到峰值为892 C和862 C,均高于基准参照混凝土,即抗氯离子渗透性能下降6.7%和3.11%;0.3%掺量的24 mm纤维混凝土电通量为816 C,相较于基准混凝土,抗氯离子渗透性能增加2.39%。该阶段表明0.3%掺量的12 mm和18 mm的玄武岩纤维无法改善混凝土抗氯离子渗透性能,0.3%掺量的24 mm玄武岩纤维针对混凝土抗氯离子渗透性能改善效果微弱。

由图5和图6发现,不同纤维对混凝土抗氯离子渗透性能改善效果最佳的纤维掺量在0.1%~0.2%区间。当纤维掺量超过该区间时,纤维混凝土的电通量变化趋势由降变升,表明此阶段的玄武岩纤维混凝土内部通氯离子含量上升,材料抗侵蚀能力减弱,即内部氯离子渗透通道增加。从玄武岩纤维与混凝土拌合物黏结状态分析,玄武岩纤维作为一种无机单丝聚合而成的表面积较大的纤维结构,与水黏结时单丝表面易凝聚游离水分,混凝土拌合物中掺入一定量纤维时,纤维结构可以吸附一部分水泥浆体,减少了结构振捣成型过程中不均匀浮浆以及泌水通道的产生。随着拌合过程中掺入的玄武岩纤维掺量增加,拌合物内部纤维对水泥浆体的吸附能力更强,在拌合过程中逐渐形成纤维聚团物,造成混凝土拌合物流动性和黏聚性降低。随着纤维的增多,混凝土拌合物形态逐渐向流动性差、黏结性弱、呈分散状的纤维聚团演变,在混凝土分层振捣过程中拌合物振捣出的少量水泥浆体无法填充内部孔隙,内部气泡也难以从流动性差的拌合物中析出,纤维砂浆聚团物增多进一步导致振捣中各层混凝土拌合物之间黏结性降低,难以振捣密实,在混凝土成型过程中逐渐形成薄弱界面,在海工环境中易形成氯离子渗透通道。具体表现为当纤维掺量超过0.1%

~0.2%区间时,抗氯离子渗透性能逐渐下降,电通量上升,其中 0.3%掺量的 12 mm 纤维混凝土及 18 mm 纤维混凝土电通量均高于基准混凝土电通量。

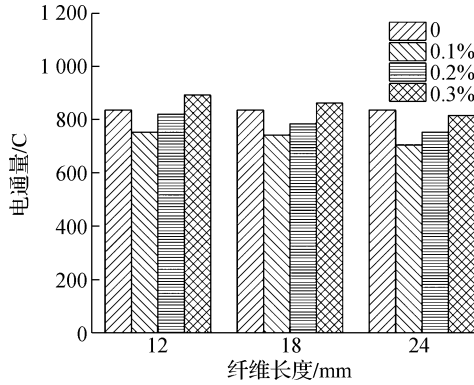


图 5 给定纤维尺寸下不同掺量对混凝土电通量影响趋势
Fig. 5 Influence trend of different dosages on the electrical flux of concrete under a given fiber size

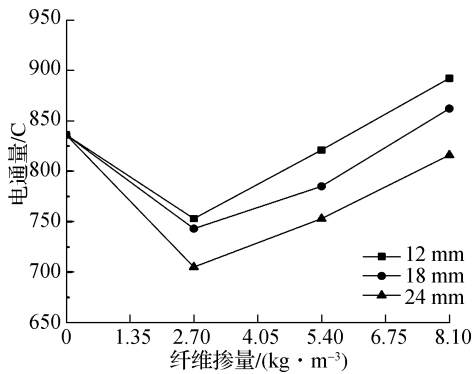


图 6 给定纤维掺量下不同尺寸对混凝土电通量影响趋势
Fig. 6 Influence trend of different sizes on the electrical flux of concrete under a given fiber content

本试验观察发现,纤维掺量是影响混凝土抗氯离子性能变化趋势的主要因素,纤维长度是影响混凝土抗氯离子渗透性能的次要因素。如图 6 所示,随着纤维长度的增加,混凝土电通量整体呈现下降的趋势,表明混凝土抗氯离子性能与纤维长度成正比,表明相同掺量下,纤维质量体积一致,纤维单丝越短,整体纤维比表面积越大,在混凝土拌合物中对水泥浆体的吸附性越强。一方面,过多的水泥浆体被纤维吸附,在拌合过程中逐渐形成纤维聚团物,影响混凝土拌合物的黏结性与流动性;另一方面,混凝土在振捣成型过程中内部孔隙气泡难以排出,各层拌合物间黏结界面薄弱,易受氯离子侵蚀,因此纤维长度与混凝土抗氯离子渗透性能成正比。

3 力学性能试验结果分析

3.1 立方体抗压强度分析

本试验设计 3 种长度、3 种掺量的玄武岩纤维混凝土试块和相应的基础对照组合计 10 组实验参数。根据 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验标准》规定的试验方法,试验数据为中间值的 15%上下浮动区间确定平均值,计算标准立方体试件抗压强度,具体试验结果见表 4。

表 4 海工混凝土立方体抗压试验结果

Table 4 Compressive test results of marine concrete cubes

纤维长度/ mm	纤维掺量/ (kg·m ⁻³)	峰值荷 载/kN	抗压强 度/MPa	抗压强度 增益值/%
素混凝土	0	1 120	49.76	/
12	2.7	1 144	50.84	2.18
	5.4	1 153	51.23	2.95
	8.1	1 063	47.25	-5.04
18	2.7	1 201	53.36	7.23
	5.4	1 256	55.81	12.16
	8.1	1 095	48.65	-2.23
24	2.7	1 150	51.11	2.72
	5.4	1 175	52.23	4.96
	8.1	1 076	47.83	-3.88

通过图 7 观察到,相较于基准混凝土,掺入玄武岩纤维的混凝土抗压强度呈现出先增长后降低的发展趋势。玄武岩纤维掺量为 0.1%和 0.2%时,掺入不同长度纤维的混凝土立方体抗压强度均呈现正增长趋势,增幅在 2%~12%之间;纤维掺量为 0.3%时,掺入纤维使得混凝土立方体抗压强度有所下降,降幅在 2%~5%之间;其中当纤维掺量为 0.2%时,不同尺寸纤维对立方体抗压强度增益要更明显,其中 0.2%掺量的 18 mm 玄武岩纤维对立方体抗压强度增幅最优,达到 12.16%;此外当掺入 0.3%的 12 mm 玄武岩纤维时,混凝土立方体抗压强度降幅要略大于其他变量,此时立方体抗压强度降幅为 5.04%;整体上玄武岩纤维掺入后混凝土立方体抗压强度增幅并不明显,当纤维掺量过多时,立方体抗压强度会出现略微下降的情况,但是仍然满足立方体标准抗压强度指标。上述数据表明,0.1%和 0.2%纤维掺量下,立方体抗压强度呈正增长,纤维掺量为 0.3%时,立方体抗压强度增率急剧降低,说明考虑掺入一定量纤维以提升混凝土抗压强度时,不适宜选取 0.3%纤维掺量。

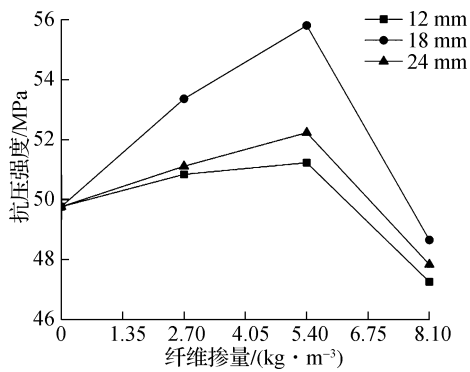


图7 给定纤维掺量下不同尺寸对混凝土抗压强度影响趋势

Fig. 7 Influence trend of different sizes on the compressive strength of concrete under a given fiber content

通过对比不同掺量下混凝土抗压强度变化趋势,发现 12 mm 和 24 mm 纤维整体上对于混凝土立方体抗压强度的提升较小,增幅分别低于 3% 和 5%。其中 12 mm 纤维的掺入对于混凝土抗压强度的提升几乎为零,是综合考虑下最不宜作为改善立方体抗压强度的纤维尺寸,原因可能是短纤维与混凝土黏结性能较弱,并不能充分发挥纤维对混凝土抗压强度的提升作用;此外 18 mm 纤维对于混凝土抗压强度的改善相比其他尺寸呈现出相对明显的提升,说明在考虑改善混凝土立方体抗压强度的前提下,适合选取 18 mm 纤维作为应用对象。

3.2 立方体劈裂抗拉强度分析

混凝土劈裂抗拉试验结果如表 5 所示。

表 5 海工混凝土劈裂抗拉试验结果

Table 5 Splitting tensile test results of marine concrete

纤维长度/ mm	纤维掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	劈裂抗拉 强度/MPa	劈裂抗拉强度 增益值/%
素混凝土	0	5.81	/
12	2.7	6.06	4.31
	5.4	6.32	8.72
	8.1	6.00	3.28
18	2.7	6.72	15.63
	5.4	7.62	31.12
	8.1	6.31	8.69
24	2.7	6.78	16.65
	5.4	7.47	28.64
	8.1	6.71	15.42

图 8 表明,玄武岩纤维对混凝土劈裂抗拉强度的改善效果随着纤维掺量的增加呈现出先增后减的趋势。纤维掺量为 0.2% 时,不同尺寸纤维下的混凝土劈裂抗拉强度提升幅度最大,其中 0.2% 掺量的 18 mm 纤维对混凝土劈裂抗拉强度提升更明显,

达到 31.12%;掺入 12 mm 纤维的混凝土劈裂抗拉强度随着掺量的增加变化相对较小,而掺入 18 mm 和 24 mm 纤维时混凝土劈裂抗拉强度变化幅度更为明显,表明纤维长度较短时,纤维掺量的增加并不能很好地满足对混凝土劈裂抗拉强度提升的要求。各纤维掺量为 0.3% 时,混凝土劈裂抗拉强度增长幅度最小,其中 0.3% 掺量的 12 mm 纤维混凝土劈裂抗拉强度最接近参照组混凝土试件,增幅为 3.28%。

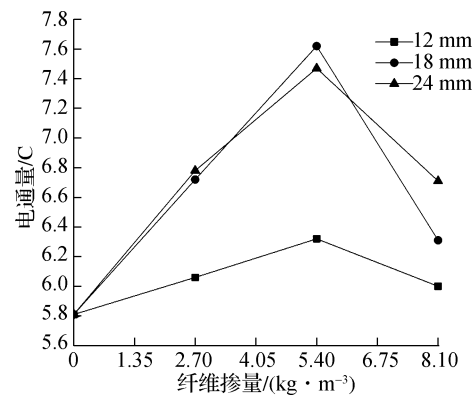


图8 给定纤维掺量下不同尺寸对混凝土劈裂抗拉强度影响趋势

Fig. 8 Influence trend of different sizes on the splitting tensile strength of concrete under a given fiber content

观察各尺寸纤维在不同掺量下的增益幅值发现,12 mm 对混凝土劈裂抗拉强度的增益最不明显;此外 12 mm 至 18 mm 纤维混凝土的劈裂抗拉强度变化对混凝土劈裂抗拉强度的增幅较之于 18 mm 至 24 mm 要更大,18 mm 与 24 mm 纤维劈裂抗拉强度增益均值相近。判断在一定纤维长度区间内,纤维长度的变化对混凝土劈裂抗拉强度影响较明显,随着纤维长度的进一步增加,对混凝土劈裂抗拉强度提升的趋势逐渐降低。

通过对比发现,0.2% 纤维掺量下混凝土劈裂抗拉强度增益均值要明显优于其他掺量,说明综合纤维尺寸下,混凝土中掺入 0.2% 纤维较之于其他纤维掺量呈现出更高的劈裂抗拉强度,优先考虑选取该掺量纤维以增强混凝土劈裂抗拉强度。当纤维掺量为 0.3% 时,各尺寸纤维混凝土劈裂抗拉强度均值最低,与 0.2% 纤维掺量实验结果相比,说明纤维掺量过多时,纤维的掺入并不能有效提升混凝土劈裂抗拉强度。分析原因为纤维掺量过多时,混凝土密实度受影响较大,掺入纤维并不能在混凝土受荷破坏前充分发挥增韧抗裂的作用,相对而言并不适

合作为增强混凝土劈裂抗拉强度的掺量选取对象。

3.3 拉压比分析

混凝土拉压比是指混凝土在受到拉力与压力作用下的承载能力比值。混凝土材料拉压比越大,表征材料受力至开裂所需时间越长,混凝土抗裂性能越好,结构服役过程中不易产生结构裂缝,作为建筑材料在海洋环境下不易被侵蚀。混凝土拉压比结果如表 6 所示。

表 6 海工混凝土拉压比

Table 6 Tension-compression ratio of marine concrete

纤维长度/mm	纤维掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	拉压 比/%	拉压比增 益值/%
素混凝土	0	49.76	5.81	11.68	/
12	2.7	50.84	6.06	11.92	2.05
	5.4	51.23	6.32	12.34	5.62
	8.1	47.25	6.00	12.70	8.72
18	2.7	53.36	6.72	12.59	7.82
	5.4	55.81	7.62	13.65	16.90
	8.1	48.65	6.31	12.97	11.05
24	2.7	51.11	6.78	13.27	13.57
	5.4	52.23	7.47	14.30	22.45
	8.1	47.83	6.71	14.03	20.11

图 9 是整合上述混凝土立方体强度和劈裂抗拉强度试验数据,计算不同纤维尺寸各掺量下混凝土拉压比值。针对玄武岩纤维脆性性能改善问题展开研究,拉压比越小,则表明混凝土材料抗压性能较好,抗拉性能不突出,即该材料偏向脆性,韧性较小,随着材料拉压比增长,材料韧性也随之提高。由图 9 可知,纤维的掺入可以保证混凝土拉压比有不同程度的提升,表明纤维的掺入在一定程度上对混凝土材料起着增韧的效果。根据纤维变量的不同,其增韧幅度与变化趋势也存在区别。其中当掺入 0.2% 体积纤维时,18,24 mm 玄武岩纤维混凝土拉压比增益最大,分别达到 16.90%,22.45%;体积掺量为 0.3% 时,12 mm 玄武岩纤维混凝土拉压比增益最大,达到 8.72%;纤维体积掺量为 0.1% 时,不同纤维尺寸对应的混凝土拉压比增益值最小,12,18,24 mm 分别对应 2.05%,7.82%,13.57%。整体趋势而言,18,24 mm 玄武岩纤维混凝土的韧性随着纤维掺量的提升呈现先增后减的趋势,12 mm 玄武岩纤维混凝土拉压比在一定掺量范围内随着纤维掺量的增加呈现接近线性增长的趋势。判断在一定纤维尺寸范围内,短尺寸纤维混凝土拉压比变化与纤维掺量成正比。

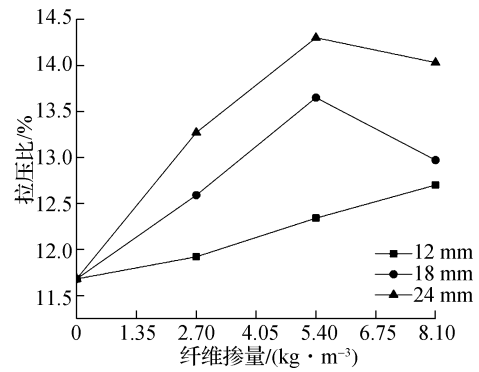


图 9 给定纤维掺量下不同尺寸对混凝土拉压比影响趋势

Fig. 9 Influence trend of different sizes on the tension-compression ratio of concrete under a given fiber content

对比图 9 掺入不同尺寸纤维时对混凝土材料韧性均值的改善效果,数据表明随着纤维的掺入,纤维长度越长,掺入玄武岩纤维时混凝土拉压比均值提升越大,说明混凝土韧性也相应提升。整体观察得知,12 mm 纤维混凝土拉压比增益值最小,24 mm 纤维混凝土拉压比增益值最大,直观发现以纤维长度为变量时,玄武岩纤维混凝土拉压比增长值与纤维长度呈正相关,表明在本试验纤维尺寸范围内,纤维对混凝土韧性改善效果与纤维尺寸成正比。当纤维长度为 24 mm 时,玄武岩纤维混凝土韧性提升最大。分析原因是随着纤维长度的增加,材料内部纤维与混凝土骨料接触面积也随之提高,黏结性进一步加强,结构整体性得到加固;长纤维混凝土受荷破坏时,裂隙面长纤维有更大概率保证吸收较高的断裂能后方才失去效用,较之于短纤维混凝土,长纤维混凝土韧性提升幅度更大。

此外,当纤维掺量在一定范围内时,纤维掺入的变化对混凝土韧性影响较明显。就本试验而言,针对混凝土拉压比改善效果较明显的 18 mm 和 24 mm 纤维在区间 0~0.2% 内时,纤维的掺入与改善效果成正比,随着纤维掺量进一步增至 0.3% 时,纤维掺入对混凝土韧性的增益幅度出现降低,表明混凝土韧性与纤维掺量并不是正相关的关系。实际应用中确定最佳纤维掺量要有明确的依据,多掺并不一定能最大程度发挥纤维对混凝土增韧的作用。

4 结论

混凝土电通量随纤维掺量增加先下降后上升。掺入 0.1% 掺量的 12,18,24 mm 纤维电通量达到最低值,混凝土抗氯离子渗透性能分别提高 9.93%,

11.12%, 15.67%; 当纤维掺量超过 0.1% 时, 材料抗氯离子渗透性能开始下降, 玄武岩纤维掺量为 0.3% 时, 12, 18 mm 纤维混凝土电通量上升, 较之于基准混凝土抗氯离子渗透性能下降 6.7%, 3.11%; 0.3% 掺量的 24 mm 纤维混凝土抗氯离子渗透性能增加 2.39%, 该阶段表明 0.3% 掺量的 12, 18 mm 的玄武岩纤维无法改善混凝土抗氯离子渗透性能, 0.3% 掺量的 24 mm 玄武岩纤维针对混凝土抗氯离子渗透性能改善效果微弱。

掺入玄武岩纤维的混凝土抗压强度较之于基准混凝土, 呈现出先增长后降低的发展趋势。玄武岩纤维掺量为 0.1% 和 0.2% 时, 掺入不同长度纤维的混凝土立方体抗压强度均呈现正增长趋势; 纤维掺量为 0.3% 时, 纤维的掺入使得混凝土立方体抗压强度有所下降, 其中当纤维掺量为 0.2% 时, 不同尺寸纤维对立方体抗压强度增益要更明显, 其中 0.2% 掺量的 18 mm 的玄武岩纤维对立方体抗压强度增幅最优, 达到 12.16%; 此外当掺入 0.3% 的 12 mm 玄武岩纤维时, 混凝土立方体抗压强度降幅要略大于其他变量, 此时立方体抗压强度降幅为 5.04%。

玄武岩纤维对混凝土劈裂抗拉强度的改善效果随着纤维掺量的增加呈现出先增后减的趋势。纤维掺量为 0.2% 时, 不同尺寸纤维下的混凝土劈裂抗拉强度提升幅度最大, 其中 0.2% 掺量的 18 mm 纤维对混凝土劈裂抗拉强度提升更明显, 达到 31.12%; 掺入 12 mm 纤维的混凝土劈裂抗拉强度随着掺量的增加变化相对较小, 而掺入 18, 24 mm 纤维时混凝土劈裂抗拉强度变化幅度更为明显; 各纤维掺量为 0.3% 时, 混凝土劈裂抗拉强度增长幅度最小, 其中 0.3% 掺量的 12 mm 纤维混凝土劈裂抗拉强度较之于基准混凝土基本无提升。

掺入 0.2% 体积纤维时, 18, 24 mm 玄武岩纤维混凝土抗压比增益较大, 分别达到 16.90%, 22.45%; 体积掺量为 0.3% 时, 12 mm 玄武岩纤维混凝土抗压比增益最大, 达到 8.72%; 纤维体积掺量 0.1% 时, 不同纤维尺寸对应的混凝土抗压比增益值最小, 18, 24 mm 玄武岩纤维混凝土的韧性随着纤维掺量的提升呈现先增后减的趋势, 12 mm 玄武岩纤维混凝土抗压比在一定掺量范围内随着纤维掺量的增加呈现接近线性增长的趋势, 判断在一定纤维尺寸范围内, 短尺寸纤维混凝土抗压比变化与纤维掺量成正比。

参考文献:

[1] SANJUAN M A, MORAGUES A. Polypropylene-fi-

ber-reinforced mortar mixes: optimization to control plastic shrinkage[J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57: 655-660.

[2] MANOTE S, NEMKUMAR B. Corrosion of rebar and role of fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2012, 40(1): 127-136.

[3] 吴中伟. 纤维增强-水泥基材料的未来[J]. *混凝土与水泥制品*, 1999(1): 5-6.

[4] 蔡蕊. 聚烯烃粗纤维混凝土抗氯离子渗透性试验研究[J]. *四川水泥*, 2015(4): 293.

[5] 刘素梅, 胡慧莹. 混杂粗/细聚丙烯纤维混凝土力学及抗氯离子渗透性能研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(2): 131-138.

[6] 孙丽娟, 刘兵伟, 孙永娟. 海水侵蚀对纤维混凝土力学性能和氯离子传输性能的影响[J]. *混凝土*, 2022(6): 24-28.

[7] 王继博, 任慧超, 张涛, 等. 麦秸秆纤维混凝土抗氯离子渗透性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(11): 131-133.

[8] 王晨飞, 牛获涛, 焦俊婷. 海洋潮汐环境纤维混凝土中氯离子迁移规律研究[J]. *混凝土*, 2017(1): 20-23.

[9] BEIGI M H, BERENJIAN J, OMRAN O L, et al. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete[J]. *Materials and Design*, 2013, 50: 1019-1029.

[10] 张俊芝, 庄华夏, 黄俊, 等. 自然潮差环境下掺合料对混凝土氯离子扩散性能衰减的影响[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 263-271.

[11] 葛辉, 张启志. 玻璃纤维对混凝土力学性能的影响[J]. *化学与粘合*, 2021, 43(2): 121-123.

[12] 晏麓晖, 张玉武, 朱林. 超高分子量聚乙烯纤维混凝土的基本力学性能[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(6): 43-47.

[13] LI Jian. Effect of chopped basalt fiber on mechanical properties and microstructure of slag fly ash concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(2): 727-732.

[14] 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.

[15] 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, 36(2): 727-732.

[16] 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): 1043-1049.

(责任编辑: 褚金红 实习编辑: 张昌保)