

玄武岩纤维对低热水泥混凝土早龄期劈拉强度的提升效果试验研究

张国辉¹, 顾德锦¹, 谢金东², 周明阳¹, 赵波¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要:为研究不同玄武岩纤维长度、掺量及龄期下低热水泥混凝土劈拉强度演化规律,采用控制变量法以 0.05 MPa/s 加载速率完成了 160 块试件的劈拉试验,分析了不同龄期混凝土劈拉强度受玄武岩纤维掺量和长度的影响程度。结果表明:在不同玄武岩纤维掺量和长度条件下,玄武岩纤维对各龄期劈拉强度均有提升效果,但影响规律有显著差异;当玄武岩纤维长度为 12 mm 时,随纤维掺量增加,3、5、7、14 d 龄期劈拉强度呈先增大后减小趋势,在纤维掺量为 0.2% 时达到峰值;当玄武岩纤维长度为 24 mm 时,随纤维掺量增加,各龄期劈拉强度均呈先增大后减小趋势,除 14 d 龄期外,其余龄期劈拉强度在纤维掺量为 0.2% 时达到峰值;最优玄武岩纤维长度为 12 mm,掺量为 0.2%。

关键词:玄武岩纤维;低热水泥混凝土;劈拉强度;养护龄期

中图分类号:TV41

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)06-0047-06

Experimental study on enhancement effect of basalt fibers on early-age splitting tensile strength of low-heat cement concrete//ZHANG Guohui¹, GU Dejin¹, XIE Jindong², ZHOU Mingyang¹, ZHAO Bo¹ (1. College of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: To investigate the evolution of splitting tensile strength of low-heat cement concrete with varying basalt fiber lengths, contents, and curing ages, splitting tensile tests were conducted on 160 specimens using the control variable method at a loading rate of 0.05 MPa/s. The influence of basalt fiber content and length on the splitting tensile strength at different curing ages was analyzed. The results indicate that under conditions of varying basalt fiber content and length, the fibers enhance the splitting tensile strength at all ages, although the impact patterns differ significantly. When the fiber length was 12 mm, an increase in fiber content led to an initial rise followed by a decline in tensile strength at ages of 3, 5, 7, and 14 days, reaching a peak at a fiber content of 0.2%. When the fiber length was 24 mm, the splitting tensile strength exhibited an initial increase followed by a decrease as fiber content increased. Except for the 14-day curing age, the maximum strengths at all other ages were achieved at a fiber content of 0.2%. The optimal basalt fiber length and content were determined to be 12 mm and 0.2%, respectively.

Key words: basalt fiber; low-heat cement concrete; splitting tensile strength; curing age

近年来,随着水利工程建设规模的扩大和深入,工程建设条件及服役环境更加严酷复杂。低热水泥具有铝酸三钙含量低、硅酸二钙含量高的特点,是一种节能、低碳的环境友好型水泥,其水化热低、温升小,具有良好的耐腐蚀性及抗裂性,在大体积混凝土施工中备受关注,已被成功用于乌东德、白鹤滩、深溪沟及溪洛渡水电站等工程^[1-2]。低热水泥的早期水化速率较为缓慢,致使其早期阶段强度较低。同时,实际工程所处区域的复杂气候环境,例如乌东德水电站冬季低湿、大风,夏季高温、大风,增加了低热

水泥混凝土在早期发生塑性开裂的风险^[3]。为提高低热水泥混凝土的抗裂性能和韧性,相关学者开展了通过掺加纤维来提高其早龄期强度的研究。例如:郭丽萍等^[4]结合金沙江向家坝水电站施工数据,发现掺入改性聚乙烯醇(PVA)纤维的混凝土在长间歇面上的裂缝较不掺纤维混凝土明显减少,掺加改性 PVA 纤维能够提高大坝混凝土的抗裂性能;Peng 等^[5]研究了钢纤维混凝土动态劈拉力学性能,发现把钢纤维掺入混凝土中可以有效改善其脆性特征,且劈拉强度随着钢纤维掺量的增加呈先减小后

基金项目:国家自然科学基金项目(52469021);云南省基础研究计划面上项目(202401AT070338)

作者简介:张国辉(1988—),男,副教授,博士,主要从事混凝土结构性能演化研究。E-mail:zgh_water@kust.edu.cn

增大的趋势;尹俊红等^[6]开展了纤维掺量和长度对碳纤维混凝土劈拉强度、抗压强度的影响研究,结果表明掺入不同纤维长度和掺量的碳纤维均能改善混凝土的抗拉和抗压强度,且当纤维长度为 10 mm、掺量为 0.24%时对混凝土的劈拉强度、抗压强度的提升效果最为显著;Wang 等^[7]的研究结果表明,添加适当体积比的聚丙烯纤维能够改善混凝土的力学性能,但由于聚丙烯纤维的疏水性,附着在纤维表面的气泡难以被消除,从而削弱了界面处的力学性能;Zhang 等^[8-9]对聚甲醛纤维混凝土进行了抗拉强度及断裂韧性试验,发现适当增加纤维长度和掺量能够有效提高纤维混凝土的抗拉强度及断裂韧性;杨九光^[10]开展了不同钢纤维掺量和长度对混凝土力学性能影响的研究,发现钢纤维掺量为 0.50%~1.50%时混凝土的力学性能显著提高;仲海民^[11]研究发现在冻融条件下聚丙烯纤维混凝土抗压、抗折强度随纤维表面处理时间的增加呈先增大后降低的趋势。

玄武岩纤维是一种无机环保纤维材料,具有绝缘性、耐腐蚀性、耐热性等性能,与碳纤维等纤维相比,其造价更低、适用性更好,是最具可持续性的增强材料之一^[12]。鉴于玄武岩纤维的优良性能,部分研究者就玄武岩纤维对混凝土材料的增强作用展开了研究。例如:郭少龙等^[13]通过试验比较了冻融循环作用前后玄武岩纤维水泥土与素水泥土的力学性能,发现在相同冻融循环次数下玄武岩纤维水泥土的无侧限抗压强度高于素水泥土,且随着纤维掺量的增加,水泥土抗冻融循环破坏能力增强;许泽宁等^[14]研究了不同纤维长度及掺量的短切玄武岩纤维混凝土的力学性能,发现纤维长度为 12 mm 时混凝土抗压强度的增强效果明显优于纤维长度为 18 mm 时,且不同养护龄期下纤维的最优掺量不同;Al-Rousan 等^[15]从纤维掺量和长度两个方面对玄武岩纤维混凝土的力学性能和耐久性能展开了研究,结果表明玄武岩纤维的掺入能显著提高混凝土的抗折和抗拉强度,且使混凝土具有良好的抗高温性能;成涛华等^[16]研究了不同纤维掺量、长径比条件下玄武岩纤维混凝土的力学性能,发现混凝土的力学性能随着纤维掺量及长径比的变化而变化,且纤维长度为 12 mm 时混凝土劈拉强度的增幅最显著;王晓军^[17]研究了聚丙烯腈纤维与玄武岩纤维混掺的纤维混凝土的力学特性,得到了最优抗折、抗拉强度下的纤维比值及总掺量;陈晓明等^[18]在对玄武岩纤维低热水泥混凝土的研究中发现不同纤维掺量及长度下,玄武岩纤维对各龄期低热水泥混凝土抗压强度均有增强作用,但增强作用存在显著差异。

综上所述,掺入玄武岩纤维混凝土的力学特性已取得了一定研究成果,但对低热水泥,特别是对早龄期混凝土劈拉强度的研究尚不系统。不同龄期条件下低热水泥混凝土受玄武岩纤维的影响程度存在差异。因此,有必要开展不同龄期条件下玄武岩纤维对低热水泥混凝土劈拉强度影响规律的研究,以期改善早龄期低热水泥混凝土性能提供依据。

1 试验方案

1.1 试验材料及配合比

试验粉煤灰采用贵州卓圣丰业环保新型材料开发有限公司生产的 F 类 I 级粉煤灰。水泥为四川嘉华特种水泥股份有限公司生产的 P·LH 42.5 低热硅酸盐水泥。粗、细骨料分别采用施工期料场砂石加工系统生产的人工碎石和人工砂。粗骨料表观密度为 2790 kg/m³,吸水率为 0.21%,粒径在 5~20 mm 范围内,含泥量为 0.3%。细骨料饱和面干吸水率为 1.2%,细度模数为 2.61,泥沙质量分数为 0.2%,表观密度为 2790 kg/m³。试验选用的长度为 12、24 mm 的玄武岩纤维是由海宁安捷复合材料有限公司生产的标准规格玄武岩纤维,其密度为 2.56 kg/m³,单丝直径在 7~15 mm 范围内,弹性模量在 91~100 GPa 范围内,抗拉强度为 4000 MPa。采用纤维体积率法设计玄武岩纤维低热水泥混凝土配合比,根据 JGJ/T 221—2010《纤维混凝土技术应用规程》和 DL/T 5330—2015《水工混凝土配合比设计规程》,经多次预试验拌和后,最终确定 1 m³混凝土中含水泥 290 kg、粉煤灰 58 kg、砂 835 kg、石子 1150 kg、水 170 kg,其中玄武岩纤维掺量分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%,对应的玄武岩纤维质量分别为 0、2.65、5.30、7.95 kg。玄武岩纤维掺量为玄武岩纤维的体积占混凝土总体积的百分比。未掺玄武岩纤维混凝土试件抗压强度标准值为 33.41 MPa,混凝土强度等级为 C30。

1.2 试验设计与方法

试验方法为控制变量法,试验控制因素为养护龄期、玄武岩纤维长度、玄武岩纤维掺量,其中养护龄期设为 3、5、7、14、28 d,玄武岩纤维长度设为 12、14 mm,玄武岩纤维掺量设为 0%、0.1%、0.2%、0.3%,共 40 个试验组。为保证试验结果的可靠性,每个试验组制作 4 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,共计 160 个混凝土试件。玄武岩纤维掺入方法采用干拌法,按照配合比,首先将粉煤灰、低热水泥、砂和石子进行干拌,干拌过程中掺入玄武岩纤维。搅拌过程持续 60 s,确保玄武岩纤维与干料均匀混合。然后加入拌和用水搅拌 90 s。图 1 为玄

玄武岩纤维在低热水泥混凝土拌合物中的分布形态。室内恒温静置 1 d 后脱模,随后将各龄期试件进行标准养护。在分别达到 3、5、7、14、28 d 养护龄期后,进行玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度试验。试验按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》进行,设定劈拉加载速率为 0.05 MPa/s。



图1 新拌玄武岩纤维低热水泥混凝土

2 试验结果与分析

2.1 玄武岩纤维长度及掺量对混凝土劈拉强度的影响

玄武岩纤维长度为 12 mm 时各龄期不同纤维掺量下玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度和相对劈拉强度的变化曲线如图 2 所示,其中相对劈拉强度为混凝土在各玄武岩纤维掺量下的劈拉强度与同一养护龄期末掺玄武岩纤维时劈拉强度的比值。由图 2(a)可知,在掺入纤维长度为 12 mm 的玄武岩纤维后,不同龄期低热水泥混凝土的劈拉强度显著提高。除 28 d 龄期外,其他龄期的劈拉强度均随纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势。3、7、14 d 龄期的低热水泥混凝土劈拉强度峰值均出现在玄武岩纤维掺量为 0.2% 时。龄期为 28 d 时,低热水泥混凝土劈拉强度随纤维掺量的增加持续增大,在纤维掺量超过 0.2% 后劈拉强度增大趋势有所减缓,最大劈拉强度为 3.58 MPa。由图 2(b)可知,当掺量为 0.2% 时,3、7、14 d 龄期低热水泥混凝土相对劈拉强度均达到峰值,与相同龄期下未掺入玄武岩纤维相比,低热水泥混凝土劈拉强度值分别增加了 20.16%、17.78%、13.79%。当掺量超过 0.2% 时,除 28 d 龄期外,其余各龄期混凝土的劈拉强度增长趋势均显著放缓。对 28 d 龄期的低热水泥混凝土而言,其劈拉强度随玄武岩纤维掺量的增加持续提升,且在玄武岩纤维掺量为 0.3% 时,低热水泥混凝土劈拉强度增幅最大,增幅为 23.84%。当玄武岩纤维长度为 12 mm,纤维掺量分别为 0.1%、0.2% 时,本研究中 28 d 龄期低热水泥混凝土劈拉强度值较同龄期末掺玄武岩纤维混凝土分别增加了

15.9%、22.8%。许泽宁等^[14]发现,相应条件下,28 d 龄期普通硅酸盐水泥混凝土劈拉强度增幅分别为 15.9%、2.5%。成涛华等^[16]发现,当玄武岩纤维长度为 12 mm,纤维掺量为 0%~0.2% 时,28 d 龄期普通硅酸盐水泥混凝土劈拉强度增幅为 5.4%~11.5%。由此可见,在玄武岩纤维长度为 12 mm,纤维掺量为 0.1%、0.2% 时,玄武岩纤维对低热水泥混凝土劈拉强度的提升效果优于普通硅酸盐水泥混凝土。

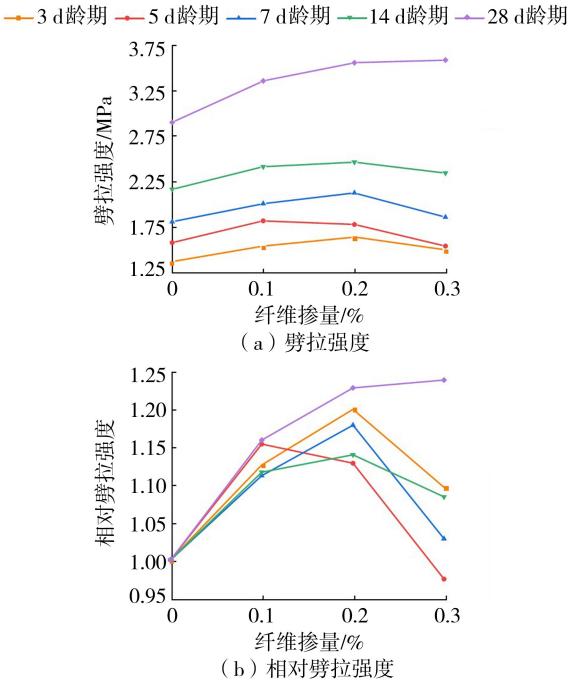


图2 12 mm 玄武岩纤维掺量对混凝土劈拉性能的影响

玄武岩纤维长度为 24 mm 时各龄期不同纤维掺量下玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度和相对劈拉强度变化曲线如图 3 所示。由图 3(a)可知,玄武岩纤维长度为 24 mm 时纤维对不同龄期低热水泥混凝土劈拉强度有一定改善效果,各龄期的劈拉强度均随纤维掺量呈先增大后减小的趋势。3、5、7、28 d 龄期低热水泥混凝土劈拉强度峰值均出现在纤维掺量为 0.2% 时。14 d 龄期低热水泥混凝土的劈拉强度峰值出现在纤维掺量为 0.1% 时,超过 0.1% 后劈拉强度开始降低。5 d 龄期混凝土在 0.3% 掺量下的劈拉强度稍低于同龄期末掺玄武岩纤维劈拉强度。由图 3(b)可知,玄武岩纤维长度为 24 mm 时各龄期低热水泥混凝土劈拉强度增幅的变化规律基本相似,增幅规律随纤维掺量先增后减。相较于同龄期不掺加玄武岩纤维的低热水泥混凝土对照组,3、5、7、14、28 d 龄期低热水泥混凝土劈拉强度最大增幅分别为 11.20%、6.18%、10.06%、13.51%、9.34%。当玄武岩纤维掺量为 0.3% 时,5 d 龄期低热水泥混凝土劈拉强度较同龄期末掺玄武岩纤维的低热水泥混凝土劈拉强度降低了 1.9%。当纤维掺量超过一

定范围后,劈拉强度提升效果降低,甚至低于对照组,表明掺入过多玄武岩纤维会对低热水泥混凝土劈拉强度造成不利影响。本研究中,当纤维长度为24 mm,纤维掺量分别为0.1%、0.2%时,28 d龄期低热水泥混凝土劈拉强度值较同龄期未掺玄武岩纤维混凝土分别增加了9%、9.34%。成涛华等^[16]研究发现,当纤维长度为24 mm,纤维掺量为0%~0.2%时,玄武岩纤维对28 d龄期普通硅酸盐水泥混凝土劈拉强度的最大增幅为5.4%。因此,当玄武岩纤维长度为24 mm时,纤维在掺量为0.1%、0.2%时对低热水泥混凝土劈拉强度的提升效果优于普通硅酸盐水泥混凝土。

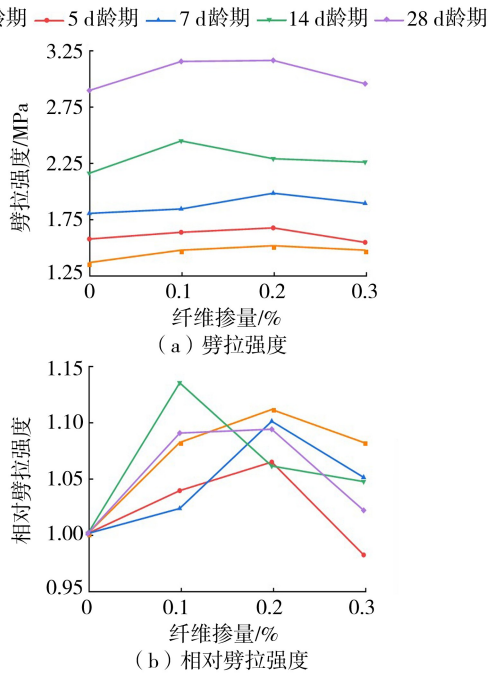


图3 24 mm玄武岩纤维掺量对混凝土劈拉性能的影响

2.2 龄期对混凝土劈拉强度的影响

定义劈拉强度比为不同纤维掺量下各龄期混凝土劈拉强度与未掺玄武岩纤维时28 d龄期混凝土劈拉强度的比值。图4为玄武岩纤维长度为12 mm和24 mm时不同纤维掺量下玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度比与龄期之间的关系曲线。由图4(a)可知,随着低热水泥混凝土龄期的增加,其劈拉强度比也逐渐提升。当玄武岩纤维长度为12 mm时,各龄期低热水泥混凝土的劈拉强度比与未掺玄武岩纤维对照组相比均有所提高,特别是当纤维掺量为0.2%时,各龄期混凝土的劈拉强度比均持平或高于其他掺量下同龄期劈拉强度比。例如,在28 d龄期下,当纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,其劈拉强度比与未掺玄武岩纤维对照组相比分别增加了16%、24%、24%。由试验数据内插可知,当纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,混凝土达

到28 d龄期劈拉强度所需的时间分别为21.2、19.6、20.2 d,相较于未掺玄武岩纤维对照组分别提前了6.8、8.4、7.8 d。同理,由图4(b)可得,当玄武岩纤维长度为24 mm时,低热水泥混凝土劈拉强度比与未掺玄武岩纤维对照组相比也有所提高。例如,在14 d龄期下,当纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,其劈拉强度比与未掺玄武岩纤维对照组相比分别增加了13%、4%、6%。当纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%时,混凝土达到28 d龄期劈拉强度所需的时间与未掺玄武岩纤维的对照组相比分别提前了5.2、4.3、1.1 d。总体而言,各掺量下纤维长度为12 mm的玄武岩纤维对不同龄期低热水泥混凝土劈拉强度提升效果优于长度为24 mm的玄武岩纤维。

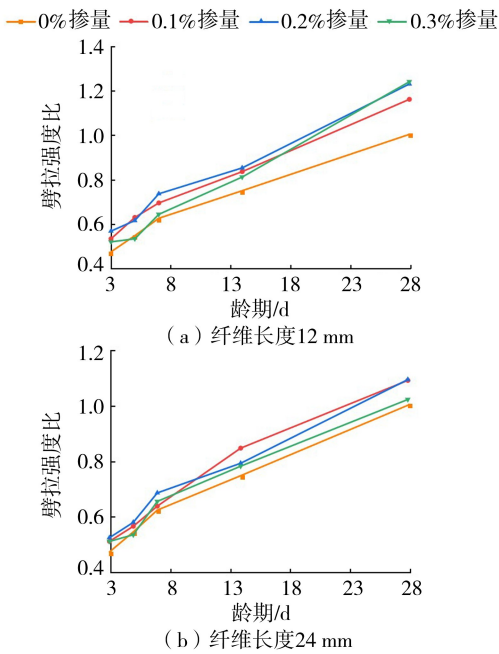


图4 不同玄武岩纤维长度下混凝土劈拉强度比与龄期的关系

2.3 混凝土劈拉破坏微观机理

在破坏截面中可观察到部分被拉断的玄武岩纤维,将部分含有玄武岩纤维的试件破坏面制作成观察样本,将样本标记后放置于奥斯维SZM-41型光学显微镜下观察其微观形态,玄武岩纤维低热水泥混凝土微观形态如图5所示。由图5可知,在适量掺入玄武岩纤维后,玄武岩纤维与水泥水化产物及骨料黏结情况良好,杂乱分布的玄武岩纤维与水化产物及骨料之间互相搭接,纤维之间无明显结团现象,有效提高了混凝土的密实性。玄武岩纤维能够在混凝土中起到桥接、承担荷载和传递应力的作用,同时,用于抵抗拉应力的纤维骨料界面增多,摩擦阻力增大,产生了更多的耗能途径。在进行混凝土劈拉试验时,由于玄武岩纤维与混凝土之间具有较强的黏结力,玄武岩纤维混凝土比素混凝土能够承受

更多的拉应力。在混凝土持续受拉部位产生微裂缝后,其内部的玄武岩纤维也发挥着对混凝土基体的增韧、阻裂作用,具有较大抗拉强度的玄武岩纤维可在裂缝的两端起到桥连作用,抑制裂缝的发展,在混凝土开裂后也不会迅速失稳破坏。但当纤维掺量超过一定范围后,玄武岩纤维难以均匀分布于混凝土基体中,过多的簇状纤维容易聚集,混凝土内部产生初始缺陷的可能性增大,形成较多的薄弱面^[19],致使玄武岩纤维掺量超过 0.2% 后低热水泥混凝土劈拉强度呈下降趋势。

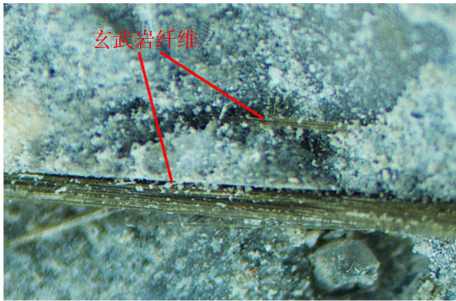


图 5 玄武岩纤维低热水泥混凝土微观形态

综合分析可知,在混凝土中掺入适量玄武岩纤维能有效改善其脆性,提高其延性,玄武岩纤维低热水泥混凝土的增强增韧机理主要依靠玄武岩纤维的断裂功和拔出功共同承担其耗能,改善和延缓了混凝土的脆性破坏状态。

2.4 早龄期混凝土劈拉强度的灰色关联分析

采用灰色关联分析法,以纤维掺量和纤维长度为影响因素,计算其与不同养护龄期劈拉强度的关联度,确定这两个因素对早龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度的影响强弱。

基于灰色加权关联度,对各评价对象进行排序,评价对象的关联次序。图 6 为纤维掺量及长度对早龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度的灰色关联度。由图 6 可知,与不同龄期劈拉强度的灰色关联度中,纤维掺量较大,纤维长度较小。随着养护龄期的增长,玄武岩纤维掺量的灰色关联度持续增大;而玄武岩纤维长度的灰色关联度虽在 7 d 至 14 d 龄期间略有波动,但整体仍呈现上升趋势。在采用玄武岩纤维增强低热水泥混凝土强度及韧性时,应重

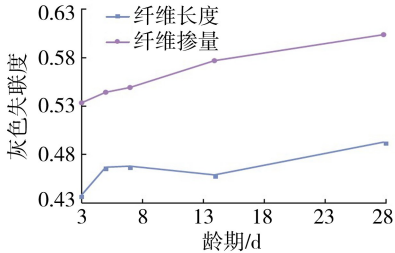


图 6 早龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度关联度

点考虑纤维掺量这一主要因素。

2.5 纤维增强指数对混凝土劈拉强度的影响

纤维增强指数(纤维掺量与长径比的乘积)对混凝土力学性能的提升有着显著影响^[20-22]。图 7 为纤维增强指数对不同龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度的影响。由图 7 可知,各龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度随纤维增强指数的增大呈先增大后减小的趋势,当纤维增强指数为 220 左右时劈拉强度达到峰值,此时 3、5、7、14、28 d 龄期低热水泥混凝土劈拉强度较同龄期纤维增强指数为 0 时分别提升了 20%、12.82%、17.88%、13.95%、22.84%。

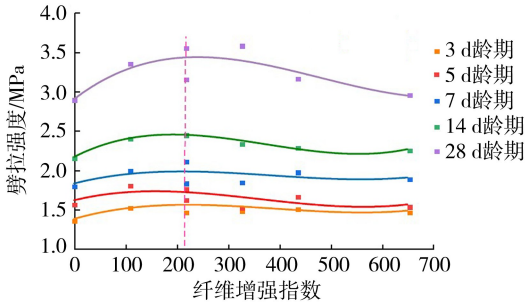


图 7 纤维增强指数与不同龄期玄武岩纤维低热水泥混凝土劈拉强度的关系

3 结 论

a. 玄武岩纤维能有效提升不同龄期低热水泥混凝土的劈拉强度。掺入纤维长度为 12mm 的玄武岩纤维后,在 3、5、7、14、28 d 龄期时低热水泥混凝土劈拉强度最大增幅分别为 20.16%、15.76%、17.78%、13.79%、23.84%;当纤维长度为 24 mm 时,低热水泥混凝土各龄期劈拉强度最大增幅为 11.20%、6.18%、10.06%、13.51%、9.34%。

b. 当玄武岩纤维长度为 12 mm,纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%时,混凝土达到 28 d 龄期劈拉强度所需时间较未掺玄武岩纤维对照组分别提前了 6.8、8.4、7.8 d。当玄武岩纤维长度为 24 mm,纤维掺量为 0.1%、0.2%、0.3%时,混凝土达到 28 d 龄期劈拉强度所需时间较未掺玄武岩纤维对照组分别提前了 5.2、4.3、1.1 d。玄武岩纤维的掺入能够有效解决低热水泥混凝土早龄期劈拉强度较低的问题。

c. 采用玄武岩纤维增强低热水泥混凝土劈拉强度时,纤维掺量为主要影响因素,纤维长度的影响次之,且当纤维增强指数为 220 左右时玄武岩纤维对混凝土劈拉强度提升最显著。本文研究条件下最优玄武岩纤维掺量为 0.2%,最优玄武岩纤维长度为 12 mm。

参考文献:

[1] 陈改新,刘艳霞,纪国晋,等. 低热硅酸盐水泥在水工混凝土中的应用研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021,52(12):191-200. (CHEN Gaixin, LIU Yanxia, JI Guojin, et al. Research on the application of low-heat Portland cement in hydraulic concretes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 191-200. (in Chinese))

[2] 吴航通,郭传科,徐建荣,等. 拱坝低热水泥混凝土抗裂效果仿真[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):76-80. (WU Hangtong, GUO Chuanke, XU Jianrong, et al. Simulation of crack resistance effect of low heat cement concrete for arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5): 76-80. (in Chinese))

[3] 胡昱,牛旭婧,杨宁,等. 低热水泥混凝土早期塑性开裂风险研究[J]. 混凝土,2021(3):19-22. (HU Yu, NIU Xujing, YANG Ning, et al. Study on the risk of early plastic cracking of low heat cement concrete [J]. Concrete, 2021(3): 19-22. (in Chinese))

[4] 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. (GUO Liping, CHEN Bo, YANG Yanan. Progress of PVA fibers research in improving crack resistance and toughness of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (6): 113-118. (in Chinese))

[5] PENG Shuai, WU Bo, DU Xiaoqing, et al. Study on dynamic splitting tensile mechanical properties and microscopic mechanism analysis of steel fiber reinforced concrete[J]. Structure,2023,58:105502.

[6] 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. (YIN Junhong, JI Yanchun, HE Zhongying, et al. Study on mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2023(1): 64-67. (in Chinese))

[7] WANG Huayi, HE Xiongjun, ZHOU Ming, et al. A study on the tensile fracture behavior of polypropylene fiber reinforced concrete based on a microscale model [J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135291.

[8] ZHANG Jiuchang, LI Baijie, CHEN Wenyu, et al. Experimental investigations on tensile strength and fracture toughness of a polyoxymethylene fiber reinforced concrete [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 130: 104250.

[9] 刘国豪,甘磊,刘玉,等. 不同砂率及骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的影响[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):39-44. (LIU Guohao, GAN Lei, LIU Yu, et al. Effects of different sand rates and aggregate sizes on fracture toughness of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 39-44. (in Chinese))

[10] 杨九光. 钢-聚甲醛混杂纤维混凝土的力学性能和韧性研究[J]. 混凝土与水泥制品,2024(2):56-60. (YANG Jiuguang. Study on mechanical properties and toughness of steel-polyoxymethylene hybrid fiber reinforced concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2024(2): 56-60. (in Chinese))

[11] 仲海民. 冻融条件下纤维混凝土的力学性能及损伤模型研究[J]. 功能材料,2024,55(2):2193-2200. (ZHONG Haimin. Study on mechanical properties and damage models of fiber reinforced concrete under freeze-thaw conditions [J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(2): 2193-2200. (in Chinese))

[12] 杨鑫,于奎,吉冯春,等. 玄武岩纤维混凝土研究现状[J]. 工程与建设,2023,37(6):1809-1811. (YANG Xin, YU Kui, JI Fengchun, et al. Current status of basalt fiber concrete research [J]. Engineering and Construction, 2023, 37(6): 1809-1811. (in Chinese))

[13] 郭少龙,鹿群,林永良,等. 冻融循环对玄武岩纤维水泥土力学性能的影响试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):36-43. (GUO Shaolong, LU Qun, LIN Yongliang, et al. Experiments on influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of basalt fiber cement soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 36-43. (in Chinese))

[14] 许泽宁,鲍犇,姚华彦,等. 玄武岩纤维对混凝土力学性能影响与增韧分析[J]. 金属矿山,2024(1):310-314. (XU Zening, BAO Ben, YAO Huayan, et al. Effect of basalt fiber on mechanical properties of concrete and toughening analysis [J]. Metal Mine, 2024(1): 310-314. (in Chinese))

[15] AL-ROUSAN E T, KHALID H R, RAHMAN M K. Fresh, mechanical, and durability properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC): a review [J]. Developments in the Built Environment, 2023, 14: 100155.

[16] 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):53-56. (CHENG Taohua, LI Yuxiang. Study on mechanical performance of basalt fiber reinforced concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2017(1): 53-56. (in Chinese))

[17] 王晓军. 混杂纤维大体积混凝土低水化热配合比试验与力学特性[J]. 混凝土,2021(3):149-152. (WANG Xiaojun. Mixing ratio experiment and mechanical properties of hybrid fiber bulk concrete hydration heat treatment [J]. Concrete, 2021 (3): 149-152. (in Chinese))

(下转第60页)

- [14] WANG Shaowei, GAO Wenlong, ZHU Pinghua, et al. Leaching-induced deterioration of shear bonding strength and micro-Vickers hardness of the ITZ modified by micro-SiO₂ and nano-SiO₂[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92;109760.
- [15] GRATTAN-BELLEW P E. Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(1): 3-16.
- [16] 徐港, 龚朝, 刘俊, 等. 混凝土抗水冻融和抗盐冻融循环作用的相关性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 552-556. (XU Gang, GONG Chao, LIU Jun, et al. Correlation between water freeze-thaw resistance and salt freeze-thaw resistance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 552-556. (in Chinese))
- [17] GAN Lei, XU Weichao, SHEN Zhenzhong, et al. Experimental and numerical investigations on damage evolution of concrete under sulfate attack and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71: 106469.
- [18] WANG Boxin, PAN Jingjing, FANG Ruichang, et al. Damage model of concrete subjected to coupling chemical attacks and freeze-thaw cycles in saline soil area[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242:118205.
- [19] 甘磊, 刘源, 沈振中, 等. 硫酸盐侵蚀和冻融循环作用下混凝土损伤演化规律[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 134-141. (GAN Lei, LIU Yuan, SHEN Zhenzhong, et al. Damage evolution law of concrete under sulfate attack and freeze-thaw cycle[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 134-141. (in Chinese))
- [20] LIU Lin, WANG Xuecheng, ZHOU Jian, et al. Investigation of pore structure and mechanical property of cement paste subjected to the coupled action of freezing/thawing and calcium leaching[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 109:133-146.
- [21] 王少伟, 肖焰钰, 徐应莉, 等. 化学浸泡法对水泥基材料钙溶蚀的加速效应[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 403-412. (WANG Shaowei, XIAO Yanyu, XU Yingli, et al. Acceleration effect of chemical solution immersion on calcium leaching of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2): 403-412. (in Chinese))
- [22] WAN Keshu, LI Lin, SUN Wei. Solid-liquid equilibrium curve of calcium in 6 mol/L ammonium nitrate solution[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53:44-50.
- [23] SCRIVENER K L, BENTUR A, PRATT P L. Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes[J]. Advances in Cement Research, 1988, 1(4): 230-237.
- [24] LIU Fang, TANG Ran, MA Weiwei, et al. Analysis on frost resistance and pore structure of phase change concrete modified by Nano-SiO₂ under freeze-thaw cycles[J]. Measurement, 2024, 230:114524.
- [25] XIE Ruifeng, YANG Jianlin, XIE Enpu. Investigation on mechanical properties deterioration of concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 22612.
- [26] WU Kai, SHI Huisheng, XU Linglin, et al. Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79:243-256.

(收稿日期:2024-11-06 编辑:俞云利)

(上接第 52 页)

- [18] 陈晓明, 张国辉, 孙俊崇, 等. 玄武岩纤维对不同龄期低热水泥混凝土强度影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(3): 112-117. (CHEN Xiaoming, ZHANG Guohui, SUN Junchong, et al. Experimental study on the influence of basalt fiber on the strength of low heat cement concrete at different ages[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(3): 112-117. (in Chinese))
- [19] 郭耀东, 刘元珍, 王文婧, 等. 玄武岩纤维特征参数对混凝土单轴受拉性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2897-2912. (GUO Yaodong, LIU Yuanzhen, WANG Wenjing, et al. Influence of basalt fiber characteristic parameters on uniaxial tensile properties of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2897-2912. (in Chinese))
- [20] 李黎, 委玉杰, 李宗利, 等. 基于纤维增强指数的碱激发砂浆物理力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2212-2220. (LI Li, WEI Yujie, LI Zongli, et al. Properties of alkali activated mortar fresh and hardened properties based on fiber reinforced index[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(8): 2212-2220. (in Chinese))
- [21] 吴小波. 玄武岩纤维复合材料波纹板力学性能及其套衬结构性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 87-94. (WU Xiaobo. Mechanical properties of basalt fiber composite corrugated plates and analysis of their lining structure performance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 87-94. (in Chinese))
- [22] 张紫键, 姚占全, 马快乐. 钢纤维类型对玄武岩纤维混凝土力学性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 598-604. (ZHANG Zijian, YAO Zhanquan, MA Kuaile. Influence of steel fiber type on mechanical properties of basalt fiber concrete[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(6): 598-604. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-05 编辑:俞云利)