

玄武岩纤维改性混凝土力学性能试验研究

张敏 覃曦 陈奕阳 郑洪祥 姜力琪 曾智超

成都工业学院土木工程系, 四川 成都 611730

[摘要]为系统剖析玄武岩纤维掺量变化对混凝土力学性能及施工工作性能的作用机制,本研究以玄武岩纤维掺量(0、1kg/m³、2kg/m³、2.5kg/m³、5kg/m³)作为核心变量参数,开展标准立方体抗压强度试验与劈裂抗拉强度试验。试验数据表明,当纤维掺量处于合理范围时,混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现显著提升趋势,且存在最优掺量。当6mm短切玄武岩纤维掺量为2kg/m³时,C40混凝土立方体抗压强度比未掺入玄武岩纤维时提高7.4%,掺量为2.5kg/m³时,劈裂抗拉强度比未掺入玄武岩纤维时提高22.6%,此时混凝土力学性能提升效果最佳。工作性能测试显示,混凝土坍落度随纤维掺量增加呈线性下降趋势,2kg/m³掺量时坍落度较基准组降低14mm,但黏聚性与保水性显著改善。研究结果为玄武岩纤维在混凝土工程中的应用提供参考。

[关键词]玄武岩纤维;改性混凝土;抗压强度;劈裂抗拉强度

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16623

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Modified Concrete

ZHANG Min, QIN Xi, CHEN Yiyang, ZHENG Hongxiang, JIANG Liqi, ZENG Zhichao

Department of Civil Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract: In order to systematically analyze the mechanism of the effect of changes in basalt fiber content on the mechanical and construction performance of concrete, this study conducted standard cube compressive strength tests and splitting tensile strength tests using basalt fiber content (0, 1kg/m³, 2kg/m³, 2.5kg/m³, 5kg/m³) as the core variable parameters. Experimental data shows that when the fiber content is within a reasonable range, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete show a significant increase trend, and there is an optimal content. When the content of 6mm short cut basalt fiber is 2kg/m³, the compressive strength of C40 concrete cubes is increased by 7.4% compared to the absence of basalt fiber. When the content is 2.5kg/m³, the splitting tensile strength is increased by 22.6% compared to the absence of basalt fiber. At this time, the improvement effect of concrete mechanical properties is the best. Performance tests show that the slump of concrete decreases linearly with the increase of fiber content. At a dosage of 2kg/m³, the slump decreases by 14mm compared to the benchmark group, but the cohesiveness and water retention are significantly improved. The research results provide reference for the application of basalt fiber in concrete engineering.

Keywords: basalt fiber; modified concrete; compressive strength; splitting tensile strength

引言

水泥基材料凭借其抗压强度高、结构刚度大、耐久性优异及经济性良好等综合优势,在交通、建筑、水利等基础设施建设领域得到广泛应用。随着城市化进程的加快与工程建设标准的提升,现代工程对混凝土材料的性能提出了多维度优化需求。尽管普通水泥混凝土具备良好的工程适用性,但其自身存在抗拉强度不足、抗折性能较弱、韧性欠佳及脆性较大等固有缺陷,这些性能短板在一定程度上制约了其在复杂受力环境、高耐久性要求工程中的推广应用。

针对混凝土抗拉、抗折强度不足及韧性缺陷等技术难题,纤维增强技术成为改善其性能的重要途径。国内外研究表明,在混凝土基体中掺入纤维可通过桥接裂缝、阻碍裂纹扩展等机制,使材料抗裂性能提升,冲击韧性提高等。当前工程中常用的纤维类型存在显著局限性。玻璃纤维因与水泥基材料的物理化学属性差异显著,导致界面相容性不佳^[1];碳纤维虽具备优异力学性能,但生产成本高且在

混凝土基体中分散性较差^[2];钢纤维与聚丙烯纤维则存在耐腐蚀性不足的问题,影响其长期阻裂性能的稳定发挥^[3]。相较而言,玄武岩纤维作为天然矿物纤维,以天然玄武岩为原料经高温熔融拉丝制备,兼具高强度、耐酸碱侵蚀、低吸湿性、化学稳定性好及经济性优势。该纤维与水泥基体具有良好的相容性,且线膨胀系数、弹性模量等物理参数与水泥基材料匹配度高,掺入混凝土后可实现与基体的协同变形,有效提升材料的强度及韧性^[4-8]。

本研究针对短切玄武岩纤维改性混凝土的力学性能,通过系统试验研究,揭示玄武岩纤维掺量对混凝土力学性能(抗压、劈裂抗拉强度)及工作性能(坍落度)的影响规律。研究成果将为玄武岩纤维混凝土工程中的应用提供参考依据。

1 实验方案设计

1.1 原材料

(1) 胶凝材料

试验选用P.O42.5普通硅酸盐水泥作为主要胶凝材料,

经检测，其物理性能指标满足。

(2) 骨料

粗骨料采用 5~20mm 连续级配碎石，细骨料选用细度模数 2.7 的天然河砂。

(3) 减水剂

减水剂采用高效聚羧酸减水剂，减水率为 25%，掺量为胶凝材料质量的 1%。

(4) 玄武岩纤维

玄武岩纤维：外观都色泽均匀，表面无污染，尖端不燃烧明火团，玄武岩纤维如图 1 所示。试验中采用原丝直径为 17 μ m，长度为 6mm 的玄武岩纤维。其核心物理力学性能参数详见表 1 所示。



图 1 6mm 玄武岩纤维

表 1 玄武岩纤维物理性能

纤维类型	比重 (g/cm ³)	单丝直径 (μ m)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (Gma)
玄武岩纤维	2.65	17	1100	7.6

1.2 配合比设计

本实验采用长度为 6mm 的玄武岩纤维进行外掺，按（外掺入）质量掺量 1kg/m³、2kg/m³、2.5kg/m³、5kg/m³ 掺入 C40 混凝土中，系统分析混凝土力学性能演变规律，建立纤维掺量-力学性能关联模型，探究玄武岩纤维最佳掺量。并设置基准组作为空白对照，不同纤维掺量下混凝土配合比设计详见表 2。

表 2 玄武岩纤维混凝土配合比设计（干砂和干石）

组号	水泥 kg/m ³	砂 kg/m ³	碎石 kg/m ³	水 kg/m ³	玄武岩纤维掺量 kg/m ³
L0-0	432	680	1290	185	0
L6-1	432	680	1290	185	1
L6-2	432	680	1290	185	2
L6-2.5	432	680	1290	185	2.5
L6-5	432	680	1290	185	5

1.3 试件制备

为确保短切玄武岩纤维在混凝土基体中均匀分布，采用强制式搅拌机（转速 $\geq$ 150r/min）实施搅拌工艺，通过机械剪切力有效破除纤维结团现象。试件成型前，试模内

壁均匀涂刷一层薄型脱模剂，确保后续脱模完整性。具体制备工序如下：

骨料与胶凝材料预混：首先将砂石骨料与水泥投入搅拌机，干拌 60s 至物料混合均匀，形成初步骨架结构。

纤维分散工艺：在搅拌机运行状态下，通过投料口均匀撒布短切玄武岩纤维，持续搅拌 60s，利用骨料摩擦作用实现纤维单丝分离，避免团聚。

液相组分分批加入：先注入设计用水量的 90%与减水剂，搅拌 60s 至浆体充分包裹骨料；再补加剩余 10%水量，继续搅拌 60s，确保水胶比精准控制与外加剂均匀分散。

拌合完成后，测定新拌混凝土的坍落度，将新拌混凝土装入标准立方体试模，置于振实台上，振动密实，制成试样，24h 后，拆卸模具，移入标准养护箱养护至 28d 龄期后开展力学性能测试，实验加载方式参照文献 8。

为表征玄武岩纤维增强混凝土关键力学参数，依据 GB/T50081-2019 标准，制备 30 个标准立方体（150mm $\times$ 150mm $\times$ 150mm）试件（3 个/组），养护 28d 后分别开展抗压强度（15 个）与劈裂抗拉强度（15 个）测试。

2 实验结果分析

2.1 玄武岩纤维掺量对混凝土工作性能的影响

基于 6mm 玄武岩纤维 1-5kg/m³ 梯度掺量试验组与基准组对比，系统研究玄武岩纤维混凝土坍落度演变特性。

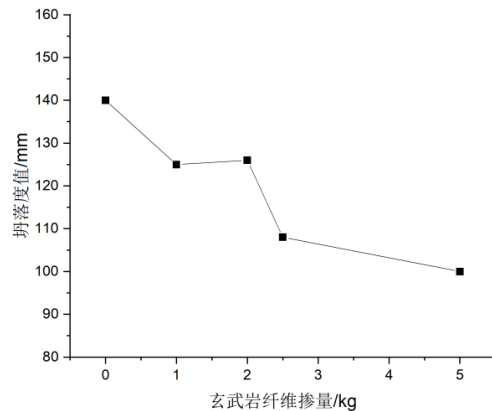


图 2 纤维掺量与坍落度关系曲线

从图 2 可知，新拌混凝土坍落度与纤维掺量整体呈逐渐降低趋势。当玄武岩纤维掺量达到 2kg/m³ 时会出现一个拐点，此时新拌混凝土坍落度相较于普通混凝土降低了 14mm，但黏聚性与保水性显著改善。当玄武岩纤维掺量继续增加时，坍落度值会明显下降，流动性显著降低。

2.2 玄武岩纤维掺量对混凝土力学性能的影响

2.2.1 掺量对混凝土抗压强度的影响

基于对 6mm 玄武岩纤维掺量 0、1kg/m³、2kg/m³、2.5kg/m³、5kg/m³ 时的玄武岩纤维混凝土 28d 龄期试件抗压强度对比分析，揭示纤维掺量对混凝土抗压性能的影响规律。

图 3 可以看出，随着玄武岩纤维掺量的增加，C40 混

凝土抗压强度整体表现出先提升后下降的变化规律。当纤维掺量达到 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土基体内部纤维与胶凝材料的界面黏结作用达到最佳协同状态,此时抗压强度达到峰值,较基准组提升幅度最为显著。若继续增大纤维掺量,由于纤维在基体中分散均匀性下降,导致内部缺陷增多,抗压强度开始呈现递减趋势。当掺量增至 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土立方体抗压强度实测值已低于基准组,表明过量纤维掺入对混凝土基体密实度产生不利影响。

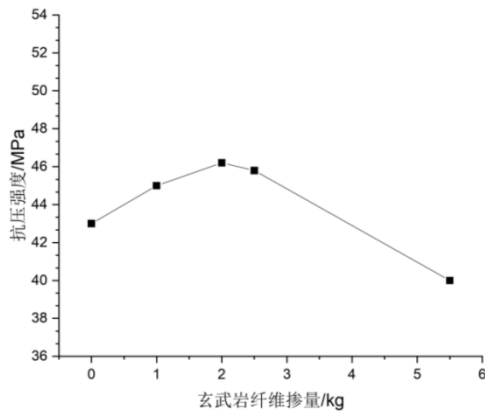


图3 纤维掺量对抗压强度的影响

当C40混凝土中掺入 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 的6mm短切玄武岩纤维时,其立方体抗压强度较基准组提升7.4%。该增强效应源于纤维与骨料的协同受力机制。在外荷载作用下,各向分布的纤维通过拉拔、断裂及变形等物理行为消耗能量,有效分担基体应力并抑制微裂纹扩展。纤维的桥接作用增强了水泥基与骨料界面过渡区的整体性,使混凝土破坏过程从脆性断裂转变为延性损伤,从而提升抗压强度。当纤维掺量增至 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,抗压强度反而低于普通混凝土,由于纤维分散性能的劣化,过量纤维在拌合过程中易形成团聚体,导致基体内部出现界面缺陷与薄弱区域。纤维团聚体不仅降低了纤维与水泥石的有效黏结面积,还破坏了混凝土密实结构,未分散的纤维束阻碍水泥浆体包裹,形成孔隙率增加的薄弱界面过渡区。此时,纤维的增强效应被界面黏结失效与基体密实度下降所抵消,甚至引发应力集中现象,最终导致抗压强度降低。

结果表明,玄武岩纤维对混凝土抗压强度的影响存在临界掺量,低掺量时通过耗能机制与界面增强提升强度,高掺量时因分散性恶化与结构缺陷导致强度劣化。实际工程中需通过控制纤维掺量及优化搅拌工艺,平衡纤维增强效应与基体密实性要求。

2.2.2 掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响

基于对6mm玄武岩纤维掺量 0 、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时的玄武岩纤维混凝土28d龄期试件劈裂抗拉强度对比分析,揭示玄武岩纤维掺量对混凝土抗拉性能的影响规律。

图4可以看出,随着玄武岩纤维掺量的逐步增加,混

凝土基体的抗拉性能呈现显著的非线性响应特征:其强度指标在纤维掺量增长初期呈持续上升趋势,达到峰值后随掺量进一步增加转而进入下降阶段。当玄武岩纤维掺量达到 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,C40混凝土抗拉力学性能得到最大幅度提升,劈裂抗拉强度达到最高,继续增加玄武岩纤维的掺量时,玄武岩纤维混凝土的抗拉强度开始降低。掺量达到 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土劈裂抗拉强度低于普通混凝土,混凝土的抗拉力学性能对比 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 玄武岩纤维掺量时大幅下降,其综合性能最差。

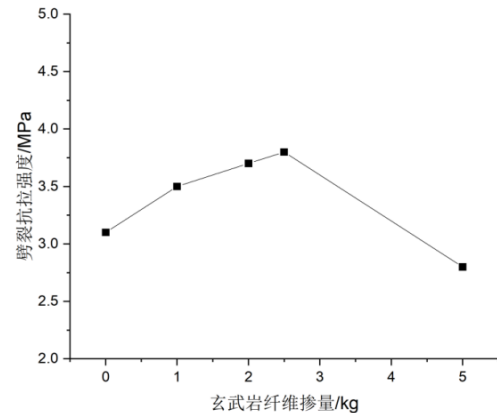


图4 纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

当C40混凝土中掺入 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的6mm短切玄武岩纤维时,其劈裂抗拉强度较基准组提升22.6%。这一增强效应源于纤维在拉应力状态下的梯度受力机制。加载初期,试件拉应变较小,应力主要由水泥基体承担,纤维尚未充分发挥作用;随着荷载增加,基体因抗拉强度不足产生微裂纹,此时各向分布的纤维开始发挥桥联效应,通过横跨裂缝两侧的物理连接约束基体变形,将部分拉应力转移至纤维-基体界面。这种应力重分布机制有效延缓了裂缝扩展,使荷载得以通过纤维的拉伸变形持续传递,避免了应力在裂缝端的集中。纤维的桥联作用不仅增强了界面过渡区的黏结强度,还通过消耗断裂能改变了混凝土的破坏模式,从而显著提升劈裂抗拉性能。

当纤维掺量增至 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时,劈裂抗拉强度骤降至基准组以下,主要受两方面因素影响:其一,玄武岩纤维的柔性特征使其在高掺量下易发生团聚,未分散的纤维束在基体中形成弱界面层,这些层状结构不仅无法有效传递荷载,反而成为新的裂纹易生点,导致纤维过早失效;其二,过量纤维在搅拌过程中因机械剪切作用发生断裂或缠绕,同时搅拌机高速运转导致纤维抛洒,造成基体含气量升高。由此形成的内部空洞削弱了纤维与水泥石的有效黏结面积,降低了基体密实度,使得纤维增强效应被界面缺陷与结构疏松所抵消。

实验结果表明,玄武岩纤维对混凝土抗拉性能的提升存在显著的掺量阈值,适宜掺量下通过桥联效应抑制裂纹扩展,过量掺量则因分散性恶化和基体缺陷导致性能劣化。实际工程中需结合纤维长径比、搅拌工艺及基体配合比,

将玄武岩纤维掺量控制在 5kg/m^3 以内,以平衡纤维分散性与界面黏结强度。

3 结论

通过在普通混凝土中掺入长度 6mm 的短切玄武岩纤维,开展玄武岩纤维掺量 (0 、 1kg/m^3 、 2kg/m^3 、 2.5kg/m^3 、 5kg/m^3) 对混凝土力学性能和工作性能影响的试验研究,对试验现象及实验结果对比分析,得到以下结论:

(1)玄武岩纤维的掺入能够改善混凝土的工作性能,玄武岩纤维掺量较少时,对混凝土的坍落度和扩展度影响较小,掺量达到 2kg/m^3 时会出现一个拐点,此时的坍落度比普通混凝土降低了 14mm。当玄武岩纤维掺量继续增加时,坍落度会明显下降,混凝土流动性减弱。

(2)随着玄武岩纤维掺量的递增,混凝土基体抗压性能呈现先增长后衰减的非线性变化趋势。当纤维掺量增至 2kg/m^3 时,纤维与水泥石的界面黏结作用达到最佳协同状态,此时立方体抗压强度达到峰值,较基准组提升幅度最为显著,提高 7.4%,掺量达到 5kg/m^3 时,混凝土立方体抗压强度低于基准组。

(3)随玄武岩纤维掺量的逐步递增,混凝土基体的抗拉性能呈现先增强后减弱的非线性演化规律。当纤维掺量达到 2.5kg/m^3 时,纤维在水泥石基体中的桥接效应与界面黏结性能达到最佳耦合状态,此时劈裂抗拉强度值达到峰值,较基准组提升 22.6%,掺量达到 5kg/m^3 时,混凝土劈裂抗拉强度低于基准组。

玄武岩纤维对混凝土抗压和抗拉性能的提升存在显著的掺量阈值,当玄武岩纤维质量掺量达 2kg/m^3 时,混

凝土抗压强度达到最大,质量掺量达 2.5kg/m^3 时,混凝土劈裂抗拉强度达到最大值。合理选择玄武岩纤维掺量,应综合考虑其对混凝土力学性能及工作性能的影响。

【参考文献】

- [1]MADHKHAN M, KATIRAI R. Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials,2019,11(225):146-158.
- [2]尚国秀.碳纤维水泥基复合材料纤维分散性及导电性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2015.
- [3]IQBAL S, ALI I, ROOM S, et al. Enhanced mechanical properties of fiber reinforced concrete using closed steel fibers[J]. Materials and Structures,2019,52(3):1-10.
- [4]李晓路,金宝宏,姚宇峰,等.玄武岩纤维再生混凝土的基本力学性能 [J]. 河北大学学报(自然科学版),2017,37(3):225-230.
- [5]覃书豪.新型玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[D].贵州:贵州大学,2022.
- [6]高真,曹鹏,孙新建,等.玄武岩纤维混凝土抗压强度分析与微观表征[J].水力发电学报,2018,37(8):111-120.
- [7]余彦锋.玄武岩纤维混凝土力学性能及抗渗性研究[J].科学技术创新,2021,11(25):135-138.
- [8]张延年,卢禹先,王广林,等.短切玄武岩纤维对混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2024,11(3):82-86.

作者简介:张敏(1986.6—),西南交通大学,岩土工程,成都工业学院,专任教师,副教授。