

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.21

深埋水工隧洞衬砌纤维混凝土力学特性研究

邓志云^{1,2,3}, 林鹏^{2,3}, 周昊⁴, 夏勇^{5,6}, 杜立兵⁷

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学 水利系, 北京 100084;
3. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213; 4. 天津华能杨柳青热电有限责任公司, 天津 300380;
5. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072; 6. 西藏自治区水风光储能源技术创新中心,
成都 610072; 7. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘要:为解决高海拔深埋水工隧洞衬砌结构频繁开裂导致的结构劣化难题, 研究采用掺加纤维方式提升混凝土的力学特性, 并提出最优纤维掺量。首先开展了不同掺量玄武岩纤维混凝土(BFRC)拉伸、压缩及弯曲力学特性试验, 获得了不同体积纤维掺量条件下混凝土拉伸、压缩及弯曲力学特性变化规律; 然后, 建立了能真实反映骨料形态、级配、长短轴比及纤维分布、初始缺陷等细观结构因素的纤维混凝土细观数值模型, 通过细观数值模型和室内轴拉试验结果对比验证, 揭示了纤维增强混凝土受拉强度的作用机理; 最后, 分析了纤维最优掺量。结果表明: 与素混凝土相比, 0.2%纤维体积掺量为最优纤维含量, BFRC的轴拉强度、劈拉强度和弯曲强度分别提高了12.81%、14.79%和21.26%。本文建立的纤维混凝土细观数值模型素(纤维)混凝土抗拉强度与室内试验素(纤维)混凝土抗拉强度误差分别为4.24%(5.26%), 且可较为真实反映纤维混凝土试件的破坏发展过程和宏观力学行为。研究成果可为玄武岩纤维混凝土结构设计与工程应用提供借鉴与参考。

关键词: 水工隧洞; 纤维混凝土; 力学特性; 室内试验; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0592-11

Study on the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Linings for Deep Hydraulic Tunnels

Deng Zhiyun^{1,2,3}, Lin Peng^{2,3}, Zhou Hao⁴, Xia Yong^{5,6}, Du Libing⁷

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, P. R. China; 4. Tianjin Huaneng Yangliuqing Co-Generation Limited Liability Company, Tianjin 300380, P. R. China; 5. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, P. R. China; 6. Technological Innovation Center of Hydropower, Wind, Solar and Energy Storage of Tibet Autonomous Region, Chengdu 610072, P. R. China; 7. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China)

Abstract: To address the challenge of structural deterioration caused by frequent cracking in the lining structures of deep-buried hydraulic tunnels in high-altitude areas, the enhancement of concrete's mechanical properties is investigated through the addition of fibers and determines the optimal fiber content for practical engineering

收稿日期: 2025-06-03 (修改稿)

作者简介: 邓志云(1990—), 男, 湖北天门人, 博士, 主要从事岩石力学、水工结构及隧道与地下工程安全稳定性研究。E-mail: zydeng@bjtu.edu.cn

通讯作者: 林鹏(1972—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 主要从事水工结构、智能建造方面的研究。E-mail: celinpe@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(12102230); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ21-H74); 西藏自治区清洁能源科技重大专项(XZ202201ZD0003G); 陕西省科技计划项目(2023-YBGY-278)

application. Firstly, tests on the tensile, compressive, and flexural mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC) with varying fiber contents were conducted, the variation patterns of concrete's tensile, compressive, and flexural mechanical properties under different volumetric fiber contents were obtained. Subsequently, a mesoscopic numerical model of fiber-reinforced concrete that truly reflects the microstructural factors such as aggregate shape, gradation, aspect ratio, fiber distribution, and initial defects was established. By comparing the mesoscopic numerical model with indoor axial tension test results, the mechanism of fiber reinforcement on the tensile strength of concrete was revealed. Finally, the optimal fiber content was analyzed. The results indicate that: Compared to the plain concrete, a fiber volume content of 0.2% is optimal, with the axial tensile strength, split tensile strength, and flexural strength of BFRC increased by 12.81%, 14.79%, and 21.26%, respectively. The error between the tensile strength of the fiber concrete predicted by the established mesoscopic numerical model and the indoor test results for plain (fiber) concrete is 4.24% (5.26%), and the model can accurately reflect the failure development process and macroscopic mechanical behavior of fiber-reinforced concrete specimens. The findings of this study can provide a reference for the design and application of basalt fiber-reinforced concrete structures.

Keywords: hydraulic tunnels; fiber-reinforced concrete; mechanical property; laboratory test; numerical simulation

0 引言

作为大型水电工程核心枢纽建筑物,水工隧洞承担着输水、泄水以及导流等多项关键职能,施工期、运行期安全稳定要求极高^[1-4]。我国西南高海拔区域水工隧洞面临复杂水岩荷载环境及内部运行环境等长期交互耦合作用^[5-6],隧洞结构性能会持续渐进性地发生损伤、劣化和性能衰退,导致隧洞不同程度地出现渗漏^[7-9];部分隧洞衬砌裂缝显著,造成严重渗水和坍塌^[10]。现有研究表明在混凝土中掺入纤维能有效减少混凝土开裂^[11-12],而玄武岩纤维以其显著的力学特性被明确纳入我国“十三五”规划中战略性新兴产业的重点发展产品目录,成为混凝土结构材料改性的理想选择。该材料作为混凝土结构改性的优选方案,其应用不仅能显著增强混凝土的抗裂能力,同时促进了固体废弃物的资源化处理,这与我国推崇的绿色可持续发展战略不谋而合。

在玄武岩纤维混凝土(BFRC)力学特性研究方面,Ayub等^[13]发现BFRC的抗压强度相比于普通混凝土最大提升24%。Algin等^[14]发现BFRC的劈裂抗拉强度相较于传统混凝土提升了15%,Guo等^[15]发现BFRC的抗压强度随着玄武岩纤维含量的增加呈现出先增后减趋势,且0.15%纤维体积掺量时抗压强度最大。室内试验方法,在试验条件、时间消耗、方法和准确性方面存在一定的局限性。采用数值模拟可有效克服这些限制,能建立混凝土宏观性能与其微观结构的关联性,有利于揭示纤维增强混凝土材料力学特性的作用机理。Mazzucco等^[16]建立了聚丙烯纤维混凝土

(PFRC)三维细观模型,但是模型并未考虑混凝土真实骨料形态和缺陷等因素。李革等^[17]建立了PFRC二维计算模型,该模型考虑了粗骨料、砂浆、骨料界面层和纤维,但模型并未考虑混凝土真实骨料形态和缺陷等因素。赵秋山等^[18]建立的有限元模型中并未考虑实际骨料形态,混凝土基体同样被视为均质材料,且仅考虑了一种类型的钢纤维。Sun等^[19]采用多尺度模拟技术研究了玄武岩纤维长度与含量对混凝土力学特性的影响,该模型同样未考虑混凝土真实骨料形态和缺陷等因素。Gao等^[20]建立了纤维混凝土弹塑性细观模型,但该模型将混凝土基体看作均质材料。可见,当前纤维混凝土细观建模方法常常忽略了混凝土中实际骨料的形态,将混凝土视为均质材料,或是多将块石考虑为简单球形、多边形,或只考虑单纤维与初始缺陷对纤维混凝土细观结构的影响^[21-22]。无法准确反映实际纤维混凝土内部复杂的骨料形态、级配、长短轴比,不同纤维长度组合、含量,以及纤维混凝土初始缺陷等细观结构因素,从而无法建立贴合真实纤维混凝土细观结构的模型。Naderi等^[23]及邹德高等^[24]指出骨料的外形特征对于混凝土的力学性能具有显著的影响。可见,忽略骨料的真实形态会导致数值模拟无法反映纤维混凝土试件的真正破坏发展过程和宏观力学行为^[25-26]。

因此,本文拟通过室内试验研究不同体积纤维掺量条件下混凝土拉伸、压缩及弯曲力学特性变化规律,建立可以考虑复杂块石形态、纤维掺量配比、砂浆胶结性能、界面层参数以及初始空隙缺陷的精细二维纤维混凝土模型,并采用室内轴心拉伸试验的结果对其进行对比验证。在此基础上,进一步分

析纤维最优掺量,提出纤维混凝土的轴压(拉)曲线拟合参数,为高海拔区深埋水工隧洞玄武岩纤维混凝土衬砌结构设计及工程应用提供一定理论依据和实践指导。

1 室内试验结果与分析

1.1 试验方案

1.1.1 试验材料

粗、细骨料均来源于高海拔区域工程探洞开采原材料,采用片麻岩作为原材料进行破碎和筛分处理。片麻岩的物理性质如下:天然密度范围为 $2.72\sim 2.75\text{ g/cm}^3$,干密度 $2.71\sim 2.74\text{ g/cm}^3$ 。经过破碎和筛分工艺,得到 $10\sim 20\text{ mm}$ 和 $5\sim 10\text{ mm}$ 粒径粗骨料。粗骨料堆积密度为 2.10 g/cm^3 、细骨料为中砂,堆积密度为 1.59 g/cm^3 。水泥为P.032.5等级普通硅酸盐水泥。采用西安热工院研发的短切玄武岩纤维,该纤维在室内试验中的长度约为 12 mm ,主要参数见表1。

表1 短切玄武岩纤维主要参数

Table 1 Main parameters of short chopped basalt fiber

参数	直径 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	容重 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	断裂延 伸率/%
值	0.013	3300~4500	95~115	2650	3.2

1.1.2 配合比设计

表2为采用的混凝土基体配合比。纤维的体积掺量分别设定为 0.0% 、 0.1% 、 0.2% 、 0.3% 、 0.4% 以及 0.5% ,共计形成了6组不同的试验配合比,采用“BX”进行分组编号,其中B代表玄武岩纤维,X代表纤维体积掺量(%),例如“B0.2”代表纤维体积掺量为 0.2% 的纤维混凝土。

表2 C30混凝土设计配合比

Table 2 Design mix proportions of C30 concrete

原材料	水泥	粗骨料		细骨料	水	减水剂
		($10\sim 20\text{ mm}$)	($5\sim 10\text{ mm}$)			
含量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	375	562.5	562.5	849	150	3.75

1.1.3 试验设计与方法

本研究设计了棱柱体、立方体轴压试验,轴拉试验、劈拉试验以及四点弯曲试验,轴拉试件尺寸为 $300\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,劈拉试件为边长 100 mm 的立方体;棱柱体轴压试件尺寸为 $300\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,立方体轴压试件为边长 150 mm 的立方体;四点弯曲试验试件尺寸为

$300\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。每组试验包含3个试样,试件均养护 28 d 后进行试验。单轴拉伸试验通过在棱柱试件内部预留钢筋的方法进行,使用MTS810液压伺服材料试验机执行试验。试件的轴向变形通过两个引伸计的测量结果平均值来确定。试验以 0.1 mm/min 的加载速率进行,直至试件破坏。劈裂抗拉试验采用INSTRON8506试验系统,加载速率 0.08 mm/min ,持续加载至试件破坏。对于棱柱体试件单轴压缩试验,同样采用INSTRON8506试验系统,预压值设定为 60 kN ,随后以 0.1 mm/min 的速率进行加载,直至试件破碎。立方体试件单轴压缩试验预压值同样设定为 60 kN ,加载速率为 0.6 MPa/s ,直至试件破坏。四点弯曲试验用于评估混凝土的抗弯性能,使用Toni折压一体试验机,加载速率 0.1 mm/min ,持续加载直至试件裂缝扩展贯通整个截面。

1.2 室内试验结果

1.2.1 抗压强度试验

纤维混凝土轴心抗压强度 f_c 与立方体抗压强度 f_{cu} 分别如图1(a)、(b)所示。

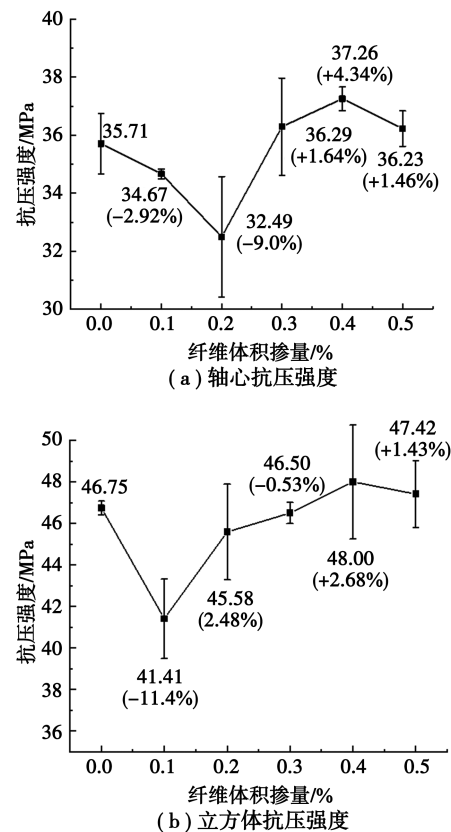


图1 抗压试验结果

Fig. 1 Compression test results

相较于素混凝土(B0.0)轴心抗压强度,体积率 $0.1\%\sim 0.5\%$ 的玄武岩纤维混凝土试件轴心抗压强度分别提升了 -2.92% 、 -9.00% 、 1.64% 、

4.34%及1.46%,随着纤维掺量的增加, f_c 值总体呈现出先降低、随后上升、最终再次下降的变化趋势。类似地,随着纤维含量增加,混凝土 f_{cu} 也呈现出先减小后增大再减小的趋势,但相较于B0.0、B0.1对应的 f_{cu} 减小幅度最大,B0.2对应的 f_{cu} 虽然有所减小(0.24%),但几乎在试验误差范围内,增加纤维体积掺量混凝土 f_{cu} 值增加幅度并不大。图1所示的试验结果与相关研究^[27-28]结果较为一致,当纤维体积分数较低时,在基体中无法形成承载骨架,对混凝土压缩强度的增强效果小于由纤维引起的缺陷带来的负面影响;当玄武岩纤维含量超过一定范围时,压缩强度随着纤维含量的增加而提高,这是由于纤维在混凝土中均匀分布,形成了一个致密的空间网状结构,这一承重骨架有效地削弱并减少了混凝土中的局部缺陷,提升了混凝土的整体均匀性和完整性,进而使得混凝土在强度和韧性方面得到了显著提升;而当纤维过多,过量纤维结团会导致混凝土基体中出现缺陷,造成混凝土的密实度下降,抗压强度出现降低的情况^[27,29]。可见,适当添加纤维可以改善混凝土的强度,但如果纤维掺量过低或过高,将增加其内部缺陷,不利于强度的提高,不应采用过高的纤维掺量实现轴心抗压强度的提升。综合考虑经济性,选取0.2%或0.3%纤维体积掺量在提升混凝土抗压延性的基础上,又能保证混凝土抗压强度基本不变。

1.2.2 抗拉强度试验

各组试件的受拉应力-应变曲线下降段陡峭且不完整,玄武岩纤维混凝土试件受拉仍然表现为脆性破坏。轴心抗拉及劈裂抗拉试验结果分别如图2(a)、2(b)所示,可见纤维掺量0.0%~0.5%试件的轴心抗拉强度 f_t 分别为3.20、3.20、3.60、3.59、3.35、2.84 MPa,可见,相较于B0.0,玄武岩纤维混凝土试件随着纤维体积掺量的增加 f_t 值呈现先增加(0.1%~0.2%)后减小(0.3%~0.5%)的趋势。纤维掺量0.2%时, f_t 增幅最大,达到了12.81%,此后,虽然0.3%及0.4%纤维体积掺量混凝土试件 f_t 增幅依然为正值,但是此时进一步增加纤维掺量并不会显著提高混凝土的抗压强度,同时也不利于增强其抗拉性能。因此,0.2%体积掺量的纤维混凝土轴心抗拉性能最优。纤维掺量0.0%~0.5%试件的劈裂抗拉强度 f_{tm} 值分别为2.34、2.47、2.68、2.54、2.23、2.26 MPa,可见,相较于素混凝土,掺加玄武岩纤维的混凝土试件随着纤维体积掺量的增加 f_{tm} 值呈现先增加(0.1%~0.2%)后减小(0.3%~0.4%)再增加(0.5%)的趋势。纤维掺量0.2%时, f_{tm} 增幅最大,达到了14.79%,这与轴心

抗拉强度规律基本一致;0.5%纤维体积掺量混凝土虽然相较于0.4%纤维体积掺量混凝土 f_{tm} 值略微增加,但是基本在误差范围内,且不经济合理。因此,0.2%体积掺量的纤维混凝土抗拉性能最优。

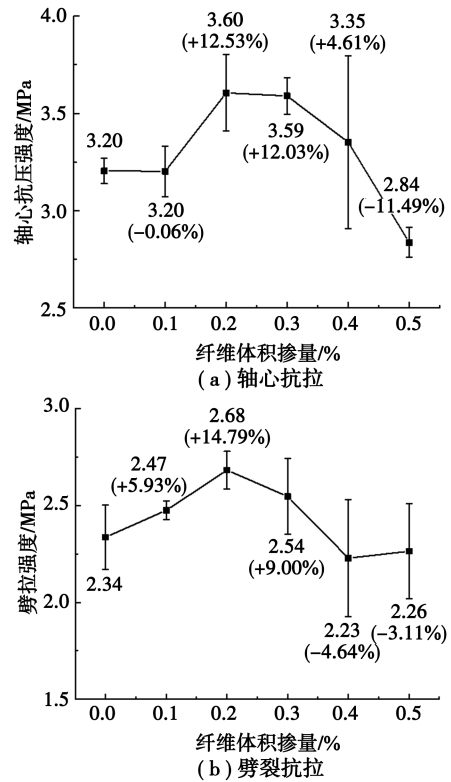


图2 抗拉试验结果

Fig. 2 Tensile test results

1.2.3 四点弯曲试验

除B0.0、B0.2及B0.5组只有2个试样,其余各组纤维混凝土试样3个,图3为纤维混凝土试件荷载-挠度曲线。可见,对照组混凝土试件B0.0的曲线在下降段存在缺失或近乎垂直,这一现象表明素混凝土脆性特征显著。较低掺量(0.1%、0.2%、0.3%)的玄武岩纤维混凝土试件显示出明显的脆性特征,表现为达到峰值荷载后荷载迅速下降,且试件在中部发生断裂。较高掺量(0.4%、0.5%)玄武岩纤维混凝土在峰值荷载后并未呈现垂直下降趋势,这说明较高掺量的玄武岩纤维对混凝土弯曲韧性有小幅提高,此时混凝土延性增强(如图3(f))。尽管掺入玄武岩纤维的混凝土试件在达到峰值荷载后承载力会出现瞬间的降低,但峰值荷载却得到了显著提升。因此,掺入玄武岩纤维显著增强了混凝土试件的抗弯性能,本试验纤维混凝土弯曲强度如图4。

对照组试件(B0.0)的弯曲强度为4.49 MPa, B0.1~B0.5试件的弯曲强度分别为4.74、5.44、5.13、5.35、5.91 MPa,弯曲强度分别提升了5.57%、

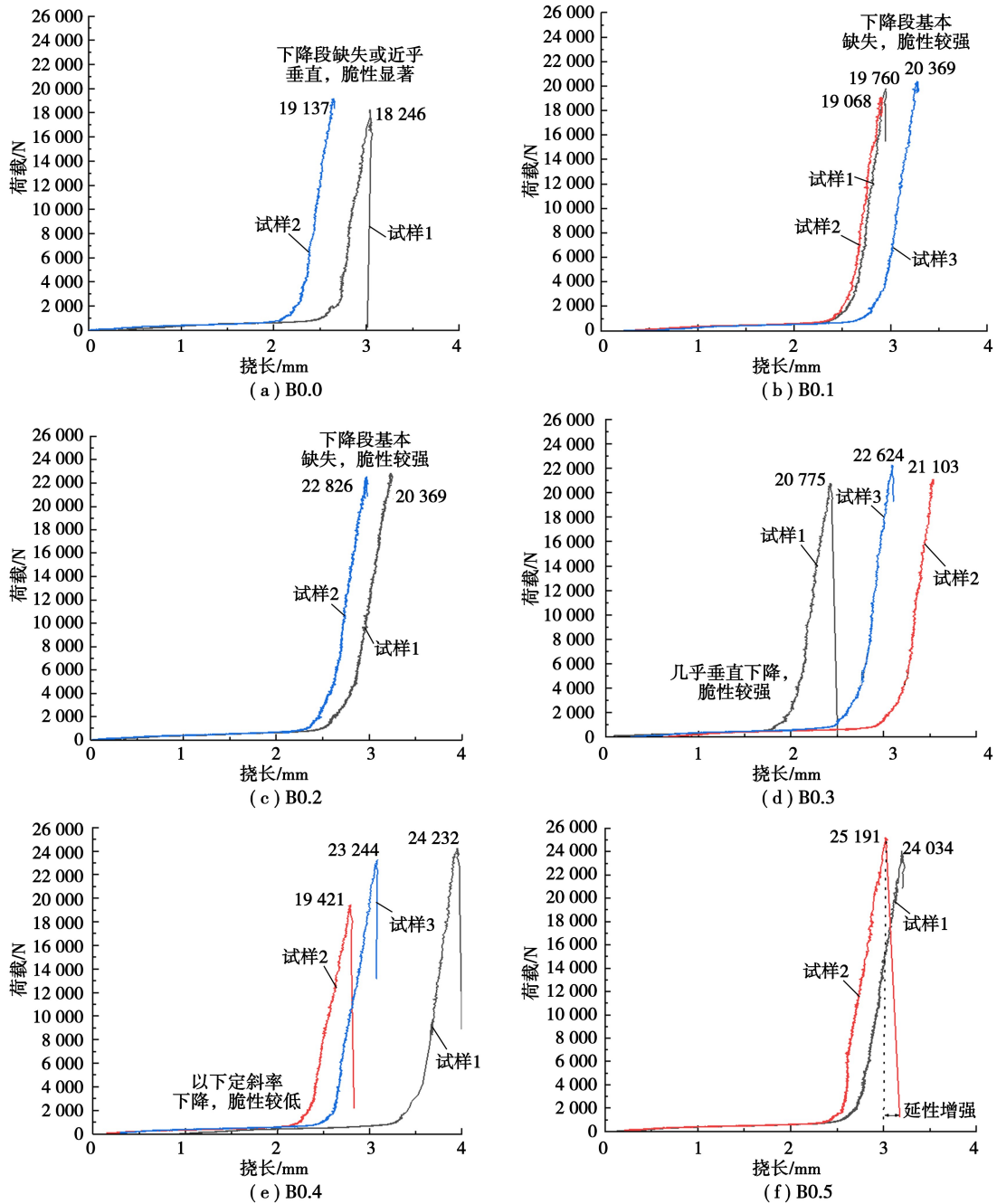


图 3 纤维混凝土试件荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curves of fiber-reinforced concrete specimens

21.26%、14.38%、19.30%及31.68%。纤维体积率0.2%及0.5%时混凝土弯曲强度提升最大,综合考虑经济成本,选用纤维体积率0.2%能较好提升混凝土的弯曲强度。

2 数值模拟结果与分析

2.1 模型参数

2.1.1 粗骨料形状

本研究采用等效凸多边形方法来模拟粗骨料的几何形态。利用图像处理技术,对实际混凝土断

面图像进行分析,提取出等效凸多边形的特征参数,如长短轴比例和倾角等,进而构建了二维粗骨料形态数据库。文献[30-31]中提出的土石混合物料中块石形态库构建方法,采用包裹骨料的最小矩形的长边长度 L_g 来定义粗骨料的粒径,长边 L_g 与短边 S_g 的比值 λ_g 表示骨料的长短轴比例,而长边与 x 轴正向的夹角 α_g 则定义为粗骨料的倾角。通过平移、缩放和旋转等几何变换,将提取的粗骨料轮廓转换为标准化的形态。首先,将骨料的几何中心定位至坐标原点 O (如图5(a))。接着,保持几

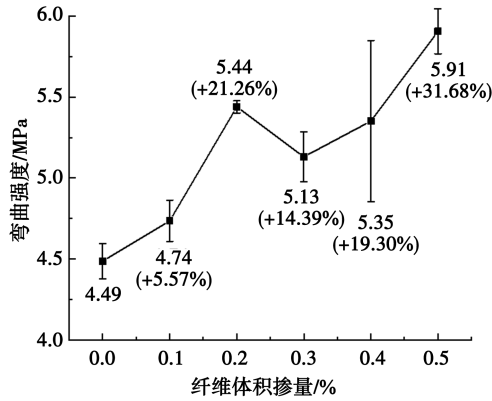


图 4 玄武岩纤维混凝土弯曲强度

Fig. 4 Bending strength of basalt fiber concrete

何中心位置不变,对骨料进行缩放处理(如图 5(b)),直至长边 L_g 的长度标准化为 1,此时短边 S_g 的长度相应调整为 S_g/L_g (即长短轴比例的倒数)。随后,以原点 O 为旋转中心,将骨料顺时针旋转 α_g 度,使得骨料的长轴与 x 轴平行,从而得到标准化的骨料轮廓(如图 5(c))。通过上述标准化流程,建立了二维粗骨料形态库。

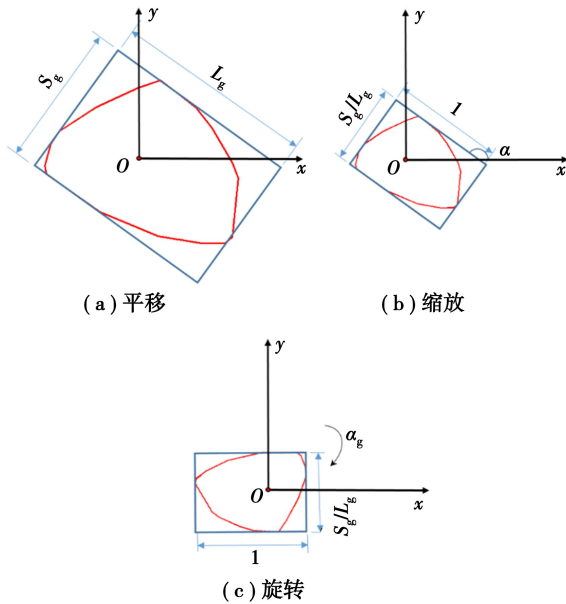


图 5 标准骨料轮廓处理流程

Fig. 5 Standard aggregate profile treatment process

2.1.2 初始孔洞缺陷

纤维的作用就是增加整体的抗拉性能,减小微裂纹对整体强度弱化。如果不考虑初始孔洞缺陷,而采用无缺陷的模型进行计算,则将会弱化纤维混凝土的增强性能。参照相关文献[32-33],本研究提出的初始缺陷孔洞模型设定孔径在 1~3 mm 范围内,宏观孔隙率为 1%。考虑到实际混凝土中宏观孔的多球形特征,模型中假设孔洞为圆形,并允

许孔洞间的叠加。因此,模型中的气泡被假定为直径 1~2 mm 的圆形,均匀分布且可叠加,气泡的累计体积率设定为块石骨料间砂浆体积的 0.4%。

2.1.3 界面层厚度

借鉴相关细观混凝土模拟研究成果^[26,34],并平衡数值模拟的计算效率和精度,界面层的厚度取 0.5 mm。

2.2 细观有限元模型

纤维混凝土细观模型中的纤维分布满足以下 3 个条件:(1)纤维与纤维不相交,纤维与纤维的最小距离大于等于界面层厚度 d ;(2)纤维只分布在砂浆中,与块石骨料不相交;(3)纤维和骨料表面存在厚度为 d 的界面层。本文假定 $d=2L_0$, L_0 为最小网格尺寸。首先,构建一个块石骨料模型,该模型符合特定的骨料粒径 S 、长短轴比 λ 以及倾角 θ ,以确保其形态与天然块石相一致。在此基础上,于块石骨料间隙中随机布置了满足既定分布条件的纤维。图 6(a)展示了纤维生成过程,其步骤概括如下:首先,随机选取 N_0 个点 P 作为纤维的起点,并为每个点随机分配一个倾角 θ 以决定纤维的取向,同时确定 N_0 个纤维长度 L_{en} 。接着,在这些参数的基础上,在平面上随机生成 N_0 条纤维,筛选出 N_1 条不与块石骨料相交的纤维,其中 P 代表纤维上的任一点。然后,从 N_1 条纤维中进一步筛选出 N_2 条位于特定区域的纤维,最终形成纤维集合。最终,从纤维集 Fiber 中选取 n 条不发生重叠的纤维,作为实验或模拟的最终纤维配置。考虑到长短不同的纤维往往相较于单一长度的纤维对于改良混凝土的抗拉性能更优,因此在数值模拟中进一步考虑混掺不同长度纤维,纤维生成参数与生成数量如表 3 所示。从纤维集 Fiber 选取不重叠纤维的流程图如图 6(b)所示,采用穷举法,从纤维集 Fiber 中选取第 k 条纤维,判断其是否与 Fiber 中其他纤维相交。若第 k 条纤维与所有先前纤维均不相交,则判定其为非重叠纤维。此时,将计数器 n 增加 1(即 $n=n+1$),以记录非重叠纤维的数量。当 $k>N_2$,整个纤维相交判断结束。

表 3 纤维生成参数与生成数量

Table 3 Fiber generation parameters and quantity

分组	长度/mm	倾角 $\theta/(^\circ)$	数量 n
第 1 组	30	均匀分布 0~180	9
第 2 组	15	均匀分布 0~180	37
第 3 组	8	均匀分布 0~180	36

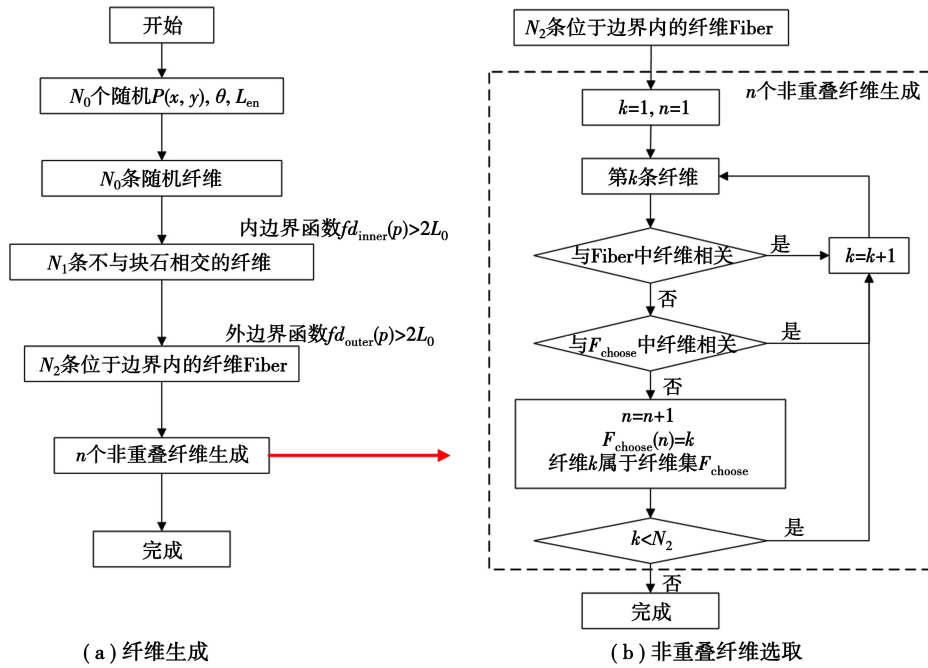


图 6 非重叠纤维生成流程图

Fig. 6 Flowchart of non-overlapping fiber generation process

为生成界面层,可以设定纤维与纤维,纤维与块石骨料的相交定义。例如定义纤维与纤维,纤维与块石骨料间的距离 $d < 2L_0$ 时,纤维与纤维相交,纤维与骨料相交。在非重叠纤维和块石骨料周边定义一层厚度为 $2L_0$ 的界面层,以模拟纤维与混凝土基体之间的相互作用。纤维混凝土细观有限元模型如图 7 所示,总共产生了 53 493 个三角单元。

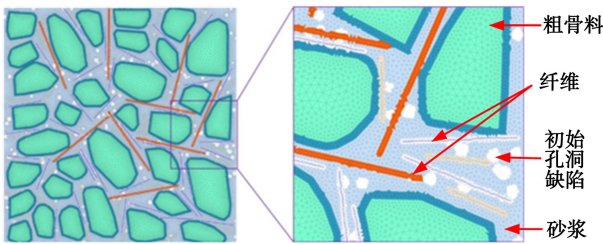


图 7 纤维混凝土细观结构模型

Fig. 7 Microscopic structural model of fiber-reinforced concrete

2.3 纤维混凝土细观抗拉模拟

采用 ABAQUS 进行纤维混凝土的抗拉试验模拟,参考文献[35]和纤维混凝土室内试验,模拟采用的块石骨料、砂浆、纤维、骨料界面层、纤维界面层的参数如表 4 所示,其中纤维采用 T2D2 杆单元,其它材料采用 CPS3 平面单元。

拉伸试验模拟中,模型底部固定,在模型顶部施加向上 0.01 mm/s 的拉伸速度。当拉伸位移达到 1 mm 时,素混凝土 (B0.0) 及纤维混凝土 (B0.2) 内部的塑性区云图发展过程分布如图 8 所示。

表 4 纤维混凝土细观模型参数

Table 4 Microscopic model parameters for fiber-reinforced concrete

参数	骨料	砂浆	骨料界面层	纤维	纤维界面层
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 700	2 100	2 100	2 650	2 000
弹性模量/MPa	30 000	15 000	12 500	100 000	12 500
泊松比	0.17	0.2	0.2	0.3	0.2
抗拉强度/MPa	8.5	7	5.5	3500	6.5
残余抗拉强度/MPa	0.85	0.7	0.55	-	1
抗压强度/MPa	80	40	30	-	30
残余抗压强度/MPa	13	8	6	-	6
极限应变系数	10	10	10	-	10

图 8(a) — (d) 展示了混凝土在拉伸载荷作用下的破坏过程,包括塑性区的起始、发展、融合及完全贯通。在抗拉强度峰值前,初始缺陷附近的应力集中导致塑性区及微裂纹的出现(图 8(a))。随着位移增大,塑性区沿孔隙和界面层扩散,并在峰值后联通,裂纹进一步扩展(图 8(b))。塑性区的连结促使裂纹垂直于拉伸方向传播。拉伸过程中横向裂纹迅速增长,受荷面积减小进一步导致抗拉承载力急剧下降(图 8(c))。最终,拉裂缝贯穿砂

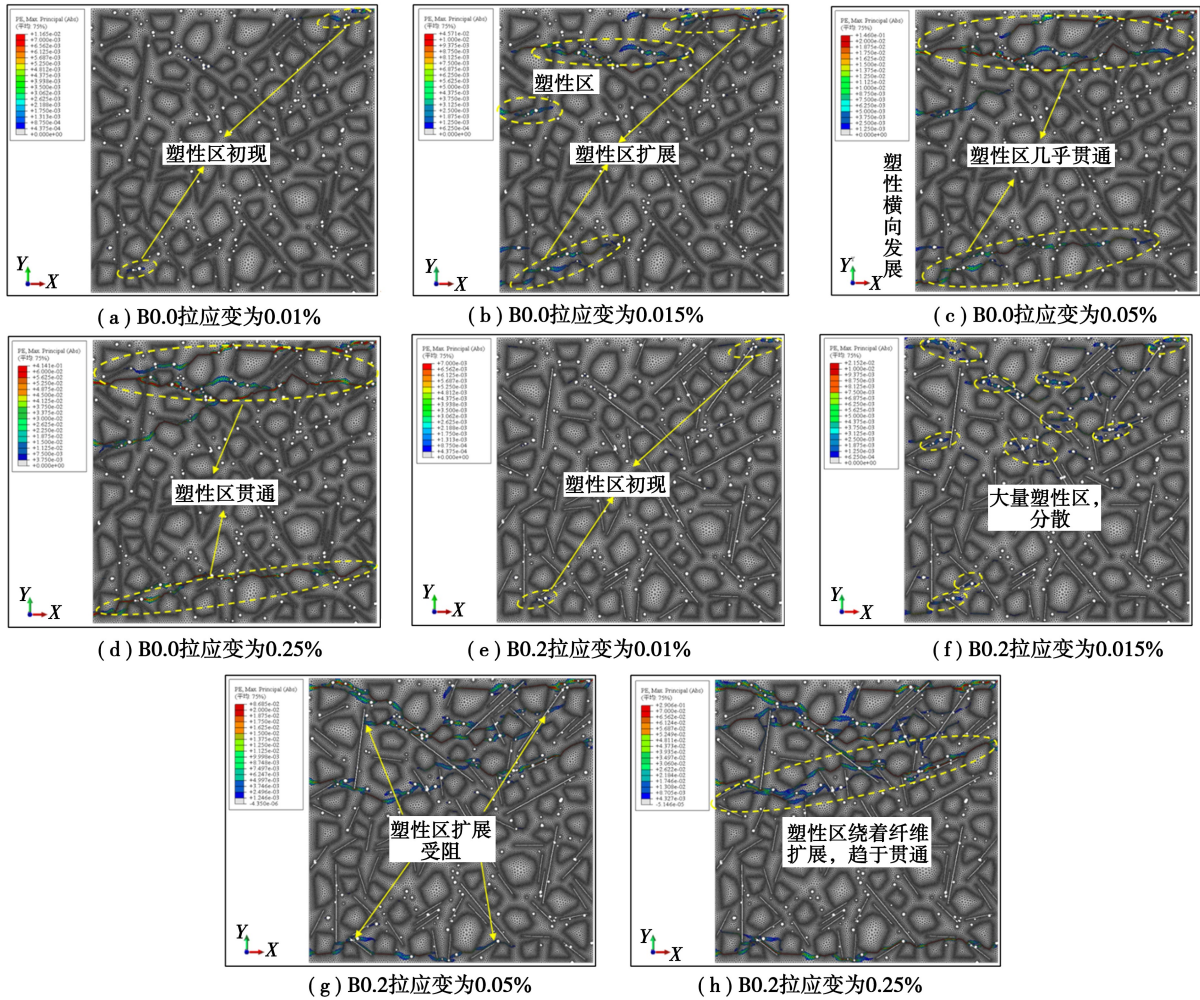


图 8 B0.0 及 B0.2 试件单轴拉伸塑性区发展过程

Fig. 8 Development process of uniaxial tensile plastic zone in specimens B0.0 and B0.2

浆和界面过渡区,形成主破坏带(图 8(d))。纤维增强混凝土(图 8(e)—(h))中,纤维形成网状结构,有利于减少初始缺陷导致的应力集中,均匀化应力分布,使塑性区更分散,因而提升了混凝土峰值抗拉强度。塑性区扩展至纤维时,扩展路径改变,此时纤维发挥了桥接作用,限制塑性区宽度的增加,抑制了宏观裂缝发展,因而能增强混凝土残余抗拉强度。

图 9 为纤维混凝土细观模拟拉应力-位移曲线。对比无纤维混凝土的模拟抗拉曲线,素混凝土峰值荷载 3.07 MPa,纤维混凝土峰值荷载 3.42 MPa,数值模拟中纤维混凝土抗拉强度提高了 11.40%。数值模拟中素(纤维)混凝土抗拉强度与室内试验素(纤维)混凝土抗拉强度误差为 4.24%(5.26%),与室内试验提升幅度(12.81%)相比误差仅为 9.90%,证实通过数值模拟方法能够较为准确地再现室内试验所揭示的规律,即纤维的掺入可有效提升混凝土的抗拉性能。

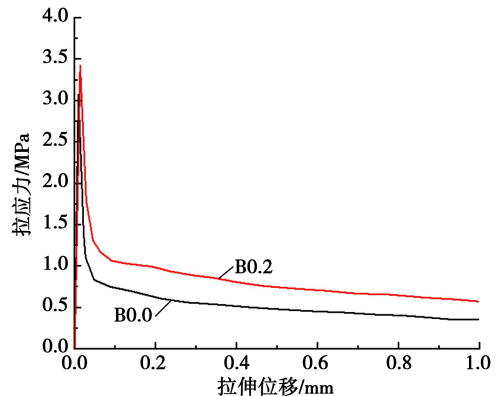


图 9 素混凝土与纤维混凝土细观模拟拉应力-位移曲线
Fig. 9 Mesoscopic simulation of tensile stress-displacement curves for plain concrete and fiber-reinforced concrete

3 分析与讨论

试验结果汇总如表 5 所示。从表 5 可以看出,玄武岩纤维的引入对混凝土抗压强度的影响不显著。然而,在轴拉强度、劈拉强度及弯曲强度方面,

表5 纤维混凝土试验结果汇总
Table 5 Summary of fiber-reinforced concrete test results

试件	轴心抗压强度/MPa		立方体抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa		轴拉强度/MPa		弯曲强度/MPa	
	试验值	均值	试验值	均值	试验值	均值	试验值	均值	试验值	均值
B0.0	36.44		46.36		2.57		3.14		4.38	
	36.45	35.71	46.71	46.75	2.20	2.34	3.27	3.20	4.59	4.49
	34.23		47.17		2.24				/	
B0.1	34.50		43.56		2.52		3.13		4.74	
	34.83	34.67	41.77	41.41	2.49	2.48	3.38	3.20	4.58	4.74
	/		38.91		2.41		3.10		4.89	
B0.2	29.85		46.67		2.55		3.75		5.48	
	32.70	32.49	42.39	45.59	2.78	2.68	3.74	3.61	5.40	5.44
	34.93		47.71		2.71		3.33		/	
B0.3	34.66		45.82		2.31		3.52		4.99	
	35.62	36.29	47.05	46.50	2.55	2.55	3.72	3.59	5.06	5.13
	38.60		46.62		2.78		3.53		5.34	
B0.4	37.82		47.86		1.81		3.81		5.82	
	36.89	37.26	51.42	48.00	2.34	2.23	3.50	3.35	4.66	5.35
	37.06		44.71		2.53		2.75		5.58	
B0.5	36.20		45.72		2.33		2.73		5.77	
	35.49	36.23	49.57	47.42	1.93	2.26	2.86	2.84	6.05	5.91
	36.99		46.96		2.53		2.92		/	

注：“/”表示由于试件缺失或试验操作不规范导致数据缺失

纤维的加入普遍提高了混凝土的力学性能,最大增幅分别为 12.81% (0.2% 体积掺量)、14.79% (0.2% 体积掺量) 及 31.68% (0.5% 体积掺量)。对于劈拉强度,随着纤维含量的增加混凝土劈拉强度先增后减,且在纤维体积率 0.2% 时达到峰值,为 14.79%;对于轴拉强度,随着纤维含量的增加混凝土轴拉强度总体也呈现和劈拉强度类似的规律,纤维体积率 0.2% 时候抗拉强度为 3.61 MPa,相比于素混凝土提升 12.81%。而对于弯拉强度,纤维的增加导致混凝土弯拉强度先增大后减小再增大,在纤维体积率 0.2% 及 0.5% 时达到峰值,分别为 21.26% 及 31.68%,考虑到 0.5% 纤维体积掺量并不能有效提升混凝土的抗拉、抗压性能,因此综合考虑选用 0.2% 纤维体积掺量为最优配比。此时,纤维的掺入提升了混凝土的抗拉及弯曲强度与韧性,有利于提升混凝土结构的阻裂性能。

此外,由于缺乏细观观测手段,数值模拟并未将玄武岩纤维的分散状态与室内试验纤维实际分

散状态相对应,且纤维改良混凝土内部孔隙状态并未在模拟中考虑,后续研究将进一步结合微细观试验手段,考虑玄武岩纤维实际分散状态及不同纤维掺量对混凝土内部孔隙状态的影响,并建立三维模型更精确地模拟纤维分布的影响,揭示纤维长度及配比等参数对混凝土抗拉力学特性的影响规律。

4 结论

(1) 相比于 B0.0, f_c 随着纤维的掺量增加大体上呈现先减小后增大再减小的趋势,且并不会有效提升混凝土的轴心抗压强度; f_t 值呈现先增加 (0.1%~0.2%) 后减小 (0.3%~0.5%) 的趋势,且纤维掺量 0.2% 时, f_t 增幅最大,达到了 12.81%; 弯曲强度分别提升了 5.57%、21.26%、14.38%、19.30% 及 31.68%。因此,综合考虑选用 0.2% 纤维体积掺量为最优配比。

(2) 建立了能真实反映骨料形态、级配、长短轴比及纤维分布、初始缺陷等细观结构因素的纤维

混凝土细观数值模型,能有效模拟混凝土在拉伸载荷作用下的主要破坏机制及其宏观力学行为。混凝土破坏通常始于界面层薄弱单元和含有初始孔隙的砂浆单元,纤维的加入显著降低了混凝土内部缺陷区域的应力集中,使得应力分布更加均匀,从而抑制了塑性区的扩展。

(3)数值模拟素(纤维)混凝土抗拉强度与室内试验素(纤维)混凝土抗拉强度误差分别为4.24%及5.26%,与室内试验纤维提升混凝土抗拉强度幅度相比误差仅为9.90%,本文提出的细观数值模拟方法可以较为真实反映室内试验揭示纤维的掺入可有效提高混凝土的抗拉性能这一规律。

参考文献(References)

- [1] 安瑞楠,林鹏,夏勇,等. 网络型地下隧洞群控排烟策略优化仿真研究[J]. 煤炭学报, 2024,49(增2): 1041-1051. (An Ruinan, Lin Peng, Xia Yong, et al. Optimization simulation study on smoke control strategy for networked underground tunnel groups [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49 (Supp. 2): 1041-1051. (in Chinese))
- [2] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等. 高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1404-1417. (Fan Qixiang, Lin Peng, Wei Pengcheng, et al. Challenges and strategies for intelligent construction of hydropower projects in high-altitude areas [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (12): 1404-1417. (in Chinese))
- [3] Deng Z, Liu X, Zhou X, et al. Field monitoring of mechanical parameters of deep-buried jacketed-pipes in rock: Guanjingkou Water Control Project [J]. Tunnel Underground Space Technol, 2022, 123 (125): 104531.
- [4] Deng Z, Liang N, Liu X, et al. Analysis and application of friction calculation model for long-distance rock pipe jacking engineering [J]. Tunnel Underground Space Technol, 2021, 115: 104063.
- [5] 何满潮,任树林,陶志刚. 深埋隧道灾变防控方法[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1777-1797. (He Manchao, Ren Shulin, Tao Zhigang. Disaster prevention and control methods for deep-buried tunnels [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1777-1797. (in Chinese))
- [6] 王玉杰,李秀文,曹瑞琅,等. 水工隧洞TBM施工适宜性围岩分类研究[J]. 水利学报, 2023, 54(7): 880-888. (Wang Yujie, Li Xiuwen, Cao Ruilang, et al. Study on surrounding rock classification for TBM construction suitability in hydraulic tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(7): 880-888. (in Chinese))
- [7] Peng L, Hu X, Su G, et al. Cracking Characteristics of the Surrounding Rocks of a Hydraulic Tunnel Under High Geothermal Conditions: A Model Test [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(3): 1369-1390.
- [8] Deng Z, Liu X, Han Y, et al. Study on the field monitoring, assessment and influence factors of pipe friction resistance in rock [J]. Tunnel Underground Space Technol, 2024, 154: 106053.
- [9] Deng Z, Liu X, Zhou X, et al. Main engineering problems and countermeasures in ultra-long-distance rock pipe jacking project: Water pipeline case study in Chongqing [J]. Tunnel Underground Space Technol, 2022, 123: 104420.
- [10] 周利,苏凯,周亚峰,等. 高压水工隧洞透水衬砌渗流-应力-损伤耦合分析方法研究[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 313-322. (Zhou Li, Su Kai, Zhou Yafeng, et al. Study on the seepage-stress-damage coupling analysis method for permeable lining in high-pressure hydraulic tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(3): 313-322. (in Chinese))
- [11] Deng Z, Liu X, Chen P, et al. Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. Part 1: Experimental program [J]. Structural Concrete, 2022, 23(1): 311-327.
- [12] Deng Z, Liu X, Chen P, et al. Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. Part 2: Numerical and parametric analysis [J]. Structural Concrete, 2022, 23(1): 328-345.
- [13] Ayub T, Shafiq N, Nuruddin M F. Mechanical Properties of High-performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers [J]. Procedia Engineering, 2014, 77: 131-139.
- [14] Algin Z, Ozen M. The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 678-685.
- [15] Guo Y, Hu X, Lv J. Experimental study on the resistance of basalt fiber-reinforced concrete to chloride penetration [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 142-155.
- [16] Mazzucco G, Xotta G. Fire spalling prevention via polypropylene fibers: A meso- and macroscale approach [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2016(1): 8639545.
- [17] 李革,徐泽华,牛建刚. 塑钢纤维轻骨料混凝土细观破坏过程的数值模拟[J]. 材料导报, 2018, 32(14): 2412-2417. (Li Ge, Xu Zehua, Niu Jiangang. Numerical simulation of the mesoscopic failure process of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete [J]. Materials Reports, 2018,

- 32(14): 2412-2417. (in Chinese))
- [18] 赵秋山, 徐慎春, 刘中宪. 钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的细观数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2018, 35 (6): 1661-1673. (Zhao Qiushan, Xu Shenchun, Liu Zhongxian. Mesoscopic numerical simulation of the compressive behavior of steel fiber-reinforced ultra-high performance concrete [J]. Journal of Composites, 2018, 35 (6): 1661-1673. (in Chinese))
- [19] 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: 58-72.
- [20] Gao H, Zhang L, Zhang D, et al. Mechanical properties of fiber-reinforced asphalt concrete: Finite element simulation and experimental study [J]. e-Polymers, 2021, 21(1): 533-548.
- [21] Meng G, Wu B, Xu S, et al. Modelling and experimental validation of flexural tensile properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121974.
- [22] Zile E, Zile O. Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers [J]. Cement & Concrete Research, 2013, 44: 18-24.
- [23] Naderi S, Zhang M. A novel framework for modelling the 3D mesostructure of steel fiber reinforced concrete [J]. Computers & Structures, 2020, 234: 106251.
- [24] 邹德高, 田继荣, 刘京茂, 等. 堆石料三维形状量化及其对颗粒破碎的影响 [J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3525-3530. (Zou Degao, Tian Jirong, Liu Jingmao, et al. Three-dimensional shape quantification of rockfill materials and its influence on particle breakage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3525-3530. (in Chinese))
- [25] 梁宁慧, 钟杨, 刘新荣. 多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗弯韧性试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2783-2789. (Liang Ninghui, Zhong Yang, Liu Xinrong. Experimental study on the flexural toughness of multi-size polypropylene fiber concrete [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2783-2789. (in Chinese))
- [26] Naderi S, Zhang M Z. A novel framework for modelling the 3D mesostructure of steel fiber reinforced concrete [J]. Comput Struct, 2020, 234: 106521.
- [27] Wang D, Ju Y, Shen H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 464-473.
- [28] Kizilkanat A B, Kabay N, Akyüncü V, et al. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 218-224.
- [29] Chen B, Liu J. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability [J]. Cement Concrete Research, 2005, 35(5): 913-917.
- [30] 刘新荣, 杜立兵, 邓志云, 等. 基于闵科夫斯基差和优化波前法的二维天然堆石料生成方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1832-1846. (Liu Xinrong, Du Libing, Deng Zhiyun, et al. Method and application of generating two-dimensional natural rockfill materials based on Minkowski difference and optimized wavefront method [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1832-1846. (in Chinese))
- [31] Deng Z, Chen P, Liu X, et al. Study on the tensile and compressive mechanical properties of multi-scale fiber-reinforced concrete: Laboratory test and mesoscopic numerical simulation [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86: 108852.
- [32] Ozturk A U, Baradan B. A comparison study of porosity and compressive strength mathematical models with image analysis [J]. Computational Materials Science, 2008, 43(4): 974-979.
- [33] 张金喜, 张建华, 邬长森. 再生混凝土性能和孔结构的研究 [J]. 建筑材料学报, 2006(2): 142-147. (Zhang Jinxi, Zhang Jianhua, Wu Changsen. Study on the properties and pore structure of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006(2): 142-147. (in Chinese))
- [34] Zeng Z, Chen W, Wang W. A numerical mesoscopic method for simulating mechanical properties of fiber reinforced concrete [A]//Proceedings of the Computational and Experimental Simulations in Engineering, Cham [C]. Springer International Publishing, 2020.
- [35] 薛兵. 基于细观尺度的钢纤维混凝土损伤破坏数值模拟研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017. (Xue Bing. Numerical simulation study on damage and failure of steel fiber concrete based on mesoscopic scale [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese))