

DOI:10.12170/20211224002

张国龙,任昊铭,章定文,等.玄武岩纤维提升水泥土抗拉性能的试验研究[J].水利水运工程学报,2022(2):109-116.(ZHANG Guolong, REN Haoming, ZHANG Dingwen, et al. Experimental study on tensile properties enhancement of cement-treated soil by basalt fiber[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(2): 109-116. (in Chinese))

# 玄武岩纤维提升水泥土抗拉性能的试验研究

张国龙<sup>1</sup>,任昊铭<sup>2,3</sup>,章定文<sup>2,3</sup>,徐慧敏<sup>4</sup>,宋 涛<sup>1</sup>

(1. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司,安徽 合肥 230088; 2. 东南大学 交通学院,江苏 南京 211189; 3. 道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学),江苏 南京 211189; 4. 中南建筑设计院股份有限公司,湖北 武汉 430000)

**摘要:**为研究玄武岩纤维对水泥土抗拉力学性能的影响,选取不同长度、直径及掺量的玄武岩纤维掺入水泥土,通过开展单轴拉伸试验、无侧限抗压强度试验和扫描电镜试验,并采用正交试验极差法,分析了玄武岩纤维对水泥土的应力-应变曲线、抗拉强度、拉压强度比和破坏形态的影响规律和微观作用机理。结果表明:玄武岩纤维水泥土的单轴抗拉试验应力-应变曲线可分为弹性变形、破坏、残余强度和稳定4个阶段;纤维变量对抗拉性能影响大小依次顺序为长度、掺量、直径;玄武岩纤维长度9 mm和掺量1.5%为玄武岩纤维的最优单掺参数。玄武岩纤维水泥土的拉压比较未掺入纤维的水泥土的拉压比高,但纤维种类和掺量等对纤维水泥土的拉压比影响较大;三维随机网状分布的玄武岩纤维可提升水泥土的抗拉强度和韧性。

**关键词:**玄武岩纤维水泥土;抗拉强度;拉压强度比;微观机理

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)02-0109-08

水泥固化土的抗压性能较好,但其抗拉、抗弯折强度较低,在某些工作条件下,水泥土结构会因拉伸而破坏,如水利工程堤坝边坡下的水泥土搅拌桩桩体常因弯曲或拉伸而破坏,输电铁塔因电线的拉紧导致用于铁塔地基的水泥土桩因抗拉强度不够而开裂<sup>[1-3]</sup>。针对水泥土抗拉强度低的局限性,在水泥土中掺入纤维来提升其抗拉性能被国内外学者证明是一种行之有效的方法<sup>[4-9]</sup>。Gutiérrez-Orrego等<sup>[4]</sup>在水泥土中加入剑麻纤维后发现,掺入0.1%剑麻纤维可使断裂模量较不掺入时增加20倍,同时其弯曲强度和抗压性能也都有不同程度的增加。戴文亭等<sup>[7]</sup>在水泥固化盐渍土中掺入稻壳灰与聚丙烯纤维改性,测试表明其无侧限抗压强度提高了31.9%、劈裂抗拉强度提高了49.1%,加州承载比CBR值提高了16.5%。

玄武岩纤维因具有成本低、易拌合、耐高温和耐腐蚀等优点,成为纤维加筋领域研究的热点<sup>[10-12]</sup>。陈峰等<sup>[13]</sup>研究表明,水泥土的渗透系数和电通量值随着玄武岩纤维掺量的增加而减小,且减小幅度也随之减小,玄武岩纤维最佳掺量为1.5%。Wang等<sup>[14]</sup>研究发现,玄武岩纤维水泥土的劈裂抗拉强度和抗压强度比为0.245,且其劈裂抗拉强度随着玄武岩纤维掺量和长度的增加呈现出先增加后减小的趋势。

目前,对玄武岩纤维加筋水泥土的研究多集中在抗压强度和抗渗性能等方面,对其抗拉特性的研究少。本研究采用自主研发的类“领结”型水泥土单轴抗拉强度设备,对掺入不同长度、直径及掺量的玄武岩纤维水泥土开展单轴拉伸试验,同时进行无侧限抗压强度试验和扫描电镜(SEM)试验,采用正交试验极差法分析纤维长度、直径和掺量对玄武岩纤维水泥土力学性能的影响,分析不同试样的破坏形态,并结合SEM照片和EDS能谱分析结果阐明玄武岩纤维对水泥土的微观加固机理。

收稿日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078129)

作者简介: 张国龙(1964—),男,安徽芜湖人,正高级工程师,硕士,主要从事闸坝等水利工程设计及相关技术研究。

E-mail: 577828466@qq.com

# 1 试验方案

## 1.1 试验材料

试验用土取自合肥白山节制枢纽船闸引航道边坡地表下 4 m 处。将其烘干、粉碎过 2 mm 筛后按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行土样的物理力学特性测试。测得土体比重为 2.71,天然含水率为 51.4%,重度为 19 kN/m<sup>3</sup>,干密度 1.21 g/cm<sup>3</sup>,孔隙比 1.2,塑限 24.9%,液限 40.8%,塑性指数 15.9。土样颗粒级配见图 1。依据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),定义试验用土为粉质黏土。

试验选用郑州格岩新材料有限公司生产的玄武岩纤维,其密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 93~105 GPa,抗拉强度为 3 500~4 000 MPa,纤维形态如图 2 所示。固化剂采用九七建材生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,其主要化学成分为 CaO、SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,含量分别为 66.17%、17.85% 和 5.24%。

## 1.2 试验方法

试验中土样初始含水率设定为天然含水率 51.4%,水泥掺入量取干土质量的 15%。结合市场现状和已有文献<sup>[15-17]</sup>,选取直径分别为 13、17 和 19 μm,长度分别为 6、9 和 12 mm,共 9 种玄武岩纤维。纤维掺量设定为 0、0.5%、1.0% 和 1.5%。制样过程中,采用少量多次的方式掺入玄武岩纤维,人工拌合确保纤维分散均匀。拌合料搅拌均匀后,将带有纤维的拌合料分 3 次装入预先涂抹凡士林的 50 mm×100 mm 的圆柱形模具中,每次装料需在振动台上分 3 层振捣,每次振捣 1.5 min 后刮花表面再进行下一层拌合料的填筑,最后振捣密实制成圆柱体试件。试样养护至 28 d 后进行单轴拉伸试验和无侧限抗压强度试验。无侧限抗压强度试验采用 CBR-2 型承载比试验仪,以 1.0 mm/min 的速率进行应变控制加载。试验采用三变量三水平正交试验,第 10 组为素水泥土对照组,试验设计方案与主要测试结果见表 1。

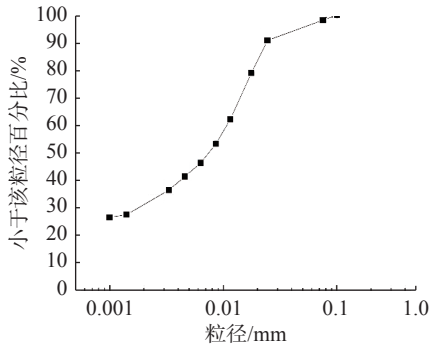


图 1 土样颗粒级配曲线  
Fig. 1 Particle grading curve of soil



图 2 玄武岩纤维(长度为 9 mm,直径为 13 μm)

Fig. 2 Basalt fiber (9 mm in length, with diameter of 13 μm)

表 1 玄武岩纤维水泥土正交试验设计方案与测试结果  
Tab. 1 Design scheme and test table of orthogonal test in basalt fibrous cement soil

| 组号 | 纤维长度/mm | 纤维直径/μm | 纤维掺量/% | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa | 拉压比   |
|----|---------|---------|--------|----------|----------|-------|
| 1  | 6       | 13      | 0.5    | 0.186    | 1.013    | 0.184 |
| 2  | 6       | 17      | 1.0    | 0.205    | 1.102    | 0.186 |
| 3  | 6       | 19      | 1.5    | 0.231    | 1.125    | 0.205 |
| 4  | 9       | 13      | 1.0    | 0.308    | 1.159    | 0.266 |
| 5  | 9       | 17      | 1.5    | 0.397    | 1.156    | 0.343 |
| 6  | 9       | 19      | 0.5    | 0.241    | 1.046    | 0.230 |
| 7  | 12      | 13      | 1.5    | 0.184    | 1.025    | 0.180 |
| 8  | 12      | 17      | 0.5    | 0.167    | 0.965    | 0.173 |
| 9  | 12      | 19      | 1.0    | 0.187    | 1.014    | 0.184 |
| 10 | 0       | 0       | 0      | 0.147    | 0.751    | 0.196 |

## 1.3 单轴抗拉强度测试设备

课题组研发了类“领结”型模具制备拉伸试样,采用直接拉伸试验法测定试件的抗拉强度。制备水泥

土试样的压样模具与压样活塞如图 3(a)所示,其材质为 Cr12 合金工具钢。制样模具的内腔成两端大中间小的变截面对称结构,高 5 cm,其细部尺寸见图 3(b)。模具两端 4 个内倾角均为  $81^{\circ}$ ,角度相对较大,从而保证拉伸过程中变截面的变化速率相对缓慢,应力及应变对称分布,试样的断裂面面积固定且均匀断裂,避免产生应力集中现象。模具衔接口处平滑,不容易对试件中部造成卡损破坏,模具两端无需附加夹具,试验可重复性好。采用应变控制式加载,试验时以  $0.5\text{ mm/min}$  的速率对试件加载直至完全断裂,测得水泥土拉伸应力-应变关系曲线。拉力传感器的最大量程是  $30\text{ kN}$ ,精度等级为 0.5。玄武岩纤维水泥土的抗拉试样与拉裂面纤维照片如图 4 所示。

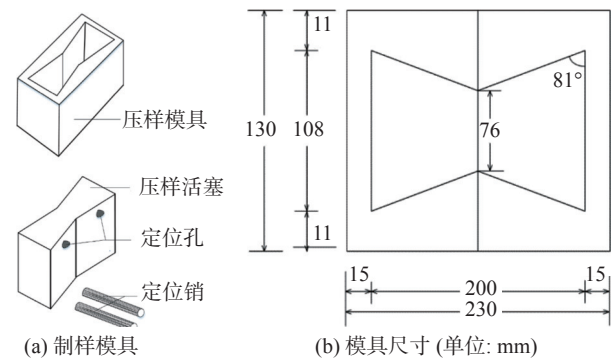


图 3 单轴拉伸设备  
Fig. 3 Uniaxial stretching equipment

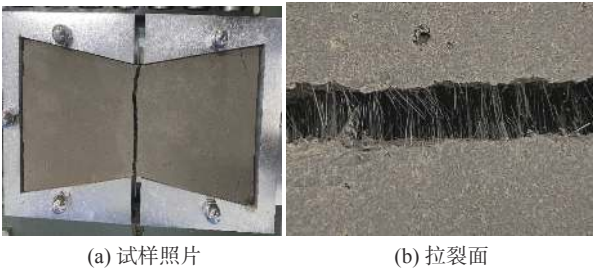


图 4 玄武岩纤维水泥土的抗拉试样与拉裂面照片  
Fig. 4 Photos of tensile specimen and tensile fracture surface of basalt fiber cement soil

## 2 测试结果与分析

### 2.1 玄武岩纤维水泥土单轴抗拉应力-应变曲线

不同纤维长度的玄武岩纤维水泥土抗拉强度试验的应力-应变曲线分别见图 5 和 6。由图 5 和 6 可见,不同纤维长度的水泥土抗拉强度试验应力-应变曲线基本相似,可分为 4 个阶段:弹性变形阶段(0~A)、破坏阶段(A~B)、残余强度阶段(B~C)和荷载稳定降低阶段(C~D)。破坏阶段(A~B)时,试样整体抗拉强度由峰值骤降,水泥土不再承担拉力。残余强度阶段(B~C)时,水泥土中的纤维将独自发挥抗拉作用,因此纤维水泥土存在一定的残余强度。由于玄武岩纤维与水泥土间的黏聚力摩阻作用,玄武岩纤维水泥土的抗拉强度出现二次增长趋势。荷载稳定降低阶段(C~D)时,随着轴向应变增大,玄武岩纤维与水泥土间的黏聚力和摩阻力逐渐耗损“脱黏”,随着玄武岩纤维的有效长度逐渐减小,应力逐渐降低。

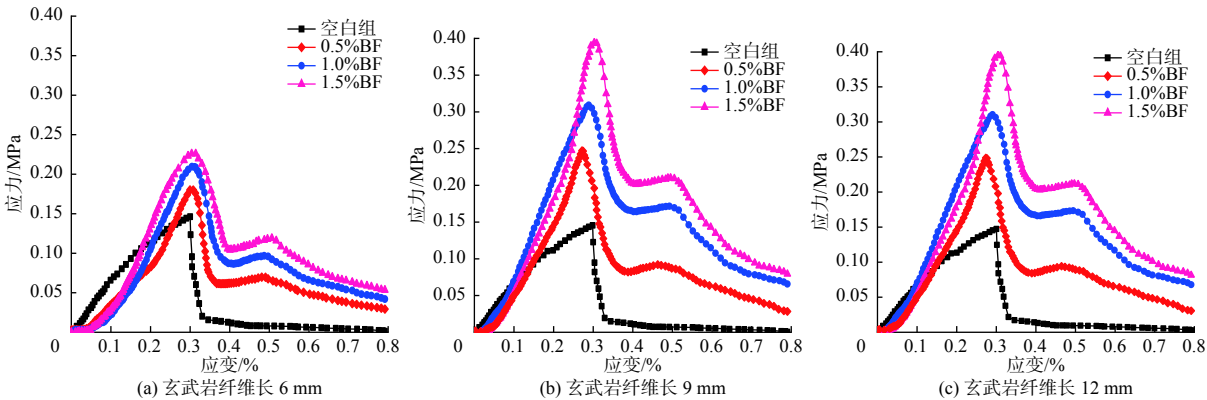


图 5 不同长度玄武岩纤维水泥土单轴拉伸应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curve of basalt fibrous cement soil with different lengths in uniaxial tensile test

由图 5 还可以发现,玄武岩纤维水泥土的峰值和残余强度随着玄武岩纤维掺量的增加而增大。如玄武岩纤维长度为 6 mm 时,玄武岩纤维掺量为 0.5%、1.0%、1.5% 时的水泥土残余强度分别为 0.062、0.090、0.120 MPa,纤维掺量为 1.5% 的玄武岩纤维水泥土残余强度较掺量为 0.5% 的玄武岩纤维水泥土增长 93.55%。另外,玄武岩纤维的掺入可以明显改善水泥土的脆性破坏特性,增加水泥土的韧性。

2.2 玄武岩纤维水泥土的抗拉强度

图 7 为玄武岩纤维水泥土抗拉强度随其长度及掺量的变化规律。由图 7 可知,纤维掺量相同时,水泥土的抗拉强度及残余强度随着纤维长度的增加呈先增大后减小的规律,本次试验中玄武岩纤维的最佳长度为 9 mm。以玄武岩纤维掺量为 1.5% 为例,纤维长度为 9 mm 时,峰值抗拉强度较 6 mm 时增长了 71.86%,纤维长度为 12 mm 时,峰值抗拉强度较 9 mm 时减小了 53.65%。这是因为当玄武岩纤维长度较长时(12 mm),纤维在拌合过程中易打结成团,致使承担拉力的有效纤维数量减少,且有效纤维握裹长度较短,纤维受拉时易被拔出而非拉断,因此,水泥土抗拉效果提升不明显;但是当玄武岩纤维长度增加时,相同掺入量时,承担拉力的有效纤维数量减少,水泥土抗拉效果提升也会受影响。

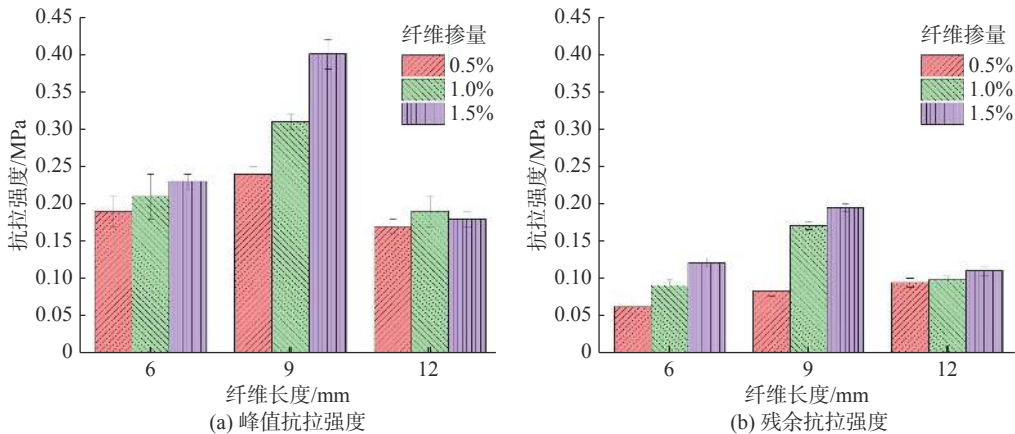


图 7 玄武岩纤维长度和掺量对水泥土抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of basalt fiber length and content on tensile strength of cement soil

2.3 玄武岩纤维水泥土拉压强度比

水泥土拉压比是指水泥土单轴抗拉强度和无侧限抗压强度的比值,该值可反映水泥土脆性特征。图 8 为玄武岩纤维水泥土拉压比随纤维长度和掺量的变化关系。由图 8 可见,纤维长度为 6 和 9 mm 时,玄武岩纤维水泥土拉压比会随着纤维掺量的增加而增大。由于纤维掺量从 1.0% 增加到 1.5% 时,无侧限抗压强度从最大值开始下降,且抗拉强度在纤维掺量为 1.5% 达到最大值,导致 9 mm 组的拉压比增加远大于 6 mm 组。纤维长度为 12 mm 时,由于纤维掺量从 1.0% 增至 1.5%,峰值抗拉强度降低,抗压强度增加,其拉压比会随着纤维掺量的增加而

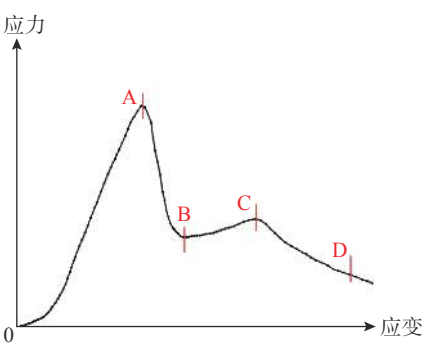
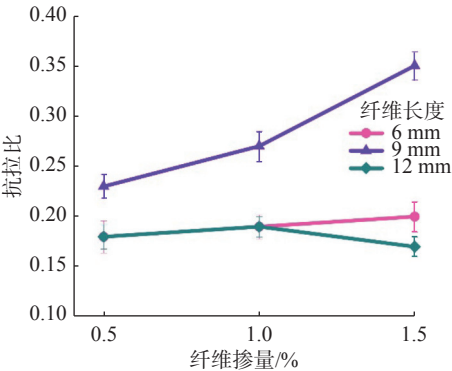


图 6 玄武岩纤维水泥土单轴抗拉强度应力-应变趋势

Fig. 6 Stress-strain trend diagram of basalt fibrous cement soil in uniaxial tension strength test

图 8 玄武岩纤维水泥土的拉压比与纤维长度和掺量的关系  
Fig. 8 Relationship between tensile-compression ratio and fiber length and dosage of basalt fibrous cement soil



减小。

本试验中玄武岩纤维水泥土的拉压比关系式为  $q_t=(17\%\sim35\%)q_u$ 。表 2 和 3 列举了水泥土和纤维水泥土的拉压比经验关系式。由于不同研究中采用的纤维种类、掺量等差异, 纤维水泥土的拉压比存在一定差异。纤维水泥土的拉压比普遍都高于普通水泥土的拉压比, 因此, 掺入玄武岩纤维可以明显增加水泥土的韧性。

表 2 水泥土的拉压比  
Tab. 2 Tension-pressure ratio of cement soil

| 年份   | 作者                      | 土质      | 水泥掺量/% | 拉压比                           |
|------|-------------------------|---------|--------|-------------------------------|
| 2009 | 马军庆等 <sup>[18]</sup>    | 粉质淤泥    | 15     | $q_t=(10\%\sim20\%)q_u$       |
| 2014 | Consoli <sup>[19]</sup> | 细砂      | 1~12   | $q_t=15\%q_u$                 |
| 2016 | 严红霞等 <sup>[20]</sup>    | (1)砂土   | 15     | 砂土: $q_t=(13\%\sim15\%)q_u$   |
|      |                         | (2)粉土   |        | 粉土: $q_t=(13\%\sim18\%)q_u$   |
|      |                         | (3)粉质黏土 |        | 粉质黏土: $q_t=(17\%\sim19\%)q_u$ |

表 3 纤维水泥土的拉压比  
Tab. 3 Tension-pressure ratio of basalt fibrous cement soil

| 年份   | 作者                 | 纤维名称   | (水泥掺量+纤维掺量)/%          | 拉压比关系                       |
|------|--------------------|--------|------------------------|-----------------------------|
| 2006 | 殷勇 <sup>[21]</sup> | 玻璃纤维   | 12+(1、2、3)             | $q_t=(18.4\%\sim19.3\%)q_u$ |
| 2016 | 陈峰 <sup>[22]</sup> | 玄武岩纤维  | 15+(0.5、1.0、1.5)       | $q_t=(14.3\%\sim17.1\%)q_u$ |
| 2020 | 黄耕 <sup>[23]</sup> | 聚乙烯醇纤维 | 15+(0.25、0.5、0.75、1.0) | $q_t=(8\%\sim38\%)q_u$      |

2.4 玄武岩纤维水泥土抗拉强度极差分析

玄武岩纤维水泥土正交试验抗拉强度极差分析见表 4。K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub> 代表玄武岩纤维长度、直径及掺量分别在各水平下的实测抗拉强度之和, k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>、k<sub>3</sub> 为 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub> 取平均值得出, 表示不同变量在各个水平下的抗拉强度均值。R 值是各变量对应的 3 种水平下 k 值的最大与最小值之差, 称为极差, 可以反映各个变量对抗拉强度试验指标的影响程度。R 值越大表明其对应的影响变量对该试验指标的影响越大。由表 4 可知, 本试验中对水泥土抗拉强度影响大小的主次顺序为: 纤维长度、纤维掺量、纤维直径。据此可以确定长度 9 mm, 掺量 1.5%, 直径 17 μm 为玄武岩纤维水泥土抗拉最优单掺参数。

2.5 玄武岩纤维水泥土中水化产物的微观形态

选取典型试样进行扫描电镜(SEM)试验。纤维长度为 9 mm、掺量为 1.5% 的玄武岩纤维水泥土试样 SEM 照片如图 9 所示。由图 9 可见, 玄武岩纤维周围、邻近纤维间均有大量絮状或块状的水泥水化产物, 如水化硅酸钙 C-S-H 等。水泥水化产物将纤维与土颗粒胶结为整体, 同时水泥水化产物填充于纤维与纤维间、纤维与土颗粒间及土颗粒与土颗粒间的孔隙, 降低了试样的孔隙率, 增大了纤维与水泥

表 4 正交试验极差分析  
Tab. 4 Range analysis of orthogonal test

| 变量             | 纤维长度变量下<br>抗拉强度/MPa | 纤维直径变量下<br>抗拉强度/MPa | 纤维掺量变量下<br>抗拉强度/MPa |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| K <sub>1</sub> | 0.622               | 0.678               | 0.594               |
| K <sub>2</sub> | 0.946               | 0.769               | 0.700               |
| K <sub>3</sub> | 0.538               | 0.639               | 0.812               |
| k <sub>1</sub> | 0.207               | 0.226               | 0.198               |
| k <sub>2</sub> | 0.315               | 0.256               | 0.233               |
| k <sub>3</sub> | 0.179               | 0.213               | 0.271               |
| R              | 0.136               | 0.043               | 0.073               |

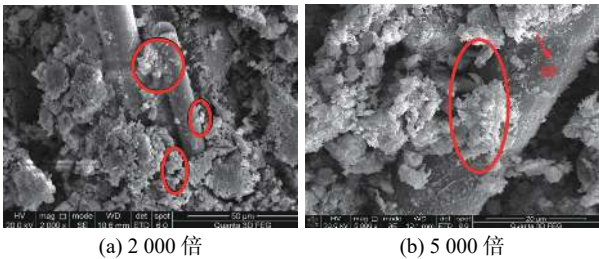


图 9 玄武岩纤维水泥土中水泥水化产物 SEM 照片  
Fig. 9 SEM photographs of cement hydration products in basalt fibrous cement soil

土间的接触面积,进而增大纤维与土颗粒间的黏聚力和摩阻力。

## 2.6 玄武岩纤维在水泥土中的分散形态

玄武岩纤维在水泥土中呈现三维随机分散分布(图 10),玄武岩纤维相互搭接交错形成一定的内部空间网状结构,当网状结构中的某一根玄武岩纤维受拉与水泥土产生相对运动趋势时,与之搭接交叉的纤维及内部夹杂的水泥土会阻碍其运动,从而约束了纤维的变形,提升了玄武岩纤维水泥土的整体强度。此外,当玄武岩纤维水泥土试件受外部荷载出现微裂缝时,纤维能有效传递应力,依靠纤维与水泥土的黏结力和拔出时的摩擦阻力,限制或减缓了裂缝的发展。

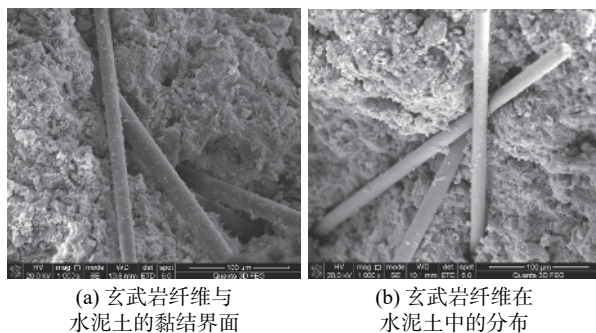


图 10 玄武岩纤维水泥土的微观照片

Fig. 10 Microscopic photograph of basalt fibrous cement soil

## 3 结 语

采用自行研发的类“领结”型模具可制备两端大中间小的变截面对称水泥土试样,在此基础上,开展了玄武岩纤维水泥土单轴抗拉试验和无侧限抗压强度试验,分析了玄武岩纤维长度、直径及掺量对其单轴应力-应变曲线、抗拉强度、拉压强度比和破坏形态的影响规律,并结合扫描电镜试验分析了玄武岩纤维的微观作用机理。主要结论如下:

(1)玄武岩纤维水泥土抗拉强度试验的应力-应变曲线可分为 4 个阶段:弹性变形阶段、破坏阶段、残余强度阶段和荷载稳定降低阶段。玄武岩纤维的掺入可明显改善水泥土的脆性破坏特性,增加水泥土的韧性。

(2)掺入玄武岩纤维能有效提高水泥土的峰值和残余抗拉强度;在本次试验参数内,正交试验极差法分析表明玄武岩纤维对水泥土抗拉强度提升效果的影响主次顺序为:纤维长度、纤维掺量、纤维直径;本次试验参数中,纤维长度 9 mm,掺量 1.5%,直径 17  $\mu\text{m}$  为玄武岩纤维水泥土抗拉最优单掺参数。

(3)玄武岩纤维水泥土的拉压比关系式为  $q_t=(17\%\sim 35\%)q_u$ ,较未掺入纤维水泥土的拉压比 15% 高;纤维种类和掺量对纤维水泥土的拉压比影响较大。

(4)玄武岩纤维在水泥土中呈三维随机网状分布,水泥水化产物将纤维和土颗粒胶结为整体,同时水泥水化产物填充土体孔隙作用,增大了纤维与水泥土间的接触面积,提高了玄武岩纤维与土颗粒间的黏聚力和摩阻力。玄武岩纤维受拉与水泥土产生相对运动趋势时,与之搭接交叉的纤维及内部夹杂的水泥土会阻碍其运动,从而约束了试件的变形,玄武岩纤维有效减缓了应力损失速度,提高了残余强度。

## 参 考 文 献:

- [1] AKBARI H R, SHARAFI H, GOODARZI A R. Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(6): 1470-1482.
- [2] 王毓国, 张爱军, 郭敏霞, 等. 水泥掺量和龄期对渠道水泥土垫层抗拉强度的影响规律[J]. *中国农村水利水电*, 2018(9): 144-148. (WANG Yuguang, ZHANG Aijun, GUO Minxia, et al. The effect of cement content and curing age on the tensile strength of cement soil cushion under a channel[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(9): 144-148. (in Chinese))
- [3] 张华杰, 韩尚宇, 蒋敏敏, 等. NaCl 侵蚀环境下水泥土的宏观特性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2012(2): 49-54. (ZHANG Hua-jie, HAN Shangyu, JIANG Min-min, et al. An analysis of the macro-and-micro properties of cement-soil under NaCl erosion

- environment[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(2): 49-54. (in Chinese))
- [4] GUTIÉRREZ-ORREGO D A, GARCIA-ARISTIZABAL E F, GOMEZ-BOTERO M A. Mechanical and physical properties of soil-cement blocks reinforced with mineral wool and sisal fiber[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(3): 04016225.
- [5] YU H, WU L, LIU W V, et al. Effects of fibers on expansive shotcrete mixtures consisting of calcium sulfoaluminate cement, ordinary Portland cement, and calcium sulfate[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(2): 212-221.
- [6] 李胜男, 骆亚生, 严武庆, 等. 玄武岩纤维加筋土的动本构特性试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 211-216, 223. (LI Shengnan, LUO Yasheng, YAN Wuqing, et al. Experimental research on dynamic constitutive characteristics of basalt fibre-reinforced loess[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(12): 211-216, 223. (in Chinese))
- [7] 戴文亭, 刘德浩, 司泽华, 等. 稻壳灰纤维水泥改性盐渍土的力学性能研究及机理分析[DB/OL]. 公路工程. (2021-04-08)[2021-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20210407.1733.018.html>. (DAI Wenting, LIU Dehao, SI Zehua, et al. Study on mechanical properties and mechanism analysis of modified salted soil with rice husk gray fiber cement[DB/OL]. Highway Engineering. (2021-04-08)[2021-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20210407.1733.018.html>. (in Chinese))
- [8] 刘永翔, 张经双, 段雪雷. 聚丙烯纤维水泥土强度增长机理分析[J]. *中国科技论文*, 2020, 15(6): 622-627. (LIU Yongxiang, ZHANG Jingshuang, DUAN Xuelei. Mechanism analysis of strength growth of polypropylene fiber cement soil[J]. *China Sciencepaper*, 2020, 15(6): 622-627. (in Chinese))
- [9] AYOTHIRAMAN R, SAHU R, BHUYAN P. Strength and deformation behavior of fine-grained soils reinforced with hair fibers and its application in pavement design[DB/OL]. *Journal of Natural Fibers*. (2021-08-12)[2021-12-10]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2021.1954129>.
- [10] YAN L, CHU F L, TUO W Y, et al. Review of research on basalt fibers and basalt fiber-reinforced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, 29(9): 1612-1624.
- [11] XIAO J Z, HAN N, LI Y, et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2021, 15(1): 1-19.
- [12] JOHN V J, DHARMAR B. Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete—A review[J]. *Structural Concrete*, 2021, 22(1): 491-502.
- [13] 陈峰, 童生豪, 任建华, 等. 玄武岩纤维水泥土的抗渗性能研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2021, 38(2): 157-162. (CHEN Feng, TONG Shenghao, REN Jianhua, et al. Impermeability of basalt fiber soil-cement[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2021, 38(2): 157-162. (in Chinese))
- [14] WANG S N, CHEN F Y, XUE Q P, et al. Splitting tensile strength of cement soil reinforced with basalt fibers[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(14): 3110.
- [15] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2015, 73: 166-180.
- [16] FIORE V, SCALICI T, BELLA G D, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2015, 74: 74-94.
- [17] KHAN M, CAO M L. Effect of hybrid basalt fibre length and content on properties of cementitious composites[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2021, 73(10): 487-498.
- [18] 马军庆, 王有熙, 李红梅, 等. 水泥土参数的估算[J]. *建筑科学*, 2009, 25(3): 65-67. (MA Junqing, WANG Youxi, LI Hongmei, et al. Study on the relations of cement-soil parameters with compressive strength[J]. *Building Science*, 2009, 25(3): 65-67. (in Chinese))
- [19] CONSOLI N C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils[J]. *Engineering Geology*, 2014, 169: 61-68.
- [20] 严红霞, 钱玉林, 吕伟华. 水泥土拉压强度变化规律[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2017, 20(1): 64-67, 73. (YAN Hongxia, QIAN Yulin, LÜ Weihua. Characteristics of tensile and compressive strength of cement-treated soil[J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 20(1): 64-67, 73. (in Chinese))

- [21] 殷勇. 玻璃纤维改善水泥土力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. (YIN Yong. Experimental study of improving cement soil's mechanical properties with fiber glass[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese))
- [22] 陈峰. 玄武岩纤维水泥土抗拉性能试验研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2016, 33(2): 188-193. (CHEN Feng. Experiment research on tensile strength of basalt fiber cement-soil[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2016, 33(2): 188-193. (in Chinese))
- [23] 黄耕. PVA纤维水泥土力学性能的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020. (HUANG Geng. Experimental study on mechanical properties of cemented soil reinforced by PVA fiber[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese))

## Experimental study on tensile properties enhancement of cement-treated soil by basalt fiber

ZHANG Guolong<sup>1</sup>, REN Haoming<sup>2,3</sup>, ZHANG Dingwen<sup>2,3</sup>, XU Huimin<sup>4</sup>, SONG Tao<sup>1</sup>

(1. *Anhui Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Corporation Limited, Hefei 230088, China*; 2. *School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China*; 3. *Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 211189, China*; 4. *Central South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China*)

**Abstract:** To investigate the effect of basalt fibers on the tensile properties of cement soil, basalt fibers of different lengths, diameters and doping amounts were selected and incorporated into the cement soil by conducting uniaxial tensile tests, unconfined compressive tests and scanning electron microscopy tests with orthogonal test polarization method. The laws and microscopic mechanisms of the effects of basalt fibers on the stress-strain curve, tensile strength, tensile-compressive strength ratio and damage morphology of the cement soil were analyzed. The results show that: the stress-strain curve of basalt fiber cement soil in uniaxial tensile test can be divided into four stages: elastic deformation, damage, residual strength and stability; in the test, the order of the effect of fiber variables on tensile properties is: length, doping amount and diameter; the basalt fiber with a length of 9 mm and a doping amount of 1.5% is the optimal single doping parameter of basalt fiber. The tensile compression ratio of basalt fiber cement soil is higher than that of unmixed fiber cement soil, but the fiber type and doping amount, etc. have a greater effect on the tensile compression ratio of fiber cement soil; the three-dimensional random mesh distribution of basalt fiber provides reinforcement in the uniaxial tensile stress state of cement soil, which in turn improves the tensile strength and toughness of cement soil.

**Key words:** basalt fibrous cement soil; tensile strength; tension-compression strength ratio; microscopic mechanism