DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.147
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

纤维对水泥土加固效果影响的试验研究

牛雷[1],徐丽娜[1],郑俊杰[2]
(1. 吉林建筑大学 土木工程学院,长春 130118;2. 华中科技大学 土木与水利学院,武汉 430074)

摘　要:将短切玄武岩纤维和水泥掺入取自长春地区的黄土中,进行无侧限抗压强度试验。主要研究纤维掺量、纤维长度对纤维水泥土无侧限抗压强度特性的影响。试验结果表明:同一纤维质量掺入比下,随着纤维长度的增加,纤维水泥土抗压强度大体呈上凸型曲线形式,曲线最终趋于无纤维掺入的水泥土强度,说明纤维分布均匀性和纤维分布密度对强度影响较大;同一纤维长度下,纤维水泥土强度随纤维质量掺入比的增大呈波浪型曲线形式发展,第 1 次波峰值大于第 2 次波峰值,曲线最终趋于某个固定值,在实际工程应用中,可采用初次波峰的掺入量进行水泥土加固,达到预期加固效果的同时,能够大幅降低工程造价;同时,要充分考虑搅拌不均匀性对水泥土强度带来的影响,且不宜采用过长的纤维进行加固,一方面容易形成集束现象,另一方面容易连挂在搅拌器械上。

关键词:玄武岩纤维;水泥土;抗压强度;纤维长度;纤维掺入比
中图分类号:TU411.6　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2021)02-0035-06

Experimental study on the reinforcement effect of fiber on cemented soil

NIU Lei[1], *XU Lina*[1], *ZHENG Junjie*[2]
(1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of fiber content and fiber length on unconfined compressive strength characteristics of fiber reinforced cemented soil which was made of short-cut basalt fiber, cement and soil taken from Changchun, a series of unconfined compressive strength tests were carried out. The results show that the strength of basalt fiber reinforced cemented soil presents a generally convex curve with increase of fiber length, and the curve finally tends to be the strength of cemented soil without fiber under the same fiber contents. It shows that the fiber distribution uniformity and fiber distribution density have great influence on the strength. The strength of basalt fiber reinforced cemented soil presents a wavy curve with increase of fiber content under the same fiber length, the second wave peak value is less than the first wave peak value and the curve finally tends to a constant value. In practical engineering application, the fiber content of the first wave peak can be used in cemented soil reinforcement to achieve the expected reinforcement effect and reduce the project cost. Meanwhile, the impact of uneven mixing on the strength of cemented soil should be fully considered, and excessively long fibers should not be used. On the one

收稿日期:2020-06-12
基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKH20200283KJ)
作者简介:牛雷(1981-),男,博士,主要从事岩土与城市地下工程等研究,E-mail:niulei2016@163.com。
徐丽娜(通信作者),女,博士,副教授,E-mail:xulina@jlju.edu.cn。
Received:2020-06-12
Foundation items: Project Supported by Education Department of Jilin Province (No. JJKH20200283KJ)
Author brief:NIU Lei (1981-), PhD, main research interests: geotechnical and urban underground engineering, E-mail: niulei2016@163.com.
XU Lina (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: xulina@jlju.edu.cn.

hand, long fibers are easy to produce cluster phenomenon; on the other hand, they are easy to be attached to the stirring apparatus.

Keywords: basalt fiber; cemented soil; unconfined compressive strength; fiber length; fiber contens

近年来,学者们将不同的纤维掺入到水泥土中,将土体改良技术中的化学改良法和力学改良法有机结合,形成纤维加筋水泥土,通常简称纤维水泥土。大量研究结果表明,在水泥土中加入聚丙烯纤维[1]、玻璃纤维[2]、聚苯乙烯纤维[3]等纤维材料可以提高水泥土抗压和抗拉强度。

玄武岩纤维抗拉强度高、弹性模量大,具有耐腐蚀、耐高温等特性,在性价比上比其他纤维具有较明显的优势,因此,许多学者开展了玄武岩纤维对水泥土加固效果影响的研究[4-5]。胡建林等[6]发现玄武岩纤维对水泥土抗压、抗拉强度均有所提升,并确定了玄武岩的较优掺入长度和最优掺量范围。陈峰[7-9]发现玄武岩纤维的掺入不仅可以提高水泥土的抗拉强度,还可增强水泥土塑性,对其黏聚力增强效果较为明显。郑俊杰等[10]将玄武岩纤维掺入到微生物固化砂土中,同样可以提高其强度和韧性。徐丽娜等[11]发现将玄武岩纤维掺入到水泥土中可以减缓水泥土在冻融循环作用下的强度损失,提高水泥土的抗冻性能。马芹永等[12]对不同玄武岩纤维掺量的水泥土进行冲击压缩和动态劈裂试验,得到合适掺量的玄武岩纤维对水泥土动态特性起着积极作用,通过试验得出玄武岩纤维的合适掺量。王闵闵等[13]通过动三轴试验,发现水泥土的动强度和动弹性模量与围压、掺入纤维的种类和纤维掺量有关;随着纤维掺量的增多,水泥土的动强度和动弹性模量增大,动变形减小,对比分析后发现掺入玄武岩纤维的水泥土动力性能较好。然而,目前将玄武岩纤维掺入进长春地区黄土的研究很少见到,笔者对此进行了相应的研究,为玄武岩纤维在该地区的应用与推广提供参考。

1 试验方案及测试方法

按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)中的要求进行试验设计。土样为黄土,取自吉林省长春市净月区某施工场地附近,塑限 ω_P 为25%,液限 ω_L 为41%,塑性指数 I_P 为16%。原状土经风干碾碎过筛,密封保存,供试验使用,试验用土的粒径分布曲线如图1所示。采用的水泥为亚泰鼎鹿牌P.O 42.5级水泥,水泥质量掺入比为0.1%,水灰比为0.5。试验选用海宁安捷复合材料有限公司生产的短切玄武岩纤维,其物理力学性质指标如表1所示,掺入纤维长度分别为3、6、12、20、35 mm。试验所用纤维质量掺量入比分别为0%、0.1%、0.3%、0.5%和0.7%。

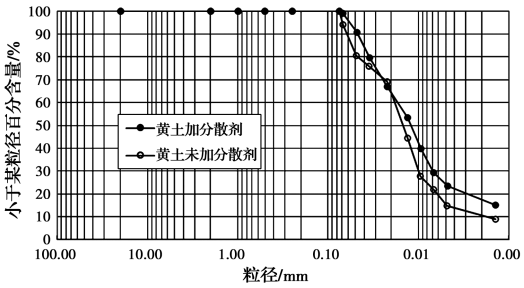


图1 粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve

表1 玄武岩纤维的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of basalt fiber

直径/μm	长度/mm	颜色	抗拉强度/MPa
7~15	3、6、12、20、35	Golden	3 000~4 800
弹性模量/GPa	密度/(g·cm^{-3})	导热系数/(W·(m·K)$^{-1}$)	使用温度/℃
91~110	2.63~2.65	0.03~0.038	−269~650

试样制作采用尺寸为70.7 mm的立方体试模,选用天津市庆达试验仪器制造有限公司生产的70型振动台,振动频率为2 860次/min。采用人工拌和法,拌和时间为6 min。制作好的试件在常温条件下养护3 d后拆模,而后进行28 ℃恒温水养,养护龄期分别为7、14、28 d。

2 试验结果与讨论

2.1 纤维长度影响

图2是纤维长度与抗压强度之间的关系,从图2(a)~(c)可看出,在纤维掺入比不变的条件下,纤维水泥土的抗压强度随纤维长度的增加大体呈先增加后减小的特点。玄武岩纤维的强度比较高,一般不容易断裂,所以,在纤维水泥土破坏的过程中,纤维是被拔出的。

图2(d)是纤维掺入比为0.5%时纤维水泥土抗压强度与纤维长度之间的关系,其中,点 A_7、A_{14}、A_{28} 分别为无纤维水泥土7、14、28 d的强度,而 B_7、

B_{14}、B_{28}为掺入长度为 35 mm 纤维的水泥土 7、14、28 d 的强度。由图 2 可以看出，B_7、B_{14}、B_{28}的值分别接近 A_7、A_{14}、A_{28}的值，点 A 与点 B 之间的强度线将出现峰值。

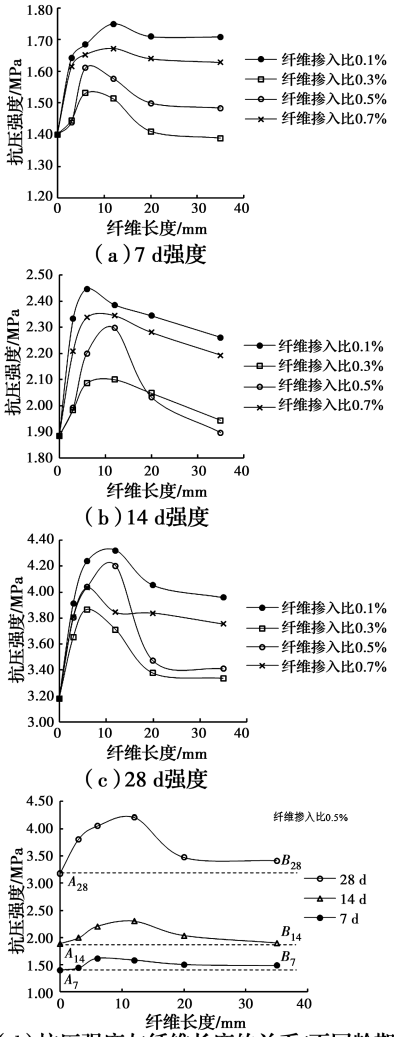


图 2　抗压强度与纤维长度的关系

Fig. 2　Relationship between compressive strength and fiber length

2.2　纤维掺量影响

现有试验条件下，保持纤维长度不变，随着纤维掺入比的增加，纤维水泥土 28 d 的无侧限抗压强度均大体表现出增大—减小—增大的特点，即呈波浪曲线形式，如图 3 所示。

纤维材料能否真正发挥作用，一方面取决于水泥土与纤维之间握裹力的大小，而握裹力与水泥土龄期、土颗粒大小、水泥土密实度和水泥掺量等因素有关，即与水泥土强度成正比；另一方面也取决于纤维的分散程度，对加载后的试件进行观察，发现试件中均有纤维集束无法充分打开的现象，如图 4 所示。

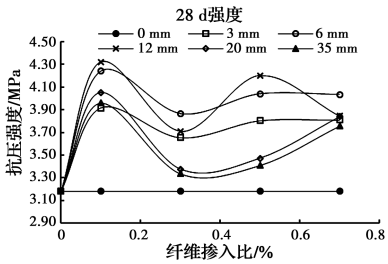


图 3　抗压强度与纤维掺入比的关系

Fig. 3　Relationship between compressive strength and fiber content

图 4　部分破坏后的试件

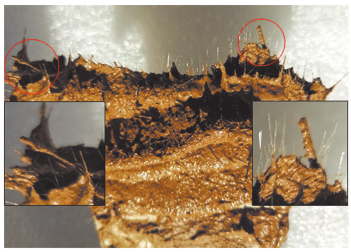
Fig. 4　Photos of some specimens after destruction

这会造成有效纤维掺量减小，如图 5(a)、(b)所示。另外，即便是分散成丝的纤维也存在分布不均的现象，如图 5(c)所示，单位截面内纤维过密和过疏都会对强度产生影响，过密会影响握裹力，过疏起不到加筋的效果，其作用机理与锚杆、锚索作用机理类似，纤维过密会降低水泥土对其锚固力，从而对水泥土强度造成不利影响，如图 6 所示，广义上讲，集束也是纤维不均匀分布的一种体现。

在水泥土强度发展过程中，随着纤维掺入比的增加，上述各方面因素所占权重并不相同，而且相互制约，同时发生，为了描述方便，在每个阶段割舍次要矛盾，使行文更加清晰，并取 12 mm 的纤维水泥土为例，如图 7 所示。随着纤维掺入比的增加，水泥土达至峰值点强度点 A，随着纤维掺入比继续增加，纤维集束的作用凸显，AE 段为强度下降段，其中，点 C 的有效纤维含量与点 D 的含量相同；当掺入比达至点 E 时，纤维集束作用发挥最大，有效纤维含量逐步上升，表现为 EB 段强度上升，点 G 的有效纤维含量与点 D 的水平相当，直至到达新的波峰点 B；第 2 次波峰点 B 数值会低于第 1 次波峰点 A，这是由于纤维集束部位强度弱化导致整体强度的降低；过了第 2 峰值点 B 后，再次出现下滑段 BH，此过程中纤维群锚耦合现象更为凸显，导致最终强度逐渐降低并趋于某个固定数值。

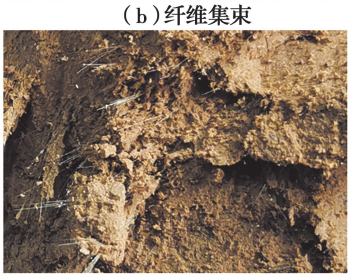
通过分析可知，现有试验条件下，在纤维长度不

变时,纤维水泥土强度随纤维掺入比的增加呈曲线发展,并不是纤维掺入越多越好;随着纤维掺入比的增加,纤维水泥土的强度均高于无纤维的水泥土强度,并且第1次波峰峰值大于第2次波峰峰值;本试验最优纤维掺入比为0.1%,最优纤维长度为12 mm。



(a)试样制备

(b)纤维集束



(c)分散纤维随机分布

图5 纤维分布均匀性

Fig. 5 Uniformity of fiber distribution

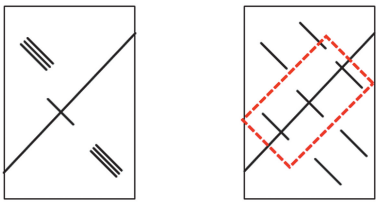


图6 纤维分布均匀性和分布密度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fiber distribution uniformity and density

2.3 龄期影响

纤维水泥土抗压强度与龄期的关系曲线如图8所示,其中,图8(a)、(b)是纤维掺入比不变的情况下,不同纤维长度水泥土强度随龄期的变化规律;图8(c)、(d)是纤维长度不变的情况下,不同纤维掺入比水泥土强度与龄期的关系。无论是按何种坐标整理,其强度均随龄期的增加而增加,这是由于纤维能够充分发挥其作用,主要依赖其抗拔力的大小,水泥水化后,胶结材料与玄武岩纤维之间形成了强大的握裹力和界面摩擦,随着龄期的增加,这种作用将越发明显,一般到90 d才趋于稳定[2]。

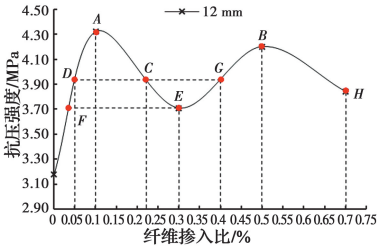
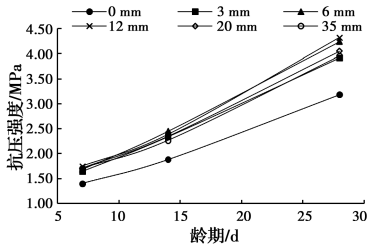
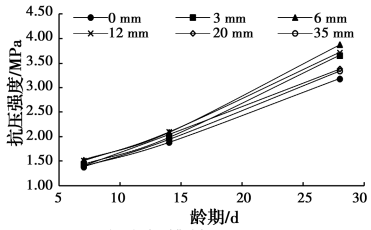


图7 28 d抗压强度与纤维掺入比的关系(12 mm)

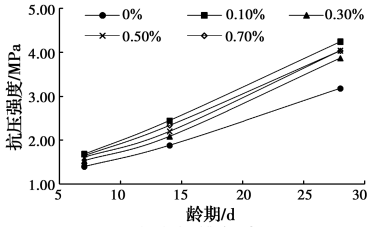
Fig. 7 Relationship between compressive strength and fiber content (12 mm)



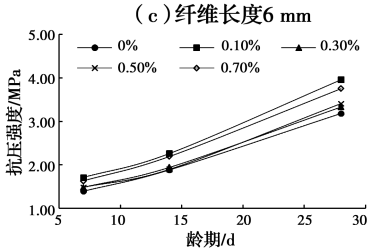
(a)纤维掺入比0.1 %



(b)纤维掺入比0.3 %



(c)纤维长度6 mm



(d)纤维长度35 mm

图8 抗压强度与龄期的关系

Fig. 8 Relationship between compressive strength and curing time

2.4 应力-应变关系

纤维长度为12 mm时,不同纤维掺入比条件下

纤维水泥土的应力-应变曲线如图 9 所示，纤维掺入比 0.7%的应力-应变曲线基本与无纤维掺入的曲线重合，纤维的掺入能够增加水泥土的延性，主要原因是分散的玄武岩纤维能够在水泥土中形成网状结构，与土颗粒共同受力，改善水泥土的工作状态，降低脆性破坏的可能。

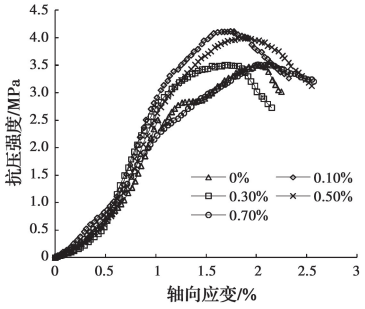


图 9　不同玄武岩纤维掺入比下的应力-应变关系

Fig. 9　Stress-strain relationship with different fiber contents

3　结论

1)在保持纤维质量掺入比不变的条件下，随着纤维长度的增加，纤维水泥土抗压强度大体呈上凸型曲线形式，这与很多学者得出的结论一致。

2)试验条件下，纤维长度不变时，纤维水泥土的强度与纤维掺入比之间整体呈波浪式变化，第 2 次波峰数值会小于第 1 次波峰数值；最优纤维掺入比为 0.1%，最优纤维长度为 12 mm。

3)在实际工程应用中，可采用首次波峰的掺入比进行水泥土加固，且不宜采用较长的纤维，以便能够达到预期的加固效果，节省材料的同时能够降低成本。另外，在制样过程中以及破坏后的试件中，均发现了纤维集束和纤维分布不均的现象。

参考文献：

[1] TANG C S, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(3): 194-202.

[2] 阮波，邓林飞，马超，等. 纤维水泥土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报，2017，14(7)：1415-1419.
RUAN B, DENG L F, MA C, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of fiber reinforced cement soil [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1415-1419. (in Chinese)

[3] 朱定华，董磊平，何峰，等. 聚苯乙烯纤维轻质混合土的抗压强度特性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版)，2010，32(2)：53-57.
ZHU D H, DONG L P, HE F, et al. Compressive strength properties of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene and strengthened by polypropylene fibers [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 32(2): 53-57. (in Chinese)

[4] 鹿群，郭少龙，王闵闵，等. 纤维水泥土力学性能的试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(Sup2)：421-426.
LU Q, GUO S L, WANG M M, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 421-426. (in Chinese)

[5] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 74: 74-94.

[6] 胡建林，杨鑫，崔乃夫，等. 玄武岩纤维对水泥土力学性能的影响效应研究[J]. 水利与建筑工程学报，2017，15(6)：138-142.
HU J L, YANG X, CUI N F, et al. Effects of basalt fiber on mechanical properties of cement soil [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 138-142. (in Chinese)

[7] 陈峰. 玄武岩纤维水泥土抗压强度试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2017，45(2)：212-215.
CHEN F. Experiment study on compressive strength of basalt fiber cement-soil [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 212-215. (in Chinese)

[8] 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 F. 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)

[9] 陈峰. 早龄期玄武岩纤维水泥土的强度及变形特性[J]. 深圳大学学报(理工版)，2017，34(6)：611-617.
CHEN F. Strength and deformation characteristics of basalt fiber cement-soil at early age [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2017, 34(6): 611-617. (in Chinese)

[10] 郑俊杰，宋杨，吴超传，等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2019，47(12)：73-78.
ZHENG J J，SONG Y，WU C C，et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced MICP-treated sand [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)，2019，47(12)：73-78. (in Chinese)

[11] 徐丽娜，牛雷，郑俊杰. 季冻区玄武岩纤维水泥土无侧限抗压强度试验[J]. 土木工程与管理学报，2019，36(6)：132-137.
XU L N，NIU L，ZHENG J J. Experiment on unconfined compression strength characteristics of basalt fiber-reinforced cemented soil in seasonal frozen area [J]. Journal of Civil Engineering and Management，2019，36(6)：132-137. (in Chinese)

[12] 马芹永，高常辉. 冲击荷载下玄武岩纤维水泥土吸能及分形特征[J]. 岩土力学，2018，39(11)：3921-3928，3968.
MA Q Y，GAO C H. Energy absorption and fractal characteristics of basalt fiber-reinforced cement-soil under impact loads [J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(11)：3921-3928，3968. (in Chinese)

[13] 王闵闵，鹿群，郭少龙，等. 循环荷载作用下纤维水泥土动力特性[J]. 岩土力学，2018，39(5)：1753-1760.
WANG M M，LU Q，GUO S L，et al. Dynamic behavior of soil with fiber and cement under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(5)：1753-1760. (in Chinese)

(编辑 胡玲)