

玄武岩纤维加筋黄土动力特性试验研究

赵彤锬, 李依泚, 王一涵, 张鑫帅, 高睿紫, 李刚*

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年1月23日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月27日

摘要

为了分析玄武岩纤维加筋黄土的动力特性, 通过开展动荷载作用下三轴固结不排水剪切试验, 针对含水率为13%的加筋土试样, 分析纤维长度、纤维含量、围压及循环应力比等因素对玄武岩纤维加筋黄土抗剪强度的影响得出结论, 随着纤维长度的增加, 纤维加筋土的动强度随之增加, 且加筋土强度明显高于素土。当纤维长度一定时, 随着纤维含量的提高, 纤维分布更加均匀, 受力更加稳定。随着围压的增加, 纤维加筋土的动强度逐渐提高。在不同循环应力比下, 素土与纤维加筋土的动应变均表现不同状态。且当循环应力较大时, 素土与纤维加筋土的破坏时间也大大缩减。结合试验结果得出, 动荷载下玄武岩纤维加筋土的最优长度为16 mm, 最优含量为0.8%。上述研究对于提升黄土强度有重要参考价值。

关键词

玄武岩纤维, 黄土, 循环应力比, 纤维长度, 纤维含量, 围压

Experimental Study on Dynamic Characteristics of Basalt Fiber Reinforced Loess

Tongkun Zhao, Yiyi Li, Yihan Wang, Xinshuai Zhang, Ruizi Gao, Gang Li*

Shaanxi Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 23rd, 2023; accepted: Feb. 13th, 2023; published: Feb. 27th, 2023

Abstract

In order to analyze the dynamic characteristics of basalt fiber reinforced loess, a triaxial consolidated undrained shear test was carried out under dynamic load to analyze the effects of fiber

*通讯作者。

文章引用: 赵彤锬, 李依泚, 王一涵, 张鑫帅, 高睿紫, 李刚. 玄武岩纤维加筋黄土动力特性试验研究[J]. 土木工程, 2023, 12(2): 149-157. DOI: 10.12677/hjce.2023.122018

length, fiber content, confining pressure and cyclic stress ratio on the shear strength of basalt fiber reinforced loess with a water content of 13%. The results showed that with the increase in fiber length, the dynamic strength of fiber reinforced soil is increased, and the strength of reinforced soil is obviously higher than that of plain soil. When the fiber length is fixed, the fiber distribution is more uniform and the force is more stable with the increase in fiber content. With the increase in confining pressure, the dynamic strength of fiber reinforced soil increases gradually. Under different cyclic stress ratios, the dynamic strain of plain soil and fiber reinforced soil is different. When the cyclic stress is high, the failure time of plain soil and fiber reinforced soil is reduced greatly. Combined with the test results, the optimal length of basalt fiber reinforced soil under dynamic load is 16 mm and the optimal content is 0.8%. The above research has important reference value for improving loess strength.

Keywords

Basalt Fiber, Loess, Cyclic Stress Ratio, Fiber Length, Fiber Content, Confining Pressure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土具有很强的湿陷性, 受水浸湿后容易产生较大的沉陷, 而我国黄土的分布面积达全国土地面积的百分之六, 有五十四万平方公里。黄土高原是地震多发区, 黄土的不稳定性也是我们需要解决的工程问题。吕立强等[1]认为我们应该正确认识黄土的动力特性。由于黄土面积广、影响面大, 并且在我国十分常见, 故对其加筋研究。纤维加筋土整体结构性好, 抗剪强度高。熊雨等[2]通过比较素土与纤维加筋土的抗剪强度, 得出玄武岩纤维土的黏聚力有明显提高。郜晓等[3]通过研究加筋黄土动力特性, 得出结论纤维加筋可以提升黄土强度。汪国刚等[4]通过试验研究得出结论, 纤维加筋土中的含水率越高, 其加筋效果越低。卢浩等[5]通过试验发现, 纤维加筋可以有效提高黄土抗剪强度和抗崩解特性。杨若辰等[6]通过研究得出结论, 合理掺加玄武岩纤维可有效增强黄土抗剪强度。盛维高等[7]通过研究得出, 加筋土的有效应力强度和总应力强度指标明显高于素土。刘思奇等[8]通过研究不同掺量的纤维对土体抗剪强度的影响规律, 得出结论 4%为最佳纤维掺量, 本文也对最优掺量有所研究。左晨希等[9]通过研究纤维加筋土抗压强度得出玄武岩纤维可提高土体抗压强度和程度延性。许健等[10]通过试验研究得出, 玄武岩纤维加筋黄土在干湿循环作用微观结构表现出显著的整体稳定性。胡文乐等[11]通过试验得出结论, 掺入玄武岩纤维能够有效提高黄土抗剪强度。通过以上研究可以发现, 玄武岩加筋有很大研究价值。

为了研究玄武岩纤维加筋黄土的动力特性, 通过开展三轴固结不排水试验, 分析纤维长度、纤维含量、围压及循环应力等因素对于加筋黄土动力特性的影响。研究成果对于提高黄土强度、减少黄土地区地震多发、解决工程问题具有重要的参考价值。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验黄土取自西安市长安区某建筑工地, 取土深度为 2.5 m, 土体呈黄褐色, 土质均匀, 其主要物理性质指标见表 1。

Table 1. Physical properties of loess**表 1.** 黄土物理性质

G_s	ρ (g/cm^3)	w (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P
2.75	1.48	15.2	23.8	13.7	10.1

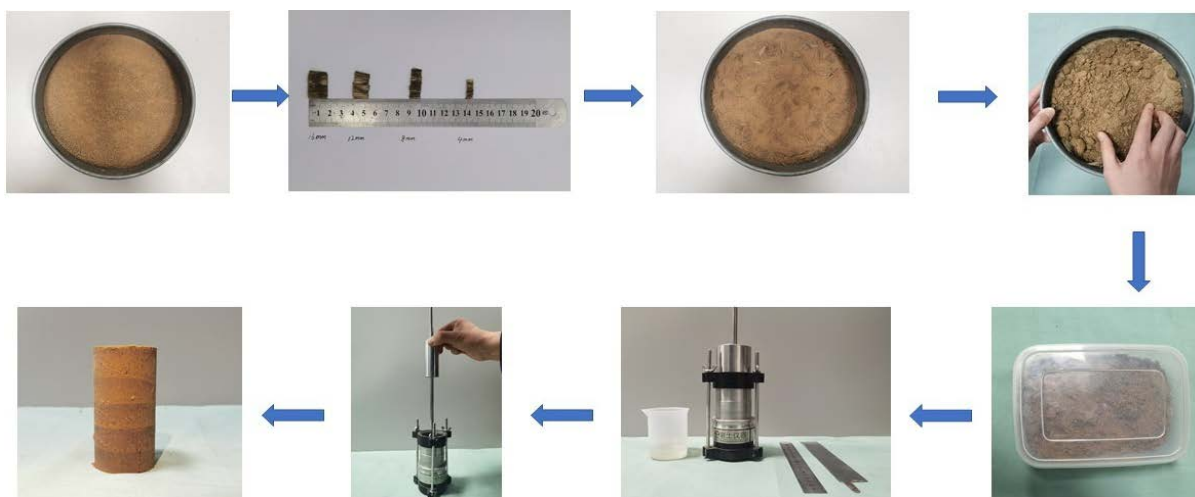
玄武岩纤维购自海宁安捷复合材料有限责任公司, 纤维表面光滑, 呈古铜色, 拆解后呈毛绒状, 可沉于水中, 其主要物理力学性质见表 2。

Table 2. Physical and mechanical properties of basalt fibers**表 2.** 玄武岩纤维物理力学性质

直径 D (μm)	抗拉强度 F_b (MPa)	弹性模量 E (GPa)	密度 ρ (g/cm^3)	断裂延伸率 F_e (%)
10	3500~4500	100	2.65	2.2

2.2. 试样制备

首先取原状风干黄土样用橡皮锤碾碎, 过 2 mm 筛后留存备用。将玄武岩纤维拆解成毛绒状, 取特定长度与掺量的纤维与干土均匀搅拌, 再加入适量水配置成特定含水率下的加筋土。试样尺寸为 50 mm \times 100 mm (直径 \times 高度), 参考土工试验方法标准(GB/T50123-2019), 分 5 层进行制样, 层与层之间进行刮毛处理, 制样流程见图 1。

**Figure 1.** Sample preparation flow chart**图 1.** 制样流程图

2.3. 试验方案

为了分析玄武岩纤维加筋黄土的动力特性, 采用 GDS DYNTTS 型土体动三轴试验机(英国 GDS)开展三轴固结不排水试验。依据土工试验方法标准(GB/T 50123-2019), 试验采用应力控制加载方式, 频率设定为 1 Hz, 循环设定 1000 次, 每个循环记录 100 个数据点, 当轴向应变达到 5% 时停止试验。针对含水率为 13% 的加筋土试样, 通过调整试样围压(25 kPa、50 kPa 及 100 kPa)、纤维长度(4 mm、8 mm、12 mm 及 16 mm)、纤维含量(0.2%、0.4%、0.6% 及 0.8%)及循环应力比(0.15 与 0.20), 来分析各影响因素对于加筋土抗剪强度的影响, 试验方案见表 3, 试验过程中针对每组试样设置 3 次重复试验, 以确保循环动荷载下试验数据的准确性、可靠性。

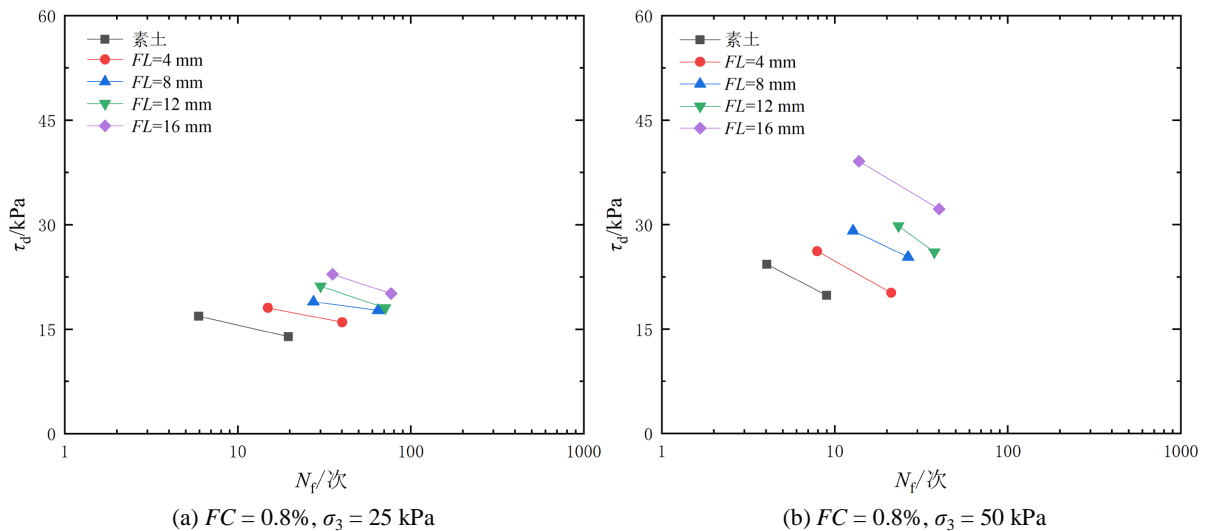
Table 3. Dynamic triaxial test scheme of basalt fiber reinforced loess
表 3. 玄武岩纤维加筋黄土动三轴试验方案

围压 σ_3 /kPa	纤维长度 FL /mm	纤维含量 FC /%	频率/ H_z	循环应力比 CSR
25	0	0	1	0.15, 0.20
	4	0.8	1	0.15, 0.20
	8	0.8	1	0.15, 0.20
	12	0.8	1	0.15, 0.20
	16	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	1	0.15, 0.20
50	0	0	1	0.15, 0.20
	4	0.8	1	0.15, 0.20
	8	0.8	1	0.15, 0.20
	12	0.8	1	0.15, 0.20
	16	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	1	0.15, 0.20
100	0	0	1	0.15, 0.20
	4	0.8	1	0.15, 0.20
	8	0.8	1	0.15, 0.20
	12	0.8	1	0.15, 0.20
	16	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	1	0.15, 0.20

3. 结果与分析

3.1. 纤维长度影响分析

图 2 为纤维长度对加筋土动强度 - 振次影响曲线。由图可见，素土与纤维加筋土的动强度均随着振动次数的增加而降低，而随着纤维长度的增加而显著提升。当围压为 25 kPa 时，纤维长度为 4 mm、8 mm、12 mm 及 16 mm 时加筋土的动强度相比于素土分别提高了 5.9%、11.8%、24%、35.3%。当围压为 50kPa 时，纤维长度为 4 mm、8 mm、12 mm 及 16 mm 时加筋土的动强度相比于素土分别提高了 8.3%、20.8%、



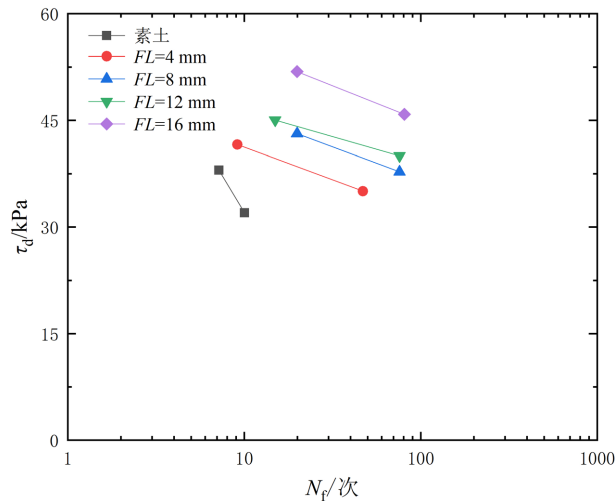
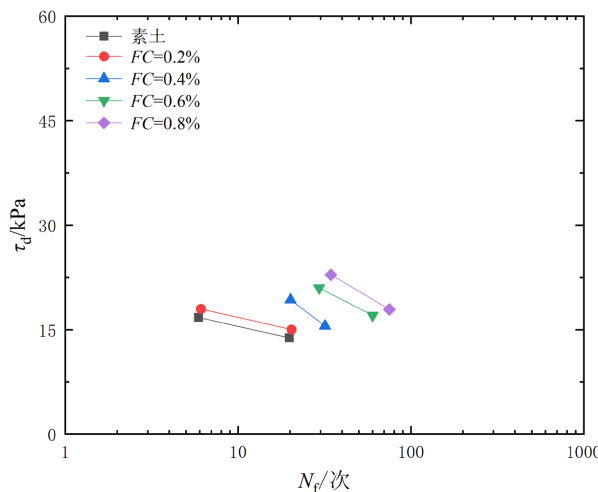
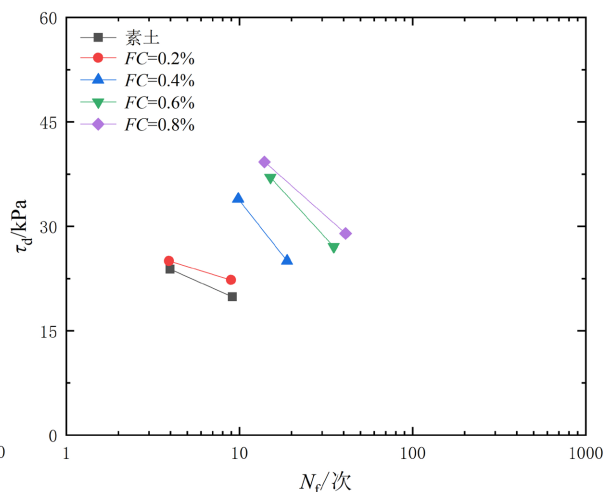
(c) $FC = 0.8\%$, $\sigma_3 = 100$ kPa

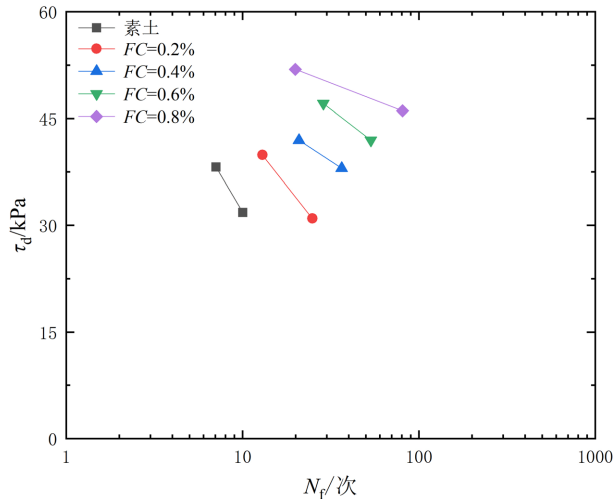
Figure 2. Influence curve of fiber length on dynamic strength-vibration times of reinforced soil
图 2. 纤维长度对加筋土动强度 - 振次影响曲线

22.9%、62.5%。当围压为 100kPa 时，纤维长度为 4 mm、8 mm、12 mm、16 mm 时加筋土的动强度相比于素土分别提高了 9.5%、13.1%、18.4%、36.8%。由此可以得出，在纤维长度较短时，纤维无法对土颗粒进行缠绕，纤维 - 土间的相互约束不强，当有外部荷载时纤维易被拔出。而随着纤维长度的增加，缠绕作用增强，约束作用提高，纤维对土体的加固作用越显著，最优纤维长度为 16 mm。

3.2. 纤维含量影响分析

图 3 为纤维含量对加筋土动强度 - 振次影响曲线。由图可见，纤维加筋土与素土的动强度均随着振动次数的增加而减小，且纤维加筋土的动强度曲线均高于素土的动强度曲线。当围压为 25 kPa 时，纤维掺量为 0.2%、0.4%、0.6% 及 0.8% 时加筋土的动强度较素土分别提高了 5.9%、13.5%、23.5%、35.3%。当围压为 50 kPa 时，纤维掺量为 0.2%、0.4%、0.6% 及 0.8% 时加筋土的动强度较素土分别提高了 4.2%、41.7%、54.2%、62.5%。当围压为 100 kPa 时，纤维掺量为 0.2%、0.4%、0.6% 及 0.8% 时加筋土的动强度较素土分别提高了 5.3%、10.5%、23.7%、36.8%。由此可以得出，当纤维含量较少时，纤维 - 土接触面

(a) $FL = 16$ mm, $\sigma_3 = 25$ kPa(b) $FL = 16$ mm, $\sigma_3 = 50$ kPa



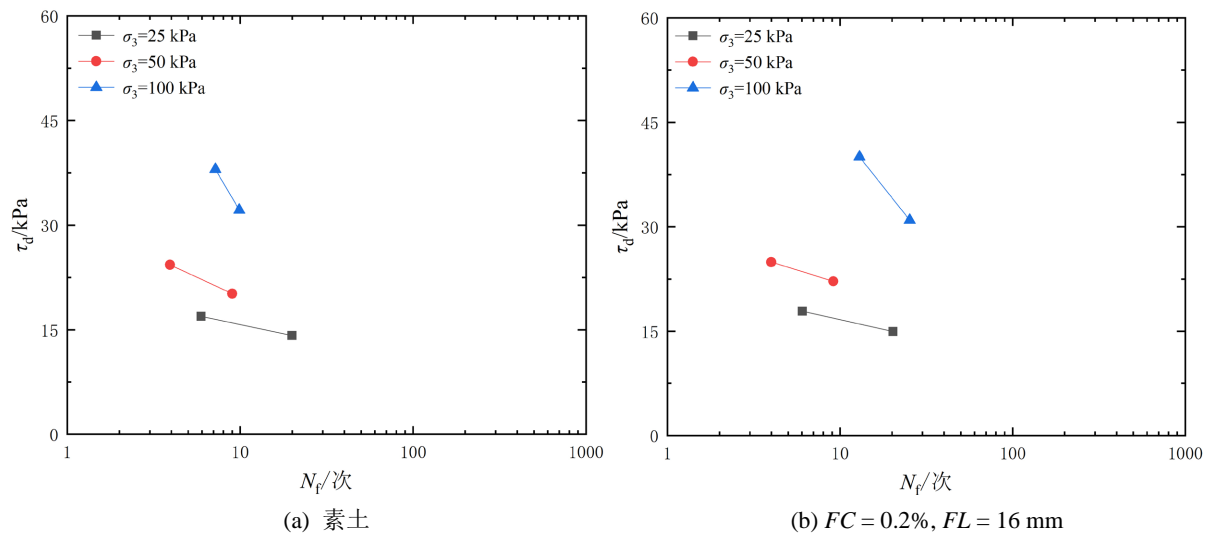
(c) $FL = 16 \text{ mm}, \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

Figure 3. Influence curve of fiber content on dynamic strength-vibration times of reinforced soil
图 3. 纤维掺量对加筋土动强度 - 振次影响曲线

积小，土体的部分区域改良不显著。随着纤维掺量的增加，纤维 - 土接触面积增大，强度逐步得到提升，即最优纤维掺量为 0.8%。

3.3. 围压影响分析

图 4 为围压对加筋土动强度 - 振次影响曲线。由图可见，素土与加筋土的动强度均随围压的提高而上升，且加筋土的动强度显著高于素土动强度。对于素土而言，50 kPa 与 100 kPa 围压较 25 kPa 围压下动强度分别提高了 41%、123.5%。当纤维含量为 0.2% 时，25 kPa、50 kPa、100 kPa 围压下的加筋土较对应围压下的素土动强度分别提高了 5.9%、4.1%、5.3%。当纤维含量为 0.8% 时，25 kPa、50 kPa 及 100 kPa 围压下的加筋土较对应围压下素土的动强度分别提高了 35.3%、62.5%、36.8%。总体来看，随着围压的提高和纤维掺量的增加，土体的动强度显著提高。主要原因在于随着围压的增大，土颗粒被挤密，纤维与土颗粒间接触更加充分，从而增强了土体的抗变形能力。此外，由于纤维在土体内均匀分布并相互交织形成复杂结构。在受到外界动荷载时，能起到连接周围土颗粒的作用，并限制土体裂缝的发展。



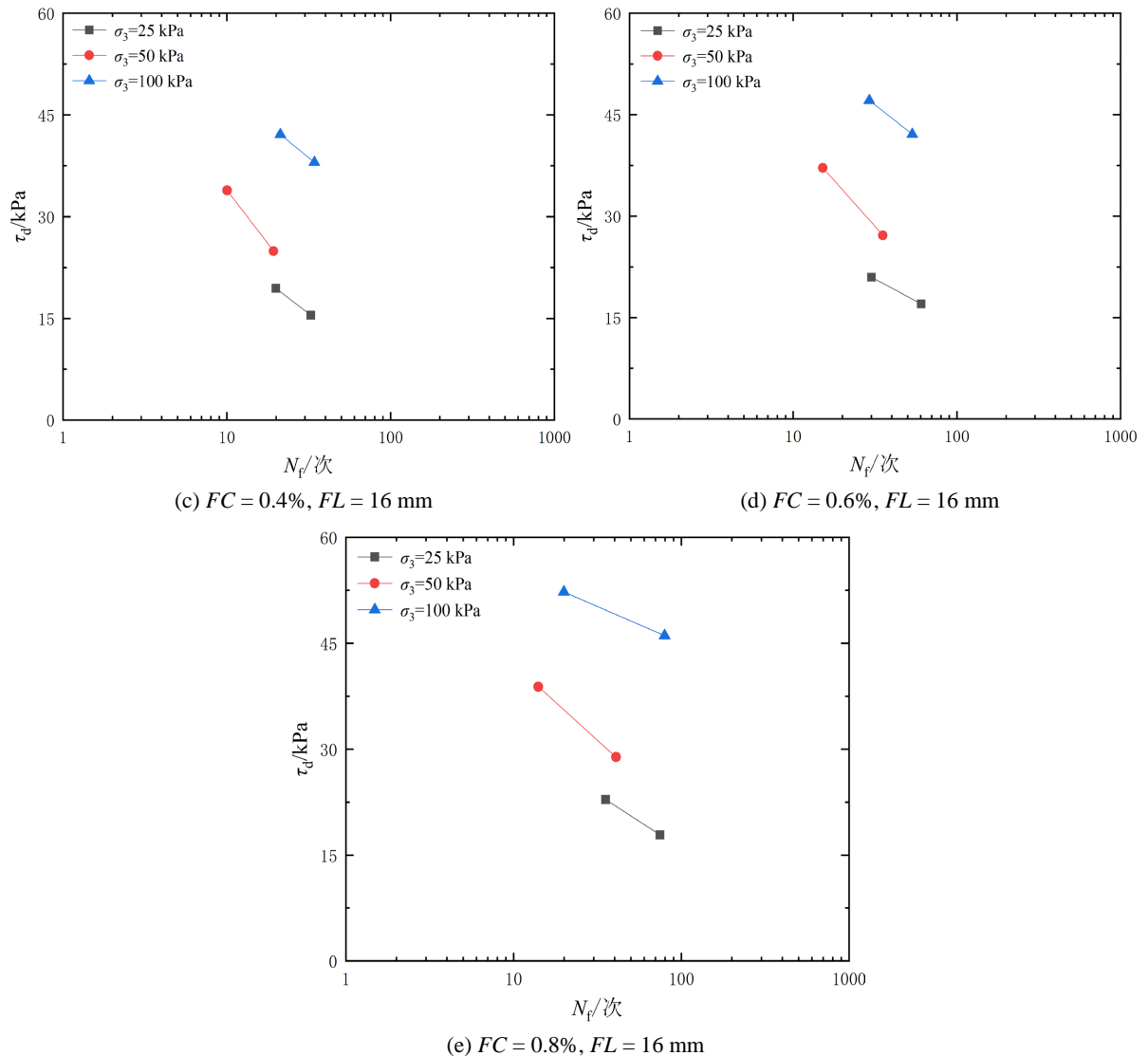


Figure 4. Influence curve of confining pressure on dynamic strength-vibration frequency of reinforced soil
图 4. 围压对加筋土动强度 - 振次影响曲线

3.4. 循环应力比影响分析

图 5 为循环应力比对加筋土动应变 - 振次影响曲线。由图可见, 循环应力比对土体的变形有显著影响。土体的动应变随着振动次数的增加先增加后逐渐趋于稳定, 而随着循环应力比的增加而增大, 且加筋土动应变显著低于素土。当振动达到 200 次后, 土体的累积变形增长速率降低并趋于稳定, 表明在前 200 次的振动过程中土体逐渐被压密, 此时产生的变形是塑性变形。经过 200 次动荷载作用后, 由于土体的低压缩性, 此时的变形转为弹性变形。这一结论与高海军[12]等研究结论一致。

4. 结论

1) 随着纤维长度的增加, 纤维加筋土的动强度随之增加, 且加筋土强度明显高于素土。当纤维长度较高时, 纤维嵌固在土体内部较深, 使得纤维与土体成为一个整体, 使得受力更加均匀, 从而提高试样的动强度。

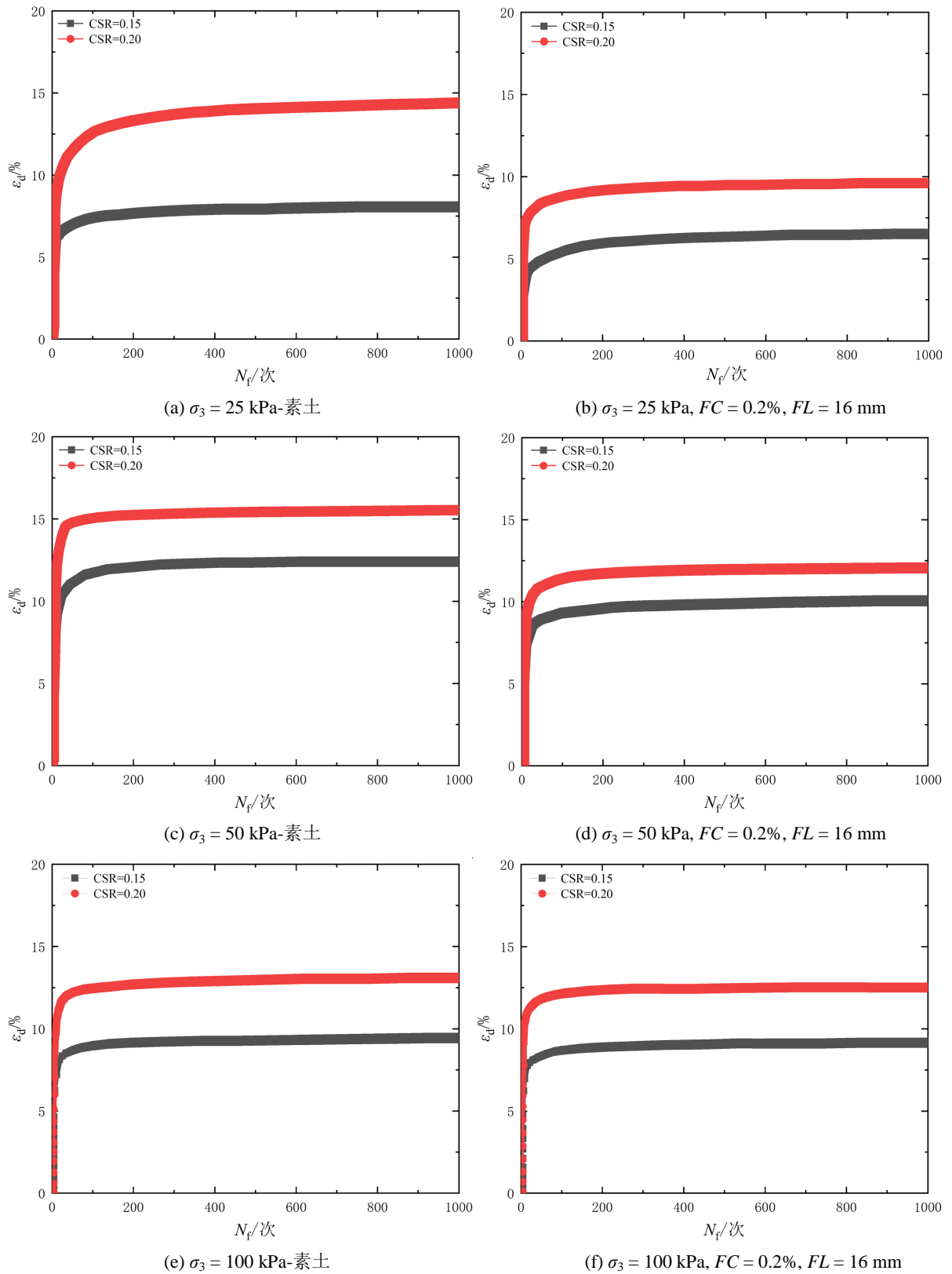


Figure 5. Relationship between dynamic strain and vibration frequency
图 5. 动应变与振次关系

2) 随着纤维含量的增加, 纤维加筋土动强度随之增大。当纤维长度一定时, 随着纤维含量的提高, 纤维分布更加均匀, 受力更加稳定。当试样承受循环动荷载作用时, 纤维较强的抗拉性能将进一步阻止试样破坏。

3) 随着围压的增加, 纤维加筋土的动强度逐渐提高。当纤维长度与纤维含量一定时, 随着围压的增加, 土颗粒间距减小, 纤维与土颗粒更紧密结合, 且纤维交织形成的空间网络结构将进一步对土颗粒进行围箍, 阻止试样被剪切破坏。

4) 随着循环应力比的增加, 纤维加筋土的动应变随之增大, 表明加筋土的动应变随着动力的增加而增大。随着围压的增加, 纤维与土颗粒间的接触越来越紧密, 接触点也越多, 导致纤维与土颗粒间的界面力增强。当试样承受外荷载作用时, 纤维会分担土体所承受的荷载, 即二者共同承担外部荷载, 从而进一步提高纤维加筋土的动强度。

致 谢

本研究由西京学院大学生创新创业训练计划专项基金(X202212715068)资助。

参考文献

- [1] 吕立强, 邵生俊, 龙吉勇. 对黄土基本动力特性的认识[J]. 地下水, 2007, 29(6): 109-111.
- [2] 熊雨, 邓华锋, 彭萌, 等. 四种人工合成纤维加筋黄土的抗剪特性[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 122-126, 133.
- [3] 郜晓, 刘妮娜, 李俊, 韩一开, 飞菲. 加筋黄土的动力特性研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(4): 854-864. <https://doi.org/10.20000/j.1000-0844.20210714001>
- [4] 汪国刚, 骆亚生, 李沛达, 等. 纤维加筋黄土的三轴蠕变试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7602-7608.
- [5] 卢浩, 晏长根, 贾卓龙, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土的抗剪强度和崩解特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 82-92.
- [6] 杨若辰, 张吾渝, 童国庆, 刘成奎. 玄武岩纤维加筋黄土力学性质及微观机理研究[J]. 青海大学学报, 2022, 40(6): 61-67. <https://doi.org/10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2022.06.010>
- [7] 盛维高, 支远哲, 王娜, 等. 芦苇加筋土工程特性室内试验研究[J]. 水力发电, 2010, 36(12): 95-97.
- [8] 刘思奇, 孙皓, 冯文泉, 等. 木质纤维加筋土体力学性能试验研究[J]. 工程建设, 2015, 47(6): 17-20.
- [9] 左晨希, 孙树林, 黄曼捷, 高诗钦, 张岩. 黄原胶和玄武岩纤维改良黄土抗压强度试验研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(1): 57-61.
- [10] 许健, 武智鹏, 陈辉. 干湿循环效应下玄武岩纤维加筋黄土三轴剪切力学行为研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 28-36. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2021.0805>
- [11] 胡文乐, 何朋立, 刘华, 谷宏全, 胡鹏飞, 王梦南, 冯旭晨. 玄武岩纤维加筋黄土力学参数优化试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 222-227. <https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.037>
- [12] 高海军, 董丁明, 赵琪, 叶万军, 景宏君, 董琪. 循环荷载作用下加筋土路基动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 208-215+230. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.201910031>