DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.057
开放科学(资源服务)标识码OSID:

纤维加筋花岗岩残积土的动单剪特性

刘飞禹[1],付晨[1],余炜[2]
(1.上海大学 力学与工程科学学院,上海 200444; 2.浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司,杭州 310030)

摘　要:为了研究纤维加筋花岗岩残积土的循环剪切特性,将聚丙烯纤维掺入到残积土中,通过循环单剪仪对纤维加筋残积土进行水平循环单剪试验,分析纤维掺量(0%、0.3%、0.6%、0.9%)、循环应力比(0.15、0.20、0.25、0.30)对花岗岩残积土动力特性的影响。结果表明:动剪应变随循环应力比的增大而增大,纤维的加入有效抑制了残积土动剪应变的发展,且纤维掺量越高,动剪应变越小;纤维提高了残积土的临界循环应力比,在临界循环应力比下,加筋试样破坏时的循环次数远大于未加筋试样,表明纤维的加入增大了土体的韧性,大大延缓了土样达到破坏的时间;在同一循环应力比下,纤维掺量越大,动剪切模量和阻尼比越大;对于动剪切模量而言,循环应力比越小,纤维加筋的优势越明显。对H-D模型进行改进,改进后的模型可用来分析不同循环应力比、不同纤维掺量下花岗岩残积土的动力响应。

关键词:花岗岩残积土;纤维加筋;剪切特性;循环单剪;循环应力比;剪切应变
中图分类号:TU443　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-6717(2026)04-0013-10

Dynamic simple shear characteristics of fiber-reinforced granitic residual soil

LIU Feiyu[1], *FU Chen*[1], *YU Wei*[2]
(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China;
2. Zhejiang Huadong Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, P. R. China)

Abstract: In order to study the cyclic shear characteristics of fiber-reinforced granitic residual soil, polypropylene fibers were mixed into the residual soil. The horizontal cyclic simple shear test of fiber-reinforced residual soil was carried out using a cyclic simple shear apparatus. The influence of different fiber contents (0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%) and cyclic stress ratios (0.15, 0.20, 0.25, 0.30) on the dynamic characteristics of granitic residual soil was analyzed. The test results show that with the increase of cyclic stress ratio, the dynamic shear strain increases. The addition of fibers effectively restrained the development of dynamic shear strain of residual soil, and the higher the fiber content, the smaller the dynamic shear strain. Fibers increase the critical cyclic stress ratio of the residual soil. Under the critical cyclic stress ratio, the number of cycles at failure for reinforced samples is much greater than that for unreinforced ones. This indicates that the addition of fibers increased the toughness of the soil and greatly prolonged the failure time of the soil sample. Under the same cyclic stress ratio, the larger the fiber content, the greater the dynamic shear modulus and damping ratio. For the dynamic

收稿日期:2024-03-08
基金项目:国家自然科学基金(52378355、52078285)
作者简介:刘飞禹(1976-),男,教授,主要从事加筋土和土动力学研究,E-mail:lfyzju@shu.edu.cn。
Received: 2024-03-08
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52378355, 52078285)
Author brief: LIU Feiyu(1976-), professor, main research interests: reinforced soil and soil dynamics, E-mai: lfyzju@shu.edu.cn.

shear modulus, the smaller the cyclic stress ratio, the more obvious the advantage of fiber reinforcement. The improved H-D model can be used to analyze the dynamic response of granitic residual soil under different cyclic stress ratios and different fiber contents.

Keywords: granitic residual soil; fiber reinforcement; shear characteristics; cyclic simple shear; cyclic stress ratio; shear strain

花岗岩残积土广泛分布于中国东南沿海地区[1],作为回填土常用于边坡和地基工程中[2]。然而,其黏土成分以高岭石为主,高岭石具有强亲水性及遇水易分解等特性,这些特性导致花岗岩残积土填筑路基在降雨和外力作用下发生变形、塌陷甚至形成灾难性滑坡[3]。因此,为满足工程需求,花岗岩残积土作为回填土需进行特殊处理以改善其性能。近年来,人工合成纤维因延展性高、耐久性好、成本低等优点被广泛应用于岩土加固,成为改良土体研究的热点之一[3]。

目前针对纤维加筋土静力特性的研究成果颇丰。Bu等[4]分析了干湿循环作用下纤维对黏土开裂特性的影响,结果表明,纤维能有效减少纵横裂缝的发展。Correia等[5]、Arabani等[6]和Bao等[7]发现,纤维的加入能有效提高土体的强度和抗变形能力。Reza Tabakouei等[8]发现,纤维长度、种类以及试样尺寸的耦合作用对砂质土力学性能影响很大。Owino等[9]通过固结试验研究了纤维长度对固结系数、渗透系数等的影响,提出了玄武岩纤维最佳材料组合方案和相关分析方程。Yang等[10]通过数值双轴试验研究了纤维加筋土的应力-剪胀关系。Ganiev等[11]通过三轴压缩试验研究发现,纤维含量的增加会降低砂土的初始刚度。Liu等[12]发现,随着冻融循环次数的增加,纤维加筋土的强度呈指数递减,纤维的加入会减弱冻融土的软化程度。刘飞禹等[13]通过在淤泥中添加聚丙烯纤维来缓解电渗法加固淤泥过程中土体开裂严重的问题,以达到提高电渗效果的目的。孟欣等[14]、范炜等[15]通过室内试验和数值模拟探究碳纤维对混凝土强度特性、变形特性的影响发现,碳纤维含量为0.2%时,混凝土动态抗压强度最大。郑俊杰等[16]发现,MICP联合纤维加筋技术显著提高了砂土的力学性能。

在纤维加筋残积土方面,Tamassoki等[17]以椰子纤维和活性炭来改善两种残积土的性能,通过直剪试验和无侧限抗压试验确定的抗剪强度参数和弹性模量来预测其CBR。关于纤维加筋土的动力特性已有一些研究。Reehana等[18]研究了循环荷载下纤维对膨胀土动力性能的影响,结果表明,纤维的加入降低了土体的孔隙率,增强了土体的完整性。Oliveira等[19]发现,在动荷载下钢纤维能调动自身的抗拉强度来补偿循环过程中土体胶结键的破坏。Zhao等[20]研究表明,纤维长度、围压等对土体动剪切模量和阻尼比有较大影响。Sheikhi等[21]通过施加应变控制循环荷载研究夯土构件的循环性能发现,在纤维含量大于2%时,试件在循环荷载下的表现最理想。Wang等[22]讨论了累积塑性应变与加载循环次数随纤维含量、纤维长度、黏结剂添加量和冻融循环次数的变化关系,建立的临界动应力力学模型为季节性冻土区铁路路基长期累积变形的控制提供了有效的方法和参考依据。

目前对纤维加筋残积土的研究大多聚焦于静力特性方面,关于动荷载下纤维加筋残积土力学性能的研究鲜有报道,因此,有必要探究纤维加筋花岗岩残积土在循环荷载下的力学性能。笔者通过动单剪仪进行水平循环剪切试验,探究纤维掺量、循环应力比对花岗岩残积土动力特性的影响,为纤维加筋花岗岩残积土的工程实践提供理论依据。

1 试验材料、设备及方案

1.1 试验设备

试验采用的循环单剪仪如图1所示,其既能做水平循环剪切试验,也能做水平、竖向双向循环试验。表1为动单剪仪各部件量程。

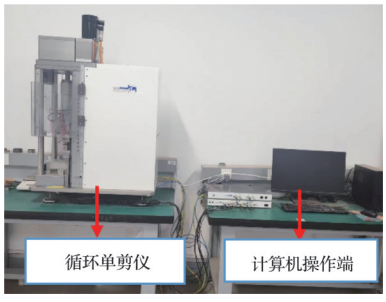


图1 GDS循环单剪仪

Fig. 1 GDS cyclic simple shear apparatus

表1 EMDCSS各部件量程

Table 1 Ranges of parts in EMDCSS

位移范围/mm	最大加载频率/Hz	加荷范围/kN	试样尺寸
轴向:±25、剪切:±15	5	轴向:5、剪切:2	直径50 mm、最大高度25 mm

1.2　试验材料

试验土样为取自广州市的花岗岩残积土，土样为棕红色，将土体烘干，压碎，过 2 mm 筛，其物理参数见表 2。选用聚丙烯纤维对土体进行加筋，纤维长度为 5 mm，加筋效果如图 2 所示。试样为直径 50 mm、高度 20 mm 的圆柱形土样。

表 2　花岗岩残积土的基本物理参数

Table 2　Basic physical parameters of granitic residual soil

最大干密/(g/cm^3)	最优含水率/%	天然含水率/%	塑限/%	液限/%
1.52	14	23.9	22.6	40

图 2　纤维加筋残积土

Fig. 2　Fiber-reinforced residual soil

1.3　试验方案

试验采用应力控制，在 100 kPa 的竖向应力下固结，采用正弦波加载，加载频率为 1 Hz，其函数为

$$y = \tau_d \sin(2\pi t) \tag{1}$$

式中：τ_d 为动荷载幅值，定义循环应力比为动荷载幅值 τ_d 与竖向固结应力的比值。试验土样的含水率为 14%，压实度为 95%，控制干密度为 1.44 g/cm^3。纤维加筋土在配制的过程中采用干拌法，即先加纤维，后配含水率，聚丙烯纤维的物理参数见表 3。纤维掺量 f_r 是指纤维的质量与花岗岩残积土干重的比值，试验方案见表 4。

表 3　聚丙烯纤维的基本物理参数

Table 3　Basic physical parameters of polypropylene fibers

密度/(g/cm^3)	直径/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	拉伸极限/%
0.91	0.048	395	3 500	17

表 4　试验方案

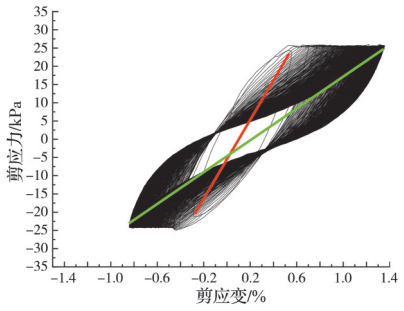
Table 4　Test schemes

纤维掺量 f_r/%	循环应力比
0	0.15、0.20、0.25、0.27、0.28、0.29、0.30、0.305
0.3	0.15、0.20、0.25、0.28、0.29、0.30、0.305、0.31
0.6	0.15、0.20、0.25、0.29、0.30、0.31、0.32、0.325
0.9	0.15、0.20、0.25、0.30、0.31、0.32、0.33、0.335

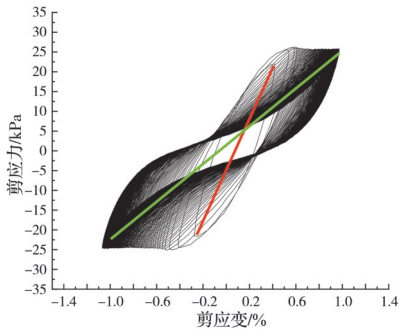
2　试验结果与分析

2.1　纤维掺量对滞回曲线的影响

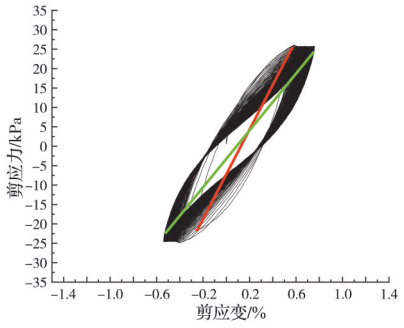
图 3 所示为不同纤维掺量剪切应力-剪切应变滞回曲线，滞回曲线的倾斜程度反映了土体刚度的大小，滞回曲线越向 x 轴倾斜，刚度越小；越远离 x 轴，刚度越大，为了更加直观地表现土体刚度的变



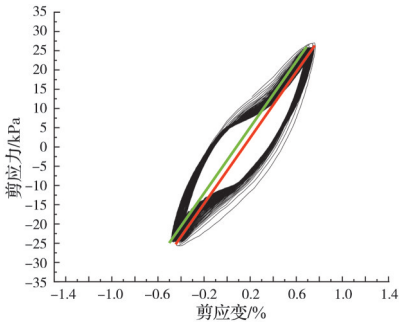
(a) f_r=0



(b) f_r=0.3%



(c) f_r=0.6%



(d) f_r=0.9%

图 3　CSR 为 0.25 时，不同纤维掺量下残积土的滞回曲线

Fig. 3　Hysteresis curves of residual soil under different fiber contents at CSR = 0.25

化趋势,引入红线和绿线,红线表示第一个滞回曲线的倾斜程度,绿线表示最后一个滞回曲线的倾斜程度。由于同一循环应力比(CSR)下不同纤维掺量的滞回曲线变化规律相似,故以CSR等于0.25为例,展示不同纤维掺量下残积土的滞回曲线。由图3可以明显看出,与其他纤维掺量下的土体滞回曲线相比,纤维掺量为0的土体滞回曲线发生了更大的倾斜,随着纤维数量的增大,滞回曲线倾斜的速度和幅度均减小。尤其当纤维掺量为0.9%时,滞回曲线的每个圈之间呈现平行而非倾斜的状态,即刚度在循环剪切过程中没有发生明显变化,表明纤维能有效限制滞回曲线的倾斜。

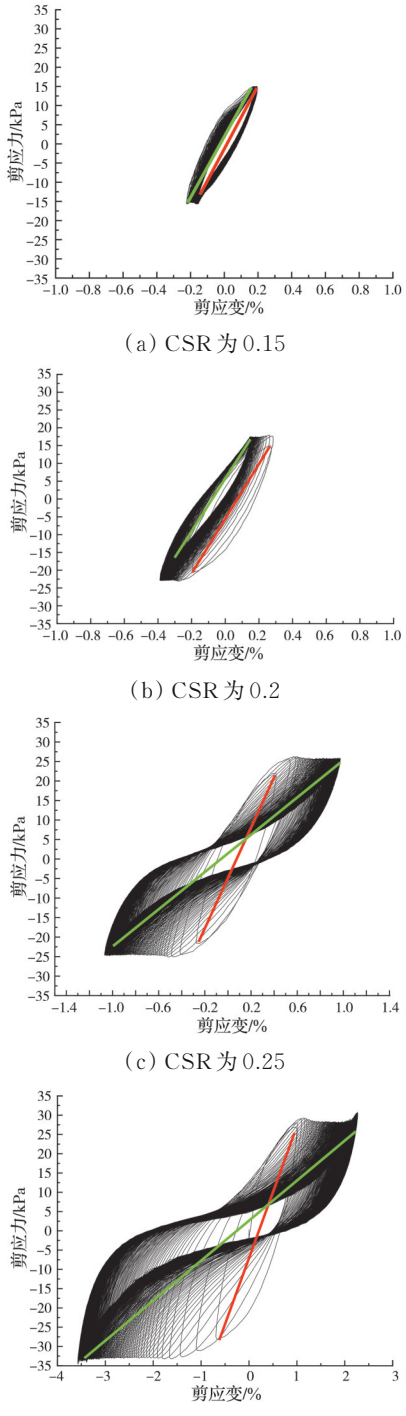
2.2 循环应力比对滞回曲线的影响

图4所示为f_r为0.3%时不同循环应力比下残积土的滞回曲线。当CSR为0.15时,滞回曲线呈平行状态,且圈与圈之间排列紧密,即在低CSR下土体刚度并没有发生变化。当CSR为0.20时,滞回曲线之间仍保持平行的状态,但滞回圈之间的间距变大,密度减小;随着CSR的继续增大,滞回曲线整体逐渐向x轴倾斜,滞回曲线之间发生交叉,排列稀疏。表明随着CSR的增大,纤维加筋的残积土整体刚度逐渐较小。

2.3 纤维掺量对动剪应变的影响

动剪应变定义为$\gamma=S/H_0$,如图5所示,S为水平剪切位移,H_0为试样剪切前的初始高度。如果试样不发生破坏,动剪应变随循环次数变化的过程可分为2个阶段,压密阶段和剪切阶段;试样发生破坏时,可分为压密、剪切和破坏阶段。如图6所示,不发生破坏时,曲线呈对数增长模式,变形增加的速度越来越慢,最终趋于平缓;而发生破坏时,曲线呈指数增长,切线斜率越来越大,应变增长速度越来越快,最终试样破坏。

同一循环应力比下不同纤维掺量的动剪应变变化规律相似,以CSR等于0.25为例,不同纤维掺量下残积土动剪应变随循环次数的变化曲线如图7所示。从图7可以看出,未加筋残积土动剪应变远大于加筋残积土,随着纤维掺量的增加,残积土动剪应变分别为1.92%、0.96%、0.74%、0.28%,说明纤维能有效抑制花岗岩残积土的动剪应变。这是因为聚丙烯纤维不仅自身具有较好的抗拉性能,且纤维与土颗粒之间会产生摩擦力。随着纤维数量的增加,纤维与土颗粒之间的接触面积增大,导致二者之间的摩擦力上升,从而增强土体的抗变形能力。



(a) CSR为0.15

(b) CSR为0.2

(c) CSR为0.25

(d) CSR为0.3

图4 f_r=0.3%时,不同CSR下残积土的滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves of residual soil under different CSR at f_r=0.3%

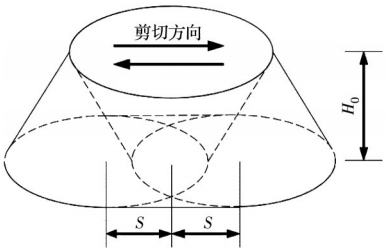
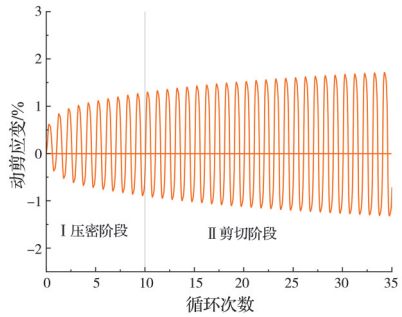
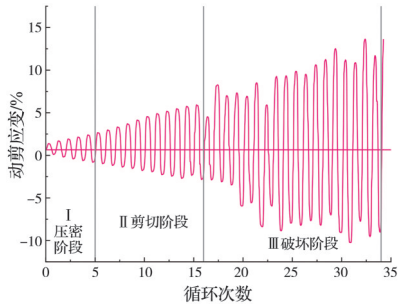


图5 动剪应变示意图

Fig. 5 Dynamic shear strain diagram



（a）不破坏模式



（b）破坏模式

图 6　动剪应变时程曲线

Fig. 6　Dynamic shear strain-time curves

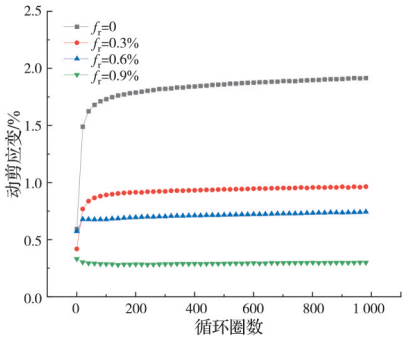


图 7　CSR 为 0.25 时不同纤维掺量下残积土动应变随循环次数的变化曲线

Fig. 7　Dynamic strain of residual soil with different fiber contents varying with the number of cycles at CSR = 0.25

2.4　循环应力比对动剪应变的影响

图 8 所示为纤维掺量为 0 时不同 CSR 下花岗岩残积土动剪应变的变化规律。由图 8 可知，CSR 越大，残积土的动剪应变越大。当 CSR 由 0.15 增加至 0.20、0.25、0.30 时，相应的动剪应变分别增加了 0.49%、1.69%、4.24%。即 CSR 虽然是等幅增加，但土体的变形却是成倍增加。

图 9 所示为 N=1 000 时不同 CSR 下残积土动剪应变随纤维掺量变化曲线。当 CSR 为 0.15 和 0.20 时，随着纤维掺量的增加，动剪应变变化很小，尤其当 CSR 为 0.15 时，动剪应变随纤维掺量的变化基本保持不变，即在 CSR 较小时，纤维在土中没有发生变形，未发挥出限制土体变形的能力。因此，纤维的数量并不影响土体应变的大小；当 CSR

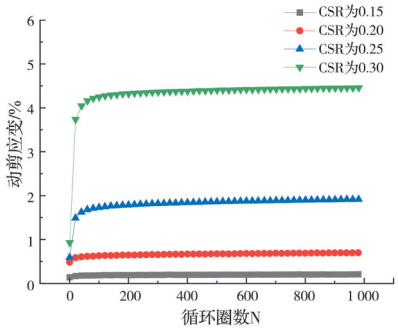


图 8　f_r=0 时不同 CSR 下残积土动剪应变与循环圈数的关系曲线

Fig. 8　Relationship curves between dynamic shear strain and number of cycles of residual soil under different CSR at f_r = 0

为 0.25 时，动剪应变随纤维掺量的增加分别减少了 0.956%、1.174%、1.62%；当 CSR 为 0.30 时，动剪应变分别减少了 1.842%、2.594%、2.883%，即在试样不发生破坏的前提下，CSR 越大，纤维对残积土动应变发展的约束作用越大。这是因为纤维在土体中分散，并相互交织在一起，形成纤维网络骨架。在剪切过程中，纤维受到土体的变形影响越大，土体受到纤维网的约束力作用越大。当然纤维的掺量并不是越多越好，纤维过多，纤维与土颗粒之间的摩擦力降低，纤维与纤维之间的接触力增加，在土中容易发生团聚现象，形成潜在的薄弱面，加筋效果被削弱。

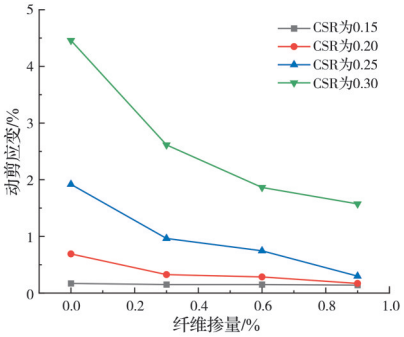
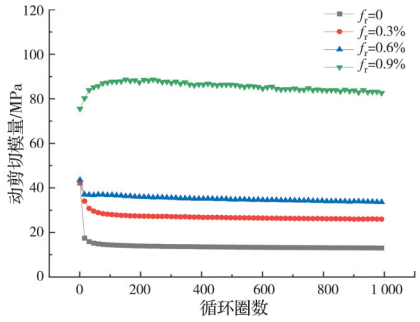


图 9　N=1 000 时残积土动剪应变与纤维掺量的关系曲线

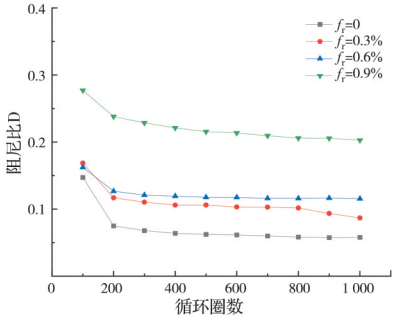
Fig. 9　Relationship curves between shear strain and fiber content of residual soil at N=1 000

2.5　纤维掺量对动剪切模量与阻尼比的影响

CSR 为 0.25 时，不同纤维掺量下动剪切模量和阻尼比随循环圈数变化的曲线如图 10 所示。在同一纤维掺量下，随着循环次数的增加，动剪切模量和阻尼比整体呈先下降后保持平稳的趋势；f_r 增大，试样的动剪切模量和阻尼比增大。纤维掺量为 0.9% 时，试样的动剪切模量呈先增大后减小的趋势。这是因为当剪切力不是特别大时，掺量越高，土中的纤维网相对越牢固，在循环初期，土体变形



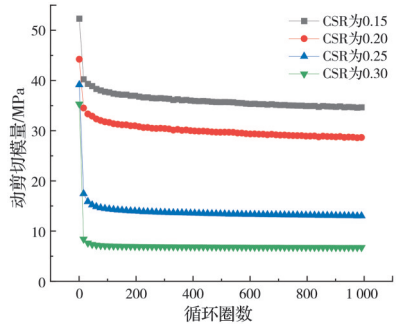
(a) 动剪切模量随循环次数的变化曲线



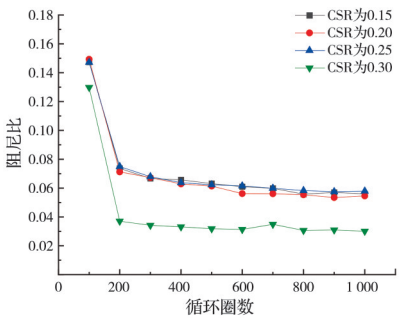
(b) 阻尼比随循环次数的变化曲线

图 10 CSR 为 0.25 时纤维加筋土动剪切模量和阻尼比随循环次数的变化曲线

Fig. 10 Dynamic shear modulus and damping ratio of fiber-reinforced soil varying with the number of cycles at CSR = 0.25



(a) 动剪切模量随循环次数的变化曲线



(b) 阻尼比随循环次数的变化曲线

图 11 f_r =0 时不同循环应力比下动剪切模量及阻尼比随循环次数的变化曲线

Fig. 11 Dynamic shear modulus and damping ratio varying with the number of cycles under different cyclic stress ratios at f_r = 0

较小,以剪密阶段为主,造成动剪切模量出现短期小幅度上升;随着循环次数的增加,进入剪切变形阶段,土体变形增大,纤维与土之间的胶结力被破坏,其限制变形的能力逐渐减弱,动剪切模量减小。而阻尼比的增大可归因于纤维在土中形成的纤维网提供了额外的阻力,阻止了变形的发展,使得每一次剪切循环都会消耗更多的能量。

2.6 循环应力比对动剪切模量与阻尼比的影响

图 11(a)所示为不同循环应力比下动剪切模量随循环次数的变化曲线。可以看出,随着 CSR 的增加,残积土的动剪切模量整体呈递减趋势。CSR 为 0.15、0.20、0.25、0.30 时,其对应的初始动剪切模量分别为 52.33、44.24、39.15、35.30,表明 CSR 的增大降低了残积土的初始剪切模量。图 11(b)所示为不同循环应力比下阻尼比随循环次数的变化曲线。除 CSR 为 0.3 时阻尼比明显降低,在其他 CSR 下阻尼比基本未发生变化,说明循环应力比与阻尼比之间不存在明显相关性。

2.7 纤维掺量对临界循环应力比的影响

临界循环应力比是指使土体破坏的最小循环应力比。当循环应力比小于临界值时,无论进行多少次剪切循环,土体都不会发生破坏,而当循环应力比大于等于临界值时,土体剪切应变迅速发展,最终导致土体破坏[23],以动剪应变达到 15% 作为试样破坏的标准。图 12 所示为不同纤维掺量下花岗岩残积土动剪应变随循环次数的变化曲线。可以看出,当循环应力比小于某值时,随着循环次数的增加,动剪应变先增大后趋于稳定,当循环应力比大于某值时,动剪应变迅速发展,土体很快发生破坏。根据临界循环应力比的定义,纤维掺量为 0%、0.3%、0.6%、0.9% 时,土体对应的临界循环应力比分别为 0.305、0.31、0.325、0.335,即纤维的加入能提高残积土临界循环应力比,且纤维掺量越大,临界循环应力比越大。

图 13 所示为临界循环应力比下试样破坏时对应的循环次数。可以看出,未加筋试样在临界循环应力比下瞬间破坏(13 圈);加入纤维后,试样会经过一段时间的剪切变形,最后达到破坏;纤维掺量为 0%、0.3%、0.6%、0.9% 时,试样破坏时的循环圈数分别为 13、190、300、320,说明纤维的加入大大延缓了土体破坏的时间。表明纤维在土体中发挥了桥梁纽带作用,在一定程度上提高了土体的韧性。

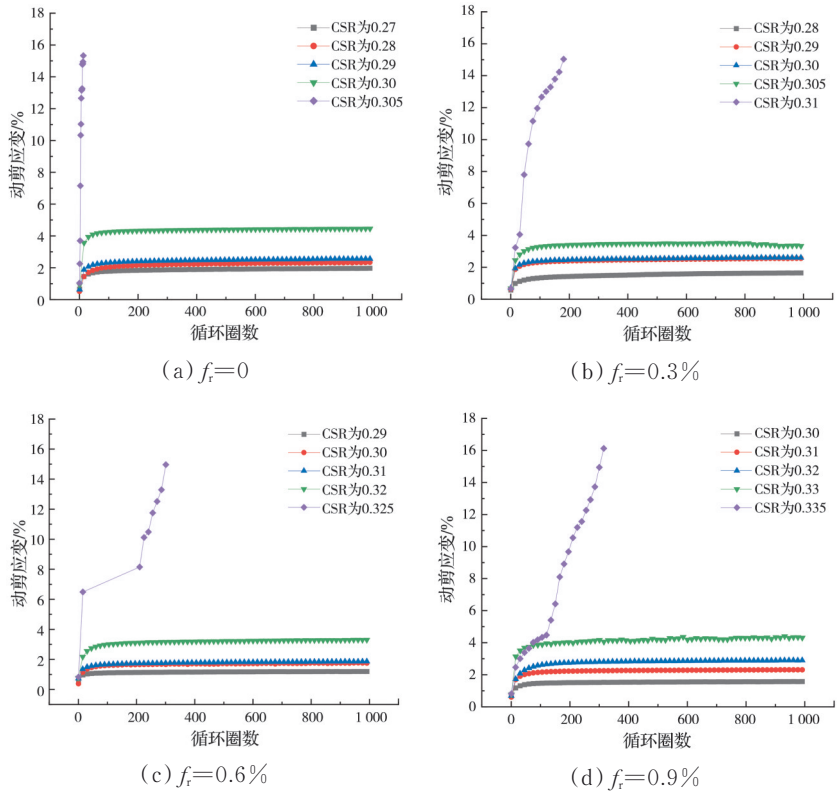


图 12　不同纤维掺量下残积土动剪应变与循环次数的关系曲线

Fig. 12　Relationship curves between residual soil dynamic shear strain and number of cycles at different fiber contents

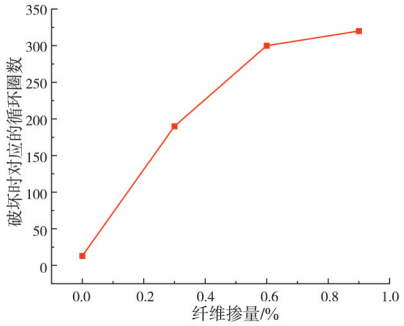


图 13　试样破坏时循环圈数与纤维掺量之间的关系曲线

Fig. 13　Relationship curve between the number of cycles and the fiber content at sample failure

3　纤维加筋残积土 Hardin-Drnevich 模型的修正

采用 Hardin-Drnevich 双曲线模型（H-D 模型）对不同 CSR、不同 f_r 下花岗岩残积土的 G/G_0-γ 关系曲线进行归一化处理，拟合模型为

$$\frac{G}{G_0}=\frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{A}\right)^B} \tag{2}$$

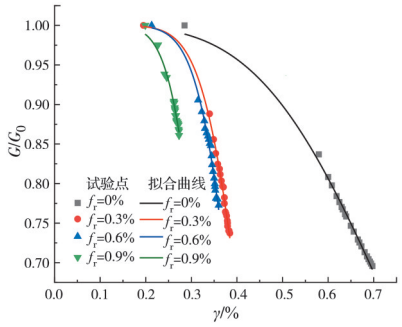
归一化处理的 G/G_0-γ 关系曲线可以更直观地反映曲线的变化特点及衰减速率[24]，拟合结果如图 14 所示。图 14 表明，动剪模量比随着动应变减小；同一 CSR 下，纤维掺量越高，动剪切模量比下降幅度越小；同一纤维掺量下，循环应力比越大，动剪切模量比衰减的速度越快。

基于纤维加筋残积土试验数据以及 H-D 模型拟合分析，得到与动剪切模量比相关的拟合参数 A 和 B，如表 5 所示。整理对比参数数据发现，拟合参数的演变过程与循环应力比和纤维掺量有关，因此采用二元二次方程来描述参数 A、B 与试验变量之间的关系

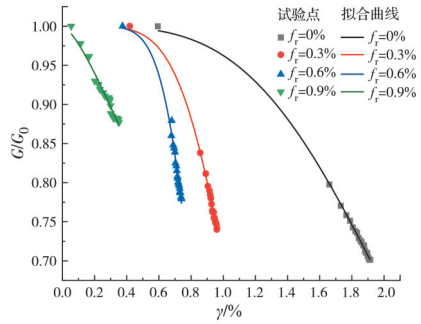
$$\varphi_{A/B}=\alpha_0 C^2+\alpha_1 f_r^{\,2}+\alpha_2 C f_r+\alpha_3 C+\alpha_4 f_r+\alpha_5 \tag{3}$$

式中：φ 为拟合参数 A 和 B；α_0～α_5 为方程的系数；C 为循环应力比；f_r 为纤维掺量。

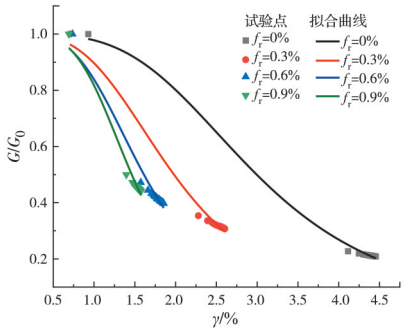
参数 A、B 在三维空间中用式(3)进行拟合，A、B 与循环应力比、纤维掺量的回归关系见图 15，方程系数 α_0～α_5 见表 6。从图 15 中可以看出，随着循环应力比的增大，A、B 均减小，但相较于 B，A 减小的趋势更明显；随着纤维掺量的增大，拟合参数均呈增大趋势，且各回归方程的相关系数 R^2 均为 0.99，故式(3)能合理地描述拟合 A、B 与试验变量之间的回归关系。试验选取的纤维含量范围较小，该模型在较大或较小纤维含量下的预测能力或准确性可能会受到限制，无法完全反映整个纤维含量范围的工程行为。因此，在使用该修正模型进行工程设计或预



(a) CSR为0.20



(b) CSR为0.25



(c) CSR为0.30

图14 不同循环应力比下纤维加筋土动剪切模量比随应变的变化曲线

Fig. 14 Curves of dynamic shear modulus ratio of fiber-reinforced soil with strain under different cyclic stress ratios

表5 不同CSR下纤维加筋土的H-D模型参数

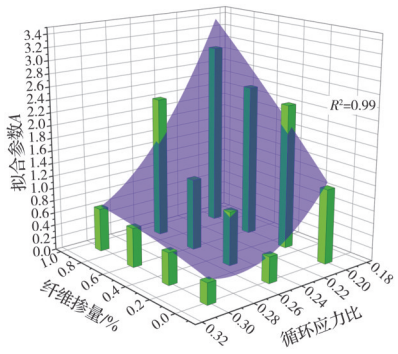
Table 5 H-D model parameters of fiber-reinforced soil under different CSR

CSR	f_r/%	A	B
0.20	0	1.181	4.138
0.20	0.3	2.302	8.18
0.20	0.6	2.424	8.74
0.20	0.9	2.929	8.305
0.25	0	0.415	3.689
0.25	0.3	0.854	5.287
0.25	0.6	1.134	7.031
0.25	0.9	2.243	8.167
0.30	0	0.334	3.456
0.30	0.3	0.505	3.159
0.30	0.6	0.621	3.447
0.30	0.9	0.684	3.938

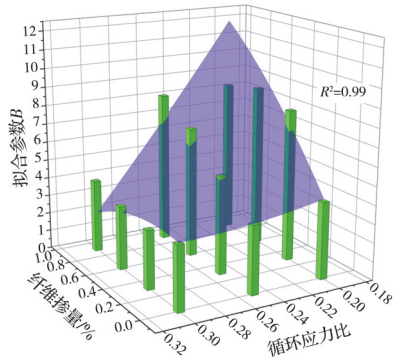
表6 拟合参数A、B的方程系数

Table 6 Equation coefficients of fitting parameters A and B

参数	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
A	−0.24	−20	163	7	−91	13
B	−2.9	−101	72	31	−44	10



(a) 拟合参数A



(b) 拟合参数B

图15 拟合参数A、B与试验变量间的回归关系

Fig. 15 Regression relationship between fitting parameters A, B and test variables

测时,需谨慎考虑其局限性,可能需要结合工程实际或实验数据进行验证和补充。

4 结论

为了研究纤维掺量、循环应力比对残积土动力剪切特性的影响,进行了室内水平循环单剪试验,得到以下结论:

1)纤维的掺入能改善残积土的刚度。随着纤维掺量的增大,残积土刚度降低的速度明显减慢;尤其当f_r=0.9%时,土体刚度基本保持不变。

2)纤维的加入能有效限制土体动剪应变的发展,提高土体的临界循环应力比,临界循环应力比随纤维掺量的增大而增大。

3)随着纤维掺的量增大,动剪切模量和阻尼比均增大;同一纤维掺量下,动剪切模量随CSR的增大而减小。

4)对Hardin-Drnevich模型进行修正,修正后的

模型能反映循环应力比及纤维掺量对纤维加筋残积土动剪切特性的影响。

参考文献

[1] 刘洪波, 梁崇旭, 刘飞禹. 考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 342-350.
Liu H B, Liang C X, Liu F Y. Seismic response analysis of granite residual soil slops considering the effect of water content[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 342-350. (in Chinese)

[2] 黎澄生, 孔令伟, 舒荣军, 等. 花岗岩残积土剪切带上的细观结构损伤规律[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3203-3212.
Li C S, Kong L W, Shu R J, et al. Meso-structure damage evolution in shear bands of granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3203-3212. (in Chinese)

[3] Praveen G V, Kurre P, Chandrabai T. Improvement of California Bearing Ratio (CBR) value of steel fiber reinforced cement modified marginal soil for pavement subgrade admixed with fly ash[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 639-642.

[4] Bu F, Liu J, Mei H, et al. Cracking behavior of sisal fiber-reinforced clayey soil under wetting-drying cycles [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: 105596.

[5] Correia N S, Rocha S A, Lodi P C, et al. Shear strength behavior of clayey soil reinforced with polypropylene fibers under drained and undrained conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(5): 1419-1426.

[6] Arabani M, Shalchian M M, Majd Rahimabadi M. The influence of rice fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2023, 407: 133542.

[7] Bao X H, Huang Y J, Jin Z Y, et al. Experimental investigation on mechanical properties of clay soil reinforced with carbon fiber[J]. Construction and Building Materials, 2021, 280: 122517.

[8] Reza Tabakouei A, Narani S S, Abbaspour M, et al. Coupled specimen and fiber dimensions influence measurement on the properties of fiber-reinforced soil[J]. Measurement, 2022, 188: 110556.

[9] Owino A O, Hossain Z. Correlation between one-dimensional consolidation coefficients and different basalt fiber lengths and RHA-cement contents in fiber-reinforced stabilized expansive soils[J]. Soils and Foundations, 2023, 63(4): 101351.

[10] Yang N Y, Chen X B, Li R D, et al. Mesoscale numerical investigation of the effects of fiber stiffness on the shear behavior of fiber-reinforced granular soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137: 104259.

[11] Ganiev J, Nakano M, Sakai T. Numerical analysis of drained compression behavior of fiber-reinforced sand based on a soil skeleton structure concept[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104789.

[12] Liu C, Lv Y R, Yu X J, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 581-590.

[13] 刘飞禹, 汤家郗, 袁国辉, 等. 纤维加筋优化电渗法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2545-2552.
Liu F Y, Tang J X, Yuan G H, et al. Experimental study on treatment of dredged slurry by electro-osmosis with fiber reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2545-2552. (in Chinese)

[14] 孟欣, 白二雷, 王志航, 等. 碳纤维增强聚合物混凝土抗冲击性能试验研究(英文)[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1): 54-62.
Meng X, Bai E L, Wang Z P, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced polymeric concrete[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 54-62. (in chinese).

[15] 范炜, 陈峰. 玄武岩纤维混凝土抗压试验有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 858-861.
Fan W, Chen F. Finite element analysis of compression test on basalt fiber concrete[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 858-861. (in Chinese)

[16] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 15-21.
Zheng J J, Song Y, Lai H J, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced bio-cemented sand[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 15-21. (in Chinese)

[17] Tamassoki S, Daud N N N, Wang S Y, et al. CBR of stabilized and reinforced residual soils using experimental, numerical, and machine-learning approaches[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101080.

[18] Reehana S, Muthukumar M. Undrained response of fibre reinforced expansive soil subjected to cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 173: 108154.

[19] Oliverra P J V, Correia A A S, Teles J M N P C, et al. Effect of cyclic loading on the behaviour of a chemically stabilised soft soil reinforced with steel fibres[J]. Soil

Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 122-125.

[20] Zhao Y Y, Yang Y, Ling X Z, et al. Dynamic behavior of natural sand soils and fiber reinforced soils in heavy-haul railway embankment under multistage cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 28: 100507.

[21] Sheikhi N S, Pouria Z, Mohsen A, et al. Evaluation of fiber-reinforced and cement-stabilized rammed-earth composite under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123746.

[22] Wang J H, Li Y, Yang P, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of fiber-binder modified subgrade filler after freezing-thawing under cyclic loading [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 39: 100936.

[23] 孙安元, 杨钢, 任玉宾, 等. 温升作用对深海沉积物静力特性及临界循环应力比的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2110-2118.

Sun A Y, Yang G, Ren Y B, et al. Undrained heating effects on monotonic shear behaviors and critical cyclic stress ratios of deep-sea sediment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2110-2118. (in Chinese)

[24] 安然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 确定残积土原位 G-γ 衰减曲线的建议方法与适宜性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4429-4436.

An R, Kong L W, Li C S, et al. A proposed method to determine in situ shear modulus and its degradation for granite residual soil and the suitability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4429-4436. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)