

冯恣, 宋文捷. 含水率对残积土与土工织物界面剪切特性的影响 [J]. 华南地震, 2024, 44(1): 157-164. [FENG Min, SONG Wenjie. Effect of Moisture Content on the Shear Characteristics of the Interface Between Residual Soil and Geotextile[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 157-164]

含水率对残积土与土工织物界面剪切特性的影响

冯 恣¹, 宋文捷²

(1. 上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201204; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 为探究不同影响因素下残积土与土工织物界面的剪切特性, 采用气动直剪仪对土工织物加筋残积土试样进行直剪试验。考虑含水率、剪切速率、竖向应力等因素, 分析不同剪切速率和竖向应力下含水率对残积土与土工织物界面剪切特性的影响。试验结果表明: 在同一含水率情况下, 筋土界面的抗剪强度与竖向应力成正比, 在含水率为17%时, 竖向应力50 kPa的抗剪强度从53 kPa分别增加到84 kPa(100 kPa)、151 kPa(200 kPa); 随着含水率的增加, 界面似黏聚力显著降低, 筋土界面抗剪强度减小, 而界面摩擦角无明显变化。剪切速度主要影响筋土界面摩擦角, 筋土界面抗剪强度随着剪切速率的增大而增大; 且在高剪切速率、低含水率情况下, 筋土界面的剪缩现象在达到一定剪切位移后有所缓解, 最后趋于平稳。

关键词: 加筋土; 筋土界面; 直剪试验; 抗剪强度; 含水率

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0157-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.18

Effect of Moisture Content on the Shear Characteristics of the Interface Between Residual Soil and Geotextile

FENG Min¹, SONG Wenjie²

(1. Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201204, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to investigate the shear characteristics of the interface between residual soil and geotextile under different influence factors, the direct shear tests were carried out on the residual soil samples reinforced with geotextile by using pneumatic direct shear apparatus. Considering moisture content, shear rate, vertical stress and other factors, the effect of moisture content on the shear characteristics of the interface between residual soil and geotextile under different shear rates and vertical stresses is analyzed. The test results show that the shear strength of the reinforced soil interface is proportional to the vertical stress under the same moisture content, and when the moisture content is 17%, the shear strength of the vertical stress of 50 kPa increases from 53 kPa to 84 kPa (100 kPa) and 151 kPa (200 kPa), respectively. With the increase of moisture content, the apparent cohesion and shear strength of the reinforced soil interface decrease significantly, but the friction angle of the soil interface has no obvious change. The shear rate mainly affects the friction angle of the reinforced soil interface, and the shear strength of the reinforced soil interface increases with the increase of shear rate. In the case of high shear rate and low moisture content, the shear shrinkage of the interface is relieved after reaching a certain shear displacement, and finally tends to be stable.

Keywords: Reinforced soil; Interface between geogrid and soil; Direct shear test; Shear strength; Moisture content

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 冯恣(1985-), 女, 高级工程师, 研究方向为道路与交通工程设计与研究。

E-mail: 272418264@qq.com

0 引言

残积土作为沿海地区常见土层,被广泛应用于当地实际工程中,但在降雨过程中容易出现滑坡等现象。含水率作为其中一个重要影响因素,影响着残积土的抗剪强度。关于含水率对土体强度的影响,国内外学者已经进行了一系列研究。Suzuki等^[1]通过直剪试验研究了含水率变化时粒状膨润土与土工织物界面的剪切特性。Wei等^[2]研究了含水率对不同风化程度花岗岩剪切特性的影响,探讨其各向异性特征和土体抗剪强度等力学特性。金解放等^[3]研究含水率对岩体破坏和能耗特性的影响,利用改进的 SHPB 试验装置,设置6个含水率等级,对红砂岩进行动态冲击试验。不同花岗岩残积土在循环剪切过程中剪应力、竖向位移的变化规律,揭示了不同含水率土体的剪切破坏机制。吕玺琳等^[4]为研究初始含水率对土石混合料力学特性的影响,选取典型土石混合料开展大型三轴固结排水剪切试验。简涛等^[5]通过不同含水率原状黄土的共振柱试验,分析了含水率对黄土小应变剪切模量的影响。含水率和原状黄土剪切模量及其衰减模式影响显著。

加筋土结构作为目前最有效的加固方法之一,能够有效的提高土体的抗剪强度,减少含水率变化带来的不利影响。国内外学者对筋—土界面领域也进行了很多研究。Abu-Farsakh等^[6]研究了不同含水率对格栅—黏土界面直剪试验,认为筋土界面抗剪强度随着含水率的增加而减小。Anubhav等^[7]通过直剪试验研究了砂土与土工织物界面剪切特性的影响,得出了影响筋土界面抗剪强度的因素。Nye等^[8]研究了黏土与土工织物界面剪切特性的影响,认为筋土界面抗剪强度随着剪切位移的增加先增大后减小最后保持不变。Biabani等^[9]通过直剪试验研究了土工膜和土工格栅的界面剪切特性,认为剪切速率对剪切强度有重要的影响。He Z等^[10]通过双曲线模型拟合应力应变直剪的关系,得出结论如下:随着含水量的增加,抗剪强度包络线几乎彼此平行。Ferreira等^[11]分析了不同类型筋材、含水率、土体密度等因素对花岗岩残积土直剪特性的影响,

结果表明含水率影响较大。任非凡等^[12]从试验研究、数值分析、理论解析三方面开展筋—土界面的力学特性研究,有利于完善筋土工程的设计理论。刘飞禹等^[13-15]研究了不同含石量、压实度、位移幅值、剪切速率等因素对筋土界面剪切特性的影响,分析界面抗剪强度和体变特性等参数的变化规律。熊甜甜等^[16]对加筋土界面抗剪强度影响因素进行了研究,得出剪切速率主要影响筋土界面的内摩擦角,对黏聚力几乎没有影响。

综上所述,目前关于含水率对残积土—土工织物筋土界面剪切特性的研究相对较少。因此,本研究主要考虑含水率的影响,通过一系列直剪试验分析残积土与土工织物界面的剪切特性。

1 试验材料与方案

1.1 试验仪器

本次直剪试验通过气动直剪仪完成,如图1所示。气动直剪仪分上下两盒,剪切盒直径为50 mm,高为20 mm。将土样放入50 mm制样器,通过液压千斤顶进行压样,压样完成后由脱模器将试样取出。



图1 气动直剪仪

Fig.1 Pneumatic direct shear apparatus

1.2 试验材料

试验土均为广州某边坡的坡顶位置处软弱面上层的残积土,具体物理参数如表1所示:

表1 残积土的物理性质

Table 1 Physical properties of residual soil

土样	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重	塑限/(%)	液限/(%)	塑性指数/(%)
残积土	1.58	2.75	25.91	46.8	21.89

1.3 试验方案

具体的试验方案如表2所示。为了研究不同含水率下筋土界面直剪特性，以含水率作为主要变量进行试验。首先将土样进行风干碾碎，过孔径

为2 mm的筛网，测出风干土的含水率。再按照设计含水率分别加入不同量的水，喷水雾至拌合均匀后，静置48 h确保土样含水率为试验所需含水率。制样完毕后立即用保鲜膜将其包住以防止水分蒸发。

表2 试验方案
Table 2 Test scheme

剪切位移/(mm)	竖向应力/(kPa)	含水率/(%)	剪切速率/(mm·min ⁻¹)
5	50	13	1
	100	17	5
	200	21	10

2 结果分析

2.1 含水率的影响

图2为不同竖向应力下的剪切应力—剪切位移曲线。结合a、b、c三图不难看出，不同竖向应力下筋土界面的剪切应力—剪切位移曲线都呈现出相似的规律，即剪切应力随着剪切位移的增大而增大，达到峰值后保持不变。在同一竖向应力下，

剪切应力随着含水率的增大而减小。在较低竖向应力(50 kPa)下，含水率从13%增加到17%时，界面抗剪强度降低了35%；含水率从17%增加到21%时，界面抗剪强度降低了37%。在同一含水率下，剪切应力也随着竖向应力增加而增加，筋土界面间的抗剪强度与法向应力成正比。以含水率17%为例，从53 kPa(50 kPa)分别增加到84 kPa(100 kPa)、151 kPa(200 kPa)。与刘志伟等^[17]结论一致。而在含水率为13%时。剪切位移超过3 mm，剪切应力小幅下降，出现剪切软化的现象。

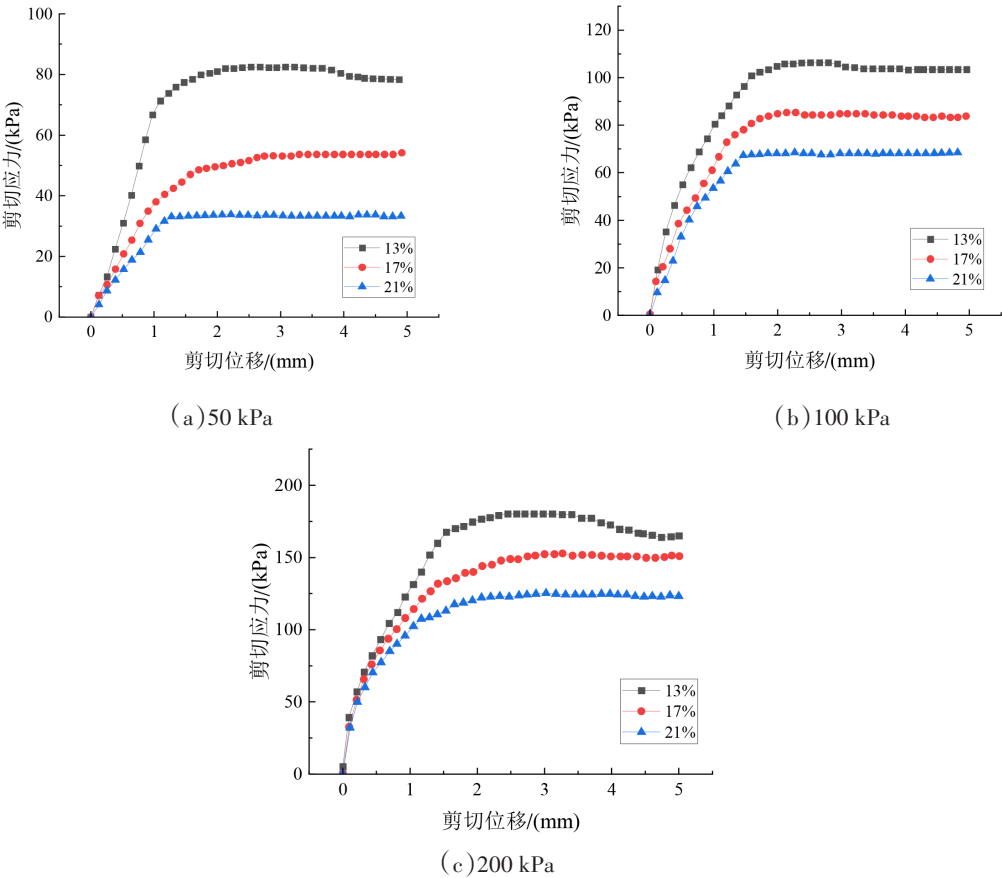


图2 不同含水率下剪切应力—剪切位移曲线
Fig.2 Shear stress-shear displacement curves under different moisture content

图3反映了竖向位移与剪切位移的关系。规定剪胀为正,在不同竖向应力下都出现剪缩现象。同一竖向应力下,高含水率剪缩更加明显,减小到一定值后保持不变。这是因为含水率越高,土的初始孔隙越大,而受到剪切作用后,土颗粒不

断移动导致孔隙率减小,试样更加密实,使得剪缩现象更加的明显。同一含水率下,竖向位移随着竖向应力的增大而增大。以17%含水率为例,从-0.2(50 kPa)分别增加到-0.25(100 kPa)、-0.37(200 kPa)。

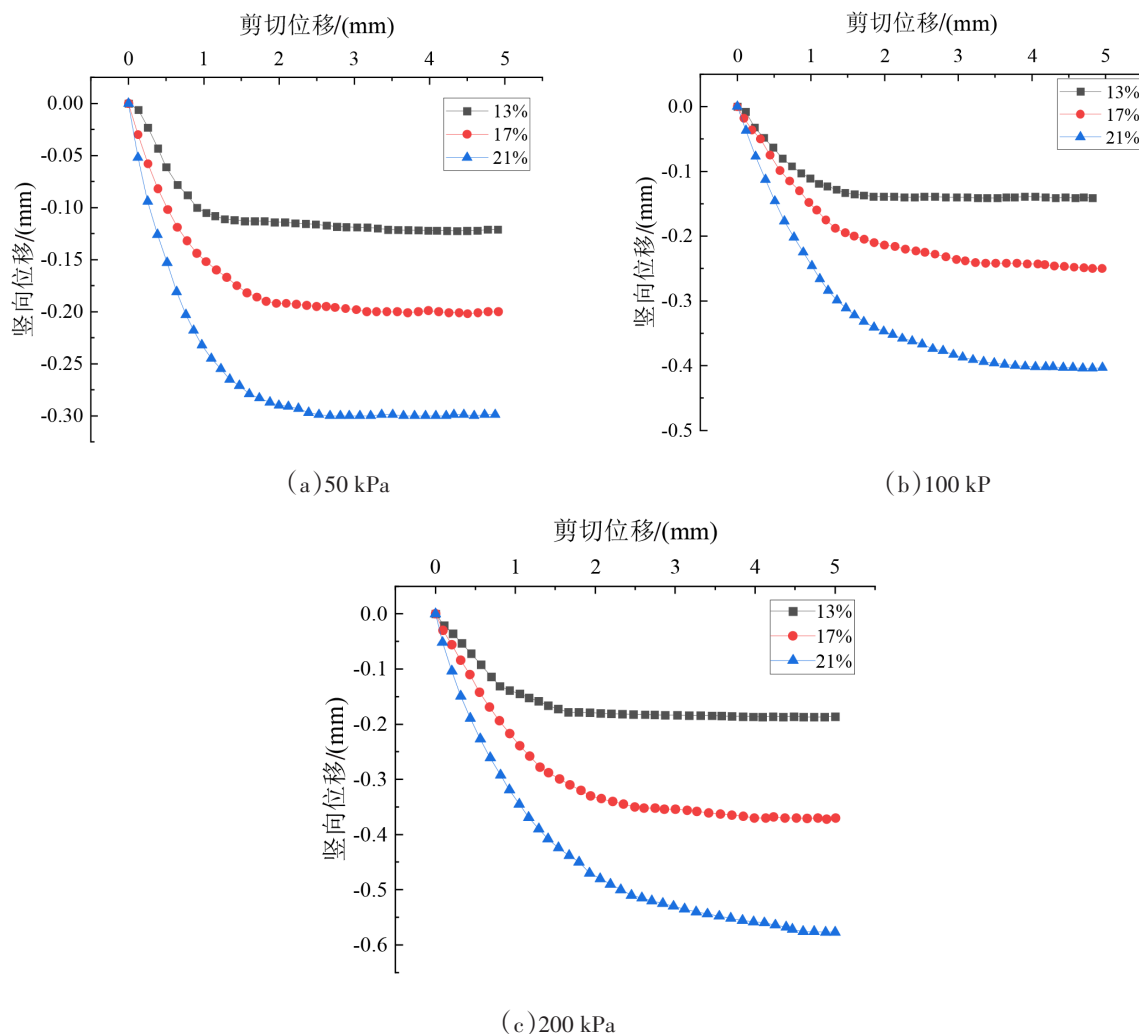


图3 不同含水率下竖向位移—剪切位移曲线

Fig.3 Vertical displacement-shear displacement curves under different moisture content

2.2 最大剪切应力和竖向位移

图4更加直观的反应了最大剪切应力与含水率、竖向应力之间的变化规律。在较低竖向应力(50 kPa)下,最大剪切应力随含水率的变化率大于其他竖向应力情况。而在三种含水率情况下的最大剪切应力随竖向应力变化率并没有太大的变化。

图5为最大竖向位移三维图。从图中可以清晰的看出,含水率越高,竖向位移随着竖向应力的变化率越大。且随着竖向应力的增加,竖向位移随含水率的变化率也增加。对比可得含水率对竖向位移

的影响大于竖向应力对竖向位移的影响。在高竖向应力、高含水率情况下,剪缩现象最为明显。

2.3 抗剪强度因素

土体含水率同时对筋土界面的似黏聚力与界面摩擦角有影响。此剪切强度符合摩尔库伦定律,即 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ (其中, τ 为抗剪强度, φ 为内摩擦角, c 为黏聚力)。图6为最大剪切应力与竖向应力关系曲线。同一含水率情况下三点可连成一条直线;不同含水率下三条直线斜率近似相同。通过线性拟合得出斜率和截距。界面摩擦角、似黏聚力和

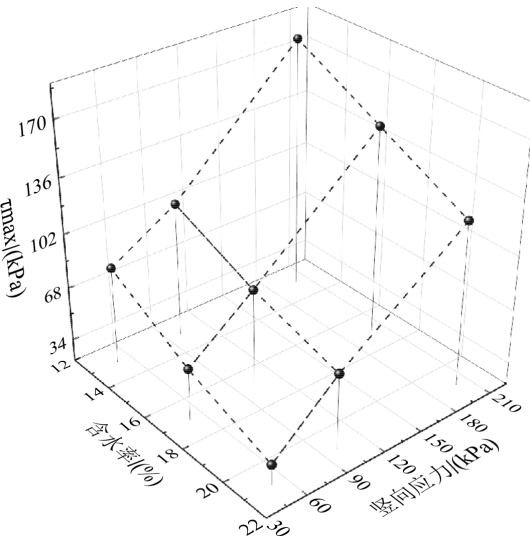


图4 最大剪切应力三维图

Fig.4 Three-dimensional diagram of the maximum shear stress

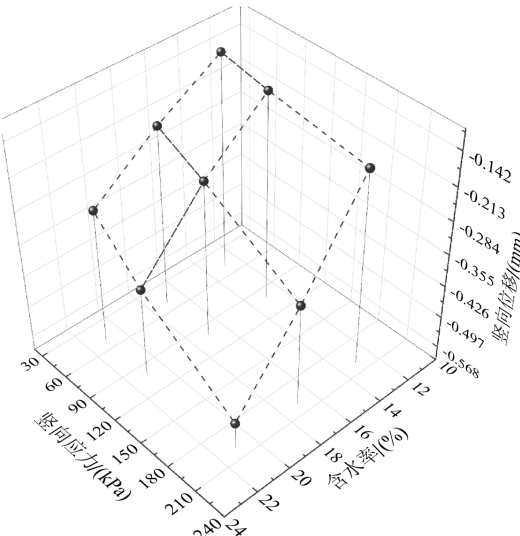


图5 最大竖向位移三维图

Fig.5 Three-dimensional diagram of the maximum vertical displacement

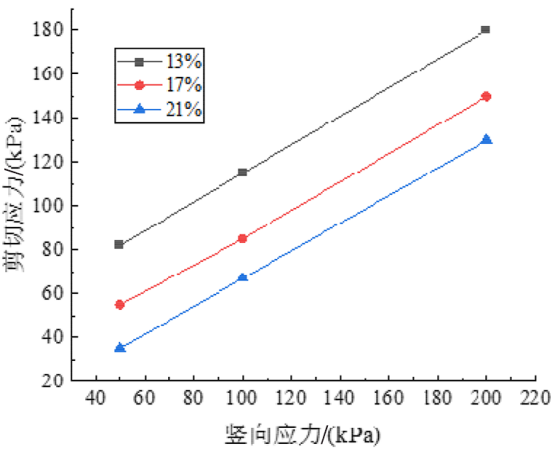


图6 最大剪切应力与竖向应力曲线

Fig.6 Curves of the maximum shear stress and vertical stress

含水率的关系曲线如图 7 所示，随着含水率的增加，似黏聚力显著降低，而界面摩擦角并没有太大的变化。分析原因可知，土体含水率的增加，加大了筋土界面间的润滑作用，从而降低了筋土界面间的摩擦和抗剪强度^[18-21]。

2.4 剪切速率的影响

图 8 为竖向应力 100 kPa 下不同剪切速率下剪

切应力与剪切位移曲线。结合 a、b、c 三图可以看出：在不同剪切速率下，剪切应力一位移曲线都呈现相似的规律，即剪切应力随着剪切位移先增大后保持不变。在同一剪切速率下，剪切应力随着含水率的增高而降低，与竖向应力作用下情况类似。以 5 mm/min 为例，最大剪切应力从 111 kPa (13%)降低到 93 kPa(17%)、76 kPa(21 %)。

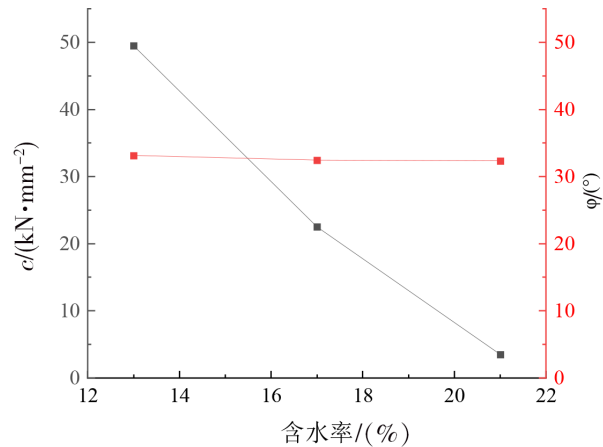


图7 界面摩擦角、似黏聚力和含水率的关系曲线

Fig.7 Relationship curves of interface friction angle ,cohesion and moisture content

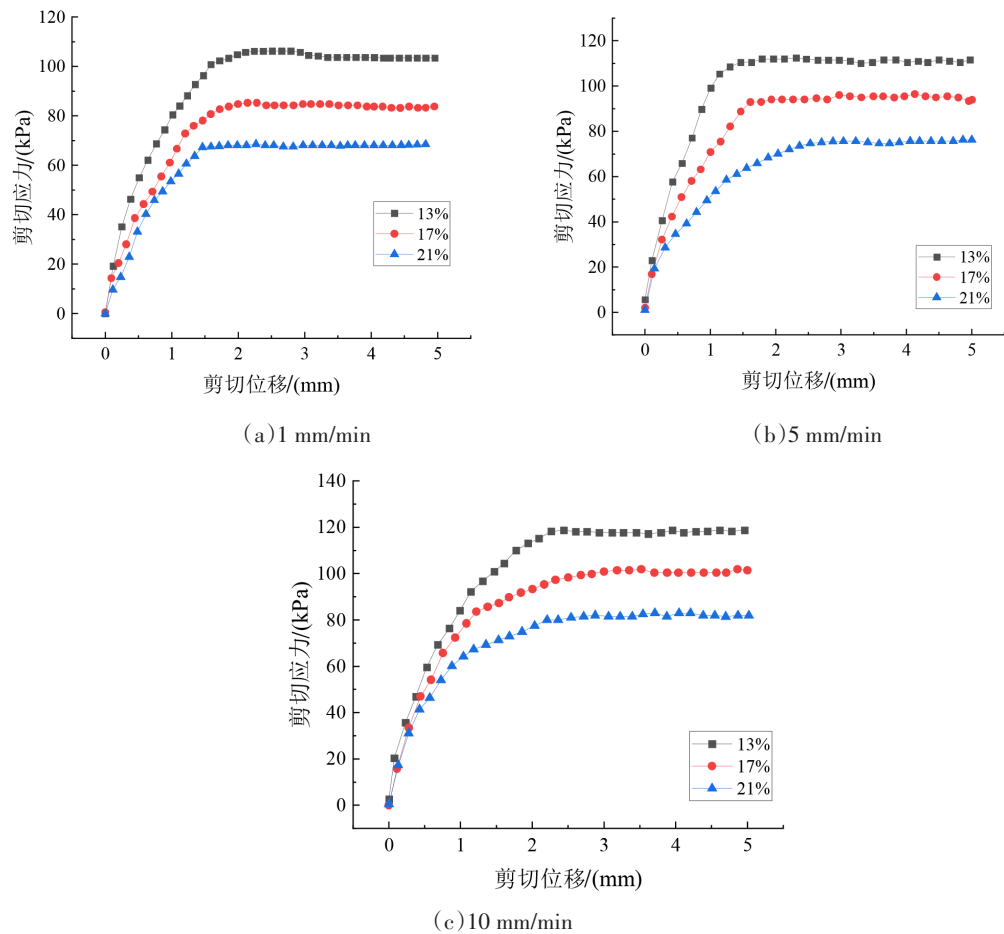


图8 不同含水率下剪切速率对剪切应力的影响

Fig.8 Influence of shear rate on shear stress under different moisture content

图9反应的是竖向位移—剪切位移曲线,不同剪切速率下的规律差别较大。在低剪切速率情况下筋土界面一直都是剪缩变形,达到一定程度后保持不变,且剪缩变形的大小也随着含水率的增大而减小。当剪切速率为5 mm/min时,高含水率(21%)一直保持剪缩变形,而在13%、17%含水率

下的筋土界面先发生剪缩变形,达到一定剪切位移之后出现明显转折点,剪缩值减少,后趋于稳定,但未出现剪胀现象。剪切速率主要影响筋土界面的内摩擦角,当剪切速率较大时,筋土界面土颗粒来不及重新排列,导致出现此类现象。

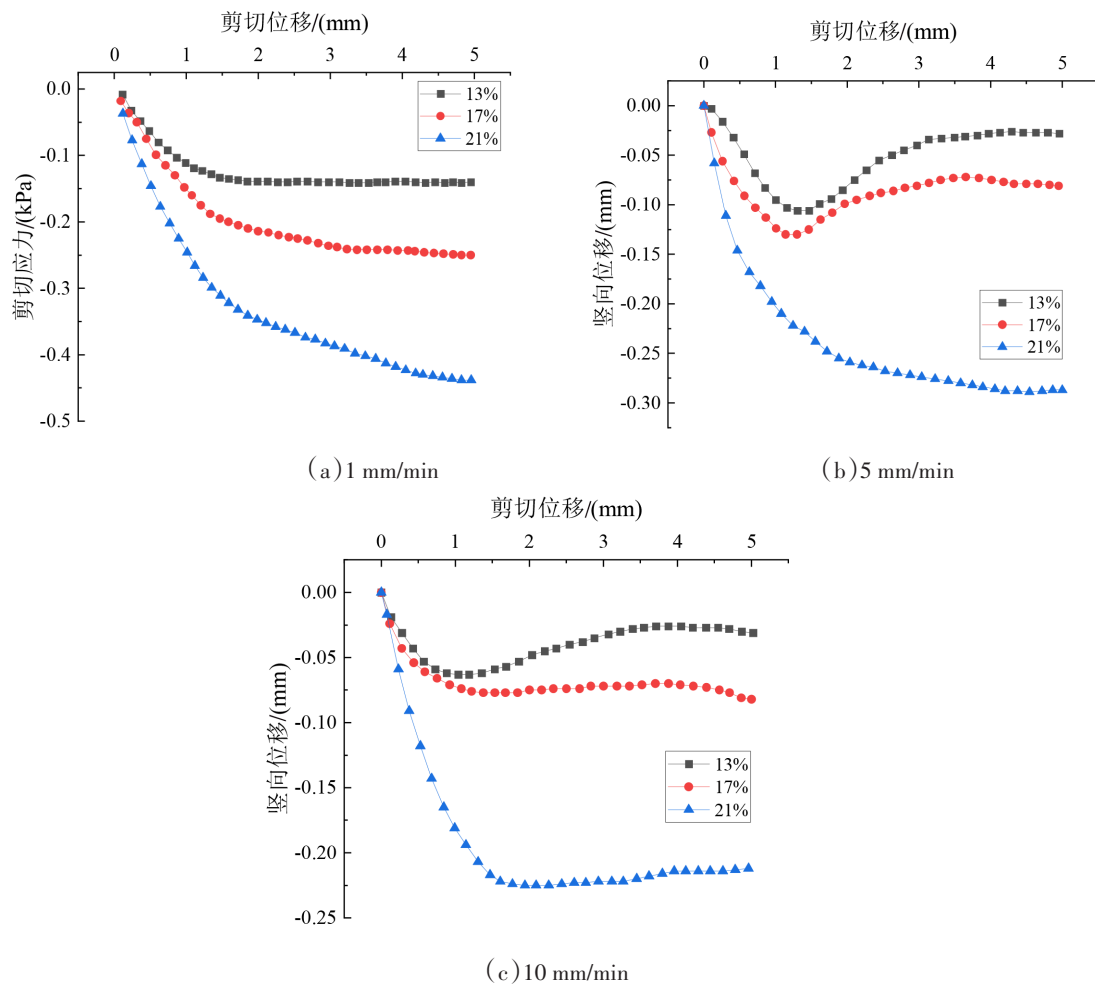


图9 不同含水率下剪切速率对竖向位移的影响

Fig.9 Influence of shear rate on vertical displacement under different moisture content

3 结论

本文通过对残积土与土工织物进行直剪试验,对不同含水率下筋土界面的剪切特性进行了研究,得出主要结论如下:

(1)筋土界面抗剪强度随着含水率的增加而减小,而在同一含水率情况下,筋土界面的抗剪强度与竖向应力成正比。

(2)在不同含水率情况下,筋—土界面似黏聚力变化显著,随着含水率的增加而减小,而界面摩擦角并没有太大的变化。

(3)剪切速度主要影响筋土界面内摩擦角,随着剪切速度的增加,筋土界面抗剪强度增大。且在高剪切速率、低含水率下的筋土界面剪缩现象随着剪切位移达到一定值时有所缓解,剪缩值减少,最后趋于平稳。

参考文献

- [1] Suzuki M, Koyama A, Kochi Y, et al. Interface shear strength between geosynthetic clay liner and covering soil on the embankment of an irrigation pond and stability evaluation of its widened sections[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(2): 301-314.

- [2] Wei Yujie, Wu Xinliang, Xia Jinwen, et al. The effect of water content on the shear strength characteristics of granitic soils in South China[J]. Soil and Tillage Research, 2019 (187):50-59.
- [3] 金解放,徐虹,余雄,等. 动荷载和含水率对红砂岩破坏及能耗特性的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(12):3231-3240.
- [4] 吕玺琳,程博文,张甲峰,等. 含水率对土石混合料力学特性影响试验研究[J]. 地基处理, 2023, 5(02):97-104.
- [5] 简涛,孔令伟,柏巍,等. 含水率对原状黄土小应变剪切模量影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 160-165.
- [6] Abu-farsakh M, Coronel J, Tao M. Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(7):540-549.
- [7] Anubhav, Basudhar P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results[J]. Geotextile and Geomembranes, 2010, 28(4):403-408.
- [8] Nye C, Fox P. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner [J]. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 2007, 133(8):973-983.
- [9] Biabani M M, Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43 (3):240-249.
- [10] He Z, Mo H, Siga A, et al. Research on the parameters of nonlinear hyperbolic model for clay-geogrid interfaces based on large scale direct shear tests[J]. Transportation Geotechnics, 2019(18):39-45.
- [11] Ferreira F B, Vieira C, Lopes M L. Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type[J]. Geosynthetics International, 2015, 22(3):257-272.
- [12] 任非凡,刘铨. 加筋土结构筋—土界面特性研究进展[J]. 西部交通科技, 2020(04):5-10+28.
- [13] 刘飞禹,孔剑捷,姚嘉敏. 含石量和压实度对格栅—土石混合体界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (05):903-911.
- [14] 刘飞禹,李婧婷,应梦杰,等. 位移幅值对砾石—格栅界面循环剪切特性的影响[J]. 中国公路学报, 2023, 36 (05):58-64.
- [15] 刘飞禹,王攀,王军,等. 不同剪切速率下格栅—土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(02):387-395.
- [16] 熊甜甜,廖红建,杨博,等. 加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (03):629-634.
- [17] 刘志伟,丁波涛,梁崇旭. 含水率对花岗岩边坡风化层界面剪切特性的影响[J]. 华南地震, 2021, 41(04):115-120.
- [18] 王培清,王保田,陈西安. 不同含水率对筋土界面抗剪强度的影响[J]. 施工技术, 2007(08):86-89.
- [19] 冯钰洁,汪峻峰,李光范,等. 海口红黏土大型单剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13):5276-5282.
- [20] 蔡国庆,张策,黄哲文,等. 含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 32-36.
- [21] 陈胜,徐采薇,徐其功,等. 极限状态下灌浆套筒内锚固钢筋的受力原理及变形分析[J]. 华南地震, 2023, 43 (02):151-157.