

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1585-08

考虑吸力变化的非饱和高液限黏土-土工织物界面剪切特性研究

刘毓胤, 陈志福

(福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

摘 要: 以高液限土为填料的加筋挡墙广泛在南方地区应用, 加筋挡墙土体吸力经常随气候变化而发生变化, 直接影响筋土界面强度特性, 考虑吸力变化的非饱和高液限黏土-土工织物界面强度特性亟待深入研究。利用 ZFY-1A 型非饱和土应变控制式直剪仪对非饱和高液限黏土-土工织物界面进行控制吸力的剪切试验, 探讨吸力循环变化(干湿循环)对筋-土界面剪切特性的影响。研究表明, 高液限黏土-土工织物界面的抗剪强度随着净法向应力的增加而增大; 随着循环次数的增加, 界面强度呈现先升高而后衰减的变化规律。经历 3 次干湿循环的界面强度低于未经干湿循环的强度。随着循环次数的增加, 界面强度总体上呈降低趋势。吸力增加的速率 δ^b 随吸力循环次数的增加先增大后减小, 有效界面摩擦角 δ' 、界面有效黏聚力 c'_a 、界面综合摩擦系数 f' 、综合摩擦系数比 K 与此类似。 $\Delta w_{\max}$ 含水率变化量的最大值随着净法向应力、循环次数的增加而增大。最大剪胀量 $(h/H)_{\max}$ 随循环次数的增加先增大后减小, 随净法向应力的增大而减小。最后通过对数拟合, 得出经历若干次基质吸力循环后的界面强度计算公式。

关 键 词: 高液限黏土; 基质吸力; 土工织物; 直剪试验; 吸力循环

中图分类号: TU 446

文献标识码: A

Study of interface shear characteristic between unsaturated high liquid limit clay and geotextiles considering suction change

LIU Yu-chuan, CHEN zhi-fu

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In South China, the geosynthetic reinforced retaining wall using high liquid limit soil as backfill is applied widely. Because of climate change, the suction between unsaturated high liquid limit clay and geotextile is altering; thus influencing the interface shear characteristic. So the interface shear characteristic between unsaturated high clay and geotextile considering suction change should be studied deeply. In this paper, a series of direct shear tests are performed using ZFY-1A direct shear apparatus to investigate the shearing resistance properties of high plasticity clay-geotextile interface under suction cycle. Results of experiment indicate that the peak shear strength of the soil-geotextile interface increases with the net normal stress. Interface strength increases at first and then reduces with the increase of cycling times, interface strength is lowest through 3 times of the dry-wet circulation. And interface strength is reduced in general. δ^b , δ' , c'_a , f' and K increase and then decrease with the increase of cycling times. $\Delta w_{\max}$ increases with the cycling times and net normal stress. $(h/H)_{\max}$ decreases with net normal stress, and increases then decreases with the increase of cycling times. Finally, the interface strength formula under different suction conditions is obtained through the logarithmic fitting.

Key words: high liquid limit of clay; matrix suction; geotextiles; direct shear test; suction cycle

1 引 言

高液限黏土作为一种液限高、孔隙比大且区域性强特殊土, 在我国南方广泛分布。随着公路、铁路等基础设施的修建, 土工合成材料在这些地区的应用越来越广。工程师和学者们对高液限黏土-

土工合成材料界面剪切特性也越来越重视, 逐渐成为研究的热点。非饱和土因土中基质吸力的存在, 其特性与饱和土有很大差别。降雨导致地下水位上升, 土体处于湿润状态, 吸力减小; 干旱使土体处于失水干燥状态, 吸力增大。气候变化对非饱和土的基质吸力等产生影响, 进而影响非饱和土的强度

收稿日期: 2013-03-22

第一作者简介: 刘毓胤, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程灾害治理方面研究。E-mail: liuyuchuan@fzu.edu.cn

特性，同理，基质吸力的变化对加筋体的强度特性也有影响。本文采用 ZFY-1A 型非饱和土应变控制式直剪仪，选取福州地区的高液限黏土，通过直剪试验研究吸力循环变化对非饱和和高液限黏土-土工织物界面剪切特性的影响。

2 研究方法

2.1 试样制备

将试验用高液限黏土烘干、粉碎、研磨、过筛后，加适量水配制成含水率为 20% 的湿土待用。将深圳海川新材科技有限公司生产的路威 T011 土工织物裁剪成 100 mm×100 mm 大小，并用胶水固定在同样尺寸的有机玻璃板上^[1-2]，要求土工织物不能收缩、脱落，胶液不能渗进土-土工织物界面。将固定有土工织物的有机玻璃板放入方形模具内；然后根据控制的干密度计算每层土的高度及用量，将高液限黏土在土工织物上分层击实；最后对完成后的试样称重，检查其密度是否符合要求。试样土体部分的干密度控制为 1.38 g/cm³。按照《土工试验方法标准》^[3]的要求，控制同组试样土体部分的含水率差值小于 1%，干密度之差不大于 0.02 g/cm³。高液限黏土的物理力学指标见表 1，土工织物的技术参数见表 2，完成试样如图 1 所示。

表 1 试样土的基本物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of samples					
土名	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	土颗相对 密度	自由膨胀率 /%
高液限黏土	91.95	36.2	55.7	2.74	61.5

表 2 路威 T011 土工织物技术参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of geotextile				
厚度 /cm	质量 /(g/cm ²)	抗拉强度 /(kN/m)	延伸率 /%	顶破强度 /N
3.40	300	22.0	65	3 200

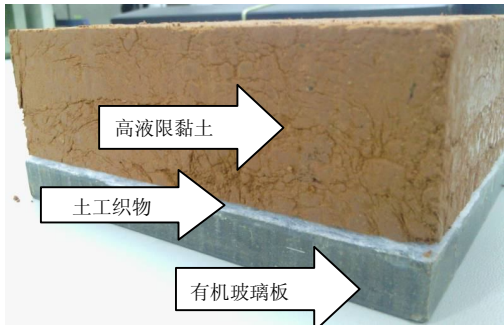


图 1 高液限黏土-土工织物界面试验试样

Fig.1 High liquid limit clay-geotextiles interface specimen

2.2 试验仪器设备

试验设备采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZFY-1A 型非饱和土应变控制式直剪仪。设备利用轴平移技术来控制试样土体的吸力，主要由压力室、加压系统、数据量测采集系统、体变及反压力控制器、装有陶土板的加压帽等部件组成；设有剪切位移限位装置、荷载传感器、位移传感器、孔隙水压力传感器；采用电动控制方式控制进气值，控制稳定可靠，具体如图 2、3 所示。

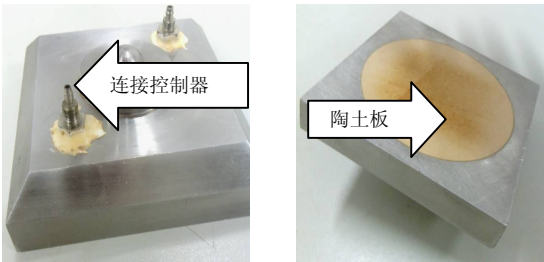


图 2 装有高进气值陶土板的加压帽

Fig.2 Top platen with ceramic disk

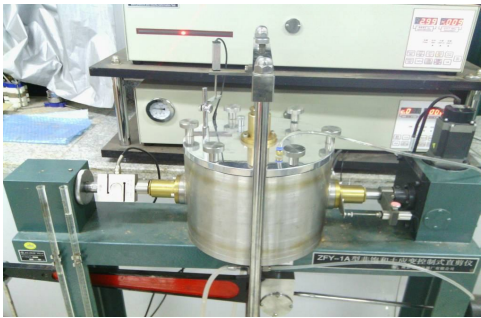


图 3 ZFY-1A 型非饱和土应变控制式直剪仪

Fig.3 Direct shear apparatus used in the present study

2.3 试验方案

为与工程实际一致，保留试样的初始基质吸力，吸力的施加从初始吸力值开始。龚壁卫等^[3]研究发现，非饱和土体经过 3 次干湿循环后土中孔隙的结构趋于稳定；方庆军等^[5]的试验证明，经过 3 次干湿循环后高液限黏土的内部结构、压缩系数的变化亦趋于稳定。因此，本文选用 4 种循环次数，最高循环 3 次。以 1~12 试验全部为控制吸力循环次数的非饱和和高液限黏土-土工织物界面排水慢剪试验。

表 3 界面干湿循环试验方案

Table 3 Scheme of direct shear tests			
试样方案	试样编号	循环次数	净法向应力/kPa
I	1、2、3	0	100、200、300
II	4、5、6	各 1 次	100、200、300
III	7、8、9	各 2 次	100、200、300
IV	10、11、12	各 3 次	100、200、300

试样安装时应使试样与高进气值陶土板等接触面充分接触; 然后将净法向应力增加到目标值 (OA); 利用轴平移技术施加目标吸力 (AB)。目标吸力达到后降低进气压力, 解除试样的吸力, 吸力 0 kPa 平衡后, 再次施加 100 kPa 的吸力, 待其脱湿平衡后, 即完成 1 次干湿循环。试验过程维持净法向应力不变。当 24 h 测得的进出水量小于试样体积的 0.05% ^[6]时, 认为吸力达到平衡, 竖向位移稳定后认为固结完成; 最后在恒定的基质吸力和净法向应力下以 0.01 mm/min 的恒速进行剪切, 详见图 4。

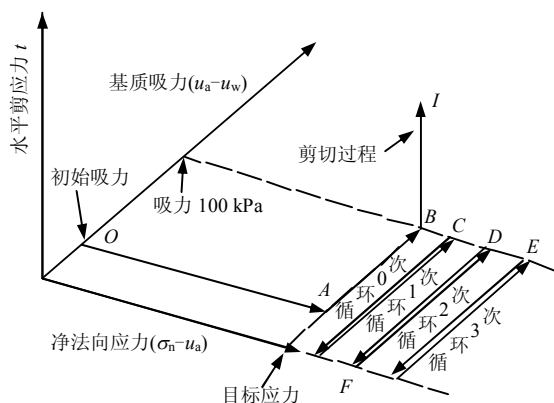


图4 应力变化路径

Fig.4 Stress paths of direct shear testing program

2.4 试验方法与试验过程

将装有试样模具的一端重叠于上剪切盒框口定位, 将试样缓慢推入剪切盒, 装上装有高进气值陶土板的加压帽, 使试样的上端与高进气值陶土板稳定接触, 即通过陶土板将试样中的孔隙水与反压及体变测量控制器连接起来, 以对试样的孔隙水压力

进行控制。非饱和和高液限黏土-土工织物试样安装简图如图 5 所示。通过软件启动各控制器, 按试验要求对试样施加竖向压力、孔隙气压力, 吸力平衡且固结完成后, 即开始剪切。

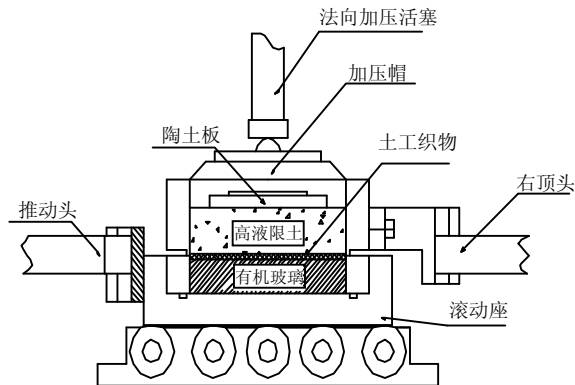


图5 土-土工织物试样安装简图

Fig.5 Schematic diagram of direct shear apparatus used for soil-geotextiles interface test

3 试验结果分析

3.1 应力-应变关系曲线

如图 6 所示, 循环 0 次时剪应力-位移曲线表现为轻微的应变硬化软化特性, 强度峰值不明显; 随着循环次数的增加曲线表现出应变软化特性, 峰值较为明显, 净法向应力越大软化现象越明显。对任何一次循环, 高液限黏土-土工织物界面的抗剪强度均随着净法向应力的增加而增大。表 4 说明, 循环 1 次的强度高于循环 0 次的强度, 随着循环次数的增加, 界面强度出现先升高而后衰减的趋势。经历 3 次干湿循环后, 界面强度低于未经历干湿循环的界面强度, 曲线表现出应变软化特性。

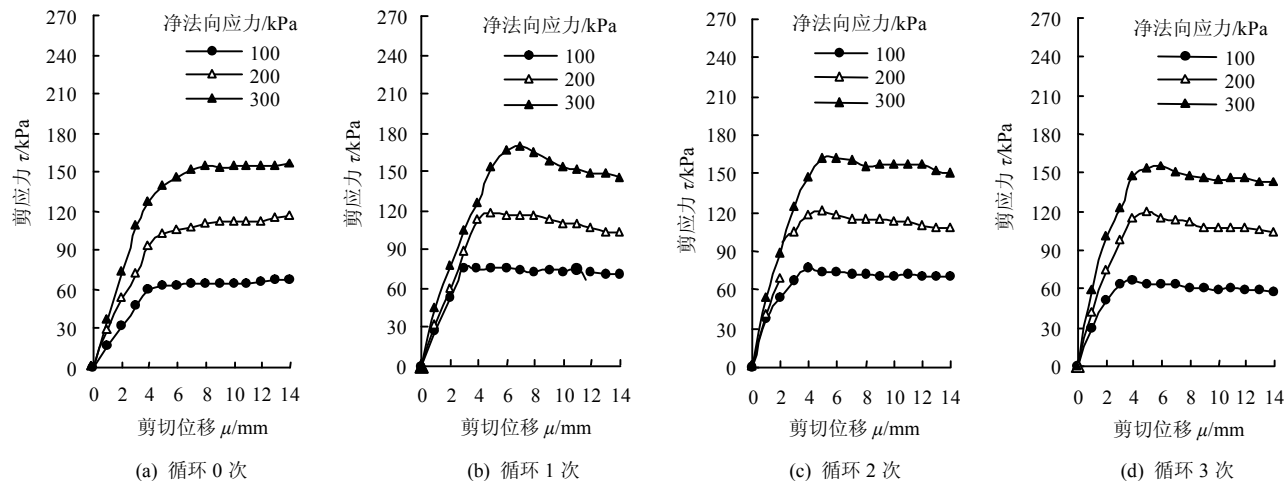


图6 不同净法向应力下剪应力与剪切位移关系

Fig.6 Curves of shear stress versus horizontal displacement for different net normal stresses

表4 土-土工织物界面抗剪强度

Table 4 Strength parameters of soil-geotextiles interface

吸力循环次数	净法向应力 /kPa	界面抗剪强度 /kPa
0次	100、200、300	67.7、112.6、156.2
各1次	100、200、300	76.0、118.7、167.3
各2次	100、200、300	71.9、115.2、161.3
各3次	100、200、300	67.1、110.6、155.2

循环0次的界面强度比循环1次的界面强度低, 主要是因为高液限黏土与土工织物之间的嵌合黏结等作用在0次循环时未充分发展, 彼此间的相互作用较弱, 导致强度比较低; 但高液限黏土的黏性较大, 经历1次干湿循环后水分进入界面, 形成具有一定排列方向的水膜, 水膜以各种作用力的方式与矿物颗粒、土工织物相互连接, 使界面处的各种相

互作用得以发展、加强, 提高了界面强度。随着循环次数的增加, 原生裂隙进一步扩展并产生新的裂隙, 对土的粒间及界面联结产生不可逆的损伤, 使界面强度出现衰减^[6]。

3.2 剪胀特性

剪切过程中试样的体积发生变化, 而剪切盒限制了试样的侧向变形, 因此, 采用高度的变化量 (h/H) 来表述试样体积的变化。图7分别为相同循环次数、不同净法向应力对界面剪胀量的影响。随着剪切位移的增加, 剪胀量先快速增长然后逐渐趋于稳定; 净法向应力越大稳定阶段的剪胀量越小, 即净法向应力对剪胀的发展有约束作用。图8分别反应了净法向应力相同、循环次数不同对剪胀量的影响, 稳定阶段的剪胀量呈现增大后减小的趋势。

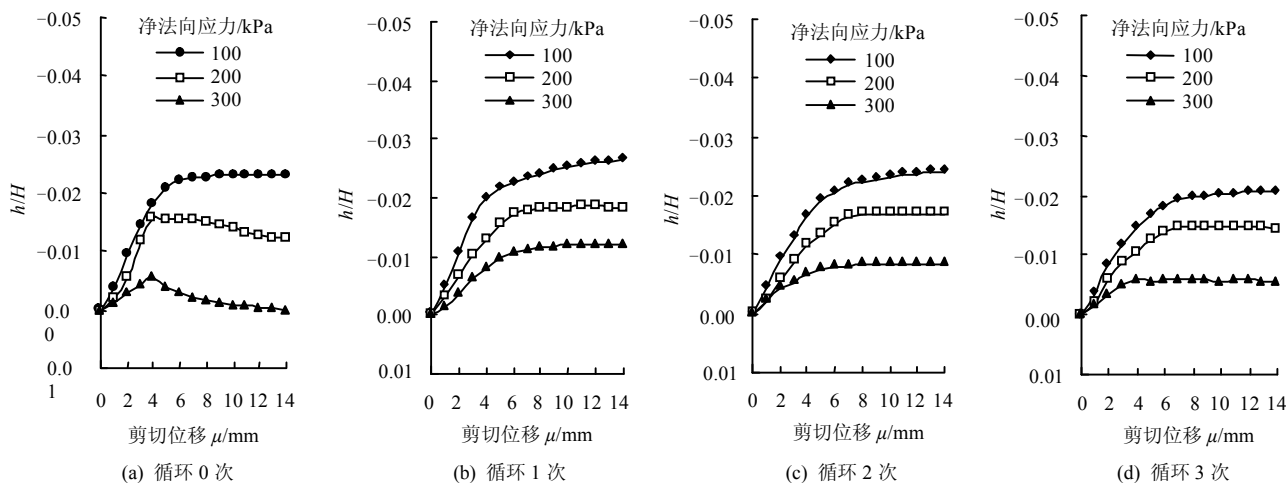
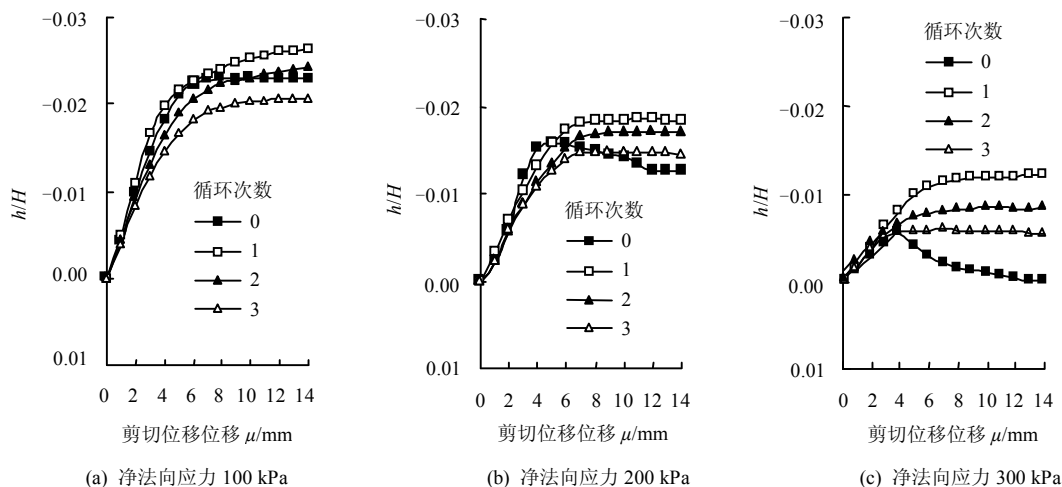
图7 相同循环次数、不同净法向应力时 h/H 与剪切位移关系Fig.7 Relationships between h/H and horizontal displacement for different net normal stresses图8 相同净法的应力、循环次数不同时 h/H 与剪切位移关系Fig.8 Relationships between h/H and horizontal displacement for different suction cycle times

图9、10说明最大剪胀量 (h/H)_{max} 随着净法向

应力的增加而减小, 随循环次数的增加先增大后减

小。该高液限黏土的膨胀率较大,在载荷条件下循环时吸水产生的膨胀被部分限制,土体的密实度提高,但随着循环次数的增加,土体结构发生变化产生微裂缝,孔隙比增大,因此 $(h/H)_{\max}$ 表现出先增后减的变化规律。

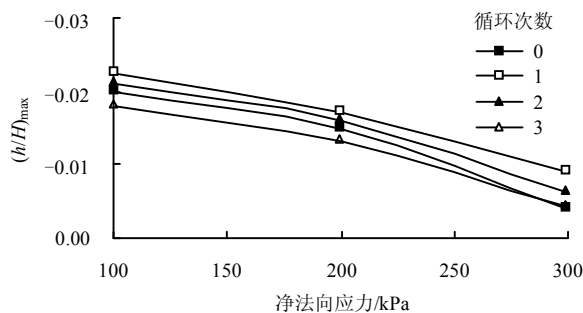


图9 净法向应力与 $(h/H)_{\max}$ 的关系

Fig.9 Relationships between $(h/H)_{\max}$ and net normal stresses

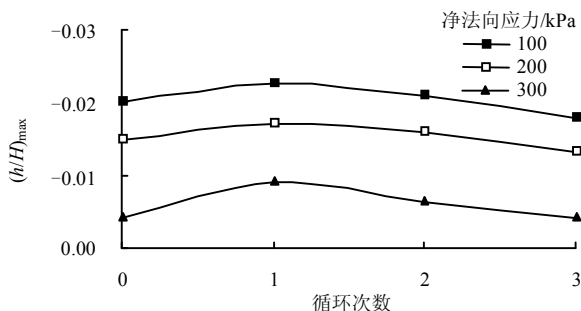


图10 循环次数与 $(h/H)_{\max}$ 的关系

Fig.10 Relationships between $(h/H)_{\max}$ and cycle times

土的剪胀角表示土在剪切过程中体积的变化率,同理本文用界面剪胀角 ψ_i 来表示剪切过程中界面体积的变化率,如公式(1)所示:

$$\tan \psi_i = -\delta_y / \delta_x \quad (1)$$

式中: ψ_i 为界面剪胀角; δ_y 为竖向位移增量; δ_x 为剪切位移增量。

表5 不同基质吸力、净法向应力下的界面剪胀参数

Table 5 Analytical values of interface dilatancy parameters

循环次数	净法向应力/kPa	界面剪胀角/(°)	界面剪胀角平均值/(°)
0次	100、200、300	8.53 6.28 2.58	5.80
各1次	100、200、300	9.09 7.13 5.71	7.31
各2次	100、200、300	8.81 6.56 2.00	5.79
各3次	100、200、300	8.25 5.43 3.15	5.61

表5为不同循环次数、不同净法向应力下的界面剪胀参数,其值说明界面剪胀角随着净法向应力的增加而减小,随着循环次数的增加先增大后减小。图11反映了循环次数相同、净法向应力不同时的界

面剪胀角对界面强度的影响,界面强度随着剪胀角的增大而减小。

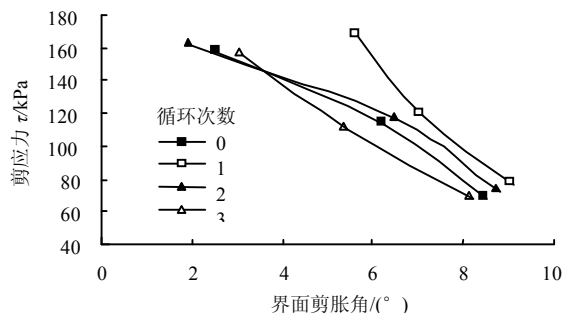


图11 循环次数相同净法向应力不同剪胀角对强度的影响

Fig.11 Variations of interface strength with interface dilation angle under different net normal stresses and cycle times

3.3 含水率

随着剪切地进行,试样的含水率一直在减小,有水从试样中排出。图12为含水率变化量的最大值 $\Delta w_{\max}$ 与净法向应力、吸力循环次数的关系曲线,从中可看出,净法向应力越大、循环次数越多, $\Delta w_{\max}$ 越大。张芳枝等^[8]和慕现杰等^[9]的研究表明,随着循环次数的增加,土体产生大量的微裂缝;且由于盐类溶质的流失导致土体中的最小孔隙有所增大。Albrecht等^[10]发现,由于土体内部裂隙数量的增多,土的渗透系数随干湿循环次数的增加而增大。因此, $\Delta w_{\max}$ 随着吸力循环次数的增加而呈增大。

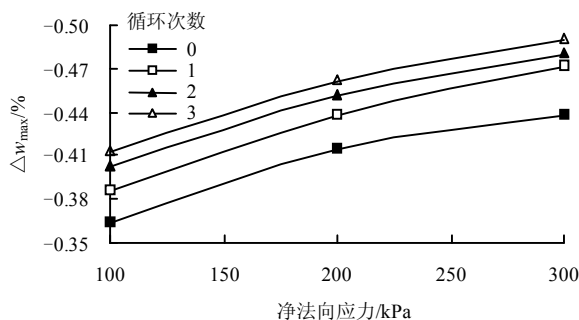


图12 净法向应力与 $\Delta w_{\max}$ 关系

Fig.12 Relationships between $\Delta w_{\max}$ and net normal

3.4 强度特性

不同循环次数下界面剪应力峰值与净法向应力的关系曲线及拟合公式如图13所示。如图可知,净法向应力与剪应力形成的强度包线近似线性,其斜率为 $\tan \delta'$,截距为 c'_s 。图14为各种净法向应力下界面抗剪强度与循环次数的关系曲线,从图中观察到,净法向应力相同时,随着循环次数的增加,界面强度出现先升高而后衰减的趋势,界面经历3次干湿循环,其强度低于未经历干湿循环的界面强度。

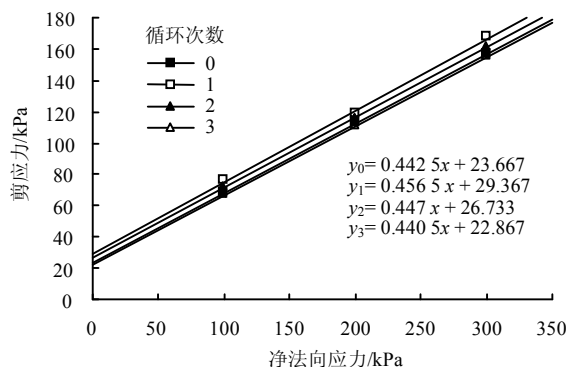


图 13 不同循环次数下净法向应力与抗剪强度包线

Fig.13 Failure envelopes corresponding to different cycle times

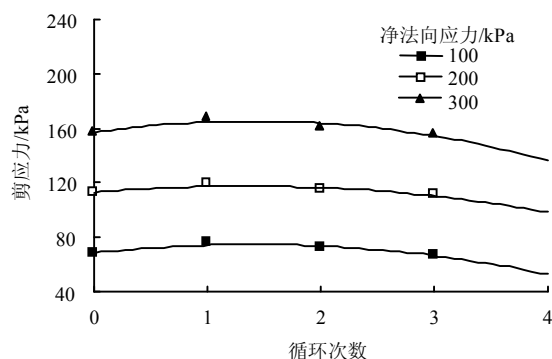


图 14 循环次数与抗剪强度包线

Fig.14 Failure envelopes corresponding to different net normal stresses

根据 Miller^[11]和 Hossain 等^[12-13]对各种非饱和界面剪切特性的研究结果,界面有效黏聚力 c'_a 计算公式为

$$c'_a = c_a + (u_a - u_w)_f \tan \delta^b \quad (2)$$

式中: c_a 为饱和条件下的界面黏聚力,本文试验结果为 3.77 kPa; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏发生时界面处的基质吸力; δ^b 为表示抗剪强度随基质吸力增加的速率。

将 δ' 、 c'_a 在不同吸力循环次数时的值及由式 (2) 计算出的 δ^b 值列于表 6。图 15 表明, δ^b 随吸力循环次数的增加,先增大后减小; δ' 、 c'_a 随循环次数的变化情况如图 16 所示,其变化规律与 δ^b 相似。循环 0 次的有效界面黏聚力比循环 1 次的小,之后随循环次数的增加呈衰减趋势,直至稳定。

表 6 δ' 、 c'_a 及 δ^b 随循环次数变化值
Table 6 Variation of δ' 、 c'_a and δ^b with cycle times

循环次数	$\delta' / (^\circ)$	c'_a / kPa	$\delta^b / (^\circ)$
1	23.87	23.67	11.25
2	24.54	29.37	14.36
3	24.08	26.73	12.93
4	23.77	22.87	10.81

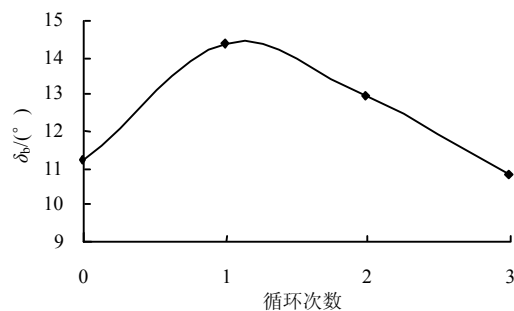
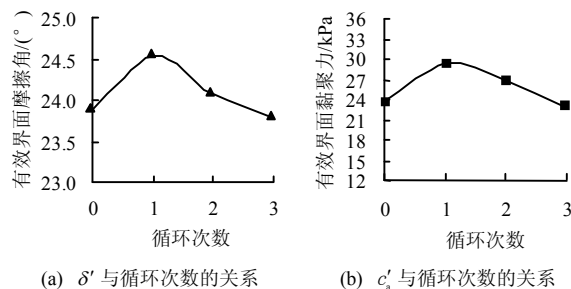
图 15 δ^b 与循环次数关系Fig.15 Relationship between δ^b and cycle times

图 16 δ' 、 c'_a 与循环次数关系
Fig.16 Relationships between δ' 、 c'_a and cycle times

《公路工程土工合成材料试验规程》^[14]将界面摩擦系数表述为 $f = \tan \delta$, 但这一方法不能合理反映黏聚力分量对界面抗剪强度的贡献。史旦达等^[14]将黏聚力分量等效成摩擦作用,用界面综合摩擦角 φ' 来体现界面黏聚力和内摩擦角的综合作用。因此根据摩尔-库仑强度理论及我国相关规范,将界面摩擦系数改进为界面综合摩擦系数。

$$f' = \tan \varphi' \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan \left(\tan \delta' + \frac{c'_a}{p} \right) \quad (4)$$

$$K = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} \quad (5)$$

式中: φ' 为界面综合摩擦角; δ' 为有效界面内摩擦角; p 为计算 δ' 时的净法向应力; f' 为界面综合摩擦系数; K 为综合摩擦系数比; φ 为高液限黏土的综合内摩擦角。

表 7、图 17、18 表明,循环次数相同时,净法向应力越大, f' 、 K 越小;随着循环次数的增加 f' 、 K 表现出与 δ' 、 c'_a 及 δ^b 相似的变化规律

对图 16 中的有效界面摩擦角曲线的后半段进行对数拟合,得到经历若干次基质吸力循环后的界面强度计算公式为

$$\delta' = -0.6969 \ln[N] + 24.546 \quad (6)$$

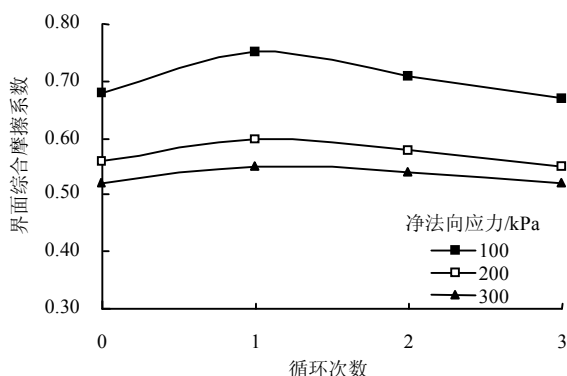
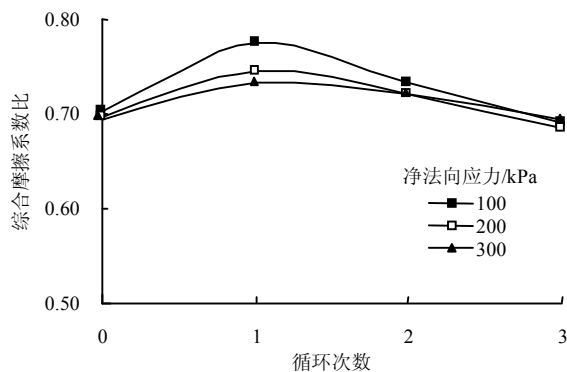
$$\tau_N = c'_a + (\sigma - u_a) \tan \delta' \quad (7)$$

式中: N 为循环次数; s 为基质吸力。

表 7 界面综合摩擦角 φ' 、摩擦系数 f' 及摩擦系数比 K

Table 7 Analytical values of interface parameters

循环次数	净法向应力/kPa	$\varphi' / (^{\circ})$	f'	K
0 次	100	34.22	0.68	0.702
	200	29.25	0.56	0.697
	300	27.47	0.52	0.694
各 1 次	100	36.87	0.75	0.775
	200	30.96	0.60	0.746
	300	28.81	0.55	0.734
各 2 次	100	35.37	0.71	0.733
	200	30.11	0.58	0.721
	300	28.37	0.54	0.721
各 3 次	100	33.82	0.67	0.692
	200	28.81	0.55	0.684
	300	27.47	0.52	0.694

图 17 界面综合摩擦系数 f' 与循环次数关系Fig.17 Relationships between f' and cycle times图 18 界面综合摩擦系数比 K 与循环次数关系Fig.18 Relationships between K and cycle times

从表 8 中可看出, 根据公式计算出的界面强度值与试验值较为接近。

表 8 界面抗剪强度计算值与试验值

Table 8 Experimental interface shear strengths and analytical results obtained from the model

循环次数	净法向应力/kPa	计算值/kPa	试验值/kPa
各 1 次	100、200、300	70.2、115.8、161.5	76.0、118.7、167.3
各 2 次	100、200、300	68.8、113.5、158.2	71.9、115.2、161.3
各 3 次	100、200、300	67.8、111.9、155.9	67.1、110.6、155.2

4 结 论

(1) 高液限黏土-土工织物界面的抗剪强度, 随着净法向应力的增加而增大, 随着循环次数的增加呈先增后减的变化规律。经历 3 次干湿循环, 界面强度低于未经历干湿循环时的强度。随着循环次数的增加, 界面强度总体上呈降低趋势。 δ^b 随吸力循环次数的增加先增大后减小, δ' 、 c'_a 、 f' 、 K 与此类似。

(2) $\Delta w_{\max}$ 随着净法向应力、循环次数的增加而增大。

(3) 净法向应力越大 $(h/H)_{\max}$ 越小, $(h/H)_{\max}$ 随循环次数的增加先增大后减小。界面剪胀角随着净法向应力的增加而减小; 随着循环次数的增加呈先增后减的趋势, 平均界面剪胀角也有类似的变化规律。循环次数相同、净法向应力不同时, 界面强度随相应剪胀角的增大而减小。

(4) 通过有效界面摩擦角曲线的后半段进行对数拟合, 可得到经历若干次基质吸力循环后的界面强度计算公式。

参 考 文 献

- [1] CHARBEL N K. Influence of hydraulic hysteresis on the mechanical behavior of unsaturated soils and interfaces[D]. America: University of Oklahoma, 2010.
- [2] 张嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 51—55.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-Min. Experimental study on behavior of interface between soil and geotextile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 51—55.
- [3] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999
- [4] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915—1918.
GONG Bi-wei, CHARLES W W NG, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1915—1918.
- [5] 方庆军, 洪宝宁, 林丽贤, 等. 干湿循环下高液限黏土与高液限粉土压缩特性比较研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(增刊 1): 73—77.

- FANG Qing-Jun, HONG Bao-Ning, LIN Li-xian, et al. Study on the different compression characteristic of high liquid limit clay and high liquid limit silt on wetting-drying cycles[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2011, 43(Supp.1): 73—77.
- [6] SIVAKUMAR V A. Critical state framework for unsaturated soils[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993.
- [7] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417—422.
- LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 417—422.
- [8] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41—46.
- ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 41—46.
- [9] 慕现杰, 张小平. 干湿循环条件下膨胀土力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 580—582.
- MU Xian-jie, ZHANG Xiao-ping. Research on mechanical properties of expansive soil under wetting-drying cycle[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 28(Supp.): 580—582.
- [10] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(1): 67—75.
- [11] MILLER H Interface direct shear testing of unsaturated soil[J]. **Geotechnical Testing Journal**, (2007), 30(3): 182—191.
- [12] HOSSAIN M A, YIN Jian-Hua. Behavior of a compacted completely decomposed granite soil from suction controlled direct shear tests[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(1): 189—198.
- [13] HOSSAIN M A. Experimental study on the interface behavior between unsaturated completely decomposed granite soil and cement grout[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2010.
- [14] 中华人民共和国行业标准 JTG E50—2006 公路工程土工合成材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [15] 史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等. 单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2237—2244.
- SHI Dan-da, LIU Wen-bai, SHUI Wei-hou, et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic geogrids and different soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2237—2244.

上接第 1571 页

- [3] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 473—476.
- CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 473—476.
- [4] 杨启贵, 刘宁, 孙役, 等. 水布垭面板堆石坝筑坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [5] 郭兴文, 王德信, 蔡新, 等. 混凝土面板堆石坝流变分析[J]. 水利学报, 1999, 30(11): 42—47.
- GUO Xing-wen, WANG De-xin, CAI Xin, et al. Rheological analysis of concrete faced rock-fill dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1999, 30(11): 42—47.
- [6] 夏志皋. 塑性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [7] DUNNE Fionn, PETRINIC Nik. Introduction to computational plasticity[M]. New York: Oxford University Press, 2005.