

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3225-06

加肋土工膜与砂土界面特性研究

高俊丽, 张孟喜, 张文杰

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, 简称 HDPE) 土工膜与土之间的抗剪强度较低是填埋场沿底部衬垫失稳的一个重要的原因。尽管糙面土工膜与黏土之间的摩擦系数较大, 但随着应力积累, 糙面土工膜很容易被拉裂, 或者由于表面的颗粒被磨掉而使界面摩擦性能降低。在传统土工膜的基础上, 提出了一种非满布单层加肋土工膜, 并进行大量的界面直剪试验, 研究在不同正应力和加肋间距下土工膜与砂土之间的界面特性、强度特性。试验结果表明, 条状土工膜提高的是黏聚力, 其内摩擦角有所下降, 而块状土工膜黏聚力和内摩擦角都有很大程度的提高; 随着加肋间距的减小, 黏聚力逐渐的增大, 而内摩擦角超过一定值后, 又随着加肋间距的增加逐渐减小, 这说明加肋间距存在一个最优值。加肋土工膜相比于光面土工膜、糙面土工膜, 在提高界面抗剪强度的同时, 依旧保持其较好抗拉裂性能, 是一种较好的新型土工合成材料。

关 键 词: 加肋; 土工膜; 剪应力; 直剪试验

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Interface property between sand and reinforced geomembrane

GAO Jun-li, ZHANG Meng-xi, ZHANG Wen-jie

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Interface instability between HDPE geomembrane and sand is a main reason for landfill structural failure on lining interface. Though frictional coefficient of textured geomembrane is large, it is easy to be splited by the huge tension force accumulated on the landfill lined slope, or to be weared and teared. A novel concept of reinforced HDPE geomembrane is proposed. A series of direct shear tests were carried out to investigate interfacial characteristics and stress mechanism under different normal stresses and spaces of reinforcement. Comparison was made between stress-strain relationship and strength property of reinforced geomembrane, smooth geomembrane and textured geomembrane. It was shown that cohesion of strip geomembrane was increased, internal frictional angle was reduced, while both of lump geomembrane were increased considerably. Along with decrease of space, cohesion of reinforced geomembrane added. However there is a gradual reduction of internal frictional angle when it exceeds a specific value. Compared with smooth geomembrane and textured geomembrane, reinforced geomembrane, as is a new kind of geosynthetics, not only has a higher interface shear strength with sand, but also has a better rupture strength.

Key words: reinforced; geomembrane; shear stress; direct shear test

1 引 言

为了防止填埋场中的渗滤液对地下水造成污染, 目前填埋场主要采用复合衬垫系统进行防渗。虽然包含有土工膜和黏土层的复合衬垫系统能将垃圾和渗滤液与周围环境有效隔离, 起到较好的防渗作用, 但由于土工膜和黏土之间界面剪切强度较低, 很容易沿该界面产生滑移及剪切破坏, 最终导致填埋场发生失稳破坏, 对周边环境造成灾难性破坏^[1]。如, 1988 年美国 Kettleman Hills 填埋场沿底部衬垫

系统第 2 层的 HDPE 土工膜-黏土界面发生整体滑动, 水平位移达到 10.67 m, 填埋场表面裂缝非常明显, 修复工作大费周折^[2]。尽管糙面土工膜与黏土之间的摩擦性能较好, 但由于受到加工工艺的限制, 其断裂强度明显低于同等规模的光面土工膜, 很容易在漫长的填埋过程中拉裂受损, 严重影响填埋场的正常使用, 因而糙面土工膜主要用于填埋场封顶的防渗, 而不用于场地衬垫中。

国内外学者对 HDPE 土工膜与黏土的界面直剪试验进行了大量的研究。Hoe 等^[3]在传统变形控制

收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40972192)。

第一作者简介: 高俊丽, 女, 1978 年生, 在职博士生, 实验师, 主要从事新型土工合成材料在填埋场上的应用研究。E-mail: susan_jl@staff.shu.edu.cn

通讯作者: 张孟喜, 男, 1963 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事新型土工加筋技术及地下结构方面的研究。E-mail: mxzhang@shu.edu.cn

直剪仪的基础上研制了 100 mm×100 mm 的直剪仪,用以测量 PVC 土工膜与压实黏土界面的摩擦特性,探讨了剪切位移与峰值强度之间的关系。Izgin 等^[4]运用 300 mm×300 mm 的大型直剪仪,分别对 HDPE 土工膜-砂土界面和 HDPE 土工膜-土工织物界面进行直剪试验,讨论了正应力对界面摩擦强度的影响。Kruse 等^[5]对 100 mm×100 mm 和 300 mm×300 mm 两种尺寸土工膜进行界面剪切试验,比较了光面 HDPE 土工膜和毛面 HDPE 土工膜界面摩擦特性的差别。丁建明等^[6]使用 TZY-1 型土工合成材料综合测定仪(100 mm×100 mm 剪切盒)对土工合成材料与黏土界面进行直剪试验研究,分析了法向应力、含水率等因素对界面摩擦特性的影响。这些研究只是利用现有材料来分析影响界面摩擦特性的各种因素,而没有从提高材料摩擦特性的角度去研究。

本文结合张孟喜等^[7-11]提出的立体加筋概念,提出了一种新的土工膜加肋方法——加肋土工膜,它是在传统光面土工膜的基础上设置条状或块状土工膜,如图 1(a)、(b)所示;或在传统光面土工膜的基础上布置三角形、台阶形、半球形、环形、柱形、锥形、圆台、棱台等不同几何形状的立体加肋,典型的加肋形式见图 1(c)、(d)。进行了大量的大型直剪试验,得到了加肋土工膜与砂土之间的剪应力与剪切位移关系及强度特性,并在此基础上,对加肋土工膜-砂土之间的剪切机制进行了分析。

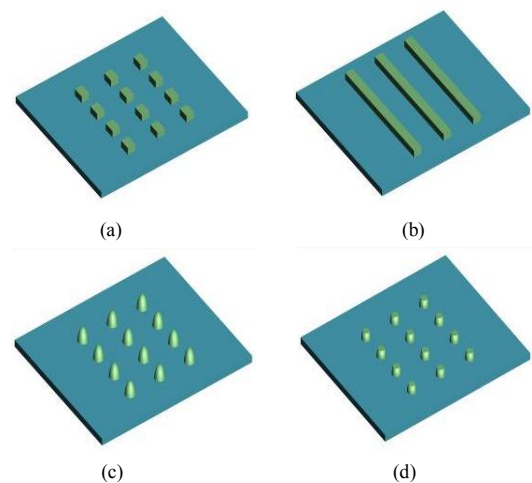


图 1 典型立体加肋方案
Fig.1 Typical three-dimensional reinforced geomembrane schemes

2 试验方案

2.1 试验设备

试验采用上海大学和上海深尔科科技有限公司

共同研制开发的大型剪拔仪,并在此仪器的基础上,对剪切盒进行了改装,如图 2 所示。整个装置的指标参数如下:上剪切盒有效剪切尺寸为 200 mm×200 mm×100 mm,在下剪切盒放置一尺寸为 296 mm×250 mm×182 mm “Ⅱ”字型板架,将土工膜通过不锈钢压条固定在“Ⅱ”字型板架上。下剪切盒长边尺寸较上剪切盒有效尺寸大 100 mm,可以保证在试验过程中剪切面积不变。试验过程中的垂直荷载和水平荷载分别由气压系统和电动机提供,最大正应力可达 600 kPa,最大水平剪切位移达 50 mm,通过高精度的荷载传感器和位移传感器,将试验数据传输到数据采集系统。



图 2 大型剪拔仪
Fig.2 Large scale direct shear- pullout apparatus

2.2 试验材料

2.2.1 砂

填料选用土样为纯净河沙,为了减少填料水分对试验结果的影响,本文采用干砂试样。其密度为 1.69 g/cm³,相对密度为 2.65,含水率为 0.12%,孔隙比为 0.57,试验时砂土的相对密度为 0.775,其颗粒级配见表 1。

表 1 纯砂的颗粒级配					
Table 1 Grain size distribution of sand					
颗粒粒径/mm	10~5	5~2	2~0.5	0.5~0.25	<0.25
颗粒级配/%	3.45	14.93	52.47	22.35	6.90

2.2.2 土工膜

试验用土工合成材料选用 1.5 mm 厚光面土工膜和 1.5 mm 厚糙面土工膜,它们分别标注为 SM 和 TM,其物理性质指标见表 2。

表 2 土工膜的物理性质						
Table 2 Physical index of geomembrane						
土工膜类型	厚度/mm	最小密度/(g/cm ³)	屈服强度/(N/mm)	断裂强度/(N/mm)	屈服点伸长率/%	断裂伸长率/%
光面	1.5	0.939	22	40	12	700
糙面	1.5	0.939	22	16	12	100

2.3 加肋土工膜布置方案及试验工况

土工膜试件长为 300 mm，宽为 250 mm，其有效长度 A 为 200 mm，有效宽度 B 为 200 mm。其上按一定方式粘贴一些肋块并用细小钉子将其加固，所加肋片是相同材质和相同厚度的土工膜，其中，条状肋块的尺寸为 15 mm×200 mm，块状肋块的尺寸为 15 mm×20 mm，沿剪切方向按一定肋块间距 s 布置，其特点是长边和短边方向均非满布布筋、竖直方向高度不变。加肋土工膜按条状和块状分别标注为 RM- n -S 和 RM- n -L。其中： n 为肋块沿剪切方向放置的数量，S 为条状，L 为块状，肋块高度为 1.5 mm。与传统的光面土工膜、糙面土工膜或复合土工膜相比，加肋土工膜除了依靠界面摩擦力限制土体的变形外，还有加肋部分抗力所引起的承载阻力（即咬合力）和加肋部分侧边的摩擦力（即侧摩阻力），是一个三维立体结构，提高了界面的摩擦系数。所用条状、块状在直剪试样中的具体布置方案如图 3 所示。

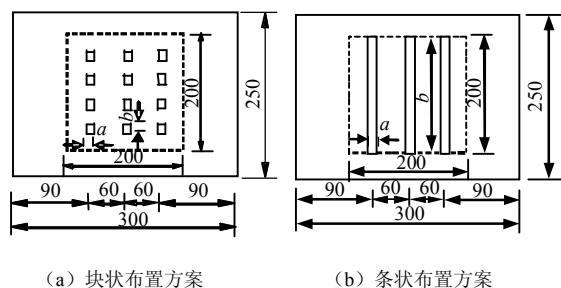


图 3 加肋土工膜布置方案 (单位: mm)

Fig.3 Experimental schemes for reinforcement (unit: mm)

根据肋块布置方式的不同，一共设计了 9 种试验工况，见表 3，每种工况分别在相应正应力下进行直剪试验，得到它们的剪应力-剪切位移曲线及强度规律。为了降低试验结果的离散性，对于相同正应力同一种加肋形式下的试样进行了 2~4 组平行试验，最后经汇总整理，共取有效数据 34 组。

为了更好地评价加肋土工膜的强度变化，这里引入加肋率 μ ，定义为加肋部分试样内全部加肋表面积与该试样相同规格有效表面积的比值，即

$$\mu = \frac{\sum ab}{AB} \times 100\% \quad (1)$$

式中： A 、 B 分别为土工膜有效长度和宽度； a 、 b 分别为单个加肋部分的长度和宽度。

表 3 不同试验工况

Table 3 Experimental cases

工况	肋块间距 /mm	加肋率 /%	正应力 /kPa
SM			50, 100, 150, 200, 300, 400
TM			
RM-1-S		7.50	100, 200, 300, 400
RM-2-S	80	15.00	100, 200, 300, 400
RM-3-S	60	22.50	100, 200, 300, 400
RM-1-L		2.25	50, 100, 150, 200
RM-2-L	80	4.50	50, 100, 150, 200
RM-3-L	60	6.75	50, 100, 150, 200
RM-4-L	40	9.00	50, 100, 150, 200

2.4 试验过程

在直剪试验中，将已装好土工膜的“II”字型板架放置在下剪切盒内，上剪切盒上面敞口，可以装填砂样，并通过加载板施加垂直压力。制备砂样时，按照统一的标准分 3 层装入砂样，并分层击实，每层击实次数一样，保证砂体的密实度一致。试样制备过程如图 4 所示。

试验数据以在剪切过程中的峰值点为破坏点，无峰值时，取某一规定的轴向应变对应的剪应力确定破坏点，绘制剪应力-剪切位移关系曲线。本试验采用应变控制，应变速率控制在 0.368 mm/min^[12]。



(a) “II”字型板架



(b) 下盒



(c) 上盒

图 4 试样装备

Fig.4 Test specimen preparation

3 试验成果及分析

3.1 剪应力-剪切位移曲线

3.1.1 条状加肋土工膜

条状加肋土工膜典型的剪应力-剪切位移曲线如图 5 所示。从图中可以看出，条状土工膜与砂土

之间的剪应力-剪切位移曲线形状基本呈双曲线形状, 剪应力随着剪切位移的增大而增大, 一般当剪切位移达到 8~10 mm 时, 剪应力达到峰值强度。在相同正应力下, 随着加肋率 μ 的增加, 峰值强度明显增大。

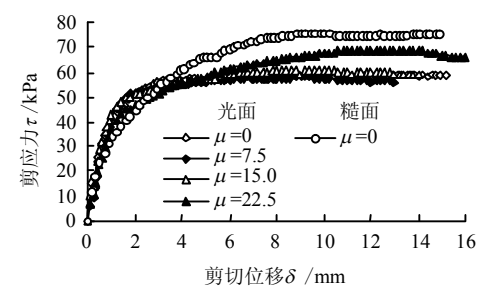
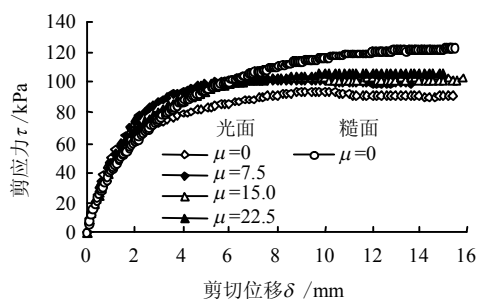
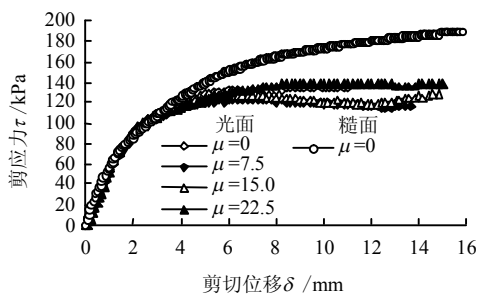
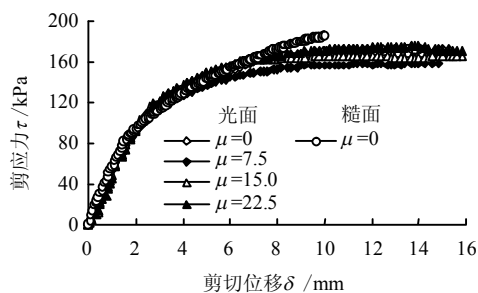
(a) $\sigma=100$ kPa(b) $\sigma=200$ kPa(c) $\sigma=300$ kPa(d) $\sigma=400$ kPa

图 5 条状加肋土工膜的剪应力-剪切位移曲线
Fig.5 Shear stress-displacement curves of strip reinforcement geomembrane

3.1.2 块状加肋土工膜

块状土工膜的典型剪应力-剪切位移曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 其剪应力-剪切位移曲

线形状与条状土工膜类似, 也是双曲线型。一般当剪切位移达到 8~12 mm 时, 剪应力达到峰值强度。在相同正应力下, 随着加肋率 μ 的增加, 峰值强度也随之增加。

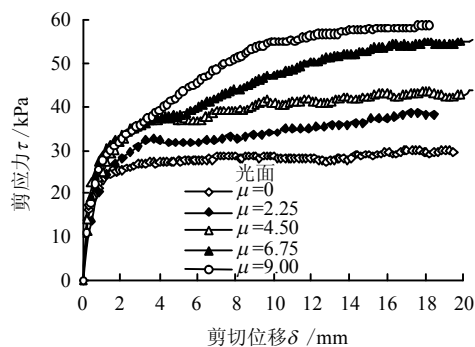
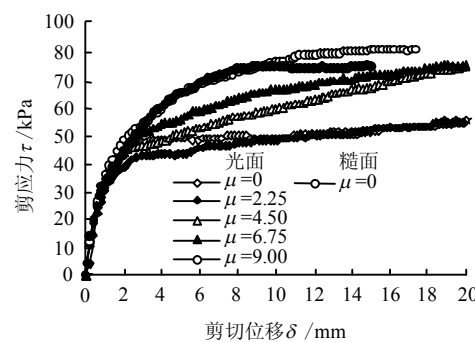
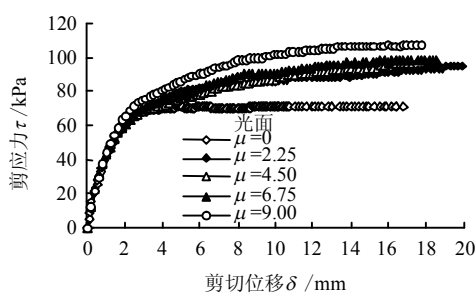
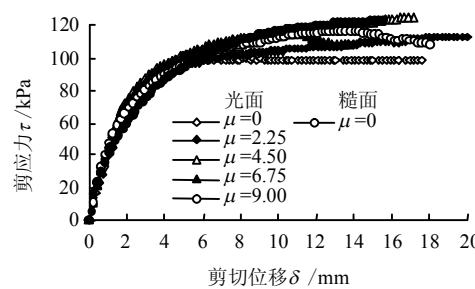
(a) $\sigma=50$ kPa(b) $\sigma=100$ kPa(c) $\sigma=150$ kPa(d) $\sigma=200$ kPa

图 6 块状加肋土工膜的剪应力-剪切位移曲线
Fig.6 Shear stress-displacement curves of lump reinforcement geomembrane

从图 5、6 还可以看出：在剪切过程中，剪应力虽随着位移的增加而增大，但增加趋势逐渐缓慢，并渐渐趋于平稳，多数情况下没有出现应力峰值。在试验的整个过程中，剪应力发展经过两个阶段：初始的快速增长阶段，其剪切位移分布在 1~4 mm 之间，以及随后的应变硬化阶段。加肋后，在同一正应力下，随着肋块间距的减小，其剪应力增大。另外，试验结果分析表明：存在一个最佳加肋间距，大于这个界限后竖向加肋的效果不能得到充分的发挥，材料使用也不够经济。从试验的结果分析，这个间距应该在 60~80 mm 左右。在正应力和加肋率相同的情况下，块状土工膜比条状土工膜的峰值剪切强度要高，这说明块状土工膜的块体与砂土之间有更强的约束挤密作用，块状土工膜表面也更加粗糙，增大了与填料间的摩擦力。

同时，由于加肋部分的存在，使其周围形成应力集中，从而降低了土工膜自身承受的水平应力，阻止了土工膜的横向拉伸。

3.2 强度特性

根据加肋土工膜直剪试验结果，可得试样在不同工况下破坏时的界面抗剪强度。采用最小二乘法，线性回归求得各组试样的强度指标，如图 7 和表 4 所示，回归直线的相关系数达到 0.98 以上，可见试验结果严格符合摩尔-库仑强度理论。从试验结果可以看出：

(1) 在正应力较小的情况下，条状土工膜比光面土工膜有更大的界面抗剪强度，但随着正应力的逐渐增加，光面土工膜界面抗剪强度达到或超过条状土工膜与纯砂之间的界面抗剪强度。究其原因，条状土工膜在正应力较大（如 300、400 kPa）的情况下，土工膜与纯砂之间的摩擦力也较大，导致土

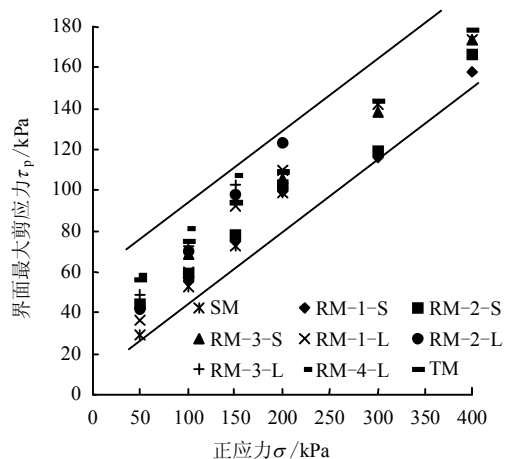


图 7 不同工况下的正应力与界面最大剪应力关系

Fig.7 Relationships between normal stress versus interface maximum shear stress with different experimental cases

表 4 界面强度指标

工况	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	R^2
SM	6.33	24.53	0.994 9
TM	38.78	19.62	0.999 2
RM-1-S	26.74	17.86	0.984 3
RM-2-S	27.58	18.64	0.982 8
RM-3-S	34.42	19.19	0.999 3
RM-1-L	11.54	26.80	0.989 7
RM-2-L	16.12	28.36	0.999 6
RM-3-L	21.23	28.18	0.994 0
RM-4-L	33.21	26.08	0.999 1

工膜从夹持端的钢条中缓慢拔出，另一端土工膜则慢慢拱起，从而引起剪应力下降明显。同时，加肋部分与下部土工膜出现了错位，加肋部分之间形成的“挤密区域”受到一定程度的破坏，削弱了其对砂土所产生的咬合力和嵌固力，减弱了其于砂土界面的摩阻力。而块状土工膜在整个试验过程中，由于所加正应力相对较小，加肋部分与土工膜之间没有发生滑移，所以随着正应力的增加，其界面抗剪强度增加明显，明显高于光面土工膜甚至糙面土工膜，说明加肋土工膜不仅具有较高的剪应力，还有着良好的断裂性能。

(2) 块状土工膜在试验过程中比条状土工膜更能充分发挥加肋部分侧面与填料间的侧摩阻力和加肋部分之间所形成的挤密区域对填料的有效约束作用，表现为在不同正应力下，相同加肋间距的块状土工膜界面抗剪强度明显高于条状土工膜。

(3) 从块状土工膜的试验结果还可以看出，随着加肋间距的减小，黏聚力逐渐增大，而内摩擦角超过 28.36°后，又随着加肋间距的增加逐渐减小，这说明加肋间距存在一个最优值。从试验结果看，这个加肋间距在 80 mm 左右。对糙面土工膜来说，尽管其黏聚力较大，但其内摩擦角很小，说明在较高正应力下，其界面摩擦力小，容易产生滑移。

3.3 加肋土工膜在不同工况下的加肋效果比较

为了更好地评价加肋后土工膜的加肋效果，引入加肋效果系数 R ：

$$R = \frac{\tau_f^R}{\tau_f} \quad (2)$$

式中： R 为强度加肋效果系数； τ_f^R 为加肋土工膜破坏时的峰值剪应力； τ_f 为光面土工膜破坏时的峰值剪应力。

根据上面的公式可计算出各组试样的强度加肋效果系数，见表 5。由表可知：

(1) 随着加肋间距的不断减小，加肋效果不断提高，说明加肋间距越小，加肋土工膜与纯砂之间

界面的摩擦力越大, 相对于光面土工膜与纯砂之间界面的摩擦力增量就越大。

(2) 在同种材料相同加肋间距的情况下, 加肋土工膜的加肋效果系数随着正应力的增大而减小, 与传统的水平加肋相似, 在低正应力下加肋的效果更好。这是由于在低正应力下, 砂土的侧向变形较大, 更加有利于发挥加肋部分的侧向约束力, 所以加肋效果更好。

表 5 不同工况下的强度加肋效果系数
Table 5 Reinforcing effect ratio with different experimental cases

工况	不同 σ_3 (kPa) 的加肋效果系数					
	50	100	150	200	300	400
SM	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TM	1.812	1.426	1.259	1.166	1.065	1.012
RM-1-S		1.128		0.974	0.915	0.883
RM-2-S		1.173		1.015	0.954	0.922
RM-3-S		1.325		1.112	1.029	0.985
RM-1-L	1.240	1.145	1.265	1.115		
RM-2-L	1.466	1.327	1.343	1.253		
RM-3-L	1.679	1.375	1.412			
RM-4-L	1.983	1.544	1.470			

4 结 论

(1) 本文所进行的几种加肋土工膜与砂土界面的试验数据表明, 条状土工膜提高的是黏聚力 c , 其内摩擦角 φ 反而有所下降, 而块状土工膜黏聚力 c 和内摩擦角 φ 都有很大程度的提高。这说明在较高正应力下, 块状加肋比条状有更好的加肋效果。

(2) 加肋土工膜-砂土的试验结果可以回归成为一条直线, 且 c 值在 11~35 kPa 之间, 随着加肋间距的减小, 黏聚力逐渐的增大, 而内摩擦角超过一定值后, 又随着加肋间距的增加逐渐减小, 这说明加肋间距存在一个最优值。从试验结果看, 这个加肋间距在 80 mm 左右。

(3) 加肋土工膜相比于光面土工膜、糙面土工膜, 能在一定程度上提高界面剪切强度, 同时由于其依旧具有较好的抗拉裂性能, 是一种较好的新型土工合成材料。

参 考 文 献

- [1] 高丽亚. 垃圾填埋场沿底部衬垫界面失稳破坏及土工膜拉力研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [2] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure I: liner-system properties[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1990, 116(4): 647—668.
- [3] HOE L, AHMET P. Interactions between PVC

geomembranes and compacted clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(11): 950—954.

- [4] IZGIN M, WASTI Y. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1998, 16(4): 207—219.
- [5] KRUSE T, VOIGT T. Frictional behaviour between smooth and rough geomembrane, various soils and geotextiles[C]//Proceedings of Prediction Versus Performance in Geotechnical Engineering Symposium, Bangkok: [s. n.], 1992: 67—76.
- [6] 丁建明, 张波. 土工合成材料与粘土接触面直剪试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2005, 22(2): 14—17.
DING Jian-ming, ZHANG Bo. Study of the interaction between geosynthetics and clay through direct-shear test[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2005, 22(2): 14—17.
- [7] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (8): 931—936.
ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Triaxial tests on sand reinforced with one-layer 3D reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 931—936.
- [8] ZHANG M X, ZHOU H, JAVADI A A, et al. Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal-vertical orthogonal elements[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(1): 1—13.
- [9] ZHANG M X, JAVADI A A, MIN X. Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(4): 201—209.
- [10] 张孟喜, 张石磊, 黄瑾. 低超载下条带式带齿加筋界面特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1623—1629.
ZHANG Meng-xi, ZHANG Shi-lei, HUANG Jin. Behavior of interface between denti-strip geosynthetic reinforcements and soil under low surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11): 1623—1629.
- [11] ZHANG M X, ZHOU H. Model test on sand retaining wall reinforced with denti-strip inclusions[J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2008, 51(12): 2269—2279.
- [12] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3101—3106.
XU Chao, MENG Fan-xiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3101—3106.