

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.006

多层复合衬垫界面非线性强度特性的斜面单剪试验

施建勇^{1,2}, 钱学德^{1,2,3}, 朱保坤^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 密歇根州环境保护厅, 密歇根 兰辛 48933)

摘要: 为研究位于垃圾填埋场斜坡上衬垫结构在垂直应力作用下沿斜坡滑移的剪切特性, 研制了大型叠环斜面单剪系统。通过砂-无纺土工布-土工网-HDPE膜-黏土结构的大型斜面单剪试验, 得到剪切过程中发生破坏面转移位移对应的垂直应力和水平应力, 计算得到位移面的转移法向应力。试验结果表明: 当界面的法向应力小于转移法向应力时, 破坏面为土工网与土工膜界面; 当界面的法向应力大于转移法向应力时, 破坏面为土工膜与黏土界面。建议破坏面转移前后的界面强度包线用双直线表示, 土工膜与相邻材料的剪切强度特性用双曲线表示, 破坏面的转移法向应力等参数由试验确定; 大型叠环斜面单剪系统为分析多层复合衬垫剪切特性提供新的试验研究方法。

关键词: 衬垫界面力学特性; 多层复合衬垫界面剪切特性; 大型叠环斜面单剪试验; 转移法向应力; 双线性; 双曲线; 新试验方法

中图分类号: TU459+.2; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)04-0315-06

Inclined ring simple shear test for nonlinear interface strength behavior in multi-layer composite liner

SHI Jianyong^{1,2}, QIAN Xuede^{1,2,3}, ZHU Baokun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Michigan Department of Environmental Quality, Lansing 48933, USA)

Abstract: A large-scale inclined ring simple shear system was developed to investigate the shearing behavior of landfill liner systems placed on the side slopes under vertical stress. A test was conducted on a multi-layer composite liner system, which consisted of a sand layer, nonwoven geotextile, geonet, HDPE geomembrane, and compacted clay. The normal transfer stress was calculated by the vertical and horizontal stresses according to transfer deformation of sliding surfaces. The results show that failure occurred at the interface between the geonet and geomembrane when the normal stress was lower than the normal transfer stress. The failure face would shift to the interface between the geomembrane and compacted clay when the normal stress was higher than the normal transfer stress. It is suggested that envelopes of the interface before and after failure transfer be simulated by bilinear curves, the interface shear behavior between the geomembrane and adjacent materials be expressed as hyperbolic curves, and the parameters, such as normal transfer stress, be determined by the test. The large-scale inclined ring simple shear device provides a new method for investigating the interface behavior of multi-layer composite liner systems.

Key words: liner interface mechanical behavior; multi-layer composite liner shear behavior; large-scale inclined ring simple shear test; normal transfer stress; bilinear; hyperbolic; new test method

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(41172234)

作者简介: 施建勇(1965—), 男, 江苏如皋人, 教授, 博士, 主要从事城市卫生填埋工程研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn

垃圾填埋场中垃圾体沿衬垫界面平移破坏的比例较高^[1],如图1(a)所示。为了研究垃圾体的稳定性,保证垃圾填埋场安全,需要开展衬垫界面力学特性研究。现有的研究以直剪试验为主^[2-4],扭剪和单剪试验也有较好的研究进展^[5-8],还有拉拔试验^[9-10]等方法可用于衬垫界面力学特性的研究;但上述试验研究的剪切面都是水平的。对于沿衬垫界面的平移破坏,滑动面同时沿斜坡和底部衬垫;位于底部的衬垫界面,其力学特性可由剪切面是水平的研究方法获得;位于斜坡的衬垫界面,在与界面成某一角度垂直应力作用下发生沿衬垫层面平行方向的相对位移,如图1(b)所示;与剪切面水平时的受力变形特点不同。

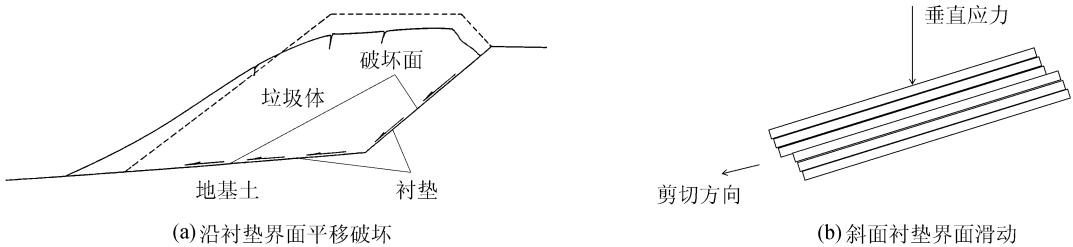


图1 垃圾体沿衬垫系统滑动破坏示意图

Fig. 1 Sketch map of sliding failure of waste wedge on liner

为了研究位于斜坡上衬垫界面的力学特性,Muller等^[11]研制了坡度1:2.5的斜面剪切仪,用于土工复合膨润土衬垫(GCL)长期剪切强度试验研究。Mizyal等^[12]利用斜板仪和传统直剪仪对不同纹理的HDPE膜与不同性状的砂之间的界面特性进行了对比试验研究,斜板仪试验的压力范围是5~50 kPa,得到较好的试验结果。徐超等^[13]采用直剪仪和斜板仪研究了不同粗糙程度的HDPE膜分别与砂土、土工布及土工复合材料之间的界面摩擦特性,直剪试验得到的界面摩擦角小于斜板试验结果,而直剪试验得到的界面黏聚力大于斜板试验结果。

在我国,山谷型垃圾填埋场占相当大的比例,此类填埋场大多具有较长的边坡,填埋场内的边坡面积大于底部面积。位于斜坡的衬垫系统受到来自上部垃圾体的竖向压力作用,产生沿斜坡方向剪切变形的趋势。现有的直剪试验、拉拔试验、扭剪试验不能模拟位于斜坡上衬垫系统的应力状态,斜板仪虽然能够模拟斜面,但无法满足高应力条件。本课题组设计制作了一套大型叠环式斜面剪切仪,在完成标准砂、黏土、黏土与光面土工膜斜面直剪试验的基础上^[14],对卫生填埋场斜坡上含有多种土工合成材料的多层复合衬垫进行加载过程中不同材料界面间的剪切强度变化规律以及复合衬垫整体变形破坏过程的单剪试验进行研究,为建立填埋场斜坡上多层复合衬垫的力学模型提供试验基础。

1 大型叠环式斜面单剪仪

大型叠环式斜面单剪仪是在叠环式水平面单剪仪基础上改进研制的,其加载系统和数据采集系统具有原系统的特性参数^[7,10]。斜面单剪仪系统和椭圆形叠环见图2。系统可实现最大2.8 MPa的垂直加载,可模拟约200 m高垃圾填埋工程中多层复合防渗衬垫界面的剪切特性;衬垫中的各层材料或用于试验的土工复合膨润土衬垫(GCL)的土工织物用环氧胶粘贴在叠环上,保证剪切过程中柔性材料不褶皱;叠环厚度

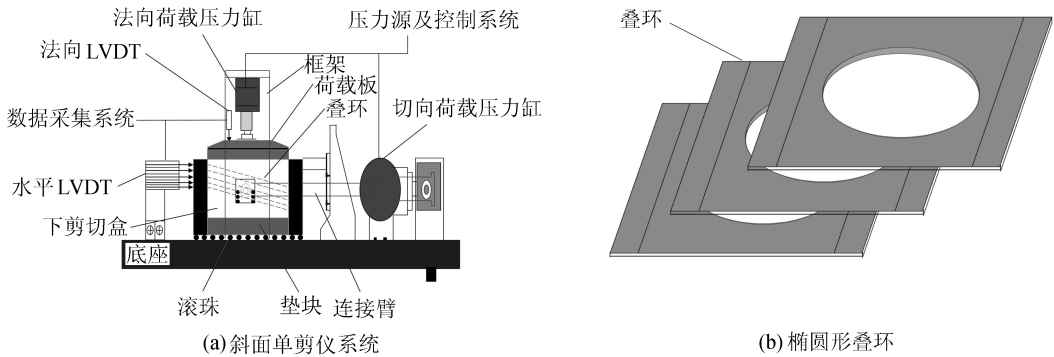


图2 斜面单剪仪示意图

Fig. 2 Sketch map of inclined ring simple shear apparatus

1.5 mm,小于衬垫材料的厚度,剪切过程中叠环不承受法向应力和剪切应力)。斜面上应力分析见图 3(α 是剪切倾斜面的角度, N 是垂直千斤顶施加的荷载, T 是水平千斤顶施加的荷载, N' 是支座法向反力, T' 是作用于下剪切倾斜面的反力, σ 是剪切界面上的法向应力, τ 是剪切界面上的剪切应力)。通过改变 α ,系统能实现不同坡比斜坡上衬垫的界面特性研究。剪切盒结构见图 4,通过一组与各个叠环接触的水平位移传感器可实现对多层复合防渗衬垫各层界面的位移监测。本次试验斜面的坡度为 1 : 3。

2 复合衬垫剪切特性的大型叠环式斜面单剪试验

本次试验是为了研究垃圾填埋场斜坡上多层复合衬垫的界面剪切特性,属于单元试验。用于试验的材料与文献[10]相同,新增复合排水网的主要土工参数如下:网芯厚度为 5 mm,单位面积质量为 1 400 g/m²,横向抗拉强度为 15 kN/m,纵向抗拉强度为 18 kN/m,法向渗透系数为 0.5 cm/s,导水率为 1.2×10⁻³ m²/s。

本次试验主要针对衬垫结构:砂-无纺土工布-土工网-HDPE 膜-黏土,研究多层复合防渗衬垫界面剪切特性;同时分析砂-复合排水网-HDPE 膜-黏土、砂-复合排水网-HDPE 膜-复合排水网-HDPE 膜-黏土复合结构的试验结果。每一种结构分 6 级初始垂直压力 (28 kPa,56 kPa,112 kPa,336 kPa,560 kPa,1000 kPa) 进行试验。选取剪切速率为 0.3 mm/min,剪切位移达到 21 mm 后可以结束试验,系统能够达到的最大剪切位移为 30 mm。

试验时,先在下剪切盒中按照控制的密度度装好砂样,将固定在叠环上的土工布、土工网、HDPE 膜分别依次叠放,安装上剪切盒,再装入一定质量配置好含水率的黏土,击实到一定厚度以达到其控制密度;施加垂直力,待垂直位移传感器读数稳定后施加水平力,量测垂直力、水平力、下剪切盒和各界面的位移,直到试验结束。图 5 是衬垫结构斜面单剪试验的正应力~位移曲线;低垂直压力下的正应力~位移曲线在约 10 mm 剪切位移时发生转折;高垂直压力时,正应力~位移曲线在约 5 mm 剪切位移时发生转折;转折前后正应力~位移曲线近似直线,但转折前斜率大,转折后斜率小。图 6 是衬垫结构斜面单剪试验的剪切应力~位移曲线。图 6 表明:(a)曲线表现出明显的非线性和硬化特征。(b)剪切应力在剪切位移小于 5 mm 时增加较快;剪切位移大于 5 mm 时剪切应力的增加普遍变缓,但保持增加趋势,没有出现软化现象。

根据图 5 和图 6,初始垂直压力为 336 kPa 的试验中,位移 7.4 mm 时可以计算得到位移面转移的法向应力为 526.0 kPa,剪切应力为 174.7 kPa,发生了破坏面转移;在初始垂直压力等于 560 kPa 时,计算得到施加

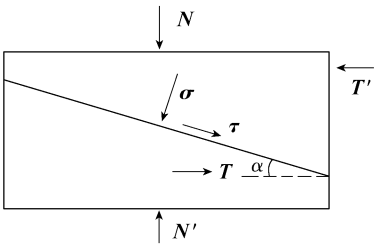


图 3 剪切面受力分析示意图
Fig. 3 Sketch map of forces on shear surface

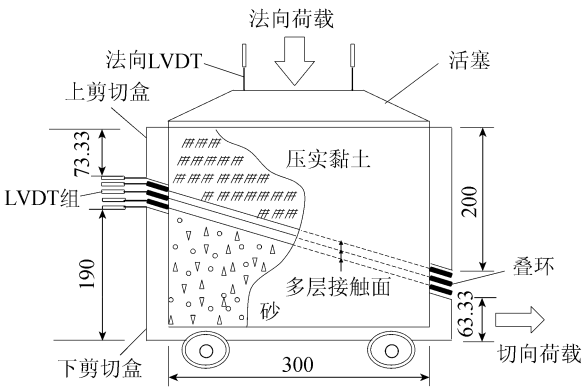


图 4 斜面单剪仪剪切盒结构示意图(单位:mm)
Fig. 4 Sketch map of inclined ring simple shear box (units: mm)

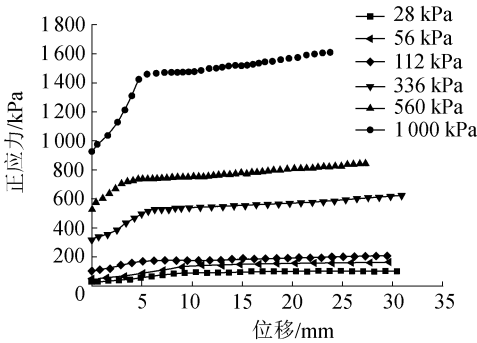


图 5 衬垫结构的正应力~位移关系

Fig. 5 Normal stress vs. displacement on liner

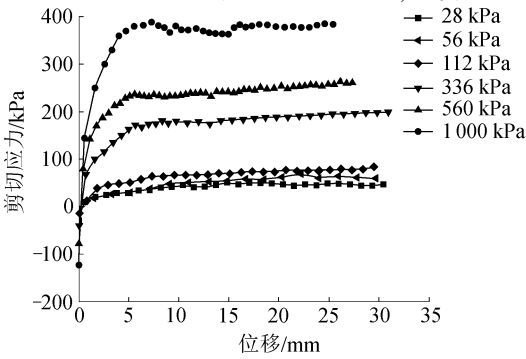


图 6 衬垫结构的剪切应力~位移关系

Fig. 6 Shear stress vs. displacement on liner

水平力前界面的法向应力为 531.0 kPa,而试验过程中土工膜与黏土界面的位移一直大于其他界面,且是唯一破坏界面。故可以认为法向应力 526.0 kPa 是本次试验破坏面转移的临界法向应力,当界面的法向应力小于 526.0 kPa 时破坏面为土工网与土工膜界面,当界面的法向应力大于 526.0 kPa 时破坏面为土工膜与黏土界面。

与水平面单剪试验结果^[7,10]对比可见,斜面单剪试验可以通过位移~时间曲线在试验过程中直接发现破坏面转移的现象,且能够计算出破坏界面转移的临界法向应力点;水平面单剪试验能发现破坏面转移现象,但只能得到破坏界面转移的临界法向应力范围,临界法向应力需要逐步逼近,无法直接确定出破坏界面转移的临界法向应力。

由于多层复合衬垫剪切时随法向应力增加可能会发生破坏面转移,在法向应力较低时破坏面会发生在土工网和土工膜界面,法向应力较高时破坏面会发生在黏土和土工膜界面,不同的材料界面会有不同的强度参数,故在破坏面发生转移前后,剪切强度包线是不同的。破坏面转移前后的界面强度包线可表示为

$$\tau_f = \begin{cases} c_1 + \sigma_n \tan \varphi_1 & \sigma_n \leq \sigma_{nc} \\ c_2 + \sigma_n \tan \varphi_2 & \sigma_n > \sigma_{nc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_f ——界面剪切强度; c_1, c_2 ——破坏界面 1 和破坏界面 2 的黏聚力; σ_n ——界面的法向应力; σ_{nc} ——破坏面发生转移的临界法向应力; φ_1, φ_2 ——破坏界面 1 和破坏界面 2 的摩擦角。

不同破坏面强度参数列于表 1。

表 1 不同破坏面强度参数

Table 1 Strength parameters on different failure surfaces

网(布)-光面膜界面		黏土-光面膜界面		数据来源	网(布)-光面膜界面		黏土-光面膜界面		数据来源
c_1/kPa	$\varphi_1/(\text{^\circ})$	c_2/kPa	$\varphi_2/(\text{^\circ})$		c_1/kPa	$\varphi_1/(\text{^\circ})$	c_2/kPa	$\varphi_2/(\text{^\circ})$	
20.9*	18.8*	26.3	18.1	朱保坤 ^[15]	0.5~3.9***	8.6~11.1***			McCartne 等 ^[4]
20.7**	16.3**	72.4	12.2	本文试验	0***	9.03***			Stark 等 ^[5]
19.3*	15.9*	43.7	13.4	朱保坤 ^[15]	7.3***	10.5***			Fox 等 ^[8]
0*	18.1*	26.4	10.6	刘慧 ^[16]	0***	11.0***			Koerner 等 ^[17]
7.7**	14.0**	60.7	7.7	刘慧 ^[16]	0**	11.0**	7.0	11.0	Koerner 等 ^[17]
8.2*	13.6*	125.1	5.3	刘慧 ^[16]	0*	15.0*			Koerner 等 ^[17]

注:表中参数均为峰值强度指标;*表示复合排水网,**表示土工网,***表示无纺土工布。

表 1 结果表明:土工网-光面膜界面的强度参数取 $c_1=0.0\text{ kPa}$, $\varphi_1=11^\circ\sim13^\circ$ 能够保证工程安全;复合排水网-光面膜界面的强度参数取 $c_1=0.0\text{ kPa}$, $\varphi_1=13^\circ\sim15^\circ$ 是可行的。由于黏土-光面膜界面的破坏是在较高法向应力下发生的,得到的黏聚力较高;通常情况下界面剪切试验法向压力小于 500 kPa^[4-5,8],得到的黏聚力较低,建议在破坏面发生转移后黏土-光面膜界面的黏聚力取 $c_2=(3\sim5)c_1$,黏土-光面膜界面的摩擦角 φ_2 可取低法向压力下的试验结果;关于 σ_{nc} 的取值还没有规律可循,建议通过相应的试验获取。文献[8]测到的 $\sigma_{nc}=629\text{ kPa}$,本文前述试验确定的 $\sigma_{nc}=526.0\text{ kPa}$ 。

破坏界面常与土工膜相关,为此进行了黏土、黏土-土工膜、土工网-土工膜界面斜面剪切试验;在法向应力较低时,剪切强度随法向应力增加的幅度较快;在法向应力较高时,剪切强度随法向应力增加的幅度较慢,剪切强度与法向应力曲线有趋于水平的特征。双曲线法是计算界面剪切强度与法向应力关系曲线的方法之一^[18-19]。

$$\tau_f = \frac{\sigma_n}{\frac{1}{a} + \frac{\sigma_n}{b}} \quad (2)$$

式中: a ——剪切强度与法向应力曲线初始切线斜率; b ——剪切强度渐近值。

相关文献资料整理得到的 a 和 b 见表 2。表 2 中 a 和 b 数值没有明显的规律。黏土-光面土工膜的 a 值可取 0.5,土工网-光面土工膜的 a 值略

表 2 土工膜界面剪切强度与法向应力双曲线参数
Table 2 Hyperbolic parameters of shear strength vs. normal stress on geomembrane interface

界面	a	b	数据来源
黏土-光面土工膜(峰值)	0.486	971	本文试验
黏土-光面土工膜(残余)	0.541	574	本文试验
土工网-光面土工膜	0.758	622	本文试验
黏土-光面土工膜(峰值)	0.505	143	Esterhuizen 等 ^[3]
黏土-光面土工膜(残余)	0.333	76	Esterhuizen 等 ^[3]
黏土-光面土工膜	0.485	19	Giroud 等 ^[7]

高,即在法向应力较低时剪切强度随法向应力增加快于黏土-光面土工膜; b 是剪切强度与法向应力曲线的渐近值,没有统一的取值范围,应由试验结果计算确定。

3 结 论

a. 研制的大型叠环斜面单剪系统,能实现对填埋深度约 200 m、位于垃圾填埋场不同坡比斜坡上多层复合衬垫结构的剪切特性研究,试验过程中能监测各层界面的位移,为分析多层复合衬垫剪切特性提供新的试验研究方法,且在确定破坏面转移的临界法向应力上有其他仪器不具备的便捷性,试验结果更合理。

b. 在砂-土工布-土工网-HDPE 膜-黏土复合衬垫结构的大型斜面单剪试验中发现,当初始垂直压力小于某一值时,土工网与土工膜界面为多层复合衬垫破坏界面;当初始垂直压力大于某一值时,剪切过程中发生了破坏界面由土工网与土工膜界面转移到土工膜与黏土的界面的现象;当初始垂直压力更大时,土工膜与黏土界面的位移明显大于其他界面,并一直增加到土工膜与黏土界面破坏。

c. 在某一初始垂直压力下,由剪切过程中发生破坏面转移的位移对应的垂直应力和水平应力可以计算得到位移面转移的临界法向应力。当界面的法向应力小于临界法向应力时,破坏面为土工网与土工膜界面;当界面的法向应力大于临界法向应力时,破坏面为土工膜与黏土界面;临界法向应力的结论被更大初始垂直压力下的试验结果所证实。

d. 斜面单剪试验得到的界面剪切特性参数与相关文献资料的结果有一定的可比性,建议破坏面转移前后的界面强度用不同的强度包线来表示,破坏面转移的临界法向应力由试验确定;土工膜与相邻材料的剪切强度特性可用双曲线表示。

参考文献:

- [1] QIAN Xuede, KOERNER R M. Stability analysis for using engineered berm to increase landfill space[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(8): 1082-1091.
- [2] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1735-1744. (BAO Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1735-1744. (in Chinese))
- [3] ESTERHUIZEN J J B, FILZ G M, DUNCAN J M. Constitutive behavior of geosynthetic interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 834-840.
- [4] McCARTNEY J S, ZORNBERG J G, ROBERT H S. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(2): 209-223.
- [5] STARK T D, WILLIAMSON T A, EID H T. HDPE geomembrane/geotextile interface shear strength[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(3): 197-203.
- [6] FOX P J, ROBERT H K. Effect of progressive failure on measured shear strength of geomembrane/GCL interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(4): 459-469.
- [7] 钱学德,施建勇,刘慧,等. 垃圾填埋场多层复合衬垫的破坏面特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 840-845. (QIAN Xuede, SHI Jianyong, LIU Hui, et al. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 840-845. (in Chinese))
- [8] FOX P J, ROSS J D. Relationship between GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(8): 743-753.
- [9] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure I: liner-system properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(4): 647-668.
- [10] 施建勇,钱学德,朱月兵. 垃圾填埋场土工合成材料的界面特性试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 688-692. (SHI Jianyong, QIAN Xuede, ZHU Yuebing. Experimental methods for interface behaviors of geosynthetics in landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 688-692. (in Chinese))
- [11] MULLER W, JAKOB I, SEEGER S, et al. Long term shear strength of geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 130-144.
- [12] MIZYAL I, YIDIZ W. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests[J]. Geotextiles and Geomembrane, 1998, 16(3): 207-219.

[13] 徐超,廖星樾,叶观宝,等.土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J].岩土力学,2008,29(5):1285-1289. (XU Chao, LIAO Xingyue, YE Guanbao, et al. Research on interface frictional characteristics of geosynthetics by laboratory shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1285-1289. (in Chinese))

[14] 施建勇,钱学德,朱保坤.大型斜面剪切仪的研制和试验[J].岩土工程学报,2013,35(4):754-761. (SHI Jianyong, QIAN Xuede, ZHU Baokun. Large-scale inclined direct shear apparatus and testing results [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 754-761. (in Chinese))

[15] 朱保坤.现代卫生填埋场斜坡复合衬里力学特性研究[D].南京:河海大学,2011.

[16] 刘慧.卫生填埋场典型衬垫系统的力学特性对比研究[D].南京:河海大学,2010.

[17] KOERNER G R, NAREJO D. Direct shear database of geosynthetic-to-geosynthetic and geosynthetic-to-soil interfaces: GRI report No. 30[R]. Philadelphia, Pennsylvanian: Geosynthetic Research Institute, Drexel University, 2005: 106.

[18] GIROUD J P, DARRASSE J. Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic geosynthetic interface shear strength [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1993, 12(3): 275-286.

[19] 施建勇,钱学德,朱月兵.垃圾填埋场复合衬垫剪切特性单剪试验研究[J].岩土力学,2010,31(4):1112-1117. (SHI Jianyong, QIAN Xuede, ZHU Yuebing. Shearing behavior of landfill composite liner by simple shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1112-1117. (in Chinese))

· 简讯 ·

第八届亚洲岩石力学研讨会将在日本札幌召开

由国际岩石力学学会主办,国际岩石力学学会日本国家小组(日本岩石力学委员会)承办的第八届亚洲岩石力学研讨会将于2014年10月14—16日在日本札幌召开。

本次大会的主题是:自然灾害、环境和能源。主要议题包括:(a)地质灾害减灾(地震和岩石动力学、地震和岩石动力学、防灾减灾、边坡稳定);(b)环境问题(全球变暖、二氧化碳的捕获和储存放射性废物处置、THMC耦合);(c)能源(采矿工程、石油工程、地热发电、油藏工程);(d)新技术(岩石的性质和场地特征、地球物理勘探和测试方法、隧道及地下空间、生命周期维护成本、现场测量和分析)。

会议的相关信息请浏览网站:www.rocknet-japan.org/ARMS8/index.htm

(本刊编辑部供稿)