

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.005

糙面土工膜与无纺土工织物界面剪切强度及 表面粗糙度变化规律

施建勇^{1,2}, 李 砚^{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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了量化糙面土工膜表面粗糙度变化规律, 研制了表面粗糙度测量仪, 并进行了不同法向应力下糙面土工膜和无纺土工织物界面剪切和对应的糙面土工膜表面粗糙度试验。研究表明, 糙面土工膜和无纺土工织物界面剪切强度是由糙面土工膜粗糙凸起和无纺土工织物纤维相互嵌入和拉拽作用产生的, 界面的剪切峰值摩擦系数主要受到法向应力的影响, 界面强度发展到残余强度, 糙面土工膜粗糙凸起磨损趋于稳定, 无纺土工织物纤维定向排列完成。

关键词: 界面剪切强度; 粗糙度; 糙面土工膜; 土工织物; 纤维

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)03-0214-05

Interface shear strength of textured geomembrane with nonwoven geotextile and change pattern of surface asperity

SHI Jianyong^{1, 2}, LI Yan^{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)

Abstract: In order to quantitatively investigate the pattern of change of the surface asperity of textured geomembrane, a new apparatus for measuring surface asperity was developed. Interface shear tests of textured geomembrane with nonwoven geotextile under different normal stresses and corresponding tests on the surface asperity of textured geomembrane were conducted. The results show that the interface shear strength of textured geomembrane with nonwoven geotextile is caused by the embedding and pulling actions between textured points of geomembrane and geotextile fabric. The peak interface shear friction coefficient is mainly influenced by normal stress. When the interface shear strength tends to be residual strength, the damage to textured points of geomembrane tends to be stable and the fabric orientation of geotextile is fully achieved.

Key words: interface shear strength; asperity; textured geomembrane; geotextile; fabric

垃圾填埋场复合衬里界面剪切特性研究从20世纪90年代开始已经得到应有的关注^[1-3], 在界面变形、强度特性宏观研究成果的基础上^[4-9], 研究逐渐向细观深化^[10-13]。Stark等^[2]通过糙面HDPE土工膜与无纺土工织物、复合排水网的界面扭剪试验, 得到界面峰值与残余强度特性, 定性地认为剪切应力-位移曲线软化的主要影响因素是无纺布表面的丝絮被拉出或撕断或平行剪切方向定向排列、糙面HDPE土工膜的表面结构被磨平; Frost等^[10]使用光学显微镜记录土工膜试样剪切界面3个方向表面轮廓变化, 引入平均粗糙度 R_a , 实现了土工膜表面粗糙度变化定量研究的目的; Hebler等^[11]通过土工膜和无纺土工织物界面特性的直

收稿日期: 2015-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(41172234); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130094110002)

作者简介: 施建勇(1965—), 男, 江苏如皋人, 教授, 博士, 主要从事生活垃圾填埋研究。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn

剪试验,发现不同法向应力下织物-膜界面具有不同的破坏特征;Kim^[12]在土工膜和无纺土工织物界面直剪试验后,向试验界面注入高流动性树脂,待凝固后取下、切片,在显微镜下观测纤维的三维分布,分析剪切对其内部结构的影响;Li等^[13]分别进行了无纺土工织物与糙面土工膜界面的分步剪切(incremental shear test)和连续剪切(continuous shear test)试验,得到了连续剪切试验规律可以由分步剪切试验重现这一重要研究成果,表明糙面土工膜表面细观特性是界面剪切特性的主要控制因素;Muller等^[14]通过土工合成材料衬里结构界面长历时的剪切试验,示意性提出界面破坏的形态;徐超等^[15]通过减小土工膜表面粗糙度,研究了界面剪切强度弱化的规律;林伟岸等^[16]通过界面剪切试验研究界面强度变化,得到土工膜表面粗糙特性和土工织物表面强度特性共同影响界面强度的规律。在含土工合成材料衬里结构界面剪切特性研究上,宏观研究方法比较完善,成果相对丰富,细观研究处于定性阶段,定量分析才开始,但定量研究进程影响对衬里结构界面剪切特性的认识。本文拟通过界面剪切强度变化、剪切前后糙面土工膜表面粗糙度变化,分析界面抗剪力变化过程,提出土工膜表面粗糙度变化分析方法,研究界面剪切发展机制。

1 试验仪器和方法

1.1 试验材料与仪器

试验材料为糙面土工膜和无纺土工布^[17],对其界面进行大型直剪试验研究;剪切盒直径 30 cm;糙面土工膜剪切前后粗糙度变化通过新研制的表面粗糙度仪器测量,该仪器按照 ASTM D-7466-08 的技术要求制造^[18]。研制的表面粗糙度测量仪器见图 1。图 1 中 E223 针触式表面轮廓仪是读取糙面土工膜表面粗糙度的传感器,其最大量程为 1 mm,精度为 0.001 mm。试样表面粗糙度由通过支架梁固定在线性导轨上的表面轮廓仪测读,支架梁通过步进电机实现沿导轨的运动,粗糙度读数的起点、终点位置由水平限位器控制,可以精确定位;表面粗糙度变化由计算机自动采集。

选取基准零点,测读方向上土工膜表面的最低点与基准零点的高差为 $Z_{\min}$,粗糙点的凸峰与基准零点的高差为 Z_{pi} 。表面粗糙度测量计算示意图如图 2 所示。

1.2 试验方法与试验结果

连续剪切试验:剪切试验选取的法向应力 σ 分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、600 kPa、800 kPa、1 000 kPa、1 200 kPa,进行界面剪切试验,直至试验的剪切位移达到 80 mm。

分步剪切试验:对应法向应力 400 kPa、600 kPa、800 kPa、1 000 kPa、1 200 kPa,将连续剪切试验中某一法向应力下的剪切试验剪切应力-位移峰值曲线分成 7 个应力点,分别为:剪切前 1,峰值应力二分之一 2,峰值应力 3,峰值应力和大位移应力平均点 4,4 点与大位移点应力差的三分之一应力点 5,4 点与大位移点应力差的三分之二应力点 6,大位移(80 mm)点 7。分步剪切试验控制点如图 3 所示。

分步剪切试验达到某一应力点后,停止试验,做剪切后土工膜表面粗糙度量测;更换土工膜和土工织物试样,进行试验到下一个应力点,量测剪切后土工膜的

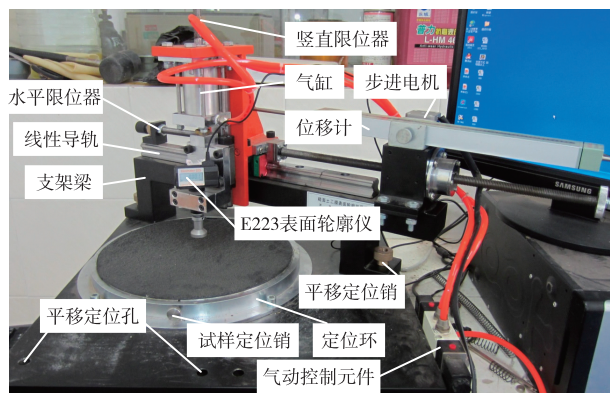


图 1 表面粗糙度测量仪

Fig. 1 Apparatus for measuring surface asperity

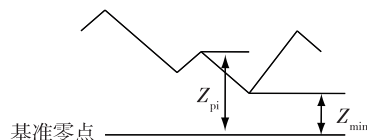


图 2 表面粗糙度测量计算示意图

Fig. 2 Sketch of measurement and calculation of surface asperity

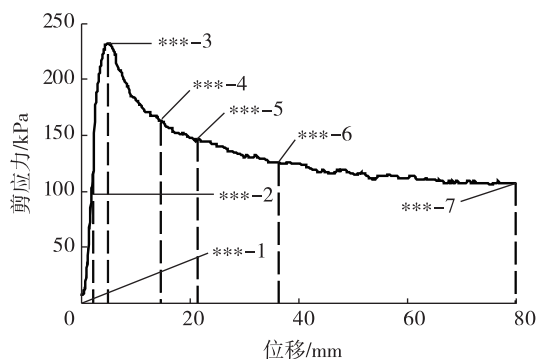


图 3 分步剪切试验控制点示意图

Fig. 3 Sketch of control points for step shear test

表面粗糙度;直至试验达到大位移(80 mm)点7,进行剪切试验后的土工膜的表面粗糙度量测。各试验方案的剪切应力-位移曲线见图4。

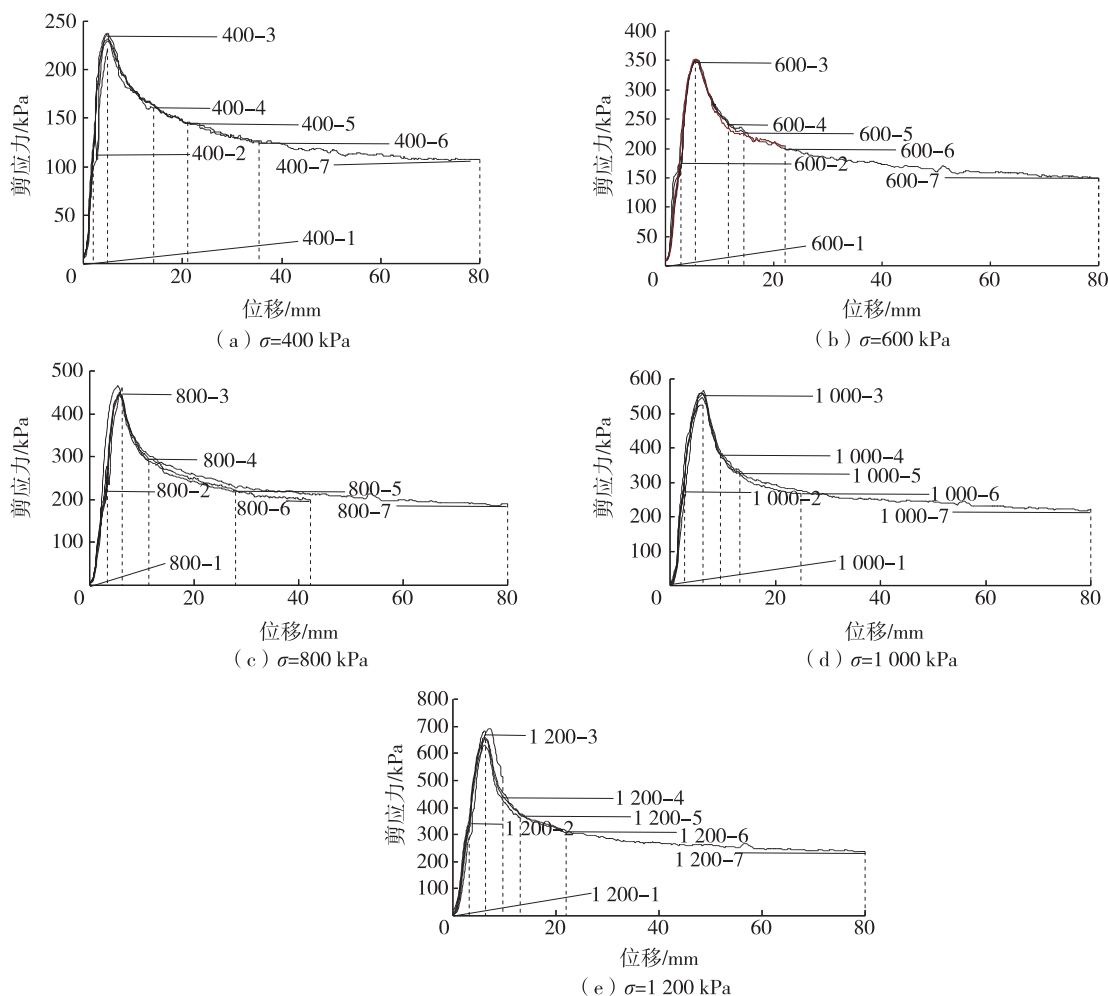


图4 分步剪切试验剪应力-位移关系

Fig. 4 Curves of shear stress versus displacement in step shear test

在图4中,每个法向应力下的分步剪切试验曲线有较好的重复性,即分步剪切试验能够重现连续剪切试验的剪应力-位移过程,与文献[13]的试验结论一致。同时得到各法向应力下对应的峰值剪切强度和残余剪切强度,如表1所示。

将表1中的 τ_p 和 τ_r 除以法向应力,分别得到峰值摩擦系数和残余摩擦系数,与文献[12]结果对比如图5所示。

由图5(a)可见,不同型号(特性)的土工织物和土工膜只对法向应力50 kPa以下峰值摩擦系数的试验结果有影响,在法向应力超过50 kPa时,试验结果有接近相同的规律,土工织物和土工膜的特性对峰值摩擦系数的影响很小;峰值摩擦系数随试验的法向应力增加而减小,低法向应力时试验得到的峰值摩擦系数会达到1.5以上;法向应力大于300 kPa时,试验得到的峰值摩擦系数约为0.55,且直至法向应力达到1 200 kPa时基本保持恒定。

由图5(b)可见,土工织物和土工膜的特性对残余摩擦系数的试验结果有影响,本次试验没有得到法向应力400 kPa以下残余摩擦系数的试验结果;在法向应力400 kPa时,文献[12]残余摩擦系数的试验结果与本次试验结果有明显的差异。残余摩擦系数也随试验的法向应力增加而减小,低法向应力时试验得到的残余摩擦系数会接近1.0,高法向应力时试验得到的峰值摩擦系数约为0.2。残余摩擦系数比峰值摩擦系数要小。

表1 峰值剪切强度 τ_p 和残余剪切强度 τ_r

法向应力	τ_p	τ_r
100	69.3	
200	123.1	
300	171.2	
400	232.3	107.6
600	348.0	150.6
800	446.0	189.3
1 000	556.4	218.0
1 200	655.4	238.1

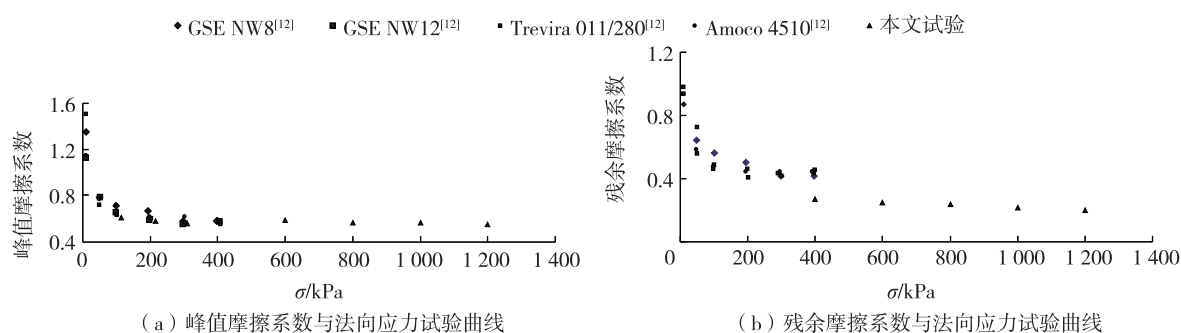


图5 峰值摩擦系数和残余摩擦系数与法向应力试验曲线
Fig. 5 Peak and residual friction coefficients versus normal stress

实际垃圾填埋工程中符合衬里的界面都将发生较大的剪切位移^[19],理论分析和设计计算时应取残余摩擦系数,这样更符合实际工程条件,也能充分考虑到工程的安全保证。

2 试验结果分析

根据剪切应力-位移试验结果,剪切应力峰值后应力和峰值应力之比与位移关系为

$$\frac{\tau}{\tau_p} = \frac{\tau - \tau_r}{\tau_p} \exp[-k(\delta - \delta_p)] + \frac{\tau_r}{\tau_p} \quad (1)$$

式中: τ ——剪切应力; δ ——剪切位移; δ_p —— τ_p 对应的剪切位移; k ——拟合系数。

式(1)计算结果和试验对比见图6。由图6可见,不同法向应力作用下试验得到的 τ/τ_p 与位移关系曲线比较接近,可以近似地进行归一化处理;式(1)能比较合理地模拟试验曲线逐渐衰减,直到趋于稳定的规律。

运用式(1)中的参数 k ,进行土工膜表面粗糙度变化与剪切位移的模拟,计算公式为

$$CA_0 - CA = (CA_0 - CA_r) [1 - \exp(-k\delta)] \quad (2)$$

式中: CA_0 ——法向压力作用后剪切前测得的土工膜表面粗糙凸起平均高度; CA ——剪切位移 δ 对应的土工膜表面粗糙凸起平均高度; $CA_0 - CA$ ——从剪切开始到剪切位移 δ 土工膜表面粗糙凸起平均高度的变化值; CA_r ——剪切位移 80 mm 时的表面粗糙凸起平均高度^[17]。

式(2)计算结果与不同法向应力下试验结果对比见图7。图7表明:试验曲线点有些离散,但试验结果和计算结果的总体趋势有一定的吻合度。随着剪切位移增加,土工膜表面粗糙凸起平均高度在逐渐减小;在剪切初期,土工膜表面粗糙凸起平均高度减小较快,特别是剪切位移小于 10 mm 的粗糙凸起平均高度减小较快;而在这个阶段,正是土工织物和糙面土工膜界面剪切应力由 0 向峰值发展的过程,土工膜表面粗糙凸起与无纺土工织物纤维相互嵌入和拉拽,界面的抗剪力在激发,同时也在发生土工膜表面粗糙凸起的磨损和无纺土工织物纤维的定向排列;剪切应力超过峰值后会逐渐减小,无纺土工织物纤维的定向排列基本完成,土工膜表面粗糙凸起平均高度变化也逐渐减缓;剪切位移继续增加,土工膜表面粗糙凸起平均高度减小并趋于稳定,到 CA_r ,无纺土工织物纤维定向排列完成,土工膜表面粗糙凸起平均高度不再变化。同时,由 τ/τ_p -位移曲线拟合得到的参数 k 可以用于式(2)关于表面粗糙凸起平均高度的计算,即由 τ/τ_p -位移曲线可以得到粗糙凸起平均高度计算参数 k 。

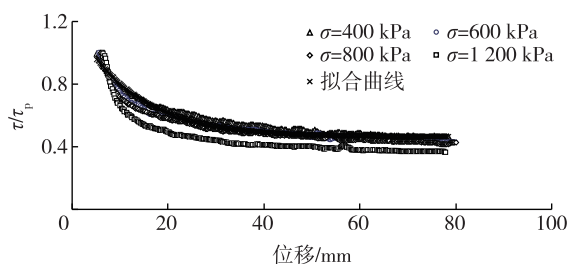


图6 剪切应力/峰值剪应力与位移关系曲线
Fig. 6 Shear stress/peak shear stress versus displacement

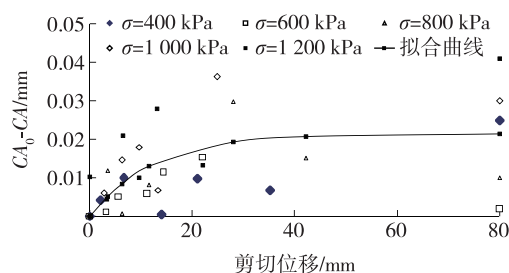


图7 表面粗糙凸起平均高度变化与剪切位移关系曲线
Fig. 7 Change of average height of surface asperity versus shear displacement

在土工膜与土工织物界面剪切过程中,土工膜表面粗糙凸起一直没有定量计算方法,关于界面剪切应力发生—发展—到达峰值—衰减到稳定值过程的机理分析比较缺乏。本文的研究工作粗略地分析了界面剪切应力发展与土工膜表面粗糙凸起的变化过程,更深入的试验研究还在进行中。

3 结 论

按照 ASTM D-7466-08 的技术要求,研制了表面粗糙度测量仪器,在进行了系列糙面土工膜和无纺土工织物界面剪切和对应的糙面土工膜表面粗糙度试验分析后,得到以下结论:(a)糙面土工膜和无纺土工织物界面峰值摩擦系数主要与试验的法向应力有关,残余摩擦系数的影响因素较多,还需要进一步研究。(b)糙面土工膜表面粗糙凸起平均高度随剪切位移变化规律可以用指数函数表示,参数 k 可由 τ/τ_p —位移试验曲线确定;剪切开始时,糙面土工膜表面粗糙凸起平均高度变化较快;在剪切位移较大时,凸起平均高度趋于稳定。(c)糙面土工膜和无纺土工织物界面剪切强度是由糙面土工膜粗糙凸起和无纺土工织物纤维相互嵌入和拉拽作用决定的,经历了发生—发展—峰值—残余过程,界面强度发展到残余强度的过程也是糙面土工膜粗糙凸起磨损稳定和无纺土工织物纤维定向排列完成的过程。

参考文献:

- [1] GIROUD J P, SWAN R H, RICHER P J, et al. Geosynthetic landfill cap: laboratory and field tests, design and construction [C]//Proceeding 4th International Conference on Geotextiles. Geomembranes and Related Products. Rotterdam: A A Balkema, 1990, V2: 493-498.
- [2] STARK T D, WILLIAMSON T A, EID H T. HDPE geomembrane/geotextile interface shear strength[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(3): 197-203.
- [3] GILBERT R B, BYRNE R J. Strain-softening behavior of waste containment system interfaces [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(2): 181-202.
- [4] FOX J P, KIM R H. Effect of progressive failure on measured shear strength of Geomembrane/GCL Interfaces [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134(4): 459-469.
- [5] BASUDHAR A P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(2): 403-408.
- [6] 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): 688-693. (SHI Jianyong, QIAN Xuede, ZHU Yuebing. Experimental methods for interface behaviors of geosynthetics in landfills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 688-693. (in Chinese))
- [7] STARK T D, CHOI H, LEE C, et al. Compacted soil liner interface strength importance [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, 138(4): 544-550.
- [8] FOX P J, THIELMANN S S. Damage to HDPE geomembrane from interface shear with gravel drainage layer and protection layer [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(2): 362-363.
- [9] KOERNER R M, KOERNER G R. A data base statistics and recommendations regarding failed geosynthetic reinforced mechanically stability earth (MSE) walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 40(1): 20-27.
- [10] FROST J D, LEE S W. Microscale study of geomembrane-geotextile interactions [J]. Geosynthetics International, 2001, 8(6): 577-597.
- [11] HEBLER G L, FROST J D, MYERS A T. Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(1): 77-105.
- [12] KIM D H. Multi-scale assessment of geotextile/geomembrane interaction [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [13] LI M H, GILBERT R B. Mechanism of post-peak strength reduction for textured geomembrane-nonwoven geotextile interface [J]. Geosynthetics International, 2006, 13(5): 205-209.
- [14] MULLER W, JAKOB I, SEEGER S, et al. Long-term shear strength of geosynthetic clay liners [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 130-144.
- [15] 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))
- [16] 林伟岸, 詹良通, 陈云敏, 等. 含土工复合排水网衬里的界面剪切特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 693-697. (LIN Weian, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Interface shear strength of liners with geocomposite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 693-697. (in Chinese))
- [17] 李砚. 衬垫系统剪切过程中土工膜表面粗糙度特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [18] ASTM. Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane, ASTM D 7466 - 08, West Conshohocken, 2008, PA 19428-2959.
- [19] DUNCAN J M, BYRNE P, WONG K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses [R]. California: University of California, Berkeley, 1978.