

填埋场复合衬垫系统直剪试验的数值模拟

郭兴文¹, 黄录野¹, 施建勇²

1. 河海大学力学与材料学院, 南京 210098
2. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098

摘要 考虑填埋场衬垫系统材料间的接触特性,建立了复合衬垫系统直剪试验的有限元模型,采用 ANSYS 程序对填埋场复合衬垫系统的直剪试验过程进行了数值仿真分析。给出了不同法向力作用下不同加载时步衬垫系统中土工膜-黏土界面的剪应力云图,研究了界面内剪应力的分布情况,分析了接触面最大剪应力出现的位置及界面切应力变化特征;绘制了衬垫系统界面的应力-位移关系曲线,探讨不同法向力作用下不同位置点沿剪切位移方向的切应力 τ_{zy} 和垂直剪切位移方向的切应力 τ_{zx} 变化特点。结果表明,随法向力增加,界面切应力-位移曲线的硬化现象越明显;界面边缘位置处的切应力较大是界面破坏的源头;数值模拟可以再现试验发生的宏观现象,这是研究衬垫系统内部作用机理的一种有效途径。

关键词 复合衬垫系统;直剪;有限元数值模拟;界面特性;应力-位移曲线;破坏特征

中图分类号 TU501

文献标志码 A

DOI 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.27.005

Numerical Simulation of Landfill Liner System in Direct Shear Test

GUO Xingwen¹, HUANG Luye¹, SHI Jianyong²

1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract This paper investigates the shearing behavior of the liner system by using the ANSYS software. The numerical model of the direct shear test is built. The shear stress nephograms of the liner system between the geomembrane and the clay in different load steps under different normal pressures indicate the locations of the maximum shear stress, and the characteristics of the interface shear stress-displacement relations. It is shown that the stress-displacement curve does not display a hardening behavior under a low normal pressure, however, with the increase of the normal pressure the hardening behavior of the stress-displacement curve becomes more evident. The shear stress at the edge is larger than that in other places in the model. The macroscopic phenomena of the direct shear test are reproduced by the numerical simulations, and it is indicated that the numerical simulations is an effective way to study the mechanism of the internal liner system.

Keywords liner system; direct shear; numerical simulation; interface characteristics; stress-displacement curve; failure characteristics

0 引言

卫生填埋场是中国目前处置城市固体废弃物和危险废弃物的主要方式,随着时间的推移废弃物将会分解产生垃圾液。为防止垃圾液渗入地下污染环境,填埋场周围需要设置衬垫系统,衬垫系统通常由土工网、土工膜、黏土、土工布及沙土等组成,当垃圾填埋较高或者填埋场使用年限较长时衬垫系统可能发生破坏,其破坏方式主要是土工合成材料之间的相对滑动及剪切破坏^[1,2],因此对复合衬垫系统的剪切破坏研究尤为重要。

对于衬垫系统内界面的相互作用及破坏特征,国外进行了比较系统的研究,在试验与数值模拟方面都已取得了一些进展。Stark 等^[3,4]将衬垫系统拆分为相邻的单一界面,通过抗拉、抗剪试验研究了可能的滑动界面位置及破坏特征。Dixon 等^[5]通过扭环剪试验对填埋场衬垫系统界面的稳定性进行了研究,得到了不同界面的抗剪强度曲线。Fowmes 等^[6]采用有限元数值技术对大型直剪试验进行了模拟计算,并与试验结果对比,分析了衬垫系统的材料及界面本构选择以及参数选择对数值计算结果的影响,指出土工材料选用拉伸模量能获得

收稿日期:2013-03-22;回修日期:2013-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41172234)

作者简介:郭兴文,副教授,研究方向为结构数值仿真分析,电子信箱:xwguo@hhu.edu.cn



精度较高且比较符合实际的结果,土工材料选用压缩模量不能获得可信的计算结果。Najser 等^[7]通过压缩和三轴试验得到黏土的亚塑性本构模型计算参数,通过离心试验获得土工材料的计算参数,应用数值模拟技术对衬垫系统进行了模拟,得到的结果与试验较为符合。

国内对衬垫系统特性的研究晚于国外,主要通过试验途径开展相关研究。徐超等^[8]采用斜板试验研究 HPDE 膜界面的摩擦特性,得到了低应力条件下各层材料间的摩擦性能参数指标,分析了影响 HPDE 膜摩擦特性的几个因素。吴景海等^[9]通过直剪和拔拉试验比较各种国产土工合成材料与填料界面的作用特性,并探讨了土工材料的加筋机理。施建勇等^[10]进行了复合衬垫系统的单剪及直剪试验,分析了不同荷载条件下衬垫系统的剪切破坏界面以及衬垫系统中最大相对位移界面的特点。

由于衬垫系统界面上接触特性的复杂性,试验尽管可给出宏观上衬垫的破坏特征,但存在不能揭示荷载作用下衬垫内部各点应力变化规律的缺点。借鉴国外应用数值计算手段模拟衬垫系统的直剪试验过程的研究思想,本研究利用 ANSYS 软件平台,建立某埋场复合衬垫系统直剪试验的数值分析模型,模拟实际的直剪试验过程,重现试验的宏观现象,结合衬垫系统内部应力及变形,分析宏观现象发生的力学机理。

1 直剪试验的数值计算

1.1 试验装置

图 1 是自行研制的直剪试验装置,装置分为上剪切盒和下剪切盒,试验时上剪切盒放土料,下剪切盒放土工材料。为了固定厚度只有几毫米的薄膜,制备厚度为 1.5mm 的薄刚性环,将土工膜黏在刚性环内,叠放在下剪切盒上。竖向通过液压缸施加法向压力,同时水平向通过拉力装置匀速拉动下剪切盒,使土工材料间发生相对滑动,上下剪切盒均接位移传感器,通过位移传感器获得各个界面间的相对位移,进而判断出衬垫内部最薄弱层的位置,结合法向力可以确定界面剪切力随位移变化的关系。

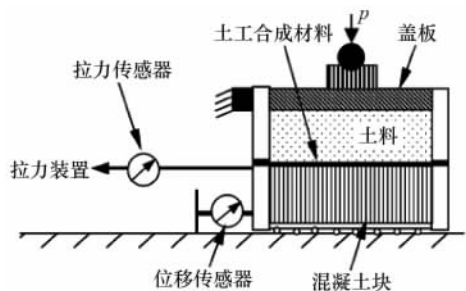


图 1 直剪装置试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of direct shear apparatus

1.2 数值模型建立

为了准确模拟直剪试验,建立与试验尺寸及结构相同的

模型(图 2),上层为厚 1.5mm,直径 300mm 的土工膜,下层为厚 30mm,直径 300mm 的黏土。土工膜和黏土外围均加刚性叠环,试验时土工材料和刚环是黏结起来的,因此数值模型用 GLUE 命令将土工材料和刚性环黏结。叠环之间、叠环与土料、叠环与土工膜之间均作为理想的光滑接触,土工膜和黏土之间是有摩擦接触。接触面间需要定义接触单元对,通过合适的法向刚度值用来保证数值计算的稳定性和收敛速度,同时可以防止接触面间相互贯穿。接触单元对定义为 TARGE170 单元和 CONTA174 单元,其中 TARGE170 单元为无厚度单元。

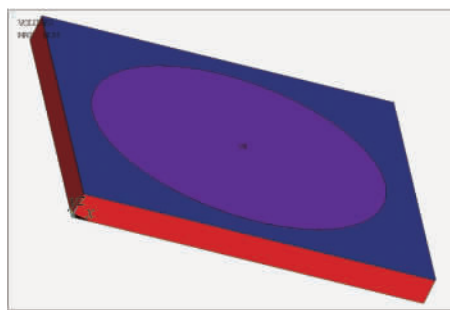


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

胡黎明等^[11]采用直剪试验研究土的参数特性,并将试验结果与数值模拟对比,发现用理想弹塑性模型、刚塑性模型、非线性模型模拟土料得到的接触面应力-位移曲线与试验结果十分相近。郭红伟等^[12]用 Drucker-Prager 准则和剑桥模型研究散粒体材料的直剪试验,发现两种模型均可以得到符合实际情况的结果。由于 Mohr-Coulomb 准则可以较好地描述岩土材料的强度,因此在岩土工程中应用较为广泛。但是 M-C 准则在三维空间的屈服面为不规则六角形锥体,在 π 平面上为不等角六边形,给数值模拟计算带来困难。为此,很多学者对 M-C 准则做了修正,在 π 平面上用光滑曲线来逼近 M-C 准则。

本研究选择用 M-C 外角点外接圆来逼近 M-C 准则,即修正的 Drucker-Prager 破坏准则作为本构模型模拟土料,可以较好地模拟土料的强度特性,且在数值计算方面优势较大。由试验测得土料的内摩擦角为 14° ,凝聚力为 26kPa,土料弹性模量为 10MPa,泊松比为 0.3^[10]。考虑现有的试验资料,土工膜单元选用理想弹性模型来模拟,弹性模量为 208.26MPa,泊松比为 0.25。接触单元选用基于 M-C 的弹塑性本构关系,通过试验测得的摩擦系数为 0.26^[10]。

1.3 网格划分

图 3 为衬垫系统的有限元模型。由于采用的 SOLID45 单元是线性单元,厚度方向上一般要划分三层以上才能获得较高精度的计算结果,考虑收敛速度和计算精度,较薄的土工膜在厚度方向划分 3 层,土工膜划分 300(10×10×3)个单元;此外,为确保黏土单元和土工膜单元尺寸相差不大,黏土厚度方向划分 10 层,黏土共 1000(10×10×10)个单元。

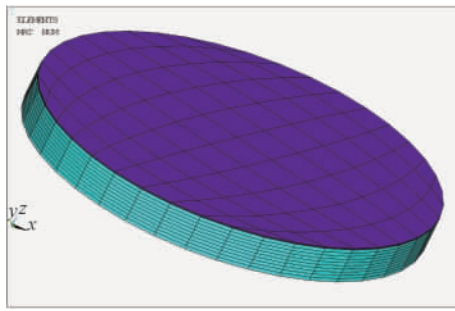


图3 有限元模型
Fig. 3 FEM Model

1.4 边界条件及加载过程

有限元模拟分析中,先将模型底面及连接黏土的刚性环所有位移都约束,在土工膜上表面施加法向均布载荷;然后对连接模型上端土工膜的刚性环施加等时间步长增量的切向(y方向)位移。剪切位移设置为10个载荷子步,每个载荷子步的剪切位移为2mm,总位移为20mm。

2 有限元结果分析

2.1 接触面切应力随剪切位移的变化特征

图4是接触面内结点位置分布图,其中y方向是剪切位移方向,x是与剪切位移垂直的方向,结点1、11、21、31、41、51、61、71、81从左到右位于x方向的中心线上,其中结点1和结点81距边界30mm。

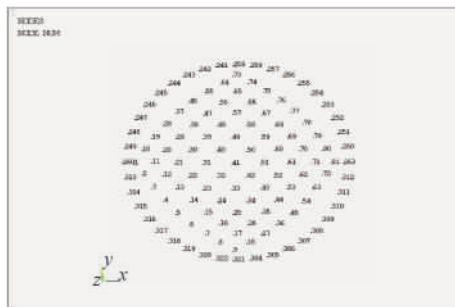
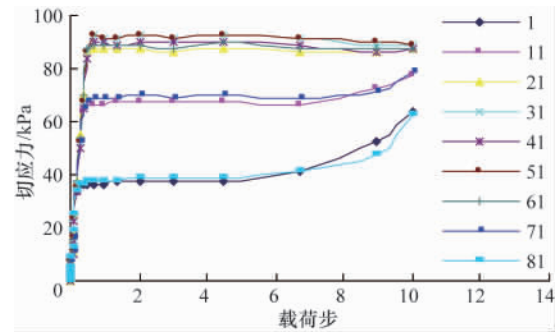


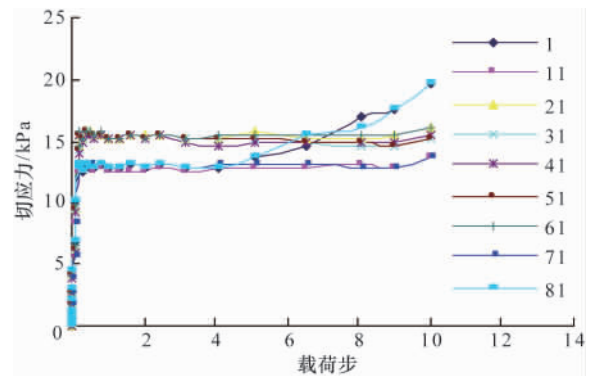
图4 土工膜结点位置
Fig. 4 Node locations

图5(a)是法向力56kPa作用下不同结点沿剪切位移方向的切应力-位移曲线,可以看出在剪切位移不到1mm时接触面上不同位置点同时达到了屈服极限,且达到屈服极限后接触面上各个结点在剪切方向的切应力大小较为接近,接触面产生整体滑动;当剪切位移达到14mm时接触面两侧(结点1和结点81)位置处的切应力有微小增加,曲线表现出微小硬化现象,其原因是由于随剪切位移的进行,两侧位置处的结点移动到接触面边缘,由于局部边界效应产生硬化现象。图5(b)是法向力336kPa作用下不同结点沿剪切位移方向的切应力-位移曲线,由于法向力的增加,接触面边缘会发生外伸及翘曲变形,从而导致内部区域的法向力值大于边缘,内

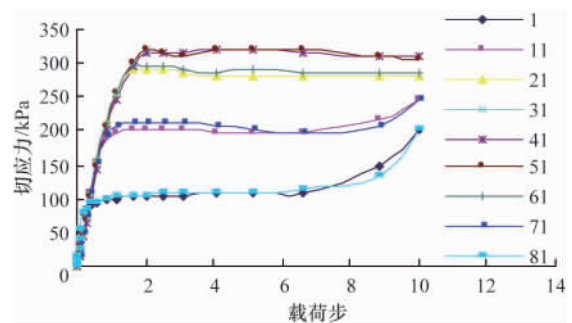
部切应力屈服值大于边缘部分区域的值。图5(c)是法向力1120kPa作用下不同结点沿剪切位移方向的切应力-位移曲线,可以看出接触面两侧位置结点率先达到屈服极限值,而内部在剪切位移达到4mm左右时才达到屈服,与中、低法向力情况下的特点不同。随法向力的增加,不同区域切应力-位移曲线都反映出一定的硬化特征,但内部区域的应力硬化现象更为明显。



(a) $\tau_z=336\text{kPa}$



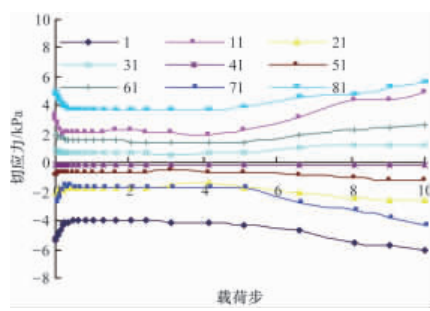
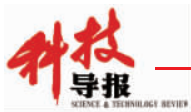
(b) $\tau_z=56\text{kPa}$



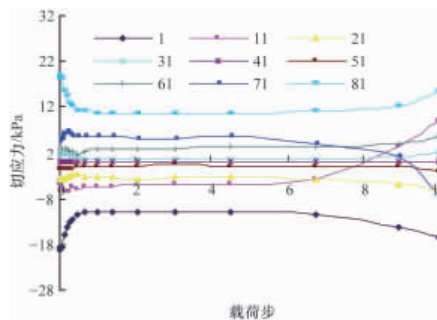
(c) $\tau_z=1120\text{kPa}$

图5 不同结点 τ_{zy} 的应力-位移
Fig. 5 τ_{zy} stress-displacement curve

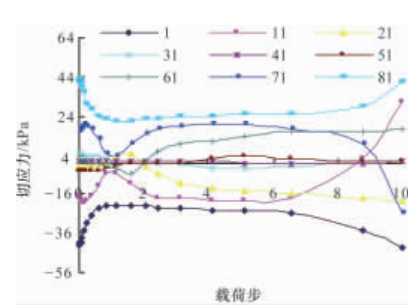
图6分别是法向力56、336、1120kPa下不同结点沿垂直于剪切位移方向的切应力-位移曲线,可以看出接触面内x方向的切应力 τ_{zx} 明显小于剪切位移方向的切应力 τ_{zy} ,节点应力-位移曲线且呈对称分布,接触面内x方向的切应力可以自平衡。



(a) $\tau_{zx}=56\text{kPa}$



(b) $\tau_{zx}=336\text{kPa}$



(c) $\tau_{zx}=1120\text{kPa}$

图 6 不同结点 τ_{zx} 的应力-位移
Fig. 6 τ_{zx} stress-displacement curve

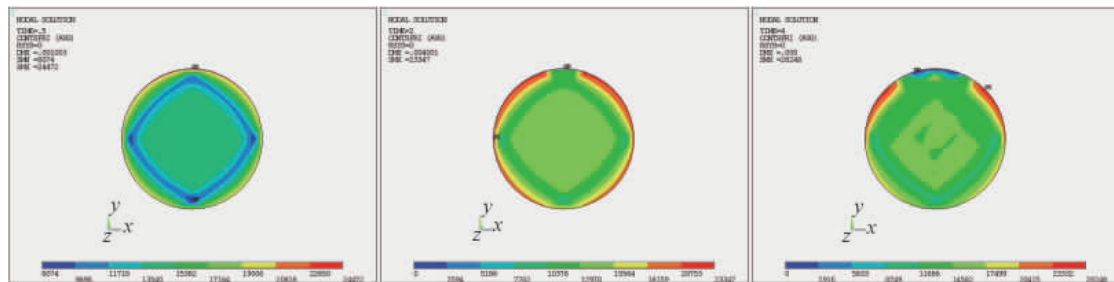
2.2 接触面摩擦力分布特征分析

图 7 是法向力 56kPa 下不同载荷子步的摩擦力云图,可以看出土工膜边缘摩擦力大于内部摩擦力,接触面的摩擦力呈近似圆环形的不均匀分布,摩擦力由外向内逐渐减小。随着剪切位移的增大,在剪切位移方向上接触面前半部边缘发生分离,摩擦力减小为 0,同时可以看出最大摩擦力始终发生在接触部分的边缘位置。

图 8 是法向力 336kPa 下不同载荷子步的摩擦力云图,当剪切位移不超过 2mm 时,接触面外围摩擦力分布不均匀,但内部的摩擦力分布较为均匀,说明此时内部仍处于黏结

状态。

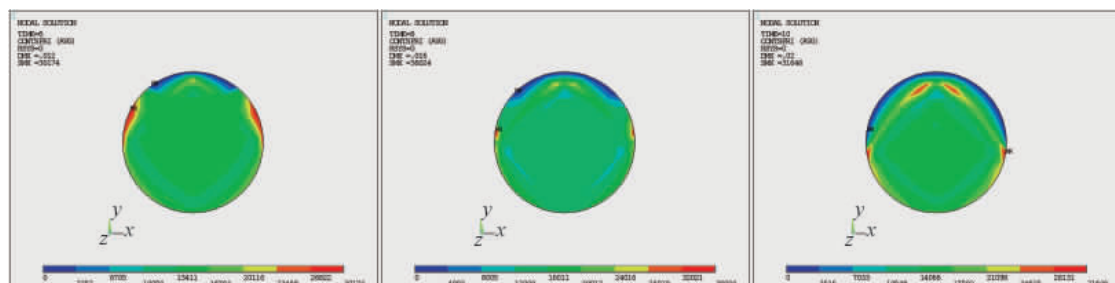
由图 8(a)、(b)可以看出最大摩擦力发生在土工膜边缘,摩擦力仍呈现出近似圆环形的分布特点,且摩擦力数值由外向内先减小后增大。由图 8(c)、(d)看出,随剪切位移的增加,在剪切位移方向上接触面前半部分发生分离,摩擦力减小为 0;最大摩擦力始终发生在接近分离的部位。同时由图 8(e)、(f)可以看出当剪切位移达到 16mm 时,土工膜内部也有部分位置的摩擦力为 0,说明随着法向力的增大,接触面有部分位置发生分离,其原因可能是由于法向力的增加使内部个别位置发生翘曲分离所致。



(a) 第 1 载荷步
(a) 1st load step

(b) 第 2 载荷步
(b) 2nd load step

(c) 第 4 载荷步
(c) 4th load step



(d) 第 6 载荷步
(d) 6th load step

(e) 第 8 载荷步
(e) 8th load step

(f) 第 10 载荷步
(f) 10th load step

图 7 法向力 56kPa 时不同载荷步的摩擦力云图
Fig. 7 Contact frictional stress (56kPa)

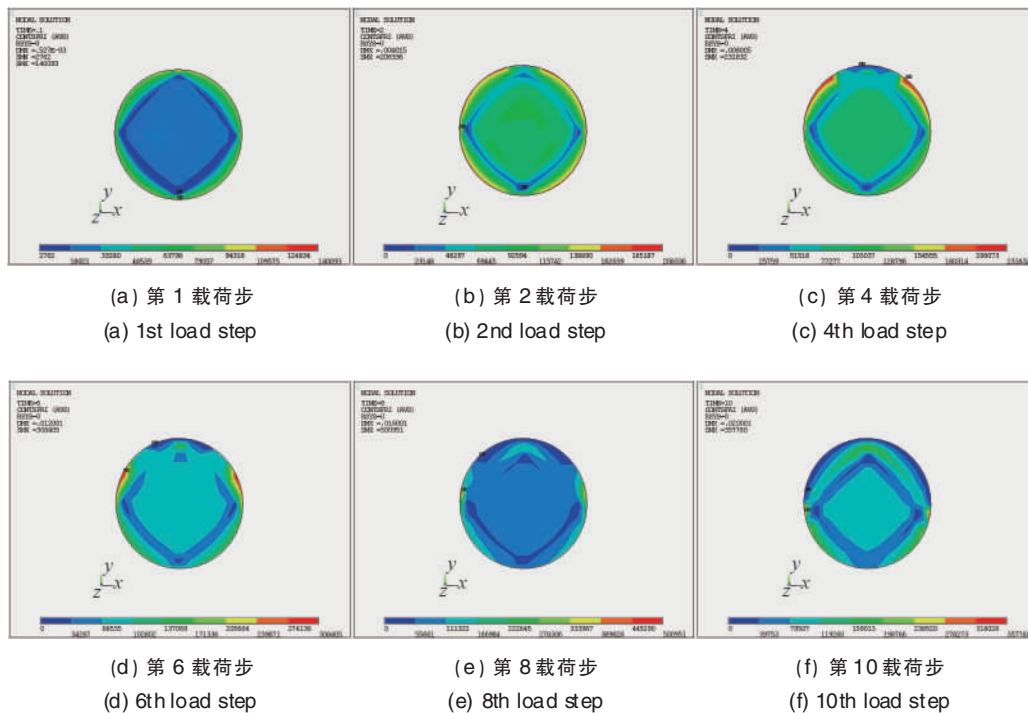


图 8 法向力 336kPa 时不同载荷步的摩擦力云图
Fig. 8 Contact frictional stress (336kPa)

图 9 是法向力 1120kPa 下不同载荷步的摩擦力云图, 由图 9(a) 看出, 由于法向力较高土工膜与黏土接触较为紧密, 当剪切位移不超 2mm 左右时, 模型界面中间区域基本没有相对滑动, 因此界面内该区域摩擦力为 0。由图 9(b)、(c)、(d) 看出, 随剪切位移的增大, 中部区域接触面开始发生滑

移, 内部区域界面摩擦力逐步增大, 同样呈现出近似环形分布的特点, 摩擦力数值由外向内先减小后增大, 最大摩擦力始终发生在接触部分的边缘位置。从图 9(e)、(f) 看出, 由于法向力的增大, 使接触面内部部分区域发生翘曲分离, 该部位界面的摩擦力减小为 0。

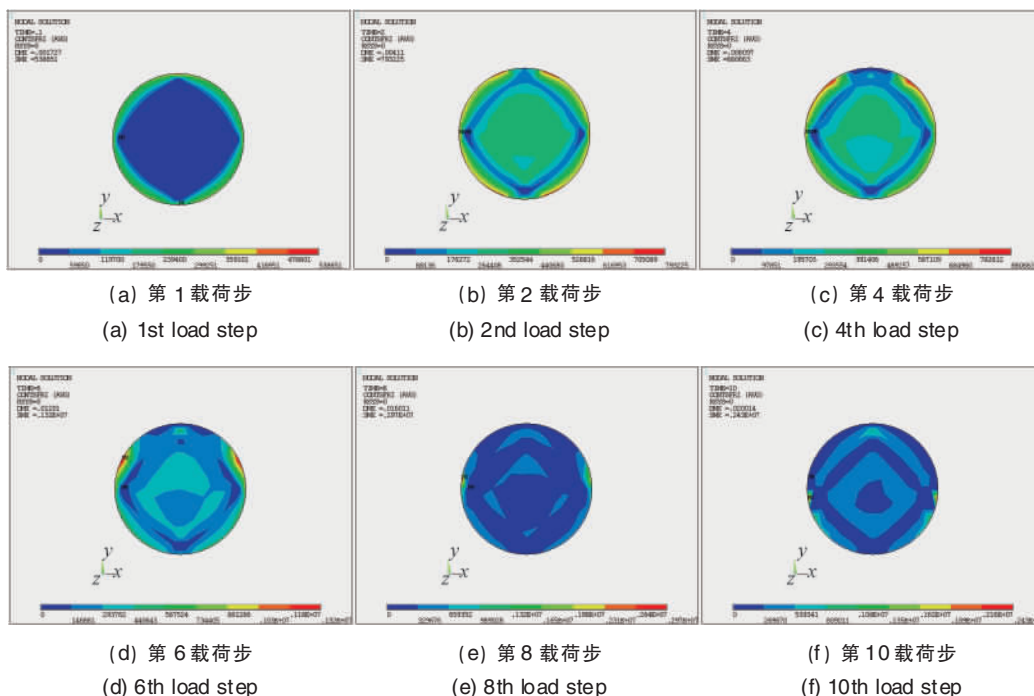


图 9 法向力 1120kPa 时不同载荷步的摩擦力云图
Fig. 9 Contact frictional stress (1120kPa)

3 结论

采用数值模拟方法,研究了直剪状态下土工膜-黏土界面的切应力分布及变化规律。

(1) 通过模拟不同法向力作用下的直剪试验,给出了不同位置处结点的切应力-位移曲线,研究表明低法向力作用下接触面内沿剪切位移方向的切应力值较为接近,接触面内表现了整体滑动的特征。随法向力的增加,内部的切应力值逐渐增大,界面内不同位置的相对滑动不再同步,两侧比内部率先达到屈服极限,同时内部区域点的切应力-位移曲线硬化现象更加明显。

(2) 直剪试验中界面的摩擦力呈现出近似圆环分布特点,最大摩擦力始终发生在接触部分的边缘,这些部位是容易破坏的部位。高法向力时,由于竖向应力分布产生较大变化,使黏与土工膜接触面摩擦力发展不均匀。

(3) 数值计算结果与直剪试验结果基本一致,说明有限元数值模拟不但可以展示试验的宏观现象,而且可以分析界面内应力变化的特点,是研究衬垫系统内部作用机理的一种有效途径。

参考文献 (References)

- [1] Qian X, Koerner R M, Gray D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, Upper Saddle River, 2002: 717.
- [2] Qian X, Koerner R M, Gray D H. Translation failure analysis of landfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(6): 506-519.
- [3] Stark T D, Poeppl A R. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 597-615.
- [4] 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.
- [5] Dixon N, Jones D R V, Fowmes G J. Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis [J]. Geosynthetics, 2006, 13(1): 1-14.
- [6] Fowmes G J, Dixon N, Jones D R V. Validation of numerical modeling technique for multilayered geosynthetic landfill lining systems [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 109-121.
- [7] Najser J, Masin D, Bohac J. Numerical modelling of lumpy clay landfill [J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 2012, 36(1): 17-35.
- [8] 徐超, 廖星樾, 叶观宝, 等. HDPE膜界面摩擦特性的斜板仪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 989-993.
Xu Chao, Liao Xingyue, Ye Guanbao, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 989-993.
- [9] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 89-93.
Wu Jinghai, Chen Huan, Wang Lingjuan, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 89-93.
- [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. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 688-692.
- [11] 胡黎明, 马杰, 张丙印. 直剪试验中接触面渐进破坏的数值模拟[J]. 清华大学学报, 2008, 48(6): 943-946.
Hu Liming, Ma Jie, Zhang Bingyin. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(6): 943-946.
- [12] 郭红伟, 高政国. 散体材料直剪试验的数值模拟研究[J]. 岩土工程界, 2008, 12(7): 13-15.
Guo Hongwei, Gao Zhengguo. Geotechnical Engineering World, 2008, 12(7): 13-15.
- [13] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Wang Maocheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



第 80 期“新观点新学说学术沙龙”聚焦地球演化与全球变暖

2013年8月22—23日,由中国科协主办、中国岩石力学与工程学会承办,主题为“地球演化与全球变暖”的中国科协第80期新观点新学说学术沙龙在北京举行,中国人民解放军总参谋部科技委教授钱七虎院士、大连理工大学教授唐春安担任领衔科学家。

本期沙龙汇集地球科学、岩石力学、数学力学、遥感测绘科学等领域近30位专家,从热力学、物理学、力学等视角出发,围绕地球演化与全球变暖主题充分交流科研成果及观点,并就生物灭绝与气候、花岗岩重融、红层与气候、沙漠化与气候、数字地球等热点问题展开热烈讨论。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/14996799.html>。