

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.040



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



填埋场 H-V 立体土工膜界面行为细观机理研究

侯娟^{1,2,3}, 王诗涵¹, 李昊¹, 李家正¹, 刘磊³

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 201900; 2. School of Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 结合 H-V 立体土工膜(Horizontal-Vertical three-dimensional geomembrane)及传统水平土工膜衬垫与土相互作用的力学模型试验, 利用基于离散元理论的颗粒流软件(Particle Flow Code, PFC), 从细观角度系统研究不同几何特征的土工膜与土之间的相互作用机理。分别从已完成土工膜复合衬垫模型试验所得的宏观力学特征、不同几何特征的土工膜衬垫与土颗粒之间的位移变化规律、土颗粒与膜之间的接触力分布、膜上的应力分布及整体衬垫系统中竖向应力的分布等方面进行对比分析。结果表明: 与传统水平土工膜相比, H-V 立体土工膜除了具有传统水平土工膜与土之间的摩擦作用外, 还有竖向膜部分对土颗粒附加的侧摩阻力和咬合力作用; 竖向膜不仅可以约束土颗粒的位移和力链从受荷中心向加载板两侧方向的传递, 而且能使 H-V 立体土工膜与土形成良好的约束挤密区, 一方面延缓了 H-V 立体土工膜衬垫内部形成连续滑移面, 另一方面更有效地均化了整体衬垫中的应力分布, 使得相同上覆荷载下 H-V 立体土工膜衬垫的整体沉降和不均匀沉降更小。

关键词: 复合衬垫; 立体土工膜; 水平土工膜; 离散元; 细观机理

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0070-09

Mesoscale mechanism study of interface behavior of horizontal-vertical three-dimensional geomembrane in landfill

HOU Juan^{1,2,3}, WANG Shihan¹, LI Hao¹, LI Jiazheng¹, LIU Lei³

(1. College of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 201900, P. R. China; 2. School of Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: The mesoscale mechanism of the interface behavior of different geomembranes was analyzed systematically combining with the mechanical model test of the Horizontal-Vertical (H-V) three-dimensional

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51778353, 51978390); 国家留学基金(201906895014); 岩土工程国家重点实验室开放研究基金(Z018007); 中国科学院青年创新促进会项目(2017376)

作者简介: 侯娟(1975-), 女, 副教授, 主要从事环境岩土工程、土工合成材料、填埋场膨润土垫的理论以及工程应用研究, E-mail: juanhou@staff.shu.edu.cn。

Received: 2020-12-16

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778353, 51978390); China Scholarship Council (CSC 201906895014); Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (No. Z018007); The Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2017376)

Author brief: HOU Juan (1975-), associate professor, main research interests: geoenvironmental engineering, geosynthetics, bentonite GCL in the landfill, E-mail: juanhou@staff.shu.edu.cn.

(3D) and traditional horizontal geomembrane by using the Particle Flow Code (PFC) based on the discrete element theory. The mesoscale characteristics such as the displacement variation, contact force distribution between the different kinds of geomembrane liners and soil particles, the stress distribution on the geomembrane, and the vertical stress distribution in the liner system were analyzed by comparing with the macroscopic mechanical characteristics obtained from the model test. The results show that the horizontal-vertical three-dimensional geomembrane provided similar friction as the traditional horizontal geomembrane. The vertical membrane of the H-V 3D geomembrane provided additional side friction and confine force. The vertical element not only confined the displacement and contact force of the partial transferring from the center to the two sides of the footing, but also provided the squeezed region between the H-V geomembrane and soil. This delayed the happening of the continuous slip surface and homogeneously distributed the stress in the H-V geomembrane lines. Therefore, the overall and uneven settlement of the H-V 3D geomembrane liner are smaller than the traditional under the same overburden load.

Keywords: composite liner; three-dimensional geomembrane; horizontal geomembrane; discrete element; mesoscale mechanism

复合衬垫是目前卫生填埋场中最重要的防污屏障^[1],土工膜是卫生填埋场复合衬垫中的关键防渗材料^[2],是填埋场环境安全的重要保障^[3]。然而,在复杂的地质条件下,填埋场长期服役过程中,土工膜复合衬垫系统的多个材料界面之间容易出现沿某一个或多个界面的局部或整体失稳破坏,进而影响整体填埋场的完整性和稳定性^[4]。其中,因土工膜抗滑力不足而引起的沿土工膜界面的滑移失稳破坏尤为严重^[5-6]。因此,土工膜与土的界面强度是影响填埋场正常服役的关键之一,其与土之间相互作用的机理引起了众多学者的广泛关注。David Frost等^[7]通过测量剪切过程中水平土工膜界面临近砂土的孔隙比,研究了水平土工膜表面粗糙度对砂土和土工膜界面作用的影响,初步解释了光面和糙面水平土工膜与土界面相互作用的不同机理。林伟岸等^[8]通过界面剪切试验,研究了土工膜与土界面强度的变化,总结了水平土工膜表面的粗糙特性和土工织物表面的强度特性共同影响界面强度的规律。近年来,部分学者进一步提出了在传统水平土工膜上布置一定的竖向约束,进而形成立体土工膜的概念^[9]。高俊丽等^[10]提出了一种非满布单层加肋式立体土工膜,并通过大量的直剪试验对比分析了不同类型土工膜与土之间的相互作用,发现加肋土工膜在明显提高界面抗剪强度的同时能保持较好的抗拉裂性能。侯娟等^[11]研发了 H-V 立体土工膜,发现相对于传统水平土工膜, H-V 立体土工膜能更有效地提高其与土之间的相互作用,进而更有效地降低土工膜复合衬垫系统的不均匀沉降^[12]。

由于土体的离散介质特性,常规的剪切试验往

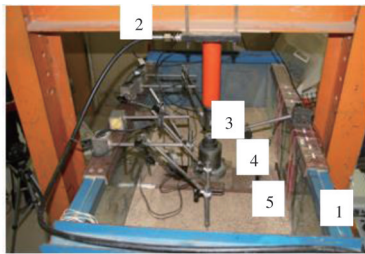
往难以直接观测或表征土工膜与土之间复杂的界面力学行为。但离散元法却在此方面具有明显的优势,可以在试验基础上为进一步分析非连续介质的力学行为提供依据^[13]。冯世进等^[14]通过离散元分析了传统水平土工膜与土之间的细观界面特性,发现水平土工膜与土之间形成的剪切带厚度约为土颗粒平均直径的 2 倍左右。Hou 等^[15]利用 PFC^{3D} 软件对施工荷载作用下传统水平土工膜的受力特性进行了细观分析,得到了上覆一定厚度的砂土层可以有效地均化颗粒接触力,避免土工膜出现局部受损的结论。

综上所述,利用离散元法可以较好地模拟离散颗粒与连续介质之间的细观作用机理,进而从细观角度解释宏观力学现象形成的本质。然而,尽管现有试验已经表明,相较传统水平土工膜复合衬垫, H-V 立体土工膜复合衬垫具有更优的力学性能^[10,12],但对于 H-V 立体土工膜与土之间的细观作用机理还缺乏系统的研究。笔者就已完成的水平土工膜和 H-V 立体土工膜复合衬垫在上覆荷载作用下的力学模型试验进行了数值模拟,通过分析衬垫中颗粒的位移、颗粒间接触力的分布、土工膜上的接触力分布传递等细观变化及整体衬垫宏观的竖向应力分布等,探明 H-V 立体土工膜复合衬垫与土界面相互作用的细观机理,并结合宏观试验现象,分析了 H-V 立体土工膜复合衬垫整体受力特性得以优化的细观本质,为 H-V 立体土工膜复合衬垫进一步工程应用提供理论依据和支撑。

1 试验简介

1.1 试验方案

H-V 立体土工膜复合衬垫力学模型试验主要模拟条形荷载作用在砂土表面且砂土与土工膜直接接触的情况。试验设备、材料及测量装置如图 1 所示^[16], 模型箱的尺寸为 $1.4\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 加载板为 $0.592\text{ m} \times 0.15\text{ m} \times 0.025\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 厚) 的钢板, 传统水平土工膜为 $0.6\text{ m} \times 0.58\text{ m} \times 0.003\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 厚) 的 HDPE 光滑土工膜, H-V 立体土工膜(图 2)水平部分与传统水平土工膜相同, 竖向部分高 0.065 m 。水平及 H-V 立体土工膜均埋置在距条形加载板底部 0.1 m 处。试验中使用自动数据采集系统(DH3815)同步记录荷载和沉降, 荷载通过容量为 100 kN 的液压千斤顶施加, 超高压电动油泵带动千斤顶向下施加压力, 油压阀门控制加载压力。将 2 个量程为 0.075 m 、精度为 0.01% 的百分表放置在条形加载板上, 以测量加载过程中的基础沉降。



注:1.模型箱;2.反力架;3.压力传感器;4.百分表;5.加载板

图 1 试验装置照片

Fig. 1 Photo of test device

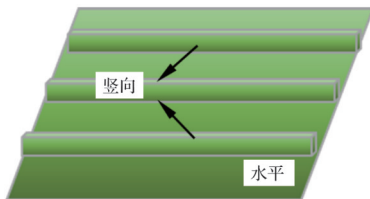


图 2 H-V 立体土工膜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Horizontal-Vertical three-dimensional geomembrane

图 3 为上覆荷载 120 kPa 时模型试验所得的土体运移照片。由图 3 可见, 条形荷载作用下, 砂土的位移主要集中在距离基础表面以下 0.3 m , 距离基础中心两边 0.35 m 的区域范围内(图 3 虚线框所示), 而此范围外, 土体位移几乎没有变化。此影响范围与文献[12, 14, 16]报道的结果非常接近。因

此, 为了既反映模型试验主要受力特征, 又提高计算机计算时效, 同时考虑模型的对称性^[17], PFC 建模时仅取如图 3 所示虚线框范围内的区域。此外, 由于 PFC 中颗粒与颗粒及颗粒与墙体的重叠量均仅与这两种基本单元的法向接触刚度有关^[16], 而与颗粒位移无关, 因此, PFC 模型将图 3 中虚线框以外, 且位移接近 0 的区域中砂土颗粒用相同刚度的墙体替代。

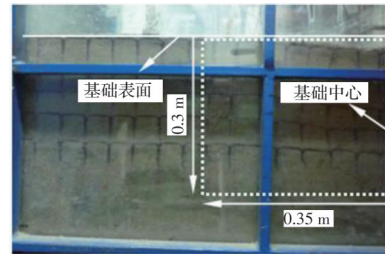


图 3 砂土位移范围

Fig. 3 Sand displacement range

1.2 试验结果

纯砂、水平土工膜和 H-V 立体土工膜复合衬垫试验所得的 p - S 曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 与纯砂工况相比, 水平土工膜复合衬垫和 H-V 立体土工膜复合衬垫均表现出良好的受力性能, 其中, H-V 立体土工膜复合衬垫受力性能比水平土工膜复合衬垫更好, 相同沉降量下能够更好地维持衬垫系统的稳定性, 承受更高的载荷。

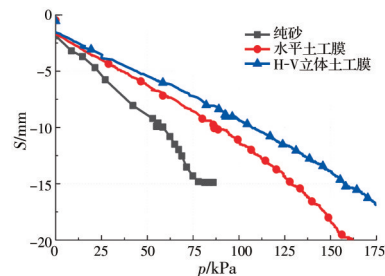


图 4 不同衬垫系统的 p - S 曲线

Fig. 4 p - S curves of different liner systems

2 PFC 模型

2.1 模型建立

在 PFC^{3D} 模型中, 采用 wall 单元模拟模型箱, ball 单元模拟砂土和土工膜, 其中, 砂土颗粒采用接触粘结, 仅可传递力; 土工膜颗粒采用平行粘结, 既可传递力, 又可传递力矩; 加载板采用刚性板模拟, 不发生任何变形。模拟所用土颗粒半径为 0.004 m , 密度为 2630 kg/m^3 , 摩擦系数为 0.7 , 土工膜颗

粒半径为 0.002 5 m,密度为 3 000 kg/m³,最终建立的 PFC^{3D}模型如图 5 所示。

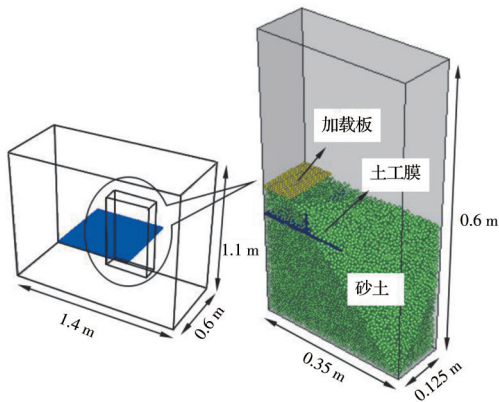


图 5 模型示意图

Fig. 5 Model Schematic diagram

2.2 细观参数的确定

在 PFC 模拟中,材料的细观参数,如接触刚度、链接刚度等常采用试错法标定^[18-21]。即将各细观参数直接赋予材料,调整细观参数,使最终得到的 PFC 整体模拟结果与试验宏观结果一致,从而标定 PFC 模拟材料的细观参数值。土工膜所用 PFC 的细观参数通过单轴拉伸试验标定,具体做法为:对 PFC 建模的土工膜进行轴向拉伸,记录拉伸过程中对应时步下的力和位移曲线,绘制 PFC 模拟和试验所得土工膜的力-位移($F-\Delta L$)曲线并进行对比,不断调整 PFC 细观参数,使两条曲线比较接近,进而最终确定土工膜的 PFC 细观参数。砂土的细观参数通过模型试验中纯砂工况的荷载-沉降($p-S$)曲线标定。具体做法为:赋予砂土一定的细观参数,分

级逐步加载,加载过程中采用 PFC 中的 history 命令,记录与模型试验完全一致位置处的力和位移值。绘制并对比 PFC 模拟和试验所得的荷载-沉降($p-S$)曲线,采用试错法不断调整 PFC 细观参数,使得两条曲线最终比较接近,从而确定土的 PFC 细观参数。砂土颗粒分级加载的荷载-沉降($p-S$)曲线对比如图 6 所示,土工膜单轴拉伸力-位移($F-\Delta L$)曲线对比如图 7 所示,采用的土工膜和土的细观参数汇总如表 1 所示。

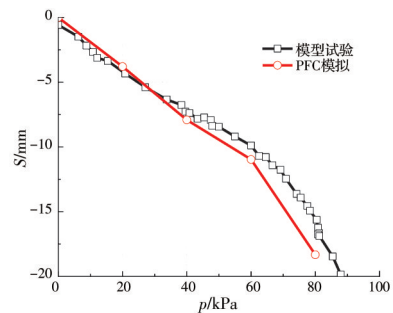


图 6 砂土颗粒分级加载荷载-沉降($p-S$)曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-settlement ($p-S$) curves of sand particles under graded loading

3 模拟结果分析

3.1 $p-S$ 曲线分析

图 8 为纯砂、水平土工膜和 H-V 立体土工膜复合衬垫试验及数值模拟所得的 $p-S$ 曲线对比图。由图 8 可知,3 种工况下 PFC 模拟所得 $p-S$ 曲线和试验值吻合良好,因此,PFC 模拟中所选取的细观参数能够较好地反映试验现象。需要指出的是,在 PFC 模拟中,由于 H-V 立体土工膜竖向膜和水平膜的结

表 1 细观参数汇总表

Table 1 Summary table of meso-parameters

材料	法向刚度 $k_n/(N \cdot m^{-1})$	切向刚度 $k_s/(N \cdot m^{-1})$	法向接触粘结强度 n_bond/N	切向接触粘结强度 s_bond/N	
砂土	5×10^5	5×10^5	0	0	
土工膜	6×10^7	1×10^7	1×10^4	1×10^4	
模型箱	5×10^5	5×10^5			
加载板	5×10^6	5×10^6			
材料	平行粘结半径 pb_rad	切向平行粘结强度 pb_s/Pa	法向平行粘结强度 pb_n/Pa	切向平行粘结刚度 $pb_ks/(Pa \cdot m^{-1})$	法向平行粘结刚度 $pb_kn/(Pa \cdot m^{-1})$
砂土	0	0			
土工膜	10	1×10^8	1×10^8	3×10^6	6×10^7
模型箱					
加载板					

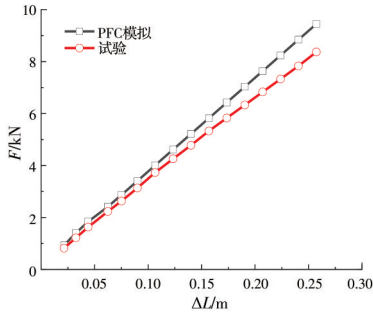


图 7 土工膜单轴拉伸力-位移 ($F-\Delta L$) 曲线
 Fig. 7 Force-displacement ($F-\Delta L$) curves of geomembrane under uniaxial tension

点采用了理想化的刚性粘结,使得 PFC 模拟中 H-V 立体土工膜的刚度略高于试验值,因此,其对土颗粒的约束作用也略高于试验值。由图 8 可知,当荷载为 60 kPa 时,在试验实测值中,水平土工膜和 H-V 立体土工膜复合衬垫的沉降量分别为纯砂工况的 72.8% 和 60.7%;而在 PFC 模拟值中,水平土工膜和 H-V 立体土工膜复合衬垫的沉降量分别为纯砂工况的 73.6% 和 29.4%。因此,无论是水平土工膜复合衬垫,还是 H-V 立体土工膜复合衬垫,两者的受力性能均比纯砂工况更好。而与传统水平土工膜复合衬垫相比,H-V 立体土工膜复合衬垫的 $p-S$ 曲线更为平缓,说明在相同上覆荷载作用下 H-V 立体土工膜复合衬垫的整体受力更加均匀,整体沉降和不均匀沉降更小。上部荷载会导致复合衬垫系统中的土工膜产生拉力,而过大的不均匀沉降又会进一步导致土工膜拉断并造成整体衬垫系统的破坏^[14]。因此,相对于水平土工膜复合衬垫,H-V 立体土工膜复合衬垫可以更好地避免因不均匀沉降而破坏的情况,从而具有更好的整体稳定性。

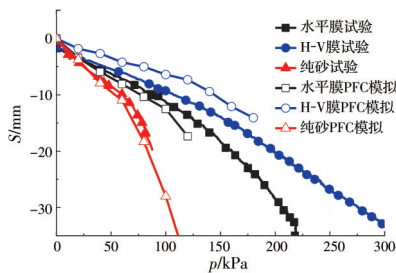
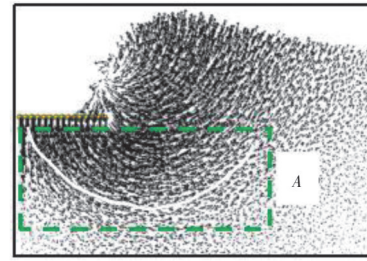


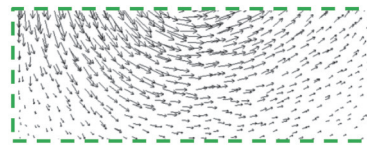
图 8 不同衬垫系统 $p-S$ 曲线
 Fig. 8 $p-S$ curves of different liner systems

3.2 颗粒位移分析

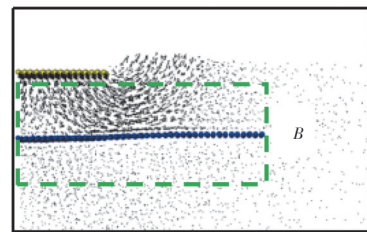
图 9 为 120 kPa 上覆荷载作用下不同衬垫中土颗粒的位移矢量分布图,虚线框给出了各衬垫相应位置的放大详图。图中箭头长短表示颗粒位移的大小,箭头方向表示颗粒的运动方向。



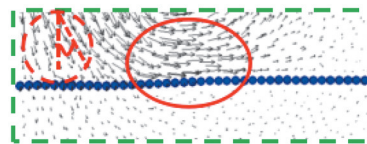
(a) 纯砂



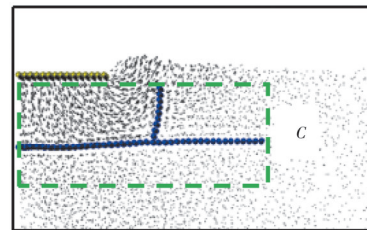
(b) 纯砂 A 区域放大详图



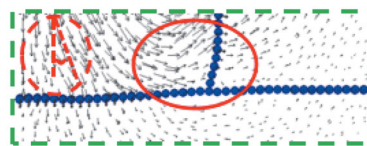
(c) 水平土工膜复合衬垫



(d) 水平土工膜复合衬垫 B 区域放大详图



(e) H-V 立体土工膜复合衬垫



(f) H-V 立体土工膜复合衬垫 C 区域放大详图

图 9 不同衬垫位移分布及详图
 Fig. 9 Displacement distributions and details of different liners

由图 9 可知,在上覆荷载作用下,土体的位移主要表现为砂土颗粒在水平方向向加载板两侧的挤出、竖直方向上向下的沉降及加载板两侧邻近范围内土体地表的隆起等。其中,纯砂工况下,土颗粒

的竖向位移主要集中在加载板附近非常小的区域,其水平方向的影响范围较为集中,致使临近区域地表隆起明显,同时,在向加载板两侧运移的过程中,土颗粒形成了明显的圆弧形滑移面(图 9(a)中实线标识部分)。由此可见,纯砂工况下,土体极易进入塑性变形状态。与此相反,两种土工膜复合衬垫中均未出现典型的圆弧形滑移面,这是由于水平土工膜的作用使砂土颗粒未能继续向基础斜下方运动,也未能向衬垫更深处发展(图 9(d)中虚线圆圈标识部分)。这说明水平膜的阻隔作用延迟了土体中圆弧滑移面的出现,进而延缓了整体塑性区的形成。

此外,对比可知,H-V 立体土工膜复合衬垫中的土颗粒呈现出与传统水平土工膜不同的运动趋势。对比图 9(c)和图 9(e)、图 9(d)和图 9(f)相同位置可知,H-V 立体土工膜复合衬垫中,竖向膜所提供的横向阻力(咬合力)和竖向摩擦力(侧摩阻力)使得竖向膜与附近土颗粒形成了类似于“半加固刚性影响区”的区域(图 9(f)中实线圆圈标识部分),在此范围内,土颗粒的位移明显小于水平土工膜复合衬垫同位置处(图 9(d)、(f)中实线圆圈标识部分)。同时,由于竖向膜的侧限作用,H-V 立体土工膜复合衬垫基底正下方附近土颗粒位移的转角明显小于水平土工膜复合衬垫。如图 9(d)、(f)中标识夹角所示,H-V 立体土工膜复合衬垫基底正下方附近土颗粒位移的转角为 21° ,比水平土工膜复合衬垫(28.5°)减小了 7.5° ,该处更多的土颗粒趋向于竖直向下运动,土体向更深处扩展,而非向水平两边缘扩展(图 9(f)中虚线圆圈标识部分)。说明竖向膜对土颗粒水平向位移的约束和阻挡作用减缓了土颗粒向外和向上整体运动的趋势,使得更多土颗粒可以和 H-V 立体土工膜协同发展,阻止了 H-V 立体土工膜复合衬垫系统沿界面的滑移破坏,进而限制了 H-V 立体土工膜衬垫系统的整体变形。这些细观的相互作用使得 H-V 立体土工膜复合衬垫系统在宏观上表现为整体土体的位移和地表隆起均小于水平土工膜复合衬垫。因此,H-V 立体土工膜复合衬垫较水平土工膜复合衬垫具有更利于填埋场应用的宏观力学性能。

3.3 接触力分析

图 10 为 120 kPa 上覆荷载作用下不同衬垫中土颗粒接触力的分布图,各对应虚线框内为不同衬垫相应位置处的放大详图。其中,线条粗细表示接触力的大小,线条方向表示接触力的传递方向。

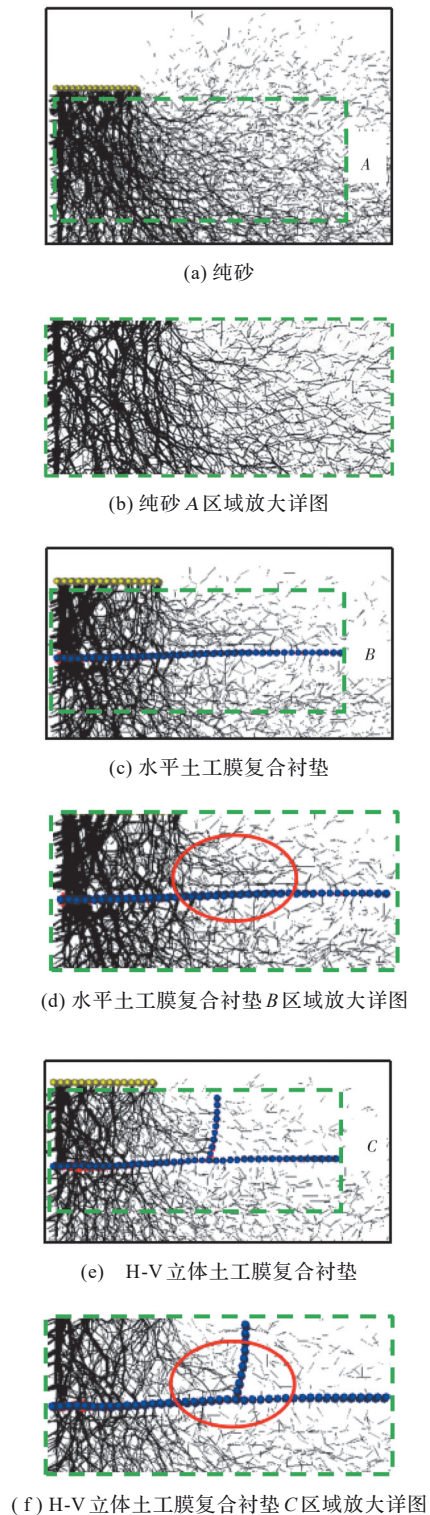


图 10 不同衬垫接触力分布及详图

Fig. 10 Contact force distribution and details of different liners

由图 10 可知,衬垫系统中土颗粒的接触力链分布整体表现出在加载板正下方范围内较为密集,而在距离加载板较远的范围内较为疏散的趋势。纯

砂工况在加载板下相同区域范围内接触力链最粗且快速向下传递,而两种土工膜复合衬垫中土颗粒的接触力链较细且分布更加均匀。水平土工膜复合衬垫从上至下竖向发展的力链被水平膜阻断,致使部分竖向力链的传递路径向水平向发展(图10(d)中圆圈标识部分)。水平土工膜复合衬垫的竖直力链主要分布范围为水平向 $0.5B$ (B 为基础板宽度)、竖向埋深 $0.5B$ 内,相对于纯砂工况的水平向 $0.5B$ 、竖向埋深 $0.65B$,其竖向埋深分布范围减小了 $0.15B$;H-V立体土工膜复合衬垫的竖直力链主要分布范围是水平向 $0.5B$ 、竖向埋深 $0.42B$ 内,相对于纯砂工况,其竖向埋深分布范围减小了 $0.23B$,说明水平膜的阻断作用均化了衬垫系统的竖向应力,使得水平土工膜复合衬垫和H-V立体土工膜复合衬垫中竖直力链分布的范围减小而整体力链分布趋于均匀。

同时,对比可知,H-V立体土工膜复合衬垫中从左至右水平向发展的力链被H-V立体土工膜的竖向膜阻断(图10(f)中圆圈标识部分),H-V立体土工膜复合衬垫水平力链的主要分布范围是水平向 $0.75B$,比水平土工膜复合衬垫($1B$)减小了 $0.25B$,说明竖向膜限制了力链沿水平方向的持续扩散,进而使得H-V立体土工膜复合衬垫的接触力链比水平土工膜复合衬垫分布更均匀。此外,H-V立体土工膜的竖向膜与周围的土颗粒还形成“协同加固区”(图10(f)中圆圈标识部分),在此区域内,竖向膜的侧向约束力和摩擦力提高了H-V立体土工膜的整体界面强度,使得H-V立体土工膜复合衬垫整体水平约束力较水平土工膜复合衬垫小,但更趋于整体范围内的均化。

3.4 土工膜受力分析

图11为120 kPa上覆荷载作用下水平土工膜和H-V立体土工膜拉力的力链分布图,线条粗细代表力链的大小,线条方向代表拉力传递的方向。由图11可知,在上覆荷载作用下,土工膜加载板正下方膜上的拉力远大于加载板以外膜上的拉力,并且距加载板中心越远,拉力越小。对比图11(a)、(b)发现,H-V立体土工膜上横向拉应力的分布与大小均较水平土工膜小(图11(a)、图11(b)中圆圈标识部分),H-V立体土工膜上横向拉应力的主要分布范围为水平向 $0.5B$ 内,比水平土工膜的主要分布范围($0.67B$)减小了 $0.17B$ 。从荷载板附近向远处传递的力链被竖向膜阻断(图11(b)中圆圈标识部分)。由此可知,H-V立体土工膜复合衬垫中,竖向膜减缓了整体水平膜上拉力的扩展,进而均化和减小了H-

V立体土工膜整体的拉伸变形,使得相同上覆荷载作用下H-V立体土工膜表现出更好的抗拉性能。

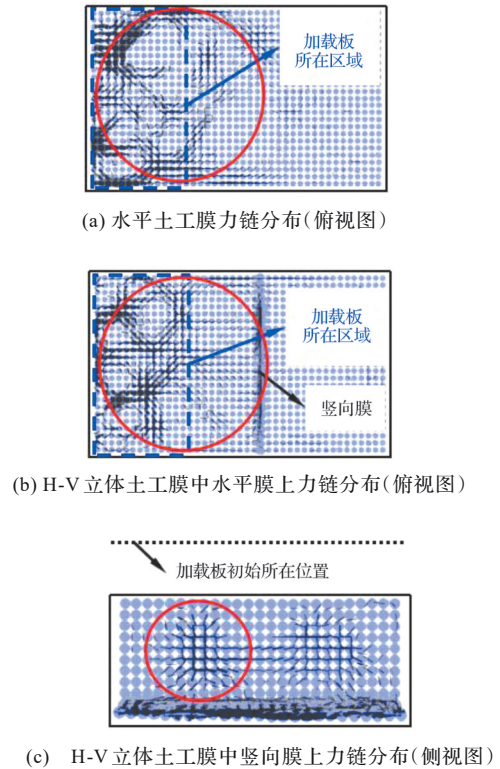


图11 不同形式土工膜上的力链分布图

Fig. 11 Distribution diagram of force chains on different geomembranes

此外,由图11(c)可知,H-V立体土工膜竖向膜上两侧拉力均呈发散状分布(以图11(c)中圆圈标识为例),拉力自中心向四周逐渐减小,分布逐渐扩散。进一步验证了在受力过程中H-V立体土工膜复合衬垫竖向膜阻拦了衬垫中从左向右水平向移动的土颗粒,并与周围土体形成了加固约束挤密区,使得这些土体与H-V立体土工膜在衬垫受力过程中协同运作,进而提高了H-V立体土工膜复合衬垫整体界面强度。

3.5 竖向应力分析

图12为120 kPa上覆荷载作用下不同衬垫中土的竖向应力分布云图,点线表示初始加载板所在位置,短划线表示土工膜所在位置。由图12可知,纯砂工况下,在加载板正下方的范围内出现明显的应力集中现象,且主要分布在水平向 $0.5B$ 、竖向埋深 $0.67B$ 的范围内,而土工膜复合衬垫仅在加载板直接作用区域内出现应力集中,其作用范围和大小远远小于纯砂工况。水平土工膜复合衬垫应力集中的范围主要在水平向 $0.4B$ 、竖向埋深 $0.6B$ 内,

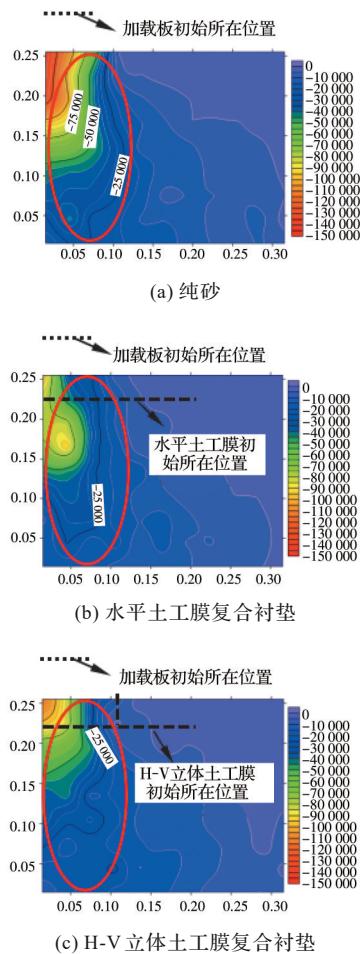


图 12 不同衬垫竖向应力分布

Fig. 12 Vertical stress distribution of different liners

H-V 立体土工膜复合衬垫应力集中主要在水平向 $0.33B$ 、竖向埋深 $0.33B$ 的范围内,相对于纯砂工况,水平土工膜复合衬垫和 H-V 立体土工膜复合衬垫应力集中的范围均有所减小,且 H-V 立体土工膜复合衬垫应力集中的范围较水平土工膜复合衬垫更小。同时,两种土工膜复合衬垫竖向应力等值曲线在加载板宽度范围内分布比纯砂工况稀疏,说明应力均化作用明显。由此可知,土工膜复合衬垫能够明显地增大应力扩散的范围,并与周围土体形成良好的应力协同传递体系。而相较于水平土工膜复合衬垫,H-V 立体土工膜复合衬垫在水平膜和竖向膜包围的区域内出现了协同挤密工作区,且应力在该区域外比水平土工膜复合衬垫小,在加载板宽度范围内,竖向应力等值曲线较水平土工膜更加稀疏,且由于竖向膜的存在,竖向应力等值曲线呈现垂直于水平面的竖直分布,说明 H-V 立体土工膜的竖向膜具有一定的应力阻挡作用,且 H-V 立体土工膜复合衬垫进一步弱化了土体内部的局部应力,使其在更

宽的区域进行应力重分配,进而有效地均化和扩散了上覆荷载,避免因应力集中较大而出现局部撕裂破坏的现象,最终提高整体衬垫系统的完整性和稳定性。

4 结论

结合已发表文献的试验结果,利用基于离散元的 PFC 软件,从细观上模拟了具有不同几何特征的土工膜复合衬垫中膜-土界面的作用机理,得到以下主要结论:

1) 土工膜复合衬垫 PFC 数值模拟结果与实测值吻合良好。在相同上覆荷载作用下,水平土工膜和 H-V 立体土工膜均能较好地改善复合衬垫的受力性能,而相对于水平土工膜复合衬垫,H-V 立体土工膜复合衬垫的整体沉降及不均匀沉降更小,能够承受更大的上覆荷载。

2) 水平土工膜主要表现出阻隔作用和摩擦作用,其中,阻隔作用使得砂土颗粒未能进一步向衬垫下方和更深处运动,而摩擦作用限制了土颗粒的水平向运动,整体衬垫对土中的应力起到扩散作用。

3) H-V 立体土工膜复合衬垫中,除了具有传统水平膜的阻隔作用和摩擦作用机理外,还主要体现在 H-V 立体土工膜中竖向膜的摩擦、侧阻和协同约束作用。竖向膜不仅约束了土颗粒在上覆荷载作用下力链向加载板两侧方向的传递,并与土颗粒形成了约束挤密区,使得 H-V 立体土工膜复合衬垫中颗粒的接触力链比水平土工膜复合衬垫分布更均匀;同时减缓了水平膜上拉力的扩展,进而减小了 H-V 立体土工膜的整体变形,使得 H-V 立体土工膜表现出更好的抗拉性能。

4) 传统水平土工膜和 H-V 立体土工膜具有不同的膜-土界面相互作用机理。与传统水平土工膜复合衬垫相比,在相同上覆荷载作用下,H-V 立体土工膜复合衬垫宏观上表现为衬垫系统的整体沉降及不均匀沉降更小、土应力分布更均匀及承载性能更高等优点。

参考文献

- [1] 王协群,王俊奇. 固体废弃物填埋场中土工膜衬垫系统的发展与应用[J]. 环境保护科学, 2004, 30(1): 24-26.
WANG X Q, WANG J Q. Development and application of geomembrane liner system in solid waste landfills [J]. Environmental Protection Science, 2004, 30(1): 24-26. (in Chinese)
- [2] 吕宏洋. 膨润土防水毯(GCL)和土工膜(GM)作为危险废物填埋场复合场衬垫系统的研究[J]. 有色冶金设计

- 与研究, 2007, 28(Sup1): 131-134, 140.
- LU H Y. A study on GCL and GM serving as a composite lining system of hazardous waste landfill sites [J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2007, 28(Sup1): 131-134, 140. (in Chinese)
- [3] JAISI D P, GLAWE U, BERGADO D T. Hydraulic behaviour of geosynthetic and granular landfill drainage materials in the Sa Kaeo landfill, Thailand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, 23(3): 185-204.
- [4] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(4): 165-182.
- CHEN Y M, SHI J Y, ZHU W, et al. A review of geoenvironmental engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(4): 165-182. (in Chinese)
- [5] 张宏伟, 林伟岸, 詹良通, 等. 土工膜/GCL界面剪切强度特性的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(2): 123-130.
- ZHANG H W, LIN W A, ZHAN L T, et al. Experiment study on shear strength of GM/GCL interface [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(2): 123-130. (in Chinese)
- [6] FOX P J, THIELMANN S S, STERN A N, et al. Interface shear damage to a HDPE geomembrane. I: Gravelly compacted clay liner [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(8): 04014039.
- [7] DAVID FROST J, KIM D, LEE S W. Microscale geomembrane-granular material interactions [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 16(1): 79-92.
- [8] 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 W A, ZHAN L T, CHEN Y M, et al. Interface shear strength of liners with geocomposite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(5): 693-697. (in Chinese)
- [9] 田武成, 胡立科, 蒋军. 某堆料场桩网复合地基失稳事故分析[J]. *低温建筑技术*, 2014, 36(9): 135-136, 141.
- TIAN W C, HU L K, JIANG J. Failure analysis of pile net composite foundation in a stockyard [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2014, 36(9): 135-136, 141. (in Chinese)
- [10] 高俊丽, 张孟喜, 张文杰. 加肋土工膜与砂土界面特性研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3225-3230.
- GAO J L, ZHANG M X, ZHANG W J. Interface property between sand and reinforced geomembrane [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3225-3230. (in Chinese)
- [11] 侯娟, 戴治恒, 李家正, 等. 三维立体土工膜: ZL201520793529 [P]. 2016-01-13.
- HOU J, DAI Z H, LI J Z, et al. Three-dimensional geomembrane : ZL201520793529 [P]. 2016-01-13. (in Chinese)
- [12] HOU J, ZHANG M X. Laboratory investigation to the behavior of foundation on horizontal-vertical reinforced sands [C]//Geo-Chicago 2016, Chicago, Illinois, August 14-18, 2016, Sustainable Materials and Resource Conservation: 1316.
- [13] 尹成. 岩石拉压实验的颗粒离散元模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- YIN C. Particle DEM simulation for rock tests of direct tension and compression [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [14] 冯世进, 刘鑫. 土工膜与土界面剪切特性细观研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 43-49.
- FENG S J, LIU X. Mesoscopical study on interface properties between geomembrane and soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 43-49. (in Chinese)
- [15] HOU J, LI H, LIU L, et al. A DEM analysis of geomembrane-lined landfill subject to vertical loading [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(2): 369-375.
- [16] 李家正. 条形基础下水平-竖向格栅加筋地基承载性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2018.
- LI J Z. Bearing behavior of strip footing reinforced with horizontal-vertical geogrids [D]. Shanghai: Shanghai University, 2018. (in Chinese)
- [17] CHEN Q M, ABU-FARSAKH M. Numerical analysis to study the scale effect of shallow foundation on reinforced soils [C]//Geo-Frontiers Congress 2011. March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2011: 595-604.
- [18] 孟京京. 岩质边坡稳定性的离散元分析及其应用[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- MENG J J. DEM analysis of the stability of rock slope and its application [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [19] HAN J, BHANDARI A, WANG F. DEM analysis of stresses and deformations of geogrid-reinforced embankments over piles [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2012, 12(4): 340-350.
- [20] NGO N T, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Experimental and discrete element modeling of geocell-stabilized subballast subjected to cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(4): 04015100.
- [21] NGO N T, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55: 224-231.