

刘庆光, 刘杰, 雷兵兵, 等. 季节冻土地区粗颗粒土-土工格栅界面特性离散元细观研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 647-656.

LIU Qingguang, LIU Jie, LEI Bingbing, et al. Discrete element mesoscopic study on interface characteristics of coarse-grained soil-geogrid in seasonal frozen soil area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 647-656.

季节冻土地区粗颗粒土-土工格栅 界面特性离散元细观研究

刘庆光¹, 刘杰^{1,2,3,4}, 雷兵兵^{2,3}, 张江鹏^{2,4}, 白奇玉^{1,2,4}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832003; 2. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆乌鲁木齐 830000; 3. 新疆维吾尔自治区山地交通基础设施灾害防治技术工程研究中心, 新疆乌鲁木齐 830000; 4. 新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 为研究在季节冻土区, 显著的温度波动改变筋土界面力学特性进而影响寒区加筋土工程的力学稳定性和长期耐久性能。通过离散元法 PFC^{3D} 软件, 针对-5℃下粗粒土-土工格栅室内直剪试验, 进行直剪试验数值模拟。方法研究了土工格栅加筋粗粒土在直剪试验中土工格栅的单体变形受力、孔隙率变化、粗粒土的位移与旋转及土体内部的力链应力场等宏细观特性演化过程, 并通过模拟与室内试验结果的对比分析, 验证模型的准确性和实用性。结果表明: 在-5℃的低温条件下, 随着剪切位移的增加, 变形逐渐明显, 且纵肋的变形显著大于横肋。深入分析土体内部不同截面的孔隙率变化, 可以观察到孔隙率随着剪切位移的增长而降低, 且剪切面上下的孔隙率呈现非对称分布模式。剪切位移主要集中于剪切面周围, 位移呈现左高右低的特征, 并随着剪切的进行, 土体内部形成中心对称的拱形结构。进一步探究土体的应力场变化, 初始时强力链沿盒壁分布, 形成低应力区, 而应力峰值过后, 颗粒间接触力减少, 力链沿对角线分布, 这种分布特征与施加的水平推力有着密切的关联。研究成果从细观角度对粗粒土的加筋机理提供了理论解释, 可为季节性冻土区的加筋工程设计参数提供了数据支撑。

关键词: 季节冻土; 土工格栅; 离散元; 直剪试验; 宏细观特性

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.098

中图分类号: U445;

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0647-10

Discrete element mesoscopic study on interface characteristics of coarse-grained soil-geogrid in seasonal frozen soil area

LIU Qingguang¹, LIU Jie^{1,2,3,4}, LEI Bingbing^{2,3}, ZHANG Jiangpeng^{2,4}, BAI Qiyu^{1,2,4}

(1. College of Water Conservancy & Architectural, Engineering, Shihezi University, Shihezi 83000, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Traffic Planning Survey Design Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Uygur

收稿日期: 2024-10-18

基金项目: 新疆维吾尔自治区交通运输厅 2022 年度交通运输行业科技项目(2022-ZD-005); 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司科技研发项目(KY2020060801); 寒区条件下土工格栅高加筋土边坡服役性能研究(KY2020060801)

作者简介: 刘庆光(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。E-mail: lqg10265850@163.com

通信作者: 刘杰(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: hfutliujie@163.com

Autonomous Region Mountain Transportation Infrastructure Disaster Prevention and Control Technology Engineering Research Center, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Key Laboratory for Safety and Health of Transportation Infrastructure in Alpine and High-altitude Mountainous Areas, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: In order to seasonally frozen regions, significant temperature fluctuations affect the mechanical stability and long-term durability of reinforced soil engineering in cold areas by changing the mechanical properties of the reinforced soil interface. This study uses the discrete element method PFC^{3D} software. A numerical simulation of the direct shear test was carried out for coarse-grained soil-geogrid indoor direct shear test at $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. The evolution process of macro and micro characteristics of geogrid reinforced coarse-grained soil in direct shear tests, such as single deformation force, porosity change, displacement and rotation of coarse-grained soil, and force chain stress field inside the soil, is revealed. The accuracy and practicability of the model are verified by comparing the simulation result with the laboratory test result. The results show that under the condition of $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ low temperature, with the increase of shear displacement, the deformation is gradually obvious, and the deformation of the longitudinal rib is significantly greater than that of the transverse rib. An in-depth analysis of the porosity changes of different sections inside the soil shows that the porosity decreases with the increase of shear displacement, and the porosity on the shear surface and below shows an asymmetric distribution pattern. The shear displacement is mainly concentrated around the shear surface, and the displacement is characterized by high left and low right. As the shear proceeds, a centrally symmetrical arch structure is formed inside the soil. The stress field of the soil is further explored. The strong chain is initially distributed along the wall to create a low-stress zone. After the stress peak, the contact force between the particles decreases, and the force chain is distributed along the diagonal. This distribution feature is closely related to the applied horizontal thrust. The research findings provides a theoretical explanation for the reinforcement mechanism of coarse-grained soil from the microscopic point of view and provides data support for the design parameters of reinforced soil engineering in seasonal frozen soil areas.

Keywords: seasonal frozen soil; geogrid; discrete element; direct shear test; macroscopic and mesoscopic characteristics

0 引言

冻土面积占中国陆地总面积的 70%，集中在东北平原、新疆和西藏^[1]。土工格栅因其在增强路基、路面、边坡和挡土墙方面表现出色而被应用^[2-4]。与黏土相比，粗粒土的抗拉强度较低，结构稳定性较差^[5-6]。尽管土工格栅在抑制融沉、冻胀和位移方面显示出优势，但在寒冷地区的加固工程多基于经验和理论试验。季冻区的冻融循环会导致土壤中水分迁移，这可能会引起土体性质的变化^[7-9]。多种因素限制了土工格栅在季节性冻土地区的应用，需要进一步研究来克服这些挑战。

传统的筋土界面摩擦特性试验只测量了土工格栅夹持端的拉拔力，无法直接观察筋土界面力的传递和位移场^[10]。为克服这些限制，EZZEIN 等^[11]利用数字图像法(DIC)研究了双向格栅位移的影响。同时随着可视化技术的应用，筋土界面位移场的捕捉已取得进展，但荷载传递机理仍是研究的难点^[12]。为弥补物理试验的不足，学者们通过数值模拟进一步研究筋土复合体的加筋机理与界面特性，主要包括有限元法和离散元法。钱劲松等^[13]通过 ANSYS 三维模拟路堤加筋效果，验证了土工格栅在侧向变形中的加筋作

用。KHEDKAR 等^[14]通过有限元法验证了土工格栅与土工格室的试验结果。刘华北等^[15]通过有限元软件 DIANA SWANDYNE II 得到了土工格栅加筋挡土墙的相关结论。虽然有限元法能模拟应力分布，但对筋土界面微观相互作用的分析有限。离散元法在颗粒土与筋材相互作用的研究中具有优势^[16]，能够揭示土工格栅与土体的微观力学行为。

离散元研究筋土界面细观特性方面，WANG 等^[17]分析了横肋数量对格栅与土体相互作用的影响。MIAO 等^[18]研究了道砟的棱角特性对加筋的影响。苗晨曦等^[19]分析了土体颗粒与土工格栅的相互作用，揭示了孔隙率和配位数的变化规律。尽管离散元法在模拟颗粒土的力学响应中有显著优势，但在寒区工程中的应用仍面临挑战，对粗粒土及其加筋结构的研究需要更多的试验模拟和理论分析。

本文结合土工格栅加筋粗粒土大型直剪试验，利用 PFC^{3D} 软件对季节冻土区土工格栅加筋粗粒土的直剪试验进行了数值模拟。PFC^{3D} 软件在模拟以粗颗粒土壤为代表的颗粒介质的整体力学行为及其演化过程中显示出明显的优势。该软件能够考虑颗粒的尺寸分布和形状多样性，基于简化的模型假设，同时获取宏观和微观尺度的力学数据。此外，PFC^{3D} 能够有效地

利用各种微观参数来探究宏观现象。基于土工格栅直剪试验离散元数值模型, 分析直剪试验过程中土工格栅的变形特点、局部孔隙率的变化趋势、土颗粒的位移与旋转和筋土复合体的应力场等, 从细观角度揭示了季节冻土区土工格栅加筋粗粒土的加筋机理。

1 方法

1.1 数值模拟和标定

利用 PFC^{3D} 建立数值模拟模型, 为了校准粗颗粒土颗粒和土工格栅的物理特性, 分别通过数值模拟的直剪试验和拉伸试验进行参数标定。

1.2 数值直剪试验

冻土由土粒、未冻水、孔隙冰及空气组成, 是一个复杂的多相体系。在外部荷载的作用下, 颗粒与颗粒之间的接触点处以及土颗粒与冰之间产生较大的应力, 对加筋复合体的整体宏观变形有较大的影响。冻土颗粒间的胶结冰所产生的胶结力是提高筋土复合体强度的一个关键因素, 因此通过离散元进行数值模拟时, 需要考虑冻土颗粒间的胶结特性, 采用平行黏结模型来考虑冻土中的胶结作用^[20]。

PFC^{3D} 能提供的基本颗粒是圆形颗粒, 但实际情况是粗粒土的形状各异, 尤其在颗粒相互作用时, 使用单个球体颗粒会降低土体的抗剪强度, 与实际存在差异。如图 1 所示, 从粗颗粒土壤的颗粒图像直观分析, 使用圆形颗粒来模拟粗颗粒土壤的力学行为显得较为粗略, 因为自然界中不存在完全圆形的粗颗粒。为了更真实地反映剪切强度并有效模拟砂土颗粒的旋转动态, 本研究采用由 2 至 4 个颗粒组成的集合体来近似模拟椭圆形状的颗粒。这种方法能够更准确地捕捉颗粒间的相互作用和运动特性。颗粒模型在位置上, 以一个颗粒为主颗粒, 剩余的 1 至 3 颗粒称为副颗粒, 主颗粒与副颗粒的粒径完全相同。生成颗粒簇后, 主颗粒的位置坐标被替代, 形成类椭球和类三角颗粒, 角度范围为 0~360°随机生成。

直剪试验所用粗粒土的平均粒径 $d_{50} = 5.53$ mm, 不均匀系数 $C_u = 13.9$, 曲率系数 $C_c = 1.3$ 。在建模过程中考虑到若使用原级配进行离散元模拟, 其计算量会大幅增加导致计算效率降低。李振等^[21]认为粗粒土中细粒含量的适量增加并不会对其抗剪强度造成较大的影响, 因此在尽量保证与原级配相似条件下, 模拟所用的颗粒级配是将小于直径 2 mm 以下的颗粒替代为直径 2~5 mm 的颗粒如图 2 所示。

表 1 为粗粒土细观参数, 首先确定室内粗颗粒冻土直剪试验的宏观力学参数, 然后将宏观力学参数带

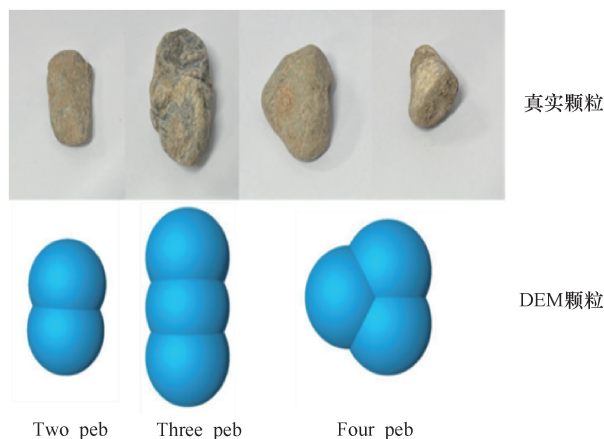


图 1 PFC^{3D} 中“clumps”的建模

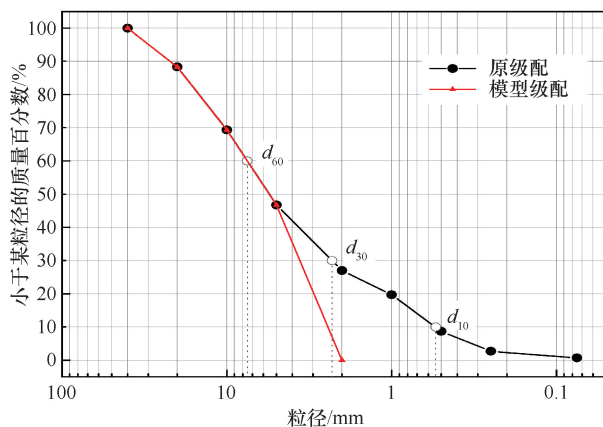


图 2 原级配与模型级配曲线

入至命令流中, 使用 PFC^{3D} 软件进行直剪试验模拟, 最后根据宏观力学参数确定细观力学参数。细观参数与宏观参数之间并不存在明显的直接联系。经过反复调整颗粒尺寸、摩擦系数和平行黏结等细观参数, 使数值模拟结果在宏观力学行为上与室内试验数据相吻合。通过这种方法, 我们能够实现微观与宏观尺度之间的有效关联, 从而提高模拟的准确性和可靠性。如图 3 所示, 直剪试验离散元模拟所使用的模型箱的箱壁是由 PFC^{3D} 软件中的墙体生成, 内部尺寸为 500 mm×500 mm×300 mm(长×宽×高), 试验与模拟所使用得模型箱尺寸基本一致。首先利用墙体单元生成 10 块墙体, 使模型箱处于封闭状态, 然后在上下箱体中分别生成颗粒簇, 上下盒之间铺设土工格栅, 等待计算至应力平衡, 开始对上墙体施加伺服, 即法向荷载。图 4 为室内试验和模拟试验剪切过程图, 剪切速度由室内直剪试验采用的 1 mm/min 调至为 2 mm/min, 模拟过程。

1.3 格栅拉伸试验

筋材的数值模型在体积和孔径截面尺寸上与实际

表 1 土颗粒微观参数

温度/℃	颗粒密度 /kg · m ⁻³	平行黏结				摩擦系数	颗粒范围 /mm
		法向刚度/N · m ⁻¹	切向刚度/N · m ⁻¹	法向强度/Pa	切向强度/Pa		
0	2 700	5×10 ⁸	5×10 ⁸	8×10 ⁸	8×10 ⁸	0.3	2~40
-5	2 700	4.5×10 ⁹	4.5×10 ⁹	5.5×10 ⁹	5.5×10 ⁹	0.3	2~40

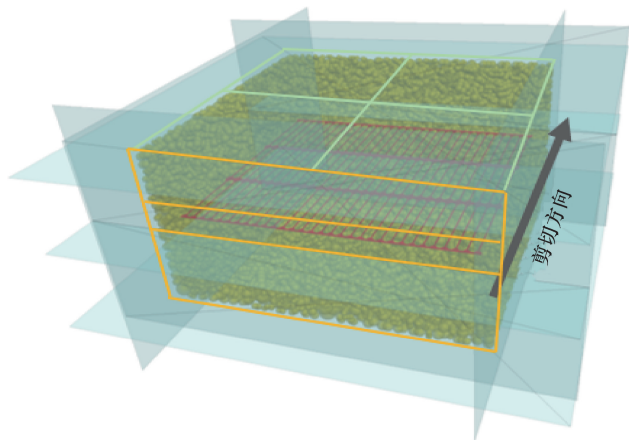


图 3 直剪试验 PFC^{3D} 模型

筋材保持相近。通过使用平行黏结接触模型来模拟格栅颗粒之间的接触, 该模型仅在受拉时起作用, 而不受压, 这与土工格栅的拉伸特性相符合。土工格栅的微观参数如表 2 所列, 由于不考虑格栅的断裂, 因此选用了较高的黏结强度。采用分段函数模拟格栅表现出的非线性应力应变关系, 需要对格栅应变合理分段^[17]。通过不断调整其细观参数值至与室内拉伸试验的拉伸曲线相吻合, 最终确定土工格栅离散元模型的细观参数。土工格栅拉伸分段线性模型可为

$$F = \begin{cases} k_1 \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ k_1 \varepsilon_1 + k_2 (\varepsilon - \varepsilon_1), & \varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2 \\ k_1 \varepsilon_1 + k_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + k_3 (\varepsilon - \varepsilon_2), & \varepsilon_2 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 为土工格栅被夹持端的拉力(N); ε 为土工格栅的应变; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为每段分段线性模型中

各阶段的弹性系数(N · m⁻¹); ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为各阶段的临界应变值。

拉伸试验的数值模拟结果与实际物理试验的曲线大致吻合, 如图 5 所示。这一结果验证了数值模型的准确性和可靠性, 表明所采用的模型和参数设置能够较好地反映土工格栅的实际拉伸行为。通过对数值与试验结果, 我们可以进一步优化模型参数, 提高模拟精度。

2 试验结果

2.1 数值试验与物理试验结果对比验证

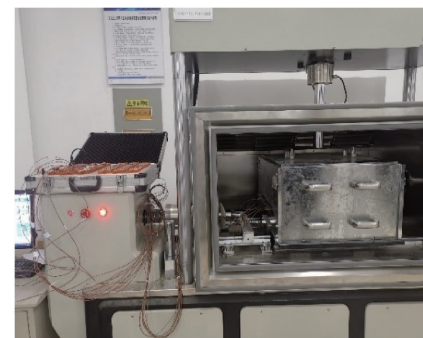
对比室内直剪试验所获得的剪切位移与剪应力曲线, 包括峰值剪应力、曲线趋势等。通过与室内试验对比模型的合理性, 图 6 为剪应力与剪切位移在 0℃ 与 -5℃ 含水率为 7% 的关系曲线, 随着剪切位移的增加, 剪应力的增长速率开始减缓。在数值模拟中, 应力曲线在达到峰值后出现小幅的波动下降。增大法向应力会使得应力曲线整体上升, 同时峰值对应的剪切位移也会增加。在相同的法向应力条件下, 模拟数据与试验结果紧密一致, 两者的发展规律相似且拟合程度较高, 这验证了直剪试验数值模型的合理性和准确性。

3 剪切试验的宏观分析

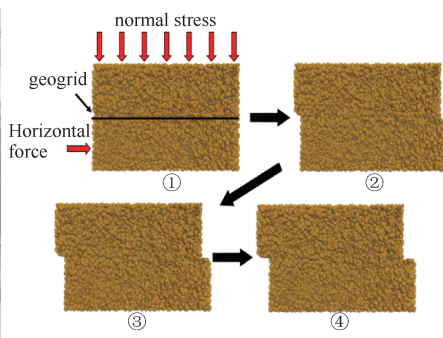
3.1 土工格栅单体变形受力分析

土工格栅加筋粗粒土的室内直剪试验能够测得筋土界面的宏观参数, 而无法观测对于剪切面上土工格栅形态的演变过程以及受力情况。利用 PFC^{3D} 程序对室内直剪试验数值模拟, 可以对筋土界面特性做进一步分析, 直观地得到剪切过程中筋材在土体内部的变形与受力分布情况。

图 7 为 -5℃ 法向荷载 80 kPa 时不同剪切位移下土工格栅变形图。剪切位移 0~5 mm 时, 土工格栅的整体外观还比较正常, 当剪切位移 5~30 mm 时, 土工格栅的变形随剪切位移的增大逐渐明显。从图 7 中可看出剪切位移下土工格栅均剪切后端变形均大于剪切前端变形, 从后往前呈递减趋势。土工格栅的纵肋比横肋的



(a) 室内试验



(b) 模拟试验

图 4 剪切过程

表 2 土工格栅离散元模型的微观参数

颗粒接触			平行黏结					
法向刚度 $/N \cdot m^{-1}$	切向刚度 $/N \cdot m^{-1}$	摩擦系数	半径乘数	温度	刚度 $/N \cdot m^{-1}$		强度/Pa	
					法向	切向	法向	切向
2×10^8	2×10^8	0.3	0.05	0 °C	4.5×10^{16}	4.5×10^{16}	2×10^{15}	2×10^{15}
				-5 °C	4.5×10^{18}	4.5×10^{18}	2×10^{17}	2×10^{17}

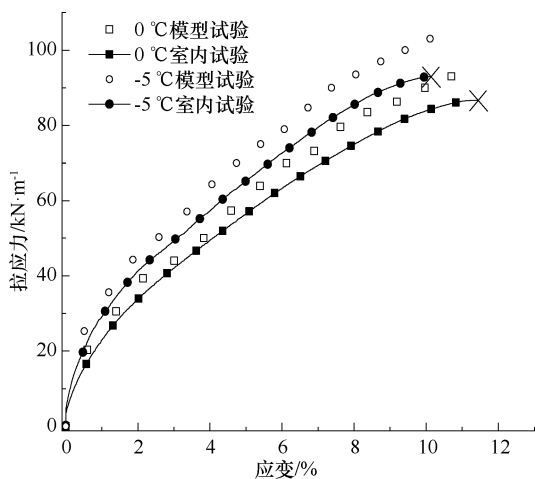


图 5 土工格栅拉伸曲线结果对比

变形程度更加显著,一方面这是由于土工格栅的纵肋比横肋的宽度小且厚度薄,其拉伸强度也远比横肋低;另一方面,粗粒土在剪切过程中,颗粒发生水平移动、旋转及翻越等现象,横肋对此现象起到阻抑作用,同时部分颗粒沿横肋方向移动,嵌入到纵肋之间的空隙中,对纵肋进行挤压,导致纵肋垂直于剪切方向的变形较大。

3.2 测量球和孔隙率

如图 8 所示,在模型内部设置了多组测量球,记录了筋土复合体在剪切过程中变化情况,布设的测量球一共有四组:在格栅的上下界面处布设两组,分别为 XY-1、XY-2;沿两截面各布设一组,分别为 XZ、YZ。测量球记录了土体内部的应力数据,为了更加直观地显示

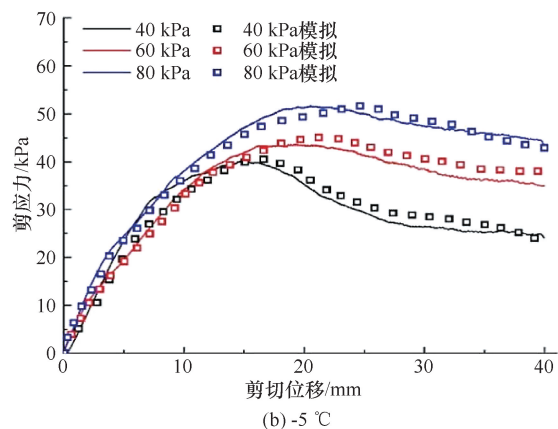
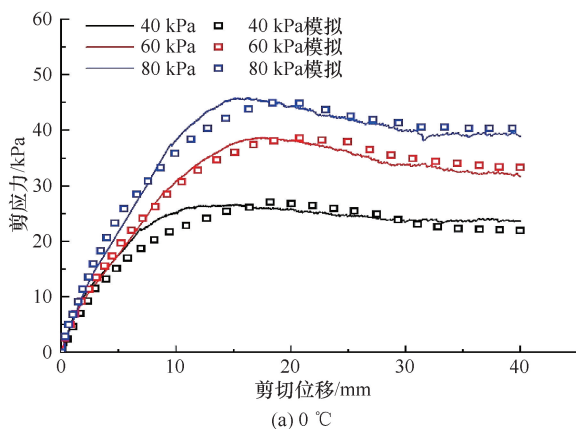


图 6 试验与模拟结果对比

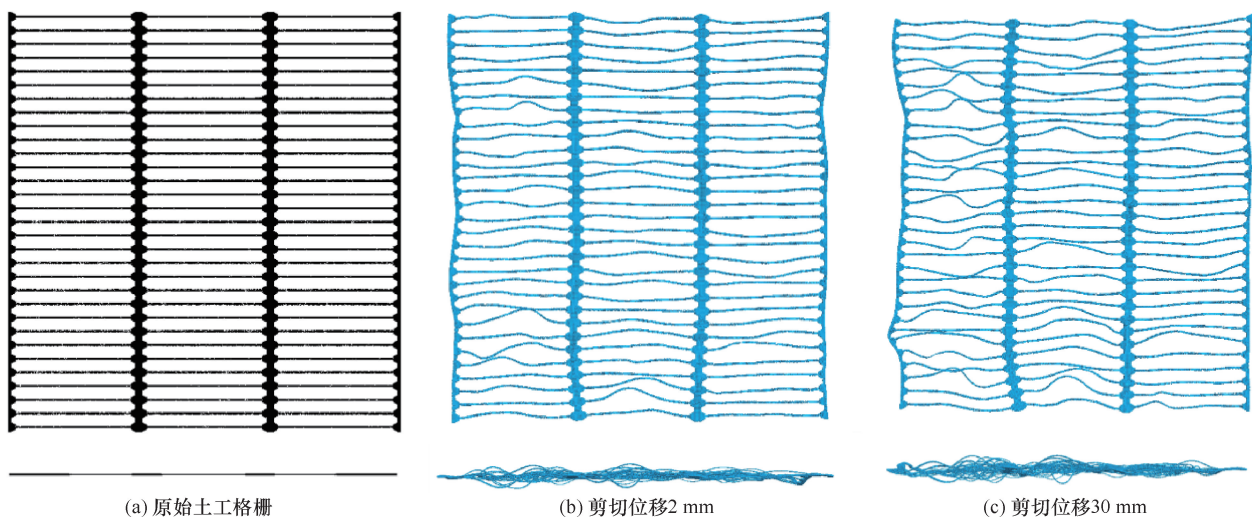


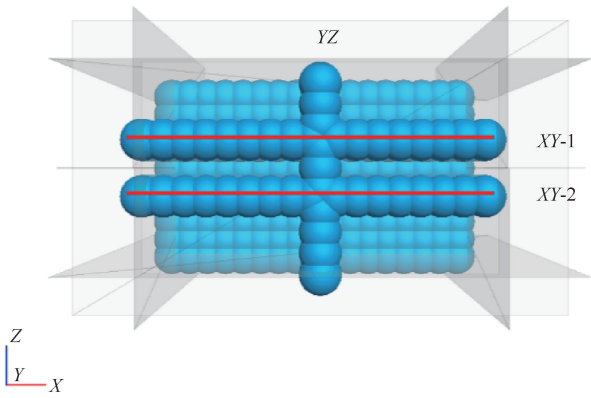
图 7 80 kPa 时不同剪切位移下土工格栅变形

出应力的变化情况, 将监测数据转化为等值线图。

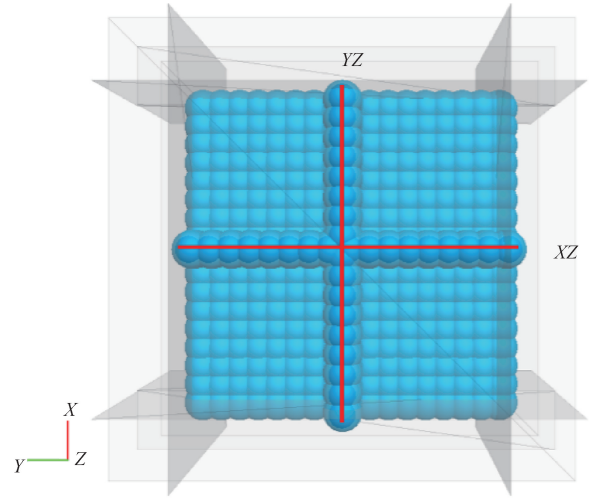
图9为-5℃剪切过程中土体在XY截面的孔隙率分布情况。XY-1、XY-2截面, 表现出一定的不对称性, XY-1界面孔隙率波动范围较大而XY-2界面受到的扰动程度相对较小。在剪切前期, XY-1截面孔隙率在左盒壁中部的孔隙率较大, 后随剪切位移的增加,

逐渐减小。XY-2截面上, 孔隙率较大的区域出现在后盒壁中部, 前盒壁中部也出现了小范围的孔隙率超过0.43的区域。当剪切位移大于20mm后, XY-1、XY-2截面土体内部的孔隙率逐渐减小并趋于稳定。

如图10所示, 随着剪切位移的增加各个截面的平均孔隙率均出现减小的情况。原因是在剪切过程

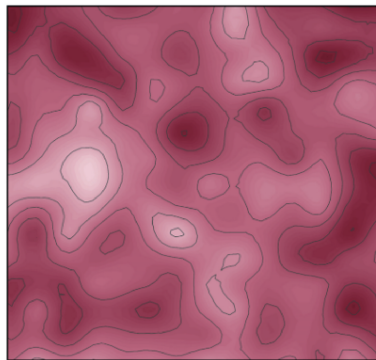


(a) 正 视



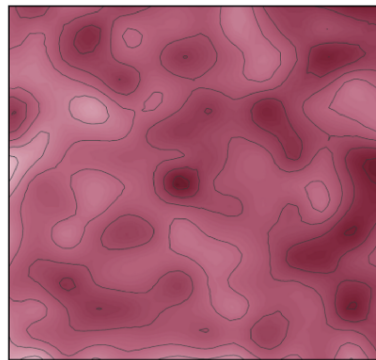
(b) 俯 视

图8 测量球位置



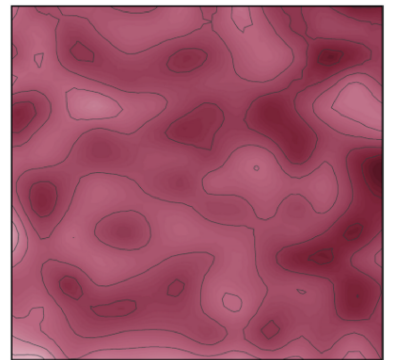
0.451 4 0.400 1 0.348 9 0.297 6

(a) XY-1剪切位移5 mm



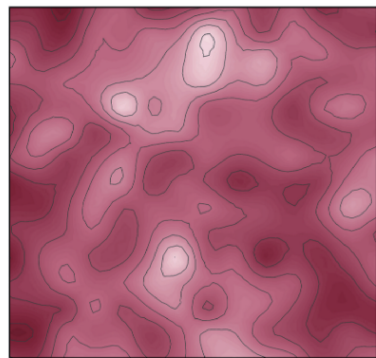
0.451 4 0.400 1 0.348 9 0.297 6

(b) XY-1剪切位移20 mm



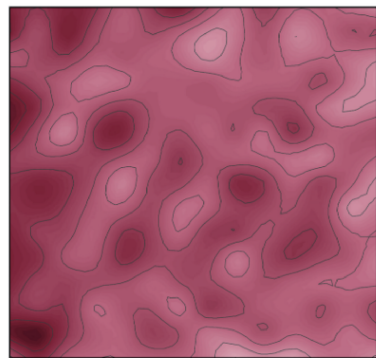
0.451 4 0.400 1 0.348 9 0.297 6

(c) XY-1剪切位移40 mm



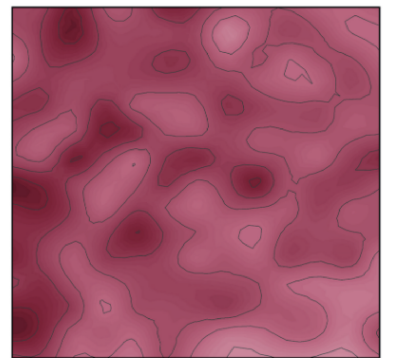
0.459 4 0.408 3 0.357 2 0.306 1

(d) XY-2剪切位移5 mm



0.459 4 0.408 3 0.357 2 0.306 1

(e) XY-2剪切位移20 mm



0.459 4 0.408 3 0.357 2 0.306 1

(f) XY-2剪切位移40 mm

图9 剪切过程中粗粒土颗粒XY截面孔隙率等值线图

中, 随剪切位移的增加, 颗粒之间的摩擦作用以及土工格栅横肋的阻隔作用约束了土颗粒产生相对位移, 使颗粒间的孔隙随剪切位移逐渐减小。

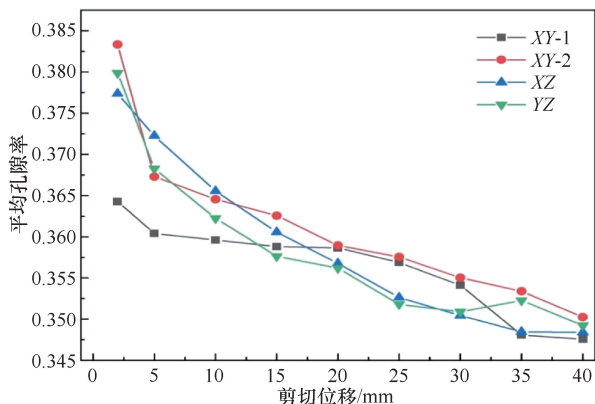


图 10 截面平均孔隙率

3.3 粗颗粒土的位移与旋转分析

通过 PFC^{3D} 软件可以直观监测筋土复合体在直剪过程中土体的细观变化。图 11 为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 60 kPa 粗粒土颗粒在不同剪切位移下的位移矢量图。箭头所指方向为颗粒位移的方向, 箭头的大小为颗粒位移量的相对大小。当剪切位移在 $2\sim 5\text{ mm}$ 时, 土颗粒位移的数量与幅度几乎没有变化。当剪切位移为 20 mm 时, 可以看到土颗粒位移主要发生在模型中部, 并随剪切位移的增加而增加。当剪切位移为 40 mm 时, 左侧的位移变化量要大于右侧, 且位移量密集区呈左高右低。随着剪切位移的增加, 土颗粒位移的数量和幅度逐渐增大。当剪切位移为 $2\sim 5\text{ mm}$ 时, 由于剪切位移很小, 筋土间完全依靠的是界面上的近似静摩擦作用。当剪切位移为 10 mm 时, 土颗粒的位移量开始出现变化, 在此阶段筋土间的相互作用不仅仅是由近似静摩擦摩擦力组成, 由于筋土间发生的相对位移增大, 此时组成因素由近似静摩擦转变为滑动摩擦力以及筋土间咬合作用。根据土颗粒位移量的变化可将直剪试验分为两个阶段, 第一阶段为近似静摩擦阶段, 第二阶段为滑动摩擦阶段。对于第二阶段, 可以认为筋土间的相互作用不

仅仅发生在剪切面上, 而且剪切面附近的土体也都发生了位移与旋转, 即间接影响带。当剪切位移 $30\sim 40\text{ mm}$ 时, 随着剪切位移的增加, 影响带范围也逐渐增大。同时图 11 也证明了图 9 的结论, 格栅位移增加时, 筋土界面中粗颗粒颗粒的位移和旋转增加, 导致测量球内颗粒接触数减少和孔隙率的增加, 揭示了试样宏观的体积剪胀主要受剪切带内颗粒的运动控制。通过对粗粒土位移量的分析, 对加筋机制中所提出的间接加固效果进行了验证。

如图 12 所示, 利用 PFC^{3D} 软件模拟了土颗粒在各剪切阶段的位移量。当剪切位移小于 10 mm 时, 土体位移程度不明显。剪切位移在 20 mm 时, 土体内部变形逐渐清晰, 在剪切带左上部出现明显的颗粒扰动现象。当剪切位移达到 40 mm 时, 土体内部变形整体呈现出近似中心对称的拱形。随着剪切位移的增加, 逐渐形成剪切带, 且以上下盒为分界线的剪切

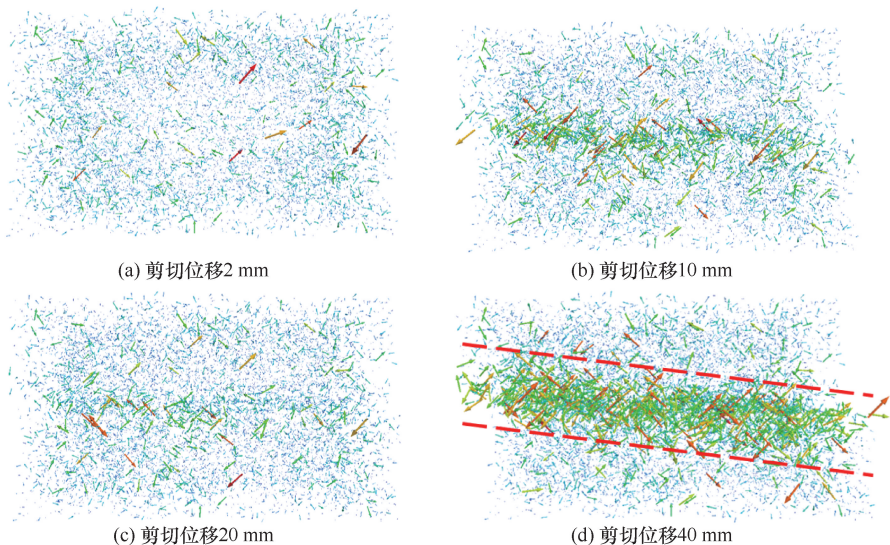


图 11 60 kPa 时粗粒土颗粒剪切位移矢量图

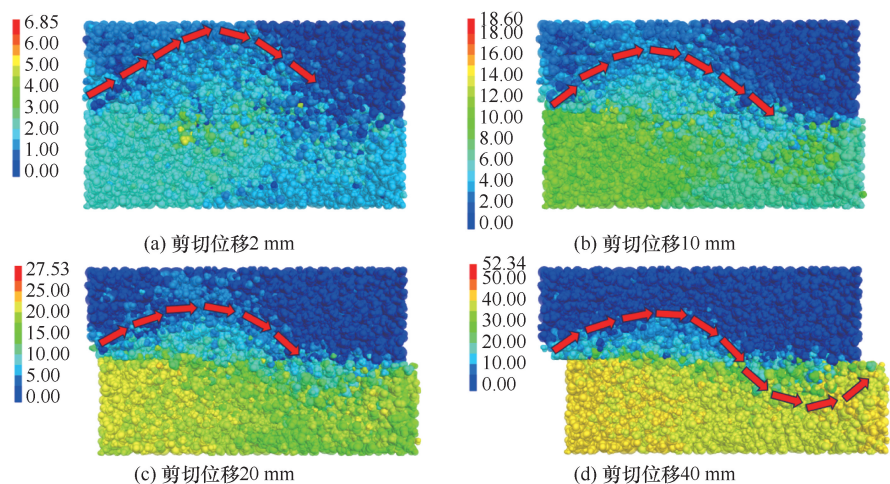


图 12 剪切过程中粗粒土颗粒位移(单位: mm)

带处颗粒出现明显分层, 同时呈现近似中心对称的拱形。可以看出土颗粒的位移主要集中在上下直剪盒的中间部位, 且位移场发生不均匀分布。加筋粗粒土直剪试验的剪切面并非完全按照上下剪切盒间的剪切面形成, 而是一个斜面, 与文献[22]的结论一致。

通过对土工格栅横肋的标注发现, 在每条横肋处土颗粒的旋转要多于其他位置, 这是由于土工格栅产生了对土体的嵌锁效应, 在直剪力的作用下, 土颗粒以旋转的方式运动。土工格栅的横肋一定程度上阻抑了内部土颗粒的水平位移, 同时土颗粒的旋转也导致了格栅的变形。

3.4 数值模拟中力链演化

颗粒体系的接触网络就是骨架, 力链网络的演变决定颗粒体系的力学性质。图 13 为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 法向荷载 60 kPa 时不同剪切位移下土颗粒间接触力链的分布情况。当剪切位移在 $2\sim 20\text{ mm}$ 时, 接触力链主要沿箱壁密集分布, 内部土体的力链线条较细且分布稀疏, 形成低应力区, 颗粒间的力链分布不均匀。当剪切位移达到 30 mm 时, 力链密集分布于整体剪切盒内部, 中部低应力区的力链分布也逐渐密集; 当剪切位移达到 40 mm 时, 力链最终沿剪切盒的对角展开分布, 即剪切盒的左下角与右上角处的力链产生贯通发育。同时在剪切过程中, 接触力链的主方向从剪切盒的左下角和右上角开始发生偏转, 筋土复合体中心部分出现低应力区, 且在剪切过程的前中期较为明显。分析是直剪试验过程中, 剪切盒左右两侧盒壁附近的

土颗粒是最先受到应力影响, 因此在剪切过程的前期就出现了土颗粒结构重新排列, 进而接触力链也受到影响, 从微观上来看, 即力链的主方向发生偏转。

随着剪切位移的增加, 力链网络发生显著变化, 主要表现在内部土体的接触力链密度增大, 证明土颗粒间的接触更加紧密。当经过峰值应力后, 土颗粒间的接触力逐渐减弱, 摩擦挤压作用也随之减弱。数值模拟直剪试验中, 剪切盒的水平推力作用在下剪切盒, 部分学者在剪切过程中水平推力在上剪切盒^[23-24], 对角线力链的形成方向与本研究相反。因此可以推断力链的形成方向与水平推力的位置相关。

3.5 应力分布

应力是连续介质力学中的概念, 而在离散介质系统中, 力的作用仅局限于颗粒间的接触点, 以及颗粒自身的位移, 空隙区域则不涉及力的作用。这种离散化处理使得离散元方法能够有效地模拟颗粒系统的力学行为, 同时避免了连续介质假设带来的局限性。通过考虑颗粒间的接触力和位移, 离散元方法能够捕捉颗粒系统的关键力学特征。由于应力概念对于描述材料行为具有重要意义。因此, 通过平均化的方法, 在离散元法中引入应力概念。公式为^[25]

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{N_p} \sigma_{ij}^{(p)} V^{(p)} \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为作用在一定区域内的应力张量 (Pa); $\sigma_{ij}^{(p)}$ 为颗粒中的平均应力张量 (Pa); N_p 为区域内颗粒数; $V^{(p)}$ 为颗粒体积 (m^3)。

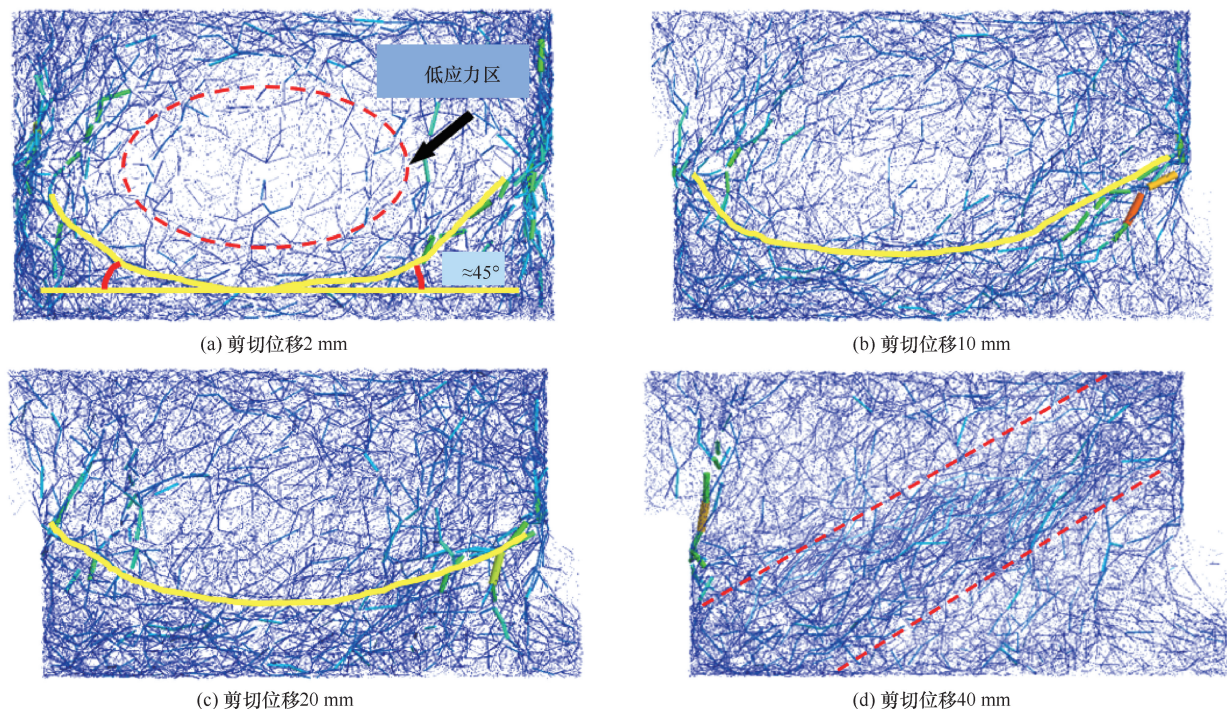


图 13 60 kPa 时剪切过程中粗粒土颗粒力链分布

颗粒的平均应力通过接触力来确定, 公式为

$$\sigma_{ij}^{(p)} = -\frac{1}{V^{(p)}} \sum_{N_c} |x_i^{(c)} - x_i^{(p)}| n_i^{(c,p)} F_j^{(c)} \quad (4)$$

式中, $x_i^{(c)}$ 为颗粒之间的接触位置(m); $x_i^{(p)}$ 为颗粒的中心位置; $n_i^{(c,p)}$ 是从颗粒中心指向接触位置的单位法向量; $F_j^{(c)}$ 为接触力(N); N_c 为颗粒间接触的数量。

通过颗粒应力平均化与区域应力平均化方法, 可以在离散元中得到作用在一定区域的水平应力 σ_h 和竖向应力 σ_v 。

图 14 为 -5°C 60 kPa 时筋土复合体在 XZ 截面的

应力变化情况, 在初始剪切阶段筋土复合体内部应力分布较为均匀, 仅在上下盒壁附近产生较小的应力。随着剪切位移的增加, 下剪切盒内土体的应力逐渐增大, 且范围由下盒壁向剪切面增加, 中下部的应力较为集中。当剪切位移达到 40 mm 时, 筋土复合体内部的应力主要集中在中心部位, 且应力从左下到右上角呈对角线型集中分布, 这与接触力链分布规律相吻合。

图 15 为 -5°C 60 kPa 时筋土复合体在 XY 截面的应力变化情况。在剪切位移在 5 mm 以下时, 截面的中心部位几乎没有受到应力影响。当剪切位移在 5~

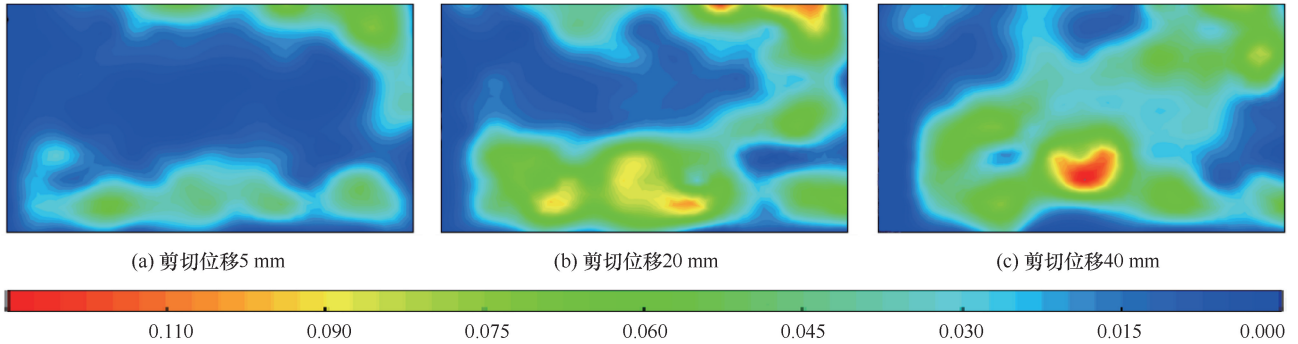


图 14 60 kPa 时剪切过程中粗粒土颗粒 XZ 截面应力分布(单位: MPa)

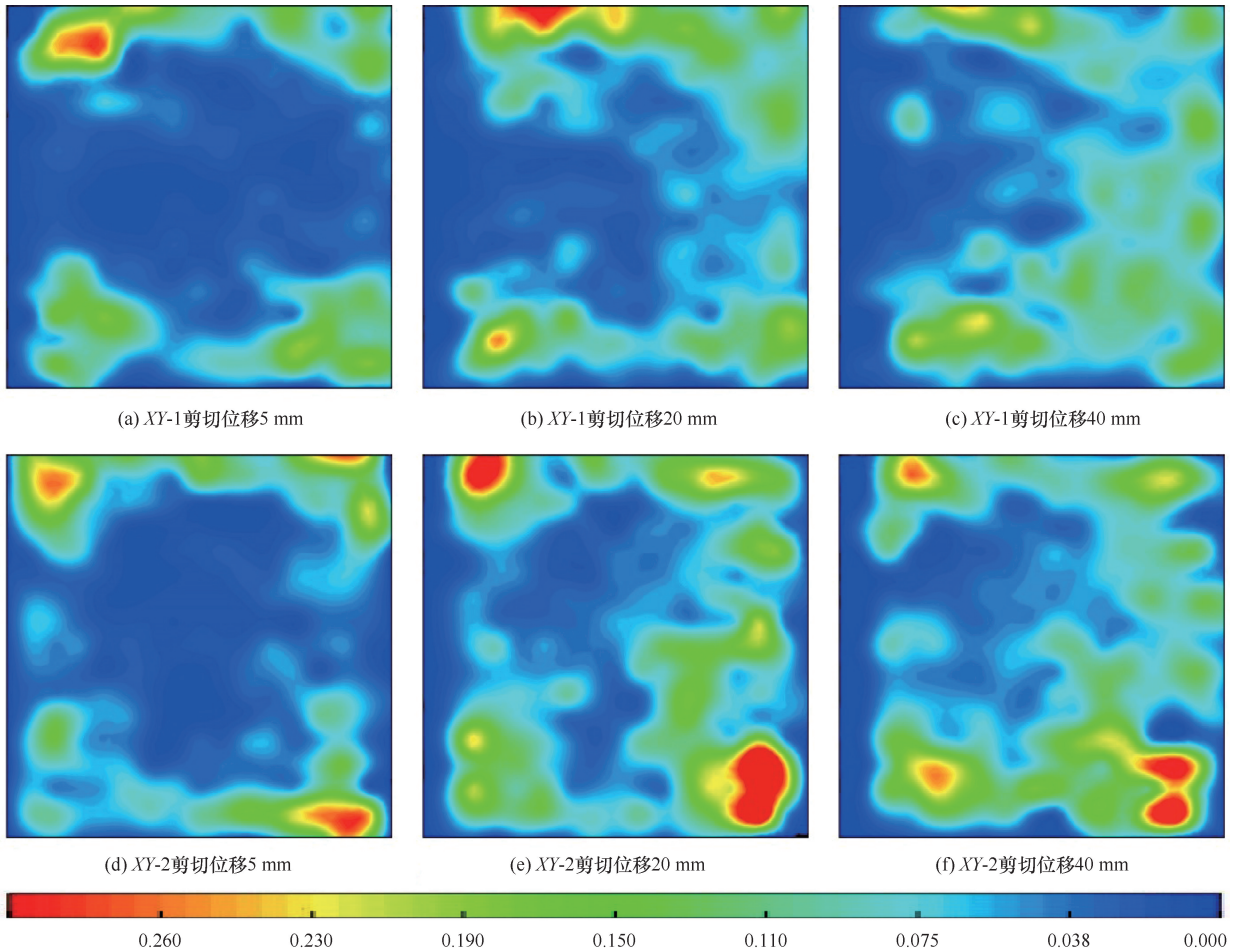


图 15 60 kPa 时剪切过程中粗粒土颗粒 XY 截面应力分布(单位: MPa)

20 mm 范围内,随剪切位移的增加,四角处的应力开始向中心部位扩散。当剪切位移达到 20 mm 后,XY-1 截面的应力向中心区域缓慢移动。当剪切位移达到 30 mm 后,XY-1 截面的应力有所减退,分析是由粗颗粒颗粒的位移和旋转增加,导致界面应力有所减退,而 XY-2 截面在剪切位移达到 20 mm 后的应力基本持平。在剪切过程中,应力的分布主要沿剪切盒的盒壁(墙体)分布,应力集中区均在剪切盒的四角,这也说明了物理模型试验存在尺寸效应。整体来看,XY 截面上的应力分布并不均匀,主要是由于粗粒土级配特点决定了土颗粒间力的传递的不均匀。XY-2(下剪切面)受到的应力要大于 XY-1(上剪切面),同时这也与图 13 力链分布图的整体趋势相吻合。

4 结 论

通过室内直剪试验与数值模拟试验的剪应力-剪切位移曲线对比,对数值模型的可靠性进行了验证。分析筋土复合体在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的单体变形受力、孔隙率变化、粗粒土的位移与旋转及土体内部的应力场,得出以下结论。

(1) 单项土工格栅剪切过程中,展现出显著的变形特性,尤其是纵肋相较于横肋更为明显。主要由于纵肋宽度较小、厚度薄且拉伸强度低,以及粗粒土颗粒在剪切过程中对纵肋的挤压作用。

(2) 对筋土复合体内部孔隙率的分析显示,XY-1 与 XY-2 截面的孔隙率不对称分布揭示了剪切过程中土体内部应力和位移的非均匀性。

(3) 土体内部的位移量随着剪切位移的增大而增加,集中分布在剪切面附近。整体分析剪切后端盒壁附近的位移变化大于剪切前端盒壁,且位移的密集区域并非与剪切面平行,而是呈左高右低的趋势,当剪切位移达到终值后,沿剪切面上下填土呈近似中心对称的拱形变化。

(4) 在土体应力场中,初始阶段强力链沿盒壁分布,形成低应力区。随着剪切位移的增加,力链密度增大,颗粒间接触加强。应力峰值过后,颗粒间接触力减弱,力链沿下剪切盒后端贯穿至上剪切盒前端,呈对角展开分布。

参考文献:

[1] LIN Z, CHENG G, DING Y. Studies on frozen ground of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4): 411-416.
 [2] 宋洋洋. 土工格栅在季节性冻土中加筋性能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
 [3] 陈榕, 王喜强, 郝冬雪, 等. 季节性冻土中土工格栅加筋特性

试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1101-1107.

[4] 魏静, 许兆义, 包黎明, 等. 青藏铁路多年冻土区土工格栅室护坡试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3168-3173.
 [5] 陈小艺. 土工格栅-粗粒土界面各向异性力学行为研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
 [6] 胡幼常, 田树林. 土工格栅加筋粗粒土的加筋影响带研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(6): 1133-1139.
 [7] 许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 冻结过程路基土体水分迁移特征分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(4): 150-158.
 [8] 王海永. 冻融循环和荷载作用下粗粒土水分迁移机制宏观试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
 [9] CHEN R, SONG Y, HAO D, et al. Influence of water content on pullout behaviour of geogrid[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 216: 12042.
 [10] 左政. 筋土界面拉拔摩擦特性试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
 [11] EZZEIN F M, BATHURST R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(3): 246-255.
 [12] 陈榕, 栾茂田, 赵维, 等. 土工格栅拉拔试验及筋材摩擦受力特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 960-964.
 [13] 钱劲松, 凌建明, 黄琴龙. 土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(12): 1421-1425.
 [14] KHEDKAR M S, MANDAL J N. Pullout behaviour of cellular reinforcements[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(4): 262-271.
 [15] 刘华北, I LING-H. 土工格栅加筋土挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 668-673.
 [16] WANG Z, JACOBS F, ZIEGLER M, et al. Visualisation and quantification of geogrid reinforcing effects under strip footing loads using discrete element method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(1): 62-70.
 [17] WANG Z, JACOBS F, ZIEGLER M. Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC2D[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42: 83-90.
 [18] MIAO C, JIA Y, ZHANG J, et al. DEM simulation of the pullout behavior of geogrid-stabilized ballast with the optimization of the coordination between aperture size and particle diameter [J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119359.
 [19] 苗晨曦, 郑俊杰, 崔明娟, 等. 三向土工格栅筋土界面及摩擦特性的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(z1): 423-430.
 [20] 尹楠, 李双洋, 裴万胜, 等. 冻结黏土三轴试验微观变形机理的离散元分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 178-185.
 [21] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006(12): 2255-2260.
 [22] 王晓帅. 不同粒径组土体直剪试验中剪切带形成过程及数值模拟研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
 [23] 黄鑫, 魏玉峰, 魏婕. 级配粗粒土直剪过程中抗剪强度与变形的影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 249-254.
 [24] 潘远阳. 颗粒形态对粗粒土剪切破碎力学特性的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
 [25] 瞿同明, 王树英, 傅金阳, 等. 基于离散元分析盾构动态掘进引起的无黏性土层主应力特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 3083-3091.

(责任编辑 王海锋)