

冯志. 法向循环荷载下筋土界面细观剪切特性分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 126–133. [FENG Min. Mesoscopic Study on the Shear Process of Reinforcement–Soil Interface Under Normal Cyclic Loading[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 126–133]

法向循环荷载下筋土界面细观剪切特性分析

冯 志

(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201204)

摘要: 为深入研究动荷载下筋土界面特性和加筋机理, 以室内试验结果为基础, 利用离散元软件建立了法向循环荷载下格栅—砾石界面直剪试验数值分析模型, 分析了法向循环荷载作用下筋土界面剪切过程的细观机理, 探究了剪切过程中筋土界面颗粒受力演化规律。结果表明: 在界面剪切试验过程中, 筋土界面由峰值前较小的变形, 逐渐软化形成局部变形集中的剪切带, 且厚度约为平均粒径的7~9倍; 力链随剪切的进行趋于稳定, 形成贯通的强力链; 循环荷载下的孔隙率变化曲线在相应上、下界静荷载试验之间, 而配位数接近或低于下界荷载的结果。

关键词: 法向循环荷载; 直剪试验; 筋土界面; 细观特征

中图法分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0126-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.14

Mesoscopic Study on the Shear Process of Reinforcement–Soil Interface Under Normal Cyclic Loading

FENG Min

(Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: In order to further study the interface characteristics and reinforcement mechanism of reinforced soil under dynamic load, based on the laboratory test results, a numerical analysis model of direct shear test of geogrid–gravel interface under normal cyclic load was established by using discrete element software. The meso-mechanism of the shear process of reinforced soil interface under normal cyclic load was analyzed, and the evolution law of particle force at reinforcement–soil interface during shear process was explored. The results show that in the process of interface shear test, the interface between reinforcement and soil changes from small deformation before the peak value to gradually soften to form a shear band with local deformation concentration, and the thickness is about 7–9 times of the average particle size. The force chain tends to be stable with the shearing process, forming a strong chain; the porosity change curve under cyclic loading is between the corresponding upper and lower bound static load tests, and the coordination number is close to or lower than the result of the lower bound load.

Keywords: Normal cyclic load; Direct shear test; Reinforcement–soil interface; Mesoscopic characteristics

收稿日期: 2024-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 冯志(1985–), 女, 高级工程师, 研究方向为道路与交通工程设计与研究。

E-mail: 272418264@qq.com

0 引言

随着加筋土理论的提出和对加筋土结构的探究逐渐深入,人类对不同筋材的加筋机理的认识亦在不断增强。加筋土结构受荷载作用下的静、动力响应^[1-2]对工程应用具有重要意义,是国内外学者研究的焦点。筋土界面特性是加筋土结构的一个关键性技术指标,对加筋土结构稳定起着重要作用。

直剪试验是探究筋土界面剪切特性的有效方式。Suddeepong等^[3]指出随着法向荷载的增加,最大剪切应力和初始剪切刚度也增加。Vieira等^[4]比较了不同幅值下应力控制和位移控制的砂—土工织物界面循环剪切试验,在位移控制的试验中,剪切刚度和阻尼比略高。徐超等^[5]首次分析了法向循环荷载频率为0.01~0.5 Hz、振幅为12.5~100 kPa和不同波形对石英砂与土工格栅界面剪切行为的影响,并指出由于动荷载的复杂性,还需要更多的研究。Liu等^[6]研究颗粒规则度对筋土界面的影响,发现循环摩擦角随着颗粒规律性的增加而减小,并确定了二者之间的联系。孟亚等^[7]通过直剪试验,研究了温度和冻融循环次数对筋土界面剪切特性的影响。应梦杰等^[8]探究了不同加载条件下筋土界面循环剪切的破碎特征,并得到了相对破碎率与输入塑性功之间的关系。Zeng等^[9]研究格栅横肋厚度对筋土界面抗剪性能的影响,发现加厚横肋可有效提高界面在水平循环荷载作用下的抗剪强度。刘飞禹等^[10]分析了粒孔比对筋土界面循环剪切特性的影响,发现随着粒孔比的增长,界面峰值应力先增加后减小。

为探究界面细观力学演化特征,离散元是一种常用、有效的手段。Feng等^[11]采用离散元方法,分析了砂土—土工织物界面剪切的微观机理,并发现剪切带厚度约为平均粒径的2.4~3.0倍。Zhu等^[12]通过离散元软件,分析试样的变形特征、破坏模式和能量耗散,从细观机理加深了对宏观力学行为的认识。王家全等^[13]利用离散元软件,对筋土界面直剪试验进行了模拟,分析了界面剪切的宏细观参数变化,并总结了全过程的界面剪切机理。杨忠平等^[14]探究了土石混合物与基岩的细观剪切机理,发现粗糙度为表观黏聚力主要控制因素,且对剪切带宽度有影响作用。Liu等^[15]分析了循环剪切过程中试样孔隙率和能量的变化,发

现界面附近孔隙度高于其他区域,颗粒的动能与剪切位移密切相关。

王环玲等^[16]结合室内试验标定颗粒流数值模拟的细观参数,建立了土石混合物概念模型,研究了块石形状的凹凸性对土石混合物强度产生的影响。

现有的关于筋土界面剪切特性的研究主要以室内试验研究为主,而对于界面细观特性,尤其是法向动荷载条件下的颗粒流演化还需要更多研究。本文应用离散元软件,根据室内试验条件,分别模拟了法向静荷载和循环荷载下的筋土界面直剪试验,研究了动荷载下界面剪切过程的细观力学特征。

1 颗粒流三维直剪试验模拟

1.1 细观参数标定

基于土工格栅—砾石室内大型直剪试验及其结果,利用离散元软件,模拟法向循环荷载下的筋土界面直剪试验过程。试样尺寸与直剪仪剪切盒相同,上、下盒分别为800 mm×200 mm×50 mm和600 mm×200 mm×50 mm。本次建立颗粒流模型时,采用试验实际用土的级配进行土颗粒的模拟,颗粒参数(法向刚度、切向刚度和摩擦系数等)则采用“试错标定法”^[17],通过一系列数值试验并将模拟结果与室内试验结果进行对比,经过不断调整、试算、拟合后,最终得到比较吻合宏观力学结果的参数取值。粗粒土颗粒采用线性接触模型,颗粒采用球颗粒,格栅单元采用平行黏结接触模型,如图1所示。将标定的细观参数分别赋予粗粒土颗粒和格栅颗粒,具体参数取值如表1所示。

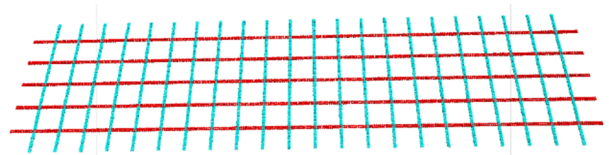


图1 土工格栅示意图

Fig.1 Schematic diagram of geogrid

1.2 法向循环荷载施加

利用离散元软件进行模拟时,墙体只能施加位移和速度,无法施加荷载,因此,法向循环荷

载不能通过对墙施加的方式实现。为了实现法向荷载的施加，通过生成颗粒组成的clump刚性簇面板，对其中颗粒施加循环荷载，以达到对试样施

加法向循环荷载的目的。借助离散元软件中的FISH编程功能，使试样受到的动荷载与室内试验相同。

表1 数值模拟参数
Table 1 Parameters of numerical simulation

对象	参数	标定值	单位
土颗粒	初始孔隙率	0.34	/
	密度	2340	kg·m ⁻³
	法向刚度	4×10 ⁶	N·m ⁻¹
	刚度比	2	/
	摩擦系数	0.7	/
格栅	密度	640	kg·m ⁻³
	黏结半径	0.40	mm
	线性模型杨氏模量	6.2×10 ⁹	N·m ⁻²
	平行黏结模型杨氏模量	6.3×10 ¹⁰	N·m ⁻²
	法向黏结强度	7.5×10 ⁹	N·m ⁻²
	切向黏结强度	7.5×10 ⁹	N·m ⁻²
	摩擦系数	0.5	/

1.3 直剪试验模拟

模拟直剪试验的过程主要有以下几个步骤：

(1)在剪切盒尺寸的空间内，按级配生成随机的球形颗粒，并标定合适的参数，在剪切面上和两侧分别生成测量球，如图2所示。

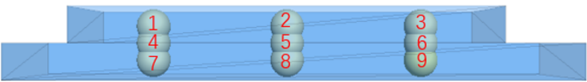


图2 测量球位置
Fig.2 Position of measuring ball

- (2)在上、下剪切盒界面处生成土工格栅模型，并标定合适的参数。
- (3)在自重状态下进行初始状态的平衡运算。
- (4)生成clump面板，待初始荷载稳定后，对其施加法向循环荷载，模型如图3所示。

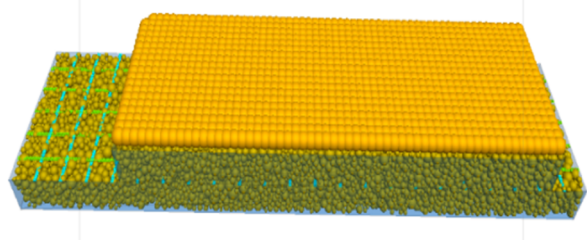


图3 直剪试验数值模型
Fig.3 Numerical model of direct shear tests

(6)通过控制下盒向右作水平运动，实现剪切过程。

1.4 数值模型验证

为验证三维离散元数值模型的准确性，将室内循环荷载(40~80 kPa)下的筋土界面直剪试验结果与数值模拟结果进行对比，结果如图4所示。可见，剪切过程中剪切应力与体变特征均与试验高度重合，证明了数值模型的正确性。

2 细观力学特征分析

2.1 剪切带

为研究法向循环荷载作用下筋土界面的变形特征，需要关注界面局部化、非连续的剪切带演化。因此，本文在剪切过程开始前，设置12列竖向宽度相同的黑色颗粒带，剪切过程各列的颗粒演化如图5所示。

在剪切位移为0.1 mm时，即剪切初期时，竖向条带基本没有变形，处于纯剪切主导的状态。剪切应力到达峰值附近时(剪切位移为5 mm)，竖向条带的变形也较小，只在侧边的竖列发生轻微的变化。在峰后软化阶段(剪切位移30 mm)，局部

变形现象愈发明显,从侧边至中间的竖向条带均演化出应变局部化现象,体现出此时筋土界面非线性变化的特征。剪切结束后(剪切位移 60 mm),在剪切面上、下两侧形成了局部变形集中的剪切带,竖向颗粒带的弯曲明显,即图中虚线的区间

范围。在法向循环荷载作用下的筋土界面直剪试验过程中,峰值前以纯剪切为主,变形较小,而峰后残余阶段以非线性应变为主导,局部变形较明显。

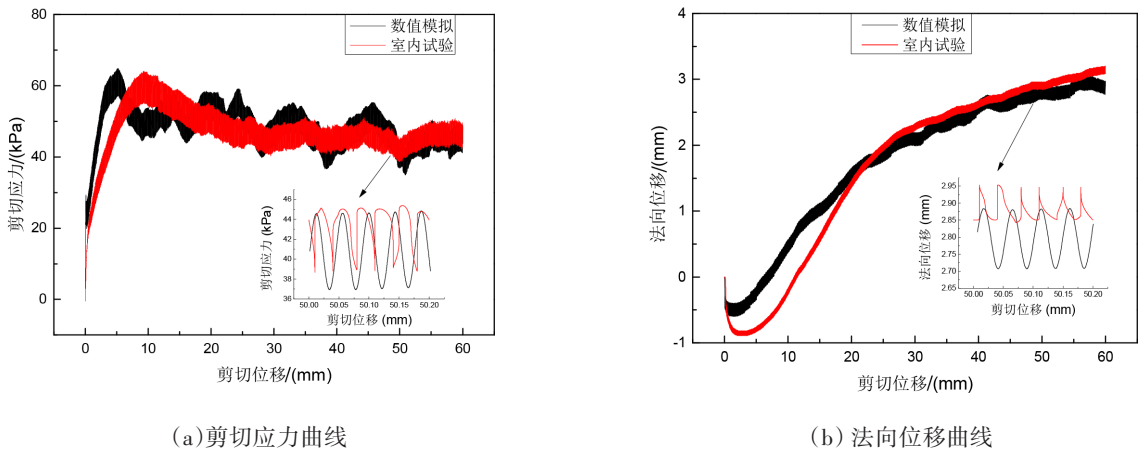


图4 数值模拟与室内试验

Fig.4 Comparison of numerical simulation and indoor experimental results

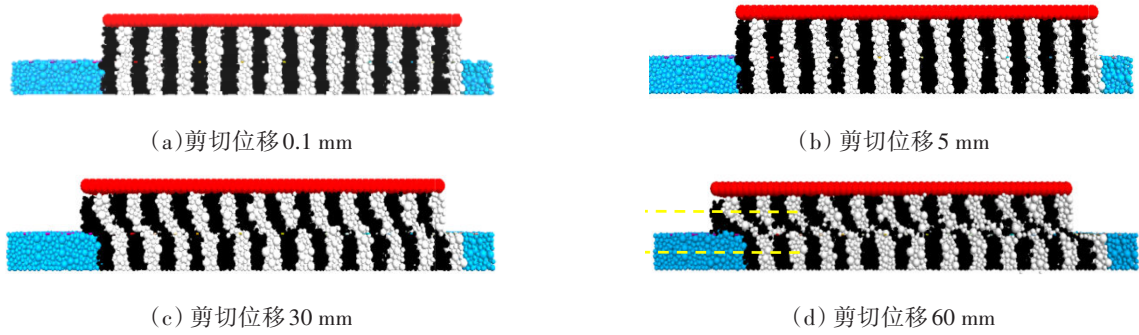


图5 剪切过程剪切带演化

Fig.5 Shear band evolution in shear proces

2.2 力链

在颗粒物质力学中,颗粒体系内部的接触互相连接逐渐形成能够传递荷载的线性链状结构,即为力链。这些力链错综复杂地在体系内部形成力链网络,力链网络是土骨架的粒间接触力的宏观表现形式,可用于反映颗粒体系受外荷载作用时受力响应机制的变化。本文通过分析剪切过程中颗粒力链网络的演化,研究了土骨架的受力情况。

图6为法向循环荷载下界面剪切过程力链演化图。在完成初始应力加载、剪切初期时(剪切位移

0.1 mm),由于竖向荷载和下盒剪切力的作用,下盒的颗粒力链部分强于上盒。经过一段时间剪切后,力链的强弱状态发生了改变,力链网络发生重构。当达到峰值阶段(剪切位移 5 mm),上盒右侧力链相较于其他位置更强,而下盒则相反。当试验进入峰后软化阶段,上述力链状态继续强化,试样强力链进一步集中,主要在上盒右侧方、下盒左下和中间位置。从试样立体状态看(图7,剪切位移 60 mm),在界面形成了贯通上、下剪切盒倾斜的强力链,这表明剪切位移大小和剪切方向会影响强力链的产生和倾斜角度。

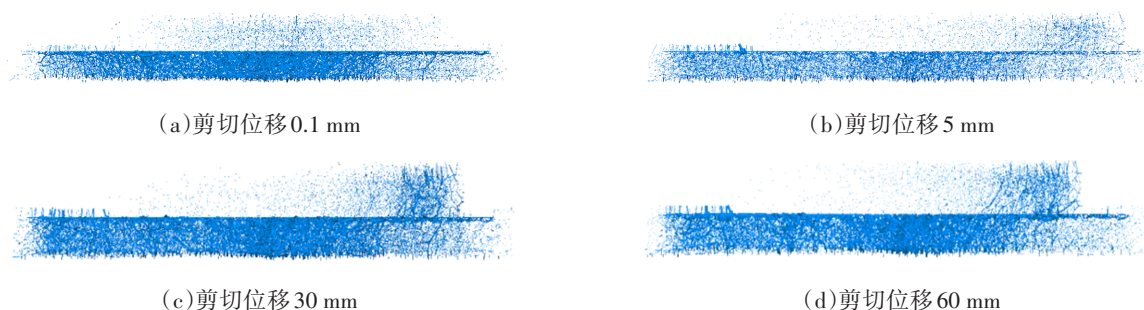


图6 剪切过程力链演化

Fig.6 Force chain evolution in shear process

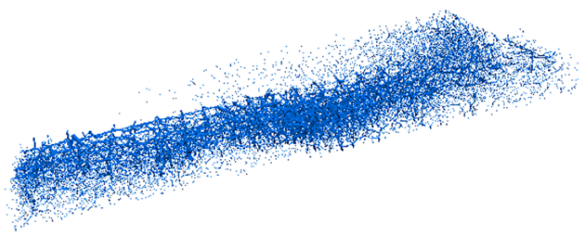


图7 剪切完成时立体角度的力链状态

Fig.7 Force chain state of solid angle with cutting completed

2.3 位移场

图8为界面剪切过程位移场变化图。在初始剪

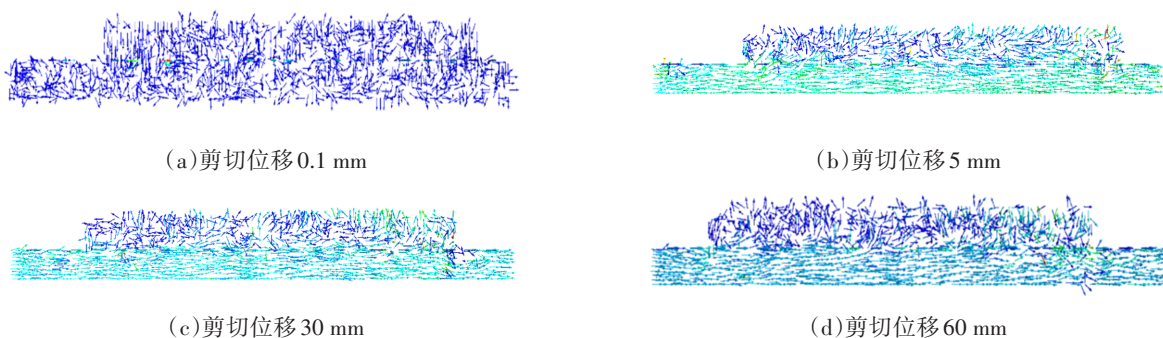


图8 剪切过程位移场演化

Fig.8 Evolution of displacement field in shear process

2.4 局部孔隙率

由于剪切作用带动筋土界面颗粒产生了位移等原因,孔隙率一直处于变化中,量测区域的局部孔隙率是试样紧实程度的细观表征,也是筋土界面剪胀性的直接证明。图9为不同区域的孔隙率改变量随剪切位移变化的曲线。

在初始剪切阶段,试样孔隙率减小为主,代表试样初始短暂的剪缩状态;第二阶段主要以孔隙率增加为主,表明此时剪胀位移更明显;最后

切阶段(剪切位移 0.1 mm),内部位移场处于一种无序的状态,且存在大量向下位移的颗粒,对应着试样初始剪缩状态。随着剪切的继续,下盒向下运动的颗粒逐渐减少,而转向沿剪切速度方向向右运动。上盒的颗粒由起始阶段各个方向的运动状态均存在,渐渐旋转角度变为以向上和向右运动为主(剪切位移 5 mm),这主要是下盒颗粒挤压和摩擦导致的,证明了持续剪胀现象的发生,而到了残余应力状态,又出现了部分向下运动的颗粒,对应着剪胀位移放缓的现象。

剪胀变化趋于稳定的状态,相应的部分位置出现孔隙率减小的情况。同时,从不同的测量圆位置看,剪切面(位置4、5、6)的孔隙率增长现象最显著,其次是上剪切盒(位置1、2、3),而下盒(位置7、8、9)的试样孔隙变化较小,甚至局部出现较长的减缩过程。法向循环荷载与水平剪切作用下,格栅界面处受影响程度最大,剪胀性最显著,孔隙率增大从剪切带部分逐渐向上、下两侧发展,试样剪胀性主要受剪切面局部区域的影响。

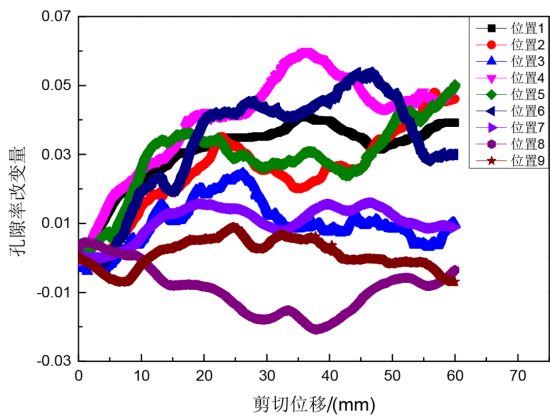


图9 剪切过程孔隙率—位移曲线

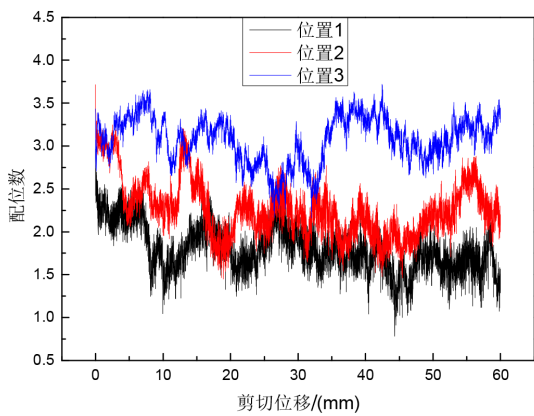
Fig.9 Porosity-displacement curve in shear process

2.5 配位数

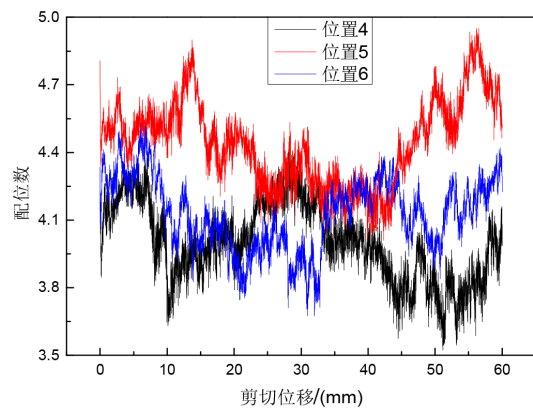
配位数指颗粒的平均接触数目，是颗粒流模型分析中常用的参数。配位数越大，颗粒间的受力传递越充分，其大小一定程度上反映了试样所处的状态(如应力水平)。土力学中剪胀现象的本质是颗粒体系在外荷载作用下发生重排列，而颗粒的滑移、

转动必然会导致试样内配位数发生变化。

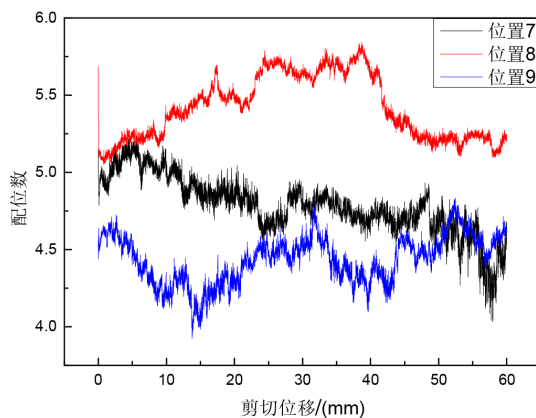
图10为不同位置测量圆内监测的平均接触数。剪切过程中，配位数呈现动态的变化，且不同区域内的配位数变化差异显著。以位置1为例，配位数随剪切位移增加先波动着降低，而后在配位数1.75附近稳定变化，但在其他位置配位数的变化规律则不完全相同。位置3是上剪切盒中配位数最高的，而这也是前述力链场中力链较强的部分。在剪切面位置(图10(b))，左、右两侧(位置4、6)的配位数波动程度更小，约在4左右变化，而中间位置(位置5)的配位数随位移的变化上、下起伏较大，且整体的值也更大。在下剪切盒(图10(c))，左侧配位数(位置7)主要表现出减小的趋势，中间(位置8)的配位数随位移的增加呈先增大后减小的特征，而位置9的配位数变化较小；左侧配位数最高，而右侧配位数最小，这也能很好对应力链场的特征。总的来说，上剪切盒配位数曲线的振荡程度较大，而下盒配位数振荡较小；上盒试样配位数整体上小于下盒。



(a)上剪切盒



(b)剪切面



(c)下剪切盒

图10 剪切过程配位数—位移曲线

Fig.10 Coordination number-displacement curve in shear process

2.6 静、动荷载的比较

图 11 为位置 2 和 8 的法向静、动荷载下的孔隙率随位移变化的曲线。动荷载作用下的孔隙率变化处于相应上、下限的静荷载作用下孔隙率之间，且在同样的位置，静、动力下的孔隙率随位移增减变化的趋势接近，可见动荷载下的试样密实度状态处于上、下界静荷载间。

图 12 为位置 2 和位置 8 的法向静、动荷载下的配位数变化的比较曲线。与孔隙率的情况不同，动

荷载下的配位数曲线并没有完全在相应的上、下界静荷载下的配位数曲线之间，而是更偏向下界荷载的状态，甚至低于下界荷载的配位数。在同一位置，曲线的增减变化规律也不完全一致，尤其是上盒颗粒在静力和动力下的差异性更显著，而下盒配位数变化更稳定，变化趋势接近。这是由于法向荷载的频繁变化，使得颗粒运动相较于静荷载更剧烈，进而导致颗粒接触更加不稳定和复杂，导致动荷载下的界面剪切时颗粒接触数偏小。

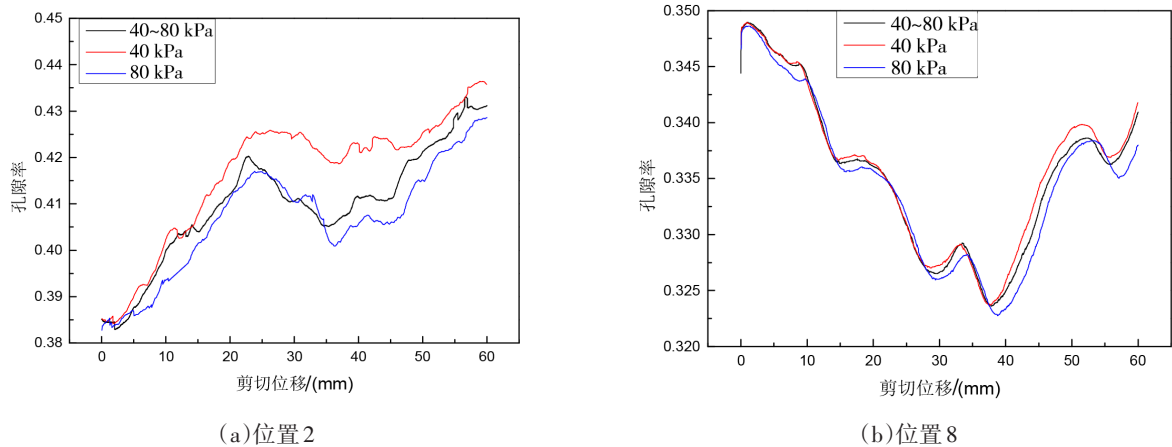


图 11 静、动力荷载下孔隙率比较

Fig.11 Comparison of porosity under static and dynamic loads

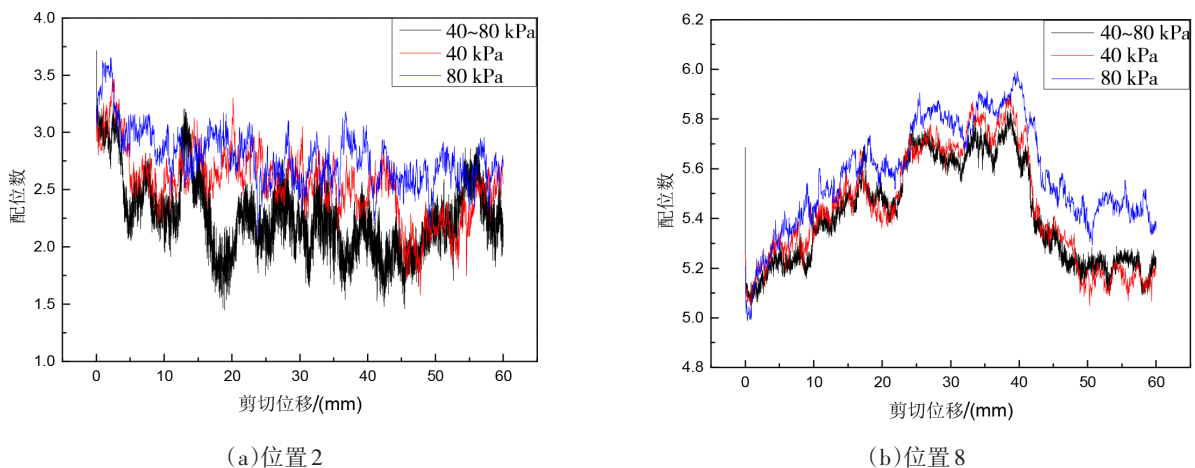


图 12 静、动力荷载下配位数比较

Fig.12 Comparison of coordination numbers under static and dynamic loads

3 结论

本文基于离散元软件,建立与试验条件一致的直剪数值模型,分析了法向循环荷载作用下土工格栅-颗粒界面剪切过程细观特性,包括剪切带、力链、位移场、孔隙率、配位数等,主要结论如下:

(1)峰值前局部变形较小,残余阶段界面非线性变形增大并形成局部变形集中的剪切带区域,剪切带厚度约为平均粒径的7~9倍。力链随剪切的进行趋于稳定,并在试样左下与右上位置间形成倾斜的贯通强力链。位移场在上盒和下盒的表现不同,下盒颗粒以向右运动为主,而上盒颗粒运动方向的改变更频繁。

(2)孔隙率和配位数的变化与剪切位移、测量圆位置等有关。在剪切初期,孔隙率以减小为主,而后以较明显的增加为主,且逐渐出现了孔隙率减小的情况,剪切面的孔隙增长现象最明显。配位数呈振荡变化的特征,且变化较复杂。

(3)动荷载作用下的孔隙率变化处于相应上、下界的静荷载作用下剪切试验的曲线之间,且变化趋势接近。动荷载下界面剪切的配位数更接近或小于下界静荷载作用的情况。

参考文献

- [1] 肖成志,刘贺,王荣霞,等.土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(04):767-772.
- [2] Li L, Yang J, Xiao H, et al. Behavior of tire-geogrid-reinforced retaining wall system under dynamic vehicle load [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020017.
- [3] Suddeepong A, Sari N, Horpibulsuk S, et al. Interface shear behaviours between recycled concrete aggregate and geogrids for pavement applications[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(2): 228-235.
- [4] Afzali-Nejad A, Lashkari A, Shourijeh P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(1): 54-66.
- [5] 徐超,孟凡祥.剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J].岩土力学,2010,31(10):3101-3106.
- [6] Liu F Y, Ying M J, Yuan G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 991-1003.
- [7] 孟亚,徐超,贾斌,等.含水率和冻融循环对筋土界面剪切特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(02):586-594.
- [8] 应梦杰,王军,刘飞禹.循环剪切作用下砾石-格栅界面颗粒破碎特性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(07):1484-1490.
- [9] Zeng W X, Ying M J, Liu F Y. Investigation on the cyclic shear response of stereoscopic geogrid-reinforced coarse-grained soil interface[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 38: 100905.
- [10] 刘飞禹,胡惠丽,王军,等.粒孔比对筋-土界面循环剪切特性的影响[J].中国公路学报,2019,32(12):115-122+131.
- [11] Feng S J, Chen J N, Chen H X, et al. Analysis of sand-woven geotextile interface shear behavior using discrete element method (DEM)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(3): 433-447.
- [12] Zhu K Y, Sun G H, Shi L. Shear-induced anisotropy analysis of rock masses containing non-coplanar intermittent joints[J]. Archive of Applied Mechanics, 2024, 94(4): 841-864.
- [13] 王家全,王宇帆,黄世斌,等.循环荷载作用下土工格栅剪切特性的颗粒流细观分析[J].水利学报,2014,45(09): 1082-1090.
- [14] 杨忠平,刘浩宇,李进,等.土石混合料-基岩接触面剪切力学特性及剪切带变形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(02):292-306.
- [15] Liu F Y, Fu J, Lu Y, et al. Macro and micro analyses of static and dynamic shear characteristics of geogrid and rubber-sand mixture interface[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 43: 101119.
- [16] 王环玲,沙聪,徐卫亚,等.基于颗粒离散元的土石混合体强度影响研究[J].土木工程学报,2020,53(09):106-114.
- [17] Zhang Z, Wang T. Numerical analysis of loess and weak intercalated layer failure behavior under direct shearing and cyclic loading[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(11): 2796-2815.