

颗粒形态对筋土界面剪切特性影响的试验和 DEM 研究¹

李婧婷^{1,2)}, 刘飞禹²⁾✉, 金亦飞²⁾

1) 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002 2) 上海大学, 上海 200444

✉ 通信作者, E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn

摘要 筋土界面的相互作用是决定加筋土结构稳定性的关键因素, 而土的颗粒形态会对筋土界面的相互作用产生显著影响。采用高速离心研磨机制备了不同粒径范围(4-6、8-10、12-14mm)和磨圆度(0.35、0.55、0.75)的砾石, 使用大型直剪仪对砾石-格栅界面进行了单调直剪试验, 研究了颗粒形态对砾石-格栅界面剪切特性的影响; 采用离散元软件建立了砾石-格栅界面直剪试验计算模型, 分析了单调剪切过程中筋土界面颗粒组构各向异性的演化规律。结果表明: 单调直剪试验过程中, 筋土界面均呈现出典型的剪切软化特征, 峰值剪应力与残余剪应力随填料磨圆度的增大而减小; 填料磨圆度相同时, 颗粒粒径较大的筋土界面内摩擦角和似黏聚力明显高于颗粒粒径较小的筋土界面的相应值; 粒径越大、磨圆度越小的颗粒, 其法向接触力和切向接触力的主方向偏转角度越大。

关键词 粒径; 磨圆度; 剪切特性; DEM; 各向异性

分类号 TU 443

Test and DEM Study on the Influence of Particle Morphology on the Shear Characteristics of the Reinforcement-Soil Interface

LI Jing-ting^{1,2)}, LIU Fei-yu²⁾✉, JIN Yi-fei²⁾

1) Shandong Expressway Engineering Inspection Co., Ltd., Beijing, 250002, China

2) School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

✉ Corresponding author, E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn

ABSTRACT The interaction at the geosynthetic-reinforced soil interface is a key factor in determining the stability of reinforced soil structures, and the particle morphology of the soil has a significant impact on this interaction. To study the influence of gravel morphology on the shear characteristics of the gravel-geogrid interface, gravel with different particle size ranges (4-6, 8-10, 12-14 mm) and roundness values (0.35, 0.55, 0.75) was prepared using a high-speed centrifugal mill. A series of monotonic direct shear tests were performed on the gravel-geogrid interface using a large indoor direct shear apparatus to investigate the effect of particle morphology on the shear characteristics of the interface. Discrete element software was used to establish a computational model for the direct shear test of the gravel-geogrid interface. The mesoscopic parameters of the geogrid were calibrated through pull-out tests, and the correctness of the model's contact parameters was verified by comparing the shear stress and volumetric behavior with experimental results. The evolution of anisotropy in the particle arrangement at the geosynthetic-reinforced soil interface during monotonic shearing was analyzed, as well as the micro-mechanisms behind the macroscopic shear characteristics of the gravel-geogrid interface. The results show that during

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378355, 52078285)

地址: 北京市海淀区学院路 30 号

E-mail: xuebaozr@ustb.edu.cn

邮政编码: 100083

http://cje.ustb.edu.cn

电话: 010-62333436

the monotonic direct shear test, the reinforced soil interface exhibited typical shear softening characteristics, meaning that as the shear displacement increased, the shear stress first increased, then decreased, and eventually stabilized in the residual phase. Both the peak shear stress and residual shear stress decreased with increasing roundness of the backfill. When the median particle size was 9 mm, an increase in roundness from 0.35077 to 0.75068 resulted in a decrease in peak shear stress by 15.26%, 15.46%, and 15.79% under $\sigma_0 = 30, 60, \text{ and } 90 \text{ kPa}$, respectively, and a decrease in residual shear stress by 23.05%, 29.10%, and 20.94%, respectively. With the same roundness, interfaces with larger particle sizes exhibited higher internal friction angles and apparent cohesion. When the roundness was 0.35, increasing the median particle size from 5 mm to 13 mm resulted in increases of 10.77% and 144.19% in peak friction angle and peak apparent cohesion, respectively, and increases of 6.88% and 180.00% in residual friction angle and residual apparent cohesion, respectively. In terms of volumetric characteristics of the reinforced soil interface, interfaces with lower roundness showed more pronounced contraction and dilation behavior than those with higher roundness. Under the same vertical load, interfaces with larger particle sizes exhibited more significant contraction and dilation behavior than those with smaller sizes. From the perspective of microscopic anisotropy, under a constant vertical load, the shear contact force exhibited a "peanut shape" distribution, and the tangential contact force exhibited a "petal shape" distribution. The main axes of particle contact normals, normal contact force, and tangential contact force shifted with shear displacement. Particles with larger sizes and lower roundness had greater deflection angles of the main directions of contact normals, normal contact force, and tangential contact force. The corresponding microscopic anisotropy was stronger than that of particles with smaller sizes and higher roundness, which is closely related to the dilation phenomenon observed in macroscopic tests.

KEY WORDS: particle size; roundness; shear characteristics ; DEM; anisotropy

1. 引言

土工合成材料加筋土结构凭借其良好的工程效益、经济效益及广阔的应用前景,广泛应用于挡墙、桥台和路基等实际工程建设中^[1-3]。筋土界面作用特性直接决定了加筋土结构的稳定性,其作用机理复杂,且界面间相互作用受多种因素影响^[4],因此研究筋土界面相互作用机制对加筋土的工程实践具有重要的意义。

加筋土填料的颗粒特性会影响筋土界面的剪切作用,不同粒径、不同形状的颗粒与土工合成材料相互作用时的界面性能有较大的差异。Esmaceli 等^[5]使用大型直剪仪,研究了法向应力、道碴平均粒径、格栅类型等对土工格栅加筋道碴剪切性能的影响。刘飞禹等^[6]通过直剪试验分析了不同颗粒级配、密实度、筋材类型等因素对筋土界面剪切特性的影响。Xu 等^[7]通过剪切试验研究了石料破碎程度对碎石-格栅界面抗剪强度的影响。Prashanth 等^[8]通过直剪试验对三种不同粒径的砂和四种不同粗糙度的土工织物进行了单调直剪试验,结果表明当孔粒比为 1 时,界面抗剪强度达到最大。Han 等^[9]探究了粒径对碎石-格栅界面力学特性的影响,并指出格栅与碎石的粒孔比影响其咬合机制和破坏模式,调整孔粒比有助于增强筋土界面的力学性能。Namjoo 等^[10]通过直剪试验,研究了填料粒径、筋材类型和筋材表面特性对筋土界面剪切特性的影响。王军等^[11]选用 4 种粒径范围的砾石,通过大型直剪试验,研究了孔粒比对筋土界面剪切特性的影响。Chao 等^[12]通过自行开发的大型温控界面动态剪切设备,对聚合物层与珊瑚砂之间的界面进行了一系列的循环剪切试验,研究了颗粒粒径和温度对筋土界面剪切特性的影响。

除了颗粒粒径,颗粒形状同样会对筋土界面的剪切特性产生影响^[13]。Liu 等^[14]通过直剪试验装置研究了骨料尺寸和形状对加筋和未加筋骨料界面单调剪切性能的影响。Aliyeh 等^[15]通过直剪试验研究了颗粒形状对加筋土试样筋土界面剪应力和内摩擦角的影响。Pillai 等^[16]通过直剪试验探究了颗粒形状对 GCL 衬垫-砂界面抗剪强度的影响。ANUBHAV 等^[17]采用直剪试验研究了颗粒形状对砂-土工布界面剪切特性的影响,结果显示颗粒形状对筋土界面剪切特性有明显影响,尤其是对峰峰值后的剪切性能影响更明显。Rizwan 等^[18]使用 X 射线断层扫描和光学轮廓测量技术,量化了砂的 3D 形状参数,通过界面剪切试验研究了砂土颗粒形态对砂-土

工合成材料界面剪切特性的影响。

直剪试验虽然可以从宏观角度分析颗粒特性对筋土界面剪切特性的影响,但无法从细观上揭示筋土界面相互作用机理。Cha-ng 等^[19]提出了一种基于扰动状态概念的本构模型,可用于描述土工合成材料界面在静、动荷载情况下的剪切软化特性。王家全等^[20]采用直剪试验和数值模拟的方法,分析了筋土界面宏观剪切特性与细观组构演化特征的关系。Ari 等^[21]对自然界中三种不同形状的砾石和三种不同粗糙度的土工膜进行了二值化处理并在离散元软件中建模,从细观角度分析了砂土-土工膜界面的剪切行为。Liu 等^[22]提出了基于相对粒径的颗粒互锁概率来描述颗粒与土工格栅之间的相互作用机制,并通过直剪试验来校准数学模型。Reddy 等^[23]利用双曲线模型对筋土界面剪切应力-剪切位移的非线性特性进行模拟,采用有限元方法分析了垃圾填埋场复合衬垫系统界面的变形特性。刘飞禹等^[24]根据试验结果推导了筋土界面剪切刚度变化的经验公式,并使用 FLAC^{3D} 软件建立了计算模型,并与振动台试验结果进行了对比验证。Moraci 等^[25]为了研究锚固区土与土工合成材料的相互作用特性,提出了一个预测筋土界面峰值强度和残余强度的理论模型,并与试验结果进行了对比验证。

综上所述,目前关于颗粒形态对筋土界面剪切特性影响方面的研究还相对较少。因此,本文采用大型直剪仪,系统地研究了在不同竖向荷载作用下,颗粒粒径和形状对筋土界面剪切特性的影响,并采用 DEM 方法分析了剪切过程中砾石-格栅界面相互作用的细观机理。

2. 试验仪器、材料及方案

2.1 试验仪器

采用大型直剪仪进行筋土界面的剪切试验,上剪切盒尺寸为 305 mm(长)×305 mm(宽)×150 mm(高),下剪切盒尺寸为 405 mm(长)×305 mm(宽)×150 mm(高),如图 1。

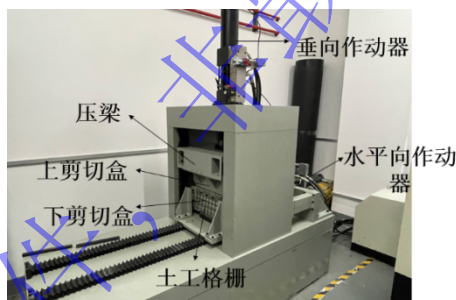


图 1 大型直剪仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of large direct shear instrument

2.2 试验材料

采用高速离心研磨机对砾石进行定时、定圈数打磨,以获取不同磨圆度的砾石试样。将砾石颗粒按照 4-6 mm、8-10 mm、12-14 mm 的粒径分组进行筛分,然后将三组不同粒径的砾石分别研磨 0、5000、10000 转,得到三种不同磨圆程度的砾石试样,试样一共分为 9 组如表 1 所示。

试验所用格栅为聚丙烯双向土工格栅,其孔径为 30 mm×30 mm,横、纵向的极限延伸率分别为 13%和 15%,极限抗拉强度为 20 kN/m。

采用磨圆度(R_w)来表征砾石的磨圆程度,其定义为颗粒各隅角的平均曲率半径和颗粒最大内切圆半径的比值^[25],如式(1)所示。

$$R_w = \frac{\sum r_i / n}{R}$$

(1)

式中, R 是颗粒轮廓最大内切圆半径, r_i 是颗粒轮廓曲率半径小于或等于 R 的隅角处内切圆半径, n 为轮廓上的隅角个数。

从每组砾石试样中随机各取 100 个砾石样品, 将样品置于桌面, 采用高像素数码相机拍摄样品的垂直投影面图像。采用 Matlab 编写了基于图像处理的磨圆度计算程序, 将拍摄的图像以 JPG 格式的文件导入 Matlab, 通过 `imread` 函数读取、`im2bw` 函数二值化处理, 得到样品的二值化图像, 如图 2。随后选中待计算的颗粒轮廓, 对二值化图像孔洞填充并平滑颗粒的边缘, 减少像素或光线带来的细小毛刺的影响。对轮廓调用 `findpeaks` 函数, 找到隅点位置, 计算轮廓隅角曲率, 并且舍弃圆心在颗粒轮廓之外的隅点。在被测轮廓中识别三点, 不断测试此三点是否能构成锐角三角形, 通过判断该三角形形成圆的圆心离被测轮廓各点间距最小值和圆的半径大小, 得到最小内切圆的圆心和半径。九种试样的平均磨圆度值见表 1。

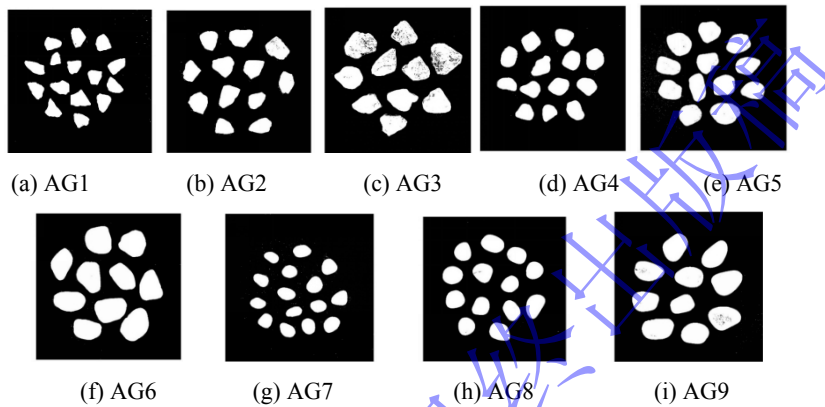


图 2 试验砾石二值化示意图

Fig.2 Binary representation diagram of test gravel

表 1 试样平均磨圆度

Table 1 Statistical result of coiling temperature control accuracy

Sample	Particle size/mm	Grinding number/ rpm	Roundness(R_w)
AG1	4-6	0	0.34835
AG2	8-10	5000	0.35077
AG3	12-14	10000	0.34849
AG4	4-6	0	0.54909
AG5	8-10	5000	0.54987
AG6	12-14	10000	0.55125
AG7	4-6	0	0.74932
AG8	8-10	5000	0.75068
AG9	12-14	10000	0.74896

3 试验结果与分析

3.1 颗粒形态对筋土界面剪切强度特性分析

3.1.1 磨圆度对剪切应力-剪切位移关系的影响

由图 3 可知, 在三种竖向荷载作用下, 三种界面剪切应力均随剪切位移的增加呈现出先增大后减小的变化趋势, 随后界面剪切应力进入残余阶段, 并逐步趋于稳定, 呈现出剪切软化特性。在同一竖向荷载作用下, 磨圆度越小的试样剪切应力越大, 且低磨圆度试样的应力-位移关系曲线出现更为明显的上下波动现象。这是因为磨圆度较低的砾石与格栅横肋、砾石与砾石间的咬合较强, 在相同竖向荷载的作用下比磨圆度较高的砾石发挥出更大的阻抗作用, 并且其咬合不稳定性较高, 所以易发生突变。

当竖向荷载由 30 kPa 增大到 90 kPa 时, AG2、AG5、AG8 与格栅界面峰值和残余剪应力均随之增大, 竖向荷载为 90 kPa 时, AG2、AG5、AG8 与格栅界面峰值剪应力相比于竖向荷载为 30kPa 时的峰值剪应力分别增加了 173.8%、170.3%、168.4%, 残余剪应力相比于竖向荷载为 30kPa 时分

别增加了 202.5%、196.3%、187.5%，即磨圆度越高剪切应力随竖向荷载的变化越不明显。

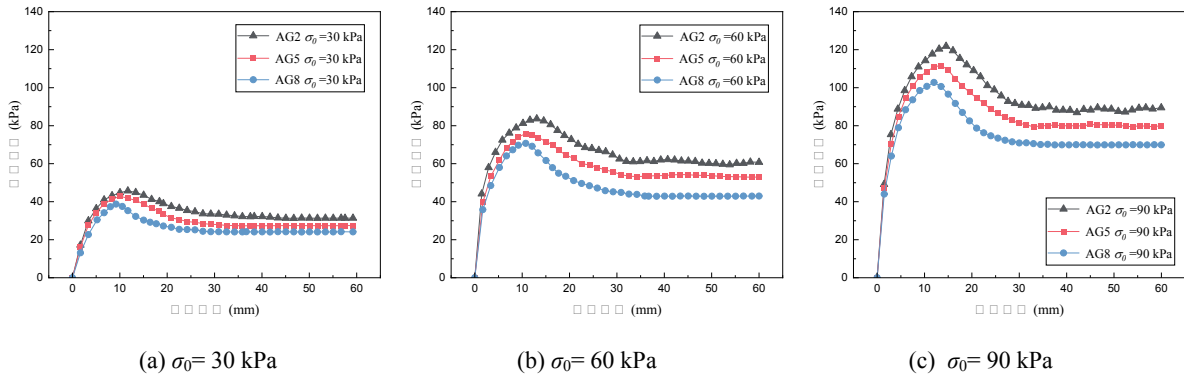


图3 不同磨圆度下界面剪切应力-剪切位移关系

Fig.3 Shear stress-shear displacement relationship at different roundness levels of the interface

3.1.2 粒径对剪切应力-剪切位移关系的影响

定义筋土界面剪切应力和剪切位移关系曲线中最大剪切应力为界面峰值剪应力(τ_p)，定义筋土界面剪切应力和剪切位移关系曲线从开始进入残余阶段直至剪切结束时剪切应力的平均值为界面残余剪应力(τ_r)。由图 4 可知，达到界面峰值剪应力(τ_p)和界面残余剪应力(τ_r)时的剪切位移随颗粒粒径的增大而增大，同时也随竖向荷载的增大而增大。在同一竖向荷载作用下，颗粒粒径越大，界面峰值剪应力与残余剪应力均越大，随颗粒粒径的增大，强度曲线也更易发生突变。当竖向应力由 30 kPa 增大至 90 kPa 时，AG1、AG2 和 AG3-格栅界面峰值剪切应力分别增大 162.5 %、166.3 %和 175.4 %，界面残余剪应力分别增大 198.2 %、202.8 %和 220.7 %。其原因为粒径较大的颗粒与颗粒、颗粒与格栅间咬合更为紧密，在剪切过程中粒径较大的单个颗粒与格栅接触面积大于粒径较小的颗粒，其对土工格栅横纵肋的被动阻抗作用较强，故而表现为较高的剪切应力；而且不仅在同一竖向荷载下表现出较高的剪应力，且受荷载影响更为明显。粒径较大的颗粒间接触、颗粒与格栅间的接触均较少，且在相同的竖向荷载作用下，单个 AG3 的颗粒滑动或旋转对筋土界面的影响较 AG1 或 AG2 对筋土界面的影响更为显著，因此 AG3 的强度曲线突变更为明显。

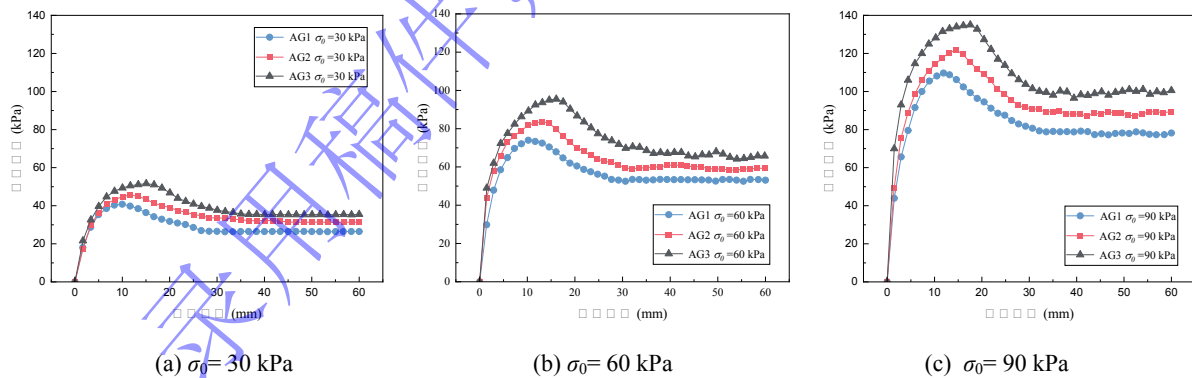


图4 不同颗粒粒径下界面剪切应力-剪切位移关系

Fig.4 Interface shear stress-shear displacement relationship under different particle sizes

3.2 颗粒形态对筋土界面剪缩剪胀特性分析

3.2.1 磨圆度对竖向位移-剪切位移关系的影响

定义试样剪缩值为负，剪胀值为正。由于在剪切过程中界面剪切面积保持恒定，所以竖向位移的变化规律可以反映试样的剪缩剪胀规律。由图 5 可知，随着剪切位移的增大，筋土界面均经历了短暂的剪缩过程，然后开始剪胀直至试验结束。在同一竖向荷载作用下，AG2-格栅界面的剪缩和剪胀特征较 AG8-格栅界面更为明显，当竖向应力由 30 kPa 增大至 90 kPa 时，AG2、AG5、AG8-格

栅界面的最大剪缩量分别增大 185.71 %、163.64 %、142.86 %，最大剪胀量分别减小 36.95 %、34.49 %、23.82 %。可见，填料磨圆度较高的界面剪缩剪胀量的变化没有磨圆度较低的界面显著。这是由于剪切过程中需要破坏颗粒间及颗粒与格栅间的互锁，磨圆度较高的颗粒间互锁较弱，剪切过程中的位置变化更多呈现为翻滚的态势，不仅在相同的竖向荷载下界面剪缩剪胀量的变化小于磨圆度较低的颗粒，而且随竖向应力的增大，由于剪切过程中的颗粒爬升和翻滚更易受到抑制，其界面剪缩剪胀量的变化也比磨圆度较低的界面要小。

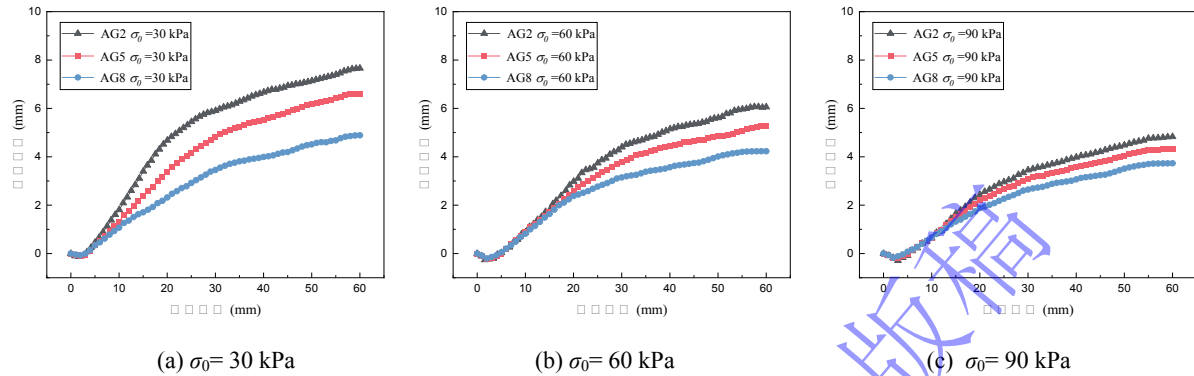


图 5 不同磨圆度下界面竖向位移-剪切位移关系

Fig.5 Vertical displacement-shear displacement relationship at different roundness levels of the interface

3.2.2 粒径对竖向位移-剪切位移关系的影响

由图 6 可知，不同颗粒粒径的砾石-格栅界面先剪缩后剪胀。在同一竖向应力的作用下，随着颗粒粒径的增大，界面最大剪胀量和最大剪缩量增大，当竖向荷载分别为 30 kPa、60 kPa 和 90 kPa 时，AG3-格栅界面的最大剪缩量分别是 AG1 的 1.4 倍、1.2 倍和 1.1 倍，最大剪胀量分别为 2.1 倍、1.9 倍和 1.8 倍。由此可见，在同一竖向应力作用下，填料粒径较大的筋土界面剪缩剪胀量更大，且受竖向荷载变化的影响更为明显。颗粒间相互翻滚或错动是土体产生剪胀性的主要原因，粒径较小的颗粒与格栅网眼形成的嵌锁作用较为薄弱，且试样内颗粒间的接触更多，在相同竖向荷载的作用下，填料粒径较小的加筋试样内部耗能较大，表现出的剪胀性较弱。

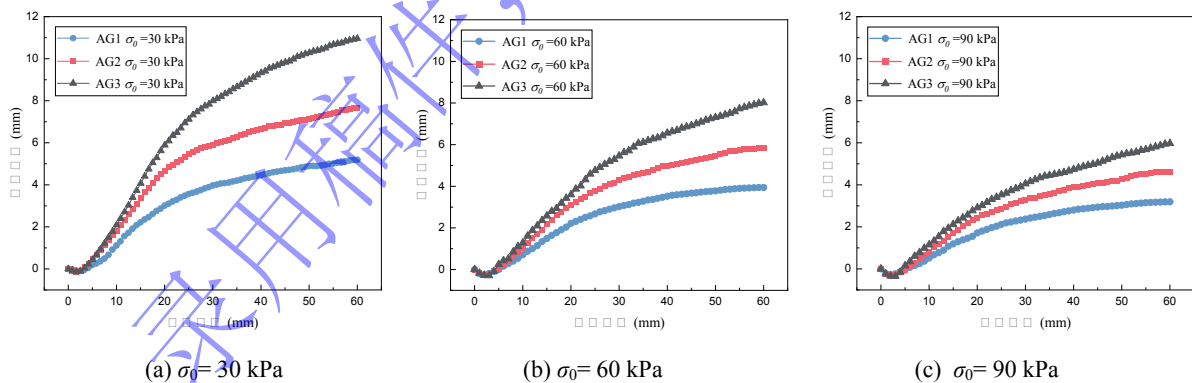


图 6 不同颗粒粒径下界面竖向位移-剪切位移关系

Fig.6 Interface vertical displacement-shear displacement relationship under different particle sizes

3.3 颗粒形态对筋土界面强度参数影响分析

图 7 给出了九种加筋界面的峰值和残余剪切应力包络线。根据 Mohr-Coulomb 破坏准则，将由图 7 的峰值剪切应力和残余剪切应力得到的界面峰值似黏聚力(C_p)、界面残余似黏聚力(C_r)、界面峰值摩擦角(φ_p)与界面残余摩擦角(φ_r)列于表 2。所有的砾石-格栅界面均表现出明显的界面峰值似黏聚力与界面残余似黏聚力。

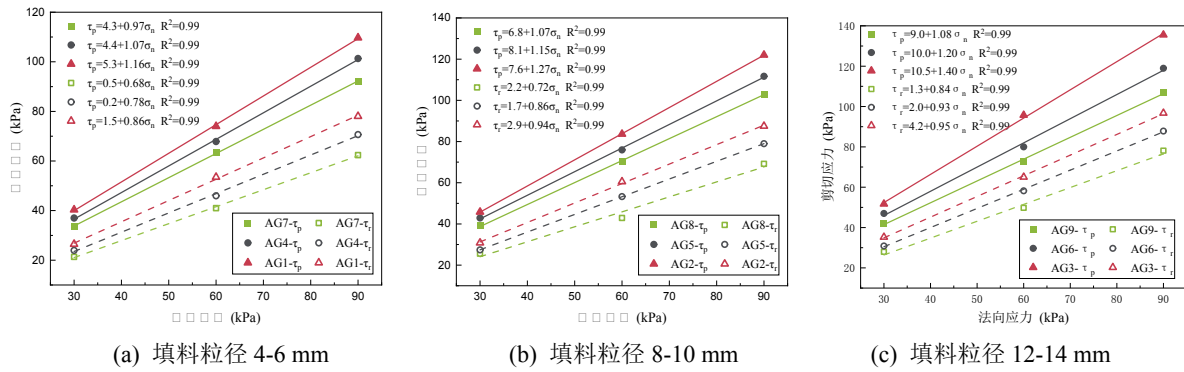


图7 界面剪切应力包络线

Fig.7 Envelope curve of interface shear stress

当填料粒径相同时，例如粒径为 12-14 mm 时，AG3、AG6 和 AG9 的界面峰值似黏聚力与界面残余似黏聚力分别为 10.5、10.0、9.0 kPa 和 4.2、2.0、1.3 kPa，表明界面峰值似黏聚力与界面残余似黏聚力随着磨圆度的增大而增大。相比于磨圆度的影响，颗粒粒径对界面似黏聚力的影响更为显著，当填料磨圆度为 0.35 时，AG1、AG2 和 AG3 的界面峰值似黏聚力与界面残余似黏聚力分别为 5.3、7.6、10.5 kPa 和 1.5、2.9、4.2 kPa。从表 3 可以看出，加筋圆砾界面的似摩擦角明显低于加筋角砾的相应值；当填料磨圆度相同时，颗粒粒径较大的加筋界面的似摩擦角明显高于颗粒粒径较小的加筋界面的似摩擦角。

表 2 试样平均磨圆度

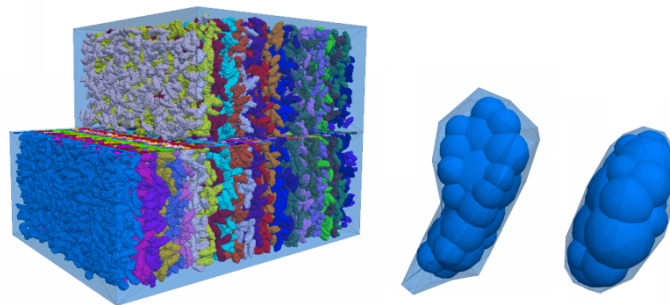
Table 2 Statistical result of coiling temperature control accuracy

Sample	Peak shear stress (τ_p)		Residual shear stress (τ_r)	
	C_p /kPa	φ_p /°	C_r /kPa	φ_r /°
AG1	4.3	49.2	1.5	40.7
AG2	7.6	51.8	2.9	43.2
AG3	10.5	54.5	4.2	43.5
AG4	4.4	46.9	0.2	38.0
AG5	8.1	49.0	1.7	40.7
AG6	10.0	50.2	2.0	42.9
AG7	4.5	44.1	0.5	34.2
AG8	6.8	46.9	2.2	35.8
AG9	9.0	47.2	1.3	40.0

4 单调直剪试验的 DEM 模拟

4.1 单调直剪试验的 DEM 模拟

基于室内直剪试验仪器的荷载加载方式和剪切盒尺寸，在 PFC^{3D} 中生成刚性墙组合形成上下剪切盒，同时在上盒顶部通过 clump 刚性簇模拟加载板，计算模型如图 8 (a) 所示。通过三维扫描技术得到室内试验试样的颗粒三维形状，并将三维颗粒形状文件导入到离散元软件 (PFC^{3D}) 中进行模拟计算，通过 bubblepack 算法对三维颗粒形状进行颗粒填充。通过 distance 控制模板的圆滑程度，ratio 控制最大/最小颗粒半径比。



(a) PFC^{3D} 计算模型示意图 (b) AG3 和 AG6 颗粒模型示意图

图 8 PFC^{3D} 计算模型及颗粒模型示意图

Fig.8 PFC^{3D} computational model and particle model schematic

填充颗粒数越多,越能真实反映和贴合实际砾石形状;但随填充颗粒数的增加,颗粒流的运算效率会相应降低。Lim^[26]等指出当单个簇颗粒所包含的球体数量大于 8 个时,就能反映颗粒间的多点接触和咬合关系。所以在较为合理的计算效率下,本文采用图 8 (b) 所示颗粒模型模拟角砾与次角砾,通过直接生成球的形式模拟圆砾,并通过 20 个不同颗粒半径的球进行组合。选用粒径为 AG3、AG6、AG7、AG8 和 AG9 五种试样进行数值计算分析,通过控制最大和最小填料颗粒半径比等比生成试样,AG3、AG6 和 AG9 试样颗粒数目约为 36000 个~120000 个,颗粒采用线性接触模型。单调直剪试验的剪切速率为 1mm/min。

格栅采用平行黏结模型,共使用球颗粒 4996 个,根据拉拔试验来确定土工格栅的细观参数,拉拔试验及数值模拟拉力-应变曲线如图 9 所示,模型中土工格栅细观参数见表 3。

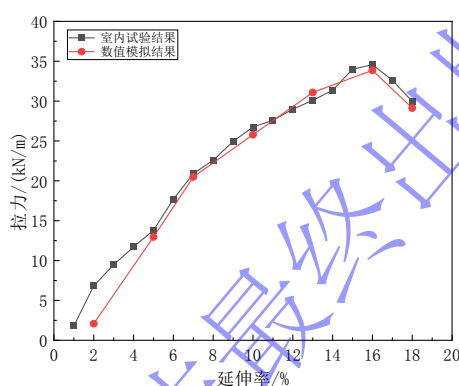


图 9 土工格栅拉力-应变关系曲线

Fig.9 Tensile force - strain relationship curve of geogrid

表 3 试样平均磨圆度

Table 3 Statistical result of coiling temperature control accuracy

Particle density/kg.m ⁻³	Bonding radius/mm	Young's modulus of parallel bond model/GPa	Stiffness ratio	Normal bond strength/GPa	Tangential bond strength/GPa
750	1.0	63	1.0	7.5	7.5

颗粒细观参数标定值的确定主要通过室内直剪试验结果对比得到,如图 10 所示。在单调直剪试验中,竖向荷载为 60 kPa。通过调试颗粒接触刚度、摩擦系数、孔隙率等匹配三种筋土界面剪切宏观特性,验证了模型的准确性,颗粒主要细观标定值见表 4。

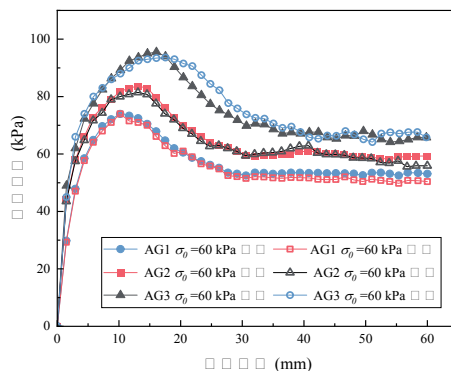


图 10 剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig.10 Shear stress - shear displacement relationship curve

表 4 颗粒细观参数标定值

Table 4 Calibration values of particle mesoscopic parameters

Parameter	Unit	Calibration value
Particle normal contact stiffness	N/m	2.0×10^7
Particle tangential contact stiffness	N/m	1.0×10^7
Wall normal contact stiffness	N/m	2.0×10^9
Wall tangential contact stiffness	N/m	1.0×10^9
Stiffness ratio	--	2.0
Particle friction coefficient	--	0.56
Wall friction coefficient	--	0
Particle density	kg/m ³	2670

4.2 砾石-格栅界面剪切特性细观分析

4.2.1 颗粒形状对组构各向异性的影响

以三种形状的砾石 (AG3、AG6 和 AG9) -格栅界面为研究对象, 为分析单调直剪过程中细观组构各向异性的演化规律, 对上下加剪切盒中所有颗粒法向和切向接触力分布情况进行了研究。由图 11、12 可知, 法向接触力远大于切向接触力, 可见颗粒形状对颗粒间法向接触力贡献占比基本没有影响。在剪切初始阶段, 法向接触力和切向接触力的主轴方向均接近 90°, 在剪切后期落入 20° ~ 40° 区间。颗粒形状的影响在细观机理上与试样的初始平均接触数有关, 对于磨圆度较高的颗粒试样, 试样平均接触数少, 其粒间结构难以抵抗切向接触力引起的力矩作用, 在剪切过程中以颗粒旋转为主; 对于低磨圆度颗粒试样, 试样平均接触数增加, 在剪切过程中的组构各向异性相对弱于高磨圆度颗粒试样。

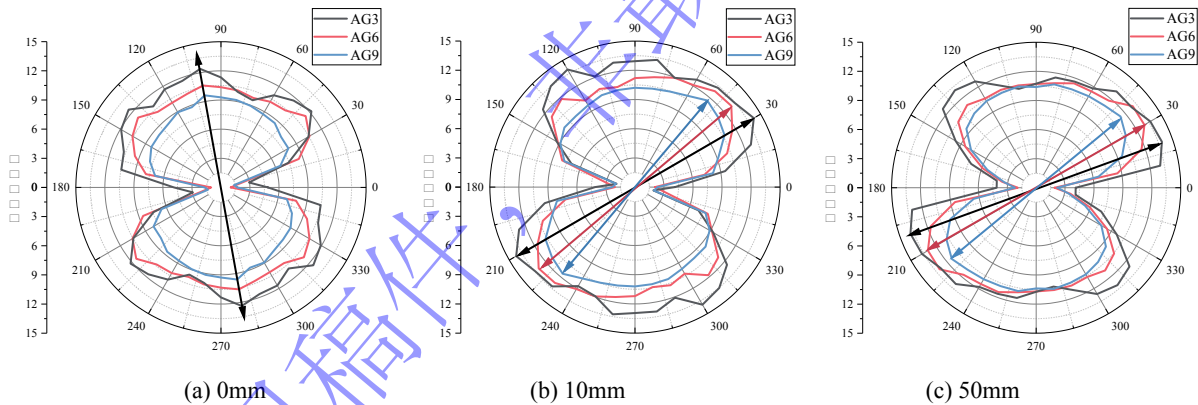


图 11 不同颗粒形状试样的法向接触力分布

Fig.11 Normal contact force distribution of samples with different particle shapes

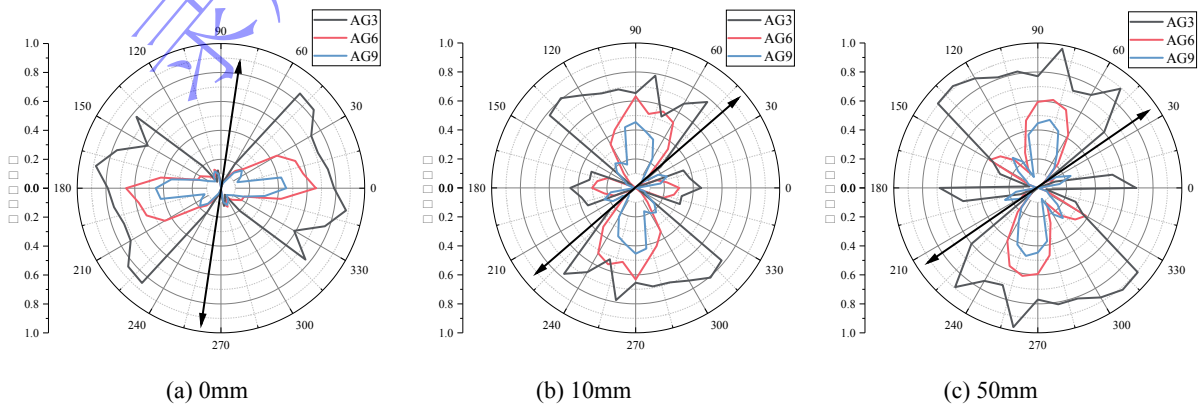


图 12 不同颗粒形状试样的切向接触力分布

Fig.12 Normal contact force distribution of samples with different particle shapes

4.2.2 颗粒粒径对组构各向异性的影响

由图 13 可知，在整个剪切过程，较大粒径试样的法向接触力在各个方向上基本都大于较小粒径试样的法向接触力，法向接触力的拟合曲线呈“花生状”。在剪切初始阶段，因重力自平衡和恒定竖向荷载作用，试样的初始法向接触力分布呈各向异性，大主应力方向接近 90° ，小主应力方向为水平方向。在剪切峰值阶段，主接触力系逐渐倾斜，法向接触力的主方向随之倾斜：

AG7、AG8 和 AG9 试样分别向 70° 、 60° 和 50° 偏移。在剪切残余阶段，因试样内一些强力链与主应力方向不平行，而是形成一定的角度，颗粒法向接触力的大主应力方向继续发生倾斜，其中较大粒径试样的倾斜程度明显强于较小粒径试样。随着颗粒粒径的增大，剪切过程中颗粒重排更为剧烈，试样内部应变局部化的范围越大，在整个剪切阶段其接触法向的主轴方向和法向接触力的大主应力方向演化更显著。

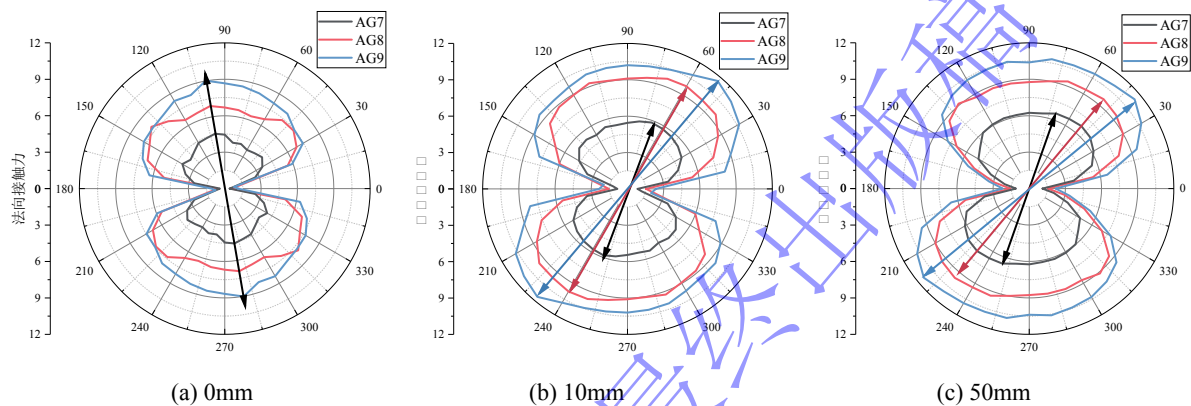


图 13 不同填料粒径试样的法向接触力分布

Fig.13 Normal contact force distribution of samples with different filler particle sizes

由图 14 可知，对于切向接触力，其拟合曲线呈“花瓣状”。在剪切位移 0 mm 时，水平方向上的切向接触力最大；在剪切峰值阶段时，切向接触力的各向异性主方向逐渐偏转，垂直方向上的切向接触力达到最大；剪切后期，其各向异性程度减小，接触力各向异性与试样宏观剪切峰值和残余强度的相对变化保持同步。对比图 11 和图 12 可知，法向接触力远大于切向接触力，说明在剪切过程中的接触力主要来源于法向接触力。

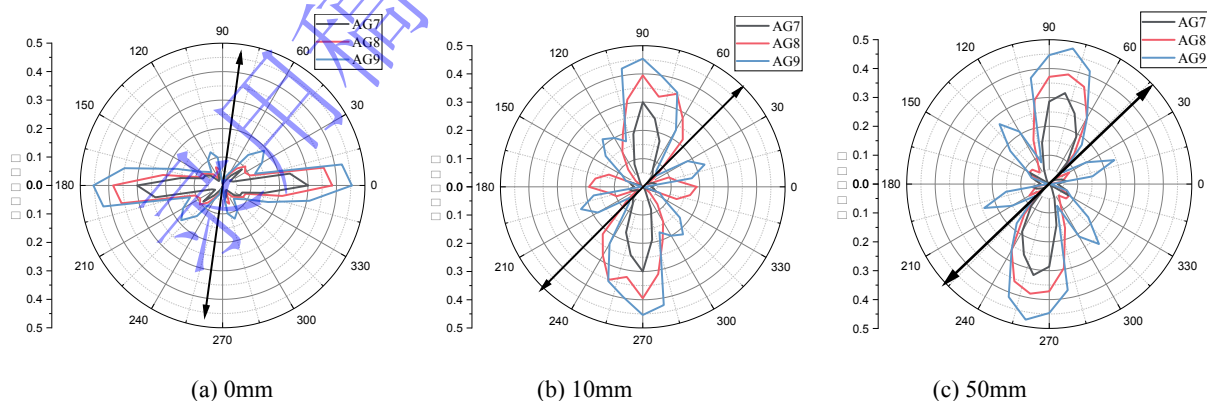


图 14 不同填料粒径试样的切向接触力分布

Fig.14 Tangential contact force distribution of samples with different filler particle sizes

5 结论

- (1) 结在相同的竖向荷载作用下, 9种筋土界面均呈现出典型的剪切软化特征, 峰值剪应力与残余剪应力随填料磨圆度的增大而减小; 磨圆度较低的筋土界面剪缩剪胀现象要比磨圆度较高的筋土界面明显。当中值粒径为 9 mm 时, 随着磨圆度从 0.35077 增加到 0.75068, $\sigma_0 = 30, 60$ 和 90 kPa 时界面峰值剪应力分别减小 15.26%, 15.46% 和 15.79%, 界面残余剪应力分别减小 23.05%, 29.10% 和 20.94%, 界面最大剪缩量分别减小 41.67%, 40.74% 和 43.75%, 界面最大剪胀量分别减小 36.16%, 30.20% 和 22.77%。
- (2) 当填料磨圆度相同时, 颗粒粒径较大的筋土界面界面内摩擦角和界面似黏聚力明显高于颗粒粒径较小的筋土界面的相应值; 在同一竖向荷载作用下填料粒径较大的筋土界面剪缩剪胀现象比粒径较小的筋土界面更明显。当填料磨圆度为 0.35 时, 随着中值粒径从 5 mm 增加到 13 mm, 界面峰值摩擦角和峰值似黏聚力分别增加 10.77% 和 144.19%, 界面残余摩擦角和残余似黏聚力分别增加 6.88% 和 180.00%, $\sigma_0 = 30, 60$ 和 90 kPa 时, 界面最大剪缩量分别增大 40.00%, 30.43% 和 25.00%, 界面最大剪胀量分别增大 118.88%, 103.55% 和 87.15%。
- (3) 竖向恒荷载作用下, 剪向接触力呈“花生状”分布, 而且切向接触力呈“花瓣状”分布, 颗粒接触法向、法向接触力和切向接触力主轴方向随着剪切位移发生偏转。三种整体规则度下试样颗粒接触法向、法向接触力和切向接触力分布规律相似, 并且粒径越大、磨圆度越小的颗粒, 其接触法向、法向接触力和切向接触力的主方向偏转角度越大; 并且粒径较大、磨圆度较低的颗粒细观组构各向异性均强于粒径较小、磨圆度较高的颗粒。这与宏观试验中界面剪胀现象有关。

参 考 文 献

- [1] Cheng F, Liu H B, Cao J Z, et al. Responses of reinforced soil retaining walls subjected to horizontal and vertical seismic loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129: 105969
- [2] Tang Y Q, Xiao S Q, Yang Q. The behaviour of geosynthetic-reinforced pile foundation under long-term dynamic loads: Model tests. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(8): 2205-2225
- [3] Başbuğ E, Cengiz C, Güler E. 1-g Shaking table tests to determine the behavior of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loads. *Transportation Geotechnics*, 2021, 30: 100597
- [4] Sweta K, Hussaini S. Behavior evaluation of geogrid-reinforced ballast-subballast interface under shear condition. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(1): 23-31
- [5] Esmacili M, Pourrashnoo A. Experimental investigation of shear strength parameters of ballast encased with geogrid. *Construction and Building Materials*, 2022, 335: 127491
- [6] Liu F Y, Wang P, Wang J, et al. Influence of soil particle size on monotonic and cyclic direct shear behaviors of geogrid-soil interface. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 150-156 (刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 150-156)
- [7] Xu Y W, Williams D J, Serati M, et al. Effects of scalping on direct shear strength of crusher run and crusher run/geogrid interface. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(9): 04018206
- [8] Vangla P, Gali M L. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(3): 254-268
- [9] Han B Y, Ling J M, Shu X, et al. Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 1015-1025
- [10] Namjoo A M, Jafari K, Toufigh V. Effect of particle size of sand and surface properties of reinforcement on sand-geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100403
- [11] Wang J, Hu H L, Liu F Y. Effects of direct shear characteristics of sand-geogrid interface under different aperture ratios. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 115-122 (王军, 胡惠丽, 刘飞禹, 等. 粒孔比对筋土界面直剪特性

- 的影响. 岩土力学, 2018, 39(S2): 115-122)
- [12] Chao Z M, Shi D D, Zheng J H. Experimental research on temperature- Dependent dynamic interface interaction between marine coral sand and polymer layer. *Ocean Engineering*, 2024, 297: 117100
- [13] Liu F Y, Hu H L, Wang J, et al. Influence of Aperture Ratio on Cyclic shear Behavior of Geogrid-soil Interface. *China Journal of Highway Transportaion*, 2019, 32(12): 115-131 (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): 115-131)
- [14] Liu F Y, Zheng Q T, Wang J, et al. Effect of particle shape on shear behaviour of aggregate-geogrid interface under different aperture ratios. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 23(7): 2099-2109
- [15] Afzali-Nejad A, Lashkari A, Shourijeh P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(1): 54-66
- [16] Pillai A G, Gali M L. Role of particle shape on the shear strength of sand-GCL interfaces under dry and wet conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(2): 262-281
- [17] Anubhav, Basudhar P K. Interface Behavior of Woven Geotextile with Rounded and Angular Particle Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(12): 1970-1974
- [18] Khan R, Latha G M. Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(3): 437-453.
- [19] Chang J Y, Feng S J. A constitutive model for geosynthetic interfaces considering nonlinear softening behavior. *Computers and Geotechnics*, 2022, 143: 104633
- [20] Wang J Q, Zhou J, Huang L Y, et al. Macroscopic and mesoscopic studies of interface interaction on geosynthetics by use of large direct shear tests. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 908-915 (王家全, 周健, 黄柳云, 等. 土工合成材料大型直剪界面作用宏观研究. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 908-915)
- [21] Ari A, Akbulut S. Evaluation of sand-geomembrane interface behavior using discrete element method. *Granular Matter*, 2021, 24(1): 21
- [22] Liu C H, Indraratna B, Rujikiatkamjorn C. An analytical model for particle-geogrid aperture interaction. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(1): 41-44
- [23] Reddy K R, Kosgi S, Motan E S. Interface shear behavior of landfill composite liner systems: a finite element analysis. *Geosynthetics International*, 1996, 3(2): 247-275
- [24] Liu F Y, Tong Y G, Wang X, et al. Effect of Stiffness Softening of Reinforcement-soil Interface on Dynamic Characteristics of Reinforced Retaining Wall. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(1): 75-84 (刘飞禹, 童艳光, 汪歆, 等. 筋-土界面刚度软化对加筋土挡墙动力特性的影响. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 75-84)
- [25] Moraci N, Gioffre D. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(2): 116-128
- [26] Lim W, McDowell G. Discrete element modelling of railway ballast. *Granular Matter*, 2005, 7(1): 19-29