

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230826001

# 法向循环荷载下土石混合料-格栅界面剪切特性研究\*

刘飞禹<sup>1</sup>, 王迪<sup>1</sup>, 付冬平<sup>2</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100089)

**摘要:** 土石混合料作为被广泛应用的路基填料, 其与土工格栅的加筋结构作为承担与传递交通荷载的重要载体, 强度与稳定性受筋土界面在法向循环荷载下的动力剪切特性影响。采用大型动态直剪仪, 对土石混合料-格栅界面进行了一系列动力直剪试验。分析了法向加载频率(0.05、0.1、1 Hz), 法向应力振幅(20、40、60 kPa)对不同细粒含量(0%、20%、40%、60%、80%、100%)下土石混合料-格栅界面剪切特性的影响。结果表明: 在法向循环荷载作用下, 剪切应力与法向位移均呈现周期性变化。界面抗剪强度随细粒含量增加呈现先增大后减小的趋势, 在40%细粒含量时达到最大值。界面抗剪强度随振幅增大而增大, 随频率增大而减小。增大细粒含量会使得界面剪缩效应减小, 而增大振幅以及频率会使得界面剪缩效应增大。界面摩擦系数与法向应力间呈现相同的周期性变化, 并存在0.5个周期左右的相位差。界面摩擦系数在峰值与残余阶段均随细粒含量增大呈现先增大后减小的趋势。

**关键词:** 筋土界面; 细粒含量; 振动幅值; 加载频率; 土石混合料

**中图分类号:** TU416.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0458-10

## Study on Shear Characteristics of Soil-rock Mixture-geogrid Interface under Normal Cyclic Loading

LIU Feiyu<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, FU Dongping<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 10089, China)

**Abstract:** As a widely used subgrade filler, soil-rock mixtures form reinforced structures with geogrids that serve as critical components for bearing and transferring traffic loads. Their strength and stability are affected by the dynamic shear characteristics at the soil-reinforcement interface under normal cyclic loading. A series of dynamic direct shear tests were conducted on soil-rock mixture-geogrid interface using a large-scale dynamic shear apparatus. The effects of normal loading frequency (0.05, 0.1, 1 Hz) and normal stress amplitude (20, 40, 60 kPa) on the interface shear characteristics of soil-rock mixture-geogrid interface at different fines content (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) were analyzed. The results showed that under normal cyclic loading, both the shear stress and normal displacement exhibited periodic variations. The interface shear strength initially increased and then de-

\* 收稿日期:2023-08-26;修回日期:2023-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52378355,52078285)资助

作者简介:刘飞禹(1976—),男,教授,博导。主要从事地基处理和土动力学方面的研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn

creased with increasing fines content, reaching its maximum value at a 40% fines content. Furthermore, the interface shear strength increased with the amplitude but decreased with the frequency. Increasing fines content reduced interface shear shrinkage, whereas increasing the amplitude and frequency enhanced it. The interface friction coefficient and normal stress demonstrated the same periodic variation, with a phase difference of approximately 0.5 cycles. Notably, the interface friction coefficient, both at peak and residual stages, showed a trend of first increasing and then decreasing as the fines content rose.

**Keywords:** soil-reinforcement interface; fines content; vibration amplitude; loading frequency; soil-rock mixture

## 0 引言

土石混合体是由滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害形成的第四系松散堆积物。土工格栅加筋土石混合料作为路基填料的方式已在路基工程中得到了广泛应用,其中细粒含量对土石混合体的剪切特性影响尤为明显。王涛等<sup>[1]</sup>可通过混合土料强度变形特性来预测不同细粒含量下的土石混合料强度变形特性。J. Yang等<sup>[2]</sup>通过制定耦合的实用模型,以评估细粒含量的改变对土壤剪切特性的影响。H. F. Zhao等<sup>[3]</sup>研究发现,土体的细粒含量与临界值间的关系会对土体的剪切特性产生影响。F. Y. Liu等<sup>[4-5]</sup>研究了土工格栅加筋橡胶与砂土混合物的界面剪切特性。基于室内试验,在PFC3D中建立了不同粒径比的混合料直剪模型,揭示了混合料在直剪过程中的细观力学机制。

土工合成材料加筋结构由于其能有效提高结构承载力,提高岩土结构的内部稳定性与强度,分配荷载力等优势,现如今已被广泛应用于路基、挡土墙、边坡等实际工程中。其上覆材料与土工合成材料界面处的界面特性及咬合机制是进行工程设计的重要参考依据<sup>[6]</sup>。国内外已有部分学者对筋土界面的动、静剪切特性进行了研究,李格焯等<sup>[7-8]</sup>研究了加筋间距、筋材刚度、土工格栅绕桩方式对变形的影响。B. Y. Han等<sup>[9]</sup>采用了矩形及三角形孔径土工格栅,研究了集料-土工格栅界面的剪切行为及粒径对界面抗剪强度的影响。刘飞禹等<sup>[10-11]</sup>通过改变剪切速率与法向加载频率,模拟车辆动荷载形式改变对于筋-土界面剪切特性的影响,并对筋-土界面在持续的循环剪切过程中的强度特性、体积变化、剪切刚度和阻尼比等变化进行了研究。

国外学者 X. M. Ding 等<sup>[12]</sup>研究了土工格栅加筋钙质砂的力学特性和变形特性,并考虑了格栅层数、相对密度、粒径和围压的影响。Y. Jia 等<sup>[13]</sup>建立了三维离散元模型探究剪切方向和土工格栅各向异性对格栅-土界面抗剪强度特性的影响。A. M. Safaee 等<sup>[14]</sup>采用未处理和处理后的粉细砂混合料对模型进行单层和多层回填试验,研究回填土性能对高加筋土墙动力响应的影响。刘飞禹等<sup>[15-16]</sup>采用基于二值图像的方法对三种土体和一种球形颗粒介质的颗粒几何形状进行了成像和量化,并按照规则性进行了描述。研究了颗粒粒径及形状对格栅-土界面静、动力剪切特性影响。J. G. Zornberg 等<sup>[17]</sup>研究开发了筋土界面特性模型,能在小位移下捕获土体-土工合成材料的刚度。X. Peng 等<sup>[18]</sup>使用具有激光辅助成像的透明土体,非侵入性地测量受限的土工格栅变形和土壤颗粒位移并生成包括土工格栅和周围土壤的整个位移场的全面数据。M. R. Abdi 等<sup>[19]</sup>采用两种不同类别的土工格栅分别包裹不同粒径的薄层散粒土,通过大型单调拉拔试验测试其加固黏土的效果。L. J. Xu 等<sup>[20]</sup>采用土工合成材料加筋土技术加固钙质砂地基,研究了粒径分布对土工织物/土工格栅-钙质砂和无筋钙质砂界面相互作用特性的影响。

由上述的分析可知,目前对于土石混合料-土工格栅界面的研究多数集中于静力方面,缺乏对于循环荷载作用下土石混合料-土工格栅界面的动剪切特性的相关研究。本文进行了一系列大型法向循环荷载下的动直剪试验,研究了细粒含量,法向加载频率,法向应力幅值对于土石混合料-格栅界面循环剪切特性的影响,可为实际工程中加筋土石混合料路基设计提供相关理论依据。

# 1 试验材料与方法

## 1.1 试验材料

本试验所采用的土石混合体主要由中风化花岗岩和砂质粘性土组成,本试验中参考王涛等<sup>[1]</sup>的做法,选取 5 mm 作为土石混合体中石颗粒与土颗粒间的粒径界限。根据相关试验规程的规定,取 31.5 mm 作为最大粒径。将筛分后的土料与石料按比例混合,控制其中土颗粒所占比例,共制备了细粒含量为 0%、20%、40%、60%、80%、100% 共六种土样,图 1 为各组细粒含量下的级配曲线。

试验加筋材料采用孔径为 35 mm×35 mm 孔径的双向聚丙烯塑料土工格栅,具体样式如图 2 所示,各项技术指标如表 1 所示。

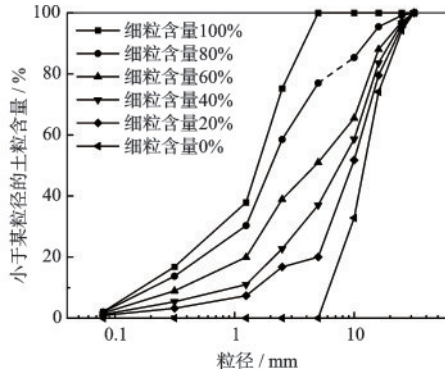


图 1 试验用土颗粒尺寸分布曲线

Fig.1 Curves of size distribution of soil particles for test

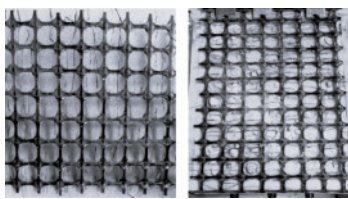


图 2 试验所用格栅及格栅的布设方式

Fig.2 Geogrid for test and its layout

## 1.2 试验仪器及方案

图 3 为大型直剪试验仪的模型图,该装置主要包含双向作动器、双向位移传感器和上下剪切盒,上剪切盒的尺寸为 305 mm×305 mm×150 mm,下剪切盒的尺寸为 405 mm×305 mm×150 mm。循环法向加载条件下的应力由初始法向应力和附加应力两部分组成,加载波形选用半正弦波,表达式为:

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_a |\sin(\pi ft)| \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为法向应力; $\sigma_i$ 为初始法向应力; $\sigma_a$ 为法向应力振幅; $f$ 为法向加载频率; $t$ 为加载时间。

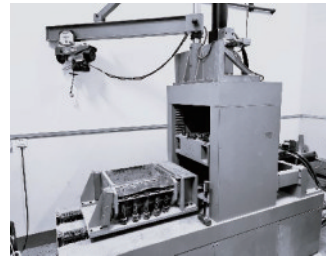


图 3 大型直剪仪

Fig.3 Large direct shear apparatus

试验方案如表 2 所示,采取恒定的初始法向应力( $\sigma_i = 40$  kPa),选取 6 种不同细粒含量的土石混合料(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%),密实度均为 75%,通过分层压实的方法将试样装入上下剪切盒,确保试样具有相同的密实度,为避免产生分层现象,同时对每层进行凿毛处理,在试验开始前,先对试样统一施加 20 kPa 的竖向应力,预压 30 分钟后使竖向应力达到 40 kPa,达到预定值后根据不同试验的具体要求对仪器输入相应的振幅与加载频率,进行剪切试验。参考蔡袁强等<sup>[21]</sup>的做法,采用 3 种法向应力振幅( $\sigma_a = 20, 40, 60$  kPa),3 种法向加载频率( $f = 0.05, 0.1, 1$  Hz)对试样进行加载。设定剪切速率为 1 mm/min,剪切位移为 60 mm。在本次试验中,剪胀为正,剪缩为负。

表 1 土工格栅技术指标

Table 1 Technical specifications of geogrid

土工合成材料	单位面积质量/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	网孔尺寸/ mm	纵横肋尺寸/mm		极限延伸率/%		极限抗拉强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	
			横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
聚丙烯土工格栅	330	35×35	5	5	9.7	9.8	45	46

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

荷载形式	细粒含量/%	初始法向应力 $\sigma_i$ /kPa	法向应力振幅 $\sigma_a$ /kPa	法向加载频率/Hz
循环荷载	0, 20, 40, 60, 80, 100	40	20, 40, 60	0.05, 0.1, 1

## 2 界面剪切特性分析

### 2.1 细粒含量对界面剪切特性的影响

图4比较了初始应力为40 kPa, 振幅为40 kPa, 频率为0.1 Hz下, 不同细粒含量的土石混合料-土工格栅界面剪切应力、竖向位移与剪切位移之间的关系。随着细粒含量的增大, 界面均呈现应变软化的变化规律, 同时界面峰值剪切应力呈现先增大后减小的变化趋势。

产生这种现象的原因可能为: 当细粒含量较低时, 试样孔隙率较大, 结构表现为骨架悬浮结构。随着细粒含量的略微上升, 块石与块石之间仍存在

大量的孔隙, 此时颗粒仍处于相对较少的阶段, 并不能将块石之间的孔隙充分填充。而随着细粒含量的继续增大, 土颗粒与石颗粒间的配比相对均衡时, 试样孔隙率减小, 结构表现为骨架密实结构。土石混合体最开始由骨架悬浮结构<sup>[22]</sup>向骨架孔隙结构过渡, 土石混合体与土工格栅界面摩阻力小于土石混合体内部提供的黏结力, 此时, 土石混合体与土工格栅界面处的剪切运动占优, 在屈服阶段, 土石混合体由于内部松散结构破坏, 剪切强度减小, 同时剪切应力迫使土石混合体内部寻找新的稳定骨架结构, 形成残余稳定阶段。

对比0%与20%细粒含量, 可发现0%细粒含量下曲线波动更为剧烈, 这是由于块石的下滑, 爬坡效应导致应力的下降, 回升, 进而影响剪切特征曲线

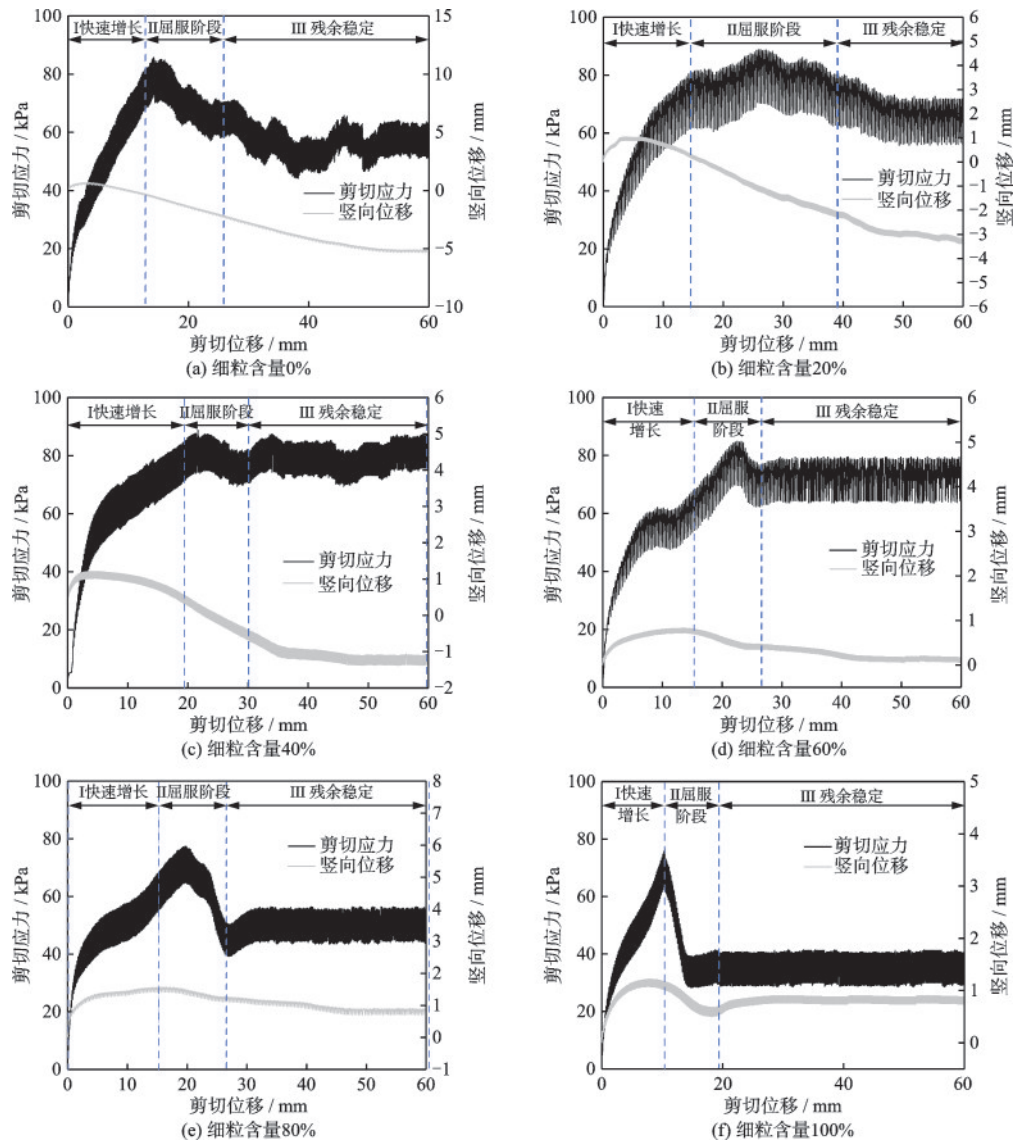


图4 不同细粒含量下界面剪切特性曲线

Fig.4 Characteristic curves of interface shear at different fines contents

出现高频率波动<sup>[22-23]</sup>。当细粒含量达到40%时,土石混合体骨架结构趋于骨架密实,土石块与土工格栅间形成锁死状态,抗剪强度得到提升,随着剪切位移的发展,土石混合体内部骨架在剪切过程中始终保持相对稳定,仅发生微小的软化现象。

随着细粒含量的继续增大至80%,块石被随机分布在土颗粒介质中,石块间没有形成大量接触,相互作用减少,主要在土颗粒以及格栅孔隙中做翻动、爬动等位置变化的运动<sup>[24]</sup>,同时块石发生破碎现象较少。因此剪切特征曲线不再出现明显的波动。细颗粒与土工格栅间难以形成有效的黏结作用,随着剪切位移的持续增大,土颗粒的相对位置不断调整,从屈服阶段向残余阶段过渡,且由于细颗粒的阻隔,石块与石块以及土工格栅间无法形成有效的咬合作用,致使剪切应力不断降低。

在不同细粒含量下,竖向位移随着剪切位移的发展,均呈现先增大后减小,之后达到相对稳定状态的发展趋势。随着细粒含量由0%增大至100%,各细粒含量下界面的最大剪缩量分别为5.2、3.4、1.4、-0.1、-0.7、-0.9 mm。可见界面最大剪缩量随着细粒含量的增大而减小。

此现象产生的原因可能为:在剪切的初始阶段,界面处堆积着土石,当块石所受的剪切应力小于其最大静摩擦力时,块石即在原位置保持不动,而块石后端的土石颗粒就被块石所拦截,并堆积形成了“锁固体”<sup>[25]</sup>,造成了界面的初始剪胀,但此现象发展极为迅速,随着剪切应力的增大,块石即开始沿界面滑动,颗粒之间孔隙发生变化,土石混合体的整体体积减小。

界面摩擦系数( $k=\tau/\sigma$ )是反映剪切过程中土石混合料与土工格栅相互作用的特征系数,如图5所示,其呈现正弦波形周期性变化。

在不同细粒含量下,界面剪切特性曲线在峰值与残余阶段可能会发生不同的变化形式,现分别对其进行讨论。可发现界面摩擦系数呈现正弦波形式的变化波形,其波峰与波谷无论是在峰值还是残余阶段,随细粒含量增加均呈现先增大后减小的趋势。在峰值阶段,随着细粒含量的增大,界面摩擦系数从0.68~1.12的波动范围升至0.84~1.7后降低至0.48~1.19。残余阶段从0.80~1.26的波动范围升至1.01~1.63后降低至0.61~1.1。同时发现法向应力与界面摩擦系数的波形间始终存在0.5个周期左右的相位差。

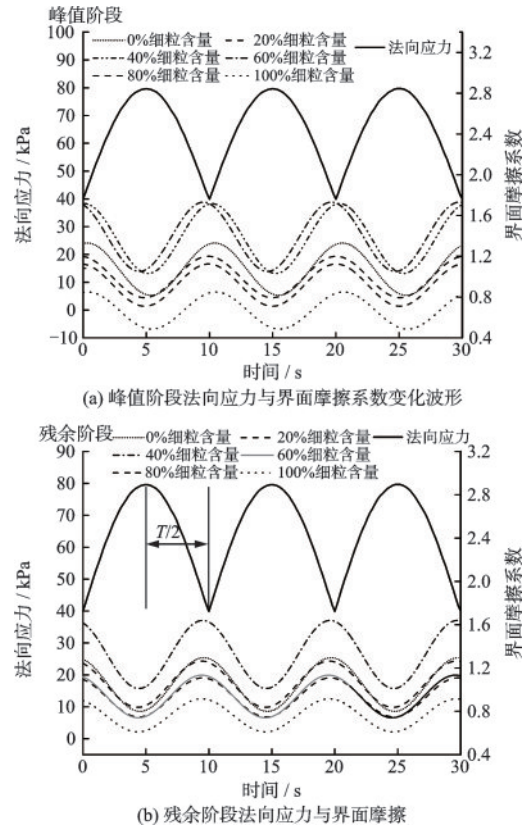


图5 界面摩擦系数变化曲线

Fig.5 Variation curves of interface friction coefficients

## 2.2 竖向应力振幅对界面剪切特性的影响

如图6所示,现按照文献[26]将上下限曲线分别定义为上界峰值应力、下界峰值应力、上界残余应力和下界残余应力。图7是细粒含量40%,初始应力为40 kPa,频率为0.1 Hz时,振幅分别为20 kPa(40~60 kPa), 40 kPa(40~80 kPa), 60 kPa(40~100 kPa)下土石混合料-土工格栅界面的剪切应力—剪切位移关系曲线。

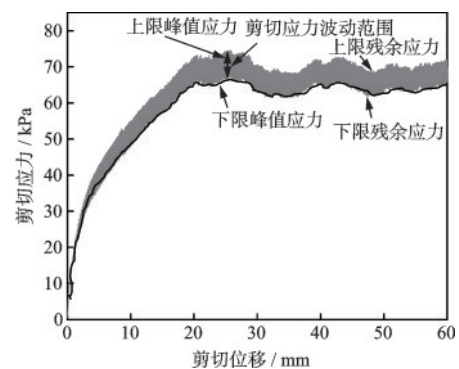


图6 法向循环荷载作用下界面剪切应力变化规律

Fig.6 Variation pattern of interface shear stress under normal cyclic loading

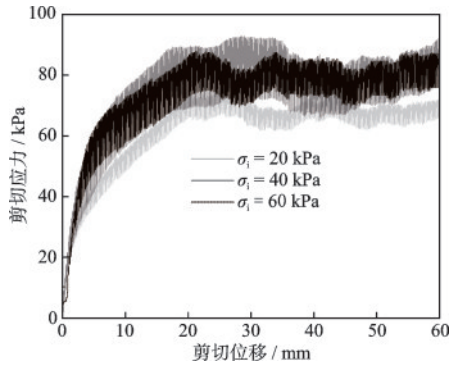


图7 不同振幅下界面剪切特性曲线

Fig.7 Characteristic curves of interface shear under different amplitudes

可以发现,随着振幅的增大,曲线的波动幅度有着明显的增大,同时屈服阶段向残余稳定阶段的过渡点向后推迟。即振幅的增大会导致曲线波动增大,土石混合体进入残余稳定状态的时间增大。通过对试验数据的分析可得:振幅为20 kPa时,剪应力在剪切位移24.93 mm时达到峰值,上下界抗剪强度分别为74.14、67.28 kPa。振幅在40 kPa时,剪切位移在27.03 mm时达到峰值,上下界抗剪强度分别为87.25、74.57 kPa。振幅为60 kPa时,剪应力在剪切位移32.93 mm时达到峰值,上下界抗剪强度分别为92.39、73.97 kPa。

各振幅下残余阶段最大波动幅度分别为6.86、11.68、18.7 kPa。界面剪切应力变化范围如图8所示。可发现随着振幅的线性增长,界面应力波动幅度呈现加速增大的非线性增长趋势。

分析此现象产生的原因可能是:在低剪切速率下,振幅作为周期性变化的附加应力,其反复的增大与减小会显著影响试样所受的约束力,进而导致试样上下界峰值剪切应力差距增大,波动幅度增大。

图9显示了不同振幅下土石混合体-土工格栅界

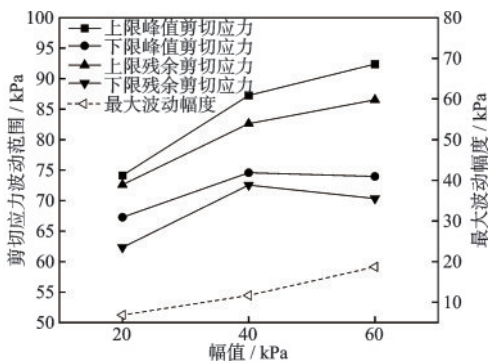


图8 不同振幅下界面剪切应力波动范围

Fig.8 Fluctuation range of interface shear stress under different amplitudes

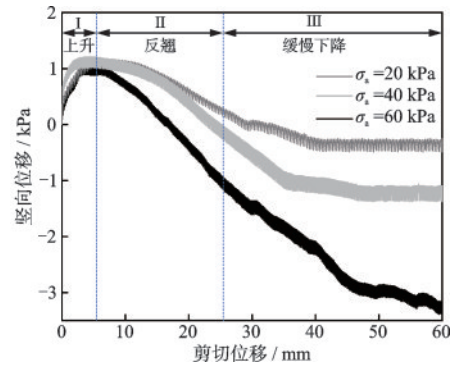


图9 不同振幅下竖向位移—剪切位移关系曲线

Fig.9 Relationship curves between vertical displacement and shear displacement under different amplitudes

面竖向位移—剪切位移关系曲线。可发现随着振幅的增大,在上升阶段剪胀量逐步减小,同时在缓慢下降阶段剪缩量增大。即增大振幅会使得土石混合体-土工格栅界面的剪胀效应减弱,剪缩效应增强。各振幅下界面的最大剪胀量分别是1.17、1.14、1.03 mm,最大剪缩量分别为0.49、1.38、3.38 mm。

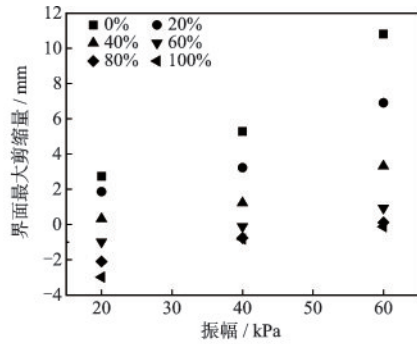
对该现象的解释为:初始阶段的剪胀效应是由于土石混合体在凹槽内形成“锁固体”,块石所受剪力未大于土块的静摩擦力,块石后端土石颗粒被块石拦截堆积所致,但又由于块石的静摩擦力有限,上升阶段发展较为迅速,并随着振幅的增长,上升阶段的发展时间与剪胀量均在减小。随着剪应力的发展,块石的翻越,部分剪切强度小于剪应力的块石的破碎,土石混合体受剪剪密,孔隙率变小等原因共同导致了剪缩效应的发生。

图10显示了不同细粒含量界面的最大峰值剪切应力和界面最大剪缩量随振幅的变化情况。从图10(a)可以看出,最大剪缩量随着振幅的增大而增大,当振幅从20 kPa增大至60 kPa,各细粒含量下试样界面最大剪缩量分别增大了8.07、5.04、2.99、1.92、2.22、2.86 mm。

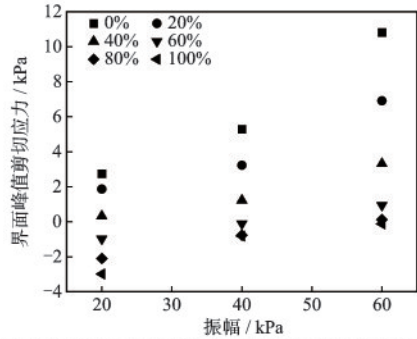
对此现象的解释为:在振幅较大的情况下,界面处的部分小颗粒会发生破碎,造成砂土间空隙变小,砂土的整体体积也随之变小,同时高振幅下大颗粒的平动、转动现象更为频繁,砂土颗粒进行重排列,砂土的整体体积也会随之变小。

从图10(b)可以发现,不同细粒含量试样界面的峰值剪切应力随振幅的增大而增大,当振幅从20 kPa增大至60 kPa,各细粒含量试样界面峰值剪切应力分别增大了17.93、17.03、15.86、15.97、16.75、17.19 kPa。

图11显示了不同振幅下法向应力,界面摩擦系



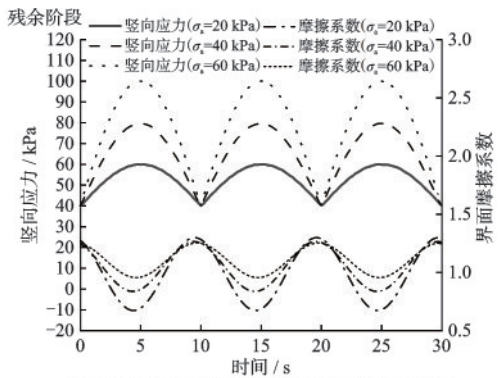
(a) 各振幅下不同细粒含量试样界面最大剪缩量变化曲线



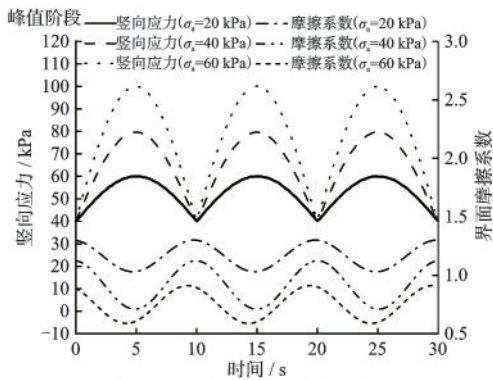
(b) 各振幅下不同细粒含量试样界面峰值剪切应力变化曲线

图10 土石混合体-格栅界面剪切特性随振幅的变化

Fig.10 Variation of shear characteristics of soil-rock mixture-geogrid interface with amplitude



(a) 峰值阶段法向应力与界面摩擦系数变化波形



(b) 残余阶段法向应力与界面摩擦系数变化波形

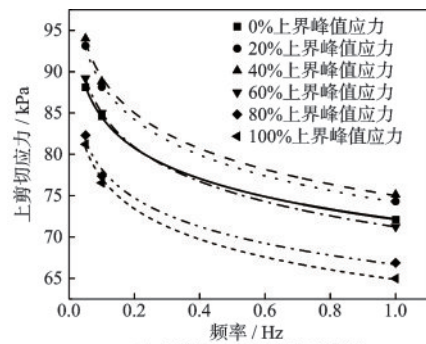
图11 不同振幅下界面摩擦系数-时间关系曲线

Fig.11 Relationship curves between interface friction coefficient and time under different amplitudes

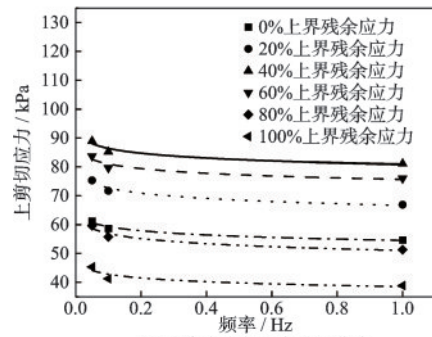
数与时间的关系曲线,可发现在峰值阶段,界面摩擦系数随着振幅的增大呈现减小的趋势,由1.03~1.3的波动范围逐步降低至0.76~1.12,0.58~0.91。而在残余阶段,界面摩擦系数波动范围则随着振幅的增大呈现增大的趋势。由0.955~1.252的波动范围提升至0.839~1.27,0.673~1.298。与此同时法向应力与界面摩擦系数波形间始终存在0.5个周期的相位差。

### 2.3 竖向加载频率对界面剪切特性的影响

为研究不同细粒含量下土石混合料-土工格栅界面剪切应力-位移曲线中剪切应力与频率间的相对关系。当初始应力为40 kPa,振幅为40 kPa时,分别对上峰值应力,上残余应力与频率间的关系以及下峰值应力,下残余应力与频率间的关系进行研究。由图12可知,上界峰值应力与上界残余应力均与频率间呈现负相关,并随着频率的增大呈现不同的减小速率。以40%细粒含量为例,当频率从0.05 Hz增大至0.1 Hz,上峰值应力从94.01 kPa减小至88.82 kPa,上残余应力从88.96 kPa减小至85.27 kPa,而当频率从0.1 Hz增大至1 Hz时,上界峰值,残余应力分别从88.82、85.27 kPa减小至75.12、81.13 kPa。可发现随着频率的增大,应力的减



(a) 峰值应力与频率关系曲线



(b) 残余应力与频率关系曲线

图12 上剪切应力与频率关系曲线

Fig.12 Relationship curves between upper shear stress and frequency

小速率放缓。根据频率与应力间的相对变化关系,选择对数函数表达频率与上剪切应力间的变化关系。

$$\tau_{up1} = c_1 + b_1 \ln f \quad (2)$$

$$\tau_{up2} = c_2 + b_2 \ln f \quad (3)$$

式中,  $c$  和  $b$  为与频率相关的经验参数;  $f$  为法向循环荷载的频率;  $\tau_{up1}$  为上界峰值应力;  $\tau_{up2}$  为上界残余应力。具体数值如表 3 所示,  $R^2$  为拟合曲线的相关系数。

**表 3 上剪切应力拟合曲线的经验参数**  
**Table 3 Empirical parameters of upper shear stress fitting curves**

细粒含量/%	上界峰值应力/kPa			上界残余应力/kPa		
	$c_1$	$b_1$	$R^2$	$c_2$	$b_2$	$R^2$
0	72.14	-5.36	0.998 6	54.53	-2.07	0.971 5
20	74.22	-6.21	0.998 7	66.66	-2.63	0.951 7
40	75.00	-6.22	0.997 8	80.87	-2.40	0.930 0
60	71.22	-5.99	0.990 0	75.65	-2.30	0.894 1
80	66.67	-5.00	0.981 4	51.06	-2.54	0.982 6
100	64.85	-5.31	0.992 8	38.51	-1.81	0.813 2

图 13 为下剪切应力与法向加载频率间的关系曲线, 可发现无论是在峰值阶段与残余阶段, 频率与下界面剪切应力同样呈现负相关, 随着频率的增大, 下界面剪切应力减小, 改变的程度减小。因此,

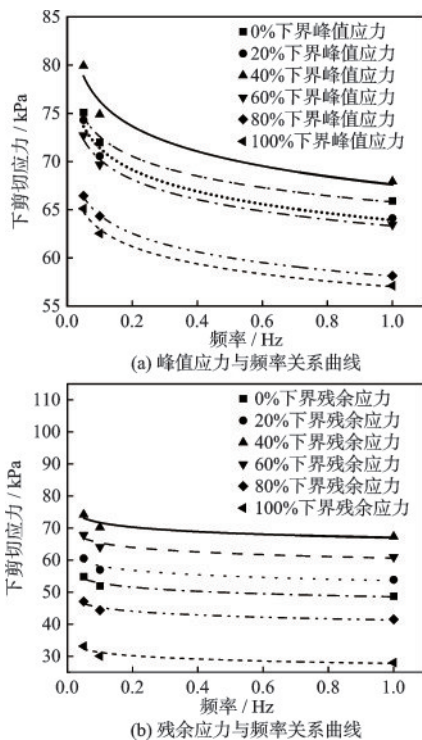


图 13 下剪切应力与频率关系曲线

Fig.13 Relationship curves between low shear stress and frequency

利用对数函数建立下剪切应力与频率间的关系。

$$\tau_{L1} = g_1 + h_1 \ln f \quad (4)$$

$$\tau_{L2} = g_2 + h_2 \ln f \quad (5)$$

式中,  $g$  和  $h$  为与频率相关的经验参数;  $f$  为法向循环荷载的频率;  $\tau_{L1}$  为上界峰值应力;  $\tau_{L2}$  为上界残余应力。具体数值如表 4 所示,  $R^2$  为拟合曲线的相关系数。

**表 4 下剪切应力拟合曲线的经验参数**  
**Table 4 Empirical parameters of low shear stress fitting curves**

细粒含量/%	下界峰值应力/kPa			下界残余应力/kPa		
	$g_1$	$h_1$	$R^2$	$g_2$	$h_2$	$R^2$
0	65.80	-2.94	0.986 2	48.54	-1.87	0.921 2
20	63.92	-3.24	0.977 8	53.58	-2.00	0.888 9
40	67.62	-3.75	0.956 4	67.00	-2.03	0.852 9
60	63.32	-2.94	0.989 4	60.63	-2.07	0.879 1
80	58.12	-2.73	0.999 4	40.30	-1.71	0.916 2
100	57.12	-2.59	0.990 3	27.47	-1.50	0.839 2

可发现相较于上界剪切应力, 下剪切应力受频率的影响相对较小, 同样以细粒含量 40% 为例, 当频率从 0.05 Hz 增大至 0.1 Hz 时, 下峰值残余应力变化范围分别为 74.88~79.94 kPa, 70.23~73.94 kPa。频率从 0.1 Hz 增大至 1 Hz 时, 下峰值残余应力变化范围分别为 67.94~74.88 kPa, 67.34~70.23 kPa。与上界剪切应力相同的是, 随着频率的增大, 应力变化接近恒定。

图 14 为不同细粒含量和频率下土石混合体-土工格栅界面的最大剪缩量, 从图中可得知, 最大剪缩量与细粒含量间呈现负相关, 与频率间呈现正相

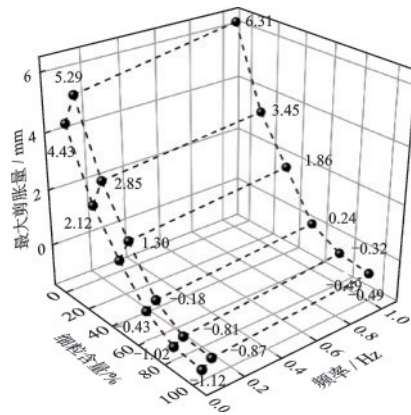


图 14 不同细粒含量和频率下界面最大剪缩量

Fig.14 Maximum interface shear shrinkage at different fines contents and frequencies



关。随着频率从0.05 Hz增大至1 Hz的过程中,各细粒含量的最大剪缩量分别增长了1.88、1.33、1.11、0.67、0.70、0.63 mm。可见在低细粒含量下,频率的增大对于土石混合物最大剪缩量的影响更大。

图15显示了细粒含量40%,振幅40 kPa时,不同频率下界面摩擦系数,法向应力随时间的变化曲线。可发现各频率下界面摩擦系数与法向应力间均呈现相同的正弦变化波形,且各频率下两者波形间均存在0.5个周期左右的相位差。峰值阶段0.05、0.1、1 Hz下摩擦系数变化分别为0.88~1.36,0.84~1.27,0.66~1.05,残余阶段变化范围分别为0.89~1.37,0.71~1.13,0.61~0.97。

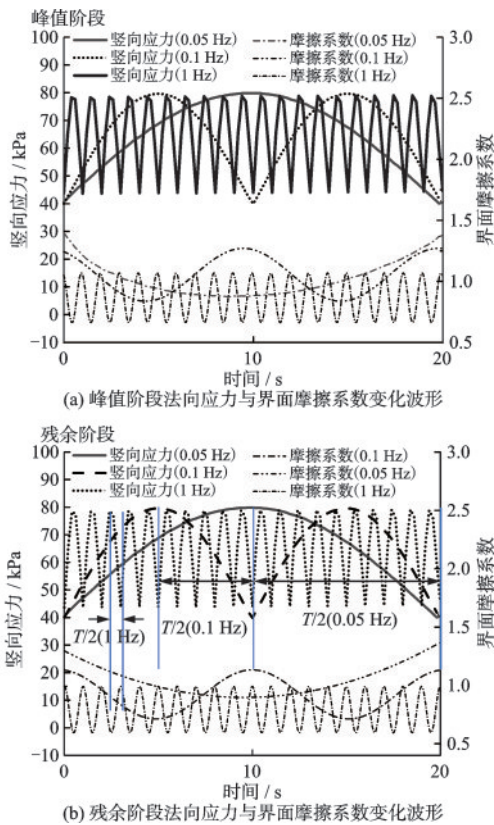


图15 不同频率下界面摩擦系数—时间关系曲线

Fig.15 Relationship curves between interface friction coefficient and time at different frequencies

### 3 结论

(1) 土石混合物-格栅界面峰值剪切应力,界面摩擦系数随细粒含量的增加呈现先增大后减小的趋势,在40%细粒含量下时最大,此细粒含量下土石混合物与格栅间的嵌固咬合作用良好。

(2) 界面最大剪缩量随着细粒含量的增加而减

小,在同一细粒含量下,荷载振幅和剪切频率越大,界面最大剪缩量越大。界面峰值剪切应力随着振幅的增大而增大,上下界峰值应力与残余应力均随频率的增大而减小。

(3) 法向应力变化波形与界面摩擦系数、剪切应力变化波形均呈现半正弦波形变化,且法向应力波形与后两者间始终存在0.5个周期左右的相位差。

### 参考文献:

- [1] 王涛, 刘斯宏, 宋迎俊, 等. 基于骨架孔隙比的土石混合物料强度变形特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2973-2983.  
Wang T, Liu S H, Song Y J, et al. Strength and deformation characteristics of soil-rock mixtures using skeleton void ratio[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 2973-2983. (in Chinese)
- [2] Yang J, Yin Z Y, Laouafa F, et al. Hydro-mechanical modeling of granular soils considering internal erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(2): 157-172.
- [3] Zhao H F, Zhang L M, Chang D S. Behavior of coarse widely graded soils under low confining pressures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 42(2): 35-48.
- [4] Liu F Y, Fu J, Ying M J. Experimental study on cyclic shear characteristics of geogrid and rubber-sand mixture interface[J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129328.
- [5] Liu F Y, Fu J, Wang J, et al. Effect of the particle size ratio on macro-and mesoscopic shear characteristics of the geogrid-reinforced rubber and sand mixture interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(4): 779-793.
- [6] Chang J Y, Feng S J. Dynamic shear behaviors of textured geomembrane/nonwoven geotextile interface under cyclic loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 49(2): 388-398.
- [7] 李格焯, 徐超, 沈盼盼, 等. 局部静荷载作用下加筋对土拱效应的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 50-59.  
Li G Y, Xu C, Shen P P, et al. Effects of reinforcement on soil arching development under localized static loading[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(1): 50-59. (in Chinese)
- [8] 杜春雪, 徐超, 杨阳, 等. 无纺土工织物过滤黏土的反滤特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增2): 275-281.  
Du C X, Xu C, Yang Y, et al. Experimental study on filter characteristics of nonwoven geotextile filtering clay

- [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup2): 275-281. (in Chinese)
- [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 [J]. *Constriction and Building Materials*, 2018, 158: 5155025.
- [10] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(5): 832-840.  
Liu F Y, Zhu C, Wang J. Influences of shear rate and loading frequency on shear behavior of geogrid-soil interfaces [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5): 832-840. (in Chinese)
- [11] Liu F Y, Zhu C, Yuan G H, et al. Behaviour evaluation of gravelly soil-geogrid interfaces under normal cyclic loading [J]. *Geosynthetic International*, 2021, 28(5): 508-520.
- [12] Ding X M, Luo Z G, Ou Q. Mechanical property and deformation behavior of geogrid reinforced calcareous sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(4): 618-631.
- [13] Jia Y, Zhang J, Chen X Y, et al. DEM study on shear behavior of geogrid-soil interfaces subjected to shear in different directions [J]. *Comput Geotech*, 2023, 156: 105302.
- [14] Safaee A M, Mahboubi A, Noorzad A. Seismic behavior of tiered geogrid reinforced soil (GRS) using treated backfill soil [J]. *Geosynthetics International*, 2023, 30(2): 200-224.
- [15] 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]. *岩石力学*, 2017, 38(1): 150-156.  
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 [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 150-156. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] Zornberg J G, Roodi G H, Gupta R. Stiffness of soil-geosynthetic composite under small displacements: I. model development [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(10): 04017075.
- [18] Peng X, Zornberg J G. Evaluation of soil-geogrid interaction using transparent soil with laser illumination [J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(2): 206-221.
- [19] Abdi M R, Zandieh A R, Mirzaeifar H, et al. Influence of geogrid type and coarse grain size on pull out behaviour of clays reinforced with geogrids embedded in thin granular layers [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2021, 25(12): 2161-2180.
- [20] Xu L J, Wang R, Liu Q B, et al. Effect of particle size distribution on monotonic direct shear characteristics of geotextile/geogrid-calcareous sand interface [J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 137: 103601.
- [21] 蔡袁强, 赵莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1238-1246.  
Cai Y Q, Zhao L, Cao Z G, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1238-1246. (in Chinese)
- [22] 杨忠平, 李进, 蒋源文, 等. 含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(8): 1443-1452.  
Yang Z P, Li J, Jiang Y W, et al. Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1443-1452. (in Chinese)
- [23] 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(2): 292-306.  
Yang Z P, Liu H Y, Li J, et al. Study on shear mechanical properties and deformation characteristics of shear zone of soil-rock mixture-bedrock interface [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 292-306. (in Chinese)
- [24] 徐文杰, 王识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(10): 2152-2160.  
Xu W J, Wang S. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(10): 2152-2160. (in Chinese)
- [25] 胡峰, 李志清, 胡瑞林, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 766-778.  
Hu F, Li Z Q, Hu R L, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 766-778. (in Chinese)
- [26] Dang W G, Chen J P, Huang L C, et al. Frictional behavior of granular materials exposed to dynamic normal load [J]. *Engineering Geology*, 2021, 295: 106414.

(本文编辑:池营营)