

# 周期性剪切应力作用下碎石的滑移特性\*

廖纤<sup>1</sup>, 陶康<sup>2</sup>, 刘煜<sup>1</sup>, 李舒彤<sup>1</sup>, 党文刚<sup>1</sup>

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082

2. 弗莱贝格工业大学岩土工程研究所, 德国 弗莱贝格 09599

**摘要:** 为了研究碎石材料在周期性剪切荷载条件下的滑移特性, 使用自主研发的多功能动剪试验机, 对碎石试样施加恒定的法向应力, 以及不同峰值、谷值和频率的水平方向周期性剪切应力, 监测试样在加载过程中剪切位移随时间的变化情况, 并分析剪切位移增量的变化情况以及整个加载期内剪切应力对应的能量密度。研究表明: 周期性剪切应力引起的滑移特征与其峰值、谷值和频率有关; 周期性剪切应力会导致碎石材料的滑移跃变, 且出现滑移跃变点的条件与加载期内的能量密度有关, 可根据能量密度范围将试样的滑移状态划分为三个区域, 即稳定区、过渡区和跃变区。

**关键词:** 碎石路基; 周期性剪切应力; 多功能动剪试验机; 滑移特性; 剪切位移; 能量密度

**中图分类号:** U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0131-09

## The slip characteristics of gravel under periodic shear stress

LIAO Xian<sup>1</sup>, TAO Kang<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, LI Shutong<sup>1</sup>, DANG Wengang<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. Geotechnical Institute, Tu Bergakademie Freiberg, Freiberg 09599, Germany

**Abstract:** In order to study the sliding characteristics of gravel materials under cyclic shear load, a self-developed multi-functional dynamic shear testing machine was used to apply constant normal stress and horizontal cyclic shear stress with different peak, valley and frequency to the gravel samples, and to monitor the change of shear displacement of the samples over time during loading. The change of shear displacement increment and the energy density corresponding to shear stress during the whole loading period are analyzed. The results show that the characteristics of slip induced by cyclic shear stress are related to its peak value, valley value and frequency. The periodic shear stress will lead to the slip jump of the gravel material, and the condition of the slip jump point is related to the energy density during the loading period. According to the range of energy density, the slip state of the sample can be divided into three regions, the stable region, the transition region and the jump region.

**Key words:** gravel subgrade; periodic shear stress; multi-functional dynamic shear testing machine; slip characteristics; shear displacement; energy density

公路和铁道建设过程中, 常常需要对路基进行高填深挖, 从而产生大量的碎石废渣(史新杰, 2014)。这些碎石废渣往往会被回收利用, 用于填筑公路、铁路路基(吴海冰, 2017; 赵学东,

\* 收稿日期: 2024-03-13

录用日期: 2024-04-18

网络首发日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51904359); 广东省自然科学基金-海上风电联合基金(2022A1515240009)

作者简介: 廖纤(2003年生), 女; 研究方向: 岩土力学; E-mail: liaox28@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 党文刚(1987年生), 男; 研究方向: 岩土力学; E-mail: dangwg@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240069

2018)。在一定的荷载条件下,路基会产生变形、沉降与滑移。因此,对碎石路基在周期性剪切应力作用下的滑移特性进行研究至关重要。

黄娟等(2017, 2023)、丁祖德等(2017)、邓如勇(2020)和许坤等(2021)研究了泥炭质土在交通荷载下的受力特性与变形特性。穆锐(2019)较为系统地研究了贵阳地区原状红黏土的疲劳特性、临界动应力和动本构关系。闫春岭等(2011)、张勇等(2009)、郭林等(2013)和谢栋等(2019)以交通荷载为背景对软黏土的累积变形特性进行了研究。马文国等(2023)和闫春岭等(2017)对交通荷载下粉性土的变形机理与影响因素进行了研究,揭示了宁夏滨河粉土路基在交通荷载下的变形机理。周德泉等(2013)发现级配不良的花岗岩残积土受到的循环荷载越大,某次压缩总变形和永久变形也越大,且循环荷载作用后的压实填土遇水将产生湿化沉降。

刘家光等(2023)以土石混填料为研究对象,对张勇等(2009)提出的累积应变预测模型进行了分析,提出了修正后的能适用于土石混填料的“塑性蠕变型”应变曲线的改进模型。针对土石混填料,郭万里等(2019)还建立了一个可以反映粒土在剪切过程中的颗粒破碎演化规律的数学模型。针对碎石材料,大量的室内外试验表明其回弹模量与碎石层内部应力状有关(曾俊等,2003),对此国内外学者提出了不同的碎石材料本构关系模型。此外,郑海君等(2023)还利用离散元法对散粒体介质剪切变形的宏观特征与细观机制进行了研究,从细观层面揭示试样剪切变形演化及剪切面贯通破坏规律。

本文采用动态直剪设备进行室内实验,对放置在剪切盒中的碎石材料施加恒定的法向荷载以及周期性的剪切荷载,探究不同应力属性下试样变形破坏规律,研究结果对于散体材料实验研究具有重要意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 实验仪器及样品

本试验采用的仪器为自主研发的DJZ-500大型动态直剪仪(Dang et al., 2022),该装置由动力系统、测量及伺服控制单元、剪切系统、剪切盒组成。伺服液压系统提供恒定和动态负载。剪切系

统由力、位移传感器和剪切箱组成。

如图1所示,剪切箱分为上下两部分,尺寸为 $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。在试验过程中,上部剪切箱固定,下部可水平移动以进行剪切。该装置可通过传感器测量法向力、剪切力以及剪切位移。试验过程中记录法向力、剪切力、时间和剪切位移,数据记录间隔为 $100\text{ ms}$ 。

本试验使用的碎石试样来源于江苏扬州,莫氏硬度为4.0,平均粒径为 $9\text{ mm}$ ,堆积密度为 $1729.3\text{ kg/m}^3$ ,孔隙率为40.4%。试验前将碎石试样逐批放入烘干机进行烘干,保证每组试样含水率均为0。每次试验采用分层法逐层添加碎石试样,保证颗粒均匀分布。同时,控制碎石的质量为 $23.5\text{ kg}$ ,在剪切盒内高度为 $170\text{ mm}$ ,以确保相同的密度和压实程度。

### 1.2 实验方案

如表1所示,试验中试样受到的法向应力恒定,均为 $250\text{ kPa}$ 。所有试验可分为两种类型:一是稳定剪切应力(CSL)条件下的剪切强度测试,二是周期性剪切应力条件下的滑移试验(DSL)。第一类试验的过程分为加载阶段和保持阶段。表中,CSL表示恒定剪切荷载组;DNL表示动态剪切荷载组; $\sigma$ 表示法向应力; $\tau_v$ 表示剪切应力的谷值; $\tau_p$ 表示剪切应力的峰值; $f$ 表示剪切应力的频率。

试验整体加载过程中,法向应力和剪切应力随时间的变化情况如图2所示。如图2(a)所示,以 $125\text{ kPa/min}$ 的速率加载法向应力至设定值(①)并保持恒定,稳定 $180\text{ s}$ 后(②)以 $125\text{ kPa/min}$ 的速率加载剪切应力至设定值(③)并保持恒定(④),之后阶梯状抬升剪应力并保持,重复直至试样滑移破坏。第二类试验加载过程如图2(b)所示,①②③阶段与第一类试验相同,第④阶段为保持阶段,此时剪切应力和法向应力都已加载至设定值,共同保持 $60\text{ s}$ 后进入循环阶段(④),剪切应力以三角形波形开始周期性变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 确定抗剪强度

为了测定恒定法向荷载条件下碎石试样的抗滑强度,在CSL组试验中施加恒定的 $250\text{ kPa}$ 法向荷载,并采取阶梯加载的剪切应力加载方法进行试验。不同剪切应力作用下,剪切应力和剪切位

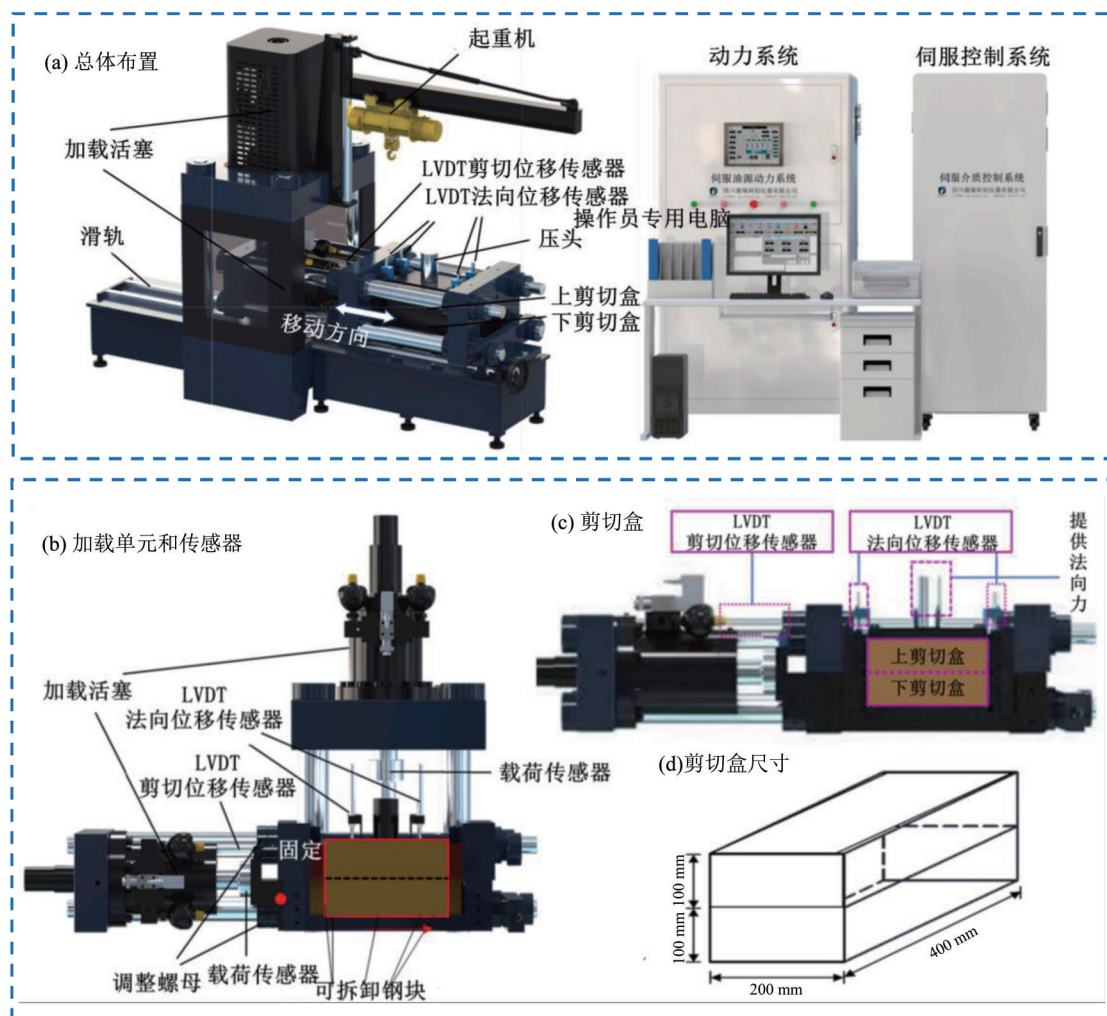


图1 DJZ-500的总体布置及主要部件

Fig. 1 The overall layout and main components of DJZ-500

移随时间的变化情况如图3所示。

整体试验分为加载阶段和试验阶段,在加载阶段,剪切应力以 $125\text{ kPa}/\text{min}$ 的速率增长。本阶段,剪切位移随着剪切应力增加而增加。在试验阶段,剪切应力分别稳定在 $475$ 、 $525$ 和 $575\text{ kPa}$ 时,剪切位移基本保持不变。而当剪切应力增加到 $625\text{ kPa}$ 时,试样发生突然滑移,剪切位移迅速增大,如图3中红色虚线框选部分所示。因此,将 $625\text{ kPa}$ 定为碎石试样在 $250\text{ kPa}$ 法向荷载下抗剪强度值。根据上述抗剪强度,设计DSL组试验,采用控制单一变量方法分别探究周期性剪切应力的峰值、谷值和频率对抗剪强度的影响。

## 2.2 峰值剪切应力的影响

DSL\_A组试验探究了周期性剪切应力的峰值对碎石滑移特性的影响,试验加载方式及相关结

果如图4所示。在该组试验中,剪切应力随时间的变化情况如图4(a)所示,即保持剪切应力的谷值( $350\text{ kPa}$ )和频率( $1\text{ Hz}$ )不变,将峰值剪切应力以 $50\text{ kPa}$ 的跨度控制在 $400\sim 550\text{ kPa}$ 之间。在单次试验过程中,法向应力、剪切应力和剪切位移随时间的变化情况如图4(b)所示。

由图4(b)可见,在法向应力保持在 $250\text{ kPa}$ 且剪切应力频率为 $1\text{ Hz}$ 、谷值为 $350\text{ kPa}$ 、峰值为 $550\text{ kPa}$ 的情况下,随着周期性剪切应力持续加载,碎石的剪切位移不断增大,并在加载过程中发生了一次跃变,即剪切位移在单位时间内的增长量发生了突增。将剪切位移随时间的变化曲线中具有这种特征点称为“滑移跃变点”,根据定义可知该点位于整个曲线的最大位移增量处。在跃变之后,剪切位移的增长速率恢复到跃变前的增长

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

组别	法向应力		剪切应力		$f/\text{Hz}$
	$\sigma/\text{kPa}$	$\tau_v/\text{kPa}$	$\tau_p/\text{kPa}$		
CSL	250	/	/	/	
DSL_A	250	350	400	1.0	
			450		
			500		
			550		
DSL_B	250	250	550	1.0	
		300			
		350			
		400			
DSL_C	250	350	550	0.1	
			0.5		
			1.0		
			2.0		

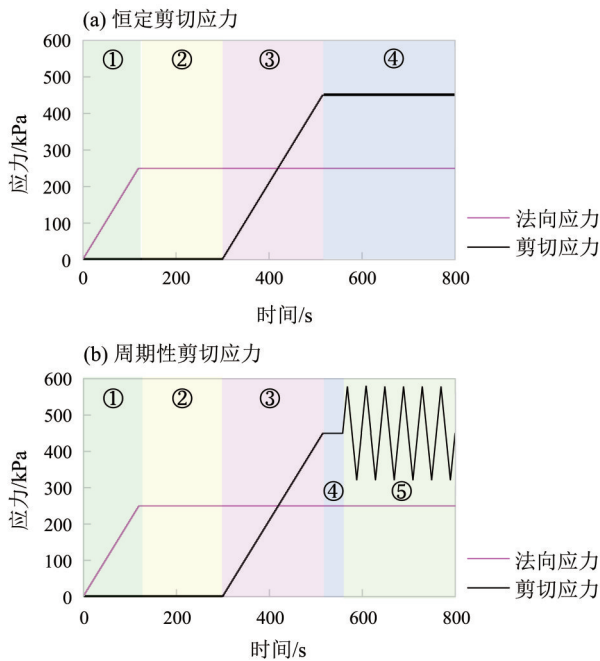


图 2 法向应力和剪切应力随时间的变化

Fig. 2 Variations of normal stress and shear stress with time

速率。在整个试验过程中，剪切位移的增速总体变缓。

不同剪切应力峰值条件下的剪切位移随时间的变化如图 4(c)所示。由图 4(c)可见，剪切应力峰值的增加引起了一定时间内剪切位移变化幅度

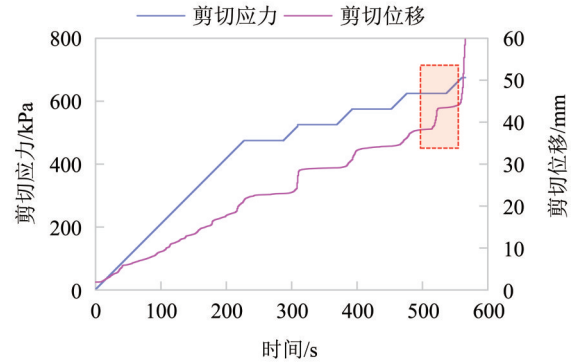


图 3 剪切应力及剪切位移随时间的变化

Fig. 3 Shear stress and displacement as functions of time

的增大。同时，在试验加载期内，以 500 和 550 kPa 峰值剪切应力加载的组别出现了“滑移跃变点”，以 400 和 450 kPa 峰值剪切应力加载的组别未出现这样的特征点。

值得注意的是，本组试验中所有组别的峰值剪切应力都没有超过恒定剪切荷载组测定出的剪切强度，即加载的剪切应力没有达到抗剪强度，但各组的剪切位移仍然有所增长。为了进一步分析剪切位移变化情况，对图 4(c)进行局部放大，如图 4(d)所示。从图中可以看出，随着周期性剪切应力持续加载，剪切位移也呈现出了相应周期性变化，并且随着剪切应力峰值的增大，剪切位移的周期性波动幅度有所增大。这是因为周期性剪切应力会导致碎石颗粒的孔隙率产生从小到大的周期性变化。在此变化中，颗粒反复碰撞、挤压，在剪切应力增大时产生一定弹性变形，剪切应力减小时弹性变形恢复，剪切位移便呈现出增大、减小交替进行的特征。在弹性变形范围内，剪切应力越大，引起的弹性变形也就越大。因此，随着剪切应力峰值增大，剪切位移的周期性波动幅度就越大。同时，剪切位移虽然有上下波动特征，但总体呈现出增大的趋势，且随着峰值剪切应力的增大此趋势也更为明显。这是因为随着剪切应力的增大，碎石颗粒的变形逐渐由弹性变形转变为塑性变形，当剪切应力卸载时，无法还原的塑性变形决定了剪切位移的总体趋势增大。从图 4(d)可以看出，当峰值剪切应力为 400 和 450 kPa 时，在试验期内碎石颗粒几乎不产生塑性变形，而当峰值剪切应力增大到 500 和 550 kPa 时，塑性变形逐次累积，在位移图上形成了较大增量。

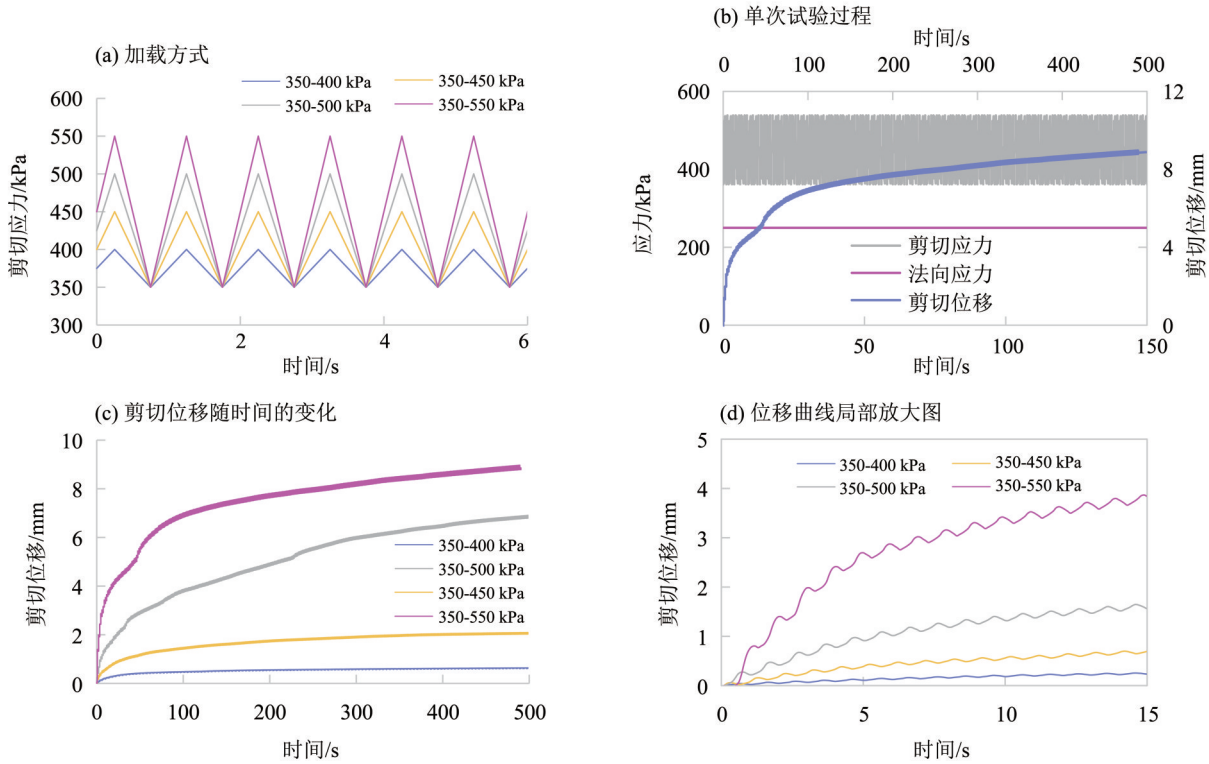


图 4 DSL\_A 组加载方式及结果  
Fig. 4 Loading methods and results of group DSL\_A

2.3 谷值剪切应力的影响

DSL\_B 组试验探究了周期性剪切应力峰值对碎石滑移特性的影响, 试验结果如图 5 所示。在该组试验中, 剪切应力随时间的变化如图 5(a) 所示, 即保持剪切应力的峰值 (550 kPa) 和频率 (1 Hz) 不变, 以 50 kPa 振荡幅度, 将谷值剪切应力控制在 250~450 kPa 之间。在单次试验过程中, 法向应力、剪切应力和剪切位移随时间的变化如图 5(b) 所示。

由图 5(b) 可见, 在法向应力保持在 250 kPa, 且剪切应力频率为 1 Hz, 谷值为 300 kPa, 峰值为 550 kPa 的情况下, 随着周期性剪切应力的持续加载, 碎石的剪切位移在试验期内发生了两次较小幅度的滑移跃变, 具有两个“滑移跃变点”。与 DSL\_A 组类似, 在整个试验过程中, 剪切位移的增速总体呈现出变缓慢趋势。

不同剪切应力谷值条件下的剪切位移随时间的变化图 5(c) 所示。从图中可以看出, 剪切应力谷值的减小引起了一定时间内剪切位移变化幅度的增大。同时, 在试验加载期内, 以 400 和 450 kPa 谷值剪切应力加载的组别没有出现“滑移跃变点”, 而以 250、300 和 350 kPa 峰值剪切应力

加载的组别均出现了“滑移跃变点”。对图 5(c) 进行局部放大, 如图 5(d) 所示。从图中可以看出, 该组剪切位移具有与 DSL\_A 组中相似的特征。

2.4 剪切应力频率的影响

DSL\_C 组试验探究了周期性剪切应力的频率对碎石滑移特性的影响, 试验结果如图 6 所示。在该组试验中, 剪切应力随时间的变化如图 6(a) 所示, 即保持剪切应力的峰值 (550 kPa) 和谷值 (350 kPa) 不变, 改变剪切应力的频率 (0.1、0.5、1、2 Hz)。在单次试验过程中, 法向应力、剪切应力和剪切位移随时间的变化如图 6(b) 所示, 整体趋势与前两组试验类似。

不同频率剪切应力条件下, 剪切位移随时间的变化图 6(c) 所示。从图中可以看到, 在试验组别内, 剪切应力频率越大, 试验期内剪切位移变化幅度越大。同时, 在试验加载期内, 以频率为 1 和 2 Hz 的剪切应力加载的组别出现了“滑移跃变点”, 以频率为 0.1 和 0.5 Hz 的剪切应力加载的组别没有“滑移跃变点”。对图 6(c) 进行局部放大可见, 剪切应力的频率越大, 剪切位移的波动频率也越大, 如图 6(d) 所示。

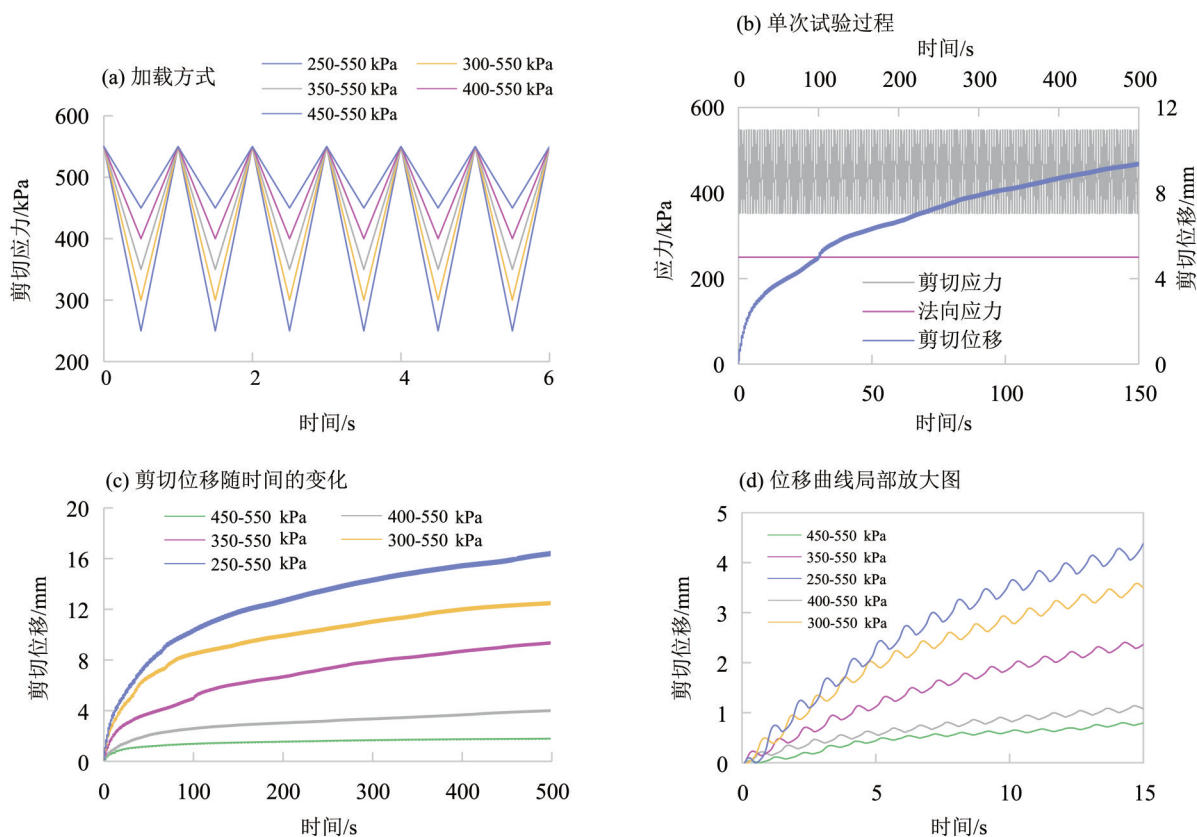


图 5 DSL\_B组加载方式及结果

Fig. 5 Loading methods and results of group DSL\_B

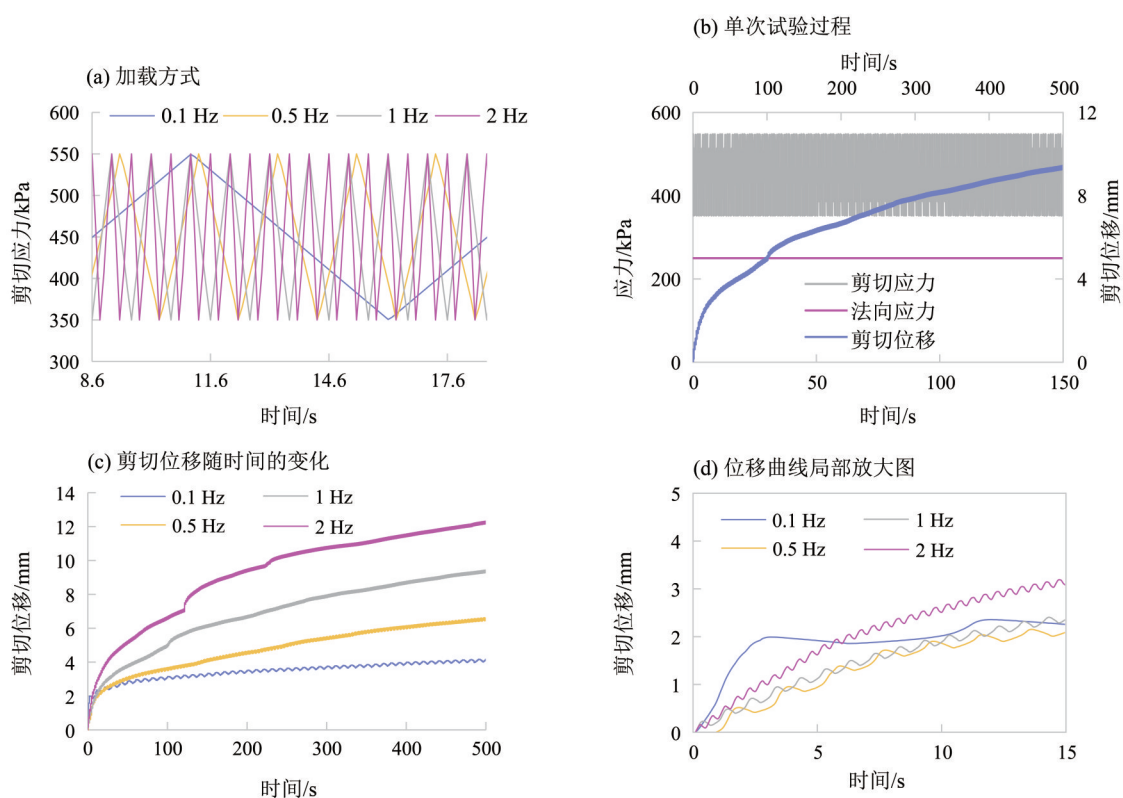


图 6 DSL\_C组加载方式及结果

Fig. 6 Loading methods and results of group DSL\_C

2.5 物理机制及能量分析

2.5.1 物理机制分析 对各组试验的位移-时间曲线进行分析, 可以发现各组试验曲线形成的物理机制是相似的, 即: 在剪切应力的作用下, 不规则排列的碎石颗粒会沿着具有最低滑移阻力的界面发生微小滑移, 而这样的滑移导致碎石颗粒的重新排列, 进而引起应力重新分布, 滑移面两侧颗粒内应力会显著增加, 形成法向应力集中。当应力集中引起碎石颗粒内部产生微裂纹后, 随着周期性剪切应力的持续作用, 应力重新分布次数会不断增加, 颗粒内部应力集中效应不断累积, 且剪切应力越大, 应力集中的累积效应越明显。在应力集中的过程中, 碎石内部微裂纹不断扩展, 最终将引起部分碎石颗粒的破碎, 形成新的更弱的接触面并发生一段较大幅度的滑移, 即为本文中定义的滑移跃变点。破裂后的碎石颗粒影响了整体的级配条件, 更细小的颗粒会在应力作用下填充至原有的孔隙中, 从而降低整体孔隙度, 因此在跃变之后, 剪切位移的增长速率会恢复到甚至低于跃变前的增长速率。

2.5.2 能量分析 为进一步确定滑移跃变点的位置, 对三组试验中单位周期下的剪切位移增量随循环加载次数的变化进行分析, 结果如图 7(a)、图 8(a)以及图 9(a)所示。在整个试验过程中, 剪切位移增量呈现出局部波动特点, 这符合之前对剪切位移具有局部周期性的分析, 即在每一个周期内位移增量都包含有部分甚至全部可恢复的弹性变形量。

对于具有滑移跃变点的组别, 根据确定的滑移跃变点位置, 计算发生跃变前剪切应力所做功的能量密度; 对于不具有滑移跃变点的组别, 计算整个试验期内的剪切能量密度。剪切能量密度随剪切应力峰值、谷值以及频率的变化情况如图 7(b)、图 8(b)以及图 9(b)所示。

由图 7(a)可知, 峰值剪切应力越大, 滑移跃变点处剪切位移增量越明显。本组试验中, 发生滑移跃变的剪切能量密度高于 2 506.2 kPa·mm, 而不具有滑移跃变点的组别即使经过了整个试验期的积累, 剪切能量密度依旧低于 958.9 kPa·mm。

由图 8(a)可知, 谷值剪切应力越小, 滑移跃变点处剪切位移的增量越明显, 发生滑移跃变所需要的周期数越少。本组试验中, 发生滑移跃变

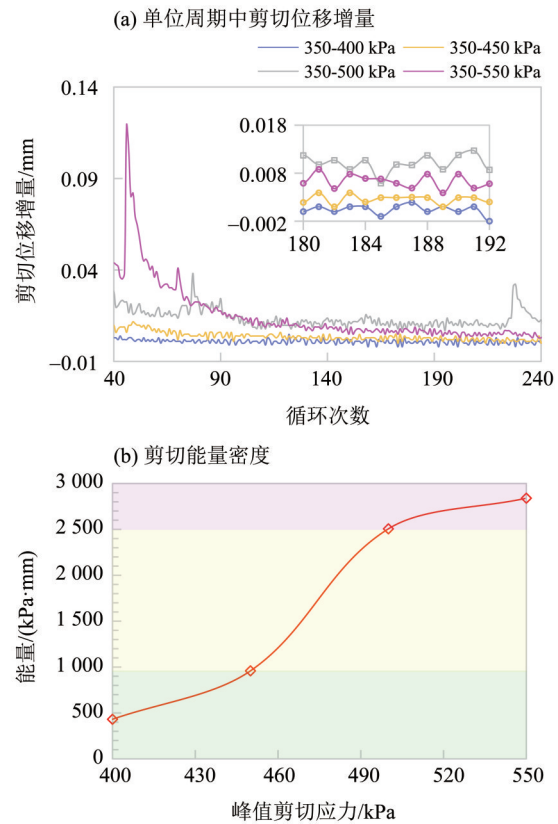


图 7 DSL\_A 组位移增量及能量分析图  
Fig. 7 Displacement increment and energy analysis diagram of group DSL\_A

的组别剪切能量密度均在 3 154.2 kPa·mm 以上, 而不具有滑移跃变点的组别剪切能量密度均在 2 235.4 kPa·mm 以下。

由图 9(a)可知, 剪切应力的频率越大, 滑移跃变点处剪切位移的增量越明显。本组试验中, 发生滑移跃变的组别剪切能量密度均在 3 154.2 kPa·mm 以上, 而不具有滑移跃变点的组别即使经过了整个试验期的积累, 剪切能量密度仍在 2 430.8 kPa·mm 以下。

由上述结果可知, 各组试验的能量值是影响碎石材料是否出现滑移跃变点的重要因素, 但碎石材料并不具有一个确切的控制滑移跃变的能量密度阈值, 但可以找到过渡区域的保守能量密度范围。以试验中未出现滑移跃变点的最高能量密度和出现滑移跃变点的最低能量密度为断点, 将碎石的滑移状态划分为三种类型, 如图 7(b)、图 8(b)以及图 9(b)所示, 以绿色区域表示稳定区、黄色区域表示过渡区、红色区域表示跃变区, 即:

- 1) 稳定区。能量低于 958.9 kPa·mm 时, 碎石

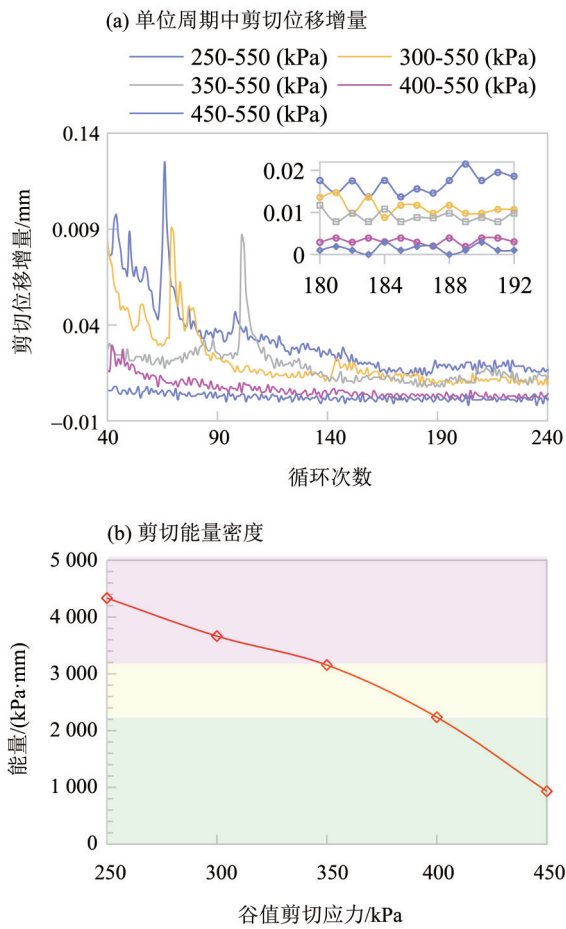


图8 DSL\_B组位移增量及能量分析图

Fig. 8 Displacement increment and energy analysis diagram of group DSL\_B

的剪切位移不断增加, 但不会出现滑移跃变。

2) 过渡区。能量高于 958.9 kPa·mm 且低于 3 154.2 kPa·mm 时, 碎石的剪切位移不断增加, 但是否会出现滑移跃变还会受到剪切应力的加载方式影响, 不能确定该区域是否一定或不会出现滑移跃变。

3) 跃变区。能量高于 3 154.2 kPa·mm 时, 碎石的剪切位移不断增加, 而且会出现滑移跃变。

### 3 结论

1) 在峰值小于碎石材料抗剪强度的剪切应力反复作用下, 碎石材料会发生滑移跃变, 即剪切位移在某段时间内突增。在位移突增过程中, 碎

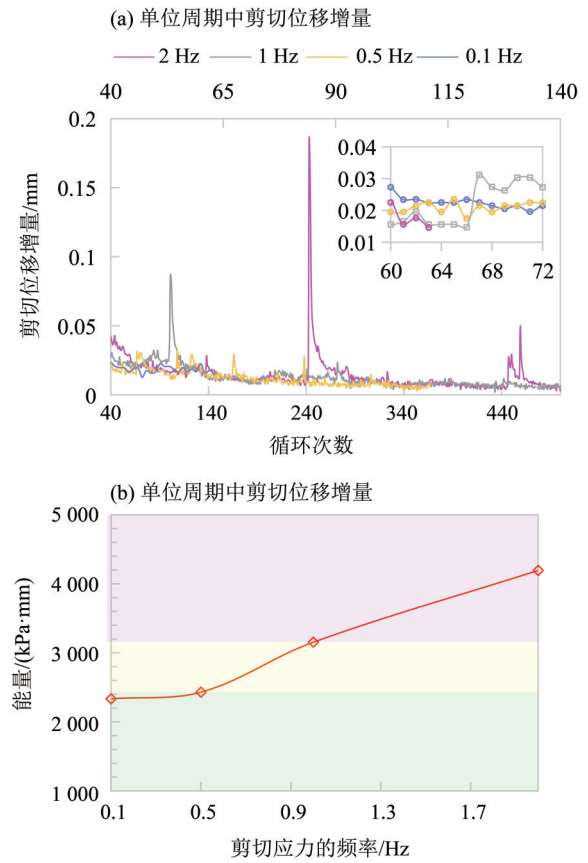


图9 DSL\_C组位移增量及能量分析图

Fig. 9 Displacement increment and energy analysis diagram of group DSL\_C

石材料被剪碎, 改变了材料的级配特性, 因此滑移跃变后位移的增速又会恢复甚至低于跃变前的水平。

2) 碎石材料的滑移特征会受到周期性剪切应力的峰值、谷值和频率影响。剪切应力的峰值越大、谷值越小、周期越大, 碎石材料的剪切位移在加载初期的增长越快, 在整个试验期内增量越大, 越容易出现滑移跃变。

3) 碎石剪切过程中, 是否出现滑移跃变点以及出现滑移跃变的时间先后与剪切位移方向的能量密度大小有关。在一定试验期内, 能量密度越大, 滑移跃变越可能发生, 且从开始加载至发生滑移跃变所需要的时间越短。可根据能量密度将碎石的滑移状态划分为稳定区、过渡区和跃变区。

## 参考文献:

- 邓如勇, 2020. 滇池泥炭质土层盾构隧道运营期沉降特性研究[J]. 现代隧道技术, 57(S1): 433-441.
- 丁祖德, 黄娟, 袁铁映, 等, 2017. 昆明泥炭质土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 38(12): 3627-3634.
- 郭林, 蔡袁强, 谷川, 等, 2013. 循环荷载下软黏土回弹和累积变形特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 47(12): 2111-2117.
- 郭万里, 朱俊高, 钱彬, 等, 2019. 粗粒土的颗粒破碎演化模型及其试验验证[J]. 岩土力学, 40(3): 1023-1029.
- 黄娟, 丁祖德, 袁铁映, 等, 2017. 循环荷载作用下泥炭质土的动变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 38(9): 2551-2558.
- 黄娟, 宋银涛, 袁铁映, 等, 2023. 循环荷载作用下昆明泥炭质土累积变形试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 54(6): 2190-2196.
- 刘家光, 宋杨, 王清洲, 等, 2023. 循环荷载作用下土石混填料的蠕变模型研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-8[2023-10-02]. <https://www.youfabiao.com/cjkxyyb/?msclkid=112f24cf42fc1a9f86c34249f616b240>.
- 马文国, 张刚, 封少博, 等, 2023. 宁夏滨河粉土路基在循环荷载下的变形特性[J]. 宁夏工程技术, 22(1): 37-43.
- 穆锐, 2019. 贵阳地区红黏土动力特性及其动本构关系研究[D]. 贵阳: 贵州大学: 5-6.
- 史新杰, 2014. 大粒径碎石路基施工技术及检测方法研究[D]. 天津: 河北工业大学.
- 吴海泳, 2017. 基于高速公路大粒径碎石路基施工及检测技术研究[J]. 交通世界, (7): 84-85.
- 谢栋, 吴建奇, 2019. 循环荷载作用下红黏土累积变形研究[J]. 地震工程学报, 41(6): 1623-1629.
- 许坤, 谢建斌, 曾林瑶, 等, 2021. 泥炭质土地区盾构隧道列车运营期沉降研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 43(1): 71-75.
- 闫春岭, 唐益群, 刘莎, 2011. 地铁荷载下饱和软黏土累积变形特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 39(7): 978-982.
- 闫春岭, 侯晓兵, 陈敦广, 等, 2017. 地铁荷载下隧道周围粘性土变形的影响因素[J]. 铁道科学与工程学报, 14(9): 1942-1950.
- 张勇, 孔令伟, 郭爱国, 等, 2009. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 30(6): 1542-1548.
- 赵学东, 2018. 高速公路碎石路基施工与路用性能研究[J]. 公路工程, 43(6): 194-197+221.
- 曾俊, 周志刚, 2003. 碎石材料本构关系模型综述[J]. 公路与汽运, (3): 36-39.
- 郑海君, 唐珏凌, 潘远阳, 等, 2023. 散粒体介质剪切变形的宏观特征与细观机制[J]. 实验室研究与探索, 42(4): 27-33.
- 周德泉, 谭焕杰, 徐一鸣, 等, 2013. 循环荷载作用下花岗岩残积土累积变形与湿化特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 44(4): 1657-1665.
- DANG W G, TAO K, HUANG L C, et al, 2022. A new multi-function servo control dynamic shear apparatus for geomechanics[J]. Measurement, 187: 110345.

(责任编辑 王海蓉)