DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0365

位移幅值和频率对残积土－混凝土界面循环剪切特性的影响

任 宇[1]，马克超[2]，刘飞禹[2*]

（1. 上海核工程研究设计院股份有限公司，上海 200233；2. 上海大学 力学与工程科学学院，上海 200444）

摘要：花岗岩残积土－混凝土界面的力学特性对整体结构的稳定性和安全性至关重要。为了探究剪切幅值和剪切频率对花岗岩残积土－混凝土界面循环剪切特性的影响，设计不同剪切幅值（1，3，6 和 9 mm）和不同剪切频率（0.1，0.5，1 和 2 Hz）的水平循环直剪试验，分析剪切应力－剪切位移曲线、最大剪切应力、竖向位移等指标的变化规律。结果表明，随着剪切幅值的增加，最大剪切应力逐步增大，但增加速率逐渐减小；竖向位移主要在前 20 次循环内显著变化，随后趋于稳定，显示出土体颗粒在初始循环中的重排效应；剪切刚度在高剪切幅值条件下减小，而阻尼比则显示出波动特性，表明土体的能量耗散机制受剪切幅值的影响。数值模拟结果表明，随着循环次数的增加，土体中力链数量增多，多数力链由 3 个颗粒组成；法向和切向接触力各向异性的主方向与剪切方向密切相关，其主方向会随剪切方向偏转，偏转角约为 35°。

关键词：土力学；土与结构界面；剪切幅值；剪切频率；直剪试验；数值模拟

中图分类号：TU 43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)01－0287－11

第 一 作 者：任 宇（1984－），现任高级工程师，主要从事核电厂结构及岩土工程方面的研究工作。E-mail：renyu2116@snerdi.com.cn

***通信作者**：刘飞禹（1976－），现任教授，主要从事地基处理和土动力学方面的研究工作。E-mail：lfyzju@shu.edu.cn

Impact of displacement amplitude and frequency on the cyclic shear characteristics of residual soil-concrete interfaces

REN Yu[1], MA Kechao[2], LIU Feiyu[2*]

(1. *Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co*., *Ltd*., *Shanghai* 200233, *China*;
2. *College of Mechanics and Engineering Science*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200444, *China*)

Abstract: The mechanical behavior of the granite residual soil-concrete interface is critical to the overall stability and safety of geotechnical structures. To investigate the effects of shear amplitude and shear frequency on the cyclic shear characteristics of granite residual soil-concrete interfaces, a series of large-scale horizontal cyclic direct shear tests were conducted, varying shear amplitudes (1, 3, 6 and 9 mm) and shear frequencies (0.1, 0.5, 1 and 2 Hz). Key parameters, including shear stress-displacement response, maximum shear stress, and vertical displacement, were analyzed. The results indicate that maximum shear stress increases with shear amplitude, although the growth rate gradually decreases. Significant changes in vertical displacement primarily occur within the first 20 cycles, after which it stabilizes, reflecting the particle rearrangement effects during the initial cycles. Shear stiffness decreases at higher shear amplitudes, while the damping ratio exhibits a fluctuating trend, suggesting that the energy dissipation mechanism of the soil is influenced by shear amplitude. Numerical simulations further reveal that, as the number of

收稿日期：2025－05－29；**修回日期**：2025－08－21

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52378355）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52378355)

cycles increases, the number of force chains within the soil also rises, with most force chains consisting of three particles. The principal directions of normal and tangential contact forces are closely related to the shear direction, with the principal direction deflecting approximately 35° in response to changes in shear direction.

Key words: soil mechanics; soil-structure interface; shear displacement amplitude; shear frequency; direct shear test; numerical simulation

First author: REN Yu (1984－), senior engineer, is engaged in research on structural and geotechnical engineering in nuclear power plants. E-mail: renyu2116@snerdi.com.cn

***Corresponding author:** LIU Feiyu (1976－), professor, is engaged in research on foundation treatment and soil dynamics. E-mail: lfyzju@shu.edu.cn

1　引　言

花岗岩残积土是我国东南沿海地区广泛分布的区域特殊土体，由花岗岩原地风化形成，其抗蚀性差、水稳定性弱，且常分布于低山丘陵地带，易因降雨等因素引发滑坡、泥石流等地质灾害[1]。花岗岩残积土与结构物(如混凝土支护、桩基等)界面的力学特性，直接关系到边坡、基坑等工程的稳定与安全[2]。

国内外学者通过各种室内试验，对土与结构作用机制及影响因素进行了深入研究，在宏观剪切特性方面取得了重要进展。H. Q. Dou 等[3]通过环剪试验研究发现，界面粗糙度和土体含水率是影响土-岩界面抗剪强度的主要因素，并建立了相应的力学模型。刘世奥等[4]提出新型三轴试验方法，在试样中预制倾角界面，以模拟土体沿预设面滑移的剪切过程，可调控结构面粗糙度，从而有效研究土-结构界面的力学行为。卢 川等[5]通过单剪试验发现，钙质砂临界内摩擦角高于石英砂，但相变角较低，颗粒破碎会使其最大剪胀角降低而相变角提高，并建立了考虑相对密实度的内摩擦角计算模型。W. X. Zeng 等[6]针对加筋土界面开展了直剪试验，结果表明增大筋材横肋厚度可降低界面应力-剪胀相变角、增大剪切带厚度，并提高循环荷载作用下界面接触力主方向的倾角。

尽管直剪试验存在剪切面应力分布不均等缺陷，但由于操作简便，仍是研究土与结构界面广泛使用的方法。L. Tang 等[7]通过室内直剪试验，探讨了冻融循环条件下土石混合料与不同粗糙度混凝土界面的强度劣化机制。M. Ying 等[8]开展了循环法向荷载作用下的系列直剪试验，分析了水平与竖向循环法向荷载对界面剪切强度的影响。S. Zhang[9]研究了不同法向荷载作用下砂－混凝土界面的剪切特性，研究发现动态法向荷载降低了砂－混凝土界面处的抗剪强度，加速了剪应力峰值处剪切位移的发生。F. Liu 等[10]开展了不同含石量的土石混合体－混凝土界面的循环剪切试验，研究表明 75%含石量的土石混合料下，土－结构界面剪切强度达到最大值。上述研究在宏观层面深化了对土－结构界面剪切行为的认识，解决了界面抗剪强度主要影响因素识别、强度预测模型构建等问题。

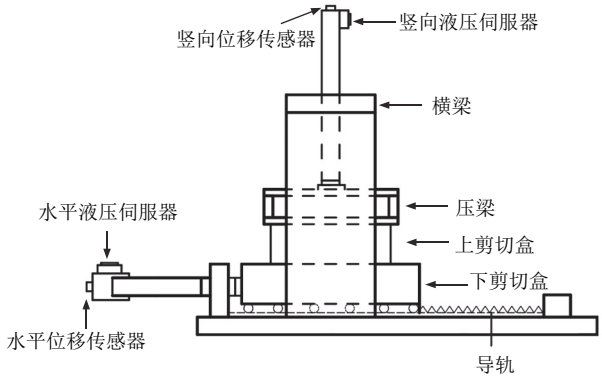
传统物理试验受制于模型尺寸和观测手段的限制，为进一步揭示界面的细观作用机制，利用离散元数值模拟近年来被广泛应用于界面研究。离散元方法能够捕捉颗粒间的微观接触行为，提供宏观试验难以获取的细观参数[11]。基于离散元法，学者们研究了粗糙度[12]，颗粒球度[13]和块石强度[14]等因素对界面力学性质的影响。刘飞禹等[15]分析了剪切过程中土体孔隙率的变化，发现试样上部 5 cm 范围内的颗粒孔隙率随剪切进行不断增加，而其他部位显示出相反的趋势，且距离界面越远，剪切对颗粒孔隙率的影响越弱。T. Pei 和 T. Qiu[16]针对干土中颗粒相互作用主导的阻尼特性研究不足的问题，基于离散元法建立模型模拟循环扭剪试验，通过参数研究，分析剪应变、围压和孔隙比对接触能量耗散分布的影响。M. S. Huang 等[17]通过恒定法向刚度条件下的界面直剪试验与离散元建模，从宏观和细观层面研究土－结构界面循环剪切特性，系统探讨孔隙率、土体密度、法向应力等初始状态对循环行为的影响。

综上所述，目前针对花岗岩残积土－混凝土界面在循环荷载作用下的动力响应规律仍缺乏系统研究，尤其是界面细观机制尚不清晰，颗粒间力链的演化过程缺乏系统揭示。因此，本文通过大型直剪试验，研究界面动力剪切特性，并运用离散元方法分析颗粒位移、接触力链、组构各向异性等细观参数变化，以深化对循环荷载作用下土－结构界面相互作用机制的理解。

2　试验设备及方案

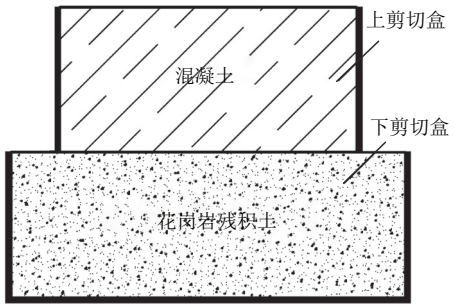
2.1　试验设备及材料

本研究中采用的大型动态直剪仪如图 1[18]所示，其剪切盒上、下净尺寸分别为 305 mm×305 mm×150 mm 和 405 mm×305 mm×150 mm，满足规范(ASTM－2017)对仪器尺寸的要求。



(a)　设备结构

(a) Structure of apparatus



(b)　剪切路径

(b) Shear path

图 1　动态大型直剪试验装置结构图及剪切路径[18]

Fig.1　Dynamic large-scale direct shear test apparatus structural diagram and shear path[18]

试验所用花岗岩残积土采自广州市增城区，其颗粒级配曲线如图 2[18]所示，基本物理性质如表 1 所示，滤纸法测得的基质吸力如表 2 所示。混凝土试块则依据 N. Barton 和 V. Choubey[19]的标准结构面粗糙度曲线，并遵循《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)制备，粗糙度为 9.5，具体形态如图 3[19]所示。

2.2　试验方案

在试验开始前，先将花岗岩残积土充分烘干，按试验要求计算并均匀喷加适量水分，使土体含水率达到 14%。混合均匀后，密封静置 24 h，以保证含水率分布均匀。装样过程中，首先将调湿后的花岗岩残积土分 5 层依次填入下剪切盒，每层均采用标准夯实工具进行压实并刮平，以确保密实度均匀一致，最终使试样干密度达到 1.4 g/cm^3。随后，将制作好的混凝土试块置于上剪切盒中，并调整位置以保证与下剪切盒紧密贴合。试验中，剪切荷载采用正弦波形，根据刘飞禹等[20]的研究结果，确定土体含水率为花岗岩残积土最优含水率 14%，法向应力为 100 kPa。试验进行至剪切循环 100 次后停止，所有试验步骤均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行，具体试验方案详见表 3。

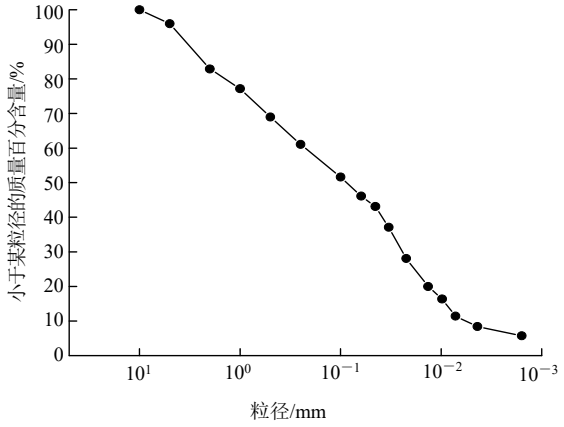


图 2　试验用花岗岩残积土的粒径分布曲线[18]

Fig.2　Particle size distribution curve of granite residual soil used in test[18]

表 1　试验用花岗岩残积土的物理参数

Table 1　Physical parameters of granite residual soil used in test

天然含水率 (natural water content) w_0/%	最优含水率 (optimum water content) w_{opt}/%	土粒相对密度 (relative density of soil particles) d_s	塑限 (plastic limit) w_p/%	液限 (liquid limit) w_l/%
23.8	14.3	2.69	23.2	41.5

表 2　试验用花岗岩残积土含水率与基质吸力关系

Table 2　Relationship between soil water content and matrix suction of granite residual soil used in test

含水率(water content)w/%	基质吸力(matric suction)s/kPa
14	1 478
19	583
24	23
29	1

3　试验结果与分析

3.1　剪切幅值对界面剪切特性的影响

图 4 展示了土－混凝土界面在不同剪切幅值下



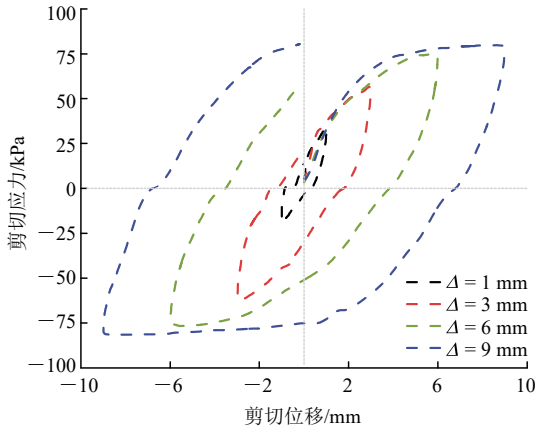
图 3　粗糙度系数 $JRC = 9.5$ 的混凝土试块[19]

Fig.3　Concrete specimen with a roughness coefficient $JRC = 9.5$[19]

表 3　循环剪切试验方案

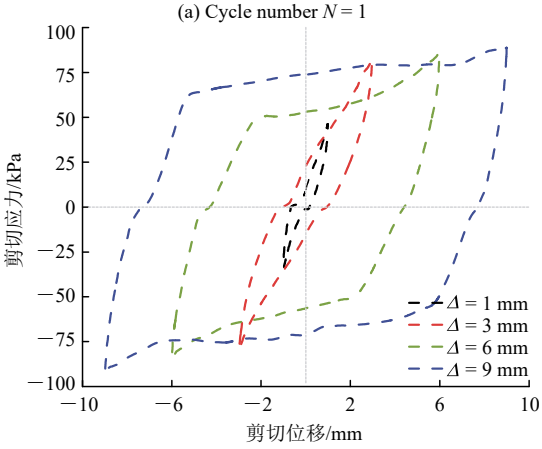
Table 3　Cyclic shear test scheme

含水率 (water content) w/%	节理粗糙度系数 (joint roughness coefficient) JRC	剪切幅值 (shear amplitudes) A_w/mm	剪切频率(shear frequencies) f/Hz
14	9.5	1，3，6，9	0.1
		3	0.1，0.5，1，2



(a)　循环次数 $N = 1$

(a) Cycle number $N = 1$



(b)　循环次数 $N = 100$

(b) Cycle number $N = 100$

图 4　不同剪切幅值下界面剪切应力－剪切位移曲线

Fig.4　Interface shear stress-shear displacement curves under different shear amplitudes

的剪切应力与剪切位移关系曲线。试验中，含水率为 14%，粗糙度系数为 9.5，法向应力为 100 kPa。在 4 种剪切幅值条件下，界面峰值剪切应力表现为循环强化特征，随循环次数的增加而增长，但增长速率逐渐减小。随着剪切幅值的增加，界面剪切应力的绝对值和滞回曲线围成的面积呈现出明显的增大趋势。当剪切幅值为 1 和 3 mm 时，随着循环次数的增加，滞回曲线逐渐向“细长型”演变；而当剪切幅值提升至 6 和 9 mm 时，滞回曲线则表现出向外扩展的趋势，形状更加饱满。在同一循环周期中，正向剪切和反向剪切的最大剪应力数值上并不完全相等。这种各向异性现象，一方面由于混凝土粗糙面在剪切方向上并非完全对称，另一方面则是由于在循环剪切过程中，界面周围的土颗粒会随剪切方向发生重新排列，排列状态会对剪切应力产生影响。

图 5 为不同剪切幅值条件下，土－混凝土界面最大剪切应力－剪切幅值曲线。结果表明，在相同的循环次数下，界面的最大剪切应力的绝对值随着剪切幅值的增大而增长，但其增长率逐渐减小。特别是在剪切幅值超过 3 mm 后，最大剪切应力的变化量明显减小，显示出界面在高剪切幅值条件下的力学特性趋于阈值。具体而言，剪切幅值为 1，3，6，9 mm 时，循环过程中的双向平均最大剪切应力分别为 33.9，81.27，86.61 和 90.97 kPa。分析认为剪切应力随剪切幅值增大是因为：土颗粒与混凝土表面产生机械咬合，随着位移幅值增大，更多的土颗粒被卷入凹槽中，咬合面积增加，需要更大的剪切力克服摩擦和颗粒重排阻力；其次，粗颗粒破碎产生的细颗粒填充空隙，提高了土体的密实度，当土颗粒再发生爬升、翻滚时，需要额外能量克服法向应力和周围土体对土颗粒位移的约束。

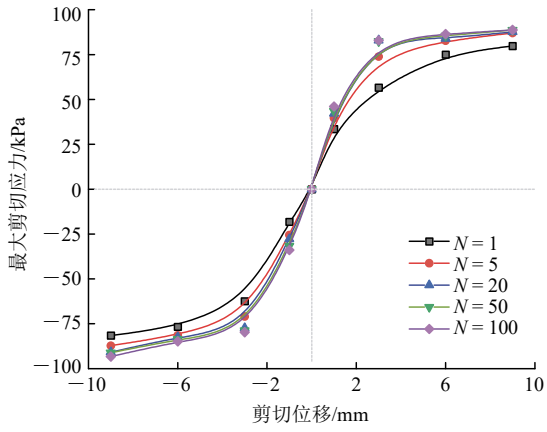


图 5　不同循环次数下界面最大剪切应力－剪切幅值曲线

Fig.5　Interface maximum shear stress-shear amplitude curves under different cycle numbers

图 6 展示了不同循环次数下土－混凝土界面竖向位移随剪切幅值的变化曲线(以收缩为正向)。分析表明，竖向位移的主要变化集中在前 20 次循环周期内，而在随后的 80 次循环中，竖向位移的增加速度显著减缓，增幅较小。这一现象是由于试验初期土体颗粒间的孔隙较大，在初始循环剪切过程中，土体颗粒的滑动、滚动和重新排列导致孔隙体积迅速减小，从而表现为显著的竖向位移；同时，土颗粒的破碎产生了更细的颗粒，这些细颗粒进一步填充了粒间空隙。而在剪切后期，随着颗粒接触点的增多和易破碎颗粒数量的减少，土体进一步收缩的空间受到限制，导致竖向收缩速率显著降低，土－混凝土界面的变形特性趋于稳定。在相同的循环次数下，界面的竖向位移随剪切幅值的增大而增大，表明剪切幅值越大，对土体结构的扰动作用越强。

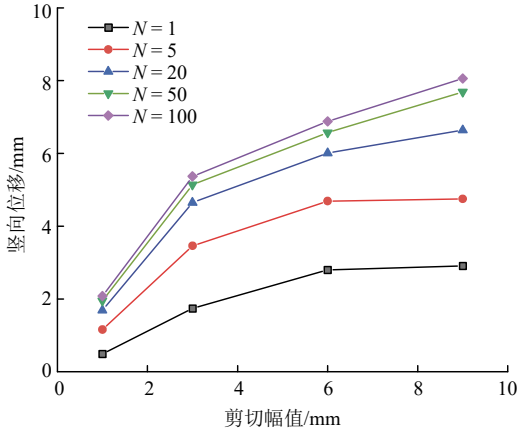


图 6　不同循环次数下界面竖向位移－剪切幅值曲线

Fig.6　Interface vertical displacement-shear amplitude curves under different cycle numbers

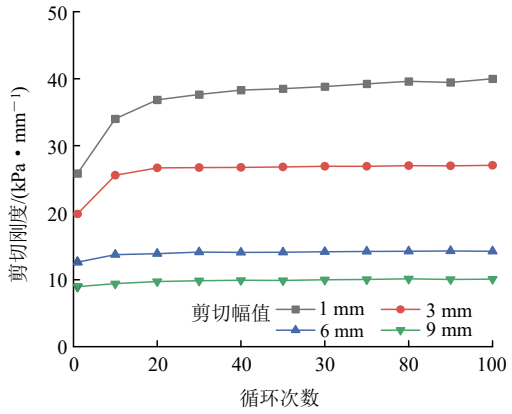
在土体动力学分析中，剪切刚度 K 与阻尼比 D 是刻画界面变形特征与能量耗散行为的关键指标，其计算方法分别如下：

$$K=\frac{\tau_{\max}+\tau_{\min}}{2A_{\mathrm{w}}} \tag{1}$$

$$D=\frac{A_{\mathrm{L}}}{4\pi A_{\mathrm{w}}}\left(\frac{1}{\tau_{\max}}+\frac{1}{\tau_{\min}}\right) \tag{2}$$

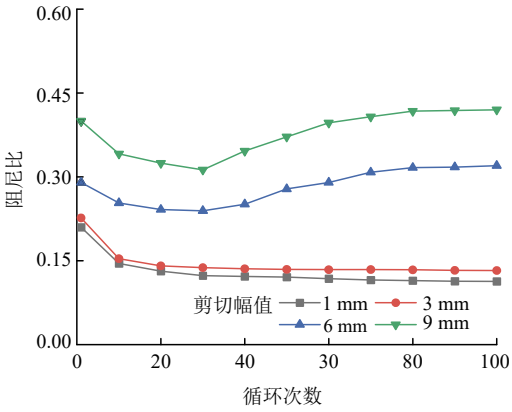
式中：K 为剪切刚度；D 为阻尼比；$\tau_{\max}$，$\tau_{\min}$ 分别为同一循环中的最大与最小剪应力的绝对值；A_{L} 为滞回曲线包围的面积；A_{w} 为剪切位移幅值。

图 7 给出了不同循环条件下土－混凝土界面剪切刚度与阻尼比的演化趋势。结果表明，随着循环幅值的增大，在相同循环次数下，剪切刚度呈下降趋势，而阻尼比逐步升高。这是由于大剪切幅值会



(a)　剪切刚度

(a) Shear stiffness



(b)　阻尼比

(b) Damping ratio

图 7　剪切幅值对剪切刚度和阻尼比的影响

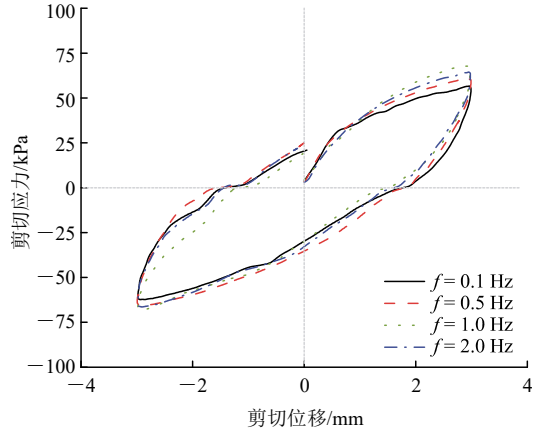
Fig.7　Influences of shear amplitude on shear stiffness and damping ratio

破坏土颗粒与混凝土表面原有的咬合结构，导致颗粒间力链网络断裂，并转向以滑动摩擦为主，此时界面抵抗变形的能力(即剪切刚度 K)下降，表现为应力－位移曲线斜率降低。试验数据表明，当剪切幅值 A_{w} 从 1 mm 分别提高至 3，6，9 mm 时，初始剪切刚度分别下降了 23.3%，51.1%和 65.4%。在大剪切幅值下，颗粒破碎、滚动摩擦及塑性变形等不可逆能量耗散占比提升，土体在加载－卸载过程中经历交替剪胀与剪缩，形成“蝴蝶”形应力路径，加剧能量耗散，表现为阻尼比增大。

当剪切幅值为 1，3 mm 时，界面剪切刚度在前 30 次循环内快速发展，后 70 次循环内保持相对稳定，而阻尼比表现出相反的变化规律。当剪切幅值为 6，9 mm 时，界面剪切刚度在历经 100 次循环后，仅有小幅提高，阻尼比表现出先降低而后提高的变化规律。

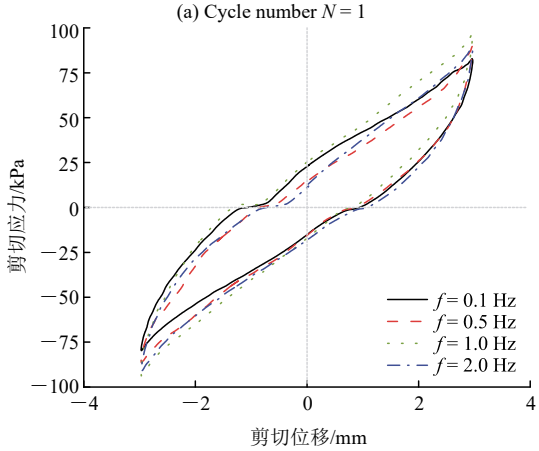
3.2　剪切频率对界面剪切特性的影响

图 8 为不同剪切频率下剪切应力－剪切位移曲线。由图 8 可知，随着剪切频率的提高，界面剪切应力先增大而后减小，当剪切频率为 1.0 Hz 时，界面剪切应力水平最高。界面剪切应力的增大主要集中在前 20 次循环内，在后续循环周期内，最大剪切应力仅呈现轻微波动。这是因为随着循环次数的增加，土体的孔隙比接近试验条件下的临界状态，颗粒重组空间受限，反复剪切导致颗粒破碎，在界面处形成低摩擦润滑层，削弱机械咬合作用，导致剪切强度不再显著增长。



(a)　循环次数 $N=1$

(a) Cycle number $N=1$



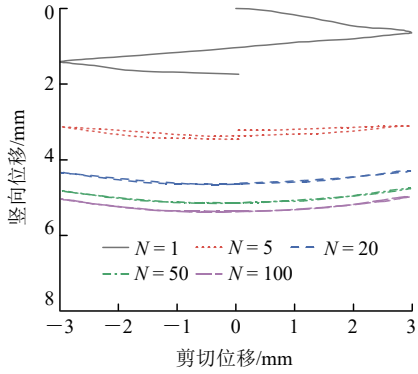
(b)　循环次数 $N=100$

(b) Cycle number $N=100$

图 8　不同剪切频率下的界面滞回曲线

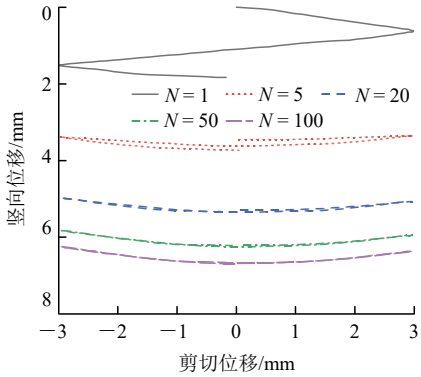
Fig.8　Shear stress-displacement responses of soil-concrete interface under various frequencies

图 9 展示了不同剪切频率下土体的竖向位移变化曲线，其中，正值表示土体在剪切过程中发生收缩。由于试验中剪切盒底面积保持恒定，竖向位移即可反映土体体积变化。根据冯大阔等[21]的研究，竖向位移 v 可分为可逆性竖向位移 v_{re} 和不可逆性竖向位移 v_{ir}。可逆性竖向位移 v_{re} 可由竖向位移 v 减去不可逆性竖向位移 v_{ir} 得到。不同剪切频率下，试样



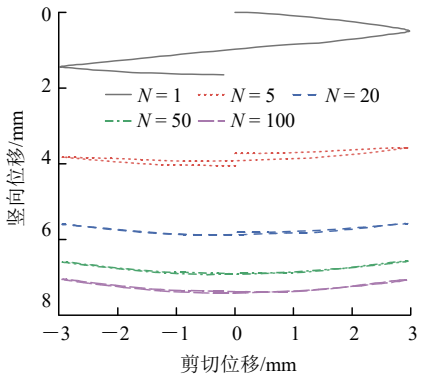
(a)　剪切频率 $f=0.1$ Hz

(a) Shear frequency $f=0.1$ Hz



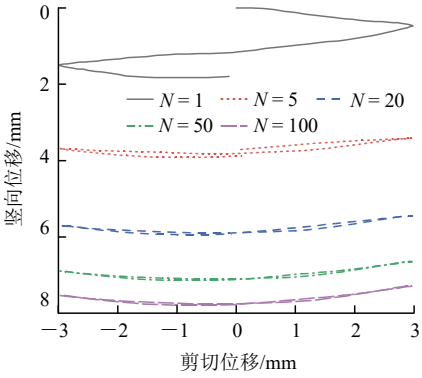
(b)　剪切频率 $f=0.5$ Hz

(b) Shear frequency $f=0.5$ Hz



(c)　剪切频率 $f=1$ Hz

(c) Shear frequency $f=1$ Hz



(d)　剪切频率 $f=2$ Hz

(d) Shear frequency $f=2$ Hz

图 9　剪切频率对界面竖向位移的影响

Fig.9　Effect of shear frequency on interface vertical displacement

界面总体呈现收缩现象，在前 20 次循环内，竖向位移增长速度较快，在接下来的循环中，逐步趋于稳定状态。此外，随着剪切频率的提高，土－混凝土界面的收缩量不断增长。通过比较图 6 中单个周期内的终始点位置，可以观察到不可逆性竖向位移 v_{ir} 始终呈现出持续增加的趋势，但其增长速率逐渐减小。这一现象导致在单个周期内，滞回曲线并未完全闭合，但其开口逐步减小。

在单个循环周期内，试验的剪切方向经历了 2 次反转，即剪切方向发生 2 次 180°转变。在反向剪切的过程中，正向剪切的影响依然占据主导地位，但这种影响会迅速减弱。从宏观角度来看，这种变化导致竖向位移的增加、体积的收缩；在微观层面上，土颗粒发生了重新排列，从高势能区域迁移至低势能区域。当反转后的剪切方向占据主导地位后，土颗粒将再次进行重新排列，并在低势能处不断旋转和翻滚，向高势能区爬升，从而引发体积的膨胀。当体积膨胀达到峰值时，系统将进行下一次剪切反转，进而形成一个周期性的循环过程。

土－混凝土界面最大剪切刚度和最大阻尼比如表 4 所示。剪切频率为 0.1～1 Hz 时，最大剪切刚度从 27.09 kPa/mm 逐步增加至 31.85 kPa/mm，显示出较强的关联性。这表明在低频剪切下，土体有更多时间进行重塑和应力释放，导致刚度降低。当频率提高时，土体在加载期间响应相对较快，从而使得其刚度增加。

表 4　土－混凝土界面最大剪切刚度及阻尼比

Table 4　Maximum shear stiffness and damping ratio of soil-concrete interfaces

剪切频率(shear frequencies)/Hz	最大剪切刚度(maximum shear stiffness)/(kPa • mm^{-1})	最大阻尼比(maximum damping ratio)
0.1	27.09	0.2265
0.5	29.33	0.2373
1	31.85	0.1866
2	30.02	0.2091

最大阻尼比在不同剪切频率下也表现出一定的波动。0.1 和 0.5 Hz 时，阻尼比分别为 0.226 5 和 0.237 3，随着频率的提升略有增加，然后在 1 Hz 时降至 0.186 6。2 Hz 时，阻尼比恢复至 0.209 1。这种波动表明不同频率下土体的能量耗散机制有所不同，影响了阻尼特性。通常而言，在低频情况下，土体内部的流动和塑性变形相对容易，导致较高的能量耗散；而在高频情况下，土体流动受限，会导致不同的耗散行为。

4　直剪试验的数值模拟分析

4.1　模型的建立及验证

采用离散元软件对花岗岩残积土－混凝土界面的直剪试验进行数值模拟研究。模型几何尺寸严格参照室内试验原型确定，剪切盒和混凝土试样均采用刚性墙体单元构建，剪切过程中通过控制下剪切盒施加水平位移，以模拟实际加载条件。为更好地模拟花岗岩残积土间的黏聚力，使用改进型黏聚抗转动接触模型(adhesive rolling resistance linear model)，该模型通过引力作用范围 D_0 和最大黏聚力 F_0 来调节颗粒之间的黏聚力，模型的具体构建情况及参数见图 10 和表 5。

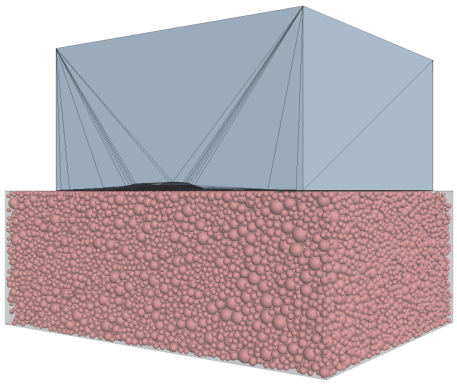


图 10　直剪试验三维模型

Fig.10　Three-dimensional model of direct shear test

表 5　直剪试验离散元模型参数

Table 5　Discrete element model parameters for direct shear test

杨氏模量(Young's modulus) Es/Pa	法向与剪向刚度比(ratio of normal to shear stiffness)Ks	阻尼比(damping ratio) β	颗粒摩擦因数(particle friction coefficient) μ_p	墙体摩擦因数(wall friction coefficient) μ_w	颗粒密度(particle density) ρ/(kg • m^{-3})	F_0/ D_0/ N mm
8.2×10^7	1	0.5	0.4	0.5	2 350	0.2 0.8

表 5 中的离散元模型参数是通过试错法逐步标定得到的，通过反复调整接触刚度、摩擦因数和黏聚参数等，使数值模拟所得的剪切应力－位移曲线在峰值应力水平和循环演化趋势上与试验结果相吻合，从而保证模型参数的合理性和有效性。图 11 对比了第 1 次与第 100 次循环的剪切应力－剪切位移曲线，可以看出，试验和数值模拟的曲线形态高度吻合，模拟效果良好。

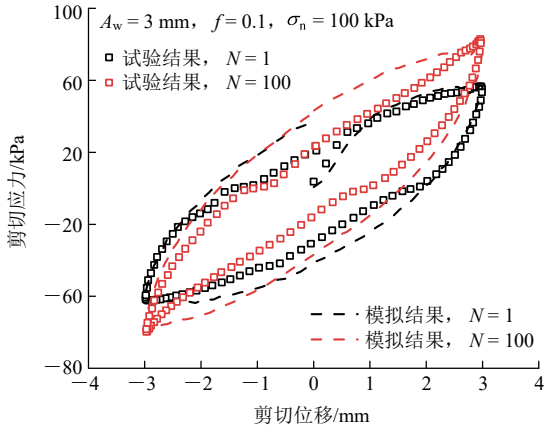


图 11　试验与模拟得到的剪切应力－剪切位移对比曲线

Fig.11　Comparison of shear stress-shear displacement curves between experiment and numerical simulation

4.2　颗粒位移分析

图 12 展示了标准化高度($H = z / d_a$)下试样的颗粒位移(累积位移)分布，其中，z 为剪切盒深度，d_a 为颗粒的平均粒径，约为 0.75 mm。

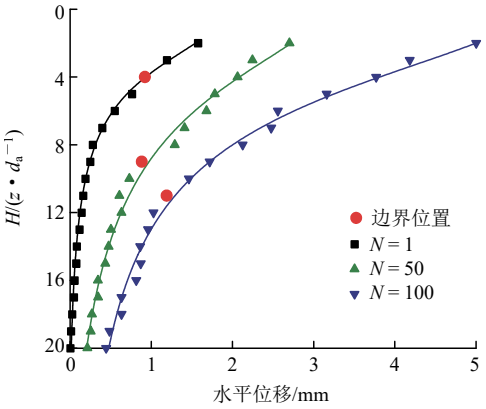


图 12　标准化高度下试样颗粒位移分布

Fig.12　Particle displacement distribution of sample under dimensionless height

界面附近区域(H<5)表现出显著的位移活跃性，最大位移量可达 5 mm。随着深度的增加，颗粒位移呈现指数衰减趋势，下剪切盒底部颗粒位移量近似为 0。经 100 次循环剪切后，在 H =11 处出现明显的位移梯度转折点，该位置被确定为剪切带边界。这是因为剪切带内的土颗粒受混凝土摩擦、联锁等力的限制，始终跟随混凝土保持相同的运动趋势，而随着深度的增加，这种效应逐渐减弱，所以出现了一个临界处。

S. X. Zhang 等[22]的研究指出，在土－混凝土界面附近会形成一个剪切变形集中的狭窄区域，即剪切带，其边界可通过位移场的变化特征进行识别。本文通过分析颗粒位移分布和位移梯度变化，确定了剪切带的边界位置，并在图 12 中以红色标记点标示。试验结果表明，随着剪切循环次数的增加，剪切带厚度呈现先增大后趋于稳定的变化趋势。这种变化规律可能与土体在循环剪切过程中的强度演化有关，随着土体逐渐密实，其密实度接近试验条件下的极限值，从而抑制了剪切带的进一步扩展。

4.3　力链数目分析

为分析颗粒间力的传递机制，本研究采用力链理论进行研究。参考 J. F. Peters 等[23-24]提出的判定标准，力链需满足 3 个条件：由 3 个及以上颗粒组成；各颗粒最大主应力绝对值大于体系平均接触力；相邻颗粒中心连线与主应力方向夹角小于 45°。图 13 统计结果显示，随着构成力链的颗粒数量增加，力链总数呈递减趋势，这主要是由于复杂力链结构更易发生断裂失效。力链数量随循环次数增加而增多，代表体系内有效承载路径增多，界面宏观强度随之提升。

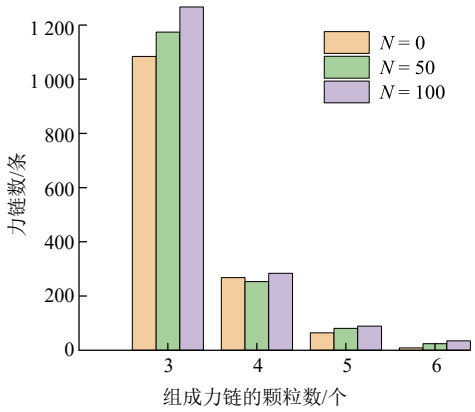
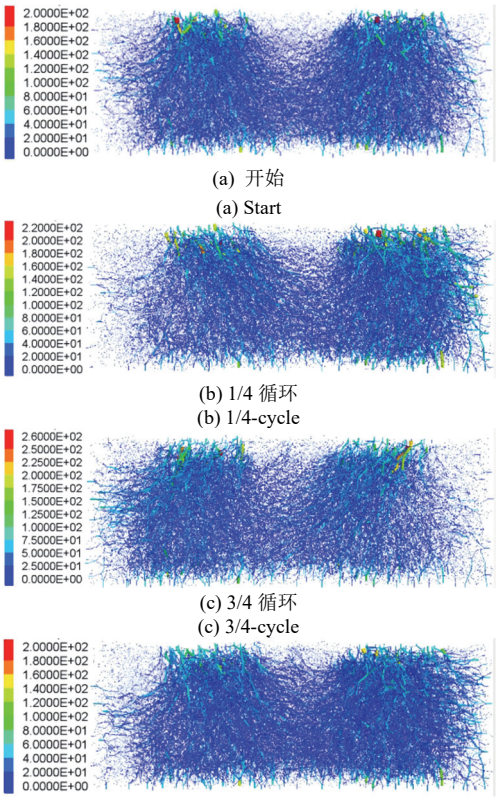


图 13　不同循环次数下组成力链的颗粒数

Fig.13　The number of particles constituting the force chain under different cycle numbers

4.4　力链分布与演化特征

在法向与切向荷载共同作用下，颗粒间的受力会优先沿特定接触路径传递，并逐渐形成具有一定结构性的力链体系，其空间分布特征及演化过程能够反映土体内部结构的调整与力学响应。图 14 给出了数值模拟中力链分布随时间的变化情况。结果表明，初始阶段受重力与法向应力控制时，力链呈现出明显的非均匀性分布特征：在混凝土中部凹陷区域相对稀疏，而在两侧则趋于集中，并主要沿法向方向排列。当进行第一次循环剪切(位移为±3 mm)时，力链方向随剪切作用发生显著偏转。当第一次循环结束(位移归 0)时，与初始状态相比，力链密度明显增加，这种力链主方向的偏转，反映了界面处受力传递方式的显著变化，也说明土体内部结构会自适应地调整以承受反复的剪切作用。



(a) 开始
(a) Start

(b) 1/4 循环
(b) 1/4-cycle

(c) 3/4 循环
(c) 3/4-cycle

(d) 1 次循环
(d) one cycle

图 14　1 次循环内力链分布示意图

Fig.14　Schematic diagram of force chain distribution in one cycle

4.5　接触力分布各向异性分析

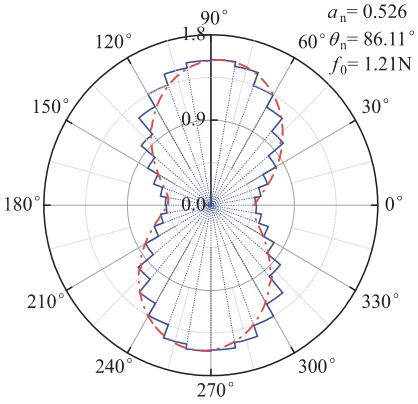
L. Rothenburg 和 R. J. Bathurst[25]指出，在直剪试验中，颗粒间法向与切向接触力的各向异性变化，可通过傅里叶函数进行近似描述，其数学表达式如下：

$$f_{\mathrm{n}}(\theta)=f_0\{1+a_{\mathrm{n}}[\cos 2(\theta-\theta_{\mathrm{n}})]\} \tag{3}$$

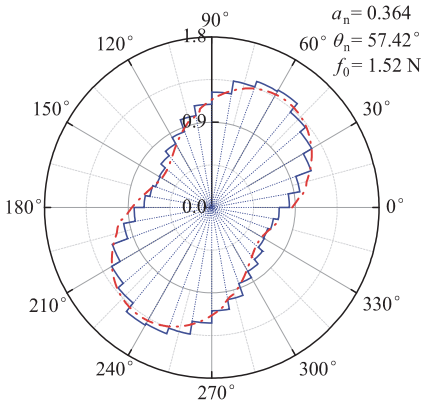
$$f_{\mathrm{t}}(\theta)=-f_0 a_{\mathrm{t}}\sin[2(\theta-\theta_{\mathrm{t}})] \tag{4}$$

式中：a_{n}，a_{t} 分别为法、切向接触力的各向异性系数；θ_{n}，θ_{t} 为其对应主方向；f_0 为平均接触力。

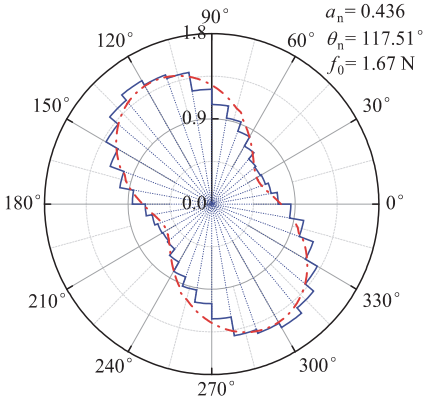
图 15，16 展示了试样在 *xoz* 平面内法向接触力和切向接触力的归一化分布特征。初始阶段受重力与法向应力控制时，接触力分布呈现出以竖直方向(约 90°)为主的各向异性特征；同时，法向力与切向力在竖直方向上表现出对称分布特征。随着剪切过程的进行，接触力分布的各向异性主方向开始发生显著变化，其偏转角度达到约 35°，这一变化直接



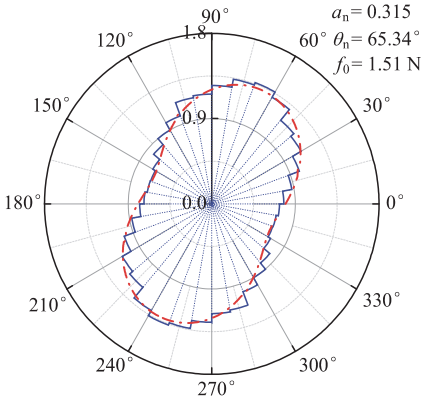
(a) 初始状态
(a) Initial state



(b) 正向剪切端点，N = 100
(b) Positive shear endpoint，N = 100



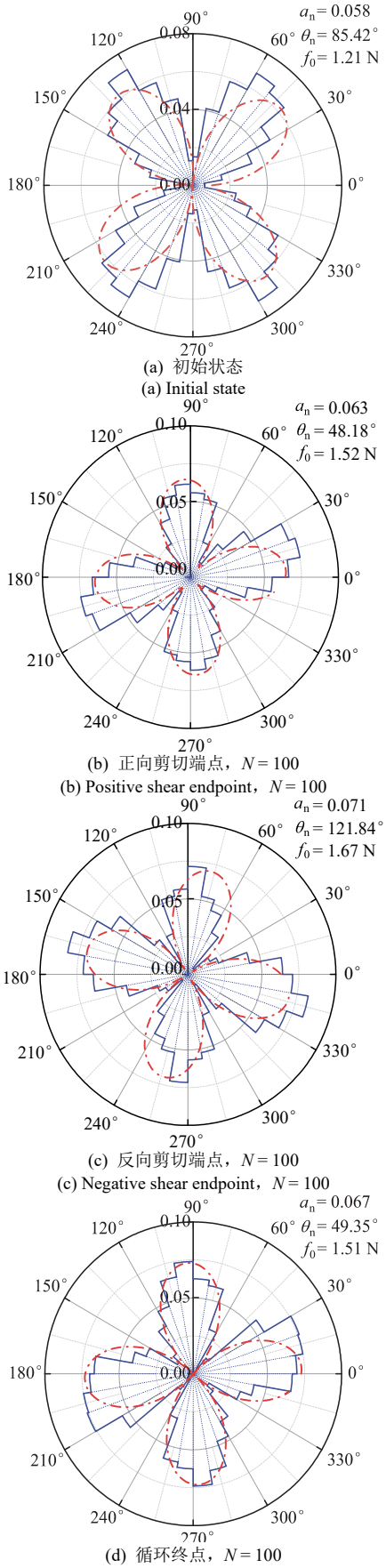
(c) 反向剪切端点，N = 100
(c) Negative shear endpoint，N = 100



(d) 循环终点，N = 100
(d) End of test cycle，N = 100

图 15　*xoz* 平面内试样法向接触力归一化分布

Fig.15　Normal contact force normalized distribution in *xoz* plane



(a) 初始状态
(a) Initial state

(b) 正向剪切端点，N = 100
(b) Positive shear endpoint，N = 100

(c) 反向剪切端点，N = 100
(c) Negative shear endpoint，N = 100

(d) 循环终点，N = 100
(d) End of test cycle，N = 100

图 16　*xoz* 平面内切向接触力归一化分布

Fig.16　Tangential contact force normalized distribution in *xoz* plane

反映了剪切作用对颗粒接触力分布特征的影响。值得注意的是，这种偏转现象与剪切方向保持高度一致，表明剪切荷载对颗粒接触网络的定向重构具有决定性影响。正向与反向剪切过程中，土颗粒因混凝土表面粗糙度的影响会表现出不同的排列方式，导致界面存在明显的各向异性。

5　结　论

采用室内大型直剪试验，研究了位移幅值与频率对残积土－混凝土界面宏观剪切特性的影响，并通过数值模拟分析了剪切过程中的细观力学行为，得到了以下主要结论：

(1) 残积土－混凝土界面在循环直剪试验中表现出典型的循环强化特征。界面峰值剪切应力随剪切循环次数的增加而逐步增大，随着循环次数增加，结构趋于稳定，强化效应逐渐减弱，峰值剪切应力增长趋缓。

(2) 增加剪切幅值可显著提升剪切应力的绝对值和滞回曲线围成的面积，但在高剪切幅值(如 6 和 9 mm)条件下，界面剪切应力的增长趋于平缓并接近极限值，表现出明显的阈值效应。

(3) 正向剪切与反向剪切下最大剪应力不完全相等，反映了界面存在显著各向异性，这主要归因于混凝土界面粗糙面方向的非对称性及土颗粒在循环过程中的差异性重排与力链重构。

(4) 随着循环次数和剪切幅值的增加，剪切刚度逐渐减小，而阻尼比则呈现出先降低后增加的趋势，表明高剪切幅值下不可逆能量耗散比例增大。

参考文献(References)：

[1] NIU X R，XIE H Y，SUN Y F，et al. Basic physical properties and mechanical behavior of compacted weathered granite soils[J]. International Journal of Geomechanics，2017，17(10)：04017082.

[2] WANG X，CHENG H，YAN P，et al. The influence of roughness on cyclic and post-cyclic shear behavior of red clay-concrete interface subjected to up to 1 000 cycles[J]. Construction and Building Materials，2021，273：121718.

[3] DOU H Q，XIE S H，CHEN F，et al. Study on shear characteristics and a mechanics model of granite residual soil-rock interface[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2023，82(6)：212.

[4] 刘世奥，廖晨聪，陈锦剑，等. 饱和砂土－结构物接触面强度特性的三轴试验方法[J]. 上海交通大学学报，2021，55(11)：1 371－1 379.

(LIU Shiao，LIAO Chencong，CHEN Jinjian，et al. Triaxial test method for strength characteristics of saturated sand-structure interface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University，2021，55(11)：1 371－1 379.(in Chinese))

[5] 卢　川，李　飒，刘　鑫，等. 钙质砂剪切强度的单剪试验研究[J]. 地下空间与工程学报，2024，20(6)：1 904－1 912.(LU Chuan，LI Sa，LIU Xin，et al. Study on shear strength of calcareous sand by simple shear test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2024，20(6)：1 904－1 912.(in Chinese))

[6] ZENG W X，LIU F Y，YING M J. Test and DEM study on cyclic hysteresis characteristics of stereoscopic geogrid-soil interface[J]. Geotextiles and Geomembranes，2024，52(2)：196－208.

[7] TANG L，LI Y，YU Y，et al. Strength deterioration mechanism of interface between soil-rock mixture and concrete with different degrees of roughness under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Cold Regions Engineering，2024，38(4)：4024029.

[8] YING M，WANG J，LIU F，et al. Analysis of cyclic shear characteristics of reinforced soil interfaces under cyclic loading and unloading[J]. Geotextiles and Geomembranes，2022，50(1)：99－115.

[9] ZHANG S，LIU F，YING M，et al. Test and prediction for the shear behavior of the sand-irregular concrete interface under constant and dynamic normal loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2024，180：108620.

[10] LIU F，GAO C，XU J，et al. Cyclic shear behavior and BoBiLSTM-based model for soil-rock mixture-concrete interfaces[J]. Construction and Building Materials，2024，426：136031.

[11] CHEN W B，ZHOU W H，YIN Z Y. Recent development on macro-micro mechanism of soil-structure interface shearing through DEM[J]. Archives of Computational Methods in Engineering，2022，30(3)：1 843－1 862.

[12] FANG H，WANG W. A three-dimensional multishear bounding surface model of granular soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics，2020，146(7)：04020068.

[13] ZHOU W H，JING X Y，YIN Z Y，et al. Effects of particle sphericity and initial fabric on the shearing behavior of soil-rough structural interface[J]. Acta Geotechnica，2019，14(6)：1 699－1 716.

[14] 杨忠平，赵亚龙，胡元鑫，等. 块石强度对土石混合料剪切特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(4)：814－827.(YANG Zhongping，ZHAO Yalong，HU Yuanxin，et al. The influence of rock strength on the shear characteristics of soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(4)：814－827.(in Chinese))

[15] 刘飞禹，马克超，杨　军. 残积土含水率和混凝土表面粗糙度对界面剪切特性影响[JOL]. 工程科学与技术，http：//kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240601.2158.003.html.(LIU Feiyu，MA Kechao，YANG Jun. The influence of moisture content of residual soil and surface roughness of concrete on interfacial shear characteristics[JOL]. Advanced Engineering Sciences，http：//kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240601.2158.003.html. (in Chinese))

[16] PEI T，QIU T. DEM investigation of energy dissipation at particle contacts in granular soil under cyclic torsional shear[J]. International Journal of Geomechanics，2022，22(4)：04022016.

[17] HUANG M S，CHEN Y W，GU X Q. Discrete element modeling of soil-structure interface behavior under cyclic loading[J]. Computers and Geotechnics，2019，107：14－24.

[18] LIU F Y，MA K C，YU W. Numerical simulation and experimental analysis of granite residual soil-concrete interface under cyclic shear[J]. Geomechanics and Engineering，2024，39(3)：305－316.

[19] BARTON N，CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics，1977，10：1－53.

[20] 刘飞禹，何江荟，曾威翔. 不同含水率下残积土－织物界面动力剪切特性研究[J]. 中国公路学报，2024，37(6)：57－65.(LIU Feiyu，HE Jianghui，ZENG Weixiang. Dynamic shear characteristics of residual soil-geotextile interface under different water contents[J]. China Journal of Highway and Transport，2024，37(6)：57－65.(in Chinese))

[21] 冯大阔，侯文峻，张建民. 切向应力控制条件下粗粒土与结构接触面三维循环特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(12)：2 574－2 582.(FENG Dakuo，HOU Wenjun，ZHANG Jianmin，et al. Study on three-dimensional cyclic characteristics of contact surface between coarse-grained soil and structure under tangential stress control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2011，30(12)：2 574－2 582.(in Chinese))

[22] ZHANG S X，LIU F Y，ZENG W X，et al. Analyzing cyclic shear behavior at the sand-rough concrete interface：An experimental and DEM study across varying displacement amplitudes[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics，2024，48(7)：1 907－1 928.

[23] PETERS J F，MUTHUSWAMY M，WIBOWO J，et al. Characterization of force chains in granular material[J]. Physical Review E，2005，72(4)：041307.

[24] FU L L，ZHOU S H，GUO P J，et al. Induced force chain anisotropy of cohesionless granular materials during biaxial compression[J]. Granular Matter，2019，21(3)：52.

[25] ROTHENBURG L，BATHURST R J. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J]. Geotechnique，1989，39(4)：601－614.