

DOI: 10.11779/CJGE202211001

切向应力幅值对土与结构接触面切向变形的影响研究

冯大阔^{1, 2, 4}, 张建民^{1, 3}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 清华大学土木水利学院岩土工程研究所, 北京 100084; 4. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 运用 80 t 大型三维多功能土工试验机, 进行了应力控制往返圆形剪切路径下粗粒土与结构接触面三维直剪试验, 分析了切向应力幅值对接触面切向位移、非共轴角和剪切柔度等切向变形特性的影响规律。试验结果表明: 应力控制往返圆形路径下, 接触面产生了明显的 x 向和 y 向位移及其偏移、非共轴角、剪切柔度和剪切耦合效应, 呈现出显著的三维特性。切向应力幅值达到临界应力幅值时, 接触面切向位移幅值及剪切柔度峰值随循环剪切基本保持不变; 剪切柔度初始峰值与非共轴角稳定值存在对立统一关系。切向应力幅值主要影响接触面力学特性参数数值, 对其之间关系形式影响很小。切向应力幅值越大, 接触面 x 向和 y 向位移幅值越大, 向负向偏移程度越大; 非共轴角稳定值越小, 剪切柔度峰值越大。非共轴角稳定值、剪切柔度初始峰值与切向应力幅值间存在良好的关系, 可用建议的计算公式进行描述, 为接触面三维力学特性的本构建模奠定了基础。

关键词: 土与结构接触面; 切向变形; 切向应力幅值; 非共轴角; 剪切柔度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)11-1959-09

作者简介: 冯大阔(1984—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事土与结构相互作用、绿色建造、装配式建造等方面的研究工作。E-mail: tpada@qq.com/fengdk@cscec.com。

Influences of shear stress amplitude on tangential deformation behavior of a gravel-structure interface

FENG Da-kuo^{1, 2, 4}, ZHANG Jian-min^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Hydroscience & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Construction Seventh Engineering Division Corp., LTD., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A series of interface tests between gravel and structure are conducted in stress-controlled two-way circular cyclic shear path by using the large-scale direct-shear apparatus, and the effects of shear stress amplitude on the tangential deformation performances of the interface, including tangential displacement, non-coaxial angle and shear flexibility, are addressed. The test results show that the interface presents distinct 3D behavior subjected to two-way circular cycling of shear stress, such as distinct tangential displacements in the x and y directions and their migration, non-coaxial angle, shear flexibility and shear coupling effect. The tangential displacement amplitude and the peak shear flexibility almost remain invariable with cyclic shearing when the shear stress amplitude reaches the critical stress amplitude. The unity of opposites is discovered between the stabilized non-coaxial angle and the initial peak shear flexibility of the interface. The shear stress amplitude primarily impacts the magnitudes of the performance parameters of the interface, instead of their relationship patterns. Increasing the shear stress amplitude results in magnified tangential displacement amplitudes in the x and y directions, enlarged migration of the tangential displacements towards the negative directions, increased peak shear flexibility and decreased stabilized non-coaxial angle. The stabilized non-coaxial angle and the initial peak shear flexibility have a close relationship with the shear stress amplitude, and can be described using the proposed formulas, which may provide a sound basis for the 3D constitutive modeling of the soil-structure interface.

Key words: gravel-structure interface; tangential deformation; shear stress amplitude; non-coaxial angle; shear flexibility

0 引言

土与结构接触面在土木、建筑、水利、市政、交

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079126); 中原青年拔尖人才支持项目(ZYQR201912156)

收稿日期: 2021-08-28

通等实际工程中广泛存在,如建筑基础与地基间、桩与桩周土体间、面板堆石坝混凝土面板与垫层料间、地下隧道衬砌与土体间等均存在土与结构接触面。接触面是结构与土之间应力、变形传递的重要媒介,其特有的力学特性对土体、结构物的受力变形及其相互作用会产生重要影响,是结构物系统稳定的薄弱环节乃至关键部位。大量学者对其抗剪强度^[1-12]、切向应力位移关系^[2, 4-11, 13-17]、剪切体变^[4, 6-8, 16, 18]等力学特性进行了深入研究,同时对土体性质^[2, 4, 15, 17]、面板粗糙度^[1-3, 5, 8-9, 11-12, 16]、剪切路径^[4, 7, 10, 15]、法向应力^[1, 5, 16]、法向边界条件^[4, 7, 19]等影响因素进行了分析探讨。

实际工程中,土与结构接触面主要受到三维加载作用,呈现显著的三维力学特性。例如桩与桩周土接触面受到周围土体的法向约束、上部结构自重产生的竖向剪切以及风或波浪产生的水平剪切等三维荷载作用。蓄水条件下紫坪铺面板堆石坝面板在“5·12”汶川地震中产生的局部破坏亦表现出显著的三维作用和三维特性。因此,深入研究三维加载条件下土与结构接触面的力学规律,建立能够真实反应接触面三维力学特性的本构模型是进行土与结构相互作用系统设计、保证结构物安全稳定的基础。但以往研究主要集中于土与结构接触面二维力学特性的研究,仅有少数学者^[4, 7, 10, 19]对接触面三维力学特性进行了探讨。

同时,土与结构接触面在地震等极限荷载作用下可能会产生大剪切变形导致破坏;但实际工程中接触面在正常工作状态下的剪切变形较破坏时小得多,此时用切向应力控制条件模拟接触面受力变形特性将更为科学有效^[20]。以往学者为了分析接触面破坏及抗剪强度,主要采用切向位移控制条件来全面研究其静动力学特性^[1-17],只有少数学者采用切向应力控制条件来探究接触面力学特性。Dejong 等^[18, 20]对切向应力控制条件下砂土与结构接触面的力学特性进行了少量研究,但主要局限于二维加载条件。冯大阔等^[21]对切向应力控制条件粗粒土与结构接触面三维循环特性进行了研究,但未深入分析切向应力幅值对接触面切向位移、非共轴特性及剪切体变等三维力学特性的影响。

本文运用自主研制的 80 t 大型三维多功能土工试验机,进行了不同应力幅值往返圆形剪切路径下粗粒土与结构接触面大型三维循环直剪试验,深入分析和总结了切向应力幅值对接触面 x 向和 y 向位移及偏移、非共轴角、剪切柔度等接触面切向变形特性参数及其关系的影响规律,发现了接触面非共轴角稳定值和剪切柔度初始峰值间的对立统一关系以及两者与切向应力幅值间良好的关系,并构建了计算公式,为接触面三维本构模型的建立奠定了基础。

1 试验条件

接触面试验采用自主研制的 80 t 大型三维多功能土工试验机(3DMAS)进行^[22]。该接触面试验机具有三维化、大尺寸、高加载、多功能、自动化等特点。可施加 800 kN 的竖向力(施加在 500 mm 直径圆形容器上的法向应力为 4.0 MPa)和 400 kN 的水平力(施加在 500 mm 直径圆形容器上的切向应力为 2.0 MPa)。法向可实现常应力、刚度和常位移 3 种边界条件,切向可自动施加应力控制、位移控制和复合控制等方式。80 t 大型三维多功能土工试验机详见文献^[22]。

试验接触面由粗粒土和三维钢板构成。粗粒土为北京麦子峪石场开采的不良级配($C_u=1.8$, $C_c=0.9$)粗粒土,表面有一定的尖角锐缘。粒径范围 5~16 mm,平均粒径 9.0 mm; 试验时在圆形直剪容器中将其分 5 层击实。粗粒土试样直径 500 mm,高度 225 mm,干密度 1.78 g/cm³。三维钢板为人造钢板,面积 800 mm × 800 mm,略大于直剪容器直径,可保证接触面面积在剪切过程中保持不变。与粗粒土接触的钢板表面均布底边长 5 mm、顶边长 1 mm、高 2 mm 的正四棱台;用正四棱台的高度定义三维钢板表面的粗糙度,则其粗糙度为 $R=2$ mm。钢板表面正四棱台经过特殊加工,保证其在剪切过程中不被磨损,故结构面粗糙度在剪切过程中始终保持不变。接触面单调剪切结果表明,该粗粒土与结构接触面抗剪强度约为 $\tau_f=280$ kPa。

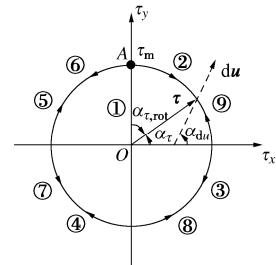


图 1 应力控制往返圆形剪切路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stress-controlled two-way circular cyclic shear path of interface

剪切路径采用切向应力控制往返圆形路径(图 1)。试验时,法向应力施加到 400 kPa 并保持不变(常应力法向边界条件);待法向位移稳定后,先沿直线路径①剪切到指定的切向应力幅值(如图 1 中 τ_m 所示),然后沿圆形路径②—③—④—⑤—⑥—⑦—⑧—⑨—……进行顺时针和逆时针往返循环剪切,并规定②—③—④—⑤—⑥—⑦—⑧—⑨为一个完整循环周次 N 。为便于试验结果分析,将接触面每个循环周次中沿顺时针方向的剪切过程②—③—④—⑤称为正向剪切,沿逆时针方向的剪切过程⑥—⑦—⑧—⑨称为反向剪切。试验时,可通过改变切向应力幅值 τ_m 来研究

其对接触面三维循环力学特性的影响。本文主要进行了切向应力幅值 τ_m 为 50, 100, 150, 200, 220, 230, 240, 250 kPa 时接触面三维剪切试验。

2 切向位移及关系

图 2 给出应力控制往返圆形剪切路径(切向应力幅值 $\tau_m=230$ kPa)下接触面法向位移 v 、 $-y$ 向位移 u_y 和 $-x$ 向位移 u_x 三维关系图($v-u_y-u_x$ 曲线)。可以看出, 应力控制往返圆形剪切路径下, 接触面产生了明显的切向位移(u_y , u_x)和法向位移 v 。本文主要研究三维加载条件下接触面切向变形特性, 故后续不再给出和讨论接触面法向位移。

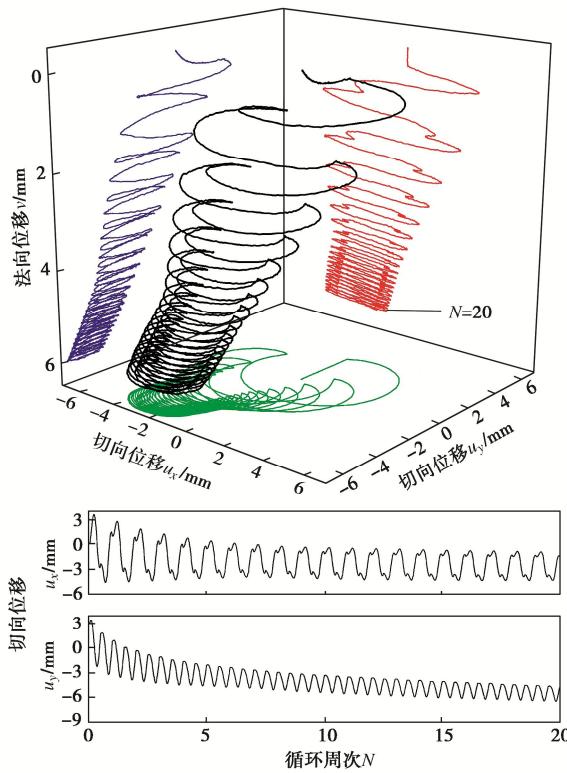


图 2 应力控制往返圆形路径接触面三维试验结果($\tau_m=230$ kPa)

Fig. 2 3D test results of gravel-structure interface subjected to two-way circular cycling of shear stress ($\tau_m=230$ kPa)

为更清晰地分析切向位移的数值和发展趋势, 图 2 亦给出相应的 x 向和 y 向位移随循环周次的时程曲线。图 3 给出了应力控制单向往返剪切路径(二维剪切路径, $\tau_m=230$ kPa)下接触面 x 向、 y 向位移时程曲线及 y 向应力位移关系曲线, 以对比分析接触面二维和三维力学特性的异同。可以看出, 在应力控制往返圆形剪切路径下, x 向和 y 向位移幅值均随循环剪切的进行逐渐减小, 初始几个循环周次内减小速率较大, 而后基本趋于稳定。同时, x 向和 y 向位移均向其负向偏移, 且初始几个循环周次内偏移较快, 而后亦基本趋于稳定。而在单向往返剪切路径下, 接触面仅在剪切方向(y 向)产生了切向位移; 在其正交切向(x

向)由于未进行剪切, 不产生切向应力和切向位移, 故图 3 未给出 x 向应力位移关系曲线。 y 向位移幅值随循环剪切的进行亦逐渐减小而后趋于基本稳定, 这与往返圆形剪切路径较为类似。不同的是, 单向往返剪切路径下, 接触面 y 向位移幅值稳定值较往返圆形剪切路径稍小, 且向其正向稍有偏移, 这主要是由剪切定向效应以及正交切向没有剪切作用所致。同时, 往返圆形剪切路径下, 接触面切向位移时程曲线在其幅值处呈平滑转变, 单向往返剪切路径下则有明显的突变, 不再呈平滑过渡。这说明接触面在三维加载条件下呈现出明显的三维力学响应, 且与二维力学特性有显著不同, 需要进行深入分析和研究。

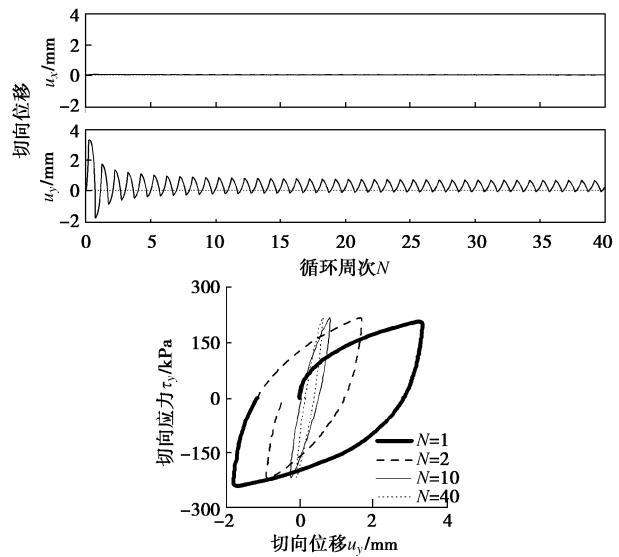


图 3 应力控制单向往返路径接触面二维试验结果($\tau_m=230$ kPa)

Fig. 3 2D test results of interface subjected to two-way beeline cycling of shear stress ($\tau_m=230$ kPa)

图 4 给出不同切向应力幅值(τ_m 为 50, 100, 150, 200, 220, 240 kPa)往返圆形剪切路径下接触面 x 向位移 u_x 随循环周次 N 的时程曲线。结合图 2 可以看出, 切向应力幅值主要影响切向位移幅值大小及其偏移程度。切向应力幅值越大, 其更接近接触面抗剪强度, x 向位移幅值越大, 向其负向偏移的程度也越大。当切向应力幅值 $\tau_m=240$ kPa 时, 第 15 循环周次($N=15$)的 x 向位移已达到约 -40 mm, 接近切向位移传感器 LVDT 的量程(50 mm), 故其时程曲线只给到第 15 循环周次。接触面切向位移的偏移由接触面异向性(土体异向性和结构面异向性)和切向应力不等幅两个因素共同作用引起, 前者是切向位移产生偏移的内因, 后者是外因。切向位移的偏移可能会产生切向应力幅值未达到抗剪强度但切向位移却很大的现象(如 $\tau_m=240$ kPa), 这种情况会导致实际工程中接触面的大剪切变形和剪切破坏, 需要在工程设计时予以重点关注。

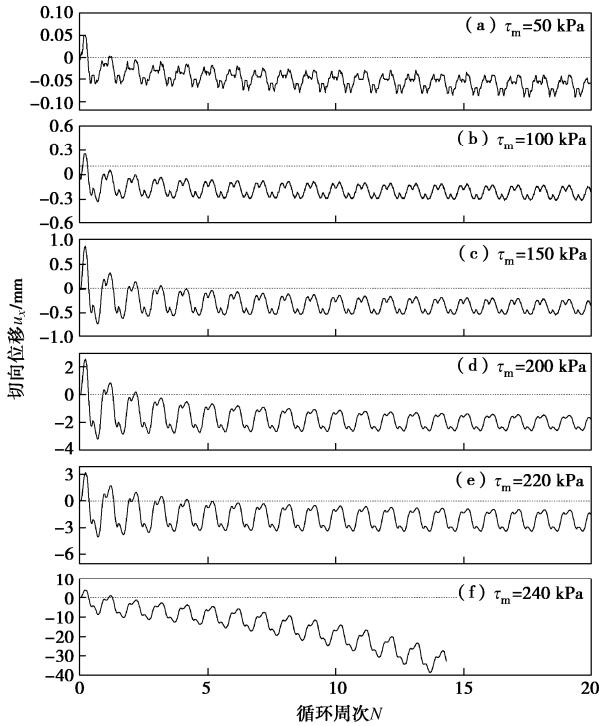


图 4 不同切向应力幅值下接触面 x 向位移时程

Fig. 4 Cyclic histories of tangential displacements in x direction of interface at different shear stress amplitudes

切向应力幅值对 x 向位移随循环周次的时程变化形式影响不大。当切向应力幅值不大时（如 $\tau_m \leq 230$ kPa）， x 向位移幅值均随循环剪切的进行而逐渐减小；但当切向应力幅值增大到一定程度时（如 $\tau_m=240$ kPa）， x 向位移幅值随循环剪切的进行基本保持不变，甚至有所增大。将接触面切向位移幅值随循环周次保持不变时对应的切向应力幅值定义为临界应力幅值 τ_{mcr} ，相应的应力水平为临界应力幅值水平 ($SL_{mcr}=\tau_{mcr}/\tau_f$)；因此该粗粒土与结构接触面的临界应力幅值 τ_{mcr} 约为 240 kPa，临界应力幅值水平 SL_{mcr} 约为 0.857。当切向应力幅值超过 240 kPa 时，接触面切向位移幅值随循环剪切的进行则逐渐增大。如切向应力幅值 $\tau_m=250$ kPa 时，第 1 循环周次 ($N=1$) 接触面切向位移已超过 -20 mm，第 2 循环周次 ($N=2$) 时已接近 -40 mm；故图 4 未给出切向应力幅值 $\tau_m=250$ kPa 时的接触面试验结果，仅在后续某些图中给出。 y 向位移随循环周次的时程变化形式与切向应力幅值 $\tau_m=230$ kPa 时的基本一致，限于篇幅这里不再给出。

图 5 给出特定循环周次 (N 为 1, 10) 不同切向应力幅值下接触面 x 向和 y 向位移间的关系图 ($u_y - u_x$ 曲线)。由于切向应力幅值 $\tau_m=240$ kPa 时接触面切向位移在第 10 循环周次 ($N=10$) 偏移过大 (约 -20 mm)，为更清晰显示接触面力学特性，故在图 5 (b) 中未给出。可以看出，应力控制往返圆形剪切路径下，接触面切向位移关系曲线呈两个开口的椭圆形；开口的存在，说明在切向应力路径旋转 360° 时，切向位移未

旋转 360°；切向位移和切向应力的变化不同步，两者之间存在一定的相位差。随切向应力幅值的增大，椭圆长短轴及开口程度增大，进一步证明了切向位移幅值随切向应力幅值的增加而增大。切向应力幅值对接触面 x 向和 y 向位移关系曲线形式基本没有影响，这也进一步证实了不同切向应力幅值下 y 向位移随循环周次的时程变化曲线形式的相似性。

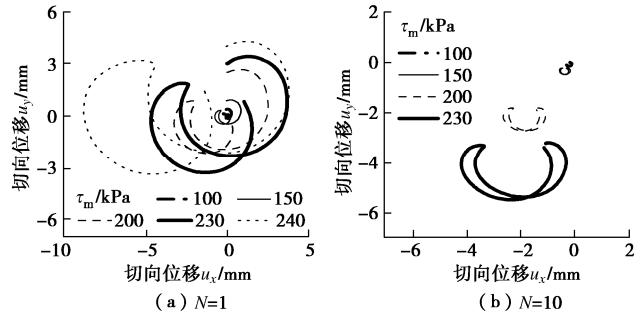


图 5 不同切向应力幅值下接触面切向位移关系曲线

Fig. 5 Tangential displacement relationship in x and y directions of interface at different shear stress amplitudes

3 切向应力位移关系

图 6 给出特定循环周次不同切向应力幅值下接触面切向应力位移关系图，包括 x 向应力位移关系 ($\tau_x - u_x$ 曲线)、 y 向应力位移关系 ($\tau_y - u_y$ 曲线) 以及正交切向应力位移关系 ($\tau_y - u_x$ 曲线、 $\tau_x - u_y$ 曲线)。可以看出，与直线型剪切路径（如十字剪切路径^[21]、单向往返剪切路径）下接触面切向应力位移关系曲线呈双曲线形式（图 3）不同，往返圆形路径下该曲线类似椭圆形，说明接触面产生了明显的剪切耦合效应。剪切耦合效应是指一个切向的剪切作用对其正交切向的影响作用，从正交切向应力位移曲线（图 6 中 $\tau_y - u_x$ 曲线、 $\tau_x - u_y$ 曲线）可以更清楚地证明三维加载条件下接触面的剪切耦合效应。而在单向往返剪切路径下，接触面仅在 y 向进行剪切，不存在剪切耦合效应。

切线应力幅值对接触面切向应力位移关系曲线形式影响不大，这亦可从其对接触面切向位移随循环周次的时程曲线形式影响不大得到验证。一个循环周次内，接触面开始剪切时， x 向位移随 x 向应力的增加而逐渐增大， x 向位移幅值并未在 x 向应力幅值处达到，而是在 x 向应力达到幅值后由于正交切向 (y 向) 的剪切耦合效应仍有所增加，在 x 向应力减小到一定程度时才达到幅值，并随 x 向应力的持续减小而逐渐减小；后续变化重复前面的特性，并在剪切方向反向时其数值由减小变为增大。 y 向位移在开始剪切时稍有增加便达到幅值，而后随 y 向应力的减小而逐渐减小，在 y 向应力达到负向幅值后由于 x 向的剪切耦合效应其数值仍在增加，逐步达到幅值后才随 y 向应力

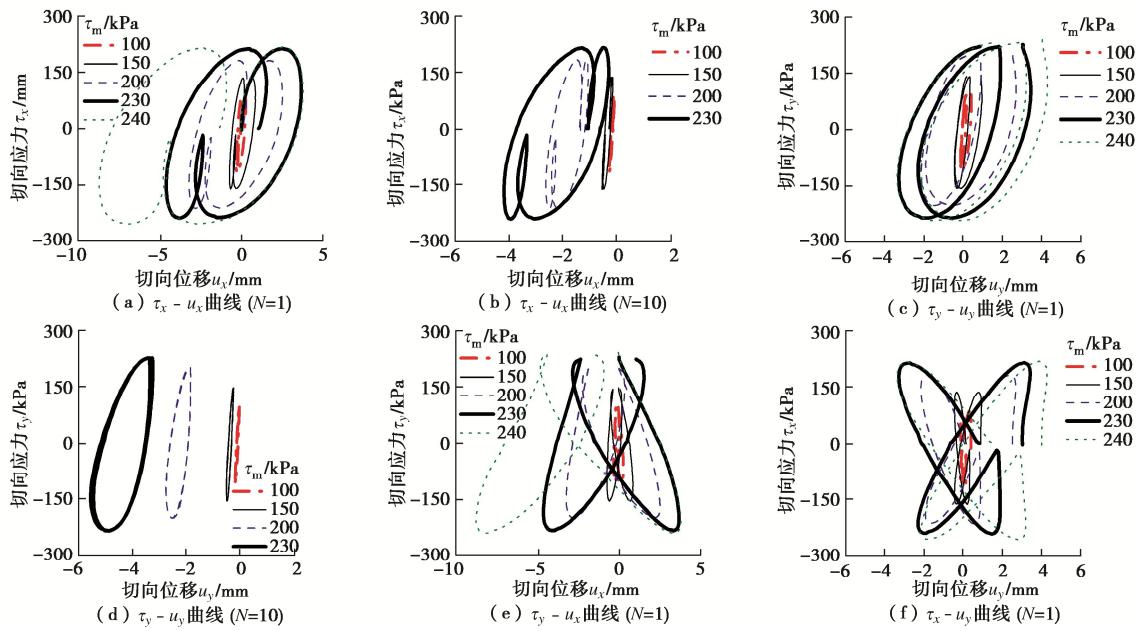


图 6 不同切向应力幅值下接触面切向应力位移关系曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement hysteretic responses of interface at different shear stress amplitudes

的持续减小而逐渐减小。这与直线型剪切路径下接触面切向位移幅值在切向应力幅值处达到的现象(图3)有明显区别。上述现象也进一步证明,切向位移和切向应力变化的不同步性,存在相位差。

4 非共轴角

为进一步分析接触面切向位移和切向应力变化的相位差,图7给出了切向应力幅值 $\tau_m=230$ kPa时特定循环周次接触面正向和反向剪切时单位应力切向位移增量 ν 分布图。

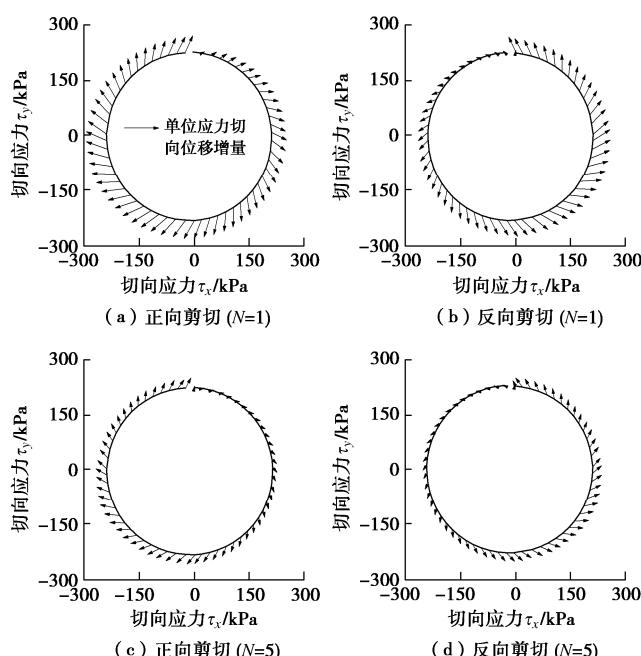
图 7 接触面单位应力切向位移增量分布图($\tau_m=230$ kPa)

Fig. 7 Distribution of shear displacement vectors of interface

单位应力切向位移增量是指由单位切向应力所产生的切向位移增量(即 $\nu=d\mathbf{u}/|d\tau|$),其为向量,既有大小,亦有方向。确定了单位应力切向位移增量的大小和方向,即可确定切向位移增量及其发展变化。单位应力切向位移增量的大小用剪切柔度($\nu=|\nu|$)来衡量,方向用非共轴角 α (图1)来度量。

由图7可以看出,单位应力切向位移增量方向与当前切向应力方向不同,亦与切向应力增量方向不同,处于两者之间,接触面产生了显著的非共轴特性。接触面非共轴特性是指单位应力切向位移增量方向或切向位移增量方向与当前切向应力方向不一致的现象,两者之间的夹角定义为接触面非共轴角 α ,其可从切向应力角 α_τ (图1)与切向位移增量角 α_{du} (图1)的差值得到($\alpha=\alpha_{du}-\alpha_\tau$),取值范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 。

图8给出了切向应力幅值 $\tau_m=230$ kPa时接触面切向应力角 α_τ 、单位应力切向位移增量角 α_{du} 以及非共轴角 α 随循环周次 N 的时程曲线。可以看出,切向应力角、单位应力切向位移增量角随循环周次均呈现出有规律地变化,两者的变化形式基本一致但并不同步,存在一定的相位差,即存在非共轴角。这种有规律地变化使得接触面非共轴角也呈现有规律变化,这从图7的单位应力切向位移增量随切向应力路径的有序变化亦可得到印证。

每个循环周次开始时,接触面进行正向剪切(图7(a), 7(c)),非共轴角均从一定数值开始迅速减小,而后基本趋于稳定,稳定值约为 38° ($\alpha_r=38^\circ$),进一步说明接触面单位应力切向位移增量介于当前切向应力及其增量之间。当 y 向应力达到正向幅值接触

面开始反向剪切时(图7(b), 7(d)), 非共轴角迅速变为负值, 且从一定数值迅速减小, 而后基本稳定在 -38° ($\alpha_r = -38^\circ$)。应力控制往返圆形剪切路径下, 当剪切方向反向时, 结构面附近土颗粒要大幅调整, 由原来的定向排列转向其相反方向; 此时, 切向位移增量与切向应力增量方向比较接近, 非共轴角突然增大。当剪切到一定程度, 土颗粒再次基本完成定向排列后, 剪切时土颗粒只需局部调整, 接触面非共轴角就基本达到稳定值。接触面正向剪切和反向剪切时非共轴角稳定值基本相等, 且不同循环周次亦保持恒定。

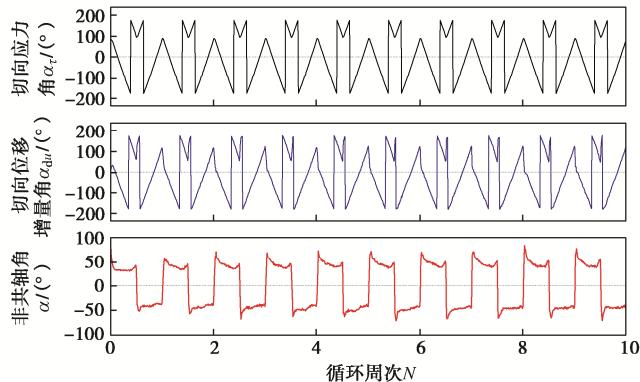


图 8 应力控制往返圆形路径接触面非共轴角时程 ($\tau_m=230$ kPa)

Fig. 8 Cyclic histories of non-coaxial angles of interface ($\tau_m=230$ kPa)

图 9 给出了第 1 循环周次 ($N=1$) 不同切向应力幅值下接触面单位应力切向位移增量分布图, 图 10 相应给出了接触面非共轴角 α 随循环周次 N 的时程曲线。结合图 7, 8 可以看出, 不同切向应力幅值下接触面单位应力切向位移增量随切向应力路径均呈现出有规律地变化, 切向应力幅值对单位应力切向位移增量分布形式影响不大, 对非共轴角随循环周次的时程变化形式影响也很小。不同切向应力幅值下, 每个循环周次接触面非共轴角均从一定数值逐渐减小, 而后基本趋于稳定; 并在半个循环周次接触面剪切方向反向时, 非共轴角变为负值, 但数值及发展趋势基本相同。接触面正向和反向剪切时非共轴角稳定值相等, 且随循环剪切的进行基本保持不变。

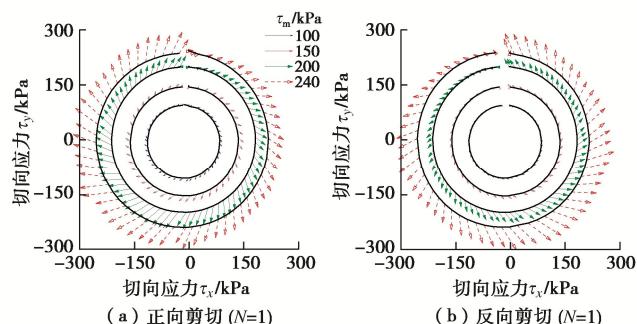


图 9 不同切向应力幅值接触面单位应力切向位移增量分布图

Fig. 9 Distribution of shear displacement vectors of interface at different shear stress amplitudes

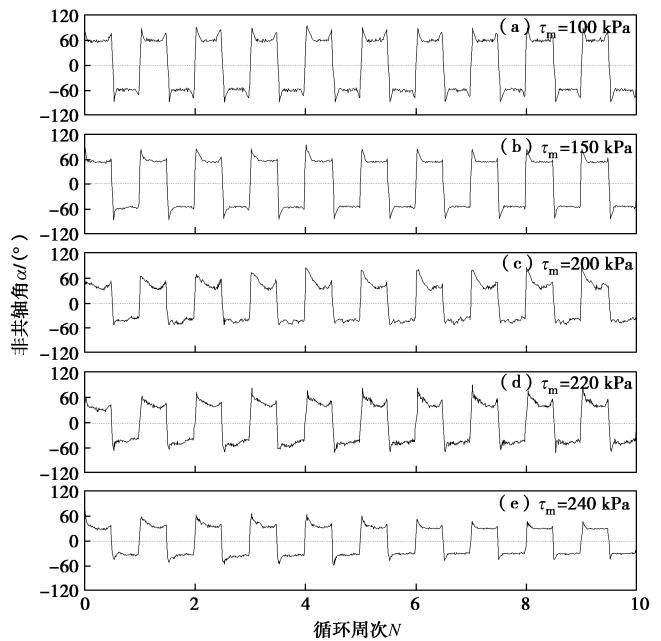


图 10 不同切向应力幅值下接触面非共轴角时程

Fig. 10 Cyclic histories of non-coaxial angles of interface at different shear stress amplitudes

不同切向应力幅值下, 非共轴角稳定值不同; 切向应力幅值对接触面非共轴角稳定值有显著影响。图 11 给出接触面非共轴角稳定值 α_r 及其变化率 $k_{\alpha r}$ 随切向应力幅值的发展变化曲线; 非共轴角稳定值变化率定义为其随切向应力幅值变化曲线的斜率 (即 $k_{\alpha r} = d\alpha_r/d\tau_m$)。可以看出, 随切向应力幅值的增加, 接触面非共轴角稳定值逐渐减小, 而减小速率则在逐渐增大; 当切向应力幅值增大到一定程度时, 非共轴角稳定值变化率迅速增大。也就是说, 切向应力幅值越大, 接触面非共轴角越小, 其稳定值减小得越快; 单位应力切向位移增量越向当前切向应力靠近, 塑性剪应变的产生越趋向于当前切向应力, 即接触面产生非共轴特性的能力越弱。可以推断, 当切向应力幅值达到抗剪强度时 (即 $\tau_m=\tau_f$), 塑性剪应变主要沿切向应力方向产生; 接触面基本不会产生非共轴现象, 非共轴角接近于零。接触面非共轴角稳定值 α_r 与切向应力幅值 τ_m 呈现良好的关系:

$$\alpha_r = \arccos\left(\frac{\tau_m}{\tau_f}\right) \quad (1)$$

式 (1) 满足当 $\tau_m=\tau_f$ 时, 非共轴角为零的条件。图 11 也给出了式 (1) 的模拟结果, 可以看出, 模拟结果与试验结果吻合度良好。对式 (1) 进行求导, 可以得到接触面非共轴角稳定值变化率 $k_{\alpha r}$ 的计算式:

$$k_{\alpha r} = \frac{d\alpha_r}{d\tau_m} = \frac{-1}{\tau_f \sqrt{1 - (\tau_m/\tau_f)^2}} \quad (2)$$

图 11 也给出了非共轴角稳定值变化率曲线, 可以看出, 当切向应力幅值 $\tau_m \geq 240$ kPa, 接触面非共轴角稳定值迅速减小, 变化率迅速增大。

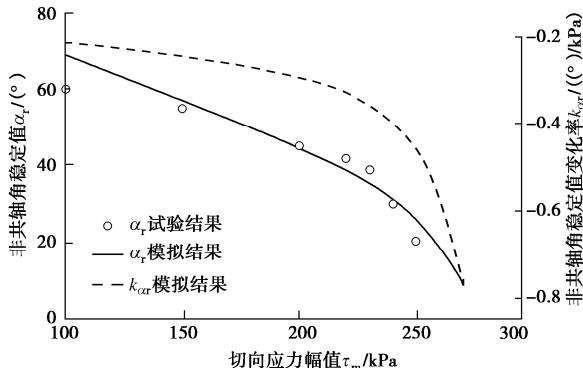


图 11 接触面非共轴角稳定值与切向应力幅值关系

Fig. 11 Relationship of stabilized non-coaxial angle against shear stress amplitude of interface

5 剪切柔度

由图 7, 9 可以看出, 单位应力切向位移增量不仅方向随剪切的进行发生有规律地变化, 其大小也随剪切的进行有规律地增大和减小。定义单位应力所产生的切向位移增量的大小为接触面剪切柔度 v , 其取值为单位应力切向位移增量的模 (即 $v=|\mathbf{v}|$)。图 12 给出了不同切向应力幅值下接触面剪切柔度 v 随循环周次 N 的时程曲线。可以看出, 不同切向应力幅值下, 接触面剪切柔度随循环周次的变化形式较为类似, 每个循环周次均从零开始增加, 达到峰值后稍有减小。当切向应力幅值较小时 (如 $\tau_m \leq 230 \text{ kPa}$), 接触面剪切柔度峰值随循环剪切的进行逐渐减小, 而后总体上趋于稳定, 呈现出明显的演化特性。当切向应力幅值较大时 (如 $\tau_m = 240 \text{ kPa}$), 接触面剪切柔度峰值随循环周次基本保持不变, 与切向位移幅值随循环周次基本不变的规律一致。这说明切向应力幅值对接触面剪切柔度随循环周次的变化形式影响较小, 主要影响接触面剪切柔度的大小及其随循环剪切的演化。切向应力幅值越大, 同一循环周次接触面剪切柔度及其峰值越大, 且增加程度非常明显。

图 13 给出初始剪切时接触面剪切柔度首次达到的峰值 (称为接触面剪切柔度初始峰值 v_p) 及其变化率 k_{v_p} 与切向应力幅值 τ_m 的关系图; 剪切柔度变化率定义为其初始峰值随切向应力幅值变化曲线的斜率 (即 $k_{v_p} = dv_p / d\tau_m$)。应力控制条件初始剪切时接触面物态演化程度很小, 接触面剪切柔度可以进行比较; 而当循环剪切到一定程度时, 同一循环周次接触面物态演化程度不同, 相应的剪切柔度很难进行比较。由图 13 可以看出, 接触面剪切柔度初始峰值随切向应力幅值的增加而显著增大; 尤其是当切向应力幅值增加到一定程度时 (如 $\tau_m \geq 240 \text{ kPa}$), 剪切柔度初始峰值迅速增加, 其变化率迅速增大。接触面剪切柔度初始峰值 v_p 与切向应力幅值 τ_m 间具有良好的关系, 可用下

式进行描述:

$$v_p = \frac{a}{(1 - \tau_m / \tau_f)^2} \quad . \quad (3)$$

当 $\tau_m = \tau_f$ 时, 接触面剪切柔度初始峰值无限大, 即切向位移将无限增加。由图 13 给出的模拟结果和试验结果可以看出, 该式的模拟效果良好。同样, 对式 (3) 进行求导, 可以得到接触面剪切柔度初始峰值变化率 k_{v_p} 的计算式:

$$k_{v_p} = \frac{dv_p}{d\tau_m} = \frac{2a}{\tau_f(1 - \tau_m / \tau_f)^3} \quad . \quad (4)$$

图 13 也给出了剪切柔度初始峰值变化率曲线, 可以看出, 当切向应力幅值 $\tau_m \geq 240 \text{ kPa}$, 接触面剪切柔度初始峰值迅速增加, 变化率迅速增大。

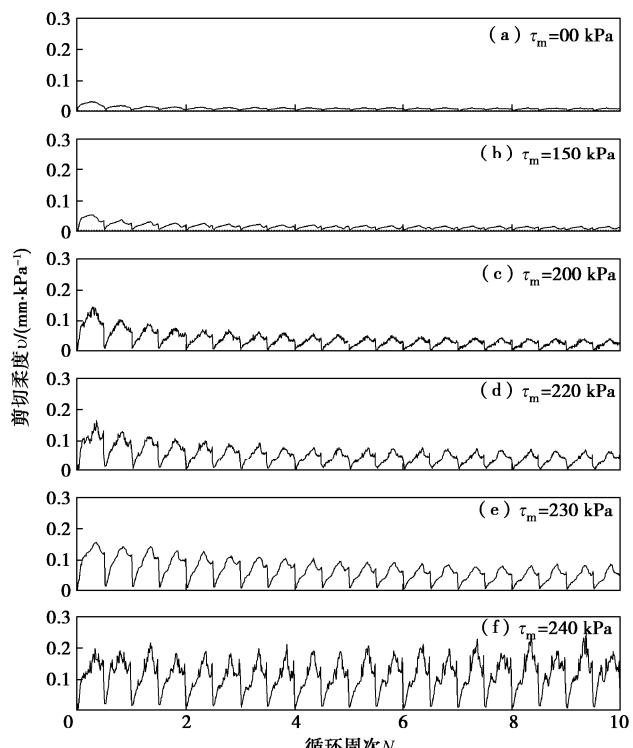


图 12 不同切向应力幅值下接触面剪切柔度时程

Fig. 12 Cyclic histories of shear flexibility of interface at different shear stress amplitudes

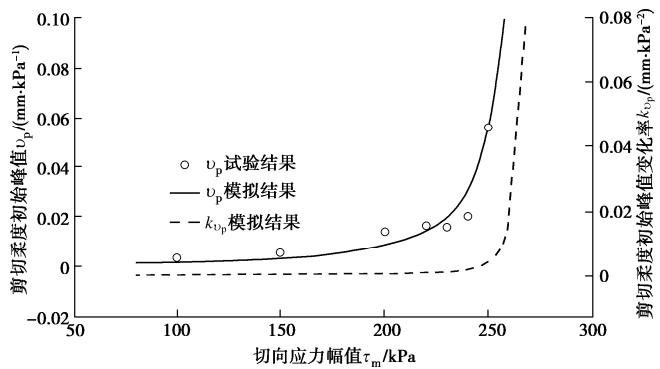


图 13 接触面剪切柔度初始峰值与切向应力幅值关系

Fig. 13 Relationship of initial peak shear flexibility against shear stress amplitude of interface

由图 11, 13 可以看出, 接触面非共轴角稳定值 α_r 、剪切柔度初始峰值 v_p 随切向应力幅值 τ_m 的变化趋势完全相反。切向应力幅值越大, 非共轴角及其稳定值越小, 剪切柔度及其初始峰值则越大; 这说明接触面非共轴角稳定值和剪切柔度初始峰值呈现对立统一的关系。将不同切向应力幅值下接触面剪切柔度初始峰值 v_p 和非共轴角稳定值 α_r 的关系绘制于图 14 中, 可以更清晰地看出两者的对立统一特性。接触面非共轴角和剪切柔度是单位应力切向位移增量的两个度量指标, 随剪切的进行同时产生和发展, 不可能单独存在; 但两者的发展趋势则完全相反。非共轴角稳定值越大, 其对剪切柔度产生和发展的阻碍作用越大, 剪切柔度峰值越小。特别地, 在每个循环周次开始剪切时, 接触面在 y 向应力正向幅值处剪切方向反向, 切向应力及其增量间夹角约为 90° , 非共轴角突然增大而后逐渐减小(图 10), 此时剪切柔度则从较小值(接近于零)逐渐增大(图 12)。反之, 接触面剪切柔度峰值越大, 剪切柔度及切向变形发展越快, 非共轴角则来不及发展, 从而使非共轴角发展程度越低、稳定值越小; 特别地, 当切向应力幅值接近接触面抗剪强度时, 剪切柔度增长极快、数值非常大(图 13), 此时接触面非共轴角基本上没有发展, 接近于零(图 11)。而当剪切柔度较小时, 接触面非共轴角则有充分的时间和能力去发展, 从而稳定值变大。由式(1), (3)可以推导出接触面剪切柔度初始峰值 v_p 与非共轴角稳定值 α_r 的关系式:

$$v_p = \frac{a}{(1 - \cos \alpha_r)^2} \quad . \quad (5)$$

可以更清楚地看出两者的反比关系及对立统一关系。图 14 也给出了式(5)的模拟结果, 可以看出与试验结果吻合度较好。

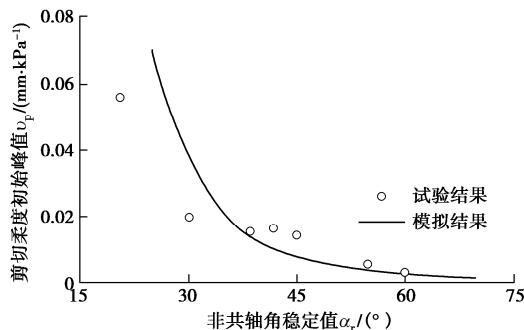


图 14 接触面剪切柔度初始峰值与非共轴角关系

Fig. 14 Relationship of initial peak shear flexibility against non-coaxial angle of interface

6 结 论

(1) 应力控制往返圆形剪切路径下, 接触面产生了明显的 x 向和 y 向位移, 并均向负向偏移; 显现出

显著的三维特性和剪切耦合效应。切向应力幅值越大, x 向和 y 向位移幅值越大, 向负向偏移程度越大。当切向应力幅值小于临界应力幅值时, 切向位移幅值随循环周次逐渐减小而后趋于稳定。当切向应力幅值等于临界应力幅值时, 切向位移幅值则保持基本不变

(2) 应力控制往返圆形路径下, 接触面呈现出显著的非共轴特性, 可用非共轴角和剪切柔度定量描述。每个循环周次接触面非共轴角均从一定数值逐渐减小, 而后趋于稳定; 该稳定值随循环剪切保持基本不变。切向应力幅值越大, 非共轴角稳定值越小, 切向位移增量越向当前切向应力靠近。非共轴角稳定值和切向应力幅值间存在良好的关系, 可以用式 $\alpha_r = \arccos(\tau_m / \tau_f)$ 进行描述。

(3) 每个循环周次, 接触面剪切柔度均从较小值(接近零)开始增加, 达到峰值后稍有减小。当切向应力幅值小于临界应力幅值时, 剪切柔度峰值随循环剪切逐渐减小而后趋于稳定; 当切向应力幅值达到临界应力幅值时, 剪切柔度峰值随循环剪切基本不变。切向应力幅值越大, 剪切柔度峰值越大。接触面剪切柔度初始峰值与切向应力幅值呈现良好的关系, 可用式 $v_p = a / (1 - \tau_m / \tau_f)^2$ 进行描述。

(4) 接触面剪切柔度初始峰值、非共轴角稳定值随切向应力幅值的变化趋势完全相反, 两者呈对立统一的关系; 在应力控制往返圆形剪切路径下可用式 $v_p = a / (1 - \cos \alpha_r)^2$ 进行描述。接触面剪切柔度峰值越大, 切向变形发展越快, 非共轴角则来不及发展, 发展程度越低、稳定值越小; 反之亦然。

(5) 切向应力幅值主要影响 x 向和 y 向位移幅值及其偏移程度、非共轴角和剪切柔度等接触面切向变形特性参数的数值, 对切向位移间关系、切向应力位移关系及切向位移、非共轴角和剪切柔度随循环周次的时程变化等曲线形式影响较小。

参 考 文 献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Géotechnique*, 1961, **11**(4): 339 – 353.
- [2] UESUGI M, KISHIDA H. Influential factors of friction between steel and dry sands[J]. *Soils and Foundations*, 1986, **26**(2): 33 – 46.
- [3] TSUBAKIHARA Y, KISHIDA H. Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses[J]. *Soils and Foundations*, 1993, **33**(2): 1 – 13.
- [4] FAKHARIAN K. Three-dimensional Monotonic and Cyclic Behavior of Sand-Steel Interfaces: Testing and Modeling[D].

- Ottawa: University of Ottawa, 1996.
- [5] 胡黎明, 潘家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 431 - 435. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 431 - 435. (in Chinese))
- [6] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 254 - 258. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 254 - 258. (in Chinese))
- [7] 冯大阔, 张嘎, 张建民, 等. 常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(10): 1571 - 1577. (FENG Da-kuo, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Experimental study on 3D cyclic behaviors of soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(10): 1571 - 1577. (in Chinese))
- [8] FARHADI B, LASHKARI A. Influence of soil inherent anisotropy on behavior of crushed sand-steel interfaces[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(1): 111 - 125.
- [9] MARTINEZ A, FROST J D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces[J]. Géotechnique Letters, 2017, **7**(1): 104 - 111.
- [10] FENG D K, ZHANG J M, HOU W J. Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(12): 04018095.
- [11] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体-基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1947 - 1954. (YANG Zhong-ping, JIANG Yuan-wen, LI Shi-qi, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1947 - 1954. (in Chinese))
- [12] LI Y H, LV M F, GUO Y C, et al. Effects of the soil water content and relative roughness on the shear strength of silt and steel plate interface[J]. Measurement, 2021, **174**: 109003.
- [13] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, **97**(12): 1657 - 1673.
- [14] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))
- [15] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1303 - 1306. (WANG Wei, LU Ting-hao, ZAI Jin-min, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1303 - 1306. (in Chinese))
- [16] 陆勇, 周国庆, 夏红春, 等. 中、高压下粗粒土-结构接触面特性受结构面貌尺度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3491 - 3499, 3526. (LU Yong, ZHOU Guo-qing, XIA Hong-chun, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3491 - 3499, 3526. (in Chinese))
- [17] 朱俊高, 汪淼, 黄维, 等. 钢-土接触面位移与强度特性直剪试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, **49**(3): 265 - 271. (ZHU Jun-gao, WANG Miao, HUANG Wei, et al. Experimental study on displacement and strength behavior of interface between soil and steel using direct shear test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, **49**(3): 265 - 271. (in Chinese))
- [18] DEJONG J T, WHITE D J, RANDOLPH M F. Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(1): 15 - 28.
- [19] FENG D K, ZHANG J M, HOU W J. Role of normal stiffness in 3D cyclic behavior of gravel-steel interface from large-scale direct shear tests[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(1): 151 - 165.
- [20] DEJONG J T, RANDOLPH M F, WHITE D J. Interface load transfer degradation during cyclic loading: a microscale investigation[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(4): 81 - 93.
- [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): 2574 - 2582. (FENG Da-kuo, HOU Wen-jun, ZHANG Jian-min. Test investigations on 3d stress-controlled cyclic behavior of gravel-structure interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2574 - 2582. (in Chinese))
- [22] 张建民, 侯文峻, 张嘎, 等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 889 - 894. (ZHANG Jian-min, HOU Wen-jun, ZHANG Ga, et al. Development and application of 3D soil-structure interface test apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 889 - 894. (in Chinese))