

# 法向刚度切向应力控制接触面动力特性试验研究

冯大阔<sup>1,2</sup>, 侯文峻<sup>3</sup>, 张建民<sup>1,2</sup>

(1. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学土木水利学院, 北京 100084;

3. 住房和城乡建设部建筑节能与科技司, 北京 100835)

**摘要:** 运用最新研制的 80 t 三维多功能土工试验机, 对工程中常用的粗粒土与人造粗糙钢板形成的接触面在常刚度法向边界条件切向应力控制下的动力特性进行了试验研究, 并分析了切向控制方式的影响。接触面在剪切时产生了明显体变, 可分为可逆和不可逆两部分; 可逆性剪切体变的发展程度主要与切向位移幅值有关; 不可逆性剪切体变的发展与剪切路程有很大关系; 接触面体变出现了一定的异向性, 且受切向加载路径、切向控制方式的影响。随着循环剪切的进行接触面切向位移发生明显偏移, 其幅值也逐渐增加, 受切向加载路径影响较大; 切向应力、应力比、法向位移与切向位移的关系与切向加载路径、切向控制方式有很大关系。接触面在初始剪切时没有达到、随后逐渐达到抗剪强度, 但破坏状态持续时间很短; 其抗剪强度指标与切向控制方式关系不大。

**关键词:** 接触面; 粗粒土; 常刚度; 应力控制; 动力特性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)06-0846-07

**作者简介:** 冯大阔(1984-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: fdk07@mails.tsinghua.edu.cn。

## Experimental study on cyclic behavior of gravel-structure interface with stress-control mode under constant normal stiffness

FENG Da-kuo<sup>1,2</sup>, HOU Wen-jun<sup>3</sup>, ZHANG Jian-min<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing 100835, China)

**Abstract:** A new apparatus is developed to investigate the stress-controlled behavior of the interface between structure and gravelly soil under constant normal stiffness condition. The test results indicate that: (1) the volumetric change is induced by cyclic shear and can be divided into reversible and irreversible parts. The reversible part is governed by tangential displacement amplitude, and the irreversible part is significantly affected by shear distance; (2) the anisotropy of interface volumetric change is obviously observed and has great concern with shear paths and control modes; (3) the tangential displacement accumulates and migrates gradually with shear cycles. The shear paths and control modes have influences on the relationship between shear stress, stress ratio, normal displacement versus tangential displacement; (4) the interface shear strength is gradually mobilized after the first few shear cycles under stress control, and its friction angle is independent of the control modes.

**Key words:** interface; gravelly soil; constant normal stiffness; stress control; cyclic behavior

## 0 引言

土与结构接触面力学特性的研究具有重要的理论意义, 接触面力学规律的总结、本构模型的建立和验证都建立在对接触面力学特性, 特别是各种控制条件和剪切路径下静动力学响应的深入认识和系统研究的基础上。随着粗粒土在土石坝、面板堆石坝、高速铁路等实际工程中的广泛应用, 其与面板、基岩、地基等构成的接触面的力学特性对土体与结构物应力变形及其相互作用等有重要影响, 因此接触面的研究也具有具有重要的工程价值。材料试验是接触面力学特性研究

的基础, 国内外学者对其进行了大量的试验研究<sup>[1-11]</sup>。

以往的研究主要存在以下几方面局限性: 主要针对常应力法向边界条件, 对于常刚度条件下接触面力学响应规律的研究还很少, Fakharian 等<sup>[6]</sup>对常刚度条件进行了一些研究, 但主要针对砂土; 由于受到试验设备的限制, 主要局限于接触面二维力学特性的研究, 接触面三维力学特性有待于进一步研究<sup>[10-11]</sup>; 主要集

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB714108);  
国家自然科学基金项目(50979046)

收稿日期: 2010-03-12

中于切向位移控制条件研究<sup>[3-11]</sup>, 如文献[11]对粗粒土与结构接触面在法向常刚度切向位移控制条件下的三维动力特性进行了研究; 而实际工程中的部分接触面用切向应力控制条件来模拟将更为合理一些, 如桥梁桩基础与周围土体接触面在交通荷载等作用下的力学特性等; 目前对切向应力控制条件下接触面力学特性及其与位移控制条件的比较研究尚无系统成果发表; 接触面本构模型也很少用切向应力控制试验结果进行直接验证。因此有必要对切向应力控制条件下粗粒土与结构接触面的力学特性及其与位移控制条件的异同进行研究。

本文运用最新研制的 80 t 三维多功能土工试验机, 对工程中常用的粗粒土与结构接触面在法向常刚度切向应力控制条件下的三维动力特性进行了试验研究。主要分析该条件下接触面的基本力学特性, 并探讨切向控制方式对接触面力学特性的影响。

## 1 试验条件

### 1.1 试验设备

试验设备采用最新研制的 80 t 三维多功能土工试验机<sup>[10]</sup>, 该设备的三维示意图如图 1 所示。设备主机框架尺寸为 2 m×2 m×3.5 m (长×宽×高), 提供了较大的空间安装接触面试样 (试样最大尺寸达 500 mm); 法向相应可行走±300 mm, 可施力 800 kN, 切向可行走±150 mm, 可施力 400 kN; 实现了试验中常用的 3 种法向边界条件 (常应力、常刚度和常位移) 以及应力、位移两种切向控制方式; 可进行直线、圆形以及任意自定义的切向加载路径; 加载、控制和测量均实现了自动化, 且精度较高。设备适用于研究各类接触面在复杂加载条件下的静动力学特性。

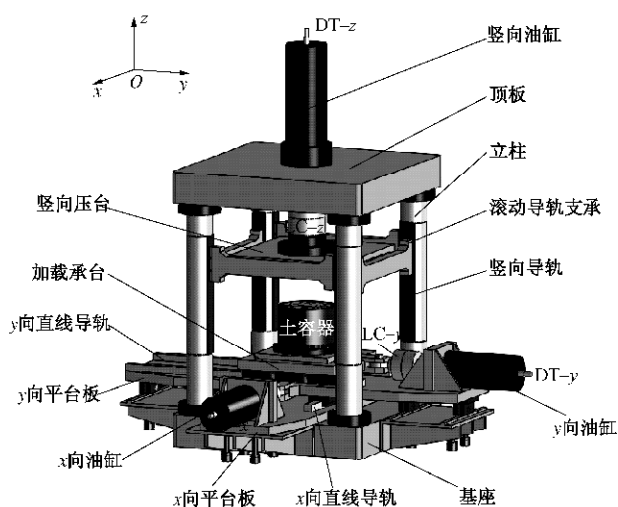


图 1 试验机三维示意图

Fig. 1 3D schematic view of test apparatus

### 1.2 试验材料

试验用粗粒土为积石峡干沟料, 颗粒尖角锐缘不多; 粒径范围 5~12 mm, 平均粒径 7.5 mm, 为不良级配粗粒土。制样时控制其干密度为 1.84 g/cm<sup>3</sup>。三轴试验结果<sup>[11]</sup>表明其应变软化程度较小, 高围压下主要为体缩, 低围压下体胀现象非常明显。

试验用结构面板为人造粗糙钢板, 其表面的齿形为统一的正四棱台。定义正四棱台的高度 (即表面齿形的峰谷距) 为结构面板的粗糙度, 用  $R$  表示。该钢板的粗糙度为  $R=1$  mm。根据切向位移控制接触面试验结果<sup>[11]</sup>, 该接触面在单调直线剪切路径下的摩擦角约为 35°。

### 1.3 剪切路径

本文试验主要在单向往返和十字加载路径下进行, 其示意图如图 2 所示。单向往返加载路径是在一个切向进行往返剪切的过程, 如图中的①—②—③—④—①, 并定义①—②—③—④—①为一个完整循环。十字加载路径是沿两个正交切向 ( $x$  和  $y$  方向) 进行交替剪切的过程, 如图中的①—②—③—④—⑤—⑥—⑦—⑧—①, 定义①—②—③—④和⑤—⑥—⑦—⑧各为一完整循环。

土体试样按要求制备完成后, 将钢板置于其上并施加需要的初始法向应力  $s_0$ , 将法向边界条件设置为常刚度条件并设定刚度值  $K$ 。然后在切向施加相应的切向应力  $t$ , 使接触面按指定的加载路径进行剪切; 并记录相关数据。本文试验采用的法向刚度值  $K=100$  kPa/mm, 初始法向应力  $s_0=400$  kPa, 切向加载幅值  $t_m=255$  kPa, 基本上为接触面静抗剪强度的 90%, 为初始法向应力的 65%。

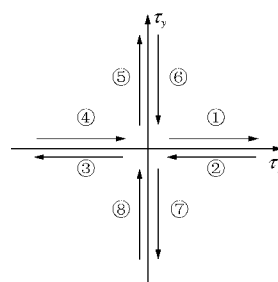


图 2 切向加载路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear paths

## 2 试验结果

图 3 给出了十字和单向往返加载路径下接触面试验结果, 包括切向位移  $u$ 、法向位移  $v$ 、法向应力  $s$  随循环周次  $N$  变化的时程曲线。接触面面积在剪切过程中保持不变, 因此法向位移和接触面体变在定性规律上是一致的; 并根据土力学习惯规定接触面体变以压

缩为正, 膨胀为负。

在切向应力控制十字和单向往返加载路径下, 接触面均产生了一定的法向位移, 这说明接触面产生了明显的剪切体变, 且在循环剪切的过程中呈现有规律的增大和减小, 但总体上以剪缩为主。初始几个剪切循环内接触面体变速率较大, 随后逐渐减慢并最终基本趋于稳定; 单向往返加载路径下接触面体变的稳定值略大于十字加载路径。在常刚度法向边界条件下, 接触面的体缩使法向应力总体上在减小, 并且呈现有规律的波动, 波动的形式与法向位移相同; 十字加载路径下法向应力平均值最后基本稳定在 300 kPa 左右; 单向往返加载路径下接触面法向应力的变化形式与法向位移也类似, 这里不再给出, 其平均值最后基本稳定在 295 kPa 左右, 略小于十字加载路径。

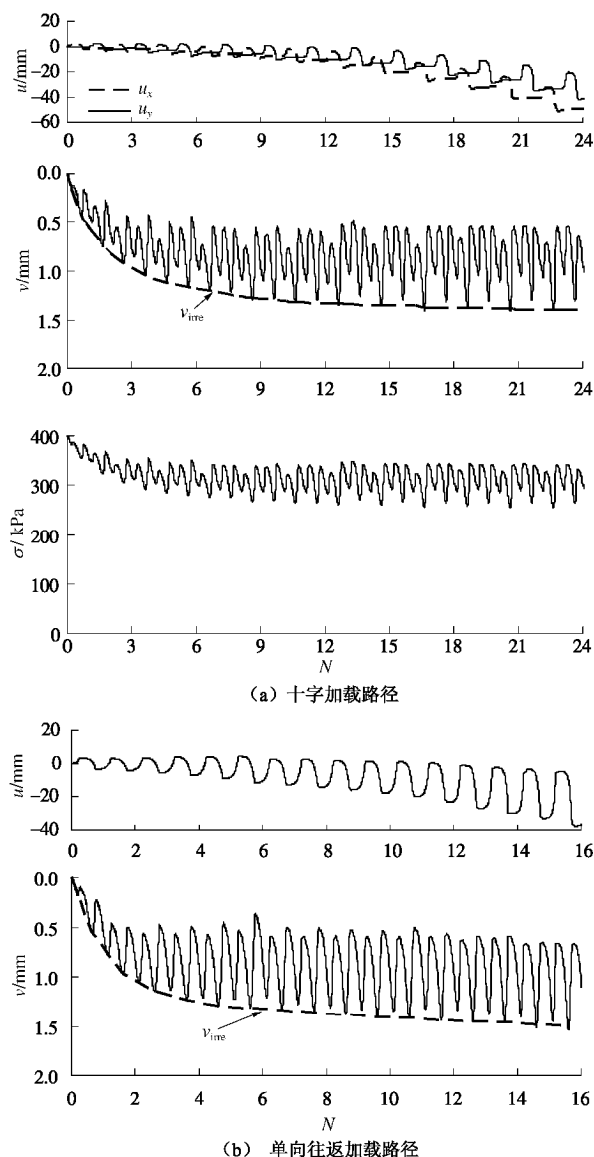


图3 切向应力控制接触面试验时程曲线

Fig. 3 Test results of interface under stress control

随着循环剪切的进行, 十字和单向往返加载路径

下接触面切向位移幅值逐渐增大, 同时向一个方向发生明显偏移。但幅值增加和偏移速率, 十字加载路径较单向往返加载路径为小; 十字加载路径下  $x$  方向的偏移速度较  $y$  方向大, 幅值增加速率基本相同。单向往返加载路径下, 第 16 循环接触面切向位移已基本偏移至 -40 mm, 位移幅值也已超过 30 mm; 而对于十字加载路径, 到了第 21 循环,  $x$  向位移才偏移至 -40 mm,  $y$  向则还不到 -30 mm, 位移幅值也才达到 20 mm 左右。

### 3 规律分析

#### 3.1 体变特性

粗粒土与结构接触面试验结果表明<sup>[9]</sup>, 接触面剪切体变可以分为可逆和不可逆两部分; 其对应的法向位移称为可逆性法向位移  $v_{re}$  和不可逆性法向位移  $v_{ire}$ 。不可逆性法向位移是指每一剪切循环中法向位移的最大值, 从接触面法向位移  $v$  中扣除不可逆性法向位移  $v_{ire}$  即为可逆性法向位移  $v_{re}$ , 即  $v_{re} = v - v_{ire}$ 。图 3 中虚线给出了接触面不可逆法向位移, 图 4 给出了接触面可逆性法向位移  $v_{re}$  与循环周次  $N$  的时程曲线。

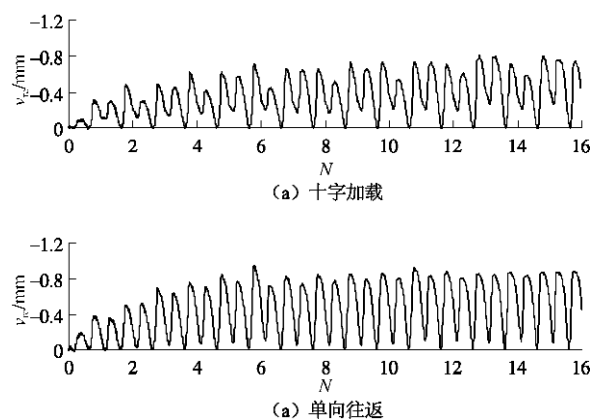


图4 接触面可逆性法向位移时程曲线

Fig. 4 Time histories of reversible normal displacement with shear cycles

从图 4 可以看出, 切向应力控制十字和单向往返路径下接触面可逆性剪切体变均非常明显, 甚至达到不可逆性剪切体变的一半以上。接触面不可逆性剪切体变一直为压缩, 其发展与剪切路程有关; 初始剪切时接触面不可逆性剪切体变速率均较大, 随后逐渐减慢并最终基本趋于稳定; 单向往返加载路径下接触面不可逆性剪切体变的增加速率及最后达到的稳定值较十字加载路径稍大一些。可逆性剪切体变幅值在初始剪切时较小, 随后逐渐增加并趋于稳定; 其幅值的增加速率, 单向往返加载路径较十字加载路径为大。初始剪切时切向位移幅值较小, 接触面可逆性剪切体变没有充分发展, 因此其幅值相对较小, 随着循环剪切的进行, 切向位移增加使可逆性剪切体变逐渐发展,

当切向位移达到一定程度时, 可逆性剪切体变充分发展, 其幅值不再变化, 基本上稳定在 0.8 mm 左右, 这说明可逆性剪切体变的发展程度主要与切向位移幅值有关; 切向应力控制条件下接触面体变经历了不可逆性剪切体变占优, 可逆性剪切体变在逐渐加强的过程; 也经历了不可逆剪切体变增量占优, 到其与可逆性剪切体变增量基本平衡, 再到可逆性剪切体变增量占优的过程。

图 5、6 分别给出了给出了 2 种加载路径下特定循环周次 (第 1, 4, 16 循环, 十字加载路径亦给出第 24 循环) 法向位移  $v$ 、可逆性法向位移  $v_{re}$  与切向应力  $t$  以及法向位移  $v$  与切向位移  $u$  的关系曲线。可以看出在十字和单向往返加载路径下, 接触面在每个循环均先剪缩再剪胀, 卸载时则主要为剪缩; 随着循环剪切的进行, 这种现象更为明显。

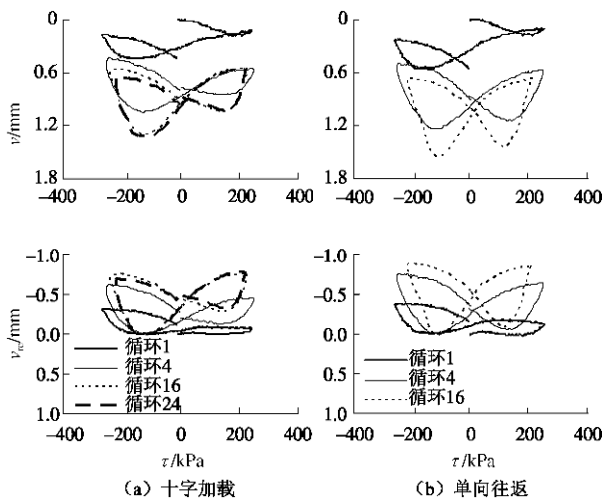


图 5 接触面法向位移 - 切向应力关系曲线

Fig. 5 Relationship between normal displacement and shear stress

在十字加载路径下, 初始剪切时由于接触面不可逆性剪切体变增长较快, 可逆性剪切体变没有充分发展, 法向位移 - 切向应力关系曲线不闭合, 总有一定的张开, 不同循环也不重合; 随着循环剪切的进行, 不可逆剪切体变增长变慢, 并逐渐趋于稳定, 可逆性剪切体变充分发展, 该曲线张开量逐渐减小; 不同循环也基本趋于重合。可逆性法向位移 - 切向应力关系曲线同一循环也是不闭合的, 稍有一定的张开, 这主要是由两个正交切向交替剪切导致颗粒重排列引起的; 曲线的张开量随循环剪切的进行逐渐减小。不同循环可逆性法向位移 - 切向应力关系曲线, 在初始剪切时由于可逆性剪切体变要继续发展而不重合; 随着循环剪切的进行、可逆性剪切体变充分发展而逐渐趋于重合。而对于单向往返加载路径, 法向位移 - 切向应力关系曲线初始剪切时不闭合, 后逐渐转为闭合;

可逆性法向位移 - 切向应力关系曲线除第一循环不闭合外, 其他循环均基本闭合。图 6 中两种加载路径下法向位移 - 切向位移曲线总不闭合, 不同循环也不重合, 这主要是由切向位移的偏移引起的。

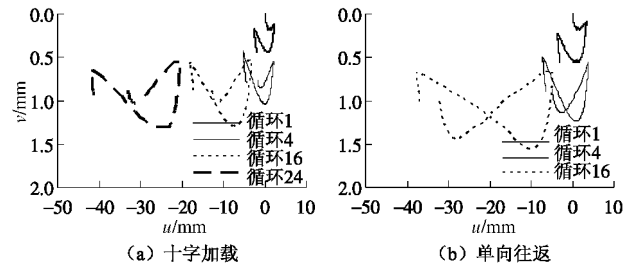


图 6 接触面法向位移 - 切向位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between normal and tangential displacements

同时可以发现, 接触面在正反两个剪切方向的可逆性剪切体变是不同的, 正方向剪切对应的可逆性剪切体变一般较反向为小, 这说明接触面体变在循环剪切过程中产生了异向性<sup>[9]</sup>, 且在初始剪切时较为明显, 随着循环剪切的进行, 接触面体变异向性稍有减弱。同时十字加载路径下接触面可逆性剪切体变在正反剪切方向的差别较单向往返路径为大, 接触面体变异向性比单向往返路径更明显, 说明切向加载路径对接触面的体变特性及其异向性有一定影响, 垂直方向的剪切一定程度上增加了接触面的体变异向性。

### 3.2 切向应力应变关系

如前所述, 接触面切向位移幅值随着循环剪切的进行逐渐增加, 且十字加载路径较单向往返加载路径慢。这是因为在初始剪切时, 接触面法向应力较大, 抗剪强度也相应较大, 达到切向应力幅值时对应的应力水平较小, 产生的切向位移也较小; 随着循环剪切的进行, 接触面法向应力逐渐减小, 达到切向应力幅值时对应的应力水平变大, 而接触面剪切硬化程度相对较低, 产生的切向位移也相应增大。而十字加载路径下接触面剪缩速率较单向往返加载路径稍慢一些, 同一循环接触面法向应力较大, 达到切向应力幅值时对应的应力水平较小, 再加上垂直方向的剪切导致颗粒重分布, 从而产生的切向位移幅值较单向往返加载路径为小。

图 7 给出了切向应力控制条件下接触面切向应力  $t$  及应力比  $h$  ( $h=t/s$ ) 与切向位移  $u$  的关系曲线。可以看出, 切向位移随着切向应力的增加是逐渐增加的; 加载阶段接触面的切向刚度 (切向应力 - 切向位移曲线的斜率) 在初始剪切时较大, 随着循环剪切的进行逐渐减小, 这在单向往返加载路径下更为明显。切向刚度的降低是法向应力降低和接触面剪切硬化综合作用的结果, 当法向应力降低起主导作用时, 切向刚度

就会随之降低。卸载阶段的切向刚度比加载阶段大的多，接触面是在切向位移变化很小的情况下迅速卸载的，因此卸载段的曲线几乎是竖直的，接触面切向位移主要在加载阶段产生。单向往返加载路径下切向位移幅值增加较快，使得加载阶段的切向刚度较十字加载为小。卸载阶段的切向刚度则差别不大。

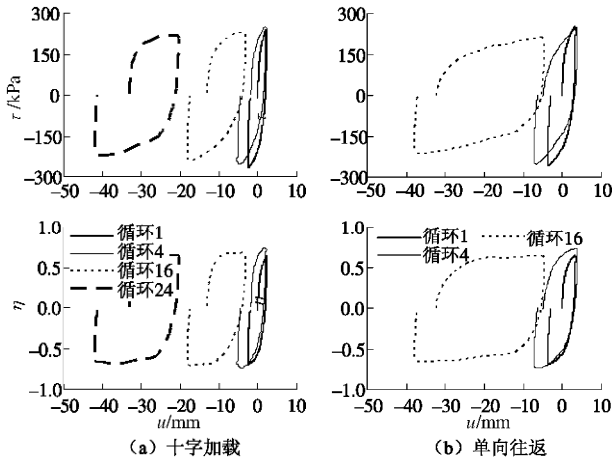


图 7 接触面切向应力应变关系曲线

Fig. 7 Relationship between shear stress and tangential displacement

在初始剪切时接触面切向应力应变曲线没有出现切向应力基本不变的水平段，随着循环剪切的进行，有产生水平段的趋势；在应力控制条件下，切向应力作为控制因素在加载阶段是不断增加的，因此不可能产生切向应力不变的水平段。应力比 - 切向位移关系曲线形式与切向应力应变曲线类似，但其随着循环剪切的进行逐渐出现了应力比基本不变的水平段，这说明接触面逐渐达到抗剪强度。由于切向位移的偏移和幅值的增大，直接导致了两种加载路径下切向应力应变关系曲线、应力比 - 切向位移关系曲线在同一循环不闭合，不同循环不重合，甚至差别较大。

3.3 强度特性

图 8 给出了十字和单向往返加载路径下接触面剪切过程中的应力路径图及其强度包线，其中十字加载路径给出的是  $x$  方向的应力路径。可以直观地发现切向应力控制两种加载路径下接触面在初始剪切时均未达到强度包线，随着循环剪切的进行逐渐接近并达到强度包线。这说明在法向常刚度切向应力控制条件下，接触面在初始剪切的几个循环内没有达到抗剪强度，没有发生破坏；随着循环剪切的进行、法向应力的降低，接触面逐渐达到抗剪强度，处于破坏状态，但破坏状态持续的时间很短，否则切向位移将会迅速增大，使设备失控。由图 8 可以得出切向应力控制条件下接触面摩擦角约为  $35^\circ$ 。

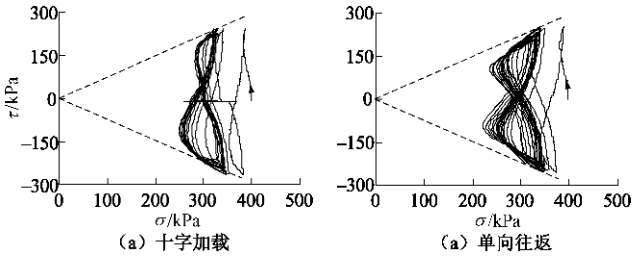


图 8 接触面应力路径图

Fig. 8 Stress paths of interface

4 影响分析

图 9~12 给出了切向位移控制十字加载路径下接触面试验结果，切向位移幅值为 40 mm。用以比较分析切向控制方式对接触面动力特性的影响。

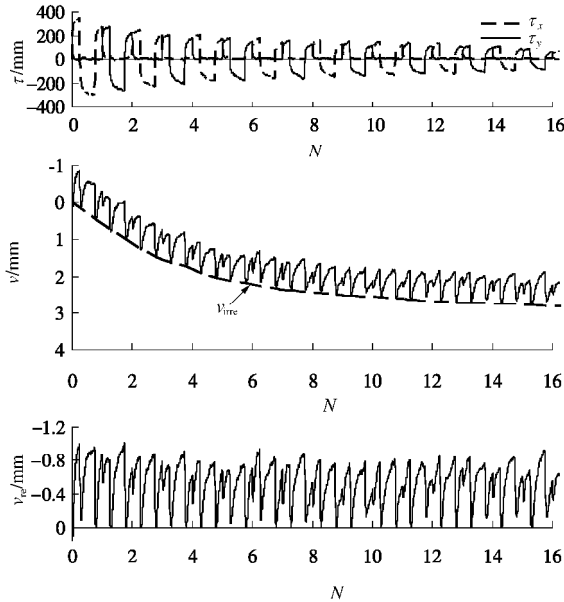


图 9 切向位移控制接触面试验时程曲线

Fig. 9 Test results of interface under displacement control

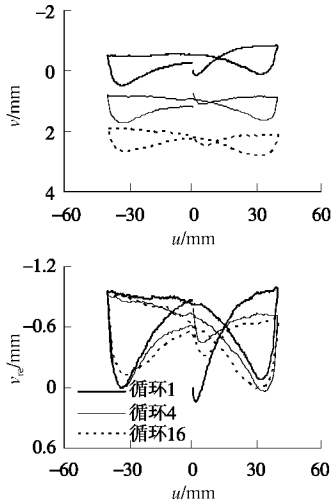


图 10 切向位移控制接触面法向位移-切向位移关系曲线

Fig. 10 Relationship between normal and tangential displacements under displacement control

在切向位移控制条件下, 接触面也产生了可分为可逆和不可逆部分的剪切体变; 不可逆剪切体变随着循环的进行逐渐增大, 然后基本趋于稳定, 稳定值较切向应力控制大得多, 可逆性剪切体变则变化不大, 维持在 0.8 mm 左右, 与切向应力控制达到的稳定值相近; 这是因为切向位移控制条件下初始剪切及后续剪切过程中, 切向位移幅值均为 40 mm, 接触面可逆性剪切体变在开始时就已经充分发展; 初始剪切的一个完整循环中, 接触面所走的剪切路程较应力控制大得多, 因此不可逆剪切体变发展的更快。进一步说明可逆性剪切体变的发展程度主要与切向位移幅值有关; 不可逆剪切体变的发展与剪切路程有很大关系。但随着循环剪切的进行, 接触面体变总体上为剪缩, 说明切向位移控制接触面体变经历了由可逆性剪切体变占优到不可逆性剪切体变占优的过程, 而切向应力控制是不可逆性剪切体变占优、可逆性剪切体变逐渐增强的过程。这也是切向位移控制条件初始剪切时接触面总体呈剪胀现象, 而应力控制时则总体剪缩的原因。同时, 切向位移控制条件下接触面也呈现一定的异向性, 但由于剪切位移幅值较大, 可逆性剪切体变充分发展, 接触面体变异向性表现的不太明显。

在切向位移控制条件下, 由于接触面总体剪缩, 法向应力降低, 抗剪强度相应降低, 因此切向应力逐渐减小, 最后基本达到零; 而在切向应力控制条件下, 接触面法向应力的降低使应力水平提高, 因此切向位移幅值随循环剪切而逐渐增大, 并产生明显偏移, 这直接导致法向位移 - 切向位移曲线不闭合, 有一定的错开, 而切向位移控制条件下该曲线则是基本闭合的。

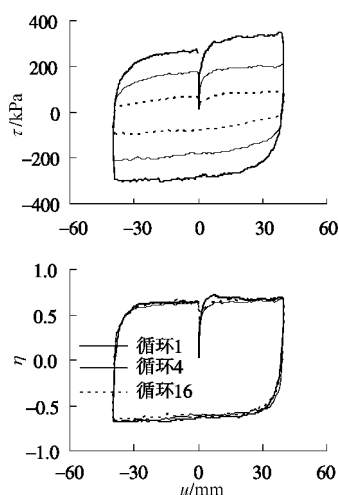


图 11 切向位移控制接触面切向应力应变关系曲线

Fig. 11 Relationship between shear stress and tangential displacement under displacement control

比较图 7, 11 可以看出, 切向应力和位移控制条件下特定循环接触面切向应力应变关系、应力比 - 切向位移关系也有明显不同。对于切向位移控制, 在初

始剪切时接触面就出现切向应力基本不变的水平段, 且接触面切向应力 - 切向位移曲线在一个完整循环内基本闭合, 不同循环一般不重合, 但形状相似。对于应力比 - 切向位移关系曲线, 切向应力控制条件下不闭合, 不同循环也不重合; 切向位移控制条件下则是闭合的, 不同循环也基本重合。进一步整理试验结果, 可以发现切向应力和位移控制条件下接触面的初始切向刚度相差不大; 但是随着循环剪切的进行, 位移控制条件下接触面剪切硬化占主导地位, 切向刚度逐渐增加; 而应力控制时法向应力降低占主导地位, 切向刚度则逐渐减小。

在强度特性方面, 切向应力和位移控制条件下接触面摩擦角均为  $35^\circ$ , 这说明接触面抗剪强度指标 (接触面摩擦角) 受切向控制方式影响较小。同时从图 12 可以看出, 切向应力和位移控制条件下接触面的应力路径有很大不同; 切向位移控制时, 接触面在初始剪切即达到抗剪强度, 处于破坏状态, 且维持一定时间, 图 11 中应力比不变的水平段是最为直接的证明; 同时法向应力和切向应力很快达到零。而对于切向应力控制条件, 初始剪切时接触面没有达到抗剪强度, 随着循环次数的增加才逐渐达到抗剪强度, 进入破坏状态, 但维持的时间很短; 法向应力和切向应力没有达到零。

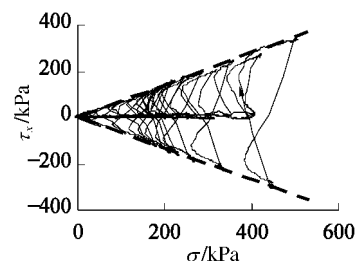


图 12 切向位移控制接触应力路径图

Fig. 12 Stress path of interface under displacement control

## 5 结 语

运用最新研制的 80 t 三维多功能土工试验机, 对粗粒土与人造粗糙钢板接触面在常刚度法向边界条件切向应力控制下的动力特性进行了试验研究, 分析总结了接触面在该条件下的主要力学特性, 并就切向控制方式对接触面动力响应的影响进行了探讨。

(1) 接触面在剪切时发生了明显的体变, 可分为可逆和不可逆两部分。可逆性剪切体变的发展程度主要与切向位移幅值有关; 不可逆剪切体变的发展与剪切路程有很大关系。切向应力控制时不可逆性剪切体变占优, 可逆性剪切体变在逐渐加强; 切向位移控制时则由可逆性剪切体变占优逐渐转变为不可逆性剪切体变占优。接触面体变出现了异向性, 且受切向加载

路径、切向控制方式的影响。

(2) 切向应力控制条件下, 随着循环剪切的进行接触面切向位移发生明显偏移, 其幅值也逐渐增加。并受切向加载路径的影响。切向应力、应力比与切向位移的关系曲线同一循环不闭合, 不同循环也不重合, 且与切向加载路径、切向控制方式有很大关系。

(3) 切向控制方式对接触面摩擦角影响很小。切向位移控制时, 接触面第 1 循环即达到抗剪强度, 处于破坏状态, 法向和切向应力最后减小到零; 切向应力控制时, 接触面在初始几个循环没有达到、随后逐渐达到抗剪强度, 但破坏状态持续的时间很短。

### 参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, **11**(4): 339 - 353.
- [2] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **111**(6): 793 - 815.
- [3] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. *Soils and Foundations*, 1986, **26**(4): 139 - 149.
- [4] 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))
- [5] 高俊合, 俞海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. *土木工程学报*, 2000, **33**(4): 42 - 46. (GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bing. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, **33**(4): 42 - 46. (in Chinese))
- [6] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(12): 1098 - 1105.
- [7] HU Li-ming, PU Jia-liu. Testing and modeling of soil-structure interface[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, **130**(8): 851 - 860.
- [8] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 21 - 25. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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, FENG Da-kuo. Development of a 3D soil-structure interface test apparatus and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(6): 889 - 894. (in Chinese))
- [11] 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的试验研究[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 behavior of soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(10): 1571 - 1577. (in Chinese))