

饱和松砂的双向耦合剪切特性试验研究

栾茂田^{1,2}, 金丹^{1,2}, 张振东³, 许成顺⁴, 李鹏⁵

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024; 3. 淮海工学院土木工程学院, 江苏 连云港 222005; 4. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022; 5. 葫芦岛市公路管理处, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 为了模拟海床及海洋建筑物遭受波浪荷载时所引起的循环应力, 进行了一系列均等固结条件下的应力控制式轴向-扭转双向耦合循环剪切试验。试验时在竖向和扭转向同时施加动应力, 使加载路径在正应力偏差 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ 与剪应力 $\tau_{z\theta}$ 应力空间内为椭圆。分别控制竖向和扭转向循环荷载的大小, 以此来探讨双向耦合剪切试验中竖向应力与剪应力幅值的变化对饱和松砂变形特性的影响。试验结果显示, 所有的竖向应变均以拉伸向为主。对于椭圆应力路径所包围的椭圆面积相同的一组试验, 当竖向荷载分量与扭转向荷载分量之比小于某一临界值时, 竖向应变完全表现为单拉伸方向的变形, 大于临界值时则呈现出拉伸向更为显著的双向循环累积特性破坏。剪应变虽都表现为双向循环累积, 但是两个荷载分量的比值不同, 应力应变关系的滞回圈曲线形状不同。而椭圆面积的大小对土样的变形特性几乎没有影响。

关键词: 岩土工程; 变形特性; 轴向-扭转双向耦合剪切试验; 主应力轴旋转

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0319-07

作者简介: 栾茂田(1962-), 男, 山东招远人, 博士, 教授, 博士生导师, 要从事岩土力学基本理论与数值分析、非线性土动力学理论与计算、海洋土力学理论与实验技术等方面的教学与科学研究工作。E-mail: tianhaolanjd@yahoo.com.cn。

Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading

LUAN Mao-tian^{1,2}, JIN Dan^{1,2}, ZHANG Zhen-dong³, XU Cheng-shun⁴, LI Peng⁵

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. College of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 5. Huludao Highway Department, Huludao 125000, China)

Abstract: To simulate the continuous rotation of principal stress axes, a set of stress controlled bi-directional cyclic loading tests were conducted. Tests were performed with two cyclic stress components involving the horizontal shear stress (torsional shear stress) and the vertical shear stress (stress difference between vertical normal stress and horizontal normal stress) to provide an approximate presentation of wave or seismic loading conditions. The stress path shown in the orthogonal coordinates of stress difference and shear stress had an elliptical shape. The ratio of the shear amplitude between the longer axis and shorter axis and the area enclosed by elliptical rotational loading path were controlled in a planned way. Test results showed that the stress-strain behavior was significantly affected by the ratio of amplitude of the two shear stress components. But it was nearly independent on the area enclosed by elliptical rotational loading path. The deformation behaviors were classified as two different types based on the ratio value.

Key words: geotechnical engineering; deformation; bi-directional cyclic loading test; rotation of principal stress axes

0 引言

循环应力条件下砂土的变形特性是阐明地震时液化发生的机理及地基沉降所关注的问题之一。但是, 由于所涉及问题的复杂性和认识上的不足, 使得现有的研究成果和反应分析原理尚存在许多不足。其中,

存在的突出问题就是考虑复杂应力条件下土的动力特

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579006); 国家自然科学基金重点项目(50639010)

收稿日期: 2008-01-17

性及其本构关系。自从第一台循环三轴仪问世以来,越来越多各种类型的循环剪切设备被开发用于研究饱和砂土在循环荷载作用下的排水以及不排水特性。Ishibashi 指出选择一个合适的土工设备,必须首先考虑其是否能够再现和模拟现场应力状态^[1]。但是由于实验技术条件的限制,通常只针对各向均等初始固结应力状态和等幅单一剪切的循环应力条件,如图 1 所示的常规三轴试验与常规扭转试验,无法实现各种实际的初始应力状态和复杂的循环应力模式,无法模拟动主应力轴连续旋转和双向同时剪切等实际的复杂工作条件^[2-7, 15],更无法考虑每一种因素的单独的影响。

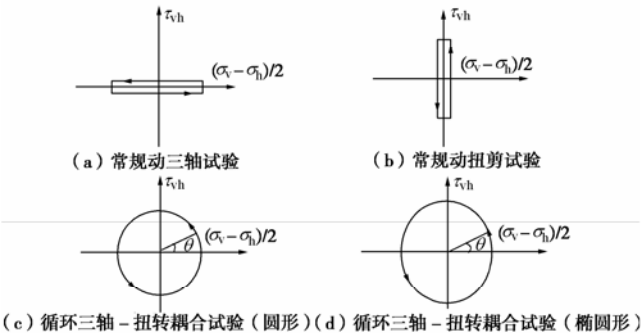


图 1 四种试验循环加载的二维应力路径

Fig. 1 Two-dimensional loading schemes

为了探讨复杂初始应力状态和循环荷载模式下土的应力-应变关系、孔隙水压力与残余变形发展规律、液化强度等性质,研制高精度多功能现代土工试验设备是十分必要的。土工试验必须能够再现现场的天然应力状态与地震或波浪等所引起的循环加载模式。如水平海床在波浪荷载作用下,海床内各点的动主应力方向将会因波浪的循环作用而发生不断的旋转^[2-4]。另外,在抗震设计或分析中,只考虑水平地震动而不考虑竖向地震动的影响是一种过分的简化,随着国内外数字化强震动台网的建设、地震破坏现象以及地震数据的进一步积累,使得越来越多的学者意识到应该充分重视竖向地震动的作用。2001 年我国滦县地震,在近场地震中或发震断层附近记录到较强的竖向地震动,一些场点记录到的竖向地震动峰值超过水平向地震动峰值。近场竖向地震动的这一特征引起了国内外学者的极大关注^[8]。周正民等分别对国内外数十次地震的竖向地震动进行了近场加速度峰值比的统计研究,研究结果表明:竖向与水平向加速度峰值比与震源距有关,随着震源距增加,比值降低^[9]。

关于双向剪切条件下,各方向荷载分量对砂土特性的影响,Seed 等人通过振动台对干砂进行了多向剪切试验,发现具有两个等值分量的双向振动比单向振动时强度低 10%~20%^[10]。Boulanger 等人利用

UCB-2D 简单剪切仪进行了几组不同密度,不同初始静水平剪切荷载的双向振动剪切试验,发现砂土水平向的抗力比垂直向更大,分析其原因为剪切应力的反向情况不同与主应力方向发生了旋转^[11]。国内沈瑞福等^[12]利用双向振动扭剪仪对砂土进行了常规动扭剪、常规动三轴和动主应力轴连续旋转条件下的不排水剪切试验,指出考虑动主应力轴旋转,土的强度明显降低,可达到 15%。姚仰平等^[13]人通过国内首创的振动拉压扭剪三轴仪上对饱和砂土的圆柱试样进行大量的动力试验,揭示了中主应力系数、主应力轴方向连续旋转及剪切胀缩性对土动力特性的重要影响。郭莹等^[14]人针对福建标准砂进行了循环扭剪、动三轴、轴向-扭转双向等幅耦合剪切试验,指出动主应力轴连续旋转的轴向-扭转双向耦合剪切试验得到的动强度较前两者都低,与循环扭剪试验得到的动强度相比约降低 10%~30%。循环三轴试验次之,循环扭剪的动强度最高。

如上所述,虽然关于主应力轴连续旋转以及双向剪切的应力条件已经得到了重视,但是由于土工实验技术的限制,对于主应力轴连续旋转的不等幅双向耦合剪切至今尚缺乏比较系统的试验研究,也没有比较一致的认识^[15]。本文以中国福建标准砂为研究对象,利用大连理工大学新研制的“土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪”^[16],通过设计并进行了大量轴向-扭转双向耦合剪切试验,拟实现如图 1(d)所示的主应力轴连续旋转且轴向、扭转双向应力幅值不等的复杂加载路径,着重探讨均等固结条件下,双向耦合剪切试验中两个荷载分量的变化对砂土液化变形的影响。两个循环荷载分量,即竖向荷载分量与扭转向剪切荷载分量,本文分别记为 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ 与 $\tau_{z\theta}$ 。分别研究了均等以及非均等固结条件下饱和砂土的强度与变形特性。

1 试验土料及实验方法

1.1 试验土料

试验中采用福建标准砂,相对密度控制为 $D_r=30\%$ 。通过测定,该砂土的比重为 $G_s=2.643$;颗粒尺寸为 $d_{50}=0.34\text{ mm}$;不均匀系数为 $C_u=1.542$;最大、最小孔隙比为 $e_{\max}=0.774$, $e_{\min}=0.537$;最大、最小干密度分别为 $\rho_{\max}=1.72(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$, $\rho_{\min}=1.49(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 。其土样的颗粒级配表如表 1 所列。

表 1 福建标准砂颗粒级配表

Table 1 Particle sizes

颗粒组成/mm						
>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075
0.01%	0.02%	56.98%	35.52%	7.44%	0.03%	0%

本文试验均采用分层干装法制备砂样, 并联合利用通 CO_2 、通无气水与施加反压 3 种方法来进行试样的饱和, 制备砂样的孔隙水压力系数均达到 98%。本文统一地采用一种固结路径, 即在不排水条件下同时施加内外侧压至设计平均固结压力 $p'_c = 100 \text{ kPa}$, 然后上下同时排水, 固结约 30 min 至变形稳定。试验中采用的双出力传感器可以实现竖向荷载与扭矩的同时施加。循环荷载的振动频率采用 0.1 Hz, 且循环荷载施加过程中总的球应力保持不变。

1.2 试样尺寸及应力状态

如图 1 所示, 试验中均采用空心圆柱试样, 试样外径和内径分别为 100 mm 和 60 mm, 试样高度为 150 mm。在试验中, 通过独立控制竖向荷载 W 、扭矩 M_T , 从而在试样中实现各种不同的动力组合应力条件。

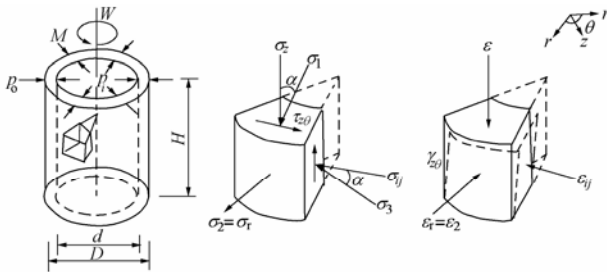


图 2 空心圆柱试样中土的应力状态

Fig. 2 Stress state of soil element in hollow-cylinder soil samples

1.3 试验设计思路

为实现如图 2 (d) 所示的复杂应力路径, 选取相位差为 90° 的应力控制式轴向 - 扭转不等幅双向耦合剪切试验, 使加载路径在 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ 与 τ 应力空间内为椭圆, 在 $z\theta$ 平面内实现主应力轴连续旋转且正应力偏差与剪应力及由两者组合而成的总偏差应力都在循环变化的应力变化模式, 如图 3 所示。

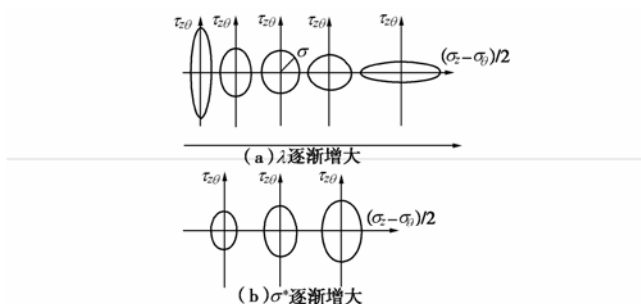


图 3 均等固结条件下轴向 - 扭转双向耦合试验的理想加载模式

Fig. 3 Ideal loading schemes of bi-directional shear loading tests

为了探讨外加荷载两个方向的幅值大小对砂土液化特性的影响, 定义竖向动应力幅值之半与动剪应力之比 $((\sigma_z - \sigma_\theta)/2)/\tau_{z\theta} = \lambda$, 在应力路径所围的椭圆面积不变的情况下对不同 λ 值进行试验, 记为固定 σ^* 变 λ 试验, 理想的加载模式如图 3 (a) 所示, 从类似循

环扭转逐渐变化到类似循环三轴扭转, 模拟波浪荷载以及地震荷载从远场到近场, 竖向与水平向加速度峰值之比逐渐增大的情况, 其中 $\lambda=0$ 时为循环扭转, $\lambda=+\infty$ 时为循环三轴。为了探讨椭圆面积的大小对砂土液化特性的影响, 取与椭圆面积相等的圆的半径 σ^* 作为度量来反映椭圆面积的大小, 同样在 λ 值不变的情况下, 对不同的椭圆面积进行试验, 记为固定 λ 变 σ^* 试验, 理想的加载模式如图 3 (b) 所示。另外还进行了某一剪切荷载分量不变而另一剪切荷载分量变化的试验, 记为恒定某一荷载分量试验。

2 试验结果分析

饱和砂土的振动液化过程是指动荷载作用下土体结构逐渐破坏, 孔隙水压力逐渐增加, 有效应力逐渐降低, 最终转化为液态的过程, 土结构的累积破坏和孔隙水压力的不断增长是两个必要的条件。在均等固结条件下所进行的循环剪切试验, 破坏标准通常取初始液化标准^[17]: 即超孔隙水压力达到平均有效固结压力时所对应的循环应力条件 (包括循环应力幅值与循环次数)。本文取砂土达到初始液化时的振动次数为破坏振次 N_f 。在均等固结条件下, 由于强度随循环振次的增加而突然衰减, 从而应力路径突然向圆点缩小。

在不同竖向动应力与动剪应力组合条件下的椭圆耦合循环剪切试验中, 砂土的强度表现出显著的差异。砂土的液化强度与竖向动应力与动剪应力的幅值之比 λ 密切相关^[18]。对于任何 σ^* , 强度曲线在 $\lambda=0.6 \sim 0.75$ 时均出现了转折点, 本文定义此转折点处的 λ 值为临界值 λ_c 。当 $\lambda > \lambda_c$ 时, 破坏振次随 λ 的增大而减小; 当 $\lambda < \lambda_c$ 时, 破坏振次随 λ 的增大而增大。在均等固结条件下, 随着循环振次的增加, 孔隙水压力上升直至最后有效应力降为 0, 导致竖向应变或剪应变的残余累积变形均较大, 且对于竖向而言, 拉伸向的累积变形更大。

2.1 固定 σ^* 变 λ 试验

图 4 所示为加载时椭圆应力路径所包围的面积相等, 但 λ 不等的竖向应力 - 应变关系。试验结果显示, 尽管竖向拉伸和压缩方向的循环应力对称, 但是两个方向所累积的应变却不对称, 拉伸向的累积变形更大。其中, 当 λ 小于临界值 λ_c 时, 尽管在拉压对称的竖向动荷载条件下, 却只产生单方向的拉伸应变。当竖向动应力逐渐增大至 λ 大于临界值 λ_c 时, 竖向应变逐渐呈现出双向循环累积特性, 但拉伸向发展的也更为迅速。且随着 λ 值逐渐增大, 发生显著变形时的竖向应力衰减减缓。图 5 所示为与图 4 同一试验中对应的剪应力 - 应变关系, 如图所示随着 λ 值逐渐增大, 剪应

变逐渐倾向于单向发展,且试样破坏时的总应变中剪应变所占比重逐渐减小。

图6给出了 $\lambda=0.3$ 条件下应变开始发生之后两个应力循环内的试验结果。左图中标记的大小写字母分别与中图及右图中标记的相同符号为同一时刻点。如图所示,轴向应变自A点开始发生。当试验加载到第18.5个循环的A→B阶段时,轴向应力开始反向卸载,同时拉伸应变开始产生,到B点时轴向应力反向卸载到零,应变停止;紧接着轴向应力进入正向加载阶段B→C,应变出现少量回弹;到正向卸载阶段C→D时,应变向相反方向发展,此时需要注意的是应变停止时的D点处并未出现压缩应变,所以相当于应变仍在回弹;到反向加载阶段D→E,应变与C→D阶段相比有少量回弹;到此,轴向应变开始发生的第一个应力循环结束,仅出现单向累积的拉伸应变。当加载到第19.5个循环时,由于砂土强度逐渐丧失,应变开始迅速增长。

如图剪应变也自a点开始发生。当试验加载到第18.5个循环时,与轴向应力相位相差 90° 的剪应力开始反向加载,如图a→b,剪应变也随之开始发生;随后的反向卸载阶段b→c,应变仅有微量回弹;正向加载阶段c→d,剪应变又向另一侧迅速发展;正向卸载阶段d→e,应变基本不变;到此,剪应变开始发生的第一个应力循环结束,出现双向循环累积的剪应变。应力-应变滞回圈特征与常规循环扭剪试验得到的结

果类似。

从图7同样可以看出 $\lambda=3.3$ 时,轴向应变与剪应变分别自A'(a')点同时开始发生。但与 $\lambda=0.3$ 情况相反的是,轴向应变总是在轴向应力的加载阶段产生,反向加载时(A'→B')产生拉伸向的应变,正向加载(C→D')时产生压缩向的应变,卸载时(B'→C'、D'→E')应变基本不变。应力-应变滞回圈特征与常规循环三轴试验得到的结果类似。 $\lambda=1$ 时情况与 $\lambda=3.3$ 情况相同。

由上可以看出,无论 λ 大于或小于临界值 λ_c ,轴向应变与剪应变总是同时发生,且当 $\lambda < \lambda_c$ 时,应变随着剪应力的加载而增长,当 $\lambda < \lambda_c$ 时,应变随着轴向应力的加载而增长。这是因为图4(a)及图6中的竖向应力较小,剪应力占主导地位。当较大的剪应力加载时,剪应变发展迅速,土颗粒间有较大的相互错动,应力单元其形状沿轴向并不对称,因此,竖向应变没有出现循环效应,而发展相对较快。当剪应力正向或反向卸载时,此时剪应变基本不变,土颗粒间几乎没有错动,而此时较小的竖向应力为反向或正向加载,故引起少量应变。图4(c)及图7中的竖向应力占主导地位,故竖向应变在竖向应力加载时发展迅速。

由上可以看出,无论 λ 大于或小于临界值 λ_c ,轴向应变与剪应变总是同时发生,且当 $\lambda < \lambda_c$ 时,应变随着剪应力的加载而增长,当 $\lambda < \lambda_c$ 时,应变随着轴

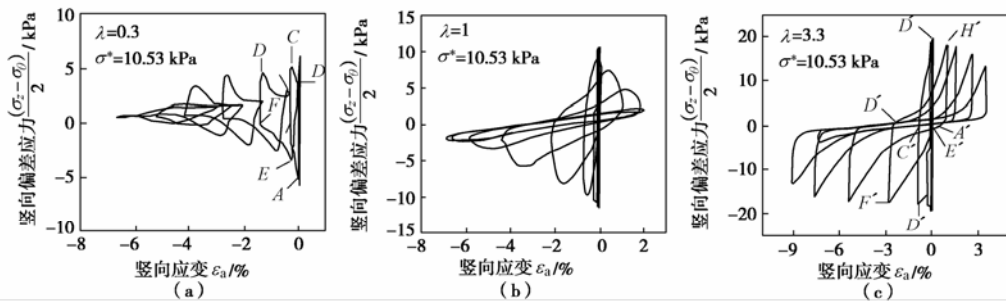


图4 固定 σ^* 变 λ 试验所测的轴向应力-应变关系

Fig. 4 Relationship between axial stress and axial strain in "varying λ and constant σ^* tests"

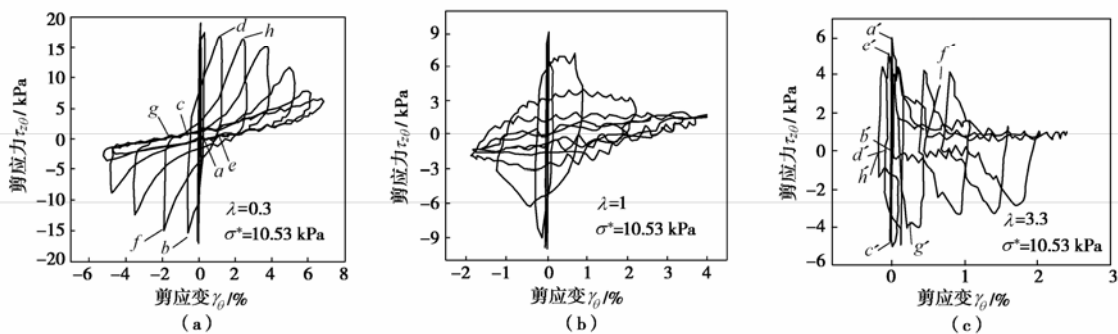
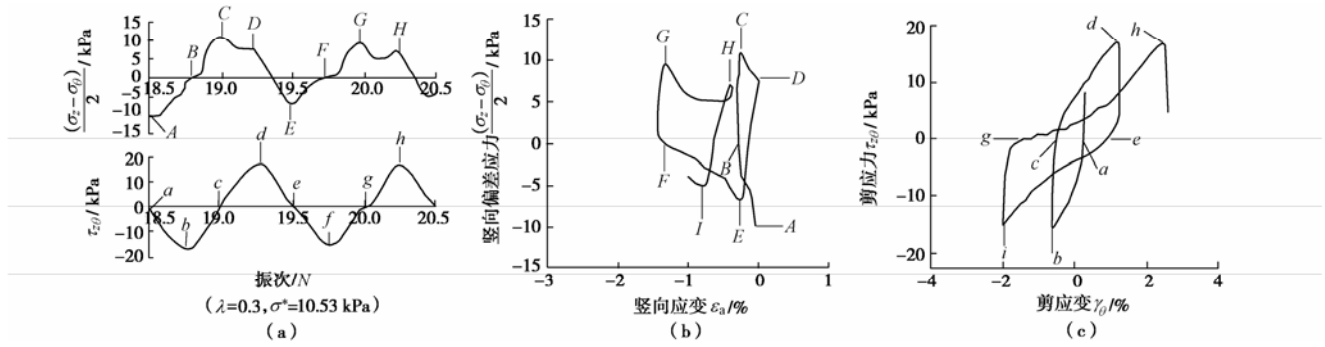
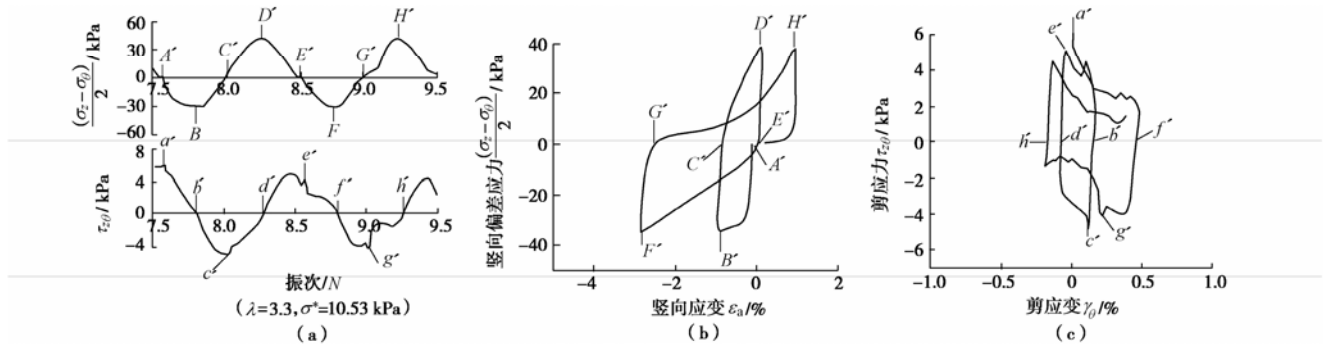
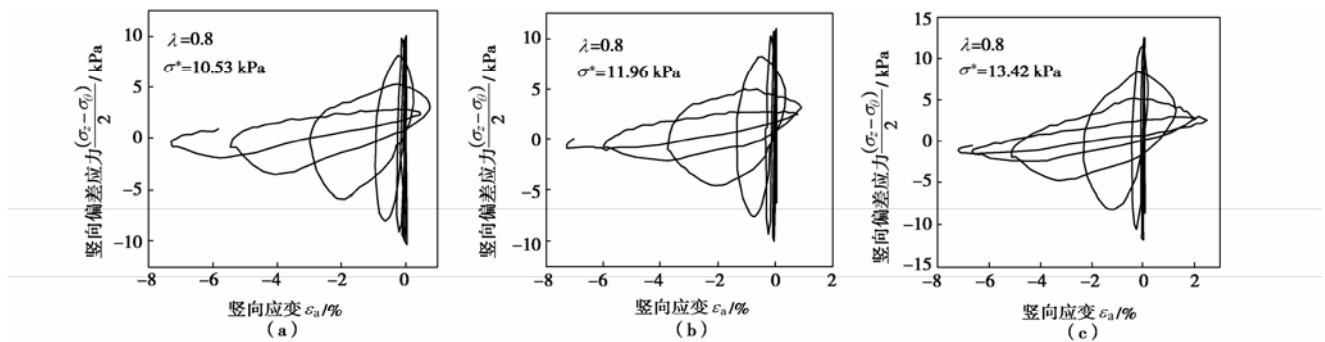
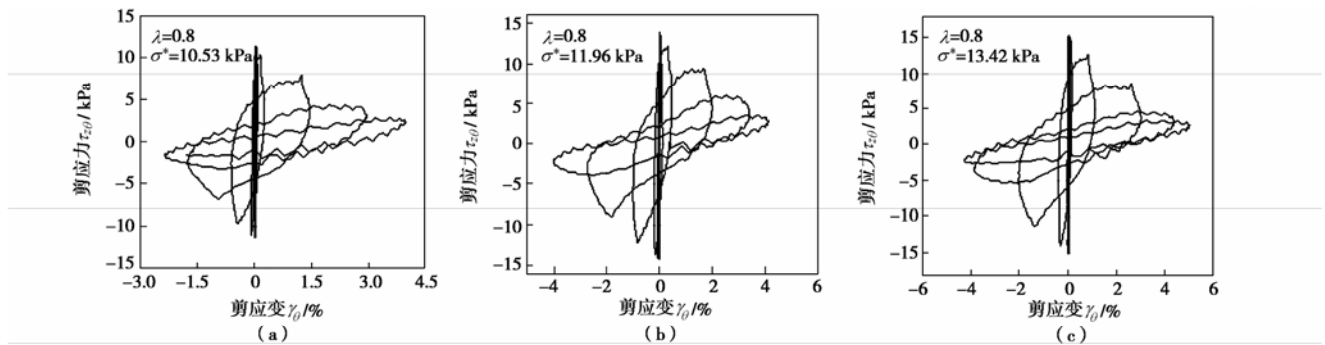


图5 固定 σ^* 变 λ 试验所测的剪应力-应变关系

Fig. 5 Relationship between torsional shear stress and shear strain in "varying λ and constant σ^* tests"

图6 $\lambda=0.3$ 时变形发生后两周内的剪切荷载分量与应力-应变滞回圈Fig. 6 Stress components and strains ($\lambda=0.3$)图7 $\lambda=3.3$ 时变形发生后两周内的剪切荷载分量与应力-应变滞回圈Fig. 7 Stress components and strains ($\lambda=3.3$)图8 固定 λ 变 σ^* 试验所测的轴向应力-应变关系Fig. 8 Relationship between axial stress and axial strain in “varying σ^* and constant λ tests”图9 固定 λ 变 σ^* 试验所测的剪应力-应变关系Fig. 9 Relationship between torsional shear stress and shear strain in “varying σ^* and constant λ tests”

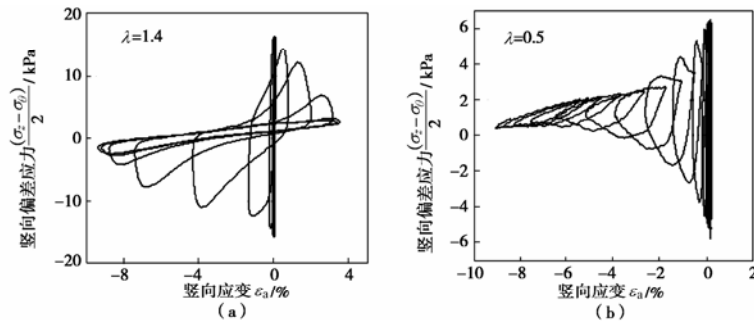


图 10 恒定扭转向剪切荷载分量单变试验所测的轴向应力 - 应变关系

Fig. 10 Relationship between axial stress and axial strain in "constant torsional shear stress tests"

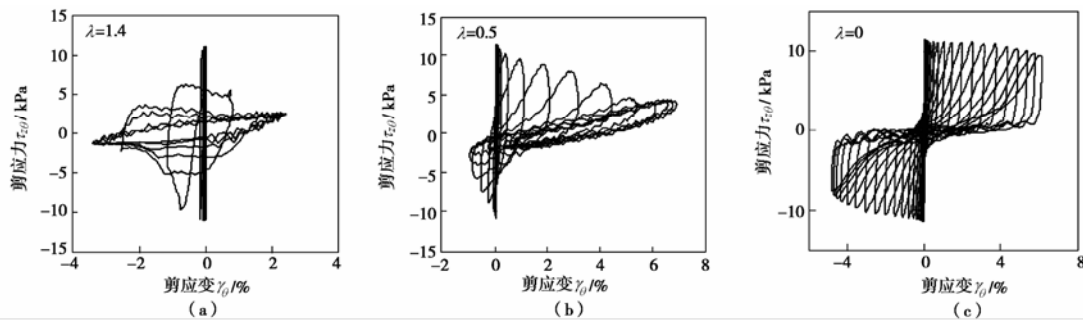


图 11 恒定扭转向剪切荷载分量单变试验所测的剪应力 - 应变关系

Fig. 11 Relationship between torsional shear stress and shear strain in "constant torsional shear stress tests"

向应力的加载而增长。这是因为图 4 (a) 及图 6 中的竖向应力较小, 剪应力占主导地位。当较大的剪应力加载时, 剪应变发展迅速, 土颗粒间有较大的相互错动, 应力单元其形状沿轴向并不对称, 因此竖向应变没有出现循环效应, 而发展相对较快。当剪应力正向或反向卸载时, 此时剪应变基本不变, 土颗粒间几乎没有错动, 而此时较小的竖向应力为反向或正向加载, 故引起少量应变。图 4 (c) 及图 7 中的竖向应力占主导地位, 故竖向应变在竖向应力加载时发展迅速。

2.2 固定 λ 变 σ^* 试验

图 8 所示为 λ 相同, 但应力路径所包围的椭圆面积不等的轴向应力应变关系。图 9 为与图 8 对应的同一试验中的剪应力应变关系。可以看出椭圆面积的大小对土样的变形趋势几乎没有影响。

2.3 恒定扭转向剪切荷载分量试验

图 10, 11 分别为扭转向剪应力幅值大小相等, 轴向应力幅值大小不等的试验结果。其中图 11 (c) 为循环扭剪试验结果, 即 λ 等于零的情况。由图可以看出, 随着 λ 的逐渐减小, 轴向应变也以 λ_c 为分界点分别出现了双向循环累积以及单向累积特性。剪应变基本都呈现双向循环累积现象, 但随着 λ 的逐渐减小, 曲线的形状由各边外凸的类似平行四边形逐渐向两长边内凹的四边形变化。图中一个滞回圈所包围的面积逐渐减小, 即一个应力循环内的能量耗散逐渐减小, 所以即使轴向应力的幅值大小相等, 但达到破坏时的振动次数逐渐增多。与郭莹等人得到的双向耦合剪切试验

条件下砂土的动强度明显低于单向剪切试验条件的结果吻合。且应力峰值点处的应变速率逐渐减小。轴向应力幅值大小相等, 剪应力幅值变化的情况与上述情况类似, 在此不作赘述。

3 结 论

通过控制椭圆应力路径的面积及变化两个荷载分量的比值, 进行了一系列均等固结条件下的双向椭圆耦合不排水循环剪切试验, 结果表明:

(1) 破坏时的竖向应变均以拉伸应变为主, 且当轴向应力幅值与剪应力幅值之比小于临界值时, 完全表现为单向拉伸方向的变形; 大于临界值时则呈现出拉伸向更为显著的双向循环累积效应。

(2) 对于任何应力路径, 剪应变均表现为双向循环累积, 但随着轴向应力幅值与剪应力幅值之比逐渐增大, 破坏时的试样剪切变形逐渐减小, 剪切应力衰减更为迅速。两个循环荷载分量的幅值之比不同, 所对应的应力应变关系的滞回圈形状不同。

(3) 椭圆面积大小对土样的变形趋势没有影响。当保持某一荷载分量不变而变化另一荷载分量时, 土样的变形趋势所发生的变化实质上也是由于轴向应力幅值与剪应力幅值之比的变化。

参考文献:

[1] ISHIBASHI Isao, KAWAMURA Makoto, BHATIA Shobha K.

- Torsional simple shear apparatus for drained and undrained cyclic testing[C]// *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, Detroit, MI, Engl, 1985: 51 - 73.
- [2] MADSEN O S. Wave-induced pore-pressure and effective stresses in a porous bed[J]. *Geotechnique*, 1978, **28**(4): 435 - 440.
- [3] YAMAMOTO T, KONING H L, SPELLMEIGHER H. On the response of a poro-elastic bed to water waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, **78**: 193 - 206.
- [4] 钱寿易, 楼志刚, 杜金声. 海洋波浪作用下土动力特性的研究现状和发展[J]. *岩土工程学报*, 1982, **4**(1): 16 - 23. (QIAN Shou-yi, LOU Zhi-gang, DU Jin-sheng. State-of-the-art of dynamic characteristics of soil under ocean wave loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, **4**(1): 16 - 23. (in Chinese))
- [5] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads[J]. *Soils and Foundations*, 1983, **23**(4): 11 - 26.
- [6] 许成顺. 复杂应力条件下饱和松砂剪切特性及本构模型的试验验证[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (XU Cheng-shun. Experimental study on behavior of saturated loose sands under complex shear loading and constitutive model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [7] 何 杨. 复杂应力条件下饱和砂土孔隙水压力及体变特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (HE Yang. Experimental study on pore water pressure and volumetric strain characteristics of saturated sands under complex stress condition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [8] 林 淋. 竖向地震动特征分析[D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2005. (LIN Lin. Characteristics analysis of vertical ground motion[D]. Beijing: China Seismological Bureau, 2005. (in Chinese))
- [9] 周正华, 周雍年, 卢 涛, 杨 程. 竖向地震动特征研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, **23**(3): 25 - 29. (ZHOU Zheng-hua, ZHOU Yong-nian, LU Tao, YANG Cheng. Study on characteristics of vertical ground motion[J]. *Chinese Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, **23**(3): 25 - 29. (in Chinese))
- [10] SEED H B, PYKE R M, MARTIN G R. Effect of multi-directional shaking on liquefaction of sands[R]. Berkeley: University of California, 1975.
- [11] BOULANGER R. W., SEED R. B. Liquefaction of sand under bi-directional monotonic and cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1995, **121**(12): 870 - 878.
- [12] 沈瑞福, 王洪瑾, 周克骥, 周景星. 动主应力旋转下砂土孔隙水压力发展及海床稳定性判断[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(3): 70 - 78. (SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Ke-ji, ZHOU Jing-xing. Building-up of pore water pressure under cyclic rotation of principal stress and evaluation of stability of seabed deposit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(3): 70 - 78. (in Chinese))
- [13] 姚仰平. 真三轴应力条件下砂土的非线性动力本构关系的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 1995. (YAO Yang-ping. Nonlinear dynamic constitutive relation of sand under real triaxial stress condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 1995. (in Chinese))
- [14] 郭 莹. 复杂应力条件下饱和松砂的不排水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003. (GUO Ying. Experimental studies on undrained cyclic behavior of loose sands under complex stress conditions considering static and cyclic coupling effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese))
- [15] BOULANGER R W, CHAN C K, SEED H B, SEED R B. A low-compliance bi-directional cyclic simple shear apparatus[J]. *Geotech Testing J*, 1993, **16**(1): 36 - 45.
- [16] 栾茂田, 郭 莹, 李木国, 王 静, 等. 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. *大连理工大学学报*, 2003, **43**(5): 670 - 675. (LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, WANG Jing, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. *Chinese Journal of Dalian University of Technology*, 2003, **43**(5): 670 - 675. (in Chinese))
- [17] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, 1966, **92**(SM6): 105 - 134.
- [18] 栾茂田, 金 丹, 许成顺, 张其一, 张振东. 双向耦合剪切条件下饱和松砂的液化特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(6): 790 - 794. (LUAN Mao-tian, JIN Dan, XU Cheng-shun, ZHANG Qi-yi, ZHANG Zhen-dong. Liquefaction of sand under bi-directional cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(6): 790 - 794. (in Chinese))