

饱和黏土动剪切模量与阻尼比的试验研究

齐剑峰^{1, 2}, 栾茂田¹, 杨庆¹, 马太雷¹, 袁颖²

(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. 石家庄经济学院工程学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 针对饱和黏土, 利用土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪, 通过不固结不排水条件下的循环扭剪和竖向-扭转耦合试验, 着重探讨了大应变情况下分级加载历史和循环应力耦合对动剪切模量与阻尼比等动力特性的影响。对试验结果的分析表明: 采用多个试样单级加载与采用一个试样分级加载试验得到的初始骨干曲线、动剪切模量与阻尼比都较为一致, 采用分级加载试验测定动剪切模量与阻尼比是可行的; 耦合循环应力中的轴向偏差应力对扭转向应力-应变滞回圈的倾斜程度及动剪切模量与阻尼比都有显著影响, 尤其当扭转向循环剪应力较小时, 可以认为轴向偏差应力的大小控制着动剪切模量的增大量, 受扭转向剪应力的影响, 轴向应力-应变滞回圈的变化模式较为复杂。

关键词: 饱和黏土; 动剪切模量; 阻尼比; 分级加载试验; 耦合循环应力

中图分类号: TU705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)04-0518-06

作者简介: 齐剑峰(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事海洋土力学理论与实验技术、岩土数值分析等方面的科研工作。E-mail: jianfengluck@163.com。

Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated clay

QI Jian-feng^{1, 2}, LUAN Mao-tian¹, YANG Qing¹, MA Tai-lei¹, YUAN Ying²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The apparatus for static and dynamic universal triaxial and torsional shear tests was employed to perform cyclic torsional shear tests and coupled vertical and torsional shear tests on soil under unconsolidated-undrained conditions. Through a series of tests on saturated clay, the effect of stepped loading history and coupled cyclic stress on dynamic shear modulus and damping ratio under large strain ($>10^{-3}$) was examined. It was indicated that the stepped loading method could be used to determine the dynamic shear modulus and the damping ratio since the initial backbone curve, dynamic shear modulus and damping ratio obtained from single-step loading tests by use of many clay samples were consistent with those obtained from stepped loading tests by use of one clay sample. There was an obvious effect of cyclic axial deviatoric stress on the obliquity of stress-strain hysteresis loops as well as on the dynamic shear modulus and the damping ratio. Especially under the low cyclic torsional shear stress, the increments of dynamic shear modulus seemed to be controlled by the magnitude of axial deviatoric stress. The variations of axial stress-strain hysteresis loops were complicated due to the influences of cyclic torsional shear stress.

Key words: saturated clay; dynamic shear modulus; damping ratio; graded loading test; coupled cyclic stress

0 引言

在地震、波浪等循环荷载作用下, 对工程场地进行等价值线性化分析中, 土的动剪切模量和阻尼比是两个不可缺少的动力参数。动剪切模量和阻尼比随着剪应变幅值的变化而变化, 为了获得不同剪应变范围内的动力参数, 通常在一个试样上由小到大施加多级循环荷载。然而循环荷载的往复作用, 将使黏土试样产生不可恢复的残余变形, 对于采用一个试样分级加载的试验, 前面各级循环荷载的施加必将产生变形累积,

从而导致黏土的物理、力学性质的改变。因而各级循环加载历史对动剪切模量和阻尼比等动力特性的影响值得研究。在小应变($<10^{-4}$)情况下, 采用一个试样逐级加载测定土的动剪切模量和阻尼比是可行的^[1], 但对于黏土试样, 达到破坏以前其变形量往往较大, 在大应变情况下, 是否还能采用多级加载的方法进行黏土的动力参数测量尚需要探讨。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579006, 50179006)

收稿日期: 2007-04-27

在波浪等循环荷载作用下, 海洋地基土体的应力状态和循环加载条件较为复杂, 对弹性孔隙介质的固结分析表明: 在表面简谐波荷载作用下, 无限厚度的弹性孔隙海床中任一固定点处的偏差应力幅值保持为常数而主应力轴发生连续旋转^[2]。这将对土的变形和强度特性产生显著的影响^[3]。在室内, 通常采用循环三轴或循环扭剪等试验模拟简单应力状态下的单向循环剪切应力条件, 对于上述复杂的应力状态与循环加载条件, 需要进行竖向-扭转耦合剪切试验来研究地基土体的剪切变形特性^[4], 因而在这种耦合循环剪切试验中, 循环应力耦合对动剪切模量和阻尼比等动力特性的影响是一个需要探讨的重要问题。

为了获得准确可靠的动力参数, 针对上述问题, 利用土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪, 在不固结不排水条件下进行了应力控制式分级加载的循环扭剪和竖向-扭转耦合试验, 通过对试验结果的分析, 着重探讨了大应变情况下分级加载历史和循环应力耦合对动剪切模量和阻尼比等动力特性的影响。

1 试验概况

1.1 试样与试验方法

试验所用黏土取自大连。首先对所取土样作烘干、碾碎处理, 然后过 0.1 mm 土工筛, 以便除去杂物和较大颗粒的土, 最后按一定的水土比例配制成泥浆, 采用真空抽吸法^[5]制备成土工试验所需的样品。基于上述制样过程所制备的样品具有组成成份均一、饱和程度高、易于切削制备成三轴或空心圆柱试样等优点。试样基本物理性质指标如列于表 1。

表 1 黏土试样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of the clay samples

ρ /(g·cm ⁻³)	w /%	G_s	w _p /%	w _L /%	I _p /%	S _r /%
1.92	29	2.67	18	36	18	>98

在循环扭剪试验和竖向-扭转耦合剪切试验中均采用空心圆柱试样, 试样的外径和内径分别为 70 mm 和 30 mm, 试样高度为 100 mm。所施加循环荷载形式为等幅正弦波, 频率为 0.1 Hz。在将试样装入设备压力室的过程中, 由于试样与内、外腔橡胶膜之间存在有气泡, 为保证试样的饱和度, 因此需要通脱气水驱赶气泡。通过这种处理, 黏土的孔压系数 B 均达到 98% 以上, 同时对内、外腔施加 50 kPa 均等围压, 进行不固结不排水试验。在循环扭剪和竖向-扭转耦合剪切试验开始以前, 通过对试样在一定加荷速率下进行单调扭剪试验, 得到单调应力-应变关系和不排水抗剪强度, 以此估算循环剪切试验所可能施加的循环荷载级别和初始剪应力大小。

1.2 试验仪器

在室内常用测定土的动剪切模量和阻尼比试验有

动三轴试验、动直剪试验、动扭剪试验和共振柱试验等^[6]。本文采用动扭剪试验直接测定出黏土的动剪切模量和阻尼比, 无需像动三轴试验在假定泊松比的基础上由变形模量换算得出。试验在大连理工大学与日本诚研舍联合研制的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪上进行, 整套试验设备由液压伺服控制加荷系统、三轴室主机系统、气水转换系统、模拟控制系统及计算机数字控制系统、数字记录系统等五部分组成。在试验中通过独立地控制竖向荷载 W 、扭矩 M_T 、外腔压力 P_o 和内腔压力 P_i , 从而在试样中实现静应力和循环应力的各种组合^[4]。

1.3 动剪切模量与阻尼比的定义

循环剪应力-剪应变滞回圈是确定土的动剪切模量与阻尼比的基础。理想的应力-应变滞回圈如图 1 所示, 动剪切模量与阻尼比定义如下

$$G_d = (\tau_{1d} + \tau_{2d}) / (\gamma_{1d} + \gamma_{2d}) \quad , \quad (1a)$$

$$\lambda = A_0 / (\pi A_T) \quad . \quad (1b)$$

式中 τ_{1d} , τ_{2d} 分别为正负最大循环剪应力; γ_{1d} , γ_{2d} 分别为正负最大循环剪应变; A_0 为图中应力-应变滞回圈的面积; A_T 为三角形 abc 的面积。

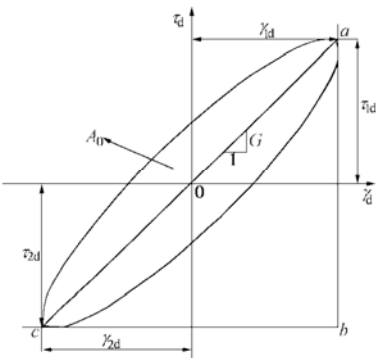


图 1 理想的应力-应变滞回圈

Fig. 1 The idealized stress-strain hysteresis loop

2 分级加载历史对动力特性的影响

2.1 试样分组与循环加载级别

为研究分级加载历史对动力特性的影响, 设计了两组试验。第 1 组试验的每个试样只进行一级循环应力幅值下的循环扭剪试验, 将该组所有试样的试验结果合并后, 能够得出在整个荷载级别范围内黏土的动力特性参数。第 2 组试验的每个试样进行多级循环应力幅值下的试验, 循环应力幅值级别逐步增大, 这样由一个试样得出在整个荷载级别范围内黏土的动力特性参数。通过在应变速率为 0.15%/min 下的单调扭剪试验, 得到该黏土的不排水强度为 $S_u=11.3$ kPa, 所施加的循环应力级别分别为不排水强度的倍数, 如表 2 所示, 表中 τ_c 为循环应力幅值。

表 2 循环应力级别

Table 2 Cyclic stress grading				
试样 编号	加载级别 τ_c/S_u	加载 级数	每级循 环次数	试样 个数
1-1	0.09	1	100	1
1-2	0.18	1	100	2
1-3	0.27	1	100	2
1-4	0.36	1	100	1
1-5	0.45	1	100	2
1-6	0.54	1	100	2
1-7	0.63	1	14	1
2-1	0.09~0.63	7	10	2

2.2 分级与单级加载的应力 - 应变滞回圈

通过分级与单级循环加载试验得到的应力 - 应变滞回圈如图 2 所示, 其中图 2 (a) 的循环荷载级别较低, $\tau_c/S_u=0.18$, 图 2 (b) 的荷载级别较高, $\tau_c/S_u=0.54$ 。由图可见, 当荷载级别较低时, 与循环次数在 10 次以内分级加载试验得到的应力 - 应变滞回圈相比, 尽管单级加载试验的循环次数达到 70 多次, 但滞回圈形状基本相似 (图 2 (a)); 而当荷载级别较高时, 在分级与单级加载试验的循环次数基本相同的情况下, 分级与单级加载试验得到的应力 - 应变滞回圈基本相似, 但在分级与单级加载试验的循环次数差别较大的情况下, 两种试验方法得到的循环应力 - 应变滞回圈存在一定差别 (图 2 (b))。

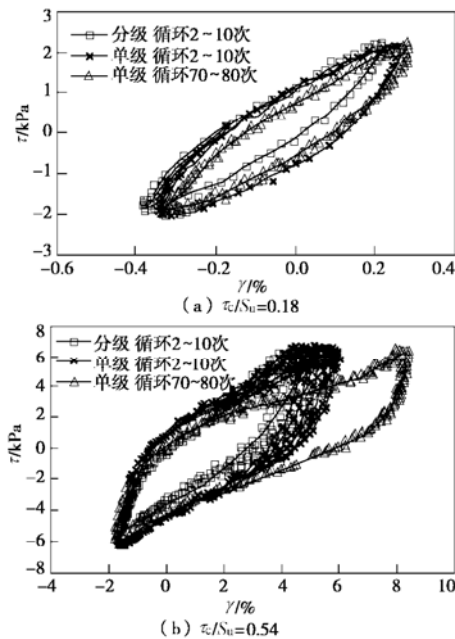


图 2 分级与单级加载试验的滞回圈比较

Fig. 2 Comparison of the hysteresis loops obtained from stepped loading and single-step loading tests

2.3 分级与单级加载的骨干曲线

循环应力作用下土骨干曲线定义为各应变下滞回圈顶点的连线, 由分级与单级加载试验得到的滞回圈顶点和骨干曲线如图 3 所示。由图可见, 对于某一给定荷载级别, 随着循环次数的增加, 滞回圈顶点逐渐向右平移, 而当荷载增大一个级别, 滞回圈顶点又回

到初始骨干曲线上。这反映了循环加载过程中的记忆消失现象^[7], 即当前较大荷载将消除过去较小荷载的加载过程记忆, 而当前较小荷载仍能记忆过去较大荷载的加载过程。而且图 3 表明, 当荷载级别较大 (如 $\tau_c/S_u>0.63$) 时, 滞回圈顶点出现跌落现象, 即尽管剪应变持续增加, 循环应力幅值却降低, 这表明试样处于临界破坏状态。图 3 所示的骨干曲线表明, 采用多个试样单级加载试验与采用一个试样分级加载试验得到的初始骨干曲线较为一致, 然而当荷载级别较高、单级与分级加载试验的循环次数差别较大时, 单级与分级加载试验得到衰减后的骨干曲线存在差别。

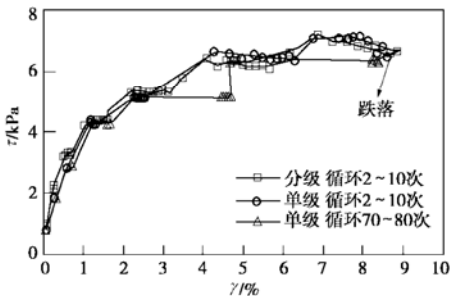


图 3 滞回圈顶点与骨干曲线

Fig. 3 Peaks and backbone curves of hysteresis loops

2.4 分级加载历史对动剪切模量与阻尼比的影响

在室内测定动力特性参数的循环剪切试验中, 采用多少次循环的滞回圈确定动剪切模量等动力参数较为合适, 是一个倍受关心的问题。对于某一给定荷载级别, 各次循环相对于第 1 次循环动剪切模量下降的百分比如图 4 所示。由图可见, 当荷载级别较低时, 在 10 次循环以内的动剪切模量下降幅度明显, 然后趋于稳定, 这说明采用循环 10 次左右的滞回圈确定动剪切模量较为合适; 然而, 当荷载级别较高时, 在 15 次循环以内的动剪切模量下降幅度明显, 在 15~70 次循环的动剪切模量基本趋于稳定, 然而在循环 70 次以后的动剪切模量又出现了下降, 因而为获得准确的动力参数, 对于荷载级别较高的情况, 需要采用较多次数的循环来确定动剪切模量。这种荷载级别与循环次数对动剪切模量的影响, 与对应力 - 应变滞回圈 (图 2) 的影响是一致的。

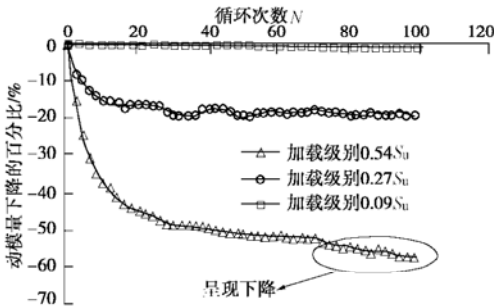


图 4 动剪切模量随循环次数下降的百分比

Fig. 4 Percentage of decrease of dynamic shear modulus with increase of cycles of load

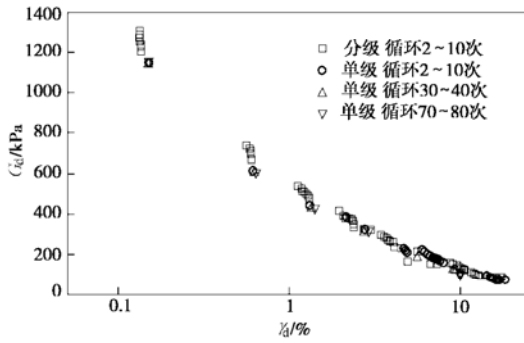


图5 动剪切模量随剪应变幅值的变化

Fig. 5 Dynamic shear modulus versus shear strain amplitude

动剪切模量 G_d 与阻尼比 λ 随剪应变幅值 γ_d 的变化 (为更清楚表示 G_d 与 λ 的变化, 图中应变坐标采用了 对数坐标), 如图 5 与图 6 所示。由图可见, 采用一个 试样分级加载试验与使用多个试样组合得出的动剪切 模量和阻尼比基本一致, 因而采用分级加载试验测定 动剪切模量与阻尼比是可行的。需要指出, 尽管在荷 载级别较高且循环次数差别较大的情况下, 分级与单 级加载试验得到的滞回圈存在一定差异 (图 2), 但由 于采用 10 次循环与 70 次循环, 根据式 (1a) 和式 (1b) 确定的动剪切模量与阻尼比在数量上差别较小, 因 而在图 5 与图 6 中这种差异没有得到充分体现。当需要 更为精确地测定动剪切模量与阻尼比时, 必须注意循 环荷载级别较高的情况。

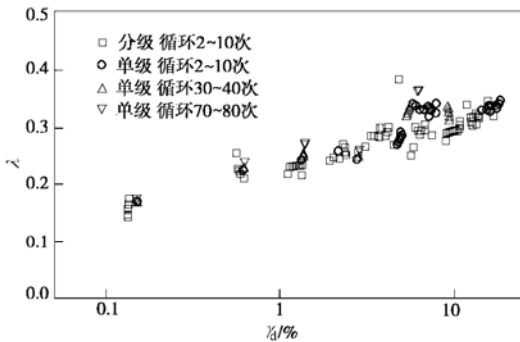


图6 阻尼比随剪应变幅值的变化

Fig. 6 Damping ratio versus shear strain amplitude

3 循环应力耦合对动力特性的影响

3.1 耦合循环应力的加载模式

耦合循环应力是扭转向剪应力与轴向偏差应力的 耦合, 剪应力与轴向偏差应力随循环次数的变化模式 如图 7 所示, 图中 $\sigma_d = (\sigma_z - \sigma_0)/2$ 为轴向偏差应力之半。

为了分析循环应力耦合对动剪切模量与阻尼比的 影响, 具体的加载过程如图 8 所示, 图 8 中 (1)~(4) 分别表示 4 个典型加载试验 (以循环应力幅度表示), 由图 8 可见, 试验中 (1)、(3) 与 (4) 分级加载的循

环剪应力幅度 τ_r 保持近似相等, 而各分级加载的轴向 偏差应力幅度 σ_r (1) 最高, (2) 和 (3) 的 σ_r 近似 相等, 而 (4) 的 σ_r 为 0, 表示仅有循环剪应力, 没 有耦合循环应力的加载试验。其中循环应力幅度由下 列算式对实测数据计算得到

$$\tau_r = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / 2, \quad (2a)$$

$$\sigma_r = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2, \quad (2b)$$

式中, $\tau_{\max}$ 与 $\tau_{\min}$ 分别为每次循环的扭转向滞回圈最 大与最小剪应力, $\sigma_{\max}$ 与 $\sigma_{\min}$ 分别为每次循环的轴向 滞回圈最大与最小偏差应力。

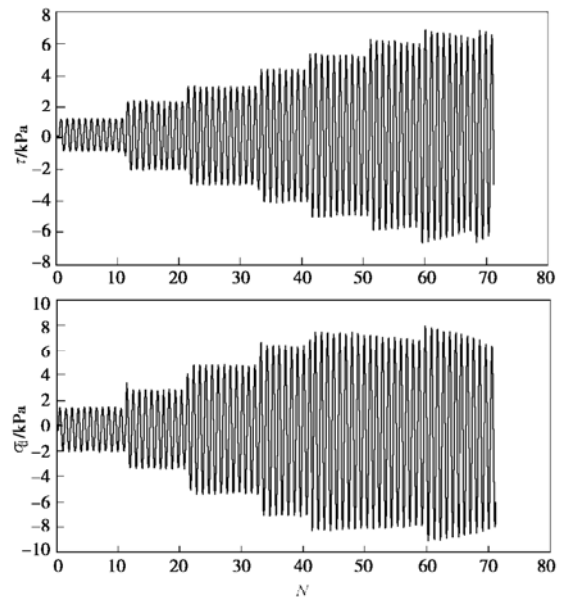


图7 分级循环加载模式

Fig. 7 Stepped cyclic loading

3.2 循环应力耦合对应力 - 应变滞回圈的影响

由于双向耦合循环应力的共同作用, 单向的应力 - 应变滞回圈与变形特性将受到影响, 由实测得到的 扭转向剪应力 - 应变滞回圈如图 9 所示。由图可见, 剪应力 - 应变滞回圈基本围绕某一点对称, 随着扭转 向荷载级别的增大, 滞回圈的倾斜程度逐渐增大; 结 合分级加载过程分析可知, 尽管图 8 中 (1)、(3) 与 (4) 的扭转向循环剪应力加载过程基本相似, 但是 由于图 8 中 (1)、(3) 与 (4) 的分级加载的轴向偏差 应力差别较大, 导致 (1)、(3) 与 (4) 的剪应力 - 应变 滞回圈存在显著差别, 主要体现在分级加载过程中对 应于图 8 (1) 的剪应变幅值较小 (图 9 (a)), 而对应 于图 8 (4) 的循环剪应变幅值较大 (图 9 (d)), 这表 明增大的轴向偏差循环应力, 减小了扭转向循环剪 应力对滞回圈倾斜程度的影响。同时由实测得到的轴 向应力 - 应变滞回圈如图 10 所示, 由图可见, 随着轴 向循环荷载级别的增大, 轴向应变的累积特征显著, 应 力 - 应变滞回圈不再围绕某一点对称, 呈现出较为复 杂的变化模式。

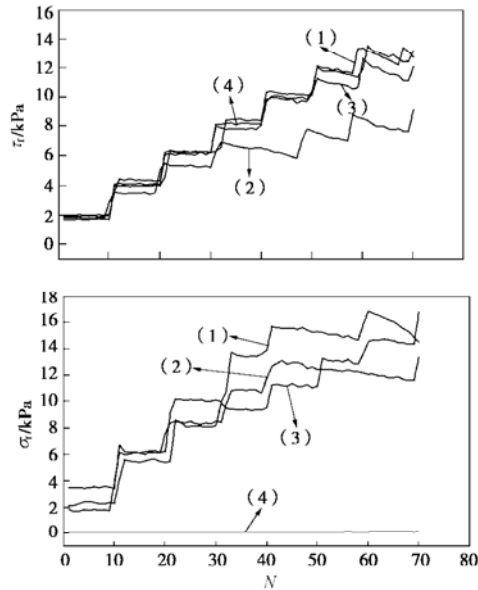


图8 耦合循环应力的分级加载过程

Fig. 8 Stepped loading process in coupled cyclic shear tests

对于应力控制的循环三轴或扭剪试验,在施加的循环应力对称条件下,应力-应变滞回圈基本上围绕某一点对称。然而耦合循环试验表明,尽管施加的循环应力对称,轴向应力-应变滞回圈不具有围绕某一点对称的特性,出现这种现象,笔者认为通过对空心圆柱试样的应力与变形分析可以得到解释,土单元体在轴向偏差应力与扭转向剪应力耦合作用下,在轴向与扭转向将同时产生变形,由于不排水条件下试样的体积不变,因而径向变形量与轴向变形量成比例发展,如果径向变形均匀,在土单元体内将不会产生附加的剪应力,因而不会对扭转向剪应力-应变滞回圈产生较大影响,但如果轴向变形较大(图10(a)),由于试样吸收较多的变形能后大大增加了黏土的抗剪强度,因而将对扭转向滞回圈产生较大影响(图9(a))。然而扭转向变形在试样中产生的附加应力较为复杂,而且附加应力在试样中的分布不均匀,如图10(d)所示,尽管没有施加轴向循环应力,但轴向变形却持续发展,由此推断扭转向变形产生的附加应力包含有轴向应力,因而除了试样吸收扭转向变形能之外,附加的轴向应力往往造成轴向应变具有明显的累积特征。

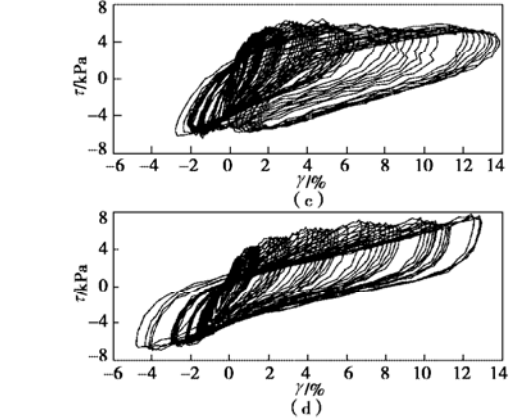
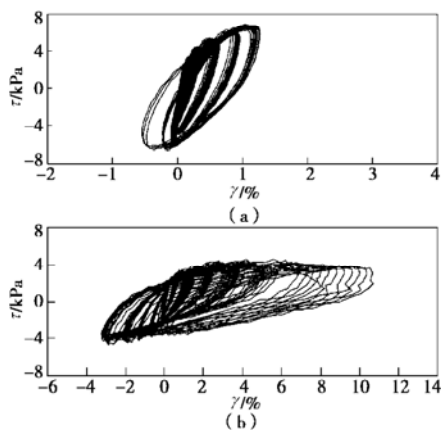


图9 双向耦合试验中分级加载剪应力-应变滞回圈

Fig. 9 Cyclic shear stress-strain hysteresis loops of stepped

loading in coupled cyclic shear tests

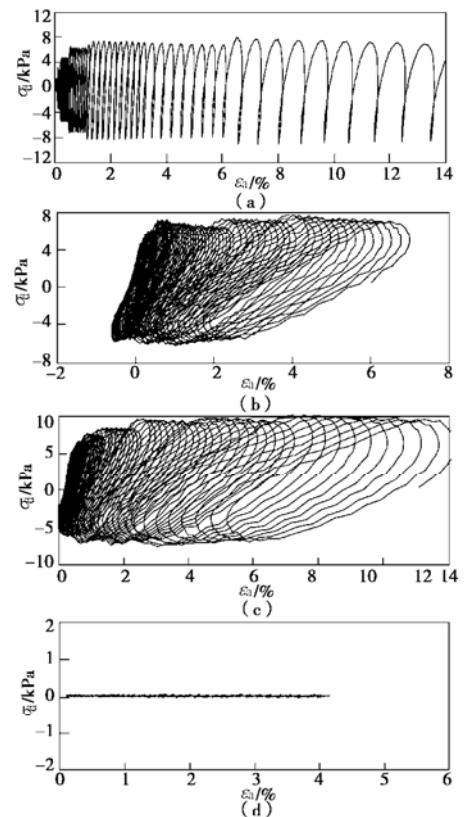


图10 双向耦合试验中分级加载轴向应力-应变滞回圈

Fig. 10 Cyclic axial stress-strain hysteresis loops of stepped

loading in two-direction coupled shear tests

3.3 耦合循环应力对动剪切模量与阻尼比的影响

由耦合循环应力试验得到的动剪切模量随剪应变幅值的变化,如图11所示。由图可见,对于某一给定的剪应变幅值,与单向循环扭剪试验得到的动剪切模量相比(加载模式(4)),耦合应力中的轴向偏差应力对动剪切模量具有增大作用,动剪切模量的发展与所施加的轴向偏差应力的大小关系密切,尤其是在循环剪应力较小的情况下,轴向偏差应力越大,动剪切模量增大越显著,而当循环剪应力较大时,轴向偏差应力对动剪切模量的增大效用降低。扭转向阻尼比随剪

应变幅值的变化如图 12 所示, 由图可见, 对于给定的剪应变幅值, 与单向循环试验得到的阻尼比相比 (加载模式 (4)), 耦合循环应力中的轴向偏差应力对扭转向阻尼比似乎具有一定的增大作用, 但规律性不明显。

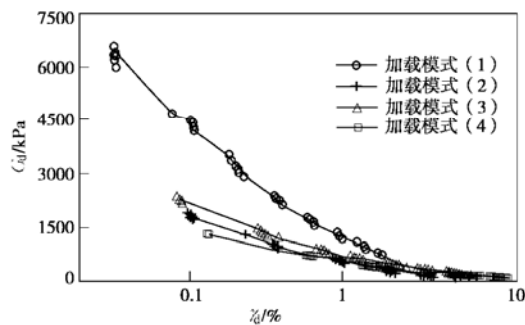


图 11 动剪切模量随剪应变幅值的变化

Fig. 11 Dynamic modulus versus shear strain amplitude

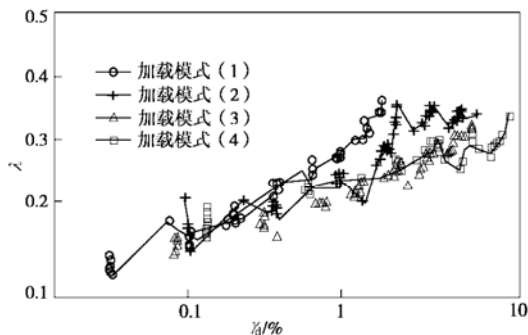


图 12 阻尼比随剪应变幅值的变化

Fig. 12 Damping ratio versus shear strain amplitude

4 结 论

为了探讨大应变情况下分级加载历史和循环应力耦合对饱和黏土动力特性的影响, 在不固结不排水条件下进行了循环扭剪和竖向 - 扭转耦合试验, 对试验结果的分析表明

(1) 在大应变条件下, 采用多个试样单级加载与采用一个试样分级加载试验得到的应力 - 应变滞回圈、初始骨干曲线、动剪切模量与阻尼比都较为一致, 采用分级加载试验测定动剪切模量与阻尼比等动力特性是可行的, 但需要注意循环荷载级别较高、单级与分级加载试验的循环次数差别较大时, 两种试验得到的动力特性及其参数存在的差异。

(2) 在分级加载的循环应力耦合试验中, 单向应力 - 应变滞回圈与变形特性受到不同程度的影响。其中, 扭转向剪应力 - 应变滞回圈基本上围绕某一点对称, 受轴向偏差循环应力影响, 剪应力对扭转向滞回圈倾斜程度的效用降低; 受扭转向剪应力的影响, 轴向应变的累积特征显著, 轴向应力 - 应变滞回圈不再围绕某一点对称, 呈现出较为复杂的变化模式。

(3) 对于给定的剪应变幅值, 耦合应力中的轴向偏差应力对动剪切模量具有增大作用, 动剪切模量的发展与所施加的轴向偏差应力的大小关系密切, 尤其是在扭转向剪应力较小的情况下, 轴向偏差应力越大, 动剪切模量增大越显著, 而当扭转向剪应力较大时, 轴向偏差应力对动剪切模量的增大效用降低。

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. (XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese))
- [2] MADSEN O S. Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed[J]. Geotechnique. 1978. 28(4): 377 - 393.
- [3] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress rotation in soils[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11 - 26.
- [4] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 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, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(5): 670 - 675. (in Chinese))
- [5] 齐剑峰, 聂影, 赵维, 等. 室内黏土试样制备技术的改进及应用[C]// 第 24 届全国土工测试学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 123 - 126. (QI Jian-feng, NIE Ying, ZHAO Wei, et al. Improved preparing technique of clay sample indoors[C]// Proceeding of the 24th Chinese Academic Seminar on Geotechnical Soil Testing. Zhengzhou: Yellow River Water Power Press, 2005: 123 - 126. (in Chinese))
- [6] 刘保健, 谢定义. 随机荷载下土动力特性测试分析法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (LIU Bao-jian, XIE Ding-yi. Testing technique and analytic method of soil dynamic behavior under stochastic loading[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese))
- [7] 孔亮, 王燕昌, 郑颖人. 土体动本构模型研究评述[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 17 - 22. (KONG Liang, WANG Yan-chang, ZHENG Ying-ren. Development in soil dynamics constitutive model[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2001, 22(1): 17 - 22. (in Chinese))