

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.010

非饱和重塑砂土动力特性循环单剪试验研究

王海东^{1,2}, 李建文¹, 陈曦¹, 刘方成³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;
3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘 要: 利用英国 WFI 生产的 WF25735 循环单剪试验系统, 完成了一系列不同含水率重塑砂土在不同剪应变条件下的循环剪切试验, 分析了不同剪应变条件下含水率的变化对非饱和砂土动力特性的影响规律。试验结果表明: 动剪模量 G_d/G_{dmax} - γ 归一化数值, 在大应变下存在一个临界含水率 11.2%, 低于临界含水率时, G_d/G_{dmax} 随含水率的增大而增大, 高于临界含水率时, 随着含水率的增大, G_d/G_{dmax} 逐渐减小。骨架曲线存在一个相同的临界含水率, 当低于该临界含水率时, 随着含水率的增大, 骨架曲线呈缓慢增大趋势, 在含水率为 11.2% 处达到峰值; 当高于该临界含水率时, 随着含水率的增大, 骨架曲线下降比较剧烈, 且出现软化现象, 从骨架曲线可以进一步解释 G_d/G_{dmax} - γ 散点图的变化趋势。对阻尼比 D/D_{max} - γ 进行归一化数值, 在较大正应力下, D/D_{max} 随着剪应变的增大而增大。非饱和砂土的滞回耗能随着剪应变的增大而增大; 随着含水率的增大, 存在一个临界含水率, 滞回耗能曲线呈现先增大后下降的趋势, 且临界含水率随着正应力的增大出现了偏移。

关 键 词: 循环剪切; 动剪模量; 骨架曲线; 滞回耗能; 阻尼比

中图分类号: TU 441+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)11-3115-09

Dynamic characteristics of unsaturated remolded sandy soil through cyclic shear tests

WANG Hai-dong^{1,2}, LI Jian-wen¹, CHEN Xi¹, LIU Fang-cheng³

(1. Hunan University Institute of Civil Engineering, Changsha, Hunan, 410082, China;

2. Hunan University of The Ministry of Education Key Laboratory for Construction Safety and Energy Conservation, Changsha, Hunan, 410082, China;

3. Institute of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412008, China)

Abstract: A series of cyclic shear test on remolded unsaturated sandy soil with different water contents was performed using the cyclic simple shear test apparatus WF25735. The effect of water content variation on dynamic properties of unsaturated sandy soil is examined at different shear strains. The experimental results show that there exists a critical moisture content of 11.2% corresponding to the normalized value of dynamic shear modulus G_d/G_{dmax} - γ at large strain. When the water content is lower than critical moisture content, the value of G_d/G_{dmax} increases with the water content, and when the water content becomes higher than the critical moisture content, it decreases gradually with the increase of water content. The same critical water content can be found on the skeleton curve. When the water content is lower than the critical water content, the skeleton curve goes up slowly, and reaches a peak value at 11.2% water content. The skeleton curve decreases sharply with the increase of the water content when the water content is higher than the critical water content, and the strain softening appears, which can further explain the scatter diagram changing trend of G_d/G_{dmax} - γ . At relatively high stress, the normalized damping ratio D/D_{max} increases as the shear strain increases. The hysteretic energy dissipation of unsaturated sandy soil increases with the increase of the shear strain. As the water content increases, there exists a critical water content. The hysteretic energy curve shows a trend of first increasing and then decreasing and the critical water content can shift as the normal stress increases.

Keywords: cyclic shear; dynamic shear modulus; skeleton curve; hysteretic energy dissipation; damping ratio

1 引 言

非饱和土的工程性质已成为 20 世纪 90 年代以

来国际土力学界研究的热点问题之一。近几十年, 在工程实际中面临非饱和土的问题越来越多。例如土石坝和高速公路等建设工程的地基要承受水流、

收稿日期: 2014-12-24

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-13-0190); 湖南省自然科学基金人才联合培养基金重点项目 (No. 13JJA001)。

This work was supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-13-0190) and Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (13JJA001).

第一作者简介: 王海东, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震性能、土-结构相互作用的研究工作。E-mail: whdwang@hnu.edu.cn

车辆等动力荷载的作用。这些地基土由于季节性干湿交替等其他因素导致地下水位发生变化,可能全部或者部分处于非饱和状态。因此,对非饱和土的动力特性进行更加深入地研究显得非常迫切,并具有重要的工程应用价值^[1]。

众所周知,动剪模量和阻尼比是描述土动力特性的两个重要指标。这两个参数被广泛应用于岩土地震工程问题中,如土-结构相互作用的分析、砂土液化研究以及土工结构承受风载、海洋波浪冲击和地震作用的研究等。为评价土的动力刚度和滞后阻尼比已在现场和实验室进行了大量研究,使用的装置有共振柱、循环单剪仪、循环扭剪仪、循环三轴仪和现场波速法等^[2-3]。Hardin等^[4-5]指出,土的动力特性受一系列因素的影响,如:平均有效应力、孔隙比、饱和度、最大主应力差、剪切应变幅、次固结时间效应、受荷历史、温度、频率、土的颗粒特征(形状、尺寸、矿物成分)。Qian等^[6]进行了小应变情况下非饱和砂土的共振柱试验来确定饱和土和非饱和土之间动力特性的差异。研究表明,饱和度和围压、孔隙比和土颗粒的尺寸分布影响着非饱和土的动剪切模量。王海东^[7]等进行了原状粉质黏土土样的循环单剪试验、扰动土样的动三轴试验,比较了不同试验下 G_d/G_{dmax} 随剪应变的变化趋势及曲线拟合。凌华等^[8-9]在改进的普通三轴仪上进行非饱和土的强度试验,研究含水率对非饱和土强度的影响。试验表明在一定含水率范围内,强度指标随着含水率的增大线性减小,并在此基础上建立了引入含水率的非饱和土总应力公式。林鸿洲等^[10]通过压力板仪和直剪仪组合试验,探讨了击实抗剪强度和基质吸力的关系。Toshiyasu等^[11]通过不排水循环单剪试验,得出非饱和砂土的液化不仅仅与土的压缩性有关,而且与饱和度有关,此外,也与初始围压相关。Xenaki等^[12]进行了砂性粉质黏土共振柱和三轴试验,结果表明,在低剪应变或低围压下,含水率对动剪模量有显著的影响,但当剪应变大于 10^{-4} 时,影响就很小了。Fardin等^[13]通过循环单剪仪,进行了循环剪切荷载下排水与不排水试验,用来研究土的动力特性影响因素,结果表明,在饱和度和为25%~75%时,砂土的最大动剪模量和阻尼比与饱和度无关,而固结压力对砂土的动剪模量和阻尼比影响较大。Kumar等^[14]通过波速试验,研究了砂土中随着饱和度的变化P波和S波的变化规律,结果表明,当饱和度在0.7%~0.9%之间时,砂土的剪切模量达到了最大值。基于目前砂土在不同含水

率下、多种剪应变下的动力特性方面的研究较少的现状,本文进行了10种含水率、6种剪应变、5种不同正应力下的非饱和重塑砂土循环剪切试验,以期研究含水率、剪应变、正应力对非饱和砂土动力力学特性的影响,得出随着剪应变的变化,不同含水率的非饱和砂土的循环剪切荷载作用下的动力特性规律,为进一步的相关研究提供试验基础。

2 试验介绍

2.1 试验设备

本文采用的试验仪器为英国WFI公司生产的WF25735循环单剪试验系统。该循环单剪系统是由单剪仪、传感器和PC系统组成,具体参数及设备组成参见文献[7]。试样尺寸直径为70 mm,高度为20 mm的扁圆柱体。试验中以层叠的薄铜环模拟土样边界条件,可以实现固定体积和竖向压力的剪切,应变控制式与应力控制式剪切,位移传感器的精度可达1 μ m,力传感器的精度可达0.001 kN,试验条件为不排水固结。试验中可以设定每级应变幅值下循环剪切的次数,对于每个循环周期系统采集50个测点。

2.2 试样制备与试验参数

试验所用土样取自湖南大学土槽实验室基地的砂土。室内物理力学特性试验研究表明,土样主要为砾砂,基本物理性质指标为:风干后天然含水率 $w=7.2\%$,土粒相对密度为2.69,天然土的密度为1.862 g/cm³,土的初始孔隙比为0.549。将风干的砂土依次过筛,为减小粒径效应,将5 mm筛上的较大颗粒去除,即试验土样最大粒径在5~6 mm,土样的颗粒分析试验结果如表1所示,土样的颗粒级配曲线如图1所示。

本试验通过控制重塑土的干密度与原状土的干密度相同,添加水量来制备土试样。分别计算所需的加水量,将蒸馏水均匀喷洒在土样上,并搅拌均匀,用塑料袋密封,在密闭保湿容器中放置1 d,使土样均匀润湿。

表1 土样的颗粒组成
Table 1 Particle distribution of soils

粒径 / mm	百分含量 / %	粒径 / mm	百分含量 / %
10~5	12.0	0.500~0.250	7.8
5~2	38.7	0.250~0.075	3.5
2~1	10.3	≤0.075	0.6
1~0.5	27.1		

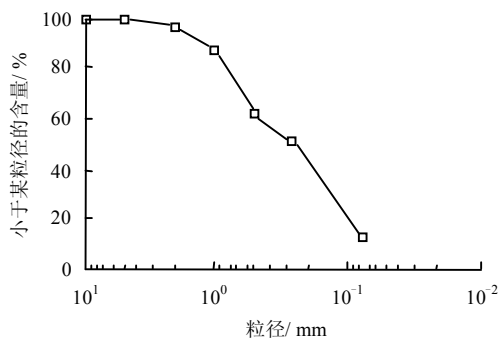


图 1 砂土的颗粒级配曲线
Fig.1 Grading curve of sand soil

2.3 试验流程

试验剪切过程中采用保持竖向压力不变的控制模式，为了研究含水率、固结压力和应变幅值对场地土的动力特性的影响规律状况，试验设计如下：

(1) 含水率从 7.2% 变化到 16.2%，含水率每级增加 1%，共 10 种含水率。即对应的饱和度从 35.3% 变化为 79.4%。试验所选用的砂土当含水率大于 16.2% 以后，试验条件控制并不理想，为此，本文所研究的非饱和砂土的饱和度控制在 35.3% 至 79.4%。

(2) 其中正应力为 25、50、100、200、300 kPa 5 个等级；剪切位移幅值 0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、2.0 mm，采取逐级加载的方式^[15]。每级应变幅值下循环 30 圈，此时土样在动力荷载下的特性已基本稳定，荷载分级见表 2。由于试样高度为 20 mm，相应剪切应变幅值为 0.005、0.010、0.020、0.040、0.050、0.100。共有 250 个试验工况。

表 2 实验荷载分级
Table 2 Grading of load

试验组号	位移幅值 / mm	应变幅值 / %	试验组号	位移幅值 / mm	应变幅值 / %
1	0.1	0.5	4	0.8	4.0
2	0.2	1.0	5	1.0	5.0
3	0.4	2.0	6	2.0	10.0

注：每级荷载下循环圈数 $N=30$ ，以下均取第 30 圈绘制剪应力-剪应变关系曲线。

(3) 各试验工况中，除控制变量（含水率、法向压力和剪切位移幅值）外，其他试验条件相同，见表 3。

表 3 试验条件
Table 3 Test condition

荷载形式	振动频率 / Hz	排水条件	加载控制方式
等弦振幅	1	固结不排水	应变控制式

试验土试样：在不排水的情况下进行循环单剪试验：试样边界条件为层叠的薄铜环（单个厚度为 1 mm）。在同样的试验条件下制备两个相同的试样，待其固结完成后取出其中一个试样，测其含水率，通过计算，在另一个试样喷洒所需的水量，使其达到试验要求的含水率，再进行不排水循环单剪试验。

3 试验结果及分析

土体在动荷载作用下的应力-应变关系是表征土动力性质的基本关系。由于土物理构成特性，其动应力-应变关系表现出非线性、滞后性及变形累积的特征。目前，土动力分析中，由于等效线性模型（Hardin-Drnevich 模型）的概念明确性和应用方便性的特点，在岩土工程计算中得到了广泛应用。等效线性模型采用等效剪切模量 G 和阻尼比 D 来反映土体动应力-动应变关系的非线性。

动剪模量和阻尼比是两个主要的表征土动力特性的参数，前者代表了土体抵抗变形的能力，后者表示了土体消耗能量的能力。其中阻尼比的定义可以表示如图 2 和式 (2)。

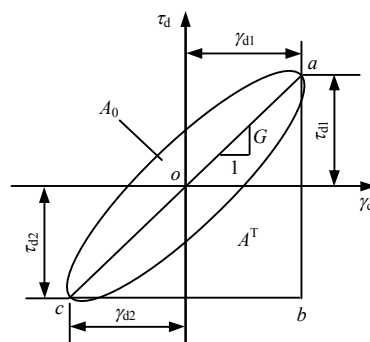


图 2 理想的动应力-应变滞回曲线
Fig.2 Idealized hysteresis loop produced by cyclic loading

$$G = (|\tau_{d1}| + |\tau_{d2}|) / (|\gamma_{d1}| + |\gamma_{d2}|) \quad (1)$$

$$D = A_0 / (\pi A_T) \quad (2)$$

式中： γ_{d1} 、 γ_{d2} 分别为正、负最大动剪应变； τ_{d1} 、 τ_{d2} 分别为正、负最大动剪应力； A_T 为三角形 abc 的面积； A_0 为滞回圈的面积，表示了在一个循环一周中土体消耗的能量； G 为土的动剪切模量； D 为土的阻尼比。

将不同动应力周期作用的最大剪应力 $\pm\tau_m$ 和它引起的最大剪应变 $\pm\gamma_m$ ，即各应力-应变滞回圈顶点绘出。它将是一条增长曲线，称为骨架曲线。将 10 种不同含水率在正应力分别为 25、50、100、200、

300 kPa 进行汇总制图,发现 25 kPa 和 50 kPa、200 kPa 和 300 kPa 基本规律一致,本文仅给出正应力分别为 50、100、200 kPa 的试验结果。

3.1 G_d/G_{dmax} - γ 关系及其对比

本文定义滞回环的平均斜率为 G_d ,则最大动剪模量为 $G_{dmax} = \tau_{dmax} / \gamma_{max}$ 。假定循环单剪法测定曲线在动荷载作用下土的动剪应力 τ_d 和动剪应变 γ_d 间的关系符合双曲线规律,其表达式为^[16]

$$\tau_d = \gamma_d / (1/G_0 + \gamma/\tau_y) \quad (3)$$

式中: G_0 为初始动剪模量; τ_y 为最大动剪应力。

若将 G_0 坡度线与 τ_y 水平线的交点横坐标定义为参考应变 $\gamma_r = \tau_y / G_0$, 可得

$$G_d/G_0 = 1/(1 + \tau_d/\tau_y) \quad (4)$$

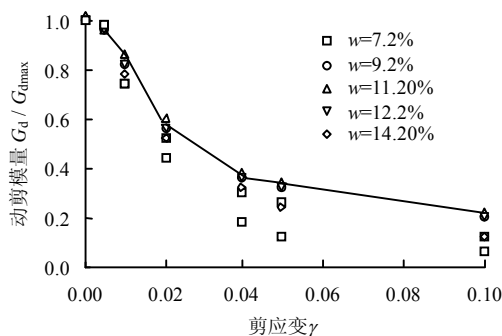
饱和度为 35.30% (含水率 $w=7.2\%$)、45.1% ($w=9.2\%$)、54.88% ($w=11.2\%$)、59.78% ($w=12.2\%$)、69.58% ($w=14.2\%$) 5 种土样的循环单剪试验数据如图 3 所示 (图中实线表示的是 $w=11.2\%$ 砂土的动剪模量归一化曲线)。

比较图 3,随着土样含水率的增大,其动剪模量归一化量先增大后逐渐降低;不同正应力,在较大剪应变下,临界含水率大约在含水率为 11.2% 左右,并且随着固结压力增大,非饱和砂土动剪模量没有出现像饱和砂土一样的靠拢现象^[16]。

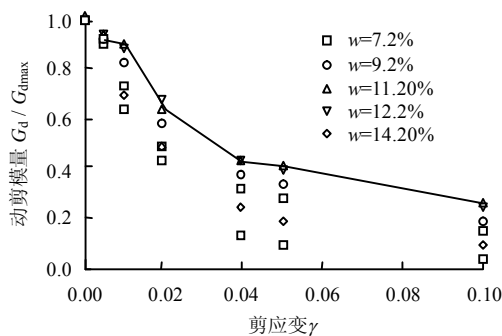
3.2 不同含水率砂土的骨架曲线

由不同动应力周期作用的最大剪应力 $+\tau_m$ 和它引起的最大剪应变 $+\gamma_m$,即各应力-应变滞回圈顶点绘出骨架曲线 (因曲线关于原点中心对称,本文只给出第 1 象限部分)。

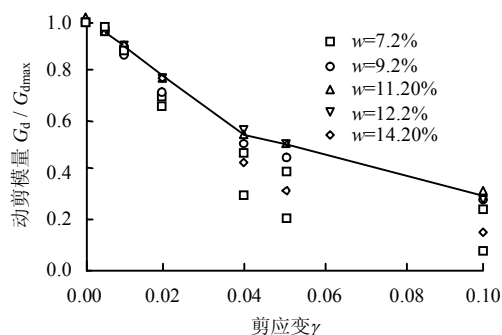
由图 4 中可以看出,正应力相同下不同含水率的骨架曲线,无论是高还是低正应力都存在一个临界含水率 11.2%,小于该含水率,骨架曲线有逐渐增大的趋势,但变化比较平缓;当大于该临界含水率时,骨架曲线逐渐下降,且变化较剧烈。图 4 中显示含水率较小时,曲线没有出现软化现象,而在所研究的应变幅值内含水率较大时,曲线出现了明显的软化现象;随着正应力的增大,骨架曲线软化出现时对应的含水率愈小,如在正应力为 50 kPa 时,对应软化的骨架曲线含水率为 15.2%,而正应力为 200 kPa 时,对应软化的骨架曲线含水率为 13.2%。当剪应变较小时 ($\leq 1\%$),含水率对骨架曲线几乎没有影响。从骨架曲线可以看出,在含水率为 11.2% 对应的斜率最大,即在 $G_d/G_{dmax} - \gamma$ 图上对应的 G_d/G_{dmax} 值最大。



(a) 正应力为 50 kPa



(b) 正应力为 100 kPa



(c) 正应力为 200 kPa

图 3 不同含水率非饱和砂土 G_d/G_{dmax} - γ 散点图

Fig.3 G_d/G_{dmax} - γ of unsaturated sandy soil for different water contents

3.3 D/D_{max} - γ 关系及其对比

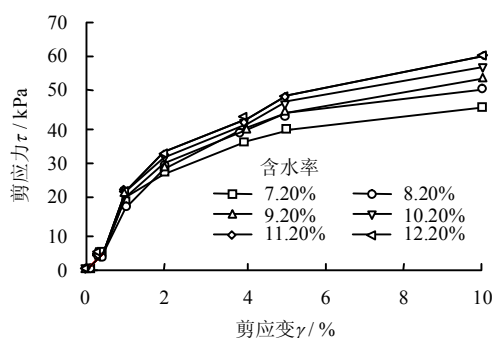
试验获得的 D/D_{max} 与动剪应变的关系见图 5。从图中可以看出,阻尼比的离散性较大,正应力较大时,阻尼比散点图出现靠拢现象,随着含水率的增大并没有表现出规律特征;正应力为 50、100 kPa 时,在小剪应变 ($\leq 4\%$) 下,随着剪应变的增大,阻尼比 D/D_{max} 逐渐增大;当正应力为 200 kPa 时,在所研究的整个剪应变范围,随着剪应变的增大阻尼比 D/D_{max} 逐渐增大。

3.4 滞回耗能随剪应变的变化曲线

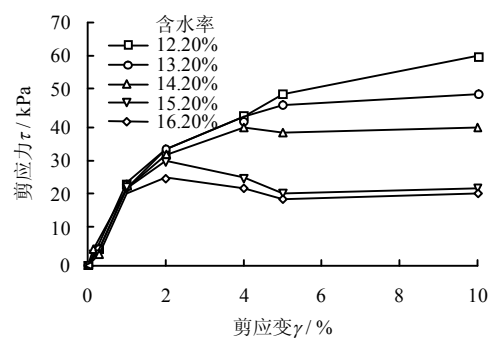
图 6 中纵坐标的滞回耗能为图 2 滞回环面积 A_0 ,滞回环的面积是评定土体耗能的重要指标,图 6 中显示存在一个临界含水率,当含水率小于临界含水率时,滞回耗能曲线随着含水率的增大而增大,

而当含水率大于临界含水率时, 滞回耗能曲线随着含水率的增大而减小, 即随着含水率的增大, 砂土耗能能力呈现先增大后减小的趋势。而且, 随着正

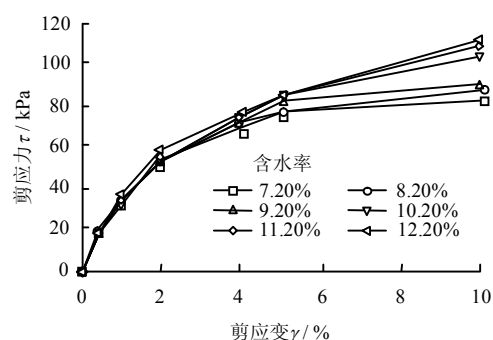
应力的增大, 临界含水率的数值有减小的趋势。另外, 在小应变下滞回环面积几乎重合, 含水率对其影响不大。



(a) 正应力为 50 kPa



(b) 正应力为 100 kPa



(c) 正应力为 200 kPa

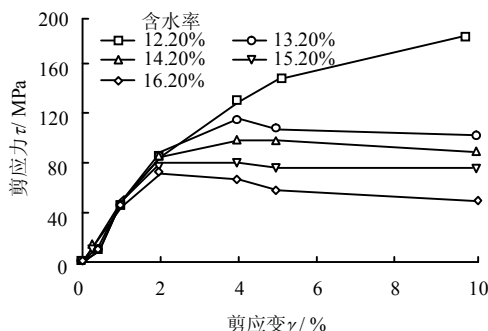
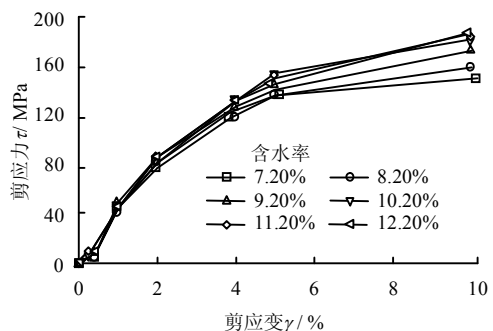
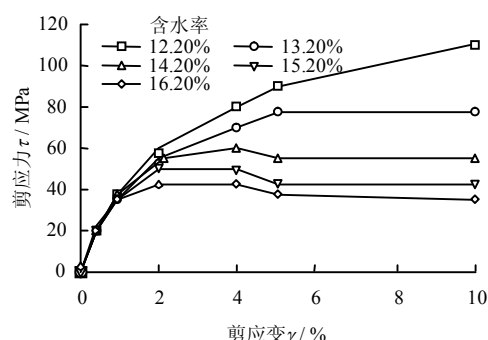
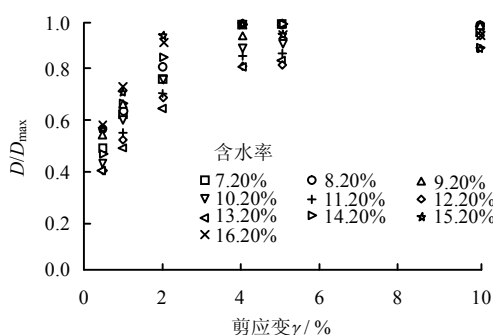
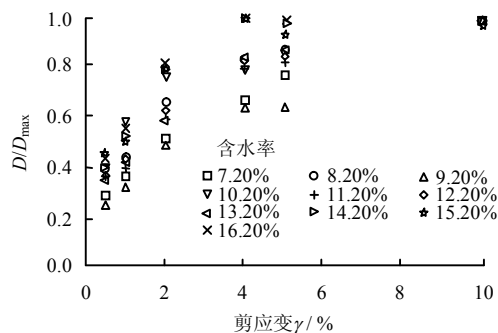


图 4 不同含水率非饱和砂土骨架曲线

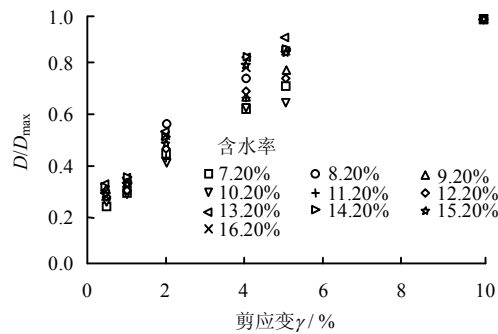
Fig.4 Skeleton curves of unsaturated sandy soil for different water contents



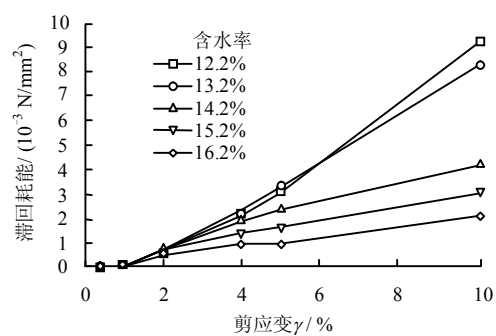
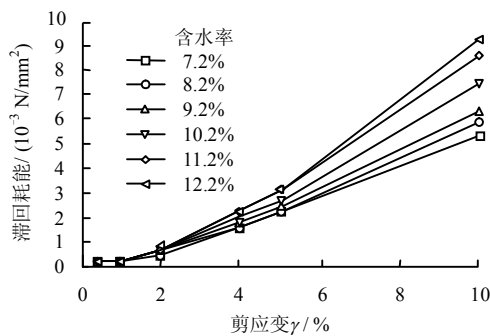
(a) 正应力为 50 kPa



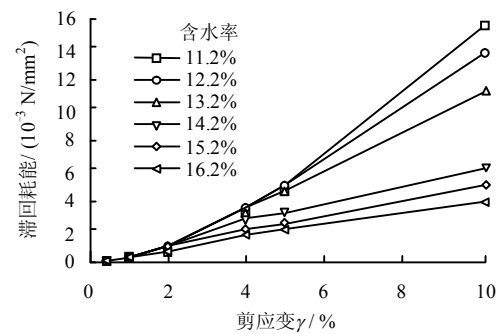
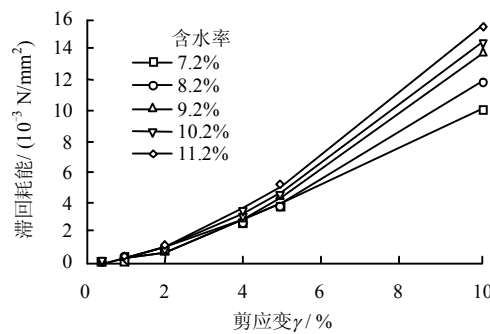
(b) 正应力为 100 kPa



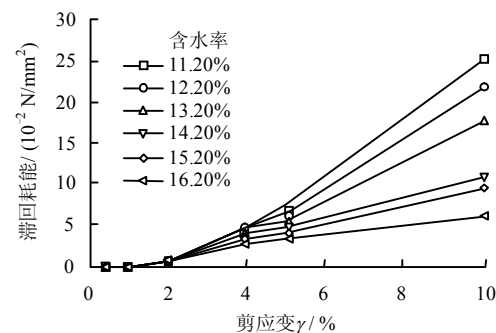
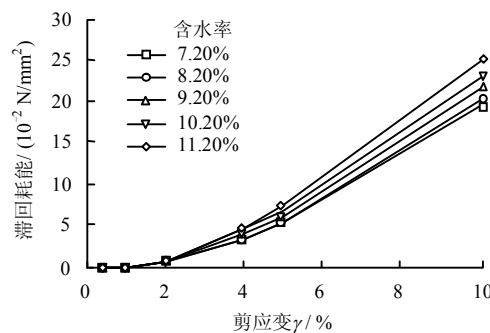
(c) 正应力为 200 kPa

图 5 不同含水率非饱和砂土 $D/D_{\max}$ - γ 散点图Fig.5 $D/D_{\max}$ - γ scatter diagram of unsaturated sandy soil for different water contents

(a) 正应力为 50 kPa



(b) 正应力为 100 kPa



(c) 正应力为 200 kPa

图 6 不同含水率下非饱和砂土的滞回耗能随着剪应变的变化

Fig.6 Hysteretic energy dissipation change of unsaturated sandy soil for different water contents

3.5 动剪模量和阻尼比随饱和度的变化曲线

图 7 结果显示, 在正应力为 50 kPa、剪应变为 1% 时, 本试验得出的动剪模量与阻尼比随饱和度

(饱和度小于 80%) 的变化很小, 这与 Fardin 等^[13] 循环单剪试验研究中采用的日本标准 Toyoura 细砂, 在相同正应力和剪应变条件下, 得出的结果非

常接近。虽然两种试验采用的砂土试样存在差别, 循环加载频率也不同 (分别为 1.0 Hz 和 0.5 Hz), 但这并不影响动剪模量和阻尼比随饱和度的变化趋势。

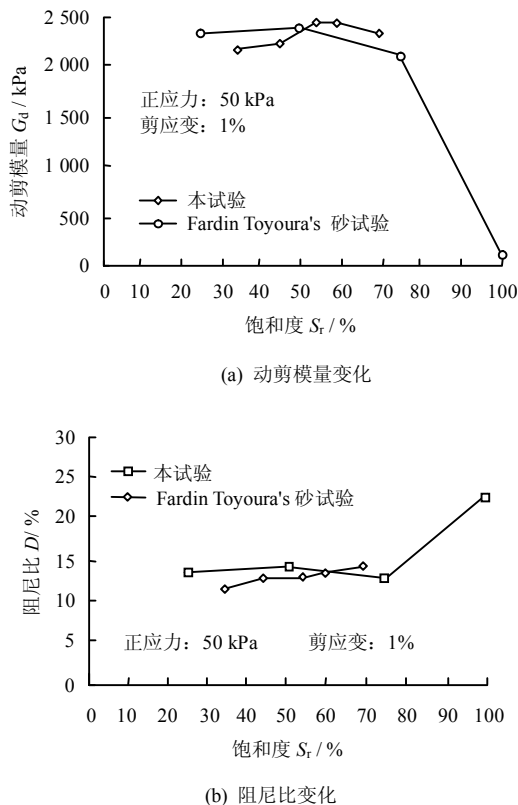


图 7 动剪模量和阻尼比随着饱和度的变化

Fig.7 Dynamic shear modulus and damping ratio changes along with saturation change

4 试验现象解释

(1) 骨架曲线理论解释

非饱和土随着饱和度的增大, 水-土之间的关系如图 8 所示: 图 8(a)为悬挂状非饱和土, 当饱和度较低, 在毛细作用下, 水形成环-悬挂水环, 在颗粒接触点的周围, 水环是孤立的, 不能形成连续的水体, 从一个水环向另一个水环不能传递压力, 空气连通; 图 8(b)为索状非饱和土, 当饱和度增大, 直到悬挂水环扩大至形成一连续水体, 此时饱和度为平衡水饱和度; 图 8(c)当饱和度继续增大至空气不再是连续体, 此时已成为孤立空气非饱和土, 空气封闭后不能流动, 部分小气泡随水能流动, 其临界饱和度称为孤立空气饱和度, 在土中, 毛细作用可忽略不计, 毛细作用引起的湿吸力近乎于 0^[17-18]。林鸿洲等^[10]试验研究中, 饱和度达到 40%~60%, 黏聚力达到最大, 相应的抗剪强度达到最大。

对于非黏性土, 当砂土很干时, 砂土的强度很

小, 随着含水率的增加, 由于土颗粒间水膜的“吸附”作用, 砂土的强度逐渐变大, 但当含水率继续增加时, 土颗粒间水膜的“吸附”作用逐渐减小, 直至消失, 此时砂土的强度又逐渐变小, 即存在一个最优含水率^[19]。在本试验中非饱和砂土循环剪切试验中所得到的骨架曲线反应了这样的趋势: 存在一个临界含水率 11.2%, 当低于该含水率时, 随着含水率的增大, 骨架曲线增长较慢, 当高于该含水率时, 随着含水率的增大, 骨架曲线急剧下降。从骨架曲线随着含水率的变化趋势也很好解释了 $G_d / G_{dmax} - \gamma$ 散点图的变化趋势。

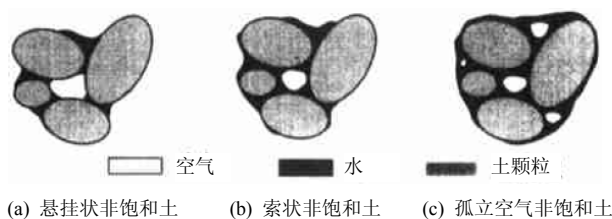


图 8 非饱和土的饱和状态

Fig.8 Saturated state of unsaturated soil

(2) 动剪模量和阻尼比的解释

饱和土中在同等应变和固结压力下, 随着土样饱和度地升高, 其阻尼比增大, 其原因在于饱和度越高, 其孔隙压力增长越快, 孔隙水的张力随之升高, 土中累积损耗的能量随孔压的升高而有规律的增长; 试样颗粒之间的接触疏松, 波的传播路径也随之减少, 在土粒和水的界面上发生波的反射, 因而, 波在传播过程中能量损耗增大, 表现在土体变软, 动剪模量减小, 而表征能量损耗多少的阻尼比却增大^[16]。对于非饱和土在同等应变和固结压力下随着饱和度的增大, 试样颗粒之间的接触先密实后疏松, 波的传播路径开始增大后减小, 在土粒和水的界面上发生波的反射, 因而, 波在传播过程中能量先减小后增大, 表现土体先变硬后变软, 动剪模量表现为先增大后减小。

(3) 滞回耗能曲线与阻尼比散点图的解释

滞回耗能曲线和阻尼比 $D / D_{max} - \gamma$ 散点图都反映的是土的耗能能力, 理论上来说, 随着剪应变的增大, $D / D_{max} - \gamma$ 和滞回耗能曲线所表现出结构耗能能力的变化趋势应该一致。然而滞回耗能曲线随着含水率的变化表现出明显的规律特性, 而阻尼比并没有表现出同样的特征, 这是因为采用式 (2) 计算时, 阻尼比与 A_0 及 A_r 直接相关, 但随着含水率的增大, 滞回圈中正负最大剪应力对应点的连线与剪应变轴 (即图 2 中 ab 与坐标横轴) 之间的夹角越

来越小, A_T 也随之改变。

5 结 论

(1) $G_d/G_{dmax} - \gamma$ 散点图 在同种固结压力下存在一个临界含水率 11.2%, 当低于该临界含水率时, 在较大剪应变下随着饱和度的增大, G_d/G_{dmax} 数值逐渐增大, 当高于该临界含水率时, 随着饱和度的增大, G_d/G_{dmax} 数值逐渐减小。

(2) 骨架曲线 本文试验所给定的应变幅值范围内, 土体在动荷载作用下均未发生破坏。从图 4 中可以看出, 存在一个临界含水率 11.2%, 当低于该含水率时, 骨架曲线略有上升的趋势, 而当低于该含水率时骨架曲线下落比较大。在所研究的应变幅值内, 含水率较大时骨架曲线出现一定的软化现象, 从骨架曲线的变化趋势也可以进一步解释 $G_d/G_{dmax} - \gamma$ 散点图的变化趋势。

(3) $D/D_{max} - \gamma$ 散点图 在同种固结压力下, 不同含水率的非饱和砂土的 $D/D_{max} - \gamma$ 离散型较大, 高正应力下, 随着剪应变的增大, 阻尼比 D/D_{max} 逐渐增大。

(4) 滞回耗能曲线表明, 滞回耗能能力随着剪应变的增大而增大; 随着正应力的增大临界含水率出现了偏移, 在低正应力下临界含水率为 12.2%, 高正应力下为 11.2%, 滞回耗能曲线小于该临界含水率时, 随着含水率的增大滞回耗能曲线逐渐增大, 高于该含水率时, 随着含水率的增大, 滞回耗能曲线逐渐减小。

参 考 文 献

- [1] D G 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐著. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [3] 周健, 白冰, 徐建平. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
ZHOU Jian, BAI Bing, XU Jian-ping. Theory and calculation of soil dynamics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [4] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1968, 94(SM2): 353—369.
- [5] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay closure[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1969, 95(SM6): 1531—1537.
- [6] QIAN X, GRAY D H, WOODS R D. Resonant column test on Partially saturated sands[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1991, 14(3): 266—275.
- [7] 王海东, 尚守平, 卢华喜, 等. 场地土动剪模量的试验对比研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(3): 33—37.
WANG Hai-dong, SHANG Shou-ping, LU Hua-xi, et al. Comparative study of dynamic shear modulus through laboratory experiments[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2005, 32(3): 33—37.
- [8] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水率的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 25(7): 1499—1503.
LING Hua, YIN Zong-ze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 25(7): 1499—1503.
- [9] 凌华, 殷宗泽, 蔡正根. 非饱和土的应力-含水率-应变关系试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 651—655.
LING Hua, YIN Zong-ze, CAI Zheng-yin. Experimental study on stress-water content-strain relationship of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 29(3): 651—655.
- [10] 林鸿洲, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931—1936.
LIN Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1931—1936.
- [11] TOSHIYASU U, MOTOKI K, RYOSUKE U, et al. Liquefaction of unsaturated sand considering the pore air pressure and volume compressibility of the soil particle skeleton[J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48(1): 87—99.
- [12] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Dynamic properties and liquefaction resistance of two soil materials in an earthfill dam-laboratory test results[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(8): 605—620.
- [13] FARDIN J, HAMED S. Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation[J]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2012, 32(1): 26—41.