

文章编号: 1000-7598 (2012) 06-1667-07

水平-竖向加筋饱和砂土动弹性模量试验研究

邱成春, 张孟喜

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘 要: 利用美国 GCTS 公司研制的 USTX-2000 全自动非饱和土/饱和土动三轴仪, 在不同围压下对以有机玻璃作加筋材料的 H-V 加筋饱和砂土进行了一系列循环荷载下动三轴试验, 研究了 H-V 加筋饱和砂土动弹性模量及阻尼比随围压、动应变、竖筋高度的变化规律, 从而得到最大动弹性模量与围压的关系。试验表明, 纯砂和加筋砂的动弹性模量都随动弹性应变幅的增大而减小, 随围压的增大而增大, 且 H-V 加筋砂较纯砂和水平加筋砂有效地增大了动弹性模量, 并随着竖筋高度增加而增大; 纯砂和加筋砂的最大动弹性模量随着围压的增大而增大, 且 H-V 加筋随竖筋高度增加而增大; 纯砂和加筋砂的阻尼比随动弹性应变幅的增大而增大, 纯砂和 H-V 加筋砂的阻尼比随围压的变化不够显著, 但有减小的趋势, H-V 加筋砂阻尼比随竖筋高度的变化不明显, 但加筋砂比纯砂有效地减小了阻尼比。

关 键 词: 水平-竖向(H-V)加筋; 动弹性模量; 阻尼比; 竖筋高度

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Test research on dynamic elastic modulus of saturated sand reinforced with horizontal-vertical inclusions

QIU Cheng-chun, ZHANG Meng-xi

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: With USTX-2000 automatic unsaturated and saturated dynamic triaxial testing system developed by GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems) company, a series of dynamic triaxial tests under cyclic loadings are performed on saturated sand reinforced with horizontal-vertical(H-V) inclusions of perspex with different confining pressures. The results of dynamic elastic modulus of saturated sand reinforced with H-V inclusions influenced by confining pressure, dynamic elastic strain and the height of vertical reinforcement are studied. Then, the relations between the maximum dynamic elastic modulus which is useful for practical engineering and confining pressure are gained. It is found that the dynamic elastic moduli of both unreinforced sand and reinforced sand decrease with the increment of dynamic elastic strain, and increase with the confining pressure increase; H-V inclusions reinforced sand improves the dynamic elastic modulus along with the increase of the height of vertical inclusion compared to unreinforced sand and conventional reinforced sand with horizontal inclusions. The maximum dynamic elastic moduli of both unreinforced sand and reinforced sand increase with the increase of confining pressure. The damping ratios of both unreinforced sand and reinforced sand increase with the increase of dynamic elastic strain. Neither the damping ratio of unreinforced sand nor that of reinforced sand is sensitive to the change of confining pressure; however, it has the tendency to decrease as the accretion of confining pressure. In addition, the damping ratio of reinforced sand is obviously decreased compared to that of unreinforced sand.

Key words: horizontal-vertical (H-V) reinforcement; dynamic elastic modulus; damping ratio; height of vertical reinforcement

1 引 言

随着社会和经济的迅速发展, 人口愈来愈集中于城市。世界上的多次破坏性地震都集中于城市, 地震所造成的巨大破坏使土动力学成为减震防灾工程中的一个重要方面。我国的高速公路与铁路的迅

猛发展, 特别是“十二五”铁路规划的出台, 使交通荷载下土的动力特性研究更具有工程实际意义。加筋土技术在水利、铁路、公路、港口和建筑工程中的广泛应用和不断发展, 使其动力特性的研究十分必要。Maher 等^[1]对随机分布纤维加筋砂土利用共振柱试验测量其动力反应, 得到加筋土结构具有较

收稿日期: 2011-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40972192); 上海市教育委员会科研创新项目(No. 11ZZ88)。

第一作者简介: 邱成春, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事加筋土动力特性的研究工作。E-mail: qcc888@shu.edu.cn

好的抗震性的结论。Krishnaswamy 等^[2]在不排水试验中研究了不同土工合成材料加筋砂在不同密实度下的抗液化强度,并用一种天然纤维代替土工合成材料进行试验对比。Vercueil 等^[3]研究了含多种土工合成材料饱和砂土以及无纺织物饱和砂土的抗液化强度,比较了这些加筋材料在提高饱和砂土抗液化强度的效果。Boominathan 等^[4]研究了随机分布纤维条和纤维网粉煤灰的抗液化强度,发现加筋粉煤灰比纯粉煤灰显著提高了抗液化强度,且纤维网较纤维条更加有效地抑制了粉煤灰的液化。孙晋等^[5]用 DDS-70 动三轴仪研究了窗纱加筋土的动弹性模量随围压、密实度和加筋层数的变化规律。谢婉丽等^[6]以护坡土工格网为加筋材料,在 GDS 三轴测试系统上对不同加筋层数的试样进行了不同围压和不同动应力作用下的动三轴试验。邹德高等^[7]在筑坝砂砾料三轴试样内水平铺设土工格栅,应用中型动三轴仪研究了加筋后砂砾料残余变形与振动次数的关系,并与不加筋的砂砾料残余变形特性进行了对比。

张孟喜等^[8]提出新型立体加筋概念,并做了大量的静力试验,研究立体加筋土的强度特性及变形规律,包括三轴试验、拉拔试验、模型试验等^[9-11],试验表明,立体加筋较传统水平加筋能够有效地增加土体的强度并限制土体的变形;然而已做的试验都是静力试验,而实际中动荷载的情况普遍存在。为了进一步探索立体加筋土的应用前景,有必要对立体加筋土的动力特性进行研究。本文以有机玻璃为加筋材料,福建标准砂为填料,制作 3 层 H-V 加筋饱和试样,在 4 种不同围压下对 H-V 加筋饱和砂土进行了一系列循环荷载下动三轴试验,主要研究了 H-V 加筋饱和砂动弹性模量及阻尼比随围压、动应变、竖筋高度的变化规律,从而得到对实际工程具有指导意义的最大动弹性模量与围压的关系。

2 H-V 加筋概念

H-V 加筋是立体加筋的一种表现形式,即在水平筋材的一侧或双侧布置竖向筋材,水平筋的形状可以是圆形或者条带状等,分为满布或者非满布,竖筋形状可采用变厚度的矩形、多面体板或半球体等。H-V 这种新型加筋形式的特征是除了水平筋材与土体的摩擦力之外,竖筋的存在对土体形成一定的侧限作用,竖筋之间的土体形成一定的加固区,约束了土体的变形,提高了土体的强度。H-V 加筋的水平摩擦很小,主要靠竖向加筋提供的约束。水平与竖向筋满布如图 1(a)所示,非满布形式如图 1(b)所示。

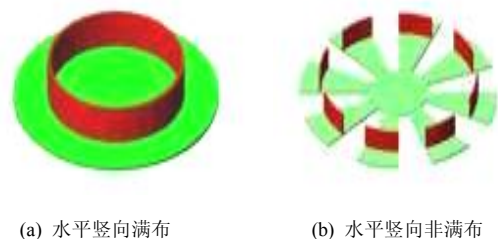


图 1 H-V 加筋典型方案示意图
Fig.1 Typical H-V reinforced elements

3 试验方案

3.1 试验仪器

试验仪器采用美国 GCTS(Geotechnical Consulting and Testing Systems)公司研制的 USTX-2000 非饱和土/饱和土动静三轴测试系统,它是一种完全集成化的系统,采用电-气闭环数字伺服控制,可以对饱和或非饱和土进行完全自动化的静态和动态试验。系统包括所有的软件模块和电子阀,轴向加载器、围压、孔隙水压/反压、孔隙气压都采用传感器反馈来伺服控制。所有的充水/排水阀,都是计算机控制的。系统主要由压力室、加载架、压力面板与压力体积控制器、通用数字信号调节和控制单元 (SCON-2000)及数据采集处理系统组成,如图 2 所示。GCTS 试验系统是一套全自动化的试验仪器,通过在配套的 CATS 软件里设置试验步骤,仪器将自动按步完成所设定的程序,包括试样饱和、试样固结、静态加载、动态加载等。



图 2 GCTS 三轴测试系统
Fig.2 GCTS triaxial testing system

3.2 试验材料

试验填料选用土样为福建标准砂。经过一系列基本试验测定其粒径主要集中在 0.5~2 mm,颗粒级配曲线如图 3 所示,其物理性质指标见表 1,属于级配不良砂。

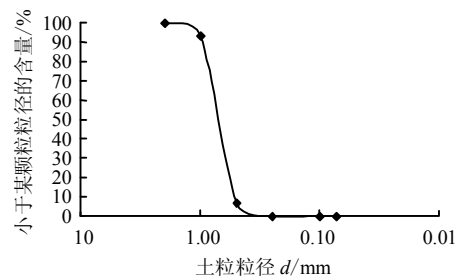
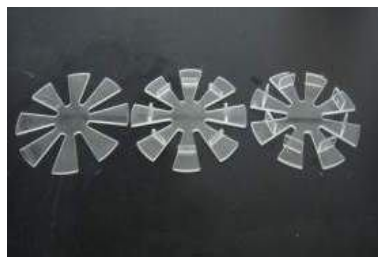


图 3 砂土颗粒的级配曲线
Fig.3 Grain size distribution curve of sand

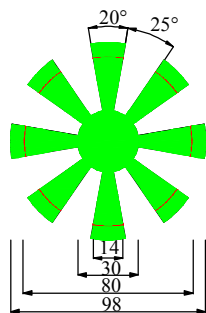
表 1 砂土的物理性质指标
Table 1 Physical indexes of sand

重度 $\gamma_0 / (\text{kN}/\text{m}^3)$	相对密度 G_s	孔隙比 e	含水率 $\omega / \%$	不均匀 系数 C_u	曲率系数 C_c
15.75	2.642	0.585 5	0.15	1.39	0.94

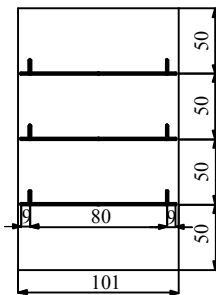
加筋土视为一种复合材料，不少学者通过大尺寸的单元体三轴试验研究了这种复合材料的力学特性、强度特性及应力-应变特性^[6, 12-13]，考虑到筋材的尺寸效应，需要采用比常规土样大的尺寸试样，本次试验三轴试样直径为 101 mm，高为 200 mm。试验筋材采用与单向拉伸高密度聚乙烯土工格栅 TGDG50 特性相似的高抗拉强度、低延伸率的有机玻璃，制作成一种水平、竖向复合立体筋片，其特点是水平和竖向方向均为非满布布筋，竖直方向加筋高度 h 变化， h 分别为 5、10 mm，且均为 3 层布置。筋材形式如图 4 所示。竖筋与水平筋之间用三氯甲烷黏结。



(a) 筋材照片



(b) 筋材尺寸



(c) 筋材布置

图 4 H-V 加筋试验方案 (单位: mm)
Fig.4 Experimental schemes for H-V reinforcement (unit: mm)

3.3 试验方法及工况

试验饱和砂样采用湿装法，每次采用一定质量的干砂制备，约为 2 450 g。砂样的饱和度将直接影响试验的结果，经过笔者多次的尝试，本试验将煮沸法和反压法相结合。将定量的砂煮沸，煮砂时不断搅动，使气体完全排出，煮砂时间为 2 h。装样时，在三瓣模筒内通入纯水至 1/2，冷却后的砂料用勺子填装，确保勺子内的砂料完全浸在水中，移入模筒后，待勺子完全浸入水面下方方可让砂料脱落。装入筋材时，注意使其保持平整，并使上、中、下 3 层筋材位置统一，上、下对齐。成样后，施加 200 kPa 左右的反压，验证孔隙水压力系数，当孔隙水压力系数 B 值满足 0.95 以上，认为试样满足饱和度要求。

振动试验采用等效循环荷载，同时由于正弦波能使土样经受较多次的循环振动，所以本次试验采用正弦波加荷；固结应力比与土层应力历史以及土类型有关，其范围一般为 0.25~2.5，本试验固结应力比 K_c 均取 2；固结围压分为 50、100、150、200 kPa 4 种，为了减少工作量，采用同一个试样，在同一固结压力下，改变 6 级动荷（定义 n 为动应力幅值与围压的比值， n 的变化范围是 0.3~0.8）连续进行试验的方法。当第 1 级动荷选择好后，即开机振动，同时测记动应力、动变形和动孔隙水压力，达到预定振次(3 次)后停机，并立即打开排水阀消除孔压；然后再关阀进行下一级加荷试验；本次试验分级加动荷过程中，动孔隙水压力的变化最高达到 10 kPa，一般在 -2~6 kPa 变化范围之内，与所选围压相比，符合《地基动力特性测试规范》^[14] 9.3.8 条规定的动模量分级试验避免动孔隙水压明显升高的要求；一级动荷振动中采用固结不排水振动；振动频率取 1 Hz。

根据纯砂、水平加筋、H-V 加筋竖筋高度，共设计了 4 种工况，见表 2。每种工况分别在围压 50、100、150 和 200 kPa 下进行 6 级动荷的振动，考虑试验的离散性，每个工况在一种围压下的试样不少于 3 个，多组平行试验后，汇总得到有效数据 16 组。

表 2 试验工况
Table 2 Experimental cases

工况	水平筋 层数	竖筋高度 h / mm	加筋形式	加筋材料
1				无筋纯砂
2	3	0	水平	
3	3	5	H-V	有机玻璃
4	3	10		

4 试验结果及分析

4.1 动应力与动应变关系

土的动应力-应变关系也称土的动本构关系,是表征土的动力特性的基本关系。试验中每级动荷有 3 次循环振动,第 2 次循环测定的动应力和动应变数据比较稳定,因此,在绘制骨干曲线和滞回曲线时,均采用每级循环中第 2 次循环的试验数据。

纯砂与 $h=5$ mm 的 H-V 加筋工况在不同围压动应力与动弹性应变的曲线如图 5 所示,同一围压 50、100 kPa 下各工况动应力与动弹性应变如图 6 所示。将试验所得数据点根据双曲线 $\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d}$ 进行拟合,即图中实线。

图 5 表明,纯砂与 H-V 加筋土在不同围压下,动应力-动应变曲线基本呈双曲线形状,同一动应变下的动应力随着围压的增大而增大。由图 6 知,同一围压下,水平加筋较纯砂有效地限制了动弹性应变的增长,而 H-V 加筋限制效果较水平加筋更为显著,并随着竖筋的高度增加而增强。

4.2 动弹性模量与动应变关系

根据每级绘制的滞回圈,按式 (1) 计算各种工况的动弹性模量^[15],

$$E_d = \frac{\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}}{\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}} \quad (1)$$

式中: E_d 为动弹性模量; $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$ 分别为最大、最小动应力; $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$ 分别为最大、最小动应变。

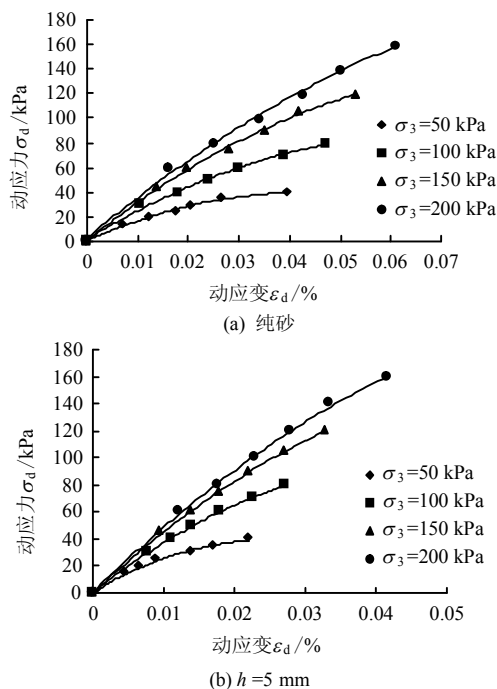


图 5 同一工况在不同围压动应力-动应变曲线
Fig.5 Dynamic stress versus dynamic strain under different confining pressures

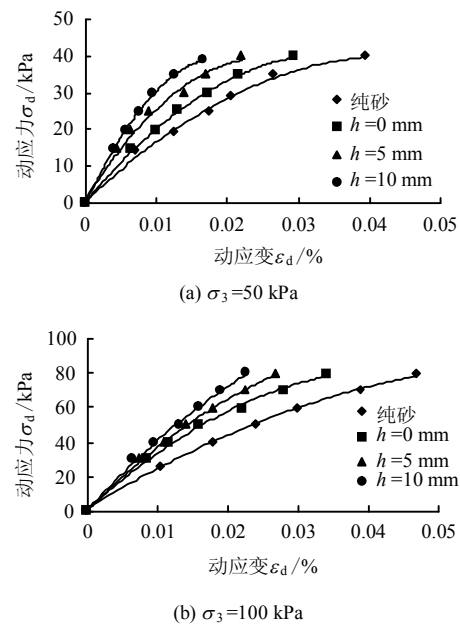


图 6 不同工况在相同围压动应力-动应变曲线
Fig.6 Dynamic stress versus dynamic strain under the same confining pressure

绘制动弹性模量与动应变的曲线图。纯砂与 $h=5$ mm 的 H-V 加筋工况在不同围压动弹性模量与动弹性应变的曲线如图 7 所示,同一围压 50、100、150、200 kPa 下,各工况动弹性模量与动弹性应变如图 8 所示。

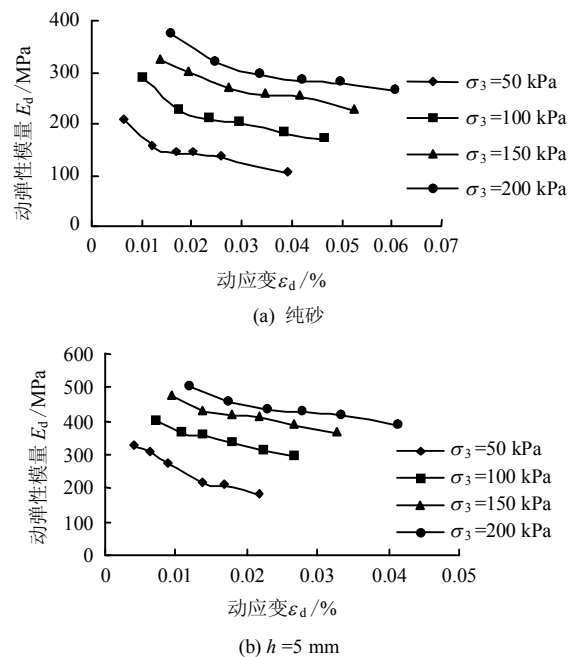


图 7 同一工况不同围压下动弹性模量-动应变曲线
Fig.7 Dynamic elastic modulus versus dynamic strain under different confining pressures

由图 7 知,随着动弹性应变的逐渐增加,纯砂与 H-V 加筋砂动弹性模量随之降低,出现刚度软化

现象。另外,同一动应变水平下,纯砂与 H-V 加筋砂的动弹性模量随围压增大而增加。

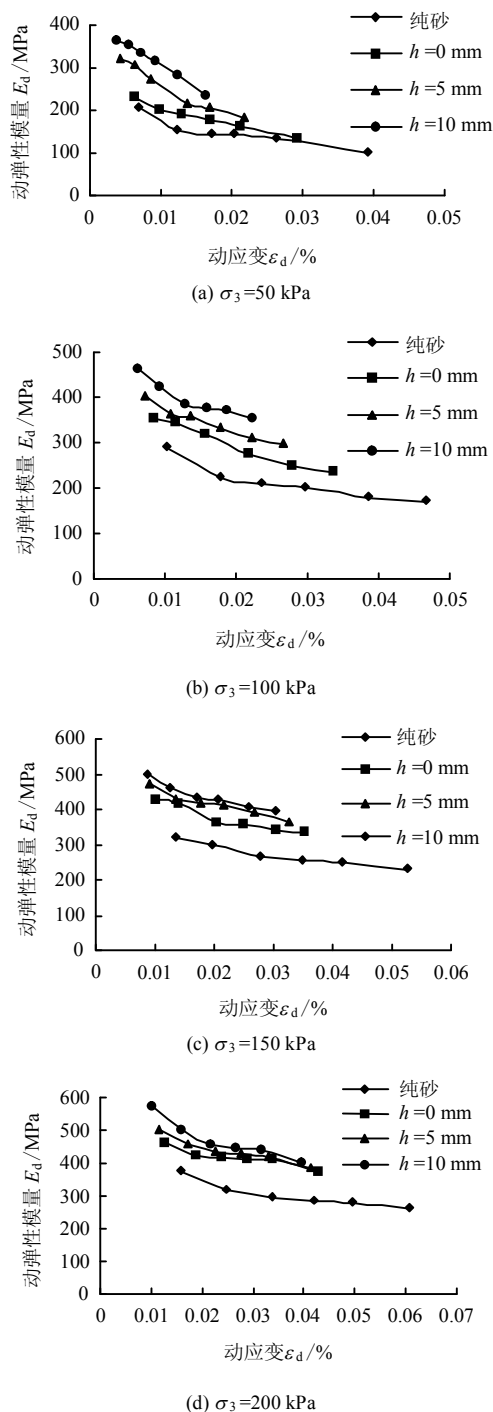


图8 不同工况相同围压下动弹性模量-动应变曲线
Fig.8 Dynamic elastic modulus versus dynamic strain under the same confining pressure

由图8知,相同围压同一动应变水平下,与纯砂相比,水平加筋有效地增加了饱和砂的动弹性模量,H-V加筋又进一步发挥了增强的效果,并随着竖筋高度的增加而增加。

另外,在低围压(50、100 kPa)下,随着竖筋

高度的增加,H-V加筋比水平加筋增加的效果较为显著,如图8(a)、(b)所示;但随着围压的增加,增加的效果有所减弱,如图8(c)、(d)所示。

4.3 最大动弹性模量

假定土的动应力幅值-动应变幅值关系满足Hardin-Drnevich双曲线型。由式(2)

$$\sigma_d = \varepsilon_d / (a + b\varepsilon_d) \quad (2)$$

式中: \$\sigma_d\$ 为动应力; \$\varepsilon_d\$ 为动应变; \$a\$、\$b\$ 为系数。

可得 \$1/E_d - \varepsilon_d\$ 关系曲线,再由直线的截距取倒数可得骨干曲线的初始斜率,即最大动弹性模量^[16],各种工况最大动弹性模量随围压变化曲线如图9所示。

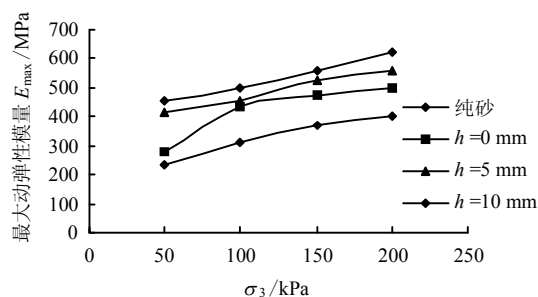


图9 最大动弹性模量-围压曲线
Fig.9 Maximum dynamic elastic modulus versus the confining pressures

由图知,纯砂与 H-V 加筋饱和砂的最大动弹性模量都随着围压的增加而增加,同一围压下,水平加筋增大了砂的最大动弹性模量,H-V加筋砂的动弹性模量增大效果更为显著,且随着竖筋高度的增加而增大。围压 100 kPa 下,水平加筋较纯砂的最大动弹性模量增加了 39.13%,竖筋 5 mm 高的 H-V 加筋增加了 45.45%,而竖筋 10 mm 高的 H-V 加筋砂增加了 60%。

4.4 阻尼比

土的阻尼比是土动力学中的另一重要特征参数,它反映了土动应力-应变关系的滞后性。阻尼比是通过试验所得到的滞回曲线,用下式计算

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_s} \quad (3)$$

式中: \$A\$ 为滞回圈的面积; \$A_s\$ 为滞回圈顶点至原点连线与横轴形成直角三角形的面积

阻尼比经典的计算方法是用椭圆曲线来拟合应力-应变滞回曲线,计算其面积。然而实测的滞回圈并不是标准的椭圆,拟合椭圆求面积的方法存在一定的误差,并且计算繁琐,工作量大。作者采用文献[17]中的用多边形逼近滞回曲线计算土阻尼比的

方法,该方法可直接完整地利用试验数据,并使计算过程得以简化。

纯砂与 $h=10\text{ mm}$ 的 H-V 加筋工况在不同围压阻尼比与动弹性应变的曲线如图 10 所示,同一围压 50 kPa 下各工况阻尼比与动弹性应变的曲线如图 11 所示。

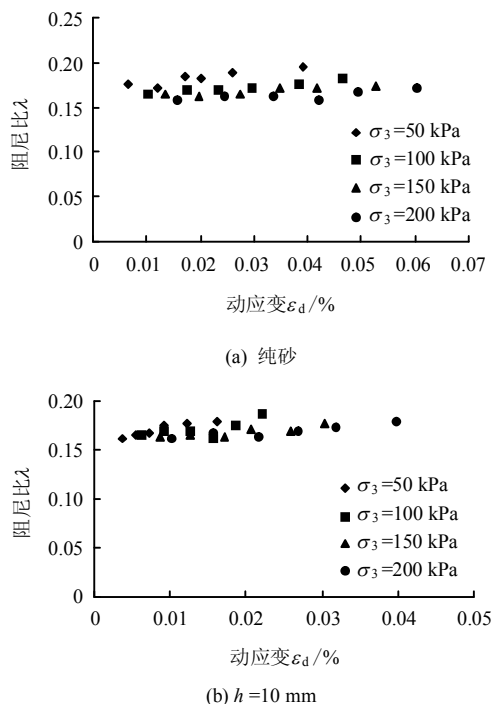


图 10 同一工况不同围压下阻尼比-动应变曲线
Fig.10 Damping ratio versus dynamic strain under different confining pressures

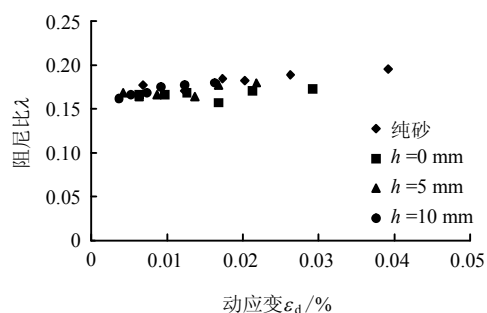


图 11 不同工况在相同围压 (50 kPa) 动应力-动应变曲线
Fig.11 Damping ratio versus dynamic strain under the same confining pressure (50 kPa)

由图 10 知,纯砂与 H-V 加筋砂的阻尼比都随着动应变的增大而增大,同一动应变水平下,纯砂阻尼比和加筋砂的阻尼比随围压的变化不够显著,但可以看出,随着围压的增大而减小的趋势;由图 11 知,同一围压下, H-V 加筋砂的阻尼比随高度的影响不明显,但加筋对阻尼比的减小很明显。

5 结 论

(1) 同一动应变下的动应力随着围压的增大而增大;同一动应力下水平加筋较纯砂有效地限制了动应变的增长,而 H-V 加筋限制效果较水平加筋更为显著。

(2) 纯砂与加筋土的动弹性模量都随着动应变的增大而减小,且围压的增加而增大;在相同围压下,水平加筋砂的动弹性模量比纯砂试样有所增大,而 H-V 加筋砂的动弹性模量较水平加筋砂又进一步增大,且随着竖筋高度的增加而增大。

(3) 纯砂与 H-V 加筋饱和砂的最大动弹性模量都随着围压的增加而增加;同一围压下,水平加筋增大了砂的最大动弹性模量, H-V 加筋砂的动弹性模量增大效果更为显著,且随着竖筋高度的增加而增大。

(4) 纯砂与 H-V 加筋砂土的阻尼比随着动应变的增大而增大,纯砂和 H-V 加筋砂的阻尼比随着围压的变化不够明显,但却有随着围压减小的趋势;同一围压下, H-V 加筋砂土的阻尼比受竖筋高度影响不显著,但与纯砂相比,还是有一定的减小。

参 考 文 献

- [1] MAHER M H, WOODS R D. Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(7): 1116—1131.
- [2] KRISHNASWAMY N R, THOMAS-ISAAC N. Liquefaction potential of reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, 13(1): 23—41.
- [3] VERCUEIL D, BILLET P, CORDARY D. Study of the liquefaction resistance of a saturated sand reinforced with geosynthetics[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1997, 16(7—8): 417—425.
- [4] BOOMINATHAN A, HARI S. Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9—12): 1027—1033.
- [5] 孙晋, 白晓红, 曾国红. 加筋土动弹性模量的动三轴试验研究[C]//第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [6] 谢婉丽, 薛建功, 常波. 加筋土动力特性的三轴试验研究[J]. *灾害学*, 2008, 23(增刊): 120—125.
XIE Wan-li, XUE Jian-gong, CHANG Bo. Triaxial test on dynamic properties of reinforced soil[J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(Supp.): 120—125.

- [7] 邹德高, 毕静, 徐斌, 等. 加筋砂砾料残余变形特性研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 158—162.
ZOU De-gao, BI Jing, XU Bin, et al. Research on the residual deformation behavior of sand-gravel composites reinforced with geogrid[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 158—162.
- [8] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 931—936.
ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Triaxial tests on sand reinforced with one-layer 3D reinforcement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 931—936.
- [9] 张孟喜, 张贤波, 段晶晶. H-V 加筋黏性土的强度与变形特性[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1563—1568.
ZHANG Meng-xi, ZHANG Xian-bo, DUAN Jing-jing. Strength and deformation properties of H-V reinforced clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1563—1568.
- [10] 张孟喜, 张石磊, 黄谨. 低超载下条带式带齿加筋界面特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1623—1629.
ZHANG Meng-xi, ZHANG Shi-lei, HUANG Jin. Behavior of interface between denti-strip geosynthetic reinforcements and soil under low surcharge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(11): 1623—1629.
- [11] ZHANG Meng-xi, ZHOU Huai, JAVADI A A, et al. Experimental and theoretical investigation of strength of soil reinforced with multi-layer horizontal-vertical orthogonal elements[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2008, 26(1): 1—13.
- [12] 杨锡武, 欧阳仲春. 不同筋材的加筋土的本构关系研究[J]. 工程力学, 2000, (增刊): 492—497.
- [13] 许桂林, 黄向京, 杨果林, 等. 土工格栅加筋红砂岩大三轴试验研究[J]. 公路工程, 2010, 35(2): 10—13, 27.
XU Gui-lin, HUANG Xiang-jing, YANG Guo-lin, et al. The large-scale triaxial tests on red sandstone soil reinforced with geogrids[J]. **Highway Engineering**, 2010, 35(2): 10—13, 27.
- [14] 国家技术监督局、中华人民共和国建设部联合发布. GB/T50269-2001 地基动力特性测试规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [15] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, 1972, 98(6): 603—624.
- [16] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [17] 陈伟, 孔令伟, 朱建群. 一种土的阻尼比近似计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 789—791.
CHEN Wei, KONG Ling-wei, ZHU Jian-qun. A simple method to approximately determine the damping ratio of soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 789—791.