

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.08

加筋方式对黄土动力特性影响三轴试验研究

马 闫^{1,2}, 谢婉丽¹, 彭淑君³, 王家鼎¹

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 佐治亚理工学院/土木与环境工程学院, 美国 亚特兰大 GA30318; 3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 为探讨黄土动力特性受加筋方式的影响, 利用 GDS 动态三轴测试系统, 以玻璃纤维单丝窗纱为筋材, 开展了 4 种围压下 10 种不同加筋方式的黄土动力特性试验, 研究了黄土动弹性模量和阻尼比随围压、加筋位置、加筋层数的变化规律。结果表明: 未加筋和加筋试样动弹性模量都随动应变增加呈指数衰减, 但随围压增加而增大; 应变小于 0.05% 时, 阻尼比分布较离散, 应变大于 0.05% 时, 阻尼比随围压和动应变增加而增大; 筋材的加入提高了土样的动弹性模量, 并有效降低了阻尼比。通过构建加筋效用规格化系数并对比发现: 加筋效益受围压与动荷载传播方向影响最为显著; 中等围压下筋材发挥效益最明显; 对本试验土样尺寸而言两层加筋效果较佳; 动静荷载作用下土体中筋材布置都应优先考虑土样 2/3 ~ 3/4 附近。

关键词: 加筋黄土; 围压; 动弹性模量; 阻尼比

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0050-07

Influence of the reinforce scheme on dynamic properties of the reinforced loess with dynamic triaxial test

MA Yan^{1,2}, XIE Wanli¹, PENG Shujun³, WANG Jiading¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA30318, USA; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to explore influence of the reinforce scheme (position, layers) on dynamic properties (dynamic modulus of elasticity, damping ratio) of reinforced loess, a series of dynamic triaxial were conducted under 4 different confinement pressures and 10 different reinforce schemes. The results show that for both the reinforced and unreinforced loess, the dynamic modulus of elasticity decays exponentially with the increase of dynamic strain, but E_d rises with the increasing confinement pressure. When dynamic strain is less than 0.05%, the damping ration shows discrete distribution. While dynamic strain is large than 0.05%, the damping ratio goes up with the increaseing confinement pressure and dynamic strain. The reinforce material efficiently improves the dynamic modulus of elasticity and reduces the damping ratio. By establishing and comparing the normalized parameters of reinforce effectiveness, this paper illustrates that the reinforcement performance is affected significantly by the confinement pressure and load propagation direction and under medium confinement pressure the reinforcement shows better performance. In terms of the sample size of this

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(41630639); 国家自然科学基金面上项目资助(41372269); 西北大学研究生创新教育项目资助(YZZ12008)

第一作者: 马闫(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为黄土工程地质性质。E-mail: myan1989@163.com

通讯作者: 王家鼎(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事黄土工程地质性质及黄土地质灾害研究。E-mail: wangjd@nwu.edu.cn

test, 2 layers of reinforcement shows best performance. Under both the static and dynamic load, putting the reinforce material at 2/3 to 3/4 position of the loess sample will have better performance than other positions.

Keywords:reinforced loess; confinement pressure; dynamic modulus of elasticity; damping ratio

土体中加入筋材不仅可以通过筋材良好的抗拉强度显著提高土体的整体强度,还能有效阻断土体内部由于差异沉降等原因引起的裂纹扩展,减少土体变形。近年来,加筋技术广泛应用于路基建设、挡土墙、边坡防护等岩土工程中,如何最优化设计加筋方案成了工程人员最关心的问题之一,也引起了许多学者的关注,如雷胜友等^[1~2]、马闫等^[3]开展了不同布筋形式下加筋黄土静力特性的三轴试验研究。不同于静力条件下的压缩特性^[4]以及素压实黄土的动力特性^[5~6],动荷载下加筋土体内部的动应力-动应变关系随时间发展不断变化,随着加筋技术在高速公路、高速铁路、机场以及强震区高边坡的应用推广,动荷载下如何最优化设计布筋方案(如加筋层数,加筋位置等)尚缺乏理论性指导,因此对于加筋土在动荷载作用下动力特性的研究十分迫切。杨燕等^[7]以窗纱为加筋材料对尾矿粉土开展了分别加入1,2层筋的室内动三轴试验,探讨了围压对动弹性模量和阻尼比的影响,但未对比加筋层数对粉土动力特性的影响。孙晋等^[8]针对粉土开展了不同密实度、不同加筋层数(0~2层)、不同加筋材料的动三轴试验,但由于仅考虑了0~2层的加筋方式,且加筋位置较为单一,未较系统探究加筋方式对土体动力性的影响;谢婉丽等^[9]探讨了0~2层筋材的加筋黄土的轴向累计应变时程特征,但未探讨动弹性模量与阻尼比随加筋方式不同的变化情况;毕静^[10]探讨了粗粒土试样中部加入1层土工格栅时加筋对粗粒土动力特性的影响;楼增焕等^[11]对2层加筋石灰土进行了动三轴试验,探讨了动力特性与动应变的关系;邱成春等^[12]以有机玻璃加筋对饱和砂土开展了水平-竖向加筋方式下动弹性模量试验研究。以上研究多针对砂土和粉土,且多集中于1层筋和2层筋的加筋土动三轴试验,对于多层数和不同加筋位置等组合布筋方式下加筋土动力响应特征研究较少。

我国西北黄土分布广泛,黄土作为一种特殊土与其它土体性质差异较大,且分布区域多属于强地震区,随着近年地震灾害频率增加,强震区加筋土应用日益增多,在多层数加筋的实际加筋工程中如何设计加筋位置和加筋层数成为设计的关键难题,因此有必要针

对性开展加筋黄土的动力特性研究,为强震区的防震减灾工程建设提供指导。本文以玻璃纤维单丝窗纱作为加筋材料,针对黄土试样开展了不同加筋位置、不同加筋层数等10种加筋方式的动态三轴循环荷载试验,主要研究了加筋黄土动弹性模量和阻尼比随围压、动应变、加筋方式的变化规律,得到对实际工程具有指导意义的最优加筋方式。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验仪器采用英国 GDS 高级动态三轴测试系统(图1)。该系统由三轴压力室、轴向压力控制系统、围压控制系统、反压控制系统等组成,配合 GDS 公司的 GDSLAB 软件,可以对试验过程和试验数据进行自动化控制和纪录。



图1 GDS 高级动态三轴测试系统
Fig.1 GDS advanced dynamic triaxial test system

1.2 试验材料与试验方案

试验用土取自西安,试样制备时先将风干黄土过5 mm 的筛孔,再进行颗粒筛分试验,得到土样颗粒分析曲线(图2),曲率系数 $C_c = 1.01$,不均匀系数 $C_u = 12.94$,土样塑限 $W_p = 17.9\%$,液限 $W_L = 26.1\%$,塑性指数 $I_p = 8.2\%$,土样定名为粉土。

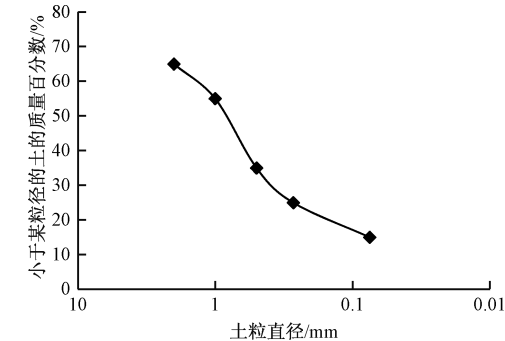


图2 土样颗粒分析试验曲线
Fig.2 Grain size distribution curve

参照《土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)》^[13]开展室内轻型击实试验,测得土样最优含水量 $W_{op} = 17.4\%$,最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.866 \text{ g/cm}^3$ 。筋材选用玻璃纤维单丝窗纱(图3),经向密度 18 根/25 mm,纬向密度 16 根/25 mm,单位面积质量为 124 g/m^2 ,每 25 mm 的经向拉伸断裂强度为 0.387 kN,纬向拉伸断裂强度为 0.368 kN。本文设计了 10 种加筋方案(图4)开展了加筋黄土的动三轴试验,同时开展未加筋素土试样动三轴试验与之对比。

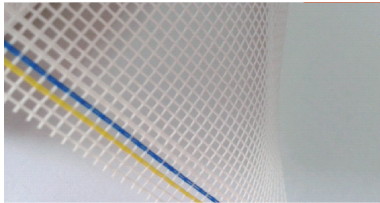


图3 试验选用筋材

Fig. 3 Reinforce material used in the test

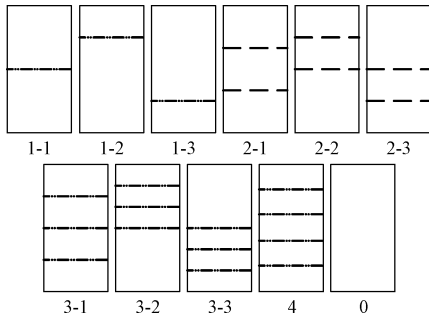


图4 10 种不同加筋方案

Fig. 4 10 different reinforce schemes

加筋方案说明:

- 1 层筋的 3 种加筋方案,即把 1 层筋材分别加在试样的 1/2 处(记为 1-1),1/4 处(记为 1-2),3/4 处(记为 1-3)。
 - 2 层筋的 3 种加筋方案,即把分别把 2 层筋材加在试样的 1/3 处和 2/3 处(记为 2-1),1/2 处和 1/4 处(记为 2-2),1/2 处和 3/4 处(记为 2-3)。
 - 3 层筋的 3 种加筋方案,即把分别把 3 层筋材加在试样的 1/4 处、2/4 处和 3/4 处(记为 3-1),1/6 处、1/3 处和 1/2 处(记为 3-2),1/2 处、2/3 处和 5/6 处(记为 3-3)。
 - 4 层筋的 3 种加筋方案,即把分别把 4 层筋材加在试样的 1/5 处、2/5 处、3/5 处和 4/5 处(记为 4)。
- 未加筋试样记为 0。

本次动三轴试验试样直径 $D = 7 \text{ cm}$,高度 $H = 14 \text{ cm}$ 。试样制备均采用分层击实法,将土样在相同的

初始含水量($\omega_{op} = 17.4\%$)下将土样压实到相同的干密度,压实度为 0.95,制样时于分层处刮毛,在相应的加筋位置水平放置筋材。

将制备好的试样上机后先进行偏压排水固结稳定后再开展振动试验,固结应力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 2$,固结围压分别为 50,100,150 和 200 kPa,同一试样在某级固结压力下固结稳定(固结稳定标准为 0.05 mm/h)后,采用正弦波等效循环荷载,频率为 1 Hz(图5),连续施加 8 级动荷载(分级加载系数 β 为动应力幅值与围压的比值)进行试验,轴向动应力如表 1 所示。其中每级动荷载下振动 5 次,每个循环采集 20 个点。本文共采用 4 种围压,10 种加筋方式,另加 4 个素土对比样,共开展了 44 个试验。

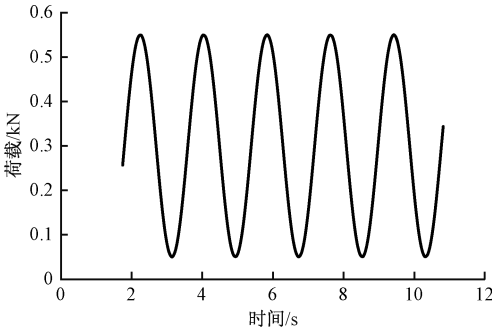


图5 $\sigma_c = 150 \text{ kPa}$,试样 3-3 正弦波加载曲线

Fig. 5 Sin wave applied on the sample 3-3 with $\sigma_c = 150 \text{ kPa}$

表 1 不同试验加载方案下的轴向动应力

Table 1 The axial stress (σ_d) of different test plans

σ_1/kPa	σ_3/kPa	$\beta = \sigma_d/\sigma_c$							
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
100	50	15	20	25	30	35	40	45	50
200	100	30	40	50	60	70	80	90	100
300	150	45	60	75	90	105	120	135	150
400	200	60	80	100	120	140	160	180	200

注: σ_c ——围压/kPa

2 试验结果及分析

2.1 动应力与动应变关系

土的动本构即土的动应力 σ_d - 动应变 ε_d 关系表征了土的基本动力特性。试验中每级动荷载下有 5 次振动,均采用每次循环中的第三次循环的试验数据绘制骨干曲线和滞回曲线。其中循环动应力为 $\sigma_d = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$,循环动应变为 $\varepsilon_d = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})$, σ_{max} , σ_{min} 分别为第三次循环最大、最小动应力, ε_{max} , ε_{min} 分别对应为第三次循环下最大、最小动应变^[14](图6)。

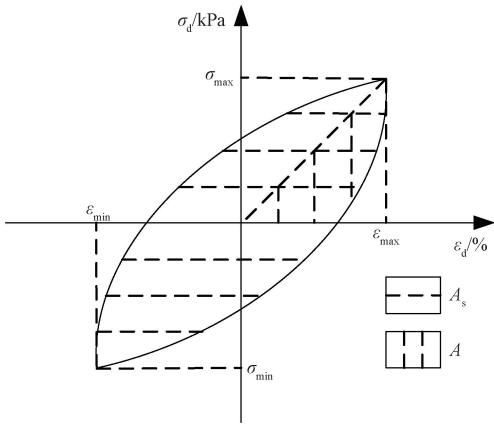


图6 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 滞回圈与动模量 E_d 阻尼比 λ 计算示意图

Fig. 6 $\sigma_d - \varepsilon_d$ hysteretic curve

图7展示了部分试样的动循环骨干曲线。可以看出,动应力-应变曲线基本呈双曲线形状,同一加筋方式时(图7a,b),随着围压增大,相同动应变下的动应力增幅增大,从低围压到高围压,曲线逐渐由应变软化过渡到应变硬化;加筋与未加筋试样动应力-应变曲线相比(图7c,d),可看出同一围压下筋材能有效限制动应变的增加,同样加筋层数下筋材发挥的效益随布筋位置不同而变化,均布布筋时筋材发挥的效益因加筋层数不同而有所差异,因此,存在一个最优加筋位置和加筋层数使得筋材最大程度发挥作用。

2.2 动弹性模量与动应变

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 E_d :

$$E_d = \sigma_d / \varepsilon_d \quad (1)$$

图8为动弹性模量与动应变曲线。可以看出,同一加筋方式下,动弹性模量随动应变增加呈指数衰减,出现刚度软化效应,先期衰减速度较快,并一般于 $\varepsilon_d = 0.07\%$ 左右曲线出现拐点,动弹性模量衰减减慢并最终趋于平缓;围压增大,动弹性模量显著增加,这是因为随围压增大,试样的孔隙比减小,试样变密实,从而加大了土体动弹性模量;加筋与未加筋试样相比,筋材的加入提高了土样的动弹性模量;动弹性模量随动应变增加而衰减的速率大小因加筋方式不同而有所差别。

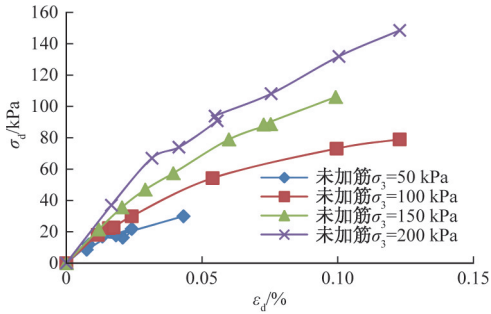
2.3 最大动弹性模量

假定土的循环动应力-动应变关系满足 Hardin-Drnevich 双曲线型式:

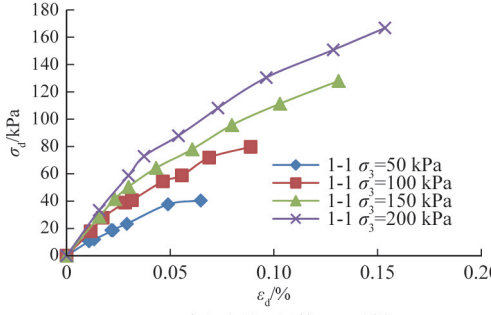
$$\varepsilon_d / \sigma_d = a \varepsilon_d + b \quad (2)$$

即:

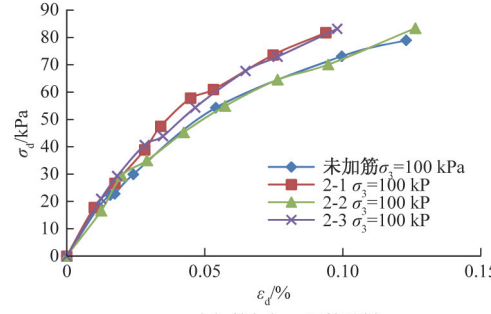
$$1/E_d = a \varepsilon_d + b \quad (3)$$



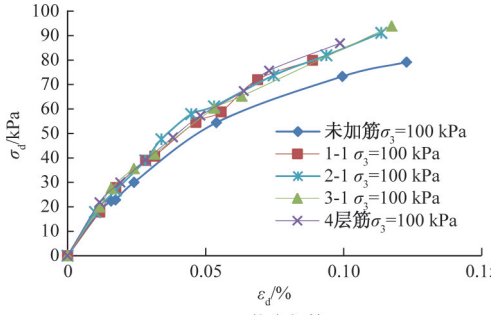
(a) 未加筋试样



(b) 中部布设一层筋(1-1)试样



(c) 未加筋与加两层筋试样



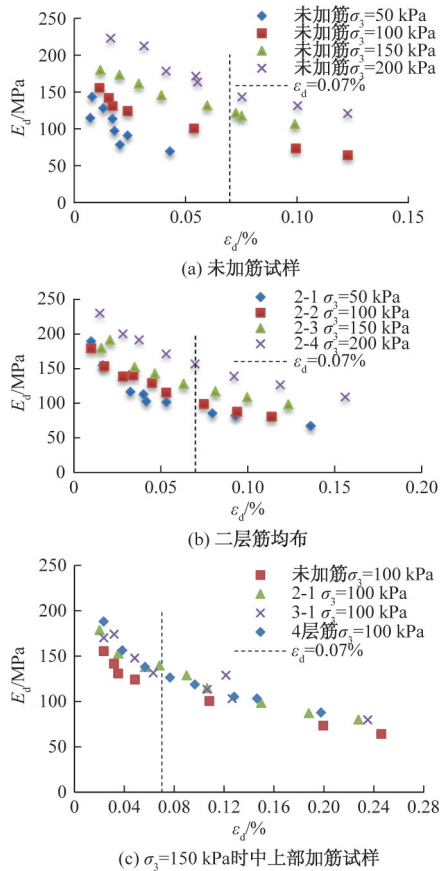
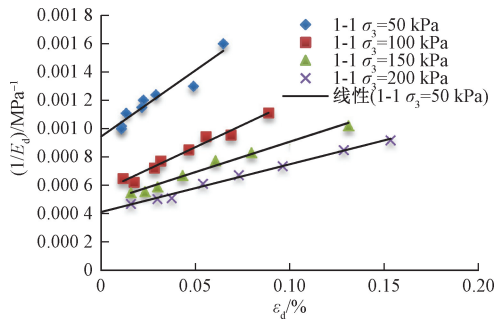
(d) 均布加筋

图7 不同围压下 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 曲线

Fig. 7 $\sigma_d - \varepsilon_d$ curve under different confining pressures

式中: a, b ——系数。

由试验结果可绘制 $1/E_d - \varepsilon_d$ 曲线,并对直线取截距可获得起始动弹性模量 $E_0 = 1/b$ [6],拟合结果显示 $1/E_d - \varepsilon_d$ 曲线线性拟合良好(图9),拟合指数 $R^2 > 0.95$,表明加筋黄土的本构关系基本不变,只是本构模型系数 a, b 随围压和加筋情况发生变化。

图8 不同围压下 $E_d - \varepsilon_d$ 曲线Fig.8 $E_d - \varepsilon_d$ curve under different confining pressures图9 $\varepsilon_d / \sigma_d \sim \varepsilon_d$ 曲线Fig.9 $\varepsilon_d / \sigma_d \sim \varepsilon_d$ curve

为研究不同加筋方式对试样起始动弹性模量的影响,将不同围压下各种加筋方式获得的起始动弹性模量按下式规格化后得到规格化系数 $\eta(\%)$:

$$\eta = \left| \frac{(E_{0x} - E_{00})}{E_{00}} \right| \times 100 \quad (4)$$

式中: E_{00} ——未加筋试样起始动弹性模量;

E_{0x} ——同等围压下加筋试样的起始动弹性模量。

从表2可以看出,同一种加筋方式下,筋材发挥效果受围压影响显著,在中等围压下筋材发挥效益最明显,低围压下 ($\sigma_c = 50$ kPa),筋材尚未开始发挥效用,高围压下 ($\sigma_c = 200$ kPa),由于偏压固结使得筋材发生缩短^[2],筋材有效面积减小,加筋效果降低。对比同一围压下不同加筋方式的动弹性模量规格化系数 η 可看出, $\sigma_c = 50$ kPa 时,2-1 加筋方式动弹性模量相对于素土提高最大 (10.39%); $\sigma_c = 100$ kPa 时,4 层加筋方式初始动弹性模量提高最显著 (相对于素土提高 17.20%),2-3,3-1 加筋方式下初始动弹性模量均较素土提高 14.89%; $\sigma_c = 150, 200$ kPa 时,1-3 加筋方式的初始动弹性模量相对于素土均提高约 13%。2-1,2-3,3-1,1-3 和 4 层加筋方式均是在土样下 2/3 ~ 3/4 处布有筋层,文献[3]针对 13 种加筋方式的重塑黄土试样开展了静三轴试验,认为黄土加筋存在一个最优加筋位置,位于土样下 3/4 附近。由此可见,动静荷载作用下土体中加入筋材都应优先考虑土样下 2/3 ~ 3/4 附近。分析最优加筋位置位于土体下部的原因是因为在静动三轴试验中,均是从试样底部向上传递荷载,因此试样下部首先接收到应力波,在试样下部布置筋材可以优先减弱应力波的传播,降低应力波对土层的影响,因此实际加筋工程设计中,应充分考虑振动荷载的方向和土层的围压;对比 1-1,2-1,3-1 各围压下 η 值可看出加筋层数并非越多越好,针对本次试验所用试样尺寸,2 层筋材效果相对较佳。

表2 起始动弹性模量规格化系数 $\eta/\%$

Table 2 Normalized parameters of initial dynamic modulus of elasticity

σ_3/kPa	0	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4
50	0.00	3.00	3.00	0.00	10.39	3.00	3.55	0.00	0.60	2.79	3.64
100	0.00	8.53	7.50	1.88	14.24	4.12	14.89	14.89	6.41	3.01	17.20
150	0.00	1.12	1.94	12.60	1.64	8.17	3.72	1.59	3.46	2.41	4.44
200	0.00	6.01	1.25	12.88	0.24	8.61	6.01	0.00	0.08	2.93	3.00

2.4 阻尼比

试样阻尼比反映了试样动应力 σ_d -动应变 ε_d 关系的滞后性,表征动循环中能量的损失。通常按照试验

所得的滞回曲线用下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_s} \quad (5)$$

式中: A ——滞回圈的面积;

A_s ——滞回圈顶点至原点连线与横轴形成的直角三角形的面积(图6)。

传统阻尼比计算方法是用椭圆曲线拟合动应力—应变滞回曲线,计算其面积。然而实测滞回圈多为非标准椭圆,因此该方法存在一定误差,且计算量大、计算过程繁琐。文献[15]推荐采用多边形逼近滞回曲线计算阻尼比,可以直接完整利用试验数据,并简化计算过程。因此,本文采用文献[15]推荐方法计算阻尼比。图10显示了不同加筋层数在筋材均布条件下的动应变与阻尼比关系。从图10可以看出,同一加筋方式下,动应变 $\varepsilon_d < 0.05\%$ 时,围压较低时土体的阻尼

比相对于高围压时更高,但此阶段阻尼比随动应变变化的规律不明显;动应变 $\varepsilon_d > 0.05\%$ 时,阻尼比随着围压增加而增大,同时随动应变增加而增大;相同应变条件下加筋试样的阻尼比较未加筋试样有所降低,且加筋层数越多土体阻尼比降低越明显。

3 结论

(1)动应力-动应变曲线基本呈双曲线形态,加筋方式相同时,随着围压增大,动应力增幅增大,从低围压到高围压逐渐由应变软化过渡到应变硬化;同一围压下筋材能有效限制动应变的增加,并存在一个最优加筋位置和加筋层数使得筋材最大程度发挥作用。

(2)动弹性模量随动应变增加呈指数衰减,出现刚度软化效应,开始时衰减速度较快,一般于 $\varepsilon_d = 0.07\%$ 附近出现拐点,拐点后衰减速度减慢,曲线最终趋于平缓;围压增大,动弹性模量显著增加;筋材的加入明显提高了土样的动弹性模量。

(3)以动弹模规格化系数 η 为评价标准,则同一种加筋方式下,筋材的发挥效果受围压影响显著,在中等围压下筋材发挥效益最明显;土体下部2/3~3/4附近布筋可以显著提高土体的初始动弹性模量;动静荷载作用下土体中筋材布置都应优先考虑土样下2/3~3/4附近;加筋层数并非越多越好,针对本次试验所用试样尺寸,二层筋材效果相对较佳。

(4)最优加筋方式受围压和荷载传播方向控制,加筋工程设计中应重点考虑土体所受的动荷载方向以及围压情况。

(5)同一加筋方式下,动应变 $\varepsilon_d < 0.05\%$ 时,低围压下土体阻尼比相比于高围压下更高,此阶段阻尼比随动应变变化的规律不明显;动应变 $\varepsilon_d > 0.05\%$ 时,阻尼比随着围压及动应变的增加而增大;筋材的加入有效降低了阻尼比,且加筋层数越多越明显。

致谢:感谢盖海龙、王延寿二位师弟在试验中给予的协助,感谢上海交通大学张振南副教授、刘宁讲师在论文撰写过程中给予的建议,感谢国家留学基金对本文的支持,感谢佐治亚理工学院 Sheng Dai 助理教授在土动力学方面的指导!

参考文献:

[1] 雷胜友,陈辉.不同筋材和布筋形式对加筋土强度影响的试验研究[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(8):122-127. [LEI S Y, CHEN H. Experimental investigation of the effects of different

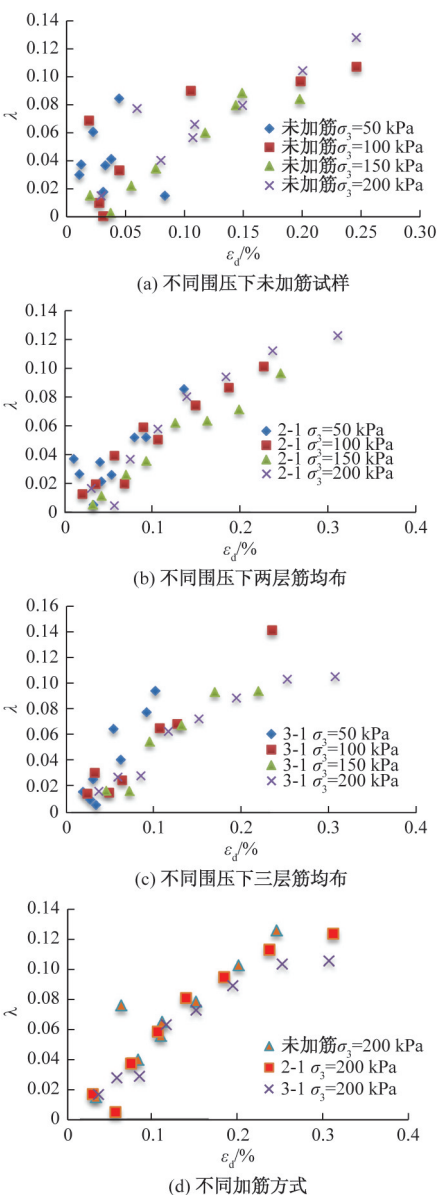


图10 阻尼比-动应变(λ - ε_d)曲线

Fig. 10 λ - ε_d curve

- reinforcement materials and reinforcement distribution modes on the strength of reinforced loess[J]. Journal of Southwest University (natural science edition), 2013, 35(8): 122 - 127 (in Chinese)]
- [2] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 1 - 5. [LEI S Y. Study on reinforced loess by triaxial tests [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 1 - 5 (in Chinese)]
- [3] Ma Yan, Xie Wanli, Peng Shujun. Study on Reinforced Scheme of Reinforced Loess by Triaxial Tests[C]//Inner Mongolia; 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011: 6147 - 6151.
- [4] 马闫,王家鼎,李彬,等. 压实黄土变形影响因素与计算模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 44 - 53. [MA Y, WANG J D, LI B, *et al.* Influence factors on the compressibility of compacted loess and empirical constitutive models [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 44 - 53. (in Chinese)]
- [5] 吴凯,倪万魁,刘海松,等. 压实黄土强度特性与微观结构变化关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 62 - 69. [WU K, NI W K, LIU H S, *et al.* Research on the relationship between the strength properties of compacted loess and microstructural changes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 62 - 69. (in Chinese)]
- [6] 刘亚明,王家鼎,谷天峰. 循环荷载下压实黄土动力特性的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 108 - 112. [LIU Y M, WANG J D, GU T F. Dynamic characteristics of compacted loess under cyclic loads [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 108 - 112. (in Chinese)]
- [7] 杨燕,柏署,张军. 加筋土的动三轴试验研究[J]. 路基工程, 2005(5): 178 - 179. [YANG Y, BAI S, ZHANG J. Dynamic triaxial test study on reinforced soil [J]. Subgrade Engineering, 2005(5): 178 - 179. (in Chinese)]
- [8] 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论文集(下册). 北京:中国水利学会, 2006: 3. [SUN J, BAI X H, ZENG G H. Triaxial test study on dynamic modulus of elasticity of reinforced soil[C]//The first session of China's water resources and hydropower in geotechnical mechanics and engineering academic seminar, conference proceedings (Vol. 2). Beijing: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2006: 3. (in Chinese)]
- [9] 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 W L, XUE J G, CHANG B. Triaxial test on dynamic properties of reinforced soil [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(Sup): 120 - 125. (in Chinese)]
- [10] 毕静. 加筋粗粒土变形和强度特性的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. [BI J. Study on the deformation and strength behavior of coarse grained soil reinforced with geogrid [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)]
- [11] 楼增焕,陈建峰. 交通循环荷载下加筋灰土的动力特性初探[C]//第八届全国工程地质大会论文集,中国地质学会工程地质专业委员会, 2008: 4. [LOU Z H, CHEN J F. Preliminary study of dynamic properties of the reinforced lime-stabilized soils subjected to traffic cycle loading[C]//The eighth national conference of engineering geology, conference proceedings, Geological society of China engineering geology professional committee, 2008: 4. (in Chinese)]
- [12] 邱成春,张孟喜. 水平-竖向加筋饱和砂土动弹性模量试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1667 - 1702. [QIU C C, ZHANG M X. Test research on dynamic elastic modulus of saturated sand reinforced with horizontal-vertical inclusions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1667 - 1702. (in Chinese)]
- [13] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004. [Standard for soil test method GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [14] 李又云,谢永利,刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037 - 1046 [LI Y Y, XIE Y L, LIU B J. Experiment research on dynamic characteristics of road bed compaction loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037 - 1046. (in Chinese)]
- [15] 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 W, KONG L W, ZHU J Q. A simple method to approximately determine the damping ratio of soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup): 789 - 791. (in Chinese)]