

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0800-05

加筋土动弹性模量的动三轴试验研究

孙 晋, 白晓红, 曾国红

(太原理工大学 建筑与土木工程学院, 030024)

摘 要: 用 DDS-70 动三轴仪研究了加筋土的动弹性模量, 着重研究了动弹性模量随围压、密实度和加筋层数的影响。研究表明: 加筋土试样动应力—应变关系曲线符合双曲线模型; 加筋土动弹性模量和应变相关曲线与纯粉土的有关曲线相似; 加筋土试样的动弹性模量随应力水平的增长而降低; 在相同的动应力水平下, 随围压、初始干密度的增大而增大。动弹性模量随动应变的增加而减小, 其变化呈指数衰减。加筋土的最大动弹性模量与筋体自身性质、围压和土体的密实程度有关。

关 键 词: 加筋土; 动弹性模量; 动三轴

中国分类号: TU 45

文献标识码: A

Study on dynamic elastic modulus of reinforced soil by dynamic triaxial tests

SUN Jin, BAI Xiao-hong, ZENG Guo-hong

(College of Architecture & Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A DDS-70 dynamic triaxial apparatus is used to investigate the elastic modulus of reinforced soil. The influences of confining pressure, compactness and the reinforcing patterns on the elastic modulus are studied. The results show that the relationship of dynamic stress versus dynamic strain of reinforced soil tally with hyperbolic model. The curves of dynamic elastic modulus versus strain for reinforced soil are similar to that of pure soil. For reinforced soil sample the dynamic elastic modulus decreases with strain increasing; at the same dynamic stress level, the dynamic elastic modulus increases with the confining pressure and the initial dry density increasing and decreases with dynamic strain increasing; the relationship between modulus and strain is exponential decay. The maximum dynamic elastic modulus relates with reinforce material, confining pressure, and compactness of the soil.

Key words: reinforced soil, dynamic elastic modulus, dynamic triaxial

1 前 言

土体的动模量和阻尼特性试验研究是地震等动荷载作用下土工建筑物设计和计算分析的基本依据。从 20 世纪 60 年代开始, 随着试验仪器设备的改进和提高, 使研究人员有可能对土的动力特性展开广泛而深入地研究。Hardin^[1-4]等人在大量试验的基础上, 对影响土动力特性的因素进行了研究, 并给出了估算动弹性模量和阻尼比的经验公式, 为土动力学的试验研究做出了杰出的贡献; Vucetic^[5]指出: 对于正常固结土或者超固结土, 塑性指数(I_p)

是影响动弹性模量和阻尼的主要因素, 并系统绘制了塑性指数对归一化后的动弹性模量和阻尼比随应变变化的影响曲线。袁晓铭^[6]用共振柱对 6 种常见土的动弹性模量和阻尼比进行了试验研究并给出了它们的推荐值。M.O.AI-Hunaidi^[7]通过共振柱试验研究了冻黏土和解冻土的动剪切模量和阻尼比, 试验发现低应变时冻土的阻尼比是解冻土的 2 倍。沈忠言、张家懿^[8]研究了围压对冻结粉土动力特性的影响。王兰民^[9]较为系统地研究和总结了地震波荷载作用下黄土的动力特性性质, 对比了不同波形对动弹性模量、动剪切模量和阻尼比的影响。蔡袁强^[10]

收稿日期: 2006-10-28

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(NO.1061)。

作者简介: 孙晋, 男, 1977 年生, 硕士研究生, 从事土动力学研究。

Email:sunj102@sina.com

通过动三轴试验研究了水泥土-土复合试样的动弹性模量和阻尼比的变化规律, 着重研究了置换率和围压的影响, 提出了一种简单实用的计算复合试样动模量和阻尼比的方法, 并给出了由试验确定的动弹性模量和阻尼比归一化公式。陈善民^[11]通过动三轴和共振柱对水泥土的阻尼特性进行了研究, 并且探讨了水泥掺合比、围压对水泥土材料的初始动弹性模量的影响。加筋土技术虽然早已发展, 并且随运用的日渐广泛, 对其相应的研究也从未停止过, 但相比较而言, 加筋土体的动力特性研究仍在理论阶段(如数值分析等), 并且多数集中在挡土墙^[12,13], 对其动力特性的试验研究基本为空白^[14]。本次试验主要对加筋土的动弹性模量进行了研究。

2 试验设备、试样及参数^[14]

2.1 设备

本次研究使用 DDS-70 微机控制电磁式振动三轴仪, 此系统由主机、电控系统、静压控制系统和微机系统组成。其工作原理是将圆柱形土样置入充满气和水的三轴室内上下活塞之间, 通过气体压力对试样施加轴、侧向静压力, 激振器和功率放大器将微机系统提供的一定频率、幅值的电讯号转化为轴向激振力, 经下活塞施加至土试样上, 测量系统将振动过程中的力、位移、孔隙水压力值记录下来。微机系统对试验进行控制和对试验数据进行处理并输出成果报告。试样为直径为 39.1 mm, 高 80 mm 的圆柱体。

2.2 试样

土样用采自太原东山的粉土其塑性指数 $I_p=8.4$, 试验对比了两种干密度 (1.76 g/cm^3 , 称为密实度 1; 1.68 g/cm^3 , 称为密实度 2) 下的加筋土的动力特性, 作为对比, 同时制作了两组同条件的素土试样。试样制备方法: 将风干土过 2 mm 的筛孔, 按要求的干密度称取所需的过筛风干粉土, 依试验要求的含水量计算所需的加水量, 然后将所取土样平铺于不吸水的盘内, 加入预计的水量并充分拌和, 盖紧盖子润湿一昼夜。依试验要求的密度, 将一定重量拌和好的土放入击实筒内, 分层击实。加筋材料(本次试验以钢窗纱作为加筋材料, 根据其目数的不同分别称为硬钢丝和软钢丝(自拟), 其具体指标见表 1), 剪成直径为 39.1 mm 的圆形, 分别放置在相应的加筋位置。土样制备分别为一层加筋, 加筋体居试样中部; 两层加筋, 上、下层加筋体距试样顶底面各 20 mm(图 1)。

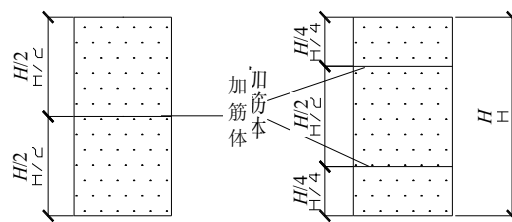


图 1 加筋体布置方式

Fig.1 Disposal mode of reinforcing materials

表 1 加筋体物理参数

Table 1 The physical parameters of reinforcing materials

项目		每延米抗拉强度	目数	厚度
		/kN/m		/mm
软钢丝	经向	4.35	17.082	0.17
	纬向	4.566		
硬钢丝	经向	9	21.336	0.245
	纬向	9.17		

2.3 试验参数

(1) 频率: 根据地震危险性分析, 长周期的低频振动比短周期的高频振动对建筑物的上部影响更大。而且按照Seed的等效谐波说法, 谐波频率一般为 $1\sim 2 \text{ Hz}$ ^[16], 因此在本试验中选取加载频率为 $f=1 \text{ Hz}$ 。

(2) 围压: 考虑到加筋垫层一般为浅层地基, 围压 σ_3 分3级取 50、100、200kPa。

(3) 加荷荷载: 目前在振动三轴试验中所用的主要方法仍是Seed的等效谐波法, 由于正弦波能使土样经受较多次的循环振动, 所以动三轴试验一般采用正弦波加荷^[15]。加荷方式为: 对一个试样逐级施加正弦波形的循环荷载, 直到试样达到指定应变。

(4) 试验方法: 考虑到加筋土工程的特点, 即施工完后就会承担荷载, 虽然也承受固结应力的作用, 但没有充分的固结时间; 又考虑到地震作用的短暂性和目前实验设备下取得的试验成果在应用上的安全性, 振动三轴试验多在不排水条件下进行, 所以本次试验采用不固结不排水剪试验。

3 试验结果整理与分析

3.1 动弹性模量

动弹性模量的影响因素除试验仪器, 制样操作熟练程度, 整理分析方法等误差外还有15个之多。其中影响 E_d 的主要因素有动应变 ε_d 、围压 σ_{3c} 、固结比 K_c 、试验频率 f 和稠度状态(E_d 随 ε_d 增加成倍减

小; E_d 随 σ_{3c} 增加而增加)^[16]。因此,在本次试验过程中,严格控制动应变 ε_d 和围压 σ_{3c} 的精度,同时尽量减少其他因素对 E_d 影响。

选择典型试验曲线示于图2~4中,从中可得如下结论。

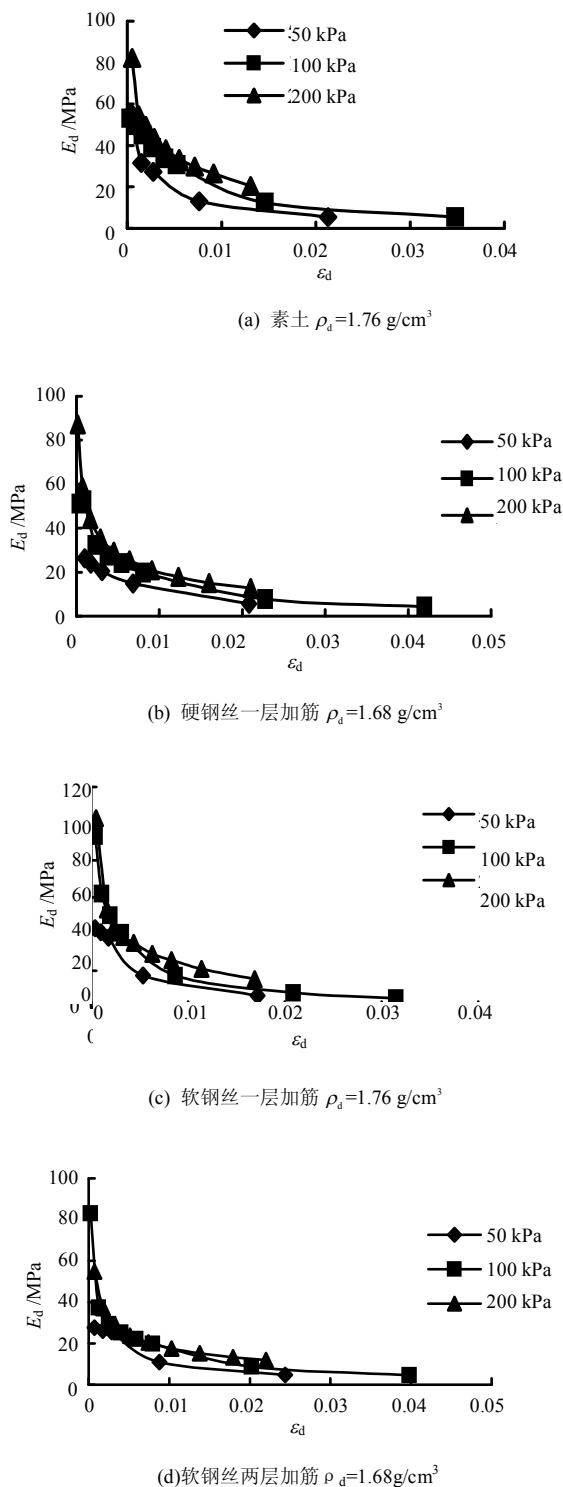


图2 围压与动弹性模量的关系曲线

Fig.2 Curves of confining pressure and dynamic elastic modulus

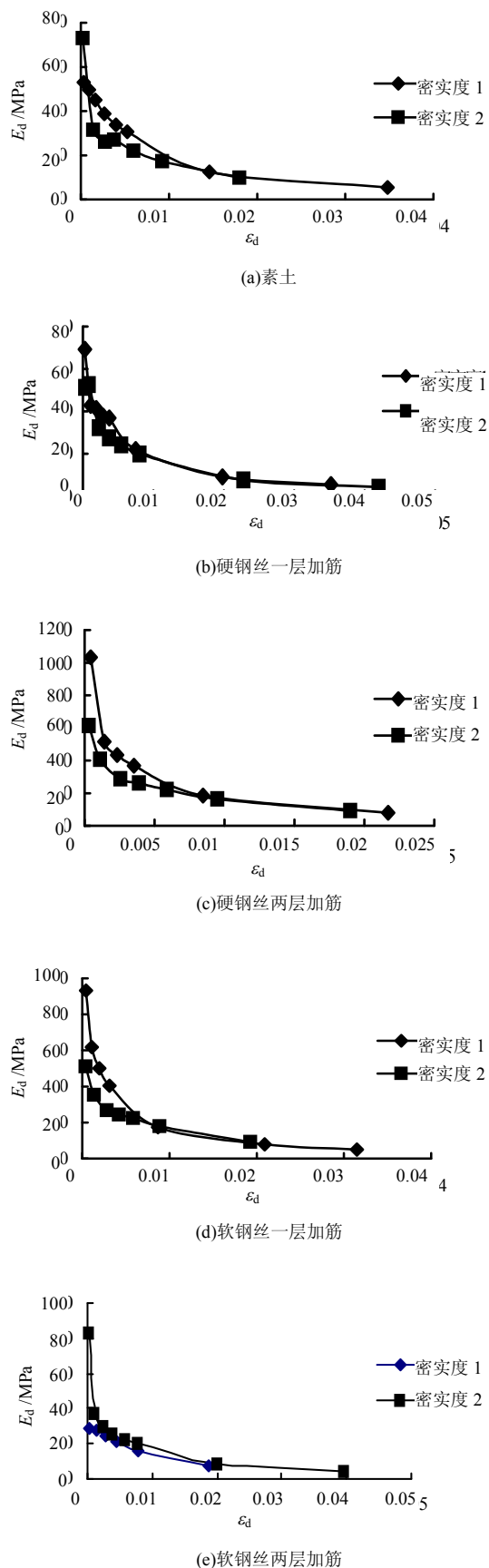
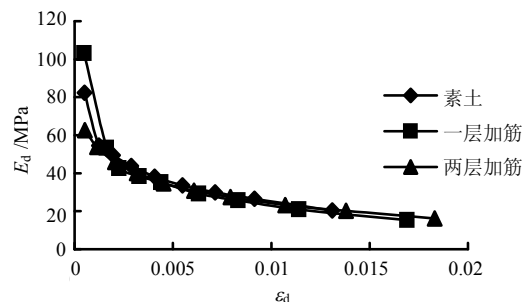
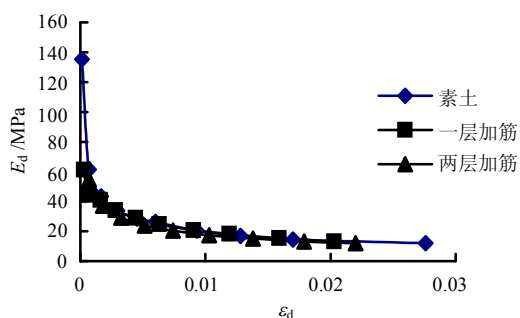


图3 密实度与动弹性模量的关系曲线(围压100 kPa)

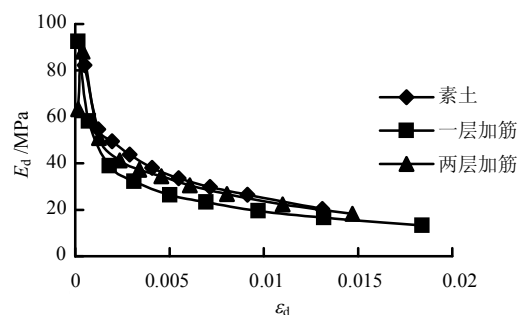
Fig.3 Curves of compactness and dynamic elastic modulus (confining pressure 100 kPa)



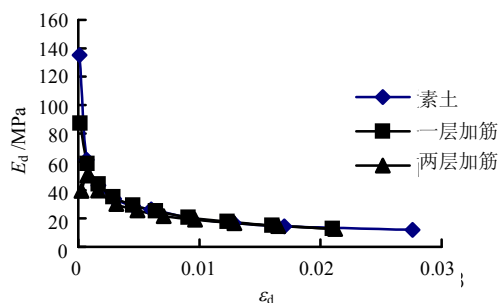
(a)软钢丝密实度1



(b)软钢丝密实度2



(c)硬钢丝密实度1



(d)硬钢丝密实度2

图4 两种密实度下加筋层数与动弹性模量的关系曲线
(围压 200 kPa)

Fig.4 Curves of layer number and dynamic elastic modulus for two different compactness (confining pressure 200 kPa)

(1) 由图 2~4 可知: 加筋土的动弹性模量和应变相关曲线与纯粉土的有关曲线相似; 从各组曲线

中的数值可以看到, 当 $\varepsilon_d > 0.02$ 时, 大多曲线趋于水平; 一般而言, 密实度较小试样的试验终止动应变大于密实度较大的, 说明密实度小时动弹性模量随动应变的增加而减小的速度慢, 而密实度大时动弹性模量随动应变的增加而减小的速度快。

(2) 由图 2 可知在两种密实度下, 尽管加筋层数不同, 但动弹性模量均随围压增大而增大, 并且动弹性模量随动应变的增加而减小, 其衰减幅度随应变增加越来越小, 变化呈现出指数函数的性质。当 $\varepsilon_d > 0.01$ 时动弹性模量几乎均小于 20 MPa。

(3) 由图 3 可知在本次试验中动应变较小 ($\varepsilon_d < 0.01$) 时, 无论是素土还是一层加筋或两层加筋 (除软钢丝两层加筋外), 其动弹性模量都随密实度增大而增大, $\varepsilon_d > 0.01$ 时两种干密度下的动弹性模量接近重合。

(4) 由图 4 可知, 两种密实度下, 素土、一层加筋和两层加筋的动弹性模量在 $\varepsilon_d < 0.01$ 时, 基本表现为素土 > 一层加筋 > 两层加筋, 此说明小应变时, 加筋效果不明显; 在本次试验中当 $\varepsilon_d > 0.01$ 时, 动弹性模量与加筋参数关系不密切。

3.2 最大动弹性模量

工程中常用最大动弹性模量作为参考指标。最大动弹性模量的确定: 动力试验的应力应变 $\sigma \sim \varepsilon$ 曲线近似为双曲线函数 (本次试验得出的加筋土的应力应变 $\sigma - \varepsilon$ 也显示出相同的性质), 经过移项以后成为线性函数。将动三轴试验得到 $\varepsilon_d = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ 的试验点绘在普通坐标上, 用直线连接以后延长, 在 $\varepsilon_d = 0$ 处截取纵标得到 $1/E_d$, 其倒数即为 E_{dmax} 。

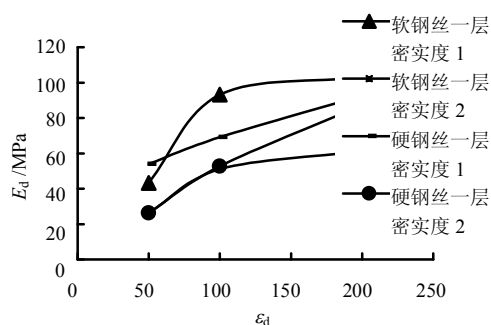


图5 最大动弹性模量

Fig.5 The maximum dynamic elastic modulus

由图 5 可见: (1) 两种加筋材料的最大动弹性模量均表现为随围压增大而增大; 且总是密实度为 1.76 g/cm^3 的最大动弹模要大于密实度为 1.68 g/cm^3 的最大动弹模。(2) 在密实度为 1.76 g/cm^3 时, 围压 100 kPa、围压 200 kPa 的最大动弹性模量表现为软钢丝要大于硬钢丝, 说明在此密实度下, 软钢丝作用发

挥较好。在密实度为 1.68 g/cm^3 时围压为 100 kPa 和 200 kPa 时最大动弹性模量表现为硬钢丝的大于软钢丝的,这说明在此密实度下,硬钢丝发挥的效果较好。由上分析可见:加筋土的最大动弹性模量不仅与土体的密实程度和围压有关,而且与筋体自身性质也有关系。

4 结 论

(1)在两种密实度下,尽管加筋层数不同,但动弹性模量均随围压增大而增大,并且动弹性模量随动应变的增加而减小,其变化呈指数衰减。

(2)两种密实度下的动弹性模量均表现为素土的动弹性模量大于一层加筋的动弹性模量,同时一层加筋的动弹性模量大于两层加筋的动弹性模量。

(3)加筋土与素土一样,随密实度的增加其动弹性模量增大。

(4)加筋土的最大动弹性模量与筋体自身性质、围压和土体的密实程度有关。

参 考 文 献

- [1] Hardin B O, Black W L. Vibration normally consolidated clay: design equations and curves [J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, American Society of Civil Engineering, 1968, 94(2): 353—369.
- [2] Hardin B O, Black W L. Closure to Vibration modulus of normally consolidated clay: design equations and curves[J]. **Journal of the Soil mechanics and Foundation Engineering Division**, American Society of Civil Engineering, 1969, 95 (6): 1 531—1 537.
- [3] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping soil: Measurement and parameter effects[J]. **Journal of the Soil mechanics and Foundation Engineering Division**, American Society of Civil Engineering, 1972, 98 (6): 603—624.
- [4] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soil: design equations and curves[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, American Society of Civil Engineering, 1972, 98(7): 667—692.
- [5] Vucetic M, Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineering, 1991, 11, 7(1): 89—107.
- [6] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程和工程振动, 2000, 20(4): 133—139.
- [7] YUAN Xiaoming, SUN Rui, SUN Jing et al. The study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of general soil, **Seismic engineering and engineering vibration**, 2000, 20(4): 133—139.
- [8] A1-Hunaidi M.O, Chen, J.H P.A. Rainer, Tremblay M. Shear modulus and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33: 510—514.
- [9] 沈忠言, 张家懿. 围压对冻结粉土动力特性的影响, 冰川冻土, 1997, 19(3): 245—251.
- [10] SHEN Zhong-yan, ZHANG Jia-yi. Effect of confining pressure on the dynamic features of frozen silt, **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1997, 19(3): 245—251.
- [11] 王兰民, 黄雅红, 石玉成, 等. 黄土动力学, 北京地震出版社, 2003, 10.
- [12] 蔡袁强, 梁旭, 李坤. 水泥土-土复合试样的动力特性. 水利学报, 2003, 10, 第10期: 19—25.
- [13] 陈善民, 王立忠, 李挺, 等. 水泥土动力特性室内试验及复合地基抗震特性分析, 浙江大学学报(工学版), 2000, 34 (4) : 398—403.
- [14] CHEN Shan-min, WANG Li-zong LI Ting et al. Experimental determination of dynamic properties of cement treated soil and earthquake behavior of composite foundation, **Journal of Zhejiang University**, July 2000, 34(4): 398—403.
- [15] 李海深, 杨果林, 邹银生. 加筋土挡土墙动力特性分析, 中国公路学报, 2004, 17 (2) : 28—49.
- [16] LI Hai-shen, YANG Guo-lin, ZOU Yin-sheng. Analysis of dynamic character of reinforced earth retaining wall. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(2): 28—49.
- [17] 白晓红, 黄仙枝, 张苇. 加筋土技术在土木工程中的应用. 太原理工大学学报, 2003, 9, 34 (5): 532—534.
- [18] BAI Xiao-hong, HUANG Xian-zhi, ZHANG wei. The Application of geosynthetic technique on civil engineering, **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2003, 34(5): 532—534.
- [19] 孙晋, 白晓红, 曾国红, 等. 加筋土动三轴试验. 第七届全国土动力学会议论文集.
- [20] 吴世明, 周健, 陈云敏, 等. 土动力学[M]. 中国建筑工业出版社, 2000.12.
- [21] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究. 岩土工程学报. 1997, 19(2): 39—48.
- [22] HE Chang-rong. Dynamic triaxial test on modulus and damping, **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 39—48.