

加筋土动力特性的三轴试验研究^{*}

谢婉丽¹, 薛建功², 常波¹

(1. 西北大学 地质系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710069)

摘要: 为了研究加筋土的抗震性能, 在 GDS 高级动态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。试验结果表明: 动荷载作用下加筋可以约束土体的侧向变形, 增强土体的抗震性能, 但其效果与加筋层数有关; 轴向累积应变与时间成对数关系。随动应力幅值的增加, 试样轴向累积应变增大。围压越大, 轴向累积应变越大。

关键词: 加筋土; 动三轴试验; 动力特性; 抗震性能

中图分类号: P315. 9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)S0-0120-05

0 前言

土是散粒矿物、水、空气的聚合物, 具有很低或甚至没有抗拉强度。加筋土是一种在土体中加入抗拉材料而形成的复合土, 它可以提高土体的强度和稳定性。加筋土的应用可谓历史悠久, 远在新石器时期, 我们的祖先就利用茅草作为土的加筋材料; 直到法国工程师亨利·维德尔(Henry Vidal)于 1963 年正式提出加筋土的概念后, 土工加筋技术就以其旺盛的生命力风靡全球^[1]。

在近几年国外的多次大型地震中, 尤其 1995 年日本的神户地震造成市内大范围的破坏, 但对于加筋土结构, 除发现结构有一些小的变形外, 未见加筋格栅断裂的现象, 从而证明了加筋土结构的良好抗震性^[2]。我国是一个多地震国家, 黄土地区一直是我国地震活动相对活跃的地区之一, 而且地震强度较大^[3], 地震带来的灾害给黄土区的建设和经济发展造成了巨大的影响, 并对该地区人民的生命财产安全构成了严重的威胁^[4]。加筋土结构中加筋的土体及筋材均为柔性, 在外力作用下有较好的整体变形协调能力, 不仅可适应较大的地基变形, 而且具有良好的抗震性。因此, 加筋土这种安全、经济而且具有好抗震性的复合结构, 必将在黄土地震区域的水利、交通及城建等领域的应用越来越广泛。

黄土地区的许多典型震例和室内试验研究表明^[3-9], 对于地震灾害, 目前在各项工程建设中尚无一定的避让或防治的法规可循, 促使越来越多的工程师和科学家开始在具体工程建设中考虑这一问题^[10]。为了加筋土动力特性的基础研究成果直接广泛地应用于实际工程, 为加筋土地震灾害的定性预测结果和预防的技术与标准提供探索, 本论文利用 GDS 高级动态三轴测试系统, 进行了不同动应力、不同围压和不同加筋层数下的加筋土动三轴试验, 探讨加筋土在动荷载作用下的抗震性能。

1 试验设备、材料及方法

筋材与土的相互作用是复杂的, 不同的土、不同的筋材及筋材的设置间距, 其效果也会不同。本试验用土工格网和黄土复合成的加筋土, 对不同加筋层数(1, 2 层), 分别在不同周围压力(50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa)和不同动应力幅值(0.1 kN, 0.2 kN, 0.3 kN, 0.4 kN)条件下对加筋土试样进行动三轴试验, 同时, 为比较加筋和不加筋的差异和效果, 对未加筋土也进行试验。这样共 $3 \times 4 \times 4 = 48$ 个试样。

1.1 试验设备

试验所用设备系英国欧美大地公司生产的 GDS 动三轴系统, 包括: 制动单元, 三轴压力室和平衡器, 围压控制器, 反压控制器, 信号控制

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40502028); 陕西省自然科学基金青年基金项目(2006D18)

作者简介: 谢婉丽(1974-), 女, 陕西大荔人, 副教授, 从事工程地质及岩土工程方面的教学与研究工作。

Email: xiewanli@nwnu.edu.cn.

器, 高速数据采集和控制卡。其中制动单元是最主要的组成部分, 它内有轴向制动器, 上接三轴压力室底座。该底座内包含有通向压力室的水力接头和孔压、围压传感器。通过计算机直接控制围压、反压和试验速率。采集这些数据并直接传输到计算机中, 也可采集轴向位移, 轴向荷载, 孔压和体积变化值。基本部件如图 1 所示。

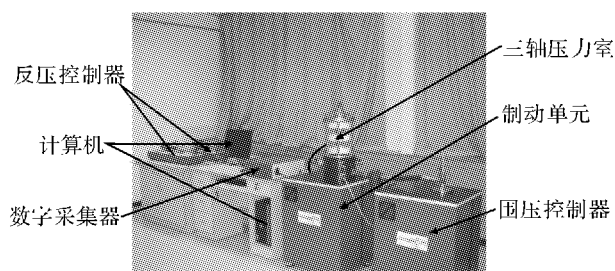


图1 动三轴系统

1.2 试样制备

土样取自咸阳市塔尔坡北的马兰黄土。经试验土的物理力学性质指标见表 1。试验试样为制备土, 控制干密度 $\rho = 1.69 \text{ g/cm}^3$ 。

击实试样制备方法: 把风干黄土过 5 mm 的筛孔, 按要求的干密度称取所需的过筛风干黄土, 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, 用喷雾设备喷洒预计的加水量, 并充分拌和, 装入容器内盖紧, 润湿一昼夜备用。依试验要求的密度, 将一定重量和含水量的土放入筒内, 分层击实。土工格栅剪成直径为 10 cm 的圆形, 分别水平放置在相应的加筋位置。(注: 试验要求的含水量即最优含水量)

表 4 土的物理力学性质指标

干容重 /(g/cm^3)	含水量 /%	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	内摩擦角 /°	粘聚力 /kPa
1.69	19.2	21.1	30.4	9.3	54.5	21.0

2.3 加筋材料

进行三轴剪切试验时, 由于试样规格的限制, 试样高 20 cm, 直径 10 cm, 而格栅的纵向尺寸为 11 cm, 因此试验中用护坡土工格栅代替土工格栅。用土工格栅和粉质粘土复合成的加筋土进行试验。土工格栅主要物理力学性质如下: 单位面积质量: 300 g/m^2 ; 网格为正方形, 网眼大小为 $2 \times 2 \text{ mm}$, 厚度为 0.80 mm。最大抗拉强度: 5.5 kN/m ; 延伸率: 25%。

2.4 试验方案

试验方案为: 将试样制成不同加筋层数(0 层,

1 层, 2 层)的土样, 击实后在 GDS 高级动态三轴测试系统上对试样施加不同围压(50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa)和不同动应力(0.1 kN, 0.2 kN, 0.3 kN, 0.4 kN), 加载指标见表 2, 这样共 $3 \times 4 \times 4 = 48$ 个试样。

因为试验采用重塑黄土, 试验采用不固结不排水的方式分级加载测试。

表 2 加载设定指标一览

控制标准	加载波形	频率范围/Hz	应力幅值/kN
应力控制	正弦波	1	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

3 试验成果及分析

将正弦波通过动三轴直接施加给试样, 进行不同加筋层数, 不同围压和不同动应力幅值情况下的加筋土的动三轴试验。

3.1 加筋层数的影响

以围压为 100 kPa, 动应力幅值为 0.2 kN 条件为例, 从图 2 可以看出: 无论加筋与否, 土样轴向累积应变开始时都随时间增加较快, 曲线较陡, 呈近似直线关系, 直到轴向累积应变达到 12% 左右时, 曲线开始分离, 加筋土和未加筋土的变化趋势明显不同, 未加筋土轴向累积应变曲线继续呈直线增长, 在振动 500 次后土样破坏, 轴向累积应变达到 19%; 而加筋土轴向累积应变基本不变, 1 层加筋土样在振动 12 000 次后, 轴向累积应变基本保持为 14%, 2 层加筋土样在振动 15 000 次后轴向累积应变基本保持为 13%。

在围压 100 kPa, 动应力 0.2 kN 条件下不同加筋层数对轴向累积应变的影响

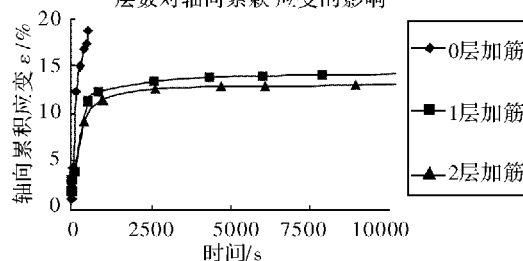


图2 不同加筋层数情况下时间与轴向累积应变的关系

从试验结果可知:

(1) 在土样轴向累积应变和时间呈直线增长阶段, 轴向累积应变 5% 以前, 无论加筋与否轴向累积应变和时间曲线几乎相同, 说明筋材还没有起到加筋作用; 轴向累积应变 5% 以后, 未加筋土比加筋土轴向累积应变增加较快, 此时筋材的加筋

作用开始发挥作用, 但由还没起明显作用。

(2) 曲线进入明显的分离后, 随着震动次数的增加, 未加筋土样很快破坏, 在振动 500 次后土样破坏, 轴向累积应变达到 19%; 而加筋土样在振动 10 000 次后, 轴向累积应变变化仅为 2%。可见筋材明显起到增强土样抗震性能。

(3) 在轴向累积应变 10% 左右以前, 1 层加筋土和 2 层加筋土强度没什么区别, 而在轴向累积应变在超过 10% 左右之后, 2 层加筋土强度明显大于 1 层加筋土强度。说明变形越大加筋土的抗震性能越强。

(4) 分别对 0 层、1 层和 2 层的加筋土样的时间和轴向累积应变曲线进行拟合, 可得到轴向累积应变与时间呈对数关系。其公式分别如下:

0 层加筋拟合公式

$$y = -1.381\ 31 + 2.886\ 06 \ln(x + 0.5),$$

1 层加筋拟合公式

$$y = -0.228\ 1 + 1.626\ 49 \ln(x + 0.5),$$

2 层加筋拟合公式

$$y = 2.124\ 56 + 1.209\ 04 \ln(x + 0.5)。$$

3.2 围压的影响

以加 1 层筋, 动应力幅值为 0.1 kN 条件下不同围压(50 kPa, 100 kPa, 150 kPa 和 200 kPa)为例, 从图 3 可以看出, 轴向累积应变开始时随时间增加较快, 曲线较陡, 呈近似直线关系; 在不同围压情况下, 当轴向累积应变达到一定值时分别趋于稳定。从曲线结果可知, 在近似直线段内, 轴向累积应变随时间增加由快到慢依次为在 150 kPa, 100 kPa, 50 kPa 和 200 kPa 条件下; 最终的轴向累积应变由大到下依次为在 150 kPa, 100 kPa, 50 kPa 和 200 kPa 条件下。综上分析可知: 在动荷载作用下, 轴向累积应变随着围压增加而增大。200 kPa 条件下轴向累积应变偏低, 原因主要是与 200 kPa 条件下试样含水率为 19.64% 有关, 而试验中其它试样含水率在 19.2% 左右, 最多误差在 0.2%, 因此认为土样中含水率的大小对土样强度特性的有非常重要的影响。分别对不同围压下加筋土样的时间和轴向累积应变曲线进行拟合, 可得到轴向累积应变与时间呈对数关系。其公式分别如下:

50 kPa 拟合公式

$$y = -0.030\ 73 + 0.372\ 55 \ln(x + 2),$$

100 kPa 拟合公式

$$y = 0.525\ 75 \ln(x - 0.5),$$

150 kPa 拟合公式

$$y = 2.315\ 31 + 0.799\ 22 \ln(x + 0.5),$$

200 kPa 拟合公式

$$y = 0.308\ 73 + 0.164\ 26 \ln(x + 0.5)。$$

在 1 层加筋, 动应力 0.1 kN 条件下不同围压

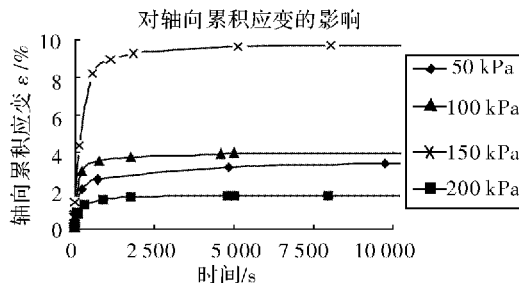


图 3 不同加筋层数围压下时间与轴向累积应变的关系

3.3 动应力幅值的影响

以加 1 层筋, 围压在 50 kPa 条件下为例。从图 4 可以看出: 轴向累积应变在低动应力幅值(0.1 kN, 0.2 kN)条件下, 开始时有较小一段直线, 之后缓慢增长。而在高动应力幅值(0.3 kN, 0.4 kN)条件下, 轴向累积应变曲线随震动时间呈近直线变化, 在振动 20 次左右轴向累积应变就分别高达 15% 和 20%。综上分析可知: 在不同动应力幅值的荷载下, 对试样的影响是不同的, 随动应力幅值的增加, 试样轴向累积应变越大, 且达到破坏所需要的时间越短。不同动应力幅值下震动时间和轴向累积应变关系的拟合公式。

$$0.1\text{ kN}: y = -0.030\ 73 + 0.372\ 55 \ln(x + 2),$$

$$0.2\text{ kN}: y = 0.345\ 03 + 1.081\ 816 \ln(x + 1.5),$$

$$0.3\text{ kN}: y = 4.157 \ln(x - 3.55),$$

$$0.4\text{ kN}: y = 4.431\ 05 + 3.971\ 65 \ln(x + 1.5)。$$

在 1 层加筋, 围压 50 kPa 条件下不同动应力幅值

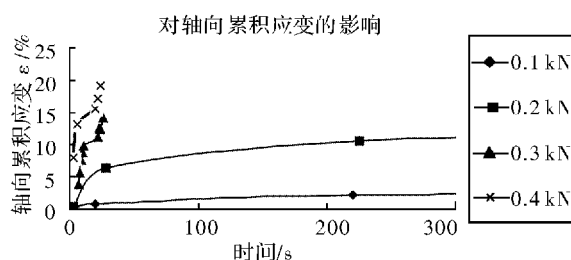


图 4 不同动应力幅值下时间与轴向累积应变的关系

3.4 加筋土破坏形态

如图 5 为加筋土和未加筋土试样在动、静三轴剪切破坏后的形态: (a) 是在静三轴下围压 100 kPa 时未加筋黄土试验后试样外形; (b) 是在静三轴下围压 100 kPa 时加筋黄土试验后试样外形; (c) 动三轴下围压 100 kPa 时动应力幅值 0.2 kN 时未加筋试样外形; (d) 动三轴下围压

100 kPa时不同动荷载幅值下(0.1 kN, 0.2 kN, 0.3 kN, 0.4 kN)加筋试样外形。

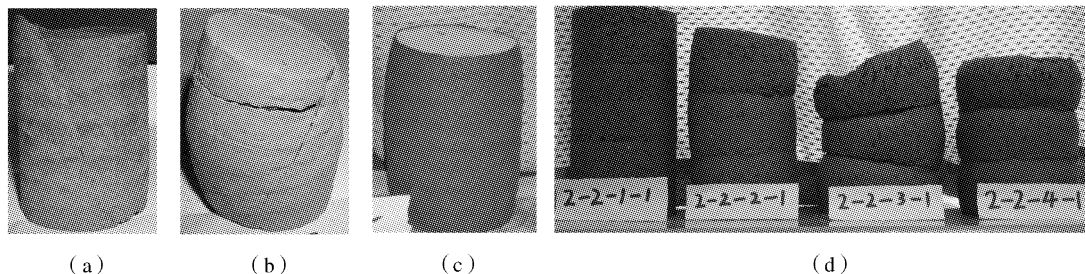


图5 三轴试验后试样外形

- (a) 静三轴下围压 100 kPa 时未加筋土样 (b) 静三轴下围压 100kPa 时加筋土样
(c) 动三轴下围压 100 kPa 时动应力幅值 0.2 kN 时未加筋土样
(d) 动三轴下围压 100 kPa 时不同动荷载幅值下(0.1 kN, 0.2 kN, 0.3 kN, 0.4 kN)加筋土样

从侧面观察,无论在动静荷载作用下,未加筋黄土横向变形是中间大、上下端小,其变化是渐变的;加筋土在筋材层横向变形明显减小,清楚表明筋材对土体的横向变形有约束作用,这是因为加筋土是由土与筋材组成的复合体,它们共同受力、协调变形。当受到外荷载作用时,土体发生侧向膨胀,产生侧向伸张应变。由于筋材的弹性模量远高于土体的弹性模量,致使土体与筋材之间产生相互错动或有相互错动趋势。这种错动就是土体沿布筋方向发生的相对于筋材的应变,这种应变对加筋土的补强影响很大,在一定范围内,应变越大,才能发挥加筋应有的拉力作用,加筋土的强度特性才能得到充分的发挥。

在试验进行中我们观测到,在静力荷载作用下,无论加筋与否,当轴向应力达到峰值时,土样开始出现剪切面,都可以用 $(45^\circ + \varphi/2)$ 表示(见图5中的(a)和(b))。在动荷载作用下,在其它条件(相同围压,相同动应力)相同情况下,加筋土的震动时间明显大于未加筋土;无论动应力幅值多大、围压多大,土样没有剪切面,只有由于震动而产生的裂缝(纹)。掰开破坏后的加筋土样,我们发现即使整个土体轴向累积应变达到20%左右,但加在其中的筋材仍然完好无损。

4 结论

(1)动荷载作用下加筋可以约束土体的侧向变形,增强土体的抗震性能,土样变形越大加筋土的抗震性能越强,但其效果与加筋层数有关。轴向累积应变与时间成对数关系,其表达式为 $y = a + b \ln(x + c)$ (y 为轴向累积应变; x 为时间/s)。

(2)在不同动应力幅值的荷载下,随动应力幅值的增加,试样轴向累积应变越大,且达到破坏所需要的时间越短。在相同动应力作用下,轴向累积应变与围压成正比关系。

(3)观察记录了破坏过程、破坏型式,试验发现加筋明显提高了土体的抗震性能,而且改变了它的受力破坏模式。未加筋土样震动较少次数就会完全失去承载能力,而加筋土在土样中即使出现许多裂缝(纹),仍然可以继续承受动荷载作用。

(4)在此次试验中发现,相同加筋层数的两个试样,在相同围压,相同动应力的条件下,其达到破坏时振次(时间)差距很大,追究原因是因为含水率相差约5%,可见,含水率的变化对黄土动力特性有显著影响。

参考文献:

- [1] Vidal, M. H. . The development and future of reinforced earth [C]// Proceedings of a Symposium on Earth Reinforcement at the ASCE Annual Convention. Pittsburgh, Pennsylvania, 1978. 1-61.
- [2] TATSUOKA F, TATEYAMA M, KOSEKI J. Behavior of Geogrid-reinforced soil retaining walls during the Great Earthquake Proceedings of 1st International Symposium on Geotechnical Earthquake Engineering[R] . 1995: 55-60.
- [3] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [4] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [5] 谢婉丽, 王家鼎. 加筋黄土体稳定性分析[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2006.
- [6] Francois, S. Pyl, L. Masoumi H. R. and Degrande G. , The influence of dynamic soil-structure interaction on traffic induced vi-

- brations in buildings [J], Soil Dynamics and Earthquake Engineering, In Press, Corrected Proof, Available online 19 January 2007.
- [7] Auersch L., The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle – track – soil interaction and measurements on high – speed lines [J], Journal of Sound and Vibration, 2005, 284(1 – 2): 103 – 132.
- [8] Van Dijk, S. J. E., et al, Compaction soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France [J], Soil and Tillage Research, 2002, 63: 141 – 153.
- [9] Wiermann, C. et al, Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam [J], Soil and Tillage Research, 1999, 50: 127 – 135.
- [10] 王兰民. 黄土动力学 [M]. 北京: 地震出版社, 2003.

Triaxial Test on Dynamic Properties of Reinforced Soil

Xie Wanli¹, Xue Jiangong² and Chang Bo¹

(1. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;*

2. *Shannxi Communication Bureau, Xi'an 710069, China*)

Abstract: Laboratory dynamic triaxial compression tests are carried out in order to evaluate the aseismic properties of reinforced soil. The mechanical behavior of the composite material is investigated through varying the number of geonet layers, confining pressure, and different dynamic stress in GDS high dynamic triaxial testing system. The results demonstrate that geonet inclusion increased the aseismic property of reinforced soil. It reduces the dynamic strength and lateral dilation. However, it indicates that there is certain relation between the dynamic strength of reinforced soil and the number of geonet layers. The relationship between axial strain (γ) and dynamic times (x) can be defined as: $\gamma = a + b \ln(x + c)$. With the increase of amplitude cycle dynamic load and confining pressure, the axial accumulated strain will increase.

Key words: reinforced soil; dynamic triaxial test; dynamic properties