

# 循环荷载作用下饱和压实黄土动力特性研究

张 军<sup>1</sup>, 郑俊杰<sup>2</sup>, 曹文昭<sup>2</sup>, 赖汉江<sup>2</sup>

(1. 山西省交通科学研究院黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 通过一系列饱和击实黄土的动三轴试验, 分析了循环荷载作用下饱和压实黄土超孔隙水压力、轴向应变、有效应力路径和滞回圈的变化规律, 以及不同激振振幅和干密度状态下对饱和压实黄土动力特性的影响。试验结果表明: 试验加载初始阶段, 超孔隙水压力和轴向变形快速增长, 随着循环次数的增加, 超孔隙水压力和轴向变形增速逐渐减缓。超孔隙水压力和轴向变形的变化曲线都存在一拐点, 当循环次数超过该拐点后, 超孔隙水压力和轴向变形趋于稳定。随着循环次数的增加, 有效应力路径向左发展, 且移动幅度逐渐减缓。当循环次数增加至一定值时, 有效应力路径在加载阶段和卸载阶段基本重合。随着循环次数的增加, 滞回圈向右发展。随着激振振幅的增大, 超孔隙水压力和轴向应变逐渐增大, 随着干密度的增大, 超孔隙水压力和轴向应变逐渐减小。

**关键词:** 饱和压实黄土; 动力特性; 循环荷载; 动三轴试验; 轴向应变; 超孔隙水压力

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0322-06

**作者简介:** 张 军(1986-), 男, 湖北鄂州人, 博士, 工程师, 主要从事路基工程及特殊土地基处理方面研究。E-mail: zhangjun\_hust@qq.com。

## Dynamic characteristics of saturated compacted loess under cyclic loads

ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHENG Jun-jie<sup>2</sup>, CAO Wen-zhao<sup>2</sup>, LAI Han-jiang<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan

030006, China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

430074, China)

**Abstract:** Based on a series of dynamic triaxial tests on saturated compacted loess, the relationships among the excess pore water pressures, axial strains, effective stress paths, hysteresis loops and number of loading cycles are studied. Then, the effects of dynamic characteristics under different excitation amplitudes and dry densities are investigated. The results show that the excess pore water pressures and axial strains increase significantly at the beginning of triaxial tests. However, the effects of loading cycles on the excess pore water pressures and axial strains decrease gradually with the increase of loading cycles and become negligible when the loading cycles exceed a certain value. The effective stress paths move to left gradually with the increase of loading cycles, but the degrees of movement decrease gradually. The effective stress paths at the loading phase are essentially coincident with those at the unloading phase when the load cycles exceed a certain value. The hysteresis loops move to right gradually with the increase of loading cycles. With the increase of excitation amplitude, the excess pore water pressures and axial strains increase gradually. With the increase of dry density, the excess pore water pressures and axial strains decrease gradually.

**Key words:** saturated compacted loess; dynamic characteristic; cyclic load; dynamic triaxial test; axial strain; excess pore water pressure

## 0 引 言

随着国民经济的快速发展和西部大开发战略的深入, 国家对西部地区基础建设的投入不断加大。作为广泛分布在我国西北和华北地区的黄土, 以其独有的物理性质和工程力学特性, 无疑是西部地区基础设施建设中研究的重点<sup>[1-3]</sup>。

黄土是第四纪干旱气候条件下形成的陆相黄色粉砂质土状沉积物, 具有多孔隙、弱胶结, 垂直节理发育, 透水性强和沉陷性等特性<sup>[4-6]</sup>。目前, 对黄土相关

基金项目: 山西省交通建设科技项目(10-2-05)

收稿日期: 2013-02-28

特性的研究较多。邵生俊等<sup>[7-9]</sup>通过单轴抗压试验、直接剪切试验和三轴试验等室内试验, 得出了黄土结构性力学特性的变化规律, 并提出了结构性临界状态的概念; 王松鹤等<sup>[10-11]</sup>分别通过直接剪切蠕变试验和三轴剪切蠕变试验, 分析不同条件下黄土的剪切蠕变特性, 并建立了经验蠕变模型。但是目前对黄土特性方面的研究主要集中在静力方面, 对其动力特性的研究相对较少。动三轴试验是研究土动力特性的一种重要方法<sup>[12-13]</sup>。黄土动力特性方面, 刘保健等<sup>[14]</sup>基于应变控制条件下压实黄土的动三轴试验, 分析了湿度、围压和激振频率等因素对压实黄土应力松弛特性的影响; 陈存礼等<sup>[15]</sup>以新疆黄土为研究对象, 分析了饱和和击实新疆黄土的动模量、动强度及阻尼比等动力特性; 李又云等<sup>[16]</sup>通过一系列动三轴试验, 分析了不同干密度、含水率和围压条件下对压实黄土的动力特性的影响; 王志杰等<sup>[17]</sup>选取兰州、洛川和杨凌地区的原状黄土, 对比分析了含水率和固结应力对不同地区原状黄土动剪切模量和阻尼比的影响。

为了深入了解黄土的动力特性, 本文以山西朔州地区黄土作为研究对象, 基于 GDS 动三轴试验系统, 通过一系列动三轴试验, 分析了循环荷载作用下饱和和压实黄土超孔隙水压力、轴向应变、有效应力路径和滞回圈的变化规律, 以及不同激振振幅和干密度对饱和和压实黄土动力特性的影响, 研究成果对循环荷载作用下饱和和压实黄土动力特性的研究具有一定的参考价值。

1 试验概况

1.1 土样制备

试验黄土土样取自山西省朔州市向阳堡乡以南山平(山阴至平鲁)高速公路路堤填筑用土料场, 该地区位于北温带半干旱大陆性季风气候, 主要的气候特征是冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨, 四季分明, 昼夜温差大, 年平均降水量 435.3 mm。海拔介于 1346~1348 m 之间, 地形平坦, 略向北倾斜, 坡度为 1° 左右。取样黄土属于 II 级自重湿陷性黄土, 土样呈黄褐色, 稍密, 天然含水率在 12% 左右。黄土土样物理性质指标见表 1。

表 1 黄土土样的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical indices of loess sample

塑限/%	液限/%	塑性指数	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
16.8	28.5	11.7	8.32	1.51

为保证黄土试样的均一性, 本次试验采用饱和和重塑土。黄土试样制备过程中, 将原状黄土风干后过 2 mm 标准土工筛, 将筛上土颗粒采用木槌碾散。本次

试验试样根据现场测得的试样干密度平均值, 采用干装击实法制作重塑试样, 试样尺寸为高 100 mm, 直径 50 mm。试样分五层击实, 根据每层土样质量, 采用特制击样器进行制样, 每层土样击实后进行刮毛, 以保证上下接触良好, 避免出现分层现象。试样制备后, 使用饱和器将其固定, 然后放入饱和缸中进行抽真空饱和, 然后安装到动三轴仪上进行反压饱和, 当孔隙水压力系数大于等于 0.98 后, 进行排水固结。

为了更好地了解山西朔州地区黄土的性质, 进行两组不同干密度状态下饱和和压实黄土试样的常规三轴压缩试验。图 1 为饱和和压实黄土试样应力-应变曲线。从图 1 可看出, 干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 的黄土试样静剪强度比干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup> 的黄土试样要大。同时, 干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 的黄土试样达到最大剪切强度时的应变要大于干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup> 的黄土试样, 两组试样的破坏点基本发生在 20%~25% 应变左右。应力-应变曲线表现为常规的非线性关系, 试验最后两组试样都产生了较小的应变软化现象。

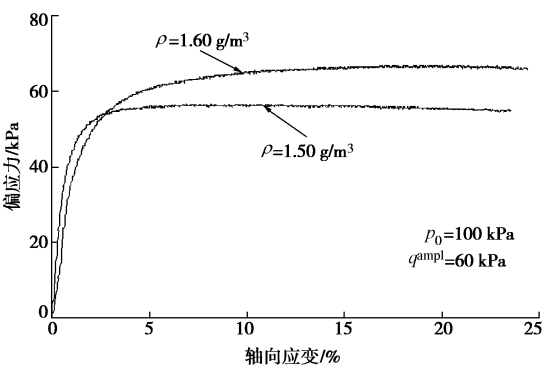


图 1 应力-应变关系

Fig. 1 Relationship between deviatoric stress and axial strain

1.2 试验设备

本次动三轴试验采用英国 GDS 公司生产的动三轴试验系统(图 2)。该动三轴试验系统主要包括驱动系统、围压控制器、反压控制器、压力室和信号调节装置五部分。

该系统轴向位移分辨率为 0.208 μm; 轴向力精度小于荷重传感器量程的 0.1%; 围压控制器和反压控制器的精度为 1 kPa; 反压控制器测量的体应变的精度为 1 mm<sup>3</sup>, 可以非常精确地在动态试验中控制轴向位移和轴向力。试验过程中可以通过 GDSLAB 软件控制试验进程和记录试验数据。循环加载试验过程中, 每个周期最多可以记录 100 个数据点。

1.3 试验方案

本次试验振动采用应力控制, 试验方案见表 2。试验通过油压施加围压, 采用恒定围压, 围压为 100

kPa, 各向等压固结。固结完成后在不排水条件下施加循环荷载进行激振, 激振频率为 1.0 Hz, 输入波形采用正弦波。激振振幅为 60 kPa 的正弦波, 加载示意图如图 3 所示。

表 2 动三轴试验方案

Table 2 Schemes of dynamic triaxial tests			
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	试样质量/g	振幅/kPa	循环次数
1.60 (理论质量 392.0 g)	392.0	40	5000
	391.8	60	5000
	392.4	120	5000
1.50 (理论质量 384.0 g)	383.9	40	5000
	384.8	60	5000
	384.7	120	5000

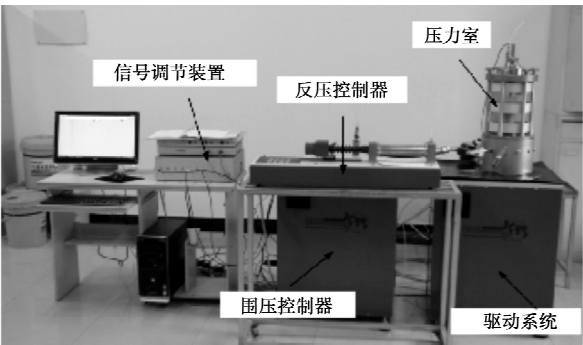


图 2 动三轴试验装置组成  
Fig. 2 Photo of dynamic triaxial tests

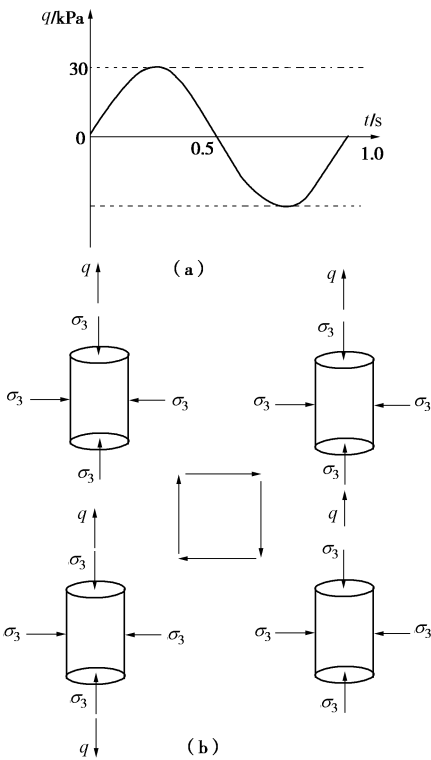


图 3 循环荷载加载示意图  
Fig. 3 Schematic of applying cyclic loads on specimen  
具体试验方案为分别采用 1.60 g/cm<sup>3</sup> 和 1.50 g/cm<sup>3</sup>

两种不同密实度的饱和压实黄土试样, 采用 40, 60, 120 kPa 3 种不同大小的激振振幅进行动三轴对比试验。分析循环荷载作用下饱和压实黄土超孔隙水压力、轴向应变、有效应力路径和滞回圈的变化规律, 以及不同荷载振幅和不同干密度状态下对饱和压实黄土的动力特性的影响。

2 试验成果及分析

以围压为 100 kPa, 干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>, 激振振幅为 60 kPa 状态下的饱和击实黄土试样的试验结果为基准, 定性分析循环荷载作用下山西朔州地区饱和击实黄土的动力特性。

图 4 为循环荷载作用下随着循环次数的增加, 超孔隙水压力的变化曲线。从图 4 可以看出, 试验加载初始阶段, 超孔隙水压力快速增长, 随着循环次数的增加, 超孔隙水压力增速逐渐减缓。可以看出, 超孔隙水压力变化曲线存在一个明显的拐点, 当循环次数超过该拐点后, 超孔隙水压力趋于稳定。本次试验中该拐点对应的循环次数为 1000 次左右。另外, 由于激振荷载在同一周期是以正弦波形式变化, 因此在同一周期中超孔隙水压力是不断变化的, 存在一个最大超孔隙水压力和一个最小超孔隙水压力。随着循环次数的增加, 最大与最小超孔隙水压力之间差值逐渐增大。同时, 当循环次数超过超孔隙水压力增长曲线拐点后, 最大与最小超孔隙水压力之间差值也基本不变。

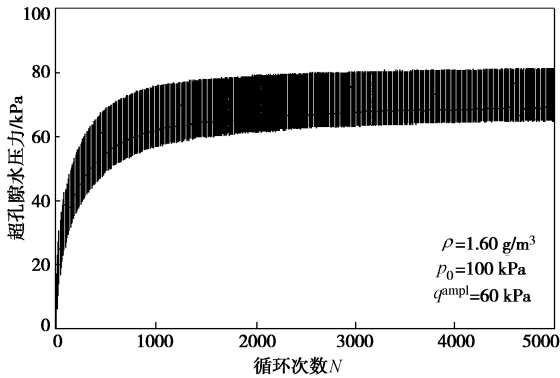


图 4 循环荷载作用下超孔压变化规律  
Fig. 4 Relationship between excess pore water pressure and number of loading cycles

图 5 为循环荷载作用下随着循环次数的增加, 轴向应变的变化曲线。由于加载过程中偏应力是正负交替进行, 当偏应力为负值时出现应力反转, 此时黄土试样处于卸荷状态。因此, 随着循环次数的增加, 轴向应变呈负方向增长, 即黄土试样回弹。可以看出, 循环荷载作用下黄土试样轴向应变变化规律与超孔隙水压力变化规律相似。试验加载初始阶段, 轴向应变快速增长, 随着循环次数的增加, 轴向应变增速逐渐

减缓。同时, 轴向应变变化曲线也存在一个明显的拐点, 当循环次数超过该拐点后, 轴向应变趋于稳定。对比图 4 可以看出, 超孔隙水压力变化曲线的拐点与轴向应变变化曲线的拐点基本一致, 说明轴向应变的变化与超孔隙水压力直接相关。

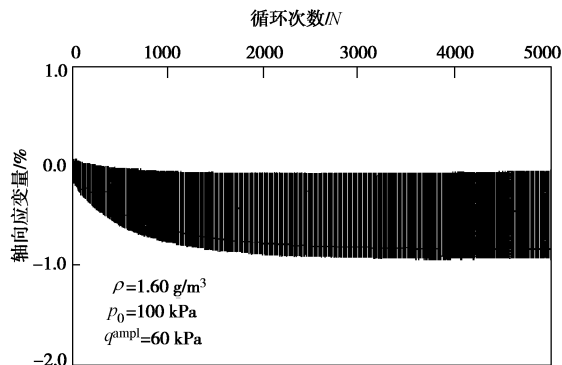


图 5 循环荷载作用下轴向应变变化规律

Fig. 5 Relationship between axial strain and number of loading cycles

有效应力路径可以较好地反映土体破坏以及土体的剪胀和剪缩特性。图 6 为循环荷载作用下有效应力路径变化曲线。由于循环次数过多, 如果将每一个循环周期的有效应力路径均画出, 各周期有效应力路径相互重叠, 将使图片不清晰, 无法判断循环荷载作用下有效应力路径的变化规律。图 6 中有效应力路径选取了若干组具有代表性的循环次数: 1~20 次, 90~100 次, 500 次, 1000 次, 2000 次, 3000 次, 4000 次和 5000 次。可以看出, 随着循环次数的增加, 有效应力路径向左发展, 且移动幅度逐渐减缓。以一个循环周期的有效应力路径为研究对象。可以看出, 每一个循环周期形成一个相对封闭的区域。随着循环次数的增加, 一个循环周期形成的封闭区域的面积逐渐减小, 当循环次数增加至 2000 次时, 有效应力路径在加载阶段与卸载阶段基本重合。

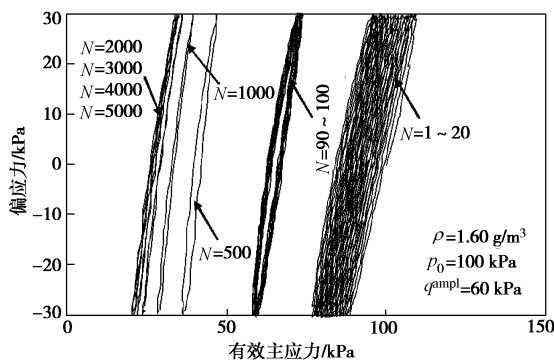


图 6 循环荷载作用下有效应力路径

Fig. 6 Effective stress paths under cyclic loads

图 7 为循环荷载作用下滞回圈的变化规律。与图 6 相同, 仅画出了 1~20 次, 90~100 次, 500 次, 1000

次, 2000 次, 3000 次, 4000 次和 5000 次具有代表性循环次数的滞回圈。可以看出, 随着循环次数的增加, 滞回圈向右发展, 且移动幅度逐渐减缓。当循环次数增加至 3000 次后, 各循环的滞回圈基本重合。另外, 偏应力为 -30 kPa 时应变积累速度明显要大于偏应力为 30 kPa 时。以一个循环周期的滞回圈为研究对象。可以看出, 随着循环次数的增加, 一个循环周期形成的滞回圈的面积逐渐增大。同时, 随着循环次数的增加, 滞回圈的倾斜程度逐渐增大。

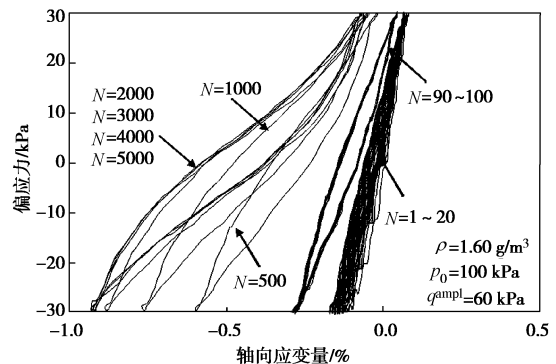


图 7 循环荷载作用下滞回圈

Fig. 7 Hysteresis loops under cyclic loads

### 3 参数分析

#### 3.1 激振振幅的影响

图 8 为不同激振振幅作用下超孔隙水压力的变化规律。可以看出, 随着循环次数的增加, 各激振振幅状态下超孔隙水压力以及最大和最小超孔隙水压力差值逐渐增大。当循环次数增加到一定程度时, 各激振振幅作用下超孔隙水压力逐步趋于稳定。随着激振振幅的增大, 超孔隙水压力达到稳定状态所需要的循环次数逐渐增加。激振振幅为 40 kPa 时, 超孔隙水压力达到稳定状态所需的循环次数仅为 100 次; 激振振幅为 60 kPa 时, 超孔隙水压力达到稳定状态所需的循环次数为 1000 次; 而激振振幅为 120 kPa 时, 当循环次数为 5000 次时的超孔隙水压力仍未达到稳定状态。同时, 随着激振振幅的增大, 超孔隙水压力呈非线性增长。激振振幅为 40, 60, 120 kPa 时, 循环次数为 5000 次时的最大孔隙水压力分别为 9.7, 81.3, 196.4 kPa。

图 9 为不同激振振幅作用下轴向应变的变化规律。可以看出, 随着循环次数的增加, 各激振振幅作用下轴向应变逐渐增大。随着激振振幅的增大, 轴向应变达到稳定状态所需要的循环次数逐渐增加, 同时, 随着激振振幅的增大, 各激振振幅状态下最小轴向应变增幅不大, 但最大轴向应变呈非线性增加。激振振幅为 40, 60, 120 kPa 时, 循环次数为 5000 次时的最大轴向应变分别为 0.17%, 0.95% 和 6.40%。

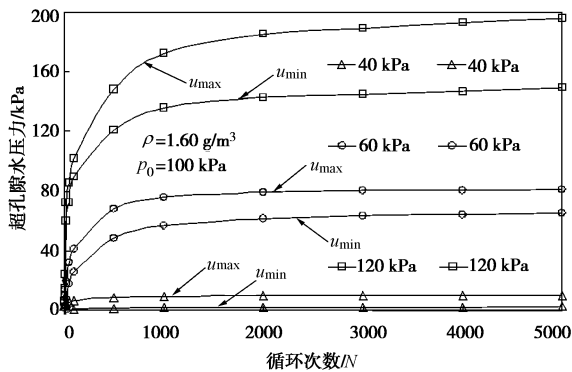


图 8 不同振幅作用下超孔压变化规律

Fig. 8 Variation curves of excess pore water pressure under different cyclic loads

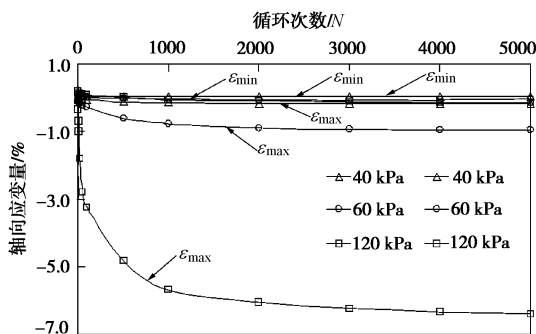


图 9 不同振幅作用下轴向应变变化规律

Fig. 9 Variation curves of axial strain under different cyclic loads

### 3.2 干密度的影响

图 10 为不同干密度状态下超孔隙水压力的变化规律。可以看出,随着循环次数的增加,两组干密度状态下超孔隙水压力以及最大和最小超孔隙水压力差值逐渐增大。随着试样干密度的增大,超孔隙水压力逐渐减小,且超孔隙水压力达到稳定状态所需的循环次数逐渐减小。

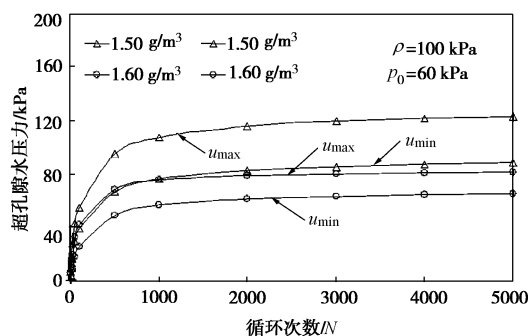


图 10 不同干密度状态下超孔压变化规律

Fig. 10 Variation curves of excess pore water pressure under different dry densities

图 11 为不同干密度状态下轴向应变的变化规律。可以看出,随着循环次数的增加,两组干密度状态下轴向应变逐渐增大。随着试样干密度的增大,最小轴向应变略有增大。而最大轴向应变明显减小。同时,随着试样干密度的增大,最大和最小轴向应变的差值

逐渐减小。干密度为  $1.50 \text{ g/m}^3$  和  $1.60 \text{ g/m}^3$  时,循环次数为 5000 次时的最大和最小轴向应变的差值分别为 0.90% 和 1.07%。

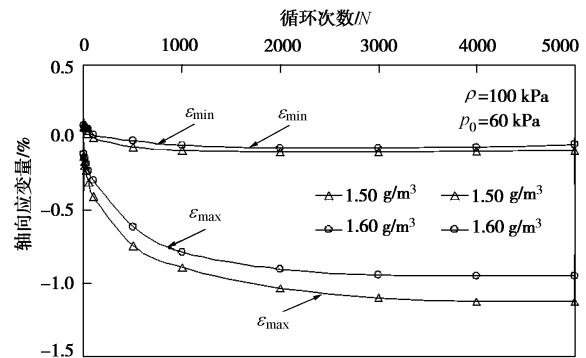


图 11 不同干密度状态下轴向应变变化规律

Fig. 11 Variation curves of axial strain under different dry densities

## 4 结 论

本文以山西朔州地区黄土作为研究对象,通过一系列动三轴试验,分析了正弦波循环荷载作用下饱和压实黄土的动力特性,得出了以下结论:

(1) 试验加载初始阶段,超孔隙水压力和轴向变形快速增长,随着循环次数的增加,超孔隙水压力和轴向变形增速逐渐减缓。同时,超孔隙水压力和轴向变形的变化曲线都存在一个明显的拐点,当循环次数超过该拐点后,超孔隙水压力和轴向变形趋于稳定。

(2) 随着循环次数的增加,有效应力路径向左发展,且移动幅度逐渐减缓。随着循环次数的增加,一个循环周期形成的封闭区域的面积逐渐减小,当循环次数增加至一定值时,有效应力路径在加载阶段与卸载阶段基本重合。

(3) 随着循环次数的增加,滞回圈向右发展,且移动幅度逐渐减缓。随着循环次数的增加,一个循环周期形成的滞回圈的面积逐渐增大。同时,随着循环次数的增加,滞回圈的倾斜程度逐渐增大。

(4) 随着激励振幅的增大,超孔隙水压力和轴向应变逐渐增大,且超孔隙水压力和轴向应变达到稳定状态所需要的循环次数逐渐增加。

(5) 随着试样干密度的增大,超孔隙水压力和轴向应变逐渐减小,且超孔隙水压力和轴向应变达到稳定状态所需要的循环次数逐渐减小。

**致 谢:** 本文动三轴试验完成过程中得到了河海大学高玉峰教授、刘建民和熊雄同学的大力帮助,在此表示感谢。

### 参考文献:

[1] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工

- 程学报, 2012, **45**(5): 141 - 161. (KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(5): 141 - 161. (in Chinese))
- [2] 谷天峰, 王家鼎, 任 权, 等. 循环荷载作用下黄土边坡变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 3156 - 3162. (GU Tian-feng, WANG Jia-ding, REN Quan, et al. Study on deformation of loess slope under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3156 - 3162. (in Chinese))
- [3] 刘保健, 支喜兰, 谢永利, 等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析[J]. 中国公路学报, 2005, **18**(4): 27 - 31. (LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, **18**(4): 27 - 31. (in Chinese))
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [5] 高国瑞, 韩爱民. 论中国区域性土的分布和岩土性质的形成[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 511 - 515. (GAO Guo-rui, HAN Ai-min. Distribution of regional soils in China and formation of their special geotechnical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 511 - 515. (in Chinese))
- [6] 李 瑞. 黄土地基的冲击压实研究[J]. 山西交通科技, 2013, **220**(1): 39 - 40, 52. (LI Rui. The study of loess foundation impact compaction[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2013, **220**(1): 39 - 40, 52. (in Chinese))
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 531 - 536. (SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 531 - 536. (in Chinese))
- [8] 邵生俊, 郑 文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 15 - 19. (SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 15 - 19. (in Chinese))
- [9] 邵生俊, 陶 虎, 许 萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 42 - 50. (SHAO Sheng-jun, TAO Hu, XU Ping. Discussion on research of mechanical characteristics of loess considering structural behavior and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 42 - 50. (in Chinese))
- [10] 王松鹤, 骆亚生, 董晓宏, 等. 黄土剪切蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3088 - 3092. (WANG Song-he, LUO Ya-sheng, DONG Xiao-hong, et al. Experimental study of shear creep characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3088 - 3092. (in Chinese))
- [11] 王松鹤, 骆亚生. 黄土三轴剪切蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1633 - 1637. (WANG Song-he, LUO Ya-sheng. Triaxial shear creep characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1633 - 1637. (in Chinese))
- [12] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLIDIS Th. Strain accumulation in sand due to cyclic loading: Drained cyclic tests with triaxial extension[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, **27**(1): 42 - 48.
- [13] GU C, CAI Y Q, YANG Z X, et al. Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clays under variable confining pressure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **40**: 118 - 128.
- [14] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(6): 1073 - 1076. (LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(6): 1073 - 1076. (in Chinese))
- [15] 陈存礼, 杨 鹏, 何军芳. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1551 - 1556. (CHEN Cun-li, YANG Peng, HE Jun-fang. Research on dynamic characteristics of saturated compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1551 - 1556. (in Chinese))
- [16] 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 You-yun, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Experimental research on dynamic characteristics of roadbed compaction loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1037 - 1046. (in Chinese))
- [17] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1464 - 1469. (WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in different regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1464 - 1469. (in Chinese))