

DOI: 10.11779/CJGE2019S2035

海东地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究

文少杰, 张吾渝*, 曾垂青

(青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 使用英国 GDS 双向动态三轴试验系统对青海省海东地区原状黄土进行动力特性试验研究。试验结果表明: 动应变 $\varepsilon_d < 1\%$ 时, 动剪切模量随动应变的增加急剧减小; 动应变 $\varepsilon_d > 1\%$ 时, 动剪切模量随动应变的增加减小缓慢, 后期基本趋于稳定。动剪切模量随固结围压、固结应力比、加载频率的增大而增大, 且增大幅值随应变的增大呈现减小的趋势。在动应变 $\varepsilon_d < 0.5\%$ 时, 阻尼比随动应变的增加迅速增大; 在动应变 $\varepsilon_d > 0.5\%$ 时, 阻尼比随动应变的增加缓慢增大; 在较小动应变时, 固结围压、固结应力比、加载频率对阻尼比无明显的影响, 随着动应变的增大, 阻尼比随固结围压、加载频率的增大而减小, 随固结应力比的增大而增大。

关键词: 循环荷载; 原状黄土; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0137-04

作者简介: 文少杰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: wenshaojie0601@163.com。

Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in Haidong area

WEN Shao-jie, ZHANG Wu-yu, ZENG Cui-qing

(School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The dynamic characteristics of the undisturbed loess in Haidong area of Qinghai Province are studied by using the British GDS bidirectional dynamic triaxial test system. The test results show that: when the dynamic strain ε_d is smaller than 1%, the dynamic shear modulus decreases sharply with the increase of the dynamic strain, while it decreases slowly with the increase of the dynamic strain and tends to be stable at the later stage when the dynamic strain ε_d is larger than 1%. The dynamic shear modulus increases with the increase of the consolidation confining pressure, consolidation stress ratio and loading frequency, in addition, the increasing amplitude decreases with the increase of the strain. When the dynamic strain ε_d is smaller than 0.5%, the damping ratio increases rapidly with the increase of the dynamic strain. When the dynamic strain ε_d is larger than 0.5%, the damping ratio increases slowly with the increase of the dynamic strain. When the dynamic strain is small, the consolidation confining pressure, consolidation stress ratio and loading frequency have no clear influence on the damping ratio. With the increase of the dynamic strain, the damping ratio decreases with the increase of the confining pressure and loading frequency, however, it increases with the increase of the consolidation stress ratio.

Key words: cyclic load; undisturbed loess; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引言

黄土是一种第四纪沉积物, 中国黄土覆盖面积约为 63.5 万 km²^[1], 多分布于中西部地区, 其具有结构疏松、大孔隙和水敏性等特殊性质, 遇水易发生流失、滑塌、湿陷等。随着中西部地区基础设施建设迅速发展, 黄土动力学特性的研究就显得尤为重要。

近年来, 关于黄土动力特性研究已取得了诸多成果。李瑞山等^[2]对比分析荷载频率对砂土和黏土动剪切模量、阻尼比的影响规律。刘亚明等^[3]分析了动剪切应变、围压和固结应力比对压实黄土动剪切模量、阻尼比的影响。骆亚生等^[4]、王军海等^[5]、刘保健等^[6]

研究了动强度受含水率、干密度和加载频率的影响规律。KripaUperti 等^[7]认为围压对阻尼的影响小于其对剪切模量的影响; 应变对阻尼比的影响大于对剪切模量的影响; 剪切模量随荷载循环次数的增加而减小。Dutta 等^[8]进行了共振柱试验, 分析围压、剪切应变和相对密度对砂土动剪切模量、阻尼比的影响。李焱等^[9]分析了频率对动强度的影响, 黄土的动强度随频率的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768060); 青海省科技厅项目(2017-HZ-804, 2017-ZJ-792)

收稿日期: 2019-04-30

*通讯作者 (E-mail: qdzwy@163.com)

升高而增大。王志杰等^[10]分析了不同地区原状黄土的动剪切模量与阻尼比的变化规律,认为原状黄土的动剪切模量、阻尼比存在区域性差异。

本研究选取海东地区原状黄土为对象,采用英国 GDS 双向动态三轴试验系统进行试验,分析固结围压、固结应力比、振动频率等因素对原状黄土动剪切模量、阻尼比的影响。

1 试验概况

1.1 试验仪器及方法

使用英国 GDS 双向动态三轴试验系统,通过 GDSLAB 软件进行试验操控和数据记录。

试验采用应力控制逐级加载方式研究围压、振动频率和固结应力比对原状黄土动剪切模量和阻尼比的影响。采用固结不排水(CU),固结应力比取 1.0, 1.5, 2.0, 固结围压为 80, 120, 160 kPa。综合考虑土质情况,本文以试样的轴向变形不超过 0.01 mm/h 为固结完成标准。固结完成后,关闭排水阀门,在竖向由小到大逐级增加施加正弦波形式周期性动剪应力,其振动频率 $f=0.5, 1.0, 2.0 \text{ Hz}$, 每一级振动 20 次,直到试样达到破坏标准,如表 1。考虑到非饱和原状黄土大孔隙等因素,本次试验在没有明显屈服点时,认为轴向应变达到 5% 即为土样破坏^[11]。

表 1 动应力和动力幅值关系

Table 1 Relationship between dynamic stress and amplitude

动力幅值/kN	0	0.024	0.048	0.072	0.096	...
动应力/kPa	0	20	40	60	80	...

1.2 原状黄土试样制备

本次试验所用原状土样采自海东地区某黄土地带。现场观察到该土样呈浅黄色,含有少量植物根系,具有较大孔隙,垂直节理发育,土质较为脆弱。采用烘干法测得其天然含水率为 7.37%~8.46%,天然干密度为 1.21~1.35 g/cm³,基本物性指标如表 2 所示。

表 2 原状黄土土样的物理性质指标

Table 2 Physical properties of undisturbed loess soil samples

土粒相对密度 G_s	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	压缩指数 $a_{l-2} / \text{MPa}^{-1}$
2.71	15.5	26.0	10.5	0.32

试验所用试样为直径为 39.1 mm,高度为 80 mm 圆柱体。按照《土工试验规程》SL237—1999 中规定的方法,采用特制削土盘进行原状土削样,并测定其含水率,然后放入模具中进行注水滴定对试样进行单一含水率的控制,使土样含水率达到 9%,并用保鲜膜、密封袋密封保存,待试样内部水分均匀后使用。本文为控制干密度对试验结果的影响,使用同一深度土样,干密度差值控制在 0.02 g/cm³ 以内^[12]。

2 原状黄土动剪切模量

2.1 原状黄土动剪切模量随动应变变化规律

原状黄土在加载初期,动应变较小时其动剪切模量较大,如图 1 所示。加载初期原状黄土在长期自然沉积过程中形成的原生结构骨架具有较强的抗剪切变形能力,表现出在较小的动应变下具有较大的剪切模量;随着动应变的增加,原生结构骨架遭到破坏动剪切模量随之急剧下降;随着动应变的继续增加,原生结构骨架逐渐破坏,试样内部土颗粒重新排列组合形成的次生结构使得动剪切模量在后期趋于稳定。

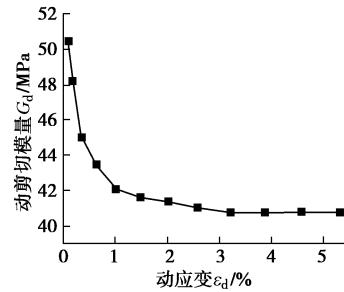


图 1 动剪切模量随动应变变化规律典型曲线

Fig. 1 Typical curve of dynamic shear modulus changing with dynamic strain

2.2 围压对原状黄土动剪切模量的影响

如图 2 所示,在相同动应变条件下动剪切模量随围压的增大而增大,但是增幅随动应变的增加呈现出弱减小趋势。原状土样在较大的围压下,土颗粒之间较为紧密地接触,使其拥有较大的咬合力、黏结力和摩擦阻力,需要较大的动剪应力才能打破土颗粒间的平衡。所以,随着围压的增大,土体产生相同动剪应变时需要更大的动剪应力。循环荷载的作用,土体内部的能量逐渐积累,动应变逐渐增大,颗粒间的相互作用力减弱,增幅呈现出弱减小的趋势。

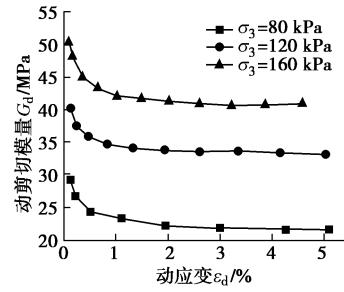


图 2 围压对动剪切模量的影响关系曲线

Fig. 2 Influences of confining pressure on dynamic shear modulus

2.3 固结应力比对原状黄土动剪切模量的影响

在实际情况中,因侧压力系数、泊松比存在使土体一般处于非等向固结状态,固结比一般为 1.4~3.0^[13],如图 3 所示,动剪切模量随固结应力比的增大而增大,增幅随动应变的增加逐渐减小。固结过

程中随着 σ_{1c} 的增加, 初始剪应力增大, 在施加动荷载时所承受的动剪应力也随之增加, 使其具有较高的动剪切模量。循环荷载逐级加载, 使土体内部的能量逐渐积累, 试样逐渐遭到破坏, 颗粒间的相互作用力减弱, 增大幅值呈现出弱减小的趋势。

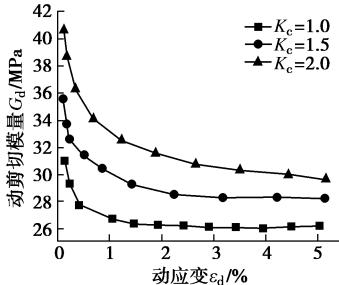


图 3 固结应力比对动剪切模量的影响关系曲线

Fig. 3 Influences of consolidation stress ratio on dynamic shear modulus

2.4 频率对原状黄土动剪切模量的影响

如图 4 所示, 动剪切模量随振动频率的增大而增大, 增大幅值随动应变的增加逐渐减小。在相同固结围压、固结应力比的条件下, 动荷载振动频率越高, 作用在土体上的时间越短, 动能吸收越不充分, 土颗粒间形成的咬合力、黏结力破坏程度越小, 土体保存着较高的抗剪强度, 因此, 原状黄土动剪切模量随加载频率的增加而增加。

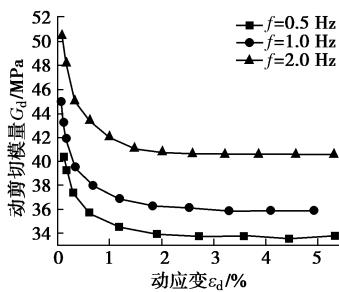


图 4 加载频率对动剪切模量的影响关系曲线

Fig. 4 Influences of loading frequency on dynamic shear modulus

3 原状黄土阻尼比

土的阻尼比 λ 反映土体在周期性循环荷载作用下因其内部颗粒间内摩擦的存在引起动应力与动应变之间关系的滞后性, 表现出循环荷载能量因土体内部阻力而耗散, 是土动力特性的一个参数。

在循环动荷载作用下原状黄土阻尼比随动应变的增大而增大, 在动应变小于 0.5% 时阻尼比增大速度较快, 在动应变大于 0.5% 时呈现出缓慢增加。加载初期原状黄土在长期自然沉积过程中形成的原生结构骨架内部含有较大孔隙, 随着动应变的增大, 土体原生结构骨架被破坏, 孔隙逐渐被土颗粒填充, 颗粒间的接触更为充分, 在动荷载逐级加载作用下颗粒间相互作

用的摩擦力随之增加, 因摩擦阻力而消耗的动能也随之增加, 表现出阻尼比随动应变的增大而增大。

在不同外界因素条件下, 原状黄土阻尼比在较小动应变下固结围压、固结应力比、加载频率对其无明显的影响, 但在较大动应变下阻尼比随固结围压、加载频率的增大而减小, 随固结应力比的增大而增大。较高的固结围压使土体颗粒较为紧密相互位移不易发生, 能量不易消耗, 阻尼较弱; 推测由于固结比的存在, 土体在固结过程中由于轴向力大于径向力, 使土体颗粒在径向方向产生了拉力, 颗粒之间在径向的黏结力等被部分抵消, 在循环荷载作用下径向颗粒间易于滑动, 产生较高的能量消耗, 阻尼较强; 较高的振动频率, 动荷载作用在土体的时间较短, 动应力在试样中的传递、能量的消耗不够充分, 表现为阻尼比随振动频率的增大而减小 (图 5~7)。

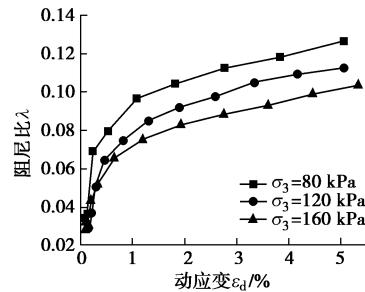


图 5 围压对阻尼比的影响关系曲线

Fig. 5 Influences of confining pressure on damping ratio

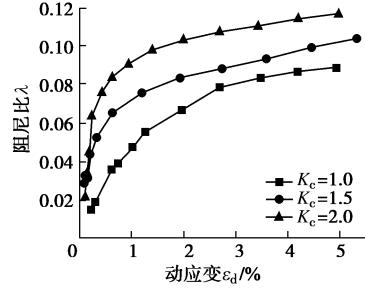


图 6 固结应力比对阻尼比的影响关系曲线

Fig. 6 Influences of consolidation stress ratio on damping ratio

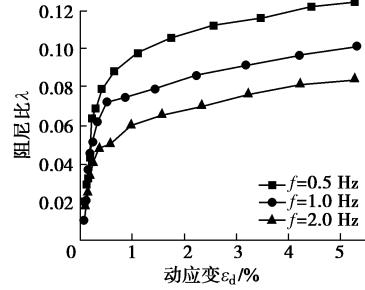


图 7 加载频率对阻尼比的影响关系曲线

Fig. 7 Influences of loading frequency on damping ratio

4 结 论

以海东地区非饱和原状黄土为研究对象, 利用英

国 GDS 双向动态三轴试验系统对其动剪切模量和阻尼比进行了试验研究, 其结果如下:

(1) 动剪切模量在 $\varepsilon_d < 1\%$ 时随动应变的增加迅速减小; 在 $\varepsilon_d > 1\%$ 动剪切模量随动应变的增加减小缓慢, 后期基本趋于稳定。

(2) 动剪切模量随固结围压、固结应力比、加载频率的增大而增大, 且增幅值随动应变的增大呈现减小的趋势。

(3) 阻尼比在动应变 $\varepsilon_d < 0.5\%$ 时, 随动应变的增加迅速增大; 在动应变 $\varepsilon_d > 0.5\%$ 时, 随动应变的增加缓慢增大。

(4) 在较小动应变时, 固结围压、固结应力比、加载频率对阻尼比无明显的影响; 随着动应变的增大, 阻尼比随围压、加载频率的增大而减小, 随固结应力比的增大而增大。

参考文献:

- [1] 张吾渝. 黄土工程[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018. (ZHANG Wu-yu. Loess engineering[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2018. (in Chinese))
- [2] 李瑞山, 陈龙伟, 袁晓铭. 荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 71 - 80. (LI Rui-shan, CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, et al. Experimental study on influences of different loading frequencies on dynamic modulus and damping ratio[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 71 - 80. (in Chinese))
- [3] 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). (LIU Ya-ming, WANG Jia-ding, et al. Dynamic characteristics of compacted loess under cyclic loads[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3). (in Chinese))
- [4] 骆亚生, 田堪良. 非饱和黄土的动剪模量与阻尼比[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 830 - 834. (LUO Ya-sheng, TIAN Kan-liang. Dynamic shear modulus and damping ratio of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 830 - 834. (in Chinese))
- [5] 王军海, 刘亚明. 基于动三轴试验的压实黄土动强度特性研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(3): 439 - 444. (WANG Jun-hai, LIU Ya-ming. Dynamic strength properties of compacted loess based on dynamic triaxial test[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3): 439 - 444. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] KRIPAUPTREI E C. Dynamic properties of residual soil over a wide range of strain[C]// Second Pan-American Conference on Unsaturated Soils. Dallas, 2017: 388 - 397.
- [8] DUTTA T T, SARIDE S. Influence of shear strain on the poisson's ratio of clean sands[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(5): 1359 - 1373.
- [9] 李焱, 骆亚生, 谭东岳. 振动频率对压实黄土动强度特性的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 130 - 133. (LI Yan, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue. Effects of vibration frequency on dynamic strength properties of compacted loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 130 - 133. (in Chinese))
- [10] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞. 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, 28(9): 1464 - 1469. (WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in different regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 28(9): 1464 - 1469. (in Chinese))
- [11] 万战胜, 杨喆, 王家鼎. 列车振动荷载作用下原状黄土动力特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(2): 47 - 51. (WAN Zhan-sheng, YANG Zhe, WANG Jia-ding. Experimental study on dynamic properties of intact loess under train vibrating load[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(2): 47 - 51. (in Chinese))
- [12] 骆亚生, 李瑞, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(6): 1041 - 1046. (LUO Ya-sheng, LI Rui, TIAN Kan-liang. Research on method of dynamic characteristics tests for unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(6): 1041 - 1046. (in Chinese))
- [13] 郭婷婷, 秦梅梅. 土动三轴试验参数选取的理论分析与计算[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 144 - 149. (GUO Ting-ting, QIN Mei-mei. Theoretic analysis of parameters selection of dynamic triaxial tests[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 144 - 149. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)