

# 振动频率对压实黄土动强度特性的影响

李焱, 骆亚生, 谭东岳, 杨利国, 付中原

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 利用动扭剪三轴仪对压实黄土进行了不同振动频率下的试验研究, 分析了振动频率  $f$  对压实黄土的动强度和动强度参数的影响规律。研究表明, 在一定围压下, 压实黄土动强度均随振动频率  $f$  的升高而增大, 与振动频率呈正相关关系; 在试样振动频率确定的情况下, 压实黄土的动强度随围压的增加而增大; 压实黄土的动黏聚力  $c_d$  和动内摩擦角  $\varphi_d$  均随着频率的增大而升高; 动强度参数中  $c_d$  和  $\varphi_d$  随振次的增加均呈减小并最终趋于稳定的趋势。

**关键词:** 压实黄土; 振动频率; 动强度; 动强度参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)04-0130-04

中图分类号: TU411.8

## Effects of Vibration Frequency on Dynamic Strength Properties of Compacted Loess

LI Yan, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue, YANG Li-guo, FU Zhong-yuan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Shear failure of compacted loess in different frequencies is studied using a torsion shear apparatus and the effects of frequency on dynamic strength and dynamic strength parameter are investigated. (1) At a certain defined confining pressure, dynamic strength of compacted loess is increased with the rise of the frequency, showing a positive relation with frequency. (2) At a certain defined frequency, dynamic strength of compacted loess is increased with the rise of confining pressure. (3) Both dynamic cohesion and internal friction angle of compacted loess are increased with the rise of frequency. (4) The dynamic cohesion and the internal friction angle are decreased and tend to be steady with the increased vibration.

**Keywords:** compacted loess; frequency of vibration; dynamic strength; dynamic strength parameter

黄土在我国西北地区广泛分布, 压实黄土在西北地区的水利和土木工程建设中有着广泛的应用。随着经济的发展和西部大开发战略的持续开展, 我国将在黄土地区兴建更多的建筑物和构筑物。不同的工程环境会产生不同的振动频率, 如在发生地震时, 振动频率一般为 1~4 Hz; 在爆破作用下, 荷载会以很大频率循环产生; 交通荷载作用的频率与通过车辆的频率有关; 挡水坝受到的波浪荷载频率与风力有关。以上这些工程状况, 有的振动频率很高, 如爆破荷载, 而有的相对很低, 如交通荷载和波浪荷载。不同的振动频率, 对土体的工程性质影响是不一样的。所以仅仅研究某一个振动频率下黄土的动力特性是远远不能满足工程实际情况要求的, 需要研究在不同振动频率下, 黄土土体的动力特性。

目前, 对其它类型土在不同振动频率下动强度变化的研究成果表明, 黏性土的动强度随着振动频率的增加而升高, 但频率继续升高后, 动强度却有下降的

趋势<sup>[1]</sup>, 或者增加幅度有所降低<sup>[2]</sup>。饱和砂土在较高振动频率下能更迅速地达到某一变形、孔压和强度发挥水平, 较高振动频率也使饱和砂土产生液化的可能性显著增大<sup>[3]</sup>。饱和砂卵石土在不同振动频率的往返荷载作用下, 频率越大, 达到破坏所需要的振次也越多, 但破坏所需的振动时间却是减少的<sup>[4]</sup>。关于振动频率对黄土动力特性的影响的研究成果<sup>[5-6]</sup>表明, 不同振动频率条件下, 原状黄土的动本构关系均服从双曲线模型; 频率的增长会使强夯黄土的动模量和阻尼比增大, 但这种增大的程度随频率增长而减小。

关于振动频率对黄土工程性质的研究目前尚缺乏统一的结论。因此, 研究振动频率对压实黄土动强度及其动强度参数的影响规律, 是有一定的现实意义的。

## 1 试验方案、仪器及土料

### 1.1 试验方案

针对普通动三轴仪存在施加动荷载不均匀、不对

收稿日期: 2008-12-22

修回日期: 2009-03-01

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-06-0864)

作者简介: 李焱(1985-), 男(汉族), 河南省永城市人, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究。E-mail: liyan6609@163.com。

通信作者: 骆亚生(1967-), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程方面的生产与科研工作。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

称以及试验易与试样帽脱离或被拉断等缺点, 本研究采用动应力状态更符合实际情况的扭转三轴仪进行试验研究。试验采用4个不同剪切振动频率, 分别为0.1, 0.2, 1, 5 Hz。采用3个不同围压, 分别为50, 100, 200 kPa, 试验采用的固结比  $K_c = 1.5$ , 共有36个试样。

固结时, 当60 min内试样轴向变形小于0.01 mm时, 就认为试样已经固结稳定。试样固结稳定后, 即对其施加预先已经确定的动应力(一般选定能使试样在5~100次就达到破坏标准的动应力)。当试样达到选定的破坏标准时记录此时的振次, 然后依据破坏振次和相应的动应力作出动强度曲线图。

## 1.2 试验仪器

试验所用仪器为日本诚研株式会社生产的DTG

199型电液伺服周期扭转荷载三轴仪, 仪器由主机、压力系统、动力控制系统和测量系统组成。压力系统由水压力系统和气压力系统两部分组成; 动力控制系统由油泵伺服机构和动力控制屏组成; 测量系统有测量传感器和计算机采集系统组成, 可实现试验数据的自动采集。

## 1.3 试验土料及试样

试验所用黄土土料均取自陕西杨凌某砖厂, 取土深度为2~2.5 m, 属于Q<sub>3</sub>黄土。烘干法测得的天然含水率为16.1%, 天然干密度为1.26 g/cm<sup>3</sup>, 比重为2.68, 天然孔隙比为1.05。试验土料的物理性质指标见表1。经标准击实试验后测得黄土最大干密度为1.60 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率为19.7%, 标准击实曲线如图1。

表1 黄土土样的物理性质指标

液限/ %	塑限/ %	塑性指数	比重	颗粒组成/ %			按塑性分类
				> 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	< 0.005 mm	
35.2	21.6	13.6	2.68	51.33	28.34	20.33	低液限黏土 CL

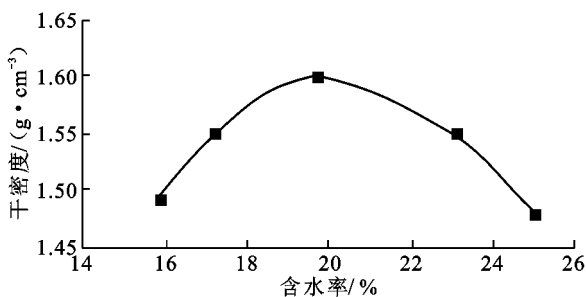
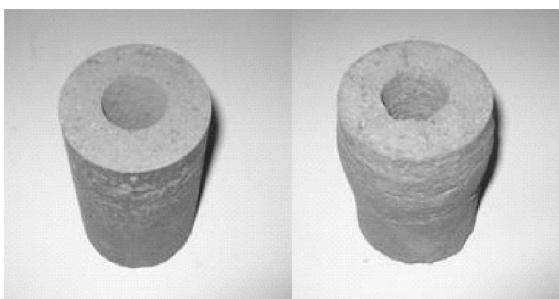


图1 标准击实曲线

试样为空心圆柱体, 外径为7 cm, 内径为3 cm, 高为10 cm, 试样高径比为1.43。

压实黄土试样制备时, 含水率按最优含水率(19.7%)配制, 静置48 h以上, 待水分均匀后, 用动扭剪三轴压样器分4次缓慢、匀速压制, 然后再用空心削样器削制而成。这样既可以精确地制成干密度为1.60 g/cm<sup>3</sup>的试样, 又可以避免因水膜转移法带来的试样内部含水不均匀所致的试验误差。试样试验前后照片如图2所示。



破坏前

破坏后

图2 试样图片

## 2 试验结果及分析

土的动强度通常被定义为在一定次数动荷载作用下产生某一指定破坏应变所需要的动应力,  $\tau_d - \lg n$  关系曲线亦称为土的动强度曲线, 反映了土在不同次数动荷载作用下达到破坏所需的动应力的大小<sup>[7]</sup>。动强度试验中的破坏标准有孔压标准、屈服标准和应变标准<sup>[7]</sup>。本试验是在动扭剪三轴仪上进行的, 在动荷载作用过程中, 压实黄土试样的孔隙水压力基本不变或略有上升, 孔隙气压力也上升缓慢, 因此, 无法采用孔隙压力破坏标准。由于施加的动荷载为水平动剪应力, 试验过程中, 动剪应变的减小和动剪应力的增大都是逐渐变化的, 没有明显的突变。所以, 也不能采用屈服破坏标准, 否则人为因素过大, 增加动强度测定的不确定性。因此, 本试验仍采用通常的应变破坏标准, 即认为试验过程中试样的轴向应变达到3%时, 试样就破坏了。

### 2.1 振动频率 $f$ 对压实黄土动强度的影响

根据试验结果整理出在同一围压, 不同剪切振动频率  $f$  下试样破坏时动剪应力  $\tau_d$  与破坏振次  $n$  关系曲线, 给出压实黄土动强度随振动频率变化曲线如图3。

从图3可以看出, 在围压一定的情况下, 动强度均随振动频率  $f$  的升高而增大, 动强度与振动频率呈正相关关系。产生这种结果的原因可以由摩尔库伦定律公式(1)解释:

$$\tau = c + \alpha \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

当土体在较高振动频率下剪切破坏时, 土中的孔隙水不能及时排出, 引起土中总应力  $\sigma$  增加, 从而增加

了土的抗剪强度  $\tau_c$ 。当试样在较低振动频率剪切破坏时, 土体有足够的时间排出孔隙水, 即总应力  $\sigma$  减小为有效应力  $\sigma'$ , 且土体中土颗粒有较为充裕的变形、滑动

时间, 从而使土颗粒之间摩擦力减小, 所以土体变形较快。也即当剪应力一定时, 剪切速率慢的试样达到破坏标准所需要的剪切次数更少, 土体的强度减小。

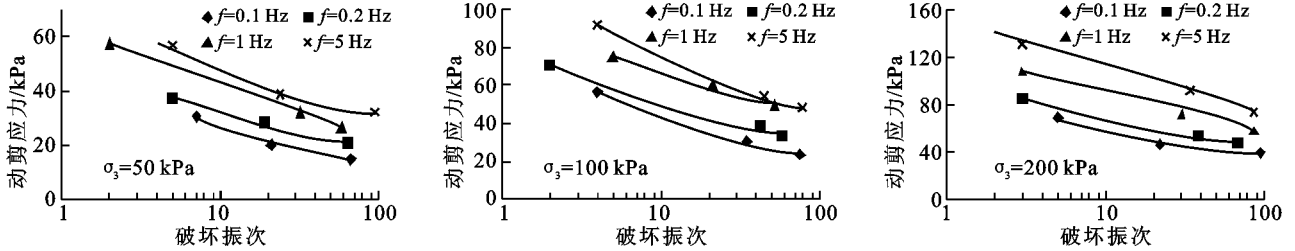


图 3 不同振动频率下压实黄土  $\tau_d - \lg n_f$  关系曲线  
 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, w = 19.7\%, K_c = 1.5$

2.2 围压  $\sigma_3$  对压实黄土动强度的影响

关于围压对黄土动强度的影响, 前人已经做了大量的研究, 取得了比较成熟的结论。

本研究根据试验结果整理出了不同剪切振动频

率  $f$  条件下试样破坏时压实黄土的动强度曲线。给出了较高和较低振动频率条件下的压实黄土强度曲线(图 4)。分析在同一振动频率下, 不同的围压对黄土动强度影响。

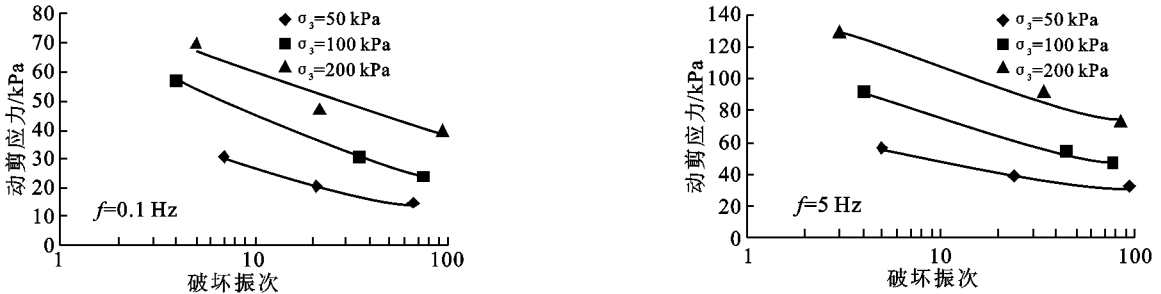


图 4 不同围压下压实黄土  $\tau_d - \lg n_f$  关系曲线  
 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, w = 19.7\%, K_c = 1.5$

由图 4 可以看出, 压实黄土的动强度与固结应力的有关, 具体表现为试样在振动频率相同的情况下, 黄土的动强度随围压的增加而增大, 围压愈大黄土的动强度曲线愈高。这是因为较大的固结围压可以促使土颗粒的联结, 使土体在剪切作用下, 土颗粒不易移动, 产生较大的内凝聚力, 从而围压愈大强度就愈高。

2.3 振动频率  $f$  对压实黄土动强度参数的影响

在振动剪切破坏的过程中, 作用在试样上的应力有: 轴向应力  $\sigma_c$ 、环向固结应力  $\sigma_3$ 、水平剪切应力  $\tau_d$ 。可绘制摩尔圆, 从中可以得知试样的主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$ 。

根据摩尔应力圆可确定大、小主应力及其方向。由应力圆的几何关系, 可导出大、小主应力的计算公式:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c + \sigma_3}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_c - \sigma_3)^2}{4} + \tau_d^2} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_c + \sigma_3}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_c - \sigma_3)^2}{4} + \tau_d^2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$  ——大主应力;  $\sigma_3$  ——小主应力;  $\sigma_c$  ——固

结应力;  $\sigma_c$  ——轴向应力;  $\sigma_c = K_c \sigma_3$ ;  $\tau_d$  ——动剪应力。根据动强度曲线图 3—4, 分别绘制破坏振次  $n = 10, 20, 30, \dots, 100$  次的摩尔圆及其强度包线得到各振动频率下压实黄土的动强度参数(表 2)。压实黄土的动黏聚力和动内摩擦角变化如下图 5—6 所示。由图 5—6 可以看出, 压实黄土的  $c_d$  和  $\varphi_d$  均随着剪切振动频率的增大而升高。试样在振动作用下剪切破坏时, 其土颗粒周围的自由水会产生运动。试样在较低振动频率下剪切破坏时, 这种土颗粒之间的自由水的运动时间较长, 对土颗粒之间的摩擦力会产生的影响也较大。而由于自由水的运动, 颗粒之间的咬合力也会受到影响, 从而使土的黏聚力和内摩擦角降低。在较高振动频率下, 这种自由水的运动时间较小, 故对土的黏聚力和内摩擦角的影响也相对小一些。这与静力情况下土的强度参数不同, 在静力状态下, 由于土不会受到动应力作用, 土颗粒周围自由水的相对运动几乎是静止的, 其强度参数的变化受到自由水的作用较小或者认为不受其影响, 强度参数将保持不变。

表 2 不同振动次数下压实黄土的动强度参数

振次	5 Hz		1 Hz		0.2 Hz		0.1 Hz	
	$c_d / (\text{kPa})$	$\varphi_d / (^\circ)$	$c_d / (\text{kPa})$	$\varphi_d / (^\circ)$	$c_d / (\text{kPa})$	$\varphi_d / (^\circ)$	$c_d / (\text{kPa})$	$\varphi_d / (^\circ)$
10	30.6	21.8	26.2	19.1	23.8	18.2	20.8	15.9
20	26.0	20.1	22.2	18.9	19.9	16.9	14.3	17.2
30	24.9	18.9	19.4	16.8	17.8	16.6	14.2	15.3
40	22.4	18.3	17.5	16.8	17.1	16.3	12.2	15.3
50	20.7	18.4	16.9	16.7	15.5	15.9	11.0	15.4
60	20.0	18.1	16.2	16.6	14.7	15.6	11.8	14.7
70	19.2	17.8	15.2	16.6	13.9	15.5	11.2	14.7
80	19.1	17.4	14.4	16.5	13.0	15.3	11.1	14.6
90	19.0	17.2	14.7	16.5	12.3	15.0	10.9	14.6
100	18.6	17.0	13.4	16.5	11.8	15.3	10.6	14.5

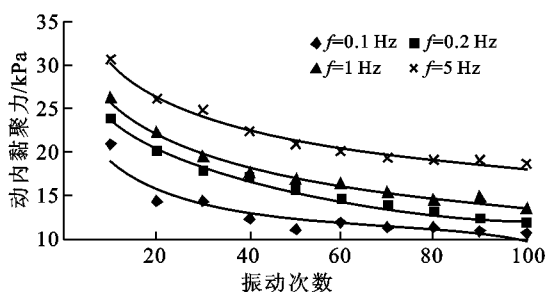


图 5 不同振动频率下  $c_d - n$  关系曲线

$\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, w = 19.7\%, K_c = 1.5$

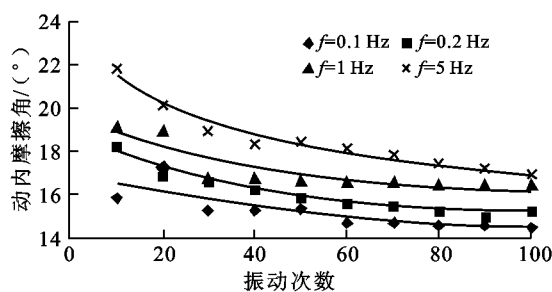


图 6 不同振动频率下  $\varphi_d - n$  关系曲线

$\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, w = 19.7\%, K_c = 1.5$

动强度参数中  $c_d$  和随振次的增大都呈减小并最终趋于稳定的趋势。这是由于土体在没有受到剪切破坏时,其内部土颗粒之间呈现一种很好的平衡和稳定状态,从而产生较大的咬合力和摩擦力,使土体黏聚力和内摩擦角都达到最大值。随着剪切振动作用的展开,土颗粒逐渐被作用在土体内部的剪力拖移出平衡位置,从而使其咬合力和摩擦力都减小,也就是内黏聚力和内摩擦角减小。当振动次数较大后,土颗粒重新排列,并重新形成一种稳定的平衡状态,从而随着振次的增加,土体的黏聚力和内摩擦角逐渐趋于稳定。

### 3 结论

(1) 围压一定的情况下,压实黄土动强度随振动频率  $f$  的升高而增大,动强度与振动频率呈正相关关系。

(2) 试样振动频率相同的情况下,黄土的动强度随围压  $\sigma_3$  的增加而增大,围压愈大黄土的动强度曲线愈高。

(3) 压实黄土动强度参数  $c_d$  和  $\varphi_d$  均随着剪切振动频率的增大而升高,随振次的增大都呈减小并最终趋于稳定的趋势。

#### [参 考 文 献]

[1] 张茹,涂扬举,费文平,等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学,2006,27(5): 699-704.  
 [2] 潘林有,王军. 振动频率对饱和软粘土相关性能的影响[J]. 自然灾害学报,2007,16(6): 204-208.  
 [3] 张建民,王稳祥,振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报,1990.12(1): 89-96.  
 [4] 郭文,李强,王汝恒. 振动频率对饱和砂卵石土动模量和动阻尼比影响的试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(6): 113-115.  
 [5] 王建荣,张振中,王峻,等. 振动频率对原状黄土本构关系的影响[J]. 西北地震学报,1999,21(3): 310-314.  
 [6] 陈存礼,胡再强. 强夯地基黄土的动力特性参数及其振动频率的关系[J]. 西安理工大学学报,1998,14(2): 216-220.  
 [7] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社,1988.