振动频率对原状黄土动本构关系的影响*

王建荣,张振中,王 峻,李 兰

(中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000)

摘要:对原状黄土(Q₄)施加4种频率的等幅正弦波荷载进行动三轴试验,研究振动频率对原状黄土动本构关系的影响.结果表明,对应于4种频率的原状黄土的动本 构关系均服从双曲线模型,但试验常数 a、b 均随振动频率的增大而略有减小.讨论 了试验常数、动弹性模量和阻尼比等随振动频率的变化规律.

主题词: 振动频率; 弹性模量; 动三轴试验; 原状黄土; 动本构关系 **中图分类号:** TU41; TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(1999)03-0310-05

0 引言

研究振动频率对土动力特性的影响,目前多采用通过对土样施加不同频率等幅正弦荷载 的室内试验方法.前人已对饱和砂土和强夯黄土进行过研究^[1,2].而对于振动频率对原状黄土 动力特性的影响尚未进行过专门研究.本文采用原状黄土(Q4)试样,用4种振动频率进行了 动三轴试验,研究不同振动频率条件下原状黄土动本构关系,以及振动频率对原状黄土动模 量、阻尼比等动力参数的影响.

1 试验步骤

试验所用黄土试样为 Q^{4+pl} 黄土状粉土原状土,采自黄河南岸洪积扇上.采样深度为3.50~3.70 m.试样尺寸为 50 mm×100 mm.试样物性参数见表 1.

先在动三轴仪上将试样固结.轴向固结应力取原有上覆土层压力 $\sigma_1 = 60.6$ kPa, 固结应力比 k_c 取为 1.69.

待固结变形稳定后,向试样施加等幅正弦波荷载.采用对同一试样逐级加大应力的分级试验方法.选用 0.5,1,5 和 10 Hz 4 种频率,对每一频率用一个试样,施加 7~8 级动荷载.在动荷载作用的同时,记录试样动应力-应变时程.由于动弹性压缩模量 Ed 反映的是土在周期荷载下弹性变形阶段的动应力-应变关系,所以为了使试样始终处在弹性变形阶段,施加的每级动荷载的幅值以试样不产生残余应变或残余应变不明显为宜.如此逐级加载,直到试样产生明显的残余应变为止.

收稿日期: 1997-05-06

^{*} 中国地震局兰州地震研究所青年地震科学基金资助项目(97-04);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC1999030. 作者简介:王建荣(1966-),男,工程师,现主要从事黄土动力学研究及震害预测、震灾评估工作.

2 试验结果分析

2.1 原状黄土的动本构特性

根据模量试验记录的动应力-应 变时程,可得到原状黄土动应力-应变 曲线 σ_d - ε_d .根据动弹性模量 $E_d = \sigma_d/\varepsilon_d$,还可作出 ε_d/σ_d - ε_d 曲线和 E_d - ε_d 曲线,见图 1.

图 2 为不同频率的 $\epsilon_{d'} \sigma_{d^-} \epsilon_{d}$ 曲 线. 由图 1 和图 2 可以明显看出, 不同 振动频率的 $\epsilon_{d'} \sigma_{d^-} \epsilon_{d}$ 关系较为一致, 可用下式表示:

表1 原状黄土试样物理力学性质指标

指标名称	数值变化范围	
含水量(W)	19. 3 % ~ 24. 83 %	
孔隙比(e)	0.908 ~ 0.936	
密度(γ)	16.9 ~ 17.1 kN/m ³	
干密度(γ_d)	14.0 ~ 14.2 kN/m ³	
比重	2.69 ~ 2.71	
塑限含水量(W_p)	16.3 % ~ 19.9 %	
液性指数(I_L)	0.29~0.35	

$$\epsilon_{d}/\sigma_{d} = a + b \epsilon_{d}$$
 (1)

式中: ɛd 为轴向动应变; σd 为轴向动应力; a、b 为试验常数. 由式(1)可得出:



根据试样在动三轴试验中的受力情况,按下式可将模量试验记录到的 σ_a 和 ε_a 转换为动剪应力 τ_a 和动剪应变 γ_d ,即

$$\tau_{\rm d} = \frac{\sigma_{\rm d}}{2} \tag{3}$$

$$\gamma_{\rm d} = (1 + \mu) \circ \varepsilon_{\rm d} \tag{4}$$

由式(2)~(4)可得:

$$F_{\rm d} = \frac{\gamma_{\rm d}}{2a(1+\mu)+2b\gamma_{\rm d}} \tag{5}$$

由此可见, τ_d - γ_d 关系与 σ_d - ε_d 关系基本上是一致的.

由式(2)和式(5)可分别求得动弹性模量 Ed 及剪切模量 G 的归一化方程:

$$E_{\rm d}/E_0 = \frac{1}{1 + \varepsilon_{\rm d}/\varepsilon_{\rm r}} \tag{6}$$

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma_{\rm d}/\gamma_{\rm r}} \tag{7}$$

其中: E_0 为起始动弹性模量; ϵ_r 为参考正应变; G_0 为起始剪切模量; γ_r 为参考剪应变; μ 为泊松比.

2.2 试验常数 $a \cdot b$ 随振动频率 f 的变化

如图 2 所示,不同振动频率的 1/ Ed-Ed 关系均可用一条直线来较好地拟合,且直线在 1/Ed 轴上的截距 a 和斜率 b 均随频率的增大而减小,见表 2.由表 2 可得 a、b 与 f 有如下关系:

$$\begin{cases} a = 0.001\ 528\ 09 - 1.093\ 02 \times 10^{-5} f \qquad (r = 0.971\ 2) \\ b = 1.143\ 47 - 0.016\ 532 f \qquad (r = 0.993\ 7) \end{cases}$$

其中: f 为振动频率,r 为相关系数.

在相同剪应变 $\gamma = 10^{-3}$ 条件下起始动弹 性模量 E_0 、剪模比 G/G_0 和阻尼比 λ随频率的 变化见表 3.

根据模量试验原理, *a、b* 值的主要影响因 素是土性参数和动荷载的基本要素,即振幅、频 率、持续时间(或振次)及波型的变化.

由于试验所用试样均采自同一地 点,深度均为 3.50~3.70 m, 土性基本 上是均一的, 故试样物性参数对 $a \, b$ 值 的影响可以忽略. 根据动弹性模量 $E_d = \sigma_d / \varepsilon_d$, E_d 反映的是产生单位应变所需 的动应力, $1 / E_d$ 则是单位动应力所产生 的应变, 据此可消除动荷载振幅对 $a \, b$

表 2 双曲线模型 a、b 常数随频率的变化

频率/Hz	$a/ imes 10^{-4}$	b	相关系数 r
0.5	15.25	1.145 29	0.9969
1	15.06	1.117 08	0.998 3
5	14.89	1.059 40	0.994 3
10	14.12	0.979 34	0.997 6

表 3 起始动弹性模量 E_0 ,剪模比 G/G_0

以及阻尼比 λ 随频率的变化

频率/Hz	$E_{0}/[\times 10^{4} \text{ kPa}]$	$G/G_0(\gamma = 10^{-3})$	$\lambda(\gamma = 10^{-3})$
0.5	6.557 4	0.6303	0.132 1
1	6.640 1	0.6331	0.173 9
5	6.715 9	0.6427	0.300 0
10	7.082 2	0.6491	0.334 5

值的影响.本文试验中各级动荷载均取振动次数 N = 10次时的 σ_d 及相应的 ε_d 值.因此对于不同频率的 a, b值,振次是相同的.试验所施加动荷载均为等幅正弦波,波型无变化.

上述分析表明,在原状黄土模量试验中,试验常数 *a*、*b*的变化主要是由于振动频率不同 所致.式(8)也表明,*a*、*b*值与振动频率*f*存在着密切的线性相关关系.

2.3 振动频率对动弹性模量 Ed 及剪切模量 G 的影响

2.3.1 不同振动频率(0.5,1,5,10 Hz)的 Ed- Ed 关系

由图 3 可见, 动弹性模量 E_d 在不同振动频率条件下的变化趋势基本相同. 随轴向动应力 σ_d 的逐级加载, 轴向动应变 ε_d逐渐增大, 而动弹性模量 E_d 相应减小, 起初衰减很快, 随 ε_d 的不 断增加, 这种衰减趋势逐渐变缓; 对应于同一轴向动应变 ε_d, E_d 随振动频率的增高而增大. 经 研究认为, 这可能是由于频率越高, 越接近于快速加载情形的缘故; 对应同一动模量 E_d, 振动 频率越高, 动应变 ε_d 越大.

图 4 为 N = 50 次, 频率 f 为 1.0, 5.0, 10 和 20 Hz 条件下强夯黄土试验所得到的 E_d - ε_d 关 系^①. 与图 3 对比可见, 二者具有相同的变化规律.

2.3.2 不同振动频率条件下的剪切模量 G 与剪应变 γ 的关系

(8)







由图 5 可见, *G*-γ 的变化规律与*E*_d-ε_d相同. 图 4 和图 5 均表明, 振动频率越高, 起始动弹性 模量 *E*₀ 越大, 相应地起始剪切模量 *G*₀ 也越大.

由图 5 还可以看出, 对同一剪应变 γ, 随着振动 频率的增高, 剪切模量 G 也呈增加趋势. 与图 3 比 较, 振动频率的影响程度相近.

2.3.3 不同振动频率的剪模比 G/G₀ 与剪应变 γ 的关系

由图 6 可见, 振动频率的影响程度与图 5 相比要小得多. 不同频率的试验点集中在一条曲线附近, 说明不同振动频率条件下, 剪模比随剪应变的增加呈现衰减趋势, 并且具有很好的"归

一化"特性.值得指出的是,这种"归一化"将为剪模比 曲线的试验测定及其在工程中的实际应用带来很多方 便.

2.4 振动频率对黄土阻尼比的影响

图 7 为不同振动频率条件下的阻尼比 λ-γ 曲线. 通过分析图 7 可得出如下结论:

(1) 黄土阻尼比的变化范围随频率的不同显著不同.低频时分布在一条窄带中.如f=1Hz时,阻尼比变化范围为0.1326~0.1989;各级动应力所对应的阻尼比变化不大.相比之下高频时阻尼比分布范围要大得多.

(2) 黄土阻尼比随剪应变的增加而增大.但频率 不同阻尼比增加趋势差异明显.低频时增加趋势较为 平缓,高频时增加趋势较为迅速.

(3) 随振动频率的增加,对同一剪应变,阻尼比也呈明显增大的趋势.

上述结果表明,振动频率对黄土的阻尼比具有较大影响.其原因可能是由于动荷载的速率 效应所造成的.频率越高,随加载速率增大,阻尼比增大.



图 4 振动频率对强夯黄土试样 E_d-_{εd} 关系的 影响(据刘公社等) Fig. 4 Influence of vibration frequency on E_d ε_d relationship of loces by dynamic compression (N = 50).



图 5 不同频率的 G-Y 关系 Fig. 5 Relationship between shear modulus and shear strain for frequency range from 0.5 Hz to 10 Hz.



3 结论

综上所述,在动三轴试验中,振动频率对原状黄土动本构关系的主要影响为:

(1) 不同振动频率(0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz)条件下,原状黄土(Q4)的动本构关系均服 从双曲线模型,但试验常数 a、b 均随振动频率的增大而略有减小.

(2) 随振动频率的增大, 对应于同一动应变 ε_d, 动弹性模量 *E*_d 略有增加, 而黄土的阻尼比 λ 明显增大.

(3) 不同振动频率的 $G/G_0-\gamma$ 曲线具有良好的"归一化"性状.

衷心感谢孙崇绍教授、段汝文副研究员和王兰民研究员对本文的指导和帮助.

[参考文献]

- [1] 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): 89~97.
- [2] 刘公社, 巫志辉. 振动频率对强夯黄土动力特性的影响[A]. 见: 第四届全国土动力学学术会议论文集. 杭州: 浙江大学 出版社, 1994. 111~114.

EFFECT OF VIBRATION FREQUENCY ON DYNAMIC CONSTITUTIVE RELATIONSHIP OF LOESS

WANG Jian-rong, ZHANG Zhen-zhong, WANG Jun, LI Lan (Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract

Influence of vibration frequency on dynamic constitutive relationship of loess is studied under uniform sine loadings with 4 kinds of frequency. The results show dynamic constitutive relationship of loess for 4 kinds of frequency submits to hyperbolic equation. The test constant a and b decreases with increase of vibration frequency. The effects of vibration frequency on parameters of the hyperbolic equation, elastic modulus, shear modulus, damping ratio are discussed.

Key words: Vibration frequency; Elastic modulus; Dynamic triaxial test; Loess; Dynamic constitutive relationship