

俄罗斯伊尔库茨克地区黄土
动力特性实验研究

王 峻, 李 兰

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 利用动三轴实验系统, 对俄罗斯伊尔库茨克地区黄土的动力特性进行了研究. 获得了该地区黄土的动力特性参数. 分析结果表明, 该地区黄土的动应力-应变关系符合双曲线模型; 动剪模比与剪应变关系曲线具有良好的归一化特性; 影响该地区黄土震陷的主要因素是含水量.

关键词: 黄土; 动力特性; 动三轴实验; 俄罗斯

中图分类号: TU411.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2001)03-0286-05

0 前言

1998 年俄罗斯科学院西伯利亚分院地壳研究所教授 T.Г. 利雅辛柯博士等来中国地震局兰州地震研究所访问时, 提供了俄罗斯伊尔库茨克地区的原状黄土试样. 作者利用动三轴实验系统对该黄土试样的动力特性进行了研究, 探讨了该地区黄土在动荷载作用下的应力-应变关系、动弹性模量、阻尼比以及震陷特性. 本文介绍了主要实验研究结果.

1 实验设备、荷载和土样

在实验中采用 DSD-160 型电磁式振动三轴仪. 动荷载选用频率为 1 Hz 的正弦波. 试样直径为 50 mm, 高为 100 mm, 取自俄罗斯伊尔库茨克地区安卡拉河右岸高阶地上, 目测鉴定为黄土状土, 形成的时代为晚更新世(Q_3). 黄土试样的物理性质指标见表 1.

表 1 黄土试样的物理性质指标

土样 编号	取土深度/ m	密度 γ / [KN·m ⁻³]	干密度 γ_d /[KN·m ⁻³]	含水量 ω /%	孔隙比 e	比重 G	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性 指数 I_p	颗粒组成/%		
										砂粒	粉粒	粘粒
1-98	3.5	16.27	14.01	16.15	0.889	2.70	30.8	22.9	7.9	9.8	73.6	16.6
2-98	0.7	14.90	13.82	7.87	0.915	2.70	25.9	16.5	9.4	32.0	46.2	21.8
3-98	2.5	14.99	12.54	19.23	1.110	2.70	30.3	20.7	9.6	19.4	56.2	24.4

2 实验方法

在动弹性模量和阻尼比的实验中, 首先将土样在静压力下固结. 取轴向固结压力 $\sigma_{1c} = 80$

收稿日期: 2000-08-10
基金项目: 中国地震局“九五”重点项目(95-05-02-03-03B)资助; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2001043.
作者简介: 王峻(1957—), 男(汉族), 河南汤阴人, 高级工程师. 现主要从事工程地震和黄土动力学实验研究工作.

kPa, 侧向固结压力 $\sigma_{3c} = k_0 \sigma_{1c}$ ($k_0 = 0.59$). 待固结变形稳定后, 沿土样的轴向逐级由小到大施加动应力. 每级振动 10 次 (相当于地震烈度 VIII). 在每级振动中都记录动应力和动应变的时程曲线和滞回曲线.

在震陷实验中, 固结条件为 $\sigma_{1c} = 200$ kPa; $\sigma_{3c} = 118$ kPa. 实验方法参见文献[1] .

3 实验结果及分析

3.1 动荷载作用下黄土的应力-应变关系

对中国西北地区黄土的动三轴实验结果表明^[2, 3], 在动荷载作用下黄土的应力-应变关系可用双曲线模型表达. 其表达式为:

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d}; E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \tag{1}$$

$$\frac{\epsilon_d}{\sigma_d} = a + b\epsilon_d \tag{2}$$

式中: σ_d 为动应力, ϵ_d 为动应变, E_d 为动弹性模量, a 和 b 为实验常数, 其大小取决于土的性质.

对俄罗斯伊尔库茨克地区黄土的动三轴实验结果进行了计算拟合, 将 a 值和 b 值列于表 2 中. 由表 2 可见, ϵ_d/σ_d 和 ϵ_d 之间呈线性相关. 因此该地区黄土的动应力-动应变关系符合式(1)所示的双曲线模型.

表 2 土样的 a 值和 b 值

土样 编号	观测 次数	a $/ \times 10^{-4}$	b	相关系数 R
1-98	10	13.25	0.721 3	0.994
2-98	10	9.05	0.380 3	0.996
3-98	11	13.83	0.775 4	0.991

3.2 动弹性模量和阻尼比

实验测得的黄土试样的 $E_d \sim \epsilon_d$ 曲线和 $D \sim \epsilon_d$ 曲线见图 1 和图 2. 表 3 给出了黄土试样的动力实验结果.

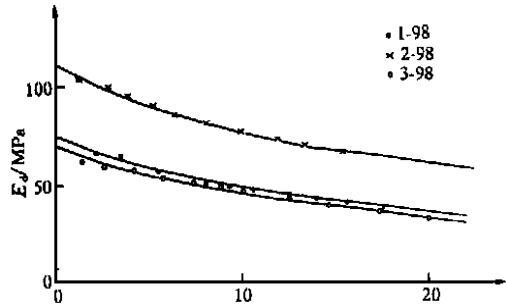


图 1 黄土试样的 E_d - ϵ_d 关系

Fig. 1 E_d versus ϵ_d for loess samples.

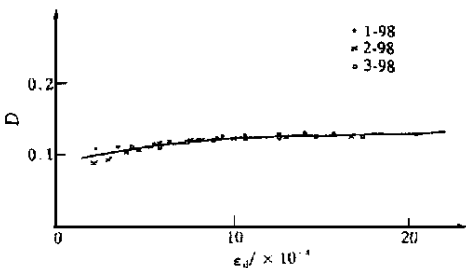


图 2 黄土试样的 D - ϵ_d 关系

Fig. 2 D versus ϵ_d for the loess samples.

由图 1 可见, 黄土的动弹性模量随动应变的增加而降低. 在应力条件相同时, 动弹性模量随含水量和孔隙比的增大而减小. 一般来说, 在相同固结压力下, 土的动弹性模量越大, 其抗震性能越好, 地震时地基发生不均匀沉陷的可能性就小^[4]. 对 3 组土样的综合分析表明, 在天然

含水量状态下, 2-98 土样的抗震性能最好. 从表 3 的实验结果可知, 土样的含水量是动弹性模量的最主要的影响因素之一.

由图 2 可知, 阻尼比 D 随动应变的增大而增大. 动应变越大, 土体内阻消耗量越多, 因此阻尼比越大. 该地区 3 组土样的阻尼比变化范围为 0.089 ~ 0.132.

表 3 土动力实验结果

土样 编号	密度 γ / [KN m ⁻³]	干密度 γ_d /[KN m ⁻³]	含水量 ω /%	孔隙比 e	轴向压力 σ_{1d} /kPa	侧向压力 σ_{3c} /kPa	初始动弹 性模量 E_{dmax} /m Pa	10 ⁻³ 应变的 动弹性模量 E_d /M Pa	阻尼比 D
1-98	16.27	14.01	16.15	0.889	80.0	47.2	75.47	48.87	0.109 ~ 0.132
2-98	14.90	13.82	7.87	0.915	80.0	47.2	110.49	77.80	0.089 ~ 0.123
3-98	14.99	12.54	19.23	1.110	80.0	47.2	72.31	46.33	0.112 ~ 0.130

3.3 动剪切模量和阻尼比

研究地基土在荷载作用下的应力-应变关系及进行地震反应分析计算时, 主要研究动剪应力和动剪应变之间的关系, 以及反映这一特征的指标——动剪切模量 G .

动剪切模量的归一化方程^[2]为:

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma_d/\gamma_r}$$
 (3)

式中: G_0 为最大动剪切模量, γ_d 为动剪应变, γ_r 为参考剪应变.

利用式(3)对实验结果进行了非线性拟合, 得到了动剪模比 G/G_0 与动剪应变 γ_d 关系曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 黄土的动剪模比随动剪应变的增加具有良好的归一化特性.

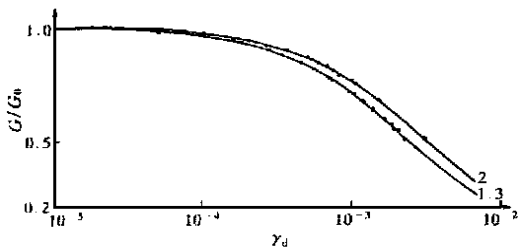


图 3 黄土试样的 $G/G_0 \sim \gamma_d$ 曲线
Fig. 3 G/G_0 versus γ_d for the loess samples.

黄土的阻尼比 D 与动剪应变 γ_d 的关系满足下列双曲线模型^①:

$$D = \frac{\gamma_d}{A + B\gamma_d}$$
 (4)

式中: A 和 B 为实验常数.

利用式(4)对 3 组土样的阻尼比与动剪应变进行拟合, 结果如表 4 所示, $D \sim \gamma_d$ 曲线见图 4.

从表 4 和图 4 可以看出, 用上述双曲线模型拟合阻尼比与动剪应变关系, 效果很好. 阻尼比随

动剪应变的增加而增大. 含水量大的土样, 阻尼比稍大一些.

表 4 阻尼比拟合结果

土样 编号	观测 次数	$A \times 10^{-4}$	B	相关系数 R
1-98	10	8.823	7.220	0.998 8
2-98	10	12.65	6.913	0.999 1
3-98	11	9.577	7.361	0.999 0

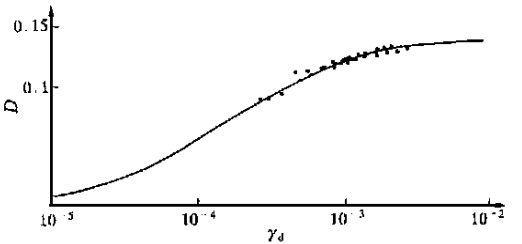


图 4 黄土试样的 $D-\gamma_d$ 关系
Fig. 4 D versus γ_d for the loess samples.

3.4 黄土震陷或残余变形

黄土震陷是指在地震作用下黄土孔隙结构产

① 王建荣. 振动频率对原状黄土动力特性影响的实验研究. 中国科学技术大学硕士学位论文, 1996.

生崩溃性破坏而形成的地面或建筑物的附加下沉. 它与土的残余变形密切相关. 黄土震陷可用残余变形 ϵ_{PN} 来表示^[5], 即

$$\epsilon_{PN} = \frac{H - H'(N)}{H}$$

(5)

式中: N 表示振次, H 和 $H'(N)$ 分别表示动应力 σ_d 作用前和作用 N 次后试样的高度.

由实验的原始记录(图 5)可得到任一振次 N 所对应的残余变形 ϵ_P . 图 6 为 3 组土样的震陷曲线. 由图 5 和图 6 可以看出, 动应力越大, 振动次数越多, 土的残余变形越大. 在动应力作用下土的残余变形与土的性质有关. 表 5 列出了当动应力 σ_d 为 100 kPa 时土样的震陷系数. 由表 5 可见, 该地区黄土试样的震陷系数随含水量的增高而增大. 1-98 土样和 2-98 土样干密度和孔隙比接近, 但由于天然含水量的差异, 使 2 组土样的震陷系数有较大差别. 因此, 可以认为含水量是该地区黄土震陷最主要的影响因素之一.

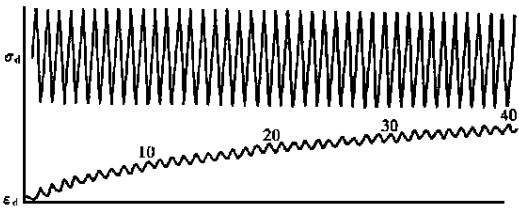


图 5 震陷实验记录
Fig. 5 Record of shock settlement test
for the loess samples.

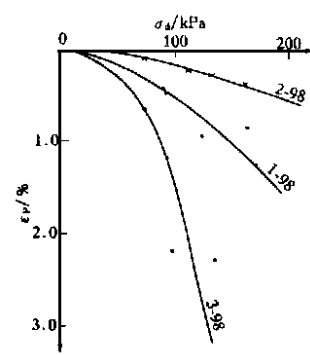


图 6 黄土试样的震陷曲线 ($N = 10$)
Fig. 6 Curves of shock settlement ($N = 10$) for the loess samples.

由于该地区黄土试样的残余变形较小, 在目前含水量状态下, 1-98 和 2-98 土样在地震时产生的附加沉陷可能较小, 而 3-98 土样相对较大.

在表 5 中还列出了中国兰州地区的 4 组 Q_3 黄土的震陷实验结果. 由表 5 可见, 2 个地区的干密度和孔隙比接近而含水量有较大差别的土样的震陷系数非常接近, 如俄罗斯伊尔库茨克地区的 1-98、3-98 土样和中国兰州地区的 L99-1、L99-3 土样. 2-98 与 L99-2 土样的干密度、孔隙比和含水量基本相同, 但是在相同动应力条件下, L99-2 土样产生的残余变形较 2-98 大得多. 另外, L99-4 土样的天然含水量与 3-98 接近, 但震陷系数却大得多. 说明在相同的动应力条件下, 中国兰州地区 Q_3 黄土的震陷性比俄罗斯伊尔库茨克地区黄土强. 引起这种差异的原因可能是二个地区黄土的成因不同.

据俄罗斯学者的研究, 伊尔库茨克黄土是在冻融作用下形成的. 而中国西北地区的 Q_3 黄土主要是风积形成的. 黄土动力学研究结果表明^[9], 黄土的成因类型与震害有一定的关系, 由于风成黄土结构疏松, 震陷及其它次生灾害较为严重. 而次生黄土场地的抗震性能略好于疏松的风成黄土.

表 5 黄土试样的震陷系数

地区	土样编号	干密度 γ_d [$\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$]	含水量 w / %	孔隙比	$\sigma_d = 100 \text{ kPa}$ 时的震陷系数 ϵ_p / %
俄罗斯伊尔库茨克	1-98	13.92 ~ 14.31	15.61 ~ 16.15	0.863 ~ 0.915	0.50
	2-98	13.33 ~ 13.92	7.26 ~ 7.87	0.915 ~ 0.971	0.15
	3-98	12.25 ~ 12.74	20.06 ~ 21.70	1.092 ~ 1.176	1.42
中国兰州	L99-1	13.72 ~ 14.01	7.95 ~ 8.70	0.895 ~ 0.936	0.46
	L99-2	13.43 ~ 13.72	6.72 ~ 7.65	0.929 ~ 0.971	1.43
	L99-3	12.05 ~ 12.74	9.88 ~ 11.80	1.077 ~ 1.195	1.46
	L99-4	13.66 ~ 13.92	17.97 ~ 19.33	0.908 ~ 0.950	3.45

4 结论

(1) 俄罗斯伊尔库茨克地区黄土的动应力-应变关系符合双曲线模型. 动剪模比与剪应变关系曲线具有良好的归一化特性. 利用式(4)对阻尼比与剪应变关系曲线的拟合效果很好.

(2) 影响该地区黄土震陷的主要因素为含水量、动应力的大小及振动次数. 其中含水量是一个最敏感的参数.

衷心地感谢 T.Γ. 利雅辛柯博士等为本次实验研究提供了土样.

[参考文献]

[1] 王峻, 王兰民. 不同地震荷载作用下黄土震陷的试验研究[A]. 见: 第四届全国土动力学学术会议论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 138—141.

[2] 段汝文, 张振中, 李兰, 等. 黄土动力特性的进一步研究[J]. 西北地震学报, 1990, 12(3): 72—78.

[3] 王峻, 王兰民, 李兰. 不同地震荷载对黄土动模量和阻尼比的影响[J]. 自然灾害学报, 1992, 1(4): 75—79.

[4] 段汝文, 张振中, 李兰, 等. 黄土动力特性研究及其在地震小区划中的应用[A]. 见: 第三届全国土动力学学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1990. 107—110.

[5] Wang Jun, Wang Lan-min. Recent research on prediction of seismic subsidence of loess[Z]. 见: 12th World Conference on Earthquake Engineering (New Zealand), 2000. 1483.

[6] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.

THE LABORATORY STUDY ON DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF LOESS IN IRKUTSK, RUSSIA

WANG Jun, LI Lan
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The dynamic characteristics of loess in Irkutsk, Russia are studied by using the dynamic triaxial test. The dynamic parameters of the loess are obtained. The results show that the stress-strain relationship obeys the hyperbolic model and the $G/G_0 \sim \gamma_d$ curves have good normalization character. It is found that the main factor that influences the shock settlement of the loess in Irkutsk is moisture content.

Key words: Loess; Dynamic character; Dynamic triaxial test; Russia