

黄土动力特性的进一步研究*

段汝文 张振中 李 兰 王 峻

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文通过实验及对资料的深入分析,进一步研究了西北地区黄土的动力特性。结果表明,典型黄土(如 Q_3 和新近堆积的 Q_4 黄土)具有比较特殊的地震工程性质——震陷性,振动开始时震陷量较大;在地震作用下湿型黄土的强度降低,有的甚至会发生液化。

一、前 言

中国西北地区地震活动频繁,这里有著名的黄土高原,许多地区被厚层黄土所覆盖,因此,研究黄土的动力特性,对该区的震害预测、防震抗震等是十分重要的。随着西北地区一些城市地震小区划工作的开展,我们开始对黄土的动力特性进行了研究,并进一步扩大研究范围,以探讨在地震作用下黄土的地震工程性质和区域分布规律。本文介绍了对黄土动力特性进一步研究的主要结果。

二、黄土在动荷载作用下的本构关系及模量与阻尼特性

通过对大量原状黄土的动力实验研究,发现 Q_3 和 Q_4 黄土在动荷作用下的应力~应变关系(本构关系)基本上呈双曲线形式,非线性特性十分明显,可用 Hardin—Drnevich 的双曲线模型来描述:

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d} \quad ; \quad (1a)$$

$$E_d = \frac{1}{a + b\varepsilon_d} \quad ; \quad (1b)$$

$$1/E_d = a + b\varepsilon_d \quad 。 \quad (1c)$$

式中 σ_d 为动应力, ε_d 为动应变, a 、 b 为土性参数。也可以写成剪应力与剪应变关系:

$$\tau = \frac{\gamma}{1/G_{max} + \gamma/\tau_{max}} \quad ; \quad (2)$$

$$G_{max} = \tau_{max}/\gamma \quad 。 \quad (3)$$

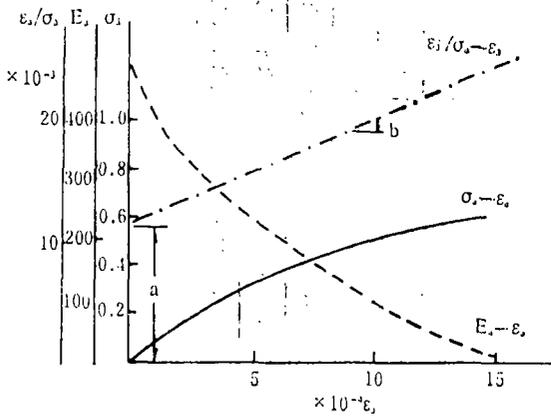


图1 动力应力与动应变关系图

Fig. 1 Relationship between dynamic stress and dynamic strain

因为 $G = \tau/\gamma$ ，由 (2)、(3) 两式可得：

$$G = G_{max} / (1 + \gamma/\gamma_r) \quad (4)$$

(2—4) 式中 τ 为剪应力， γ 为剪应变， γ_r 为参考剪应变， τ_{max} 为破坏时的最大剪应力。

对黄土的动力实验结果如图 1 和图 2 所示。实验结果表明，一般在黄土的骨架结构没有被破坏时，随固结应力增大黄土的应力~应变曲线较陡，动弹性模量随固结应力的增大而增大。在应力条件相同时，黄土的动弹性模量随其本身的孔隙比增大而减小，也随黄土的湿度的增大而减小。此外黄土的骨架结构对其动弹性模量也有一定的影响，虽然一些黄土的物性指标和应力条件相近但其模量相差较大。通常土性参数 a 小 b 也小，其动弹性模量则较大而且随应变增大衰减也较小； a 大 b 也大，动弹性模量则较小而且随应变增大衰减也较大。

表 1

取土地点	取土深 (m)	γ (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	ω (%)	G	e	Sr (%)	ω_L (%)	ω_p (%)	I _p	颗粒组成 (%)			196KPa δ_s (%)
											砂粒	粉粒	粘粒	
西宁	4.5~4.7	16.87	14.12	19.80	2.73	0.896	60.3	27.6	17.8	9.8	20.2	57.8	22.0	5.89
兰州	5.0~5.2	14.12	13.14	7.50	2.71	1.022	19.9	24.5	14.6	9.9	13.0	76.5	10.5	6.14
榆中	6.0	12.94	11.67	10.60	2.71	1.227	23.4	26.4	17.9	8.5	10.5	71.5	18.0	10.58
定西	5.0	14.22	12.55	13.70	2.71	1.117	33.2	29.9	19.2	10.7	7.0	73.5	19.5	10.03
静宁	5.0	13.53	11.57	16.50	2.71	1.297	34.5	30.5	21.8	8.7	6.5	72.5	21.0	11.72
西吉	5.0	13.73	11.96	15.10	2.71	1.221	33.5	30.7	20.2	10.5	7.0	71.0	22.0	12.38
通渭	5.0	13.34	11.18	19.00	2.70	1.368	37.5	30.6	21.7	8.9	6.5	68.0	25.5	12.32
会宁	5.0	13.53	12.15	11.60	2.72	1.194	26.4	26.9	16.9	10.0	16.0	70.5	13.5	10.10
天水	5.0	14.02	11.86	13.10	2.69	1.221	39.9	27.8	18.8	8.5	10.0	66.5	23.5	
宝鸡	5.1	15.00	12.36	21.35	2.73	1.165	50.0	29.6	19.1	10.5	11.0	66.0	23.0	
西安	4.9~5.1	14.61	11.80	22.98	2.73	1.253	50.1	33.3	17.2	16.1	6.5	62.1	31.0	

虽然黄土的成因和物质成分基本相同，但是在西北地区由西北往东南随着地形、地貌的不同，黄土的显微结构和工程性质是有变化的，因而影响到它的模量和阻尼特性。由西往东，我们取了一些土样进行实验研究，取样深度为 5 米左右。表 1 和表 2 分别列出了各地黄土的物理力学性质和模量与阻尼特性。由表 1 和表 2 可知，黄土的天然容重较小，一般都小于 15.0 KN/m³；孔隙比基本上都大于 1，塑性指数大多在 10 左右；粉粒含量接近 70%，粘粒含量低于 20%。当黄土的应变为 10⁻³ 时，其动弹性模量大多数在 40MPa 以下，最小为

表 2

取土地点	取土深 (m)	γ (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	ω (%)	e	σ_{1c} (KPa)	σ_{3c} (KPa)	初始弹性模量 E_0 (MPa)	10^{-3} 成变的 E_d (MPa)	a ($\times 10^{-4}$)	b	阻尼比 (范围)	土 类
西宁	4.5~4.7	19.96	14.22	19.05	0.879	76.73	45.28	97.12	48.71	10.095	1.0025	0.15~0.192	黄土状轻亚粘土
兰州	5.0~5.2	14.02	12.75	9.95	1.084	70.36	41.55	84.38	46.06	11.65	0.968	0.11~0.182	黄土
榆中	6.0	12.75	11.57	10.60	1.293	78.40	46.26	53.02	21.66	18.50	2.670	0.105~0.207	黄土
定西	6.7	13.34	12.15	10.00	1.200	78.40	46.26	73.79	40.38	13.28	1.0989	0.084~0.186	黄土
静宁	5.0	14.22	12.26	16.15	1.170	78.40	46.26	63.21	32.24	15.30	1.506	0.129~0.20	黄土
西吉	5.0	13.24	11.37	16.55	1.340	78.40	46.26	44.59	28.22	21.976	1.2744	0.104~0.150	黄土
通渭	5.0	13.83	11.67	18.65	1.272	78.40	46.26	53.61	31.65	18.271	1.2653	0.098~0.130	黄土
会宁	5.0	13.63	12.26	11.50	1.182	70.66	41.55	45.37	29.79	21.60	1.1324	0.170~0.255	黄土
天水	5.0	14.02	11.86	17.75	1.215	70.56	41.55	75.36	41.75	13.00	1.050	0.130~0.170	黄土
宝鸡	5.1	15.00	12.36	21.35	1.164	83.50	49.29	144.16	73.01	6.80	0.663	0.10~0.20	黄土状亚粘土
西安	4.9	14.61	11.86	22.98	1.253	73.11	43.12	67.13	31.16	14.60	1.689	0.05~0.15	黄土状亚粘土
兰 9-4-1	5.0	14.01	12.74	9.95	1.084	70.36	41.55	84.38	46.06	11.61	0.968	0.16~0.182	黄土垂直取土
兰 9-4-2	5.0	14.48	13.23	9.30	1.004	70.36	41.55	79.58	43.32	12.32	1.033	0.06~0.150	黄土水平取土
兰 9-4-3	5.0	14.90	13.62	9.15	0.945	70.36	41.55	80.26	43.09	12.20	1.058	0.11~0.153	黄土水平取土

21.66MPa, 最大为73MPa。六盘山以西的7个黄土样品的动弹性模量平均为32.86MPa, 取泊桑比 μ 为0.28, 换算成剪切模量为12.84MPa。模量较小说明这些地区的黄土的承载力和抗震性能是较差的。

土的阻尼特性反映了能量在土中传播时的损失情况。表2的结果表明, 黄土的阻尼比在0.05~0.25之间变化, 总的趋势是随着应变增大阻尼比逐渐变大。另外我们还作了黄土样品的共振柱实验, 用自由衰减振动直接测得了剪应变为 10^{-6} ~ 10^{-4} 时黄土的剪切模量和阻尼比, 图2b为黄土的阻尼比与剪应变的关系图。由图2b可见, 阻尼比随剪应变的增大而明显增大。一般情况下软土的阻尼比比硬土稍大。

在同一地点沿水平向及垂直向分别取土样, 在相同条件下进行的对比实验表明, 在这两个方向上, 黄土的结构是比较均一的。

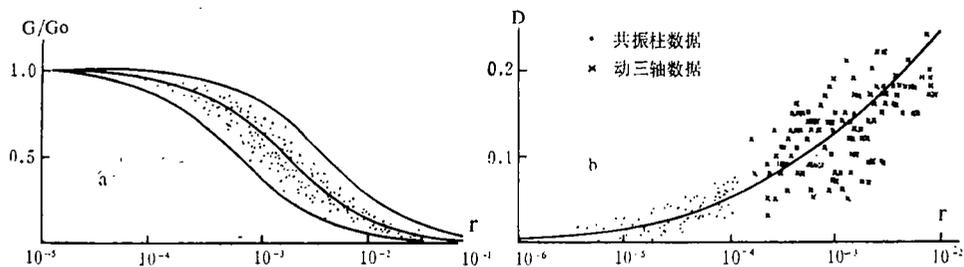


图 2

a. 黄土 $G/G_0 \sim \text{Log } \gamma$ 关系 b. 黄土阻尼比与剪应变关系 ($D \sim \gamma$)

三、黄土的震陷研究

黄土地区的很多震害现象与黄土的震陷是有密切关系的。因此我们进行了黄土的震陷实验研究。

1. 原状黄土震陷的实验研究

把原状黄土成型后, 在 $\sigma_{1,c} = 196\text{KPa}$ 和 $\sigma_{3,c} = 115.64\text{KPa}$ 的压力下进行固结, 当固结变形稳定后加一级较小的动应力使土结构基本不发生变化, 然后再加一级较大的动应力, 使土样产生残余变形, 这样即可得出动应力与相应振次的残余变形之间的关系。图3为几种土类的震陷实验记录, 图4是西北一些地区黄土的震陷实验结果($\sigma_d \sim \varepsilon_d$ 关系)。实验结果表明, 黄土的震陷或残余变形随动应力的增大而增大; 陇西黄土含水量达到25%左右发生液化现象; 随孔隙比的增大黄土的残余变形也增大, 但当孔隙比较小例如0.8左右时就不会产生震陷。对于干型黄土样品, 其残余变形大多集中在前10次振动中(图3c), 振动超过10次以后残余变形逐渐减小以至达到稳定, 表明样品此刻处于压密状态。含水量在20%左右的黄土的震陷较大, 残余变形可达10%以上。我们在兰州市兰山公园的三台阁挖了一个20米深的探井, 每隔5米取一组土样, 共取4组进行震陷实验, 结果表明, 随着深度增大, 残余变形减小。在静宁, 我们挖了一个10米深的探井, 在5米和10米深处各采一组土样进行实验, 结果与上述相同(图4中的G88—2和G88—1)。

一些次生黄土或黄土状亚粘土以及一些软土的震陷与黄土不同。有的振动一开始震陷量就很大, 振动4~5次土样就被破坏了(图3b); 有的在振动一开始基本不发生震陷, 在振动10次或20次以后才发生较大残余变形, 土样随即被破坏(图3a和d)。

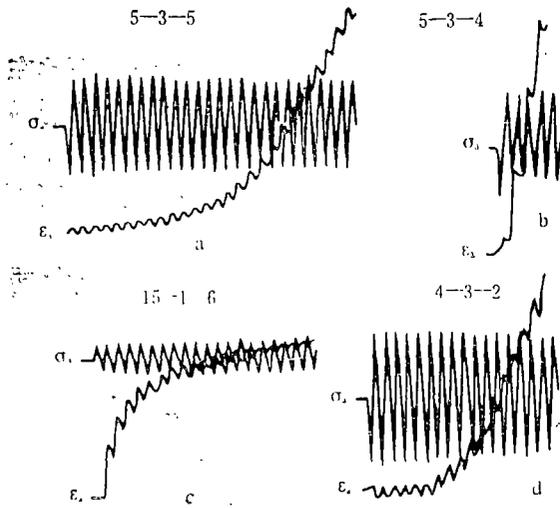


图 3

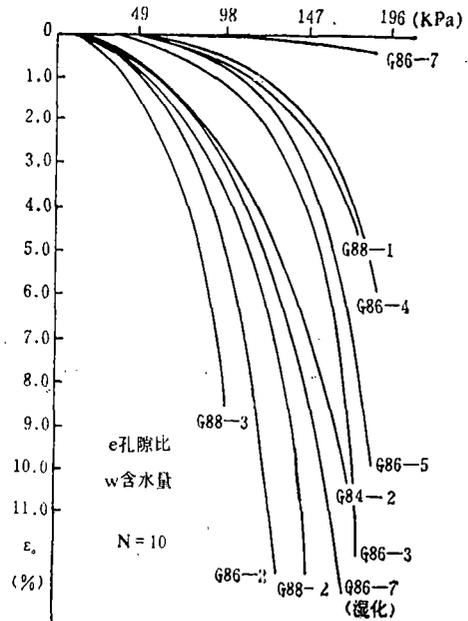


图 4

2. 黄土的震陷与湿陷的比较

经过对比实验我们发现，典型的黄土在196KPa压力下的湿陷系数与相同固结压力下的震陷或震陷系数基本接近，湿陷起始压力与震陷临界动应力也是比较接近的，如表3所示。这是因为震陷和湿陷的影响因素有相似之处，例如都受孔隙比的影响，孔隙比大，震陷和湿陷均大，土的显微结构特别是一些架空颗粒结构的黄土湿陷强烈，震陷量也较大。但是也存在一些差别，含水量较高的土，如大于塑限含水量的土，一般震陷系数都大于湿陷系数；干型黄土含水量小，一般震陷较小，但湿陷系数却较大。另外砂土或亚砂土一般震陷较大，但这类土湿陷较小或不湿陷。

表 3

地点	196KPa压力下的湿陷系数 δ_s	196KPa压力下的震陷系数 ϵ_γ	湿陷起始压力 P_{sh} (KPa)	震陷临界动应力 σ_d (KPa)
兰州	0.04~0.08	0.04~0.077	29.4~49.0	29.4~49.0
静宁	0.049~0.108	0.05~0.110	35.3~53.9	37.2~53.2
西吉	0.04~0.124	0.035~0.121	34.3~46.1	47.04
西安	0.03~0.07	0.056~0.067	24.5~43.1	49.0

四、黄土的动强度实验研究

动强度实验的过程是，将一组样品（3—4个）在同一应力下固结，对每个土样分别施加大、中、小三种动应力，得到一组相同破坏应变下的 $\sigma_d - \log N$ 曲线，然后改变固结应力进行同样实验，作出三组不同固结应力下的三条 $\sigma_d - \log N$ 曲线，得到一定振次的三个不

同破坏动应力，再绘出莫尔圆求出土的动凝聚力 C_d 和动摩擦角 ϕ_d 。

由于很难找到10多个土性均一的土样，所以实验得出的结果是近似的。由于多数黄土的含水量都不高，有的只有百分之几，这类黄土的破坏应变达不到5%，所以只能取2.5%。实验结果表明，干型和湿型黄土的 ε_d -log N关系曲线是明显不同的。随着振次的增加，湿型黄土的应变增加很快而且应变量大，其 ε_d -log N曲线下凹；干型黄土的应变增加较慢而且应变小，因此曲线上凹。对土样做动强度CU实验的同时，也作了静强度UU实验，结果列于表4中。由表4可以看出，一般动强度的摩擦角都比静强度的小，两者相差最大达7—8度湿型黄土的动摩擦角和动凝聚力都降低了，说明其动强度比静强度小。一般情况下干型黄土的动凝聚力增大。有的湿型黄土随着固结压力的增大其强度反而降低，这种土的承载力低于196KPa。这是由于在固结时，土样变形很大，使土的骨架遭到破坏，导致强度降低。

表4

取土地点	静强度UU实验		动强度CU实验			
	C (KPa)	ϕ (度)	ε_f (%)	振次	C_d (KPa)	ϕ_d (度)
西宁	4.61	19.5	5.0	10	25.28	19.1
				20	21.66	19.0
西宁	28.03	22.7	5.0	10	25.28	16.4
				20	17.44	17.7
兰州	21.07	18.0	2.5	10	17.64	17.8
				20	19.59	15.9
			5.0	10	10.78	22.7
				20	11.07	22.2
兰州	24.99	26.1	2.5	10	37.53	18.8
				20	35.48	18.5
静宁	7.84	23.8	5.0	10	12.54	23.5
				20	5.68	24.8
西吉	44.1	17.2	2.5	10	43.32	16.2
				20	41.16	16.1
			5.0	10	59.88	13.5
				20	57.13	13.4

我们所作的黄土的动强度和静强度的对比实验结果，与Seed等的实验研究结果相似。对于干型黄土，在动荷载作用下引起其破坏所要求的总应力为其静强度的100~120%；对于湿型黄土，引起其破坏所要求的总应力为其静强度的80~100%。由于动强度实验比较复杂，静强度实验较为简单，因此根据土的类型可以用静强度来代替动强度，只是在选择安全系数时，干型黄土可小一些，湿型土应该大些。

五、结 语

上述实验是在等效正弦波下进行的动力试验，它与实际地震波的作用是有差别的。为了深入研究黄土的动力特性有必要开展模拟地震波条件下的黄土动力实验研究，这将更有助于探讨在地震作用下黄土的破坏机理和规律。

(本文1989年9月22日收到)

参 考 文 献

- (1) 段汝文, 黄土动力特性的实验研究, 西北地震学报, Vol. 1, No. 2, 1979.
- (2) Braja M. Das, 土动力学原理, 吴世明、顾尧章译, 浙江大学出版社, 1984.
- (3) H. B. Seed and C. K. Chan, Clay strength under earthquake loading conditions, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 92, No. SM2, 1966.
- (4) F. I. Makdisi and H. B. Seed, Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT7, 1978.

FURTHER RESEARCH ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF LOESS

Duan Ruwen, Zhang Zhenzhong, Li Lan, Wang Jun
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)

Abstract

By means of experiments and systematic analysis of the data, the further research on dynamic characteristics of loess was made. The results show that the typical loess (i.e. of Q_3 and Q_4) have special earthquake engineering property—the seismic subsidence (i.e. subsidence caused by earthquake). Loess is sensitive to earthquake and its subsidence is relatively more serious at the beginning of earthquake; strength of wet loess decreases with earthquakes and sometimes it can even be liquefied.