

黄土场地地震陷量的试验预测^{*}

王 峻 王兰民 李 兰
(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 通过不同地震荷载作用下黄土震陷的试验研究对兰州地区几个黄土场地的震陷量进行了预测.发现黄土在随机地震荷载和等幅正弦荷载作用下的震陷量预测结果存在一定的差别.

主题词: 地震荷载 黄土 试验 震陷量

1 前言

黄土震陷是指在地震作用下黄土孔隙结构产生崩溃性破坏而形成的地面或建筑物的附加下沉^[1].它与土的残余变形密切相关.黄土地区的很多震害现象与黄土的震陷是有密切关系的.例如,据前苏联 E·B·波波娃的研究,干燥黄土在Ⅷ度地震时可发生 1 m 的沉陷.另据史料记载,1920 年 12 月 26 日宁夏海原 8.5 级地震时,“海原县城,半城塌陷”;1970 年宁夏西吉地震,震中烈度仅Ⅶ度强,居然也产生了很多滑坡和裂缝.由此可见,震陷是一种重要的,不可忽视的地震灾害.

以往,在进行黄土震陷试验时,主要是采用单一频率的等幅循环荷载(如正弦波等)等效地震作用进行试验研究.众所周知,地震荷载是一种随机动荷载.因此,将等幅循环荷载作用下测得的土动力学参数取作地震荷载直接作用下土—结构系统反应分析的计算参数,只是一种近似的做法.

本文直接将随机地震荷载施加在黄土试样上进行了震陷试验,将其结果用于黄土场地的震陷量预测研究中,并与等幅正弦荷载(频率为 1 Hz 的正弦波)作用下的预测结果进行了对比.通过对不同地震荷载作用下黄土震陷的试验预测研究,试图把更为可靠的预测结果用于工程地基抗震设计和震害预测中,为黄土地区的工程建设、抗震减灾服务.

2 不同地震荷载作用下黄土的震陷试验^[2]

2.1 试验中使用的随机地震荷载

为了增强试验对黄土的针对性,选用的几条随机地震荷载时程(图 1)是兰州地区地震小区划和地震危险性分析中做出的基岩输入波和黄土反应时程,即兰州黄土未来可能遭受的典型随机地震荷载.有关参数见表 1.

2.2 土样及试验方法

^{*} 甘肃省自然科学基金资助课题
收稿日期: 1996-04-18
第一作者简介: 王峻,男,1957 年 9 月出生,工程师,从事工程地震和黄土动力学实验研究.

试验采用的原状黄土试样是在被预测的场地上从探井中不同深度处采得的. 试验时, 将土样削成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体. 然后在动三轴仪上固结, 固结压力分别模拟了原状土样的天然应力状态和在有建筑物附加荷载下的应力状态. 轴向压力 σ_1 分别等于土层的上覆自重压力或 196kPa, 侧向固结压力 $\sigma_3 = k_0 \sigma_1 (k_0 = 0.59)$. 待固结变形稳定后, 向试样轴向施加动荷载时程, 测定振动后土样的残余应变 ϵ_p . 这样在同一固结压力下每组用 4~5 个物性参数相近的试样, 对其分别施加不同幅值的动应力 σ_d , 就可得到一条 $\sigma_d - \epsilon_p$ 关系曲线, 即震陷曲线, 如图 2、图 3 所示.

表 1 选用地震荷载的有关参数

随机荷载名称	卓越周期(s)	持 时(s)	荷载类型	模拟烈度
兰州人造地震波	0.17	11.0	往返型	VIII
兰州黄土反应时程(I)	0.30	15.0	往返型	VIII
兰州黄土反应时程(II)	0.50	25.0	往返型	VIII

为了把更切合实际的土动力特性参数用于地基震害预测, 本文在震陷试验中, 对每一个预测场地的土样(相同的一组土样)分别做了随机地震荷载和与之等效的等幅正弦荷载作用下的震陷试验, 并得到了黄土在不同地震荷载作用下的震陷曲线, 以便用于震陷量计算.

3 震陷量预测方法

为了给工程地基土的抗震设计和处理提供可靠的定量科学资料, 有必要对地基土的震陷量进行预测. 本文采用黄土震陷试验分析计算预测方法^[3,4]对黄土场地在不同地震荷载作用下的震陷量进行了预测研究. 具体作法如下:

- (1) 首先把被预测的黄土场地按其不同的物理性质分为若干层, 在每一层土的中部取原状土样进行震陷试验, 取得震陷曲线.
- (2) 利用本地区地震小区划和地震危险性分析得到的地面水平最大加速度 a_{max} 计算出各土层可能遭受的动剪应力 τ_{di} .

$$\tau_{di} = 0.65 \cdot r \cdot h \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot K_d$$

(1)

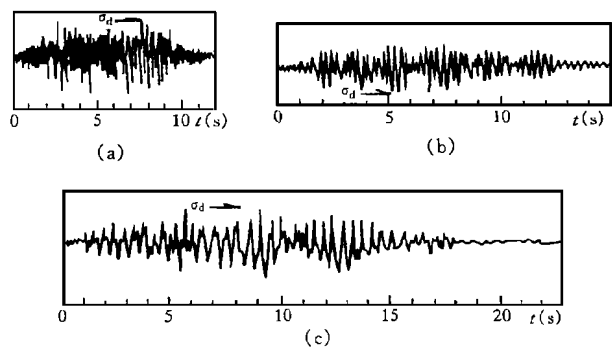


图 1 试验中使用的随机地震荷载时程

Fgi. 1 The time histories of irregular seismic loads used in the test.

- (a) 兰州人造地震波; (b) 兰州黄土反应时程(I);
- (c) 兰州黄土反应时程(II)

上式中的 r 为黄土的密度 (kN/m^3), h 为土层深度 (m), $\frac{a_{max}}{g}$ 为地震系数, K_d 为动应力折减系数, K_d 可由表 2 得到.

动应力大小由下式计算:

$$\sigma_d = 2\tau_d$$

(2)

将 τ_{di} 换算成 σ_{di} , 在震陷曲线上求得 σ_{di} 所对应的震陷系数 ϵ_{pi} , 将相应的系数乘以该地层的厚度 h_i 就得到该地层的震陷量 S_{di} , 即:

$$S_{di} = \epsilon_{pi} \cdot h_i$$

(3)

(3) 把该场地土的各个分层的震陷量求和就得到该场地土的总震陷量 S_d , 即:

$$S_d = \sum_{i=1}^n \epsilon_{pi} \cdot h_i$$

(4)

然后给出总震陷量与地震加速度(或烈度 I)的关系曲线和地震烈度在 VII VIII IX度条件下的震陷量预测结果.

4 震陷量预测结果及分析

本文用上述预测方法对兰州地区几个黄土场地在随机地震荷载和与之等效的等幅正弦荷载作用下的震陷量进行了预测研究. 其预测结果如图 4、表 3 所示. 图 4 是根据震陷试验结果估算的黄土总震陷量与地震加速度关系曲线, 它给出了有关场地土在不同地震加速度水平下的黄土震陷量. 表 3 是由图 4 中震陷量预测曲线确定的各个场地在遭受烈度为 VII VIII IX度地震作用时, 可能产生的最大震陷量.

从图 4、表 3 中可以看出, 不同地震荷载作用下黄土的震陷量随地震动加速度(或烈度)的增高而增大, 但增长趋势不同. 图 4 中 LZ-2 表明, 地震动加速度 $a < 550$

表 2 黄土动应力折减系数

深度 h (m)	应力折减系数 K_d
0.0	1.000
1.5	0.985
3.0	0.975
4.5	0.965
6.0	0.955
7.5	0.935
9.0	0.915
10.5	0.895
12.0	0.850
15.0	0.825

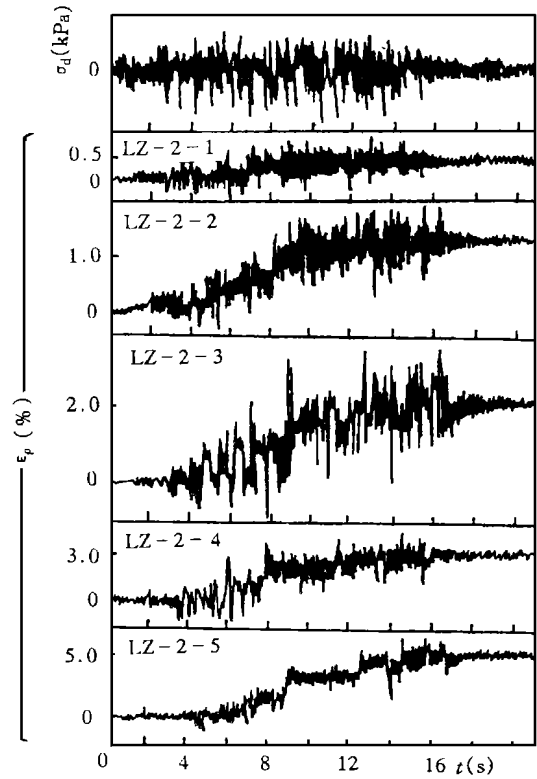


图 2 震陷试验记录

Fig. 2 Records of seismic subsidence test.

gal 时, 随机地震荷载作用下黄土的震陷量都比等幅正弦荷载作用下的小. 当 $a > 550$ gal 后, 随机地震荷载作用下黄土的震陷量增长较快, 比等幅正弦荷载作用下的大. 对 LZ-1、LZ-3 和 LZ-4 来说, 在相同地震动加速度(或烈度)下, 随机地震荷载作用下黄土的震陷量始终都比等幅正弦荷载作用下的小.

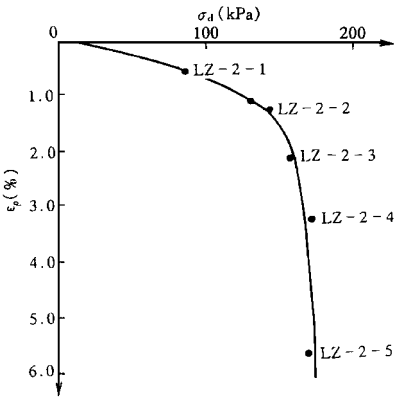


图 3 震陷曲线

Fig. 3 Curves of seismic subsidence.

图 4 的预测结果还表明, 不同卓越周期、峰值和持续时间的随机地震荷载对黄土的震陷量预测结果影响不同。

从以上分析可知, 不论在什么激振方式下, 相同场地土的震陷量随地震动加速度(或烈度)的增高而增大. 在地震烈度为Ⅷ度时, 各个黄土场地的震陷很轻, 无明显震害; 当地震烈度达到Ⅸ度时, 这些黄土场地都将发生严重的震陷灾害。

已有的研究成果^[4,5]表明, 位于高阶地上的具有颗粒架空孔隙微结构的 Q₃ 风成黄土, 一般含水量都比较低, 当这种黄土湿度增大后, 它的震陷量大幅度增加. 也就是说本文预测的这些黄土场地, 如果不严格控制其地基土的湿度, 一旦水浸入地基土, 即使在地震烈度Ⅷ度的影响下都可能产生严重的震陷灾害。

本文用黄土震陷试验分析计算预测方法对以上黄土场地在不同地震荷载作用下的震陷量进行了预测研究. 经对比分析发现, 黄土在随机地震荷载和等幅正弦荷载作用下的震陷量预测结果存在一定差别. 显然将利用由本地区地震危险性分析和地震小区划中做出的地震动时程转换出的随机地震荷载时程直接输入动三轴得到的试验结果用于地基土的震陷量预测更切合实际。

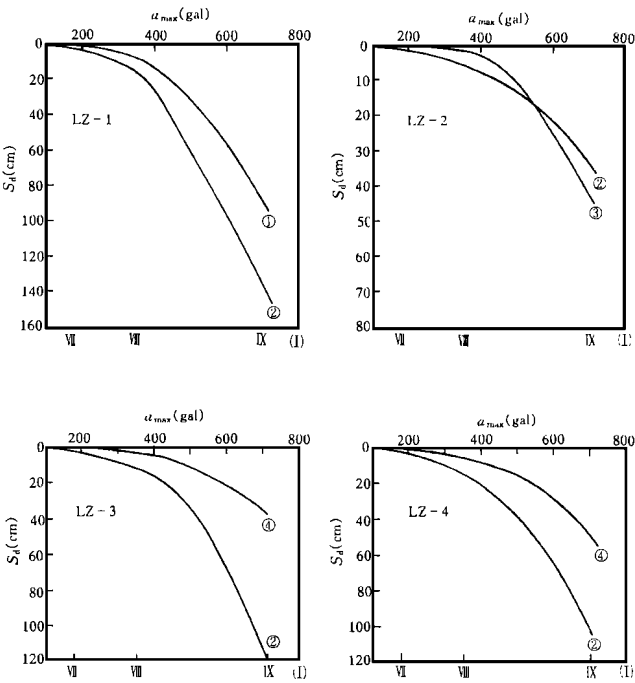


图 4 不同地震荷载作用下黄土
场地震陷量预测曲线

Fig. 4 Predicted curves of seismic subsidence quantities
on loess sites under different seismic loads.
① 兰州黄土反应时程(I); ② 等幅正弦荷载;
③ 兰州人造地震波, ④ 兰州黄土反应时程(Ⅱ)

表 3 黄土场地震陷量预测结果

场地 编号	计算 深度 (m)	土物性参数平均值			地震荷载 名称	各地震烈度下最大震陷量(cm)		
		容重 (kN/m ³)	含水量 (%)	孔隙比		Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
LZ-1	20	15.68	18.55	1.008	兰州黄土反应时程(I)	0.95	7.50	91.50
					等幅正弦荷载	3.05	14.70	142.40
LZ-2	20	14.50	8.90	0.994	兰州人造地震波	0.15	2.00	44.28
					等幅正弦荷载	1.80	5.75	33.60
LZ-3	20	15.05	11.34	0.959	兰州黄土反应时程(Ⅱ)	0.65	3.25	37.50
					等幅正弦荷载	2.85	12.70	115.20
LZ-4	20	14.90	11.65	0.991	兰州黄土反应时程(Ⅱ)	1.90	6.65	51.20
					等幅正弦荷载	3.80	15.20	105.40

5 结 论

通过对不同地震荷载作用下黄土场地震陷的试验预测研究和对比分析, 初步得出以下结论:

(1) 不同地震荷载作用下黄土的震陷量随地震动加速度(或烈度)的增高而增大, 但增长趋势不同. 一般来说, 对于相同的场地土, 随机地震荷载作用下的震陷量预测结果比等幅正弦荷载作用下的小. 黄土在随机地震荷载和等幅正弦荷载作用下的震陷量预测结果存在一定的差别.

(2) 黄土的震陷与随机地震荷载的卓越周期、峰值和持续时间有关. 因此把由本地区地震危险性分析和地震小区划中做出的地震动时程直接输入动三轴得到的震陷系数用于场地土的震陷量预测更接近实际, 其预测结果也更合理.

参考文献

1 汤淼兴, 周建石, 马龙海. 略论震陷的成因类型及震陷的分析评价. 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. 297 ~ 300.

2 王峻, 王兰民. 不同地震荷载作用下黄土震陷的试验研究. 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. 138 ~ 141.

3 WANG Lanmin, ZHANG Zhenzhong, WANG Jun. The method of predicting loess ground earthquake disaster in urban areas by irregular seismic loading test. The First International Conference on Disaster Prevention in Urban Areas (Tehran Iran). 1992.

4 张振中, 王兰民. 黄土地区城市的震陷灾害. 见: 第四届全国工程地质大会论文选集(一). 北京: 海洋出版社, 1992. 364 ~ 370.

LABORATORY PREDICTION OF SEISMIC SUBSIDENCE QUANTITY ON LOESS SITES

WANG Jun WANG Lanmin LI Lan
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB*)

Abstract

Based on the laboratory research on seismic subsidence of loess under different seismic loads, seismic subsidence quantities on several loess sites in Lanzhou were predicted. The result shows that there is a certain difference in the predicted seismic subsidence quantities under irregular seismic loading and equivalent sinusoid loads.

Key words: Seismic load, Loess Test, Seismic subsidence quantity