

随机地震荷载作用下黄土动强度的 试验方法

王兰民 张振中 王 峻 李 兰

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文将APPLE—Ⅰ微机与国产动三轴仪联机,对黄土试样直接施加随机地震荷载时程进行动强度试验,提出了在随机地震荷载条件下,从黄土的动应力与积累残余应变关系曲线确定动强度的动三轴试验方法。进而用这种方法做出的动强度参数对1920年海原8.5级大震所引起的回回川黄土滑坡进行了反演,反演结果与宏观震害相符合。

一、引 言

目前国内外对土动力特性的室内试验研究大都采用等幅循环荷载进行。但等幅循环荷载与地震荷载的性质不同。众所周知,地震荷载是一种随机动荷载。因此,用等幅循环荷载下的土动强度作为斜坡地震稳定性分析的计算参数只是一种近似的做法。

另一方面,在评价斜坡的地震稳定性中所采用的拟静力法及其诸种改进方法,都用地震系数与潜在滑动体重量的乘积等效地震的作用。而地震系数被选择为预测场地的地面运动加速度峰值。这就要求必须在模拟一个实际地震动的不规则荷载条件下确定土的动强度。并且,应该从对应于加速度时程峰值的最大剪应力的角度来表示土的强度。

根据土动强度的这一正确选择,本文将强震加速度记录时程和人造地震波时程转换得到的随机地震荷载时程直接施加于黄土试样,对其动强度的试验方法进行了探讨。

二、动加荷方案和随机地震荷载时程

试验中所采用的加荷方案如图1^{〔1〕}所示。首先将试样在一个轴向固结应力下排水固结,固结比按下式取值,

$$K_c = \frac{1}{K_0} = \frac{1}{1 - \sin \phi} \quad (1)$$

待固结变形稳定后,对试样施加一个幅值相对较小的随机地震荷载序列,在这一阶段的加荷过程中,试样由变形到产生一定幅值的残余应变(如图1中B'点)。再把同一时程但

幅度变大的荷载加到同一试样上。试样进一步变形到图 1 中 B' 点所指的残余应变。依次下去，同一随机动荷载的几个序列被施加到同一试样上，而每一序列荷载的幅值都逐渐增大。如果把轴向应力和残余应变的峰值点连接起来，就获得一条如图 1 中 C'、C'' 和 C''' 所示的虚曲线。这条曲线代表了在一套给定固结应力和随机地震荷载条件下土的动应力—残余应变关系。

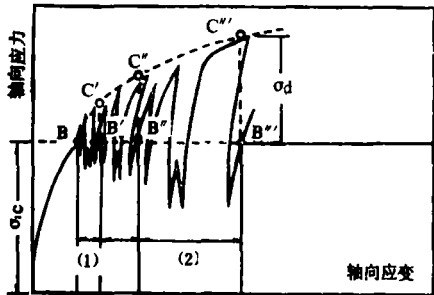


图 1 试验中使用的加荷方案
Fig. 1 Loading scheme used in the tests

在这种加荷方案中，逐渐增大幅值的随机地震荷载被加到一个试样上。因此，该试样对一个随机地震荷载序列的响应就可能受到前面其它较小幅度序列的影响。因为前几级荷载对这级应力—应变关系的影响就可能出现，这就好象该试样与没有经受任何荷载作用前的原始性状相比更软一些一样，即硬度减小。然而，对天然非饱和原状黄土来说，前几级荷载的施加增大了土的密度，从而会导致土的硬度增加一定的量值。因此，不论前期荷载的影响如何，上述加荷方案对做出一条动应力与残余应变的关系曲线是合适的。而且，这种加荷方案有一个优点，即只使用一个试样就能获得一条动应力与残余应变的关系曲线。

试验中选用的 4 条随机地震荷载时程如图 2 a、图 3 a、图 4 a 和图 10 所示，这些时程的特性参数见表 1。

在黄土斜坡的地震稳定性分析及其震害预测中，合理地选用一条或几条该场地未来可能遭受到的地震动时程，作为其动强度的试验荷载，将具有重要的工程实用意义。

三、试验步骤及结果

试验中，采用了 3 组兰州典型黄土的原状试样及 7 组重塑试样。在对回回川黄土地震滑坡反演时，从滑坡附近未扰动的黄土层中开挖 5 米深探井，从中取得未受扰动土样一组。所有试验组都同时做了常规静强度试验。这些试样的物性参数变化范围如表 2 所示。

表 2

物性参数 试样	含水量 (%)	容重 (KN/m³)	孔隙比	试样个数
兰州原状黄土	7.92~9.00	13.7—14.9	0.865—1.060	30
兰州重塑黄土	5.06—18.91	14.0—15.4		54
回回川原状黄土	18.98	13.97	1.038	9

表 1

随机荷载名称	卓越周期 (S)	持时 (S)	荷载类型	模拟烈度
乌恰 6.7 级强余震记录 UD 分量	0.42	18.5	冲击型	7°
兰州人造地震波	0.17	11.0	往返型	8°
人造波反应时程	0.26	11.0	往返型	8°
回回川拟合波	0.50	18.5	往返型	10°

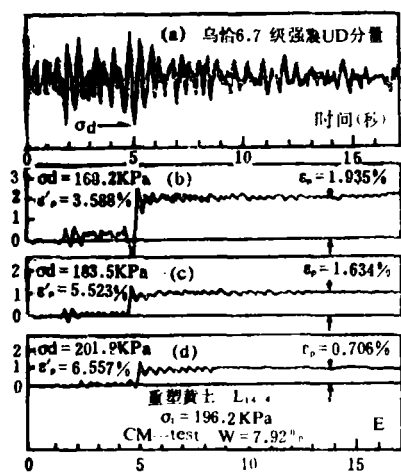


图2 地震荷载作用下黄土动强度试验中残余应变的增长情况

Fig. 2 Evolvement of residual strains in loess dynamic strength test under a seismic load

在动三轴仪上,将试样固结后,开始对其施加随机地震荷载时程,同时记录动应力和应变时程。在一个动应力时程中有一个最大的峰值应力,使三轴加荷活塞到达最低点时实施这一最大动应力的试验称为CM—试验;使三轴加荷活塞到达最高点时实施这一最大动应力的试验称为EM—试验^[1]。在试验中,对每一条随机动荷载均采用上述两种方式试验,以模拟土体在地震时可能遭受到的地震应力的复杂情况。

这样,每组试验需用6个试样,对这些试样分别在 σ_1 为98.1kPa、196.2kPa和294.3kPa三个轴向固结应力下各做二次试验。图2、图3和图4分别给出了在三条随机地震荷载作用下每一种固结应力的两种试验结果。以图2为例,图2a给出了乌恰

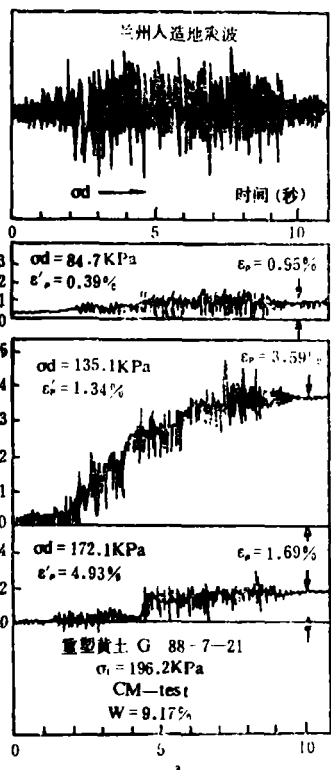


图3 人造地震荷载作用下黄土动强度试验中残余应变的增长情况

Fig. 3 Evolvement of residual strains in loess dynamic strength test under a artificial seismic load

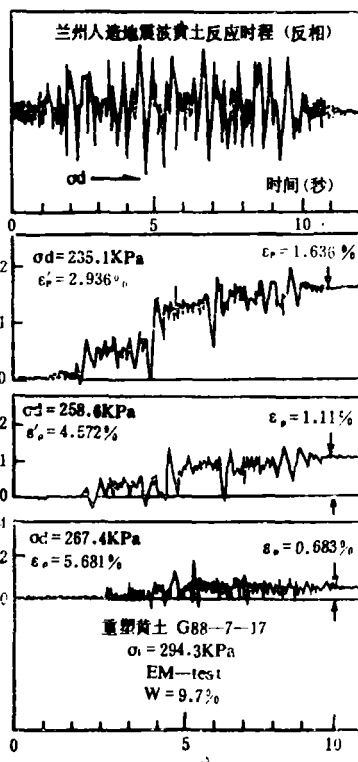


图4 人造地震波反应荷载作用下黄土动强度试验中残余应变的增长情况

Fig. 4 Evolvement of residual strains in loess dynamic strength test under a response time history load

6.7 级强余震加速度UD分量时程被转换成动三轴仪上的轴向应力时程。图 2 b 表明了一个试验过程中, 峰值轴向应力在三轴压缩方向上为 $\sigma_d = 168.2 \text{ kPa}$, 由动荷序列作用使试样产生的轴向残余应变为 $\varepsilon_r = 1.935\%$, 在实施这一动荷序列之前, 试样在其前几个序列里已经受了一次 $\varepsilon'_r = 3.588\%$ 的残余应变。图 2 C 表明了在后面一个试验过程中, 随机动荷的幅度增加到 $\sigma_d = 183.5 \text{ kPa}$, 在前几级加荷序列的试验中已经受了 $\varepsilon'_r = 5.523\%$ 轴向残余应变的试样在该级加荷序列的试验过程中又经受了一次 $\varepsilon_r = 1.634\%$ 的附加残余应变。在最后一级加荷序列的试验过程中, 试样的轴向残余应变积累到 $\varepsilon'_r + \varepsilon_r = 7.263\%$, 如图 2 d 所示。图 3 和图 4 分别表示了在人造地震波和其反应时程作用下的两个试验过程, 它们都与图 2 相类似。值得指出的是, 这三个图中所指示的峰值应力的幅度指的是三轴压缩边的最大峰值。在上述三轴试验过程中, 轴向固结应力朝三轴压缩边施加, 因此, 残余应变和试样破坏的关键现象总是产生在三轴压缩这一边。据此, 在三轴压缩边所记录到的峰值应力就有理由被作为是直接影响残余应变发展和试样破坏的一个关键因素。

四、动强度的定义及其确定方法

等幅循环荷载作用下, 土的动强度被定义为在一定振次作用下, 产生某一指定应变所需的动应力。本文将随机地震荷载作用下土的动强度定义为在一条特定的随机地震荷载时程作用下, 产生某一指定应变所需的动应力。前人的试验结果表明〔2〕, 对于天然非饱和原状黄土, 这一指定应变取为 5% 较为合适。

根据这一定义, 确定随机地震荷载下黄土的动强度参数 C_d 和 ϕ_d , 值可按如下方法进行。

(1) 从诸如图 2—4 的试验记录上读出对每一级随机地震荷载序列所积累的总残余应变值 $\varepsilon'_r + \varepsilon_r$, 以 $\varepsilon'_r + \varepsilon_r$ 为横坐标, 压缩边动应力峰值 σ_d 为纵坐标, 将这些坐标点 $(\varepsilon'_r + \varepsilon_r, \sigma_d)$ 点在坐标图中, 并用光滑曲线连接起来, 就得到了一条动应力与残余应变的关系曲线 (图 6)。

(2) 分别做每一固结应力下 CM 和 EM 两种试验所得到的两条 $\sigma_d - \varepsilon'_r + \varepsilon_r$ 曲线的平均曲线 (图 5), 并由图 6 中的三条平均曲线读出对应于 $\varepsilon'_r + \varepsilon_r = 5\%$ 的动应力值, 将其分别作为相应于三个固结应力下的轴向破坏动应力。

(3) 在 $\tau - \sigma$ 坐标中, 以 $(\sigma_{cd}, 0)$ 为圆心, τ_{cd} 为半径做动静合成摩尔应力圆 (图 7), 由三个固结应力下的三个摩尔圆画出动强度包线, 然后量出动抗剪强度参数 C_d 和 ϕ_d 。其中, σ_{cd} 和 τ_{cd} 可通过下面两式确定:

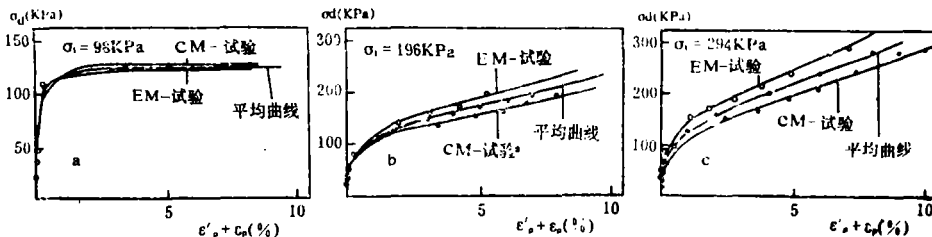


图 5 动应力与残余应变的关系

Fig.5 Dynamic stress-residual strain relationship

$$\sigma_{o,d} = \frac{1}{2} (\sigma_{1e} + \sigma_{d1} + \sigma_{3e}) \quad (2)$$

$$\tau_{o,d} = \frac{1}{2} (\sigma_{1e} + \sigma_{d1} - \sigma_{3e}) \quad (3)$$

图 8 就是按此方法做出的对应于图 5 的一组试样的动强度。

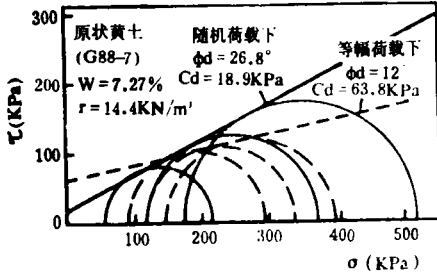


图 8 随机地震荷载下黄土的动强度与
常规动强度试验结果对比

Fig.8 Failure envelops obtained from random seismic and sinusoidal loading test results

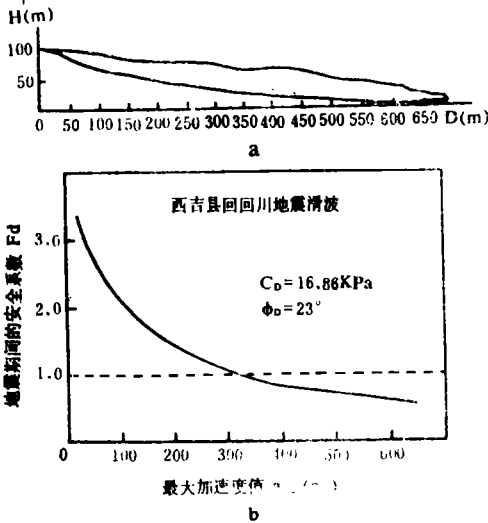


图 9 a、滑坡实测剖面 (段汝文等,
1989) b、计算结果

Fig.9 a. A profile of the landslide (Duan Ruwen et al.,1989) b. Calculating result

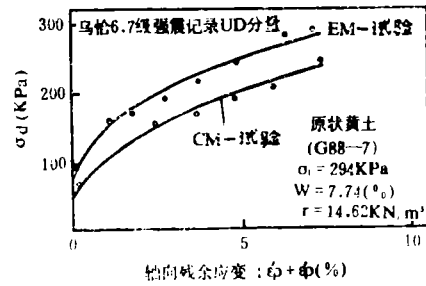


图 6

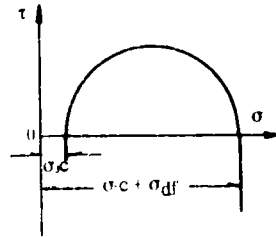


图 7 随机地震荷载下动摩尔应力圆的画法
Fig.7 Construction of Mohr circles and failure envelops associated with static and dynamic loading

五、对回回川地震滑坡的反演

1920年海原8.5级大地震在其极震区西南的西吉一带,造成了规模巨大,数量极多的滑坡。回回川地震滑坡就是其中规模较大、形态较为典型的一个。其实测剖面如图 9 a所示。

回回川滑坡场地距1920年大震震中约70公里,位于10度区内。据此,本文拟合了海原大震时该滑坡场地的地震加速度时程(图 10),将该时程转换为轴向动荷载时程直接施加于所取试样上,按上述动强度的试验方法进行试验,试验结果为: $C_d = 16.86 \text{ kPa}$, $\phi_d = 23^\circ$ 。将 C_d 和 ϕ_d 代入方程 (4) [8],

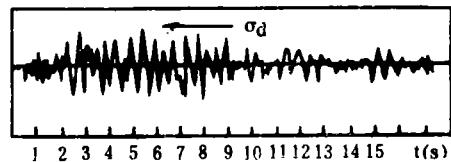


图10 试验所用的随机地震荷载时程
Fig.10 Random seismic time history of load used in the test

对图9a所示滑坡剖面进行计算。计算结果如图9b所示。

$$F_d = \frac{\sum[W \cdot \tan\phi_d + C_d \cdot L \cdot \cos\alpha] / [\cos^2\alpha (1 + \tan\alpha \tan\phi_d / F_d)]}{\sum[W \cdot \tan\alpha + \frac{a_{max}}{g} \cdot W]} \quad (4)$$

(4)式为拟静力法的一种改进形式, 式中 F_d 为安全系数, 其它符号与拟静力法中的意义相同。

图9b表明, 该斜坡失稳的临界最大加速度值为320伽。根据我国烈度表中的加速度考值, 320伽属于8度范围, 那么斜坡滑动所需的地震动强度应在8度以上。事实上, 1920年海原大震时该斜坡处在10度区。因此, 反演计算结果与实际宏观震害是符合的, 1970年西吉发生了5.5级地震, 震中烈度为7度强, 在西吉县再次造成了一些地震滑坡。这无疑验证了西吉地区黄土缓斜坡(坡角在10度左右)失稳的临界加速度值在300伽左右。

六、结 论

1. 本文将微机与国产动三轴仪联机组成的任意波轴向荷载动三轴试验系统, 可初步开展实际地震动作用下土动力性质的试验研究。

2. 随机地震荷载作用下黄土动强度的试验方法, 使地震危险性分析和土层地震反应计算的结果能够直接应用于场地地震害预测。

3. 随机地震荷载作用下的黄土动力特性是目前国内外很少探索的领域, 因此今后需要进一步开展试验研究。

(本文1990年10月14日收到)

参 考 文 献

- [1] K. Ishihara, Akira Nagao and Ryoji Man, Residual Strain and Strength of Clay under Seismic Loading, 4th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 1983.
- [2] 张振中、段汝文, 黄土震陷研究与震害预测, 西北地震学报, Vol. 9, 增刊, 1987.
- [3] K. Ishihara, Hai-lung Hsu, I. Nakazumi and K. Sato, Analysis of Landslides during the 1984 Naganoken-Seibu Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology Problems in Seismic Areas, Vol. 3, Bari, Italy, 1986.

A TEST METHOD OF DYNAMIC STRENGTH OF LOESS UNDER RANDOM SEISMIC LOADING

Wang Lanmin, Zhang Zhenzhong, Wang Jun, Li Lan
(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

Abstract

In this paper, by use of an APPLE-II microcomputer controlling a dynamic triaxial apparatus made at home, the dynamic strength tests are directly performed on a loess by employing random time histories of seismic load. The method of determining the dynamic strength of loess under the seismic loading from relation curves of dynamic stress and residual strain was presented. And then, the Huihuichuan loess landslide induced by the 1920 Haiyuan earthquake ($M_s=8.5$) is inverted, and the inverted result coincides with the real seismic damage.