

黄土震陷下限深度研究

徐舜华, 秋仁东, 王 平

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用兰州和西安地震小区划黄土震陷数据, 获得了这两个地区黄土震陷下限深度预测的经验公式, 与实验结果较为吻合。结果显示在一定的地震动条件下黄土的物理指标含水量、固结压力、剪切波速能够比较好的反映黄土震陷特性, 通过研究它们与残余应变的关系可以预测黄土震陷下限深度。

关键词: 黄土震陷; 下限深度; 含水量; 固结压力; 剪切波速; 残余应变

中图分类号: P642.27; TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)03-0240-05

Study on Boundary Depth of Loessial Seismic Subsidence

XU Shun-hua, QIU Ren-dong, WANG Ping

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The experimental formula for boundary depth of loessial seismic subsidence in Lanzhou and Xi'an areas is acquired by using the data of seismic micro-zone in both cities, and the result is identical with the test result. It is indicated that the characters of loessial seismic subsidence can be reflected better by physic parameters of loess, such as water contents, concretion stress, shear wave velocity, under certain dynamic condition, and the boundary depth can be predicted by studying relationship between them and residual strain.

Key words: Loessial seismic subsidence; Boundary depth; Water contents; Concretion stress; Shear wave velocity; Residual strain

0 引言

中国黄土主要分布在多地震的中西部地区, 其中湿陷性黄土约占总面积的 60%。由于黄土特殊的结构特性, 特别是六盘山以西的黄土呈现粒状架空大孔结构, 胶结物较少, 土质疏松, 强度较低, 在地震时容易产生破裂、滑移和地震沉陷等灾害, 这已被历史地震和当代地震的震害所证实。其中震陷是黄土地区普遍存在的严重地基震害^[1]。

自上世纪 80 年代初黄土震陷概念由兰州地震研究所张振中^[2]等人提出以来, 众多的专家学者已对黄土震陷进行了大量的实验研究, 并取得了阶段性成果。2003 年王兰民教授根据以往研究成果对黄土震陷的各个研究方向进行了详尽的表述, 明确

了黄土震陷的定义; 对黄土震陷的影响因素物性参数(含水量、孔隙比、干密度)、固结应力、振次、荷载类型、卓越周期和有效持时以及峰值等进行了更加全面的分析; 指出了黄土震陷性与其结构特征的关系; 在黄土残余应变经验公式的基础上提出了震陷量估算方法; 提出了基于有限单元法的黄土震陷的二维预测方法^[3]等。

在诸多研究方向中, 黄土震陷的判定尤其是黄土震陷下限深度的确定是一个重要方面。工程实践中根据黄土的物性指标判断黄土场地的震陷性无疑是一种简单易行的方法。自上世纪 80 年代起, 国内学者对黄土震陷机理、影响因素、危害性和预测方

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(50379049); 兰州地震研究所青年基金项目(2006159); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20060022

作者简介: 徐舜华(1974—), 男(汉族), 黑龙江拜泉人, 研究实习员, 硕士, 研究方向为黄土地震工程。

法进行了较多研究,获得了很多可喜的研究成果。1984年李启鹄等^[4]研究了孔隙比对残余应变的影响;1986年余雄飞等^[5]研究了含水量对残余应变的影响;1987年张振中等^[2]曾从孔隙比、湿陷的起始压力及湿陷性强弱等方面讨论过震陷判别标志应用于震害预测的可能性等等。但是目前对黄土震陷下限深度的研究尚少,并缺少有力的数据支持,对实际工程的指导意义较弱。本文根据兰州市三台阁系统的、完整的震陷数据以及兰州地震小区划数据对黄土震陷下限深度进行了一些统计分析研究,给出了在具体条件下的黄土震陷的下限深度。所有资料都来自于西安和兰州地震小区划^{①、②}。根据《湿陷性黄土地区建筑规范》的湿陷性标准,对应地把震陷系数大于0.015的黄土定为震陷性黄土,其产生的震陷量可以对工程场地产生影响^[6]。

1 黄土震陷的定义及试验方法

1.1 黄土震陷定义

黄土震陷概念^[7]是由张振中等提出的。从土动力学角度来讲,黄土震陷是指黄土在动荷载作用下产生的残余应变值,在等幅循环荷载下的动三轴震陷试验中则被取为动应力作用前后试样的高度之比:

$$\epsilon_p(N) = \frac{H - H'(N)}{H} \quad (1)$$

式中 $\epsilon_p(N)$ 表示动应力往返作用 N 次所产生的残余应变; H 和 $H'(N)$ 分别表示动应力作用前和作用 N 次后的试样高度。

从灾害学角度来讲,黄土震陷是指非饱和、低湿度的黄土在地震荷载作用下黄土场地产生的突然的附加沉陷。从黄土地震灾害的考察、土动力学试验及黄土微结构的研究结果来分析,黄土震陷的机理可以描述为:黄土的架空孔隙结构在地震作用下发生的崩溃性破坏。

1.2 黄土震陷试验方法

本文所采用数据均来自于循环动三轴试验仪,其型号为DSD-160型动力三轴仪,仪器性能的一般指标为:频率范围为0.1~100 Hz,最大轴向压力16 kg/cm²,最大侧向静压力8 kg/cm²,试样高度和直径分别为10.0 cm和5.0 cm,轴压最大变形在-10.0~+10.0 mm。这一试验系统可将任意波形的轴向荷载通过加荷活塞的上下运动直接施加到试样上。

黄土震陷试验当中施加的外界动应力一般有两

种:等效地震作用的正弦循环荷载和随机地震荷载时程。随机地震荷载时程是目前黄土震陷研究当中采用较多的一种荷载类型。本文中所用均为等效地震作用的正弦循环荷载。

采样时,在需要进行试验的场地挖取不同深度的原状土样,在原有上覆压力下在动三轴仪上固结,进行试验。固结比由下式确定:

$$K_C = \frac{\sigma_{1C}}{\sigma_{3C}} = \frac{1}{K_0} \quad (2)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (3)$$

对西北黄土一般 φ 在24°左右,通常取 $K_C=1.69$ 。

按照式(1)的震陷的定义,对同一组的5~7个试样在同一地震动时程调整到不同幅值下进行震陷试验,根据试验记录中的轴向应力(峰值 σ_d)和应变时程(残余应变 ϵ_p)的对应关系就可获得一条黄土震陷曲线。

2 黄土震陷下限深度的确定

进行黄土地基震陷处理时,首先要确定黄土震陷的深度,根据具体的震陷系数来计算出实际震陷量,才能确定其受到某一动应力作用时能达到何种程度的震害。

2.1 不同动应力作用下黄土震陷下限深度确定

取三台阁几组分布于不同深度试样震陷数据(振动循环10次),其不同深度土层物理指标见表1,在相近动应力条件下,分析其震陷系数随深度变化趋势。图1是黄土震陷系数随深度变化曲线。

表1 三台阁黄土物理指标

土样 编号	土样深 度/m	含水量 /%	密度 /g·cm ⁻³	干密度 /g·cm ⁻³	孔隙比
14-4	5	6.99	1.43	1.34	1.017 3
14-3	10	8.86	1.47	1.35	1.017 8
14-2	15	12.15	1.53	1.37	0.991 3
14-1	19	9.16	1.56	1.42	0.909 5

经过非线性分析,在一定动应力作用下震陷系数随深度增加而减小的趋势很明显,最后接近于零。在不同动应力作用下,震陷系数与深度的关系符合指数函数的分布,但震陷性低于工程要求的深度 H 有所不同:在150 kPa动应力作用下(图1(a)), H 大于4.5 m;在166 kPa动应力作用下(图1(b)), H 大于6.6 m;在178 kPa动应力作用下(图1(c)), H

① 张振中,等.兰州地震小区划成果报告.中国地震局兰州地震研究所,1992:26-31.

② 孙崇绍,等.西安地震小区划成果报告.中国地震局兰州地震研究所,1985:15-20.

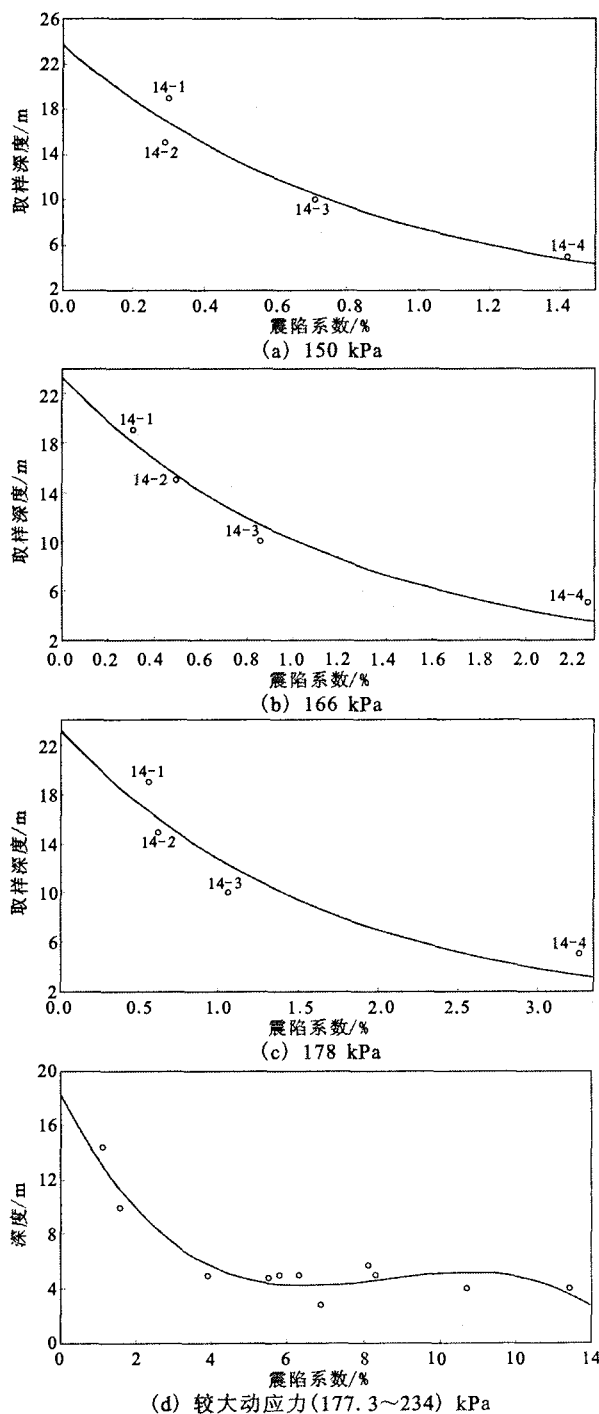


图 1 不同动应力作用下兰州三台阁黄土残余应变曲线

Fig. 1 Variation curves of residual strain of loess at Santaige in Lanzhou with the depth under different dynamic stress.

大于 9.4 m。

在不考虑相同动应力的条件下,选取试验中每个试样较大动应力(177.3~234 kPa)作用得到的震陷结果(选择的震陷系数为动应力振动 30 次结果)随深度变化曲线(图 1(d))。此时震陷系数与深度

的关系稍有复杂,当 H 大于 11.6 m 时,震陷性低于工程要求。

同时又选取分布在兰州十几个不同场地、不同阶地上,典型的马兰黄土震陷的几十个试验数据,在只考虑震陷系数与深度关系的情况下,做成散点图(图 2),这样取得震陷性低于工程要求时的深度应该在 10 m 以上。

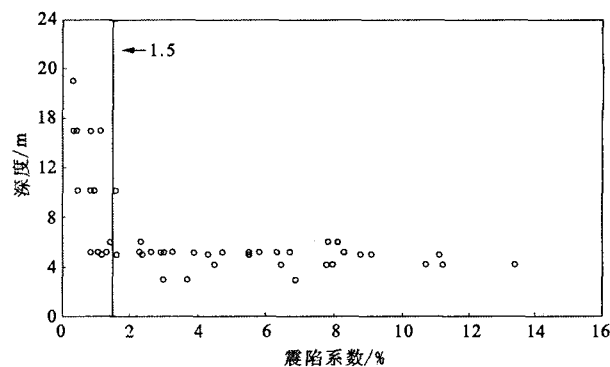


图 2 兰州黄土残余应变随深度变化散点图

Fig. 2 Scattering graph of residual strain of loess in Lanzhou changing with the depth.

以上各图拟合函数分别为

150 kPa 时, $H = 23.67 \exp(-1.15 \epsilon_p)$, $r = 0.96$;
166 kPa 时, $H = 23.34 \exp(-0.83 \epsilon_p)$, $r = 0.98$;
178 kPa 时, $H = 23.28 \exp(-0.60 \epsilon_p)$, $r = 0.93$;
较大动应力时, $H = 18.25 - 5.37 \epsilon_p + 0.66 \epsilon_p^2$,
 $r = 0.95$ 。

再根据公式(1),

$$\frac{\sigma_d}{2} = \tau_{di} = 0.65 \gamma_i h_i \frac{\alpha_{\max}}{g} \cdot K_d \quad (4)$$

式中 γ_i 为黄土的密度(kN/m^3); K_d 为动应力折减系数,可查表 2 得到; $\frac{\alpha_{\max}}{g}$ 为地震系数,即最大水平地面加速度与重力加速度之比。计算出 $\alpha_{\max}$,再找出其对应的地震烈度值。

综上所述,可以确定在较大动应力(177.3~234 kPa)条件下,即在 VII~VIII 度烈度的作用下,兰州地区的黄土震陷性低于工程要求的深度应该在 12 m 左右。

黄土地层随着深度的增加其固结程度也在加强,下部地层经长时间的上覆地层的压力作用,颗粒之间接触更加紧密,孔隙量也在变少,胶结得到加强,所以在地震力作用下,其易损性将会变小。

2.2 不同含水量条件下黄土震陷的下限深度确定

为了预测在不同的含水量条件下的黄土震陷的下限深度,本文分析统计了兰州地震小区划期间所

表2 不同深度黄土的动应力折减系数

深度 H/m	0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0
折减系数 K_d	1.000	0.985	0.975	0.965	0.955	0.935	0.915	0.895	0.850

获得的兰州不同深度的试样的震陷数据,得出了兰州地区在一定的动应力作用下(1.49~1.56 kPa),黄土不同深度、不同含水量条件下黄土震陷残余应变关系,见图3。在这里黄土土层的不同深度用固结压力来表达。其关系式为: $\epsilon_p = 0.61 \times W - 3.46 \times \log_{10}(g) + 2.77$; 相关系数为: $r = 0.92$ 。

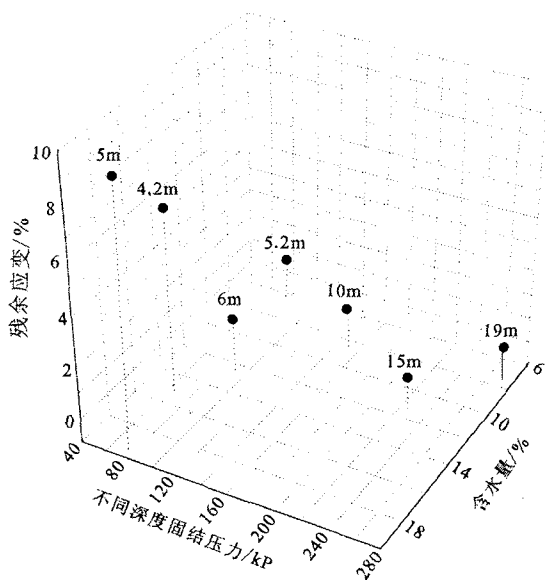


图3 一定动应力作用下黄土固结压力(深度)与含水量对残余应变的影响

Fig. 3 The influence of concretion stress(depth) of loess and water contents on residual strain under certain dynamic stress.

可以看出,固结压力的以10为底的对数值和含水量与残余应变的相关性非常好。残余应变与含水量为正的线性关系,而与固结压力为负的对数关系。残余应变随着含水量的增加而增加,随着固结压力的增大而减小。

本文根据所得经验公式,在1.49~1.56 kPa的动应力作用下,对在不同含水量条件下的兰州黄土震陷的下限深度进行了一些预测(表3),以校验其经验公式的准确性。

表3 不同含水量条件下兰州黄土震陷下限深度

含水量/%	5	6	7	8	9	10	11	12
震陷下限深度/m	1.18	1.77	2.66	3.99	5.99	8.99	13.50	20.26

从其预测结果来看,随着含水量的增长,震陷下限深度也在不断在加深。而根据已知的三台阁天然黄土对应的含水量条件(10%)及对应动应力条件

(150 kPa, 166 kPa),震陷下限深度为4.5 m、6.6 m,对比可知预测值是合理的。

同时因样本量较小以及样本的含水量分布的均匀度不够理想等原因,此经验公式应用可能有一定的局限性和含水量的范围要求。当有更多的合理的样本时,相信此经验公式可以得到很好的改善和校正。

2.3 利用剪切波速对黄土震陷下限深度的确定

黄土的剪切波速值与黄土的物理力学指标如密度、强度、震陷特性、含水量、孔隙比等有着密切的关系,剪切波速的大小能够反映黄土的震陷特性^[1]。本文利用西安地震小区划震陷数据与剪切波速资料,对西安黄土的震陷特性做了一些分析。为方便对比本文选择了150 kPa动应力条件下的情况,见图4。其关系式为: $\epsilon_p = 50.32 - 0.187V_s$ 。

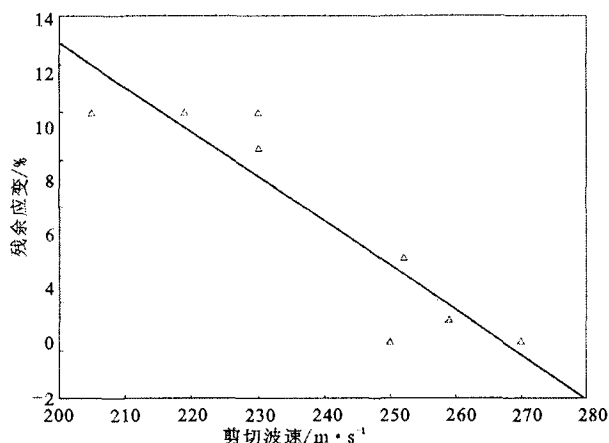


图4 150 kPa动应力条件下剪切波速与残余应变关系

Fig 4 The relationship between shear wave velocity and residual strain under 150 kPa dynamic stress.

从图中可以看出,在一定的动应力作用下,黄土的残余应变与剪切波速有一个负的线性关系。残余应变随剪切波速的增长而减小,当残余应变小于1.5%时,剪切波需大于261 m/s。而利用西安黄土(Q_3)的统计规律公式^[1], $V_s = 141.2H^{0.28}$,可以计算出对应黄土土层深度为8.97 m,即在150 kPa动应力条件下(相当于Ⅶ度地震烈度),大于8.97 m的黄土土层将不具工程危险性,这一预测与上节在同一动应力作用下,10%含水量条件下的预测值较为符合,同时与实验室震陷数据相吻合。

3 结论

(1) 在不同的动应力作用下,黄土震陷的下限深度是不同的。动应力越大,震陷下限深度越深。在较大动应力作用下(相当于Ⅶ~Ⅷ度地震烈度),兰州黄土震陷下限深度可达 12 m。

(2) 在一定动应力作用下(相当于Ⅶ度地震烈度),不同含水量条件下兰州黄土震陷下限深度是可以预测的,并且预测结果与实验数据较为吻合,从经验来讲也是较为合理的。

(3) 剪切波速能够反映黄土的如密度、含水量、孔隙比等与震陷特性关系密切的物理参数,因而能够反映黄土的震陷特性。

(4) 利用剪切波速对西安黄土的震陷下限深度判断与实验数据相符,预测结果较为合理。

[参考文献]

- [1] 王兰民主编. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003:198-208.
- [2] 张振中,段汝文. 黄土震陷研究与震害预测[J]. 西北地震学报,1987,9(增刊):14-18.
- [3] 王兰民. 黄土地震灾害预防与减轻研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2000.
- [4] 李启鹏,程显尧,蔡东艳. 地震荷载下黄土的动力特性[J]. 西安冶金建筑学院学报,1985,43(3):9-27.
- [5] 余雄飞,谢定义. 原状黄土的增湿结构弱化特性对动荷载下变形特性的影响[A]//全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编[G]. 1986:225-228.
- [6] 建设部. 湿陷性黄土地区建筑规范(GB50028). 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [7] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京:地震出版社,1999:68-70.
- [8] 王峻,王兰民. 永登 5.8 级地震中黄土震陷灾害的探讨[J]. 地震研究,2005,28(4):393-397.
- [9] 徐舜华,王兰民,袁中夏. 黄土震陷初判指标的界定研究[J]. 西北地震学报,2006,28(2):140-143.

(上接 217 页)

清楚可见 sPn 初动符号与 Pn 相反;sPn 的周期一般比 Pn 波大;因为 sPn 原生波是 S 波,故此在两水平向常常也很清楚;sPn 震相出现在 Pn 之后、 $\bar{P}$ 之前,要特别注意与 P* 波的混淆。

震源深度是地震定位的一个重要参数。测算国内及邻近地区地震的震源深度,无论震级大小,如果区域台网记录中能够记录到 sPn 震相,并且分析人员能够认准该震相,应用本文中所介绍的方法就可以测算出较为精确的震源深度值。如果有多台记录到了 sPn 震相,取各台计算深度的平均值可以得到比较精确的震源深度值。

本文及其它文献给出的我国部分地区的 sPn—Pn 走时差表为应用 sPn 震相测定我国部分地区近震深度提供了有利工具。另外,可用 sPn—Pn 的走时差变化监测某一震区震源深度在时间和空间域的变化来预测地震。

sPn 震相为计算近距离($\Delta < 1\ 000$ km)发生的地震的震源深度提供了一种切实可行的方法。特别是对于区域台网来说,一般记录到 sPn 震相的机会较多,可以将该方法用于实际工作中,尽可能精确地给出国内浅源地震的震源深度值,更好地为科研工作者研究地震成因及其深部地壳结构的的活动提供重要判据。

用 sPn 震相计算震源深度,各个台站的计算结果具有可比性。如果 sPn—Pn 的到时差较为一致,基本上可以准确地计算出该次地震的震源深度,方法简洁、实用,便于在日常工作中推广。

[参考文献]

- [1] 高原,周惠兰,郑斯华,等. 测定震源深度的意义的初步讨论[J]. 中国地震,1997,13(4):321-329.
- [2] 修济刚,李友博,王铁城,等. 宽频带数字地震学观测与研究[M]. 北京:海洋出版社,1988.
- [3] 内蒙古自治区地震局. 内蒙古自治区 2003 年和 2004 年两次 5.9 级地震[M]. 北京:地震出版社,2005.
- [4] 时振梁,张少泉,赵荣国,等. 地震工作手册[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [5] 张少泉. 地震波分析与应用[M]. 北京:地震出版社,1998.
- [6] 库尔哈奈克. 地震图解析[M]. 刘启示,等译. 北京:地震出版社,1990.
- [7] 张诚. 地震分析基础[M]. 北京:地震出版社,1986.
- [8] 房明山,杜安陆,董孝平,等. 用 sPn 震相测定近震震源深度[J]. 地震地磁观测与研究,1995,16(5):13-18.
- [9] 高立新,阎海滨,丁凤和,等. 东乌珠穆沁旗 5.9 级地震参数及序列特征[J]. 东北地震研究,2005,21(2):16-23.
- [10] 任克新,邹立晔,刘瑞丰,等. 用 sPn 计算内蒙地震的震源深度[J]. 地震地磁观测与研究,2004,25(3):24-31.