

黄土震陷时微观结构随动应力变化分析

裘国荣¹, 石玉成^{1,2}, 刘红玫^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:通过黄土微观结构图像的处理可以很好地提取黄土微观结构要素。本文取通渭老地震区的黄土做震陷实验,应用土体微观结构定量分析系统对不同正弦荷载下震陷土样的微结构图片作定量结构效应分析,探讨了其不同动应力荷载下的微观结构参数变化规律,并建立了各参数与动应力的对应关系。结果表明,黄土震陷由其微观结构及外部荷载共同决定,各微观要素在震陷过程中有不同变化,孔隙的有效直径、孔径分维、连通率和颗粒定向度的微结构参数变化与残余变形变化基本保持一致。

关键词:黄土; 震陷; 微观结构; 定量分析

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2010)01-0042-05

Analysis on Microstructural Variety in Seismic Subsidence of Loess with Dynamic Stress

QIU Guo-rong¹, SHI Yu-cheng^{1,2}, LIU Hong-mei^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Creative Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Loess's microstructural parameters could be obtained well by dealing with the microstructural image. Based on the seismic subsidence experiment of loess samples taken from the Tongwei old earthquake area, we count the microstructural parameters, research the orderliness of microstructural parameters variety corresponding to different sine wave dynamic stress values and find the relation between the microstructural parameters and the dynamic stress using the soil microstructural quantitative analysis system. It appears that seismic subsidence of loess depends on its microstructure and external stress state. All microstructural parameters hold different variety in the seismic subsidence process of loess. Among them the variety of effective diameter of trellis pores, pore diameter dimension, connectivity and granule beamed degree is in conformity with the variety of residual deformation of loess.

Key words: Loess; Seismic subsidence; Microstructure; Quantitative analysis

0 前言

微观结构是黄土工程性质的一个重要方面,一方面反映了土体的形成条件,另一方面又是决定土体物理、力学及其它性质的重要因素。由于黄土的微观结构的复杂性和技术手段的限制,以往的研究都是以定性为主,定量的研究较少且欠全面。随着扫描

电子显微镜(SEM)和专业图片处理系统的应用和完善,粘性土微结构的定量研究也逐渐发展起来。吴义祥^[1]、张礼中^[2]研制并发展了土体微观结构图像的定量分析系统,阐述了结构熵、结构单位的平均粒径、平均形状等粘土结构状态参数,分析了结构变

收稿日期:2009-11-19

基金项目:国家自然科学基金(50878200);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2010018

作者简介:裘国荣(1983-),男(汉族),男(汉族),浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事工程地震方面研究.

化与粘土特殊物理力学性质之间的关系;施斌^[3]等研究了我国某些粘性土的结构定向性和有序性的定量表述方法,并对其结构特性进行了定量评价,获得了孔隙性、形态、颗粒定向性和各向异性率及结构概率熵等定量指标;石玉成^[4]等研究了黄土的震陷性与其显微结构特征的关系定性关系,并对黄土显微结构进行了分类。

黄土由于其结构的特殊性,颗粒之间点接触为主,孔隙多呈架空孔隙结构,粘结物和胶结物较少,过渡带^[5]不明显,因此以往研究的粘性土微结构分析系统并不能完全应用于黄土的微结构参数分析。黄土微结构参数的定量研究需要有适合自身的方法。

黄土在荷载作用下变形随着时间的增长而增大,决定其变形量大小的主要因素之一是黄土的结构强度^[6-7],换言之,黄土的位移和变形主要是由土体内结构变化(结构单元体之间的相对位移和错动等变形)所导致的。因此,要研究黄土的变形与强度时效的本质,微观结构是研究的起点^[4,8],并以此为基础建立相关的数学关系,以达到研究和预测黄土变形和强度变化的目的。黄土的微观结构是由其基本单元体构成的,通常称为结构单元体,主要是由单粒(原生矿物的碎屑)和集粒(细小矿物颗粒、个别有较大的原生矿物碎屑被一些胶结物胶结而成的矿物集合体)组成的。由于成因类型不同,通常它们在变形过程中是不稳定的整体,具体表现在它们的位置和形状都不断在发生着变化,即结构要素的变化。因此结构单元体在土的变形过程中是处于一种动态的平衡中,在不同时空上黄土的微观结构具有其各自独特的变化特征。

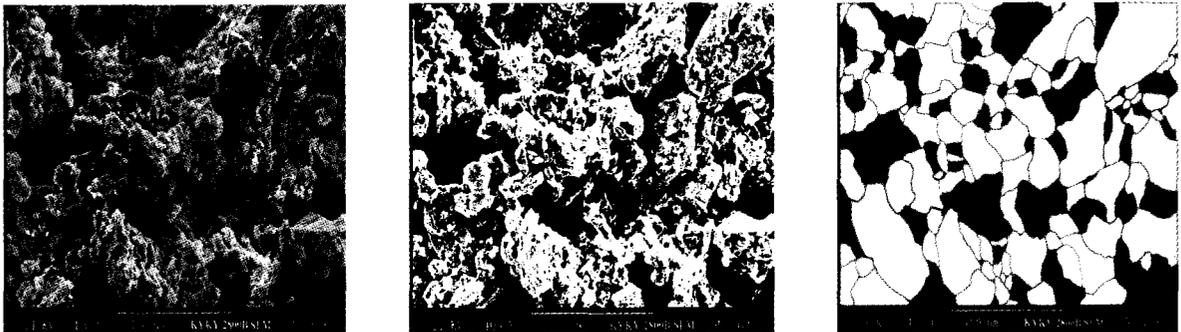
要表征不同动荷载对黄土震陷所产生的影响,不但要宏观上使用震陷系数来衡量最终的震陷量,而且需要从微观结构上分析各种结构参数的变化过

程,以及与动荷载和震陷系数的关系。本文主要从颗粒形态(颗粒大小、颗粒形状、颗粒级配和表面起伏性)、颗粒排列形式(颗粒定向性)、孔隙性(孔隙大小和孔隙级配)和颗粒的接触关系(连通性)四大结构要素入手分析在不同动荷载作用下黄土震陷的微观结构要素变化规律。这些结构参数按其确定性分为确定型结构参数和非确定型结构参数两类。确定型结构参数包括:颗粒大小、孔隙大小、颗粒定向性、接触带连通性、颗粒形状等,它们比较容易用常规的量测方法加以确定;非确定型结构参数包括:表面起伏性、颗粒和孔隙级配等,它们难以用数学表达和量测,可根据土的微观结构形态总存在着某种统计意义上的层次性和自相似性特点,采用分形理论对这些非确定型结构参数进行量化。

1 图像预处理

通常的图像处理软件处理图片都是通过调节对比度和明亮度将图片二值化,也可以通过 MATLAB 等编程软件将图片二值化。由于图像在输入时因为光线强弱,电压及频率的波动以及各种电磁信号等因素对摄像过程的干扰,摄入的图像中有一些干涉影像,因而图片的像素值并不能精确表示颗粒和孔隙。

利用 Photoshop 软件,根据像素值和经验手动勾绘出颗粒和孔隙的边缘轮廓,对于图像的颗粒和孔隙边界界定更为准确,并且也易于微结构参数统计。一般图像中会存在许多过小的面积颗粒和孔隙,对于黄土的结构性质和力学性能没有多大的意义,还会影响到统计微结构参数的效率,因此需要对此进行图像筛选,即将这些面积过小的无实际意义的颗粒和面积按其所在位置同化到周边颗粒或孔隙中。图 1 是经 MATLAB 编程和 Photoshop 手工处理的原状土样图像二值化效果。



(a) 原始图片

(b) MATLAB二值化图片

(c) Photoshop二值化图片

图 1 黄土微观结构图像二值化效果

Fig. 1 Two value effect for microstructure image of loess.

2 黄土微结构参数量化方法

黄土的主要结构参数有颗粒大小、颗粒形状、颗粒级配、表面起伏性、颗粒定向性、孔隙大小、孔隙级配和颗粒的连通性等,这些结构参数又可分为确定型结构参数和非确定型结构参数两类。确定型结构参数可用常规的量测方法和图片数据统计软件直接加以读取确定;非确定型结构参数根据土的微观结构形态存在的某种统计意义上的层次性和自相似性特点,采用分形理论通过对读取的数据加以分析进行量化。

2.1 粒度分维(D_{ps})和孔径分维(D_{bs})计算方法

粒度组成是土的重要参数之一。通常情况下是以小于某一粒径(r)的颗粒的累计数目 $N(\leq r)$ 的分布特征加以刻划的。由质量分布特征可知两者具有较好的幂函数对应关系,即

$$N(\leq r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

D_{ps} 值越大反映颗粒均一化程度愈差,在含义上与粗粒土的不均匀系数 C_u 相当。在具体计算时以粒径 ϵ 为横坐标,大于该粒径的颗粒数为 $N(\epsilon)$ 为纵坐标,在双对数坐标系中确定其对应关系,取其稳定的直线部分的斜率的负值作为 D_{ps} 。粒径的尺度为单位像素点,值域为 $[1, 256]$,这实际上与将其换算成常规尺度(如 cm 或 mm)效果是完全一致的。孔径分维计算方法和粒度分维相同,这里不作具体介绍。

2.2 颗粒和孔隙的有效直径

由于颗粒和孔隙的形状不规则,最长弦并不能完全反应颗粒和孔隙的大小,建议使用等面积圆下的直径代替。为了更加准确地分析颗粒和孔隙的大小对黄土性质的影响,引入了有效直径的概念: $\bar{R} = \sum R_i \frac{A_i}{A}$, R_i 是第 i 个颗粒或孔隙的等面积圆直径; A_i 是第 i 个颗粒的面积; A 是所有颗粒的总面积。有效直径相对于平均直径考虑了颗粒和孔隙的级配情况,对于讨论黄土性质更有直接的现实意义。

2.3 颗粒定向度

一般情况下认为土颗粒的长轴代表了颗粒排列的方向,因此在讨论土微观结构的定向性时,主要研究长轴的排列方向及其有关特征。通常将颗粒的最长弦与水平向右的夹角称为颗粒的方向角。由于土颗粒的大小变化相差十分悬殊,粒径的长轴相差可达几十倍甚至上百倍、上千倍。土体在变形的过程中,不同粒径的颗粒在同一应力的作用下,粒径较大的颗粒被调整的程度较小,粒径较小的颗粒被调整的程度较大,因此粒径较大的颗粒在整个土体中的

方向性中起较大的作用。为了考虑不同粒径在土体整体方向性中的地位 and 作用,引入主方向角的概念:

$$\bar{\alpha} = \sum \alpha_i \frac{A_i}{A} \quad (2)$$

α_i 是第 i 个颗粒的长轴与水平向右方向的夹角,取值在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间; A_i 是第 i 个颗粒的面积; A 是所有颗粒的总面积。获得了主方向角以后,考虑每个颗粒偏离主方向角的程度以及不同粒径颗粒的影响,即颗粒整体排列方向的一致性。取各个颗粒的方向角与主方向角的偏差绝对值,考虑各个颗粒的作用与影响,再取权重和值,得到方向度

$$\bar{\beta} = \sum |\alpha_i - \bar{\alpha}| \frac{A_i}{A} \quad (3)$$

$\bar{\beta}$ 为 0 时,说明所有颗粒排列一致,颗粒方向角与主方向角相同,土体的方向一致性程度好;反之, $\bar{\beta}$ 越大,土体的方向一致性程度越差。

2.4 连通率

黄土土体通常认为是颗粒和孔隙的结合体,颗粒之间存在多种接触关系,实际上是颗粒的立体效应,其结合物难以从二维图像中单独提取出来。把颗粒与颗粒之间的连接边界定为颗粒的接触关系,这种意义上的接触关系也能在很大意义上反映颗粒的接触状况。从图 1 分析,土体中存在两种连接边界,一种是颗粒与颗粒之间的连接边界,另一种是颗粒与孔隙之间的连接边界。可以将颗粒与颗粒之间的连接边界长与所有颗粒的边界长之比定义为颗粒的连通率。由于颗粒与颗粒之间的连接边界长难以直接统计,是所有颗粒的边界长与所有孔隙的边界长之差,可以得出连通率的计算公式

$$K_{\infty} = \frac{C_s - C_v}{C_s} \quad (4)$$

C_v 、 C_s 分别是所有孔隙和所有颗粒的周长之和。

应用 Image-ProPlus 软件能直接读取颗粒和孔隙的面积、周长、方向角、最长轴、最短轴以及颗粒的表面起伏分维,再应用 MATLAB 和 Excel 软件的计算功能,就能得出黄土微结构的非确定性参数。

3 不同动应力下的黄土微结构参数变化

取样自 1718 年通渭 7.5 级地震区老滑坡体上顶部边缘未滑移地区的黄土,深度为 4~5 m,试样整体基本均匀,试样高为 100 mm,直径为 50 mm,含水量 10%,进行了频率为 1 Hz、动荷载分别为 10 kPa、30 kPa、50 kPa、80 kPa、100 kPa 的正弦波载荷

下的黄土震陷试验,同时对原状样和不同动应力震陷下的样品进行了扫描电子显微镜的观察照像。按照以上的微结构参数统计方法对颗粒形态(颗粒大小、颗粒形状、颗粒级配和表面起伏性)、颗粒排列形式(颗粒定向性)、孔隙性(孔隙大小和孔隙级配)和

颗粒的接触关系(连通性)四大结构要素进行了分析统计,主要结构参数统计如表 1 所示。实验变形是各对应动应力下孔隙总体积变化之差与原来土样的总体积之比。

表 1 主要结构参数统计表

动应力 /kPa	颗粒表面起伏分维	颗粒有效直径/ μm	颗粒平均扁圆度	粒度分维	孔径分维	孔隙有效直径/ μm	颗粒定向度/ $^\circ$	连通率 /%	实验变形 /%	统计变形 /%
0	1.072 8	41.728 2	1.864 1	1.299 1	0.940 5	60.435 7	49.691 7	0.498 2	0	0
10	1.072 8	42.121 2	1.864 2	1.288 5	0.931 2	58.425 6	48.563 2	0.503 4	-0.05	-0.23
30	1.075 2	40.536 4	1.831 2	1.286 5	0.910 1	52.664 5	46.322 2	0.515 6	-0.65	-0.94
50	1.069 8	42.577 1	1.810 5	1.287 8	0.888 5	44.824 1	44.925 3	0.538 7	-4.50	-4.80
80	1.071 2	41.432 5	1.820 3	1.303 4	0.879 5	34.653 2	43.876 2	0.560 1	-8.40	-8.48
100	1.075 6	42.312 6	1.803 7	1.314 1	0.869 9	31.565 5	43.622 6	0.566 7	-9.30	-10.1

从表中分析可以定性的确定孔径分维、空隙有效直径、颗粒定向度和连通率等微结构参数在黄土震陷过程中变化较大,且与黄土震陷残余应变变化较为一致,可以认为黄土震陷过程中这四个结构参

数起了主要的内因作用。

为了更加清晰的分析各微结构参数变化与对应动应力之间的关系,统计了主要结构参数相对于原状土结构参数的相对偏差(表 2)。

表 2 主要结构参数的相对偏差统计表

动应力 /kPa	颗粒表面起伏分维 /%	颗粒有效直径 /%	颗粒平均扁圆度 /%	粒度分维 /%	孔径分维 /%	孔隙有效直径 /%	颗粒定向度 /%	连通率 /%
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0.94	0.01	-0.82	-0.99	-3.33	-2.27	1.04
30	0.22	-2.86	-1.76	-0.97	-3.23	-12.86	-6.78	3.49
50	-0.28	2.03	-2.88	-0.87	-5.53	-25.83	-9.59	8.13
80	-0.15	-0.71	-2.35	0.33	-6.49	-42.66	-11.70	12.42
100	0.26	1.40	-3.24	1.15	-7.51	-47.77	-12.21	13.75

不考虑微弱变化的结构参数,通过对应的动应力与相关参数值的线性拟合,可以得出主要结构参数和相对偏差相对于动应力的线性相关系数(表 3)。

表 3 主要结构参数及相对偏差相对于动应力的线性相关系数表

结构参数	孔径分维	孔隙有效直径	颗粒定向度	连通率
相关系数	-0.000 7	-0.307 3	-0.060 8	0.000 7
相对偏差相关系数	-0.075 4	-0.508 4	-0.122 3	0.147 5

通过表 2 和表 3 分析更能明确的发现与黄土震陷残余变形和外界动应力密切相关的是孔径分维、空隙有效直径、颗粒定向度和连通率等四个微结构参数,其它参数在震陷过程中变化不大,与残余应变关系也不大。这说明黄土震陷过程是通过调整孔隙大小和颗粒排列来实现的,颗粒的因素作用不大。在黄土受到动荷载作用产生残余应变过程中,颗粒之间的点接触极易破坏,孔隙被压缩;骨架颗粒和掉入孔隙的细碎颗粒在剪应力作用下,向着主方向角排列,方向度变小;又孔隙变小,土体被压密,颗粒之间的连接变多,连通率变大。表 3 通过线性拟合更

从定量上得出了孔径分维、空隙有效直径、颗粒定向度和连通率的微结构参数与动应力应变的线性系数。从中可以发现,孔隙的有效直径、孔径分维和颗粒定向度作了负向调整,连通率作了正向调整。这四个结构参数对应于动应力的线性相关性大小依次为:孔隙的有效直径>连通率>颗粒定向度>孔径分维。

4 讨论

黄土震陷形成主要是因为孔隙的变化,因此在各动应力作用下,孔隙总体积变化之差与原来土样的总体积之比就是对应的动应力下的残余应变。以此可得到统计的震陷曲线(图 2)。

从图 2 中可以看出,试验应力应变曲线和统计应力应变曲线趋势一致,都是分成三段,说明从扫描电镜获取的微观结构照片统计黄土微结构参数是可行的方法。统计曲线比试验曲线较大是因为统计过程中,颗粒内部的孔隙较难统计,在黄土震陷过程中,大孔隙被破坏,小孔隙比例越来越大。通常情况下,统计的孔隙要比真实的孔隙数目要少,统计的空

隙比比实际的空隙比为小。

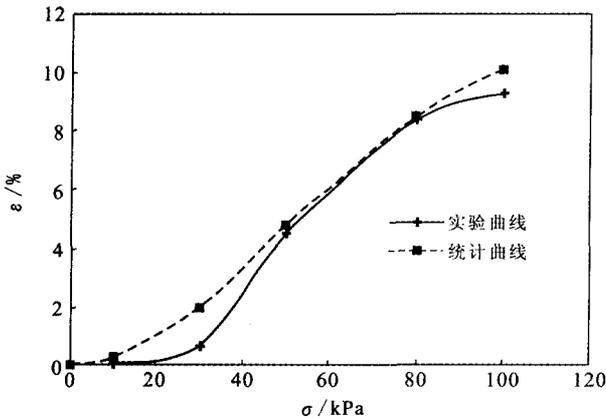


图2 黄土的震陷曲线

Fig. 2 Seismic subsidence curves of loess.

电镜图像对孔隙的鉴别通常是可能的,但也不是全部,而是在一定范围内,因此不能包含太大和太小的孔隙范围。通常孔隙直径不能大过摘取图片的边长最大值,也不能小于图片分辨像素的最小值。而且为了使图片分析更趋于快捷的方式,过小的孔隙和颗粒的直径都应同化到周边的孔隙和直径中。

在震陷初始阶段,当动应力较小时,比如10~30 kPa以内,黄土变形基本是弹性的;随着试验结束,变形消失,也就不会在整体残余变形上有多大反应。图2中试验曲线前段黄土震陷残余变形较小,但统计曲线却稍微偏大。主要原因是实验初始阶段,动应力较小,架空孔隙破坏尚未形成,但黄土颗粒之间重新分散聚合,掉入较大孔隙,小孔隙含量变多,导致统计结果中细小孔隙较难被统计,使得统计的残余变形结构较大。

5 结论

黄土震陷的微观结构定量分析主要通过对土体微观结构图像的分析处理获取。黄土震陷主要是通过孔隙大小调整和颗粒排列方式改变来实现的,在不同动应力作用下震陷残余变形中,并不是所有的微结构参数变化保持一致,有的结构参数变化并不明显,而且不动的微结构参数对黄土震陷残余应作出不同贡献。黄土宏观残余应变是黄土微观结构发生变化所致,因此黄土微观结构定量分析可以建立结构状态参数与其对应的宏观力学参量之间的对应关系。

黄土微结构参数的定量化可以为黄土微结构类型的划分和分类提供定量的标准,使微结构参数作为一个重要的指标参与评价黄土震陷性的变化规律,并为改善黄土的工程性质提供可靠的依据。

[参考文献]

- [1] 吴义祥. 工程黏性土微观结构定量分析[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 23: 143-153.
- [2] 张礼中, 胡瑞林, 李向全. 土体微观结构定量分析系统及应用[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 163-170.
- [3] 施斌, 李生林. 黏性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. 中国科学(A 辑), 1995, 25(6): 666-672.
- [4] 石玉成, 李兰, 刘红玫. 黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 129-134.
- [5] 胡瑞林. 黏性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [6] 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.
- [7] 何丽君, 石玉成, 杨惠林, 等. 地震动作用下黄土边坡稳定性分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 142-147.
- [8] 张晁军, 石耀霖, 黄建平. 粘弹性分层和重力作用对地震形变场数值模拟的影响[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 201-207.