

黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究

石玉成^{1,2}, 李 兰², 刘红玫²

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:借助电镜扫描分析手段,对Q₃震陷性黄土的微结构特征、颗粒形态等进行了分析.结果表明黄土的显微结构对震陷系数有较大影响,并与震陷的临界动应力关系密切.通过孔隙含量的定量测试分析,探讨了中大孔隙对黄土震陷影响,并对土样的微结构某些指标进行了比较和分析.

关键词:黄土;震陷性;微观结构;架空孔隙

中图分类号:P642.13⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2002)02-0129-06

0 引言

土的结构是描述土体物理本质的一个极为重要的方面,太沙基在创立土力学这门学科时就已指出了土结构的重要性.在对某些特性机理的分析中,土体结构的定性描述曾起了重要的作用.随着电子显微镜及其它测试手段的发展,为直接观察土的结构和细节提供了有利条件.目前,通过电子显微结构扫描和计算机图像处理,使得黄土孔隙微结构的定量研究成为可能^[1].本项研究通过室内试验和微结构定性分析与定量分析相结合,旨在揭示黄土微结构与黄土震陷之间的内在联系.

结果表明,黄土的架空结构状态及中孔隙含量大于50%是导致黄土震陷产生的条件.而各地区黄土震陷性的差异是由于经受后期自然地理环境的影响,使显微结构发生变化,导致震陷的蜕化.黄土的显微结构从西北到东南由粒状架空接触逐渐过渡到凝块镶嵌结构,前者容易形成震陷,而后者对震动的敏感性较小.

1 震陷性黄土的微结构特征

黄土含有大量孔隙,这是黄土区别于其它土类的主要特征之一.黄土的显微结构是在黄土形成时和形成后的成土作用过程中形成的^[2],必然要反映它的生成环境和成岩过程中的地球物理化学作用和生物化学作用.最能表征其微观结构特征的是黄土的颗粒形态、孔隙特征和胶结程度.

1.1 颗粒形态及相互关系

电镜中见到的黄土骨架形态大致可分为单粒状、集粒状和凝块状三种.西部黄土以单粒

收稿日期:2002-02-19

基金项目:地震科学联合基金资助课题(199044);科技部社会公益研究专项资助(2000-35);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2002021

作者简介:石玉成(1966-),男(汉族),山东沂水人,副研究员,主要从事地震工程研究工作.

状为主;东部黄土以集粒状为主.颗粒之间的排列不具定向性,粒间接触关系可分为架空接触、镶嵌接触和胶结接触.

架空接触:骨架颗粒直接以点接触,接触面积小,胶结物少,形成架空孔膜.

镶嵌接触:骨架颗粒多以边面或面面接触,接触面积大,孔隙减少,颗粒相互穿插,呈镶嵌形式.

胶结接触:骨架颗粒部分接触或不接触,其间充以粘胶微粒或盐晶,孔隙少.胶结物多,胶结程度较好.

1.2 孔隙的特征

土的孔隙性包括孔隙的大小、形状、数量以及连通性等方面.黄土的孔隙率在50%左右.按大小孔隙可分为四种类型:大孔隙、中孔隙、小孔隙和微孔隙.其中大孔隙主要在黄土沉积后成岩过程中由生物作用形成,呈管状或不规则状,数量少;中孔隙由骨架颗粒相互组成,数量多,为颗粒的变位提供了空间,连通性好,透水性强,是黄土产生震陷的主要原因;小孔隙和微孔隙在黄土沉积时形成,由骨架颗粒群形成的架空孔隙,数量较多,对骨架颗粒的稳定起着主要作用.

黄土的大孔隙主要包括根洞、虫孔、裂隙等;中孔隙主要包括支架孔隙及少量孔隙;小孔隙主要是镶嵌孔隙,并含少量胶结物孔隙;微孔隙主要是胶结物孔隙.

2 显微结构与震陷的关联分析

震陷性黄土最重要的特征是架空孔隙结构,这是产生震陷的基本内因.黄土的架空结构状态及中孔隙含量大于50%是导致黄土震陷产生的条件.

黄土震陷是指在地震作用下黄土结构产生崩溃性破坏,而形成地面或建筑物的附加下沉,它与土的残余变形密切相关.黄土的震陷有两个含义:一是土体在荷载作用下附加沉降;二是由于土体有较高的含水量或浸水后土体本身有湿陷性,在动荷载作用下产生震动湿陷.黄土震陷是一种残余变形特性,它与显微结构、震陷的临界动应力、孔隙比、含水量有着密切的关系,所以把动变形的试验结果作为反映黄土震陷的主要动力学参数.

2.1 试验结果

黄土震陷的动力特性研究表明,晚更新世马兰黄土和全新世黄土状土是具有大孔隙结构弱粘性黄土.这种黄土在地震作用下,因孔隙结构崩溃性破坏,必然会产生急剧的残余变化——震陷.试验结果表明,凡是震陷性强的黄土都具有明显的架空孔隙结构,反之,凡是架空孔隙不明显的凝块镶嵌胶结结构的黄土,不具备震陷性.实验结果表明,震陷系数随黄土的密度增大而减小;随孔隙比的增大而增大;随架空孔隙的发育而增大;随胶结物的增大而减小;随着振次的增加震陷系数速率加快.所以黄土是否产生震陷与其显微结构状态有直接的关系.

2.2 显微结构特征对残余应变的控制作用

黄土显微结构类型很多,而粒状架空孔隙是黄土具有特殊动力性质的控制因素^[3].粒状架空接触结构黄土以点接触的形式连接,当土体受不大的外荷载作用时颗粒接触点处应力易于集中而导致移动和整个架空结构的破坏,显示崩溃性.典型粒状架空孔隙结构的黄土临界动应力很低,仅 $0.2\sim 0.3\text{ kg/cm}^2$.架空孔隙结构的存在与否对残余变形影响很大,以架空孔隙为主的黄土显示明显的残余应变,最大可以达到 $5.0\%\sim 8.0\%$;临界动应力在 $0.2\sim 0.7\text{ kg/cm}^2$ 时,有效作用的振次或持时在十几秒钟内即达到总残余应变的80%以上,反映出黄土结构崩溃性破坏的脆性破坏特性.而对架空结构不明显的黄土,临界动应力大于 1.0 kg/cm^2 时略有

变化的趋势。

2.3 孔隙比与震陷

统计结果表明^[4],黄土的孔隙比越大及干重度越小,它的震陷性越高,反之越小。黄土的孔隙比直接反映结构性特征,控制着残余变形的大小。当孔隙比小于 0.85 时,黄土不发生震陷;当孔隙比大于 0.9 时,黄土在动应力作用下会产生不同大小的震陷量。对同一场地而言,一般是孔隙比越大震陷性越高;但如果将不同地区的黄土进行对比则差异很大。例如,甘肃地区分布于黄土梁顶的 Q_3 风积黄土,大孔隙密布而明显,孔隙比可达 1.25%~1.33%。这种黄土若分布在高烈度区震陷将非常强烈,震陷系数会超过 0.10。试验结果表明,兰州黄土的震陷系数在 0.04~0.077;静宁的震陷系数在 0.05~0.11;西吉的震陷系数在 0.035~0.12。因此从不同地区黄土的对比中,得不出孔隙比与震陷的正比关系。

3 微结构特征的室内分析

根据以上对显微结构特征的分析,清楚地看出架空孔隙结构的骨架颗粒形态、连接和排列方式是影响黄土震陷的主要特征。其中颗粒排列方式是最重要的;其次是颗粒形态。

3.1 结构分类和震陷

文献[5]根据黄土颗粒形态、排列方式和连接方式在影响黄土湿陷性方面的主次地位以及它们之间相互搭配的关系和黄土中实际存在的结构类别,共划分了 12 种显微结构类型(表 1),按照其湿陷程度由强到弱自上而下排列。为了表明显微结构分类能否反映黄土的震陷性,把震陷系数 ϵ_a 值和震陷的临界动应力 σ_a 值与相对应的试样显微结构类型表示在图 1 和图 2 上。

表 1 黄土显微结构分类表

类别	颗粒形态	排列方式	连接形式	显微结构分类
I	粒状	空	接触	粒状、架空接触结构
II	粒状	架空	接触—胶结	粒状、架空、接触—胶结结构
III	粒状	架空—镶嵌	接触	粒状、架空—镶嵌接触结构
IV	粒状	架空	胶结	粒状、架空、胶结结构
V	粒状	架空—镶嵌	接触—胶结	粒状、架空—镶嵌、接触—胶结结构
VI	粒状	架空—镶嵌	胶结	粒状、架空—镶嵌、胶结结构
VII	粒状—凝块	架空	胶结	粒状—凝块、架空、胶结结构
VIII	粒状—凝块	架空—镶嵌	胶结	粒状—凝块、架空—镶嵌、胶结结构
IX	粒状	镶嵌	接触	粒状、镶嵌接触结构
X	粒状	镶嵌	胶结	粒状、镶嵌、胶结结构
XI	粒状—凝块	镶嵌	胶结	粒状—凝块、镶嵌、胶结结构
XII	粒状架	镶嵌	胶结	凝状、镶嵌、胶结结构

图 1 和图 2 表明这种结构分类基本能反映黄土的震陷性。将图 1 和图 2 进行比较,震陷的临界动应力值和显微结构类型的相关关系要强于震陷系数与之的相关关系。因为当含水量大于塑限含水量时,震陷系数较大;干性黄土含水量较小,震陷性系数也小。震陷的临界动应力的大小能反映残余变形的增长趋势和大小,便于同预计的地震动剪应力相比较。震陷系数是划分震陷等级的基础资料,它的大小能反映某一土层在中强地震时产生沉陷量的大小,因此更能直观的反映地震破坏的程度。可对震陷系数统计分析,并以此来估算黄土场地上在一定地震力作用下的震陷量。

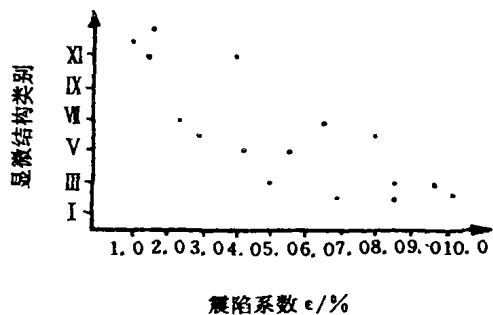


图 1 显微结构类型与震陷系数的关系

Fig. 1 Relation of microstructure type and seismic subsidence coefficient.

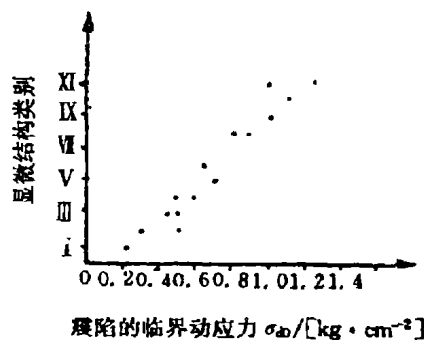


图 2 显微结构类型与震陷的临界动应力关系

Fig. 2 Relation of microstructure type and critical dynamic stress of seismic subsidence.

3.2 室内试验数据分析

微结构研究的流程如图 3 所示。

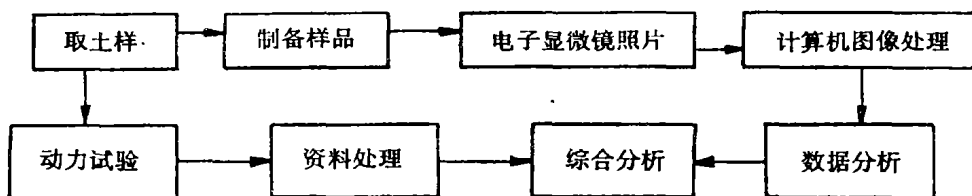


图 3 微结构研究流程图

Fig. 3 Flowchart of microstructure study.

土样的微结构分析是利用日本 JEM-1200 电子显微镜,其最高放大倍数为 100 倍.通过对土样进行扫描,取得二次像,同时将二次像通过与计算机配置好的接口板输入到电脑中,再利用计算机处理系统进行分析,得到所需的参数.电子显微镜输入到计算机的图像需经过一系列的变化才可得到所需要的孔隙参数.将震陷前的原状样品作了四类孔隙面积的测量,样品中占比例最大的为中孔隙(半径 0.04~0.16),占孔隙的 53.5%~57.6%;其次为小孔隙(半径 0.01~0.04),占孔隙的 30.3%~31.6%;再次为微孔隙(半径小于 0.01),占孔隙的 9.1%~9.8%.前者容易形成震陷,而后者震动敏感性小.

利用电子显微镜所取得的土样的定量结构参数与震陷试验有关数据对应起来进行分析,如图 4 所示.看出,在相同的震陷标准下,残余应变随中大孔隙含量的增高而线性增大.其中中孔隙含量的影响更为显著.当中大孔隙含量小于 10% 时,震陷不明显.

3.3 微结构的分析

根据 20 个土样微结构数据资料统计出的各项指标变异系数来看(表 2):同深度、不同孔的土样处理出的各项指标数据

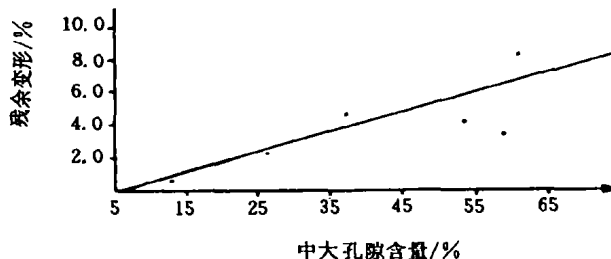


图 4 残余应变与中大孔隙含量的关系

Fig. 4 Relation of residual strain and large-middle pore content.

值变异系数最大为 15.8%, 最小为 6.08%; 试验后的同深度、不同孔的土样最大为 12.88%, 最小为 2.36%; 同筒、不同部位(试验后)土样最大为 9.13%, 最小为 2.36%。说明某均匀土层在不同钻孔、不同深度和不同孔位, 土样都有一定的代表性, 这就给利用微结构了解、判断土体结构的变化带来一定的可行性。

表 2 微结构图像处理数据变异系数

状况			平均孔隙	平均孔隙	平均孔隙	平均孔隙等
			直径	面积	周长	面积圆直径
			/μm	/μm ²	/μm	/μm
同深度	原状	L94-2	13.510	143.793	98.619	12.843
		G95-1	14.134	156.919	93.520	13.941
不同孔	试验后	L94-2-4	10.121	80.450	32.913	4.093
		G95-1-4	8.532	57.155	35.949	5.659
同筒 不同深度	试	L94-2-31	6.944	37.833	10.038	2.440
	验	L94-2-32	7.076	39.335	19.378	3.763
	后	L94-2-33	7.010	38.570	24.051	3.415

图 5、图 6 是 L94-2 饱和黄土土样在试验前后的电镜照片, 展示了结构变化过程。该土样原状土的孔隙体积占到总体积的 7/8, 为架空结构, 孔隙中充满水。在荷载作用下, 中孔隙结构强度降低而崩溃, 粉粒物质散落, 使得微小孔隙含量增加, 大、中孔隙含量减少。伴随着孔隙直径与体积的减小、孔隙率的下降、孔隙个数的增多导致土样被压密。

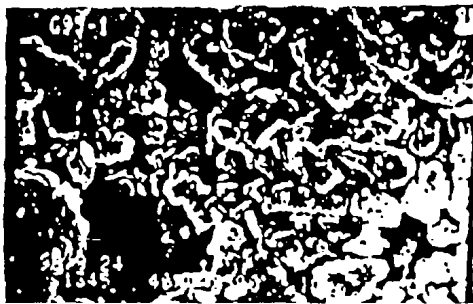


图 5 土体试验前的结构照片

Fig. 5 The picture of soil microstructure before test.

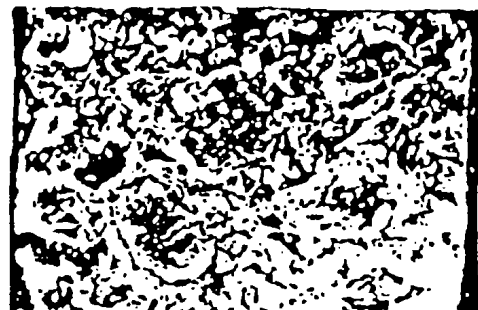


图 6 土体试验后的结构照片

Fig. 6 The picture of soil microstructure after test.

4 结论

(1) 黄土震陷性是一个多因素综合作用的结果, 除结构连接性以及土性差异对其具有非常直接且显著的控制作用外, 含水量的高低、密度的大小等也是重要的制约因素。

(2) 黄土的震陷性主要是由其独特的弱胶结大、中孔隙微结构所造成的。根据黄土骨架颗粒的形态、排列方式和连接形式等显微结构特征, 可以对黄土微结构进行分类。这种分类基本上能反映具有震陷性的黄土的特征。实验结果表明, 以粒状架空结构为主的黄土震陷性明显; 而以粒状镶嵌、粒状胶结为主的黄土, 震陷性较低。

(3) 黄土震陷变形的机理在于土体在地震动荷载作用下结构状态出现显著调整, 其结构类型和震陷的临界动应力数值有着较为密切的关系。经过进一步的积累资料, 有可能为黄土微结构理论研究发展迈出有意义的一步。

(4) 由统计值变异系数,验证了利用微结构研究土样结构变化的可行性。

(5) 目前所做的工作只是在黄土微结构定量分析领域内的一些探索,今后随着资料的不断累积和研究工作的深入,可以预期将会从中找到广为应用的规律。随着显微图像处理技术和标准的进一步提高,黄土震陷变形特征的微观研究将展示出广阔的前景。

[参考文献]

- [1] 胡瑞林,等.粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M].地质出版社,1995.
- [2] 廖胜修.黄土显微结构的区域性变化与湿陷性的关系[A].见:中国黄土分类、定名及应用研讨会论文集[C].陕西人民教育出版社,1990.144—154.
- [3] 张振中,段汝文.黄土震陷研究与震害研究[J].西北地震学报,1987,9(增刊):14—18.
- [4] 李兰.兰州震陷性黄土的地震工程特性与震害预测[A].见:第四届全国地震工程会议论文集[C].杭州:浙江大学出版社,1994.55—59.
- [5] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学,1980,10(12):1203—1208.

STUDY ON THE RELATION OF LOESS SEISMIC SUBSIDENCE AND ITS MICROSTRUCTURE CHARACTERS

SHI Yu-cheng, LI Lan, LIU Hong-mei

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

Abstract: The seismic subsidence is one of major disasters in loess areas in China. The deformation mechanics of loess structure under earthquake loading are analyzed. By using electronic-microscope scanning, microstructure and grain shape of Q_3 loess, which has seismic subsidence property, are studied. It indicate that the microstructure of loess has great influence not only to the seismic subsidence coefficient, but also to the critical dynamic stress. Through the quantitative test analysis of pore content, the influence of middle-large pores on loess seismic subsidence is discussed and some items of loess samples' microstructure are compared and analyzed.

Key words: Loess; Seismic subsidence; Microstructure; Overhead pore