

# 饱和黄土液化的孔隙微结构特征

刘红玫, 王兰民

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 通过对黄土中各类孔隙含量的定量测试及数理分析, 介绍了黄土孔隙微结构的计算机图像处理分析方法, 并从孔隙微结构的角度研究了饱和黄土液化机理. 在此基础上, 建立了孔隙微结构特征与黄土液化势的定量关系, 从孔隙微结构角度对中国不同地区黄土液化势进行了评价.

**主题词:** 黄土; 微结构; 液化机理

**中图分类号:** P642.13<sup>+</sup>1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2002)02-0135-05

## 0 前言

饱和黄土的液化是黄土地区潜在的地震岩土灾害之一, 科学合理地进行分析评价, 是一项重要课题. 黄土作为一种多孔隙、弱胶结的粘性土体, 其物质组成和存在方式十分复杂. 一般由颗粒的形态、排列组合方式、孔隙性和接触关系等四部分特征加以概括, 工程实践表明这些要素能完全反映结构状态的性质和功能. 但对黄土液化这一具体的地震工程地质问题而言, 用一、二个结构参数对微结构形态加以刻画, 通过室内试验与理论分析, 是能够提示出二者(微结构与黄土液化)之间的内在联系的.

## 1 问题的提出

黄土液化具有许多不同于砂土液化的特征. 大量的动三轴试验研究已经证明, 黄土液化时其孔压比不能上升到接近 1 的程度, 随黄土种类的不同浮动范围大体在 0.3~0.8 之间. 黄土所特有的孔隙微结构是否是导致这一差异的主要原因之一呢? 理论分析认为<sup>[3]</sup>: 当黄土浸水处于饱和状态时, 饱和度一般为 80%~95% (试验结果), 通常低于砂土的饱和度. 此时中、大孔隙中充满了水, 而部分小孔隙和绝大多数微孔隙未充水. 在一定强度的动荷载作用下, 开始时由于原有微结构未遭破坏, 应变以弹性为主; 随着振次的增加以及易溶盐和中溶盐的大量溶解, 使得中、大孔隙结构强度降低而崩溃, 粉粒物质散离, 落向这些孔隙中. 在此过程中, 一方面孔隙体积减小, 孔隙水来不及排出而导致孔压上升, 作用于土骨架的有效应力急剧降低, 土的强度大幅度丧失, 应变急剧增大. 另一方面, 随着孔压的继续升高, 原来未充水的小孔隙和微孔隙由于孔壁隔水物质和胶结物溶解而充水, 这在一定程度上消散了原先充水的大、中、小孔隙中的水压力, 使孔压上升受到一定的制约而达不到有效围压.

收稿日期: 2001-03-27

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所青年基金资助项目(99232); 科技部社会公益研究专项资助(35-2000); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: 1C2002005

作者简介: 刘红玫(1971-), 女(汉族), 甘肃敦煌人, 工程师, 主要从事黄土地震工程研究.

为了对以上分析进行验证,我们开发了黄土孔隙微结构定量分析的计算机处理方法<sup>[2,3]</sup>.利用电子显微镜和计算机图像处理系统对黄土孔隙微结构进行定量的分析研究.

## 2 黄土孔隙微结构的计算机图像处理分析方法

使用黄土孔隙微结构的计算机图像处理分析方法,对液化前后的样品进行测量分析,以直方图的形式表征液化前后试样中各类孔隙含量的变化;并将分析结果与室内液化试验结果进行对比;并把微观特征和宏观力学性质结合起来进行分析.

先将土样按照电镜分析的要求制成合适的样品,放入电镜中进行观察(所用仪器为中国科学院兰州化学物理研究所的JSM-5600LV低真空扫描电子显微镜,其最高放大倍数为100万倍).在整体观察的同时,选定一定的区域对土样进行扫描,取得其二次像.将二次像通过已配置好的与计算机的接口板输入到计算机中,再利用图像处理系统进行分析,得到所需的参数.同时,还将土样拍成照片,以便进行对比分析.最后编程对其结果进行分析研究.

电子显微镜输入计算机的图像是用灰度表征其差异的黑白图像,需经过一系列的变换才可得到所需孔隙的参数,其主要过程如图1所示.

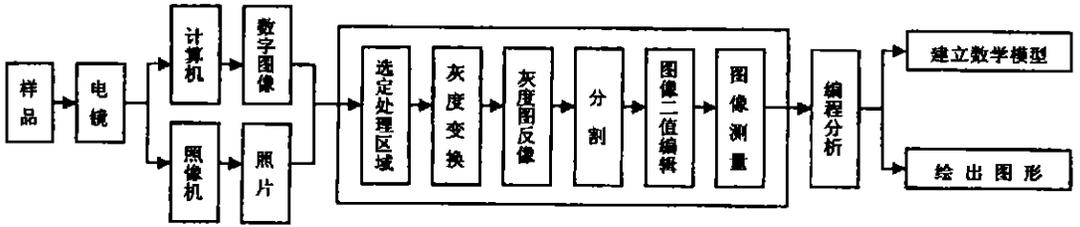


图1 获取黄土微结构参数的主要过程

Fig.1 The process of obtaining parameters of loess microstructure.

## 3 黄土液化前后的孔隙微结构特征

按照孔隙成因和半径的大小,黄土中的孔隙被分为微孔隙、小孔隙、中孔隙和大孔隙(表1)<sup>[4]</sup>.其中,微孔隙形成于胶结物中,这类孔隙在黄土中数量很多,分布杂乱,连通性差,透水性弱.中小孔隙均为粒间孔隙,小孔隙(又称镶嵌孔隙)存在于骨架颗粒相互穿插、紧密排列的部位,其多呈缝隙状,较小;而中孔隙由骨架颗粒相互支架构成(又称支架孔隙),一般较大,形状多样,这类孔隙连通性好、透水性强.而大孔隙主要是黄土中次生的根洞、虫孔、鼠穴、节理和裂隙以及溶蚀孔洞,该类孔隙含量较少.

通过扫描电子显微镜对试样液化变形前后各类孔隙的测量及分析发现:液化前原状土样中占比例最大的是中孔隙,液化后此类孔隙含量迅速下降,而微小孔隙的含量大幅度上升(图2).图3为饱和黄土液化前后孔隙微结构的电镜照片.

表1 黄土各类孔隙的定义

孔隙种类	孔隙半径/ $\mu\text{m}$	孔隙主要成因
大孔隙	$> 16$	根洞、虫孔、裂隙等
中孔隙	$4 \sim 16$	支架孔隙
小孔隙	$1 \sim 4$	镶嵌孔隙
微孔隙	$< 1$	胶结物孔隙

黄土的液化特征有异于砂土,主要是由于黄土特殊的组成和结构所决定的.即当饱和黄土所承受的振动荷载作用使其原有稳定的结构状态遭到破坏时,原来由土颗粒所承担的压力就要传给孔隙中的水分来承担,因而引起孔隙水压力的增高.同时随着胶结物的溶解和微孔隙和部分小孔隙的充水,部分地消散了孔隙中的水压力,使其达不到有效围压.而振动作用使黄土

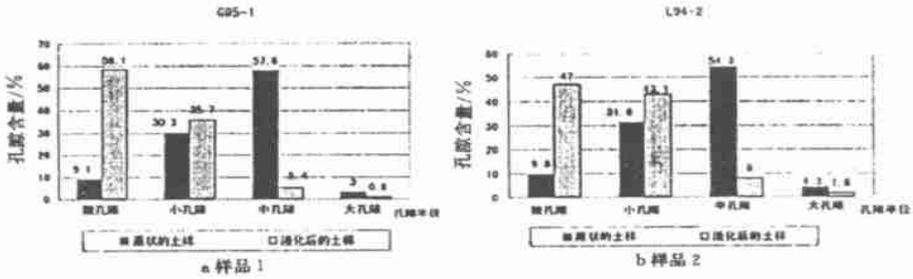


图 2 液化前后孔隙含量的对比

Fig. 2 Comparison of pore content before and after liquefaction.

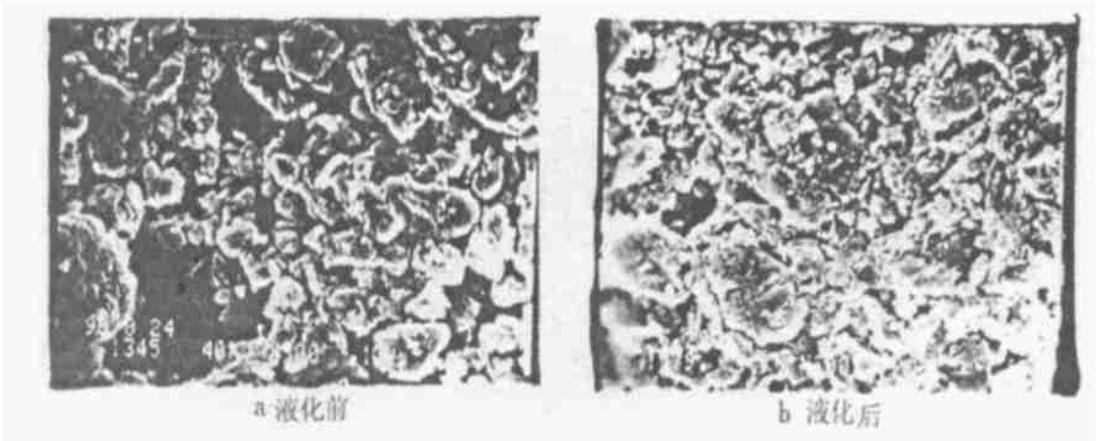


图 3 饱和黄土液化前后孔隙微结构的电镜照片

Fig. 3 Electron microscope photos of pore microstructure of saturated loess microstructure before and after liquefaction.

土体的结构发生破坏, 中大孔隙坍塌, 粉粒物质落入其中, 逐渐形成另一种稳定状态. 而对砂土而言, 虽然它是无粘性土, 但是砂土结构是颗粒接触, 这种结构在液化前所能达到的饱和度一般都接近 100%, 而在液化过程中没有结构性变化的问题, 因而孔压可以稳步发展, 直到孔压上升达到有效围压时, 砂土呈现“悬浮”状的流态性质. 与饱和砂土的“砂沸”液化机理不同, 黄土的液化则表现为“剪切流滑”和“结构再生”两方面的性质. 在这些过程中, 黄土的低抗剪强度、多孔隙弱胶结等都扮演了不可忽略的角色.

#### 4 孔隙微结构对黄土液化势的影响

为了进一步研究孔隙微结构特征与黄土液化的关系, 对液化前后黄土孔隙微结构资料与液化试验的有关资料进行了对比分析. 结果表明: 黄土液化时中、大孔隙含量减少, 而微小孔隙的含量增大, 其中中孔隙的减少和微小孔隙的增加最为显著. 而且孔压比、液化应力比与中小孔隙的变化量具有一定的相关性, 即液化应力比随着液化前后中孔隙相对减少量或微小孔隙相对增加量的增大而线性减小(图 4); 而液化振次随着中孔隙减少量和微小孔隙相对增加量呈指数规律增长(图 5). 也就是说, 在相同的液化标准下, 孔隙变化量越大, 液化应力比越小, 试样易液化; 而液化振次越高, 在动荷载作用过程中, 中孔隙破坏越多, 从而导致微小孔隙增多. 这两种关系分别可用公式(1)和公式(2)来表述.

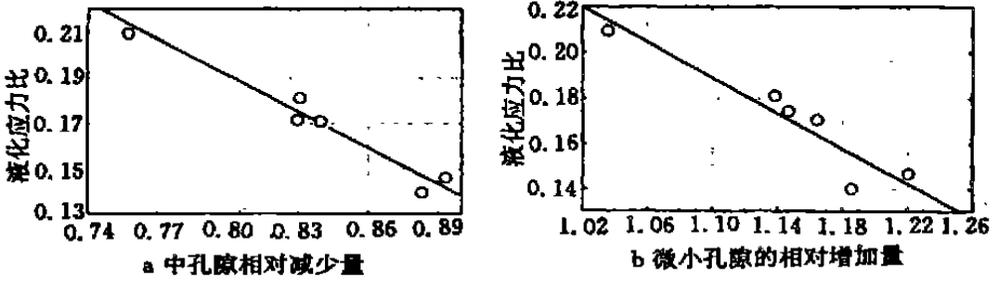


图4 孔隙变化量对液化应力比的影响

Fig. 4 Influence of pore varieties on liquefaction stress ratio.

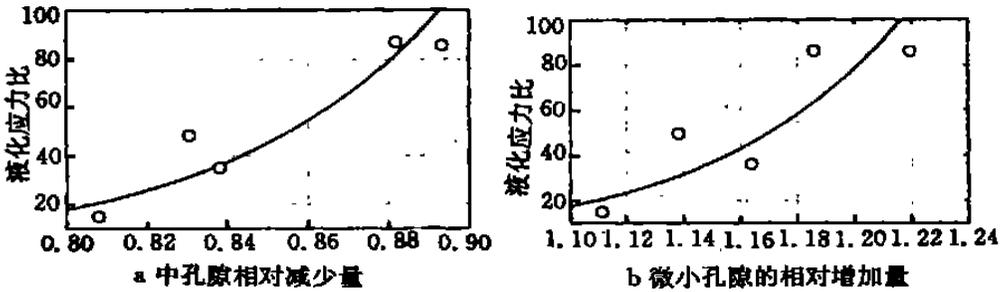


图5 孔隙变化量对液化振次的影响

Fig. 5 Influence of pore varieties on liquefaction vibration numbers.

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma_0} = A - B \frac{\Delta X}{X} \tag{1}$$

$$N = A - B e^{c \frac{\Delta X}{X}} \tag{2}$$

$\Delta X$  为液化后中孔隙或微小孔隙的变化量,  $X$  为液化前该类孔隙的含量.

图5还表明,中孔隙的相对减少量和微小孔隙的相对增加量是密切相关的.前面已论述了粉粒物质落入中大孔隙中,使得中大孔隙相对减少,从而导致了微小孔隙的大量增加.由于大孔隙个数远小于中孔隙,因此,液化与中孔隙关系更为密切.

对中、美、俄三国黄土的液化试验和孔隙微结构分析结果对比发现,中大孔隙含量对黄土液化势有显著的影响,其中中孔隙含量的影响更为显著.当中大孔隙含量大于25%时,黄土具有显著的液化势;当中大孔隙含量小于15%时,没有明显的液化势(图6).表2给出的黄土液化时各类孔隙含量的变化,也反映了这种影响.

上述研究结果,就可以从孔隙微结构角度对黄土液化势进行趋势评价.在中国,黄土中各类孔隙含量由西北向东南,在土层中自上而下的变化具有一定规律<sup>[4]</sup>.黄土液化势也随着孔隙变化成规律性变化(表3).

### 5 结论

影响黄土液化的因素很多,我们仅从孔隙微结构的角度对其进行了简要的阐述,通过上述试验及分析结果,可以认为:

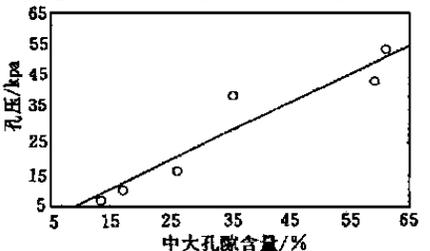


图6 中大孔隙含量对孔压的影响

Fig. 6 Influence of mid-large pore content on pore pressure.

(1) 黄土孔隙微结构是影响黄土液化的主要因素之一. 其中, 中大孔隙含量对黄土液化势有显著影响, 当中大孔隙含量小于 15% 时, 没有明显的液化势, 大于 25% 时, 具有显著的液化势. 而各类孔隙含量在液化前后发生显著变化: 中、大孔隙减少, 而微小孔隙含量大幅度增加.

(2) 本文开发的黄土微结构图像处理分析方法切实可行, 图像分析系统可以较准确地测得所需的孔隙参数.

表 2 黄土液化时各类孔隙含量的变化

大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
- 45 % ~ 75 %	- 80 % ~ 90 %	+ 50 % ~ 100 %	+ 300 % ~ 800 %

表 3 中国不同地区黄土的孔隙特征与液化势评价

孔隙类别	孔隙含量变化		液化势
	自西北向东南	自上而下	
大孔隙	增高	显著减少	自西北向东南 自上而下 液化势变小
中孔隙	显著减少	递减	
小孔隙	减少	增多	
微孔隙	大幅度增多	增多	

### [ 参考文献 ]

- [ 1 ] Wan Lanmin, Zhang Zhenzhong, Li Lan, et al. . Laboratory study on loess liquefaction[ A ] . See: Proc. 11<sup>th</sup> world conference on Earthquake Engineering[ C ] . 1996.
- [ 2 ] 刘红玫. 黄土孔隙微结构的计算机图像处理分析方法[ J ] . 高原地震, 1999, 11(3): 44—47.
- [ 3 ] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[ J ] . 岩土工程学报, 2000, 20(1), 75—80.
- [ 4 ] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[ M ] . 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

## STUDY ON THE LIQUEFACTION MECHANISM AND PORE MICROSTRUCTURE OF SATURATED LOESS

LIU Hong-mei, WANG Lan-min

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

**Abstract:** Through quantitative tests and numerical analysis of pore contents of loess, computer-added image manipulation method of microstructure of loess pore is introduced and the mechanism of saturated loess liquefaction is studied. The quantitative relations of pore microstructure and loess liquefaction potential are established and the loess liquefaction potentials in different areas of china are estimated with pore microstructure.

**Key words:** Loess; Microstructure; Liquefaction mechanism