

DOI: 10.11779/CJGE2019S2027

黄土微观参数指标与动弹性模量关联度研究

安亮¹, 邓津^{*1, 2, 3}, 郭鹏⁴, 张仰鹏⁵, 郑芳¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃 兰州 730000; 4. 天津大学岩土工程研究所, 天津 300072;

5. 吉林大学交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 取岷县地震台、庆阳黄土塬 2~12 m 深度土层的粉土、粉质黏土样品, 通过室内动三轴和扫描电镜试验, 测定了动弹性模量和微观结构特征, 研究了粉土、粉质黏土的动本构关系, 并采用关联度分析法研究了黄土竖向(沉积向)和横向(垂直于沉积向)的微观结构与最大动弹性模量之间的关系。研究结果表明: 粉土和粉质黏土的动本构关系都符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型。分形维数、概率熵和平均形状系数的变化对粉土、粉质黏土的最大动弹性模量的影响最敏感。其次是平均周长、长轴、短轴, 而平均面积对其影响则相对较小。针对粉土横竖向关联度, 横向微观参数对最大动弹性模量的影响更敏感; 而粉质黏土, 竖向微观参数对最大动弹性模量的影响更敏感。

关键词: 黄土; 动弹性模量; 微观结构; 灰色关联度原理; 双曲线模型; 各向异性

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0105-04

作者简介: 安亮(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的科研工作。E-mail: 17693235093@163.com。

Correlation between microscopic parameters and dynamic elastic modulus of loess

AN Liang¹, DENG Jin^{1, 2, 3}, GUO Peng⁴, ZHANG Yang-peng⁵, ZHENG Fang¹

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Geotechnical

Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Base of Institute of

Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China; 4. Geotechnical Engineering Institute, Tianjin

University, Tianjin 300072, China; 5. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The silty soil and silty clay samples of 2~12 m-deep soil layer of the Minxian Seismic Station and the Qingshui Loess Plateau are studied by the dynamic triaxial and scanning electron microscopy experiments, and the dynamic elastic modulus and microstructure characteristics are measured. The dynamic constitutive relation of silty clay is studied. The relationship between the vertical structure of the loess and the transverse (perpendicular to sedimentary direction) and the maximum dynamic elastic modulus are studied by the correlation analysis method. The results show that the dynamic constitutive relations of silt and silty clay are consistent with the Hardin-Dinevich hyperbolic model. The influences of fractal dimension, probability entropy and average shape coefficient on the maximum dynamic elastic modulus of silt and silty clay are the most sensitive. Secondly, for the average circumference, long axis and short axis, the average area has a relatively small impact on them. In view of the vertical and horizontal correlations of silt, the influences of transverse microscopic parameters on the maximum dynamic elastic modulus are more sensitive. For the silty clay, the influences of vertical microscopic parameters on the maximum dynamic elastic modulus are more sensitive.

Key words: loess; dynamic elastic modulus; microstructure; principle of grey correlation; hyperbolic model; anisotropy

0 引言

动弹性模量作为土动力特性重要参数, 是土层和地基地震反应分析中必备的动力参数, 也是地震小区划分析中必不可少的参数。孙德安等^[1]研究了净围压和初始含水率对动弹性模量的影响。王谦等^[2]研究了甘南地区次生黄土的动本构关系。李又云等^[3]研究了压实黄土的含水率和干密度对动弹性模量的影响。

近几十年来, 随着 CT 扫描和电镜扫描技术的不断发展, 土体微观研究突飞猛进, 从微观角度研究黄土的特征表现也成为了一种趋势。安亮等^[4]运用 CT 细观扫描试验探索黄土渗透液化的细观变化, 可初步

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578518)

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者 (E-mail: dengjin@gsdzj.gov.cn)

判断液化的强弱。王兰民等^[5]研究了黄土微观结构架空孔隙，并基于架空孔隙的量化数据建立了黄土震陷系数计算公式，提出了震陷过程中应力应变发展的5个阶段。

土体的微细观结构是其宏观物理、力学表现的根本所在。李识博等^[6]采用PFC3d建立黄土三轴试验模型，与室内试验进行对比分析，发现动弹性模量与数值模型中微观参数有着密切的联系。但对于黄土动力特性与微观各向异性关联度的研究较少。

本文对取自岷县粉土和庆阳粉质黏土进行室内动三轴和电镜扫描试验，采用灰色关联度方法^[7]研究了不同深度下粉土和粉质黏土颗粒横向和竖向微观参数与宏观力学参数之间的联系，建立并分析了粉土和粉质黏土颗粒在竖向和横向两个方向的微观差异性及与动弹性模量的关联度，为岷县台地区的黄土病害治理提供指导。

1 材料及试验方法

1.1 材料

本次动三轴试验土样取自甘肃省岷县地震台和庆阳黄土塬，取样深度：岷县为2.0, 2.5, 4.0, 8.0 m；庆阳为3, 6, 9, 12 m。岷县黄土颗粒以粉粒为主，庆阳黄土颗粒以黏粒为主，试验用土的基本物理力学性质指标见表1。

表1 试样的物性指标

Table 1 Physical indexes of sample

试样编号	土样质量/g	密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	取样深度/m	孔隙比
MX-1	148.31	1.54	9.2	2.0	0.75
MX-2	148.11	1.54	8.3	2.5	0.75
MX-3	148.06	1.54	8.7	4	0.75
MX-4	148.63	1.55	8.6	8	0.74
QY-1	154.05	1.60	9.0	3	0.68
QY-2	158.75	1.65	10.0	6	0.64
QY-3	162.34	1.69	12.2	9	0.59
QY-4	154.04	1.60	11.0	12	0.68

1.2 微观试验

不同深度下黄土微观结构照片如图1所示。图1为岷县、庆阳不同深度下横向和竖向原状土样的SEM照片，由图1可见，深度较浅的黄土（2.5~4.0 m）颗粒之间多成点接触，孔隙较大，排列疏松，使得浅层黄土结构不稳定，在外力作用下容易发生破坏；随着深度的增加（8~12 m），由于上覆土层压力的增加，颗粒排列变得紧密，黄土孔隙结构中主要以小孔隙为主。

2 结果及分析

2.1 动弹性模量试验

根据动弹性模量的定义，首先验证试验曲线是否符合双曲模型。依据试验结果计算弹性阶段每一级循

环荷载下岷县、庆阳黄土的动弹性模量 E_d 和动弹性模量的倒数 $1/E_d$ ，绘制出不同深度黄土的 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线，如图2, 3所示。

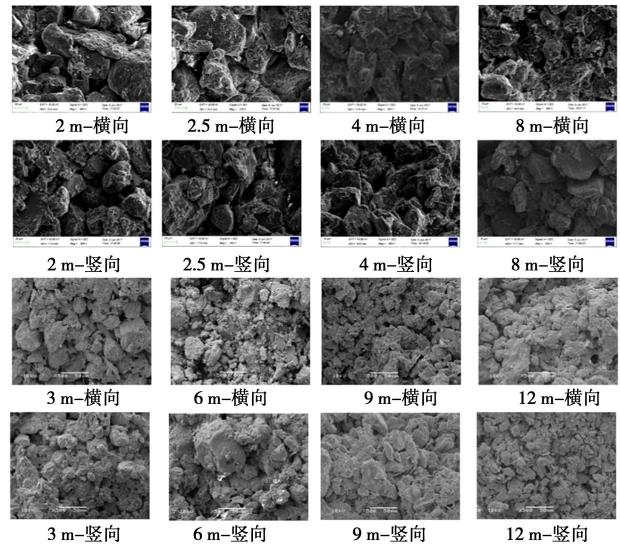


图1 岷县、庆阳黄土不同沉积方向SEM照片

Fig. 1 SEM photos of Minxian and Qingyang loesses in different sedimentary directions

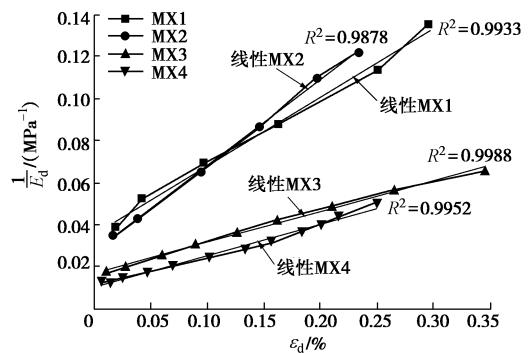


图2 岷县台黄土的 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

Fig. 2 Curves of $1/E_d - \varepsilon_d$ of loess in Minxian

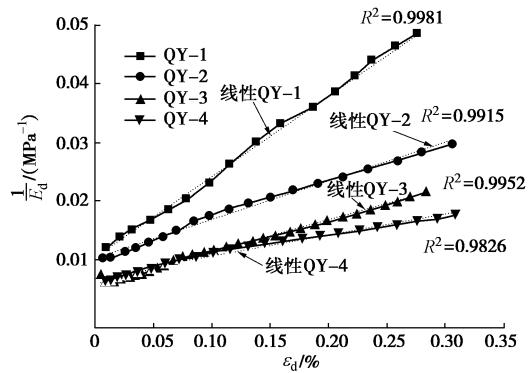


图3 庆阳黄土的 $1/E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

Fig. 3 Curves of $1/E_d - \varepsilon_d$ of loess in Qingyang

从图2, 3中可以看出，同一深度下，粉土、粉质黏土 $1/E_d$ 随着轴向应变的增加呈现出线性增加的趋势，符合双曲线模型，即粉土和粉质黏土的动本构关

系都符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型^[8]。根据图 2, 3 可知, 不同深度的粉土和粉质黏土的动弹性模量的倒数 $1/E_d$ 和动应变 ε_d 存在较好的线性相关关系:

$$\frac{1}{E_d} = a + b\varepsilon_d \quad , \quad (1)$$

式中 a , b 为模型参数, 如表 2 所示。

表 2 双曲线模型参数

Table 2 Parameters of hyperbolic model

试样编号	模型参数		相关系数 R^2
	a	b	
MX-1	0.0359	0.326	0.9933
MX-2	0.0103	0.1506	0.9878
MX-3	0.0272	0.4101	0.9988
MX-4	0.0173	0.1468	0.9952
QY-1	0.0104	0.1399	0.9981
QY-2	0.0103	0.0659	0.9915
QY-3	0.0058	0.0544	0.9952
QY-4	0.0069	0.0367	0.9826

2.2 微观试验参数分析

通过颗粒及裂隙图像识别分析系统(PCAS)^[9]对黄土颗粒微观结构进行分析处理所得参数见表 3, 4。

综合岷县、庆阳黄土微观颗粒分析表明, 粉土和粉质黏土颗粒平均周长、平均面积、长轴和短轴都随着最大动弹性模量的增大而减小; 概率熵表征颗粒的定向性, 对于粉土和粉质黏土, 粉质黏土的定向性更差。

3 动弹性模量和微观结构的关联度分析

基于表 3, 4 微观试验结果, 可见颗粒平均面积、平均周长、长轴和短轴与最大动弹性模量有很大的相关性。因而本文基于灰色关联度分析法进一步研究了土的微观结构参数和宏观力学参数之间的联系。

(1) 参考数列、比较数列选择

本文以土体最大动弹性模量与黄土颗粒在横竖两个不同方向上的微观结构参数 $X_i(k)$ (i 分别为分形维数)

表 3 岷县粉土微观结构定量参数统计

Table 3 Quantitative parameter statistics of microstructure in Minxian

取样深度/m	$E_{d\max}$ /MPa	分形维数		概率熵		形状系数		平均面积		平均周长		长轴		短轴	
		横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖
2.0	27.8	1.1	1.1	0.96	0.98	0.35	0.39	246	137	79	52	21	14	11	8
2.5	59.5	1.0	1.0	0.97	0.98	0.38	0.38	123	85	52	45	14	13	7	7
4.0	57.8	1.0	1.0	0.94	0.94	0.35	0.35	313	289	94	81	26	24	13	12
8.0	97.0	1.1	1.0	0.98	0.98	0.36	0.34	134	160	63	71	17	19	10	11

表 4 庆阳粉质黏土微观结构定量参数统计

Table 4 Quantitative parameter statistics of microstructure in Qingyang

取样深度/m	$E_{d\max}$ /MPa	分形维数		概率熵		形状系数		平均面积		平均周长		长轴		短轴	
		横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖	横	竖
3	96	1.10	1.12	0.97	0.98	0.32	0.36	176	177	63	65	16	16	10	10
6	97	1.07	1.07	0.98	0.98	0.37	0.37	122	122	52	52	14	14	9	9
9	172	1.06	1.06	0.97	0.98	0.38	0.46	81	105	44	47	13	14	8	8
12	149	1.10	1.07	0.99	0.96	0.43	0.41	94	149	47	58	14	17	8	9

数、概率熵、平均形状系数、平均面积、平均周长、长轴和短轴) 分别建立关联度。

以颗粒的微观结构参数为变量 $X_i(k)$, 以不同动荷载试验条件下最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 为变量 $X_0(k)$ 。假设 $X_0(k)=fX_i(k)$, 则变量 $X_0(k)$ 与变量 $X_i(k)$ 按 f 关系相关联。其中 $X_0(k)$ 对应序列即为参考序列, $X_i(k)$ 对应序列即为比较序列。

(2) 本文运用均值法对原始数据进行无量纲化处理

均值法表达式为

$$X'_i = \frac{X_i(k)}{X_l} \quad , \quad (2)$$

$$\bar{X}_l = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad . \quad (3)$$

(3) 构造关联离散函数, 计算关联系数

以参考序列集 $X'_0(k) = \{X'_0(k), k=1, 2, \dots, m\}$ 量化后值作为参考基准, 以比较序列 $X'_i(k) = \{X'_i(k), k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n\}$ 量化后值作为比较数据列, 接近度为

$$\Delta_i(k) = |X'_i(k) - X'_0(k)| \quad . \quad (4)$$

关联系数计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad , \quad (5)$$

式中, Δ_{\max} , Δ_{\min} 为最大和最小极差, $\Delta_{\max} = \max(i) \max(k) \{\Delta_i(k)\}$, $\Delta_{\min} = \min(i) \min(k) \{\Delta_i(k)\}$, $i \in (1, 2, \dots, n)$, $k \in (1, 2, \dots, m)$, 依据前人研究 $\rho = 0.5$ 。

(4) 计算灰色关联度

由以上式 (4), (5) 所得结果计算微观结构参数与动弹性模量关联度:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) \quad . \quad (6)$$

取 $\rho = 0.5$ ，关联度 γ 取值 $0 \sim 1$ ，其值越接近于 1，表示关联越紧密。按此计算方法得到岷县粉土、庆阳粉质黏土横向的关联度值，计算结果如表 5 所示。

表 5 颗粒横向比较系列与参考系列关联度统计表

Table 5 Correlation statistics of horizontal and vertical comparison series of particles and reference series

地 点	方 向	分 形 维 数	概 率 熵	平 均 形 状 系 数	平 均 面 积	平 均 周 长	长 轴	短 轴
岷 县	竖	0.67	0.70	0.67	0.43	0.54	0.52	0.54
庆 阳	横	0.73	0.72	0.71	0.45	0.53	0.53	0.55
岷 县	竖	0.63	0.64	0.75	0.64	0.62	0.71	0.64
庆 阳	横	0.62	0.62	0.75	0.46	0.53	0.59	0.56

从表 5 关联度结果表明，岷县粉土在竖向上关联度顺序依次为：概率熵、分形维数、平均形状系数、平均周长、短轴、长轴和平均面积；横向：分形维数、概率熵、平均形状系数、短轴、平均周长、长轴和平均面积。庆阳粉质黏土在竖向上关联度顺序依次为：平均形状系数、长轴、概率熵、短轴、平均面积、分形维数和平均周长；横向：平均形状系数、概率熵、分形维数、长轴、短轴、平均周长和平均面积。分形维数对粉土最大动弹性模量影响最大，平均形状系数对粉质黏土最大动弹性模量的影响最敏感。

4 结 论

通过灰色关联度分析理论对岷县、庆阳地区黄土最大动弹性模量影响参数敏感性的分析，可以的如下 3 点结论。

(1) 对于粉土和粉质黏土，粉质黏土的定向性更差。动本构关系符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型。

(2) 分形维数、概率熵和平均形状系数对粉土和粉质黏土的最大动弹性模量影响最敏感，其次是平均周长、短轴和长轴，而平均面积的影响相对较小。

(3) 不同沉积方向下，粉土在横向的微观参数对最大动弹性模量的影响程度更大；粉质黏土在竖向的微观参数对最大动弹性模量贡献率更高。

黄土颗粒的微观分布参数对其动力特性的影响有重要的作用，基于黄土动力特性认识的微观参数分析还需要深入的研究。

参 考 文 献：

- [1] 孙德安, 吴 波. 非饱和粉土的动弹性模量和阻尼比研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1108 - 1113. (SUN De-an, WU Bo. Study on dynamic modulus and damping ratio of unsaturated silt[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,

43(9): 1108 - 1113. (in Chinese))

- [2] 王 谦, 李 娜, 王 平, 等. 甘南地区黄土的动模量与阻尼比特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 192 - 197. (WANG Qian, LI Na, WANG Ping, et al. Behaviors of dynamic modulus and damping ratio of loess in Gannan region of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 192 - 197. (in Chinese))
- [3] 李又云, 谢永利, 刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037 - 1046. (Experimental research on dynamic characteristics of roadbed compaction loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037 - 1046. (in Chinese))
- [4] 安 亮, 邓 津, 王兰民. 黄土液化微观特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, 20(2): 1673 - 8047. (AN Liang, DENG Jin, WANG Lan-min. Experimental Investigation of Micro-mesoscopic Features of Loess Liquefaction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 20(2): 1673 - 8047. (in Chinese))
- [5] 王兰民, 邓 津, 黄 媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3025 - 3031. (WANG Lan-min, DENG Jin, HUANG Yuan. Quantitative analysis of microstructure of loess seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3025 - 3031. (in Chinese))
- [6] 李识博, 王常明, 马建全, 等. 陇西黄土三轴剪切过程微观变化研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3299 - 3305. (LI Shi-bo, WANG Chang-ming, MA Jian-quan, et al. Microscopic changes of Longxi loess during triaxial shear process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3299 - 3305. (in Chinese))
- [7] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. (DENG Ju-long. Gray theory basis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97 - 106.

(责编: 孙振远)