

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007064

# 无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

孙茜<sup>1,2</sup>, 阎长虹<sup>1</sup>, 刘羊<sup>3</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 南京理工大学紫金学院, 江苏南京 210046; 3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东广州 510060)

**摘要:** 近年来基坑、隧洞等开挖工程活动中的卸载导致黏性土体发生过大侧向变形, 引起的工程事故越来越多。目前多采用测斜仪对基坑周围土体变形进行水平位移监测, 然而由于软土的特殊工程性质, 在监测中软土无法带动测斜仪一起变形, 往往监测效果不尽人意, 不能准确给出实际软土的真实变形。因此, 需要加强开挖卸荷工程施工中土体的侧向变形监测技术研究工作。本文基于磁性矿物受荷载变形具有定向性特征, 运用磁组构试验对无侧限压缩后的黏性土试样进行磁各向异性研究, 同时与有侧限压缩试验变形测试结果进行比较, 分析试验轴向应力、土样含水率对无侧限压缩条件下磁各向异性的影响规律, 以及主磁化率值与应变的数学关系, 探讨了由黏性土磁各向异性推求其受力变形规律的可行性。研究成果表明, 受力作用的黏性土变形与其磁性矿物定向性具有较好的一致性。这一认识对于有效监测软土地区卸荷工程周围软土变形情况具有重要的理论意义和实际应用价值。

**关键词:** 无侧限压缩; 侧向变形; 含水率; 磁各向异性

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0123-08

## A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

SUN Qian<sup>1,2</sup>, YAN Changhong<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 2. Zijin College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 3. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510060, China)

**Abstract:** In recent years, the unloading of excavation engineering activities such as foundation pits and tunnels has caused excessive lateral deformation of cohesive soil, which result in more and more engineering accidents. At present, the inclinometer is often used to monitor the horizontal displacement of the soil around the foundation pit. However, due to the special engineering properties of soft soil, the inclinometer cannot be driven to deform with the soft soil during monitoring. The effect of monitoring is often unsatisfactory and inaccurate to reflect the true deformation. Therefore, it is necessary to strengthen the research of lateral deformation monitoring technology of soil in the construction of excavation unloading engineering. In this paper, based on the directional characteristics of the deformation of magnetic minerals under loading, the magnetic fabric test is used to study the magnetic anisotropy of the cohesive soil sample after unconfined compression test and then to compare with the results of the confined one. The paper then discusses the mathematical relationship between the main magnetic susceptibility value and the strain as the consequence of the analysis of the influence of the axial stress and the moisture content

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-16

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目资助(18KJB170006); 江苏高校哲学社会科学基金项目资助(2018SJA2103)

第一作者: 孙茜(1983-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事软土变形研究工作。E-mail: sqiannju@163.com

通讯作者: 阎长虹(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质工程地质科研和教学工作。E-mail: yanqh@nju.edu.cn

of soil on the magnetic anisotropy under unconfined compression. Finally, the feasibility of the calculation of the law of force and the deformation from the magnetic anisotropy of the cohesive soil is explored. The research results show that the deformation of the cohesive soil under force has good consistency with its orientation of magnetic mineral. This understanding has important theoretical significance and practical application value for effectively monitoring the deformation of soft soil around unloading projects in soft soil areas.

**Keywords:** unconfined compression; lateral deformation; moisture content; magnetic anisotropy

软土在我国沿海、沿江、沿湖等地区分布非常广泛,它具有含水率高、孔隙比大、压缩性强、渗透系数低、灵敏度高、强度低等特性。在基坑开挖或隧洞掘进时其周边土体将发生应力卸载,引发应力场的突变,同时工程扰动会导致软土结构破坏使其强度大大降低,从而在卸载临空面附近发生大的侧向变形,进而引发支护结构倾覆破坏,导致周边地面沉降<sup>[1-3]</sup>。地基变形监测通常采用测斜仪,由于扰动的高含水软土强度小,测斜管强度大,扰动土在发生变形时,无法带动测斜管一起发生变形,常出现监测变形量很小、而实际变形很大,或软土流动变形影响范围大导致监测布置范围常达不到实际变形范围的现象,不能起到变形预警作用。针对工程施工卸荷作用软土变形监测难度大的问题,基于磁性矿物受荷载变形具有定向性特征,运用磁组构试验研究受力作用下黏性土变形和磁性矿物定向性的关系,尝试引入一种运用磁各向异性技术监测软土变形的新技术,实现有效监测卸荷工程周围软土的变形的目标。

目前已有研究成果显示岩土体受荷载后发生变形,使矿物颗粒具有一定的定向性,该定向性同时也体现在磁性矿物上,从而引起磁化率在各个方向的差异,即磁化率各向异性。磁化率各向异性可以快速、灵敏地指示岩土体的变形,被广泛用于地质和古今环境变迁研究。Rathore<sup>[4]</sup>、Henry 等<sup>[5]</sup>、Cifelli 等<sup>[6]</sup>、张淑伟等<sup>[7]</sup>通过磁化率各向异性研究了构造变形。顾延生等<sup>[8]</sup>、霍斐斐等<sup>[9]</sup>、刘彩彩等<sup>[10]</sup>、艾可可等<sup>[11]</sup>对黄土、红土、下蜀土等特殊土进行了磁性研究,通过磁化率各向异性研究土的成因,为地层划分提供依据。谢兴俊等<sup>[12]</sup>、唐锐桢等<sup>[13]</sup>利用磁化率各向异性研究了古气候、古风向和古水文变化。

岩土体应变椭球的 3 个主轴和磁化率椭球的 3 个主轴方向一致且相互平行,二者的主轴长度存在一定的数量关系。Carmichael<sup>[14]</sup>通过大量试验研究了岩石在单轴压缩作用下磁化率的变化规律。研究结果表明,磁化率在平行于应力作用方向上减小,而在垂直于应力作用方向上略有增加;Sun 等<sup>[15]</sup>研究了实验室

压实的磁铁矿-黏土合成物和天然海洋沉积物的磁组构和微观结构,发现磁颗粒附着于黏土颗粒,磁组构和黏土颗粒的定向方式一样有规律发育;Borradaile 等<sup>[16]</sup>指出,磁化率各向异性是研究岩石结构的多功能工具,磁化率各向异性可以推断岩石中主要矿物的方向分布,反映岩石有限应变的方向,记录同期的结晶主应力方向等;Ruf 等<sup>[17]</sup>在研究糜棱岩带时发现,磁化率各向异性能够记录弱磁化岩石中的有限应变,磁化率椭球与有限应变椭球的方向一致,并存在一定的数学关系。从上述研究成果来看,岩土体磁化率各向异性的研究主要集中在古气候、古风向研究以及土壤地层划分方面,关于磁化率各向异性与应变关系的研究,研究对象主要是构造地质作用下的岩石,黏性土几乎没有涉及。本文将原状软土制成不同含水率的黏性土重塑样,研究不同侧限、不同加卸载条件下试样的磁化率各向异性特征,重点研究了无侧限压缩条件下轴向应力、土样含水率对黏性土磁各向异性的影响规律,探讨由黏性土磁各向异性推求其受力变形规律的可行性。

## 1 试验材料

### 1.1 土样准备

试验土样为取自南京市江北新城区的第四系河流冲积相淤泥质粉质黏土,该层土呈千层饼状,即淤泥质土夹薄层粉土,层理发育,含有机质,略有臭味,其物理力学指标如表 1 所示,用筛分和密度计联合测定法测出黏土的粒径分布如表 2 所示。

表 1 软土的物理力学性质指标

Table 1 Physical parameters of the soil					
天然含水率 w/%	天然孔隙比 e	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	液性指数 $I_L$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa
39.9	1.130	17.7	1.68	5.4	11.9

表 2 粒径分布

Table 2 Particle size distribution					
粒径/mm	0.075 ~ 0.25	0.05 ~ 0.075	0.005 ~ 0.05	0.002 ~ 0.005	<0.002
含量/%	6.8	9.5	60.3	9.3	14.2

本文将原状软土重塑后进行试验,经重塑后,土体的结构被破坏,强度较原状土大大降低。通过配置不同含水率土样进行试验,发现当含水率高于28%时,土样失去自稳能力,更无法进行加载试验,因此选取含水率区间为20%~28%。控制干密度为 $1.48\text{ g/cm}^3$ ,设计含水率分别为20%、24%、26%、28%。将土样分层压实,制成横截面积 $30\text{ cm}^2$ 、高度 $3\text{ cm}$ 的圆柱体试样。

## 1.2 土样矿物成分分析

X射线衍射(X-ray diffraction)是一种重要的多物相分析方法。结晶物质都有特定的化学组成和结构参数,将样品和已知物相的衍射数据或图谱进行一一比对,从而分析试样的矿物成分。XRD试验在南京大学地球科学与工程学院X射线衍射实验室进行。测试使用日本理学DMAX RAPID II型二维面探测器衍射仪,采用微区毛细管透射法进行测量。实验参数如下:光源功率:50 kV 90 mA;激发靶材:Mo;光路系统:0.1 mm 准直管;测试方式:透射;样品载具:Kapton管;直径:0.5 mm;Omega角模式: $0^\circ$ 固定;Phi角模式: $6^\circ/\text{s}$ 旋转;计数时间:9 min;数据转换:自动。运用Jade6.0软件分析,X射线衍射图谱见图1。

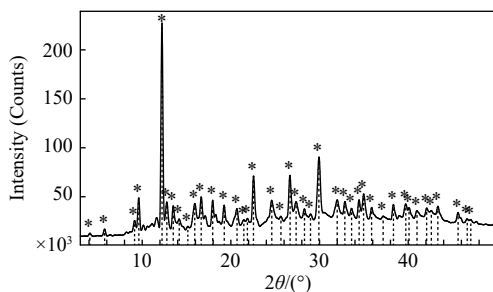


图1 X射线衍射图谱。

Fig. 1 XRD pattern of the soil sample

试验测得数据( $2\theta$ 、 $d$ 、 $I/I_1$ )与标准衍射数据比较,即可进行物相的定性鉴定。经比对,样品中主要矿物有石英、黏土矿物、云母、方解石、赤铁矿、针铁矿、褐铁矿、磁铁矿、黑锰矿、软锰矿、石盐、 $\alpha$ -铁等。其中,黏土矿物主要有高岭石、伊利石和蒙脱石。各物相的含量与衍射线强度成正比,而强度又与峰面积成正比,因此,利用各物相的峰面积与总的峰面积百分比即可大致换算出样品中每个物相的含量(图2)。

试样矿物成分中,强磁性矿物有磁铁矿、 $\alpha$ -铁;弱磁性矿物有赤铁矿、针铁矿、褐铁矿、黑锰矿、软锰矿;无磁性矿物有石英、方解石、黏土矿物、云母、石盐。从不同磁性强度矿物的含量上看,强磁性矿物约

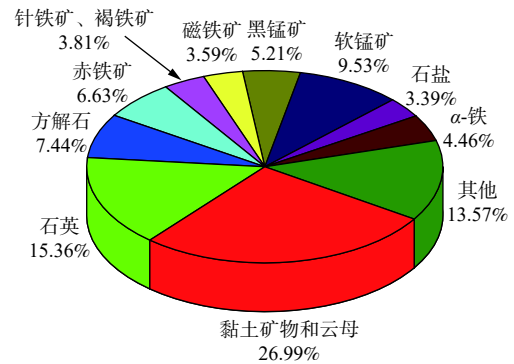


图2 试样矿物成分及含量

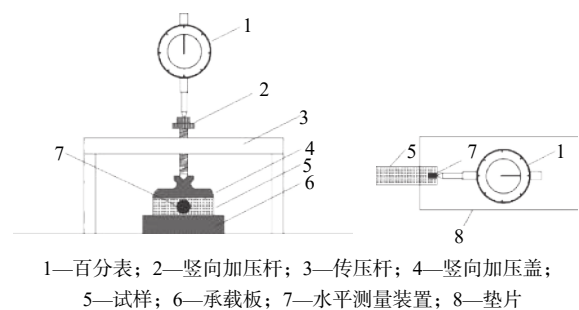
Fig. 2 Content of mineral components in the sample

占矿物总量的8.05%,弱磁性矿物约占矿物总量的28.77%,无磁性矿物约占矿物总量的53.18%。由于土中磁性矿物(包括强磁性矿物和弱磁性矿物)含量超过30%,且磁化率试验具有极高的灵敏度和精确度,因此对黏性土进行磁性研究是可行的。

## 2 试验方法

### 2.1 无侧限压缩试验

现有的土工试验方法通常采用常规土工试验、三轴试验及蠕变试验等,研究黏性土在固结排水条件下的垂直变形,水平位移则需要由排水体积变形和试样垂直变形换算得到,无法直接测读。本文采用在WG型三联中压固结仪基础上改装而成的无侧限压缩试验装置<sup>[18]</sup>,如图3所示。试样置于承载板上,试样上部和加压盖相连,竖向荷载通过竖向加压杆给试样加载。采用百分表测量土体竖向及水平变形,竖向百分表置于加压杆上,水平百分表用固定支架固定,表头与试样侧向接触。



1—百分表;2—竖向加压杆;3—传压杆;4—竖向加压盖;  
5—试样;6—承载板;7—水平测量装置;8—垫片

图3 无侧限压缩试验装置简图

Fig. 3 Sketch of the unconfined compression test device

含水率分别为20%、24%、26%和28%的试样分别在轴向应力12.5、50、100 kPa作用下变形稳定,试验方案见表3。

表 3 不同含水率无侧限压缩试样加载方案  
Table 3 Loading scheme of soil samples with different moisture contents

试样编号	含水率/%	轴向应力/ kPa
1-1	20	12.5
1-2		12.5—50
1-3		12.5—50—100
2-1	24	12.5
2-2		12.5—50
2-3		12.5—50—100
3-1	26	12.5
3-2		12.5—50
3-3		12.5—50—100
4-1	28	12.5
4-2		12.5—50
4-3		12.5—50—100

将试样的轴向应变与侧向应变之比定义为应变比( $L_1/L_3$ )。每级荷载作用下选取一系列含水率与变形稳定后的应变比数据绘制成图 4<sup>[19]</sup>。当轴向应力保持一定时,随着含水率的增加应变比呈现逐渐减小的趋势,表明轴向应变的增加速率小于侧向应变。当含水率保持一定时,随着轴向应力的增大,应变比呈现逐渐减小的趋势,意味着轴向应变的增加速率小于侧向应变。

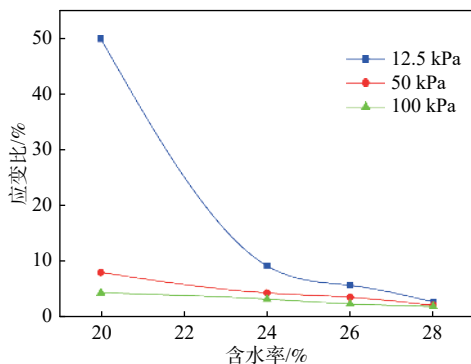


图 4 不同轴向应力条件下应变比随含水率的变化关系  
Fig. 4 Correlation between the strain ratio and moisture content

### 2.2 有侧限压缩试验

为了与无侧限压缩试验进行对比,在 WG 型三联中压固结仪进行一系列有侧限压缩试验。有侧限压缩试样(C1~C6)的制样方法均相同,含水率均为 24.6%。其中,C1~C3 为有侧限加载试样,C4~C6 为有侧限卸载试样,加载方案见表 4。施加 1 kPa 的预压力后,分级施加固结压力,压力等级为 25, 50, 100, 200, 400, 800 和 1 600 kPa,施加每级压力后 24 h 再加下一级荷载。

### 2.3 磁化率各向异性试验

对上述经压缩变形稳定的黏性土样进行磁化率

各向异性(AMS)试验。由于土样在各个方向的磁化率均不同,因此对每个土样都选取了 4 个不同方位的试样,如图 5 所示。

表 4 有侧限压缩试样加载方案  
Table 4 Loading scheme of soil samples under confined compression conditions

试样编号	加载方式/kPa
有侧限加载	C1 25—50—100—200—400
	C2 25—50—100—200—400—800
	C3 25—50—100—200—400—800—1 600
有侧限卸载	C4 25—50—100—200—400—800—1 600—200
	C5 25—50—100—200—400—800—1 600—400
	C6 25—50—100—200—400—800—1 600—800



图 5 磁各向异性试样

Fig. 5 Sample of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS)

在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成试样的磁化率测量,采用捷克斯洛伐克 AGICO Inc 公司生产的 KLY-3 型 Kappa-bridge 磁化率仪(图 6),灵敏度为  $2 \times 10^{-8}$  (SI)。测试前首先测量仪器背景值,若背景值标准误差小于  $0.1 \times 10^{-6}$ ,则保存背景值数据,若背景值不符合要求,用酒精对仪器进行擦拭直至符合要求。调整试样的测量方向,分别测量 1, 2, 3 三个方向的磁化率(图 7),电脑自动输出该土样的磁化率统计参数。



图 6 磁化率各向异性试验仪器

Fig. 6 AMS test instruments

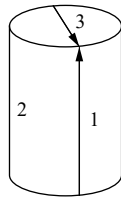


图7 磁化率各向异性测量方向

Fig. 7 Measuring directions of the specimen

### 3 试验结果分析

#### 3.1 土样磁各向异性

磁化率张量椭球的方向特征用磁化率椭球赤平投影图表征,与构造地质学中的赤平投影图类似,磁化率的主方向可用偏角和倾角表示。在磁化率椭球赤平投影图中,圆周上的角度代表主磁化率方向的偏角,点到圆心的距离代表主磁化率方向的倾角。圆周上的各点倾角为零,圆心位置处的倾角为 $90^\circ$ 。试验数据经 Anisoft 软件处理,可得到不同土样在各种受力条件下的磁化率椭球赤平投影图(图8)。

由图8(a)—(d)可以看出,无侧限压缩条件下,土样的最小主磁化率 $K_3$ (图中正方形标记)较均匀地分布在磁化率椭球赤平投影图圆心周围,最大主磁化率 $K_1$ 和中间主磁化率 $K_2$ (分别为图中三角形标记和圆形标记)分布在赤平投影图的四周。对比有侧限条件下加载土样与卸载土样的磁化率椭球赤平投影图(图8e、f),可以发现加载土样(C1、C2、C3)的最小主磁化率 $K_3$ 分散在圆心附近, $K_1$ 、 $K_2$ 分布在赤平投影图的四周,而卸载土样(C4、C5、C6)刚好相反,最大主磁化率 $K_1$ 较均匀地分布在圆心周围, $K_2$ 、 $K_3$ 分布在赤平投影图的四周。

土体受力变形后,土中磁性矿物定向排列,引起磁化率在不同方向的差异性。土样经竖向加载后,发生侧向变形,土颗粒发生指向外侧的侧向移动,侧向成为土中磁性矿物定向排列的优选方向,即最大主磁化率方向。因此,土样经加载后,最大主磁化率方向倾角为零,最大主磁化率 $K_1$ 分布在赤平投影图的四周。反之,土样经卸载后,土体同时发生竖向回弹变形和一定程度的指向内侧的侧向变形,土体变形以竖向回弹变形为主,竖向成为土中磁性矿物定向的优选方向,也就是最大主磁化率方向的优选方向。因此,土样经卸载后,最大主磁化率方向倾角近似为 $90^\circ$ ,最大主磁化率 $K_1$ 分布在赤平投影图的圆心附近。此结论与岩样单轴压缩试验一致。

对比无侧限压缩土样和有侧限压缩土样的磁化

率椭球赤平投影图,总体上可以看出,无侧限压缩土样的主磁化率点分布更集中,比有侧限条件下土样的磁各向异性更明显。

#### 3.2 磁各向异性与无侧限变形的定量关系

磁化率各向异性度 $P_j$ 反映颗粒排列的有序化程度。在无侧限单轴压缩条件下,平行于应力作用方向的磁化率随着应力作用增加而减小,垂直于应力作用方向(试样横截面方向)的磁化率随着应力作用增加而增加,从而导致磁化率各向异性的变化。无侧限压缩试样磁各向异性基本参数见表5,从表中数据可以看出,相同含水率条件下,轴向应力越大,土样颗粒定向性越高,磁化率各向异性度 $P_j$ 越大;土颗粒呈面状分布的程度越高,磁面理度 $F$ 越大;磁线理度 $L$ 无明显规律。相同轴向应力水平下,试样含水率越大,土体的侧向变形越显著,磁化率各向异性度 $P_j$ 越大,磁面理度 $F$ 越大,磁线理度 $L$ 无明显规律。无侧限压缩试样的形状参数 $T$ 均满足 $1 > T > 0$ ,说明以磁面理发育为主。

表5 无侧限压缩试样磁各向异性基本参数

Table 5 Parameters of magnetic anisotropy for soil samples under unconfined compression

含水率/%	轴向应力/kPa	磁各向异性度 $P_j$	磁线理度 $L$	磁面理度 $F$	形状参数 $T$
20	12.5	1.023	1.001	1.019	0.853
	50.0	1.026	1.001	1.022	0.894
	100.0	1.028	1.001	1.024	0.910
24	12.5	1.024	1.003	1.019	0.747
	50.0	1.031	1.001	1.025	0.950
	100.0	1.037	1.001	1.031	0.907
26	12.5	1.027	1.001	1.023	0.898
	50.0	1.033	1.003	1.027	0.818
	100.0	1.040	1.001	1.034	0.952
28	12.5	1.038	1.002	1.032	0.905
	50.0	1.042	1.001	1.036	0.944
	100.0	1.044	1.002	1.037	0.901

岩土体应变椭球的3个主轴与磁化率椭球的3个主轴互相平行,具有共轴关系,并且在长度上存在一定的数量关系<sup>[20]</sup>,可以用幂指数形式表示:

$$K_i/K_j = (L_i/L_j)^\alpha \quad (1)$$

式中: $K_i$ 、 $K_j$ ——相互垂直的主磁化率值;

$L_i$ 、 $L_j$ ——相互垂直的主应变轴长度;

$\alpha$ ——幂指数。

影响幂指数 $\alpha$ 的因素很多,有岩土体类型、磁性矿物的成分等。由上式可知,结合主磁化率值之比 $K_1/K_3$ 和应变比 $L_i/L_j$ ,可计算幂指数 $\alpha$ (表6)。由表中

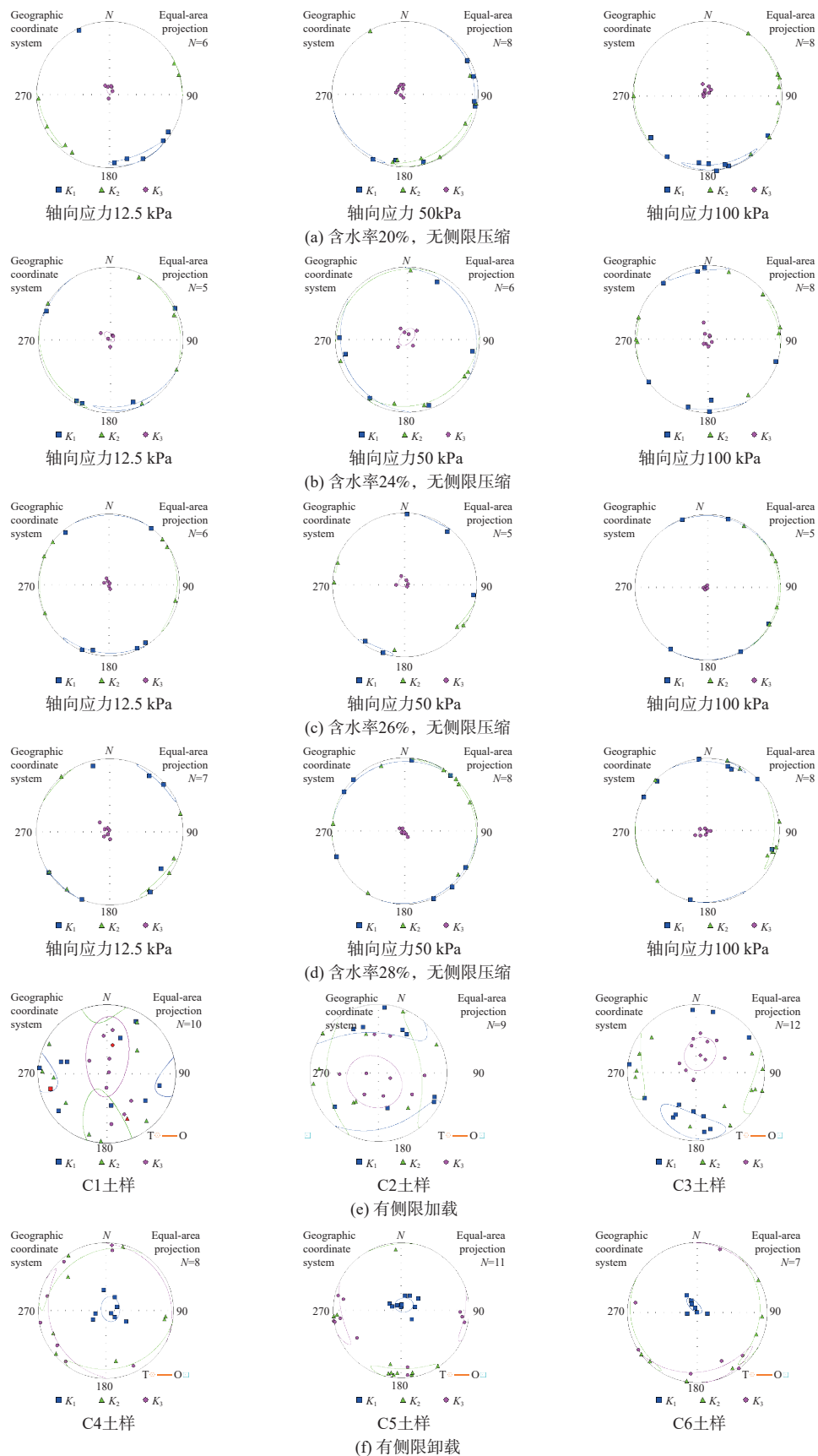


图 8 不同土样在各种受力条件下的磁化率椭球赤平投影图

Fig. 8 Stereoplots of AMS data for different soil samples under different confined compressions

数据可知, 土体在无侧限条件下, 幂指数  $\alpha$  和轴向应力、含水率存在一定的数量关系。轴向应力越大,  $\alpha$  越大; 含水率越高,  $\alpha$  越大。

表 6 幂指数  $\alpha$   
Table 6 Power exponent ( $\alpha$ ) values

含水率/%	轴向应力/kPa	$K_1/K_3$	$L_1/L_3$	$\alpha$
20	12.5	1.018	49.749	0.004 6
	50	1.021	8.166	0.009 9
	100	1.023	4.547	0.015 0
24	12.5	1.016	9.334	0.007 1
	50	1.024	4.514	0.015 7
	100	1.030	3.414	0.024 0
26	12.5	1.022	5.856	0.012 3
	50	1.024	3.75	0.017 9
	100	1.033	2.565	0.034 4
28	12.5	1.030	2.926	0.027 5
	50	1.035	2.315	0.040 9
	100	1.035	2.084	0.046 8

#### 4 结论

(1) 通过矿物成分分析, 发现黏性土中含有一定比例的强磁性矿物, 如磁铁矿、 $\alpha$ -铁等, 弱磁性矿物, 如赤铁矿、针铁矿、褐铁矿、黑锰矿、软锰矿等, 为黏性土开展磁性研究提供了理论依据。

(2) 有侧限压缩试样中的磁性矿物在压力作用下向四周扩散, 最大主磁化率  $K_1$  分布在赤平投影图的圆周处; 卸载样的主磁化率分布规律正好相反, 由于土中磁性矿物向试样中心积聚, 最大主磁化率  $K_1$  分布在磁化率椭球赤平投影图椭球中心。加载样的轴向应力越大, 磁各向异性度越大。卸载样的卸载压力越大, 磁各向异性度越大。相对于加载样, 卸载样的磁各向异性度更强。加载样以磁面理发育为主, 轴向应力越大, 磁面理度  $F$  越大, 磁线理度  $L$  无明显规律。卸载样以磁线理发育为主, 磁线理度  $L$  越大, 磁面理度  $F$  无明显规律。

(3) 无侧限压缩条件下, 轴向应力和土样含水率是影响磁化率各向异性程度的重要因素, 土体的主磁化率值之比和应变比存在一定的幂函数关系。相同含水率条件下, 轴向应力越大, 土样侧向变形明显, 磁化率各向异性度越大, 磁面理度  $F$  越大, 磁线理度  $L$  无明显规律; 而相同轴向应力条件下, 土样含水率越大, 土体的侧向变形越显著, 磁化率各向异性度越大, 磁面理度  $F$  越大, 磁线理度  $L$  无明显规律。无侧限压缩试样形状参数  $T$  均满足  $1 > T > 0$ , 以磁面理发育为主。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 谭儒蛟, 焦宇杰, 徐文杰. 天津滨海软土蠕变参数及路基沉降效应分析 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 67 - 73. [ TAN Rujiao, JIAO Yujie, XU Wenjie. Tests on the creep parameters of the soft soil in Tianjin coastal region and analysis on the effect of subgrade settlement deformation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 67 - 73. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 等. 盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 97 - 103. [ LIU Haoxu, ZHU Jianfeng, RAO Chunyi, et al. Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 97 - 103. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 杜晨翔. 开挖引起的深厚淤泥质软土桩基变形试验研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016. [ DU Chenxiang. Experiment study on the deformation of pile foundation by excavation in thick mucky soft soil [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] RATHORE J S, BECKE M. Magnetic fabric analyses in the Gail Galley (Carinthia, Austria) for the determination of the sense of movements along this region of the Periadriatic Line [J]. Tectonophysics, 1980, 69(3/4): 349 - 368.
- [ 5 ] HENRY B, PLENIER G, CAMPS P. Post-emplacement tilting of lava flows inferred from magnetic fabric study: the example of Oligocene lavas in the Jeanne D'Arc Peninsula (Kerguelen Islands) [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 127(1/2): 153 - 164.
- [ 6 ] CIFELLI F, ROSSETTI F, MATTEI M, et al. An AMS, structural and paleomagnetic study of quaternary deformation in eastern Sicily [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(1): 29 - 46.
- [ 7 ] 张淑伟, 杨振宇, 王喜生, 等. 磁化率各向异性的原理及应用实例 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(1): 135 - 140. [ ZHANG Shuwei, YANG Zhenyu, WANG Xisheng, et al. Anisotropy of magnetic susceptibility: theory and case studies [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(1): 135 - 140. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 顾延生, 管硕, 马腾, 等. 江汉盆地东部第四纪钻孔地层与沉积环境 [J]. 地球科学, 2018, 43(11): 3989 -

4000. [ GU Yansheng, GUAN Shuo, MA Teng, et al. Quaternary sedimentary environment documented by borehole stratigraphical records in eastern Jiangnan basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 3989 – 4000. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 霍斐斐, 邵瑞琦, 姜南, 等. 柴达木盆地北缘中新生代地层的磁组构特征及其沉积—构造学意义[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2): 583 – 596. [ HUO Feifei, SHAO Ruiqi, JIANG Nan, et al. Anisotropy of magnetic susceptibility of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern margin of Qaidam Basin and its sedimentary-tectonic significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2): 583 – 596. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 刘彩彩, 王伟涛, 张培震, 等. 祁连盆地第三纪沉积物磁性地层和岩石磁组构初步研究[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2965 – 2978. [ LIU Caicai, WANG Weitao, ZHANG Peizhen, et al. Magnetostratigraphy and magnetic anisotropy of the Neogene sediments in the Qilian Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2965 – 2978. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 艾可可, 季军良. 准噶尔西北部山地晚新生代以来隆升过程: 来自沉积学和磁组构的证据[J]. *地球科学*, 2015, 40(3): 535 – 547. [ AI Keke, JI Junliang. Tectonic uplift of mountains in northwestern Junggar since late Cenozoic: evidences from sedimentology and magnetic fabric in heshituoluogai basin[J]. *Earth Science*, 2015, 40(3): 535 – 547. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 谢兴俊, 常秋芳, 孔祥辉. 洛川红黏土-黄土记录的风向变化及磁组构与磁化率对气候变化的敏感性对比[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(1): 66 – 71. [ XIE Xingjun, CHANG Qiufang, KONG Xianghui. Changes of the wind direction recorded by red clay and loess in Luochuan and comparison of the sensitivity of magnetic fabric and magnetic susceptibility to climate change[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(1): 66 – 71. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 唐锐枰, 葛俊逸, 庞海娇, 等. 泥河湾黑土沟剖面磁组构特征及古湖水文环境变化[J]. *科学通报*, 2020, 65(11): 1027 – 1045. [ TANG Ruiping, GE Junyi, PANG Haijiao, et al. Paleohydro-climatic changes revealed by anisotropy of magnetic susceptibility at the Heitugou section, Nihewan Basin, and its influences on human's occupation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(11): 1027 – 1045. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] CARMICHAEL R S. Stress control of magnetization in magnetite and nickel, and implications for rock magnetism[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1968, 20(3): 187 – 196.
- [ 15 ] SUN W W, KODAMA K P. Magnetic anisotropy, scanning electron microscopy, and X ray pole figure goniometry study of inclination shallowing in a compacting clay-rich sediment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B13): 19599 – 19615.
- [ 16 ] BORRADAILE G J, HENRY B. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy[J]. *Earth-Science Reviews*, 1997, 42(1/2): 49 – 93.
- [ 17 ] RUF A S, NARUK S J, BUTLER R F, et al. Strain and magnetic fabric in the Santa Catalina and Pinaleno Mountains Metamorphic Core Complex Mylonite Zones, Arizona[J]. *Tectonics*, 1988, 7(2): 235 – 248.
- [ 18 ] 刘羊, 孙茜, 阎长虹. 含水量对软土无侧限变形影响的试验研究[J]. *土工基础*, 2018, 32(4): 455 – 460. [ LIU Yang, SUN Qian, YAN Changhong. Evaluation of moisture content on the unconfined compressive strength of soft soils[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2018, 32(4): 455 – 460. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 孙茜. 无侧限压缩条件下重塑土变形机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2019. [ SUN Qian. Study on deformation mechanism of remolding soil under unconfined compression[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] CABALLERO-MIRANDA C I, TORRES-HERNÁNDEZ J R, ALVA-VALDIVIA L M. Anisotropy of magnetic susceptibility analysis of the Cantera Ignimbrite, San Luis Potosí, México: flow source recognition[J]. *Earth, Planets and Space*, 2009, 61(1): 173 – 182.

编辑: 张明霞