



深部粘土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点

李文平¹, 张志勇², 孙如华¹, 王维理³, 李小琴¹

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 2. 上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200072; 3. 北京市勘察设计研究院, 北京 100038)

摘 要: 为研究山东省巨野矿区埋深近 700 m 的巨厚土层中煤矿立井水平地压大小计算方法, 本文自行设计了最大固结压力可超过 20 MPa 的高压 K_0 蠕变试验系统。以取自巨野矿区埋深为 300~600 m 的 6 组原状粘土样为例, 进行了固结压力为 6, 8, 10, 12, 14, 16 MPa 下的 K_0 蠕变固结试验, 得到了相应的 K_0 值大小, 分析了 K_0 值随深度的变化规律。用扫描电镜图像分析, 结合计算机影像分析技术, 对同一粘土试样在不同高压固结荷载下 K_0 蠕变稳定后的微观结构进行了分析, 发现随着埋深加大, 固结压力增加, 粘土的微观结构各向异性越明显; 并根据这一微结构性变化特点解释了深部粘土 K_0 值宏观变化的本质。

关键词: 深部土; 高压; K_0 试验; 土微结构; 各向异性

中图分类号: TD321; TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1185-06

作者简介: 李文平(1965-), 男, 博士, 1986年毕业于中国矿业大学水文地质工程地质专业, 现任教授, 从事地质工程及岩土工程方面的科研和教学工作。

High pressure K_0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay

LI Wen-ping¹, ZHANG Zhi-yong², SUN Ru-hua¹, WANG Wei-li³, LI Xiao-qin¹

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Shanghai Geological Construction Co. Ltd, Shanghai 200072, China; 3. Beijing Geotechnical Institute, Beijing 100038, China)

Abstract: The high pressure creep equipment was designed to study the horizontal ground stress of shaft lining in Juye mine area of Shandong province where the thickness of alluvium was nearly 700 m. The maximum consolidation pressure of the equipment could exceed 20 MPa. Six undisturbed clay samples taken from depth of 300~600 m in Juye coal field were used in K_0 consolidation tests. The consolidation pressures were 6, 8, 10, 12, 14, 16 MPa in these tests. The coefficients of lateral pressure K_0 of the samples were obtained and the variation of K_0 with depths were analyzed. The SEM tests of one clay sample under different consolidation pressure were performed and the microstructure was scanned. The variation of anisotropy of microstructure was analyzed with computer image analysis. It was shown that the anisotropy of microstructure of clay increased obviously with the increase of depth and consolidation pressure. The essential reasons of the macro variation of coefficients of lateral pressure K_0 in consolidation tests were analyzed based on the microstructure characteristics.

Key words: deep buried soils; high pressure; K_0 experiment; soil microstructure; anisotropy

0 概 述

立井是煤矿的咽喉工程, 立井地压大小计算是煤矿立井设计的关键所在。厚松散土层中煤矿立井地压计算一直未有理想的计算公式, 目前主要依靠经验设计^[1]。即将建设的山东省巨野煤矿区土层覆盖厚度最大达 700 m, 直径达 8 m 左右的立井要穿过如此深厚的土层, 如何合理计算其承受的水平地压无疑成为一个亟需解决的技术难题^[2]。

本文利用巨野矿区立井地质勘探检查孔, 取得了埋深为 300~600 m 的 6 组深部粘土样, 测试了其基本工程地质性质指标。同时, 根据该区土层埋深大即

固结压力大的特点, 笔者自行设计制作了最大固结压力可超过 20 MPa 的高压蠕变 K_0 固结试验装置。文中利用该装置测得了不同埋深粘土样的侧向土压力大小, 总结了侧压力系数 K_0 值随垂直固结压力大小变化的规律^[3]; 并进一步利用扫描电镜图像分析技术, 从粘土微观结构性变化的角度解释了这一规律发生的根本原因。由此, 为获得计算巨厚松散土层中煤矿立井水平地压大小更合理的方法提供了一定的技术参考。

1 土样性质

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40572160, 40272114)

收稿日期: 2005-08-15

试验土样为山东省巨野矿区龙固矿井检查钻孔所取原状深部粘土样,埋深为 300~600 m,共选用 6 组,其基本物理力学性质见表 1。

表 1 深部粘土样的基本物理力学指标

Table 1 The basic properties of deep buried clay samples				
编号	取样深度/m	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	塑限/%
1	309.00~326.40	1.80	19.41	31.64
2	385.90~388.00	1.96	15.41	24.14
3	429.60~431.80	1.93	11.18	28.51
4	462.30~468.50	1.96	10.78	27.17
5	525.00~526.60	1.93	15.68	16.46
6	542.70~546.00	1.92	17.12	17.81

编号	液限/%	塑性指数	粘聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
1	52.37	20.73	98.45	23.51
2	47.30	23.16	94.12	23.44
3	48.51	20.00	28.95	32.70
4	55.06	27.89	130.73	17.66
5	34.85	18.39	198.08	43.07
6	35.88	18.07	203.05	44.72

2 高压蠕变 K_0 固结试验

2.1 试验设备系统

参考目前试验确定静止侧压力系数 K_0 的试验仪器要求,可知高压蠕变 K_0 固结仪试验系统应具有以下特点:能控制土体侧向不产生变形,耐高围压,构造简单,操作方便,加压方便并能长时间加恒压,能测轴向、横向土压力,能测孔隙水压力^[4-5]。

根据上述思路,笔者自行设计制作了高压 K_0 固结仪,试验装置如图 1 所示。该装置最大试验围压为 20 MPa,可以模拟研究深度大于 800 m 的深部试样,试样尺寸为 $\Phi 61.8\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。试验装置主要由下列几个部分组成:

(1) 刚性容器

刚性容器是试样的压力室,由一个整体的不锈钢圆钢锻压切削而成。经耐压检测,该容器的刚度大,耐压性能好。

(2) 加压装置

加压装置选用杠杆加压,杠杆比例为 1:30。经检测,杠杆加压端挠度小,符合试验要求。

(3) 垂直压力传感器

该固结仪所采用的垂直压力传感器是一种结构特殊的振弦传感器,可减少侧向力的干扰,具有灵敏度高、精度高、稳定性好、适用于对应力的长期观测,可以与电脑检测仪配套使用直接显示压力值。该传感器量程可达到 20 MPa,误差为 0.04%。

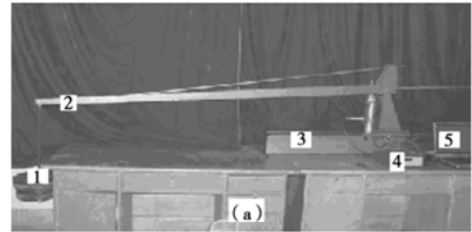
(4) 侧向压力传感器及孔隙水压传感器

其结构原理为竖式弦振弦压力传感器,可以与电脑检测仪配套使用,性能稳定,准确度高,可以急速

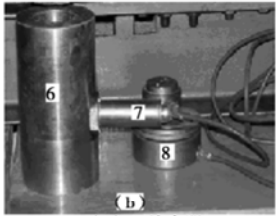
加压卸压。寿命长,抗震动、抗电磁干扰,温度影响系数小。量程可达 20 MPa,误差为 0.04%。

(5) 电脑配套智能检测仪

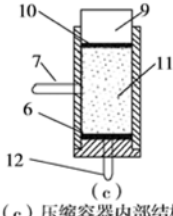
仪器以单片机为核心,配有高性能钢弦激发器等电路。使用时激发电路激励钢弦自振,微机快速准确测量频率。若事先输入传感器常数,选定测量物理档,则由微机按数学模型计算出物理量值直接显示数字。



(a) 试验装置全貌



(b) 压缩容器



(c) 压缩容器内部结构示意图

1-加压砝码; 2-加压杠杆; 3-底座; 4-计算机数据采集系统;
5-轴向压力、侧向压力及孔隙水压显示仪表; 6-加压容器;
7-侧向压力传感器; 8-轴向压力传感器; 9-加压活塞;
10-透水石; 11-试验土样; 12-孔隙水压力传感器

图 1 高压 K_0 固结试验装置

Fig. 1 High pressure K_0 consolidation equipment

2.2 试验方案

室内蠕变试验加载主要有梯级加载法和恒定荷载法两种^[5-6]。前者对一个试样施加某一恒定的轴向压力,待压缩变形基本稳定后,施加下一级荷载。后者是对一组相同的试样,分别施加各级恒定荷载,观测试样在该级恒定荷载作用下的变形或变形速率随时间的变化。本文主要目的是获取深部土样在 K_0 状态下轴向蠕变稳定后的静止侧压力系数和每一级压力下土样轴向蠕变稳定后土样的微观结构状态,因此,本文采用了对每一组粘土试样分级加荷的方法,在每级荷载下土样变形稳定后记录静止侧压力系数 K_0 值。

在将加工好的试样装到固结仪容器之前,应在其表面均匀的涂抹一层润滑油,以保证试样在 K_0 固结过程中不会因为外界环境的变化而失水。对以上 6 组土样分别施加 6, 8, 10, 12, 14, 16 MPa 的 6 级不同固结轴向压力进行试验,分别模拟土样处于 300, 400, 500, 600, 700, 800 m 时的上覆土压力;在各级压力下轴向变形稳定后(考虑蠕变),记录轴向应力 σ_1 和侧向应力 σ_3 ,即可整理出试样在不同深度情况下所对应的侧压力系数 K_0 。

2.3 试验结果分析

利用笔者自行设计的高压蠕变 K_0 固结仪,本文对

以上 6 组粘土试样进行了不同固结轴向压力下的高压 K_0 蠕变试验, 可以得到侧压力系数 K_0 值随不同固结压力变化的曲线。如前所述, 不同的固结压力分别对应不同的深度, 因此, 同样可以得到侧压力系数 K_0 值随深度的变化曲线, 如图 2 所示。

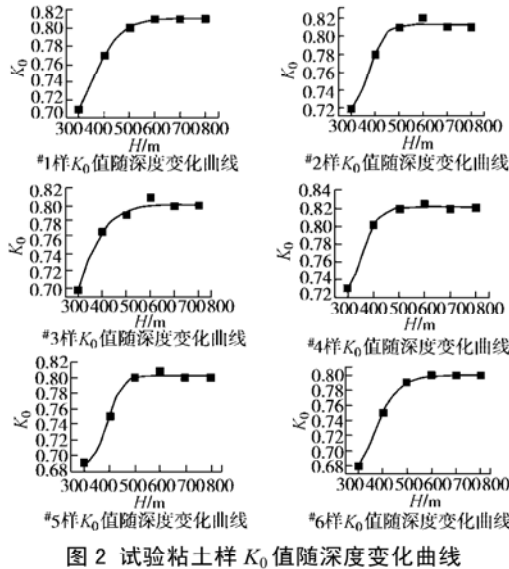


图 2 试验粘土样 K_0 值随深度变化曲线

Fig. 2 Relationship between coefficient of lateral pressure K_0 and depth of clay samples

图 2 中, 离散点为试验确定的不同深度对应的侧压力系数 K_0 值, 实线为对离散点进行最小二乘拟合得到的拟合曲线。6 个试样的拟合曲线都可以表示为如下的函数形式:

$$K_0 = a + b \exp[(c\gamma H)/(10^3 p_a)] \quad (1)$$

式中 a , b , c 为拟合常数, 本次拟合结果可取 $a = 0.79 \sim 0.82$, $b = -1.76$, $c = -0.47$ (适用于 $H \geq 300$ m); γ 为土的重度 (kN/m^3); H 为计算点深度 (m); p_a 为大气压强, 一般取 0.1 MPa。

即是说, 侧压力系数 K_0 值随深度的变化曲线为指数函数型。在 300~500 m 深度范围内, 侧压力系数 K_0 值变化较大; 超过 500 m 深度后, 侧压力系数 K_0 基本保持不变。

3 深部粘土 K_0 蠕变微观结构定向性研究

3.1 深部粘土微观结构排列的定向性参数

土颗粒在沉积环境、应力历史、风化、胶结等物理化学作用下, 颗粒或粒团会呈一定倾角的排列, 形成一定的组构形式^[7-9]。这种组构形式在外力的作用下会发生一定的变化, 从而导致土颗粒微观结构的排列发生变化, 由此形成了土在微观结构上排列的各向异性。为便于对不同固结压力下土样微观结构的定向性进行分析, 对试样采用统一的放大倍数 ($\times 600$) 进行测试, 对 SEM 照片采用同一尺寸能够取得更广泛的

统计规律, 提高定向性分析的精度^[10]。

从微观结构的观点对土的各向异性进行研究, 也就是研究微结构单元体的空间分布, 即单元体的定向性, 包括定向角分布、主定向角和各向异性率^[11-13]。

单元体的定向方位在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上的定向角分布是镜像对称的、且呈椭圆形分布^[11,13]。由此, 可定义单元体的主定向方位为椭圆形的长轴方向, 主定向角则为主定向方向与零度方向的夹角, 各向异性率为反映整个图像中单元体定向程度的指标, 形式如下:

$$I_n = \frac{R - r}{R} \times 100\% \quad (2)$$

式中 I_n 为各向异性率; R 为椭圆形的长轴长度; r 为椭圆形的短轴长度。当 $I_n = 0$ 时, 表明颗粒或孔隙呈随机分布, 表现为各向同性; 当 $I_n = 100\%$ 时, 表明单元体高度定向, 呈同一方位分布, 有明显各向异性。

3.2 深部原状粘土样微观结构的定向性

(1) 原状样 SEM 图像

本次试验选取第 1 组土样进行微观结构的研究, 样品的物理力学性质见表 1。利用扫描电镜对该原状土样进行扫描, 得到其扫描照片如图 3 所示。



图 3 原状土样 (#1) SEM 照片

Fig. 3 The SEM photograph of undisturbed clay sample #1

(2) 孔隙的定向性分析

孔隙的定向性是颗粒定向性的间接反映, 与粘性土的工程地质性质有密切关系, 因此在有关粘性土微观结构的定量分析中, 孔隙的定向性分析指标最为重要, 对其可以通过定向频率来描述。定向频率可以直观地反映各定向角区间内孔隙的出现频率。通过孔隙的定向频率就可以了解孔隙的平面定向性规律。从而可以了解颗粒的定向性分布状况。具体的计算方法是将 $0 \sim 180^\circ$ 以 10° 为单位分为 18 个方位区, 统计分析出孔隙在每个区间出现的概率, 从而可以看出整个图像中孔隙的定向分布情况。图 4 所示的是深部原状粘土样 (#1) 的孔隙定向性分析结果。

从图 4 可以看出, 天然情况下深部粘土的孔隙的分布区间较均匀, 说明深部粘土结构单元体的定向性不明显。计算所得各向异性率为 34.9%, 表明深部粘土微观结构的定向性很差, 土颗粒排列基本处于各向同性状态。

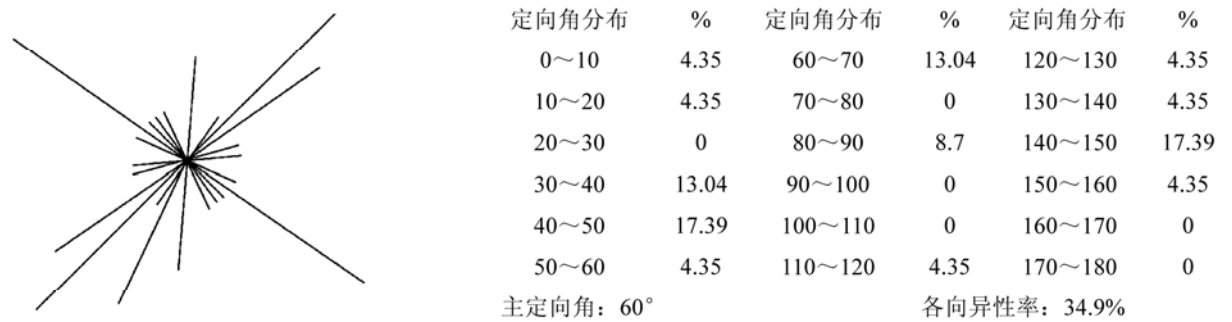


图 4 原状粘土样（#1）SEM 图像定向性分析

Fig. 4 The results of orientation analysis of the SEM photography for undisturbed clay sample #1

3.3 不同固结压力下粘土微观结构定向性定量分析

取不同固结压力下（6，8，10，12，14，16 MPa）变形稳定后的#1 土样的微观结构照片（见图 5），对其进行图像处理并分析孔隙微观结构的定向性^[14-16]。

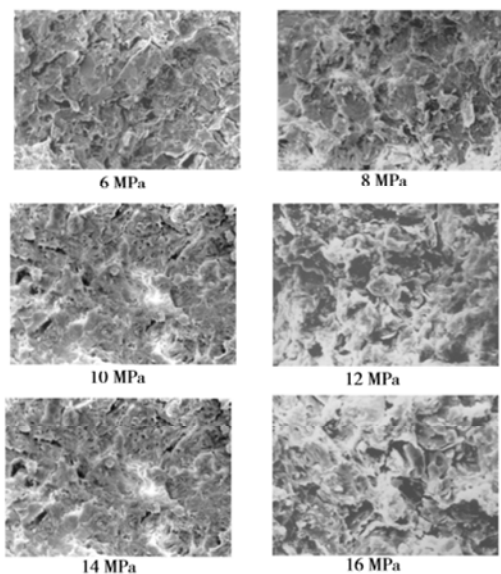


图 5 不同固结压力下#1 土样微观结构照片

Fig. 5 The SEM photographs of clay sample #1 under various consolidation pressures

采用图像处理软件对图片进行一系列处理^[17]，可以得到不同固结压力下土样孔隙的 SEM 图像的定向性分析结果图形，见图 6。由此，可以对试样在各级固结压力下孔隙的方位角进行统计，以获取试验各级固结压力下定向角分布规律及其各向异性率^[18-19]。

总结图 6 中各级固结压力下#1 土样的各向异性

率，可以绘制出固结压力与侧压力系数 K_0 的关系曲线，见图 7。

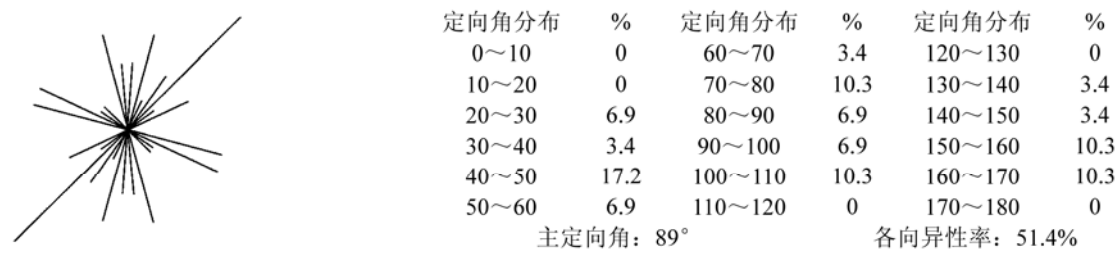
从图 7 可以看出，随着固结压力的提高，土颗粒的各向异性逐步增大，当固结压力在 6~10MPa 时，各向异性变化幅度较大，说明在这个过程中，土体内部颗粒排列的调整最为剧烈，表现在宏观上则是 K_0 值逐步增大，且增长幅度较大。在 10~16 MPa 应力区间内，颗粒定向性及有序性变化幅度较小，说明在固结压力达到 10 MPa 时，土体内部颗粒调整基本趋于稳定，孔隙变化幅度较小。表现在宏观上则是 K_0 值变化幅度极其微小，基本保持为定值。

4 结 论

(1) 研制的高压 K_0 固结试验测试系统装置，可加最大固结压力 20 MPa，可测量侧压力、孔隙水压力，并可自动监测记录数据，操作简单，加压方便，测试成本较低。

(2) 深部粘土的高压蠕变 K_0 试验表明，深部粘土的侧压力系数 K_0 值随深度呈指数函数形式变化，在 300~500 m 深度范围内变化较大，当深度超过 500 m 后则基本保持不变。

(3) 随着固结压力的增加，粘土微结构的各向异性逐步增加。当固结压力为 6~10 MPa 时，粘土微结构的各向异性增长幅度较大，表明在这个过程中，土体内部颗粒及孔隙的方向性调整最为剧烈，体现在宏



(a) #1 土样 6 MPa 下 SEM 图像的定向性分析结果

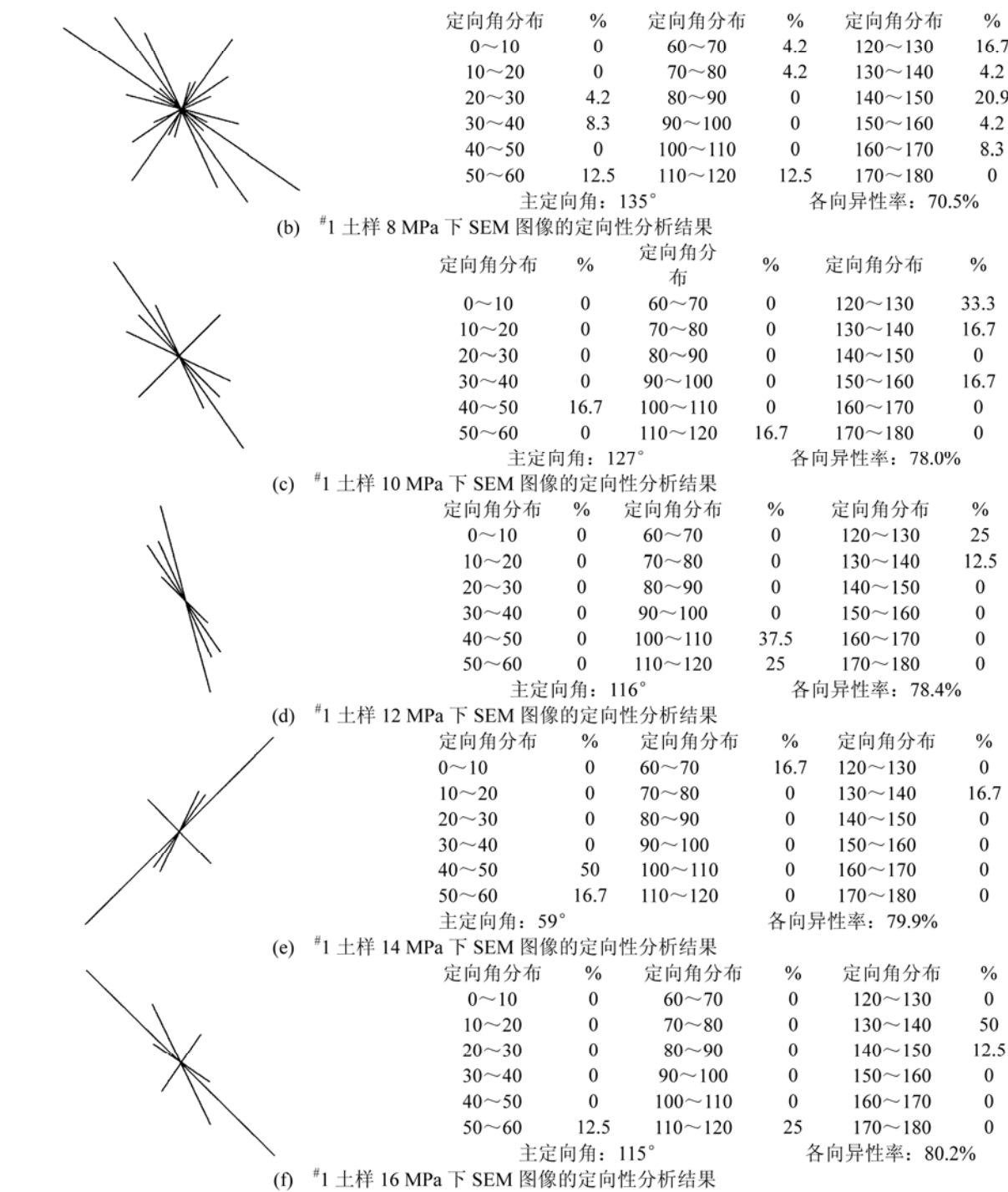


图 6 不同固结压力下#1 土样孔隙定向性分析结果

Fig. 6 The results of orientation analysis of the SEM photographs for clay sample #1 under various consolidation pressures

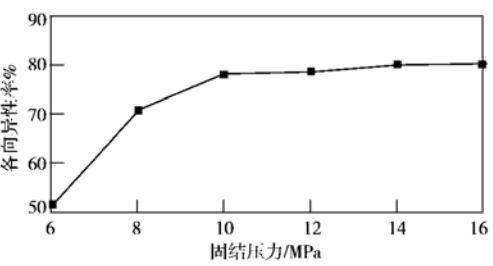


图 7 土样 (#1) 各向异性率随固结压力的变化曲线

Fig. 7 Relationship between anisotropic ratio and consolidation of clay sample #1

观上则造成 K_0 值变化幅度较大; 当固结压力为 10~16 MPa 时, 微结构的各向异性增长幅度很小, 表明在这个过程中, 土体内颗粒排列的方向性基本不再变化, 颗粒及孔隙高度定向, 表现在宏观上则是 K_0 值基本保持不变。

参考文献:

[1] 于双忠,彭向峰,李文平,等.煤矿工程地质学[M].北京:煤炭工业出版社, 1994: 252 - 260. (YU Shuang-zhong, PENG

- Xiang-feng, LI Wen-ping, et al. Coal geology engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994: 252 - 260.)
- [2] 洪伯潜. 巨野煤田开发条件及井筒施工关键技术[J]. 中国煤炭, 2002, 28(4): 5 - 7. (HONG Bo-qian. Juye coal field: development conditions and key technology for shaft-sinking [J]. China Coal, 2002, 28(4): 5 - 7.)
- [3] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬粘土的工程特性及其工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 446 - 449. (ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Study on the engineering properties and engineering environmental effects of Neogene hard clays in south-west of Shandong province [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 446 - 449.)
- [4] 王衍森, 崔广心, 杨维好. 深部土的高压 K_0 固结试验研究展望[J]. 岩土力学, 2003, 增刊: 687 - 690. (WANG Yan-sen, CUI Guang-xin, YANG Wei-hao. Prospect of experimental studies of high-pressure consolidation tests of soils in thick alluvium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, Supp: 687 - 690.)
- [5] 姜 朴, 等. K_0 固结三轴仪的研制与试验研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(3): 23 - 26. (JIANG Pu, et al. Development and experiment of K_0 consolidation triaxial apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(3): 23 - 26.)
- [6] 董孝璧. 确定土侧压力系数 K_0 的方法研究[J]. 地质灾害与环境保护[J]. 1998, 9(4): 27 - 33. (DONG Xiao-bi. Study on the methods to determine lateral stress ratio of soils [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(4): 27 - 33.)
- [7] 齐吉琳, 谢定义, 等. 土结构性的研究方法及现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99 - 103. (QI Ji-lin, XIE Ding-yi, et al. Status quo and method of quantitative study on soil structure [J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(1): 99 - 103.)
- [8] 蒋明镜, 沈珠江, 等. 结构性粘土研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(1): 26 - 31. (JIANG Ming-jing, SHENG Zhu-jiang, et al. Review on structured clay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1999, 19(1): 26 - 31.)
- [9] 吴义祥, 等. 土体微观结构的研究现状评述[J]. 地质论评, 1992, 38(3): 250 - 259. (WU Yi-xiang, et al. A review of the present state of the research on soil microstructures [J]. Geological Review, 1992, 38(3): 250 - 259.)
- [10] 陈丽华, 缪 昕, 于 众. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986. (CHEN Li-hua, MIAO Xi, YU Zhong. Application of SEM on geology [M]. Beijing: Science Press, 1986.)
- [11] 施 斌, 王宝军, 宁义务. 各向异性粘性土蠕变的微观力学模型[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 7 - 13. (SHI Bin, WANG Bao-jun, NING Yi-wu. Micromechanical model on creep of anisotropic clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 7 - 13.)
- [12] 吴义祥. 工程粘性土微观结构的定量评价[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 23(2): 143 - 151. (WU Yi-xiang. Quantitative analysis on microstructures of clayey soils [J]. Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, 1991, 23(2): 143 - 151.)
- [13] TOVEY N K, KRINSLEY D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments [J]. Bulletin of LAEG, 1992, 46: 92 - 101.
- [14] 施 斌, 李生林, 等. 粘性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. 中国科学(A 辑), 1995, 25(6): 665 - 671. (SHI Bin, LI Sheng-lin, et al. Quantitative study on SEM images of microstructures of clayey soils [J]. Science in China (Series A), 1995, 25(6): 665 - 671.)
- [15] 施 斌. 粘性土微观结构简易定量分析法[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 7 - 10. (SHI Bin. Simple methods of quantitative analysis on microstructures of clayey soils [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(1): 7 - 10.)
- [16] 王 清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工大学学报, 2001, 28(2): 148 - 153. (WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of them icrostructure characteristics of so il and its appl ication to the engineering [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 148 - 153.)
- [17] TOVEY N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric [J]. J of Microcopy, 1990, 120(3): 303 - 315.
- [18] 齐吉琳, 谢定义. 孔隙分布曲线及其在土的结构性分析中的应用[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(1): 6 - 9. (QI Ji-lin, XEI Ding-yi. The pore size distribution curve and its appplication in soil structure analysis [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(1): 6 - 9.)
- [19] 李向全, 胡瑞林, 张 丽. 粘性土固结过程中的微结构效应研究[J]. 岩土工程技术, 1999(1): 52 - 56. (LI Xiang-quan, HU Rui-lin, ZHANG Li. Study on microstructures of clayey soil during consolidation [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(1): 52 - 56.)