

文章编号: 1001-4888(2019)03-0397-09

固结条件下黏性土微观孔隙结构试验研究^{*}

贾超¹, 何玥¹, 狄胜同¹, 李康¹, 杨亚宾²

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东济南 250061; 2. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队, 山东德州 253015)

摘要: 土体微观结构状态是控制土体稳定的重要因素, 工程土体在宏观上表现出的复杂特性根本上取决于微结构的复杂性和不确定性。本文以德州市沉降区钻孔中黏性土层为研究对象, 基于对电镜扫描图像的分析处理, 从微观角度对不同深度黏性土的孔隙结构演化机制进行研究, 并探讨土体初始结构状态对压缩性的制约关系。微观试验分析表明: 固结荷载改变土体微结构类型, 随着固结荷载增加, 结构单元体由松散状态转变为团聚状态, 土体密实度提高, 孔隙面积减小。定量分析表明: 固结压力将改变土体微结构要素, 随着固结荷载增加, 平均孔径减小、微小孔隙所占比例增加、孔隙形状不断调整最终趋于圆滑、集团化程度变高、土体定向性增强。上述试验为深入理解土体微观结构非线性问题, 以及微观结构与宏观工程特性的相互作用机制提供了依据。

关键词: 黏性土; 微观孔隙结构; 定量分析; 演化特征; 压缩性

中图分类号: TU411.92

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-241

0 引言

地下水超采引起地面沉降是一个全球性环境问题。在含水层系统中, 细颗粒沉积物(主要为黏性土)的变形量占全部地面沉降变形量的 50% 以上, 因此对弱透水层的固结变形研究是一个值得探讨的问题^[1]。然而, 由现场监测和室内试验得到的传统宏观物理力学指标难以分析土体内在结构的不确定性与多样性, 因此, 解决土体工程问题应考虑微观结构定量特性及其与工程地质性质的制约关系, 利用定量指标对黏性土微结构要素进行精细化识别, 探讨土体微结构的变化对地面沉降过程的影响。

沈珠江曾指出, 建立能够定量反映土体结构性的数学模型是 21 世纪土力学研究的核心问题^[2], 可见土体微观结构变化的研究已成为当前岩土力学领域广泛研究的课题之一。龚晓南等基于前人对粘土结构性与其物理力学性质关系的部分研究成果, 进一步探讨了各类土体的结构性以及形成粘土结构性强弱的原因^[3]; 施斌等重点介绍了粘性土微观结构研究方面的一些新技术, 主要包括供扫描电镜分析用的冷冻刀切干燥法、定量评价粘性土微观结构的图像处理技术、测定粘性土粒间胶结物化学成分的 EDX 技术和无损探测土体内部结构的 CT 技术^[4]; 吴义祥利用自行研发的土体微观结构定量分析技术, 提取结构熵、平均形状因子等结构状态参数, 分析研究了各参数的演化规律以及与土体物理力学性质的关系^[5]; 谢和平就分形几何在岩土介质孔隙的几何图形, 岩石的破碎、损伤和断裂等问题中的应用进行详细探讨, 说明分形几何已成为研究岩土工程中复杂力学问题的有力工具^[6]; 在土体结构要素定量指标变化与宏观力学性质关系等研究方面, 沈珠江将土体看作原状土和损伤土组成的合成材料, 在弹塑性损伤模型基础上, 提出了更实用的非线性损伤力学模型, 制定了有关计算参数的测定方法^[7]; 尚嘉兰

^{*} 收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2018-01-17

通讯作者: 贾超(1976—), 男, 教授, 工学博士。主要从事工程地质、水文地质和岩土工程等方面的研究和教学工作。

Email: jiachao@sdu.edu.cn

等利用扫描电镜,研究了岩样在单轴压缩试验下微损伤的产生、连接直至破坏的演化过程及规律,以微观角度探究岩石的破坏机理以及宏观变形破坏行为,为认识岩爆发生的机理及复杂应力状态下岩石损伤破坏的理论分析提供了试验依据^[8]。

土体微观结构研究主要涉及颗粒形状、排列与分布情况,以及土体内部孔隙特征与赋存变化规律^[9]。为探究结构性黏土固结过程中压缩性变化及微观孔隙结构演化特征,本文以山东省德州市不同深度黏性土为研究对象,结合电镜扫描技术对微观结构进行定性描述,利用数字图像处理软件对孔隙形态、排列及分布等结构要素及其变化规律进行定量提取与量化,在此基础上结合单向固结试验数据,分析初始结构特征参数与压缩系数之间的相关关系,以期从整体上把握结构形态的再造规律。

1 试样制备与电镜扫描

1.1 试验取样与试样固结

测试土样取自山东省德州市沉降区内的黏性土层,取样深度为 175m、233m,土样标号记作 X1、X2。考虑到厚壁取样的结构扰动影响比较大,为确保试验精确度,本文利用液压回转式钻机和敞口薄壁取土器,采用快速静压、低速拔起的方法取样^[10]。本区黏性土具有压缩性高、孔隙比大、含水量高等特征。单向固结压缩试验在室内固结仪上进行,土样面积为 30mm²,高 20mm,设计荷载等级为 0kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa,每级压力稳定时间标准为 24h,试验测得各级荷载下德州黏性土压缩曲线如图 1 所示。

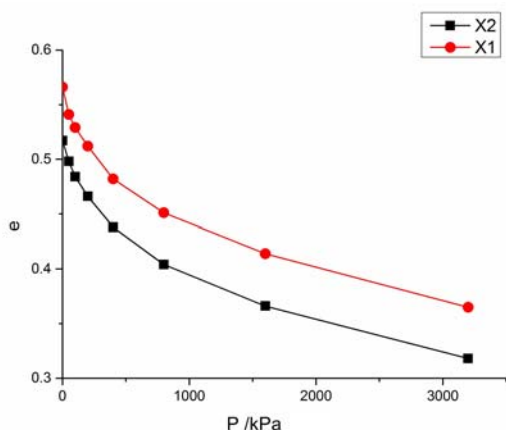


图 1 土的压缩曲线

Fig. 1 Soil compression curve

为 6mm×8mm×3mm 的观察样,并进行相应编号。将观察样放入液氮中进行速冻,速冻后的试样放入 Labconco6L 冷冻真空干燥机进行真空干燥处理。入射电子束的照射会在样品表面引起电荷集聚,降低图片质量,为避免此问题,需在样品表面进行薄金膜(或银、碳)喷镀处理^[12],结合样品尺寸,确定镀膜时间为 240s。基于上述 SEM 试样制备过程,利用扫描电镜仪就可得到不同位置、不同放大倍数的土体微观结构图像。图像放大倍数选取的准确程度直接影响提取的微观结构信息,唐朝生等在进行电镜扫描试验时指出,当放大倍数大于 3000 时,土体微观结构图像已经“失真”^[13]。故本文统一采用拍摄放大倍数为 2000 倍,每组观察样选取 3 个不同的平整位置进行拍摄,选取代表性最强的 SEM 图像进行分析。

1.3 图像处理

本文采用 PCAS 图像处理软件对获取的 SEM 图像进行信息采集与处理^[14],方便快捷地提取土体微观特征参数。图像分析需将灰度图像分割成黑白二元图像,目前国际上对土壤 SEM 图像分割没有公认的完善方法,本文采用目视分割法,通过手动设定分割阈值对图像进行二值化处理,以目测方式将图像与分割图形相比较以获得最佳阈值^[15]。通过设置阈值 PCAS 可自动封闭小孔隙,将图像分割成颗粒与孔隙两部分,分析各个孔隙的长度、宽度、面积、形状因子、分维数和定向性等指标,进而得到表征孔隙结构要素的定量参数。

1.2 SEM 样品制备

试样制备是土体微结构研究中的重要环节,为获得更真实的土体微观结构,必须采用专门的土样干燥方法,使试样既脱水又不产生膨胀使土体结构扰动。普遍采用的试样制备方法包括烘干法、置换法、风干法、界点干燥法以及真空冷冻升华干燥法等^[11]。本试验采用真空冷冻升华干燥法制备 SEM(扫描电镜)试样。

首先在固结土样中心未扰动部位用涂了凡士林的钢丝锯切取 20mm×20mm×25mm 的毛坯样,用手将土样小心掰断,从而获取界面比较平整的软弱面,便于进行图像观察。在此基础上使用

双面钢刀将含软弱面的毛坯样切割,制备成尺寸

2 微观图像定性分析

限于篇幅,本文仅给出原状土样和固结压力(100kPa、400kPa、800 kPa)下的 SEM 图像,如图 2、图 3所示。土体微观结构具有复杂性和多样性,这与水动力作用、物质来源、颗粒堆积状态等因素有关。结合图 2(a)、图 3(a)分析可知,原状土的颗粒单元体任意排列且分布随机,结构较松散,颗粒间孔隙多且大,存在较大孔隙通道使土体具有连通性,无法看出明显结构特征;随着土层深度增加,上覆土体自重应力改变了土体结构,处于更深地层的 X2 原状土样呈现出较 X1 原状土样孔隙更小、分布更均匀的特征,颗粒无明显定向性;对比不同荷载下完成固结的同一试样,固结荷载使黏性土微观结构类型改变,颗粒间因有效应力增大而相互挤压,团聚现象明显,密实程度显著提高,土体强度增强,被压缩后的土体大、中孔隙明显减少,破碎成更多的小、微孔隙,说明部分大颗粒难以抵抗增大的有效应力而崩解成细小颗粒,并重新兼并生长,孔隙面积减小,渗流通道间自由水流出,大部分被结合水占据,此物理过程宏观上表现为水逐渐从土体中排出,土体致密性不断提高。

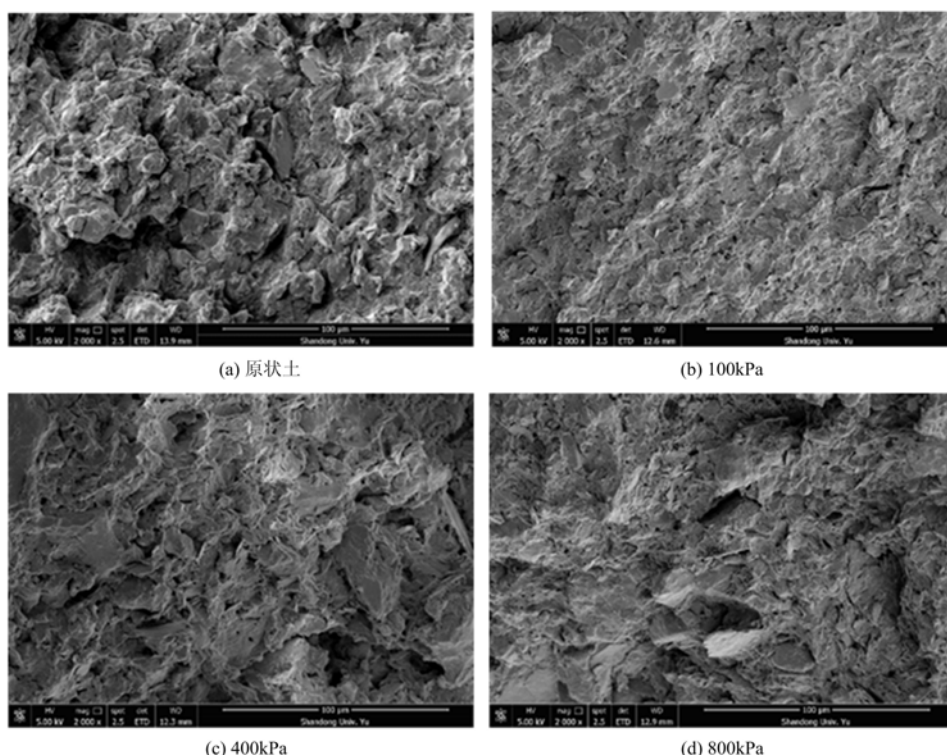


图2 不同固结压力下 X1 试样 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of X1 under different pressures

3 微观试验定量分析

根据不同压力作用下获取的孔隙结构参数,从孔隙形态、分布、排列等方面入手,对黏性土在固结过程中孔隙结构要素变化特征进行定量研究,分析孔隙结构特征指标和土体压缩系数之间的量化关系,从而解释黏性土基于微观结构角度的宏观固结特性。

3.1 孔隙形态变化特征

对电镜扫描图像上每个孔隙的尺度、形状特征进行分析,主要指标包括孔隙数目、孔隙面积、等效孔径、孔隙周长等,可以得到表征孔隙大小、形状的结构参数,即平均孔隙面积 $\bar{A}$,平均等效孔径 $\bar{D}_E$,孔隙个数 N ,平均形状系数 F 。图 4 即为平均等效孔径随固结压力的变化趋势图。

由图 4 可知,变形初期孔径对压力的敏感性较强,表现出明显的波动性;在压力作用下,土体孔径常朝减小的方向发展,初始孔径越大,降低幅度越大,X1 试样等效孔径降低幅度为 24.9%,X2 试样在土

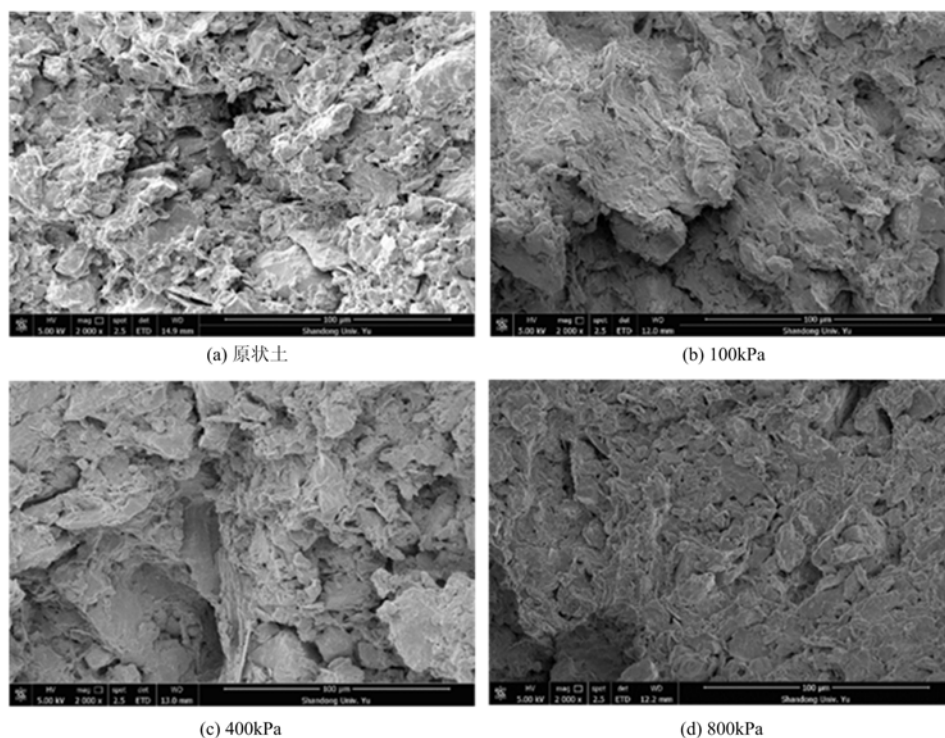


图 3 不同固结压力下 X2 试样 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of X2 under different pressures

体自重及上覆荷载作用下,初始孔隙尺寸小于 X1,其变化幅度为 14.9%,略小于 X1 土样。当压力增至结构屈服应力时,部分土颗粒相互挤压直至破碎成更小颗粒,不断填充相互间的孔隙,也进一步导致沉降的发生。

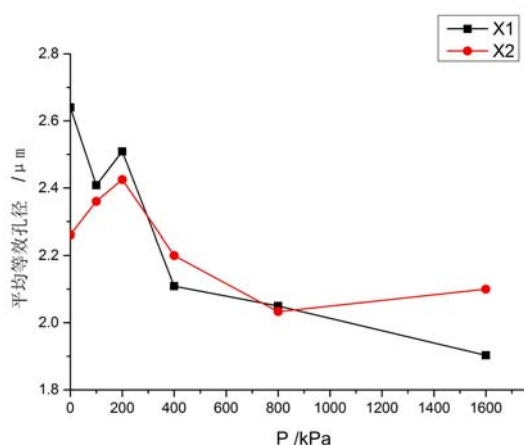


图 4 平均等效孔径随着固结压力的变化

Fig. 4 Variation of average equivalent diameter on pressure

对于微观孔隙大小的划分,周晖给出了如下划分标准^[16]: (1) 大孔隙 ($d > 10\mu\text{m}$); (2) 中孔隙 ($2.5\mu\text{m} < d < 10\mu\text{m}$); (3) 小孔隙 ($0.4\mu\text{m} < d < 2.5\mu\text{m}$); (4) 微孔隙 ($d < 0.4\mu\text{m}$)。按此标准绘制 X1、X2 试样在各尺度范围内的孔隙含量分布,如图 5 所示。固结压力的不断提高使大孔隙数量递减,使得微小孔隙相对比例逐渐增加。当固结基本完成时,孔径大于 $2.5\mu\text{m}$ 的孔隙含量分别由 24% 减少至 12% (X1),由 20% 减小至 13% (X2),相应的降低幅度为 50.0%、35%。两种试样具有较好的压缩性,其变化趋势在一定程度上与宏观沉降趋势一致。

形状系数 F_i 的定义为:

$$F_i = \frac{C_e}{S_a} \quad (1)$$

式中, C_e 为与颗粒或孔隙等面积的圆周长; S_a 为颗粒或孔隙的实际周长。

由每个孔隙的形状系数可得孔隙平均形状系数 F 为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i / n \quad (2)$$

式中, n 为统计颗粒或孔隙数。 F 的取值范围在 $(0, 1]$ 之间, F 值越大表明孔隙形状越接近于圆形。

图 6 中平均形状系数的变化是土颗粒聚集、破碎、再聚集的过程。原状土平均形状系数分别为

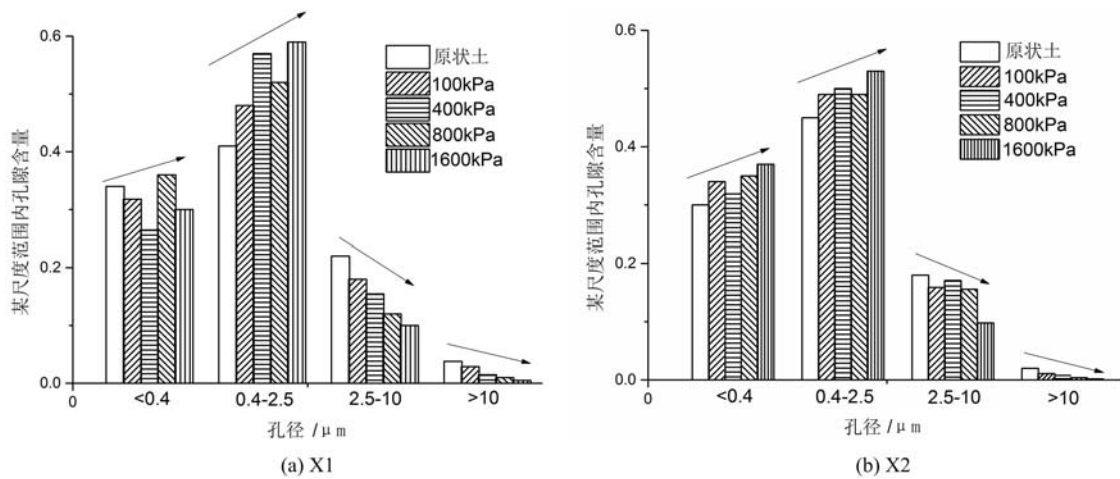


图 5 孔隙含量分布

Fig. 5 Pore size distributions

0.3802、0.4008, 孔隙形状相对狭长。固结初期平均形状系数增长较快, 此时孔隙水渗流排出, 加载在土颗粒上的有效应力未能使颗粒破碎, 夹在其间的孔隙被挤压, 形状越加圆滑; 随着荷载的增加, 部分土颗粒难以承受直至崩解, 应力消散, 孔隙形状再次被轻微调整, 直至固结后期土体经过破碎、重塑, 内部结构趋于稳定, 孔隙形状系数又呈上升趋势。固结完成后, 平均形状系数增加幅度分别为 3.99% 与 2.48%, X1 的平均形状系数增加幅度更大, 说明试样 X1 的孔隙形状与 X2 相比更为复杂, 比 X2 更易被压缩。

表 1 为定量化描述孔隙尺度与形状特征的参数值。由表可知, $\bar{A}$ 值与 $\bar{D}_E$ 呈现相同的变化趋势, 孔隙或土颗粒渐渐破碎, 表现为大、中孔隙逐渐压缩为小、微孔隙, 孔隙数量增多, 平均形状系数 F 增加, 部分孔隙在固结完成后被压实, 直至消失。

表 1 试样固结前后孔隙形态特征参数

Tab. 1 Morphological characteristics of pore for each sample before and after consolidation

特征参数	X1		X2	
	原状样	固结后	原状样	固结后
平均孔隙面积 $\bar{A}/\mu\text{m}^2$	5.40	2.24	4.00	1.93
平均等效孔径 $\bar{D}_E/\mu\text{m}$	2.62	1.69	2.25	1.57
孔隙个数 N	1384	1823	1225	1521
平均形状系数 F	0.3802	0.396	0.4008	0.404

3.2 孔隙分布变化特征

孔隙分布具有明显的分形特征, 可选用分布分维值作为量化指标, 其具体计算方式为: 使用边长为 a 的正方形分割含有多个孔隙存在的、边长为 L 的方形图像, 建成规格为 $(L/a) \times (L/a)$ 的正交型网格, 将此时网格中含孔隙的数量记为 $N(a)$, 在一定范围内改变正方形边长 L , 则含孔隙的网格数量会相应改变, 记为 $N(a_1), N(a_2), N(a_3), \dots, N(a_n)$ 。将这些数据描绘于双对数坐标系中, 发现 $\ln a$ 同 $\ln N$ 的对应关系具有明显的线性特征, 表明孔隙分布具有分形特征, 那么孔隙分布分维值为^[17]:

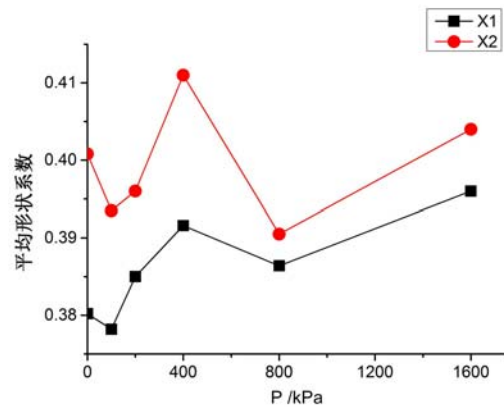


图 6 平均形状系数随着固结压力的变化

Fig. 6 Variation of average form factor on pressure

$$D_{hl} = -\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\ln N(a)}{\ln a} \quad (3)$$

孔隙分布分维数越大,孔隙越发育,数量越多,平面离散化程度越高。各试样在不同压力下的分布分维值见图 7。在整个固结过程中,孔隙分布分维呈减小趋势,X1 土样降幅为 13.2%,X2 土样降幅为 7.45%,说明孔隙分布离散化程度降低,集团化程度提高,分布趋向集中。固结初期分布分维值调整明显,随着压力的增加,土体中大、中孔隙逐渐被压缩,土密实程度增加;至固结后期孔隙调整变得困难,土体结构趋于新的平衡,数值趋于稳定状态,这与 SEM 图片显示的变化规律一致。

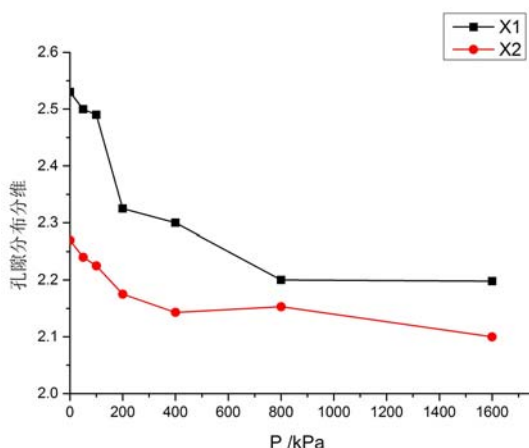


图 7 孔隙分布分维随固结压力变化曲线

Fig. 7 Variation of porosity distribution fractal dimension on pressure

3.3 孔隙定向性变化

土颗粒或孔隙微结构的定向性在很大程度上影响土体工程特性,反映孔隙排列有序性的结构参数为概率熵^[18],其计算公式为:

$$H_m = -\sum_{i=1}^n P_i \lg P_i \quad (4)$$

式中, P_i 为孔隙在某一方位区中出现的概率。显然, H_m 取值越小,表明所有孔隙排列方向越一致,有序性越好。图 8、图 9 为计算得到的固结前后黏性土 X1、X2 竖直切面孔隙玫瑰图。

由图 8、图 9 可知,原状样孔隙在切面内没有明显定向性,排列杂乱无序,各方向概率分布均匀,图像呈中心对称,且孔隙各向异性特征明显。随着固结压力的增加,土颗粒相互挤压发生错动,其排列方向的改变使孔隙方向发生调整,随着孔

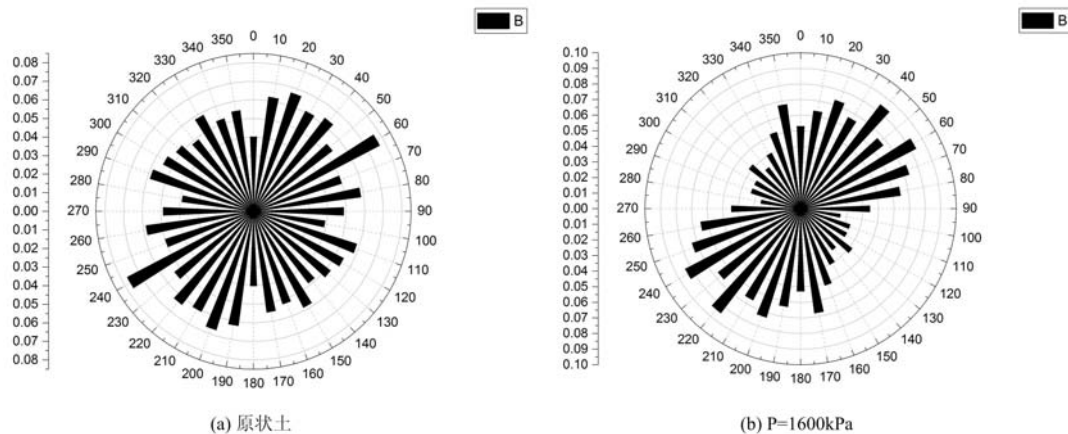


图 8 固结前后 X1 试样孔隙的定向角分布图

Fig. 8 Directional angular distribution of X1 sample before and after consolidation

隙不断受到挤压而缩小,颗粒调整方向受限,致使孔隙的定向性也趋于稳定,试样 X1、X2 的概率熵分别从 0.9903 降低到 0.985,从 0.9893 降低到 0.9845,孔隙定向性小幅增加。固结完成后,X1 试样的孔隙定向角主要集中在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 及 $50^\circ \sim 60^\circ$ 间,X2 试样的孔隙定向角主要集中在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 及 $170^\circ \sim 180^\circ$,孔隙排列在水平方向集中。

3.4 压缩性与天然结构状态的相关分析

土体复杂的工程特性均与处于自然发展阶段的结构状态有关,即天然结构状态。压缩系数作为表征土体工程特性的指标之一,反映了土体受压后的压缩特性,它与土样的成分、结构等有关,压缩系数越大表明该土压缩性越高。在工程实际中,常采用 0.1MPa 至 0.2MPa 压力区段获得的压缩系数作为计算值^[19],故本文将着重探讨 α_{1-2} 与未经施压试样的微结构之间的联系,分别建立各个孔隙结构参数与

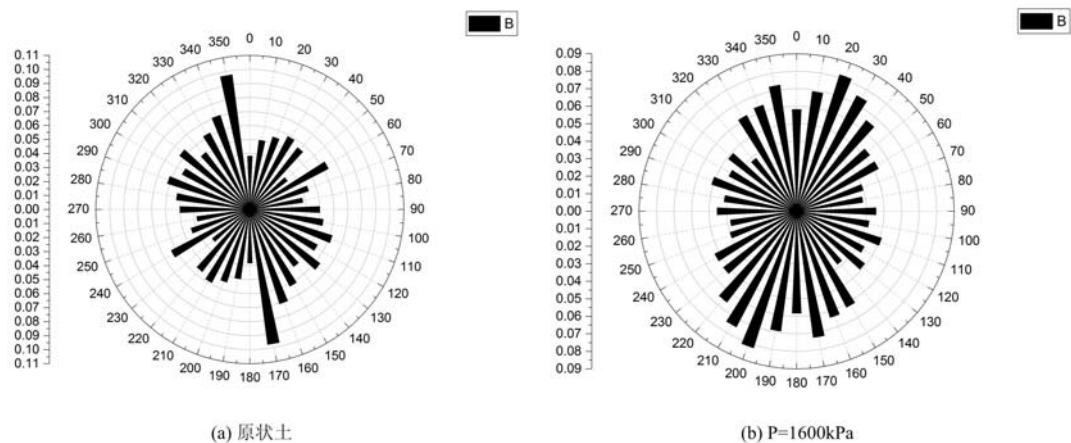


图 9 固结前后 X2 试样孔隙的定向角分布图

Fig. 9 Directional angular distribution of X2 sample before and after consolidation

压缩系数的量化关系,得到 4 组不同的拟合关系式,从微观角度对宏观力学参数进行敏感性分析。本文选取 5 个地点不同地层单元的天然黏土样,将原状土各孔隙结构参数分别与压缩系数进行拟合,结果如下式所示:

$$Y = a + b \ln X \tag{5}$$

式中, Y 表示压缩系数; X 为各微观参数值; a, b 为参数; R 为相关系数,拟合参数见表 3。

表 3 参数拟合值

Tab. 3 Parameters of fitting function

微观结构参数	平均等效孔径 $(\bar{D}_E)/\mu\text{m}$	平均形状系数	孔隙分布分维	概率熵
a	-0.035	-0.231	-0.036	0.217
b	0.218	-0.426	0.243	3.621
相关系数	$R=0.949$	$R=0.770$	$R=0.903$	$R=0.773$

由表 3 可知,就德州黏性土而言,影响压缩系数的主要结构参数为孔隙尺寸,其次为孔隙分布情况,反映孔隙定向性的概率熵、孔隙形状对压缩系数影响不大。黏性土孔隙特性很大程度上受颗粒形态、排列的约束,在分析孔隙特征随固结压力的变化规律时也印证了这一点,孔隙形状是土颗粒形状变化的间接反映,因此平均形状系数及概率熵对土体压缩性没有太大影响。

孔隙尺寸直接反映土的压缩特性,等效孔径与压缩系数呈正相关关系,孔隙尺寸越大,在有效应力作用下土颗粒有更多空间被压实,土体结构越疏松,抵抗外界变形能力越弱,土体压缩性越高;孔隙分布分维与压缩系数呈正相关关系,分维数反映土中孔隙离散情况,分维数越大,孔隙数量越多,在空间分布面积越大,离散性越强,土体更易被压缩。

4 结论与展望

以德州沉降区内不同深度的黏性土样为研究对象,采取理论分析与室内试验相结合,定性分析与定量统计相结合的方法,探究黏性土固结过程中微观结构要素变化特征与分形特征,并从统计意义上建立宏观物理力学参数指标与微观结构要素之间的关系,得出如下结论:

采用薄壁取样器获取德州沉降区内黏性土原状样,并对各固结试样进行真空升华干燥处理,使试样既脱水又不产生膨胀使土体结构扰动,确保了试验的精准度,获取的 SEM 图像可真实反映土体微观结构形态特征。

孔隙微观结构参数在压力作用下的变化规律不尽相同,固结初期黏性土孔隙渗流通道较大,但孔隙数量少,表征孔隙形态、排列、分布特征的定量参数调整趋势稳定;当有效应力增加到足以破碎土颗粒时,土体结构遭到破坏,微观参数此时略有调整,孔径依旧被挤压变小,数量增多,更多大孔隙被压碎成

小孔隙,但其形状有变狭长趋势,概率熵减小,水平向定向集中的孔隙增多;直至固结后期土体结构再次重塑,孔隙结构参数再次调整最终趋向稳定。

通过分析压缩系数与原状土微观孔隙特征的相关性,发现对于德州沉降区土体,等效孔径、孔隙分布情况对压缩性影响最大,均与压缩系数呈正相关;平均形状系数与概率熵对压缩系数影响较小。说明孔隙越发育,离散化程度越高,越易被压缩,表明利用土体微观结构特性指标的发展变化趋势验证宏观物理力学特征是可行的。

笔者认为在黏性土固结特性与微观性质的相互关系的研究方面,下一步可对微观结构特性指标在压力作用下的发展变化趋势建立量化关系,定量反映土体结构状态变化规律,并提炼出更具指导性的宏观参数联系方程,通过微观参数变化范围确定宏观力学特性阈值,使其对于地面沉降计算与预测具有更切实的指导性。

参考文献:

- [1] 谢海澜,武强,赵增敏,等.考虑非达西流的弱透水层固结计算[J].岩土力学,2007,28(5):1061—1065 (XIE Hailan, WU Qiang, ZHAO Zengmin, et al. Consolidation computation of aquitard considering non-Darcy flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (5):1061—1065 (in Chinese))
- [2] 沈珠江.土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J].岩土工程学报,1996,18(1):95—97 (SHEN Zhujiang. Mathematical model of soil structure—Core issues of soil mechanics in the 21st century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1):95—97 (in Chinese))
- [3] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等.粘土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J].水利学报,2000,31(10):43—47 (GONG Xiaonan, XIONG Chuanxiang, XIANG Kexiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(10):43—47 (in Chinese))
- [4] 施斌,姜洪涛.粘性土的微观结构分析技术研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):864—870 (SHI Bin, JIANG Hongtao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6):864—870 (in Chinese))
- [5] 吴义祥.工程粘性土微观结构的定量评价[J].地球学报,1991,12(2):143—151 (WU Yixiang. Quantitative approach on micro-structure of engineering clay [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1991, 12 (2):143—151 (in Chinese))
- [6] 谢和平.分形几何及其在岩土力学中的应用[J].岩土工程学报,1992,14(1):14—24 (XIE Heping. Fractal geometry and its application to rock and soil materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (1):14—24(in Chinese))
- [7] 沈珠江.结构性粘土的非线性损伤力学模型[J].水利水运工程学报,1993(3):247—255 (SHEN Zhujiang. A nonlinear damage model for structured clay[J]. Hydro-Science and Engineering, 1993(3):247—255 (in Chinese))
- [8] 尚嘉兰,李廷芥.岩石细观损伤破坏的观测研究[J].实验力学,1999,14(3):373—383 (SHANG Jialan, LI Tingjie. Observation and study on meso-damage and fracture of rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(3):373—383 (in Chinese))
- [9] 薛茹,胡瑞林,毛灵涛.软土加固过程中微结构变化的分形研究[J].土木工程学报,2006,39(10):87—91 (XUE Ru, HU Ruilin, MAO Lingtao. Fractal study on the microstructure variation of soft soils in consolidation process[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10):87—91 (in Chinese))
- [10] 张先伟,孔令伟.利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J].岩土力学,2013(S2):134—142 (ZHANG Xianwei, KONG Lingwei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(S2):134—142 (in Chinese))
- [11] 李妥德,谌壮丽.土样微观结构研究中的样品制备技术[J].水文地质工程地质,1985(2):41—45 (LI Tuode, CHEN Zhuangli. Technology of sample preparation in microstructure research of soil samples[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1985(2):41—45 (in Chinese))
- [12] 白冰,周健.扫描电子显微镜测试技术在岩土工程中的应用与进展[J].电子显微学报,2001,20(2):154—160 (BAI Bing, ZHOU Jian. The applications and advances of SEM in geotechnical engineering[J]. Journal of Chinese

- Electron Microscopy Society, 2001, 20(2):154—160 (in Chinese))
- [13] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4):560—565 (TANG Chaosheng, Shi Bin, WANG Baojun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4):560—565(in Chinese))
- [14] Liu C, Shi B, Zhou J, et al. Quantification and characterization of micro porosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1):97—106.
- [15] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 固结条件下软黏土微观孔隙结构的演化及其分形描述[J]. 水利学报, 2008, 39(4):394—400 (ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. Evolution of micro pore structure of soft clay and its fractal features under consolidation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4):394—400 (in Chinese))
- [16] 周晖. 珠江三角洲软土显微结构与渗流固结机理研究[D]. 华南理工大学, 2013 (ZHOU Hui. Study on soft soil microstructure and mechanism of seepage and consolidation in Pearl River Delta[D]. South China University of Technology, 2013 (in Chinese))
- [17] 毛灵涛, 薛茹, 安里千, 等. 软土孔隙微观结构的分形研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5):600—604 (MAO Lingtao, XUE Ru, AN Liqian, et al. Fractal approach on soft soil porosity microstructure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5):600—604 (in Chinese))
- [18] 施斌. 粘性土微观结构定向性的定量研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1):36—44 (SHI Bin. Quantitative research on the orientation of microstructures of clayey soil [J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(1):36—44 (in Chinese))
- [19] 胡瑞林. 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 (HU Ruilin. Quantitative microstructure models of clayey soils and their engineering behaviors[M]. Geological Publishing House, 1995 (in Chinese))

Experimental study of microscopic pore structure of clay soil under consolidation consolidation

JIA Chao¹, HE Yue¹, DI Sheng-tong¹, LI Kang¹, YANG Ya-bin²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, The Second Hydrogeological Engineering Geological Brigade, Dezhou 253015, Shandong, China)

Abstract: The microstructure state of soil is an important factor to control the stability of soil. The complex macroscopic characteristics of engineering soil are fundamentally determined by its complexity and uncertainty of microstructure. In this paper, taking the clay soil from the settlement area of Dezhou City as research object, based on the analysis and processing of scanning electron microscope images, the mechanism of pore structure evolution of clay soil taken from different depths was studied from the microscopic point of view. The constraint relation between the initial structure state and compressibility of soil was also discussed. Experimental results show that the consolidation load has changed the microstructure type of soil; with the increase of consolidation load, the structural units are converted from loose state to reunion state; the compactness of soil increases and the pore area decreases. Quantitative analysis shows that the consolidation pressure will change the micro-structural elements of soil. With the increase of consolidation load, the average pore size decreases and the proportion of micro-pores increases. The pore shape will eventually adjust to be smooth, and the degree of collectivization will increase, soil orientation enhanced. The above experiment provides an important basis for the further understanding of the nonlinear problem of soil microstructure and the interaction mechanism between microstructure and macroscopic engineering characteristics.

Keywords: clay soil; microscopic pore structure; quantitative analysis; evolution characteristics; compressibility