

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.05.016

饱和细粒土固结过程中矿物组分与有机质的三维表征*

刘治清^① 宋晶^{①②} 李学^① 杨玉双^③ 任玉琦^④

(^①中山大学地球科学与工程学院 广州 510275)

(^②广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室 广州 510275)

(^③澳大利亚联邦科学与工业研究组织 墨尔本克莱顿 Vic3168)

(^④中国科学院上海应用物理研究所 上海 201204)

摘要 饱和细粒土颗粒细小,比表面积大,易与土体中的孔隙水、有机质相互结合形成团聚体,这种结合形式对土体的物理力学性质有着重要影响。本文从三维微观结构角度探讨饱和细粒土的多物质结构特征对其固结演化性质的作用。土样分成4种组分:孔隙、有机质、多矿物组分和伊利石为主的矿物组分。通过同步辐射显微CT技术联合数据约束模型,获取多物质三维结构表征。伊利石为主的矿物组分,与孔隙呈共存结构,即使在1600kPa高压作用下仍不易排出孔隙水。有机质与伊利石为主的矿物组分易结合形成有机黏土颗粒,有机质不仅吸附在组分表面,而且嵌入组分结构内部;在土体固结过程中,有机质存在富集特征,40~400 μm 直径的有机质总体积逐渐增大,削弱土颗粒间的连结强度。本研究采用定性分析与定量分析相结合,获取了固结过程中矿物组分与有机质的结构表征,为特殊土体的微宏观性质分析提供一种可行性研究方法。

关键词 矿物组分 有机质 同步辐射 μCT 数据约束模型

中图分类号: P642.11 文献标识码: A

THREE-DIMENSIONAL CHARACTERIZATION OF MINERAL AND ORGANIC COMPOSITIONS IN PROCESS OF CONSOLIDATION OF SATURATED FINE-GRAINED SOIL

LIU Zhiqing^① SONG Jing^{①②} LI Xue^① YANG Yushuang^③ REN Yuqi^④

(^①School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275)

(^②Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Guangzhou 510275)

(^③CSIRO Private Bag33, Clayton, Australia, Vic 3168)

(^④Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204)

Abstract The particles in the saturated fine-grained soils are small. Their specific surface areas are large. The pore water and organics in the soil tends to form aggregates. This combination has important influence on the physical and mechanical properties of the soil. In this paper, the effect of multi-material structure of saturated fine-grained soil on its consolidation and evolutionary properties is discussed from the perspective of three-dimensional microstructure. The components in the soil samples are classified into four groups: pores, organics, multi-minerals

* 收稿日期: 2017-05-30; 收到修改稿日期: 2017-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金(41402239, 41572277, 61505266) 广东省自然科学基金(S201204000733) 资助.

第一作者简介: 刘治清(1991-), 男, 硕士生, 主要从事软土及地质工程方面的研究. Email: liuzhq9@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者简介: 宋晶(1982-), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事软土工程及微观结构研究. Email: songj5@mail.sysu.edu.cn

and illite-dominated minerals. The structures were analyzed by synchrotron radiation μ CT combined with the data constrained modelling in the consolidation process. The results show that illite-dominated minerals are hydrophilic and display a coexistence of multiple phases in a voxel with pore, so that the water is difficult to be discharged under high pressure (1600kPa). Organics combined with illite minerals form organoclay agglomerated particles. It is not only adsorbed on the illite-dominated mineral surface, but also embedded in the mineral structure. The organics migrated in consolidation progress, which is illustrated by gradually increased volume of organics (in 40~400 μ m diameter). The strength of the soil between the soil particles weakened. This research utilizes qualitative and quantitative analysis to obtain evolutionary characteristics of minerals and organics. The approach presented would be applicable in studying the relationship between microstructure and macro-properties for special engineering soils.

Key words Minerals compositions, Organics, Synchrotron radiation μ CT, Data constrained modelling

0 引言

吹淤造陆是国内外陆域形成的重要方式,以淤泥作为回填料,在疏导河道的同时实现了就地取材、变废为利(彭涛等,2001;张明等,2011)。吹淤造陆形成的机场、港口、码头等大面积场地,既满足经济发展需求,又缓解土地资源紧张。吹填淤泥的主要成分为高黏性细粒土,它具有高含水量、高压缩性、低强度等性质。吹填以后自然沉积固结需要很长时间才能完成,竣工后地基蠕变明显,如果蠕变长时间不能稳定,对其上的建筑物将造成很大的破坏(应舒等,2010;李红文等,2017)。

吹填淤泥含水量高,基本处于饱和状态,颗粒与水的相互作用共同形成吹填淤泥的工程性质(丁建文等,2012;鲍树峰等,2014)。吹填淤泥以细粒土为主,黏粒含量高,同时含有一定量的有机质。细粒土颗粒比表面积大,易与水、有机质经过物理化学作用相互结合,从而影响土体固结、蠕变和强度特征(何俊等,2003;宋晶等,2014)。孙运坚等(2015)认为吹填淤泥之所以性质“活泼”是因为黏粒和强亲水性矿物含量高,黏土矿物与水、有机物相互结合形成聚集体;王清等(2013)对排水固结过程中淤泥的物理力学性质作对比,发现排水固结过程中团聚体和盐分的迁移制约土体强度;Kennedy et al. (2002)研究海洋黏土发现黏土矿物表面与总有机碳关系密切,黏土矿物结构有利于有机碳的积累;雷华阳等(2013)通过力学实验分析团聚体的变形,指出细粒土中黏粒组的蠕变变形也会制约宏观力学特征。可见,吹填淤泥中黏土矿物、有机质与其排水固结效果关系密切。

前人对黏土矿物、水、有机质的研究主要从宏观物理力学性质的角度来探索它们之间的相互作用。

获取矿物组分与有机质的微观结构,从微观角度定量分析,有利于基于不同物质的分布特征解释宏观物理力学现象。

目前物质分布特征常采用显微成像技术实现,如扫描电子显微镜(SEM)获取土体微观结构,但这种方法只能看到二维空间内颗粒之间的接触关系,无法精准获取三维立体结构以及对其进行定量分析(唐朝生等,2008)。在固结过程中,土体由浮泥状态到流塑状态再到软塑状态,结构变化显著,无法用单一放大倍数的SEM进行图像分析。随着计算机断层扫描技术(CT)精度的不断提升,利用其获取土体微纳三维结构成为可能。高精度显微CT具有无损、动态、高分辨等特点,通过对样品进行不同角度的成像和图像重建,获取土体三维立体结构和成分(李文昭等,2014;康志勤等,2014;刘治清等,2016)。

杨玉双等提出一种材料微观表征方法——数据约束模型(Data Constrained Modelling,简称DCM),它考虑了多种X射线能量下(Multi-Energy X-ray,简称ME)样品中各物质成分吸收系数的差异,基于显微CT扫描技术建立材料的三维结构数学模型(Wang et al. 2013; Yang et al. 2013)。DCM不仅可以表征大于等于像元尺寸的材料结构信息,而且保留了小于像元尺寸的物质分布信息。

针对吹填淤泥中的细粒土,本文以同步辐射多能量X射线断层显微CT技术联合数据约束模型(ME-SR- μ CT-DCM)为研究主线,建立微米级以上像元尺寸的土体三维结构模型,其中包括小于微米级像元尺寸的团聚体赋存状态和孔隙结构信息(Yang et al. 2010;王海鹏等,2014; Song et al. 2017)。以SEM与X-射线能谱分析技术为辅,建立不同压力作用下的细粒土三维结构。提取不同尺度的团聚体中黏土矿物与有机质的分布信息,定量分

析矿物和有机质的结构演化特征以及它们与土体中的水分相互作用关系,探讨吹填淤泥宏观蠕变特性的内在机理。

1 土体的基本物理力学性质及制样

实验原状土样取自广东纯洲岛西侧大亚湾海域吹填淤泥,土体呈灰黑色,微臭。原状吹填淤泥经筛分得到等效粒径小于 0.075mm 的细粒土,饱和细粒土的基本物理力学特征(表 1)。

样品制备及实验主要分 4 步,第 1 步自重沉积,模拟吹填沉降,将土样与水搅拌均匀,自沉至沉降稳定(图 1a)(刘治清等,2016);第 2 步,一维固结,土样在 0kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa 等竖向压力下排水固结(图 1b);第 3 步,将样品进行真空冷冻干燥,制取显微 CT 实验样品(图 1c),进行同步辐射 CT 扫描实验;第 4 步,对样品干燥镀膜(图 1d),进行电镜扫描。同时,干燥样品研磨后进行 XRD 分析,分析曲线(图 1e)。采用 X 射线衍射分析(XRD)结合 X 射线荧光光谱分析(XRF)定量研究矿物成分,鉴别土体矿物类型(尚彦军等,2004);通过烧失量实验确定有机质含量(胡彩莉等,2016)如表 2 所示。

表 2 土样的矿物成分
Table 2 Minerals in soil sample

矿物名称	伊利石	绿泥石	方解石	白云石	长石	高岭石	石英	蒙脱石	有机质
质量百分比 /%	19.14	2.01	1.75	3.79	3.96	5.31	33.20	28.46	2.39

2 同步辐射显微 CT 图像处理

X 射线显微 CT 技术可以实现无损三维定量表征(Harjupatana et al., 2015)。其中,同步辐射显微 CT 技术的图像采集速度快、能够避免射线硬化,具有无损、动态成像、高分辨、三维可视化等先进性(王海鹏等,2014),可以实现土体材料的无损三维定量表征(Song et al., 2017)。本研究采用多能量同步辐射显微 CT 实验(ME-SR- μ CT),在澳大利亚同步辐射光源进行,采用 Ruby 探测器(Single pco.edge sensor)采集投影图像(图 2)。样品到探测器的距离 30cm,探测器的像元尺寸 6.53 μ m,30keV 和 40keV 两能量的曝光时间分别约为 100ms 和 40ms,保持样品在两次 CT 实验中的扫描位置不变。样品旋转 180 $^\circ$ 采集 1800 张投影图像,即图像采集间隔 0.1 $^\circ$ 。

表 1 土样的基本物理性质

Table 1 The basic physical properties of soil samples

密度 /g \cdot cm $^{-3}$	含水量 W/%	液限 W $_l$ /%	塑限 W $_p$ /%	塑性指数 I $_p$ /%	黏粒含量 /%	粉粒含量 /%	d $_{60}$ /mm	d $_{30}$ /mm	d $_{10}$ /mm
1.466	101.87	52.3	27.8	24.5	36.09	63.91	0.025	0.006	0.001

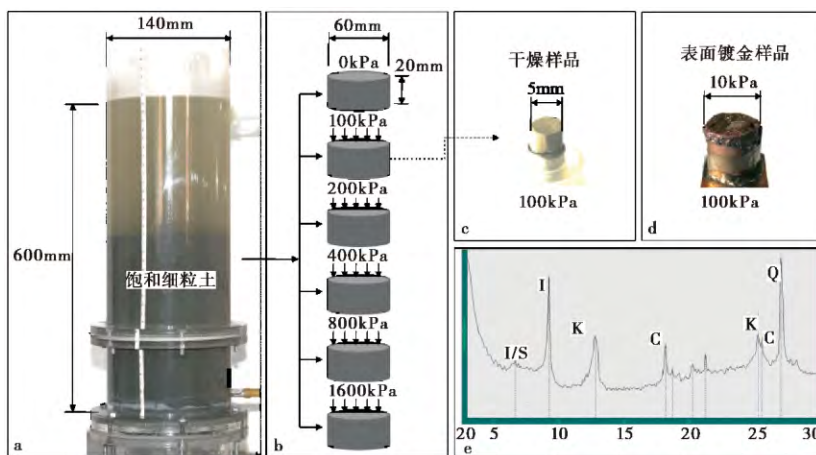


图 1 自重沉降示意图(a)、一维固结实验(b)、CT 扫描样品(c)、SEM 扫描样品(d)和土样 X 射线衍射分析(e)

Fig. 1 Self weight settlement(a), One-dimensional consolidation test(b), CT scanning sample(c), SEM sample(d), X ray diffraction analysis(e)

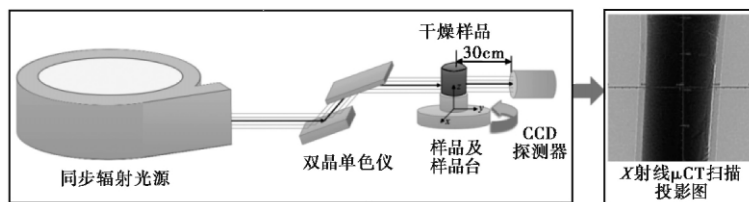


图2 同步辐射实验示意图

Fig. 2 Sketch map of synchrotron radiation μ CT experiment

每次 CT 扫描前后,各采集 20 张亮背景图像和 20 张暗背景图像。采用 X-TRACT 软件进行投影图背景校正、图形归一化校正、相位恢复、环形伪影校正,实现 CT 重构(王玉丹等,2012)。

3 数据约束模型(DCM)

借助 DCM 软件(Song et al., 2017)划分饱和细粒土组分。获得物质对有机质的线性吸收系数比值。一方面矿物对有机质的吸收系数比值都大于 10,矿物和有机质差异明显。另一方面,伊利石、绿泥石和方解石 3 种矿物吸收曲线形态相近,可划分为一组。基于计算机运行速度,饱和细粒土结构划分 4 个组分,即:孔隙,有机质,多矿物组分(白云石、长石、高岭石、石英和蒙脱石)和伊利石为主的矿物组分(伊利石、绿泥石和方解石)。4 种组分体积百分比根据室内试验得到;DCM 将基于显微成像技术计算得到最接近室内试验的组分赋存结果。

基于饱和细粒土的 CT 重构切片,用 DCM 建立微米级以上像元尺寸的土体三维结构模型。每个样品取 1 个分析模型,尺寸为 $200 \times 200 \times 200$ Voxels,总体积为 $1.306 \times 1.306 \times 1.306 \text{ mm}^3$ 。根据样品各组分对 30keV 和 40keV 能量的吸收差异,进行三维数据校准。用 DCM 数据约束算法(Yang et al., 2013)建立各压力下物质成分的三维模型。例如,1600kPa 样品的 DCM 模型分组包括孔隙(用蓝色表示如图 3a),有机质(用绿色表示如图 3b),多矿物组分(用黄色表示如图 3c),伊利石为主的矿物组分(用红色表示如图 3d) 4 种组分共存的三维结构(图 3e)。

6 个样品经过 DCM 运行,还原土体结构演化特征。孔隙体积不断减小,矿物组分体积不断增大,孔隙与矿物组分大多呈团聚状,以小于微米级分辨率的尺寸存在(Song et al., 2017)。值得注意的是,绿泥石和方解石属于伊利石为主的矿物组分,由于两者含量较少,矿物赋存特征讨论中不做针对分析。

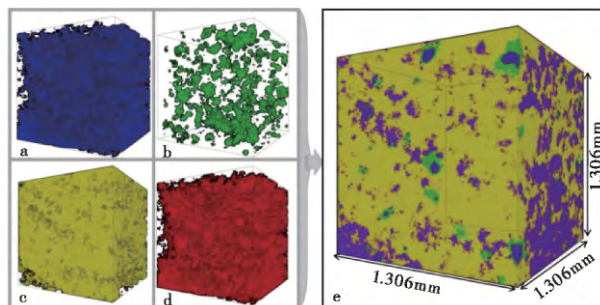


图3 孔隙(a),有机质(b),多矿物组分(c),伊利石为主的矿物组分(d),各矿物成分集合体(混合颜色表示多种组分共存于体元中)(e)

Fig. 3 Pores (a), Organics (b), Multi-minerals (c), Illite-dominated minerals (d), Aggregates of various mineral components (Coexistence of multiple phases in a voxel is displayed as a mixed colour) (e)

4 孔隙与矿物组分的相互赋存特征

饱和细粒土的黏土矿物含量高,质量百分比 54.92% 将制约吹填淤泥的流变性和蠕变性(胡华, 2005)。黏土矿物颗粒细小,易相互结合形成团聚体。孔隙水不仅存在团聚体之间,且大量存在于团聚体内部的微小孔隙之中。

伊利石为主的矿物组分与孔隙赋存状态(图 4a),可以看出大多数孔隙(蓝色)与该矿物组分(红色)共存于同一体元,模型的体元多呈紫色分布。借助图 4b 和图 4c 中放大 4000 倍的 SEM 图像,说明排水固结过程中,排水通道以伊利石为主的矿物组分表现。从图 5 可以看出,0kPa 到 100kPa 作用下土体含水率从 101% 迅速减少到 50% 左右。随着固结作用持续,1600kPa 样品中,某些体元排水后,伊利石为主的矿物组分呈独立的团聚体存在于结构中(图 4a 红色)。

饱和细粒土的多矿物组分(黄色)既包括黏土矿物也包括原生矿物,该组分多与孔隙相互独立存在,鉴于黏土矿物中的蒙脱石和高岭石的吸收系数

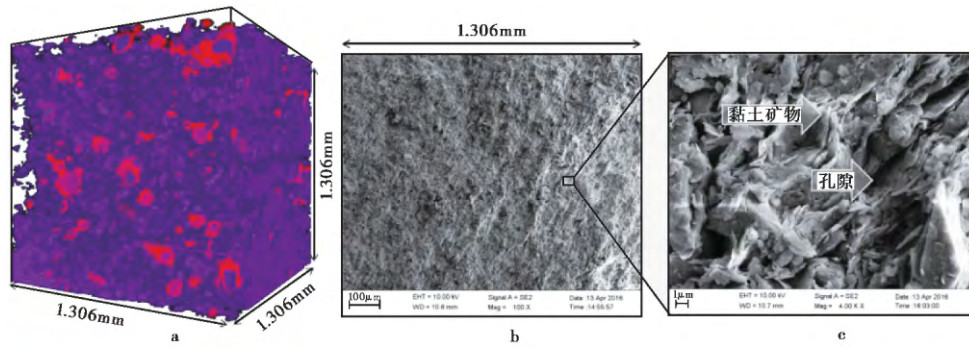


图 4 孔隙与伊利石为主的矿物赋存 (a)、土样放大 100 倍的 SEM 图像 (b) 和 放大 4000 倍的 SEM 图像 (c)

Fig. 4 Distribution of pores and illite-dominated minerals (a) , SEM image of 100 times amplified (b) , SEM image of 4000 times amplified (c)

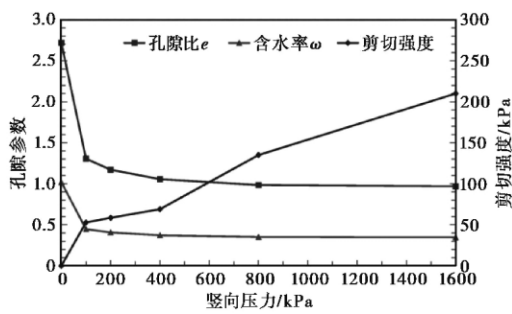


图 5 固结过程中土体孔隙比、含水率、抗剪强度的变化

Fig. 5 Variation of void ratio , water content and shear strength of soil during consolidation

与石英、长石相近,不易区分,多矿物组分与孔隙及孔隙水的赋存状态有待进一步分析。

5 有机质三维表征

黏土矿物不仅吸附孔隙水而且富集有机质(陈慧娥等,2005)。基于 SEM 及能谱分析,获得有机质在饱和细粒土中的赋存状态(图 6a)和团聚体成分特征(图 6b),发现具有较大比表面积特征的有机质与矿物颗粒形成团聚体,即有机黏土复合体。基于数据约束模型,有机质与两种矿物组分的三维结构分布较相似,以伊利石为主的黏土矿物赋存形式为例,从图 6c 和 6d 进行分辨。有机质的赋存分 3 种形式:有机质分布在黏土矿物表面,如图 6c 的 A 区域;有机质包裹黏土矿物,如图 6c 的 B 区域;有机质嵌入黏土矿物层理结构,如图 6d 的 C 区域。这 3 种状态即:表面吸附态、颗粒包裹态和层间结合态。

针对连通体分布特征进行数量和体积的统计,第 m 个组分满足连通阈值 x 的第 k 个连通体中,团

聚体的体积连通程度由等体积的球体直径 $D_k^{(m)}$ 衡量,单位为 μm ,如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} D_k^{(m)} = \left(\frac{6V_k^{(m)}}{\pi} \right)^{1/3}; k = 1, 2, \dots, K \\ V_k^{(m)} = V_0 \sum_{i=1}^T v_n^{(m)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, K 表示连通体数量; $V_0 = 6.53 \times 6.53 \times 6.53 \mu\text{m}^3$ 为单一体元的总体积; T 表示某个连通体中满足连通条件的体元数; $v_n^{(m)}$ 表示满足连通体条件的 T 个体元中 m 组分的体积百分比之和。

基于数据约束模型,有机质单一物质的三维分布(图 7a),连通体(Wang et al.,2014)分布特征如图 7b。分析模型总体积为 $1.306 \times 1.306 \times 1.306 \text{mm}^3$,统计得到有机质颗粒大小主要位于 $0.4 \sim 400 \mu\text{m}$ 范围内(图 7c)。有机质连通体分布与物质分布的三维结构相似,可见有机质颗粒多呈单粒状,结构疏松、偶有链状团聚体。

随着压力增大,有机质总体积百分比增大(图 7c)。 $0 \sim 400 \text{kPa}$, $4 \sim 40 \mu\text{m}$ 的有机质体积百分比增加; $400 \sim 1600 \text{kPa}$, $40 \sim 400 \mu\text{m}$ 的有机质体积百分比增加。可见土体固结过程中,孔隙水逐渐排出(图 5),有机质发生聚集, $4 \sim 40 \mu\text{m}$ 的有机质体积不断增加成为 $40 \sim 400 \mu\text{m}$ 的有机质团聚体,但三维结构显示有机质仍呈现疏松的赋存状态。该结构特征也是饱和细粒土存在高压缩性、高含水量、蠕变的部分原因。

6 结论与建议

(1) 多能量同步辐射显微 CT 结合数据约束模型技术,建立了饱和细粒土的三维可视化模型,实现

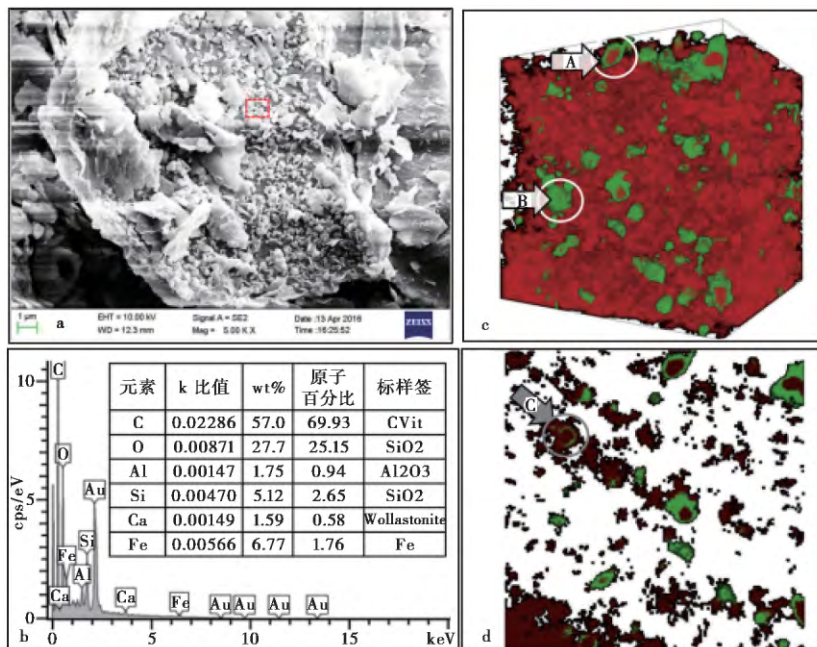


图 6 放大 5000 倍的 SEM 图 (a) ; EDX 能谱图 (b) ; 有机质与伊利石为主的矿物组分三维结构 (c) ; 有机质与伊利石为主的矿物切片 (d)

Fig. 6 Magnified SEM diagrams of 5000 times (a) ; EDX energy spectra (b) ; Three-dimensional structure of organics and illite-dominated minerals (c) ; Two-dimensional slice of organics and illite-dominated minerals (d)

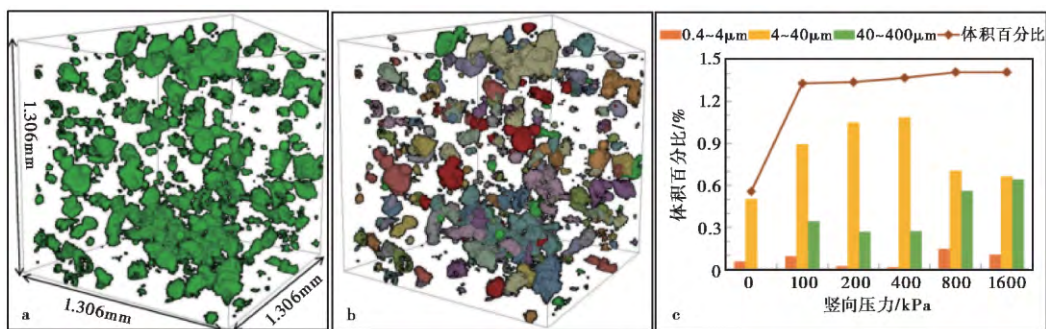


图 7 有机质体元分布 (a) , (b) 有机质连通体分布 , (c) 有机质定量统计

Fig. 7 Three-dimensional distribution of organics (a) , Cluster distribution of organics (b) , Quantitative evolution of organics microstructures (c)

了孔隙、有机质、多矿物组分和伊利石为主矿物组分的表征。

(2) 多矿物成分赋存的孔隙水赋存较少,是固结过程中的骨架结构;伊利石为主的矿物组分中大量赋存排水通道,其结构是固结过程中强度提高的主要制约因素。

(3) 有机质在饱和细粒土中的赋存状态包括表面吸附态、颗粒包裹态和层间结合态。40~400 μm 的有机质以单粒、疏松的状态赋存于伊利石为主的矿物结构中,随固结过程的持续而增大,制约土体强

度的提高。

(4) 建议进一步对多矿物成分中的蒙脱石、高岭石等矿物进行三维结构辨别和提取,以期获得更加全面的黏土矿物工程地质性质。

参 考 文 献

Bao S F , Lou Y , Dong Z L , et al. 2014. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 36 (7) : 1350~1359.
Chen H E , Wang , Q. 2005. Influences of organic matter on the effects of

- consolidating soft soil with cement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering **24**(S2): 5816~5821.
- Ding J W, Wu X C, Li H, et al. 2012. Compression properties and structure yield stress for solidified soil composing of dredged clays[J]. Journal of Engineering Geology **20**(4): 627~632.
- Harjupatana T, Alaraudanjoki J, Kataja M. 2015 X-ray tomographic method for measuring three-dimensional deformation and water content distribution in swelling clays[J] Applied Clay Science **114**: 386~394.
- He J, Xiao S F. 2003. Some Influence of bond water on rheological properties of marine soft soils[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition) **33**(2): 204~207.
- Hu C L, Ma Y Z, Guo C, et al. 2016. Optimization of the experiment conditions for estimating organic matter content with loss-on-ignition method[J]. Earth and Environment **44**(1): 110~118.
- Hu H. 2005. Influence of clay content on rheological parameters of soft soil and its mechanism analysis[J]. Geotechnical Engineering World **8**(11): 34~36.
- Kang Z Q, Wang W, Zhao Y S, et al. 2014. Three-dimensional percolation mechanism in oil shale under different temperatures based on micro-CT[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering **33**(9): 1837~1842.
- Kennedy M J, Pevear D R, Hill R J. 2002. Mineral surface control of organic carbon in black shale[J]. Science **295**(25): 657~660.
- Lei H Y, Chen L, Ding X D, et al. 2013. Properties of secondary consolidation of two types of dredger fill sites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering **33**(S1): 90~96.
- Li H W, Li X M, Dong F C, et al. 2017. Strength testing slit hydraulic soil foundation base on vacuum preloading[J]. Water Resources and Power **35**(1): 138~140.
- Li W Z, Zhou H, Chen X M, et al. 2014. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation Micro-CT[J]. Acta Pedologica Sinica **51**(1): 67~74.
- Liu Z Q, Song J, Yang Y S, et al. 2016. Three-dimensional pores evolution characteristics during consolidation process of saturated fine-grained soil[J]. Journal of Engineering Geology **24**(5): 931~940.
- Peng T, Ge S T, Wu W, et al. 2001. Dredger reclamation technology application in Shenzhen Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology **1**(1): 68~70.
- Shang Y J, Yu Z Q, Wang S J, et al. 2004. Comparison of clay mineral content variations in clay-size portions and bulky completely decomposed granite[J]. Hydrogeology & Engineering Geology **3**(3): 7~12.
- Song J, Tang L S, Wang Q, et al. 2014. Analysis on physical and mechanical properties of some typical dredger fill in coastal regions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni **53**(6): 106~111.
- Song J, Yang S, Ren Y, Q, et al. 2017. Microstructure characterizations of saturated fine-grained soil in consolidation process. v3. CSIRO. Data Collection. <http://doi.org/10.4225/08/58d0cc5d97845>.
- Sun Y J, Sun S Q, Bao S F. 2015. Cause of conventional vacuum consolidation technology failure to newly filled reclamation mud foundation[J]. Port & Waterway Engineering **11**: 148~154.
- Tang C S, Shi B, Wang B J. 2008. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering **30**(4): 560~565.
- Wang H P, Yang Y S, Jiang X J, et al. 2014. Physical structure characterization of direct coal liquefaction residue by DCM model and synchrotron X-ray CT[J]. Journal of Shanxi University(Nat. Sci. Ed) **37**(4): 545~552.
- Wang Q, Sun M Q, Sun T, et al. 2013. Microstructure features for dredger fill by different solidified technologies[J]. Journal of Tongji University(Natural Science) **41**(9): 1286~1292.
- Wang Y D, Peng G Y, Tong Y J, et al. 2012. Effect of some factors on X-ray spiral micro-computed tomography at synchrotron radiation[J]. Acta Phys. Sin **61**(5): 174~182.
- Wang Y D, Yang Y S, Cole I, et al. 2013. Investigation of the microstructure of an aqueously corroded zinc wire by data-constrained modelling with multi-energy X-ray CT[J]. Materials and Corrosion **64**(3): 180~184.
- Yang S, Gao D C, Muster T, et al. 2010. Microstructure of a paint primer—a data-constrained modeling analysis[J]. Materials Science Forum **654-656**: 1686~1689.
- Yang Y S, Tulloh A, Chen F, et al. 2013. Data-constrained characterization of sandstone microstructures with multi-energy X-ray CT[C]. Journal of Physics Conference Series **463**(4): 12048~12051.
- Ying S, Gao C S, Huang Q. 2010. Experimental study on surface-layer improvement of soft foundation filled by newly dredged silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering **32**(12): 1956~1960.
- Zhang M, Yan Y S. 2011. Study on consolidation characteristics of dredged fill[J]. Geotechnical Investigation & Surveying **9**(9): 19~24.
- 鲍树峰, 姜炎, 董志良, 等. 2014. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报 **36**(7): 1350~1359.
- 陈慧娥, 王清. 2005. 有机质对水泥加固软土效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报 **24**(S2): 5816~5821.
- 丁建文, 吴学春, 李辉, 等. 2012. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. 工程地质学报 **20**(4): 627~632.
- 何俊, 肖树芳. 2003. 结合水对海积软土流变性质的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版) **33**(2): 204~207.
- 胡彩莉, 马玉贞, 郭超, 等. 2016. 烧失量法测定土壤有机质含量的实验条件探究[J]. 地球与环境 **44**(1): 110~118.
- 胡华. 2005. 黏粒含量对淤泥质软土流变参数的影响及其机理分析[J]. 岩土工程界 **8**(11): 34~36.
- 康志勤, 王玮, 赵阳升, 等. 2014. 基于显微CT技术的不同温度下油页岩孔隙结构三维逾渗规律研究[J]. 岩石力学与工程学报 **33**(9): 1837~1842.
- 雷华阳, 陈丽, 丁小冬, 等. 2013. 两种类型吹填场区地基土的次固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报 **33**(S1): 90~96.
- 李红文, 李雪梅, 邓成发, 等. 2017. 基于真空预压法的淤泥质吹填土地基强度检测[J]. 水电能源科学 **35**(1): 138~140.

- 李文昭,周虎,陈效民,等. 2014. 基于同步辐射显微 CT 研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. 土壤学报, 51(1): 67~74.
- 刘治清,宋晶,杨玉双,等. 2016. 饱和细粒土固结过程的三维孔隙演化特征[J]. 工程地质学报, 24(5): 931~940.
- 彭涛,葛少亭,武威,等. 2001. 吹填淤泥填海造陆技术在深圳地区的应用[J]. 水文地质工程地质, (1): 68~70.
- 尚彦军,岳中琦,王思敬,等. 2004. 全风化花岗岩全岩和黏粒中黏土矿物含量变化对比[J]. 水文地质工程地质, (3): 7~12.
- 宋晶,汤连生,王清,等. 2014. 沿海地区典型吹填土物化特征的对比[J]. 中山大学学报(自然科学版), 53(6): 106~111.
- 孙运坚,孙树青,鲍树峰. 2015. 新近吹填淤泥现行真空预压技术加固效果不佳原因分析[J]. 水运工程, (11): 148~154.
- 唐朝生,施斌,王宝军. 2008. 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, 30(4): 560~565.
- 王海鹏,杨玉双,蒋兴家,等. 2014. 基于 DCM 模型与同步辐射 CT 的煤直接液化残渣物理结构表征[J]. 山西大学学报(自然科学版), 37(4): 545~552.
- 王清,孙明乾,孙铁,等. 2013. 不同处理方法下吹填土微观结构特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 41(9): 1286~1292.
- 王玉丹,彭冠云,佟亚军,等. 2012. 影响同步辐射 X 射线螺旋显微 CT 的若干因素研究[J]. 物理学报, 61(5): 174~182.
- 应舒,高长胜,黄家青. 2010. 新吹填淤泥地基浅层处理试验研究[J]. 岩土工程学报, 32(12): 1956~1960.
- 张明,杨永生. 2011. 吹填淤泥土的固结特性研究[J]. 工程勘察, (9): 19~24.

新书推荐

长江三峡库区地质灾害成因与评价研究

刘传正 刘艳辉 温铭生 李铁锋 连建发 秦胜伍 著

内容提要

本书比较系统地反映了长江三峡库区地质灾害成因与评价研究 3 个空间尺度进展。一是大尺度范围,即整个三峡库区涉及的 19 个县(区)行政管辖范围内的地质灾害调查评价,重点是区域地质灾害评价预警的“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”递进分析方法与应用。二是中尺度范围,即长江三峡江段复杂斜坡(滑坡)的成因研究,提出了古川江与古峡江在瞿塘峡段东西贯通形成统一的长江所伴随的溯源侵蚀、“水锯”下切和地下暗河或岩溶洞穴垮塌等 3 种异常地质作用,是长江三峡江段复杂斜坡(滑坡)形成的主因。这种复杂斜坡是一种“基岩”、古垮塌体、古崩滑体、现代崩滑体和第四纪沉积体等几种或全部的“复合堆积体”。三是小尺度范围,即三峡库区巴东县新城区所在的扇形大斜坡的地质特征、成因和开发利用问题。论证提出了巴东斜坡是一个“复杂斜坡系统”,是在单斜山背景下持续经受长江快速侵蚀下切导致侧向卸荷与滑移作用的产物,即“重力成因论”,并以巴东斜坡区为例初步建立了区域工程地质环境质量评价-地质环境功能区划-工程容量评价-地质灾害防治风险管理

管理的四阶段关联的研究体系。

本书可供从事工程地质、环境地质、灾害地质等方面科研人员、工程技术人员和政府官员阅读,也可供高等院校师生参考。

