

文章编号: 1000-7598-(2014)06-1634-07

吹填软土蠕变过程中颗粒与孔隙演化特征分析

杨爱武^{1,2}, 孔令伟¹, 张先伟¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071; 2.天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300381)

摘 要: 软土一般具有蠕变特性, 蠕变在微观上表现为土颗粒与孔隙的变化。为了解长期变形内在机制, 对天津滨海吹填软土原状土与重塑土进行了固结不排水三轴蠕变试验。在围压为 75 kPa、偏应力为 10 kPa 情况下开展多组平行试验, 选取蠕变过程中多个时间点的试样进行微观结构测试, 提取了颗粒与孔隙变化参数, 研究蠕变过程中微结构变化规律。研究结果表明: 在文中所受荷载条件长期作用下, 颗粒与孔隙定向性明显; 平均孔径及平均孔隙体积呈逐渐减小趋势; 结构性原状土比表面积逐渐增大, 重塑土则呈减小趋势; 结构性原状土颗粒与孔隙分数维呈减小趋势, 但重塑土呈相反趋势。

关键词: 吹填软土; 蠕变; 颗粒; 孔隙; 定向频率; 演化

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Analysis of evolution of particles and pores in creep process of dredger fill soft soil

YANG Ai-wu^{1,2}, KONG Ling-wei¹, ZHANG Xian-wei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300381, China)

Abstract: Soft soil generally has creep characteristics, the creep on microstructure shows the changes of soil particles and pores. In order to understand internal mechanism of the long-term deformation, a consolidated undrained triaxial creep test about undisturbed and remolded of the Tianjin Binhai dredger fill is carried out. At the same time, multi-group parallel tests under the confining pressure of 75 kPa and deviatoric stress of 10 kPa are also carried out. Through selected samples of different times in the process of creep to take microstructure test, the changed parameters of particles and pores are extracted to study the variation characteristics of microstructure in the process of creep. The results show that orientation of particles and pores is significant under the long-term loading conditions; the average pore diameter and average pore volume are gradually decreased; the specific surface area of structural undisturbed soil gradually increases; but the remolded soil is in the opposite trend; structural undisturbed soil particles and pore fractal dimension are decreasing, but the remolded soil shows the opposite trend.

Key words: dredger fill soft soil; creep; particles; pore; directional frequency; evolution

1 前 言

软土一般具有蠕变特性与结构性。蠕变宏观特性由其内部微观结构的调整来实现, 即微观结构对土的工程性质变化起着决定性的影响。近年来, 许多学者对软土微观结构与其工程特性之间的关系进行了大量研究, 如雷华阳^[1]、Martin 等^[2]、胡瑞林等^[3]、孔令荣等^[4]、张季如等^[5]对软土固结前后微观结构特性变化进行了研究, 初步揭示了软土宏观变形与微结构特征之间的关系。孟庆山等^[6]通过试验研究了动力排水固结前、后软土微观结构参数变化及其分形维数特征。周翠英等^[7]对软土破裂面的微观结构特性与其强度的关系进行了研究。Matsuo

等^[8]从微观结构方面对黏土的强度和变形进行了研究。李军霞等^[9]对不同排水条件下软土蠕变特性及其微观孔隙变化进行了研究。张先伟等^[10]对一维压缩蠕变前、后软土微观结构特性进行了研究。可见, 目前的研究多集中在固结与剪切前、后微观结构变化, 对于蠕变微观机制研究也多是在蠕变前、后, 蠕变过程中微观结构变化特征研究还有很多工作要做。因此, 深入研究软土蠕变过程中结构演化特征, 对于认识软土蠕变机制具有重要的理论意义。

2 试验方案及蠕变特性

本文以天津滨海新区吹填软土为研究对象, 开展了不固结不排水蠕变试验, 试验最大围压为 100 kPa。

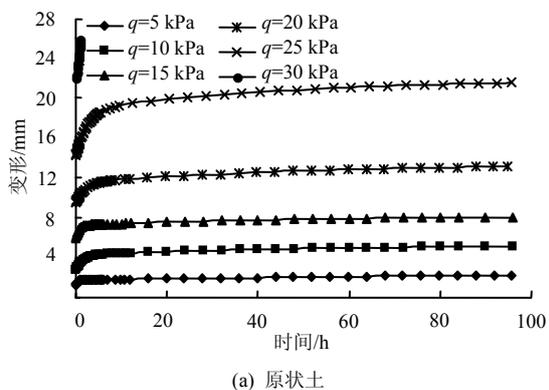
收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41372291, No.51179186, No.41102200)。

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理及土体微观结构的研究工作。E-mail: tulilab@163.com

试验仪器采用 TSS10 土体三轴蠕变试验仪。试验样品为原状样及其相应的重塑样，取自天津滨海新区临港工业区经过真空预压处理的吹填场地，其基本性质如表 1 所示。蠕变试验的蠕变变形标准为 48 h 试样变形量小于 0.01 mm，当土样出现快速脆性破坏后，试验结束。在三轴蠕变仪（TSS10）上试验的同时，在自行研制的应力控制式多接头三轴试验仪上进行相同的试验，试验过程不排水。本文主要对围压 $\sigma_3 = 75 \text{ kPa}$ 、偏应力 $q=10 \text{ kPa}$ 的情况下进行多组蠕变平行试验，在试验进行到 1、2、4、8、12、24、48、96 h 后停止试验，取样品进行微观结构及比表面积测试。蠕变破坏后的样品亦做微观结构及比表面积测试。取样示意图如图 1 所示，图中曲线为分级加载时变形随时间变化量，曲线上的实心圆点代表取样点。为了真实反映吹填土的结构形态，采用真空冷冻升华干燥法制样，避免了干燥过程对土样结构带来的影响。试验仪器为德国生产的 LEO 场发射扫描电子显微镜，定量分析采用仪器自配的 Leica Qwin5000 图像处理系统。

对比图 2 中的原状土与重塑土蠕变曲线可知：在同一条件下（围压与偏应力相同），原状土的蠕变变形量小于重塑土的蠕变变形量；原状土衰减蠕变变形对应的应力值大于重塑土，即原状土的变形刚度大于重塑土，究其原因原状土具有明显的结构性，而重塑土基本上不具有（或结构性弱）结构性。



土结构的存在，使其抵抗变形能力明显提高。

图 3 表明，应变率时间对数基本为直线，随着围压的增大，应变率逐渐减小；随着偏压的增大，应变率逐渐增大。原状土在小于其结构屈服应力 ($\sigma_r \approx 15 \text{ kPa}$) 的偏应力作用下，应变率时间对数曲线较后面几级陡峭，随着偏应力的均匀增加，陡峭的直线逐渐变得平缓。最终变为互相平行的直线，其斜率与重塑土基本一致。该现象也与土的结构性有关。

表 1 吹填软土物理力学指标
Table 1 Basic physico-mechanical parameters of soft dredger fill soil

含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	压缩指数 C_c/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
50.6	1.68	1.474	45.8	24.4	21.4	1.230	2 012

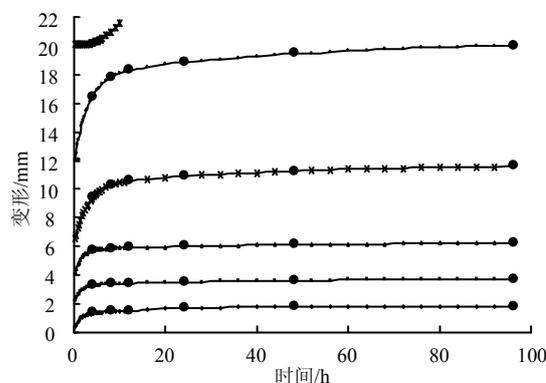


图 1 蠕变过程取样示意图

Fig.1 Schematic diagram in creep process

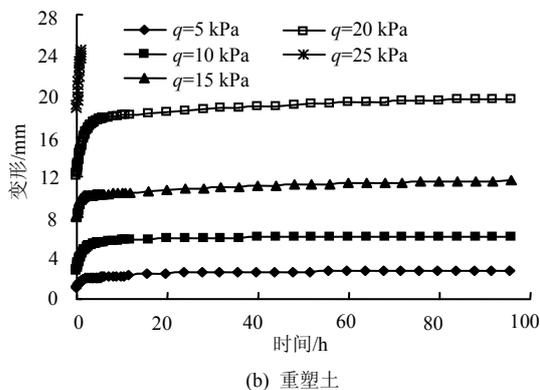


图 2 75 kPa 围压下蠕变变形随时间变化曲线

Fig.2 Curves of creep deformation changing with time under the confining pressure of 75 kPa

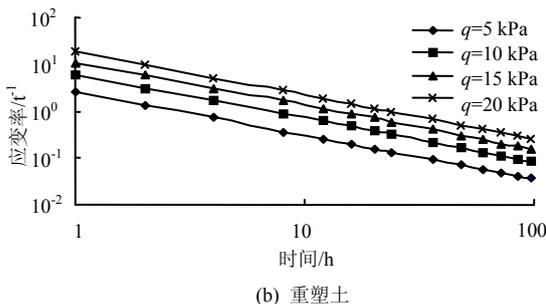
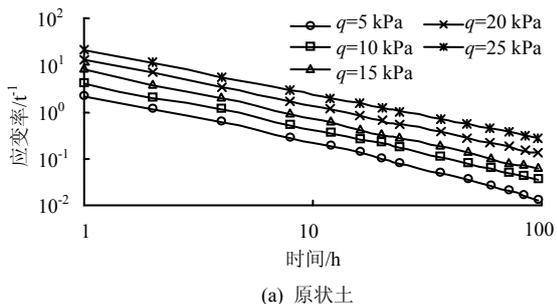


图 3 75 kPa 应变率-时间对数曲线

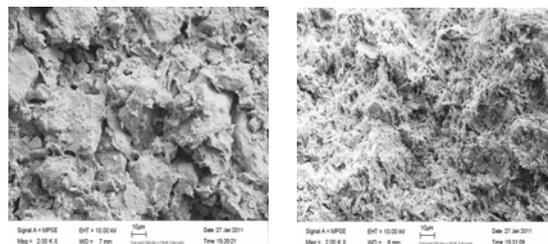
Fig.3 Strain rate-time logarithm curves of confining pressure of 75 kPa

3 蠕变过程中颗粒(孔隙)定向性分析

图 4(a)、(b)分别为天津原状与重塑吹填土的 SEM 照片, 图 5 为原状土与重塑土在 $\sigma_3=75$ kPa、 $q=10$ kPa 下蠕变过程中的典型样品(2、24、96 h、破坏后) SEM 照片。

从图 4、5 可以看出, 原状吹填软土自然沉积时间不长, 经过短暂的真空预压处理后, 虽然形成了一定的结构, 但结构疏松, 在后期受压作用下, 特别是受剪力的长时间作用下, 结构发生变动, 由疏松的分散结构逐渐演变为絮凝结构, 使颗粒产生不同程度的定向排列, 并逐渐密实。具有松散结构的土体, 其蠕变特性明显, 这也从本质揭示了吹填软土蠕变特性明显的原因。重塑土由于彻底扰动, 刚开始无结构性, 即土体均匀定向性差, 一受力颗粒就会慢慢转向受合力方向, 所以在整个蠕变过程中,

表现出其定向性趋势比原状土明显。蠕变破坏后, 两种土体微结构形态相似。主要是原状土出现大量结构破坏, 而重塑土在受力的过程中也伴随着结构的形成, 到蠕变破坏时, 也就是形成有一定结构的土体其结构又大量破坏, 因此, 表现出与原状土破坏后相似的微结构形态。



(a) 原状土 (b) 重塑土

图 4 蠕变前土体微观结构图
Fig.4 Microscopic structures pictures before creep

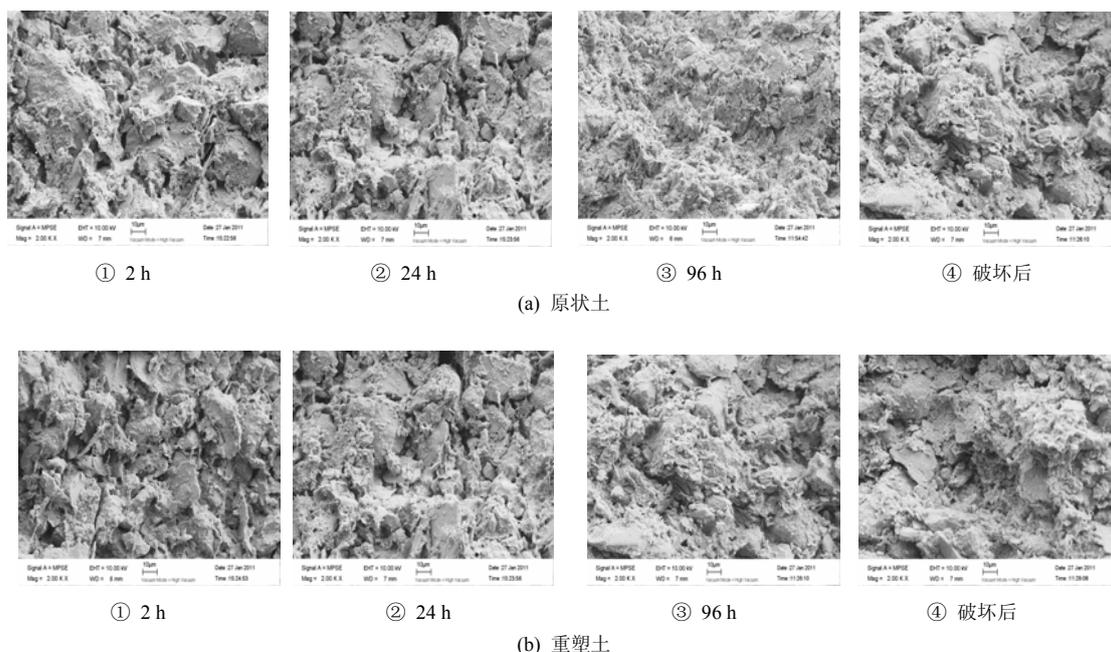


图 5 蠕变过程中微观结构图
Fig.5 Microstructures in creep process

对微观图片(图 4、5)进行了定量化分析, 不同方位角($a/^\circ$)频率分布($Fi(a)/\%$)随时间变化成果如图 6、7。

从定向频率分布图分析来看, 蠕变开始时, 原状土定向性超过重塑土。在本文研究的恒定力的作用下, 随着时间的推移, 原状土定向性有增加的趋势, 但不明显。而重塑土随着时间的推移, 定向性明显增加, 超过原状土。总体来说, 发生蠕变破坏后, 孔隙与颗粒的定向性变化较为复杂, 孔隙定向角无明显优势, 说明孔隙无明显定向性。土样破坏

后多呈“腰鼓状”, 因此, 在这种应力条件下, 颗粒定向变化规律不明显。

总之, 土结构的存在对于颗粒的定向变化影响较大。蠕变开始时, 原状样的定向度高于重塑土样, 变化也较缓。重塑土由于彻底扰动后失去原有结构, 在应力作用下, 颗粒间的联结受到破坏, 颗粒取向是随机的, 但稍加一小的应力水平, 颗粒就在压力作用下调整位置, 使其扁平表面向合压力方向的平面转动, 即使土样中颗粒定向度增加。随后由于颗粒表面平行度的增加, 颗粒间斥力也随之增加,

所以定向度将随着应力的增加而越来越缓慢地增加。对原状样来说，土结构的存在，在外力作用下

其颗粒位置的调整要难得多，定向度的增加就更缓。

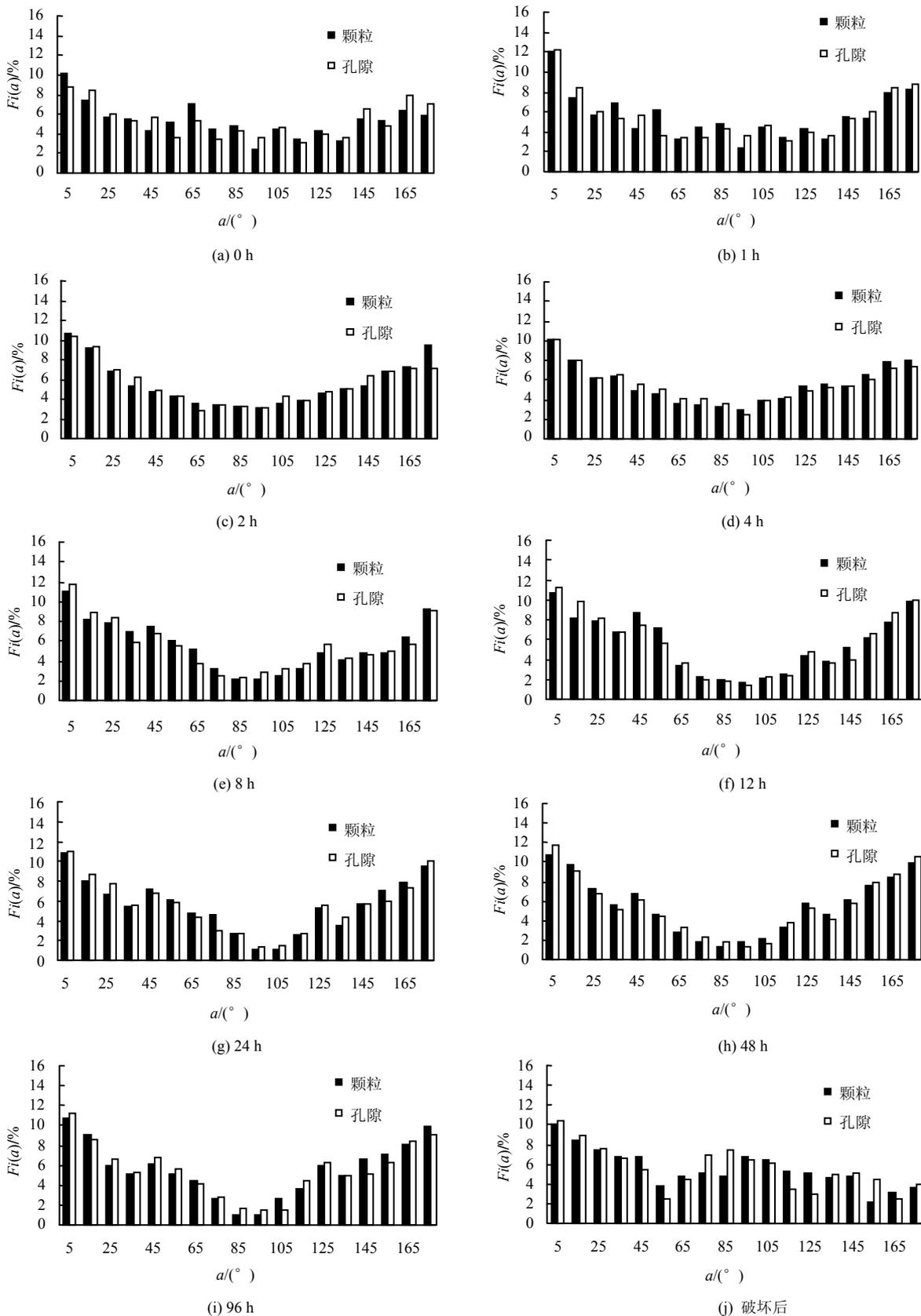


图 6 原状土蠕变过程中定向频率分布图

Fig.6 Directional frequency distributions of undisturbed soil in creep process

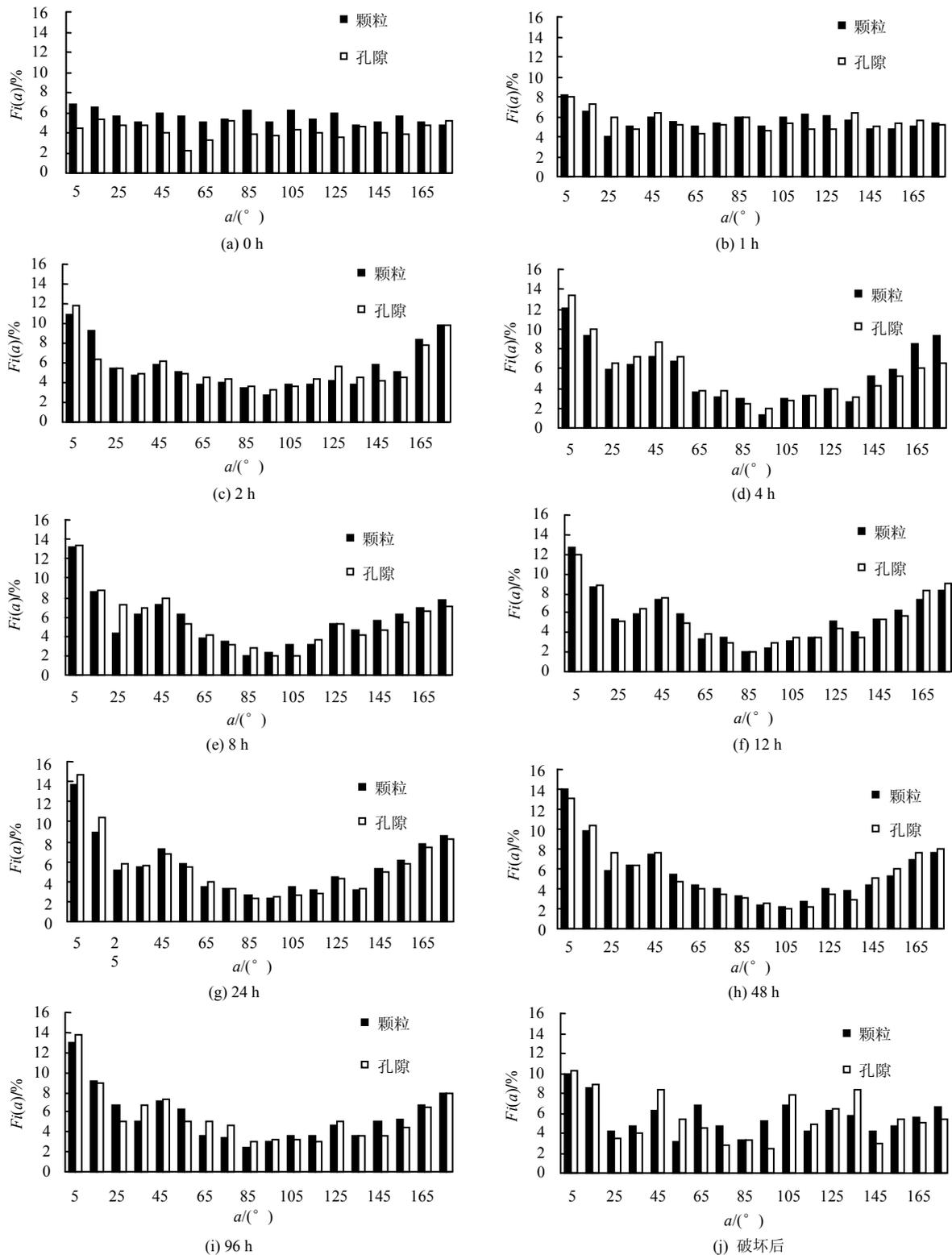


图7 重塑土蠕变过程中定向频率分布图

Fig.7 Directional frequency distribution diagrams of undisturbed soil in creep process

4 蠕变过程中颗粒(孔隙)定量分析

颗粒粒径分布、比表面积等分析结果如表2所示,在受恒定偏应力作用下,随着时间的增长,原状土总体上颗粒有变小趋势,比表面积增大;重塑

土颗粒则呈相反趋势。这是因为在蠕变过程中,原状土伴随着颗粒之间的靠拢、滑移、镶嵌的同时,还伴随着大量结构的破损,最终是颗粒破损数量大于颗粒聚合的数量,从而比表面积呈增加趋势;而重塑土主要是一些碎小团粒在外力作用下凝聚成大

聚合体，随着时间的增长，聚合体数量大为增加，因而颗粒比表面积呈减小趋势。

孔隙的尺寸、孔径分布等分析结果如表 3 所示，破坏前，在本文恒定力的作用下，随着时间的增长，原状土（重塑土）孔径逐渐减小，平均孔隙体积也逐渐减小。破坏后，两种状态的土平均孔径以及平均孔隙体积等都略有增大。这是因为在吹填土蠕变过程中，颗粒之间的靠拢、滑移、镶嵌，造成大孔隙逐渐被小孔隙取代，形成数量较多的小孔隙。可认为蠕变过程中孔隙变化遵循孔隙匀化原理，也可称为大孔隙优先改变原理，即体积收缩过程中大孔隙减少多，小孔隙变化小，孔隙分布逐步均匀化。

表 2 蠕变过程中颗粒大小及比表面积统计表
Table 2 Particle size and specific surface area in creep process

Table with 7 columns: 时间/h, 土类, 粒径(μm)分布/%, 颗粒比表面积/(m²/g). Rows include data for 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 96 hours for both original and remolded soil, plus data after destruction.

表 3 蠕变过程中孔径变化统计表
Table 3 Aperture changed in creep process

Table with 8 columns: 时间/h, 土类, 粒径(μm)分布/%, 平均孔径/nm, 平均孔隙体积/(cm³/g). Rows include data for 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 96 hours for both original and remolded soil, plus data after destruction.

5 蠕变过程中孔隙与颗粒分形维研究

分形维数越大，结构越复杂。本文提取的分形特征参数有两个：孔隙分布分维 D_{bd} 和颗粒分布分维 D_{pd} ，采用 Sandbox 方法^[11]求取，即以边长为 ϵ 的正方形将图像分割成规格为 $(L/\epsilon) \times (L/\epsilon)$ 的正交型格网，设格网中含有孔隙（或颗粒）的格子总数为 $N(\epsilon)$ ，那么如果改变 ϵ ，使其在一定值域范围内变化，则将得到相应的序列值 $N(\epsilon_1)$ 、 $N(\epsilon_2)$ 、 $N(\epsilon_3)$ ，那么，孔隙（或颗粒）分布分维按下式计算：

$$D_d = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon}。$$

计算结果统计如表 4 所示。

表 4 孔隙与颗粒分形维一览表
Table 4 Porosities and particle fractional dimensions

Table with 5 columns: 时间/h, 原状土 (孔隙分维, 颗粒分维), 重塑土 (孔隙分维, 颗粒分维). Rows include data for 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 96 hours for both original and remolded soil, plus data after destruction.

表 4 数据表明：随着时间地推移，结构性原状土孔隙与颗粒分形维数呈减小趋势，破坏后分形维数维明显增大，甚至超过初始值；重塑土孔隙与颗粒分形维数与时间呈正比关系，破坏后反而减小很多。上表数据还表明，结构性原状土与重塑土孔隙和颗粒分形维数变化速率开始阶段大，之后逐渐趋于稳定。上述现象与土的结构性有关，与结构性土蠕变特性相吻合。

6 结论与建议

(1) 吹填土富含黏粒与黏土矿物、大孔隙比、高压缩性的特征以及自固沉积形成的分散性结构类型是引起具有蠕变特性的根本原因，其不排水蠕变变形呈非线性特性。

(2) 土体蠕变内在表现为颗粒与孔隙的变化、结构的存在，使原状土与重塑土蠕变过程中颗粒与孔隙变化特征区别明显。吹填土在蠕变作用下，颗粒与孔隙都有定向性趋势，但扰动后的重塑土这一现象更为明显；平均孔径及平均孔隙体积均呈逐渐

减小趋势；原状土小尺寸粒径呈增加趋势，比表面积逐渐增大，重塑土则呈减小趋势；原状土颗粒与孔隙分形维数都呈减小趋势，而重塑土则呈相反趋势。

参 考 文 献

- [1] 雷华阳. 饱和软黏土固结变形的微结构效应[J]. 水利学报, 2004, 35(4): 91—96.
LEI Hua-yang. Micro-structure effect of consolidation deformation of saturated soft clay[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, 35(4): 91—96.
- [2] MARTIN J C, LADD C C. Fabric of consolidated kaolinite[J]. **Clay and Clay Mineral**, 1975, 23(1): 17—25.
- [3] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [4] 孔令荣, 黄宏伟, HICHER P Y, 等. 上海淤泥质黏土微结构特性及固结过程中的结构变化研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3287—3292.
KONG Ling-rong, HUANG Hong-wei, HICHER P Y, et al. Structural changes in the Shanghai silty clay microstructural characteristics and consolidation process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3287—3292.
- [5] 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 Ji-ru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. Evolution of soft clay under consolidation microscopic pore structure and its fractal [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(4): 394—400.
- [6] 孟庆山, 杨超, 许孝祖, 等. 动力排水固结前后软土围观结构分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1759—1763.
MENG Qing-shan, YANG Chao, XU Xiao-zu, et al. Soil microstructure analysis before and after the dynamic drainage consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1759—1763.
- [7] 周翠英, 牟春梅. 软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1136—1141.
ZHOU Cui-ying, MU Chun-mei. Microstructure characteristics and strength of the relationship of the soft soil rupture surface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(10): 1136—1141.
- [8] MATSUO S, KAMON M. Microscopic study on deformation and strength of clays[C]//Proceedings of 9th ICSMFE. Tokyo: the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, 1: 201—204.
- [9] 李军霞, 王常明, 张先伟. 不同排水条件下软土蠕变特性与微观孔隙变化[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3493—3498.
LI Jun-xia, WANG Chang-ming, ZHANG Xian-wei. Soft soil creep characteristics under different drainage conditions and micropore changes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3493—3498.
- [10] 张先伟, 王常明. 一维压缩蠕变前后软土的微观结构变化[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1688—1694.
ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. One-dimensional compression creep around the soft soil micro structural changes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1688—1694.
- [11] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

建筑地基基础及地下室结构设计疑难处理与实例

建筑科学类, 李国胜著, 小 16 开, 320 页, 平装, 定价: 46 元, 2014 年 2 月出版, 书号: 9787112157969

本书以提问解答方式编写, 内容包括: 设计的重要概念、地基基础设计的基本规定、设计中遇到的一些突出问题、天然地基基础设计、复合地基设计、桩基础设计、地下室结构设计、其他等共 8 章, 并附有大量工程实例。

读者对象: 可供建筑结构设计人员参照应用, 也可供建筑结构设计施工图文件审查、施工、监理等工作人员和大专院校土建专业师生参考。

摘自中国建筑书店