DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.005

上海淤泥质黏土固结蠕变过程中结合水与微结构的变化

李 硕[1]，王常明[1]，吴 谦[2]，张志敏[1]，张兆楠[3]

（1. 吉林大学 建设工程学院，吉林 长春 130026；2. 长安大学 公路学院，陕西 西安 710064；3. 核工业二七二地质大队，江苏 南京 210003）

摘 要：为深入了解软土蠕变机制，开展了上海淤泥质黏土的一维固结蠕变试验、结合水测试试验和扫描电镜（SEM）试验，定量分析了固结蠕变过程中结合水和微结构的分阶段变化规律。结果表明：$p<\sigma_k$时主要是自由水的排出，宏观表现为衰减蠕变过程；$p>\sigma_k$后，渗透结合水逐渐转化为自由水排出，蠕变变形和等速蠕变率明显增大。蠕变过程由渗透结合水主导，随着结合水排出土的结构逐渐固化，含水率随荷载增加呈指数型衰减，存在固结−蠕变耦合效应。松散的骨架−絮凝结构演变为紧密的团聚−絮凝结构，颗粒在经历了蠕变调整之后定向性降低，小孔隙数量大量增加，孔径<1 μm 的小孔隙组占优。存在荷载、结合水与颗粒的响应机制，其结果可以较好地解释工程现象。

关 键 词：软土；固结蠕变；结合水；微结构；蠕变机制

中图分类号：TU 411 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2017) 10－2809－08

Variations of bound water and microstructure in consolidation-creep process of Shanghai mucky clay

LI Shuo[1], WANG Chang-ming[1], WU Qian[2], ZHANG Zhi-min[1], ZHANG Zhao-nan[3]

（1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;
2. Highway College, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. No.272 Geological Party of Nuclear Industry, Nanjing, Jiangsu 210003, China）

Abstract: To understand creep mechanism of soft clay, one-dimensional consolidation creep tests, bound water measurement tests, and scanning electron microscope (SEM) tests on Shanghai mucky clay are conducted. The variations of bound water and microstructure in the process of consolidation-creep are quantitatively analyzed. The results show that, free water discharged under condition of $p<\sigma_k$ during decaying creep process. The osmotic bound water is changed into free water to excrete under condition of $p>\sigma_k$. Meanwhile, the creep strain and steady-state creep strain rate increase significantly. The creep process is dominated by osmotic bound water. The microstructure is solidified gradually with bound water discharging and the water content decreases exponentially with increasing loads. Deformation of soft clay is caused by consolidation-creep coupling effects. The original loose skeleton-flocculated structure translates into dense reunion-flocculated structure. The directionality of particles decreases under the long-term creep adjustment. The quantity of fine pores increases massively after creep tests and the pores with diameters less than 1 μm in dominancy. The response mechanism among loads, bound water and particles can explain engineering phenomenon well.

Keywords: soft soil; consolidation-creep; bound water; microstructure; creep mechanism

1 引 言

由于其特殊的沉积环境，沿海软土存在显著的蠕变特性，即在超静孔隙水压力消散后，由于土颗粒表面结合水膜的变化及颗粒重新排列还会产生缓慢变形。工程上表现为工后沉降问题。软土蠕变的研究可从宏观、细观和微观 3 个角度开展。宏观层次的研究：从唯象理论的角度，以室内蠕变试验为基础，通过试验曲线分析蠕变特性。20 世纪 90 年代以来，针对各地软土的蠕变试验纷纷开展，建立

收稿日期：2017-05-08
基金项目：国家自然科学基金项目(No. 41572257)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572257).
第一作者简介：李硕，男，1992 年生，博士研究生，主要从事软土蠕变和结合水方面的研究工作。E-mail: 1607229007@qq.com
通讯作者：王常明，男，1966 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事岩土力学方面的教学和研究工作。E-mail: wangcm@jlu.edu.cn

了各种蠕变模型，使蠕变研究有了长足发展[1−3]。但这类研究无法解释蠕变的物理本质，单纯从宏观现象推导的模型很难具有普适性。细观层次的研究：从蠕变的物质基础[4]出发，主要研究土中结合水的行为[5]及矿物成分、有机质等对蠕变的影响。微观层次的研究：以位错理论为基础，通过观察软土微结构的变化[6−9]，分析结构损伤与破坏的物理本质[10]。微观层次的研究以定性研究居多，随着结构定量化技术水平的提高，确立微观分析基础上的本构关系将是未来研究的热点。

结合水类型和含量的变化均与蠕变息息相关，从结合水和微结构两个角度解释蠕变规律，对指导工程实践和了解蠕变本质均有着重要意义。现有研究对蠕变过程中结合水的行为及量化涉及较少，微结构定量化程度较低。本文以上海软土为例，定量分析了一维固结蠕变试验前、后微结构的变化规律，结合蠕变特性和结合水的变化情况，旨在探讨固结−蠕变机制。

2 试验方案及蠕变特性

2.1 试验方案

试验土样为上海第四系海相沉积淤泥质粉质黏土，灰黑色，细腻，流塑状态，其物理力学性质见表 1。试样具有典型软土的高含水率、大孔隙比等特性。

通过颗分试验求得土体的粒度成分为：砂粒（>0.075 mm）含量 3.5%、粉粒（0.075～0.005 mm）含量 64.5%、黏粒（<0.005 mm）含量 32%。较多的黏粒是土中结合水含量较高的原因。采用 X 射线衍射分析法测定了土样的矿物成分，土样包含的黏土矿物主要有伊利石、高岭石和绿泥石，其中伊利石含量高达 39%，相对于其他黏土矿物，伊利石亲水性相对较强，造成了软土结合水含量高、蠕变特性显著。

表 1 试样物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil sample

埋深 H/m	天然密度 ρ/(g/cm^3)	土粒相对密度 G_s	孔隙比 e	含水率 w/%	液限 w_L/%	塑限 w_P/%	塑性指数 I_P	压缩系数 $\alpha_{1\text{-}2}$/MPa^{-1}	结构屈服应力 σ_k/kPa
7.0～7.5	1.74	2.65	1.25	47.0	35.21	21.43	13.78	0.62	100～150

2.1.1 高压固结试验和固结蠕变试验

试验仪器为杠杆式高压固结仪，试样始终处在饱水状态，双面排水，采用分级加荷的方式：12.5→25→50→100→200→400→800→1 600 kPa。高压固结试验每级荷载持续 24 h，利用压缩曲线求取压缩系数和结构屈服应力。对于固结蠕变试验，每级荷载作用下试样变形速率小于 0.01 mm/d 时，视为变形达到稳定，此时可以施加下一级荷载[1]。

传统土力学采用 Casagrande 法求取土体的先期固结压力，对于天然沉积的结构性土体，用此法求取的先期固结压力实际上是土体的结构屈服应力 σ_k [11]。通过高压固结试验得到试样的 e-lg$p$ 曲线，从曲线曲率半径最小点分别作曲线的切线和平行于横轴的水平线，两条直线夹角的角平分线与曲线后部直线段的延长线有一交点，交点所对应固结压力 p 的数值即等于结构屈服应力 σ_k。多次试验得到试样的结构屈服应力为 100～150 kPa。

2.1.2 微观结构试验

利用扫描电子显微镜（SEM）对原状样和试验后土样进行微结构研究，借助图像分析软件 IPP 对 SEM 照片进行数字图像处理，获得微结构参数。SEM 样品的制备和微结构测试方法参见文献[6]。

2.1.3 结合水测试试验

由于黏土矿物表面的结合水在 200～250 ℃将完全脱去[12]，因此，将上海软土原状样和固结蠕变试验后试样在 250 ℃下烘至恒重，并将原状样在 250 ℃下烘干失水计算所得的含水率定义为绝对含水率[12]记为 w_a，以区别现行土工试验方法标准中根据土样在 105 ℃烘干失水所得的含水率。依照同样方法分别测得液限绝对含水率和塑限绝对含水率，分别记为 w_{aL} 和 w_{aP}。实测 w_a、w_{aL} 和 w_{aP} 的值分别为 50.12%、38.2%和 24.23%。

采用容量瓶法[13]测定试样的吸附结合水含量，基本假设为渗透结合水和自由水的平均密度等于 1.0 g/cm^3，而吸附结合水的平均密度为 1.3 g/cm^3。干黏土颗粒吸附瓶中的液态水并将其转化为颗粒表面的吸附结合水，瓶中水的体积随之减小。将风干试样过 0.1 mm 筛，在 250 ℃下烘干 8 h 以完全脱去黏土表面的结合水，置入干燥器中冷却，取干黏土 30 g 左右放入容量瓶中，容量瓶容积为 255 mL，瓶颈标有刻度，分度值 0.05 mL。将定量蒸馏水 V_0 注入瓶中，摇匀排除气泡，记录初始液面高度。此后定时记录容量瓶内液面变化。为保证试样不受外界环境影响，试验在恒温水浴中进行，水浴温度为

25 ℃。设置两组平行试验和“瓶加水”的蒸发校正。

2.2　蠕变特性

图1为不同固结压力p作用下的应变−时间关系曲线。加载的瞬时有一定量的瞬时应变，随即进入衰减蠕变阶段。p 较小时，蠕变很快稳定，应变最终趋于定值，变形近似为弹性变形。p 超过结构屈服应力σ_k后，出现等速蠕变阶段，蠕变变形量陡增，此后随着 p 的增长等速蠕变率逐渐减小并趋于稳定。曲线没有急剧流动阶段。普遍认为，σ_k为土的结构强度，荷载超过σ_k则初始结构产生破坏[11]，从蠕变曲线来看确实存在分阶段特征。

各级荷载作用下软土的 *e-t* 曲线（见图 2）由 3 段组成：前段的抛物线、中段的斜直线和尾部的平缓直线。据 Casagrande 法，中段斜直线和尾部平缓直线的交点即为主固结和次固结的分界点，而次固结阶段曲线斜率的大小即为次固结系数 C_a。次固结系数越大，则相同时间内蠕变变形量越大。由 *e-t* 曲线确定各级荷载下主固结的完成时间为 60～200 min。

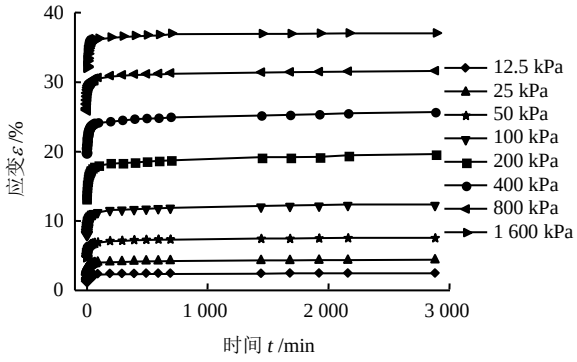


图 1　固结蠕变试验应变−时间关系曲线

Fig.1　Strain-time curves by consolidation-creep tests

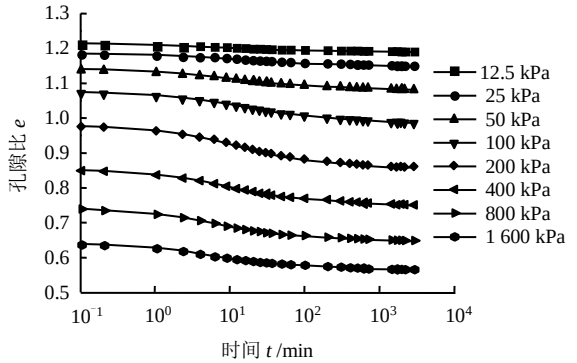


图 2　各级荷载的 *e-t* 曲线

Fig.2　*e-t* curves under various stepwise loads

e-t 曲线的形状与 p 的大小有密切关系：当 p 较小时，*e-t* 曲线近似为平缓直线，主、次固结没有明显的界限；$p>\sigma_k$时，曲线呈典型的反 S 形，主固结与次固结分界明显，蠕变变形大增，次固结系数也随之增大。然而当 p>800 kPa 后，又会产生主、次固结分界不明显的现象，结构趋于新的稳定，次固结系数有所减小，见图 3。

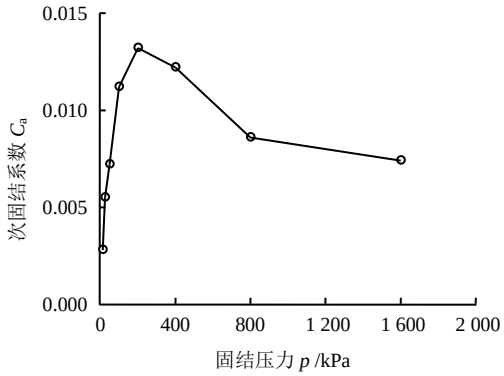


图 3　不同荷载下次固结系数的变化

Fig.3　Variation of secondary consolidation ratio under different loads

3　蠕变过程中结合水的变化

3.1　结合水含量测试与类型划分

蠕变性质与其物质组成密切相关，黏土矿物等固相颗粒通过表面电荷与孔隙水相互作用，在其表面形成结合水膜。结合水可分为吸附结合水与渗透结合水。吸附结合水依靠静电和氢键连结，被颗粒表面牢固吸附，黏滞性较高。渗透结合水位于吸附结合水层之外受范德华力作用，受外力时可从水膜较厚处向较薄处转移。结合水具有抗剪强度τ_f，其分布随距黏粒表面距离增加呈指数递减[14]。当受力超过τ_f，结合水便具有自由水的性质并参与渗流。蠕变既包括颗粒的位错也包括结合水膜的变化。

容量瓶法的理论依据是自由水转变为吸附结合水时，密度增大而体积减小。将质量为m_s的干土颗粒加入容量瓶中，注入V_0体积的蒸馏水，自由水转变为吸附结合水时，容量瓶中液体体积缩小量为ΔV，则吸附结合水含量w_g可由下式确定：

$$w_g=\frac{\rho_{we}\rho_{wt}}{\rho_{we}-\rho_{wt}}\frac{\Delta V}{m_s} \tag{1}$$

式中：ρ_{we}为吸附结合水密度，取 1.3 g/cm^3；ρ_{wt}为自由水密度，取 1.0 g/cm^3。

$$\Delta V=\frac{m_s}{\rho_s}+V_0-V_t-V_1 \tag{2}$$

式中：V_t为 t 时刻容量瓶液面读数；V_1为从开始到 t 时刻液体蒸发损失量。

图 4 为颗粒表面吸附结合水的形成过程，平均吸附结合水含量 w_g 高达 20.98%，这与李文平[15]所得黏土吸附结合水含量的经验公式 w_g =0.885w_p 较为接近。根据液塑限法确定渗透结合水的含量，即塑限是土中吸附结合水的最大含量；而液限是非自由水的含量，代表吸附结合水和渗透结合水含量之和[5]。据此可得试样渗透结合水含量 w_o =17.22%，孔隙中自由水的含量 w_f =11.92%。

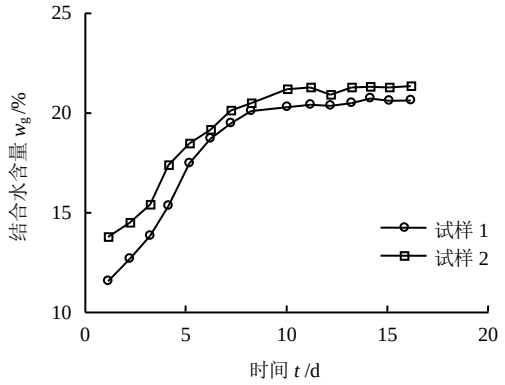


图 4 吸附结合水形成过程

Fig.4 Formation process of absorbed bound water

3.2 蠕变过程中结合水的变化情况

由于试样始终处在饱水状态，孔隙均为结合水和自由水所充填，在荷载作用下，孔隙不断缩小但颗粒的总体积 V_s 不变，排出的孔隙水由于失去颗粒作用均为自由水形式。基于这一客观事实，可依据孔隙比的变化情况对蠕变过程中各类型孔隙水的排出规律进行分析。首先进行临界孔隙比的求取：

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= e - e\frac{w_f m_s}{\rho_{wt} V_w} = e - \frac{w_f \rho_s}{\rho_{wt}} \\ e_2 &= e\frac{w_g m_s}{\rho_{we} V_w} = \frac{w_g \rho_s}{\rho_{we}} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：m_s 为颗粒总质量；V_w 为孔隙水总体积；e_1 为渗透结合水开始排出时的孔隙比；e_2 为吸附结合水开始排出时的孔隙比。

由此求得临界孔隙比 e_1 =0.93，e_2 =0.55。设蠕变过程中 t 时刻试样孔隙水含量为 w_t，由含水率计算公式得

$$w_t = \frac{m_w - m_{dt}}{m_s} = \frac{m_w - \rho_w (e - e_t) V_s}{\rho_s V_s} \tag{4}$$

式中：m_w 为试样所含孔隙水的总质量；m_{dt} 为 t 时刻试样已排出孔隙水的质量；e_t 为 t 时刻试样孔隙比；ρ_w 为被压缩孔隙中孔隙水的密度。由此可得

$$w_t = \begin{cases} w - \dfrac{\rho_{wt}(e - e_t)}{\rho_s} & (e_t > e_2) \\ w - \dfrac{\rho_{wt}(e - e_2)}{\rho_s} - \dfrac{\rho_{we}(e_2 - e_t)}{\rho_s} & (e_t < e_2) \end{cases} \tag{5}$$

由于黏滞性的不同，孔隙水排出的优先级为自由水>渗透结合水>吸附结合水。结合试样的 w_t-t 曲线（见图 5），可以分析蠕变过程中结合水的变化。

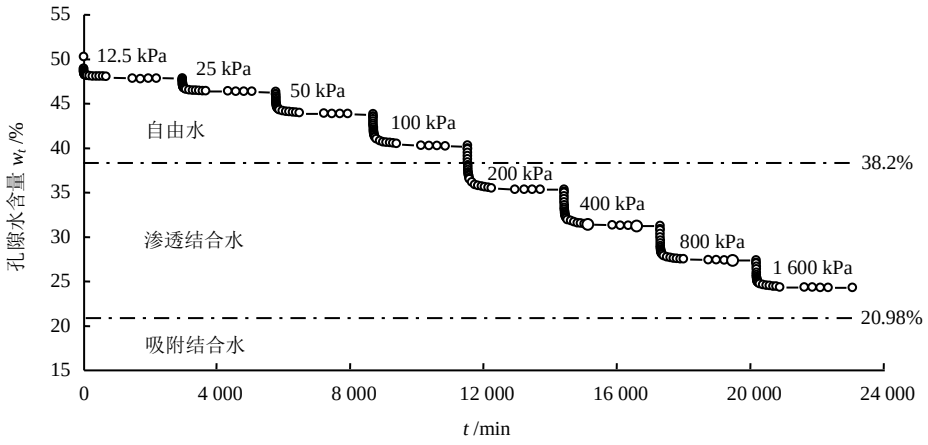


图 5 固结蠕变过程中孔隙水含量与时间关系曲线

Fig.5 Pore water content-time curves by consolidation creep test

由图可知，在前 4 级荷载作用下，孔隙水含量 w_t 减少 10.22%，孔隙中的自由水大部分被排出，只有少部分残留。由此可知，当 $p<\sigma_k$ 时，主要是自由水的排出过程，结合水含量基本未变，对应着变形集中于固结阶段，变形稳定快，蠕变变形量极小，应变–时间曲线呈衰减型。当 p 达到 200 kPa 时，初始结构破坏，w_t 的减少量逐渐达到并超过原状样中自由水含量，此时已有部分渗透结合水转化为自由水排出，结合水的行为开始活跃，蠕变变形明显增加，变形稳定时间延长，宏观表现为在衰减蠕变后出现等速蠕变过程。当 p 达到 400 kPa 后，w_t 的减少量已经超过试样所含自由水的总量，此时排出的

孔隙水绝大部分为渗透结合水，由于其黏滞性，排水过程比自由水更加缓慢。结合水的排出过程中，被克服 τ_f 的结合水承担孔隙水压力，颗粒和较高 τ_f 的结合水承担有效应力，如此交替使孔隙不断缩小，结合水膜不断变薄，w_t 的减少速率逐渐降低。直到试验结束，w_t 减小至 24.27%（实测绝对含水率 24.8%），仍大于吸附结合水含量 20.98%，这说明试验后仍有少部分渗透结合水未排出，那么紧密贴附于颗粒表面的吸附结合水层就更难以排出，整个试验过程吸附结合水含量未发生改变。由此确定在蠕变过程中起主导作用的是渗透结合水。

图 6 为各级荷载下变形稳定时的含水率 w_s 与固结压力 p 曲线。w_s 随 p 的增长呈指数型衰减，近似符合公式为

$$w_s = 22.278 + 23.562\exp(-0.004\,2p) \qquad (6)$$

当 $p<\sigma_k$ 时，随着 p 的增大，w_s 减小速率极快，因为主要是自由水排出，黏滞阻力较小，且开放性孔隙较多，自由水可轻易排出。当 p 达到 200 kPa 以后，排出的主要是渗透结合水，黏滞阻力大，且此时初始结构破坏，大孔隙和联通孔隙严重压缩导致排水困难，w_s 减小较慢。当 p 达到 800 kPa 后，曲线斜率再次下降，这是因为孔隙更加致密，结合水膜更薄，水化膜的楔入压力阻碍着颗粒的接近和结构密度的增加，且这种力随着颗粒的接近逐渐提高，阻碍结合水的排出。与常规固结相比，蠕变过程 w_s 随 p 的增长下降更为显著，特别是在 200 kPa 之后，此时也是渗透结合水大量排出的阶段。由于结合水的黏滞性，其排出需要较长的过程，蠕变过程会有大量结合水排出，因而软基工程中需考虑蠕变现象。

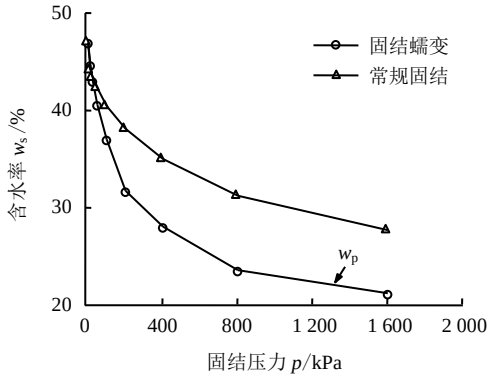


图 6　不同固结压力下变形稳定时试样的含水率

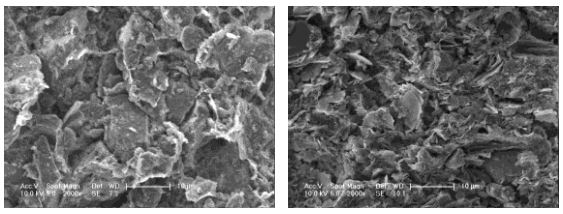
Fig.6　Water content of sample in a steady of deformation under different consolidation pressures

很多学者对固结–蠕变的耦合效应做了研究[3]。蠕变过程中仍然存在孔隙水排出引起的固结变形已成公论。从本次试验结果来看，当 p >200 kPa 后，固结过程中排出的孔隙水大部分是结合水，有结合水的排出，必定使结合水膜发生变化，颗粒也会产生位置调整，即固结阶段也存在蠕变变形，土体的变形是固结–蠕变耦合的结果。对于沿海软土来说，蠕变变形量大，特别是在较大荷载下，结合水转化为自由水排出，这种耦合现象就更加明显，蠕变变形对总变形的贡献更高。

4　蠕变试验前、后软土微结构的变化

4.1　微结构定性分析

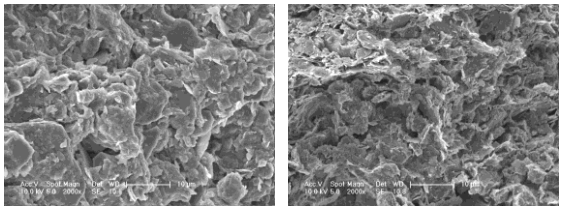
蠕变特性其实就是微观结构变化的宏观表现。图 7 为原状样放大 2 000 倍的 SEM 照片，其微结构属片状结构体系，颗粒以叠聚形式排列居多。水平剖面呈骨架状结构，片状粉粒和黏粒搭建起基本格架，孔隙大小分布不均；竖直剖面呈松散的絮凝状结构，孔隙较多且连通性较好。开放联通的小孔隙，为结合水的赋存提供了充足的空间。黏土矿物以伊利石为主，聚集成厚度不一的块体和絮状集合体。竖直剖面可见薄片状伊利石微晶把结构分割成许多小孔隙，伊利石容易堵塞孔隙和吼道，降低土的渗透性，其亲水性也使得结合水含量较高。存在少量花瓣状绿泥石。集合体以边–面接触方式为主，面–面接触方式为辅。图 8 为试样试验后的 SEM 照片，表现为水平剖面的团聚结构和竖直剖面紧密的絮凝状链状结构。部分集合体从试验前的边–面接触转变为面–面接触，大孔隙数量锐减，小孔隙密布。颗粒聚团现象明显，定向性增强，结构变得致密、均匀。



(a) 水平剖面　　(b) 竖直剖面

图 7　原状样 SEM 照片

Fig. 7　Scanning electron microscope photos of intact samples



(a) 水平剖面　　(b) 竖直剖面

图 8　蠕变试验后土样的 SEM 照片

Fig.8　Scanning electron microscope photos of samples after creep tests

4.2 微结构定量分析

4.2.1 孔径和粒径分布

孔（粒）径 d 是指孔隙或颗粒的等效直径，等价于与孔隙或颗粒面积相等的圆的直径。表 2 为蠕变试验前、后孔径和粒径分布。原状样孔径集中分布于 d<1 μm、d=1～2 μm、d=2～5 μm 的 3 个区间内，其数量达到孔隙总数量的 90%以上。与水平剖面相比，竖直剖面孔径 d<1 μm 的孔隙数量更多，而 d=1～2 μm 的孔隙数量更少，反映了结构的各向异性。蠕变试验后，表观孔隙总面积明显减少。d=2～5 μm、d=5～10 μm 的孔隙数量减少，而 d<1 μm 的小孔隙数量增加，孔径分布更为集中。这说明在蠕变过程中，颗粒位置调整使得颗粒间接触点增多，大孔隙逐渐被小孔隙取代，最后孔隙多为 d<1 μm 的小孔隙。

蠕变试验后，d =2～10 μm 的颗粒分布减少，而 d <1 μm、d =1～2 μm 的颗粒分布增加。小颗粒数量与小孔隙数量的增加总是呈正相关关系，颗粒在荷载的作用下改变其配位排列，小颗粒正好在大颗粒搭起的骨架中起连接作用，使得大孔隙被切割成若干更为细小的孔隙。颗粒之间更加紧密，因而在剖面上就显示为小颗粒数量增加。

表 2 蠕变前、后土样微结构的孔（粒）径分布

Table 2 Pore (particle) size distribution of microstructures of intact soft clay samples and samples after creep tests

试样	对象	剖面	孔（粒）径分布/%				
			<1 μm	1～2 μm	2～5 μm	5～10 μm	10～20 μm
原状样	孔隙	水平	29.7	39.6	23.4	7.2	0.0
		竖直	34.9	32.1	24.5	7.5	0.9
	颗粒	水平	28.7	22.3	30.9	16.0	2.1
		竖直	23.4	33.8	40.0	2.1	0.7
蠕变后	孔隙	水平	46.4	34.0	18.3	1.3	0.0
		竖直	45.6	32.5	18.3	3.6	0.0
	颗粒	水平	33.3	31.4	28.6	5.2	1.4
		竖直	31.0	34.8	31.7	2.4	0.0

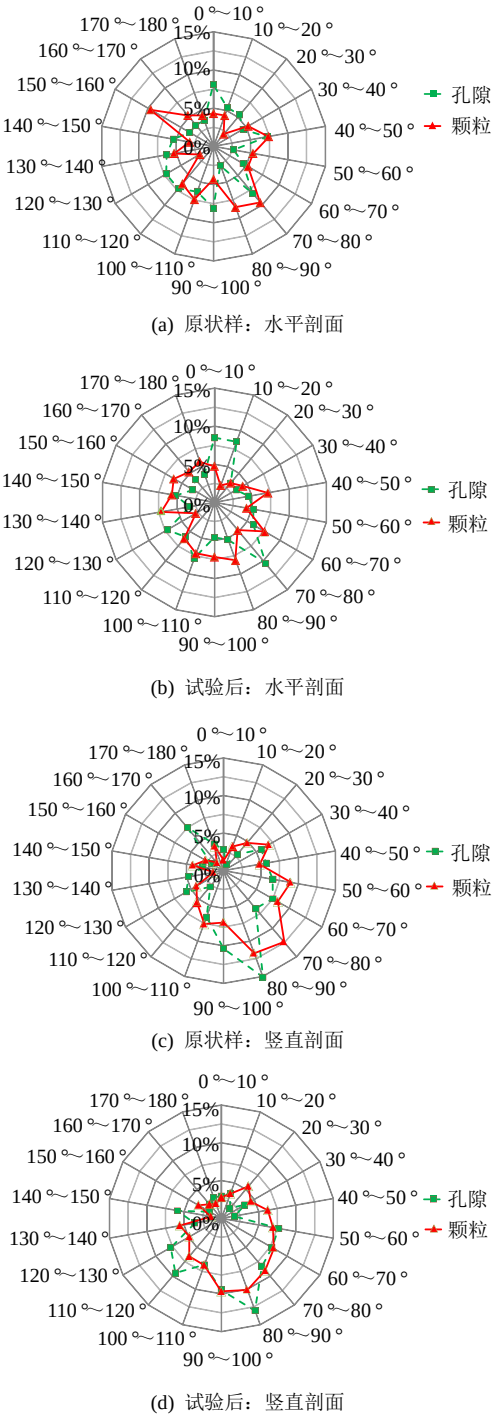
4.2.2 颗粒定向性分布规律

定向频率 $F_i(\alpha)$表示颗粒长轴在某一方向的分布百分比，将 180°划分成 n 个等分区间，每个区间的角度为 180°/n，$F_i(\alpha)$为在 0°～180°范围内第 i 个区间内颗粒或孔隙的定向频率，其计算式为

$$F_i(\alpha)=(n_i/N)\times 100\% \quad (7)$$

式中：n_i 为长轴方向在第 i 个区间内颗粒或孔隙的个数；N 为颗粒或孔隙的总数；文中 α =10°，i=18。

图 9 为蠕变前、后颗粒和孔隙的定向频率分布雷达图，原状样颗粒定向角在水平剖面广泛分布于 0°～20°、30°～120°、130°～180°，优势区间为 70°～90°、150°～160°区间；在竖直剖面广泛分布于 30°～120°，优势区间为 70°～90°区间。



(a) 原状样：水平剖面

(b) 试验后：水平剖面

(c) 原状样：竖直剖面

(d) 试验后：竖直剖面

图 9 原状样与蠕变试验后土样孔隙和颗粒定向频率分布

Fig. 9 Directionality frequency distribution of pore and particle of intact samples and samples after creep tests

蠕变试验后，水平剖面颗粒定向角在各区间分布较为平均；竖直剖面颗粒定向角的分布区间与原状样颗粒定向角的分布区间大致相同，所不同的是颗粒定向角并无明显的优势区间，而是较为均匀地

分布于 20 °～120 °区间。土样在长时间受压过程中，颗粒间的初始连接被破坏，内部结构不断调整再造，颗粒不断调整其位置去适应压力的变化，排列由宽松变得紧密。土体不断向更为稳定的承载形态过渡，颗粒定向程度与原状样相比有所减小，在各方向的分布更为均匀，土骨架的凌乱度增加，颗粒排列由有序趋向无序，方向角混乱，定向性降低。

5　讨　论

5.1　微结构与结合水的联系及量化

以往学者将软土蠕变机制归结为黏土颗粒间的错动，这仅是从物理因素方面解释蠕变行为，忽视了对颗粒表面水化层的研究。与结构水化层相比，渗透水化层由于其较弱的偶极–偶极连结，在压力和温度的提高下易受破坏，是影响蠕变的化学因素，也是蠕变的物质基础。微结构与结合水联系的纽带便是孔隙。上海软土原状样孔径 d<1 μm 和 d =1～2 μm 孔隙占总孔隙数量的 65%以上，这一尺寸的孔隙主要由结合水充填，而自由水多分布于 d=2～10 μm 的集合体间孔隙和架空孔隙中。d<1 μm 和 d=1～2 μm 孔隙由于颗粒间的电性引力，与大孔隙相比其稳定性更高，能承受较大荷载而不产生变化。荷载作用下，大孔隙优先改变，d=2～10 μm 的孔隙数量大幅减小，d<1 μm 和 d=1～2 μm 的孔隙数量逐渐增加，最后接近总孔隙数量的 80%，表明此时孔隙基本为结合水所充填。

当前微结构研究的各种手段均有其局限性。SEM 试验可以清晰地反映土体微结构、定量表征微米级孔隙，但对于纳米级孔隙[16]无法有效量测，且二维定量分析产生的误差在所难免；MIP 试验可以将孔隙量测尺度精确至 10^{-2} μm 量级，但无法显示孔隙形态特征，压汞过程存在的瓶颈效应，也使得其结果可能会夸大小孔隙的分布密度；蠕变过程中微结构和水膜的变化无法实时量测。因此，探讨微结构与结合水的联系需将 SEM 与 MIP 试验相结合，分级加载与分别加载相结合，从三维的孔隙分析深入，这也是今后研究结合水的有效手段。

5.2　荷载作用下微结构演化历程

高国瑞[17]将侧限压缩过程分为 3 个阶段，变形曲线与微结构的变化一一对应。将这种划分方法应用于蠕变试验可推演微结构演化过程。结合蠕变特性和结合水变化规律划定各阶段分界点，见图 10。$p<\sigma_k$ 时结构以弹性变形为主，少量连结点的破坏并不影响结构整体的稳定性；$p>\sigma_k$ 后主要为连结和孔隙变形，连结点大规模破坏，孔隙变形显著；p >800 kPa 为单元体变形阶段，孔隙的改变减缓。饱和黏土中颗粒多以结合水膜接触连接，颗粒连结大规模破坏阶段也是结合水大量排出、蠕变变形量较大的阶段，对应土体在 200、400 kPa 两级荷载下结构变化最剧烈。



(a) 线性变形($p<\sigma_k$)　(b) 连结和孔隙变形($p>\sigma_k$)　(c) 颗粒变形

图 10　蠕变过程中微结构的阶段性变化
Fig.10　Phase change of microstructure in consolidation-creep process

5.3　荷载–结合水–颗粒响应机制

土体作为一个完整的系统，内部各要素演化必然存在着相互关联和协同作用，变形是系统内部各要素共同作用的结果。因而需走出各个要素独立演变的误区，从系统协同作用的观点研究蠕变机制。

初始结构破坏前，孔隙中的自由水大量排出，结合水含量基本未发生变化。当 $p>\sigma_k$ 后，结构连结大规模破坏，渗透结合水转化为自由水排出。由于结合水的黏滞性，其排出和迁移过程缓慢，蠕变持续时间较长。经历了颗粒间连接点滑移、破坏再到颗粒本身的重新排列，颗粒定向性降低。孔隙更为细小，结合水膜变薄，连接力增强。蠕变过程是结合水分布均匀–不均匀–均匀的过程，也是颗粒接触从松散到紧密的过程。颗粒形态和排列方式的变化以及结合水的迁移，都是对荷载的一种响应，其目的是使结构更加稳定。

6　结　论

（1）固结–蠕变曲线具有分阶段特征：$p<\sigma_k$ 时蠕变变形极小，为结构微调阶段；$p>\sigma_k$ 后等速蠕变过程明显，为结构破坏阶段；p>800 kPa，蠕变变形又减小，为结构固化阶段。

（2）蠕变由渗透结合水主导，吸附结合水含量基本不变。$p<\sigma_k$ 时主要是自由水的排出过程，结合水含量未发生变化。$p>\sigma_k$ 后，初始结构破坏，渗透结合水转化为自由水排出，出现等速蠕变阶段，蠕变变形量大增，固结–蠕变耦合效应增强。随着荷载的增加，结合水膜变薄，颗粒间连接力增强，结构渐趋于新的稳定。

（3）蠕变试验后，软土由松散的骨架–絮凝结构演变为紧密的团聚–絮凝结构；在经历了挤压滑移旋

转之后颗粒排列由有序趋向无序，方向角更加混乱，定向性降低；d<1 μm 的小孔隙数量大量增加。

（4）存在荷载、结合水与颗粒的响应机制，荷载作用下结合水迁移和颗粒移动互相影响，通过蠕变的形式使结构更加紧密。

参 考 文 献

[1] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1999.
SUN Jun. Rheological behavior of geotechnical materials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.

[2] 王常明, 王清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 227－230.
WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. Creep characteristics and creep model of marine soft soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 227－230.

[3] 柯文汇, 陈健, 盛谦, 等. 一个描述软黏土时效特性的一维弹黏塑性模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2198－2205.
KE Wen-hui, CHEN Jian, SHENG Qian, et al. A one-dimensional elasto-viscoplastic model for describing time-dependent behavior of soft clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2198－2205.

[4] 房营光, 彭占淇, 谷任国, 等. 流变物质对软土流变参数影响的蠕变试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 257－262.
FANG Ying-guang, PENG Zhan-qi, GU Ren-guo, et al. Analysis of creep test on effect of rheological material on soft soil rheological parameter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 2): 257－262.

[5] 肖树芳, 房后国, 王清. 软土中结合水与固结、蠕变行为[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 531－535.
XIAO Shu-fang, FANG Hou-guo, WANG Qing. The bound water, consolidation and creep behavior of soft soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(4): 531－535.

[6] 张先伟, 王常明, 李军霞, 等. 蠕变条件下软土微观孔隙变化特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1060－1067.
ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming, LI Jun-xia, et al. Variation characteristics of soft clay micro-pore in the creep condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1060－1067.

[7] LIU Chun, SHI Bin, ZHOU Jian. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. **Applied Clay Science**, 2011, 54(1): 97－106.

[8] LEI Hua-yang, LU Hai-bin, WANG Xue-chao. Changes in soil micro-structure for natural soft clay under accelerated creep condition[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2016, 34(4): 365－375.

[9] 雷华阳, 卢海滨, 王学超, 等. 振动荷载作用下软土加速蠕变的微观机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 309－316, 324.
LEI Hua-yang, LU Hai-bin, WANG Xue-chao, et al. Research on microscopic mechanism of accelerated creep of soft clay under vibration loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 309－316, 324.

[10] 杨爱武, 孔令伟. 吹填软土蠕变过程中结构强度变化及微观机理分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 181－187.
YANG Ai-wu, KONG Ling-wei. Strength evolution and micro-structure mechanics of structured soft dredger fill from triaxial creep test[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(2): 181－187.

[11] 沈珠江. 软土工程和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100－111.
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 100－111.

[12] 刘清秉, 项伟, 崔德山. 离子土固化剂对膨胀土结合水影响机制研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1887－1895.
LIU Qing-bing, XIANG Wei, CUI De-shan. Effect of ionic soil stabilizer on bound water of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(10): 1887－1895.

[13] 吴凤彩. 黏性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(6): 84－93.
WU Feng-cai. Measurement of adsorbed bound water in clay soils and some characteristics of seepage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 6(6): 84－93.

[14] 李生林, 薄遵昭. 土中结合水译文集[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
LI Sheng-lin, BO Zun-zhao. Translation collection of adsorbed water in soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.

[15] 李文平, 于双忠, 王柏荣, 等. 煤矿区深部黏性土吸附结合水含量测定及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(3): 31－34.
LI Wen-ping, YU Shuang-zhong, WANG Bo-rong, et al. The measuring of adsorbed bound water of the typical deep clay soil in coal mining area and its significance[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1995, 22(3): 31－34.

[16] HICHER P Y, WAHYUDI R H, TESSIER D. Micro structural analysis of inherent and induced anisotropy in clay[J]. **Mechanics of Cohesive-Frictional Materials**, 2000, 5(5): 341-371.

[17] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.
GAO Guo-rui. Neoteric soil geotechnology[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1990.