

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.02.14

小偏应力作用下吹填土蠕变过程中微结构特征演变研究

杨爱武^{1,3}, 吴可龙¹, 周玉明², 孔令伟³, 张先伟³

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 天津市勘察院, 天津 300381; 3. 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, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了解吹填土长时期稳定蠕变变形的本质机理, 对天津滨海吹填土原状土与重塑土开展分级加载固结不排水三轴蠕变试验, 在围压 75 kPa、偏应力 10 kPa 下开展多组蠕变平行试验, 并选取 8 个时间节点取样进行扫描电镜与比表面积试验, 主要研究小偏应力作用下稳定蠕变过程中微结构变化规律。结果表明, 天津吹填土富含黏粒与黏土矿物、大孔隙比与高压缩性的物理性质、片架结构和片堆结构的结构类型, 这些特征使其具有明显的蠕变特性。蠕变过程中, 随着时间的增长, 颗粒体积变大, 数量呈减小趋势, 比表面积呈减小趋势; 孔隙变化遵循大孔隙优先改变原理, 孔径与体积减小; 颗粒与孔隙的外形趋于“圆滑”, 复杂度减小, 圆形度增加, 整体向无序状态发展。吹填土蠕变现象总结为其内部结构不断改变自我调整再造以适应外力变化的过程。最后, 依据受力大小和结构破损程度将蠕变过程分为 2 个阶段, 结构压密增长阶段与结构减损破坏阶段。

关键词: 吹填软土; 蠕变; 微观结构; 小偏应力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)02-0089-08

A study of the microstructure characteristics evolution of dredger fill in the process of creep

YANG Aiwu^{1,3}, WU Kelong¹, ZHOU Yuming², KONG Lingwei³, ZHANG Xianwei³

(1. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300381, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In order to understand the internal mechanism of long-term deformation, consolidated undrained triaxial creep tests are conducted on undisturbed and remolded soft dredger fill in the Tianjin Binhai District. Parallel tests are carried out at 75 kPa of confining pressure and 10 kPa of deviatoric stress. Eight time point samples during creep are selected for SEM and the specific surface area test to examine the micro-structure change. The results show that the characteristics of enrichment of clay and clay minerals, large void ratio, high compressibility, frame structure and stack structure are the fundamental causes of creep properties. With the increase of time in creep, the particle volume becomes larger, the number decreases and the specific surface area decreases. Pore changes follow the macropore change principle, and diameter and volume decreases. Grain and pore shape tends to “smooth”, complexity reduced, the circular degree increased, and the overall tends to the disordered state. The creep phenomenon of dredger fill is summarized as its internal structure change to adapt to external changes. Finally, on the basis of force size and structure damage degree, the creep process is divided into 2 stages, namely, structure compact growth and structure damage.

Keywords: soft dredger fill; creep; microstructure

收稿日期: 2014-06-03; 修订日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186, 41372291, 41102200)

第一作者: 杨爱武(1971-), 男, 教授, 主要从事软土微观结构与力学特性研究。E-mail: tulilab@163.com

随着沿海城市经济发展和城市基本建设的蓬勃开展,一些港口城市存在着严重的陆域不足现状,将疏浚淤泥用于填海造陆,已成为沿海城市土地开发的重要手段,它不但能有效降低近海抛泥弃淤对海洋环境的污染,同时也对缓解沿海城市土地资源紧张的局面有相当积极的意义,其经济和社会效益均十分显著。目前,天津滨海新区正在进行着世界瞩目的吹填造陆工程,先后已在临港工业区、东疆港、南港区、中新生态城、中心渔港、海滨旅游区等完成吹填造陆数百平方公里。按滨海新区的发展策略,九大功能区中临海的六大功能区,均要通过不同规模的吹填造陆获取土地资源^[1]。

由于天津滨海新区吹填材料主要来源于浅海淤泥,属于一种高含水量的超软土,孔隙比大,容重小,吹填施工完成后较长时间内,含水率还高达 100% 以上,孔隙比大于 2.5;强度很低,十字板抗剪强度小于 10 kPa,承载力很小,灵敏度很高,在自重固结排水过程会形成一定的结构性;黏粒含量一般为 35% ~ 60%,有机质含量高,致使压缩性很高,一般压缩系数 $a_v > 2.0 \text{ MPa}^{-1}$,且时间因素对其变形影响较大,长期沉降量很大^[1-4]。吹填场地在投入使用后,长期变形量较大是影响其安全运营的突出问题之一。2010 年 3 月,深圳填海区多楼盘沉降,人行道上出现“波浪”现象,导致住宅小区内外周边的地面上出现不同程度的裂缝。天津滨海新区吹填场地已经出现类似的问题,不少已建成的道路出现“起拱”,埋入地下的管道出现弯曲变形与移位,防潮闸以及多层建筑物下沉明显。究其原因是因为设计填海区构筑物时没有考虑土体短期内形成的结构性对长期强度的不利影响,没有足够重视因时间效应影响的土体长期力学效应。

考虑时间效应对软弱土长期力学效应影响研究已有较多成果^[5-8],如 Tavenas 对超固结的 Saint-Alban clay 开展排水与不排水蠕变试验,结果表明蠕变引起的不均匀沉降是导致路堤出现裂缝的重要原因。王元站等对天津滨海两种典型软土蠕变特性进行了试验研究,采用 Merchant 模型进行拟合,并对模型参数变化规律进行了探讨。李国维等通过一维蠕变试验,研究了超固结软黏土蠕变过程中的次固结系数及侧压力系数与应力历史的关系。相对于正常沉积的软土,吹填软土由于含较高的含水率、黏粒含量较高,蠕变性质更为显著。目前,对于吹填土的力学特性国内外学者已经开展一系列研究^[9-14],如刘莹^[10]、刘娉慧^[11]、詹良通^[12]分别对固结沉积、外加剂加固、自重沉积作用下

吹填土结构强度演化规律进行了分析;ZHOU^[13]研究了真空动力固结加固含饱和软黏土夹层的吹填土路基的加固机理;Vasconcellos^[14]研究表明水力吹填作用下吹填土对时间有显著的敏感性。上述研究虽然积极地推动了对吹填土力学特性的了解,仍很少考虑吹填土在应力环境变化时,“时间”这一影响因子对其变形规律与强度破坏分布的影响,特别是对于时间效应敏感性较强的吹填土的长期变形规律,强度破坏分布及其根本机理目前尚未有深刻认识,以往对于土体蠕变机理的解释多是对比破坏前后的微观结构得到的^[15],而这并没有从根本上考虑时间因子这一重要因素对变形过程的影响。同时,吹填土作为一种人工参与制造的结构性土,它有别于因长期地质演化过程而形成的天然土,这种短期内在自重沉积作用或地基处理条件下形成的结构强度必然与天然沉积的结构性土有所差异,以往研究得出的结构性土的微观机制是否同样适合吹填土值得探讨。

鉴于此,本文以天津滨海新区吹填土为研究对象,在开展蠕变试验的同时,通过选取不同时间节点取样进行微观结构测试,研究吹填土蠕变过程中微结构演化规律,以深化认识吹填土的蠕变机理以及与结构性变化有关的工程长期后效性评价。

1 土样性质及试验方案

1.1 土样性质

样品取自天津滨海新区临港工业区吹填场地。吹填厚度 6 m 左右,前期经过一次真空预压地基处理,表层土强度较高,向下强度逐渐降低,本文研究的土体取自场地 4 ~ 5 m 深度处,室内对其基本物理力学性质及矿物成分进行了分析(表 1 ~ 3)。吹填土矿物含量高,超过 50%,其中伊利石、高岭石、绿泥石分别占黏土矿物总量的 36% ~ 37%、9% ~ 10%、10% ~ 11%,伊蒙混层占黏土矿物总量的 42% ~ 45%。黏土矿物由于其晶格结构的差异,反映出力学性质也有很大差别。伊蒙混层晶格结构连接低于伊利石与高岭石系列,含量越多,对工程力学性质不利影响越大。利用美国 Micromeritics 公司生产型号为 SediGraph 5100 粒度分析仪进行颗粒分析,测试结果表明试验土样为细粒土,黏粒含量超过 80%,0.1 ~ 10.0 μm 粒径分布频率最高。吹填土含水率高,孔隙比大,压缩性高,强度低于正常沉积海积软土。天津吹填土富含黏粒与黏土矿物、大孔隙比、高压缩性的特征,使其具有明显的蠕变变形特性。

表 1 现场吹填土基本物性指标

Table 1 Basic physical parameters of in-situ dredger fill

含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	结构屈服应力 σ_k/kPa
55.5	1.72	1.495	42.4	21.4	21.0	1.067	2.305	15.0

表 2 矿物 X 射线衍射分析成果表

Table 2 Mineral analysis of the X-ray diffraction

编号	成岩矿物种类和含量/%								矿物总量/%
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	石盐	角闪石	
1	17.4	4.6	6.3	17.4	1.3	0.7	1.9	0.3	50.1
2	19.5	1.2	8.5	16.1	1.2	0.3	1.6	0.2	51.4

表 3 黏土矿物 X 射线衍射分析成果表

Table 3 Clay mineral analysis of the X-ray diffraction

样品 编号	黏土矿物相对含量/%						混合比/%	
	S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
1	—	42	37	10	11	45	—	—
2	—	45	36	9	10	45	—	—

注: I—伊利石; K—高岭石; C—绿泥石; I/S—伊蒙混层。

1.2 试验方案

常规三轴试验仪器大都只能进行应变控制,而不能进行不同的应力水平控制。本试验采用的是 TSS10 型土体三轴流变试验机,它可以进行应力维持,即在某一个应力水平下,保持该应力(即总应力)不变,定时量测试样的应变、孔隙水压力和排水量等数据。试验土样为原状土与重塑土,试样直径 50.0 mm、高 100 mm 根据上覆压力设定围压再进行分级加载的固结不排水三轴蠕变试验。首先,土样抽气饱和后在设定的围压下固结完毕后,逐级施加各级偏应力 $\Delta\sigma_1$,加载次数 $n > 3$,每级应力加载水平按 5 kPa、10 kPa、15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa 递增。由于试验仪器压力传感器直接与水样接触,不存在因围压的作用而产生反力需要修正,采集的数据就是各级偏应力下应变随时间变化曲线。通过采集的竖向变形值,判断试样变形是否达到稳定,判定标准为 48 h 变形量小于 0.01 mm 就认为达到稳定,且每一级应力水平下,蠕变最少持续时间都要达到 96 h,再施加偏应力 $\Delta\sigma_1$,如此循环,直到土样破坏。

为了获得与时间相关的土体微观结构变化规律,对吹填土在围压 $\sigma_3 = 25 \text{ kPa}$ 、50 kPa、75 kPa、100 kPa、125 kPa 下进行不同偏应力的分级加载不排水蠕变试验,因篇幅有限,本文主要研究小偏应力作用下,稳定蠕变阶段微结构变化特征,即选取 $\sigma_3 = 75 \text{ kPa}$ 、偏应力 $q = 10 \text{ kPa}$ 下开展多组蠕变平行试验,在试验进行到 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、96 h 后停止试

验,立即取样进行扫描电镜(德国,型号 1530VP)测试及比表面积(美国,型号 ASAP2020)试验。为了使土样既干燥又不变形保持原始结构形态的目的,制样采用真空冷冻升华干燥法制样^[16]。取样方案示意图如图 1 所示,图中实心黑圆点代表取样时间点。微观结构定量分析利用扫描电子显微镜配套提供的定量分析软件,结构观察面为土层剖面。

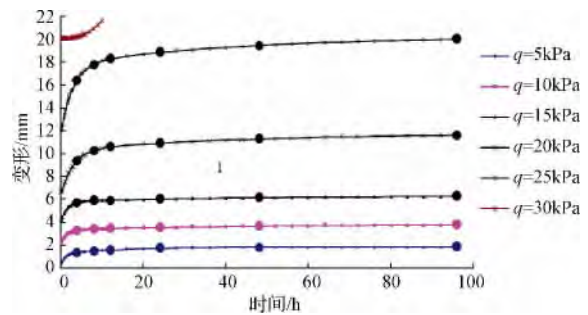


图 1 原状土 SEM 试验取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of select samples for SEM test of the undisturbed soil

2 天津滨海吹填土蠕变特性

三轴固结不排水剪切蠕变试验结果如图 2、图 3 所示。无论是原状土还是重塑土,其不排水蠕变变形都呈非线性,随着偏压的增大,变形斜率逐渐增大,最终趋于加速破坏。当 $q < \sigma_k \approx 15 \text{ kPa}$ 时,变形曲线很快趋于稳定;当 $q > \sigma_k$ 时,蠕变变形量随着偏应力的增大而增大,当偏应力再继续增大到一定程度时,土体出现较大变形,表现在图 2(a) 中 $q = 30 \text{ kPa}$ 下,试样在较短时间内发生较大变形,很快发生破坏。

另一方面,在相同应力水平下,原状土的蠕变变形量小于重塑土相应值。原状土非稳定蠕变变形对应的应力值大于重塑土,即变形刚度大于重塑土,究其原因,是原状土具有明显的结构性,而重塑土基本上不具有

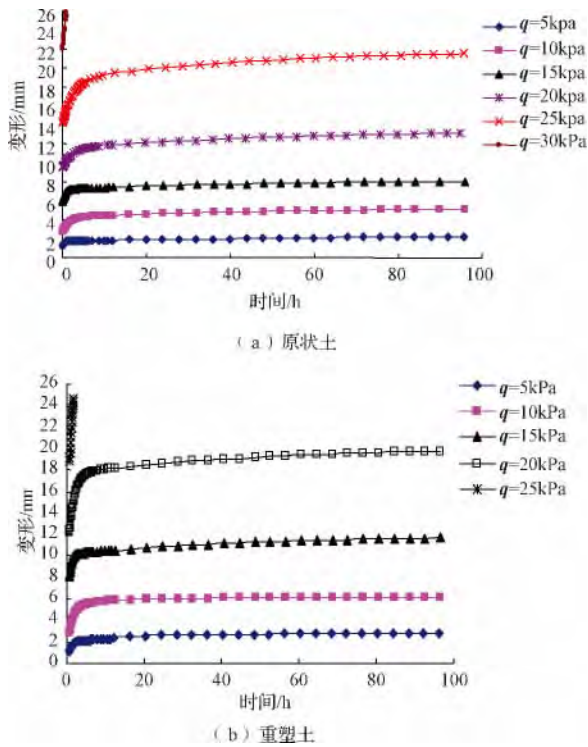


图 2 不同偏应力下的三轴不排水蠕变轴向应变-时间曲线
 Fig. 2 Axial strain-time curves of the undrained triaxial shear creep under different deviatoric stresses

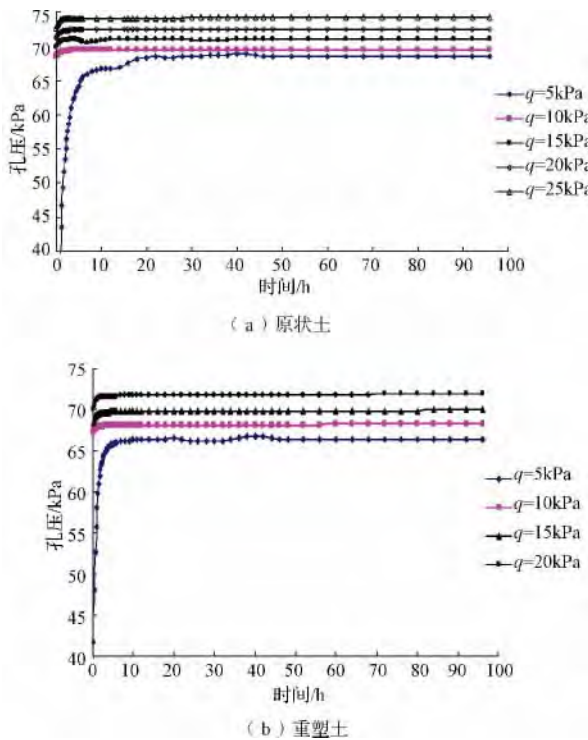


图 3 不同偏应力下的三轴不排水蠕变孔压-时间曲线
 Fig. 3 Pore water pressure-time curves of the undrained triaxial shear creep under different deviatoric stresses

(或结构性弱) 结构性。由于结构性的存在, 土体抵抗变形的能力强, 变形较小; 当 $q > \sigma_k$ 时, 由于结构的逐渐破坏, 土体抵抗变形的能力逐渐向重塑土靠近, 变形速率逐渐增大。而无结构强度的重塑土抵抗变形的能力较差, 随着 q 的增大, 很快就达到破坏, 破坏时的应力当然较原状土要小。

相同 σ_3 下, 随着 q 的增大, 孔隙水压力 U 也随之增大。但第 1 级 U 增加值最大, 接近围压大小; 随后 q 均匀增大, U 基本上均匀增加, 最后 U 达到最大值, 土体中有效应力很小而破坏。

3 吹填土蠕变过程中微观结构变化

3.1 定性分析

图 4 为天津原状与重塑吹填土的 SEM 照片, 图 5 为原状土在 $\sigma_3 = 75 \text{ kPa}$, $q = 10 \text{ kPa}$ 下蠕变过程中 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、96 h 时的土样 SEM 照片。

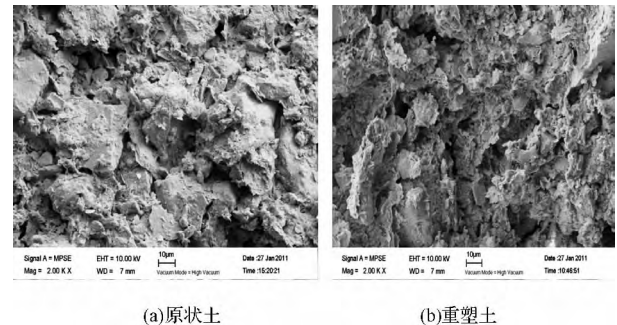


图 4 原状与重塑吹填土 SEM 图像(放大 2000 倍)
 Fig. 4 SEM photographs of the natural clay sample and the resold clay sample of dredger fill samples($\times 2000$)

原状吹填土自然沉积时间不长, 经过短暂的真空预压处理后, 形成了一定的结构性, 但结构蓬松, 在荷载作用下, 特别是受剪力的长时间作用后, 结构由疏松的分散结构逐渐演变为片架结构和片堆结构, 使颗粒产生不同程度的定向排列, 并逐渐密实。从图 4 与图 5 中可以看出, 可见经过蠕变后, 原始结构中的颗粒在压力作用下随着时间的推移重新聚集成更大、稳定性更强的聚合体, 蠕变后结构多变为絮凝状结构与团聚结构, 并且这两种结构相对密实程度非常高。从图中可直观看到孔隙的收缩和其体积的减少, 这主要是蠕变过程中颗粒的重新组合和定向排列所引起, 孔隙变得细小且量多。重塑土由于彻底扰动, 土体定向性差, 受力后颗粒就会慢慢转向受合力方向, 在整个蠕变过程中, 颗粒定向性发展比原状土明显。整体而言, 蠕变

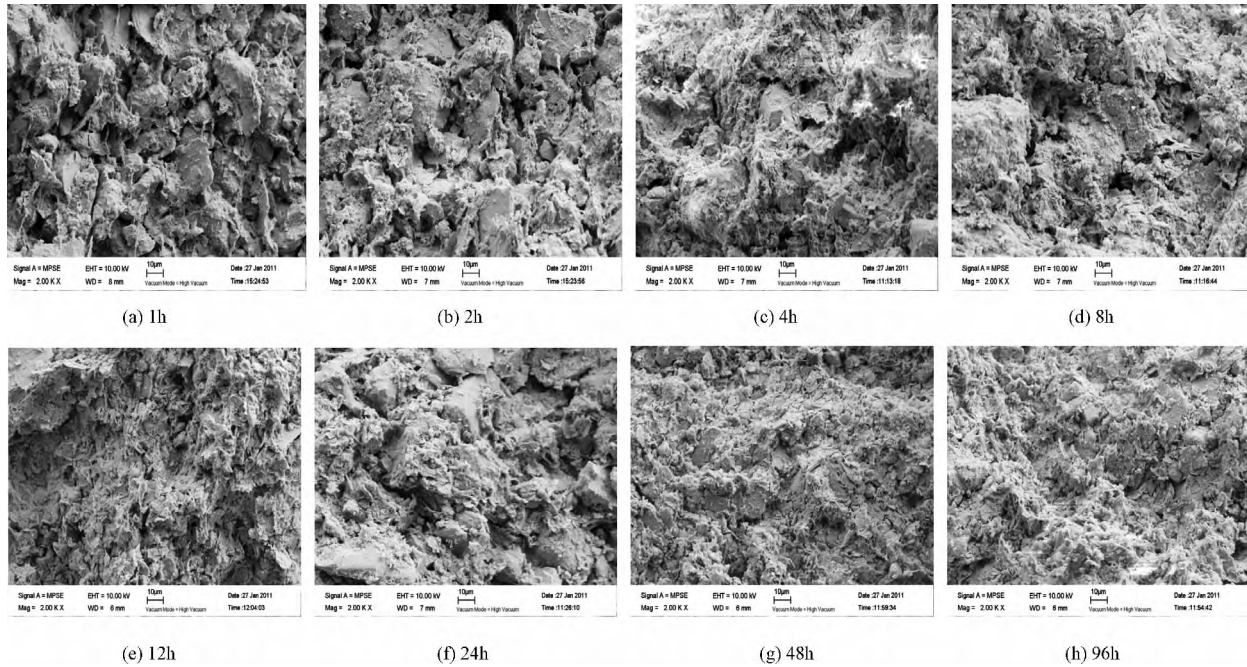


图 5 原状吹填土蠕变过程中土样 SEM 图像(放大 2000 倍)

Fig. 5 SEM photographs in the process of creep of the natural dredger fill samples(×2000)

导致土的结构由初始的絮凝结构逐渐向重塑土状态发展。

3.2 定量分析

(1) 颗粒(孔隙)大小及数量

颗粒与孔隙的尺寸、粒(孔)径分布、数量、比表面积等分析结果如表 4、图 6 所示,在受恒定小偏应力作用下,随着时间的增长,原状土的孔隙数量总体上呈现增加趋势,亦即小孔隙数量增加,总孔隙数量也在增加,但增加幅度大小不一。这是由于在软土蠕变过程中,颗粒之间的靠拢、滑移、镶嵌幅度增大,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。孔径逐渐减小,平均孔隙体积也呈现逐渐减小趋势。同时,随着时间的增长,颗粒比表面积呈减小趋势。

蠕变后期,颗粒粒径为 1~2 μm 与 2~5 μm 的分布减少,而 <1 μm、5~10 μm、>10 μm 的分布增加,即吹填土蠕变过程中同时伴随着颗粒的破损、重组与聚合,大团粒被挤碎或连接力较弱处在外力作用下被折断形成小团粒,同时一些碎小团粒在外力作用下凝聚成大聚合体,这与孔隙在孔径分布上的分析是相吻合的,其结果是导致蠕变破坏后土颗粒数量增加了^[17]。

(2) 颗粒(孔隙)的复杂度、圆形度

颗粒或孔隙形状的复杂度 e 可表示为:

$$e = S^2 / A' \quad (1)$$

式中: S 、 A' ——颗粒或孔隙的周长与面积。

圆形度 R 可表示为:

$$R = A' / A'' \quad (2)$$

表 4 原状吹填土蠕变过程中微结构的个数与孔(粒)径分布

Table 4 Number and pore (particle) size distribution of microstructures in the process of creep of the natural dredger fill

时间/h	类型	孔径、粒径分布/%					数量
		<1 μm	1~2 μm	2~5 μm	5~10 μm	>10 μm	
1	颗粒	79.35	14.45	4.65	0.90	0.65	775
	孔隙	76.71	16.89	5.08	0.99	0.33	906
2	颗粒	73.39	19.05	6.42	1.14	0.00	744
	孔隙	77.38	16.28	4.14	1.44	0.76	926
4	颗粒	71.84	20.02	7.12	0.61	0.41	728
	孔隙	73.51	17.96	6.65	1.09	0.79	970
8	颗粒	69.80	18.62	9.49	0.95	1.14	734
	孔隙	72.35	18.77	7.53	0.86	0.49	1048
12	颗粒	63.95	17.44	11.51	1.40	1.70	730
	孔隙	69.59	20.28	8.21	1.34	0.58	1123
24	颗粒	64.85	17.27	12.97	2.61	2.30	690
	孔隙	69.62	20.04	7.59	1.79	0.95	1208
48	颗粒	64.20	17.24	12.09	2.70	3.77	681
	孔隙	67.01	23.10	7.74	1.40	0.75	1279
96	颗粒	64.59	16.42	11.94	3.25	3.80	677
	孔隙	67.48	20.96	9.40	1.41	0.75	1301

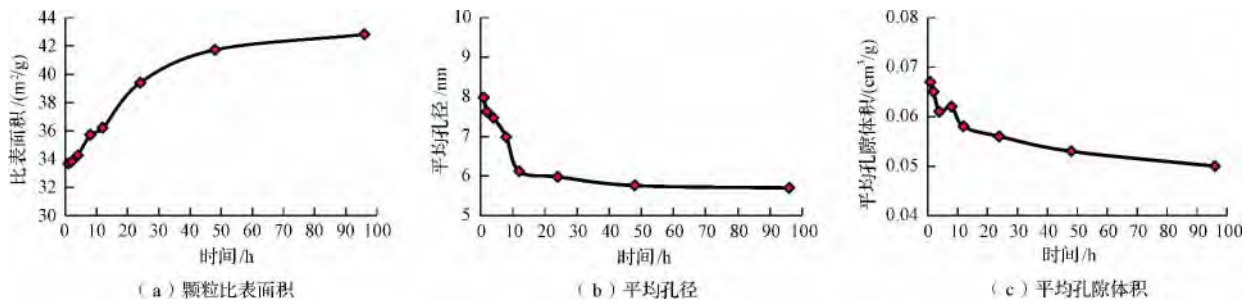


图 6 原状吹填土蠕变过程中微颗粒比表面积、孔径与孔隙体积

Fig. 6 Specific surface area and pore size and volume of micro-pore in the process of creep of the natural dredger fill

式中: A' ——颗粒或孔隙的实际面积;

A'' ——颗粒或孔隙外接圆面积。

从图 7 可以看出,在接近于结构屈服应力大小的荷载作用下,随着时间的发展,颗粒的靠拢与相互挤压使得颗粒与孔隙的复杂度基本上呈降低趋势,也就是说,孔隙的大小随压力的增加变小,并且总体形状趋向圆形化,微观结构的外形更趋于“圆滑”。虽然颗粒与孔隙的复杂度都有所减少,但孔隙比颗粒复杂度减少幅度要大,说明蠕变过程对孔隙外观形状的改造比颗粒要明显。

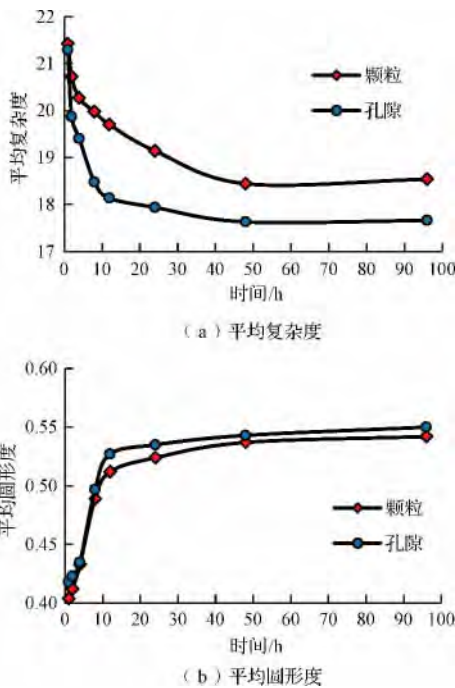


图 7 蠕变过程中微结构的复杂度、圆形度

Fig. 7 Abundance distribution and average circularity of microstructures in the process of creep

蠕变后期,等轴形与长条形的颗粒数量都减少,整体上颗粒趋向于扁圆形发展,复杂度增加,圆形度减小,颗粒(孔隙)变得不规则,表现为无序状态^[17]。

4 吹填土蠕变机理探讨

总结上述对吹填土宏观蠕变力学试验与考虑时间因子过程中微观结构变化规律可知,吹填土在自固结沉积以及后期的地基处理过程中形成特殊的结构性,其微观结构因素如颗粒形状、分布、排列和连结方式、微颗粒聚合体的形态、尺度和胶结形式、孔隙尺度及孔隙率等对土体工程特性起到支配和控制的作用。在应力状态发展过程中,总会有不同程度胶结的断裂和颗粒的破碎,这必然伴随着内应力的调整,且这一过程是与时间相关的、缓慢的过程,由此引发的结构重塑导致的变形就是蠕变。

由吹填土宏观蠕变试验可以看到(图 2),吹填土的蠕变变形包括可逆变形(如瞬时弹性变形)与不可逆变形(如黏弹塑性变形)。吹填土的可逆变形主要是由胶粒尺寸改变,以及土骨架的体积变形和封闭的小气泡可逆的体积变化所导致的。在外力增大时,颗粒靠拢和水膜厚度减小。在荷载卸除时,斥力推开颗粒,使体积变形部分恢复。吹填土的不可逆变形是颗粒不可逆位移和它们重新排列的结果。上述试验结果表明这种因时间相关的蠕变变形规律受控于微观孔隙的变化和颗粒的重新排列,即蠕变变形伴随着结构联结的破坏而发展。吹填土的蠕变变形主要是非可逆变形,而这种变形对吹填土工程的危害也是不容忽视的。

为此,依据蠕变过程中受力大小和微结构变化特征,将吹填土蠕变过程分为 2 个阶段(图 8)。

(1) 结构压密增长阶段(OB 段)

在蠕变初期,土体结构基本保持完整(A 点),结构强度限制变形发展,土体在较低应力作用下变形量较小。当作用力增大但未达到结构屈服强度(B 点)之前,作用力由具有一定胶结强度的土颗粒接触点来承担,造成结合水膜的挤压变形并表现出弹性,成为颗粒彼此接近时的机械阻力,导致结构性强度不断增加,

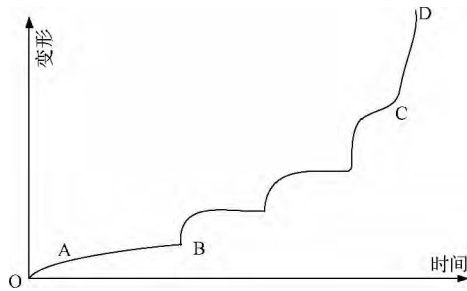


图8 吹填土蠕变过程示意图

Fig. 8 Creep process diagram of dredger fill

结构发生硬化,这一阶段土体变形也较小,蠕变特性表现并不明显。随着压缩荷载的增加,结构强度值在上升,未超过其最大值,尽管黏土结构在产生缺陷,蠕变总会朝着趋稳方向发展。

(2) 结构减损破坏阶段

该阶段也可细分为两段:BC段及CD段。C点为结构完全破损点,D点为破坏点。

当应力超过结构屈服应力(B点),由于土颗粒间的胶结强度和结合水膜厚度是不同的,刚开始施加作用力时,颗粒间连接力较弱处先破损、断裂,产生微破裂面。

随着时间的增长和作用力的增大,相对于第一阶段由外界压力起主导作用逐渐变为由颗粒的滑动、旋转和换位占主导作用,这加剧了结构的不断软化,蠕变特性表现逐渐明显。随着时间的进一步增长,作用力略再增大时,原来破碎的小团粒将重新聚集成团,形成新的集合体,颗粒之间相互嵌挤咬合形成比较稳定的结构。颗粒间连接由松散变得紧密,土骨架形成暂时的稳定形态,土体进入蠕变稳定阶段,这时土体能承受更大荷载。此过程相当于图8中BC段^[18]。

当外力的变化再增加时,会使暂时稳定的结构继续破坏,当现时结构的形成强度增长不足以补偿作用力增长的速度使土体被最终破坏。此过程相当于图8中CD段^[18]。

由此看来,吹填土在较长时间的蠕变过程中,土体的现时结构是始终动态变化的。首先,当外界应力小于结构屈服应力时,初始结构发生自我调整,结构强度呈增长趋势;当外界压力超过结构屈服应力时,初始结构开始破坏的同时,伴随着被破坏的土体的结构重新稳定,形成暂时稳定现时结构;当外力继续增加,结构继续破坏,重新稳定,形成暂时稳定的现时结构;如此循环几次(具体次数取决于土体破坏强度)后,土体结构强度所剩无几,当外力再增加时,土体现时形成的微

小结构强度增长不足以补偿作用力增长的速度,土体就会破坏。土蠕变过程是内力与外力相互消长和不断平衡的结果,吹填土不同蠕变表现都是内部结构不断改变自我调整再造以适应外力变化的过程。

5 结论

(1) 天津滨海吹填土含水率高,孔隙比大,强度低于正常沉积海积软土,压缩性高。其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片架结构和片堆结构使其具有明显的蠕变特性。

(2) 小偏应力作用下,吹填土稳定蠕变过程中微结构变化主要特征是,随着时间的增长,颗粒体积变大,数量呈减小趋势,比表面积呈减小趋势;孔隙变化遵循大孔隙优先改变原理,孔径逐渐减小,平均孔隙体积也呈现逐渐减小趋势;微结构的外形趋于“圆滑”;颗粒与孔隙的复杂度减小,圆形成度增加,整体向无序状态发展。

(3) 天津吹填土不排水蠕变变形呈非线性特性,当 $q < \sigma_k$ 时,结构性会抑制蠕变变形发展,蠕变变形量小,为衰减稳定型,硬化占主要部分,其微观结构的变化是逐渐趋于稳定,结构强度得到增长;当 $q > \sigma_k$ 时,微观结构遭到破坏,变形曲线的斜率随着偏应力的增大而增大,蠕变变形量大,软化占主要部分。

本文仅对 $\sigma_3 = 75 \text{ kPa}$, $q = 10 \text{ kPa}$ 下的天津吹填土进行了蠕变的微观结构测试与分析,考虑到不同围压与偏应力对蠕变具有重要影响,后续研究将重点关注应力对蠕变过程中微观结构演变的敏感性与关联性分析。

参考文献:

- [1] 杜东菊,杨爱武,刘举,等.天津滨海吹填土[M].北京:科学出版社,2010. [DU D J, YANG A W, LIU J, et al. The mechanical properties of Tianjin coastal dredger fill[M]. Beijing: China Science Press, 2010. (in Chinese)]
- [2] 杨爱武,杜东菊,卢力强.天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):83-87. [YANG A W, DU D J, LU L Q. Study on sediment characteristics and micro-structure of soft dredger soil of Tianjin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 83-87. (in Chinese)]
- [3] 杨爱武,闫澍旺,杜东菊.结构性吹填软土蠕变模型研究[J].岩土力学,2012,33(11):3213-3219.

- [YANG A W, YAN S W, DU D J. Study of creep model of structural soft dredger fill [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (11): 3213 - 3219. (in Chinese)]
- [4] 刘莹, 王清, 肖树芳. 不同地区吹填土基本性质对比研究 [J]. *岩土工程技术*, 2003 (4): 197 - 200. [LU Y, WANG Q, XIAO S F. The Comparative Research on Fundamental Properties of Dredger Fill in Different Areas [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003 (4): 197 - 200. (in Chinese)]
- [5] TAVENAS F, LEROUÉIL S, ROCHELLE P L, *et al.* Creep behavior of an undisturbed lightly over consolidated clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15 (3): 402 - 423.
- [6] Leoni M, Karstunen M, Vermeer P A. Anisotropic creep model for soft soils [J]. *Géotechnique*, 2008, 58 (3): 215 - 226.
- [7] 王元站, 黄东旭, 肖忠. 天津滨海地区两种典型软黏土蠕变特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34 (2): 379 - 384. [WANG Y Z, HUANG D X, XIAO Z. Experimental research on creep properties of two typical soft clays in coastal region of Tianjin [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (2): 379 - 384. (in Chinese)]
- [8] 李国维, 胡坚, 陆晓岑, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34 (12): 2198 - 2205. [LI G W, HU J, LU X C, *et al.* One-dimensional secondary consolidation coefficient and lateral pressure coefficient of over consolidated soft clay. [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (12): 2198 - 2205. (in Chinese)]
- [9] V Herbstová, I Herle. Structure transitions of clay fills in North-Western Bohemia [J]. *Engineering Geology*, 2009 (104): 157 - 166.
- [10] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土沉积固化后结构强度增长的机理分析 [J]. *同济大学学报*, 2003, 31 (11): 1295 - 1298. [LIU Y, XIAO S F, WANG Q. Mechanism analysis of increase in structural strength of solidified dredger fill [J]. *Journal of Tongji University*, 2003, 31 (11): 1295 - 1298. (in Chinese)]
- [11] 刘娉慧, 肖树芳, 王清. 外掺剂加固吹填泥浆的机理分析 [J]. *工程地质学报*, 2005, 13 (2): 285 - 288. [LIU P H, XIAO S F, WANG Q. Mechanism of improvement of dredger fill serous fluid with additive [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13 (2): 285 - 288. (in Chinese)]
- [12] 詹良通, 童军, 徐洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究 [J]. *水利学报*, 2008, 32 (9): 201 - 205. [ZHAN L T, TONG J, XU J. Laboratory study on self-weight sedimentation and consolidation behaviors of hydraulic-dredged mud [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 32 (9): 201 - 205. (in Chinese)]
- [13] ZHOU Jian, SU Yan, JIA Min-cai, *et al.* In-situ tests on vacuum dynamic consolidation to improve a hydraulic fill ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27 (9): 1091 - 1095.
- [14] João Flávio Vieira de Vasconcellos, Shailesh Singh, Nagaratnam Sivakugan. Sensitivity Analysis of Time Dependent Settlements in Hydraulic Fills [J]. *Geotech Geol Eng*, 2010, 28: 351 - 360.
- [15] 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*, 2011, 31 (11): 3493 - 3498. [LI J X, WANG C M, ZHANG X W. Creep properties and micropore changes of soft soil under different drainage conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 31 (11): 3493 - 3498. (in Chinese)]
- [16] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 32 (2): 406 - 412. [ZHANG X W, KONG L W, GUO A G, *et al.* Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 32 (2): 406 - 412. (in Chinese)]
- [17] 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 X W, WANG C M. Microstructural change of soft clay before and after one-dimensional compression creep [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32 (11): 1688 - 1694. (in Chinese)]
- [18] 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 A W, KONG L W. 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. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞