

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.092



# 高含水率有机质河道底泥压缩性状试验研究

黄烁菡, 王婧, 牟聪, 丁建文

(东南大学岩土工程研究所, 南京 210096)

**摘要:**河道底泥的压缩性状是影响河道底泥环保疏浚设计及处置的一个关键因素,采集了 4 条河道的底泥,针对 4 种城市河道底泥和过氧化氢处理的底泥开展了一系列物理和压缩试验,研究河道底泥的压缩性状,探讨有机质含量对河道底泥压缩性状的影响规律。试验结果表明,河道底泥的有机质含量变化范围大,河道底泥的压缩性状与底泥的物理性状密切相关,与无机质土类似,初始孔隙比和液限孔隙比是河道底泥压缩性状的两个关键控制因素。有机质对底泥压缩性状的影响可以归结于液限孔隙比的改变,有机质含量主要影响河道底泥的液限和比重,进而导致河道底泥重塑屈服应力  $\sigma'_{vr}$  和压缩性状发生改变。有机质含量越高,液限孔隙比越大,压缩指数越大,呈现出的压缩性越高。

**关键词:**河道底泥;有机质;含水率;压缩性状

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-6717(2019)05-0035-07

## One-dimensional compression behavior of reconstituted river sediments with organic matter

Huang Shuohan, Wang Jing, Mou Cong, Ding Jianwen

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** The compression behavior of river sediments is an important factor affecting the design and disposal of environmental dredging of river sediments. To investigate the compressibility of four river sediments, the consolidation tests of four kinds of river raw sediments and river sediments with hydrogen peroxide treated were performed in adapted odometers. The compression behavior of river sediments was studied and the effect of organic matter content on compression of sediments was discussed. The results show that the contents of organic matter in river sediments varies widely, and the compression behavior of river sediments is closely related to the physical properties of sediments. It is found that the main factors of influencing the compression behavior of reconstituted river sediments are initial void ratio and void ratio at liquid limit. The effect of organic matter on the compression behavior of river sediments can be attributed to the change of the liquid limit void ratio. The organic matter content affects the liquid limit and specific gravity of the river sediments, which leads to the change of remoulded yielding stress and compression

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51378118); 国家科技支撑计划(2015BAB07B06)

作者简介: 黄烁菡(1993-), 女, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: 1047340376@qq.com。

丁建文(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: jwding@seu.edu.cn。

Received: 2019-04-17

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378118); National Science and Technology Support Program (No. 2015BAB07B06)

**Author brief:** Huang Shuohan(1993-), research interest: geoenvironmental engineering, E-mail: 1047340376@qq.com. Ding Jianwen (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

behavior of river sediments. With increase of organic matter content, void ratio at liquid limit and compression index of river sediments increases, and the compressibility of river sediments is higher.

**Keywords:** river sediments; organic matter; water content; compression

城市内河底泥是来源于生活、工业的污染物质经物理、化学和生物作用沉积于河床底部,形成富含有机质和营养盐的灰黑色淤泥<sup>[1-2]</sup>。通常人类活动越活跃的区域,河湖底泥中有机物质含量越高。这些有机物质的存在,致使河湖底泥性状呈现与非污染疏浚泥不同的物理-力学性状。近年来,许多学者针对河道底泥工程特性开展的一系列研究<sup>[3-5]</sup>表明,城市河道底泥组成复杂,底泥中有机质含量高,造成其具有高含水率、细颗粒成分高、低透水性的特点。

土中有机质常被视为对工程不利的物质成分,大量研究表明,有机质具有极强的持水性和吸水性<sup>[6]</sup>,同时,土中有机质含量升高会引起土体阳离子交换量增大、初始孔隙比上升等特性<sup>[1-2]</sup>,这些特性造成有机质土的天然含水率、液限含水率高,高含量的有机质通常造成土体的压缩性、蠕变性增大,强度减小,稳定性降低<sup>[7-9]</sup>。底泥中的有机质含量会直接影响底泥的排水性能,研究河道底泥的压缩性状,有助于了解底泥排水性能和潜在的压缩体积量,为工程应用中高含水率疏浚底泥的排水有效处理和填埋堆场库容有效利用提供直接指导<sup>[3]</sup>。已有研究主要通过人工添加研究有机质对土体物理-化学-力学性状的影响,针对河道污染底泥,开展有机质的影响规律研究较少。

笔者以福州晋安区 3 条河道底泥和扬州七里河河道底泥为研究对象,采用过氧化氢处理改变河道底泥中有机质含量,并制备初始含水率约为 1.0、1.5 和 1.75 倍液限  $w_L$  的试样开展一维压缩试验,探索有机质含量和初始含水率对河道底泥压缩性状的影响规律。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料与方法

试验底泥取自福建省福州市和江苏省扬州市。其中,浦东河底泥、水上公园底泥和凤坂河底泥分别取自福建省福州市晋安区的浦东河、水上公园人工湖和凤坂河;七里河底泥取自江苏省扬州市七里河。试验底泥的基本物理性质如表 1 所示。由于底泥的孔隙液中含有可溶物质(溶解性有机质、营养盐、重金属离子等),底泥烘干后,孔隙液中的可溶物质以固体形式存在于干土土粒中,按照常规方法计算含

水率会产生误差,因此,采用 Noorany<sup>[10]</sup> 提出的含液率概念计算土样含水率。底泥的比重  $G_s$  采用标准比重瓶法测定<sup>[11]</sup>,测定过程中为了防止水与有机质产生反应,采用煤油代替水进行试验;有机质含量采用 440 °C 高温灼烧测定底泥的烧失量(Loss On Ignition, LOI)<sup>[12]</sup>;液限  $w_L$  和塑限  $w_P$  分别采用碟式液限仪和搓条法测定<sup>[13]</sup>。

表 1 河道底泥基本物理参数

Table 1 Physical properties of river sediments

土样	LOI/%	$G_s$	$w_L$ /%	$w_P$ /%
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	39.1
水上公园底泥	10.60	2.48	84.0	37.7
凤坂河底泥	3.67	2.69	45.1	31.5
七里河底泥	3.05	2.68	41.1	21.9

采用浓度为 30% 的过氧化氢溶液淋洗处理浦东河底泥。过氧化氢和底泥中有机物质发生氧化反应,使底泥中有机物质分解水和二氧化碳,在不引起底泥土颗粒矿物成分组成和含量变化的条件下,可有效降低底泥中的有机质含量<sup>[14-15]</sup>。故采用过氧化氢淋洗法,使浦东河底的有机质含量由 9.5% 降低到 6.87% 和 3.67%,将淋洗后有机质含量为 6.87% 和 3.67% 的浦东河底泥分别称为浦东过氧化氢淋洗底泥 1# 和 2#。表 2 是过氧化氢溶液淋洗前后浦东河底泥的基本物理性质。

表 2 过氧化氢淋洗前后浦东河底泥的基本物理参数

Table 2 Physical properties of Pudong river sediments with or without hydrogen peroxide treatment

土样	LOI/%	$G_s$	$w_L$ /%	$w_P$ /%
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	39.1
浦东过氧化氢淋洗底泥 1#	6.87	2.55	64.2	33.1
浦东过氧化氢淋洗底泥 2#	3.67	2.63	48.9	28.1

### 1.2 固结试验方法

河道底泥由于沉积环境、疏浚技术等的影响,其天然含水率通常高于液限,呈流塑状态<sup>[16]</sup>。因此,为更好地符合实际情况,试验配置固结试样的初始含水率将普遍大于液限。通过向现场取回的底泥加入原位河水并搅拌均匀,调整成泥样初始含水率分别为 0.96~0.99 倍、1.48~1.5 倍和 1.72~1.75

倍液限。根据泥样初始含水率和环刀体积(高4 cm、直径 6.18 cm),计算固结试样质量,保证放入环刀内泥样质量和计算值间误差小于 2%。向固结盒内注入现场取回的原位河水,液面高于试样顶部,并静置 24 h。

为避免高含水率泥样从透水石侧壁挤出,固结试验第 1 级荷载选用 0.5 kPa,采用 Hong 等<sup>[17]</sup>研制的低应力起始固结仪进行加载,荷载施加顺序为 0.5 kPa→1.5 kPa→3.125 kPa→6.25 kPa→12.5 kPa→25 kPa→50 kPa→100 kPa→200 kPa→400 kPa→800 kPa→1 600 kPa。由 Zeng 等<sup>[18]</sup>的研究可知,每级荷载下加载时间 3 h,可保证试样主固结的完成。试验过程中,固结盒内注入现场取回的原位河水,保证试样始终处于饱和状态。

## 2 试验结果

### 2.1 河道底泥原泥压缩性状

表 3 是 4 种河道底泥的一维固结试验方案,其中浦东河底泥固结试样的初始含水率为 0.99 倍、1.50 倍和 1.72 倍液限,水上公园固结试样初始含水率为 1.50 倍液限,凤坂河底泥固结试样初始含水率为 0.96 倍、1.50 倍液限,七里河底泥固结试样初始含水率为 0.99 倍、1.48 倍液限。

表 3 底泥试样固结试验方案

Table 3 Programme of one-dimensional incremental load consolidation tests of river sediments

土样	LOI/%	$G_s$	$w_L$ /%	$e_L$	$e_0$	$e_0/e_L$
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	2.25	0.99
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	3.33	1.50
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	3.90	1.72
水上公园底泥	10.6	2.48	84.0	2.08	3.08	1.50
凤坂河底泥	3.67	2.69	45.1	1.21	1.21	0.96
凤坂河底泥	3.67	2.69	45.1	1.21	1.81	1.50
七里河底泥	3.05	2.68	41.1	1.10	1.12	0.99
七里河底泥	3.05	2.68	41.1	1.10	1.61	1.48

注: $e_L$  为对应于液限的孔隙比; $e_0$  为固结试样的初始孔隙比。

图 1(a)、(b)分别为浦东河底泥、水上公园底泥、七里河底泥和凤坂河底泥  $e_0/e_L = 1.48 \sim 1.50$ 、 $0.96 \sim 0.99$  时的压缩曲线  $e-\lg \sigma'_v$ 。底泥的压缩曲线与高初始含水率重塑土的压缩曲线一致,呈倒“S”形。Hong 等<sup>[17]</sup>将这一现象归因于重塑土中存在类似于天然沉积黏土的屈服应力  $\sigma'_{vr}$ 。当竖向有效应力  $\sigma'_v$  小于屈服应力  $\sigma'_{vr}$  时,各压缩曲线较为平缓;当竖向有效应力  $\sigma'_v$  大于屈服应力  $\sigma'_{vr}$  时,土体的压缩性增大,压缩曲线陡然下降。

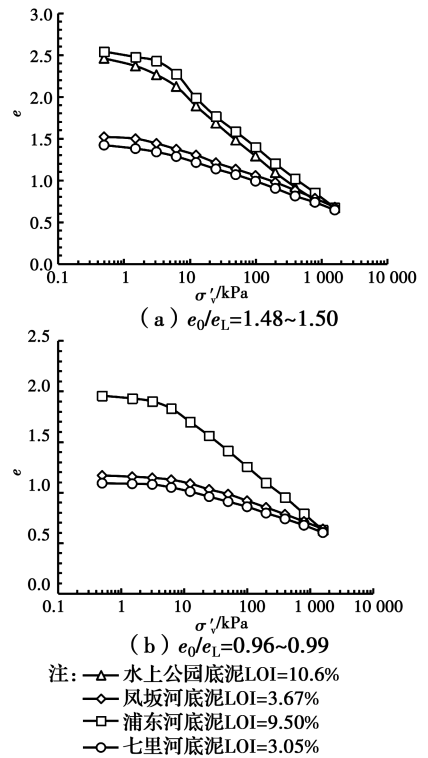


图 1 相同  $e_0/e_L$  值的河道底泥压缩曲线  
Fig. 1 Compression curves of reconstituted river sediments at same  $e_0/e_L$

这 4 种河道底泥有机质含量、液限等参数指标均不相同。从图 1 中可以看出,  $e_L$  值较大的底泥压缩曲线始终在  $e_L$  较小的底泥压缩曲线上方。长期以来,针对重塑无机土压缩性状的研究结果表明,  $e_0$  和  $e_L$  是影响重塑土压缩特性的两个重要物理参数。Skempton<sup>[19]</sup>总结了 20 多组天然沉积土,发现液限不同土样的压缩性不同,各种深度天然土的含水率与液限的比例在 0.6~1.5 之间。Nagaraj 等<sup>[20]</sup>提出用参数  $e_0/e_L$  归一化压缩曲线。Burland<sup>[21]</sup>认为,相较于液限  $w_L$ ,液限孔隙比  $e_L$  更加适合分析重塑土的压缩性状。这一试验证明,与无机质土的压缩曲线特性相同,液限孔隙比  $e_L$  是影响底泥压缩曲线的重要物理参数。

压缩指数是评价土体压缩性的重要指标,本文采用 Burland<sup>[21]</sup>提出的压缩指数  $C_c^*$ , 定义为

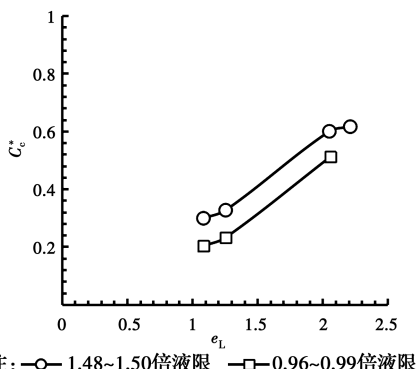
$$C_c^* = e_{100}^* - e_{1000}^* \quad (1)$$

式中: $e_{100}^*$  和  $e_{1000}^*$  分别为竖向有效固结压力  $\sigma'_v = 100$  kPa 和 1 000 kPa 时的重塑土孔隙比。

图 2 是底泥的液限孔隙比  $e_L$  与压缩指数  $C_c$  的关系图。从图 2 可以看出,底泥的压缩指数随液限孔隙比  $e_L$  的增大而增大,表明液限孔隙比  $e_L$  高的底泥具有较高的压缩性。

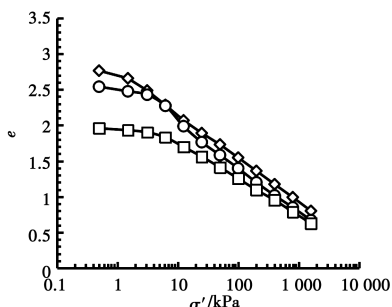
图 3(a)、(b)、(c)分别是不同初始含水率的浦东河底泥、凤坂河底泥和七里河底泥的压缩曲线

$e-\lg \sigma'_v$ 。初始含水率值较高的底泥的压缩曲线始终在初始含水率较低的压缩曲线的上方,河道底泥压缩性随初始含水率的增加而增大。

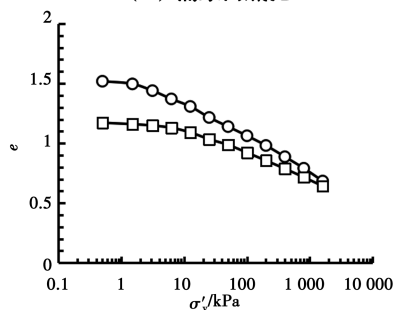


注:—○—1.48~1.50倍液限 —□—0.96~0.99倍液限  
图2 底泥液限孔隙比  $e_L$  与压缩指数  $C_c$  关系图

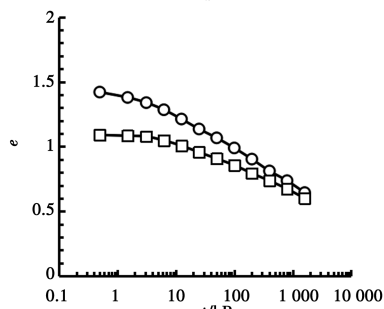
Fig. 2 Compression curves of reconstituted river sediments at same  $e_0/e_L$ .



注:—○—1.72倍液限 —□—0.99倍液限  
(a) 浦东河底泥



注:—○—1.5倍液限 —□—0.96倍液限  
(b) 凤坂河底泥

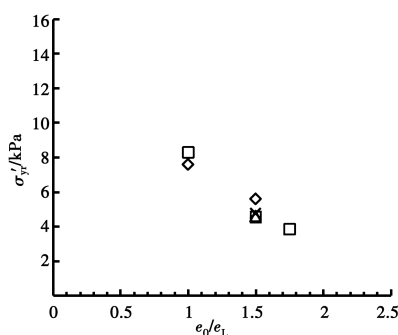


注:—○—1.5倍液限 —□—0.96倍液限  
(c) 七里河底泥

图3 不同初始含水率下底泥压缩曲线

Fig. 3 Effect of initial water content on compression curves of river sediments

重塑土的压缩曲线中存在一个竖向有效应力界限值,超过这一界限值,重塑土的压缩性迅速增大,压缩曲线陡降,这一竖向有效应力的界限值即是重塑屈服应力。重塑屈服应力采用 Butterfield<sup>[22]</sup> 提出的确定方法,压缩曲线在  $\ln(1+e)-\lg \sigma'_v$  双对数坐标下变换为两条直线,这两条直线的交点即为重塑屈服应力。图4是底泥重塑屈服压力与  $e_0/e_L$  的关系图,从图4可以看出,随着底泥初始含水率的增大,底泥的重塑屈服应力减小。Hong 等<sup>[17]</sup> 指出,土的重塑屈服应力与土体的初始孔隙比与液限孔隙比之间的比值  $e_0/e_L$  有关,并提出重塑屈服应力预测公式  $\sigma'_{yr} = 5.66/(e_0/e_L)^2$ 。



注:□浦东河底泥LOI=9.50%  
×凤坂河底泥LOI=3.67%  
△水上公园底泥LOI=10.6%  
◇七里河底泥LOI=3.05%

图4 底泥重塑屈服压力与  $e_0/e_L$  关系图

Fig. 4 The  $e_0/e_L$  effects on remoulded yield stress

## 2.2 有机质含量对河道底泥压缩性状的影响

土中有机质含量变化通常会改变土体的比重以及液限值<sup>[7, 23-24]</sup>。土体的比重  $G_s$  和液限  $w_L$  是直接影响土体液限孔隙比  $e_L$  的两个参数。图5、图6分别为浦东河底泥液限、比重与有机质含量关系图。结果表明,浦东河底泥有机质含量升高引起底泥液限升高、比重降低。土体的液限孔隙比公式为

$$e_L = G_s \times w_L \quad (2)$$

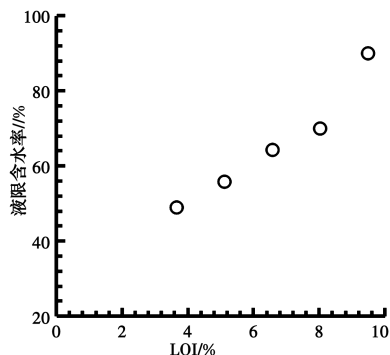


图5 有机质含量与底泥液限含水率关系图

Fig. 5 Organic matter contents effects on  $w_L$

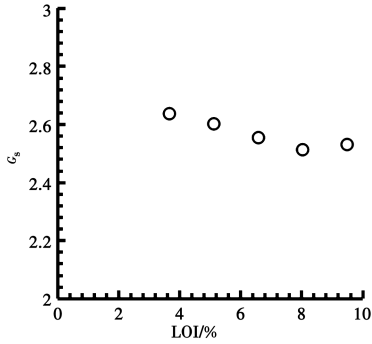


图 6 有机质含量与底泥比重关系图

Fig. 6 Organic matter contents effects on  $G_s$

图 7 为浦东河底泥液限孔隙比  $e_L$  与有机质含量的关系图,试验结果表明,有机质含量升高会导致底泥的液限孔隙比增大。

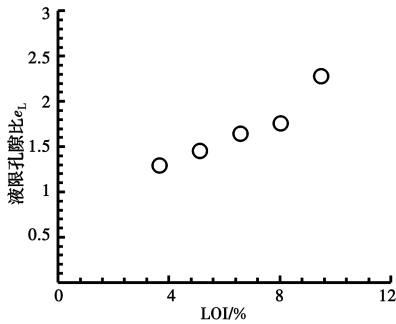


图 7 有机质含量与底泥液限孔隙比  $e_L$  关系图

Fig. 7 Organic matter contents effects on  $e_L$

表 4 为过氧化氢淋洗前后的浦东河底泥的一维固结试验方案,固结试样的初始含水率为 0.98~0.99倍、1.48~1.50 倍和 1.72~1.75 倍液限范围内。

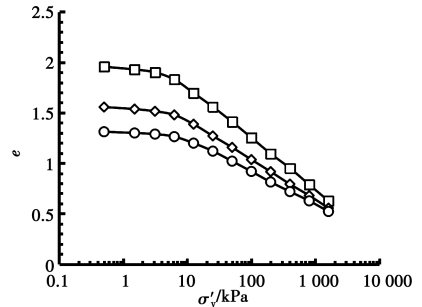
表 4 不同有机质含量浦东河底泥固结试验方案

Table 4 Programme of one-dimensional incremental load

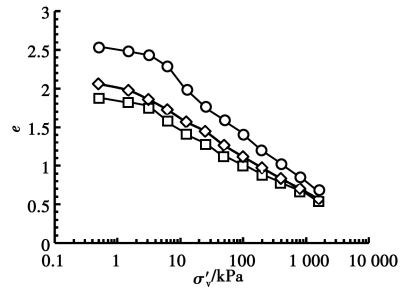
consolidation tests of Pudong river sediments with organic contents

土样	LOI/%	$G_s$	$w_L$ /%	$e_L$	$e_0$	$e_0/e_L$
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	2.25	0.99
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	3.33	1.50
浦东河底泥	9.50	2.53	89.8	2.27	3.90	1.72
浦东过氧化氢淋洗底泥 1#	6.87	2.55	64.2	1.64	1.60	0.98
					2.37	1.48
浦东过氧化氢淋洗底泥 1#	6.87	2.55	64.2	1.64	2.76	1.73
浦东过氧化氢淋洗底泥 2#	3.67	2.63	48.2	1.27	1.34	0.99
					1.96	1.50
浦东过氧化氢淋洗底泥 2#	3.67	2.63	48.2	1.27	2.28	1.75

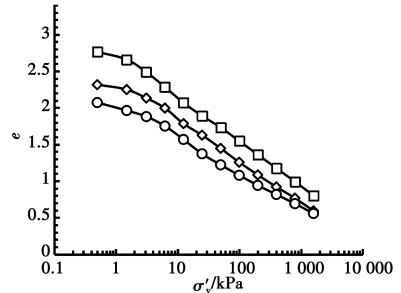
图 8(a)、(b)、(c)分别为过氧化氢淋洗前后浦东河底泥固结土样  $e_0/e_L=0.98\sim 0.99$ 、 $1.48\sim 1.50$  和  $1.72\sim 1.75$  时的压缩曲线  $e-\lg \sigma'_v$ 。不同有机质含量底泥压缩曲线层次上存在明显差异,有机质含量高的底泥的压缩曲线位于有机质含量低的底泥的压缩曲线上方。随着竖向有效应力的增加,有机质含量高的底泥展现了更高的压缩性,各压缩曲线之间的差距减小。李学等<sup>[25]</sup>通过研究固结过程中吹填土的微观特征,并采用模拟试验定量分析有机质对吹填土工程性质的影响,发现在土体固结过程中,100 kPa 和 400 kPa 是土体中有机质结构发生变化的两个特征值,在 100 kPa 竖向压力下黏土颗粒和有机质之间的团聚体稳定性遭到破坏,而在 400 kPa 竖向压力下有机质颗粒发生破坏。因此,在竖向压



(a)  $e_0/e_L=0.98\sim 0.99$



(b)  $e_0/e_L=1.48\sim 1.50$



(c)  $e_0/e_L=1.72\sim 1.75$

注: □—浦东河底泥 LOI=9.50%  
◇—浦东过氧化氢淋洗底泥 1# LOI=6.87%  
○—浦东过氧化氢淋洗底泥 2# LOI=3.67%

图 8 相同  $e_0/e_L$  值不同有机质含量的浦东河底泥压缩曲线

Fig. 8 Effect of organic matter contents on compression

curves of Pudong clay at same  $e_0/e_L$

力较大时,不同有机质含量的底泥压缩曲线逐渐趋于一致。

Zeng 等<sup>[26]</sup>通过人工添加腐殖酸的方式改变土体中有机质含量,并进行了 26 组的一维固结试验。试验结果表明,腐殖酸对土体压缩性质的影响主要是通过改变土体的初始孔隙比  $e_0$  和液限孔隙比  $e_L$  两个物理参数。当  $e_0$  和  $e_L$  相同时,无机土和有机质土的  $e$ - $\lg \sigma'_v$  压缩曲线基本一致。

图 9 为不同有机质含量的浦东河底泥的重塑屈服应力与  $e_0/e_L$  关系图,随着初始含水率增大,重塑屈服应力呈减小趋势。试样的  $e_0/e_L$  比值相同时,底泥的重塑屈服应力基本一致,这表明,有机质含量主要通过改变底泥的初始孔隙比  $e_0$  与液限孔隙比  $e_L$  影响重塑屈服应力  $\sigma'_{vr}$ 。

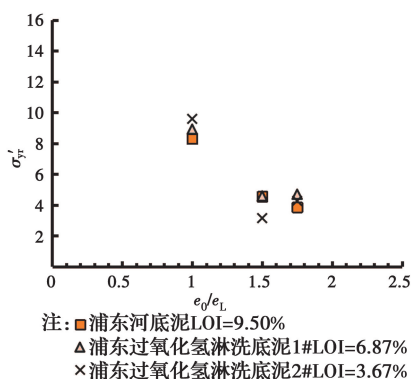


图 9 不同有机质含量浦东河底泥屈服压力与  $e_0/e_L$  关系图  
Fig. 9  $e_0/e_L$  effects on remoulded yield stress of Pudong river sediments with different organic contents

图 10 为浦东河底泥压缩指数与有机质含量关系图。底泥的压缩指数随有机质含量的增大而增大,表明底泥中的有机质含量越高,底泥呈现出越高的压缩性。林琳等<sup>[27]</sup>采用人工添加腐殖酸的方式研究有机质对黑土压缩特性的影响,也得出类似的结论。

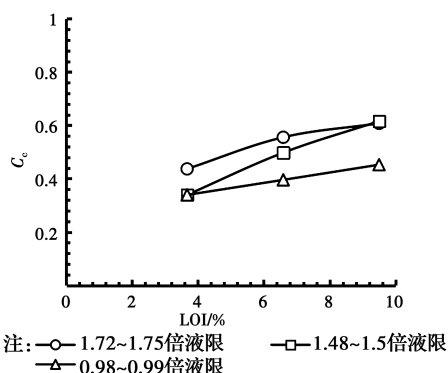


图 10 底泥压缩指数与有机质含量关系图  
Fig. 10 Organic matter contents effects on  $C_e$

### 3 结论

通过对福州晋安区和扬州七里河共 4 条河道底泥的系列压缩试验研究,得出如下主要结论:

1) 在  $e_0/e_L$  值相同的条件下,液限孔隙比  $e_L$  较大的底泥的压缩曲线始终在液限孔隙比  $e_L$  较小的压缩曲线上方,与无机土类似,初始孔隙比  $e_0$  和液限孔隙比  $e_L$  也是分析和评价河道底泥压缩性状的关键控制因素。

2) 在  $e_L$  值相同的条件下,河道底泥初始含水率增加,底泥重塑屈服应力  $\sigma'_{vr}$  减小,压缩指数增大。

3) 底泥有机质含量上升,压缩指数呈现上升趋势,有机质含量增加主要通过影响河道底泥的液限和比重,进而导致河道底泥重塑屈服应力  $\sigma'_{vr}$  和压缩性状发生改变。

#### 参考文献:

- [1] 许炼烽, 邓绍龙, 陈继鑫, 等. 河流底泥污染及其控制与修复[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1708-1715. XU L F, DENG S L, CHEN J X, et al. River sediment pollution and its control and restoration [J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23 (10): 1708-1715. (in Chinese)
- [2] 方盛荣, 徐颖, 路景玲, 等. 螯合剂处理重金属污染底泥的实验研究[J]. 化工学报, 2011, 62(1): 231-236. FANG S R, XU Y, LU J L, et al. Experimental research on chelator for treatment of sediment contaminated by heavy metals [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2011, 62(1): 231-236. (in Chinese)
- [3] 俞亚南, 张仪萍. 杭州西湖疏浚底泥工程性质试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 579-582. YU Y N, ZHANG Y P. Test study on engineering properties of dredging soil of West Lake in Hangzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 579-582. (in Chinese)
- [4] ZENG L L, HONG Z S, GAO Y F. Practical estimation of compression behaviour of dredged clays with three physical parameters [J]. Engineering Geology, 2017, 217: 102-109.
- [5] ZENG L L, HONG Z S, CUI Y J. Time-dependent compression behaviour of dredged clays at high water contents in China [J]. Applied Clay Science, 2016, 123: 320-328.
- [6] HUSEIN M A I, ALAWNEH A S, ABU-SAFQAHA O T. Effects of organic matter on the physical and the

- physicochemical properties of an illitic soil [J]. *Applied Clay Science*, 1999, 14(5/6): 257-278.
- [7] SANTAGATA M, BOBET A, JOHNSTON C T, et al. One-dimensional compression behavior of a soil with high organic matter content [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(1): 1-13.
- [8] MESRI G, AJLOUNI M. Engineering properties of fibrous peats [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (7): 850-866.
- [9] MADASCHI A, GAJO A. One-dimensional response of peaty soils subjected to a wide range of oedometric conditions [J]. *Géotechnique*, 2015, 65(4): 274-286.
- [10] NOORANY I. Phase relations in marine soils [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 110(4): 539-543.
- [11] Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer: ASTM D854-14 [S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [12] Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils; ASTM D2974-07 [S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [13] Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils: ASTM D4318-17e1 [S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- [14] BAVER L D. The effect of organic matter upon several physical properties of soils [J]. *Agronomy Journal*, 1930, 22(8): 703-708.
- [15] SCHMIDT N O. A study of the isolation of organic matter as a variable affecting engineering properties of a soil [D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1965.
- [16] 邓东升, 洪振舜, 刘传俊, 等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 250-253.
- DENG D S, HONG Z S, LIU C J, et al. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 250-253. (in Chinese)
- [17] HONG Z, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents [J]. *Géotechnique*, 2010, 60(9): 691-700.
- [18] ZENG L L, HONG Z S, CAI Y Q, et al. Change of hydraulic conductivity during compression of undisturbed and remolded clays [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 51(1/2): 86-93.
- [19] SKEMPTON A W. The consolidation of clays by gravitational compaction [J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1969, 125: 373-411.
- [20] NAGARAJ T S, MURTHY B R S. Rationalization of Skempton's compressibility equation [J]. *Géotechnique*, 1983, 33(4): 433-443.
- [21] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 329-378.
- [22] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance one-log  $p'$ ) [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(4): 469-480.
- [23] ZENG L L, HONG Z S, WANG C, et al. Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132/133: 660-667.
- [24] ZENTAR R, ABRIAK N, DUBOIS V. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments [J]. *Applied Clay Science*, 2009, 42(3/4): 391-397.
- [25] 李学, 刘治清, 宋晶, 等. 有机质在吹填淤泥固结中的微宏观特征[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10): 28-35.
- LI X, LIU Z Q, SONG J, et al. Micro-macro characteristics of organic matters in dredger fill consolidation [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 28-35. (in Chinese)
- [26] ZENG L L, HONG Z S, GAO Y F. One-dimensional compression behaviour of reconstituted clays with and without humic acid [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 144: 45-53.
- [27] 林琳, 韩少杰, 王恩姮, 等. 有机质与黏粒含量对黑土压缩-回弹特性的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1138-1147.
- LIN L, HAN S J, WANG E H, et al. Effect of organic matter and clay content on compression-rebound characteristics of black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1138-1147. (in Chinese)