

清淤淤泥的固结特性试验研究

周宣兆^a, 朱伟^{a,b,c}, 孙政^a

(河海大学 a. 岩土工程科学研究所; b. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心; c. 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 太湖等湖泊开展清淤工程中产生的清淤淤泥常先放置于堆场, 后经排水固结法处理为土地利用。设计处置方法前需了解淤泥固结特性, 为预估沉降和固结速率提供参数。通过对固结仪进行改进, 在满足对清淤淤泥进行固结试验的条件后, 对3种不同初始含水率的清淤淤泥和1种重塑软土在小固结压力下进行试验, 研究了清淤淤泥的固结特性和规律。结果表明: 小固结压力下, 清淤淤泥的压缩过程可用 $e - \lg p$ 曲线线性描述, 压缩指数与初始含水率线性相关, 清淤淤泥的固结系数随固结压力增加而增加(处于 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 数量级), 变化幅度较小, 渗透系数极低(处于 10^{-7} cm/s 数量级)。

关键词: 清淤淤泥; 固结; 排水; 固结系数; 渗透系数

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0069-04

Experiment on consolidation properties of dredged material

ZHOU Xuanzhao^a, ZHU Wei^{a,b,c}, SUN Zheng^a

(a. Geotechnical Research Institute; b. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety; c. College Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Dredged material generated in sediment cleaning engineering of Tai Lake is usually placed in the storage yard and improved by drainage consolidation method before using in the projects. It is necessary to learn the consolidation properties of dredged material to predict settlement and consolidation rate. After improving the consolidometer, three kinds of dredged material with different initial water contents and one kind of remodeling soft soil were tested under low consolidation pressure to study consolidation properties. Test result shows that compression process of dredged material under low pressure can be described linearly by $e - \lg p$ curve, compression index of dredged material is affected markedly by initial water content. Coefficient of consolidation ascends in small range with the increase of consolidation pressure (about $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$) and coefficient of permeability is quite low (about 10^{-7} cm/s).

Key words: dredged material; consolidation; drainage; coefficient of consolidation; coefficient of permeability

0 引言

为遏制湖泊水质恶化, 湖泊底泥疏浚工程大规模开展^[1], 由此产生大量淤泥。近年来, 苏州、无锡、常州3市共投资20多亿元, 累计清淤量达1.7亿 m^3 ^[2]。疏浚淤泥的常规处理方式堆场处理^[3], 放置在堆场中的淤泥在自然沉积作用下实现泥水分离后进行后续处理^[4]。将堆场转变为土地利用时需要进行地基处理。常用的堆场地基处理方法是固结排水法, 一般有真空预压、堆载预压等方法。通过固结排水法提高堆场的承载力, 使堆场变为可以利用的土地, 在海洋工程中有较多的应用, 天津新港东突堤陆域工程, 广州南沙港陆域工程, 物流保税区工

程与南沙港区一期工程^[5-8]中采用固结排水法处理吹填淤泥都取得了成功。排水固结法设计时应综合考虑荷载大小、地基土性质、工期要求, 合理安排排水系统和加压系统, 使土体排水固结, 还需计算固结过程中地基土的固结度、沉降^[9]。显然, 应用固结排水法处理淤泥时, 其性质直接影响固结速率和沉降量, 设计前需通过固结试验获取合理的参数^[9]。

由于湖泊底部的底泥在清淤工程中经过机械扰动, 一般会成为浓度为15%~20%的泥浆, 这些泥浆经过在堆场内沉淀、沉积后形成了清淤淤泥。淤泥含水率非常高(液限的1.2~2.0倍), 呈流动状态, 几乎没有强度^[10]。因此, 常规的固结试验仪也无法测定其固结特性。对清淤淤泥进行固结排水施

收稿日期: 2012-11-21; 修回日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979028); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005)

作者简介: 周宣兆(1988-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向: 从事环境岩土工程。

工时难以通过固结参数对其效果进行预测。

基于这种工程需求,对现有固结仪进行改进。在将初始荷载减低到 3.125 kPa,并将加压板改为轻质传压板,解决了初始荷载的挤出问题。使用改造后的固结仪对太湖清淤产生的堆场淤泥进行了固结试验,为预估淤泥的变形量和固结速率提供相应的参数,指导固结排水工程的设计和施工。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

淤泥取自太湖梅梁湾白旆堆场,考虑到清淤淤泥的含水率多为液限的 1.2~2.0 倍,从取自堆场中的清淤淤泥泥样中选取级配较为近似,初始含水率为 89%、104%、118% 的泥样进行固结试验,将初始含水率为 89% 的淤泥晾晒搅拌,待含水率均匀降至 43% 时,制成重塑黏土试样,进行固结试验,与淤泥进行对比。试验用泥的基本物理性质指标见表 1。

表 1 试验用淤泥的物理性质指标 % , g/cm³

初始含水率	密度 ^①	液限	塑限	比重 ^②	粘粒	有机质
43	1.71	59.0	28.3	2.67	22.5	4.5
89	1.59	58.5	28.2	2.68	22.3	4.8
104	1.50	58.8	28.0	2.67	22.6	4.7
118	1.44	58.6	28.0	2.67	22.4	4.6

注:①为泥的密度,②为淤泥颗粒的比重。

1.2 试验方法

根据《土工试验规程》^[11],试样含水量测定采用烘箱在 105℃ 的恒温下烘至恒量,比重采用比重瓶法进行测定,有机质含量的测定采用灼烧法(温度控制在 600℃,灼烧至恒量)。由测定的物理性质指标可以推算,高含水率淤泥处于饱和状态,制样时直接分层填入固结容器,重塑土试样在装样后采用真空抽气饱和和法饱和。

由于淤泥含水率高,采用常规固结仪试验会导致淤泥从侧壁缝隙挤出,为了避免该问题,对常规固结仪进行了改进,减小了初级荷载值,加压板改为轻质传压板,代替传统的加压上盖,避免淤泥突然受到较大压力而挤出。考虑淤泥初始孔隙比高、固结沉降量大的特点,改变环刀高度为 4cm。固结容器底部密封,试样在单面排水条件下固结。本文选取重塑土和 3 种不同初始含水率的试样进行固结试验,采用大小为 3.125,6.25,12.5,25kPa 的固结压力逐级加载,荷载率为 1。配置数据采集系统记录沉降量(改进后仪器如图 1),以试样变形每小时不大于

0.005 mm 为稳定标准,研究小固结压力作用下,不同初始含水率清淤淤泥的压缩固结特性。

实验室内安装保持室温恒定的空调系统,避免试验过程中温度变化影响孔压测定。

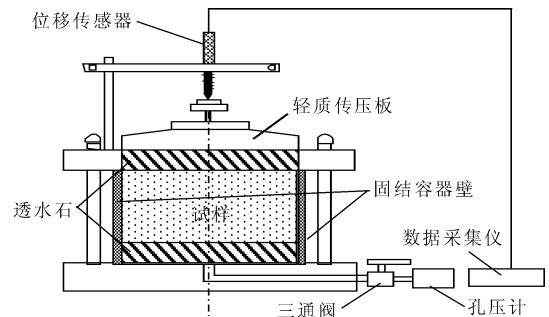


图 1 改进固结仪示意图

2 试验结果与分析

2.1 压缩特性

固结试验测得每级荷载下的沉降量,固结压力相同时,淤泥和重塑黏土的压缩特性存在显著差别,为了表达试样间的差异,取固结压力为 3.125 kPa 和 25 kPa 下的沉降曲线制成图 2。如图 2(a) 所示,在第一级荷载(3.125 kPa)的作用下,重塑土最先沉降稳定,初始含水率越高,淤泥沉降稳定所需时间越长;重塑土的应变量为 2% 左右,淤泥的累计应变量为 8.6%~9.5% 之间,达到重塑土的 4 倍以上。随着固结应力的增加,淤泥始终保持高压缩性,如图 2(b) 所示,在第四级荷载(25 kPa)的作用下,重塑土的累计应变量为 6%,淤泥的累计应变量为 25%~32%,为重塑土的 5 倍以上。

根据试验结果,将试样在不同固结压力下固结时的体积压缩系数整理成表 2,可以看出,相同荷载作用下,淤泥的体积压缩系数远大于重塑土。淤泥的体积压缩系数随固结压力的增加而急剧降低,第四级和第一级荷载作用下的体积压缩系数之比为 27% 左右,说明四级荷载作用后淤泥的压缩性有效降低。

表 2 体积压缩系数随固结压力的变化 MPa⁻¹, kPa

试样	固结压力			
	0~3.125	3.125~6.25	6.25~12.5	12.5~25
重塑土	6.3	3.0	1.8	1.4
89% ^①	28.0	15.5	12.8	7.5
104% ^②	29.4	23.2	13.2	8.2
118% ^③	32.6	29.6	15.5	9.0

注:① ② ③代表初始含水率为该值的淤泥样。

为了更全面地了解淤泥的压缩特性,将固结试

验的结果整理为 $e - \lg p$ 曲线,见图 3,对结果进行拟合,发现淤泥和重塑土的 $e - \lg p$ 曲线近似为一直线。受应力历史对压缩性的影响,一般软黏土的 $e - \lg p$ 曲线在低压力时平缓,压力增大时变陡,成为一条斜直线。

曲线会随扰动程度加大而平缓。与一般软黏土不同,淤泥和重塑土 $e - \lg p$ 曲线呈直线状,由于机

械搅拌、扰动,消除了应力历史的影响,淤泥的压缩过程与正常固结重塑土相似。

拟合数据得到如下公式:

$$e = -C_c \lg p + e_0 \quad (1)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; C_c 为压缩系数, $e - \lg p$ 曲线上直线段的斜率。

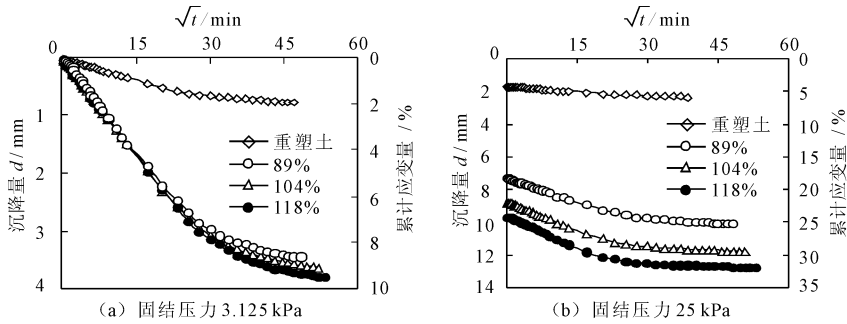


图 2 固结沉降随时间的变化

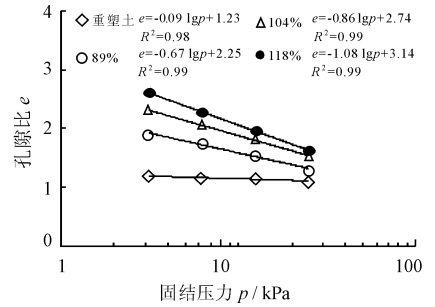


图 3 孔隙比与固结压力的关系

从图 3 中可以看出,淤泥的压缩指数为重塑土的 7.4 ~ 12 倍,初始含水率越大压缩指数越高。经四级荷载作用后,孔隙比显著降低,初始含水率为 89%、104%、118% 的淤泥的孔隙比由初始状态的 2.2、2.7、3.1 分别降至 1.3、1.5、1.6,孔隙比趋于一致,说明应用固结排水法处理高含水率清淤淤泥的有效性。

不同初始含水率淤泥与重塑土的级配相近,两者的区别主要在于初始含水率不同。如图 4 所示,试样的初始含水率与其压缩指数呈良好的线性关系,拟合关系式为 $C_c = 0.0131w - 0.4792$,初始含水率越高,对应的初始孔隙比越大,压缩指数越大,初始含水率对淤泥的压缩特性影响显著。

2.2 固结及渗透特性

固结系数是进行固结排水法设计时的重要参数,是反映土体性质的指标。国内外学者提出了很多确定固结系数的方法,最常用的是时间平方根法。

为了进一步了解淤泥固结排水过程,根据试验得到的沉降量与时间均根关系曲线,采用时间平方根法,整理试验得到的淤泥和重塑土的固结系数,得到图 5 所示的 $C_v - P$ 曲线。重塑土和淤泥的固结系数都随固

结压力的增加而增加;在相同荷载作用下,重塑土的固结系数总大于淤泥。固结压力相同时,初始含水率越高,淤泥的固结系数越低,淤泥的固结系数在 $1.7 \times 10^{-4} \sim 2.14 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 范围内变化,变化幅度较小。

根据固结系数的表达式,利用 $k = \frac{C_v \gamma_w}{1 + e}$ 计算

每级荷载下平均渗透系数,如图 6 所示,重塑土和淤泥的渗透系数分别在 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ 、 10^{-7} cm/s 数量级上变化。逐级加载过程中,淤泥的渗透系数始终大于重塑土,两者的渗透系数随固结压力的增加而减小。第一级荷载作用下,不同初始含水率淤泥的渗透系数较接近,第二级荷载作用下,淤泥的初始含水率越高,渗透系数的降幅越大。在第三级荷载作用下,初始含水率为 104%、118% 淤泥的渗透系数的降幅依然较大,而初始含水率为 89% 的淤泥变化很小,不同初始含水率淤泥的渗透系数较为接近,第四级压力作用下,淤泥渗透系数的变化幅度趋于一致。前两级荷载作用下,重塑土的渗透系数显著降低,后两级荷载作用下,渗透系数变化幅度较小。

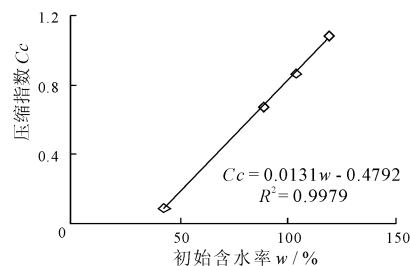


图 4 压缩指数与初始含水率的关系

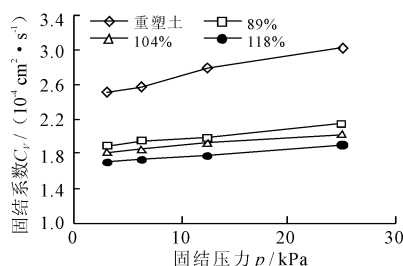


图 5 固结系数与固结压力的关系

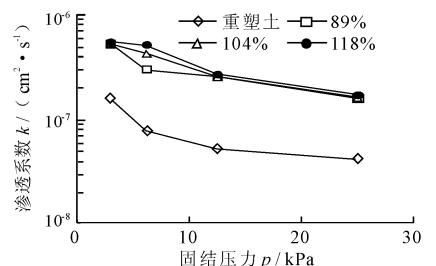


图 6 渗透系数与固结压力的关系

3 讨论

重塑土和淤泥固结渗透规律的差异:清淤淤泥和重塑土都表现出极低的渗透性,在 3.125 kPa 荷载作用下,不同初始含水率淤泥的渗透系数较接近,且都大于重塑土的渗透系数,这是由于机械扰动及高含水率,清淤淤泥的微结构以紊流状和粒状镶嵌结构为主,并发育有大裂隙和微层理以及由粘粒和粉粒及粉砂交叉淤积而成的带状结构^[12],表现出明显的大孔隙架空结构,孤立孔隙虽直径较大,数量少,连通性差^[13],固结时,清淤淤泥中的孤立孔隙在固结压力作用下逐渐靠近,自由水排出时受孔隙的束缚和影响较小,受固结压力影响较大,孔隙中的自由水在固结压力作用下被“挤出”,而非严格地以渗流方式排出,相比重塑土中自由水以渗流方式排出相比,排水相对容易,故在第一级荷载作用下,不同初始含水率淤泥的渗透系数较为接近,淤泥的渗透系数大于重塑土。

后续荷载作用下,清淤淤泥的结构逐渐变致密,形成稳定骨架,淤泥中自由水在孔隙中以渗流方式排出,其结构相比重塑土较为疏松,水分较易排出,故在相同固结压力下淤泥的渗透系数大于重塑土。

重塑土和疏浚淤泥的固结系数随固结压力的增加而增加,与吕永高和杨建林^[14]得出的高压压缩性土,压力越大,固结系数越大的结论及林鹏等^[15]研究得出的正常固结软土在小应力范围内,固结系数随应力水平的增加而增加,大应力范围内,固结系数随应力水平的增加而减小的规律相符,这说明重塑土和清淤淤泥与正常固结软土在不同应力水平下固结系数的变化规律相似。

根据固结系数的定义,固结系数与渗透系数及体积压缩系数有关,在相同固结应力下,虽然重塑土的渗透系数小于淤泥,但体积压缩系数远小于淤泥,故在相同荷载下,重塑土的固结系数大于清淤淤泥。

4 结语

(1)清淤淤泥具有极大的压缩性,压缩指数处于 0.67~1.08 之间,压缩过程能够用 $e - \lg p$ 曲线线性描述,压缩指数与初始含水率呈线性关系。不同初始含水率的淤泥经四级荷载作用后,孔隙比之间的差距明显缩小。

(2)小固结压力下,清淤淤泥的固结系数随固结压力的增加而增加,固结系数分布在 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 数量级上,变化幅度较小。相同固结压力下,初始含

水率越高,固结系数越低。

(3)小固结压力下,清淤淤泥的渗透系数分布在 10^{-7} cm/s 数量级上,表现出极低的渗透性,固结压力越高,渗透系数越低,设计时应根据该特点合理布置排水通道,保证排水速率。

(4)通过小固结压力下高含水率清淤淤泥的固结特性试验,探究了反映固结特性的参数与固结压力和初始含水率的关系。在设计应用固结排水法处理清淤淤泥的方案时,为预估淤泥的变形量和固结速率提供参考。

参考文献:

- [1] 郑金秀,胡春华,彭祺. 底泥生态疏浚研究概况[J]. 环境科学与技术,2007,30(4):111-114.
- [2] 水利部太湖流域管理局. 太湖污染底泥疏浚规划总报告[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2007.
- [3] Carrier W D I, Bromwell L G, Somogyi F. Design capacity of slurrified mineral waste ponds[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983, 109(5): 699-716.
- [4] 张成良,洪振舜,邓永锋. 淤泥吹填处理及其研究进展[J]. 路基工程,2007,(1):12-14.
- [5] 叶柏荣,王兆龙. 新吹填地基的加固方法[J]. 港口工程,1990(4):28-32.
- [6] 刘兵,蔡南树,艾英钵. 大面积吹填软土地基真空预压施工工艺[J]. 水运工程,2006(9):73-76.
- [7] 郭全元. 吹填土真空预压工程实例分析[J]. 铁道勘察,2006(3):48-50.
- [8] 董志良,胡利文. 南沙港区陆域吹填工程真空预压软基处理应用技术及加固效果分析[C]//. 第六届全国工程排水与加固技术研讨会论文集. 北京:人民交通出版社,2005:16-24.
- [9] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [10] 朱伟,张春雷,高玉峰,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [12] 钱征. 天津新港软土的一些工程特性[C]//. 天津软土地基. 天津:天津科学技术出版社,1987.
- [13] 文海家,严春风,汪东云. 吹填软土的工程特性研究[J]. 重庆建筑大学学报,1999,21(2):79-83.
- [14] 吕永高,杨建林. 不同竖向荷载作用下低、中、高压压缩性土固结系数大小的统计分析[J]. 岩土工程界,2002(9):63-64.
- [15] 林鹏,许镇鸿,徐鹏,等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学,2003,24(1):106-108.