

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.011

初始含水率对白马湖疏浚淤泥透气真空排水效果的影响

陆志浩^{1,2}, 周源^{1,2}, 张莹^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对不同疏浚工艺造成的疏浚淤泥初始含水率不同以及新疏浚淤泥含水率在短时间内呈现较大变化的实际工程情况, 为探究初始含水率对疏浚淤泥真空排水效果的影响, 对白马湖疏浚淤泥进行了不同初始含水率的淤泥透气真空排水室内模型试验。结果表明: (a) 淤泥的初始含水率越高, 真空促排作用产生的表面水越多, 相同时间内淤泥促排含水率下降量越大, 淤泥的排水效果越好; 淤泥的真空排水过程可分为3个阶段, 即快速排水阶段、稳定排水阶段以及缓慢排水阶段。(b) 淤泥的初始含水率越高, 淤泥进入缓慢排水阶段的时间越短, 淤泥的真空排水周期也越短; 淤泥的初始含水率越高, 淤泥的含水率降低量越大, 含水率降低过程越缓慢。

关键词: 疏浚淤泥; 初始含水率; 真空排水; 白马湖

中图分类号: TU411.99 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2014)01-0057-05

Impact of initial moisture content on aeration vacuum drainage of dredged sludge in Baima Lake

LU Zhihao^{1,2}, ZHOU Yuan^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In practical projects, different dredging processes cause different initial moisture contents and the moisture content of the newly dredged sludge shows large changes over a short time. In order to study the impact of the initial moisture content on the effects of the vacuum drainage of the dredged sludge in Baima Lake, an indoor simulation experiment was carried out on the vacuum drainage of the sludge with different initial moisture contents. The results show the following: (a) With a higher initial moisture content of the sludge, there is more surface water produced by the vacuum drainage, the moisture content decreases more over the same period of time, and sludge drainage is more effective. The sludge drainage process can be divided into three stages: the fast drainage stage, the stable drainage stage, and the slow drainage stage. (b) With a higher initial moisture content of the sludge, the sludge needs less time to reach the slow drainage stage, the vacuum drainage of the sludge occurs over a shorter period, the moisture content of the sludge decreases more, and the moisture content of the sludge decreases at a slower rate.

Key words: dredged sludge; initial moisture content; vacuum drainage; Baima Lake

内陆湖泊及航道清淤时会产生大量的疏浚淤泥,我国目前最常用的处理方法是设置淤泥堆场进行放置^[1],由此会带来占地广、难处理等一系列问题。解决这些问题的关键在于如何在短时间里排出淤泥中大量的水分。处理堆场疏浚淤泥主要有以下几种方法:机械脱水法,自然风干法,电渗法以及真空预压法。黎荣等^[2]试验表明机械脱水以及自然风干法处理疏浚淤泥存在局限;陈雄峰等^[3]试验表明电渗法处理淤泥有

效果,但不经济。真空预压法是一种有效的排水固结方法^[4-7],Novak 等^[8]、Bouwer 等^[9]认为若要提高泥水分离效果,需要寻求适合的渗流梯度范围;Palmeira 等^[10]、Barrington 等^[11]研究了滤层材料对淤泥真空排水的影响;Haegeman 等^[12]通过试验证明了用真空抽水固结方法处理疏浚淤泥的有效性。透气真空快速泥水分离^[13]是一种能够快速降低疏浚淤泥含水率的新型技术,刘传俊等^[14]和吉锋^[15]的研究表明该技术能够克服一般装置在高黏粒高含水率淤泥抽水时遇到的淤堵问题。但在实际工程中,由于不同疏浚工艺造成疏浚淤泥的初始含水率不尽相同,新疏浚出来的淤泥初始含水率在短时间内会呈现较大的变化^[16],因此,研究初始含水率对于疏浚淤泥真空排水效果的影响显得尤为重要。

基于以上考虑,以白马湖疏浚淤泥堆场的疏浚淤泥为例,进行不同初始含水率的淤泥透气真空排水室内模型试验,同时分析初始含水率对淤泥真空排水效果的影响。

1 试验方法

室内试验以南水北调江苏段疏浚工程为依托,采用的疏浚淤泥取自南水北调东线江苏段淮安白马湖疏浚堆场。采用自行研制的双球阀透气真空快速泥水分离试验装置,利用透气装置的球阀开启度来调节装置内的真空负压和透气速率,在气流和真空负压的作用下,高含水率疏浚淤泥内部的孔隙水通过装置中的滤水管道流出,从而实现泥水分离。

1.1 试验用泥基本物理性质

参考 JTG E40—2007《公路土工试验规程》,通过试验得到淤泥的基本物理性质指标如下:液限为 72.2%,塑限为 35.3%,密度为 2.73 g/cm³;淤泥中砂粒质量分数为 15.0%,粉粒质量分数为 52.6%,黏粒质量分数为 32.4%。

1.2 试验装置

试验装置由真空泵、饱和缸、试验槽、滤管、量测仪器(真空表、流量计、电子秤和标准卡尺)以及一些连接管道组成,如图 1 所示。

1.3 试验方案

为了探究不同的初始含水率对淤泥真空排水的影响,设计调制了 4 组不同初始含水率的淤泥试样,设计目标的初始含水率分别为 2 倍液限、2.5 倍液限、3 倍液限、3.5 倍液限(见表 1),同时保持 4 组试验中淤泥的真空度为 20 kPa 和透气速率为 0.5 m³/h,并以此进行淤泥真空排水试验。试验过程中对饱和缸的抽水量、水面高程、泥面高程分别进行记录。其中抽水量是指抽真空作用下从淤泥里排出水分的质量,水面高度变化反映的是淤泥促排作用产生的表面水的变化,泥面高度的变化则反映淤泥体积的变化,而淤泥体积的变化等于真空抽水量与表面促排水量的总和。

试验的终止标准为连续 3 d 的含水率变化都在 0.5% 之内。根据试验测得的数据,可以换算得到淤泥的含水率,表达式为

$$w_t = w_0 - \frac{(1 + w_0)m_{抽}}{\rho_0 V_0}$$

式中: w_0 ——初始时刻淤泥的含水率; w_t ——淤泥任意时刻的含水率; ρ_0 ——试验淤泥的初始密度; V_0 ——淤泥的初始体积; $m_{抽}$ ——任意时刻饱和缸抽水质量。

2 试验结果分析

评价真空排水的效果主要有以下几个方面:泥面沉降量,淤泥的表面排水量,累计抽水量,含水率的变化,最终含水率等。其中泥面沉降量是指初始泥面高程与任意时刻泥面高程的差值,累计抽水量可以从试验

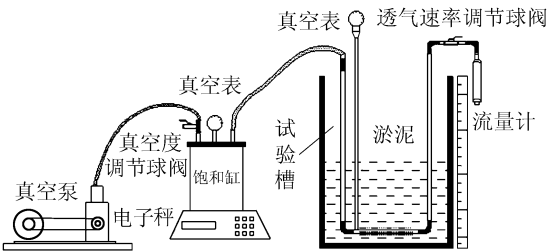


图 1 透气真空快速泥水分离装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of rapid sludge de-watering with aeration-vacuum device

表 1 实配初始含水率与理想初始含水率
Table 1 Actual initial moisture content and ideal initial moisture content

理想初始含水率/%	实配初始含水率/%	对应的液限倍数
144.4	158.6	2.0
180.5	186.1	2.5
216.6	213.5	3.0
252.7	238.8	3.5

结果中直接读取,含水率的变化以及最终含水率可以根据累计抽水量求得(本次试验中模型槽的表面用塑料薄膜进行了密封处理,因此没有考虑蒸发量与流失量的影响),能够间接反映淤泥的抽水效果;透气真空淤泥排水路径分为表面排水和真空泵抽水。研究表明^[17-18],在同样的试验条件下,透气真空快速泥水分离与自然静置泥水分离相比,对于降低总体含水率的贡献而言,无论是真空泵抽水效果还是表面排水效果,都是前者好于后者。在本次试验中,淤泥表面排水包含了其自然沉降产生的表面水,在与真空泵抽水的联合作用下具有更好的排水效果。

2.1 初始含水率对泥面沉降的影响

图 2 结果表明:随着淤泥初始含水率的增大,淤泥的泥面沉降量越大;4 组试验中淤泥的泥面沉降速率随着时间的变化都存在一个由急变缓的过程;随着初始含水率的增大,淤泥的沉降速率越大,其沉降趋于稳定的时间也越短。同时对比图中较低液限倍数(2 倍、2.5 倍)的淤泥与较高液限倍数(3 倍、3.5 倍)的淤泥的沉降曲线可以发现,低液限倍数初始含水率的淤泥沉降曲线较平缓,其原因在于此时淤泥中土颗粒含量较高,孔隙率较低,土颗粒之间骨架基本能够形成,沉降过程中其变化规律基本类似于固结沉降。高液限初始含水率的淤泥沉降曲线则显现出 3 个阶段不同的变化规律,起始阶段曲线下滑较明显,中间阶段由急向缓均匀变化,最终阶段曲线平缓变化。显现如此变化的原因在于初始阶段淤泥的初始含水率较高,淤泥中土颗粒的质量浓度较低,土颗粒处于松散状态,沉降过程主要以土体的自然沉降为主导;在中间变化阶段,淤泥在真空排水的催化作用下加速了其自然沉降,原来松散的土颗粒能够相互接触并凝结成絮团,小的絮团在相互接触后又结成大的絮团并最终形成骨架结构,沉降过程转变为自然沉降与固结沉降共同作用;最终沉降阶段,土体自然沉降作用基本完成,土颗粒之间已经形成致密的骨架结构,其沉降规律转变为以固结沉降为主。

2.2 初始含水率对累计抽水量的影响

图3结果表明:淤泥初始含水率越高,相同时间内淤泥的抽水量越大,淤泥达到缓慢排水状态的时间越短。

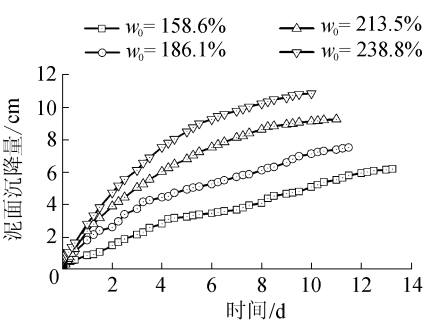


图 2 淤泥泥面沉降曲线

Fig. 2 Subsidence curves of sludge's surface

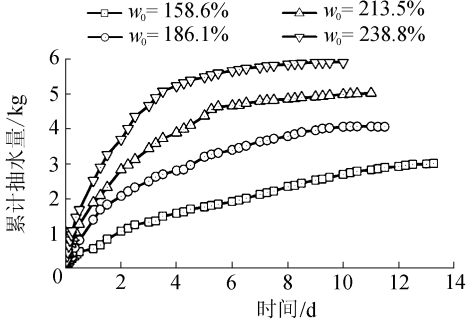


图 3 淤泥累计抽水量变化曲线

Fig. 3 Variation of sludge's cumulative pumping amount

2.3 初始含水率对含水率变化的影响

将试验得到的抽水量代入含水率换算公式中,可以得到不同初始含水率淤泥的含水率变化曲线(图 4)。从图 4 可以看出,淤泥的初始含水率越高,淤泥的含水率下降量越大,进入稳定状态的时间就越短;整个试验周期内,任意时刻不同初始含水率淤泥的含水率大小关系与其初始时刻含水率大小关系保持一致。

2.4 初始含水率对最终含水率的影响

考虑到试验终止含水率往往不能代表试验的最终含水率,为此,结合已有的测量数据建立含水率变化数学模型并确定试验中最终含水率的大小。

通过对累计抽水量以及含水率变化曲线进行分析,可以得到淤泥的平均排水速率变化曲线(图 5)。从图 5 可以发现,4 条曲线变化规律类似:淤泥平均排水速率在试验开始时较大,一段时间后进入稳定下降阶段,最后基本处于稳定状态且变化很小。因此,淤泥含水率变化曲线可以分为 3 个阶段,即快速排水阶段、稳定排水阶段和缓慢排水阶段,3 个阶段将每条曲线各自分为 3 个部分、2 个拐点。由于抽水量和含水率的变

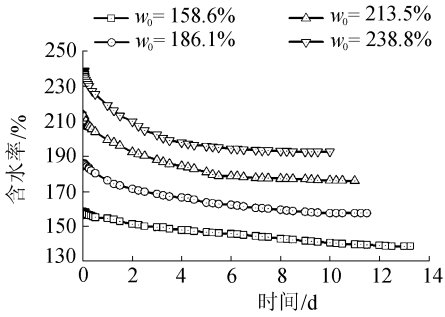


图 4 淤泥含水率变化曲线

Fig. 4 Variation of sludge's moisture content

化都是以时间的变化为基准的,所以拐点与时间存在着一定的函数关系。综合以上考虑,根据函数 $y = A_1 \exp(-x/t_1) + A_2 \exp(-x/t_2) + B$ 建立含水率变化数学模型如下:

$$w_t = A_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) + w_\infty \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 ——与2个拐点相对应的时刻; A_1 、 A_2 ——与时间相关的系数; w_∞ ——最终含水率,在 t 趋向于无穷大时代入公式求得。

用含水率变化数学模型分别对4组不同初始含水率淤泥含水率变化曲线进行拟合,可以得到相应的 T_1 、 T_2 和 w_∞ ,见表2。

对于曲线拟合来说,相关系数能够较真实地反映其拟合效果的优劣。分析不同初始含水率淤泥的拟合相关系数 r 可以发现,其相关度都在0.99以上,模型曲线与实际试验数据拟合较好,淤泥含水率变化数学模型能够很好地反映实际试验结果。

进一步分析不同初始含水率的淤泥可以发现,标志着进入缓慢排水阶段的 T_2 随着初始含水率的增大而相应缩小,说明初始含水率越大,淤泥进入缓慢排水阶段的时间越短,淤泥的排水周期也越短,淤泥的含水率降低量越大。在此基础上对不同初始含水率的淤泥分别进行考虑,将任一时刻该淤泥的含水率降低量与其总的含水率降低量相比,可以得到该淤泥的含水率降低率变化曲线(图6)。从图6可以看出,对于不同初始含水率的淤泥,初始含水率越低其排水周期越长,含水率降低越缓慢。

从图5可以发现,淤泥初始含水率越高,淤泥的排水速率越快;从图6可以发现,淤泥初始含水率越高,淤泥的含水率降低率越大。对于实际疏浚淤泥堆场,根据初始含水率可以分为较高初始含水率淤泥区和较低初始含水率淤泥区,考虑到不同初始含水率淤泥的排水特性不同,在淤泥排水过程中,建议在满足施工要求时先从较高初始含水率淤泥区域开始排水,再逐渐过渡到较低初始含水率淤泥区域进行排水,这样可以最大限度地节约淤泥排水时间,降低处理成本。

3 结 论

- a. 淤泥的初始含水率越高,淤泥的泥面沉降量越大,沉降速率越快,淤泥沉降趋于稳定的时间也越短;低液限初始含水率的淤泥沉降过程主要以固结沉降为主,高液限初始含水率的淤泥沉降过程伴随着由自然沉降向固结沉降转变的过程。
- b. 淤泥的初始含水率越高,真空促排作用得到的表面水越多,相同时间内真空促排导致的含水率下降量越大,淤泥表面排水达到稳定的时间越短,淤泥的排水效果越好。
- c. 淤泥的真空排水可以分为3个阶段:快速排水阶段、稳定排水阶段、缓慢排水阶段。淤泥的初始含水率越高,淤泥进入缓慢排水阶段的时间就越短,淤泥的含水率降低量越大,含水率降低得越缓慢。
- d. 对于实际工程淤泥排水,在满足施工要求时建议先从较高初始含水率淤泥区域开始排水,可以最大限度地节约淤泥排水时间,降低处理成本。

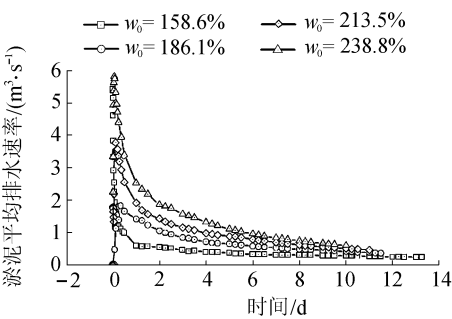


图5 淤泥平均排水速率变化曲线

Fig. 5 Variation of sludge's average drainage rate

表2 不同初始含水率淤泥含水率变化拟合曲线分析结果

Table 2 Analysis of fitting curves for variation of moisture content of sludge with different initial moisture contents

$w_0/\%$	T_1	T_2	$w_\infty/\%$	含水率降低率/%	相关系数 r
158.6	0.76	13.87	137.8	20.8	0.9989
186.1	0.65	5.42	156.1	30.0	0.9983
213.5	0.15	2.97	174.9	38.6	0.9989
238.8	1.91	1.91	191.5	47.3	0.9972

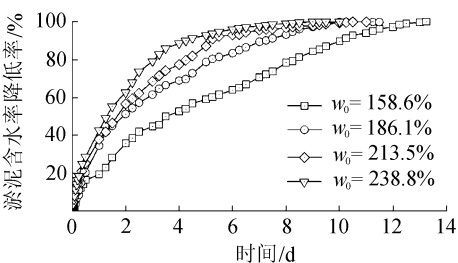


图6 淤泥含水率降低率变化曲线

Fig. 6 Variation of reduction rate of moisture content of sludge

参考文献:

- [1] 冉光兴, 曹卉, 李巍. 东钱湖底泥环境特征与疏浚方案[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 73-76. (RAN Guangxing, CAO Hui, LI Wei. Environmental characteristics and dredging scheme for sediment of Dongqian Lake[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 73-76. (in Chinese))
- [2] 黎荣, 赵新华, 从月宾, 等. 城市河道环保疏浚的试验研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(5): 19-24. (LI Rong, ZHAO Xinhua, CONG Yuebin, et al. Experimental study on environment dredging of a city river[J]. Water Resources and Hydropower Engineer, 2004, 35(5): 19-24. (in Chinese))
- [3] 陈雄峰, 荆一凤, 吕鑑, 等. 电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 54-58. (CHEN Xiong-feng, JING Yi-feng, LYU Jian, et al. The research of environmental dredged sludge dewatering in Taihu Lake by electro-osmotic[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5): 54-58. (in Chinese))
- [4] 陈环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(5): 39-47. (CHEN Huan, BAO Xiuqing. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(5): 39-47. (in Chinese))
- [5] 闫澍旺, 陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 35-44. (YAN Shuwang, CHEN Huan. Mechanism and calculation methods of vacuum stabilization of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 35-44. (in Chinese))
- [6] 沈珠江, 陆舜英. 软土地基真空排水预压的固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(3): 7-15. (SHEN Zhujiang, LU Shunying. Analysis of consolidation and deformation of soft subsoil under vacuum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(3): 7-15. (in Chinese))
- [7] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 45-55. (GAO Zhiyi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45-55. (in Chinese))
- [8] NOVAK J T, AGERBÆK M L, SØRENSEN B L, et al. Conditioning, filtering, and expressing waste activated sludge[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1999, 125(9): 816-824.
- [9] BOUWER H, RICE R C. Effect of water depth in groundwater recharge basins on infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1989, 115(4): 556-567.
- [10] PALMEIRA E M, GARDONI M G. The influence of partial clogging and pressure on the behavior of geotextiles in drainage systems[J]. Geosynthetics International, 2000, 7(4/5/6): 403-431.
- [11] BARRINGTON S F, EL-MOUEDDEB K, JAZESTANI J, et al. The clogging of nonwoven geotextiles with cattle manure slurries [J]. Geosynthetics International, 1998, 5(3): 309-325.
- [12] HAEGEMAN W, VAN IMPE W F. Filtration performance testing of geotextiles for vacuum consolidation drains [J]. Geosynthetics International, 1999, 6(1): 41-51.
- [13] 邓东升, 洪振舜, 朱伟, 等. 高含水量疏浚淤泥堆场透气真空快速泥水分离方法: 中国, 2007101320929 [P]. 2007-09-11.
- [14] 刘传俊. 白马湖疏浚淤泥透气真空快速泥水分离试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [15] 吉锋. 白马湖疏浚淤泥沉积规律与富裕水抽水试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [16] 汪顺才, 张春雷, 黄英豪, 等. 堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2823-2828. (WANG Shuncai, ZHANG Chunlei, HUANG Yinghao, et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2823-2828. (in Chinese))
- [17] 周源, 高玉峰, 陶辉, 等. 透气真空快速泥水分离技术对淤泥水分的促排作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 3064-3070. (ZHOU Yuan, GAO Yufeng, TAO Hui, et al. Drainage-promotion effect of aeration vacuum rapid mud-water separating technique on dredged sludge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 3064-3070. (in Chinese))
- [18] 曹玉鹏, 吉锋. 吹填淤泥沉积规律室内试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 36-39. (CAO Yupeng, JI Feng. Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 36-39. (in Chinese))