

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.02.009

透气真空排水法对疏浚淤泥表面水的促排作用

周 源^{1,2}, 高玉峰^{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:通过自行研制的模型试验装置, 进行了 16 组不同控制条件下的透气真空排水室内模型试验, 得出了采用透气真空排水法各试验的淤泥试样表面水层厚度. 在相同试验容器内进行相同初始含水率疏浚淤泥的自然静置沉降试验, 对比了自然静置沉降试验与透气真空排水试验的表面水排出率. 结果表明, 透气真空排水试验的表面水层厚度大于自然静置沉降试验中的表面水层厚度, 透气真空排水法能够促进淤泥向上表面排出水分. 通过排水面和淤泥颗粒受力分析, 从颗粒絮凝的“絮凝-断裂”沉降过程以及下部支撑淤泥层的“抽空”效应解释了透气真空排水法促进表面水排出的机理.

关键词:高含水率疏浚淤泥; 透气真空排水; 自然静置; 表面水; 模型试验

中图分类号: TU411.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2010)02-0165-05

我国河流湖泊分布广泛, 内陆江河湖泊的泥沙淤积非常严重. 为了改善水质, 建设港口, 浚深加宽航道, 需要进行大规模的疏浚清淤作业, 不可避免地会产生大量的淤泥. 目前绝大部分内陆疏浚淤泥放置于堆泥场, 废弃于陆地抛填区或低洼地区, 占用了大量的鱼塘或耕田. 疏浚淤泥黏粒含量高、透水性差, 在自然静置自重作用下需要几年甚至更长的时间才能固结^[1-4]. 疏浚淤泥堆放占地浪费了土地资源, 也是我国内陆河流、湖泊治理的制约性问题之一, 其解决的关键是快速排出淤泥中的水分.

疏浚淤泥一般采用堆场自然沉降固结的方法来降低水分, 通过淤泥上表面形成的表面水层来排水, 耗时较长. 采用真空排水固结类方法处理疏浚淤泥的关键问题是保证排水系统的有效性, 这样才能有效地降低淤泥中的水分, 加速固结^[5-6]. 国内很多工程都采用真空排水固结类方法, 但由于疏浚淤泥的黏粒含量一般较高, 进行常规真空排水时, 排水通道很快会被淤堵, 导致疏浚淤泥排水效果很差.

笔者所在的课题组进行了 2 年多室内试验研究^[7], 成功开发出一种快速高效抽取高含水率疏浚淤泥中水的技术——透气真空排水法^[8-10], 解决了高含水率、高黏粒含量的疏浚淤泥真空排水淤堵问题, 保证了排水的效果. 该方法属于真空排水固结法, 其主要措施是向真空管道内通入一定速率的气流, 降低管道中的真空度, 使得滤水界面上有真空度和气流率的共同作用, 以解决滤层材料的淤堵问题.

透气真空排水法不仅能迅速抽出大量的水分, 而且可以使淤泥中的水分迅速向上排出, 形成表面水层. 本文进行了相同试验条件下的透气真空排水与自然静置沉降室内模型试验, 以考察表面水层的增厚情况, 以自然静置沉降法的表面水层厚度作为基准, 衡量了透气真空排水法对表面水形成的促进效果. 通过分析淤泥中固体颗粒的受力情况和絮网断裂变形, 解释了表面水促进排水作用的内在机理.

1 透气真空排水试验

采用可以同时控制真空度和透气速率的透气真空排水室内试验装置进行试验, 试验仪器主要由模型箱、真空泵、饱和缸、流量计、电子秤和镀锌打孔管道构成, 如图 1 所示. 模型箱用来盛放疏浚



图 1 透气真空排水试验装置全貌

Fig. 1 Test devices for aeration vacuum dewatering

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(50879023); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA11Z135); 水利部公益性行业专项(200701045)

作者简介: 周源(1983—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事土动力学和环境岩土研究. E-mail: zdp_1000@hhu.edu.cn

淤泥试样,真空泵、饱和缸以及镀锌管道之间用抗压软管连接,真空度通过镀锌打孔管道传递到淤泥试样中。在镀锌打孔管道外侧包裹一层过滤材料,保护淤泥中土颗粒不流失。饱和缸放置在电子秤上,实时对抽入到饱和缸中的物质质量进行称重,在透气球阀外侧加装可以精确控制气流速率的玻璃转子气体流量计。当真空泵工作时,饱和缸中的空气被抽出,从而产生了真空负压。真空负压通过镀锌打孔管道传递到淤泥试样中,于是淤泥中的水分被抽到饱和缸中,电子秤时刻记录饱和缸的质量。

试验淤泥试样取自南水北调东线工程江苏淮安白马湖疏浚淤泥堆场,其基本物理指标为:初始含水率 240%,液限 60.8%,塑限 26.8%,砂粒组质量分数 7.05%,粉粒组质量分数 58.81%,黏粒组质量分数 34.14%,土粒相对密度 2.56。颗粒分布曲线见图 2,试验参数见表 1。

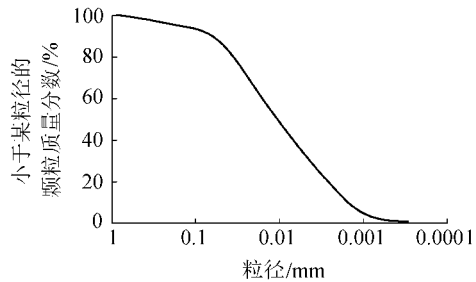


图2 白马湖疏浚淤泥颗分曲线

Fig. 2 Particle size distribution of samples from Baima Lake

表1 透气真空排水试验参数及疏浚淤泥的表面排水情况

Table 1 Conditions of the aeration vacuum dewatering model tests and Thickness increase rate of the surface-water											
试验 编号	真空度/ kPa	透气速率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	初始 含水率/%	表面水层 厚度/cm	提高率/%	试验 编号	真空度/ kPa	透气速率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	初始 含水率/%	表面水层 厚度/cm	提高率/%
1	15	0.5	240	7.0	59.09	9	35	2.0	240	5.9	34.09
2	15	1.0	240	8.0	81.82	10	15	1.5	240	6.7	52.27
3	15	2.0	240	5.0	13.64	11	25	1.5	240	9.3	111.36
4	25	0.5	240	8.2	86.36	12	35	1.5	240	7.5	70.45
5	25	1.0	240	9.1	106.82	13	45	0.5	240	5.9	34.09
6	25	2.0	240	5.9	34.09	14	45	1.0	240	6.3	43.18
7	35	0.5	240	6.7	52.27	15	45	1.5	240	6.9	56.82
8	35	1.0	240	7.1	61.36	16	45	2.0	240	5.2	18.18

透气真空排水试验周期为 7 d,在试验过程结束后记录模型箱内表面水层厚度的变化,见表 1。

2 自然静置沉降试验

自然静置沉降试验采用相同的模型箱和相同初始含水率的淤泥试样进行试验,经过 7 d 后,测量表面水层的厚度为 4.4 cm,以此作为透气真空排水试验下表面水层厚度的对照基准。透气真空排水试验排出表面水的厚度均大于自然静置沉降试验排出表面水的厚度,如图 3 所示。各透气真空排水试验表面水层厚度比自然静置沉降试验厚度的提高率(指透气真空排水试验表面水层厚度的提高值与自然静置沉降试验表面水层厚度的比值)见表 1。

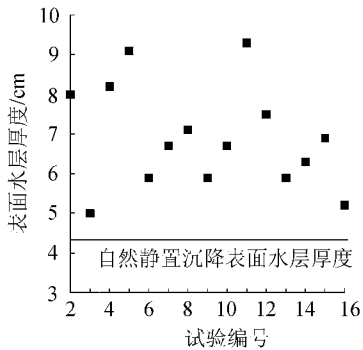


图3 透气真空试验与自然静置沉降试验表面水层厚度比较

Fig. 3 Comparison of surface-water thickness between aeration vacuum dewatering and natural sediment tests

3 透气真空作用下的颗粒受力分析

自然静置沉降试验中模型箱四周及底面均不设置排水系统,土体唯一的排水边界是顶部,水分通过淤泥层的上界面向土体外渗流,淤泥和清水界面逐渐下降,土体被压密固结。透气真空排水试验中模型箱底部设置透气真空排水管,土体有上下 2 个排水面,除了淤泥层顶部排水以外,可以通过带有真空排水管的负压层排水,加上渗流路径缩短,致使淤泥中的水分迅速排出,土体被压密固结。

透气真空排水试验中,淤泥中的水分会向下移动,被很快抽出到真空排水管中。淤泥中的水分与淤泥固体颗粒之间存在强烈的渗流作用,如图 4 所示,固液两相之间存在较大的相对速度,根据二相流体理论,两者之间会产生较大的作用力,称为拖拽力。

在模型箱底部,土颗粒较为密集,移动变形困难,水分向下渗流速度大于土颗粒下沉速度,因而土颗粒受到的拖拽力方向向下,同时两者相对速度较大,拖拽力大小与相对运动速度大小成正比,因此拖拽力也较大;

在顶部,水分向下渗流速度较小,土颗粒较为稀疏,自重作用下的沉降速度较快,土颗粒下沉速度大于水分向下渗流速度,因而土颗粒受到的拖拽力方向向上,同时两者相对速度较小,因此拖拽力也较小。

由此可以看出,透气真空排水试验中淤泥水分渗流速度下大上小,土颗粒下沉速度下小上大,必然存在一个平面,该平面上的水分向下渗流速度等于土颗粒下沉速度,两者之间没有相对运动,不存在拖拽力,称之为等速界面。在等速界面之上,拖拽力方向向上;等速界面之下,拖拽力方向向下。拖拽力的大小与相对渗流速度成正比,等速界面附近的拖拽力很小,远离等速界面后,拖拽力逐渐变大。

3.1 自然静置沉降试验中土颗粒的受力分析

在自然静置沉降过程中土颗粒之间的距离较大,因此可以忽略土颗粒之间的相互作用,理论上土颗粒只受自重和浮力的作用;由于向下运动,土颗粒还会受到液体的黏滞力以及向上渗流拖拽力的阻碍作用,如图 5(a)所示。

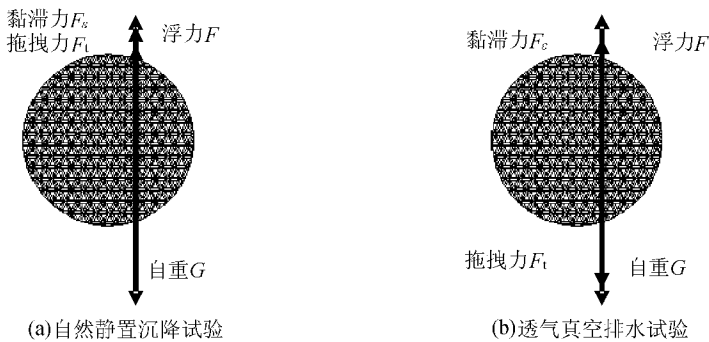


图 5 土颗粒的受力分析

Fig. 5 Stresses acting on soil particles for natural sediment and aeration vacuum dewatering tests

3.2 透气真空作用下沉降过程中土颗粒的受力分析

透气真空排水过程中土颗粒除了同样受到自然静置沉降中土颗粒所受的作用之外,在等速界面以下,由于运移速度小于水分渗流速度,因而受到向下渗流拖拽力的作用。拖拽力是促进土颗粒沉降的推动力,如图 5(b)所示。

4 透气真空排水法促排作用机理分析

4.1 “絮凝-断裂”压缩过程

高含水率淤泥中含有大量的细颗粒,在很短的时间内多个细颗粒会连结在一起形成絮团^[11-12]。絮团是不稳定的,絮团中的细颗粒会断裂分离出去,也会有新的细颗粒连结进来。大小不同的絮团在下沉过程中不断调整自身大小和沉降速度,最终会趋于一个相近的大小和相近的沉降速度,也就是说絮团与絮团之间几乎没有相对运动。因此在沉降作用开始一段时间之后会出现清晰的泥水分界面^[13],界面之下的絮团沉降速度相同。如若淤泥中颗粒浓度足够高,絮团就会进一步连结形成絮网。絮网结构非常脆弱,含有细颗粒的淤泥在形成络合絮凝结构后,絮凝体按着同一个速度整体下沉压密。

虽然土颗粒间形成了一定的连接形式^[14-15],但是在扰动作用力以及自重作用下,这些连接关系可能被打破^[16-17],也可能再连接。因此在额外拖拽力的作用下,这些软弱的连接仍然可能断裂成单个的颗粒或者絮凝片断。单个颗粒可以继续自由沉降运动,选择一个更为稳定致密的位置沉积下来,而絮凝片断会寻找一个更加稳定位置形成新的絮网连接。絮网在不断的“断裂-连结”过程中体积逐步减小,絮网的这种运动变形过程其实是压密的过程,其中的水分从泥水分界面析出。

显而易见,透气真空排水法中额外的拖拽力造成了络合絮凝结构某些颗粒或者片断的断裂脱离,使得土

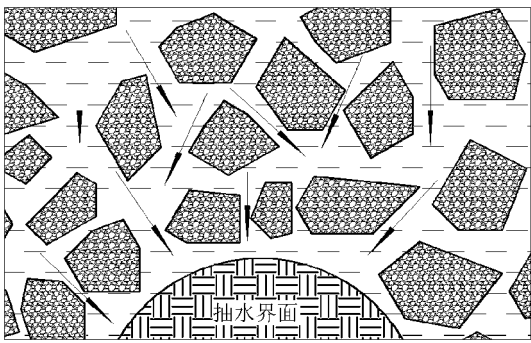


图 4 土颗粒孔隙水相对渗流方向与拖拽力方向

Fig. 4 Pore water in soil particles against directions of relative seepage and drag force

颗粒更加迅速地下沉,孔隙水更加畅通地运移,因此排水过程包含“断裂-胶结”的骨架压密运动,相同时间达到的沉降量必然大于自然静置沉降试验中单纯的整体骨架压密引起的沉降量。

4.2 透气真空排水试验淤泥层下部的“抽空”效应

透气真空排水试验中等速界面之下的土体由于受到更大的拖拽力的作用,土体中的孔隙水被很快抽出而发生固结,所以该层淤泥体积减小很快。该层之上的淤泥层由于下部支撑层的体积减小而迅速下沉。在形成整体絮凝骨架的淤泥层中,由于下部孔隙水、土颗粒被抽出,原本的支撑结构变得疏松脆弱,空隙增大,已经不能再继续维持原来的承载能力,上部淤泥骨架在重力作用下会很快下沉。

而在自然静置沉降试验中,下部的孔隙水以及土颗粒浓度只会越来越高,上部絮凝结构下降的阻力会越来越大。因此在透气真空排水试验中,土体骨架下沉的速度远大于自然静置沉降试验土体骨架沉降速度。

综上所述,透气真空排水试验淤泥层沉降速度快于自然静置沉降试验中的速度,虽然土体中的水也向下渗透排出,但是由于额外的拖拽力作用,土体骨架向下体积压密变形的速度大于所含水分体积抽出速度,因此这部分差额体积水分通过上排水面排出土体,土体骨架下降压缩的体积总是大于被真空吸力抽排出来的水的体积。虽然水的总体趋势是向下移动,但是由于固相液相速度的差异,宏观上看来表面水层厚度是增加的。

5 结 语

透气真空排水试验表面水层加厚速度大于自然静置沉降试验表面水层加厚速度,试验结束时,透气真空排水试验表面水层的厚度要大于自然静置沉降试验表面水层的厚度,这称为表面水促排作用。表面水促排作用有利于缩短淤泥的排水固结过程。

表面水促排作用产生的原因有3点:(a)透气真空排水法中有2个排水界面,且排水渗径较短;(b)透气真空排水试验中等速界面下的土颗粒受到向下拖拽力的作用,而自然静置沉降试验淤泥层中土颗粒受到向上拖拽力的作用;(c)在向下的拖拽力的作用下,透气真空排水试验中土颗粒存在“絮凝-断裂”压缩过程和“抽空”效应,因此透气真空排水试验中土骨架向下体积压密的速度大于自然静置沉降试验土骨架向下体积压密的速度,在宏观上表现为透气真空排水法的表面水层厚度大于自然静置沉降法的表面水层厚度。

参考文献:

- [1] HONG Z, LIU S, SHEN S, NEGAMI T. Comparison in undrained shear strength between undisturbed and remolded Ariake clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(2): 272-275.
- [2] CARGILL K W. Prediction of consolidation of very soft soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(6): 775-795.
- [3] ROWE R K, GNANENDRAN C T, LANDVA A O, et al. Calculated and observed behaviors of a reinforced embankment over soft compressible soil[J]. Canada Geotechnical Journal, 1996, 33(2): 324-338.
- [4] DENG D. Comparison of remolded shear strength with intrinsic strength line for dredged deposit[J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(2): 363-369.
- [5] HAEGEMAN W, VAN IMPE W F. Filtration performance testing of geotextiles for vacuum consolidation drains[J]. Geosynthetics International, 1999, 6(1): 41-51.
- [6] KOERNER G R, KOERNER R M. Leachate flow rate behavior through geotextile and soil filters and possible remediation methods[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1992, 10(4/6): 401-430.
- [7] 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 Dong-sheng, HONG Zhen-shun, LIU Chuan-jun, 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))
- [8] 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, 200710132092.9[P]. 2007-10-13.
- [9] 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.
- [10] 刘传俊, 周源, 吉锋. 高含水量疏浚淤泥快速泥水分离技术试验研究[EB/OL]. [2008-05-17]. http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number.html.
- [11] 黄建维. 黏性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981(2): 30-41. (HUANG Jian-wei. Experimental study of settling properties of cohesive sediment in still water[J]. Journal of Sediment Research, 1981(2): 30-41. (in Chinese))
- [12] DERJAGUIN B V, LANDAU L D. Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged

particles in solutions of electrolytes[J]. Acta Physicochim URSS ,1941 ,14 :633-662.

[13] CAMP T R ,STEIN P C. Velocity gradients and internal work in fluid motion[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineering ,1943 ,30 :110-117.

[14] MERCKELBACH L M ,KRANENBURG C. Determining effective stress and permeability equations for soft mud from simple laboratory experiments[J]. Geotechnique ,2004 ,54(9) :581-591.

[15] EINSTEIN H A ,KRONE R B. Experiment to determine modes of cohesive sediment transport in salt water[J]. Journal of Geophysical Research ,1962 ,67(4) :1451-1461.

[16] 杨美卿 ,钱宁.紊动对细泥沙浆液絮凝结构的结构[J]. 水利学报 ,1986(8) :21-30.(YANG Mei-qing ,QIAN Ning. The effect of turbulence on the flocculent structure of the slurry of fine grain[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1986(8) :21-30.(in Chinese))

[17] 冯骞 ,薛朝霞 ,汪翔 等.水流剪切力对活性污泥特性影响的试验研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2006 ,34(4) :374-377.(FENG Qian ,XUE Zhao-xia ,WANG Hui ,et al. Experimental study on influence of hydrodynamic shear stress on characteristics of activated sludge[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2006 ,34(4) :374-377.(in Chinese))

Promotion of aeration vacuum dewatering method for surface water of dredged sludge

ZHOU Yuan^{1,2} ,GAO Yu-feng^{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 21098 , China)

Abstract : By use of the self-development test devices , 16 groups of laboratory aeration vacuum dewatering model tests were conducted under different control conditions. The thickness of surface water layer of each aeration vacuum dewatering test was obtained. The natural sediment tests were conducted for the dredged sludge with the same initial conditions by means of the same test devices. The dewatering efficiency of surface water of the natural sediment tests was compared with that of the aeration vacuum dewatering tests. The test results indicated that the thickness of the surface water of the aeration vacuum dewatering method is larger than that of the natural sediment tests. The aeration vacuum dewatering method can promote the water in the dredged sludge to dewater from the upper surface. Through the analysis of drainage interfaces and the stresses acting on the particles , the mechanism of promoting dewatering of the surface water by the aeration vacuum dewatering method is explained from the aspects of the “ flocculation-breaking ” sediment process of particle flocculation and the “ pump-empty ” effect of the subjacent layers.

Key words : high-water-content dredged sludge ; aeration vacuum dewatering ; natural sediment ; surface-water ; surface water ; model test