

疏浚淤泥中的拱架结构防淤堵机理

周源^{a,b}, 高玉峰^{a,b}, 陶辉^{a,b}

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

摘要: 透气真空快速泥水分离技术适用于高含水率高粘粒含量疏浚淤泥的堆场处理, 可以快速减小堆场中淤泥的体积, 加速堆场的周转利用, 并能解决常规真空处理方法中存在的滤层淤堵问题。通过对透气真空快速泥水分离试验和常规真空抽水试验结束后进行试样取样颗粒分布试验, 可以看出透气真空方法中滤层材料附近的淤泥土体中细颗粒流失, 粗颗粒富集, 形成拱架结构; 而常规真空抽水方法中不存在细颗粒流失, 没有形成拱架结构, 造成了淤堵。分析了拱架结构层形成的过程, 其能够保护土体内部的细颗粒不再流失, 同时保证较高的渗透性。解释了常规真空抽水方法容易产生淤堵, 而透气真空方法能够解决淤堵问题的原因。

关键词: 透气真空快速泥水分离技术; 淤堵; 颗粒分布; 拱架结构

中图分类号: TU411.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)02-0007-07

The Mechanism Analysis of Anti-clogging Arching Structure in Dredged Sludge

ZHOU Yuan^{1,2}, GAO YU-feng^{1,2}, TAO Hui^{1,2}

(a. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering;

b. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, P. R. China)

Abstract: A number of lands were occupied by discarding the dredged sludge in the yard as waste materials. The Aeration Vacuum rapid Mud-Water Separating (AVMWS) technique was appropriate for discarding yard with high water content and high clay particle content sludge. This technique could quickly reduce the volume of the sludge and accelerate the turnover use of the yard. In addition, the technique could overcome the clogging problem when pumping water from high water-content, high clay particle content dredged sludge. Through the sampling particle size distribution tests after AVMWS and conventional vacuum pumping model tests, it was found that in the AVMWS tests the fine-grained soil run off, coarse particles accumulated, and arching structure layer was formed. However, in the conventional vacuum pumping tests, fine particles did not lost and there was clogging without arching structure layer. The layer could protect the internal loss of the fine particles and ensure a high permeability of the soil at the same time. And the mechanism was explained as well.

Key words: AVMWS technique; clogging; particle size; arching structure

中国是一个河流湖泊分布广泛的国家, 内陆江河湖泊的泥沙淤积非常严重^[1]。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, 不可避免地产生大量的淤泥^[2-4]。

收稿日期: 2009-09-02

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

作者简介: 周源(1983-), 男, 博士生, 主要从事土动力学与环境岩土研究, (E-mail)zdp_1000@hhu.edu.cn。

目前绝大部分内陆疏浚淤泥采用堆泥场放置处理,废弃于陆地抛填区或低洼地区,占用大量的鱼塘或耕田。疏浚淤泥含水率高、强度低,很难直接对疏浚淤泥进行开发利用;疏浚淤泥粘粒含量高、透水性差,在自重作用下需要几年甚至更长时间才能完成固结^[5-9]。因此,需要快速降低疏浚淤泥的含水率,快速排出疏浚淤泥中所含大量的水,解决疏浚淤泥处置占地时间长,浪费宝贵的土地资源的问题。

采用真空抽水加速固结的方法来处理疏浚淤泥,其中关键的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^[10-11]。国内很多工程都采用真空抽水方法^[12],但是疏浚淤泥的粘粒含量一般较高,进行常规真空抽水时,排水通道很快就会被淤堵,导致常规的真空抽水方法在疏浚淤泥排水上效果很差^[13-17]。

针对淤堵的问题,经过 2 年多的试验研究^[18],开发出了一种快速高效抽取高含水率疏浚淤泥中水的技术——透气真空快速泥水分离技术^[19-21],克服了在高含水率高粘粒含量的淤泥中抽水时存在的淤堵问题,同时能够很快排出淤泥中的水分。

通过透气真空快速泥水分离室内试验与常规真空抽水室内试验之后的取样颗粒分析,从细颗粒流失的角度解释了透气真空快速泥水分离技术形成自然过滤层的机理,自然过滤层是多级颗粒拱架组成的过滤透水结构层,阻止细颗粒在滤层材料内部淤积,解决了淤堵问题。同时从微观角度描述了透气真空快速泥水分离技术从初始状态开始形成过滤层的过程。

1 透气真空技术的室内模型取样颗粒分试验

1.1 透气真空与常规真空模型试验

取样颗粒分试验是在模型试验基础上,通过在试验结束后的模型箱内不同部位采样进行的颗粒分试验。透气真空模型试验采用透气真空快速泥水分离室内模型试验装置,而常规真空是在上述模型试验装置的基础上去除透气系统。

模型试验的疏浚淤泥试样取自南水北调东线江苏段淮安白马湖疏浚堆场,共有 2 种,基本性质指标见表 1。

表 1 白马湖疏浚淤泥物理性质指标

泥样	原泥含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	砂粒组 含量/ %	粉粒组 含量/ %	粘粒组 含量/ %	土颗粒 相对 密度
透气真空用	109.2	60.8	26.8	7.98	57.88	34.14	2.56
常规真空用	82.3	73.1	31.1	2.89	50.55	46.56	2.55

在原泥中加水,将淤泥含水率调整至目标含水率并充分搅拌均匀,进行透气真空快速泥水分离和常规真空抽水的室内模型试验,试验初始条件与参数取值见表 2。

表 2 模型试验初始条件与参数取值

初始条件	初始含水率/%	初始泥层厚度/cm	真空度/ kPa	透气速率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	试验周期 /d
透气真空试验 1	240	30.3	35	0.5	7
透气真空试验 2	240	30.2	35	2.0	7
透气真空试验 3	240	30.1	35	2.0	7
常规真空试验 1	320	20.5	98	0	/
常规真空试验 2	320	22.0	98	0	/

在试验进行过程当中,按照事先计划好的时间间隔,测读记录各项数据,包括饱和缸真空度、泥浆中管道内的真空度、电子秤显示的抽水重量、表面水的高度、淤泥泥面的高度和流量计的透气速度。

1.2 透气真空模型试验结束后的颗粒分析

在透气真空快速泥水分离模型试验中,当试验结束后,在透气真空管道滤水段外部会存在一层外包泥层,如图 1 所示。

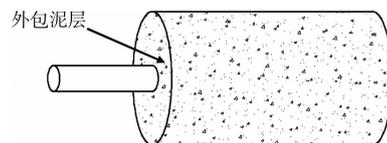


图 1 外包泥层与滤管的相对位置

在上图中,一点一点逐层削去外包泥层,在滤水段外侧紧贴滤层材料的 3 个部位刮取适量泥样后,将 3 处取得的泥样混合,测定混合样的颗粒分布。同时测定在饱和缸中的试验尾水中所含颗粒的粒径分布。将两者的结果汇同原泥颗粒分结果绘成图 2—图 4,典型颗粒粒径(d_{10} , d_{50} , d_{90})对比见表 3—表 5,这 3 个典型颗粒粒径能够较全面反映粒径分布中较细颗粒组、较粗颗粒组以及中等粒径颗粒组的含量分布情况。

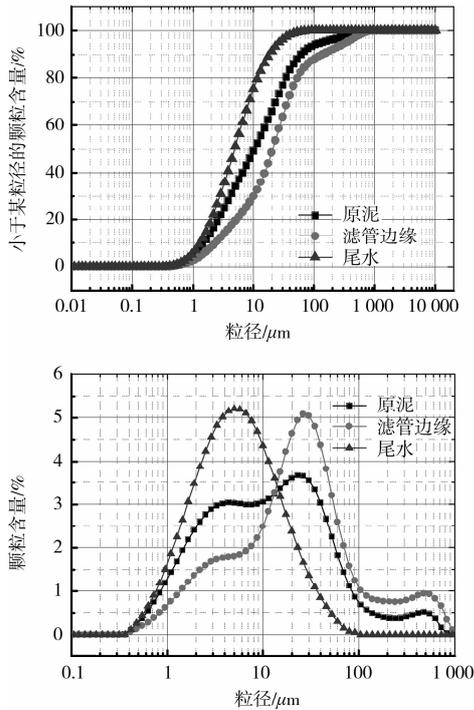


图 2 透气真空试验 1 不同部位颗分曲线与颗粒频率曲线

表 3 透气真空试验 1 不同部位典型颗粒粒径对比

位置	尾水	原泥	滤管边缘
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.316	1.485	2.391
$d_{50}/\mu\text{m}$	4.857	9.919	20.821
$d_{90}/\mu\text{m}$	18.398	57.424	140.443

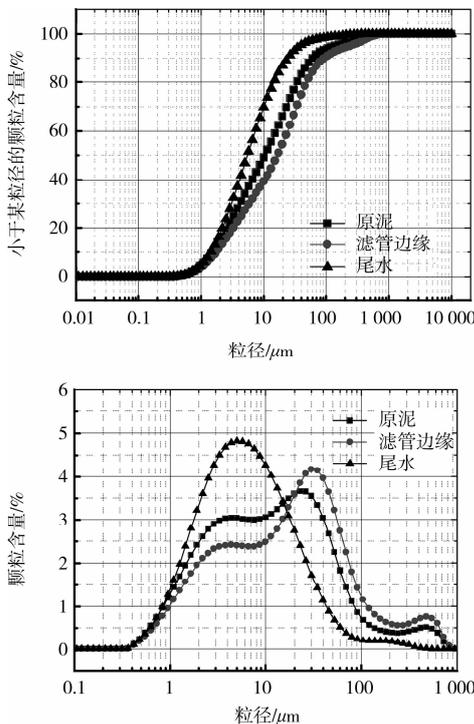


图 3 透气真空试验 2 不同部位颗分曲线与颗粒频率曲线

表 4 透气真空试验 2 不同部位典型颗粒粒径对比

位置	尾水	原泥	滤管边缘
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.434	1.485	1.769
$d_{50}/\mu\text{m}$	5.498	9.919	16.725
$d_{90}/\mu\text{m}$	24.227	57.424	94.176

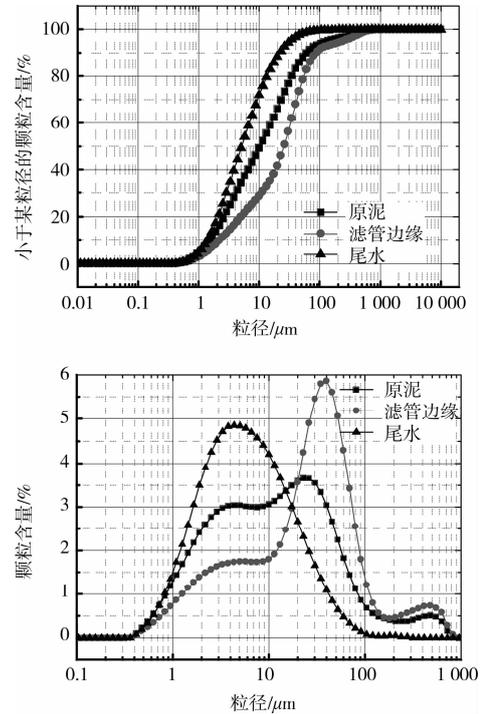


图 4 透气真空试验 3 不同部位颗分曲线与颗粒频率曲线

表 5 透气真空试验 3 不同部位典型颗粒粒径对比

位置	尾水	原泥	滤管边缘
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.392	1.485	2.232
$d_{50}/\mu\text{m}$	5.125	9.919	25.768
$d_{90}/\mu\text{m}$	21.732	57.424	86.585

1.3 常规真空淤堵模型试验结束后的颗粒分析

在常规真空快速泥水分离模型试验中,在很短的时间内就会发生淤堵,真空抽水作用无法进行下去。当发生淤堵试验停止后,在管道滤水段外部会存在一层较薄的外包泥层,一点一点逐层削去外包泥层,在滤水段外侧紧贴滤层材料的 3 个部位刮取适量泥样后,将 3 处取得的泥样混合,测定混合样的颗粒分布。同时测定在饱和缸中的试验尾水中所含颗粒的粒径分布。将两者的结果汇同原泥颗分结果绘成图 5—图 6,典型颗粒粒径(d_{10} , d_{50} , d_{90})对比见表 6—表 7。

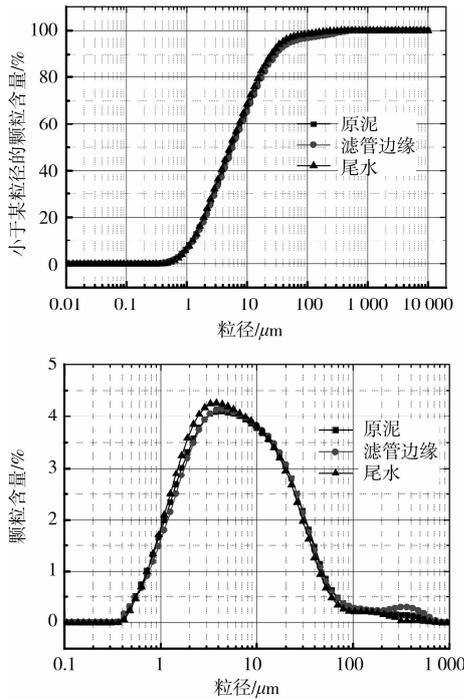


图 5 常规真空试验 1 不同部位颗分曲线与颗粒频率曲线

表 6 常规真空试验 1 不同部位典型颗粒粒径对比

位置	尾水	原泥	滤管边缘
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.253	1.259	1.319
$d_{50}/\mu\text{m}$	5.210	5.635	5.865
$d_{90}/\mu\text{m}$	25.350	29.099	30.722

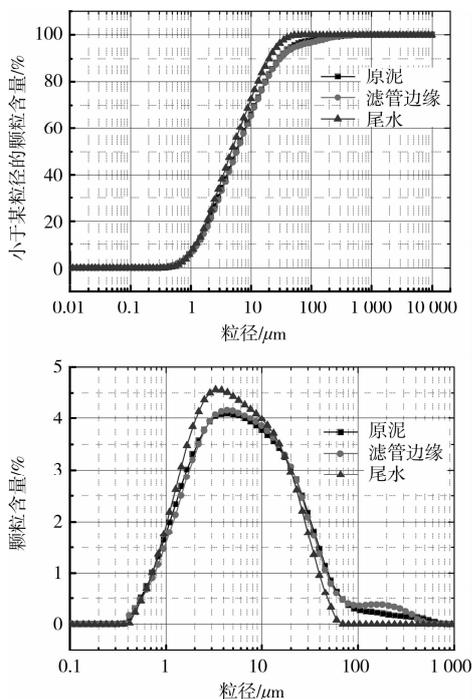


图 6 常规真空试验 2 不同部位颗分曲线与颗粒频率曲线

表 7 常规真空试验 2 不同部位典型颗粒粒径对比

位置	尾水	原泥	滤管边缘
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.237	1.259	1.328
$d_{50}/\mu\text{m}$	4.733	5.635	5.860
$d_{90}/\mu\text{m}$	19.906	29.099	30.583

1.4 颗粒流失分析

从上述 5 次试验之后的颗分数据可以看出在 3 次透气真空快速泥水分离试验中,滤管边缘和尾水中的颗粒分布曲线相应于原泥发生了较大的改变,尾水典型颗粒粒径(d_{10}, d_{50}, d_{90})相应于原泥有明显减小,滤管边缘处的泥样典型颗粒粒径(d_{10}, d_{50}, d_{90})相应于原泥均有增大,这表明在透气真空技术中原泥中的细颗粒逐渐转移到了尾水中,而粗颗粒留在滤层材料边缘形成粗颗粒富集层。

而在 2 次常规真空试验中,发生了淤堵,滤管边缘与尾水中的颗粒分布曲线相应于原泥没有发生较大变化,尾水、原泥、滤管边缘处的泥样典型颗粒粒径(d_{10}, d_{50}, d_{90})基本不变化,没有发生颗粒分选作用。

从 3 次透气真空快速泥水分离试验的颗粒频率曲线可以看出滤管边缘和尾水中的各粒径组颗粒含量相应于原泥发生了较大的偏移,滤管边缘主要的颗粒为大颗粒,细粒组的颗粒含量很低;而尾水中的颗粒多为细颗粒,粗颗粒基本缺失。

从 2 次常规真空试验中的颗粒频率曲线可以看出滤管边缘和尾水中的各粒径组颗粒含量相应于原泥未发生明显变化。

上述现象表明在透气真空快速泥水分离方法中,滤层材料内外会发生颗粒分选作用,靠近滤层材料的土体中细颗粒流失,粗颗粒富集;而发生淤堵的常规真空方法中,滤层材料附近的土体中不会发生颗粒分选流失,粒径变化不明显。由此可见,淤堵发生的与否与细颗粒流失,粗颗粒富集有着直接的关系。

2 透气真空技术中拱架结构防淤堵的机理

2.1 颗粒流失的意义——形成拱架结构

当含有细颗粒的不稳定土体与滤层材料接触时,滤层材料的特征孔径大于土体中的某一细粒组颗粒直径,这些细颗粒就可以在渗透水流的作用下穿越滤层材料,被带出体系之外,这个过程称之为细颗粒的流失。细颗粒在多孔介质中的迁移决定着土木工程中各种下部结构物的特性,比如以土工织物

作为上部或者下部地基衬垫的工程中的淤堵问题。不仅细颗粒的流失十分重要,而且细颗粒随后的迁移停滞位置也有重要的研究意义^[22]。

细颗粒流失后,原本占据的位置被空出来,土体形成疏松的结构,与土工滤层材料紧邻的土体中的细颗粒流失最为严重,流失后的土体中剩下较粗的颗粒,由于上部荷载产生拱效应,这些粗颗粒互相搭接形成的一个拱架结构,这些相对较大的颗粒将同样截留比自身稍小一点的颗粒,稍小一点的颗粒同样形成拱架结构,并且继续截留更小一级的颗粒,从而在与土工织物相邻的土体中形成了一个粒径逐步减小的多级拱架结构,这种结构疏松多孔,使得透水性增强。形成这样多级结构之后,能够继续再随着动态水流移动穿越滤层材料的颗粒就会越来越少^[23],降低了滤层材料被细颗粒淤堵的可能性。

由于力学中的拱效应,能够承担一定的压力,因此这些颗粒并不会被完全压密,继而保留了相当一部分过水空隙,这样既保证了土体的稳定性,又不至于造成滤层的淤堵失效。

透气真空作用提供了一种动态的水流作用,在土工织物滤层界面上出现水力梯度方向周期性的变化,使得滤层界面附近的渗透水流也呈现周期性的往复流动。这种特殊的水动力条件使得滤层附近淤泥土体中的细颗粒更容易被水流带出,剩下的粗颗粒形成良好的拱架结构。

2.2 拱架结构防淤堵的作用

工程中常用的过滤材料主要分为2类,一类是土工合成材料,一类是天然散粒体材料。散粒体材料过滤层是粒径渐次变化的多层散粒体材料构成的过滤防渗破坏结构,它依靠最内层的细粒层来阻挡被保护土体中颗粒的流失,同时向外逐渐变粗的颗粒层又提供了良好的排水通道。

高翼强和陈德锋^[24]认为采用非织造布作为过滤层时,实际上是借助于非织造布和相邻的土层共同组成一个渐次过滤层,它在外观结构上与传统的多层级配粒料滤层很相似,但它是由于土工布的引入而自然形成的,无需人工去选料和进行级配,施工方便,而且是就地取材。余巍,陈轮等^[25]也认为在细颗粒流失、粗颗粒形成拱架结构的过程中,土工织物实际上起到了催化剂的作用。毛昶熙,段祥宝等^[26]进一步提出了土工织物滤层的设计思想,他们认为完全保住土体的细颗粒很难做到;而允许接触处少许细颗粒被水流带出去,留下粗颗粒与土工织物滤层组合起来发挥滤层作用,保住更深土体内部的细颗粒的水动力稳定性的开放式滤层,更适宜在

工程中应用。陈轮,易华强等^[27]通过模拟试验研究了这种土工织物过滤系统土体结构的稳定性,认为采用较大孔径的土工织物作为过滤层,能更好地防止淤堵。

同样的,在透气真空快速泥水分离方法中,与土工滤层材料接触的淤泥会形成一种类似于散粒体材料过滤层的拱架结构过滤层,这种过滤结构力学特性较为稳定,同时渗透性好,有利于防淤堵。

3 透气真空技术中拱架结构的形成过程

从上述分析可以看出,透气真空技术能够防淤堵是因为在滤层边缘部位土体中细颗粒自然流失而形成拱架结构形式的过滤层,称为自然过滤层,其具体形成机理可以分为如下4步(图7)。

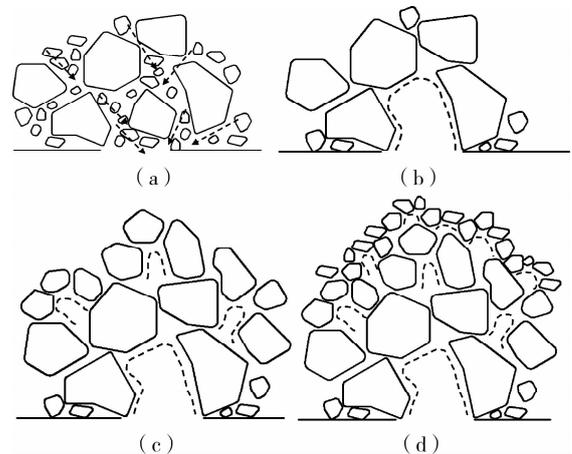


图7 拱架结构的形成过程

1)最靠近滤层的淤泥中细颗粒流失。在水流的带动下,靠近滤层材料孔隙的细颗粒被冲进滤管中,然后随着尾水流出来,这些细颗粒本来是填充着粗颗粒之间的间隙的,流失后粗颗粒之间间隙变大,原来的接触消失了,开始在重力和水力作用下移动。

2)较大颗粒形成拱架结构。细颗粒流失后,粗颗粒之间变成了直接的接触形式,由于拱效应的支持,粗颗粒不会移动得太剧烈,一般就在原位附近滞留搭接,形成疏松多孔的结构。同时拱效应使得这种结构可以承担一定的荷载,这就是在一定的真空压力下,该层结构不至于破坏,保证了这样一种透水效率很高的结构的长效性。

3)次一级颗粒被最粗颗粒截留,形成次一级拱架结构。最初的第一级粗颗粒拱架形成以后,形成的拱架结构仍然具有较大的孔隙,在水流作用下,与其接触的土体中细颗粒仍然继续流失。但是由于第一级粗颗粒之间搭接后的孔隙总是小于自身特征粒

径的,因此在其上形成的次一级拱架结构,其特征粒径要小于第一级成拱颗粒粒径,其所能流失的细颗粒粒径范围缩小了,形成的拱结构也相对变小。

4)逐步形成多级拱架结构。在水流作用下,次级拱结构上又能形成更小的拱结构,能够流失的颗粒粒径也越来越小。就这样,流失作用造就了一层又一层特征粒径不同的过滤层,这些过滤层可以很好地排水,截留住细颗粒。同时,形成的拱架结构可以分担真空压力和来自外部的压力,具有良好的力学稳定性。至此,这一层滤层材料外的附加过滤结构已经具有渗透排水和防止土体流失的功能,可以与原先的土工织物材料一起看作新的过滤层体系。

4 结论

1)透气真空快速泥水分离技术能够使得滤层材料附近的土体中细颗粒流失出来,在滤层材料保护的内侧土体发生粗颗粒富集,经过滤层材料过滤的尾水中粘粒含量较高。

2)常规真空抽水方法发生淤堵时,滤层材料附近不发生颗粒流失,在滤层材料保护的内侧土体不发生粗颗粒富集,尾水也与原泥的颗分没有明显变化。

3)适当允许细颗粒流失,剩下的粗颗粒在滤层材料内侧形成自然分选的拱架结构层,拱架结构层能够保持淤泥中的细颗粒不在滤层材料中淤积,同时保证较好的透水性,解决了淤堵的问题。

4)拱架结构形成是逐步的过程,首先形成较粗 1 级的拱架结构,孔隙较大,粗颗粒较多;在第 1 级拱架结构外面逐渐形成第 2 级、第 3 级等次级拱架结构,孔隙逐步变细,细颗粒逐步增多,直至与原泥颗粒分布相同。

参考文献:

[1] 胡春宏, 吉祖稳, 黄永健, 等. 我国江河湖库清淤疏浚实践与分析[J]. 泥沙研究, 1998, 47: 47-55.
HU CHUN-HONG, JI ZU-WEN, HUANG YONG-JIAN, et al. Analysis on dredging practice in rivers, lakes and reservoirs[J]. Journal of Sediment Research, 1998, (47): 47-55.

[2] 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.
ZHU WEI, ZHANG CHUN-LEI, GAO YU-FENG, et al. The status quo of dredged spoils utilization [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25 (4): 39-41.

[3] 赖永辉, 谈广鸣, 王军. 深圳港西部港区进出港航道工

程疏浚泥水抛泥沙输移扩散规律研究[J]. 武汉大学学报, 2006, 39 (3): 41-45.

LAI YONG-HUI, TAN GUANG-MING, WANG JUN. Study on transmitting and spreading rules of dredging sediment of Shenzhen Western Port channel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39 (3): 41-45.

[4] 张国安, 虞志英. 连云港疏浚工程的环境效应——以羊窝头抛泥区为例[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19 (2): 46-56.

ZHANG GUO-AN, YU ZHI-YING. Environmental effect of dredging project in Lianyungang——take Yangwoto dumping area as a case[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001, 19 (2): 46-56.

[5] 郭佑雄, 汪肇京, 邱良芬, 等. 塑料排水带堆载法在围海造陆工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (6): 1025-1031.

GUO YOU-XIONG, WANG ZHAO-JING, QIU LIANG-FEN, et al. Application of geodrain-loading method to reclamation engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1025-1031.

[6] HONG Z, LIU S, SHEN S, et al. Comparison in undrained shear strength between undisturbed and remolded Ariake clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132 (2): 272-275.

[7] CARGILL K W. Prediction of consolidation of very soft soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 10 (6): 775-795.

[8] 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, 32 (2): 324-338.

[9] DENG D S. Comparison of remolded shear strength with intrinsic strength line for dredged deposits[J]. China Ocean Engineering, 2007, 21 (2): 363-369.

[10] HAEGEMAN W, VAN IMPE W F. Filtration performance testing of geotextiles for vacuum consolidation drains[J]. Geosynthetics International, 1999, 6 (1): 41-51.

[11] KOERNER G R, KOERNER R M. Leachate flow rate behavior through geotextile and soil filters and possible remediation methods [J]. Geotextiles & Geomembranes, 1992, 11 (4-6): 401-430.

[12] 董志良, 李婉, 张功新. 真空预压法加固潮间带软土地基的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (S2): 3490-3494.

DONG ZHI-LIANG, LI WAN, ZHANG GONG-XIN. Experimental study on treatment of soft soil in intertidal

- zone with vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 3490-3494.
- [13] 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 YA-NAN, ZHANG YI-PING. Test study on engineering properties of dredging soil of West Lake in Hangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (4): 579-582.
- [14] 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 XIN-HUA, CONG YUE-BIN, et al. Experimental on environmental dredging of a city river[J]. Hydraulic and Hydraulic Power Technique, 2004, 35 (5): 19-24.
- [15] 陈雄峰, 荆一凤, 吕健, 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, LV 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.
- [16] 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 GUANG-XING, 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.
- [17] 叶柏荣. 关于吹填浮泥造陆的技术问题[J]. 港工技术, 1994, (1): 41-45.
YE BO-RONG. On the technical issues for land reclamation [J]. Harbor Work Technique, 1994, (1): 41-45.
- [18] 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.
- [19] 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]. 2008-07-16.
- [20] 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.
- [21] 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]. 2008-05-07. http://www.paper.edu.cn/downloadpaper.php?serial_number=200805-179&type=1.
- [22] REDDI L N. Particle transport in soils: review of significant processes in infrastructure systems [J]. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 1997, 3 (2): 78-86.
- [23] 辛选民, 全纪恩, 淮占科, 等. 土工布滤水管性能试验研究[J]. 地下水, 1991 (4): 210-213.
XIN XUAN-MIN, QUAN JI-EN, HUAI ZHAN-KE, et al. Study on filtration performance test of geotextile tube[J]. Underground Water, 1991 (4): 210-213.
- [24] 高翼强, 陈德锋. 非织造土工布的孔径分布及淤堵特性[J]. 产业用纺织品, 1995, 13 (4): 23-25.
GAO YI-QIANG, CHEN DE-FENG. Clogging characteristics of non-woven geotextile and pore size distribution[J]. Industrial Textiles, 1995, 13 (4): 23-25.
- [25] 余巍, 陈轮, 王钊. 土工织物梯度比试验研究的新进展[J]. 长江科学院院报, 2006, 23 (2): 58-60.
SHE WEI, CHEN LUN, WANG ZHAO. Advancement in research on gradient ratio test of geotextile[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23 (2): 58-60.
- [26] 毛昶熙, 段祥宝, 冯玉宝. 管涌与滤层的研究(II): 滤层[J]. 岩土力学, 2005, 26 (5): 680-686.
MAO CHANG-XI, DUAN XIANG-BAO, FENG YU-BAO. Study on piping and filters: part II of filters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (5): 680-686.
- [27] 陈轮, 易华强, 许齐, 等. 土工织物反滤系统土体结构稳定性模拟试验研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25 (4): 117-121.
CHEN LUN, YI HUA-QIANG, XU QI, et al. The study of the structure stability simulated tests in soil-geotextile filtration system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25 (4): 117-121.

(编辑 胡英奎)