

DOI: 10.11779/CJGE201912014

# 环保疏浚泥处理工程泥性质变化规律及问题分析

吴思麟<sup>1, 2</sup>, 朱伟<sup>1, 2, 3</sup>, 刘既明<sup>1, 2</sup>, 李云全<sup>3</sup>, 崔岩<sup>3</sup>, 王飞龙<sup>1, 2</sup>, 赵笛<sup>1, 2</sup>

(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 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024;

3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 以中国通济桥水库环保疏浚及泥处理利用工程作为典型案例, 研究在工程过程中泥的物理、化学性质变化规律, 同时也分析了疏浚泥饼的力学性质。基于对泥的基本性质分析, 梳理了该典型工程在疏浚、处理及利用中存在的<sup>关键词:</sup> 通济桥水库; 环保疏浚; 泥处理; 泥利用

中图分类号: TU441; X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)12-2290-07

作者简介: 吴思麟(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事环境岩土等方面的研究工作。E-mail: wusilinhhu@126.com。

## Change laws of mud property and problems in typical environmental dredging treatment projects

WU Si-lin<sup>1, 2</sup>, ZHU Wei<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Ji-ming<sup>1, 2</sup>, LI Yun-quan<sup>3</sup>, CUI Yan<sup>3</sup>, WANG Fei-long<sup>1, 2</sup>, ZHAO Di<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. College of Environment, Hohai

University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** With the burgeoning water environment treatment in China, a large number of environmental dredging projects are being implemented. Dredging, treatment and utilization of sediments all need to be considered. Based on the typical case of the environmental dredging, treatment and utilization project of Tongjiqiao reservoir in China, the change laws of physical and chemical properties of mud are studied, and the mechanical properties of dredged mud cake are analyzed. Through the analysis, the key problems in the typical project are pointed out: the concentration of dredged mud is low, its concentration efficiency is low, the dredging and treatment work efficiency is not matched, and the mud cake is of high alkaline property after treatment. They are also the common problems in the dredging, treatment and utilization of sediments in China. The investigation of the problems may provide guidance and inspiration for the scientific research and construction in this field.

**Key words:** Tongjiqiao reservoir; environmental dredging; mud treatment; mud utilization

## 0 引言

随着中国水环境治理工程如火如荼的展开, 大量的污染底泥的疏浚工程正在实施。在这些工程中, 污染底泥如何疏浚、疏浚后泥浆如何处理处置, 以及如何利用均是需要考虑的。在中国, 适用于河道、湖泊、水库的绞吸式疏浚方式<sup>[1-2]</sup>, 以及适用于小型河道的水力冲刷疏浚方式是目前普遍都使用的两种疏浚方式。这两种方式的共同特点是会产生低浓度的疏浚泥浆<sup>[3-4]</sup>。在过去的十余年间, 这些体积庞大的低浓度泥浆一般被吹填至堆场<sup>[3, 5]</sup>, 经过数年后的沉降, 再予以固化<sup>[5]</sup>或真空预压<sup>[6]</sup>等处理利用。长期占用土地以及可能带来的二次污染<sup>[7]</sup>均是需要解决的问题。

为解决这些问题, 一种“泥浆浓缩-板框压滤-处置利用”的工艺产生了。这种工艺对泥浆快速浓缩, 随后浓缩的泥浆被泵入板框压滤机进行快速脱水, 最后将产生的泥饼运输至处置或利用的位置。据统计, 目前国内 40%的疏浚泥浆采用了类似的处理工艺, 其余 60%依然是将泥浆直接堆放<sup>[8]</sup>。这种新工艺节省了泥浆处理场地, 并且快速地处理了泥浆, 是未来疏浚泥浆处理的发展方向。因此研究这种工艺中各个环节, 发现其中存在的问题并改进、优化具有很大的意义。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2017ZX 07603-003-04); 江苏省科技计划项目 (BE2018737)

收稿日期: 2019-04-08

\*通讯作者 (E-mail: zhuweitem.hhu@gmail.com)

例如, 研究该工艺底泥经疏浚、浓缩及压滤一系列过程中泥的物理性质的变化规律, 这有助于工艺的优化, 提高效率; 研究底泥中的污染物在各个输出产物中的分布规律以及板框压滤产生的泥饼的力学性质等, 这些有助于更好的利用及处置产物。然而目前这些问题还欠缺调查及研究, 仅仅实验室尺度的研究无法解决这些问题。

浙江省通济桥水库环保疏浚及泥处理利用工程是典型的使用“泥浆浓缩—板框压滤—泥饼利用”工艺的工程<sup>[9]</sup>。本文以此工程为例, 对该工程各环节的泥、水取样分析, 研究了疏浚—浓缩—压滤等各处理环节中疏浚泥的物理、化学性质变化规律以及处理产物的力学性质, 并在此基础上分析讨论了这套典型疏浚及泥处理利用工艺中存在的问题, 以期为该领域的科研及施工人员提供指导及借鉴。

## 1 工程背景、材料及方法

### 1.1 工程背景

通济桥水库位于钱塘江直流浦阳江上游, 距离浙江省浦江县城 4 km。水库正常库容 5880 万  $\text{m}^3$ , 正常蓄水位 108.6 m, 正常水库面积 5.35  $\text{km}^2$ 。水库自 2009 年被浙江省列入备用水源地。水库底泥氮磷过高, 并且重金属超标<sup>[9-10]</sup>造成了通济桥水库水质不达标, 综合考虑需要对通济桥底泥进行疏浚。根据底泥污染物分布的调查, 确定通济桥的疏浚范围: 疏浚面积 316.4 万  $\text{m}^2$ , 疏浚厚度在 0.1~1.3 m, 总疏浚量为 139.0 万  $\text{m}^3$ 。根据水库疏浚施工水深、工期及避免二次污染的条件要求, 选用了两台 200  $\text{m}^3/\text{h}$  深水环保绞吸式挖泥船对水库进行疏浚。

库底底泥经绞吸式疏浚后变成体积庞大、含水率较高的稀泥浆。通济桥水库疏浚底泥处理及处置采用了“泥浆浓缩—板框压滤—处置利用”的工艺, 工艺简图如图 1。疏浚的泥浆首先经过沉砂池 (图 1:  $b_c$ ) 初步沉淀分离泥沙、垃圾, 随后泥浆混合絮凝剂在 3 区块浓缩池 (规模是 100  $\text{m} \times 90 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 图 1:  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ ) 进行沉淀分离浓缩。浓缩的浓泥浆通过小型的绞吸挖泥船 (图 1n) 泵入均化池 (图 1c), 均化池中的泥浆泵入 8 台过滤面积 800  $\text{m}^2$ /台的板框压滤机 (图 1d) 进行压滤泥水分离, 为加快过滤效率, 掺加了石灰作为助滤剂。最终压滤成的泥饼运至 12 km 以及 26 km 以外的矿山、沙坑 (图 1f) 及砖厂 (图 1g) 进行处置利用。

### 1.2 采样方法

为研究底泥从疏浚、泥处理至利用过程中泥的物理、化学性质的变化规律以及泥饼的力学性质, 对各

工艺环节的泥、水进行了采样。水库底泥原状样 (下称原状泥) 采用小型抓斗挖泥器采样, 对水库中东部区、北部区、西部区及西南湾区<sup>[10]</sup>的表层底泥各取一个点位进行了采样; 深水环保绞吸式挖泥船疏浚出的泥浆 (下称疏浚泥浆) 通过取样瓶从疏浚管道出泥口直接取样, 见图 1 中  $b_c$  区域上方的疏浚管道口, 每间隔 5 分钟取一次样, 共取 3 次; 疏浚泥浆添加絮凝剂后会浓缩沉降, 形成明显的泥水分层, 下层的泥即为浓缩泥 (下称浓缩泥), 浓缩泥通过小型抓斗挖泥器采样, 对 3 个浓缩池各取 1 个样, 即图 1 中  $b_1$ 、 $b_2$  及  $b_3$ ; 浓缩泥通过小型绞吸式挖泥船疏浚至均化池, 均化池的泥浆与石灰混合均匀后将进入板框压滤机进行脱水, 在进入板框机之前通过采水器对均化池中的泥浆 (下称板框前泥) 采样, 每间隔 5 min 取一次样, 共取 3 次; 板框压滤机将板框前泥压滤成为泥饼, 对泥饼 (下称泥饼) 进行取样, 每隔 5 min 取一次样, 共取 3 次; 产生的泥饼将被运至堆场, 对堆场的堆放一段时间的泥饼取样 (下称堆场泥), 共取 3 个样。上述采样后将样品密封于聚乙烯袋中, 低温保存运回实验室进行试验分析。

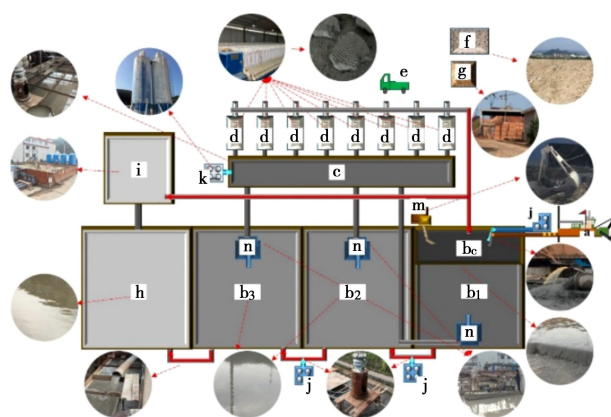


图 1 “泥浆浓缩—板框压滤—处置利用”工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of “mud concentration-plate frame pressure filtration-disposal utilization”

### 1.3 试验方法

工艺各阶段泥样的密度、浓度、相对密度、泥饼重塑样的无侧限抗压强度、破坏应变及压缩系数均参考标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 进行测定; 泥样、水样的 pH、有机碳 TOC、总氮 TN、总磷 TP 及重金属根据《水和废水监测分析方法》第四版进行测定。泥饼的粒径分布采用激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000) 进行测量。

泥饼重塑样按照工程中板框压滤产生的原状泥饼的平均含水率 (57.75%) 及密度 (1.57  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 作为制样的依据, 泥饼捣碎后先调整含水率至原状样标准, 随后在环刀模具中通过击样法制样, 直至试样密度与

原状泥饼密度相同, 随后即可进行重塑的无侧限剪切试验及压缩试验。

底泥在疏浚、处理及利用过程中的体积变化是一个非常重要的参数, 涉及到工艺各环节的设计, 计算式如下:

$$V_{i\text{相对}} = \frac{\rho_{\text{原状}} \cdot C_{\text{原状}}}{\rho_i \cdot C_i} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{\text{原状}}$  为原状泥的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $C_{\text{原状}}$  为原状泥的浓度,  $\rho_i$  为第  $i$  个工艺环节泥的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $C_i$  为第  $i$  个工艺环节泥的浓度,  $V_{i\text{相对}}$  是第  $i$  个工艺环节泥相对原状泥的体积。

## 2 结 果

### 2.1 泥的物理性质在疏浚及处理利用过程中的变化规律

为了解底泥疏浚、处理及处置利用过程中泥的各种物理性质的变化规律, 分别测定了这一系列过程中泥的密度、浓度及相对密度, 见图 2~4。

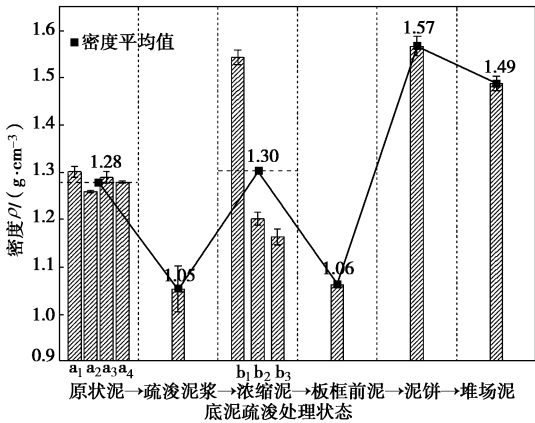


图 2 疏浚及泥处理利用过程中泥密度变化

Fig. 2 Change laws of density during dredging and mud treatment

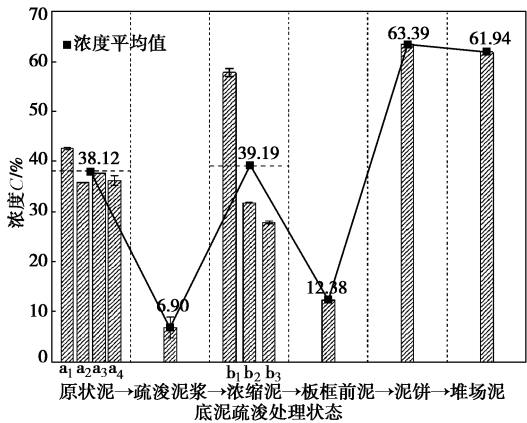


图 3 疏浚及泥处理利用过程中泥浓度变化

Fig. 3 Change laws of concentration during dredging and mud treatment

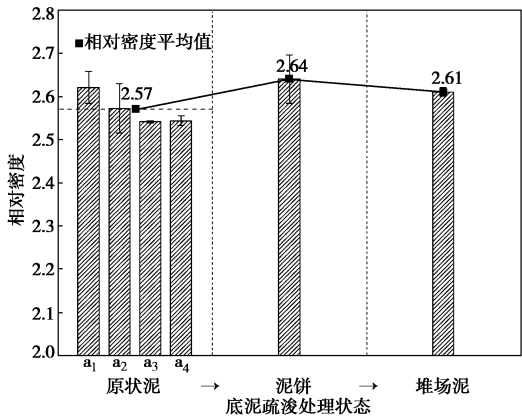


图 4 疏浚及泥处理利用过程中泥相对密度变化

Fig. 4 Change laws of specific gravity during dredging and mud treatment

从图 2 及图 3 可以看出泥在这套工艺中密度及浓度的变化: 原状泥经绞吸式疏浚后混入了大量的水, 密度及浓度大幅度下降; 疏浚泥浆在浓缩池中浓缩, 浓缩泥的密度及浓度甚至略高于原状泥; 浓缩泥泵入均化池后密度及浓度均大幅度下降, 使总体的浓缩效率并不高; 板框前泥进入板框压滤机后, 压滤泥饼的密度和浓度均较高, 泥饼的密度为  $1.57 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 浓度有 63.39% (换算为土工含水率约 58%); 堆场泥的密度及浓度均略低于泥饼, 分别是  $1.49 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 61.94%, 这可能是因为泥饼重塑变松散, 并且堆场的降雨导致泥的浓度下降。

为了更直观地说明这个过程, 运用式 (1), 得到了疏浚、处理及处置利用过程中泥相对体积的变化, 见图 5。从图 5 可以看到, 1 体积的原状泥在绞吸式疏浚后体积大幅度增加, 变为 6.74 相对体积的疏浚泥浆, 即绞吸式疏浚使底泥体积接近变为原来的 7 倍; 经过浓缩池浓缩后, 相对体积变为 1.11; 而进入均化池后, 相对体积变为 3.72; 经板框压滤形成的泥饼及堆场泥的相对体积分别为 0.49 及 0.53, 即基本上底泥经过这一套工艺处理得到的最终产物体积变为原状泥的二分之一。图 4 展示了原状泥、泥饼及堆场泥的相对密度, 可以看出泥的相对密度未明显变化, 均在 2.6 左右。

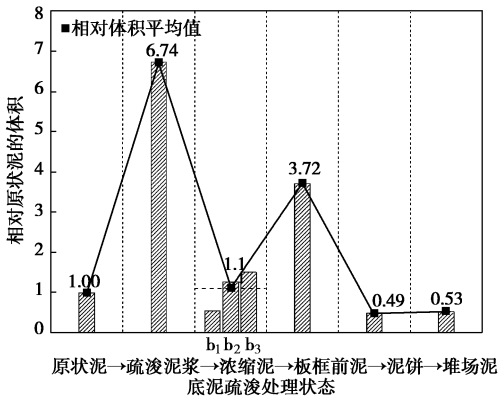


图 5 疏浚及泥处理利用过程中泥相对体积变化

Fig. 5 Change laws of volume during dredging and mud treatment

2.2 泥的化学性质在疏浚及处理利用过程中的变化规律

为了解疏浚、处理及处置利用过程中泥的各种化学性质的变化规律, 分别测定了这一系列过程中泥的 pH、有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 及重金属, 如图 6~10。

图 6 展示了疏浚、处理及处置利用中泥 pH 的变化, 可以清楚地看到原状泥在疏浚、浓缩过程中 pH 都呈中性, 接近 7; 而板框前泥、泥饼及堆场泥的 pH 的呈强碱性, pH 在 12 左右, 这主要是因为添加了石灰的缘故。并且值得注意的是, 堆场泥的 pH 要比泥饼低 1.2, 这很可能是泥饼在堆场堆放过程中, 由于雨水的洗刷, 导致 pH 下降。

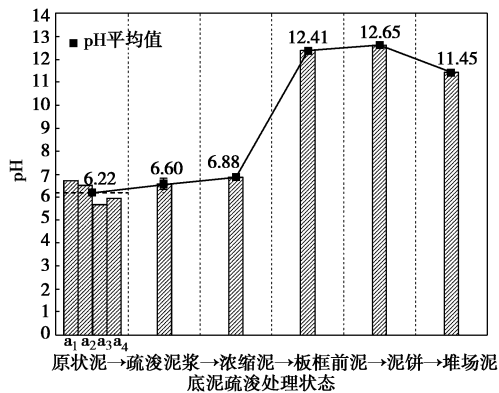


图 6 疏浚及泥处理利用过程中泥 pH 变化

Fig. 6 Change laws of pH during dredging and mud treatment

图 7 是底泥处理过程中 TOC 变化图, 可以看到底泥经板框压滤处理后, 泥饼及堆场泥的 TOC 都大幅度下降, 剩 0.03% 左右; 同时监测了板框压滤的尾水的 TOC, 尾水的 TOC 约为 43.32 mg/L, 这说明在板框压滤过程中, 泥中的 TOC 可能随着压滤尾水被带出。

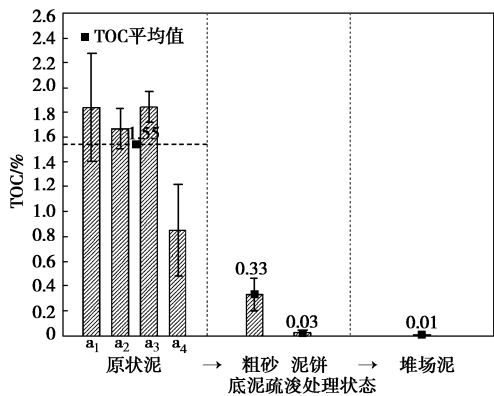


图 7 疏浚及泥处理利用过程中泥 TOC 变化

Fig. 7 Change laws of TOC during dredging and mud treatment

图 8 及图 9 分别展示了泥中 TN、TP 在处理利用中的变化。经过压滤后泥饼的 TN 有一定程度的下降, 同时测定压滤尾水的 TN, 尾水的 TN 约为 8.93 mg/L, 尾水的 TN 相当高, 可知在压滤过程中泥的一部分 TN 随着压滤尾水被带出; 而堆场泥的 TN 大幅度的下降,

很有可能是底泥在堆场堆放过程中, 雨水的冲刷或下渗带走了 TN。图 9 中 TP 的规律与 TN 不同, 无论是泥饼中的 TP 还是堆场泥中的 TP 均没有明显的下降; 测定压滤尾水的 TP, 尾水的 TP 约为 0.11 mg/L。这些都说明 TP 很好地吸附在土颗粒中, 不会随着间隙水的压滤或浸出而损失。

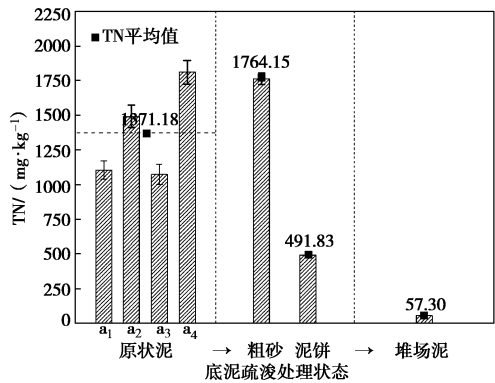


图 8 疏浚及泥处理利用过程中泥 TN 变化

Fig. 8 Change laws of TN during dredging and mud treatment

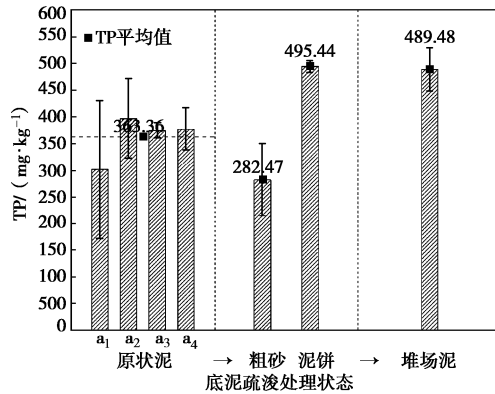


图 9 疏浚及泥处理利用过程中泥 TP 变化

Fig. 9 Change laws of TP during dredging and mud treatment

图 10 展示了各种状态的泥 6 种重金属的总量情况, 其中原状泥的值是 4 个区域的重金属含量的平均值。可以看出处理后的产物, 即泥饼及堆场泥中的重金属含量基本没有特别显著的变化。此外测定的压滤尾水中, 也未检测出重金属, 这说明底泥中的重金属基本结合在颗粒中。

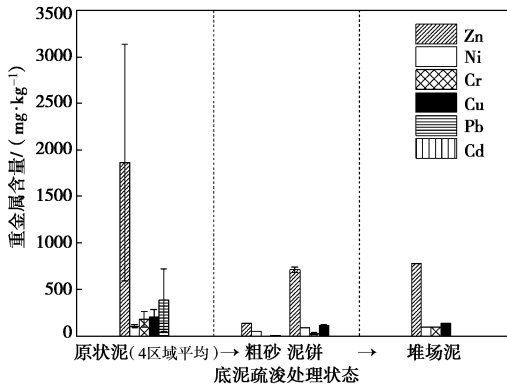


图 10 疏浚及泥处理利用过程中泥重金属变化

Fig. 10 Change laws of heavy metals during dredging and mud treatment

## 2.3 疏浚泥饼的力学性质

为了解压滤泥饼的力学性质, 关注了泥饼的粒径分布、重塑样的无侧限抗压强度以及压缩特性。重塑土的粒径分布如图 11 所示, 6 组无侧限抗压强度试验及 5 组压缩试验的结果分别见图 12, 13。

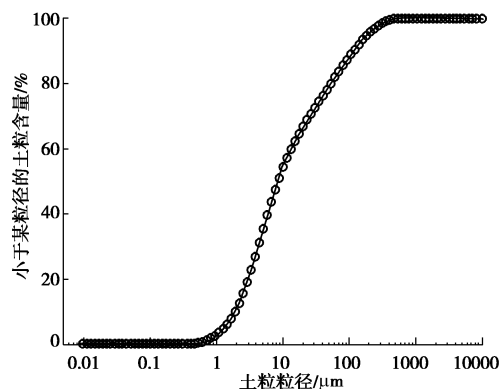


图 11 泥饼的累积粒径曲线

Fig. 11 Cumulative grain-size curves of mud cake samples

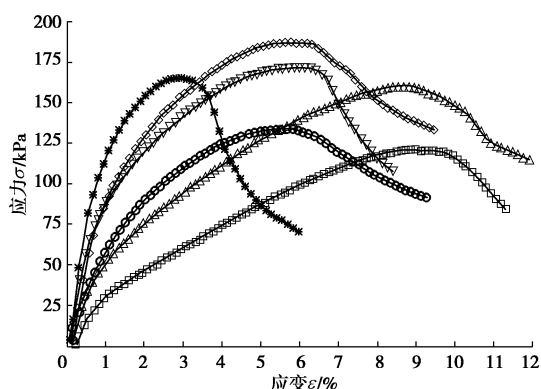


图 12 6 个重塑泥饼样品的应力 - 应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of 6 reshaped mud cake samples

根据图 11, 可知泥饼的黏粒含量 ( $<5 \mu\text{m}$ ) 为 35%, 根据标准《土的分类标准》(GBJ 145—90), 泥饼土属于高液限粉土。根据图 12, 可以得到重塑泥饼的无侧限抗压强度平均为  $156.46 \pm 24.55 \text{ kPa}$ , 破坏应变为  $6.44\% \pm 2.27\%$ 。根据图 13, 利用 100 kPa 和 200 kPa 压力下对应的孔隙比计算重塑泥饼的压缩系数, 压缩系数为  $0.37 \pm 0.12 \text{ MPa}^{-1}$ , 根据《建筑地基设计规范》(GB 50007—2011), 重塑泥饼是中等压缩性土。

## 3 讨 论

前文分别总结了典型工程“通济桥水库环保疏浚及泥处理利用工程”中泥的物理、化学性质变化规律, 同时也分析了疏浚泥饼的力学性质。以此为基础, 接下来进一步讨论该工程中疏浚、泥浆处理及泥饼处置利用中存在的问题。

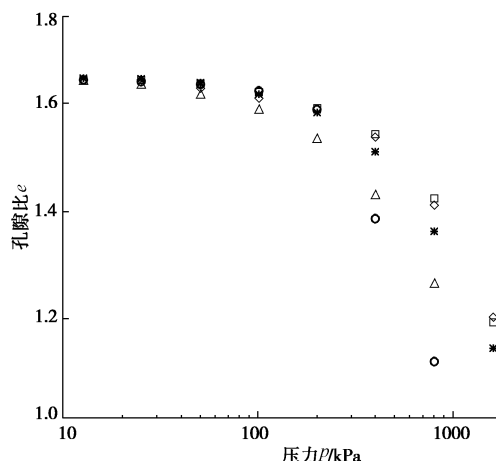


图 13 5 个重塑泥饼样品的压缩曲线

Fig. 13 Compression curves of 5 reshaped mud cake samples

### 3.1 该典型工程中的疏浚问题

从图 5 疏浚及泥处理过程中泥体积变化规律可以看出, 1 体积的底泥经过绞吸式疏浚后, 疏浚泥浆的相对体积为 6.74。即这样的疏浚方法使底泥体积大幅度增加, 使后续的处理、处置及利用的难度大大增加, 本工程不得不采用 3 个浓缩池储存浓缩, 以及后续多个板框压滤机配合脱水。中国大多数的疏浚工程都存在类似的问题: 湖泊、水库多采用绞吸式的疏浚方式, 而河道底泥则多采用排干后水力冲刷清淤。这些疏浚方式都使底泥的浓度大幅度降低, 体积增量显著增加。假若存在高浓度的疏浚方式, 在疏浚时泥浆体积并不增加或者小幅增加, 便可以极大地减小后续的处理利用难度。因此这也是中国目前存在的疏浚上的难题, 亟需高浓度的疏浚方式。

### 3.2 该典型工程中的泥浆处理问题

该典型工程在泥浆处理过程中存在两个问题。首先, 从图 5 可以看出, 疏浚泥浆经过浓缩相对体积变为 1.11, 这部分浓缩泥本应该混合石灰后进入板框压滤机, 然而经过小型的绞吸式挖泥船泵送至均化池后, 泥浆体积再次增加, 板框前泥相对体积变为 3.72。这样使浓缩池效率大打折扣, 并且加大了板框压滤机的处理工作量。因此需要寻求使浓缩池中的浓缩泥保持高浓度进入板框压滤机的方法。

此外, 根据图 5 原状泥与泥饼相对体积的关系, 我们可以分析疏浚工程与板框压滤机处理的工效关系。图 5 显示, 1 体积的原状泥经过板框压滤变为 0.49 相对体积的泥饼, 那么可以计算绞吸式挖泥船每单位时间疏浚出底泥将处理成为多少的泥饼。本次通济桥水库疏浚采用了两艘绞吸式挖泥船, 每艘船按照 24 h 工作; 共采用 8 台板框机, 每台板框压滤机按照 24 h 工作。那么计算疏浚、板框压滤的工效, 如表 1。

由表 1 可见, 在本工程中, 绞吸式挖泥船每日产

生泥饼的方量要远大于板框压滤机每天能处理的泥饼量, 在实际工程中也出现了挖泥船需要等待压滤机将上一批疏浚的泥饼压滤完成, 才能进行下一次疏浚的状态。也就是说在通济桥疏浚及泥处理工程中, 疏浚与泥处理工效是不匹配的。为了使工效匹配, 需要增加板框压滤机的数量, 经过计算, 共计需要 21 台 230 m<sup>3</sup>/d 的板框压滤机才可以匹配。本工程需要庞大的板框压滤规模是值得思考的, 是否有其他更高并且简易的泥水分离工艺衔接疏浚工程, 需要进一步研究。

表 1 通济桥疏浚及泥处理工程疏浚、板框的工效

Table 1 Dredging and mud treatment efficiency of Tongjiqiao reservoir				
施工机械	数量	单位处理能力/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	累计处理能力/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	累计泥饼生产量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
绞吸挖泥船	2	<sup>a</sup> 4800	<sup>a</sup> 9600	<sup>b</sup> 4704
板框压滤机	8	<sup>b</sup> 230	<sup>b</sup> 1840	<sup>b</sup> 1840

注: a: 指原状泥方量; b: 指泥饼生产方量。

3.3 该典型工程中的泥饼处置利用问题

泥饼如何处置利用取决于泥饼的性质。在本工程中, 压滤成的泥饼运至附近的矿山、沙坑进行土地的修复, 部分泥饼被运往砖厂进行烧砖利用。在此分析泥饼的性质是否满足这样的处置及利用方式。

根据 2.1 节及 2.3 节泥饼的物理性质及力学性质, 可以看出压滤产生的泥饼力学性质较好, 接下来主要讨论其环境特性。从图 6 中可以看出泥饼的 pH 高达 12.65, 根据《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007) 判断, 压滤产生的泥饼已经成为危废, 这直接说明泥饼已经无法利用, 必须按照危废的处置方法进行处置。此外, 图 6 中堆场泥的 pH 为 11.45, 已经低于泥饼的 pH, 这很可能是泥饼在堆场堆放过程中, 由于雨水的洗刷, 导致 pH 下降。这无疑将会在泥饼的处置利用过程中造成环境的二次污染。因此本工程目前对泥饼的处置利用方法是不可行的。

分析泥饼 pH 较高的原因, 很明显可知是因为板框压滤中添加石灰导致的, 那么是否可以不添加石灰, 或者更换其他相同作用的中性材料? 石灰一般是污泥脱水常用的添加剂<sup>[11-13]</sup>, 国内在淤泥板框脱水中加入石灰就是借鉴污泥脱水工程而产生的工艺。因此弄清楚石灰在淤泥板框脱水中的作用, 并寻找相同作用的中性材料是未来的发展方向。

除泥饼的 pH 问题严重, 根据图 8, 可以看出堆场泥的 TN 相较于泥饼的 TN 也有大幅度下降, 这可能也是由于雨水冲刷或下渗带走了泥饼中的 TN。那么 TN 的流失对周边的水环境是否会产生二次污染也需要考虑。而根据图 9, 10 可以看出 TP、6 种重金属均

很好地稳定在堆场泥中, 在之前的研究, 也有学者<sup>[14-15]</sup>指出石灰对重金属有一定的稳定效果, 因此泥饼中的 TP 及重金属对环境的负面影响并不会很显著。

4 结 论

(1) 研究了典型工程“通济桥水库环保疏浚及泥处理利用工程”工艺过程中泥的物理、化学及力学性质的变化规律。在疏浚-浓缩-压滤的工艺过程中, 泥的相对密度基本不变; 密度及浓度在疏浚后大幅度降低, 在浓缩及压滤完成后大幅度提升; pH 在压滤完成后大幅度提升; TOC 及 TN 在压滤完成后大幅度下降; TP 及重金属没有明显变化; 压滤泥饼属于高液限粉土, 其无侧限抗压强度均值为 156.46 kPa, 破坏应变为 6.44%, 压缩系数为 0.37 MPa<sup>-1</sup>。

(2) 梳理了在疏浚、泥处理及利用中存在的问题: 底泥经疏浚后体积增幅 6.74 倍, 需要研发高浓度的疏浚技术; 泥浆在浓缩工艺中效率低; 绞吸式疏浚工艺与板框压滤工艺工效不匹配, 单位时间绞吸疏浚出的泥浆需要大模板框压滤机完成处理; 板框压滤工艺因添加石灰使泥饼呈强碱性难利用, 需要寻找替代方法。

参考文献:

[1] 武剑博, 黄引平. 环保疏浚的技术要求与环保绞刀的设计[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(7): 138 - 140. (WU Jian-bo, HUANG Yin-ping. Technical demands of protection dredging and design of environmental protection cutters[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(7): 138 - 140. (in Chinese))

[2] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1 - 10. (ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin. Advance in the study on the effectiveness and environmental impact of sediment dredging[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(1): 1 - 10. (in Chinese))

[3] 徐桂中, 杨瑞敏, 丁建文, 等. 高含水率疏浚泥堆场颗粒分选规律现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 634 - 638. (XU Gui-zhong, YANG Rui-min, DING Jian-wen, et al. Field experiment on grain sorting behaviors in reclaimed land of dredged slurries with high water content[J]. Journal of Southeast University 2013, 43(3): 634 - 638. (in Chinese))

[4] 黄英豪, 董 婵. 淤泥处理技术原理及分类综述[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 91 - 94. (HUANG Ying-hao, DONG Chan. Principles and classifications for treatment of dredged material[J]. Yellow River, 2014, 36(7): 91 - 94. (in Chinese))



- [5] 张春雷, 管非凡, 李磊, 等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, **32**(12): 95 - 99. (ZHANG Chun-lei, GUAN Fei-fan, LI Lei, et al. The progress in the reutilization treatment and disposal of dredged sediments in China[J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(12): 95 - 99. (in Chinese))
- [6] 唐彤芝, 丛建, 彭吉力, 等. 疏浚土排水固结过程中水质分析与污染性评价[J]. 人民长江, 2017, **48**(1): 12 - 19. (TANG Tong-zhi, CONG Jian, PENG Ji-li et al. Analysis of water quality and evaluation of water pollution during drainage and consolidation of dredged sediment[J]. Yangtze River, 2017, **48**(1): 12 - 19. (in Chinese))
- [7] 吕鑑, 霍守亮, 荆一凤, 等. 环保疏浚底泥堆场污染物扩散防治研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(3): 229 - 234. (LÜ Jian, HUO Shou-liang, JIN Yi-feng, et al. Research on pollutant diffusion control of contaminated dredged material on the mud dumping site[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, **32**(3): 229 - 234. (in Chinese))
- [8] 朱伟. 中国水利学会疏浚与泥处理利用专委会综合讨论摘登[J]. 水资源保护, 2018, **34**(4): 93 - 94. (ZHU Wei. Summary of the comprehensive discussion of the special committee on dredging and mud treatment and utilization of China water conservancy society[J]. Water Resources Protection, 2018, **34**(4): 93 - 94. (in Chinese))
- [9] 汤德意, 沈杰. 生态清淤及淤泥处置技术在水库整治中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2018, **38**(3): 70 - 75. (TANG De-yi, SHEN Jie. Application of ecological dredging and silt disposal technique in reservoir dredging engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, **38**(3): 70 - 75. (in Chinese))
- [10] 匡帅, 保琦蓓, 康得军, 等. 典型小型水库表层沉积物重金属分布特征及生态风险[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 336 - 348. (KUANG Shuai, BAO Qi-bei, KANG De-jun, et al. Distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface sediments deposited in a typical small sized water reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 336 - 348. (in Chinese))
- [11] ZALL J, GALIL N, REHBUN M. Skeleton builders for conditioning oily sludge[J]. Journal Water Pollution Control Federation, 1987, **59**(7): 699 - 706.
- [12] 余志荣, 郁雨苍. 石灰在污泥调质中的应用及作用机理研究[J]. 中国给水排水, 1989, **5**(6): 7 - 11. (YU Zhi-rong, YU Yu-cang. The application and mechanism of lime in sludge conditioning[J]. China Water & Wastewater, 1989, **5**(6): 7 - 11. (in Chinese))
- [13] 冯凯, 黄鸥. 石灰调质与石灰干化工艺在污泥脱水中的应用[J]. 给水排水, 2011, **37**(5): 7 - 10. (FENG Kai, HUANG Ou. Application of lime conditioning method and lime drying method in sludge dewatering[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, **37**(5): 7 - 10. (in Chinese))
- [14] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 309 - 313. (WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, et al. Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil[J]. Environment Science, 2015, **36**(1): 309 - 313. (in Chinese))
- [15] 杜延军, 金飞, 刘松玉, 等. 重金属工业污染场地固化/稳定处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 116 - 124. (DU Yan-jun, JIN Fei, LIU Song-yu, et al. Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 116 - 124. (in Chinese))