



## 湖泊疏浚淤泥固化试验研究

陈海斌<sup>1,2</sup>, 郑世华<sup>1,2</sup>, 钟煌亮<sup>1,2</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 上海航道工程总承包有限责任公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对湖泊疏浚淤泥有机质含量高、含水率高、强度低等特点, 采用水泥、生石灰和粉煤灰等添加剂对其进行固化研究, 阐述淤泥固化后的短期强度和含水率变化特征, 并对固化效果进行分析和总结。根据模糊优化理论, 将固化效果、生产成本、工期等因素作为优化目标, 建立数学模型, 提出并分析固化剂混合添加方案, 并对添加方案进行试验论证。结果表明, 掺入4%的水泥和9%的粉煤灰为最优固化方案, 强度增长约38%, 成本降低约45%, 该固化方案可满足相应的工程要求。

**关键词:** 疏浚淤泥; 固化机理; 强度; 模糊优化

中图分类号: U 616'.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0230-04

### Solidification test investigation on lake's dredging sludge

CHEN Hai-bin<sup>1,2</sup>, ZHENG Shi-hua<sup>1,2</sup>, ZHONG Huang-liang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Shanghai Waterway Engineering General Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of lake's dredging sludge, i.e. high organic content, high water content and low strength, this paper investigates solidification tests with cement, lime and fly ash as improving additive. Proceeding from the changing characteristics of strength and water content after solidification, we study the solidification mechanism of the dredged sludge and analyze the solidification efficiency. According to the fuzzy optimization theory, an optimum model is set up with optimizing scheme of cost, efficiency and time, by which a best project is obtained and analyzed. Results show that the mixture additive of 4% cement and 9% fly ash can be chosen as the optimal scheme according to the model. Due to the mixture addition, the cost decreases about 45% and the shear strength increases to 38%, and this scheme meets the engineering requirements.

**Key words:** dredging sludge; solidification mechanism; strength; fuzzy optimization

城市湖泊疏浚清淤工程中, 需要处理大量疏浚淤泥, 而此类淤泥有机质含量高、含水率高、强度低, 自然干化时间一般需要5~10 a, 甚至更久。这将占用大量的土地, 并可能造成地表水污染等其他问题。目前最好的方法是对其固化处理然后资源化利用, 即通过加入固化材料进行简单的混合搅拌, 利用固化材料与淤泥中水分和土颗粒的物理化学反应, 钝化重金属、降低含水量和

提高抗压强度<sup>[1]</sup>。范昭平等<sup>[2]</sup>针对湖泊疏浚底泥有机质含量高的特点, 提出了对高有机质淤泥采用水泥-石膏进行固化的方法; 孟庆山等<sup>[3]</sup>针对武汉东湖底泥的治理, 提出利用水泥作为主固化材料、粉煤灰或石膏作为辅助固化材料可极大地改善单纯以水泥作为固化材料的固化效果。

本文针对湖泊疏浚底泥的特点, 加入不同比例固化材料对其进行固化, 研究固化土体的含

收稿日期: 2012-10-24

作者简介: 陈海斌(1978—), 男, 工程师, 从事围海造地、环保疏浚等水运工程的施工和研究。

水率和短期强度变化规律。结合模糊优化理论, 将固化效果、生产成本、工期等因素作为优化目标, 建立数学模型, 得出固化材料最佳掺加比例, 并通过试验进行论证。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验淤泥取自武汉某湖泊疏浚底泥, 基本物理性质指标见表1。根据土的分类方法, 属高液限

有机质黏土, 其中液塑限依据《土工试验方法标准》<sup>[4]</sup>测定, 有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定, 颗分试验采用烘干法测定。

### 1.2 试验方法

针对湖泊疏浚底泥脱水干化土的特性, 结合实际工程施工特点, 探讨固化剂添加总量在13%情形下, 单一固化材料和2种固化材料混合添加方案时土体的短期强度增长和含水率变化规律, 试验方案见表2。

表1 疏浚淤泥基本物理性质指标

平均含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	不同粒径含量/%			有机质含量/%	比重	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
				>0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm			
124	58.6	29.4	29	1.32	1.04	97.64	8.8	2.67	1.31

表2 固化试验方案

方案	水泥掺量/%	生石灰掺量/%	粉煤灰掺量/%	总掺量/%
1	0	0	0	0
2	13	0	0	13
3	0	13	0	13
4	0	0	13	13
5	6	0	7	13
6	4	0	9	13
7	0	6	7	13
8	0	4	9	13

依据试验方案, 先将淤泥和规定配比的添加剂经搅拌均匀后, 装入钢制直剪环刀制成直剪试样。制样前在环刀内壁均匀涂一层润滑剂, 以将试验的人为影响降到最低。固化淤泥拌合物按干密度控制法进行制样, 随即放入温度(20±2)℃、湿度大于90%的养护室进行标准养护, 每组试验测定3个平行试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 单一添加剂对强度的影响

单一添加剂对淤泥的含水率和短期强度的影响见图1和2。在无添加剂的情况下, 24 h后土体的强度和含水率基本上不会发生变化。当添加13%的水泥时, 24 h后土体的强度增加至41 kPa, 增幅达到107%, 含水率降低约12%; 当添加13%的生石灰时, 24 h后土体的强度增加至28 kPa, 增幅为63%, 含水率降低约16%; 当添加13%的粉煤灰时, 24 h后土体的强度增加至21 kPa, 增幅为

25%, 含水率降低约6%。可见, 添加水泥使土体的短期强度增长最大, 生石灰使土体的含水率降低最大。

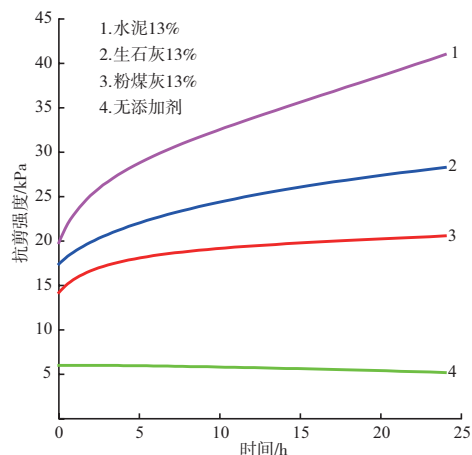


图1 单一添加剂对强度影响

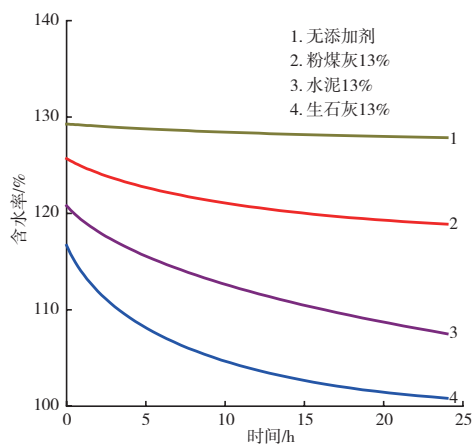


图2 单一添加剂对含水率影响

可以看出,水泥的处理效果较好,但成本很高;粉煤灰处理效果较差,但成本较低。为了保证固化效果的基础上降低生产成本,可以采用两种添加剂混合的固化方案。

## 2.2 混合添加剂对强度的影响

由图3和4可知,添加6%水泥和7%粉煤灰,土体强度增长最大约53%,添加4%水泥和9%粉煤灰次之,强度增长约38%;添加6%生石灰和7%粉煤灰,土体含水率降低最大约13%,添加6%水泥和7%粉煤灰次之,含水率降低约8%。

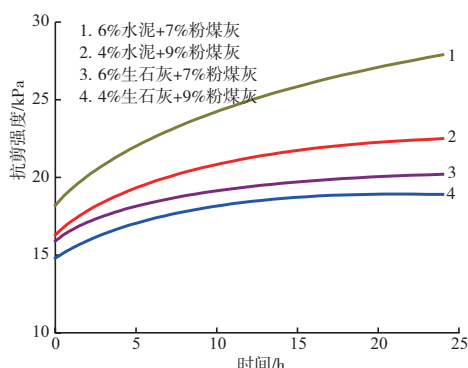


图3 混合添加剂对强度影响

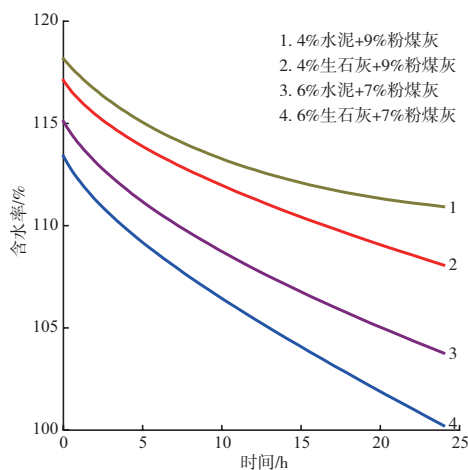


图4 混合添加剂对含水率影响

通过试验可知,水泥在固化过程中占主导地位,其变化引起固化土强度变化最为显著;添加粉煤灰产生的固化强度增强效果相当于减小了淤泥含水率,对于土体固化的早期强度作用更大。

## 2.3 优化理论分析

在固化剂添加总量为13%条件下,固化剂的添加配比选择至关重要。最优配合比是既能达到工程所需的短期强度,又能节约成本。基于模糊优化理论寻找最优方案,假设对1 t淤泥进行处

理,则需要0.13 t添加剂;生石灰、水泥和粉煤灰添加量分别为 $x_1$  t,  $x_2$  t和 $x_3$  t。

由图1和2可知,单一固化剂对土体强度和含水率的影响在添加后12 h内呈曲线关系,12 h后基本上呈线性关系,则假定各种添加剂对土体长期强度和含水率影响为线性关系,每0.01 t添加剂加固1 t土体的效果可以根据单一添加剂试验确定。结合工程所在地固化剂的市场价格,其数学模型参数见表3。

表3 各添加剂的数学模型参数

添加剂	含水率变化/%	短期强度增量/kPa	成本/元
0.01 t生石灰	-2.592	1.73	3.8
0.01 t水泥	-3.049	2.60	4.8
0.01 t粉煤灰	-3.145	1.19	1.6

根据2种添加剂不同添加方案,在满足约束条件下使目标函数达到最优,其中由于掺量13%根据经验确定,此界限是模糊的,可表达为:

$$F \text{ind} \mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T \quad (1)$$

$$\min f_1(x) = 380x_1 + 480x_2 + 160x_3 \quad (2)$$

$$\min f_2(x) = -2.592x_1 - 3.049x_2 - 3.145x_3 \quad (3)$$

$$\min f_3(x) = 1.73x_1 + 2.61x_2 + 1.19x_3 \quad (4)$$

$$\text{s.t. } g_i = \sum x_i \leq 0.13 (i=1, 2, 3) \quad (5)$$

$$x_i \geq 0 (i=1, 2, 3)$$

依据有限化处理原则,假设每种添加剂的掺量为整数。根据多目标规划模糊化原理<sup>[5]</sup>,对含水率、短期强度和成本进行优化与筛选。

首先确定强度目标的指标优属度矩阵:

$${}_1\tilde{R}_{1j} = 1 - \frac{0.89x_1 + 1.0x_2 + 0.7x_3}{\max + \min} = 1 - \frac{0.89x_1 + 1.0x_2 + 0.7x_3}{21.84} \quad (6)$$

$${}_1\tilde{R}_{2j} = \frac{1.73x_1 + 2.61x_2 + 1.19x_3}{\max + \min} = \frac{1.73x_1 + 2.61x_2 + 1.19x_3}{49.4} \quad (7)$$

根据优属度矩阵计算得:  ${}_1\mathbf{G} = (0.648, 0.553)$ ,  ${}_1\mathbf{B} = (0.352, 0.447)$ , 已知  ${}_1\mathbf{W} = (0.9, 0.1)$ , 取  $p=1$  可得强度下的目标优属度。

将成本目标优属度进一步优化,优化步骤相同。计算得到:添加4%水泥和9%粉煤灰所对应的目标优属度最大,  $z_{122} = 0.281$ 。

## 2.4 试验结果分析

从图5可以看出,理论预测值和试验值集中分

布在角平分线上, 说明了理论预测的合理性。从在角平分线以下的分布点可以看出, 在一些添加剂配比方案中, 理论预测高估了实际强度值, 表明理论预测过程中各添加剂互不影响的假设存在一定不合理性。

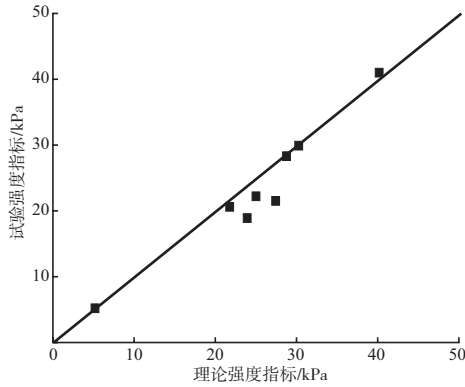


图5 理论强度和试验强度的比较

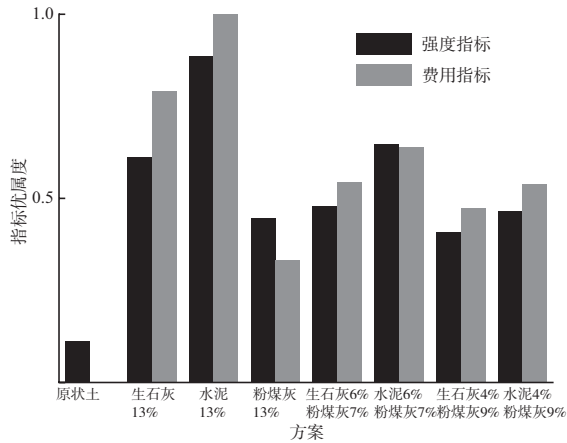


图6 不同方案的强度和费用指标

对试验结果进行指标优属度处理, 由图 6可知, 单独掺入13%的水泥不仅强度指标最高, 但成本指标也最高; 单独掺入13%的粉煤灰, 强度

指标最低, 相应的成本也较少。在混合添加剂方案中, 掺入生石灰4%、粉煤灰9%成本指标最小; 掺入水泥6%、粉煤灰7%强度指标最大。实际工程中既要满足短期强度要求, 又要考虑经济成本, 添加4%水泥、9%粉煤灰为最优方案。该方案不仅可以满足强度要求, 而且可以节省约45%的成本。

### 3 结论

1) 在单一添加剂条件下, 水泥的处理效果较好, 但成本很高; 粉煤灰处理效果较差, 但成本较低。

2) 采用多目标规划模糊化模型来反映混合添加剂的效果比较理想, 偏差较小, 产生偏差的原因主要是没有考虑添加剂的相互影响。

3) 两种添加剂混合时, 理论分析和试验结论一致。当掺入4%的水泥和9%的粉煤灰为最优方案。此方案有效地降低成本约45%, 强度增长率达到38%。

### 参考文献:

- [1] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机制初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68.
- [2] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 8(26): 1 327-1 334.
- [3] 孟庆山, 杨超, 雷学文, 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 3(31): 707-712.
- [4] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [5] 陈守煜, 赵瑛琪. 多目标规划模糊优化原理与模型[J]. 水利学报, 1990(12): 37-43.

( 本文编辑 武亚庆 )

## · 消 息 ·

### 三峡通航信息服务技术获航海科技二等奖

日前, 《三峡—重庆航运综合信息服务系统关键技术研究及示范》获评中国航海学会科学技术奖二等奖。

为有效提升枢纽通航能力, 交通运输部长江三峡通航管理局以信息化建设为突破点, 运用现代调度、GPS、雷达等技术, 建成三峡—葛洲坝枢纽交管系统、数字化航道等。船方通过GPS终端可随时随地申报过闸, 系统将按其所处位置及通过“报告线”的次序进行自动排序。三峡通航管理局滚动发布过闸计划, 通过信息化系统适时公开通航信息, 船方可随时通过互联网进行查询和监督, 实现了开方式交流。

摘自《中国交通报》