

## 疏浚淤泥的固化试验研究

邵玉芳<sup>1</sup>, 龚晓南<sup>2</sup>, 郑尔康<sup>3</sup>, 刘增永<sup>4</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程系, 杭州 310029; 2. 浙江大学土木工程学系, 杭州 310027;  
3. 铁道部第四勘察设计院杭州分院, 杭州 310017; 4. 浙江省绍兴市公路管理处, 绍兴 312000)

**摘要:** 采用一种成分可调的水泥系土壤固化剂对太湖清淤工程的 3 种代表性淤泥质土(HH-4、HH-10、LM-2)进行了固化试验, 以研究太湖淤泥固化后用于路基填筑的可行性, 确定固化剂各组分的质量分数, 掺入固化剂的最佳质量分数以及固化土的强度变化特性。结果表明: 当固化剂质量分数为 6% 时, 3 种固化土均能满足路堤填料的规范要求, 但加固 HH-10 土样时, 需要提高固化剂中 A、D、F 组分的质量分数。由于土样颗粒级配和化学成分的不同, HH-4 固化土具有较高的早期强度, LM-2 固化土具有较高的后期强度。疏浚淤泥固化并用于路基填筑, 避免了淤泥的长期占地堆放, 既减少了环境污染, 又保护了土地资源, 经济和社会效益显著。

**关键词:** 土壤固化剂; 疏浚淤泥; 路基; 击实试验; 无侧限抗压强度试验

**中图分类号:** TU 472. 5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)9-0191-04

邵玉芳, 龚晓南, 郑尔康, 等. 疏浚淤泥的固化试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 191-194.

Shao Yufang, Gong Xiaonan, Zheng Erkang, et al. Experimental study on stabilization of dredged silts[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 191-194. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

河道、港口需要定期疏浚以净化水质和保障水路畅通, 从而产生大量含有各种污染物的废土。以前疏浚淤泥的处置方法一般是倒入海洋或冲填在山谷等空地, 严重影响海洋及堆放场地周围的环境。因此, 欧盟已制定相关法律, 规定疏浚淤泥必须作为污染废弃物加以处理, 不得向海洋倾倒。美国也制定了疏浚淤泥综合管理计划, 目的是寻找经济、环保的处理方法, 避免疏浚淤泥的二次污染。解决疏浚淤泥污染最有效的方法是资源化利用。目前国内大规模的公路、房屋等建设工程需要耗费大量土料, 土地资源日益匮乏。若将疏浚淤泥进行处理, 代替土料, 不但解决了淤泥的占地堆放、环境污染, 还能保护土地资源<sup>[1-5]</sup>。

土壤固化技术已成为处理污泥或淤泥的最可靠、经济的方法之一。土壤固化剂由多种无机和有机材料配制而成, 其成分可以根据固化对象进行调整。固化剂的加固原理是生成胶凝物质, 黏结土颗粒; 降低土孔隙中的动电电位, 促使黏土颗粒凝聚; 提高固化土系统的比表面积, 促进水化反应等<sup>[6-7]</sup>。Andromalos 等(1995)从化学试剂种类及掺入比、施工设备以及养护等方面提出了

模拟现场条件的疏浚淤泥固化方法<sup>[8]</sup>。Agostini 等(2007)、Lafhaj 等(2007)提出了污泥处理的 Novosol 法, 即采用  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$  (羟磷灰石) 固定铅、铬、铜等有害物质, 采用热处理法去除有机质, 所得到的材料可用于制砖等<sup>[9,10]</sup>。Kumar 等(2001)用粉煤灰、石灰固化煤矿污泥, 所得固化土的标准击实密度、CBR、无侧限抗压强度等均满足公路填料的要求<sup>[11]</sup>。Chitambira 等(2007)通过高温养护研究水泥土的长期强度, 根据无侧限抗压强度与温度之间的关系推导出活化能, 活化能越高, 水泥土强度随温度升高的速度越快, 因此, 活化能与水泥土的长期强度呈正相关, 污染物质降低了水泥土的活化能, 将污泥碳化后, 水泥土的活化能显著提高<sup>[12]</sup>。Brouwers 等采用水泥和石灰固化疏浚淤泥, 发现水泥与石灰在固定污染物质时具有互补性, 疏浚淤泥经水泥和石灰处理后可作为建筑填料。以上研究对疏浚淤泥中污染物质的去除强调较多, 但对固化淤泥的工程性质研究还不够充分。而且不同水系的淤泥其性质差别很大。本文着重研究太湖疏浚淤泥固化后的工程性质, 并分析了固化土用作路基填料的可行性<sup>[13]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 土样

取有代表性的 3 种太湖疏浚淤泥(HH-4、HH-10、LM-2)各 50 kg, 密封后运至实验室, 测定重度( $\gamma$ )、含水率(天然含水率  $w$ 、塑限  $w_p$ 、液限  $w_L$ )等基本性质指

收稿日期: 2006-09-11 修订日期: 2007-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678158)

作者简介: 邵玉芳(1970-), 女, 浙江杭州人, 博士, 主要从事农业水利工程的学科科研工作。杭州 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310029。Email: shaoyf@zju.edu.cn

标, 见表 1。土样的化学组成及 pH 值见表 2。土样在 105 ~ 110℃恒温下烘干, 粉碎, 过 5 mm 筛后, 密封待用。

表 1 土样的基本性质指标

Table 1 Basic properties of soil samples

土样	类别	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$w/\%$	$w_p/\%$	$w_L/\%$
HH-4	黏质粉土	17.5	51.7	20.3	30.5
HH-10	黏土	17.9	67.8	18.7	37.4
LM-2	粉质黏土	18.6	61.7	23.8	32.0

表 2 土样的主要成分及 pH 值

Table 2 Main components and pH value of soil samples

土样	$w$ (SiO <sub>2</sub> )	$w$ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$w$ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$w$ (CaO)	$w$ (MgO)	pH
HH-4	54.7	11.4	3.2	0.9	1.0	4.9
HH-10	57.9	11.2	3.7	0.6	1.3	4.1
LM-2	50.3	14.6	6.7	1.7	1.1	5.3

1.1.2 土壤固化剂

采用 QS-I 水泥系固化剂进行加固, 其有效成分主要有:

- 1) 胶结土壤颗粒, 形成早期强度;
- 2) 与黏土矿物发生化学反应, 形成后期强度, 从而提高固化土的强度;
- 3) 具有表面活性作用和缓凝作用, 使得成分 B 更易进入土壤颗粒内部, 使离子交换反应迅速、彻底进行, 同时调整固化剂的延迟时间;
- 4) 可以防止水对固化土的浸蚀, 使固化土强度稳定, 不泥化;
- 5) 具有早强作用;
- 6) 其生成物能填充固化土的内部孔隙, 使固化土体积膨胀。

上述成分可以根据需要调整。分析土样的成分和物理性质, 调制了 5 种固化剂配方进行初步筛选试验, 选出 1<sup>#</sup> 配方用于 HH-4 和 LM-2 土样的固化, 2<sup>#</sup> 配方用于 HH-10 土样的固化。2<sup>#</sup> 配方与 1<sup>#</sup> 配方相比, 主要是提高了成分 A、D 和 F 的质量分数。

1.2 试验仪器和用具

1.2.1 标准击实仪

配备 2.5 kg 击锤、导杆、套筒、小型击实筒、底板、垫块等。

1.2.2 万能试验机

微机控制电子式万能试验机, 最大压力 50 kN, 精度 0.01 kN。

1.2.3 其他

- 恒温干燥箱;
- 电子天平: 感量 0.01 g;
- 台秤: 称量 15 kg, 感量 5 g;

圆孔筛: 孔径 40、25 mm 或 20、5 mm 各 1 个;

抗压强度试模: 直径和高度均为 5 cm 的圆筒形试模;

另需搅拌锅、碾土器、量筒、脱模器、修土刀、凡士林、平直尺、钢丝锯等。

2 击实试验

水泥土的最佳含水率接近于素土, 此处采用水泥系固化剂, 可认为固化土的最佳含水率也近似于素土, 因此测定了 3 种素土的最佳含水率 ( $w_0$ ) 和最大干密度 ( $\rho_{dm}$ )。细粒土的  $w_0$  约比  $w_p$  小 3% ~ 10%, 由于土样的  $w$  大大高于  $w_p$ , 因此采用干土法轻型击实试验, 共取 6 个点, 以 2% 递增, 分别是  $w_p - 8\%$ 、 $w_p - 6\%$ 、 $w_p - 4\%$ 、 $w_p - 2\%$ 、 $w_p$ 、 $w_p + 2\%$ , 按规范方法测定土样在上述含水率时的干密度, 绘制含水率 ~ 干密度 ( $w \sim \rho_d$ ) 曲线<sup>[15]</sup>, 如图 1 所示。 $w_0$  和  $\rho_{dm}$  结果见表 3。

表 3 击实试验结果

Table 3 Results of compaction tests

土样	$w_0/\%$	$\rho_{dm}/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
HH-4	17.7	1851.4
HH-10	15.6	1791.2
LM-2	19.6	1883.5

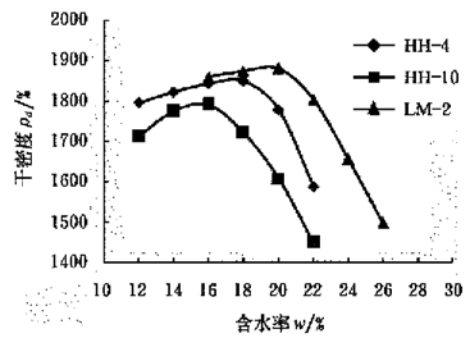


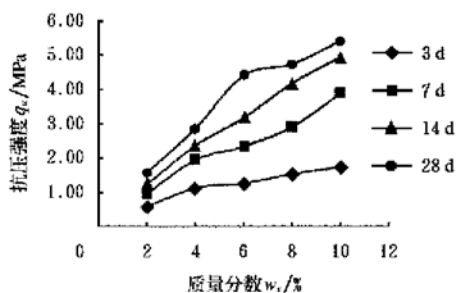
图 1 土样的含水率~干密度曲线

Fig. 1  $w \sim \rho_d$  curves of soil samples

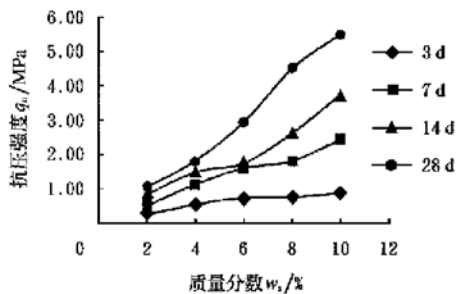
3 无侧限抗压强度试验

根据标准击实试验所得到的最佳含水率和最大干密度, 初步估算每组试样所需要的湿土质量, 再按湿土质量分数的 2%、4%、6%、8%、10%, 分别称取固化剂, 人工搅拌均匀后分 3 层压入试模内, 每一层击实后, 加入下一层土之前, 需拉毛表面。试样制作完毕静置 24 h 后脱模, 放入标准养护室 (室温 20℃, 相对湿度 100%) 内养护, 试验前 1 d 取出浸水<sup>[14]</sup>。拭去表面水分, 用修土刀将试样上下表面修平, 放入万能试验机内进行抗压强度试验, 加荷速率为 1 mm/min。

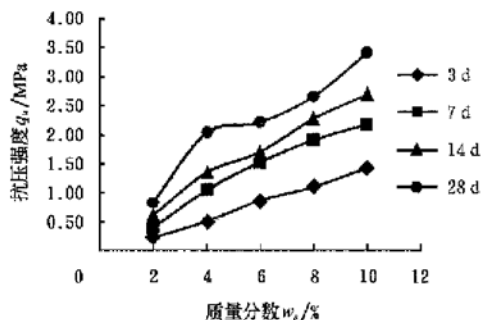
图 2、3 分别为采用 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 固化剂配方时, HH-4、LM-2、HH-10 固化土的无侧限抗压强度 ( $q_u$ ) 随固化剂质量分数 ( $w_s$ ) 及龄期的变化。由图 2、3 可见, 随着固化剂质量分数的提高和龄期的增长,  $q_u$  增幅逐渐加快, 尤其是 LM-2 固化土。图 1 中, 3 d 的 HH-4 和 LM-2 固化土的强度曲线都较平缓, 7 d 以后  $q_u$  曲线逐渐变陡, 强度增幅变大, 比较两种固化土, HH-4 的早期强度较大, LM-2 的后期强度较大。图 3 与图 2 中  $q_u$  的变化规律基本相似。



a. HH-4



b. LM-2

图 2 1<sup>#</sup> 固化剂配方的 HH-4、LM-2 固化土  $q_u$  曲线Fig. 2  $q_u$  curves of HH-4, LM-2 stabilized-soil by 1<sup>#</sup> stabilizer图 3 2<sup>#</sup> 固化剂配方的 HH-10 固化土  $q_u$  曲线Fig. 3  $q_u$  curves of HH-10 stabilized-soil by 2<sup>#</sup> stabilizer

## 4 结论与讨论

1) QS-1 水泥系土壤固化剂能有效固化太湖疏浚淤泥。根据土样性质, 采用 2 种不同的固化剂配方, 当固

化剂质量分数  $\geq 6\%$  时, 3 种固化土均可用作路堤填料<sup>[16]</sup>。固化剂质量分数为 6% 时, 路堤造价约为 39 元/ $m^3$ , 与传统材料(塘渣  $> 40$  元/ $m^3$ )相当, 但鉴于环保等原因, 固化淤泥用作路堤填料, 具有无可比拟的经济和社会效益。

2) 采用 1<sup>#</sup> 固化剂配方加固疏浚淤泥时, HH-4 固化土的早期强度较大, LM-2 固化土的后期强度较大。原因是 HH-4 土样中黏粒含量较高, 离子交换反应较迅速, 而 LM-2 中 Fe 与 Ca 含量较大, 火山灰反应对强度增长的贡献较大, 火山灰反应需要较长时间。调整 1<sup>#</sup> 固化剂中 A、D、F 的质量分数, 得到的 2<sup>#</sup> 固化剂, 使 HH-10 固化土的强度得到很大提高, 也是由于淤泥化学组成的影响。以上分析有待进一步试验验证。

3) 由于 3 种疏浚淤泥的含水率都很高, 在施工时宜采用路拌法, 使淤泥含水率达到最佳含水率时再进行施工, 以获得更好的固化效果。

## [参 考 文 献]

- [1] Shan H, Meegoda J. Construction use of abandoned soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 58: 133–145.
- [2] Tsuchida T, Porbaha A, Yamane N. Development of a geomaterial from dredged bay mud [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13: 152–160.
- [3] 张成良, 洪振舜, 邓永峰. 淤泥吹填处理及其研究进展 [J]. 路基工程, 2007, (1): 12–14.
- [4] 姬凤玲, 朱伟, 张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨 [J]. 岩土力学, 2004, 25: 1999–2002.
- [5] Yozzoa D, Wilberb P, Willc R. Beneficial use of dredged material for habitat creation, enhancement, and restoration in New York-New Jersey Harbor [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 73: 39–52.
- [6] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 11–15.
- [7] 汪益敏. 路基边坡坡面冲刷特性与加固材料性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2003: 11–47.
- [8] Andromalos K, Ameel M. Evaluation of field methods for the solidification stabilization of contaminated soils and sludges [EB/OL]. USA, 1995: 1–16. <http://www.braymanenvironmental.com/papers.html>.
- [9] Agostini F, Skoczylas F, Lafhaj Z. About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment [J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29: 270–278.
- [10] Lafhaj Z, Samara M, Agostini F, et al. Polluted river sediments from the North region of France: treatment with Novosol process and valorization in clay bricks [J]. Construction and Building Materials, doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2007, 23(1) (in press).

- [11] Kumar S, Puriv V, Das B, et al. Geotechnical properties of fly ash and lime-fly ash stabilized coal mine refuse[EB/OL]. <http://www.ejge.com/2001/Ppr0105/ppr0105.htm>. 2001-05.
- [12] Chitambira B, Al-Tabbaa A, Perera A, et al. The activation energy of stabilized/solidified contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141: 422–429.
- [13] Brouwers H, Augustijn D, Krikke B, et al. Use of cement and quicklime to accelerate ripening and immobilize contaminated dredging sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145: 8–16.
- [14] CT/T 3073–1998, 土壤固化剂[S].
- [15] 黎霞, 李宇峙. 路基路面工程试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [16] CJJ/T 80–98, 固化类路面基层和底基层技术规程[S].

## Experimental study on stabilization of dredged silts

Shao Yufang<sup>1</sup>, Gong Xiaonan<sup>2</sup>, Zheng Erkang<sup>3</sup>, Liu Zengyong<sup>4</sup>

(1. Department of Biosystems Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Hangzhou Branch of the Fourth Survey and Design Institute of China Railways, Hangzhou, 310017, China;

4. Highway Department of Shaoxing City, Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** Three typical kinds of dredged silts from Taihu Lake, namely HH-4, HH-10, LM-2, were stabilized by a series of cementatory soil stabilizer with adjustable ingredients. Experiments were conducted to confirm the feasibility of using the stabilized-soil as roadbase filling, and determine the content of main ingredients and optimum mixing ratio of the stabilizer and engineering properties of the stabilized-soils. Results show that the stabilized-soil can be used as roadbase filling while the mixing ratio is above 6%, but as for HH-10, the A, D, F ingredients of the stabilizer should be increased. Because of the grain size and oxides content of the soils, HH-4 stabilized-soil has a higher short-term strength and LM-2 stabilized-soil has a higher long-term strength. Application of the stabilized-silts to roadbase construction can not only prevent pollution from the dredged silts, but also save land resources, thus brings enormous benefits to the economy and society.

**Key words:** soil stabilizer; dredged silt; roadbase; compaction test; unconfined compression test