

文章编号: 1000-7598-(2008) 04-1010-05

湖泊底泥改性固化的强度特性和微观结构

周 旻, 侯浩波, 张大捷, 田晓峰, 李进平

(武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 400079)

摘 要: 将灰渣胶凝材料作为改性剂应用于湖泊环境疏浚底泥的固化处理, 研究了改性淤泥的强度特性, 探讨灰渣胶凝材料对淤泥的改性机理。改性淤泥的抗压强度试验结果表明, 当灰渣胶凝材料质量掺入比为 5 % 时, 能够显著提高改性淤泥的各个龄期强度; 当掺入质量比为 12.5 % 时, 28 天强度可以达到 1.55 MPa。改性淤泥的早期强度较高, 后期强度能持续增长, 同时具有良好的耐水浸泡性能。SEM 分析表明, 灰渣胶凝材料能与底泥颗粒中的活性物质发生火山灰反应, 形成高强难溶的胶结物, 使改性淤泥中大孔隙数量减少, 改善了淤泥土颗粒之间的胶结性能。这说明灰渣胶凝材料是一种性能优异的底泥改性材料。

关 键 词: 湖泊底泥; 固化; 灰渣胶凝材料; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Strength characteristics and microstructure of solidified lake sludge

ZHOU Min, HOU Hao-bo, ZHANG Da-jie, TIAN Xiao-feng, LI Jin-ping

(1. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The slag cementitious material is used as a new kind of binding agent for solidification/stabilization with lake sludge. The mechanism and strength characteristics of treated sludge are studied. The slag cementitious material can greatly improve the unconfined compressive strength of sludge at various curing periods with the 5 % content, while 12.5 % content is optimal for strength development (1.55 MPa at 28th day). The treated sludge strength is high in early period; and the long-term strength is increasing with a good ability of water resistance. SEM analysis shows that pozzolanic reaction occurred in the slag cementitious material and sludge particles, and formed high strength and insoluble mineral cement to decrease the macropores in treated sludge. The binding performance is obviously improved. All those show that the slag cementitious material is a preferable solidifying agent for lake sludge.

Key words: lake sludge; solidification; slag cementitious material; compressive strength; microstructure

1 引 言

环境疏浚旨在清除湖泊水体的污染底泥, 为水生生态系统的恢复创造条件, 由于污染底泥中含有各种对环境有害的污染物, 不能直接吹填排放, 必须经过无害化处理或采取防止污染扩散的措施, 对于疏浚过程中产生的湖底淤泥及水生生物等淤积物的运输和出路安排已成为环境疏浚工作中一项十分重要的内容^[1]。武汉市即将进行的汉阳月湖综合治理, 首先要清理湖底淤积的 50 万 m³ 淤泥, 工程初步设计采取搅吸方式抽出淤泥, 由于抽出淤泥的含水量高达 90 %, 施工工期要求紧, 且市区内没有足

够大的堆场, 所以无法采用自然排水固结, 只能将其运往市郊堆填。污染底泥疏浚工程量浩大, 要在污染底泥处理过程中不产生二次污染, 在可能条件下, 宜选择处理成本低的处理工艺, 使污泥处置与综合利用相结合。污泥的物理性质及工程性质比较接近黏性土的性质, 但同时也具有含水量高、强度低、腐殖质含量大等特点, 采用掺入固化剂的化学固结法使它具有一定的自硬能力, 改善强度或承载力从而形成具有一般土同等程度工程性质的土工材料, 这样, 就可以将污染底泥再生资源化并作为填土材料加以综合利用^[2]。

利用水泥来固化淤泥的研究开展较多, 但单纯

收稿日期: 2006-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 30270267)。

作者简介: 周旻, 男, 1978 年生, 讲师, 博士, 主要从事固体废物资源化与环境岩土工程研究方面的工作。E-mail: iszhoumin@163.com

的添加水泥不仅造价过高,而且加固效果也不理想,最近开始研究使用新型固化材料,尤其是将一些工业废料例加粉煤灰、石灰、石膏等作为辅助固化材料的研究开展较多^[3-5]。这些研究结果表明,新型固化材料在一定程度上节省了建筑材料,提高了加固效果,但水泥始终是在其中起主要作用的因素,外加的辅助成分也在某种程度上增加了原料的复杂性和应用的局限性,对于大量的疏浚污泥的处理,这些新型固化材料并不适用。所以,选择适用于淤泥改性的固化材料成为固化处理淤泥的关键问题。初步研究表明,灰渣胶凝材料能代替传统固化基材对污泥进行常温固化处理,固化块的机械性能、抗冻、融性能和耐干、湿性能均满足护坡砖的要求,并且浸出液中重金属离子的浓度在国家允许的范围内,实现了污泥无害化的处理^[6]。

本文所介绍的灰渣胶凝材料是一种由矿渣、脱硫灰渣、石灰、高钙灰等无机工业废料组成的,采用球磨工艺进行深加工而成的水硬性胶凝材料。与普通硅酸盐水泥对比,灰渣胶凝材料的加工工艺少了生料粉磨和烧成两道工艺;与新型固化剂对比,少了添加各种外掺剂的复杂工艺。该材料现已广泛用于交通、水利等基础工程^[7]。

基于以上考虑,本文利用灰渣胶凝材料完全取代普通水泥、充分利用固体废料的胶凝特性来加固湖泊疏浚底泥,分析改性效果,并探讨灰渣胶凝材料改善淤泥土材料性能的微观作用机理,为进一步开发和研制高性能灰渣基材料奠定基础。

2 材料与方法

2.1 原材料

为了考察经改性固化处理后的疏浚淤泥作为填土材料的适用性,笔者通过室内试验的方法对淤泥固化土的物理、力学性质进行了研究。室内试验所用淤泥取自月湖湖底,黑色,发臭,土质细腻,土芯切面光滑,含较多的腐殖质,流塑状。其基本参数见表1。

表1 试验所用的疏浚淤泥基本参数
Table 1 Physico-mechanical indices of sludge

含水率 /%	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比	比重	塑性 指数	液性 指数	压缩系数 / Mpa^{-1}
86.36	1.58	1.98	2.74	26.8	1.78	1.39

固化材料选用自配的灰渣胶凝材料,其胶凝性能指标见表2,其80 μm 筛筛余仅为0.8%~1.2%,颗粒非常细,同时强度达到32.5#水泥的水平。

表2 固化材料的胶凝性能指标

Table 2 Physico-mechanical indices of binding agent

密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	标准稠度 /%	比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
2.96	26.0	550	5.5	10.5	21.1	46.2

2.2 试样制备

试验在制样时,将淤泥按湿重的百分比配制不同的掺合比,淤泥和灰渣胶凝材料利用机械搅拌均匀,制成无侧限抗压试样,静置1d后脱模,在标准养护室里养护至预定龄期。无侧限抗压强度试验在TSY6-1B型应变控制三轴仪中进行,由于压缩时不存在排水问题,变形速率选用0.4 mm/min。

扫描电镜的试样强度来源于强度测试后的试块,人工切割开取其较平整的断面,除去表层扰动颗粒后,得到新鲜且较完整保持了原状结构的试样,表面喷金后交由武汉大学分析测试中心进行SEM试验。

3 试验结果

3.1 抗压强度

图1为各个龄期下灰渣胶凝材料掺量 a_w 与无侧限抗压强度 q_u 之间的关系。从图1可以看出,在淤泥固化早期,抗压强度增长很快,抗压强度与固化材料的掺量基本成线性关系,且存在着最低掺量临界值。若淤泥中灰渣胶凝材料的含量低于该临界值,可以认为无固化效果。从现有结果来看,该临界值为3%,低于深层搅拌法中水泥固化软土的最低掺量5%^[8]。当龄期为28d时,随着掺量的增加,强度大体上呈指数增长。当 $a_w = 12.5\%$ 时,28d时最大强度可达1.55 MPa。可以初步看出,对于湖底淤泥而言,灰渣胶凝材料是一种比较稳定的固化材料,随着龄期增长强度稳步提高,不仅早期强度高,中期强度,长期强度同样也高。

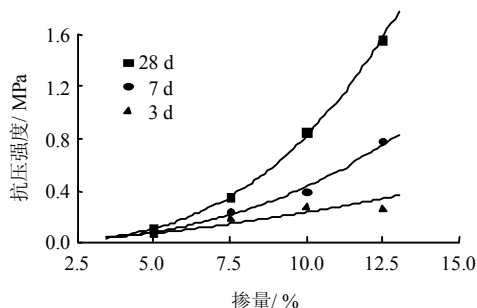


图1 抗压强度与灰渣材料掺量的关系
Fig.1 Relationship between compressive strength and slag cementitious material content

3.2 压缩变形特性

压缩变形是衡量材料力学特性的重要指标。当其破坏应变较大时,表明材料的韧性较好;相反,当破坏应变小时,则表明材料为脆性破坏。改性淤泥的破坏应变绝大多数分布在 2.5 %~5.0 %之间,并且具有随抗压强度增大而减小的趋势。改性淤泥具有较好的韧性,这是比较符合将其用作堤防、地基等工程填土要求的。

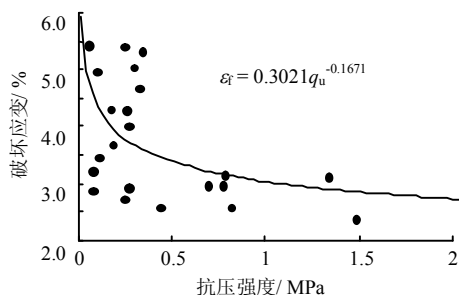


图 2 改性淤泥的破坏应变与抗压强度

Fig.2 Strains at failure and compressive strengths

由于具有韧性,改性淤泥的应力-应变关系同样表现出非线性变化的规律,其变形不是一个常数,而随着应力范围变化而变化。变形系数 E_{50} 是一个能有效反映出材料变形特性的参数,它被定义为 $E_{50} = q_u / 2\varepsilon_{0.5}$ ($\varepsilon_{0.5}$ 为 $\sigma = q_u / 2$ 时对应的应变值)。

图 3 表明 q_u 与 E_{50} 之间有良好的线性相关关系,个别实测点虽有所偏离,但大部分实测点较为集中,且变化趋势明显,二者之间的关系为 $E_{50} = 121.64q_u$,这与一般水泥土的经验关系也是一致的^[9]。

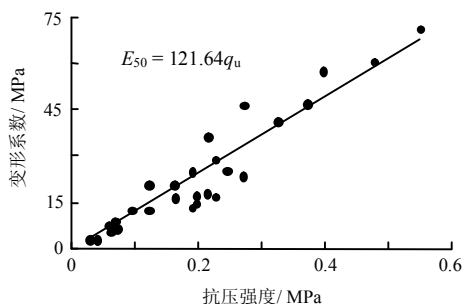


图 3 变形系数与抗压强度的相互关系

Fig.3 Relation between deformation coefficient and compressive strength

3.3 耐水性试验

为了探讨灰渣胶凝材料对淤泥的固化效果,在养护 28 d 龄期后,一组直接测定强度,一组浸入水槽中,经过 24 h 后的浸泡进行表面观察及强度检验结果见表 3。

表 3 改性淤泥浸泡性能
Table 3 Compressive strengths for treated sludge after soaking in water

掺量 / %	28 d 强度 / MPa	浸水 24 h 后 强度 / MPa	软化系数 / %	表面完 整性
5.0	0.11	0.09	82.3	无变化
7.5	0.35	0.30	86.7	无变化
10.0	0.85	0.75	89.1	无变化
12.5	1.55	1.40	90.3	无变化

软化系数越大,耐水性越好,经灰渣胶凝材料处理后的淤泥,软化系数达到 80 % 以上,说明改性淤泥硬化后其耐水浸泡性较好,灰渣胶凝材料对淤泥耐水性的改善作用较为明显。改性后的淤泥具有化学稳定性,能将原泥中的污染物固结在其中,有效地减少疏浚淤泥的二次污染。

3.4 微观结构特性

通过扫描电镜,可以观察到不同龄期、不同材料掺量条件下,改性淤泥微观结构的不同形态。原状淤泥的 SEM 照片如图 4 所示,淤泥颗粒间只有原生矿物的几何堆积,颗粒及孔隙清楚,主要为黏土矿物,其次是其他水溶盐和腐殖质等。没有牢固的连接。

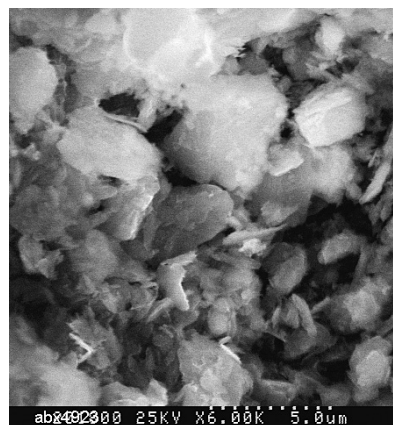


图 4 原状淤泥的 SEM 图像 ($\times 6000$)

Fig.4 SEM photo of untreated sludge

图 5 为掺入质量比为 10 %、龄期为 3 d 的改性淤泥 SEM 照片。从扫描电镜照片上可清晰地看出,在松散土颗粒的孔隙间分布有许多细针状的水化产物。此外,由于灰渣胶凝材料本身具有反应快速和早强的特点,当它与淤泥一经混合,则初期的水化反应就能生成大量的细针状水化硅酸钙。这就决定了改性淤泥的强度增长是相当快的。

随着养护龄期的增加,细针状的水化硅酸钙晶体数量也随之增加,使其微观结构也变得更复杂。

图6为掺入质量比为10%、龄期为28 d的SEM照片,可见灰渣胶凝材料的水化产物附着在土颗粒表面,土颗粒因团聚而增大,水化硅酸钙晶体已经将土颗粒间的孔隙填充,有些地方的土颗粒已被水化硅酸钙晶体完全包裹,并将土体颗粒紧紧地连接成一体。

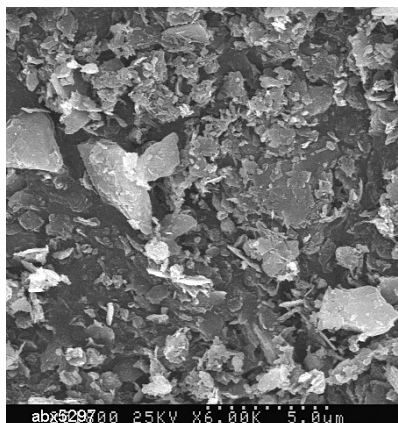


图5 10%掺量下3 d龄期的SEM图像($\times 6\,000$)
Fig.5 SEM photo of treated sludge ($a_w=10\%$, $T=3\text{ d}$)

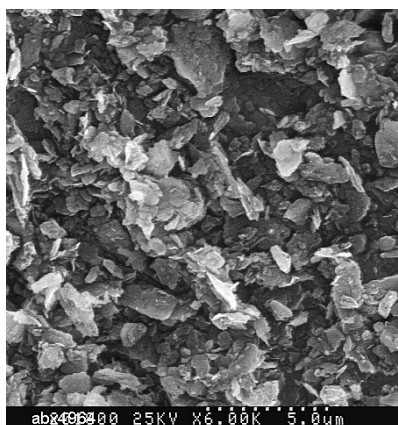


图6 10%掺量下28 d龄期的SEM图像($\times 6\,000$)
Fig.6 SEM photo of treated sludge ($a_w=10\%$, $T=28\text{ d}$)

对改性淤泥的孔隙比的测试结果见表4,处理后的淤泥含水率减小,密度增大,孔隙比大幅减小,说明灰渣胶凝材料促使淤泥土颗粒团聚,灰渣材料水化后起了胶结、填充了部分孔隙的作用,与土颗粒的强结构连接是决定其力学性质的主要因素。

表4 龄期28 d时改性淤泥的孔隙比
Table 4 Void ratios of treated sludge ($T=28\text{ d}$)

掺量/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率/%	孔隙比
5.0	1.58	64.61	1.52
7.5	1.60	58.63	1.46
10.0	1.63	55.12	1.41
12.5	1.65	54.47	1.36

4 灰渣胶凝材料改性淤泥的机理

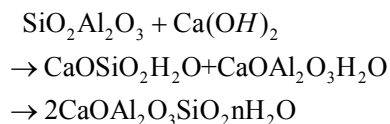
一般认为,水泥土的强度主要来源于两部分水化物的胶结作用,即水泥本身水化产物的胶结作用和水水泥水化时产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中活性物质之间的硬凝反应所产生水化物的胶结作用^[10]。淤泥固化后的强度主要来源于水泥熟料类浆体的胶凝作用以及凝胶物质与土颗粒之间的界面胶结作用,因此,要提高淤泥土强度就必须改善水化凝胶体的性能以及凝胶物质与淤泥土颗粒之间的胶结性能。结合灰渣胶凝材料的胶结特性,分析认为,掺加在淤泥中的灰渣胶凝材料能够产生如下作用。

(1) 促进水化速度和水化程度

普通水泥类固化材料的比表面积一般为 $200\text{--}300\text{ m}^2/\text{g}$,难以与粒径非常小的淤泥发生充分反应。灰渣胶凝材料本身颗粒很细,组成物中含有分散剂,可增加灰渣颗粒表面活性,利于与黏土颗粒结合。在水化反应过程中的中间产物,能够使得灰渣颗粒在浆体中较为均匀地分散,有利于更多数量的灰渣颗粒跟水接触,进而能够减少未水化灰渣颗粒的数量,增大灰渣颗粒的水化程度,使土粒较小的淤泥甚至是其中所包含的有机质成分也可固结。灰渣水化速度和水化程度的提高有利于凝胶体早期强度的形成。

(2) 灰渣的火山灰反应

灰渣材料水化反应生成的钙离子,通过离子交换反应而被吸附于微小的黏土矿物表面,使黏土粒子形成电荷凝集,结成团粒。水化反应所生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与黏土矿物中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 结合而生成硅酸钙或铝酸钙水化物。这种反应需要较长的时间进行,典型的火山灰反应式如下:



灰渣胶凝材料的火山灰反应能够生成更多的水化硅酸钙凝胶(简称 C-S-H),并且能够细化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,主要体现在两个方面:一是立足于 OH 基,OH 基破坏 Si—O 键,使 Si 和 Al 分离活化,并与之结合生成各种石榴石和水化硅酸盐;二是立足于 CO_3 基,使 CO_3 基也可以与活性 SiO_2 反应生成灰硅钙石和片柱钙石,加速 Si 和 Al 分离活化进程。这些化合物的细微晶体具有很高的强度,不仅在热力学上极为稳定,而且是极难溶于水。

从上面分析可知,灰渣胶凝材料能够显著改善胶凝物质的性能,再加上磨细灰渣对淤泥孔隙的填

充效应,使得改性淤泥中大孔隙数量减少。改性淤泥的强度随着材料的孔隙率降低及胶凝材料的特性改善而提高。掺加在淤泥土中的灰渣将分散并吸附在土颗粒表面,火山灰反应生成的 C-S-H 凝胶结构相互交叉,更为紧密地“生长”于土颗粒表面,土颗粒表面的凝胶物质将使土颗粒牢牢连接在一起。另外,掺加活性灰渣,减少并细化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 大晶体也有利于黏土颗粒与凝胶物质的连接作用。特别是具有针状结晶结构水化硅酸钙类物质,呈现不规则的成长,在土粒子间形成架桥结构而发挥固化强度。改性淤泥微结构的改善将带来强度性能的提高,也使改性淤泥的压缩性、耐水性得以提高。

5 结 语

本文对灰渣胶凝材料改性湖底淤泥的强度进行了试验。在此基础上,尝试用扫描电镜测定其微观结构,对固化机理进行初步探讨。经过大量试验研究,结果表明,灰渣胶凝材料性能优良,掺加 5% 时就可固化淤泥。灰渣胶凝材料与淤泥中的黏土矿物的稳定反应,一定程度上改变了淤泥的物理性能,宏观上显著提高抗压强度,降低压缩性,增强耐水性能,从而使淤泥质软土变成良好的工程填土。将湖泊疏浚淤泥进行改性固化处理,将污泥的处置与综合利用相结合,值得进一步开发研究。

参 考 文 献

- [1] 刘鸿亮,金相灿,荆一凤. 湖泊底泥环境疏浚工程技术[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 81—84.
LIU Hong-liang, JIN Xiang-can, JING Yi-feng. Environmental dredging technology of lake sediment[J]. **Engineering Science**, 1999, 1(1): 81—84.
- [2] 三木博史. 土の流动化处理工法の各种用途への利用技术[J]. 土木技术资料, 1995, 37(9): 32—37
- [3] 黄新,胡同安. 工业废石膏与水泥配合加固软土地基[J]. 建筑技术, 2001, 32(3): 161—163.
HUANG Xin, HU Tong-an. Soft soil consolidation by the mixture of industrial waste gypsum and cement[J]. **Architecture Technology**, 2001, 32(3): 161—163.
- [4] 荀勇. 含工业废料的水泥系固化材料加固软土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 210—213.
XUN Yong. Test on strengthening soft soil with cementary solidifying agent containing industrial waste[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 210—213.
- [5] 林彤,刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1 049—1 052.
LIN Tong, LIU Zu-de. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1 049—1 052.
- [6] HOU H B, ZHANG D J, ZHOU M, et al. Solidification of heavy metal sludge using HAS as solidified binder [C]// FENG C G, HUANG P, MA Y, et al: Proceedings of the China Association for Science and Technology, Beijing: Science Press, 2006. 2: 474—479.
- [7] 侯浩波. HAS 耐水土壤固化剂及其应用[J]. 新技术新工艺, 1999, 18(5): 30—31.
HOU Hao-bo. HAS water stability soil consolidator and its application[J]. **New Technology & New Process**, 1999, 18(5): 30—31.
- [8] 贾苍琴,黄茂松,姚环. 水泥—粉煤灰加固闽江口地区软黏土试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 884—888.
JIA Cang-qin, HUANG Mao-song, YAO Huan. Experimental research on stabilization of soft soil with cement and fly-ash in the Minjiang Estuary[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2004, 32(7): 884—888.
- [9] 汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 449—554.
TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 449—554.
- [10] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 2004, 130(7): 696—706