

文章编号:1674-2869(2012)1-0036-07

工业废料固化高含水率疏浚淤泥强度特性分析

桂跃¹,王其合²,张庆¹

(1. 昆明理工大学建工学院土木系, 云南 昆明 650051; 2. 上海铁路设计院集团有限公司, 上海 200120)

摘要:疏浚淤泥因含水率高而难以直接利用, 将其固化成填土材料是一种有效的处理方法. 本文通过试验对比分析了3种常见工业废料: 粉煤灰、矿渣、磷石膏作为主要固化剂, 添加少量生石灰或水泥做反应诱发剂组成的6类复合固化剂固化处理高含水率疏浚淤泥的效果. 结果表明: 复合固化剂固化疏浚淤泥可以获得较高的无侧限抗压强度; 3种工业废料中, 磷石膏复合固化剂的固化效果最理想; 水泥和工业废料组成的水泥基复合固化剂效果优于石灰基复合固化剂. 通过引入强度增长率概念, 发现固化淤泥的无侧限抗压强度增长率和复合固化剂中工业废料掺灰比呈线性关系. 基于此规律, 本文还给出了含工业废料固化高含水率疏浚淤泥早期强度的预测公式.

关键词:疏浚淤泥; 固化; 工业废料; 无侧限抗压强度; 强度增长率

中图分类号: TU447

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2012.1.008

0 引言

利用工业废料进行土壤改良在岩土工程中应用广泛, 如添加粉煤灰改善软土的承载力、采用矿渣稳定膨胀土等. 工业废料在问题土改良中利用, 不仅达到土性改良目的, 而且实现了工业废料本身的消纳, 具有良好的环境效益和经济效益.

在港口工程、围垦工程、河湖清淤工程中会产生大量疏浚淤泥^[1-4]. 疏浚淤泥含水率高、黏粒含量高、强度极低, 很多还富含有机质, 是工程上难以直接利用的一种特殊土. 在我国, 通常是作为废弃物在农田、水塘等地集中堆放, 若不加妥善处理, 则会长期占用大量土地, 造成一系列的社会问题, 并且存在环境污染危害, 如何处理疏浚淤泥是一个值得重视的问题. 采用固化法将疏浚淤泥固化改良成填土材料, 可以变废为宝, 既解决了淤泥处置问题, 又缓解了工程建设中大量填土材料的需求, 是疏浚淤泥资源化利用研究中的热点之一.

国内外已有学者开展利用工业废料固化处理疏浚淤泥的研究^[5-8]. 目前, 大部分的研究还是集中在用工业废料作为辅助固化剂, 辅助水泥、生石灰固化疏浚淤泥, 通常这些复合固化剂的效果要优于单掺水泥或生石灰, 但是这种方法对工业废料的消耗是极其有限的, 固化成本上也仅小幅改善. 以工业废料作为固化剂, 辅以少量水泥或生石

灰作为反应诱发剂, 是工业废料利用的另一种新的思路, 更有利于工业废料的消纳及固化成本的节约^[9]. 本文通过试验分析了国内3种排放量较大的典型工业废料: 磷石膏、粉煤灰、矿渣固化高含水率疏浚淤泥的强度特性及强度影响因素, 对工业废料在固化疏浚淤泥中的利用有一定的参考意义.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

疏浚淤泥取至江苏省淮安市南水北调东线工程白马湖疏浚淤泥吹填堆场, 于实验室中对其物理性质指标进行了测试, 试验均按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)进行, 其基本物理性质指标见表1. 淤泥粒径分布曲线测试采用马尔文(Malvern)公司生产的Mastersizer Micro(MAF5000)激光衍射粒度仪进行测定, 结果如图1所示.

石灰产自南京市麒麟镇麒麟石灰厂, 是未消解的磨细生石灰, 氧化钙质量分数89.2%, 氧化镁质量分数2.3%, 属Ⅱ级生石灰. 磷石膏取自江苏某磷肥厂, 主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 采用烘干法测得其天然含水率17.4%左右, 2 mm筛余量小于1%. 粉煤灰取自江苏某火电厂, 主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 这3种成分的质量分数总和

收稿日期: 2011-12-19

作者简介: 桂跃(1982-), 男, 江西临川人, 讲师. 研究方向: 土力学与基础工程.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(NO:51108217); 云南省科技厅应用基础研究计划项目(NO:2011FZ047).

表1 白马湖疏浚淤泥的物理性质指标

Table 1 Summary of the physical properties of dredged material from Baima - hu Lake

含水率 / %	重度 /(kN/m^3)	相对 密度	液限 / %	塑限 / %	粒组/ %			有机质含量 w / %
					砂粒	粉粒	黏粒	
120	13.8	2.65	66.7	29.3	4.5	65.3	30.2	4.2

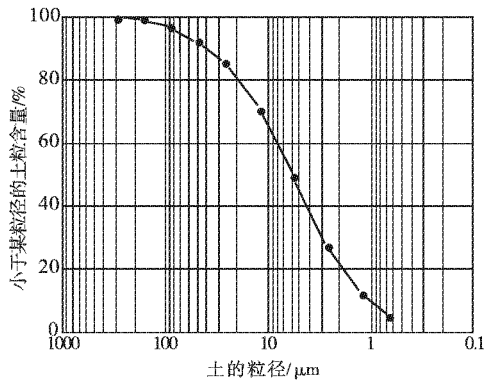


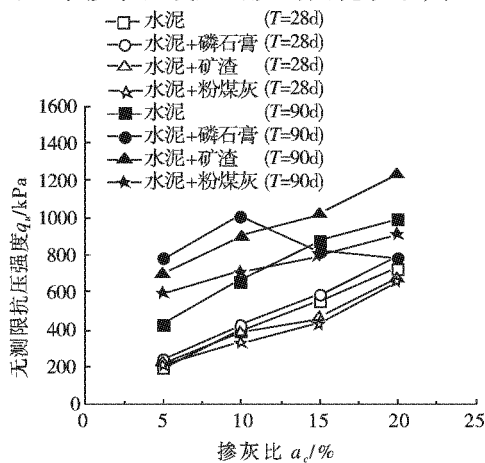
图1 白马湖疏浚淤泥颗粒分布曲线

Fig.1 Particle size distribution of dredged material from BaiMa - hu Lake

大致为 73 %,天然含水率为 15 % 左右,经筛分试验测得粉煤灰试样中粒径大于 0.1 mm 的颗粒质量分数为 51 %,属于 II 级粉煤灰.矿渣取自南京某炼铁厂,主要成分为 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 ,属于中等活性碱性矿渣.

1.2 土样制备

各种工业废料的掺灰比分别为 5 %、10 %、15 %、20 %,作为反应触发剂的生石灰或水泥固定比例 2.5 %,掺水泥作为触发剂的工业废料复合固化剂称为水泥基复合固化剂,掺生石灰作为触发剂的工业废料复合固化剂称为石灰基复合固化剂;为了对比单掺水泥或生石灰的固化效果,本



文还分别进行了单掺水泥、生石灰固化淤泥试验,掺灰比均为 2.5 %、5 %、10 %、15 %、20 %,文中所有掺灰比均为淤泥质量百分比.制备包括搅拌、制样和养护.

1.3 试验方法

试样为直径 5 cm、高度 10 cm 的圆柱体试样,采用 YSH-2 型无侧限压力仪进行无侧限抗压强度试验,试样步骤根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)进行,每一配比及龄期均采用 3 组试样进行平行试验.

2 试验结果及其分析

2.1 固化疏浚淤泥无侧限抗压强度与掺灰比关系

图2给出了养护龄期分别为 28 d、90 d 时,6 种复合固化剂,以及单掺生石灰或水泥固化疏浚淤泥试样的无侧限抗压强度与掺灰比的关系.从图中可以看出,各类固化疏浚淤泥的无侧限抗压强度和掺灰比大致呈线性增长关系.生石灰、水泥单掺掺灰比越大,固化淤泥无侧限抗压强度越大;对于工业废料复合添加剂,生石灰或水泥掺灰比固定为 2.5 %,随着工业废料的掺灰比增大,除部分磷石膏复合固化剂固化土外,其余固化土的无侧限抗压强度基本呈增加的趋势.

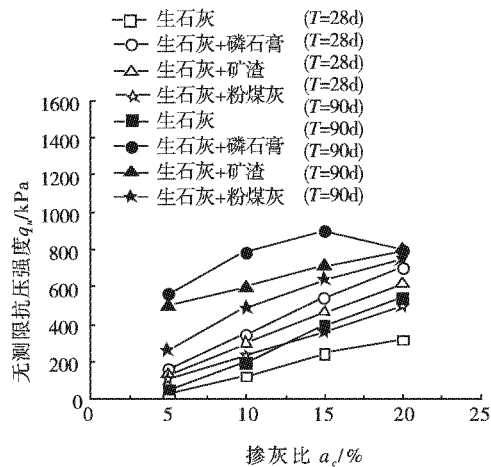


图2 固化淤泥无侧限抗压强度与掺灰比关系

Fig.2 Relationship of UCS with the percent of stabilizer

为了直观比较单掺水泥或生石灰和工业废料复合固化剂的固化效果,图3中给出来它们龄期 28 d 早期强度和龄期 90 天强度的直方图.

从图3中可以看出,龄期 28 d 的早期强度,水泥基复合固化剂固化淤泥的无侧限抗压强度均高于 200 kPa,生石灰基复合固化剂固化淤泥强度相对

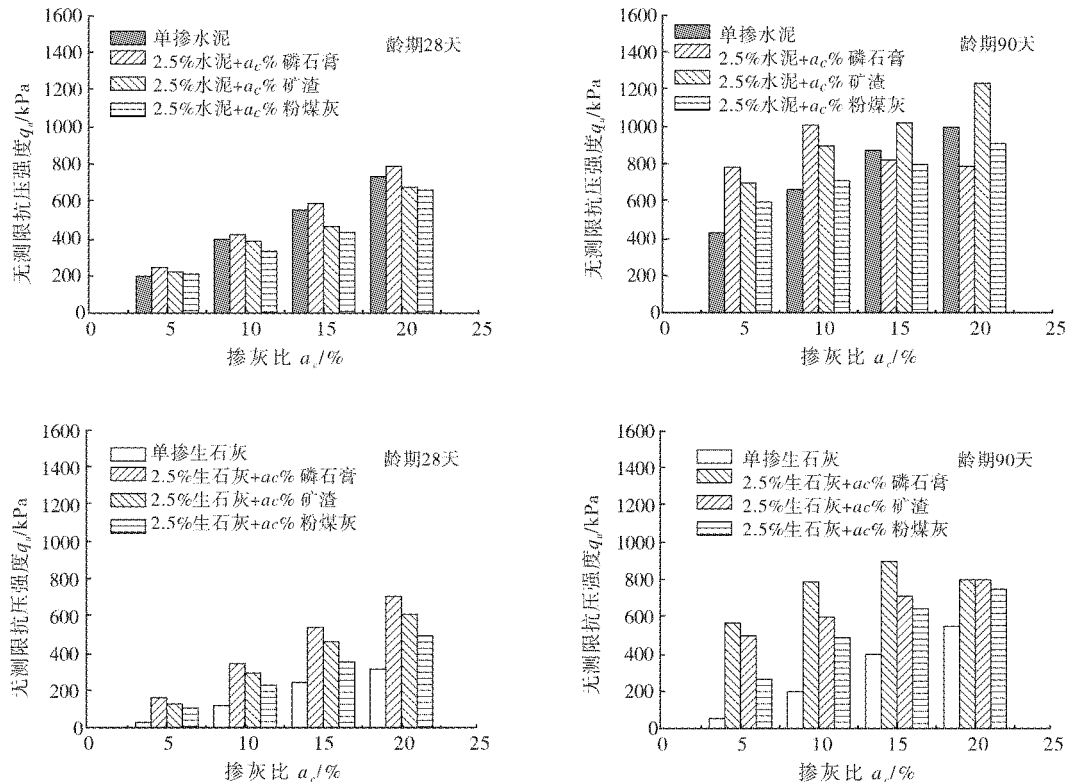


图3 不同龄期固化淤泥无侧限抗压强度与工业废料掺灰比关系

Fig.3 Relationship of UCS with the percent of stabilizer with different curing period

较低,但是也远优于单掺生石灰.例如,单掺10%生石灰固化淤泥的无侧限抗压强度仅有110 kPa左右,而掺2.5%生石灰+10%的磷石膏固化淤泥的无侧限抗压强度达到350 kPa左右,从而体现了复合固化剂固化土早期强度高的优势.对比单掺水泥的效果,磷石膏复合固化剂的固化效果和其持平,例如,单掺15%水泥固化淤泥的无侧限抗压强度550 kPa左右,而掺2.5%水泥+15%磷石膏固化淤泥的无侧限抗压强度590 kPa左右;而矿渣、粉煤灰复合固化剂在掺灰比10%、15%、20%时低于水泥固化的效果.龄期90 d时,复合固化剂的效果优于水泥和生石灰,尤其是远优于单掺生石灰的效果.例如,单掺10%生石灰固化疏浚淤泥的无侧限抗压强度是185 kPa,而2.5%生石灰+10%矿渣组成的复合固化剂固化淤泥强度高达590 kPa,是其3倍以上.经对比发现,3种工业废料中,磷石膏的效果明显优于矿渣和粉煤灰,矿渣略优于粉煤灰.

从图2、图3中还可以看出,磷石膏复合固化剂固化淤泥存在强度转折点,当龄期90 d时,掺灰比超过一定值,固化土的无侧限抗压强度反而有所降低.对于水泥基磷石膏复合固化剂,当磷石膏的掺灰比 $a_c=10\%$ 为强度转折点;对于石灰基磷石膏固化剂,磷石膏的掺灰比 $a_c=15\%$ 为强度转折点.

2.2 固化疏浚淤泥无侧限抗压强度与养护龄期关系

图4给出了单掺水泥、生石灰,工业废料复合固化剂固化淤泥无侧限抗压强度与养护龄期的关系曲线.

从图4中可以看出,固化疏浚淤泥的无侧限抗压强度发育随着养护龄期的增加呈现增大的趋势,且水泥掺灰比小于10%、生石灰掺灰比15%时,固化土的强度增幅较平缓,且与龄期大致呈线性关系;大于上述掺灰比时,强度增长呈现幂指数关系;对于复合固化剂固化淤泥,强度随龄期增大而增大,但是本次试验中可以看出它们的关系并无一致的规律,部分呈线性关系,部分呈幂指数关系.

2.3 固化疏浚淤泥强度增长率与掺灰比关系

为了分析工业废料的参加及掺灰比增大导致的强度增长,引入固化土的无侧限抗压强度增长率 D_{qu} ,用以评估工业废料的固化效果.无侧限抗压强度增长率的表达式如式(1).

$$D_{qu} = (q_{u2} - q_{u1}) / q_{u1} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: D_{qu} 为无侧限抗压强度增长率; q_{u2} 为复合添加剂固化疏浚淤泥无侧限抗压强度,本文中为不同掺灰比工业废料和2.5%生石灰或水泥组成的复合固化剂; q_{u1} 为一定掺灰比(本文为2.5%)生

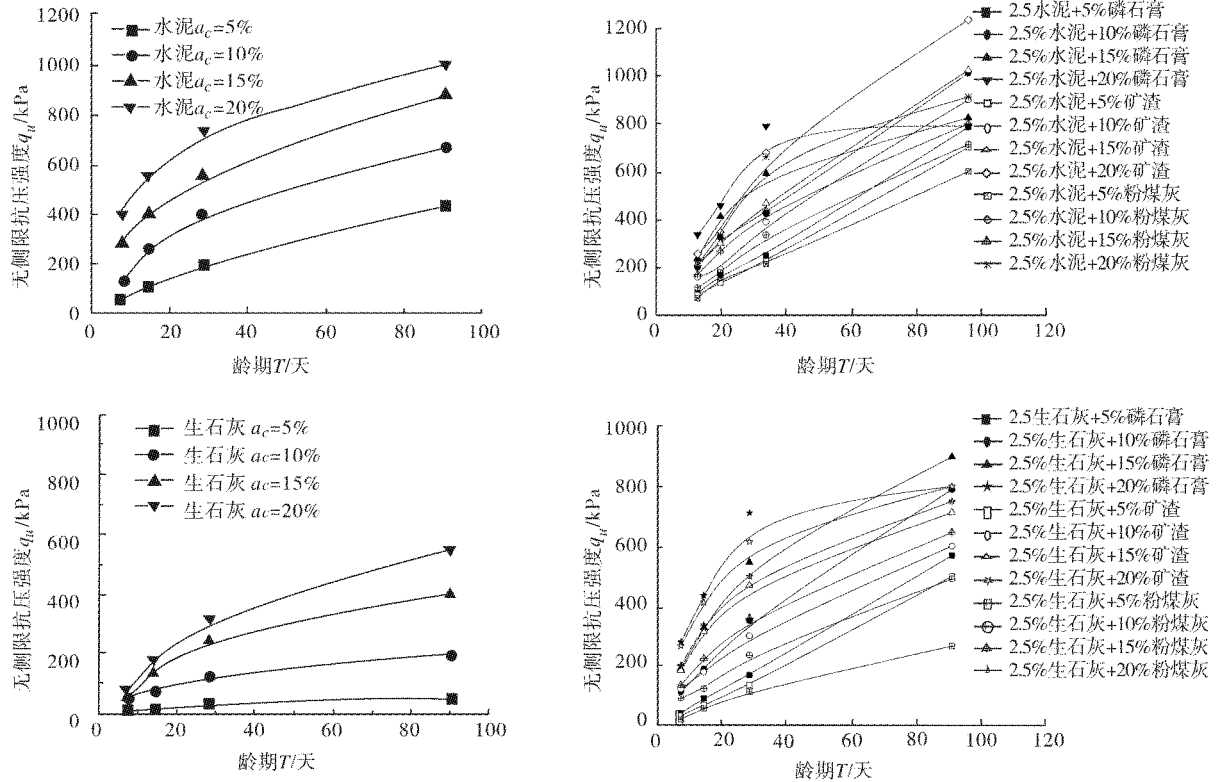


图4 固化疏浚淤泥无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship of the UCS with the curing period

石灰或水泥固化疏浚淤泥无侧限抗压强度。

图5给出了养护龄期28 d时,固化疏浚淤泥强度增长率与工业废料掺灰比的关系,从图中可以看出,生石灰基的复合固化剂固化疏浚淤泥的

无侧限抗压强度增长率比水泥基的要大2至4倍;掺灰比越大,无侧限抗压强度增长率越大,它们之间呈直线关系,可以用 $D_{qu} = ma_c + n$ 表示. 图5数据拟合出如下关系式:

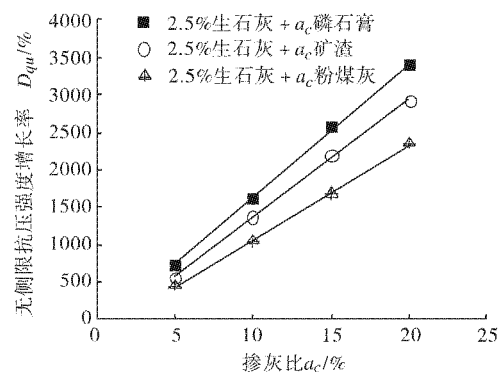
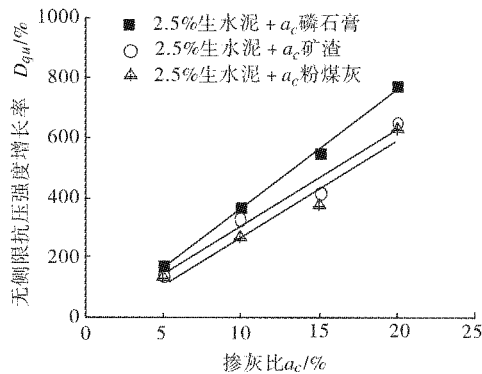


图5 龄期28d时固化疏浚淤泥无侧限抗压强度增长率与掺灰比关系

Fig. 5 Relationship of the increasing rate of UCS with the percent of stabilizers on the curing period of 28 d

2.5% 水泥 + a_c 磷石膏

$$D_{qu} = 39.6a_c - 29.5 \quad R^2 = 0.99$$

2.5% 水泥 + a_c 矿渣

$$D_{qu} = 31.8a_c - 13.4 \quad R^2 = 0.97$$

2.5% 水泥 + a_c 粉煤灰

$$D_{qu} = 32.1a_c - 47.7 \quad R^2 = 0.96$$

2.5% 生石灰 + a_c 磷石膏

$$D_{qu} = 179.9a_c - 163.6 \quad R^2 = 0.99$$

2.5% 生石灰 + a_c 矿渣

$$D_{qu} = 158.5a_c - 215.3 \quad R^2 = 0.97$$

2.5% 生石灰 + a_c 粉煤灰

$$D_{qu} = 126.5a_c - 198.5 \quad R^2 = 0.99$$

引用现有文献中其他研究者得出的试验结果,分析无侧限抗压强度增长率与掺灰比,也可以得出类似的关系式,如表2所示. 结合本文试验和前人资料,可以发现 m, n 的取值和疏浚淤泥的初始含水率、工业废料种类有关.

表 2 引用其他研究者发表的试验数据

Table 2 Data from the other researches

参考文献	原料土	初始含水率/%	固化材料	固化材料掺水泥/石灰 灰比 a_c /%	工业废料	拟合公式	相关度
[6]	疏浚淤泥	180.0	水泥 磷石膏	0.72	0.72	$D_{qu} = 32a_c - 8.7$	0.98
					1.44		
					2.16		
					2.88		
[5]	疏浚淤泥	79.3	石灰 磷石膏	15.0	2.5	$D_{qu} = 46a_c + 93$	0.93
		92.6			5.0	$D_{qu} = 32a_c - 8.7$	0.99
		110.0			7.5	$D_{qu} = 14.3a_c + 5$	0.98
					10		
[10]	疏浚淤泥	120.0	水泥 粉煤灰	2.2	2.2	$D_{qu} = 20.7a_c + 148$	0.70
					4.4		
					6.6		
					8.8		
				2.9	2.9	$D_{qu} = 10.3a_c + 678$	0.83
					5.8		
					8.7		
					11.6		

由本文试验结果及前人成果可以看出,龄期 28 d 时,无侧限抗压强度增长率和工业废料的掺灰比有良好的线性关系,因此可以在水泥或生石灰掺灰比一定时,根据工业废料的掺灰比进行固化淤泥无侧限抗压强度的预测。

对于单掺水泥固化淤泥的强度与掺灰比的关系,前人已有很多研究成果.朱伟^[11]给出了推求某个龄期 and 水泥量的固化土无侧限抗压强度公式: $q_u = 0.77t^{0.58}(a_c - 20)$; M. Boutouil^[12]拟合了无侧限抗压强度与水灰比的关系 $UCS_{28d} = a[1/(w/c) + b]$; M. A. Sakr^[13]的研究成果中拟合了石灰掺灰比与固化淤泥无侧限抗压强度的关系: $q_u = 6.28 + 8.68 a_c + 0.47 t$.从图 2 可以看出,本文试验中单掺水泥固化淤泥的强度与掺灰比关系和文献^[11]提出的预测公式最为接近,可以在此基础上提出关于水泥基复合固化剂固化淤泥的无侧限抗压强度预测公式:

$$q_{u, 28d} = q_{u1} + q_{u2} = q_{u1} + (D_{qu} q_{u1} + q_{u1}) = (2 + D_{qu}) q_{u1} = k(a_{c1} - a_0)(2 + ma_{c2} + n) = k(a_{c1} - a_0)(ma_{c2} + n) \quad (2)$$

式(2)中: k 为固化系数; a_0 为最低水泥掺灰比; a_{c1} 为水泥掺灰比; a_{c2} 为工业废料掺灰比; m, n 为工业废料固化系数.在实际工程中,只要预先进行几组单掺水泥或生石灰的试验,确定出 k 和 a_0 ,而后再固定水泥或生石灰掺灰比 a_{c1} ,变化几组工业废料掺灰比 a_{c2} ,得出 m 和 n ,从而可以利用此公式预估达到理想的固化土强度所需的掺灰比组

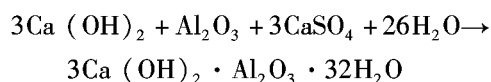
合.上式也可以用于石灰基复合固化剂固化淤泥强度的预测.

3 固化机理及成本分析

3.1 固化机理

水泥或石灰固化疏浚淤泥的作用可总结如下:**a.**物理吸水,干物质的加入,相当于降低了淤泥的含水率;**b.**化学反应转化水,固化剂水化过程及生成水化产物过程中需要一定量的水;**c.**水化产物的作用,水化产物对淤泥土有胶结作用.但是淤泥初始含水率过高、掺灰比较小的时候,过多的水分导致水化产物在单位体积中的数量较少,土中孔隙多,难以形成较高的整体强度^[14].

对于不同的种类的工业废料,其参与淤泥固化发生的反应机理也是不同的.磷石膏复合固化剂的固化机理是在强碱性环境下,随着龄期的增长,磷石膏中的硫酸钙和淤泥中的活性氧化物发生复杂的化学反应,会生成钙矾石,主要反应方程如下^[15]:



钙矾石含有 32 个结晶水,在结晶的形成过程中,固相体积膨胀将达到约 120%.磷石膏的掺入一方面消耗了淤泥中的水,起到减水作用;另一方面生成的结晶物填充了土中存在的空隙,增加了淤泥固化土的密实度,从而强度增大.但当磷石膏掺量超过一定值时,生成的钙矾石过多,膨胀作用

有可能使土体结构破坏,导致强度下降.从本文试验结果可以看出,膨胀量过大分别出现在试样养护龄期 90 d、水泥基复合固化剂磷石膏的掺灰比大于 10%、生石灰基复合固化剂磷石膏的掺灰比大于 15%,之后,这说明膨胀物质的生成和养护龄期及磷石膏的掺灰比有关.

矿渣及粉煤灰在固化反应中起作用的成分较为相似,均为固化剂中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 在水泥或生石灰提供的碱性环境中发生水化反应,生成大量水化产物,水化硅酸钙(CSH)与水化铝酸钙(CAH),起到吸水 and 胶结土颗粒的作用^[16-19]. 相比而言,矿渣中还含有较多的 CaO 成分,可以为水化反应提供更多的碱性环境,因此矿渣复合固化剂的效果要优于粉煤灰.

3.2 固化成本分析

高含水率疏浚淤泥的固化处理成本中,固化剂成本是重要组成部分.对于大规模的淤泥固化,质优价廉的固化剂可以节约相当可观的成本.以本文为例,按目前市场价格,水泥约为 600 元/t、生石灰 200 元/t,粉煤灰、矿渣属于成本极低的工业废料,约 50 元/t,而磷石膏其成本可以视为 0 元.从本文试验结果来看,单掺 15% 左右的水泥固化效果相当于“2.5% 水泥 + 20% 工业废料”复合固化剂的效果,计算得出,“2.5% 水泥 + 20% 工业废料”复合固化剂改良 1 m^3 淤泥的成本仅十几元左右,而要达到相同的改良效果,单掺水泥的成本在五六十元左右,由此可以看出工业废料巨大的低成本优势;此外,工业废料的消纳带来的环境效益也是巨大的.但是值得注意的是,工业废料复合固化剂的使用还要顾及其运输成本,对于距离较远的将会产生一定的运输费用.

综上所述,磷石膏、粉煤灰、矿渣等都属于工业废料,用于疏浚淤泥的固化是一种“以废治废”的做法.对于需要大规模处理疏浚淤泥的工程来说,考虑就地取材采用更多的含无机胶凝材料的工业废料作为问题土的固化剂是值得提倡的做法.

4 结 语

工业废料作为固化剂处理疏浚淤泥,是一种“以废治废”的方法,有望实现工业废料的大量消纳及淤泥固化处理成本的节约.本文通过室内试验,分析了 3 种典型工业废料的固化淤泥效果,得出以下结论:

a. 3 种工业废料中,磷石膏复合固化剂的固化效果最为明显,矿渣次之,粉煤灰最差.除磷石膏

外,工业废料复合固化剂固化疏浚淤泥的无侧限抗压强度与掺灰比呈线性关系,掺灰比越大,固化淤泥无侧限强度越高.磷石膏复合固化剂固化土中的磷石膏掺灰比过大、养护龄期较长,可能产生大量膨胀物质导致固化土的结构破坏.

b. 试样养护龄期 28 d 时,固化疏浚淤泥的无侧限抗压强度增长率与工业废料的掺灰比呈线性关系,掺灰比越大,强度增长率越大,且石灰基复合固化剂比水泥基固化剂固化土的强度增长率高.

参考文献:

- [1] 周源,高玉峰,陶辉. 疏浚淤泥中的拱架结构防淤堵机理[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(4):7-11.
- [2] Zentar R, Miraoui M, Abriak N E, et al. Natural dewatering of marine dredged sediments [J]. Drying technology, 2011, 29(14):1705-1713.
- [3] Detzner H D, Schramm W, Doing U, et al. New technology of mechanical treatment of dredged material from Hamburg harbour [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(6-7):337-343.
- [4] Förstner U, Calmano D W. Characterisation of dredged materials [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(11):149-157.
- [5] 桂跃,高玉峰,张庆,等. 疏浚淤泥生石灰-磷石膏材料化处理效果[J]. 浙江大学学报:工学版,2010,44(10):1974-1978.
- [6] 丁建文,张帅,洪振舜,等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学,2010,33(9):2817-2823.
- [7] Dimitris D, Meng X G. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils [J]. Engineering Geology, 2003, 70:377-394.
- [8] Kamon M, Jeoung J, Inui T. Alkalinity control properties of the solidified/stabilized sludge by a low alkalinity additive [J]. Soils and Foundations, 2005, 45(1):87-98.
- [9] 高玉峰,桂跃,黎兵,等. 一种磷石膏-淤泥联合固化处理方法[P]. 中国,2009,ZI200910026859.9.
- [10] 张春雷,朱伟. 淤泥复合型固化材料实验研究[C]//第二届全国岩土与工程大会,武汉,2006.
- [11] 朱伟,张春雷,高玉峰,等. 海洋疏浚淤泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(10):1561-1566.
- [12] Boutouil M, Levacher D. Effect of high initial water content on cement-based sludge solidification [J]. Ground Improvement, 2005, 9(4):169-174.
- [13] Mohammed A Sakr, Mohamed A S, Yasser M M. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high or-

- ganic content [J]. *Geotech Geol Eng*, 2009, 27:105 – 113.
- [14] 张春雷,汪顺才,朱伟,等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. *岩土力学*, 2008,29(S1):567 – 571.
- [15] 吴少鹏,沈卫国,周明凯,等. 磷石膏粉煤灰石灰固结材料的研究[J]. *中国公路学报*, 2001,14(S):13 – 15.
- [16] 查莆生,刘松玉,杜延军. 石灰 – 粉煤灰改良膨胀土试验[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2007,37(2):339 – 345.
- [17] Samaras Papadimitriou C A, Zouboulis A I. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008,154, 1052 – 1059.
- [18] McCarthy M J, Csetenyi L J, Sachdeva A, et al. Controlling swelling in lime – stabilised sulfate – bearing soils using fly ash [J]. *Ground engineering*, 2011, 44(1): 29 – 33.
- [19] 袁军,郑敏,徐军,等. HG 无机/有机复合土壤固结材料的应用研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2010,32(1):23 – 26.

Analysis on strength characteristics of stabilized high water content dredged sludge with industrial wastes

GUI Yue¹, WANG Qi – he², ZHANG Qing¹

(1. College of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;
2. China Railway Shanghai Design Institute Group CO. , LTD. , Shanghai 200120, China)

Abstract: The stabilization is one of the options used to convert the high water content dredged sludge (DS) into drying filling materials in engineering. The paper presents an experimental study on the characteristics of stabilized high water content DS with three types of industrial wastes as the main stabilizers, including phosphogypsum, fly ash and slag. The experimental results show that the stabilized DS can obtain relative high early unconfined compressive strength. The phosphogypsum as main stabilizer achieves the most desirable effects. The cement-industrial wastes stabilizers are better than the lime-industrial wastes stabilizers. The unconfined compressive strength growth rate is linearly correlated with the percentage of industrial wastes in stabilizers. Finally, a prediction expression of unconfined compressive strength of stabilized high water content DS is given.

Key words: dredged sludge; stabilization; industrial wastes; unconfined compressive strength; strength growth rate

本文编辑:龚晓宁