

固化有机质淤泥试验研究

冯 诚¹ 王保田² 李守德²

(1. 江苏省交通科学研究院、江苏南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所、江苏南京 210098)

【摘要】 淤泥固化技术是淤泥资源化的一个重要方法。当采用水泥基材料对有机质淤泥固化处理时,淤泥中的有机质严重影响了淤泥固化的效果。对此,笔者进行了固化有机质淤泥的试验研究,在分析有机质对淤泥固化效果影响机理的基础上,掺加不同外加剂改善有机质淤泥的固化效果,试验结果发现,碱性剂的加入会导致有机质的溶解,削弱淤泥的固化效果,粉煤灰的加入削弱了有机质对水泥水化的阻碍作用,有效提高了固化体的强度,采用水泥-粉煤灰-硫酸钠复合固化材料大幅度提高了固化淤泥的短期强度和长期强度,粉煤灰的加入提供了大量的钙离子,其掺量越大,固化淤泥无侧限强度后期增长率越大。

【关键词】 有机质淤泥;固化;外加剂;水泥基材料;pH

【中图分类号】 TV 223.26; TU 411

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.03.009

An Experimental Study on Solidification/Stabilization of Organic Silt

Feng Cheng¹ Wang Baotian² Li Shoude²

(1. Jiangsu transportation Research Institute, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

【Abstract】 Solidification technology plays a very important role for reuse of dredging. The organic matter in the silt remarkably influences the effect of solidification. In order to assess this, an experimental program of organic solidification was undertaken, the mechanical impact of the organic matter on the solidification was evaluated, the result showed that sodium leads to the organic matter's dissolution, which would weakened the solidification effect of the soil, and the fly ash could undermines the hindering effect of organic matter on the cement hydration, it effectly enhanced the strength of the soil, at last, a new composite additive was proposed, when treated with this, the short-term and long-term strength was greatly increased, the fly ash provided large amount calcium ion the late growth rate was continuously increasing with the increase of the fly ash.

【Key words】 organic silt; solidification; admixture; cement-based material; pH

0 引言

淤泥疏浚是航道疏通、港口维护、湖泊治理中常用的工程措施。我国每年都有数亿方以上的疏浚淤泥产生,在疏浚淤泥中有相当一部分淤泥来自污染严重的湖泊、河道。目前仅太湖因污染严重而需要疏浚的淤泥就有3925~5928万m³,这些污染严重的淤泥不可避免的会含有一定量的有机质和污染物,这些淤泥必须经过处理后才能应用于工程。

疏浚淤泥的常规处理方法,不管是海抛、陆抛还是吹填处理,都存在破坏倾倒区资源、污染周边环境等缺点,随着人们环保意识的增加和国家对环保管理力度的加大,疏浚淤泥的资源化处理越来越受到国内外人们的认可。疏浚淤泥资源化处理方法主要

有物理方法、热处理法、化学处理法三种方法。

其中淤泥固化处理的化学方法可以根据工程使用要求来设计固化材料配方,一次处理便可以达到工程使用要求,处理量大、处理时间短,处理后的淤泥可直接填筑地基或临时置于存放地待用,因此是国内大规模处理疏浚淤泥的最适宜的处理方法^[1]。

一些学者如朱伟^[2]、陈志敏^[3]、Leonard A^[4]的研究发现,淤泥中数量极少的有机质严重影响了淤泥固化的效果。但是目前还没有行之有效的固化有机质淤泥的方法。为此,笔者在向淤泥中添加水泥的基础上,再掺入其他外加剂进行相关试验,探求固化含有有机质淤泥的效果,并寻求优良的固化剂配方。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

淤泥取自南京秦淮河,相关资料见表1,粉煤灰取自南京下关电厂,相关参数见表2,试验采用添加剂分别为粘土、粉煤灰、硫酸钠(分析纯)、分析纯NaOH、海螺牌P.O 32.5#,粘土比重2.72,塑限35.2%,液限65.7%,塑性指数 $I_p=30.5$,粘粒含量约14%,图1给出了粘土的颗粒大小分布曲线。

表1 秦淮河淤泥物理性质指标

含水率/%	pH	相对密度	液限/%	塑限/%	有机质含量/%
120	6	2.67	55	26	5

表2 粉煤灰物理性质指标 %

原料名称	烧失量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Σ
粉煤灰	5.5	49.4	30.3	8.5	3.7	1.3	0.6	99.3

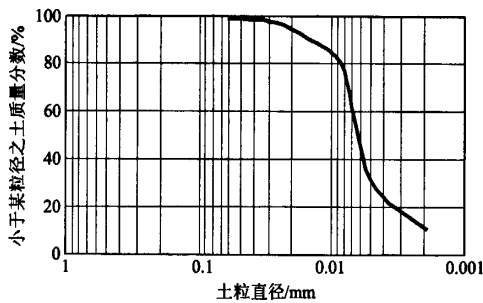


图1 粘土颗粒大小分布曲线

1.2 试验方法

水泥掺量不变,通过向有机质淤泥掺加不同的外加剂,根据无侧限强度指标评价不同外加剂对固化淤泥强度的影响并分析其机理。将外加剂、水泥先后加入淤泥中搅拌均匀后,分三层装入直径3.91 cm、高8 cm的三开模中,每层振实后装入下一层,静置1d拆模后送至温度20~22℃、湿度85%~90%的养护室养护。固化体养护至试验龄期7d、28d取出,进行无侧限抗压强度试验,试验后测量固化体含水率。试验采用仪器为应变控制式无侧限压缩仪、轴向位移计、天平、烘箱、多功能液塑限仪。

添加剂掺量计算公式如式(1)

$$a_w = m_a / m_s \times 100\% \quad (1)$$

式中: a_w 为添加剂掺量; m_a 为所加添加剂质量; m_s 为待加固软土干质量。

2 试验结果分析

2.1 单掺水泥

试验结果见表3,固化体强度随水泥、外加剂掺量的变化关系见图2、图3。

如图2所示,淤泥单掺水泥,固化体7d强度随水泥掺量的增加基本呈线形增长,而7~28d强度基本没有增长。水泥掺入25%时,固化体28d强度仅为26.1 kPa,远不能满足现有工程需要。淤泥中有机质包裹、覆盖在土颗粒上,阻碍水泥与土颗粒活性成分反应,大大降低水泥效用。

表3 固化淤泥强度随外加剂掺量及种类的变化

试验方案	水泥掺量/%	外加剂	外加剂1掺量/%	外加剂2掺量/%	不同龄期固化淤泥无侧限强度/kPa		不同龄期固化淤泥含水率/%	
					7d	28d	7d	28d
					1	10	无	0
	15	无	0	0	14.2	15.1	70.3	57.6
	20	无	0	0	16.1	17.3	68.7	56.3
	25	无	0	0	23.2	26.1	68.2	54.7
2	20	粘土	20	0	16.6	18.1	72.0	62.0
	20	粘土	30	0	23.6	26.0	66.0	57.0
	20	粉煤灰	20	0	20.2	36.0	69.0	59.5
	20	粉煤灰	30	0	33.0	42.0	64.1	54.0
3	20	硅酸钠	4	0	无强度	无强度	75.1	61.2
	20	氢氧化钠	(pH=7) ¹	0	10.2	12.2	75.5	60.2
	20	氢氧化钠	(pH=9) ¹	0	无强度	5.0	74.8	61.1
	20	氢氧化钠	(pH=11) ¹	0	无强度	无强度	74.5	60.9
4	20	粉煤灰、硫酸钠	20	4	33.0	50.0	67.0	56.1
	20	粉煤灰、硫酸钠	30	4	54.0	70.0	62.0	51.3

注1:加入NaOH使得淤泥孔隙液pH=7、9、11

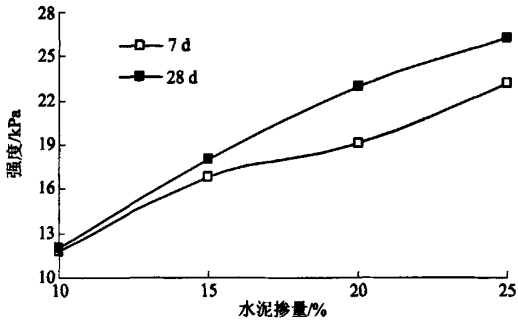


图2 固化淤泥强度随水泥掺量变化

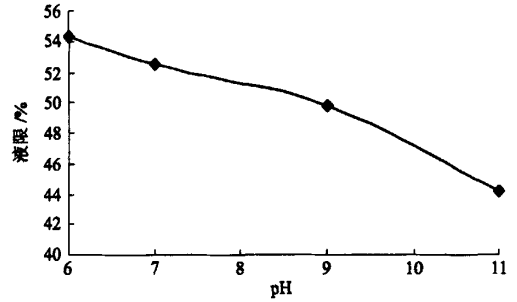


图4 淤泥液限随 pH 值变化曲线

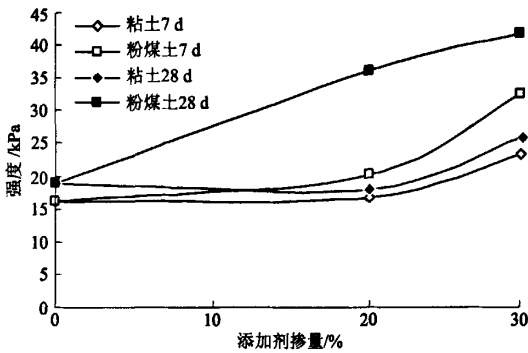


图3 固化淤泥强度随外加剂掺量变化

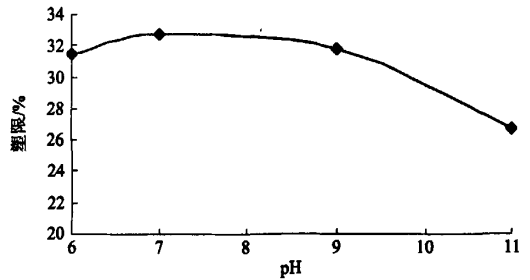


图5 淤泥塑限随 pH 值变化曲线

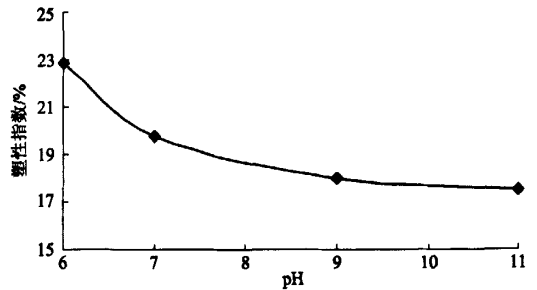


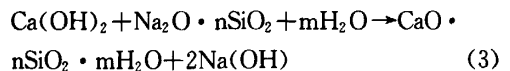
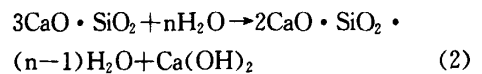
图6 淤泥塑性指数随 pH 值变化曲线

2.2 提高淤泥 pH 值(混掺水泥)

因此,掺入外加剂降低有机质的负面作用非常必要。Tremblay^[5]发现向淤泥中加入不同的有机质并单掺水泥固化时,引起固化淤泥孔隙液 pH 值变化的有机质极大影响了水泥的水化进程。凡是加入使得土体 pH<9 的有机物后,固化淤泥水泥水化产物生成量减少,强度几乎没有增长。而加入使得固化淤泥孔隙液 pH>9 的有机物后,pH 越高,水泥水化越完全,固化体强度越高。本试验向淤泥掺入氢氧化钠改变淤泥的 pH 值,然后掺加水泥,研究 pH 值对淤泥性质的影响,并比较 NaOH/Na₂SiO₂ 两种碱性外加剂固化淤泥的效果。

提高 pH 后(加入水泥前),淤泥液限/塑限、塑性指数随 pH 值的变化见图 4—图 6。淤泥初始孔隙液 pH 值在 6~7 之间,先加入 NaOH 分别将其 pH 调节到 7、9、11,静置 1d 稳定后加入水泥搅拌后制样,养护及试验方法同上,pH 值采用 1-14pH 试纸测定。加入 NaOH 后可以发现淤泥 pH≥9 时,原先干稠的淤泥变得稀松多水,几乎没有粘性,加入水泥后,拌和物中有絮状物生成,放置一天脱模养护至试验龄期试样无强度。

Na₂SiO₃ 学名水玻璃,其与水泥浆液的凝胶机理包括水泥的水解过程和水泥与水玻璃的反应,即:



氢氧化钙(硅酸三钙水化生成)与水玻璃的反应随氢氧化钙的逐渐生成而连续的进行,随着反应的进行,胶质体越来越多,强度也越来越高^[3]。所以水泥浆液的初期强度主要是水玻璃与氢氧化钙的反应起主要作用,而后期强度主要是水泥的水化反应起作用。同时,水玻璃还与土中的钙反应生成硅酸盐,使土体进一步固结。

水玻璃成本较高,掺量过大会提高工程造价,本

试验掺入 4% Na_2SiO_3 到淤泥中,稳定后测定土体 pH 值为 10,然后加入水泥搅拌制样、养护后强度情况同上,固化体基本没有强度。当采用 Na_2SiO_3 作为外加剂掺入淤泥中时,发现了与添加 NaOH 相似的情况,固化体强度没有因为 Na_2SiO_3 的掺入而有明显提高,反而降低了。

碱性剂的加入会导致淤泥中有机质的溶解^[4],NaOH、 Na_2SiO_3 作为辅助添加剂固化淤泥削弱了有机质淤泥的固化效果,不同于以往固化非有机质土的情况。

随着淤泥孔隙液中 pH 值的增加,土体液限大幅下降,而塑限则呈先微弱增加后下降的趋势,塑性指数也不断下降,且斜率随 pH 值增加不断减小;pH=11 时,曲线趋于水平,这说明拥有着极大比表面和细小粒有机质的存在增加了土体的液限和塑限,随着土体 pH 值的增加,有机质溶解,原先存在于土体中的有机质溶解成为土体液相的一部分,导致了土体粘粒含量的减少(见图 4—图 6)。

土体 $\text{pH} \geq 9$ 时,图 4 中液限、图 5 中塑限下降的速率都增加了,说明当土体 $\text{pH} \geq 9$ 时,土体中有机质溶解比较彻底,土体中粘粒含量的变化逐渐稳定。

图 6 中当 $\text{pH} \geq 9$ 时,塑性指数下降速率趋缓,说明了相同问题。淤泥 pH 值升高时,淤泥效果变差,这是由于当土体 pH 值较低时,有机质粘附在土颗粒上,将土颗粒包裹,阻止水泥与土颗粒活性成分反应;当淤泥 pH 值升高时,有机质溶解,淤泥孔隙液中充满了有机质。水泥加入后,由于水泥颗粒相对较小、比表面较大,还拥有大量具有胶凝性质的钙离子,使得水泥中的有效成分被有机质絮凝包裹起来,形成了观察到的絮凝颗粒,阻碍了水泥水化的进行,降低了固化效果。同时,水泥未加入前,随着 pH 值增高,淤泥中有机质溶解,淤泥粘性降低,使得淤泥中自由水增多,进一步削弱了固化效果。以上试验证明:提高淤泥中 pH 值而后加入水泥不能解决淤泥中有机质削弱固化效果的问题。当选择外加剂对淤泥进行固化时,应选择中性辅助添加剂。不同有机质对于淤泥固化效果的影响机理不同,在处理不同种类的有机质淤泥时,应进行相关的试验,确定辅助添加剂种类。

2.3 加入有机质吸附剂(混掺水泥)

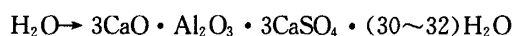
国外学者 Lo^[6]的研究表明,亲有机质粘土吸附了污染土中的有机质,有效提高了水泥固化的效率,是一种理想的吸附剂。粉煤灰、粘土比表面相对较大,能够吸附有机质,减弱有机质对水泥水化的阻碍作用。本文试验中采用粉煤灰、粘土作为吸附剂,验证它们对有机质的吸附作用,以求提高水泥固化效

率。

从图 3 不同外加剂下固化淤泥的强度变化曲线可以看出,粉煤灰作为外加剂固化淤泥明显优于粘土,加入粉煤灰的固化淤泥后期强度增长率明显提高,而粘土吸附有机质的效果并不理想,这是由于同粘土相比,粉煤灰提供的大量钙离子一方面能够胶凝、包裹吸附有机质,另一方面提高了孔隙液中钙离子的浓度,促进了水泥水化反应的进行。加入 30% 粉煤灰后,固化体 28 d 强度为 42 kPa,比未加前提高了 60.9%。需要继续提高固化淤泥的强度就需要添加更多粉煤灰,会大大增加运费和固化成本。掺加一种外加剂固化有机质淤泥经济性差,性价比低。

3 水泥-粉煤灰-硫酸钠复合固化剂

在上述试验研究的基础上,考虑采用复合固化材料固化有机质淤泥。通过上述粘土和粉煤灰作为有机质吸附剂的对比,发现粉煤灰的加入为固化淤泥提供了更多的钙离子,从而更好地起到胶凝的作用,有效削弱了有机质对水泥水化的阻碍作用。粉煤灰价格便宜,大量掺入不仅减小了淤泥的含水率,还提高了固化淤泥的抗干湿循环能力和强度^[7]。在加入粉煤灰、水泥的基础上,本文试验中加入中性硫酸钠固体,研究水泥-粉煤灰-硫酸钠复合固化剂对固化淤泥强度的提升作用。从表 3 可以清晰的看出:中性硫酸钠的加入有效提高了固化体的强度。粉煤灰掺量为 20% 时,4% Na_2SO_4 的加入使得固化体 7 d、28 d 强度分别比未加前增长了 63.3% 和 38.8%;粉煤灰掺量为 30% 时,硫酸钠掺入后固化体 7 d、28 d 强度分别比未加前增长了 63.6% 和 66.6%。早期和后期强度都有了明显提高,能够满足筑堤和路面填料的要求。粉煤灰掺量越大,固化体后期强度提升越快,说明正是粉煤灰的掺入提供了更多的钙离子,钙离子不仅胶凝了有机质,削弱了有机质对淤泥固化的消极影响,而且促进了水泥的水化,它们和加入淤泥中的硫酸钠反应,生成硫酸钙难溶固体,提高了固化体的强度。其中生成的硫酸钙还与水泥中的铝酸三钙(C_3A)反应,生成少量新的针状晶体水化硫铝酸钙^[8](生成的钙矾石会在铝酸三钙(C_3A)外表面形成一层覆盖膜,减少了孔隙液中铝酸三钙(C_3A)浓度,进而降低铝酸三钙(C_3A)反应速度)。反应式为:



这种化合物称为高硫型水化硫铝酸钙,自然界称钙矾石,钙矾石具有膨胀性,对固化体起着挤密的作用,减小了颗粒间的孔隙,使得固化体更加密

实^[8]。随着水泥水化的进行,水泥中的铝酸三钙(C_3A)与高硫型水化硫铝酸钙作用,转变为低硫型水化硫铝酸钙($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)和水化铝酸四钙($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$)的六方板状固溶体,进一步提高了固化体的强度。

4 结论

1)在采用水泥基材料对有机质淤泥进行固化处理时,淤泥中的有机质显著影响了水泥水化的进程,养护期间固化体强度基本上没有增长,水泥大量掺入不能有效地提升固化体的强度。这是因为拥有极大比表面的有机质吸附在土颗粒上面,阻碍了水泥与土颗粒间的反应,影响了淤泥的固化效果。

2)碱性剂的加入会导致有机质的溶解,进一步削弱淤泥的固化效果,不同于以往加固非有机质土的情况。有机质的溶解使得原先覆盖包裹着土颗粒的有机质脱离土颗粒而后,覆盖包裹了拥有相对较大比表面的水泥活性胶凝颗粒,阻碍了水泥的水化作用。在采用水泥基材料固化有机质淤泥时,需要采用中性掺加剂作为外加剂。

3)淤泥中的有机质随着 pH 值增高而溶解,淤泥液、塑限、塑性指数降低,淤泥中自由水增多,当孔隙液中 $pH \geq 9$ 时,有机质溶解基本稳定。

4)粘土和粉煤灰作为有机质吸附剂的对比试验发现,粉煤灰削弱了有机质对水泥水化的阻碍作用,有效提高了固化体的强度。但固化体强度仍处于一个较低的层次,需要采用复合固化材料才能取得理想的效果。

5)采用水泥-粉煤灰-硫酸钠复合固化材料,大幅度提高了固化淤泥的短期强度和长期强度。粉煤灰的加入提供了大量的钙离子,其掺量越大,固化淤泥无侧限强度后期增长率越大。

参 考 文 献

- [1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41.
- [2] 范昭平,朱伟. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(8):1327-1334.
- [3] 陈志敏,赵德安,李双洋. 黄土及饱和黄土中水泥水玻璃注浆效果评价[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版),2004,23(6):48-52.
- [4] Tremblay, Helene. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement[J]. Canadian Geotechnical Journal,2002,39(3):535-546.
- [5] Leonard A, Oste Theo M Lexmond and Willem H. Van Riemsdijk. Metal Immobilization in Soils Using Synthetic Zeolites[J]. Journal of Environmental Quality,2002, 31:813-821.
- [6] Lo, Irene M.-C. Solidification/stabilization of phenolic waste using organic-clay complex[J]. Journal of Environmental Engineering,1996,122(9):850-855.
- [7] 周红波,李恒. 高钙粉煤灰加固促淤地基机理和性状试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(5):783-788.
- [8] F. M. Lea. 水泥和混凝土化学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1970.

收稿日期:2010-02-24

(上接第141页)

4 结论

路面土质底基层材料干缩试验可参考本文所举的试验方法。干缩试验宜采用 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 的小梁试件,本试验设计并定制了小梁试件的试模及测量干缩值的仪器。采用静力压实法制作试件,每种配合比混合料制4根试件,拆模后取出试件进行养护,养护期满后测试其中两根试件的平均干缩值,同时测量另两根平行试件的平均水分损失量,直到连续两次测量数据无变化或接近时为止。通过对干缩试验数据的计算得到干缩应变、平均干缩系数等能反映干缩特性的指标,最后绘制干缩试验图表进行分析。

参 考 文 献

- [1] 程箭. 二次稳定膨胀土配合比设计方法与应用研究[D]. 南京:南京林业大学,2006.
- [2] 李芸,王元纲,许长青,等. 掺钢渣二灰碎石的干缩性能[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2006,30

(4):89.

- [3] 中华人民共和国建材行业标准. JC/T 603—2004 水泥胶砂干缩试验方法[S]. 北京:中国建材工业出版社,2005.
- [4] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [5] 王加龙,何兆益,黄维蓉. 无机结合料和固化剂稳定粉土收缩性能研究[J]. 重庆交通学院学报,2005(4):84.
- [6] 杨波,雷婷,宋人武. 公路路面二灰碎石基层的收缩试验研究[J]. 铁道建筑技术,2006(3):41.
- [7] 中华人民共和国行业标准. JTJ 057—94 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [8] 中华人民共和国行业标准. JTJ 034—2000. 公路路面基层施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版,2000.
- [9] 申爱琴,等. 加固的含砂低液限粉土收缩性能研究[J]. 建筑材料学报,2000,3(4):336.

收稿日期:2009-12-18