



吹填淤泥固化室内试验研究

史燕南¹, 俞炯奇², 周剑锋¹, 张超杰²

(1. 常州市建筑科学研究院股份有限公司, 江苏常州 213002; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江杭州 310020)

摘要: 为了解决吹填土含水率高、压缩性大和排水固结时间长等工程问题, 提出使用复合型固化剂固化吹填土, 从而达到节省工期、节约成本的目的, 为吹填土地基的加固提供一种经济可行的方法。通过单掺试验、正交试验和抗渗抗剪试验等方法, 研制出3种效果较好的固化剂。试验结果表明: 类别3固化土(复合掺入2%水玻璃、3%生石膏和0.5%苛性钠)固化效果最佳, 但综合考虑原料成本因素, 在类别2(单掺0.04%)的三乙醇胺的性价比最高。

关键词: 吹填淤泥; 复合型固化剂; 固化机理; 渗透性

中图分类号: TU 599

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0138-05

Indoor experiment on curing of dredged soil

SHI Yan-nan¹, YU Jiong-qi², ZHOU Jian-feng¹, ZHANG Chao-jie²

(1. Changzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Changzhou 213002, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In order to solve the problem of dredged fill including high moisture content, large compressibility and long consolidation time, etc, this paper puts forward an economic and feasible method, i. e. using composite curing agent to cure the dredged soil, so as to achieve the aim of saving time and cost. Three kinds of curing agents with better effect are developed by means of single-mixed and orthogonal experiments, and impermeability and shear tests, etc. The test results show that the effect of category 3 mixed with 2% sodium silicate, 3% gypsum and 2% NaOH is the best, but considering raw material costs, the cost performance ratio of category 2 which is only mixed 0.04% triethanolamine is the highest.

Key words: reclaimed sludge; composite curing agent; stabilization mechanism; permeability

吹填土又名冲填土, 是在航道整治和疏浚时用绞吸船把原状淤泥在水中搅拌成一定比例浓度的泥浆, 经过水力吹填而成的沉积土。通过吸泥管吸取的海底泥浆具有含水含盐量高、孔隙比大、压缩性强和排水固结时间长等不良工程地质特征, 使得吹填淤泥处理成本昂贵。因此, 需要在淤泥土中掺入固化剂以形成胶凝物质来改善土壤性质, 从而使吹填淤泥固结不受时间限制, 且强度、稳定性等达到工程实际要求^[1]。

多年来研究者们的工作主要集中在水泥、石灰、粉煤灰等无机材料对土体加固的研究上。国外的 Shirazi^[2]、Khelifa^[1] 等以及国内的林宗寿^[3]、刘顺妮^[4-5] 等都对掺石灰和粉煤灰的水泥土有一定的研究, 但关于利用粉煤灰和石灰固化海积淤泥的相关报道却较少。此外, 水泥单价较高, 若在石灰和粉煤灰中掺入添加剂替代水泥, 可以大大降低水泥的使用量, 降低成本。

以浙江温州平阳淤泥为研究对象, 通过单掺

收稿日期: 2013-09-26

作者简介: 史燕南(1988—), 女, 助理工程师, 从事建筑工程。

试验和正交试验研制出几种满足的要求固化剂, 并利用抗剪、抗渗测试等手段探讨分析了几种固化剂的固化效果。

1 材料与试验方法

1.1 试验淤泥土和其它材料

1.1.1 淤泥土

试验采用温州平阳海积淤泥为研究对象, 主要性质如表 1 所示。

表 1 平阳海积淤泥的物理性质

岩土名称	含水率/ %	湿密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	液限/ %	塑限/ %	pH 值	有机质含量/%
淤泥	54.3	1.67	0.91	58.0	29.4	7.85	0.51

1.2.2 其它材料

1) 生石灰、生石膏、苛性钠、硅粉、三乙醇胺、水玻璃, 都使用实验室分析纯。

2) 粉煤灰采用二级灰。

1.2 试验方法

使用各种固化剂加固平阳海积淤泥, 最终选定的配比方案要满足 50 ~ 60 kN 的承载力, 即抗压强度大于等于 100 kPa, 并且尽量将成本控制在最低范围内 (一般考虑 20 元/ m^3)。

制样的基本步骤为: 1) 将 5 cm × 5 cm × 5 cm 的三联试模擦净, 四周刷油; 2) 称 500 g 的湿泥, 配制成含水率为 85% 的样品 (采用较先进的绞吸泵时, 吹填土含水率可达 85%); 3) 将不同种类、掺比的固化剂分别加至泥样中, 按胶砂搅拌规范搅拌; 4) 采用混凝土试验用振动台振动成型, 分 3 层, 每层各振动 1 min, 每个配比做 3 个平行试样; 5) 试件成型完毕, 用湿布覆盖表面, 减少试样水分蒸发。

在室温为 22 °C 左右静置 1 d 后脱模, 然后放入数控水泥标准养护箱进行标准养护, 至试样龄期, 然后进行各项数据测试。

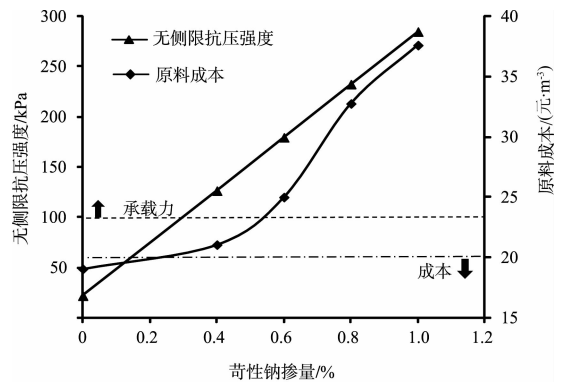
2 试验内容

2.1 单掺试验

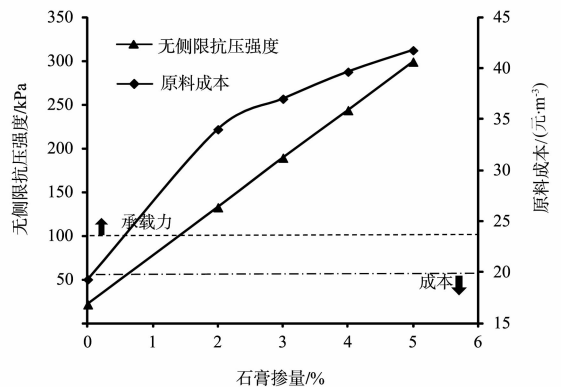
通过试验确定基准配比, 为 3% 石灰 + 6% 粉

煤灰, 水灰比 0.5, 含水率 85%, 其 7 d 无侧限抗压强度约为 50 kPa。其中百分比掺量以干土质量为基准, 掺量单位为 kg。

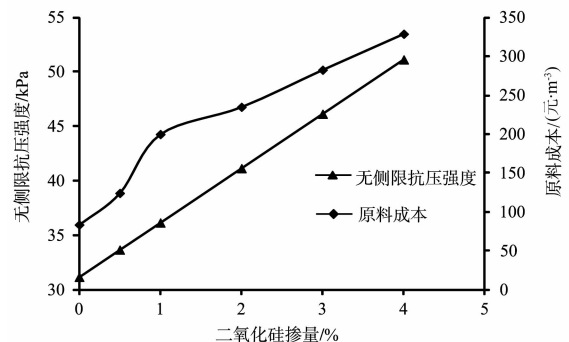
土壤固化的对策主要有减薄双电层厚度, 添加膨胀组分, 提高早期强度以及土壤 pH 值等几种, 且由于无机类固化剂成本低, 研究比较完善, 应用较为广泛, 强度也较高, 因此选定苛性钠、水玻璃、硅粉、三乙醇胺及生石膏作为固化剂的添加组分。图 1 为各固化剂掺量与抗压强度和原料成本的关系。



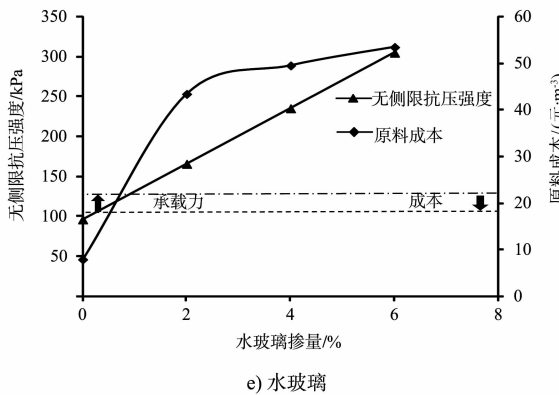
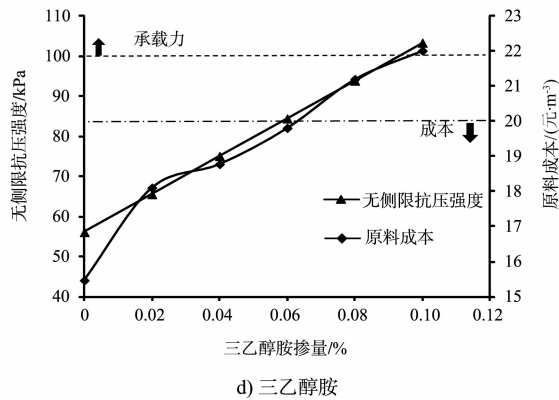
a) 苛性钠



b) 石膏



c) 二氧化硅



注：石灰300元/t；粉煤灰150元/t；三乙醇胺5800元/t；生石膏500元/t；苛性钠2300元/t；水玻璃650元/t；硅粉7500元/t。

图1 各固化剂掺量与无侧限抗压强度及原料成本的关系

从图1可以看出，随着各种固化剂掺量的增加，固化土的无侧限抗压强度都有所增加。其中，

苛性钠、石膏、水玻璃增长曲线最明显，各掺量点都满足承载力要求，在满足100 kPa条件下，原料成本在20元/m³左右，但苛性钠将达到30元/m³；三乙醇胺次之，相对其它几种固化剂而言，三乙醇胺掺量最小，原料成本最低，效果较为明显；硅粉总体偏低，在30~60 kPa，且成本颇高，后期正交试验不予考虑。

2.2 正交试验

由单掺试验得到，苛性钠、生石膏、水玻璃及三乙醇胺对固化土的早期强度提高较多，由于三乙醇胺是公认的性能比较好的早强剂，在基准配比为3%石灰+6%粉煤灰中加入0.04%的三乙醇胺，强度从50 kPa左右提高到139.4 kPa，提高了1.8倍，而成本仅增加了1.9元/m³。

各个因素对固化土抗压强度的影响程度是不同的，每个影响因素的水平也不一样，为了得到固化剂的最优配比，以无侧限抗压强度为考核目标，进行了正交试验。又同时考虑到成本问题，对之前的配比进行相应的调整，本次试验运用数理统计正交试验法进行了三因素三水平试验，对应的正交表是L₉(3⁴)，具体试验方案及计算结果列于表2。表2中所有百分比掺量以干土质量为基准，掺量单位为kg。

表2 28 d龄期实验方案与极差计算结果

试验号	影响因素列号				28 d 无侧限抗压强度/kPa	原料成本/(元·m ⁻³)
	生石膏掺量(A)	苛性钠掺量(B)	水玻璃掺量(C)	误差估计		
	1	2	3	4		
1	1(1%)	1(0.4%)	1(2%)	1	184.9	38.8
2	1(1%)	2(0.5%)	2(3%)	2	222.6	46.0
3	1(1%)	3(0.6%)	3(4%)	3	55.3	53.1
4	2(2%)	1(0.4%)	2(3%)	3	312.1	48.2
5	2(2%)	2(0.5%)	3(4%)	1	101.1	55.3
6	2(2%)	3(0.6%)	1(2%)	2	221.6	46.6
7	3(3%)	1(0.4%)	3(4%)	2	190.7	57.5
8	3(3%)	2(0.5%)	1(2%)	3	405.6	48.8
9	3(3%)	3(0.6%)	2(3%)	1	261.8	56.0
K ₁	462.7	687.7	812.0	547.8		
K ₂	634.8	729.4	796.6	634.9		
K ₃	858.0	538.6	347.1	773.0		
\bar{K}_1	154.3	229.2	270.7	182.6		
\bar{K}_2	211.6	243.1	265.5	211.6		
\bar{K}_3	286.0	179.5	115.7	257.7		
R	131.8	63.6	155.0	75.1		

各列极差 R 的大小可用来衡量试验中相应因素作用的大小, 极差大的因素, 说明它的 3 个水平对强度所造成的影响大, 通常是重要因素, 相反极差小的往往是次要因素。按照极差的大小分析可得本次试验中影响固化土 28 d 强度因素的主次顺序为 $C \rightarrow A \rightarrow B$, 即水玻璃掺量是影响强度的主要因素, 生石膏掺量次之, 苛性钠掺量影响相对较小。

表 3 符合要求的配比方案

固化剂配比	28 d 无侧限抗压强度/kPa	原料成本/(元·m ⁻³)
类别 1(4% 石灰 + 8% 粉煤灰)	142.4	21.5
类别 2(基准配比(正交))	139.4	16.6
类别 3(A ₃ B ₂ C ₁)	405.6	48.8

综合单掺试验结果和正交试验结果, 确定了具有针对性的 3 种固化剂较优配方(表 3), 为 A₃B₂C₁、基准配比、4% 石灰 + 8% 粉煤灰, 其中基准配比和 4% 石灰 + 8% 粉煤灰这两个方案同时满足承载力和成本要求, 而 A₃B₂C₁ 只满足承载力要求, 由于其无侧限抗压强度最高, 故同时对其进行后期性能测试试验。

3 固化土的性能测试

3.1 抗剪强度

固化土的抗剪强度主要由粘聚力 c 和内摩擦角 φ 来表示, 这两者共同称为固化土的抗剪强度指标。为了研究在平阳淤泥土中加入固化剂后, 其粘聚力和内摩擦角的变化情况, 笔者进行了相应的直接剪切试验, 如表 4 所示。从表中可以看出, 类别 3 最坚硬, 其凝聚力值最大, 内摩擦角也最大; 类别 1 的固化土最软, 其值也最小。

表 4 3 种固化土的抗剪强度指标

固化剂类别	凝聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	性状描述
1	22	25.0	较软, 可用手将环刀压入
2	28	23.7	较硬, 亦可用手制备环刀试样
3	66	30.2	坚硬, 环刀需用工具敲入

3.2 渗透特性

本节将基于达西渗透定律对固化土渗透特性进行试验分析, 3 种固化土的平均粒径均小于 0.52 mm, 符合达西定律的适用条件。

从表 5 可以看出, 3 种固化土的渗透性都较弱, 都属于极低渗透性土。类别 1 固化土的渗透系数最大; 类别 3 固化土的渗透系数值最小, 也就是说, 随着添加剂掺量的增加, 固化土的渗透性越差, 即抗渗能力越强。由于添加剂的加入, 固化土中凝胶物质数量有所增加, 填充了土颗粒间的孔隙, 使结构更加紧密, 渗透性能越低。

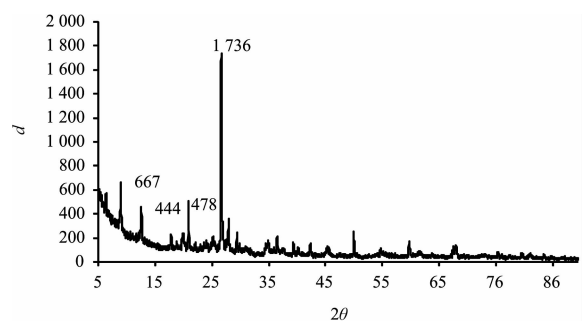
表 5 3 种固化土的渗透系数值

固化剂编号	$\frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$ (平均粒径)/mm	渗透系数/($\times 10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.012 6	24
2	0.008 5	6.2
3	0.010 0	0.85

3.3 XRD 图谱分析

X 射线衍射图谱的判别就是识别图谱, 图谱中的衍射峰的峰形、强度和 d 值是矿物晶体结构的反映, 据此可以对矿物的种类进行鉴定和计算矿物的相对含量。

从图 2 可知, X 射线衍射特征峰集中在 $5^\circ \sim 30^\circ$, 且峰形较为尖锐, 说明土的结晶性良好。但加入固化剂后, 没有产生新的矿物衍射峰, 证明淤泥土中没有新矿物生成。而各类别的固化土的 d 值比原状土的 d 值稍有减小, 反映了固化剂加入后, 在一定程度上能够影响黏土矿物层间水的脱失, 改变了晶层间距, 使得晶面间距减小。



a) 原状土

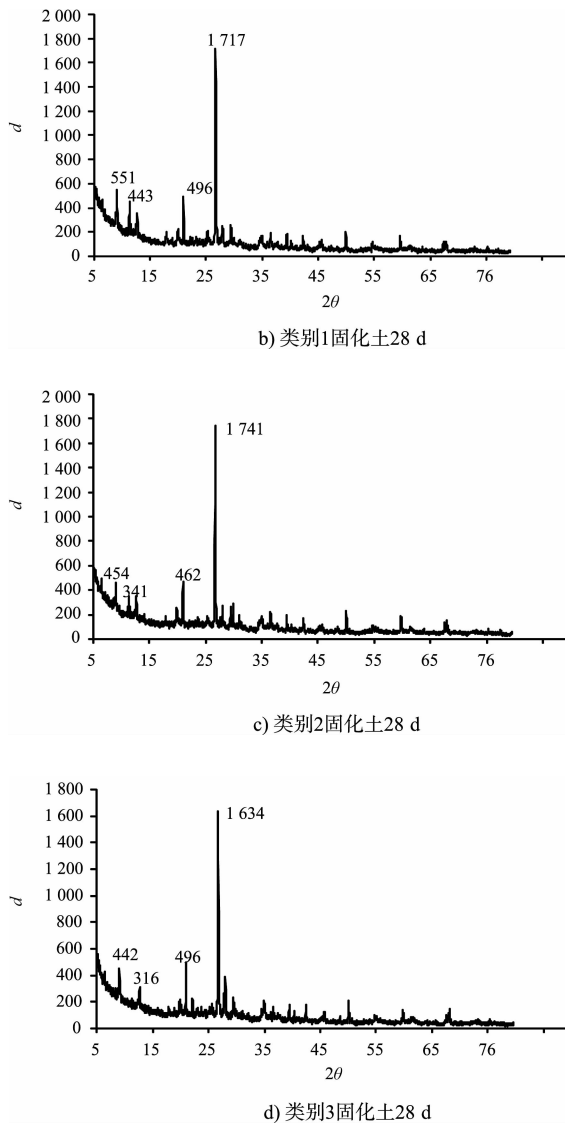


图2 XRD 图谱

4 结论

1) 各类固化土的无侧限抗压强度与各添加剂的掺量成正比。

2) 类别1 固化土与类别2 (单掺0.04%的三乙醇胺) 固化土的28 d 无侧限抗压强度值基本相同, 类别3 (掺2%水玻璃、3%生石膏和0.5%苛性钠) 效果最佳, 但成本高。

3) 3类固化土的抗渗、抗压、抗剪等性能都有所改善, 类别2 和类别3 相比类别1 稍佳, 其中类别2 性价比最佳。

参考文献:

[1] Shirazi H. Field and laboratory evaluation of lime fly ash to replace soil cement as a base course[J]. Transportation Research Record, 1999, 1652: 270-275

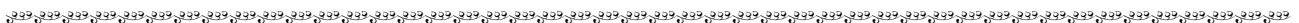
[2] Khelifa H, Mohamed G, Said K, et al. Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils[J]. GeotechGeol Eng, 2011, 29: 759-769.

[3] 林宗寿, 黄赞, 刘顺妮, 等. 消石灰脱水法制备好强石灰固化剂的研究[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(1): 4-6.

[4] 刘顺妮, 林宗寿, 陈云波. 改性石灰黏土固化剂的研究[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 169-173.

[5] 刘顺妮, 黄云, 林宗寿. 黏土含水率对固化剂配比的影响[J]. 材料科学与工程, 1998, 16(4): 74-76.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第126页)

6 结语

总体来看, 当前国内外港口均处于转型升级发展的关键阶段, 智能港口发展是大势所趋。随着物联网技术、云平台、大数据管理等新一代信息技术的发展, 从感知、传输、应用3个层级搭建智能港口总体框架, 为满足供应链竞争要求和港口服务需求而梳理想能应用体系, 将使港口有效发挥其在全球供应链中的资源配置作用。为此, 本文提出港口智能化建设框架的设想, 期待共同推进我国港口的发展水平, 提高港口供应链竞争能力。

参考文献:

[1] 高楠, 张宇, 张杰. 新时代港口的发展趋势及特点[J]. 经营管理者, 2013(13): 215.

[2] 王宇, 李继春. 物联网技术在智能港口中的应用前景[J]. 集装箱化, 2010(12): 28-30.

[3] 李向文. 第五代物联网港口设想及我国港口物联网发展前瞻[J]. 集装箱化, 2013(2): 15-17.

[4] 刘杨, 王晓明, 王豫炜. 国投交通信息化发展规划[R]. 北京. 中交水运规划设计院有限公司, 2013.

(本文编辑 郭雪珍)