

污泥固化材料优选试验研究

郑修军¹, 朱 伟², 李 磊³, 徐志荣², 屈 阳²

(1. 河海大学 土木工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098; 3. 河海大学 科学研究院, 南京 210098)

摘 要: 针对污泥固化材料种类繁多, 各种材料互相组合时对固化污泥强度所起作用不明确问题, 通过正交试验, 研究常用的硅酸盐固化材料、碱性固化材料和黏土系辅助材料共同组合时对固化污泥强度的影响规律。结果表明, 常用的各种系列污泥固化材料中硅酸盐固化材料和碱性固化材料对固化污泥强度形成起主要作用, 碱性固化材料对固化污泥早期强度的形成具有重要作用, 硅酸盐固化材料的作用到后期会明显的表现出来, 黏土系辅助材料在添加后主要起系数和构建无机骨架的作用。

关 键 词: 污泥; 固化材料; 正交试验; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Optimization experiment study of sludge solidifying materials

ZHENG Xiu-jun¹, ZHU Wei², LI Lei³, XU Zhi-rong², QU Yang²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Lots of sludge solidifying materials are used for sludge treatment, but the role of every material is not clear. The orthogonal test is carried out to optimize materials and reveal the influences of Portland solidification materials, alkali solidification materials and clay mineral materials. Test results show that the Portland solidification material and alkali solidification material play a major role in solidified sludge. Basic materials provide early strength for solidified sludge Portland solidification material provides the latter part strength. The clay mineral materials can construct skeleton to form monolithic body.

Key words: sludge; solidifying materials; orthogonal experiment; unconfined compressive strength

1 引 言

污泥是污水处理过程中所产生的沉淀物和漂浮物, 其成分复杂, 具有高含水率、高有机质含量、同时含有各种有毒有害物质的特点。

将污泥送往卫生填埋场直接进行填埋处置, 通过填埋场的屏障系统可以最大限度避免污泥通过扩散对周围环境的污染, 污泥填埋在未来一段时期内仍将是我国主要的污泥处置方式^[1-2]。污泥填埋时要求无侧限抗压强度不小于 50 kPa^[3], 由于污泥的含水率高、力学性质差, 未经处理的污泥无法直接进入填埋场。通过向污泥中添加固化材料, 降低污泥的含水率, 固化预处理后进行填埋处置技术是符合我国现阶段国情的污泥处置技术之一^[4-5]。针对

传统固化技术中存在水泥用量大、强度低的问题, 研究适合中国现状的高效、经济的污泥固化复合材料显得尤为重要。目前国内外对于污泥常用的固化材料主要可以分为硅酸盐类固化材料、碱性固化材料以及黏土系辅助材料三大类^[6-8], 国内外众多学者采用 3 种材料单独或者混合对污泥固化后的强度进行了研究^[9-11], 但没有对 3 种类型的材料在提高固化效果中所起的作用进行深入探讨, 不能从实际工程中固化材料类型的选择提供依据。

本文选取硅酸盐系固化材料、碱性固化材料、黏土系辅助材料, 通过设计室内正交试验, 研究了 3 种类型固化材料对污泥强度的影响, 定性分析了各类材料在固化过程中的作用, 为实际工程中材料的选取提供了参考。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

试验所用的污泥取自南京市某污水处理厂脱水

污泥，污泥的指标见表 1。可见其中含有大量水和有机物质，同时还含有各种有毒有害重金属。所选
用固化材料的基本指标见表 2。

表 1 污泥的基本性质指标
Table1 Physico-mechanical characteristics of sludge

含水率 /%	重度 /(kN·m ⁻³)	比重	pH	塑限指数 /%	有机质 /%	C _u /(mg·kg ⁻¹)	Z _n /(mg·kg ⁻¹)	C _d /(mg·kg ⁻¹)	P _b /(mg·kg ⁻¹)
345	10.7	1.58	7.17	235.1	45.2	223	419	13	114

表 2 固化材料的基本性质指标
Table 2 Characteristics of sludge solidifying materials

材料	硅酸盐固化 材料 A	碱性固化 材料 B	黏土系辅助材料		
			1	2	3
主要成分	SiO ₂ Fe ₂ O ₃ Cao Al ₂ O ₃ SO ₃	CaO MgO	(K, Na)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si _{3.1} Al _{0.9})O ₁₀ (OH) ₂	CaO ₂ (Al, Mg) ₂ SiO ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	K(Al, V) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂

2.2 正交试验设计

选用 L9(3⁴)正交表安排试验，选择硅酸盐固化材料 A、碱性固化材料 B 和黏土系辅助材料（1~3）为考察对象，以固化污泥的无侧限抗压强度为评价指标。正交试验方案见表 3。

表 3 正交试验方案
Table 3 Orthogonal experiment design

试验号	因素 /%			测试项目
	硅酸盐固化 材料 A	黏土系辅助 材料（1~3）	碱性固化 材料 B	
1	5	5	0	X1
2	5	10	5	X2
3	5	15	10	X3
4	10	5	5	X4
5	10	10	10	X5
6	10	15	0	X6
7	15	5	10	X7
8	15	10	0	X8
9	15	15	5	X9
K1				
K2				
K3				
R				

注：①材料添加的质量分数为材料质量与污泥质量之比；②K1、K2、K3 为均值，R 为所在列极差，具体参数参见后文表 4~6。

试验的大致步骤可以简要概括为将硅酸盐固化材料、碱性固化材料和黏土系辅助材料按设计添加量加入到污泥中加入搅拌机充分搅拌均匀，根据土工实验规范的要求（试样高度和直径比为 2~2.5:1），将搅拌后的固化污泥分 3 层装入内径为 3.91 cm、高 8.0 cm 的钢制模具内，每层振动 2 min 后装入下一层，振动密实试样置于温度（20±2）℃、湿度大于 90 % 的养护箱中养护至 1 d 后脱模，脱模

后继续养护至试验龄期 3 d 和 7 d，然后测定每组试样的无侧限抗压强度值。

无侧限抗压强度试验标准采用《土工试验方法标准》^[11]，试验设备为南京土壤仪器厂有限公司生产的 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪，每组取 3 个试样进行平行试验。

3 不同材料对固化污泥无侧限抗压强度的影响

不同材料处理后固化污泥的无侧限抗压强度值和正交分析结果见表 4~6。从表中可以看出，当养护龄期为 3 d 时，加入黏土系辅助材料 1~3 的固化污泥能够满足填埋强度不小于 50 kPa 的分别为 3，5，7 号试样，7 号试样和 3，5，7，9 号试样；当养护龄期到达 7 d 时，满足填埋强度要求的试样分别为 3~5，7~9 号试样，5~9 号试样和 3~9 号试样。

同等掺入量下 3 种辅助材料的固化效果是辅助材料 3 大于辅助材料 1 大于辅助材料 2，表明不同的黏土矿物组成对固化污泥形成整体强度的贡献存在一定的差异，这是因为黏土系辅助材料的加入为固化污泥提供无机颗粒骨架，同时黏土系辅助材料中的矿物成分还会参与硅酸盐系和碱性材料的胶结反应，因此当添加不同的黏土系矿物时固化污泥的强度也会不同。从表中的极差分析亦发现，传统污泥固化材料中对固化污泥强度提高起主要作用的是硅酸盐系材料和碱性材料；随着养护龄期的增加，硅酸盐系材料和碱性材料两者的极差差值变小，并有硅酸盐系材料极差大于碱性材料极差的现象，表

表 4 添加黏土系辅助材料 1 固化效果
Table 4 Solidified effect with clay mineral materials 1

项目	试验号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 d	13.20	28.80	54.30	45.30	63.00	28.20	87.40	37.40	48.90
7 d	20.70	44.40	96.12	72.00	106.20	49.50	120.60	69.30	86.40
3d					7 d				
	硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 1	碱性固化材料 B			硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 1	碱性固化材料 B	
K1	32.10	50.30	24.60		K1	53.74	71.10	46.50	
K2	45.50	41.40	41.00		K2	75.90	73.30	67.60	
K3	57.90	43.80	69.90		K3	92.10	77.34	107.64	
R	25.80	8.90	45.30		R	38.36	6.24	61.14	

表 5 添加黏土系辅助材料 2 固化效果
Table 5 Solidified effect with clay mineral materials 2

项目	试验号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 d	3.94	17.98	24.76	24.44	46.72	19.80	58.32	16.08	45.94
7 d	4.32	18.72	30.40	40.82	74.40	28.26	123.60	38.88	101.80
3d					7 d				
	硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 2	碱性固化材料 B			硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 2	碱性固化材料 B	
K1	15.56	28.90	13.27		K1	17.81	56.25	23.82	
K2	30.32	26.93	29.45		K2	47.83	44.00	53.78	
K3	40.11	30.17	43.27		K3	88.09	53.49	76.13	
R	24.55	3.24	29.99		R	70.28	12.25	52.31	

表 6 添加黏土系辅助材料 3 固化效果
Table 6 Solidified effect with clay mineral materials 3

项目	试验号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 d	4.41	29.16	55.66	43.58	82.68	35.70	92.76	38.52	68.92
7 d	14.14	37.98	88.72	63.12	114.25	57.78	149.04	68.04	125.46
3d					7 d				
	硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 3	碱性固化材料 B			硅酸盐固化材料 A	黏土系辅助材料 3	碱性固化材料 B	
K1	29.74	46.92	26.21		K1	46.95	75.43	46.65	
K2	53.99	50.12	47.22		K2	78.38	73.42	75.52	
K3	66.73	53.43	77.03		K3	114.18	90.65	117.34	
R	36.99	6.51	50.82		R	67.23	17.23	70.68	

明各类固化材料中早期起主要作用的是碱性固化材料，硅酸盐系固化材料的作用在后期才开始表现出来，这主要是由于在碱性固化材料在接触污泥中水分后可以迅速发生反应，消耗掉污泥中一部分多余的水分，同时反应时释放的反应热有利于固化污泥中水分的散失，而硅酸盐系固化材料的胶结反应是随时间增长慢慢完成的过程，需要到达一定龄期后才能够形成较多的硅酸盐产物，因此碱性材料的早期效果较为明显，随着龄期的增长，硅酸盐系材料的作用得到充分发挥。

4 结 论

- (1) 通过正交试验设计发现，常用的硅酸盐固化材料、碱性固化材料和黏土系辅助材料复合进行固化污泥处理时，得到的固化污泥的无侧限抗压强度能够满足填埋强度要求。
- (2) 硅酸盐系固化材料和碱性固化材料对固化污泥强度的形成其主要作用，其中碱性固化材料早期作用明显，硅酸盐系材料的作用在后期才能发挥完全，黏土系辅助材料在污泥固化过程中可以填充

于前 2 种固化材料形成的整胶结体内, 提高了固化污泥的整体性强度。

(3) 关于三类材料对固化污泥强度影响机理有待进一步深入地研究, 可为污泥固化材料的选择提供定量的理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 吴健波, 刘振鸿, 陈季华. 剩余污泥处置的减量化发展方向[J]. 中国给水排水, 2001, 17(11): 24—26.
- [2] 赵丽君, 张大群, 陈宝柱. 污泥处理与处置技术的进展[J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 23—25.
- [3] KOENING A, KAY J N, WAN L M. Physical properties of dewatered wastewater sludge for landfilling[J]. **Water Science and Technology**, 1996, 34: 533—540.
- [4] 朱伟, 李磊, 林城. 生物与化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 933—938.
- [5] 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.
- [6] TYAGI R D, MEUNIER J, BLAIS J F. Simultaneous sewage sludge and metal leaching: effect of temperature[J]. **App Microbial Biotechnol**, 1996, 46: 422—431.
- [7] MINGOT J I, OBRADOR A, MANNE J, et al Acid extraction sequential fraction of heavy metals in water treatment sludge[J]. **Environ Tecnol**, 1995, 16(9): 869—876.
- [8] GOUGAR M L D, SCHEETZ B Z, ROY D M. Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: a review[J]. **Waster Management**, 1996, 16(4): 295—303.
- [9] 曹永华, 闫澍旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740—744.
- [10] 朱伟, 林城, 李磊, 等. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1 020—1 025.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.