

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-3001-05

干湿循环条件下固化污泥的物理稳定性研究

李 磊¹, 朱 伟², 林 城³, 大木宜章⁴

(1.河海大学 科学研究院, 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 土木工程学院, 南京 210098; 4.日本大学 生产工学部, 日本 千叶县习志野市 275-0006)

摘 要: 针对采用水泥和膨润土为固化材料处理的污水厂污泥为研究对象, 采用干湿循环试验测量了在水分强烈变化下固化体的质量、体积、含水率及强度等参数的变化情况, 进而评价固化污泥的干湿耐久性。结果表明, 水泥的掺入是提高固化体干湿耐久性的主要因素, 但要达到一定的掺入量才能发挥作用。膨润土对固化体的干湿耐久性影响呈现两面性, 适当地掺入膨润土有利于干湿耐久性的形成, 而过多地掺入膨润土反而不利于干湿耐久性的形成。在水泥掺入质量比小于或等于 0.4 时, 干湿循环后固化体相对控制样强度明显提高, 但体积显著减小, 而水泥掺入质量比大于 0.4 时, 干湿循环后固化体相对控制样强度有所下降而体积基本不变。

关 键 词: 污泥; 耐久性; 固化; 干湿循环; 膨润土

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Study of wet and dry properties of solidified sludge

LI Lei¹, ZHU Wei², LIN Cheng³, T. OHKI⁴

(1. Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Tiba Narashino 275-0006, Japan)

Abstract: Based on the cement-solidification of sludge using bentonite as additive, the wet and dry test was conducted to measure the parameters of relative mass loss, volume change, water content and unconfined compression strength(UCS) under the condition of violent water changes, in order to evaluate the wet and dry durability of the solidified sludge. The results show that the cement plays the major role in improving the wet and dry durability of solidified sludge; and the results are achieved at the enough cement content. Bentonite can also improve the wet and dry durability of solidified sludge at the appropriate range of adding content, however exceeding the range, can reduce the wet and dry durability. At cement content below 0.4, UCS of solidified sludge increases after wet and dry cycles relative to control samples but volume of solidified sludge decreases remarkably; at cement content larger than 0.4, UCS decreases relative to control samples and volume varies little.

Key words: durability; sludge; solidification; wet and dry cycle; bentonite

1 引 言

污泥是污水厂在处理污水过程中产生的沉淀物和漂浮物, 具有高含水率、高有机物含量等特点, 又含有大量有毒、有害成分。如果不能对污泥进行妥善处理, 容易造成对周围环境的 2 次污染。采用固化和稳定化的方法对污泥进行处理, 固化后的污泥可转化为填土材料、烧砖材料和垃圾场的覆土材料等加以资源化再利用^[1-3], 或进入填埋场填埋处置^[4-5]。

由于污泥中有机质含量往往超过 40 %, 对其固化需要消耗大量的固化材料, 而且固化效果较差^[6-7]。本文提出采用膨润土为添加剂辅助水泥固化处理污泥, 能获得良好的效果。微观分析表明, 加入膨润土后固化污泥中的碳酸钙成分显著增加, 有助于提高污泥的强度。另外, 整体的密实性也得到了较大的提高^[8-9]。本方法确保在较低的水泥掺入量下, 使固化污泥获得较高的强度、低的渗透性和较好的污染物稳定性, 从而达到对污泥力学性质改善和对其中重金属及有机污染物危害进行控制的目的。

收稿日期: 2008-04-21

基金项目: 江苏省社会发展计划项目 (No. BS2007156); 天津市应用基础研究计划项目 (No. 07JCYBJC07600); 教育部博士点基金项目 (No. 2008029410001)。
第一作者简介: 李磊, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事环境岩土及固废处理相领域的研究。E-mail: Dr.lilei@163.com

由于污泥和添加材料膨润土本身抵抗水分变化的能力较差,两种材料在干燥时容易失去水分,在湿润时又容易吸水膨胀,对固化污泥的材料耐久性产生影响。为了在较短周期内获得固化污泥在干湿交替条件下材料耐久性,进行干湿循环试验,研究在水分强烈变化下固化污泥的物理力学性质的变化,为评价固化污泥的干湿耐久性提供理论依据。

2 试验材料和试验方法

试验所用的污泥取自南京江心洲污水厂,污泥的指标见表 1。从实测结果可以看出,污泥含有大量水和有机物。水泥为南京江南水泥厂 32.5#普通硅酸盐水泥。膨润土为南京汤山膨润土生产的钙基膨润土,它的基本性质见表 2。从表 2 可以看出,钙基膨润土具有高吸水率、高吸附量等特性。

表 1 污泥的基本性质指标

Table 1 Physical and chemical characterization of sludge

含水率 /%	重度 /(kN/m ³)	土的 相对 密度	pH	塑限 /%	有机质 /%	Cu	Zn	Cd	Pb
						/(mg/kg)			
314~360	10.9	1.61	7.07	25.61	42.8	199	505	26	116

表 2 膨润土的基本性质指标

Table 2 Basic properties of ca-bentonite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	吸水率 2 h	CEC	粒度 180 目
/%				/%	/(mol/100 g)	/%
70.49	16.14	1.89	2.02	≥180	0.792	95

注:部分指标引自于华 2005 年^[10],CEC 为阳离子交换容量。

干湿循环试验参考美国试验与材料学会 (ASTM) D4843—1988 的试验方法^[11]。该方法适用于固体废弃物的干湿循环评价。试验步骤可概括为:每一个配比要求制成 7 个试样,按照试验方法的要求,将试样养护到 28 d 开始干湿循环试验。干湿循环开始前,将其中 1 个试样取出,测其无侧限抗压强度、含水率及质量,剩下的 6 个试样分成 2 组,每组 3 个样,一组作为控制样,另一组作为干湿样,并将试样分别放入 6 个宽口玻璃杯中。试验前先将 2 组试样称重,量体积,将装有控制样的玻璃杯置于相对湿度为 99 %,温度为 20 ℃ 的恒温恒湿箱中 24 h,将装有干湿样的玻璃杯置于温度为 (60±5) ℃ 的烘箱中烘 24 h,然后分别从恒温恒湿箱与烘箱中取出 2 组试样,并将取出的试样在常温的房间中放置 1 h,并向玻璃杯加水直至将试样淹没,再将装有试样的玻璃杯置于(20±3) ℃ 的培养箱中 23 h,用蒸馏水冲洗试样的表面碎屑,观察可能

出现的开裂、破坏等现象。将试样取出放入另外 6 个新的玻璃杯中,这样就完成一个干湿循环。重复以上步骤,直到 12 个干湿循环结束,并最终测量试样的无侧限抗压强度、含水率、重量及体积等指标。干湿循环的判断标准主要以试样的平均累积修正相对质量损失率(S),这里简称相对质量损失率(%),以及试样是否破坏为依据。当 S>30 %或试样在试验过程中发生破坏,则判定该试样的干湿耐久性不能达到要求。

相对质量损失率的计算公式:

$$S = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{W_{i,s}}{M_s} - \frac{W_{i,c}}{M_c} \right) \quad (1)$$

式中: $W_{i,s}$ 为第 i 次循环干湿样的干质量损失 (以第 i 次残留在玻璃杯中干物质重量为依据); $W_{i,c}$ 为第 i 次循环控制样的干质量损失 (以第 i 次残留在玻璃杯中干物质重量为依据); M_s 为干湿试样的干质量; M_c 为控制试样的干质量。

根据短期内强度及污染物稳定性的研究结果^[8],本试验安排了 8 组不同配比的试样,见表 3。试验除了测量相对质量损失率 S,还测量了干湿过程中的体积损失率 (减少的体积和干湿前试样体积的百分比 (%)) 及干湿前后的强度变化结果,以能更全面地反映固化污泥抵抗水分变化而保持完整的物理力学特性的能力。

表 3 干湿循环试验方案

Table 3 Mix design of wet and dry test samples

试样编号	污泥:膨润土: 水泥掺入质量之比	试样编号	污泥:膨润土: 水泥掺入质量之比
S1B0	1:0:0.2	S5B0.6	1:0.6:0.2
S2B0.1	1:0.1:0.2	S6C0.6	1:0.2:0.6
S3B0.2 (S3C0.2)	1:0.2:0.2	S7C0.4	1:0.2:0.4
S4B0.4	1:0.4:0.2	S8C0.1	1:0.2:0.1

注:表中 S 表示试样的序号; B 表示水泥掺入质量比固定为 0.2 时不同的膨润土掺入质量比; C 表示膨润土掺入质量比固定为 0.2 时不同的水泥掺入质量比。

3 试验结果和分析

3.1 干湿循环作用下固化污泥的质量损失

由干湿循环试验获得的相对质量损失率见表 4。从表中可以看出,8 个试样经过干湿循环后,只有试样 S2B0.1、S3B0.2、S6C0.6、S7C0.4 符合干湿循环的标准,而其他 4 个试样,相对质量损失率过高,或几次循环后就发生破坏,分析如下:

①在不符合干湿循环标准的 4 个试样中,从它们的质量组成比例可以发现,当只掺入水泥时,试

样不会发生破坏,但相对质量损失率大于 30 %,如试样 S1B0,但当膨润土的掺入质量比高于水泥的掺入质量比时,试样经过几次循环后就发生破坏,如试样 S4B0.4、S5B0.6、S8C0.1。

表 4 固化污泥的相对质量损失率

Table 4 Average cumulative corrected relative mass loss of solidified sludge after wet and dry cycles

试样编号	相对质量损失率 $S/\%$	试样编号	相对质量损失率 $S/\%$
S1B0	32.9	S5B0.6	破坏
S2B0.1	23.8	S6C0.6	2.7
S3B0.2 (S3C0.2)	19.3	S7C0.4	3.0
S4B0.4	破坏	S8C0.1	破坏

②只加水泥时,试样的相对质量损失率超过了 30 %,但当水泥掺入质量比固定为 0.2 时,随着膨润土的掺入,固化污泥试样的相对质量损失率逐渐减小,且小于 30 %时达到了标准的要求,如 S2B0.1、S3B0.2。随着膨润土的继续掺入,试样反而在循环过程中发生破坏,如试样 S4B0.4、S5B0.6。这个结果反映了膨润土对固化污泥耐久性的影响呈现出两面性,即当膨润土掺入量小于等于水泥掺入量时,表现出有利的一面,达到了标准要求;当掺入量超过水泥掺入量时,表现出不利的一面,试样在循环过程中发生破坏。

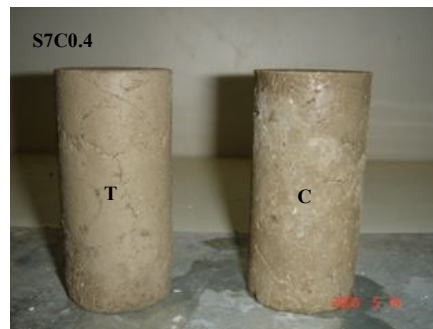
③当膨润土掺入质量比固定为 0.2 时,随着水泥掺入量的增加,试样由达不到标准到达到标准,且相对质量损失率基本上呈现出先显著减小,后达到很小值而逐渐稳定的趋势,如试样 S8C0.1、S3C0.2、S7C0.4、S6C0.6。这个结果表明,水泥的掺入有利于固化污泥耐久性的形成,且掺入量越多耐久性越好。

3.2 干湿循环作用下固化污泥的体积损失

干湿循环后,固化污泥体积发生了巨大的变化,对固化污泥的资源化利用将产生不利影响,如图 1(a)所示,其中标有 T 的试样为干湿样,标 C 的为控制样。只有水泥的掺入质量比达到一定值时,固化污泥的体积变化才达到较小值,如图 1(b)所示。由试验可得到固化体体积损失率随循环次数变化的关系,如图 2 所示。从图中可以看出,①随着膨润土或水泥的掺入,体积损失率都出现下降,但水泥相对膨润土来说,对固化污泥的体积损失的减少贡献更为显著,如在膨润土掺入质量比为 0.2 时,水泥掺入质量比由 0.1 增加到 0.6,试样的体积损失率由接近 45 %下降至接近 0。②固化污泥的体积损失主要发生在第 1、2 循环中,随后损失率变化较

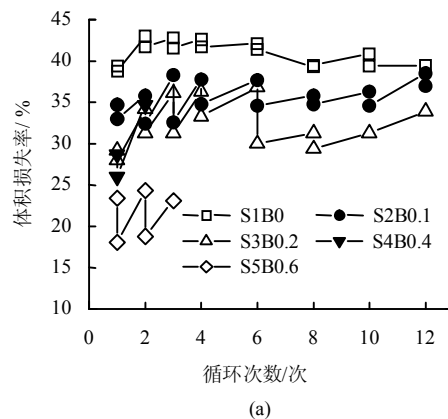


(a)

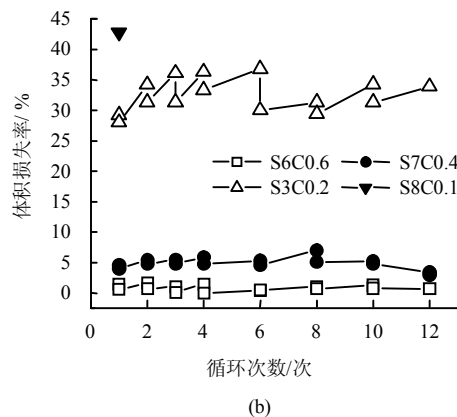


(b)

图 1 干湿循环试验样与控制样的对比
Fig.1 Comparison between test samples and control samples



(a)



(b)

图 2 固化体干湿循环过程的体积损失
Fig.2 Volume loss of solidified sludge during wet and dry cycles

小,当水泥掺入较多时,从一开始体积损失率就保持较小的变化,这说明水泥掺入量多的固化体较早就形成固化完整体。③膨润土掺入量越高,同一次循环里干燥与湿润后试样的体积变化差也越大,如试样 S2B0.1、S3B0.2、S4B0.4、S5B0.6。而水泥掺入量较高或无膨润土掺入时,同一次循环里干燥与湿润后试样的体积变化差也越小,如试样 S1B0、S6C0.6、S7C0.4,这说明了膨润土在干燥与湿润过程中产生了较大的胀缩,但其胀缩程度可通过掺入足够量的水泥来控制。

3.3 干湿循环作用下固化污泥的抗压强度变化

经过 12 次干湿循环试验后,只有 S2B0.1、S3B0.2、S6C0.6、S7C0.4 符合标准,因此强度试验只有这 4 个试样的强度结果,对控制样、干湿样和 28 d 固化样的强度进行比较,如图 3 所示。

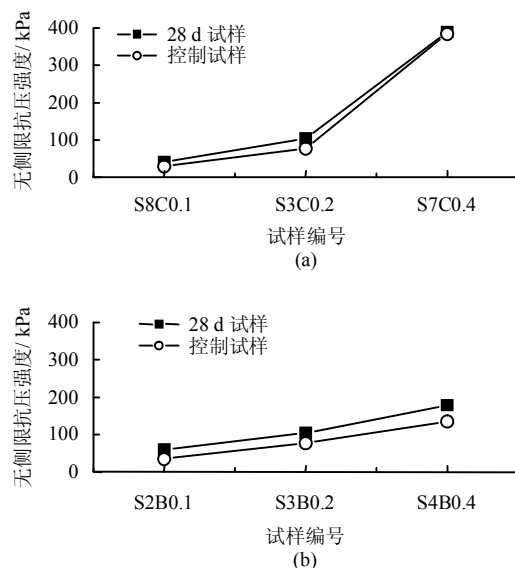


图 3 固化污泥试样养护 28 d 龄期与控制样强度比较
Fig.3 Compression strength of 28 day curing samples and control samples

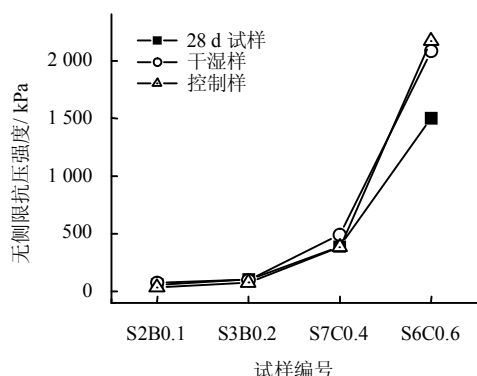


图 4 固化污泥干湿循环试样与控制样强度比较
Fig.4 Compression strength of different samples before and after wet and dry cycles

从图 3 可以看出,控制样的强度要略低于 28 d 固化样的强度,说明控制样的强度在 30 d 的试验周期里没有增长反而降低,这可能是因为水泥的水化被抑制,在水的反复浸泡下试样结构受到了损伤等因素造成,但当水泥掺入质量比达到 0.6 时,其抗压强度才显著增长超过 28 d 时的强度,如图 4 所示,说明水泥掺入量要达到一定值后才能抑制水的浸泡对固化体强度的不利影响。从图 4 可以发现,干湿试样的强度要高于 28 d 固化样的强度,且水泥的掺入量越大,两者的差越大。结合控制样的强度,说明干燥这个过程对固化体的强度有显著的贡献,这与温度与水泥水化速率成正相关的结论相吻合,当然,这个过程也伴随着干湿循环对固化体结构的破坏,但相对于水泥水化对强度的作用要小得多,因此干湿样的强度相对较高。但是,当水泥掺入质量比大于 0.4 时,干湿样的强度反而低于控制的强度,说明在固化体完整结构形成后,干湿循环对固化体的不利影响开始显现,因此干湿试样的强度相对控制样的强度要小。

4 结 论

(1) 以膨润土为添加剂的固化污泥材料耐久性受到环境干湿条件的影响。通过增加水泥掺入量能提高固化体的完整性,显著降低质量、体积及强度的损失,提高固化污泥的材料耐久性。

(2) 膨润土对固化污泥抵抗干湿变化的能力的影响呈现出两面性,适当地掺入膨润土有利固化污泥抵抗干湿变化的能力,而过多地掺入膨润土将产生不利的影响。

(3) 膨润土在干湿过程中体积发生了较大的变化,膨润土掺入量较大时,固化污泥发生了破坏,但其胀缩程度可通过掺入足够量的水泥来控制。

(4) 干湿循环作用后,干湿样的强度在水泥掺入量较小时相对控制样的强度更高,但在水泥掺入量较大时,反而低于控制样的强度。

(5) 本文的工作限于耐久性中干湿循环的评价,关于冻融循环及长期污染物稳定性等内容的研究尚需开展。

参 考 文 献

- [1] GURJAR B R. Sludge treatment and disposal[M]. Netherlands: A. A. Balkema, 2001.
- [2] 朱伟,李磊,林城.生物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.

- ZHU Wei, LI Lei, LIN Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 933—938.
- [3] KAMON M, INAZUMI S, RAJASEKARAN G, et al. Evaluation of waste sludge compatibility for landfill cover application[J]. **Soils and Foundations**, JGS, 2002, 42(4): 13—27.
- [4] 赵乐军, 戴树桂, 辜显华. 污泥填埋技术应用进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 27—30.
- ZHAO Le-jun, DAI Shu-gui, GU Xian-hua. Application State of sludge landfill technology[J]. **China Water & Wastewater**, 2004, 20(4): 27—30.
- [5] 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.
- CAO Yong-hua, YAN Shu-wang, ZHAO Le-jun. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 740—744.
- [6] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 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.
- FAN Zhao-ping, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1327—1334.
- [7] 朱伟, 曾科林, 张春雷. 淤泥固化处理中有机物成分的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 33—36.
- ZHU Wei, ZENG Ke-lin, ZHANG Chun-lei. Influence of organic matter component on solidification of dredged sediment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 33—36.
- [8] 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): 1020—1025.
- ZHU Wei, LIN Cheng, LI Lei, et al. Solidification/stabilization (S/S) of sludge using valcium-bentonite as additive[J]. **Environmental Science**, 2007, 28(5): 1020—1025.
- [9] 林城, 朱伟, 李磊. 固化污泥的基本力学性质研究-以膨润土为辅助添加剂[C]//第二届全国岩土与工程学术大会. 北京: 科学出版社, 2006.
- CHENG Lin, WEI Zhu, LEI Li. Basic mechanical behaviors of cement-solidified sludge using calcium-bentonite as additive[C]//The 2nd Geotechnical and Engineering Conference in China. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] 于华, 刘子利, 张雪风, 等. 硅溶胶改性膨润土的研究[J]. 硅酸盐通报, 2005, (4): 36—39.
- YU Hua, LIU Zi-li, ZHANG Xue-feng, et al. Study on the modification of bentonite with silica sol[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2005, (4): 36—39.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM D4843—1988 standard test method for wetting and drying test of solid wastes[S]. Philadephta: ASTM Press, 1988.