

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.066



干湿循环作用下固化淤泥的抗剪强度变化规律

刘文化,舒俊炜,孙秀丽,华渊,李芳菲

(江南大学环境与土木工程学院,江苏无锡214122)

摘要:河、湖等的疏浚淤泥多采用固化方式进行处理。针对固化淤泥材料的干湿稳定性问题,系统开展了干湿循环作用下水泥固化疏浚淤泥的抗剪强度特性试验研究,揭示了固化淤泥在干湿循环作用下抗剪强度的变化机理,并对各影响因素进行了定量分析。结果表明:随着干湿循环次数的增加,固化淤泥的抗剪强度逐渐变化,且先快后慢,最后趋于稳定;干湿循环后,水泥掺量 100 kg/m^3 固化淤泥试样的抗剪强度降低,而水泥掺量 $150、200\text{ kg/m}^3$ 试样干湿循环后的抗剪强度不降反增,说明干湿循环对固化淤泥的影响与水泥的掺量有关。较高的干燥温度促进了水泥水化,从而导致水化产物增加,固化淤泥的抗剪强度增大;同时,干湿循环过程中,微裂缝的发育导致固化淤泥的抗剪强度降低,干湿循环对固化淤泥抗剪强度的影响取决于二者的综合作用。

关键词:固化;疏浚淤泥;干湿循环;抗剪强度;机理分析

中图分类号:TU411 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)04-0010-09

Shear strength variations of solidified sludge during drying-wetting cycles

Liu Wenhua, Shu Junwei, Sun Xiuli, Hua Yuan, Li Fangfei

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Solidification is a major treatment method for the dredged sludge from rivers and lakes. In order to investigate the wetting/drying stability of the solidified materials, a series of tests measuring the shear strengths of solidified dredged sludge during drying/wetting process were performed. Besides, the variation patterns of the shear strength were revealed and the influential factors are analyzed quantitatively. The test results show that the shear strength of solidified dredged sludge changes gradually with the increasing number of drying/wetting cycles, and finally tends to be stable. The shear strength of solidified dredged sludge with a cement content of 100 kg/m^3 decreases after drying/wetting, while the shear strengths of solidified dredged sludge with cement contents of 150 and 200 kg/m^3 increase after drying/wetting, which indicates that the influence of drying/wetting on the mechanical behaviors of sludge relates to the cement content. A higher drying temperature promotes the hydration reaction of cement during the drying/wetting

收稿日期:2018-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51709129);江苏省自然科学基金(BK20170187);中央高校专项资金(JUSRP11713);大连理工大学国家重点实验室开放基金(LP1613)

作者简介:刘文化(1987-),男,副教授,博士,主要从事淤泥无害化处理与资源化利用方面的研究,E-mail:wenhualiu@jiangnan.edu.cn.

Received:2018-12-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51709129); Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No. BK20170187); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JUSRP11713); Open Research Fund of State Key Laboratory, Dalian University of Technology (No. LP1613)

Author brief: Liu Wenhua (1987-), associate professor, PhD, main research interests: resource utilization of sludge, E-mail:wenhualiu@jiangnan.edu.cn.

process. Therefore, it resulted in the increase of hydration products and the increase in shear strength. However, the development of crack inside the material during drying/wetting leads to the decrease of its shear strength. The overall influence of drying/wetting on the shear strength of solidified sludge depends on the compromises of the two factors.

Keywords: solidification; dredged sludge; drying/wetting cycle; shear strength; mechanism analysis

中国南方地区水系发达、河道纵横,近年来,为保障航道畅通及改善内陆河、湖水质,开始有计划地对城市湖泊、河流进行清淤,产生了大量的疏浚淤泥。据统计,中国每年的淤泥疏浚量在 10 亿 m^3 以上,仅太湖每年的疏浚量就达到 400~600 万 m^3 ^[1],珠三角地区的年淤泥疏浚量则达 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[2]。疏浚淤泥具有含水率高、强度低、受不同程度污染等特点,难以直接利用。淤泥的无害化处理及资源化利用已成为目前亟待解决的问题。

由于淤泥产量的逐年增加以及受城市土地资源日益紧缺的影响,传统的海洋倾倒和陆地抛填方法受到越来越多国家的质疑。相反,采用水泥、石灰等固化材料对淤泥进行固化处理的淤泥固化技术因其成本低、效率高优点而备受推崇。该法已成为目前淤泥处理的主要方法。淤泥固化技术是一项“变废为宝”的重要举措,既解决了淤泥处置占用土地和环境污染问题,也为工程建设提供了填料。经固化处理的淤泥可作为堆场围堰、垃圾填埋场封顶层、路基等的填土材料进行回收利用^[3-5]。目前,中国已在深圳、无锡、广州等多地开展了固化淤泥作为回填材料的示范工程,并取得了较好的效果^[6-7]。仅太湖地区就已将 180 万 m^3 淤泥进行固化处理并作为无锡市科教产业园的填土材料进行回收利用^[8]。

研究者们对固化淤泥进行了大量的研究,研究成果主要集中在固化材料^[9-11]、固化机理^[12-13]、渗透特性^[14]、污染物的稳定性^[15]等方面。这些研究成果对固化淤泥技术的大规模应用起到了积极的推动作用。

由于降雨-蒸发、水位升降等原因,固化淤泥构筑的土工结构物在运营过程中不仅受到上覆荷载等机械因素的影响,干湿循环等环境因素也对固化淤泥的力学性能和长期稳定性产生影响,进而改变其工程性质。因此,如何对固化淤泥土工结构物的干湿稳定性进行系统地评价是采用固化淤泥构筑土工结构物时需要解决的问题。对此,少数研究者做了初步的探索,并取得了一些有意义的成果。Yang^[16]在研究固化含汞淤泥的干湿耐久性时发现,干湿循环导致固化淤泥强度降低,但随着固化剂掺量的增加,固化淤泥的干湿稳定性有所改善。李磊等^[17]通过在室内采用烘干-浸水方式模拟干湿循环过程,测定了以膨润土为辅助添加剂的水泥固化淤泥在水分强烈变化条件下的质量、体积及强度等参数,以干湿

循环过程中试样的质量损失率和试样是否破坏为依据,评价了固化淤泥在干湿循环条件下的稳定性,结果表明,不同水泥和膨润土掺量下的干湿稳定性存在较大差异。李亚林等^[18]采用相同的干湿循环方法模拟干湿交替过程,对生石灰、粉煤灰和氯化铁混合固化淤泥的干湿循环稳定性进行评价,结果发现,干湿循环后固化淤泥的无侧限抗压强度和抗剪强度均降低 20% 以上。

上述关于固化淤泥干湿稳定性的研究中,研究者多采用烘干的方式(温度高于 20 °C)模拟干燥过程,通过对比干湿循环试样和标准养护(温度为 20 °C)试样的无侧限抗压强度、抗剪强度等试验结果,评价固化淤泥的干湿稳定性。大量试验表明,水泥、石灰等固化材料的水化反应与温度密切相关^[19-20],而水化产物是保证固化淤泥工程性质的重要条件。仅通过干湿循环试样和标准养护试样试验结果的对比,难以分离干湿循环过程中温度的影响,不能有效地反映固化淤泥的干湿稳定性。鉴于此,本文以水泥为固化剂对太湖疏浚淤泥进行固化处理,通过对比标准养护试样、控制试样和干湿循环试样的抗剪强度试验结果,研究水分强烈变化条件下水泥固化疏浚淤泥的力学特性变化规律,探讨干湿循环的影响机理,为系统评价固化淤泥的干湿稳定性提供依据。

1 试验材料

试验所用的淤泥为太湖疏浚淤泥,淤泥的物理力学特性指标如表 1 所示。根据土的分类标准,该淤泥属高液限黏土,其主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 。底泥挖出后,立即放入预备的塑料桶中静置,除去上清液后,其含水率为 80%。试验所用固化剂为宜兴市盛佳水泥厂生产的 32.5 复合硅酸盐水泥。

表 1 试验用淤泥的物理性质指标

Table 1 Physical properties of testing used sludge

含水率 $\omega/\%$	比重 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	有机质 含量/ $\%$	塑性指数 I_P
80	2.66	62.4	27.7	4.4	34.7

2 试验方法

2.1 试样制备

取除去上清液的疏浚淤泥,按每立方米淤泥(含

水率 80%) 中水泥添加量 100、150、200 kg 3 个配比, 配制淤泥、水泥混合物, 搅拌 10 min 后抽真空 30 min, 以消除混合物中的气泡。而后, 将淤泥、水泥混合物装入 61.8 mm×20 mm 的环刀中, 制备环刀试样。装样过程中不断振动模具, 以排除气泡使试样密实。之后, 将制备好的试样放入恒温恒湿箱(温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度大于 95%) 中, 养护 28 d。养护完成后进行抽真空饱和, 制备饱和固化淤泥试样备用。基本步骤如图 1 所示。

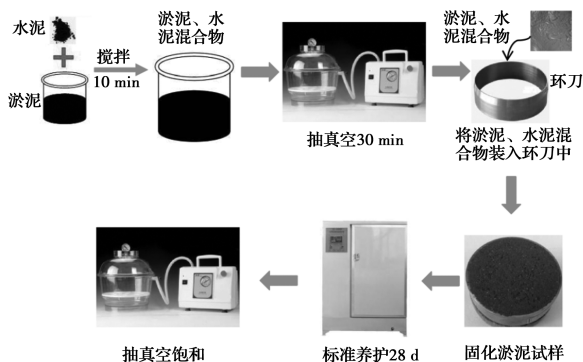


图 1 固化淤泥试样制备流程

Fig. 1 Procedures for preparation of solidified sludge specimens

2.2 试验方案

按照上述制样流程, 将每一种水泥掺量制成 72 个标准环刀试样, 在标准养护条件下养护 28 d 后,

表 2 干湿循环试验方案

Table 2 Testing program for drying/wetting

试样编号	水泥掺量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	养护 温度/ $^\circ\text{C}$	养护 时间/d	养护 湿度/%	干燥 温度/ $^\circ\text{C}$	干湿循环 次数	备注
S-100-20-0	100	20 ± 2	28	≥ 95		0	标准养护 28 d 后, 进行 0 次干湿循环
S-100-20-4	100	20 ± 2	28	≥ 95	60	4	标准养护 28 d 后, 进行 4 次干湿循环
S-100-20-8	100	20 ± 2	28	≥ 95	60	8	标准养护 28 d 后, 进行 8 次干湿循环
S-100-20-12	100	20 ± 2	28	≥ 95	60	12	标准养护 28 d 后, 进行 12 次干湿循环
S-150-20-0	150	20 ± 2	28	≥ 95		0	标准养护 28 d 后, 进行 0 次干湿循环
S-150-20-4	150	20 ± 2	28	≥ 95	60	4	标准养护 28 d 后, 进行 4 次干湿循环
S-150-20-8	150	20 ± 2	28	≥ 95	60	8	标准养护 28 d 后, 进行 8 次干湿循环
S-150-20-12	150	20 ± 2	28	≥ 95	60	12	标准养护 28 d 后, 进行 12 次干湿循环
S-200-20-0	200	20 ± 2	28	≥ 95		0	标准养护 28 d 后, 进行 0 次干湿循环
S-200-20-4	200	20 ± 2	28	≥ 95	60	4	标准养护 28 d 后, 进行 4 次干湿循环
S-200-20-8	200	20 ± 2	28	≥ 95	60	8	标准养护 28 d 后, 进行 8 次干湿循环
S-200-20-12	200	20 ± 2	28	≥ 95	60	12	标准养护 28 d 后, 进行 12 次干湿循环
S-100-20-B	100	20 ± 2	40	≥ 95		0	标准养护 40 d
S-150-20-B	150	20 ± 2	40	≥ 95		0	标准养护 40 d
S-200-20-B	200	20 ± 2	40	≥ 95		0	标准养护 40 d
S-100-60-C	100	$20 \pm 2/60 \pm 2$	40	≥ 95		0	$20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 养护 28 d 后, 每天在 $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 8 h, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 16 h
S-150-60-C	150	$20 \pm 2/60 \pm 2$	40	≥ 95		0	$20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 养护 28 d 后, 每天在 $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 8 h, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 16 h
S-200-60-C	200	$20 \pm 2/60 \pm 2$	40	≥ 95		0	$20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 养护 28 d 后, 每天在 $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 8 h, $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护 16 h

注: 试样编号采用“S-X-Y-Z”形式表示, 其中“S”代表试样, “X”为水泥掺量, “Y”为养护温度, “Z”为干湿循环次数(其中“B”代表基准试样, “C”代表控制试样); 表内“空白”代表无此项数据。

将其中 12 个试样取出, 抽真空饱和后, 参照《土工试验规程》(SL 237—1999)^[21], 在竖向压力 50、100、200、400 kPa 条件下进行固结快剪试验, 剪切速率 1.0 mm/min; 剩下的 60 个试样分成 5 组, 每组 12 个样(每种工况 3 个平行试样), 第 1 组作为基准试样(在标准养护条件下继续养护), 第 2、第 3、第 4 组作为干湿样, 抽真空饱和后, 在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (参考 ASTM D4843—1988^[22]) 条件下烘干 8 h, 之后再在 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行抽真空饱和 16 h, 以此作为一次干湿循环。第 2、第 3、第 4 组拟定的干湿循环次数为 4、8、12 次。完成预定次数干湿循环试验后立即参照 SL 237-1999《土工试验规程》^[21] 进行固结快剪试验。在第 2、第 3、第 4 组试样进行干湿循环试验期间, 第 5 组试样则每天在温度 $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度大于 95% 的条件下养护 8 h, 在温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度大于 95% 条件下养护 16 h, 以作为控制试样(养护温度与干湿循环试样一致)。当第 4 组试样(12 次干湿循环)的固结快剪试验完成后, 取第 1 组的基准试样和第 5 组的控制试样, 分别在 50、100、200、400 kPa 条件下进行固结快剪试验。上述固结快剪的剪切速率均为 1.0 mm/min。以 3 个平行试样的平均值为最终试验结果, 对比分析不同干湿循环次数条件下固化淤泥的抗剪强度特性。干湿循环试验方案如表 2 所示。

3 试验结果与分析

3.1 固化淤泥的抗剪强度变化规律

图2所示为水泥掺量 100 kg/m^3 条件下经历不同干湿循环次数后固化淤泥的剪应力-剪切位移曲线

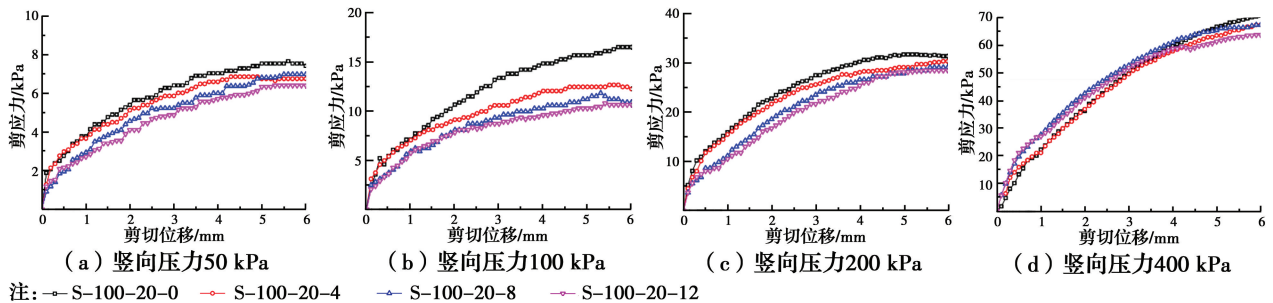


图2 干湿循环作用下水泥掺量 100 kg/m^3 固化淤泥的剪应力与剪切位移曲线

Fig. 2 Shear stress-shear deformation relationship of solidified dredged sludge with cement content of 100 kg/m^3 subjected to different drying/wetting cycles

水泥掺量 $150, 200 \text{ kg/m}^3$ 条件下, 固化淤泥的剪应力-剪切位移曲线如图3、图4所示。从图3、图4可以看出, 竖向压力 50 kPa 条件下, 水泥掺量 $150, 200 \text{ kg/m}^3$ 固化淤泥试样均呈现出应变软化特征。竖向压力 100 kPa 作用下, 干湿循环后固化淤泥试样均表现为应变软化特征, 而标准养护 28 d 的试样表现为应变硬化。竖向压力 200 kPa 作用下, 水泥掺量 150 kg/m^3 固化淤泥试样均表现为应变硬化特征; 水泥掺量 200 kg/m^3 固化淤泥试样标准养护 28 d 后, 在竖向压力 200 kPa 条件下, 表现为应变硬化特征, 经历不同干湿循环次数后, 则表现为应变软化特征。竖向压力 400 kPa 条件下, 水泥掺量 $150, 200 \text{ kg/m}^3$ 固化淤泥试样干湿循环前后均呈现出应变硬化特征。由以上分析可知, 经历干湿循环后, 水泥掺量 $150, 200 \text{ kg/m}^3$ 试样的应力-应变曲线有从应变硬化向应变软化转变的趋势。这可能与干湿循环过

程引起的结构屈服应力增长有关, 详见3.4节讨论。可以看出, 不同干湿循环次数条件下的固化淤泥试样均呈现出应变硬化特性, 随着剪切位移的增加, 剪应力逐渐增长。随着干湿循环次数的增加, 相同竖向压力条件下, 剪切初始阶段的斜率逐渐减小, 说明干湿循环导致固化淤泥的抗剪强度降低。

程引起的结构屈服应力增长有关, 详见3.4节讨论。

水泥掺量 $150, 200 \text{ kg/m}^3$ 固化淤泥试样在经历干湿循环后, 剪应力-剪切位移曲线位于标准养护 28 d 条件下固化淤泥试样的上方, 说明干湿循环后固化淤泥的抗剪强度不降反增。这与水泥掺量 100 kg/m^3 试样截然不同。干湿循环前后固化淤泥的抗剪强度变化与干湿循环引起的裂缝发展以及干燥过程中水泥水化反应有关, 关于这部分的讨论将在3.4节进行。

从图2~图4还可以发现, 随着干湿循环次数的增加, 固化淤泥抗剪强度变化总体呈现先快后慢的趋势, 干湿循环对固化淤泥剪应力-剪切位移曲线的影响主要发生在前8次干湿循环, 而后逐渐趋于稳定。考虑到文章篇幅, 仅取竖向压力 50 kPa 条件下的试验结果进行具体说明。水泥掺量 100 kg/m^3 试样在干湿循环 $0, 4, 8, 12$ 次时的抗剪强度(根据

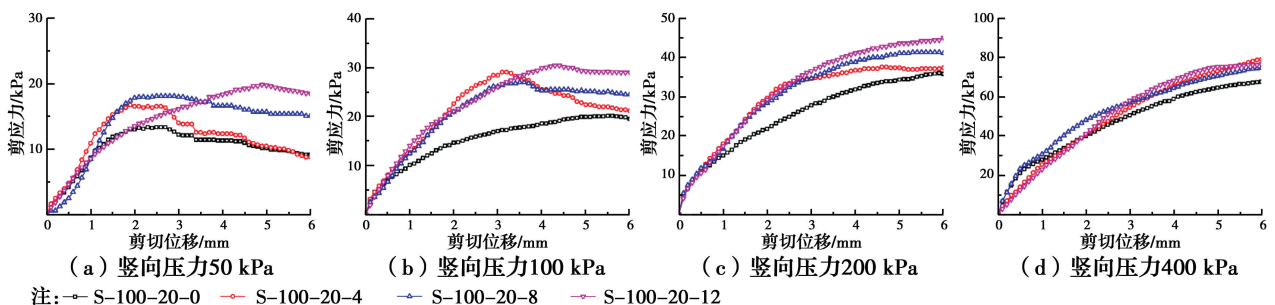


图3 干湿循环作用下水泥掺量 150 kg/m^3 固化淤泥的剪应力与剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear deformation relationship of solidified dredged sludge with cement content of 150 kg/m^3 subjected to different drying/wetting cycles

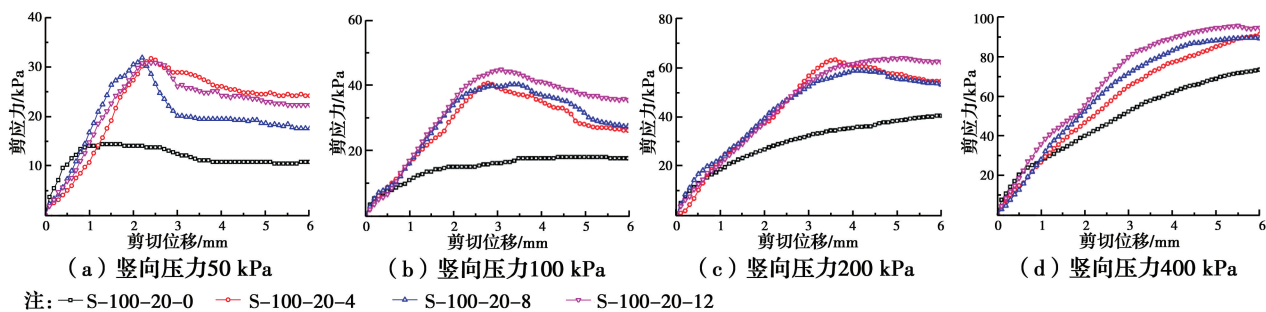


图4 干湿循环作用下水泥掺量 200 kg/m^3 固化淤泥的剪应力与剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear deformation relationship of solidified dredged sludge with cement content of 200 kg/m^3 subjected to different drying/wetting cycles

《土工试验规程》^[21], 应变软化曲线取峰值剪应力为抗剪强度, 应变硬化曲线则取剪切位移等于 4 mm 对应的剪应力为抗剪强度) 分别为 $7.0, 6.5, 6.0, 5.7 \text{ kPa}$, 干湿循环 $4, 8, 12$ 次时的抗剪强度分别为干湿循环 0 次时的 $0.93, 0.86, 0.81$ 倍。水泥掺量 150 kg/m^3 试样在干湿循环 $0, 4, 8, 12$ 次时的抗剪强度分别为 $13.4, 16.8, 18.1, 18.4 \text{ kPa}$, 干湿循环 $4, 8, 12$ 次时的抗剪强度分别为干湿循环 0 次时的 $1.25, 1.35, 1.37$ 倍。对于水泥掺量 200 kg/m^3 的试样, 干湿循环 $0, 4, 8, 12$ 次时的抗剪强度分别为 $14.4, 31.8, 31.9, 30.9 \text{ kPa}$, 干湿循环 $4, 8, 12$ 次时的抗剪强度分别为干湿循环 0 次时的 $2.21, 2.22, 2.14$ 倍。显而易见, 随着干湿循环次数的增加, 固化淤泥的抗剪强度逐渐趋于稳定。

3.2 固化淤泥强度变化机理分析

为探讨干湿循环对固化淤泥试样力学特性的影

响, 设置基准试样和控制试样, 通过对比基准试样、控制试样和干湿循环试样的直剪试验结果, 分析水分强烈变化条件下水泥固化疏浚淤泥的力学特性变化机理。

表3所示为不同养护条件和干湿循环条件下固化淤泥试样的抗剪强度。通过对比基准试样和控制试样发现, 相同水泥掺量、竖向压力和养护龄期条件下, 控制试样的抗剪强度大于基准试样。这主要是因为控制试样具有较高的养护温度, 与基准试样相比生成了较多的水化产物, 抗剪强度提高。这一结果也说明干湿循环试样在干燥过程中受到的烘干温度(与控制试样的养护温度一致)会促进水泥的水化, 在相同龄期条件下, 生成了更多的水化产物, 水化产物的增加增强了土颗粒之间的粘结, 使得固化淤泥试样具有较高的结构强度, 抗剪强度增大。

表3 抗剪强度试验结果

Table 3 Test results of shear strength

竖向压力/ kPa	水泥掺量 100 kg/m^3 试样 的抗剪强度/kPa			水泥掺量 150 kg/m^3 试样 的抗剪强度/kPa			水泥掺量 200 kg/m^3 试样 的抗剪强度 / kPa		
	τ_{fb}	τ_{fc}	τ_f	τ_{fb}	τ_{fc}	τ_f	τ_{fb}	τ_{fc}	τ_f
50	7.8	11.7	5.7	13.6	25.6	18.4	15.8	38.7	30.9
100	15.9	17.2	9.6	20.4	39.6	29.9	24.4	55.4	44.8
200	33.0	45.5	25.5	36.3	54.6	41.1	41.6	76.4	61.5
400	59.5	61.0	58.7	64.6	88.5	67.6	73.5	114	89.3

注: τ_{fb} 为基准试样的抗剪强度; τ_{fc} 为控制试样的抗剪强度; τ_f 为干湿循环 12 次试样的抗剪强度。

从表3还可以看出, 干湿循环试样的抗剪强度小于控制试样, 说明干湿循环过程中固化淤泥试样的抗剪强度变化不仅受烘干温度引起水泥水化产物增加的影响, 还受其他因素的作用。事实上, 固化淤泥试样在干燥过程中, 由于试样表面与热空气接触

使得试样表面的脱湿速率高于试样内部, 试样内外部形成含水率梯度, 导致试样表面受拉而内部受压, 当试样表面的拉应力超过其抗拉强度时, 裂缝便随之产生^[23]。图5所示为干湿循环 12 次后, 不同水泥掺量条件下固化淤泥试样的裂缝发展情况。可以

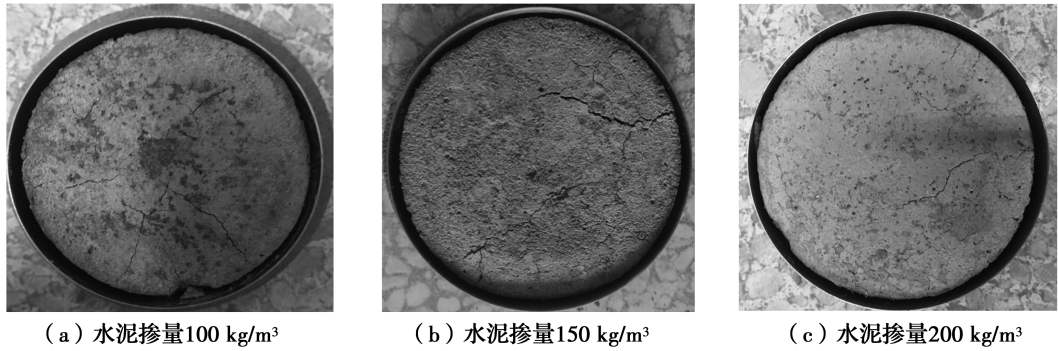


图 5 干湿循环 12 次后不同水泥掺量固化淤泥试样裂缝发展情况

Fig. 5 Development of cracks on the surface of solidified sludge with different cement contents after subjected to 12 times drying/wetting cycles

看出,随着水泥掺量的增加,试样表面裂缝发展越不明显。这主要是因为水泥掺量越大,胶结强度越高,较大的胶结强度增强了颗粒间的粘结力,提高了试样抵抗拉应力的能力,干湿循环过程中产生的裂缝越少。干湿循环过程中,裂缝的产生降低了颗粒之间的粘结,破坏了土体结构,抗剪强度降低。

图 6 所示为不同水泥掺量条件下基准试样、控制试样和干湿循环试样的 SEM 图像。可以看出,对于同一养护(或干湿循环)条件的试样,随着水泥掺

量的增加,颗粒排列趋于紧密,水化产物含量增加,抗剪强度和抵抗拉应力的能力增加。对比同一水泥掺量条件下基准试样、控制试样和干湿循环试样的 SEM 图像发现,控制试样和干湿循环试样相对于基准试样生成了较多纤维状的 C—S—H 凝胶类水化产物(S-200-60-C 最为显著)。这也从微观层面上证实了养护温度越高,水化产物越多,固化体内部的孔隙进一步被填充,抗剪强度越高的结论。

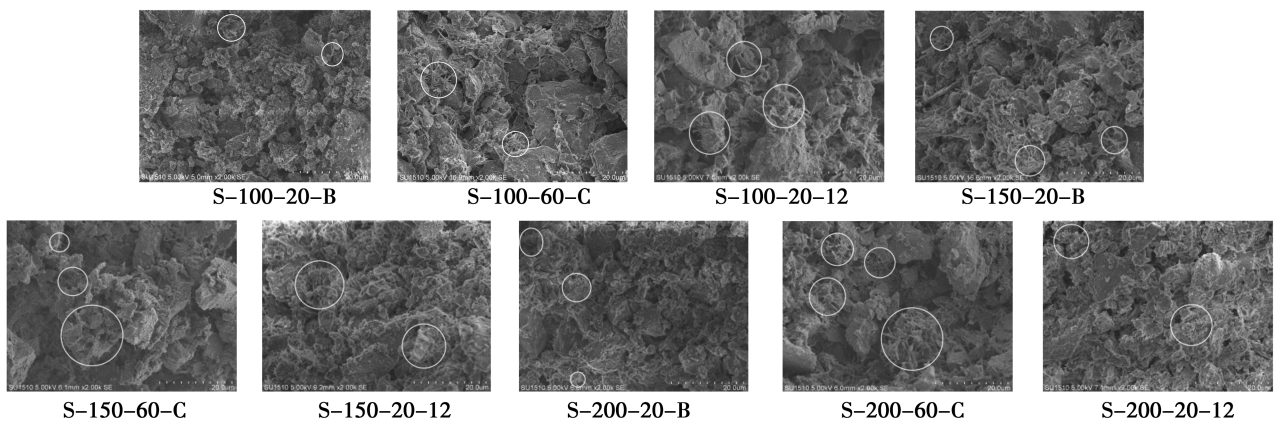


图 6 固化淤泥的 SEM

Fig. 6 SEM for solidified sludge

由以上讨论可知,干湿循环过程中烘干温度引起的水化产物增加和裂缝的发展对固化淤泥的抗剪强度产生截然相反的影响,即水化产物的增加引起固化淤泥强度增大,而裂缝的发展则使得固化淤泥的抗剪强度降低,干湿循环对固化淤泥力学特性的最终影响取决于上述两方面所占的权重。

3.3 烘干温度和裂缝开展对固化淤泥抗剪强度影响的权重分析

烘干过程中水化产物的增加与水泥的掺量有关,水泥掺量越高,烘干温度引起的水泥水化反应越

显著,反之则水化反应不明显。为定量分析烘干温度引起的水化产物增加对固化淤泥抗剪强度的影响,定义烘干温度引起的抗剪强度增长率为

$$\xi = (\tau_{fc} - \tau_{fb}) / \tau_{fb} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ξ 为温度引起的抗剪强度增长率; τ_{fc} 为控制试样的抗剪强度; τ_{fb} 为基准试样的抗剪强度。考虑到文章篇幅,仅取竖向压力 50 kPa 条件下不同水泥掺量基准试样与控制试样的抗剪强度进行对比分析(表 4)。由表 4 可以看出,水泥掺量越高,高温养护后,试样的抗剪强度增长率越大,说明水泥掺量越

高,烘干温度引起的水泥水化反应越明显,抗剪强度增长越显著。

前已述及,干湿循环对固化淤泥抗剪强度的影响受烘干温度引起的水化产物增加和裂缝发展的共同作用。因此,通过综合对比干湿循环试样、基准试样以及控制试样的抗剪强度,可将干湿循环过程中温度的影响以及裂缝的影响进行分离。以干湿循环试样的抗剪强度变化为基础,分离出干湿循环过程中温度的影响即可获得裂缝对固化淤泥试样的影

响。为此,定义裂缝引起的抗剪强度衰减率为

$$\eta = (\tau_f - \tau_{fb}) / \tau_{fb} \times 100\% - \xi \quad (2)$$

式中: η 为裂缝引起的抗剪强度衰减率; τ_f 为干湿循环试样的抗剪强度。从表4可以看出,3种水泥掺量固化淤泥试样在干湿循环过程中裂缝引起的抗剪强度衰减率随水泥掺量的增加逐渐减小。这一结果也证实了水泥掺量越大,试样的胶结强度越高,抗拉强度越大,干湿循环过程中产生的裂缝越少,干湿循环过程中裂缝引起的抗剪强度衰减越小。

表4 竖向压力50 kPa条件下基准试样与控制试样的抗剪强度对比

Table 4 Shear strength of the based specimen and the controlling specimen under vertical stress of 50 kPa

水泥掺量/ (kg · m ⁻³)	抗剪强度/kPa			温度引起的抗剪强度增长率 ξ /%	裂缝引起的抗剪强度衰减率 η /%
	τ_{fb}	τ_{fc}	τ_f		
100	7.8	11.7	5.7	50	-76.9
150	13.6	25.6	18.4	88.2	-52.9
200	15.8	38.7	30.9	144.9	-49.3

注: τ_{fb} 为基准试样的抗剪强度; τ_{fc} 为控制试样的抗剪强度; τ_f 为干湿循环12次试样的抗剪强度。

3.4 试验结果的讨论

相对于天然结构性土而言,固化土称之为人工结构性土,其压缩屈服应力即为结构屈服应力。根据 Butterfid^[24] 采用的双对数坐标法可确定干湿循环前后固化淤泥的结构屈服应力。水泥掺量100、150、200 kg/m³ 固化淤泥试样在干湿循环0次时的结构屈服应力分别为62.2、85.7、104.0 kPa;干湿循环12次后的结构屈服应力分别为26.3、165.7、271.7 kPa。可以看出,水泥掺量100 kg/m³ 固化淤泥试样干湿循环后结构屈服应力降低,而水泥掺量150、200 kg/m³ 固化淤泥试样干湿循环后结构屈服应力增大。这与直剪试验结果的变化趋势相一致。

干湿循环前后固化淤泥剪应力-剪切位移曲线形式的转变与干湿循环过程中引起的结构屈服应力变化有关。对于水泥掺量100 kg/m³ 的固化试样,由于试样在干湿循环前后的结构屈服应力均小于或接近50 kPa,因此,试样剪切时均属于正常固结土,应力-应变曲线均为应变硬化特征。水泥掺量150 kg/m³ 固化淤泥试样在干湿循环0次时,结构屈服应力大于50 kPa而小于100 kPa,因此,在竖向压力50 kPa条件下剪切时为超固结土,表现为应变软化特征;而在竖向压力大于等于100 kPa时为正常固结土,表现为应变硬化特征。干湿循环后结构屈服应力大于100 kPa而小于200 kPa,因此在竖向压力小于等于100 kPa条件下剪切时为超固结土,表

现为应变软化特征;而在竖向压力大于等于200 kPa时表现为应变硬化特征。同理,对于水泥掺量200 kg/m³ 的固化淤泥试样,干湿循环0次时,在竖向压力小于100 kPa时表现为超固结土,属应变软化特征,大于等于100 kPa时为正常固结土,呈应变硬化特征;干湿循环后,在竖向压力50、100、200 kPa下剪切时表现为超固结土,属应变软化特征,竖向压力400 kPa时为正常固结土,呈应变硬化特征。

通过对比烘干温度引起的抗剪强度增长率 ξ 和裂缝引起的抗剪强度衰减率 η ,即可评价干湿循环对固化淤泥试样抗剪强度的最终影响。对于水泥掺量100 kg/m³ 的固化淤泥试样,虽然温度的提高促进了水泥的水化,但由于水泥含量较低,烘干温度引起的水泥水化产物增加较少(如图6所示),抗剪强度提升较少;同时,由于水泥含量较低,颗粒间具有较小的粘结力,仅能承受较小的拉应力,干燥过程中形成的试样内外含水率梯度使得试样表面会出现一定的拉应力,从而在干湿循环过程中产生了较多的裂缝(如图5(a)所示),试样的抗剪强度降低较多,导致裂缝的影响大于烘干温度的作用,最终固化淤泥试样的抗剪强度降低。而对于水泥掺量150、200 kg/m³ 的固化淤泥试样,由于水泥含量较高,使得烘干温度引起的水泥水化产物增长较多(如图6所示),胶结强度显著提升,抗剪强度明显增大;同时,较大的胶结强度增强了颗粒间的粘结力,提高了

试样抵抗拉应力的能力,干湿循环过程中产生的裂缝较少(如图5(b)、图5(c)所示),抗剪强度降低不明显,最终导致干湿循环过程中烘干温度的影响大于裂缝的影响,因此,干湿循环后,固化淤泥试样的抗剪强度增大。根据以上的讨论分析,对于太湖疏浚淤泥而言,当水泥掺量大于 150 kg/m^3 时,可不考虑干湿循环对固化淤泥抗剪强度的劣化作用;而水泥掺量小于 100 kg/m^3 时,干湿循环对固化淤泥抗剪强度的劣化作用应当引起足够的重视。

4 结论

1) 干湿循环过程中,固化淤泥力学特性变化与水泥掺量有关。对于水泥掺量 100 kg/m^3 的固化淤泥试样,干湿循环后试样的抗剪强度降低,而水泥掺量 $150、200\text{ kg/m}^3$ 固化淤泥试样经历干湿循环后的抗剪强度增大。

2) 干湿循环条件下,固化淤泥的力学特性受干湿循环过程中烘干温度引起的水化产物增加和裂缝发展的共同影响,最终的表现取决于这两方面所占的比重。

3) 在评价干湿循环对水泥固化疏浚淤泥力学特性的影响时,应尽量采用与现场相一致的干湿循环条件(如干燥温度),以获得能够反映现场实际情况的试验结果,对实际工程提供可靠指导。

4) 干湿循环试验均是在无上覆荷载条件下进行,这与实际情况可能存在一定差异。上覆荷载和干湿循环耦合作用下固化淤泥力学特性的变化规律还有待深入研究。此外,干湿循环条件下,水泥固化淤泥中水化产物的量化分析也有待深入研究。

参考文献:

[1] 朱伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3041-3054.
ZHU W, MIN F L, LÜ Y Y, et al. Subject of “mud science and application technology” and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041-3054. (in Chinese)

[2] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664.
WANG D X, XU W Y. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):

3659-3664. (in Chinese)

[3] HUANG Y H, ZHU W, ZHANG C L, et al. Experimental study on dredged material improvement for highway subgrade soil[J]. Paving Materials and Pavement Analysis, ASCE, 2010, GSP203: 335-340.

[4] HE J, LI F, LI Y, et al. Modified sewage sludge as temporary landfill cover material [J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(3): 257-262.

[5] LIN C, ZHU W, HAN J. Strength and leachability of solidified sewage sludge with different additives [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(11): 1594-1601.

[6] 张春雷, 朱伟, 李磊, 等. 湖泊疏浚泥固化筑堤现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2007, 147(1): 27-29.
ZHANG C L, ZHU W, LI L, et al. Field test of dike construction with solidified lake dredged material [J]. China Harbour Engineering, 2007, 147(1): 27-29. (in Chinese)

[7] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005, 25(5): 27-30.
ZHU W, FENG Z C, ZHANG C L, et al. Field experiment of dredged spoil solidified with cement for marine reclamation works [J]. China Harbour Engineering, 2005, 25(5): 27-30. (in Chinese)

[8] HUANG Y H, ZHU W, QIAN X D, et al. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials[J]. Engineering Geology, 2011, 119(3/4): 112-119.

[9] 陈萍, 高炎旭, 马美玲, 等. 疏浚淤泥与焚烧底灰混合固化方法的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 749-756.
CHEN P, GAO Y X, MA M L, et al. Experimental study on solidification method for dredged mud mixed with MSWI [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 749-756. (in Chinese)

[10] SUN X H, ZHU W, QIAN X D, et al. Exploring cementitious additives for pretreatment of high-early-strength sewage sludge from the perspective of the rapid generation of nonevaporable water [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(5): 878-885.

[11] NA W. Utilization of portland cement and municipal solid waste incineration fly ash for solidification/stabilization of sewage sludge [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2015, 14(1): 141-144.

[12] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C F. Soil-water transfer

- mechanism for solidified dredged materials [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(5): 588-598.
- [13] 黄英豪,朱伟,董婵,等. 固化淤泥结构性力学特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(Sup2): 130-136.
HUANG Y H, ZHU W, DONG C, et al. Experimental study on structural behaviour of solidified dredged material [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(Sup2): 130-136. (in Chinese)
- [14] SONG F Y, GU L, ZHU N W, et al. Leaching behavior of heavy metals from sewage sludge solidified by cement-based binders[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(4): 344-350.
- [15] SU M H, SHIH K, KONG L J. Stabilizing cadmium into aluminate and ferrite structures: Effectiveness and leaching behavior [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 340-346.
- [16] YANG G C C. Durability study of a solidified mercury-containing sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993, 34(2): 217-223
- [17] 李磊,朱伟,林城,等. 干湿循环条件下固化污泥的物理稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3001-3004, 3012.
LI L, ZHU W, LIN C, et al. Study of wet and dry properties of solidified sludge [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3001-3004, 3012. (in Chinese)
- [18] 李亚林,杨家宽,杨昌柱,等. 基于骨架构建体脱水污泥填埋长期稳定性研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9): 76-80.
LI Y L, YANG J K, YANG C Z, et al. Study on durability of landfill disposal of dewatered sludge conditioned by composites based on skeleton builder [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2013, 41(9): 76-80. (in Chinese)
- [19] JANUSA M A, HEARD G E, BOURGEOIS J C, et al. Effects of curing temperature on the leachability of lead undergoing solidification/stabilization with cement [J]. *Microchemical Journal*, 1998, 60(2): 193-197.
- [20] AYDIN A A, AYDM N A. Development of an immobilization process for heavy metal containing galvanic solid wastes by use of sodium silicate and sodium tetraborate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 270: 35-44.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification of soil test [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese)
- [22] American Society for Testing and Materials. Standard test method for wetting and drying test of solid wastes, ASTM D4843-1988 [S]. Philadelphia: ASTM Press, 1988.
- [23] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2729-2734.
ZHANG J J, GONG B W, HU B, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2729-2734. (in Chinese)
- [24] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils (an advance one-logp') [J]. *Géotechnique*, 1979, 29(4): 469-480.

(编辑 胡玲)