

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210526002

城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究*

徐杨¹, 曹磊¹, 阎长虹², 孙萍¹, 段焜¹

(1. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏南京 211169; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 淤泥固化土的干湿耐久性是其资源化利用中长期服役性能的重要指标。本文选取有机质含量分别为7.7% (S淤泥)和11.7% (Z淤泥)的两种典型城市河道淤泥, 掺入水泥及新型固化剂进行固化处理, 通过干湿循环试验及无侧限抗压强度试验研究了不同种类的固化剂及其掺量对淤泥固化土干湿耐久性的影响。试验结果表明: 在水泥掺量较低条件下 (S淤泥对应5%、Z淤泥对应5%和10%), 淤泥固化土的抗压强度随干湿循环次数增加逐渐下降, 且第1次循环的下降幅度最大, 随后下降幅度明显减小; 在水泥掺量较高条件下 (S淤泥对应10%以上、Z淤泥对应15%以上), 淤泥固化土的抗压强度随干湿循环次数增加先增大后下降, 且峰值强度对应的循环次数具有随水泥掺量的增加和有机质含量的减少而增加的趋势, 淤泥固化土抗压强度随干湿循环作用的变化规律是劣化效应和养生修复效应协同作用的结果。总体来说, 淤泥固化土随着水泥掺量的增加, 其干湿耐久性显著提高。新型固化剂达到掺量10%时淤泥固化土的干湿耐久性介于水泥掺量15%~20%淤泥固化土之间, 显然新型固化剂处理城市河道淤泥优于水泥固化的效果。这一研究为城市河道淤泥固化处理提供了一种新的处理技术。

关键词: 城市河道淤泥; 有机质; 固化稳定; 干湿循环; 耐久性

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1028-08

Experimental Study on Drying-wetting Durability of Solidified Urban River Sludge

XU Yang¹, CAO Lei¹, YAN Changhong², SUN Ping¹, DUAN Kun¹

(1. School of Architectural Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The drying-wetting durability of solidified sludge is an important indicator of long-term performance during resource utilization. In this study, two typical urban river sediments with organic matter contents of 7.7% (S sludge) and 14% (Z sludge) were selected, and solidified with Portland cement and a new curing agent. The drying-wetting cycle test and unconfined compressive strength test were conducted to study the effect of the curing agent content on the drying-wetting durability. The results show that under the condition of low cement content (S sludge corresponding to 5%, Z sludge corresponding to 5% and 10%), the compressive strength of solidified sludge gradually decreases with the increase of drying and wetting cycles, and the decrease of the first cycle is the largest, and then the degree of declining is significantly reduced. Under the condition of higher cement content (S sludge corresponding to more than 10%, Z sludge corresponding to more than 15%), with the in-

* 收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-08-14

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB170013)、江苏省社会发展计划支撑项目(BE2019705)资助

作者简介: 徐杨(1987—), 男, 副教授, 博士。主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: xuyang870808@163.com

crease of drying-wetting cycles, the compressive strength of solidified sludge increases first, and then decreases. The number of cycles corresponding to the peak strength tends to increase with the increase of the cement content and the decrease of the organic matter content. The law is the comprehensive result of the deterioration effect and curing restoration effect. In general, the solidified sludge has a significant increase in drying-wetting durability as the cement content increases. When the new curing agent reaches 10%, the drying-wetting durability of the solidified sludge is between 15%-20% of the cement solidified soil. Obviously, the new curing agent is better than cement in curing urban river sludge. This research provides a new treatment technology for the solidification of urban river sludge.

Keywords: urban river sludge; organic; stabilization/solidification; drying-wetting cycles; durability

引 言

为保证河流、湖泊和港口等水利工程的蓄水、防洪排涝、航行运输等功能,需定期进行疏浚,这将产生大量疏浚淤泥。据统计,广州、南京等城市河道淤泥年均清出量超过100万 m^3 ,江苏太湖生态清淤工程5年共清理淤泥3541万 m^3 。疏浚淤泥可以归为软土的范畴,具有含水量高、力学性质差($C_u < 50 \text{ kPa}$)、有机质含量较高等特点,有时还含有毒有害污染物,在工程上一般很难直接利用,因此,如何有效处理利用疏浚淤泥成为当前环境岩土工程领域一个新的研究课题。

采用淤泥固化技术能使城市废弃疏浚泥资源化变成再生土工材料,对于保护生态环境和土地资源具有十分重要的现实意义。在淤泥固化方面许多学者开展了相关研究,例如淤泥固化土的强度特性^[1]、压缩特性^[2]及三轴剪切特性^[3]随固化剂掺量、龄期的变化规律等,为淤泥处理提供了技术理论支撑。淤泥固化处理技术日趋成熟,在江苏太湖、湖北黄石磁湖等多个清淤及资源化处理工程进行了应用,第三方检测结果表明,经固化处理后的疏浚淤泥能够满足力学强度的要求,且污染物稳定效果良好。然而,经固化处理后的淤泥应用于工程往往需要服役数十年,受外部环境影响,其耐久性能否满足工程稳定性的要求成为淤泥固化工程应用的关键问题。

近年来,受全球气候变化影响,极端干/湿气候频发,我国防灾减灾形势异常严峻。干湿循环效应对改良土长期稳定性能的影响,已逐渐引起有关学者的关注。如李磊等^[4]研究了水泥和膨润土添加剂对固化污泥干湿耐久性的影响,发现其干湿耐久性

随水泥掺量的增加而提高,膨润土过量添加反而会降低污泥固化土的干湿耐久性。郑军等^[5]通过加州承载比指标研究了干湿循环作用对新型固化土的影响,并探讨了干湿循环作用的影响机理,发现由于固化剂的养生作用和水分变化引起的裂隙发育的共同影响,新型固化土的承载强度随干湿循环次数先增加后减小。刘文化等^[6]研究了淤泥固化土在干湿循环作用下抗剪强度的变化规律,指出水泥掺量是影响固化淤泥抗剪强度变化规律的重要因素。周春梅等^[7]研究了压实黄土在干湿和冻融循环过程中路用性能的变化规律,得到了关键指标CBR在气候环境影响下的长期演变规律。杜杰等^[8]探讨了硫酸钠环境对气泡混合轻质土干湿耐久性的影响,指出钙矾石的生成是影响的关键因素之一。谈云志等^[9]针对富含有机质淤泥,研究了掺入偏高岭土-石灰改良水泥的固化效果,结果表明偏高岭土卓越的火山灰反应能力有助于提高固化土的长期强度。杨爱武等^[10]利用DDS动三轴仪,研究了干湿循环作用与初始静偏应力耦合作用下固化污泥土动力累计变形特性。T.Kamei等^[11]应用废石膏和粉煤灰联合加固软黏土,通过干湿循环试验研究了固化土的耐久性,结果表明干湿循环的影响主要集中在前三次循环,对固化土含水率变化、体积变化、干密度等物理性质影响较小。S.Horpibulsuk等^[12]研究了碱激发粉煤灰污泥固化土的干湿耐久性,并基于统计分析建立了无侧限抗压强度随干湿循环次数的预测公式。郑旭等^[13]通过室内试验研究干湿循环对碳化固化土物理力学特性的影响,并通过SEM、XRD、MIP测试定性分析了微观机理。H.Olivier等^[14]研究了固化黏土的质量、波速、渗透性及力学性质等指标随干湿循环的变化规律,指出钙矾石晶体生成而发生体积膨胀诱发的大量微裂隙是产生

力学损伤的主要原因。

城市河道疏浚淤泥与自然沉积的淤泥物理性质有较大的差异,颗粒成分以粉粒与黏粒为主,有机质含量较高,同时具有高含水率、低渗透性的特征。已有研究较多关注固化剂掺量和种类对固化土干湿耐久性的影响,对于土性参数的影响关注较少,特别是针对有机质含量较高的城市河道淤泥固化土的干湿耐久性还未见报道。

为此,本文以南京市内秦淮河中段城市河道淤泥为例,选取有机质含量不同的两种典型城市河道淤泥,通过干湿循环试验和无侧限抗压强度试验,研究不同固化剂类型及其掺量对淤泥固化土干湿耐久性的影响。研究结果将为疏浚淤泥固化土处理技术和资源化利用提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试样材料

为评价城市河道淤泥固化土的耐久性和稳定性,本次选取S淤泥和Z淤泥两种典型淤泥进行干湿强度试验。淤泥的基本物理性质及化学成分见表1和表2,试验淤泥取自南京市内秦淮河中段,受沉积环境和物质来源的影响,两种淤泥的成分具有一定差异性,特别是有机质含量,其中S淤泥和Z淤泥的有机质含量分别为7.7%、11.7%。

针对城市河道淤泥具有有机质含量高的特点,为改善淤泥固化效果,提高其耐久性和稳定性,提出了基于碱性组分和膨胀性组分的固化方法,研制了一种新型固化剂。新型固化剂包含水泥、石灰和废石膏等成分,水泥采用42.5普通硅酸盐水泥,所

用的石灰CaO含量大于90%,废石膏的主要成分为CaSO₄,三者的质量配比约为10:(1.5~2.5):(0.5~1.5)。由于淤泥有机质含量等土性条件的差异,新型固化剂加固不同种类淤泥时,石灰和废石膏的掺入比例在上述范围内变化。根据前期试验结果,针对本文研究的城市河道淤泥,新型固化剂的配比取水泥:石灰:废石膏=10:2:1。新型固化剂中碱性组分石灰主要通过提高孔隙溶液pH值,增加Ca²⁺浓度,改善水泥水化环境,膨胀性组分废石膏主要利用石膏晶体及其反应产物钙矾石的膨胀特性,填充孔隙,增加固化土的密度。

为对比分析新型固化剂的固化效果,采用42.5普通硅酸盐水泥固化剂分别进行试验,水泥固化的试样按掺量不同设置4组,其掺量分别为5%、10%、15%、20%。此外,掺入新型固化剂10%作为对比,评价新型固化土的干湿耐久性。上述掺量均为固化剂与淤泥干土的质量之比。

1.2 试样制备

淤泥晾晒风干,粉碎后过2 mm筛,S淤泥、Z淤泥风干含水率分别为3.9%、6.9%。根据试验配比将淤泥和固化剂充分混合,向混合土中加入适量的水,控制混合土含水率为40%,土样处于可塑状态。将混合土装入塑料袋密封1 h,促进土样中的水分分布均匀。称取适量土样倒入三轴钢制磨具,采用击实法制备试样,分三层击实,试样尺寸为直径3.91 cm、高8.00 cm,干密度控制在1.40±0.02 g/cm³。制备好试样后,用通气的薄膜包扎确保试样完整性,放入湿度大于95%、温度20±2℃的标准养护箱,养护90 d。达到龄期后进行干湿循环和强度试验。

表1 试验淤泥的基本物理性质

Table 1 Physical properties of tested sludge

编号	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	有机质含量/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
S淤泥	>100	<1.4	52.76	32.88	19.88	2.58	7.7	19.58	61.32	19.10
Z淤泥	>100	<1.4	61.89	42.56	19.33	2.44	11.7	41.56	47.99	10.45

1.3 试验方法

干湿循环试验是一种室内加速试验,用于模拟气候变化对土体长期性能的影响。干湿循环主要分为吸湿和脱湿两个过程,吸湿方式主要有完全浸

水饱和与部分浸水饱和两种方法,参考(ASTM) D4843-88的干湿循环试验方法,对其进行简化和改进,考虑到淤泥经固化处理后常作为土工填料,吸湿方式通过单向毛细入渗吸水进行模拟,脱湿的温度取45℃,代表长江中下游地区极端高温条件。具

表2 试验淤泥的化学成分

Table 2 Chemical composition of tested sludge

编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	烧失量
S淤泥	59.51	11.53	4.62	5.12	1.80	1.65	1.22	0.73	0.50	0.07	12.56
Z淤泥	55.97	9.94	4.25	5.20	1.60	1.74	1.32	0.67	0.65	0.06	18.04

注:质量分数/%

体实验过程为:试样养护结束后,脱去塑料薄膜,上下各放置一块透水石,至于饱和器中,加水超过下端透水石2 cm左右,并间隔1 h向试样顶面和侧面喷洒水分,整个吸湿过程持续24 h。吸湿完成后,擦去表面水分,静置1 h,测量试样质量。此时,作为干湿循环的初始状态,记作0次循环。将初始状态试样在烘箱中干燥24 h,温度控制在45±3℃,干燥后对试样进行称重。干燥后试样继续完成上述吸湿过程,即为1次干湿循环。根据日本高速公路标准协会建议^[15],岩土材料的干湿耐久性评价可采用5次干湿循环。部分研究表明^[16],干湿循环对土体工程性质的影响主要集中在前3次,随后逐渐减弱。因此,本次试验共进行5次干湿循环。

完成每次干湿循环后,测量试样的质量和几何尺寸,用于计算质量损失率和体积变化率等物理指标。同时,通过无侧限抗压强度试验获得试样强度指标。质量损失率采用累计质量损失率C,可表示为:

$$C = \sum_i \frac{W_i}{M_0} \times 100\% (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (1)$$

式中, M₀为试样初始状态时的干质量; W_i为第i次干湿循环减小的质量。

试样体积通过直径和高度进行换算,将前后两次干湿循环的试样体积之差记为体积变化量,体积变化量除以前一次干湿循环的试样体积记为体积变化率。无侧限抗压强度试验参照土工试验方法标准^[17],加载速率采用1 mm/min,加载至试样完全破坏或轴向应变达到20%。每组采用三个平行试样,结果取平均值。

2 试验结果

2.1 干湿循环对固化土强度的影响

图1为固化土抗压强度随干湿循环次数的变化

规律。0次干湿循环时,即循环初始状态,随着固化剂掺量增加,固化土抗压强度逐渐增加。在相同固化配比条件下,S淤泥固化土的抗压强度高于Z淤泥固化土,如掺入15%水泥时,S淤泥固化土抗压强度576 kPa是Z淤泥固化土抗压强度324 kPa的1.78倍,反映出淤泥有机质含量等土性条件对固化效果影响较大。

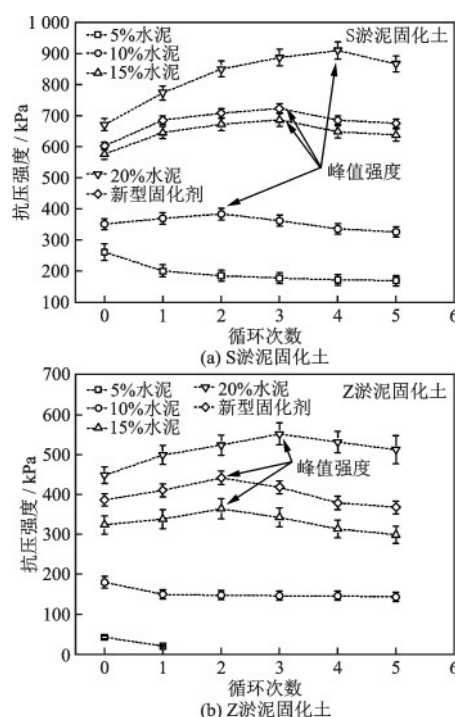


图1 干湿循环对淤泥固化土强度的影响

Fig.1 UCS values vs drying-wetting cycles of solidified sludge

干湿循环对淤泥固化土的影响呈现出两种不同的特征。当固化剂掺量较低时,固化土抗压强度随循环次数增加而持续下降,下降幅度在第1次时最大,随后逐渐减小,最后趋于稳定。5%水泥掺量S淤泥固化土和5%~10%水泥掺量Z淤泥固化土均为此特征。值得注意的是,5%水泥掺量Z淤泥固化土经过1次干湿循环后便丧失完整性,无法继续试验。当固化剂掺量较高时,淤泥固化土抗压强

度随循环次数先增加后下降,存在一峰值强度。对于S淤泥固化土,10%、15%、20%水泥掺量下,峰值强度对应的循环次数分别为2、3、4次。对于Z淤泥固化土,15%、20%水泥掺量下,峰值强度对应的循环次数分别为2、3次。总体来看,峰值强度对应的循环次数有随固化剂掺量增加而增加的趋势,且同样固化剂掺量时,Z淤泥固化土峰值强度对应的循环次数要小于S淤泥。

S淤泥和Z淤泥掺入10%新型固化剂后分别称为固化土O1和O2,它们均表现出良好的固化效果,抗压强度-循环次数曲线介于15%与20%水泥掺量对应的曲线之间。对比O1和O2的抗压强度变化曲线可知,O2的曲线相对更靠近20%水泥掺量对应的曲线,说明新型固化剂加固有机质含量更高的Z淤泥具有更好的固化效果。

2.2 干湿循环对质量损失率的影响

质量损失率是固化土干湿耐久性的重要评价指标之一,5次干湿循环后,淤泥固化土的质量损失率如图2所示。两种淤泥固化土相比,Z淤泥固化土的质量损失率略高,表明Z淤泥固化土抵抗干湿循环的能力更弱,与抗压强度的变化特征是一致的。主要原因是Z淤泥的有机质含量更高,对水泥水化反应环境及产物的不良影响更显著。随着固化剂掺量增加,质量损失率逐渐减小,水泥掺量从5%增加到10%时,下降幅度最大,水泥掺量继续增加,下降幅度逐渐减小。说明提高固化剂掺量,固化土抵抗干湿循环的能力得到显著改善。新型固化土的质量损失率均小于3%,且低于15%水泥掺量的试样,符合土工材料干湿耐久性的要求。

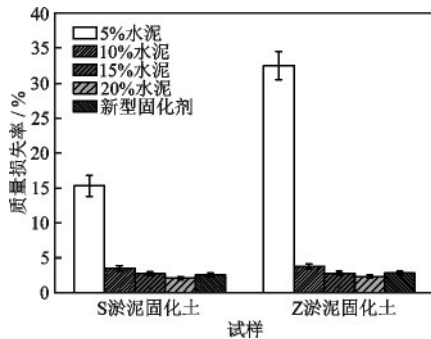


图2 5次干湿循环后质量损失率

Fig.2 Mass loss rates after 5 drying-wetting cycles

2.3 干湿循环对体积变化率的影响

图3为干湿循环过程中最大体积变化率。最大体积变化率是指某一试样在干湿循环过程中体积变化率的最大值,并不一定对应第5次干湿循环时的体积变化率。总体来看,干湿循环下固化土的体积变化不明显,体积变化率均小于1%,略低于钢渣粉水泥改良膨胀土在干湿循环下的体积变化率^[18]。从淤泥的基本物理性质可知,城市河道淤泥黏粒含量不高,主要以粉粒和砂粒为主,水分变化过程中胀缩效应不明显,同时,固化剂生成的水化产物起到了良好胶结效果,限制了固化土变形的发展。不同固化剂掺量下,最大体积变化率并无明显规律和特征,可能与测量误差和计算误差等因素有关。

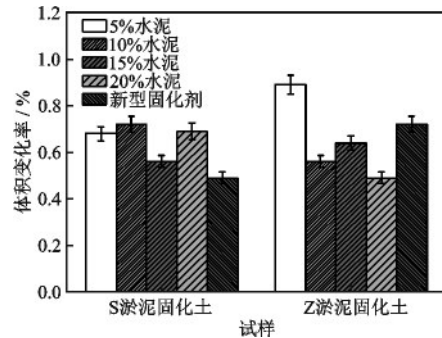


图3 干湿循环过程中最大体积变化率

Fig.3 Maximum volume change rates during drying-wetting cycles

3 分析与讨论

根据上述结果可知,质量损失率为干湿耐久性的总体控制指标,抗压强度的变化规律是淤泥固化土在干湿循环作用下微观结构演变的宏观表现。为解释固化淤泥土在干湿循环过程中强度变化规律,需要厘清土颗粒-有机质-固化剂在水分变化过程中的相互作用关系。干湿循环作用对固化土的影响主要体现在两方面^[5]:(1)在含水率变化过程中,土颗粒胀缩变形致使固化土微裂隙发育,以及水分迁移过程中对固化土骨架的侵蚀作用,综合称为劣化效应;(2)水分反复进入固化土内部,激发未反应固化剂二次水化反应,称为养生修复效应。

在劣化效应方面,干湿循环作用对水敏性土体

将产生显著的不可逆胀缩变形^[16],土体当中的亲水性黏土矿物是胀缩变形的物质基础,吸湿和脱湿等水分变化则是外界辅助因素。土体吸湿时,水分进入黏土矿物晶格之间,由于黏土矿物比表面积大,可形成厚度较大的水化膜,从而增加土粒之间的距离,产生膨胀力;而在脱湿时,含水率逐渐降低,在范德华力作用下土颗粒逐渐靠近,收缩势和基质势不断增加,产生收缩力。干湿循环过程中,胀缩应力不断对土体结构产生累计损伤,微细观裂纹逐渐产生并发展,宏观上表现为强度的降低。同时,在水分进出固化土内部的迁移过程中,也会对固化土骨架产生侵蚀作用,导致土颗粒流失,表现为固化土的质量损失。

在养生修复效应方面,城市河道淤泥中含有大量有机质,将会抑制水泥的水化反应,部分水泥颗粒被包裹在有机质和土颗粒中,无法与孔隙水发生水化反应。干湿循环所产生的微裂隙将有利于水分与水泥颗粒接触,进而促进水化反应。为模拟极端干旱气候,脱湿温度达到45℃,显著高于正常养护温度,高温养护对固化剂的水化反应有明显的促进作用^[19-20],有利于强度增长。二次水化反应产生新的水化产物,不仅能修复干湿循环中产生的微裂隙,还能增加胶结性水化产物的总量,进一步增强土粒之间的结构强度。因此,干湿循环对固化土抗压强度影响规律是劣化效应和养生修复效应协同作用的结果。

利用上述结论可较好解释两种淤泥固化土在干湿环境下抗压强度的发展规律。当固化剂掺量较低时(5%),随着干湿循环次数增加,两种淤泥固化土的抗压强度逐渐降低,主要原因是固化土中水泥含量较少,大部分水泥已完成水化反应,水泥二次水化反应比例很低,干湿循环作用的影响主要受劣化效应控制,劣化效应在第1次循环影响最为显著,之后逐渐弱化,这与S.Horpibulsuk等^[12]的研究结果一致。当水泥掺量增加为10%时,两种固化土表现出不同的强度变化特征,Z淤泥有机质含量更高,固化剂水化反应的抑制作用更加明显,将弱化干湿循环的养生修复效应。在更高水泥掺量条件下,正常养护时固化土中水泥未完全水化,在干湿循环前期以养生修复效应占主导,循环后期二次水化反应基本完成,则以劣化效应为主,所以固化土

抗压强度随干湿循环次数的增加而先增大后降低,这与郑军等^[5]的研究结果一致。值得注意的是,同一水泥掺量条件下两种淤泥固化土峰值强度对应不同的干湿循环次数,同种淤泥固化土水泥掺量不同时峰值强度对应的干湿循环次数也存在差异。固化土水泥掺量越高,干湿循环条件的养生修复作用持续时间增加,峰值强度对应的循环次数也随之增加。以20%水泥掺量为例,Z淤泥固化土和S淤泥固化土的峰值强度分别对应第3次和第4次干湿循环。主要原因是土性差异的影响,其中有机质含量是影响固化效果的敏感因素。Z淤泥更多含量的有机质,包裹大量水泥颗粒,抑制水泥水化反应,其固化土中可参与水化反应的水泥含量少于相同掺量的S淤泥固化土,导致干湿循环的养生修复作用持续时间变短,所以更早达到峰值强度。必须指出的是,上述分析主要考虑了有机质含量对水泥水化的不良影响,并未考虑有机质的胀缩变形。事实上,有机质能显著改变土体液塑限,吸水性较强,但相比于黏土矿物,其胀缩性很小^[21]。

图4为淤泥固化土5次干湿循环后抗压强度降低率,强度降低率为正表示强度下降,对应虚线上方,强度降低率为负表示强度提高,对应虚线下方。相同固化剂掺量条件下,S淤泥固化土的强度降低率更低,较低的有机质含量更利于水泥水化产物的大量生成,更多胶凝物质增强固化土的黏结效果,具有更好的干湿耐久性。

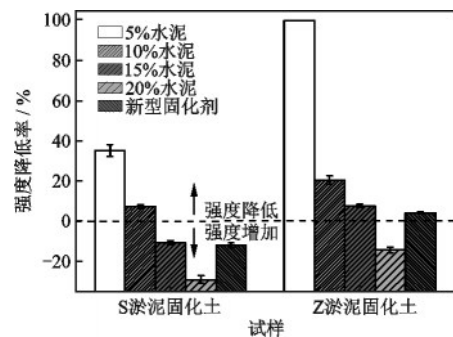


图4 5次干湿循环后抗压强度降低率
Fig.4 UCS reduction rates after 5 drying-wetting cycles

新型固化剂包含一定含量的膨胀性组分石膏,石膏及其产物在干湿循环过程中的胀缩性需要予以注意。综合抗压强度、质量损失率和体积变化率等指标,新型固化土O1和O2均表现出较好的干湿

耐久性,其干湿耐久性介于水泥掺量 15%~20% 淤泥固化土之间,说明掺入石膏并未显著影响淤泥固化土的干湿耐久性,T.Kamei 等^[1]指出固化土掺入足量水泥可链接包裹石膏晶体,从而提高含石膏固化土的干湿耐久性。

4 结 论

(1)由于有机质对水泥水化反应的抑制作用,在同等固化配比条件下,有机质含量更低的 S 淤泥固化土具有更好的干湿耐久性。

(2)在水泥掺量较低条件下(S 淤泥对应 5%、Z 淤泥对应 5% 和 10%),淤泥固化土的抗压强度随干湿循环次数增加而逐渐下降,且第 1 次循环的下降幅度最大,随后下降幅度明显减小;在水泥掺量较高条件下(S 淤泥对应 10% 以上、Z 淤泥对应 15% 以上),淤泥固化土的抗压强度随干湿循环次数增加先增大后下降,且峰值强度对应的循环次数具有随水泥掺量的增加和有机质含量的减少而增加的趋势,淤泥固化土抗压强度随干湿循环作用的变化规律是劣化效应和养生修复效应协同作用的结果。

(3)新型固化剂的固化效果优于水泥,掺入 10% 新型固化剂,其干湿耐久性介于水泥掺量 15%~20% 淤泥固化土之间。

(4)干湿循环对淤泥固化土抗压强度和质量损失率的影响规律一致,体积变化率无明显规律,综合来看,除 5% 水泥掺量的试样,均符合土工材料干湿耐久性的要求。

参考文献:

- [1] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(10):1561-1565.
Zhu W, Zhang C L, Gao Y F, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(10): 1561-1565. (in Chinese)
- [2] 黄英豪,朱伟,周宜兆,等.固化淤泥压缩特性的试验研究[J].岩土力学,2012,33(10):2923-2928.
Huang Y H, Zhu W, Zhou X Z, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged

material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2923-2928. (in Chinese)

- [3] Chiu C F, Zhu W, Zhang C L. Yielding and shear behavior of cement-treated dredged materials [J]. Engineering Geology, 2009, 103: 1-12.
- [4] 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):3001-3006.
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): 3001-3006. (in Chinese)
- [5] 郑军,阎长虹,夏文俊,等.干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增1):3051-3057.
Zheng J, Yan C H, Xia W J, et al. Experimental study of influence of drying and wetting cycles on bearing capacity of improved soil by CMSC soil stabilized agent [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1):3051-3057. (in Chinese)
- [6] 刘文化,舒俊炜,孙秀丽,等.干湿循环作用下固化淤泥的抗剪强度变化规律[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(4):10-18.
Liu W H, Shu J W, Sun X L, et al. Shear strength variation of solidified sludge during drying-wetting cycles [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(4):10-18. (in Chinese)
- [7] 周春梅,王琴华,张静波,等.干湿和冻融循环对压实黄土路用性能影响的试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(3):533-540.
Zhou C M, Wang Q H, Zhang J B, et al. Experimental study on the influence of dry-wet and freeze-thaw cycles on compacted Loess road performance [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3):533-540. (in Chinese)
- [8] 杜杰,黎冰,王勇,等.硫酸钠环境下气泡混合轻质土的抗干湿性能研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4):581-588.
Du J, Li B, Wang Y, et al. Study on resistance to dry-wet cycles of air-foam treated light soil under sodium sulfate environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 581-588. (in Chinese)
- [9] 谈云志,柯睿,陈君廉,等.偏高岭土-石灰增强水泥固化淤泥的耐久性研究[J].岩土力学,2020,41(4):1146-1152.
Tan Y Z, Ke R, Chen J L, et al. The durability of ce-

- ment solidified sludge enhanced with metakaolin and lime[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1146-1152. (in Chinese)
- [10] 杨爱武,袁腾云,杨少朋,等. 干湿循环与初始静偏应力耦合作用下城市污泥固化土动力累计变形特性[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(1): 117-126.
- Yang A W, Yuan T Y, Yang S P, et al. Study on dynamic cumulative deformation characteristics of municipal sludge solidified soil under the coupling action of dry-wet cycle and initial static deviator stress[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 117-126. (in Chinese)
- [11] Kamei T, Ahmed A, Shibi T. The use of recycled basalt and coal ash to enhance the strength of very soft clay in dry and wet environmental conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38:224-235.
- [12] Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C. Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 56: 324-332.
- [13] 郑旭,刘松玉,蔡光华,等. 活性MgO碳化固化土的干湿循环特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 297-304.
- Zheng X, Liu S Y, Cai G H, et al. Experimental study on drying-wetting properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 297-304. (in Chinese)
- [14] Olivier H, Javad E, Anne-lise B, et al. Durability of soil mix material subjected to wetting/drying cycles and external sulfate attacks [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192:416-428.
- [15] Japan Highway Society. JHS, method of wetting and drying test for water absorption of rocks. Method for soil testing [M]. *Japan Highway Society Handbook*, 2001:284-286.
- [16] 唐朝生,施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1376-1384.
- Tang C S, Shi B. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1376-1384. (in Chinese)
- [17] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019 [S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [18] 吴艳开,乔晓龙,李丹丹,等. 干湿循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(3):319-329.
- Wu Y K, Qiao X L, Li D D, et al. Experimental study on expansive soil improved by steel slag powder-cement under dry-wet cycles[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(3):319-329. (in Chinese)
- [19] 章荣军,郑俊杰,程钰诗,等. 养护温度对水泥固化淤泥强度影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3463-3471.
- Zhang R J, Zheng J J, Cheng Y S, et al. Experimental investigation on effect of curing temperature on strength development of cement stabilized clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3463-3471. (in Chinese)
- [20] 王东星,高向云,邹维列,等. 高温效应下MgO-矿粉/粉煤灰固化土强度预测[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6):92-97.
- Wang D X, Gao X Y, Zou W L, et al. Study on strength predication of reactive MgO-slag/fly ash stabilized clay considering high temperature effect[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(6): 92-97. (in Chinese)
- [21] 张同娟,王益权,刘军,等. 黄土地区影响土壤膨胀性的因子分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(6):185-189.
- Zhang T J, Wang Y Q, Liu J, et al. Factors influencing swelling of soils in Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(6): 185-189. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)