

基于生物炭改良的水泥固化土强度试验研究

李伸鑫¹, 吴发红², 吉 锋³, 王 健³, 徐桂中²

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;
2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051;
3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:为明确生物炭的添加对固化高含水率疏浚泥强度的影响,对含生物炭的固化高含水率疏浚泥开展了一系列的无侧限抗压试验,探讨了不同养护龄期下生物炭添加对固化高含水率疏浚泥强度规律的影响。试验结果表明:和不含生物炭的固化疏浚泥相比,相同养护龄期下生物炭的添加将引起固化疏浚泥无侧限抗压强度的增加,且增加幅度随生物炭掺量的增加而增大。此外,随着养护龄期的增大,生物炭添加引起固化疏浚泥强度性状的改变幅度也是逐渐增大的。最终,固化疏浚泥的破坏应变表现出增加的变化趋势,含生物炭的水泥固化土的破坏应变比不含生物炭的水泥固化土更大,破坏形态更明显。

关键词:生物炭;疏浚泥;高含水率;无侧限抗压强度;破坏应变

中图分类号:TU411.6

文献标志码:A

文章编号:1671-5322(2021)02-0001-05

我国海洋河流湖泊众多,在城市建设、水利工程、海洋工程中,每年都会产生大量的疏浚淤泥。而且河道疏浚泥含水率高,强度低,不但无法用于工程填料,还要占用大量土地堆放。因此,如何有效地处置河道淤泥是各种河道清淤工程亟需解决的关键问题^[1-2]。

目前,固化方法是实现疏浚淤泥资源利用的常用方法之一,该方法是通过向高含水率的河道疏浚淤泥中添加水泥、石灰等固化材料,使固化材料与淤泥发生化学反应,产生胶结物质,从而达到快速提高淤泥强度的目的。然而单采用水泥作为掺加剂来固化淤泥,不仅没有最大限度提高固化强度,并且水泥成本太高。为此很多学者又提出了加入水泥的同时,再加入其他辅助材料,如粉煤灰、磷石膏、工业矿渣等^[3-7]。

本文则是加入生物炭颗粒作为辅助材料。李金文等^[8]研究表明,生物炭在土体改良、污染土修复和炭封存等方面具有广阔前景,它本身具有低密度、高比表面积、高稳定性等特点,使得生物炭能够改变土体物理性质,如土体密度、孔隙结

构、孔径分布、持水性等,进而影响土体硬度、持水能力和团聚体稳定性等。李凤奇^[9]、王凡等^[10]研究表明,生物炭施入土壤生态系统后,作用包括土壤固炭、改善土壤结构及理化性状、提高土壤肥力、提升作物产量和质量等;生物炭在能源领域方面的应用表现为可作为代替传统能源的清洁环保型能源。随着生物炭研究的不断深入,其在全球炭生物地球化学循环、气候变化和环境保护中的重要作用日趋体现。

本文在固化高含水率疏浚泥中加入不同掺量的生物炭颗粒,养护不同龄期后开展无侧限抗压试验。基于试验结果,首先分析了生物炭添加对固化疏浚泥应力-应变曲线和无侧限抗压强度的影响,并探讨了生物炭添加使固化工程废浆强度性状发生改变的原因。之后,进一步研究了加入生物炭引起固化疏浚泥破坏应变和破坏形态的变化。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用疏浚泥取自安徽省蚌埠市五河县某

收稿日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51978597)。

作者简介:李伸鑫(1996—),男,江苏南通人,硕士生,主要研究方向为地基处理。

工程,其基本物理性质指标如表 1 所示。土体的液限和塑限分别为 58.8% 和 27.0%,砂粒、粉粒和黏粒含量为 1.0%、61.1% 和 37.9%,比重为

2.68。根据土体的液限和塑限,试验土样为高液限黏土。

表 1 试验用淤泥的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of test sludge

液限/%	塑限/%	比重 Gs	砂粒(>75 μm)/%	粉粒(5~75 μm)/%	黏粒(<5 μm)/%
58.8	27.0	2.68	1.0	61.1	37.9

试验所用生物炭(图 1a)购自河南省长葛市新原化工有限公司。通过粉碎机将柱状生物炭磨碎,过筛得到试验所用的生物炭颗粒,其粒径分布在 0.6~1 mm 范围内。试验所用水泥为盐城阜宁佳宁水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

标含水率为 3 倍液限,即 176.4%)。考虑到试验效果和成本问题,控制水泥掺量为 15%(水泥掺量为总质量的百分比),设定生物炭掺量 0.5%、15%、20%(生物炭的掺量为生物炭的质量占干土质量的百分比),根据固化效果必要时可补充其他掺量进行试验。之后计算需外加的水、水泥和生物炭质量,按顺序先加入水泥,再加入生物炭颗粒并将混合物搅拌均匀。

制备试样前,将试样模具(直径 39.1 mm,高度 80 mm)清洗干净,干燥后在模具内壁及上下端盖子底部均匀涂抹凡士林以减小试样和模具间的摩擦,并称量和记录模具的质量。然后分 3 次将搅拌均匀的混合物装入模具。需要注意的是,装入过程中需多次振捣以排除试样中的气泡,保证试样均匀致密。待装满模具后,用刮土刀将试样表面刮平,放入标准养护室内进行养护。待养护 24 h 成型后对试样进行脱模,对未达到目标养护龄期的试样继续养护至目标龄期(养护温度为 $(20\pm1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(96\pm2)\%$)。待达到规定龄期时取出试样测定其尺寸和质量,并开展无侧限抗压强度试验。所有试验均按照《土工试验方法标准》^[11]进行,具体试验方案如表 2 所示。

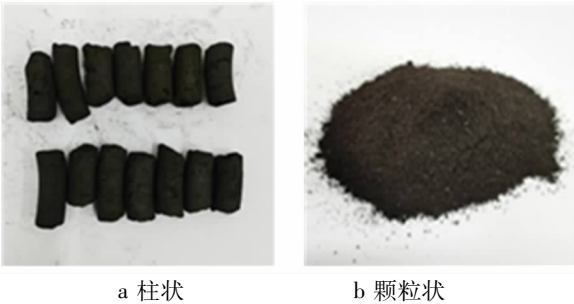


图 1 试验用生物炭
Fig 1 Charcoal with different forms

1.2 试验方案

试验前先取一定质量的淤泥放入塑料桶内,加水浸泡后搅拌均匀并测定含水率。从处理高含水率疏浚淤泥的目的出发,设定泥浆的目标含水率为 176.4%(试验所用五河土液限为 58.8%,目

表 2 无侧限抗压强度试验方案
Table 2 Unconfined compressive strength test plan

目标含水率/%	水泥掺量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	生物炭掺量/%	养护龄期/d
176.4	150	0/5/15/20	7/28/60/90

2 试验结果分析

2.1 应力-应变关系曲线

图 2 为不同养护龄期下含生物炭固化疏浚泥的应力-应变关系曲线。由图 2 可以看出,和不含生物炭的固化土类似,含生物炭固化土的应力-应变曲线也可分为 4 个阶段。第 1 阶段为加载的初始阶段,应力-应变曲线近似为一条直线;第 2 阶段为塑性上升段,应力逐渐增大并达到峰值;

第 3 阶段为陡降段,即材料的破坏阶段,此段的特点是在应变增加不是很大的情况下,应力迅速减小,并出现了反弯点;第 4 阶段为残余强度阶段,此时应力变化不大,而应变逐渐增加,试件产生了较大的塑性变形^[12-14]。

由图 2 可以看出含生物炭的水泥固化土较不含生物炭的水泥固化土的应力-应变曲线幅度增大,掺量 20% 时,7 d 时增幅约为 47%,28 d 时增幅约为 92%,60 d 时增幅约为 132%,90 d 时增幅

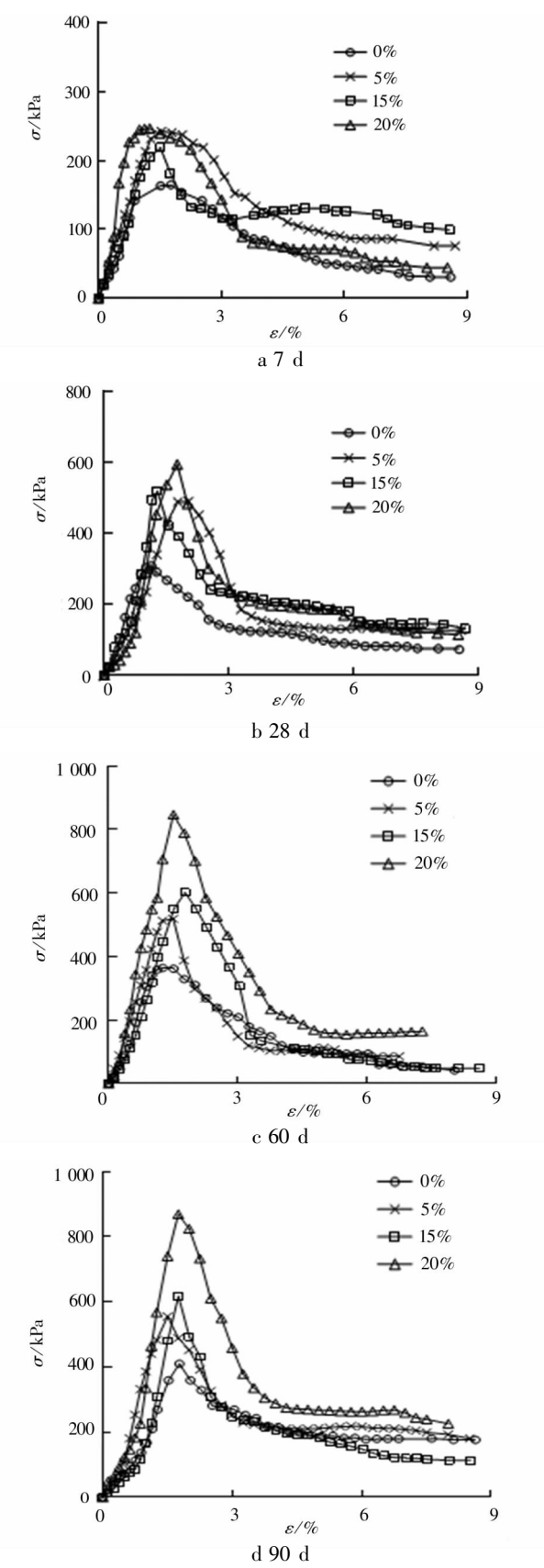


图 2 不同养护龄期下含生物炭固化土的应力 - 应变曲线

Fig 2 Stress-strain curves of biochar-containing solidified soil under different curing ages

约为 112% ,表明掺加生物炭后应力得到增大。在应变约为 1.5% 时,应力增大到峰值,说明生物炭的添加对水泥固化土的强度提升是有益的,而且生物炭掺量的不同,应力 - 应变曲线不同。在相同龄期下,生物炭的掺量越大,曲线幅度越高,应力越大(龄期为 7 d 时除外)。

在龄期为 7 d 时,生物炭掺量为 5%、15%、20% 时,应力 - 应变曲线基本重合,峰值应力也基本一样,由于 7 d 时生物炭都没有与土颗粒充分结合,因此生物炭掺量的增加并没有使得应力 - 应变曲线有明显的变化。在龄期分别为 28 d、60 d、90 d 时,可以看出含生物炭的水泥固化土较不含生物炭的水泥固化土的应力随应变增加的趋势更大,应力增大幅度分别为 92%、132%、112% ,应力 - 应变曲线都在不含生物炭的水泥固化土的上方。生物炭掺量不变的情况下,随着龄期的增加,含生物炭的水泥固化土的应力 - 应变曲线也逐渐增高,在前期应力增大效果明显,在 60 d 后应力 - 应变曲线增高幅度逐渐平稳。因为含生物炭的水泥固化土在 60 d 时充分反应,生物炭颗粒与土颗粒充分黏结,且生物炭在被土颗粒包裹后,团聚化作用明显,土颗粒吸附在生物炭上,使得土颗粒之间黏聚力提高,因此应力得到增加。

2.2 无侧限抗压强度峰值

图 3 为含不同掺量生物炭的水泥固化土的峰值强度与龄期间的关系,图中图例表示生物炭的不同掺量。由图 3 可知,随着生物炭掺量的增加,龄期的增加,峰值强度呈现先上升后趋于平稳的趋势。不含生物炭的水泥固化土的峰值强度曲线在含生物炭的水泥固化土的峰值强度曲线下方,峰值强度明显低于含生物炭的水泥固化土。在龄期 7 d 的时候,峰值强度差距不大,待龄期增加到 28 d 时,含生物炭的水泥固化土的峰值强度出现一个大幅提高,较 28 d 不含生物炭的水泥固化土强度增幅约为 92% ,且随着生物炭掺量的增加,峰值强度的增大更为显著。由此表明生物炭的加入使水泥固化土的强度有所提高,且提高的幅度是可观的,但是具体最佳掺量还有待继续研究。在龄期 7 d 的时候峰值强度差距不大,是由于生物炭颗粒早期与土颗粒还未充分反应,早期强度并没有特别大的提升。随着养护龄期的增加,生物炭自身的持水性、高比表面积、高稳定性且不降解的特性发挥了作用,使得土颗粒吸附在生物炭颗粒表面,并把生物炭包裹住,因此土颗粒与生物

炭颗粒之间的黏结力增强,相应的峰值强度增大。待龄期增加到 60 d 时,较 60 d 不含生物炭的固化土强度增幅约为 132%,之后峰值强度开始平缓,逐渐出现平台期,不再大幅度提高,与 90 d 的峰值强度相接近。

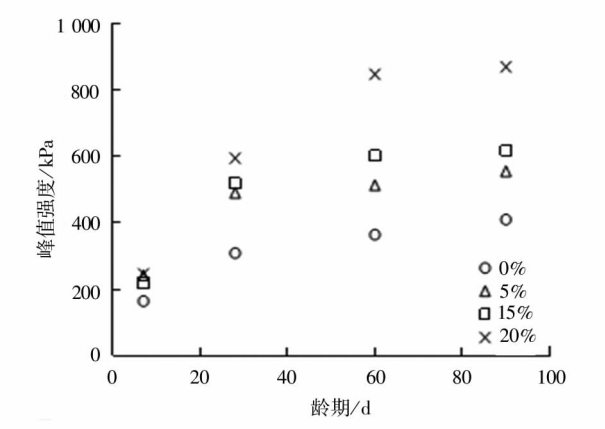


图 3 含不同掺量生物炭的水泥固化土的峰值强度随龄期的变化曲线
Fig 3 Variation curve of peak strength of cement-stabilized soil with different content of biochar with age

2.3 破坏应变

破坏应变是表征固化土变形特性和破坏特性的重要指标,其大小可反映固化处理后土体的可压缩性。一般取固化土无侧痕抗压强度测定的应力-应变曲线上的峰值应力对应的应变作为破坏应变。当应力-应变曲线上未出现峰值点时,则取 1.5% 时的应变作为破坏应变^[15]。

破坏应变一般发生在应力-应变曲线的第三阶段,即材料破坏阶段,因此鉴于不含生物炭的水泥固化土的破坏应变及生物炭不降解的特性,可分析含生物炭的水泥固化土的破坏规律。由图 2 可知,含生物炭的水泥固化土和不含生物炭的水泥固化土的破坏应变都发生在约 1.5% 应变处。含生物炭的水泥固化土的破坏应变比不含生物炭的更大,破坏形态更明显,如图 4a 是不含生物炭的水泥固化土在龄期 60 d 的破坏形态,图 4b 是含生物炭的水泥固化土在龄期 60 d 的破坏形态,可以看出含生物炭的水泥固化土相较于不含生物炭的水泥固化土出现裂缝的宽度更大,裂缝条数更多。在破坏后的土块中,含生物炭的水泥固化土具有更多孔隙,并且生物炭是不降解的物质,所以在出现破坏界面后,黏聚力迅速减小,应力相对应减小,破坏后变形更快。



图 4 水泥固化土的破坏形态
Fig 4 Failure modes of cement-solidified soil

3 结论

在试验的基础上,通过对含生物炭的水泥固化土和不含生物炭的水泥固化土的应力-应变曲线、峰值强度及破坏形态的研究,分析了含生物炭的水泥固化土与生物炭的掺量以及龄期的关系,得出以下结论:

- (1) 含生物炭的水泥固化土的无侧限抗压强度随着龄期的增加而增大,且和不含生物炭的水泥固化土一样都存在峰值强度。
- (2) 含生物炭的水泥固化土的无侧限抗压强度相较于不含生物炭的水泥固化土有显著的提高,且随着掺量的增加而增大。因为生物炭本身疏松多孔和持水性能导致它与土颗粒产生黏结和团聚化的作用。
- (3) 含生物炭的水泥固化土的破坏应变比不含生物炭的水泥固化土更大,破坏形态更明显,但是含生物炭的水泥固化土强度有显著的提高。相较于不含生物炭的固化土,生物炭掺量 20% 的固化土,龄期 7 d 时强度增幅约为 47%, 28 d 时增幅约为 92%, 60 d 时增幅约为 132%, 90 d 时增幅约为 112%。

参考文献:

[1] 徐志豪,章荣军,郑俊杰,等. 絮凝-固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文):1-9[2021-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20201226.1052.002.html>.

[2] 程福周,雷学文,孟庆山,等. 高含水率疏浚淤泥固化的力学性质试验研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(1):295-299.

[3] 张丽华,范昭平. 石灰-粉煤灰改良高含水率疏浚淤泥的试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2013,35(1):91-95.

[4] 桂跃,王其合,张庆. 工业废料固化高含水率疏浚淤泥强度特性分析[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(1):36-42.

[5] 张小芳,陈瑞敏,简文彬. 水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥的水分转化规律及其固化机理研究[J/OL]. 工程地质学报:1-11[2021-01-31]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-378>.

[6] 林彤,刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(6):1049-1052.

[7] 丁建文,张帅,洪振舜,等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2817-2822.

[8] 李金文,顾凯,唐朝生,等. 生物炭对土体物理化学性质影响的研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(1):192-206.

[9] 李凤奇. 生物炭对土壤改良的作用分析[J]. 现代农村科技,2019(11):48.

[10] 王凡,廖娜,曹银贵,等. 基于生物炭施用的土壤改良研究进展[J]. 新疆环境保护,2020,42(2):12-23.

[11] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[12] 张国忠,肖勇,陈德鹏,等. 水泥固化土应力应变关系特性研究[J]. 黑龙江工程学院学报,2014,28(1):38-40.

[13] 赵莹莹,付秀丽,张国忠,等. 固化土应力-应变力学特性及其影响因素分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2018,36(6):849-851,882.

[14] 金裕民,郑旭卫,蔡纯阳,等. 水泥粉煤灰固化滩涂淤泥的强度与固化机理研究[J]. 科技通报,2015,31(5):132-136,141.

[15] 宋苗苗,朱鹏,徐桂中,等. 钙质促凝剂对固化高含水率工程废浆强度的影响[J]. 硅酸盐通报,2020,39(12):3945-3951.

Experimental Study on the Strength of Cement-solidified Soil Based on Biochar Improvement

LI Shenxin¹, Wu Fahong², JI Feng³, WANG Jian³, XU Guizhong²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology,
Huainan Anhui 232001, China;

2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;

3. Jangsu Hongji Water Technology Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu 225000, China

Abstract:In order to clarify the effect of the addition of biochar on the strength of the solidified dredged mud with high moisture content, a series of unconfined compressive tests were carried out on the solidified dredged mud with high moisture content containing biochar, and the influence of the addition of biochar on the strength law of the solidified dredged mud with high moisture content under different curing ages was discussed. The results show that compared with the solidified dredged mud without biochar, the addition of biochar at the same curing age will increase the unconfined compressive strength of solidified dredged mud, and the increase range will increase with the increase of the biochar content. In addition, with the increase of curing age, the variation range of the strength properties of solidified dredged mud caused by the addition of biochar also gradually increased. Finally, the failure strain of solidified dredged mud increased with the biochar, and the failure strain of cement-solidified soil containing biochar was larger and the failure pattern was more obvious than that of cement-solidified soil without biochar.

Keywords:biochar; dredged sludge; high-moisture content; unconfined compressive strength; failure strain

(责任编辑:张英健)