

# 考虑初始含水率与养护龄期影响固化软土的 强度和流动特性研究

姚 达<sup>1,3</sup>, 姜 舒<sup>2</sup>, 张玉婷<sup>1</sup>, 韩启元<sup>4</sup>, 张 丹<sup>5</sup>

(1. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000;

2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司徐州分公司, 江苏 徐州 221018;

3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000;

4. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 5. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘要:**通过开展一系列水泥固化土的无侧限抗压试验和流动度试验,探讨初始含水率与养护龄期对水泥固化土的强度与流动性的影响规律与作用机理。结果表明:水泥固化土的应力应变关系呈现应变软化特性,固化土的强度随着含水率的增加而减少,随着养护龄期的增加而增大。固化土的流动值随着初始含水率的增大而增加,整体表现为低流动性。

**关键词:**软土; 固化处理; 初始含水率; 养护龄期; 强度特性; 流动特性

中图分类号:TU44

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)03-0010-0005

## Study on the strength and flow characteristics of cement solidified soft soil considering initial moisture content and curing age

YAO Da<sup>1,3</sup>, JIANG Shu<sup>2</sup>, ZHANG Yuting<sup>1</sup>, HAN Qiyuan<sup>4</sup>, ZHANG Dan<sup>5</sup>

(1. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. Xuzhou Branch of The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Sources Co., Ltd., Xuzhou 221018, China; 3. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

4. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

5. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**Abstract:** By carrying out a series of unconfined compressive strength and fluidity tests of cement solidified soil, the influence law and mechanism of initial moisture content and curing age on the strength and fluidity of cement solidified soil were discussed. The results show that the stress-strain of cement solidified soil presents strain softening characteristics. The strength of cement solidified soil decreases with the increase of water content and increases with the increase of curing age. The flow value of solidified soil increases with the increase of initial moisture content, and the overall performance is low fluidity.

**Key words:** soft soil; solidification treatment; initial moisture content; curing age; strength characteristic; flow behavior

软黏土广泛分布于全球各地,包括许多城市发展和工业中心所在地区,尤其集中于沿海一带<sup>[1]</sup>。随着城市建设和经济发展,用地规模不断增加,不

可避免地需要在软黏土地区进行开发利用,而由于软黏土具有含水量高、压缩性高、承载力低、渗透性低、剪切强度低等特点<sup>[2]</sup>,易引起不良工程问题。因

收稿日期:2021-06-20

基金项目:江苏省水利科技项目(2020012);江苏水源公司科技研发项目(SSY-JS-2020-F-47)

作者简介:姚达(1990—),男,工程师,本科,研究方向为软基处理技术。E-mail: yumanshu@126.com

此,需要对软黏土进行加固处理。目前,常用的固化材料种类主要有:有机化合物、无机化合物、酶三类,因其固化速度快、强度高、用量少、造价低等优点而被广泛应用<sup>[3-4]</sup>。

水泥固化土作为传统的固化剂,研究较为成熟,被广泛用于改善软黏土力学特性,提高其承载性能。目前,国内外学者对该固化剂的研究主要围绕其力学特性和抗冻性能开展,主要集中在有关水泥掺量<sup>[5-6]</sup>、土体性质<sup>[7-8]</sup>、孔隙水盐分浓度<sup>[9-10]</sup>对其的影响。需要注意的是,软黏土具有高初始含水率的特性,且需要通过水化反应形成坚硬的水泥固化土,因此原料土的含水率对水泥固化土也有着不可忽视的影响<sup>[11]</sup>。冯哲源等<sup>[12]</sup>分析了含水率对盐城滩涂固化土强度特性的影响,研究表明其抗压强度随土样含水率的增加而降低;王宇姣等<sup>[13]</sup>对鄱阳湖疏浚土进行研究发现,当含水率低于27%时,固化剂水化反应不充分使得强度降低。此外,对于高含水率的软黏土而言,水泥的加入使得固化土具有相对稳定的结构而提高其强度,在实际施工中可以高效处理土体材料,降低施工成本<sup>[14-15]</sup>。而对于不同含水率和龄期对水泥加固土的流动性的影响,目前研究尚不完善,仍需要深入探讨。

为了进一步研究含水率和龄期对水泥加固土强度特性及其流动性的影响,通过无侧限抗压试验和流动性试验,系统地研究土体初始含水率和养护龄期对水泥固化土强度特性与流动特性的影响,并对影响原因进行了分析,为固化加固技术在高含水率疏浚泥、软土地基加固等实际工程中的应用提供参考。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用土样取自盐城阜宁,依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[16]</sup>测定土体的基本物理性质。其中,土体的液限和塑限分别为53.1%和24.7%,比重为2.68。根据土体的液限和塑限,结合塑性图(图1)可知,试验所用土样为高液限黏土。

### 1.2 试验方案

考虑到我国存在大量的疏浚淤泥,其含水率高、强度低,且在疏浚施工结束沉积稳定后的含水率达到2.0~3.0倍液限甚至更高<sup>[15]</sup>,故本试验设定土样的初始含水率为 $1.5 w_L \sim 3.5 w_L$ ,水泥掺量为 $150 \text{ kg/m}^3$ ,龄期分别设置为7、28、42、90 d。

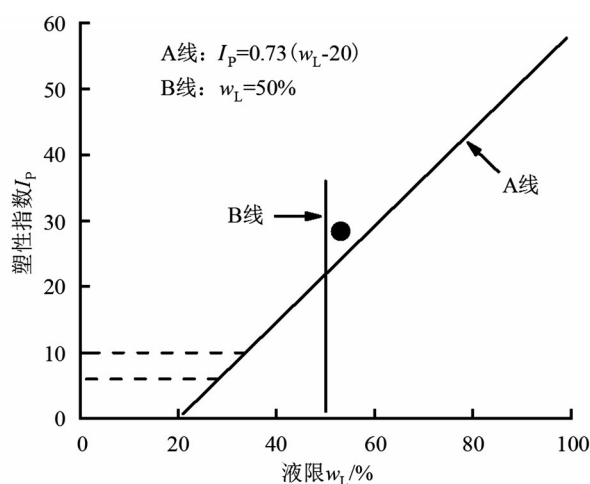


图1 土样塑性

#### 1.2.1 无侧限抗压试验

将土样分别调配到一定的含水率,将水泥和土样充分混合,并使用便携式机械搅拌机搅拌,直至获得均匀的黏土—水—水泥拌合物。然后将浆体倒入内径39mm、高80mm的3层塑料模具中,并使用振动器使得各层均匀无气泡,脱模后将试样移入恒温 $[(20 \pm 2) ^\circ \text{C}]$ 的养护室进行标准养护。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[16]</sup>,无侧限抗压试验中使用的应变率设定为每分钟1%,在每个含水率和龄期下,测试3个平行试样,以获得无侧限抗压强度的平均值。

#### 1.2.2 流动性试验

本文参照Rajendran<sup>[17]</sup>的方法,采用 $76.6 \text{ mm} \times 152.4 \text{ mm}$ 的开口圆柱筒,将圆筒放至光滑平整的有机玻璃板上,并将刚搅拌均匀的水泥固化土拌合物装入圆筒中并装满。用刮刀将表面刮平后,轻轻提起圆筒,拌合物在有机玻璃板上形成塌陷体,测量其最大直径和最小直径,则两者的平均值即为流动值。

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力-应变关系曲线

图2为不同初始含水率和养护龄期条件下固化土试样典型的应力-应变曲线,其中每个试样的峰值应力即为无侧限抗压强度 $q_u$ 。可以发现,固化土试样的应力-应变曲线均为应变软化型。即土体的应力随应变的增加呈先增大,待达到峰值后再减小的变化趋势。这主要是由于当水泥掺量超过一定值后,土中形成胶结结构,外加荷载作用下土体结构破碎后表现出脆性特性<sup>[18-19]</sup>。同时,从图2可

以看出试验的破坏应变基本都分布在1%~2%左右,与一般的水泥固化土的破坏应变在0.5%~2%之间的结论相一致<sup>[20]</sup>。

由图2还可以看出,初始含水率的影响较为明显,即在相同龄期条件下,较低的初始含水率试样的应力—应变曲线高于较高的初始含水率的应力—应变曲线。这是由于水泥水化产物在固化试样单位体积中的量不同<sup>[19]</sup>,因此初始含水率较低的试样强度较高。反之,初始含水率较高时,其强度较低。而在相同的初始含水率下,养护龄期较长试样的应力—应变曲线始终位于养护龄期较短试样的上方[图2(c)]。这主要是由于随着养护龄期的增加,水泥水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与黏土颗粒表面溶解的活性二氧化硅和氧化铝发生火山灰反应,增加了土中水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝产物的产量,提高了固化土结构的密实程度和强度,宏观表现为固化土无侧限抗压强度的增加<sup>[21-22]</sup>。

## 2.2 无侧限抗压强度

图3为相同养护龄期下固化土无侧限抗压强度随土体初始含水率的变化规律。由图可知,所有测试样品的无侧限抗压强度 $q_u$ 均随着含水率的增加而持续降低。含水量是影响软黏土强度的重要因素之一,即含水量越高,强度越低<sup>[20]</sup>。同时,含水量也是影响水化反应的重要因素。但是含水量过高使得水化反应中水分过高,会导致颗粒间距离增大或颗粒簇间间距过大,强度降低<sup>[23]</sup>。

当养护龄期相同时,含水率较低的水泥固化土试样的无侧限抗压强度高于含水率较高的试样,如当养护龄期为7 d时,含水率为80%的试样无侧限抗压强度为786.4 kPa,含水率为160%的试样无侧限抗压强度为229.6 kPa,下降了70.8%;当龄期为28 d时,含水率为80%的试样无侧限抗压强度为930.8 kPa,含水率为160%的试样无侧限抗压强度为483.0 kPa,下降了48.1%;当龄期为42 d时,含水率为80%的试样无侧限抗压强度为980.6 kPa,含水率为160%的试样无侧限抗压强度为495.7 kPa,下降了49.4%;当龄期为90 d时,含水率为80%的试样无侧限抗压强度为1 027.9 kPa,含水率为160%的试样无侧限抗压强度为509.6 kPa,下降了50.4%。

测定不同养护龄期下水泥固化土的无侧限抗压强度,结果如图4所示。不同初始含水率下,固化土的无侧限抗压强度随养护龄期的增加,均表现出逐渐增大的变化趋势,且强度增长速率随着龄期的增加而逐渐减小。这主要是由于随着龄期的增加,

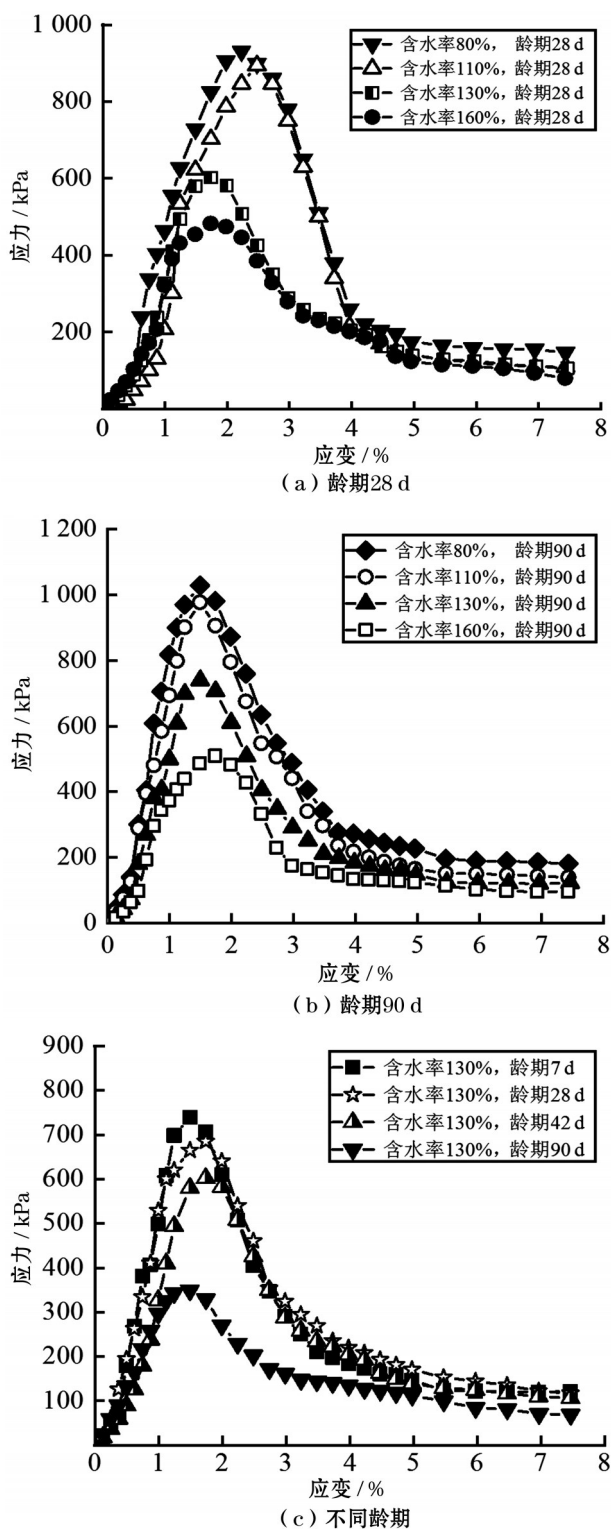


图2 固化土典型的应力—应变关系曲线

水泥的水化反应不断进行,生产了更多的水化产物,使得土体微观结构强度和密实性得到提升,宏观表现为土体对外加荷载抵抗能力的增加<sup>[24]</sup>。之后,随着养护时间的进一步增加,水泥的水化反应接近完成时,土体的无侧限抗压强度将趋于稳定。对于本文试验所用土样,养护42 d后固化土的无侧



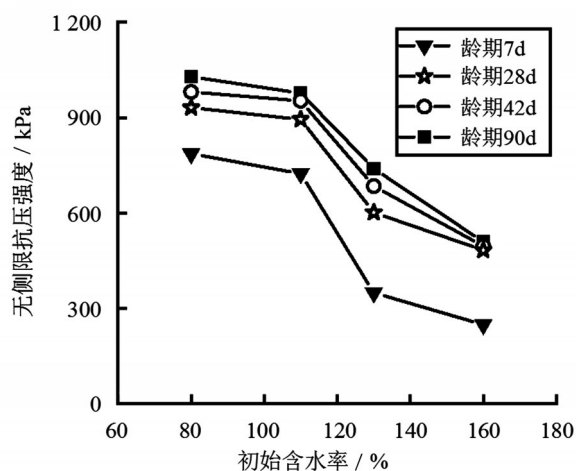


图3 固化土无侧限抗压强度随初始含水率变化规律

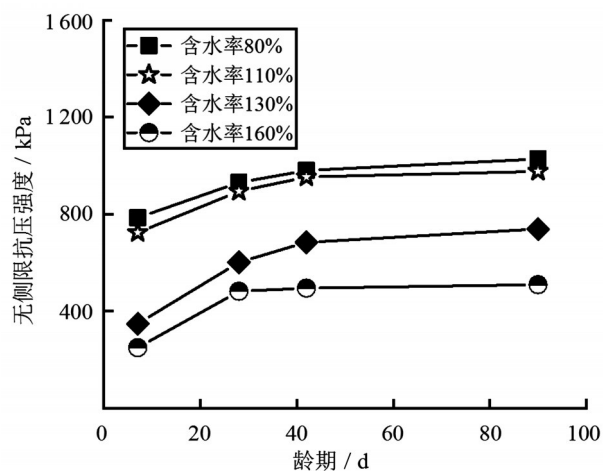


图4 固化土无侧限抗压强度随养护龄期的变化规律

限抗压强度随养护龄期的增加即基本达到稳定。

此外,当初始含水率较高时,养护龄期 28 d 的试样强度可达到龄期为 7 d 的试样强度的 1.5~2.0 倍左右,这与张春雷等<sup>[19]</sup>得到的固化土 28 d 的强度比 7 d 强度可以提高 1.4~2.3 倍的结论较为一致。如当初始含水率为 160% 时,龄期为 7 d 的试样强度为 249.6 kPa,龄期为 28 d 的试样强度为 483.0 kPa,后者达到前者的 1.9 倍;当初始含水率为 130% 时,龄期为 7 d 的试样强度为 349.0 kPa,龄期为 28 d 的试样强度为 602.0 kPa,后者达到前者的 1.7 倍。

为进一步探究初始含水率对水泥固化土强度的影响,收集已有文献中不同地区固化土的试验结果进行分析(表 1)。图 5 为相同养护龄期与水泥掺量下不同液限土体固化处理后 28 d 强度随初始含水率的变化曲线。相同初始含水率下,固化处理后土体的无侧限抗压强度随实验土体的不同呈分散式的规律,由此推断水泥固化土的强度还受

到土体液限的影响,总体来看,在含水率与龄期相同的条件下,液限低的土体强度要大于液限较高的土体。

表1 文献中土体液限

| 土样   | 液限/% | 塑限/% | 参考文献                |
|------|------|------|---------------------|
| 盐城土  | 53.1 | 24.7 | 本文                  |
| 白马湖土 | 60.5 | 31.5 | 陆强 <sup>[25]</sup>  |
| 天津土  | 33.1 | 17.9 | 詹博博 <sup>[27]</sup> |
| 大连土  | 46.7 | 28.1 | 程钰诗 <sup>[28]</sup> |
| 广州土  | 81.0 | 34.0 | 董金梅 <sup>[26]</sup> |
| 南京土  | 36.0 | 23.0 |                     |

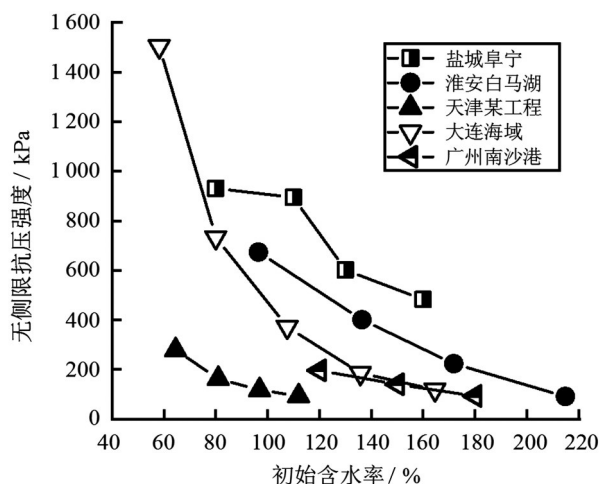


图5 固化土 28d 无侧限抗压强度随初始含水率变化规律

不难发现所有土样的抗压强度均随着初始含水率的增大而减小,这与本文试验规律相同;而由于土样的液限不同,尽管养护龄期与水泥掺量一致,仍呈现出较大的差别,在含水率 96% 时,淮安土样的强度是天津土样的 5.7 倍,这表明液限对水泥加固土强度有较大的影响。

### 2.3 流动度

流动度是影响水泥固化土拌合物现场泵送和施工的重要因素之一,而其受初始含水率的影响较大。图 6 给出了不同初始含水率条件下水泥固化土试样的流动性测试结果。可以看出试样的流动值随着初始含水率的增加而持续增加。根据 Rajendran<sup>[17]</sup>所示,对于高流动性材料其流动值不小于 20.3 cm,低流动性材料小于 15.2 cm。由图可得出,该试样表现为低流动性。

图 7 是几种淤泥土的流动度对比图,可以看出

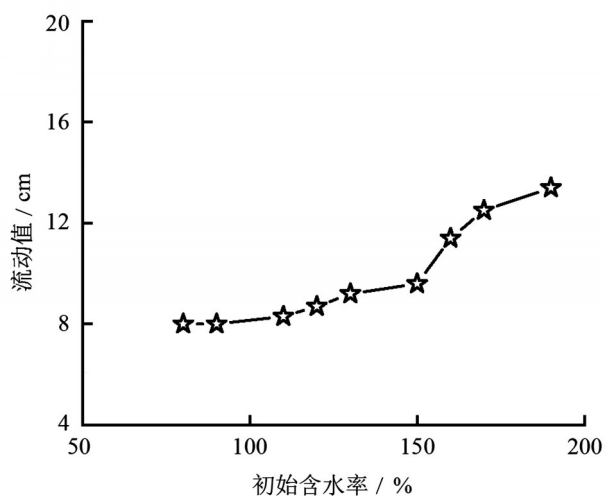


图6 不同初始含水率下固化土的流动值

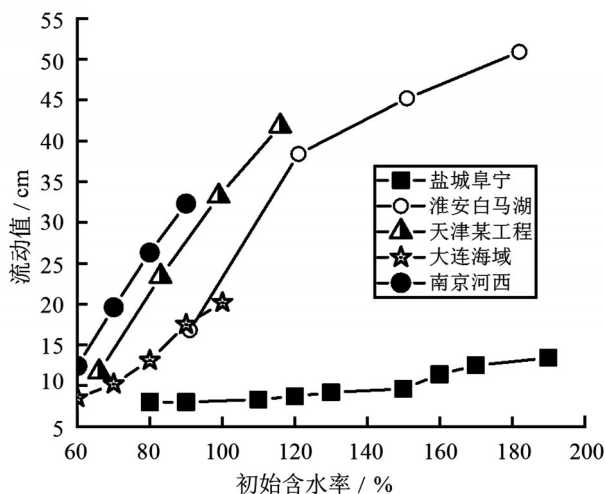


图7 不同土样的流动值随初始含水率的关系

初始含水率越高,土样的流动度越大,而液限低的土样其流动度大于液限较高的土,在含水率为120%时,天津土的流动值是淮安土样的1.1倍,是盐城土样的5倍,这说明土样的物理性质同样对固化土的流动度有较大的影响。

### 3 结 论

(1)固化软黏土试样的应力-应变曲线均为应变软化型,表现出脆性破坏特性。相同养护龄期条件下,初始含水率低的试样的应力-应变曲线始终位于初始含水率高的试样的上方。

(2)初始含水率对水泥固化土强度具有负面影响,即随着初始含水率的增加,其无侧限抗压强度均随之降低。

(3)对于不同初始含水率的固化土试样,其强

度均随养护龄期的增加而增大,且强度增长速率随着龄期的增加而逐渐减小。

(4)试样的流动值随着初始含水率的增大而增加,整体表现为低流动性。

#### 参考文献:

- [1] HAMIDI S, MARANDI S M. Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin[J]. Applied Clay Science, 2018, 151: 92-101.
- [2] EMMANUEL E, LAU C C, ANGGRANI V, et al. Stabilization of a soft marine clay using halloysite nanotubes: A multi-scale approach[J]. Applied Clay Science, 2019, 173: 65-78.
- [3] 沈心媛, 万云杰. 软黏土固化材料研究现状与原理浅析[J]. 江苏建材, 2020(2): 13-16.
- [4] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊2): 1273-1277, 1298.
- [5] 王佩, 宋新江, 徐海波. 水泥改性膨胀土强度特性及微观机理研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(6): 27-31.
- [6] KHALID U, LIAO C C, YE G L, et al. Sustainable improvement of soft marine clay using low cement content: A multi-scale experimental investigation[J]. Construction & Building Materials, 2018, 191: 469-480.
- [7] 赵文文, 王盛年. 水泥混合土渗透特性试验研究[J]. 工程建设与设计, 2020(14): 178-180.
- [8] 芮凯军, 李俊才, 杨宇, 等. 不同土质水泥土性质的室内试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 173-178.
- [9] YIN J, HAN W X, XU G Z, et al. Effect of salinity on strength behavior of cement-treated dredged clay at high initial water contents [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(10): 4288-4296.
- [10] YIN J, HU M M, XU G Z, et al. Effect of salinity on rheological and strength properties of cement-stabilized clay minerals[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(5): 611-620.
- [11] 李晓林, 李翔. 水泥固化土力学性质影响因素的探讨[J]. 山西建筑, 2017, 43(31): 53-55.
- [12] 冯哲源, 徐桂中, 徐洪群, 等. 盐城滩涂固化土强度特性试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(1): 51-56.
- [13] 王宇姣, 柴新军, 邓卫平, 等. 水泥固化鄱阳湖疏浚土试验研究[J]. 重庆建筑, 2013, 12(10): 50-51.
- [14] 丁建文, 万星, 冯旭松, 等. 高含水率疏浚淤泥固化土的压缩模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 369-374.
- [15] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 280-284.

(下转第18页)

面积 1 783.25 hm<sup>2</sup>,产生水土流失面积 801.44 hm<sup>2</sup>,各项水土保持措施治理达标面积 793.57 hm<sup>2</sup>,经过对扰动地表采取各项水土保持措施治理后,有效地提高了项目区地表的蓄水保土能力,经计算,每年拦蓄水量为 20.63 万 m<sup>3</sup>,保土量为 3.17 万 t<sup>[7]</sup>。

## 6 结 语

江苏省淮河洼地治理工程将生态理念融入水土保持建设全过程,工程通过实施水土保持措施后,水土流失防治效果明显,6项水土流失防治指标达到并优于水土保持方案设计要求,项目已经进入自然恢复期,各项水土保持防护措施已经逐步发挥水土保持效益,运行状况良好,其建设管理经验对其他重点工程建设有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

[1] 江苏省世行贷款淮河流域重点平原洼地治理项目管理

办公室. 世行贷款江苏省淮河流域重点平原洼地治理工程水土保持设施自验报告[R]. 南京:江苏省世行贷款淮河流域重点平原洼地治理项目管理办公室,2017,7.

[2] 康玲玲,王云璋,吴卿,等. 水土保持生态效益评价方法探讨[J]. 中国水土保持,2004(9):22-24.

[3] 景可,焦菊英. 水土保持措施与效益评价研究[J]. 水土保持研究,2004,18(1):132-136.

[4] GB50434—2008 开发建设项目水土流失防治标准[S].

[5] SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].

[6] 淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站. 世行贷款江苏省淮河流域重点平原洼地治理工程水土保持监测总结报告[R]. 蚌埠:淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站,2017,7.

[7] 江苏省世行贷款淮河流域重点平原洼地治理项目管理办公室. 江苏省世行贷款淮河流域重点平原洼地治理工程水土保持生态工程建设工作总结报告[R]. 南京:江苏省世行贷款淮河流域重点平原洼地治理项目管理办公室,2017,11.

(上接第 14 页)

[16] 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.

[17] RAJENDRAN N. Controlled low strength materials (CLSM), reported by ACI Committee 229[R]. Aiken, SC (United States): Westinghouse Savannah River Co., 1997.

[18] HORPIBULSUK S, LIU M D, LIYANAPATHIRANA D S, et al. Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the structured cam clay model [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1-2):1-9.

[19] 张春雷,汪顺才,朱伟,等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学,2008,29(S1):567-570.

[20] 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(10):103-107.

[21] SALEHI M, SIVAKUGAN N. Effects of lime-clay modification on the consolidation behavior of the dredged mud [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engi-

neering, 2009, 135(6):251-258.

[22] BOAR DMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D. Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes[J]. Géotechnique, 2001, 50(6):533-543.

[23] HONG Z S, BIAN X, CUI Y J, et al. Effect of initial water content on undrained shear behaviour of reconstituted clays[J]. Géotechnique, 2013, 63(6):441-450.

[24] 杨俊钊. 普通硅酸盐水泥对海底淤泥固化效果影响因素试验研究[J]. 中国港湾建设,2020,40(9):26-30.

[25] 陆强. 海水环境下固化淤泥流动性及强度特性试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.

[26] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[27] 詹博博. 大连湾海底疏浚泥水泥固化土力学性状试验研究[D]. 南京:东南大学,2018.

[28] 程钰诗. 水泥固化(超)高含水率淤泥强度特性[D]. 武汉:华中科技大学,2017.