

水平秸秆排水体联合真空预压加固 疏浚淤泥现场试验研究

刘延军¹, 付宏卿², 李兴兵³, 陈 俊⁴, 刘 超⁵

(1. 南水北调江苏项目管理有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019;
3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225002; 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 221051)

摘要:为进一步研究秸秆排水体对疏浚淤泥固结效果的影响,依托念四河西段整治工程,分别开展双层水平秸秆排水体真空预压与双层水平塑料排水板真空预压固结疏浚淤泥的现场试验研究,对比分析两种处理方式下疏浚淤泥的土中真空度、地表沉降、十字板剪切强度、含水率等差异。结果表明:两种排水体处理后的土体沉降量相差较小,且经秸秆排水体处理后的土体含水率略低。说明秸秆排水体具有更好的防淤堵特性,且秸秆排水体处理疏浚淤泥场地用时短,有利于节约工期,经济效益显著,对同类工程有一定参考价值。

关键词:疏浚淤泥; 秸秆排水体; 真空预压; 现场试验; 十字板剪切强度

中图分类号: TU472 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2024)12-0040-0005

Field experimental study on combined horizontal straw drainage body and vacuum preloading reinforcement for dredging sludge

LIU Yanjun¹, FU Hongqing², LI Xingbing³, CHEN Jun⁴, LIU Chao⁵

(1. South-to-North Water Transfer Jiangsu Project Management Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
2. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
3. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225002, 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 221051, China)

Abstract: To further investigate the influence of straw drainage body on the consolidation effect of dredged silt, relying on the remediation project of the western section of Niansi River, field experimental studies on the consolidation of dredged silt by vacuum preloading with double-layer horizontal straw drainage body and vacuum preloading with double-layer horizontal plastic drainage board were carried out respectively. The differences in vacuum degree in soil, surface settlement, vane shear strength, moisture content and other aspects of dredged silt under the two treatment methods were compared and analyzed. The results show that the difference in soil settlement amounts after treatment with the two types of drainage bodies is relatively small, and the moisture content of the soil treated with the straw drainage body is slightly lower. This indicates that the straw drainage body has better anti-clogging characteristics. Moreover, the time taken to treat the dredged silt site with the straw drainage body is shorter, which is conducive to saving the construction period. It has significant economic benefits and has certain reference value for similar projects.

Key words: dredging sludge; straw drainage body; vacuum preloading; field experiment; vane shear strength

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078449)

作者简介: 刘延军(1970—),男,高级工程师,研究方向为水利工程管理及地基处理。E-mail:514556794@qq.com

经绞吸式疏浚产生的疏浚泥含水率极高,且含有较多的细颗粒,排水性能较差^[1]。真空预压排水固结法作为一种可快速实施大面积加载的物理排水方法,具有显著优势,被大量应用于实际工程^[2-5]。但该方法在实际应用中面临种种问题:①高含水率疏浚淤泥几乎无承载力,进行传统真空预压时,竖向排水板插板施工困难^[6-7];②真空预压过程中靠近塑料排水板的周围会出现渗透性极低的“土柱”现象^[8];③真空预压结束后塑料污染问题也不容回避。为解决以上问题,诸多学者从排水板材质角度出发进行了深入研究。王婧等^[9]通过对排水板板芯和滤膜性能展开研究,发现编织布滤膜和整体式塑料排水板的防淤堵性能更好。目前已有研究表明农作物秸秆可以用来加固软土地基。梁同好等^[10-11]指出自行研制的秸秆辊的渗透系数与砂较为接近,并通过方差分析法得出秸秆辊最优水平组合为直径20 cm,密度0.121 g/cm³。Xu等^[12-13]发现由麦秸秆制成的排水体在真空加卸载过程中具有良好的弹性变形特性。李长辉等^[14]提出相比塑料排水板秸秆排水板效果要好,并且秸秆能够在一段时间后发生降解,符合环保绿色的发展需求。袁威等^[15]指出秸秆排水板不仅具有良好的工程性能,且成本低于塑料排水板。王山等^[16]通过大尺寸模型试验测定真空预压处理后疏浚淤泥内不同位置的有机质和营养元素含量的分布情况,指出秸秆降解会引起处理后疏浚泥氮磷钾等含量的增加,同时会引起碳氮比的降低。目前,作为一种新型的真空预压技术,相关水平排水板真空预压技术的研究并不多,针对水平秸秆排水体处理软地基效果的研究则更加有限。另一方面,由于室内试验模型尺寸较小,可能无法完全准确地反映出在实际工程中真空预压加固疏浚淤泥效果的影响。本文选取双层水平秸秆排水体与双层水平塑料排水板,依据现场监测数据分析了疏浚淤泥的土中真空度、地表沉降、十字板剪切强度、含水率的变化规律,对比验证了水平秸秆排水体真空预压技术的可行性,为该方法在扬州市吹填疏浚淤泥的应用推广和环境保护工作中的应用提供参考。

1 现场试验

1.1 工程概况

本项目依托工程为念四河西段整治工程,该项目主要施工内容包括:河道疏浚、护岸工程、排口整治及水土保持4个部分。其中河道疏浚部分疏浚总

长度为1.4 km,疏浚量约12万m³。本次示范工程在疏浚淤泥堆场选择2块试验区域,进行河道疏浚淤泥快速复耕技术现场应用研究,每块试验场地为20 m×30 m的长方形区域,分别进行双层水平秸秆排水体与双层水平塑料排水板快速处理疏浚淤泥,具体方案如表1所示。

表1 现场试验方案

场地编号	类型	处理面积/ 长(m)×宽(m)	排水体 间距/m	布设方式
1号场地	秸秆排水体	20×30	1	双层水平
2号场地	塑料排水板	20×30		双层水平

1.2 施工工艺

本工程采用塑料排水板和课题组自制秸秆排水体两种排水体^[17-18]。试验所用塑料排水板为SPB-B型排水板,与宋苗苗等^[22]研究中所用相同,故在此不再详述。将室内制作好的单根长分别为20 m和30 m的秸秆排水体运至试验现场边缘较干燥场地,再进行连接拼接、组装,形成网格状水平排水体系,网格间距选择1 m^[19-20]。排水体布置如图1所示。本工程真空预压加固处理具体工序为:场地找平→施工设备进场→测量放样→排水体连接组装→管路系统连接→排水体定位→铺设土工布→开挖压膜沟→场地密封→固结排水。工程监测内容具体包括:膜下真空度、表层沉降情况、十字板剪切强度与含水率。1号和2号场地除了使用不同材料的排水体,其余施工流程与监测内容相同。

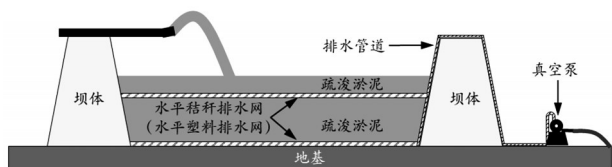


图1 现场示范工程布置示意

1.3 现场测点位置布设

试验区吹填厚度为2~2.5 m。为研究真空度在排水体系中的传递规律,在秸秆排水体与塑料排水板中各安装真空表15个。真空预压过程中,在试验区进行地面沉降量监测,每个试验场地在4个角落和中心各布置5个沉降标。固结排水处理完成后在场地中心点附近进行含水率与十字板剪切强度检测。分别在场中心点的右侧取距中心10、30和50 cm处共3个位置进行十字板剪切试验,

测试深度分别取5、40、80、120和160 cm。含水率测点与十字板剪切测点一致。具体测点位置如图2所示,其中P1表示场地中心的排水体,P2、P3分别表示场地北侧和南侧距场地边缘2 m处的排水体。

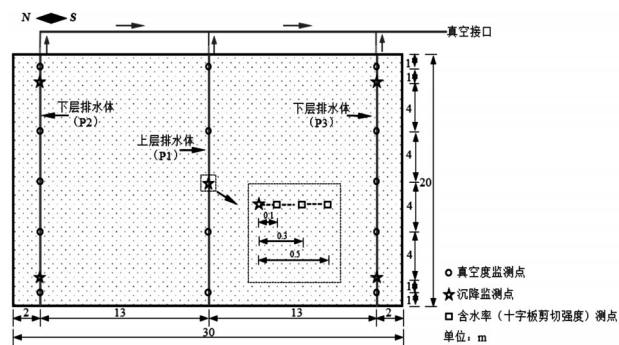


图2 现场示范工程测点布置示意(单位:m)

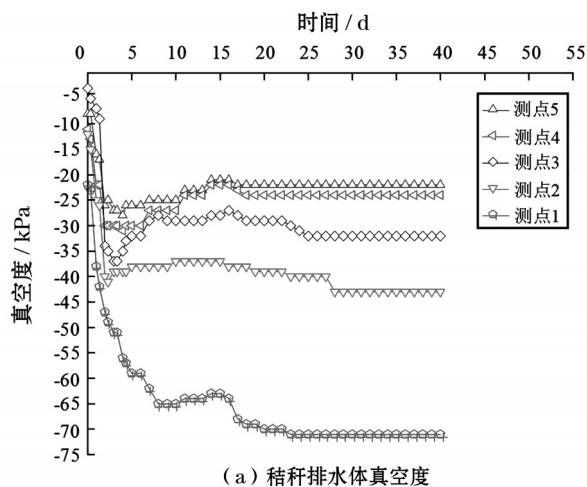
2 现场监测数据分析

2.1 真空度

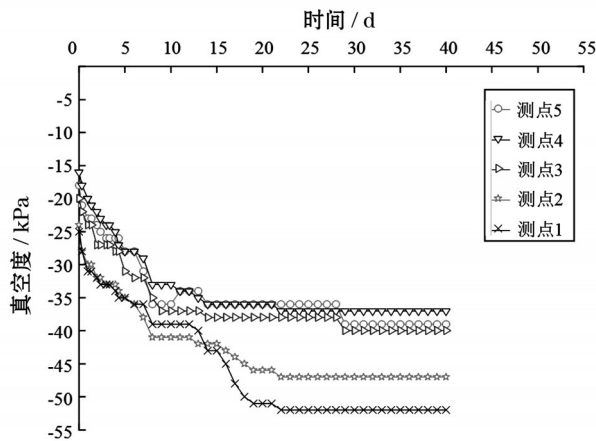
图3(a)为1号场地排水体中真空度监测结果。以P3为例,总体上,1号场地秸秆排水体中的真空度随着排水时间增加初期波动较为明显,15~20 d后真空度逐步稳定。

由图3可以看出,排水体中真空度随着测点位置不同有明显差别,其中测点1靠近真空接口,最终稳定在-75 kPa附近,相对较高。测点6离真空接口较远,其值稳定在-25 kPa左右。测点1与测点6的真空度差值达77%,表明接口位置对真空度的衰减有较大影响。图3(b)为2号场地塑料排水板中真空度监测结果。与秸秆排水体真空度变化规律类似,总体上,排水体中真空度随时间逐步增大,直至15 d左右达到稳定值,且距离真空接口越近处真空度越高。统计P3测点1与测点6的真空度,其差值为28.8%,真空度衰减受接口位置的影响比秸秆排水体中低。排水体中的测值最终稳定在-37~-52 kPa。但相对于秸秆排水体,塑料排水板中整体真空度衰减较为严重,其最大真空度相对于秸秆排水体下降约30%,但排水体中真空度随位置的变化不如秸秆排水体明显,表明塑料排水板的真空度分布在内部相对均匀,但是在接口处有较大真空损失。

图4为30 d时2个场地排水体中的真空度沿纵向的变化规律。由图4可以看出,两类排水体在远离接口处真空下降均较大,塑料排水板的真空度在-40~-50 kPa,总体偏低;秸秆排水体虽在靠近接



(a) 秸秆排水体真空度



(b) 塑料排水板真空度

图3 排水体真空度变化规律

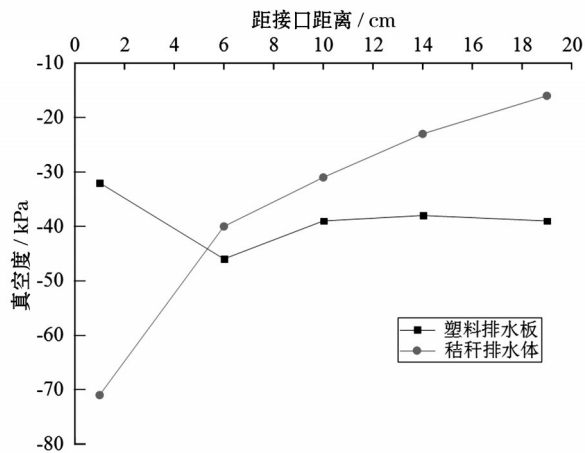


图4 排水体真空度沿纵向变化规律

口处具有较高真空度,但其真空度受位置变化的影响较大,远离接口处的衰减比塑料排水板更大。因此,秸秆排水体在布置时需要仔细考虑接口位置和数量,以达到最优的排水效果。

2.2 表层沉降量

真空预压结束后统计监测数据,每个场地取

5个沉降标的平均值。沉降量变化趋势如图5所示。由图5可以看出,随着真空荷载的施加,2个场地的沉降量线性增大,10 d内1号场地最大沉降速率达到2.5 cm/d,2号场地沉降最大速率达到2.72 cm/d,20 d后2个场地沉降速率逐步变缓,至40 d后沉降均趋于平缓,基本稳定在0.1 cm/d。现场地表沉降呈“碗口”形,即地表沉降从中心向两侧递减。在总体上,采用秸秆排水体和塑料排水板排水体在场地沉降规律上区别不大,1号场地沉降量终值27.94 cm,2号场地沉降量终值27.68 cm,表明水平布置秸秆排水体的固结排水效果与塑料排水板等同。

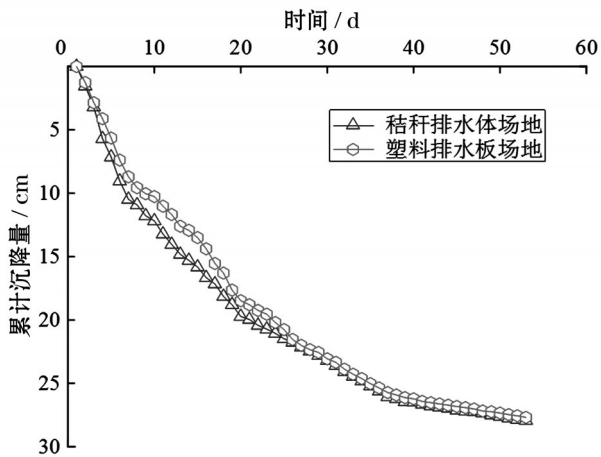


图5 表面沉降规律

2.3 土体抗剪强度

真空预压完成后进行十字板剪切强度测试,在场地中心位置钻孔取样。图6为不同场地测点的抗剪强度随取样深度的变化,由图6可见,抗剪强度总体偏低,且呈现随着深度先变小再变大的规律。表层的5 cm深度处因为离膜下真空排水位置较近,因此抗剪强度处于最高值,之后抗剪强度随深度的增加迅速下降,考虑2个场地横向排水体的布置位置分别是50 cm和150 cm,因此靠近该位置的测点对应的抗剪强度下降的幅度有明显减小趋势,在80 cm深度后大部分测点的抗剪强度逐步上升,至160 cm深度处达到较高值。在同一深度处,总体上距离中心点越近处抗剪强度越大,表明排水体附近因排水效果好,土体固结程度高,强度增长快。

由图6可见,1号场地表层土强度在21~42 kPa,随着测点位置下移,抗剪强度逐步降低,至80 cm深度处抗剪强度达到最小值7~10 kPa,在160 cm测点处抗剪强度再次增大至14 kPa附近。此外,离中

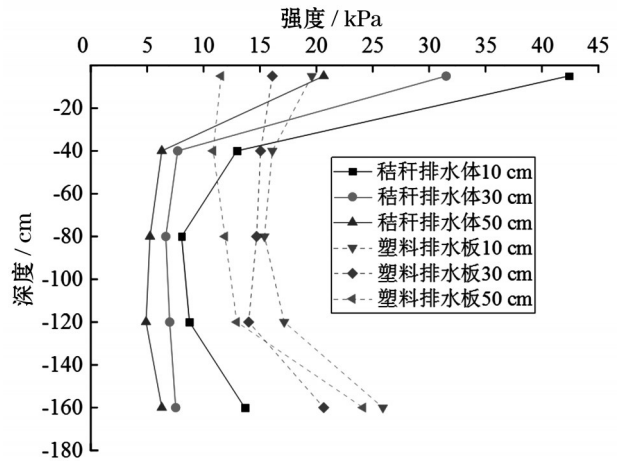


图6 抗剪强度随深度变化

心点不同水平距离处的强度差异并不显著。这表明秸秆排水体的布设位置对固结后土体强度的影响较大,可以适当加密秸秆排水体,有利于排水固结效果。1号场地土层固结后抗剪强度相对均匀,强度测值随水平位置变化影响较小。

2号场地抗剪强度随着不同深度变化,表层位置强平均达到13~20 kPa,显著低于1号场地。随着深度增加,抗剪强度逐步递减,至40 cm处强度下降趋势发生变化,部分测点强度达到最低值。测点深度在80 cm处抗剪强度开始逐步增加,直至160 cm深度处达到较高值24 kPa左右。总体上,2号场地平均抗剪强度最低在14 kPa左右,在相同深度上略高于1号场地。此外,2号场地相同深度不同水平位置处的抗剪强度差异较1号场地明显,以80 cm深度处强度值为例,距中心10 cm与50 cm处强度相差达到32.4%。分析结果表明,采用塑料排水板作为横向排水体处理疏浚淤泥场地,对场地抗剪强度的影响与采用秸秆排水体差别不大,但存在抗剪强度沿水平方向均匀性较差的情况。

图7为2个场地残余剪切强度结果,整体上强度值均较低,且沿深度方向的分布规律与原状样一致,其中1号场地的残余强度最低值约为1.7 kPa,最高值出现在表层,约为16.8 kPa,2号场地残余强度最低值约为5.5 kPa,表层最高值约10.9 kPa。

2.4 含水率

表3为处理后场地含水率随深度的变化情况,从总体上看,含水率从地表10 cm至160 cm处有逐步减小的趋势。但同一深度下,含水率近似相等。结果分析表明,经40余天真空排水处理,1号场地的平均含水率由初始状态的1.5倍液限(80%)降低至63%左右,2号场地的平均含水率由初始状态的

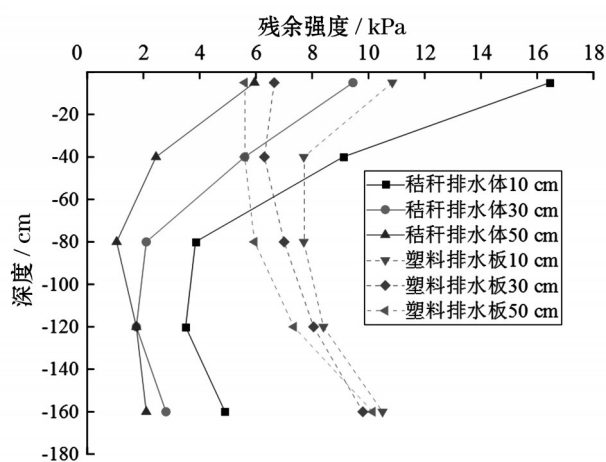


图7 残余强度随深度变化

1.5 倍液限(80%)降低至处理后的64%左右,处理效果略低于1号场地。此外,相较于2号场地,1号场地在水平方向上不同位置处的含水率变化较低,这表明经秸秆排水体加固后的土体均匀性更好。

3 结 论

本文依托念四河西段整治工程项目,开展了疏浚淤泥吹填场地真空预压排水处理现场试验。现场设置秸秆排水体和塑料排水板两类排水体系。通过现场试验对土体真空度、地表沉降、土体最终含水率以及十字板剪切强度进行测量,探讨了处理效果与经济性。通过分析相关数据,得到以下结论:

(1)塑料排水板与秸秆排水体处理后的土体沉降量相差较小,但秸秆排水体中真空度随着测点位置不同有明显差异,离接口较近处与较远处真空度相差较大。后续应考虑秸秆排水体接口位置和数量,以达到最优的排水效果。

(2)2个场地的含水率均由初始状态的1.5倍液限降低至63%左右,但经秸秆排水体加固后的土体在水平方向上均匀性更好。

(3)采用秸秆作为排水体较传统塑料排水板真

表3 不同场地含水率随深度的变化情况

单位:%

深度/cm	秸秆排水体 10 cm	塑料排水板 10 cm	秸秆排水体 30 cm	塑料排水板 30 cm	秸秆排水体 50 cm	塑料排水板 50 cm
5	63.89	67.52	63.84	61.66	63.88	74.23
40	65.48	61.41	65.51	61.75	65.45	69.82
80	64.80	66.13	64.84	63.79	64.78	65.92
120	65.92	68.87	66.02	59.97	65.88	66.65
160	57.37	64.94	57.33	53.62	57.39	58.21

空预压法具有良好的经济性,尤其是当秸秆排水体实现大批量机械化制作后价格仍可进一步下降。

参考文献:

- [1] 吴学春,孙衣春,丁建文,等. 南水北调东线工程3个疏浚泥堆场踏勘调查及试验[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(4):47-50.
- [2] 薛永忠. 探讨泥水分离技术在疏浚泥堆场处置工程中的应用[J]. 江苏水利,2018(3):11-14.
- [3] YU F L, HANG L, JUN W, et al. Experimental analysis of a staged vacuum preloading method with PHD-PVD for waste slurry treatment [J]. Acta Geotechnica, 2023, 19 (5):2487-2497.
- [4] 陈仕文,李栋,汪旭. 超深软土区真空预压对复合地基的影响及其防治[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(2): 690-700.
- [5] NGHIA T N, BERGADO T D, MAMORU K, et al. A simple

solution for prefabricated vertical drain with surcharge preloading combined with vacuum consolidation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1):304-322.

- [6] 宋丁豹,蒲诃夫,张纯雪,等. 水平排水板真空脱水-固化联合方法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(9):1897-1906.
- [7] 刘飞禹,李航,王军,等. 水平联合竖直排水板真空预压处理工程废浆试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):24-32.
- [8] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):201-225.
- [9] 王婧,李涛. 塑料排水板芯板及滤膜物理力学性能研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(S1):125-129.
- [10] 梁同好,严正春,刘超,等. 新型排水体麦秸秆真空预压排水室内实验[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35 (增刊1):3432-3440.

(下转第60页)

调控。通过精细化预报模型、多工程联合调度技术及智能决策支持系统的综合运用,提高洪水预警预报的准确性、调度决策的科学性及效果评估的及时性,为保障人民生命财产安全和促进社会经济可持续发展提供更加坚实的支撑。

参考文献:

[1] 吴绍洪,潘韬,杨勤业,等. 中国重大气象水文灾害风险

格局与防范[M]. 北京:科学出版社,2014.

[2] 尹志杰,王容,李磊,等. 长江流域“2017·07”暴雨洪水分析[J]. 水文,2019,39(2):86-91.

[3] 王浩,雷晓辉,尚毅梓. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):1-8.

[4] 贺恒伟. 人工智能与人类智能的博弈——由《最强大脑》引发的思考[J]. 科技资讯,2017,15(35):230-231.

(上接第44页)

[11] 梁同好,严正春,刘超,等. 新型排水体麦秸秆辊真空预压排水室内实验[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):3432-3440.

[12] XU G, YIN J, FENG X, et al. An improved method for dewatering sewage sludge using intermittent vacuum loading with wheat straw as vertical drains [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(7): 1-9.

[13] 冯哲源,陶小玉,徐桂中,等. 稻秸秆绳排水体真空固结处理高含水率疏浚淤泥可行性研究[J]. 江苏水利,2020(7):56-59,63.

[14] 李长辉,武航,程国勇,等. 不同排水板真空预压软土加固对比试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(10):2819-2827.

[15] 袁威,邓永锋,陈小兵,等. 秸秆排水板室内降解试验及现场应用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2023,53

(3):402-409.

[16] 王山,徐桂中,罗凤华,等. 秸秆排水体联合真空预压处理对疏浚淤泥有机质和养分影响研究[J]. 中国农村水利水电,2023(4):33-39.

[17] 韩启元. 秸秆排水体联合间歇式真空处理高含水率疏浚泥固结机理研究[D]. 南昌:东华理工大学,2023.

[18] 李伸鑫. 秸秆排水体真空预压处理高含水率疏浚淤泥固结特性研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2021.

[19] 王山,梁广雪,陈先勇,等. 真空预压处理高含水率疏浚泥室内足尺大模型试验研究[J]. 江苏水利,2022(12):1-6,12.

[20] 李波,程文亮,项存平,等. 大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):162-165.