

理化复合法改性淤泥早期压缩性影响因素研究

廖超¹, 杨玉娇², 章荣军^{2,3}, 刘斯杰², 武若宇²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司; 2. 武汉大学土木建筑工程学院; 3. 水资源工程与调度全国重点实验室)

摘要:通过一维压缩试验对不同初始条件下理化复合法处理后的高含水率淤泥(改性淤泥)压缩性进行研究,探讨分级加载总时长、养护时间、固化剂掺量和絮凝剂掺量对淤泥压缩曲线、压缩指数以及屈服应力的影响,并引入固有压缩曲线概念,对压缩数据进行归一化处理,进一步分析不同初始条件下的淤泥压缩性。结果表明:理化复合法改性淤泥压缩曲线具有明显双阶段特征,屈服后压缩指数为屈服前压缩指数的20倍左右;淤泥屈服应力随固化剂掺量的增加以及分级加载总时长的减小而线性增大;淤泥屈服应力随养护时间延长呈现对数增长规律;存在一个最优絮凝剂掺量使淤泥脱水效果最佳、结构性最强。

关键词:理化复合法;高含水率淤泥;压缩性;影响因素;屈服应力

Study on factors affecting early compressibility of mud treated by physicochemical composite method//Liao Chao¹, Yang Yujiao², Zhang Rongjun^{2,3}, Liu Sijie², Wu Ruoyu²(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd.; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management)

Abstract: A study on the compressibility of high-water-content mud treated by the physicochemical composite method under different initial conditions was conducted through one-dimensional compression tests. The effects of the total duration of step loading, curing time, dosage of solidifying agent, and dosage of flocculant on the compression curve, compression index, and yield stress of the mud were investigated. The concept of the intrinsic compression curve was introduced to normalize the compression data, enabling further analysis of the compressibility of the mud under different initial conditions. The results show that the compression curve of the mud treated by the physicochemical composite method exhibits a distinct two-stage characteristic, with the post-yield compression index being approximately 20 times that of the pre-yield compression index. The yield stress of the mud increases linearly with the increase in solidifying agent dosage and the decrease in the total duration of step loading. The yield stress of the mud follows a logarithmic growth pattern with prolonged curing time. There exists an optimal dosage of flocculant that maximizes dewatering efficiency and enhances structural strength.

Key words: physicochemical composite method; high-water-content mud; compressibility; influencing factors; yield stress

随着基础设施建设和水生态治理项目的不断推进,河道整治与清淤工程正大规模展开。据统计,我国每年疏浚淤泥产量达数亿立方米^[1-3]。水力疏浚自身工艺特点导致疏浚淤泥具有天然含水率高、压缩性强、抗剪强度极低、渗透系数小等不良工程性质,此外,部分淤泥受重金属污染,干化慢、利用难,且干化后土壤易板结,不利于植物生长^[4-5],这些性质导致其末端处理占地大、周期长,难以直接被资源化利用,如何经济、合理且高效地处置如此大体量的疏浚淤泥已然成为工程界的一大难题。

疏浚淤泥的高含水率特性导致直接固化法等传

统处置方法的功效大幅降低。为提高固化效率,解决疏浚淤泥处理难题,郑耀林等^[6-7]提出了絮凝-固化-真空预压联合处理方法,该方法通过絮凝作用提升了淤泥渗透系数,随后在真空预压作用下大幅降低了淤泥含水率,从而达到提升固化强度的目的。作为一种新兴的疏浚淤泥处理技术,理化复合法有效推动了疏浚淤泥资源化利用进程,不仅可以解决巨量疏浚淤泥的处置问题,还可以以废治废、变废为宝,为路堤等建筑工程提供理想填料。与其他主流处理方法(如机械脱水法、自然干化法、直接固化法等^[8])相比,理化复合法具有显著优势:①能高效脱

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2022BAA068);铁四院科技研究开发计划项目(2020K047)

作者简介:廖超(1987—),男,高级工程师,硕士,主要从事路基加固研究。E-mail:373024741@qq.com

通信作者:刘斯杰(1994—),女,副研究员,博士,主要从事泥固结固化耦合研究。E-mail:sjliu@whu.edu.cn

水,处理效果优于机械脱水法和自然干化法,后者常受限于脱水效率和气候因素;②能节约固化剂用量,更好地控制处理成本,尤其是在大规模应用时;③相比直接固化法,理化复合法对环境的影响较小,能够有效减少废水和废气排放,具有更好的环保性和可持续性,适用于多种复杂废弃物的处理。国内外一些学者也通过室内试验、现场试验等验证了理化复合法处理后的高含水率淤泥(以下称“理化复合法改性淤泥”)作为填土应用是可行的^[9-10]。例如:孙晓辉等^[11]通过一系列絮凝-固化以及絮凝-压滤-固化试验,发现经过该方法处理后的淤泥用于生产建材或作为流态填筑材料是可行的;徐志豪^[12]针对白鹤滩特高压虞城换流站清挖工程淤泥开展了理化复合法改性淤泥填料化现场试验,不仅验证了理化复合法在处理高含水率淤泥方面极具优越性与可行性,还提出了理化复合法改性淤泥填料化施工工艺。

理化复合法改性淤泥的压缩性对其早期固结变形及后期强度发展均存在重要影响,明确其压缩特性有助于进一步提升淤泥处理效率。然而,理化复合法改性淤泥在早期阶段涉及复杂的固结与固化反应,目前其固结-固化耦合机制仍未得到充分阐释,早期压缩特性尚不明晰。因此本文开展了一系列室内压缩试验,重点分析了理化复合法改性淤泥压缩特性的变化规律,探讨初始条件的改变对理化复合法改性淤泥压缩特性的影响,并引入归一化指数来进一步评价不同初始条件下理化复合法改性淤泥的压缩特性,以期为理化复合法改性淤泥工程应用提供技术支持。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验土样,即试验所用高含水率流泥,取自湖北省荆门市钟祥镜月湖疏浚工程。土样砂粒占土样总质量的0.32%,粉粒占54.80%,黏粒占44.88%;液限为51.12%,塑限为26.18%,天然含水率为113%,塑性指数为24.94,土样分类为CH,土样的粒径分布曲线如图1所示。该土样具有天然含水率高、细粒含量高、界限含水率高等高液限黏土的典型特点。

固化剂采用由型号为P·O 42.5的普通硅酸盐水泥以及等级为S95的高炉矿渣混合而成的复合固化剂,二者混合比例为1:1。絮凝剂采用阴离子聚丙烯酰胺溶液(阴离子聚丙烯酰胺颗粒与水的质量比为1:500)与含钙量大于95%的优等钙质生石灰(CaO)(试验方案中生石灰掺量为1.5%)混合而成

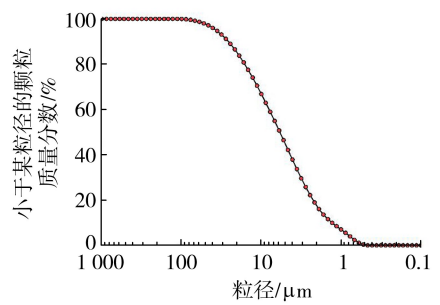


图1 淤泥粒径分布曲线

的无机-有机复合絮凝剂。

1.2 试验方法

所有外加剂掺量均按照掺入固相成分与干土质量之比计量。首先,向淤泥中按配比先后添加水、固化剂、絮凝剂,并快速搅拌直至均匀或者形成较明显的大絮团,制备匀质混合物。其次,将匀质混合物分3层装入直径为61.8 mm、高度为40 mm的环刀,制备环刀试样。然后,将制备好的环刀试样置于(20±2)℃温度下养护,为了防止试样挤出,制样采用分级加载方式加载压力(1、5、10、15、20、25、30 kPa)至设定养护压力 P 。最后,到设定养护时间 T 后进行一维快速固结压缩试验,按照10 min内压缩变形量变化值与此10 min初始压缩变形量的比值小于0.13为稳定标准逐级加荷(30、40、60、80、100、150、200、300、700、1000、1500 kPa),采用Guo等^[13]推荐的最终沉降预测方法获得每级固结完成时的压缩变形量。

1.3 试验方案

根据以往研究,固化剂掺量 w_c 、养护时间 T 对固化作用的影响最大^[14-15],絮凝剂掺量 w_f 对絮凝作用的影响较大^[16-17],分级加载总时长 T_L 对堆载效果具有明显影响。为了研究这些初始条件对理化复合法改性淤泥压缩性的影响规律,开展A、B、C、D 4组试验,具体试验方案见表1。其中, w_p 为阴离子聚丙烯酰胺掺量; w 为等效初始含水率,表示混合物中水与干土的质量比。为了确保试验结果的准确性,每个试验方案均由3个平行试样组成,当3个平行试样值的差异小于10%时,取3个平行试样的平

表1 试验方案

试验组次	$w/\%$	$w_c/\%$	$w_p/\%$	T_L/h	T/d
A	180	7.5、10.0、 13.5、15.0	0.125	2	1
B	210	5	0.175	2	0、0.5、1.0、 1.5、2.0、3.0
C	210	5	0.125、0.150、 0.175	2	1.0
D	210	5	0.175	2、3、 6、12	1.0

均值;如果3个试样中有1个试样异常,另外2个试样的误差小于10%时,就用小于10%的2个试样取平均;否则重新配制试样开展试验。

2 结果与分析

2.1 固化剂掺量的影响

图2为不同固化剂掺量下理化复合法改性淤泥的 e - $\lg p$ (e 为孔隙比, p 为施加的竖向压力)压缩曲线。由图2可知,压缩曲线具有“前缓后陡”的发展趋势,存在明显的屈服点,与固化土的压缩曲线具有相似性^[18]。当竖向压力小于屈服应力时,理化复合法改性淤泥结构性可抵抗外部荷载,因此孔隙比变化量较小,且屈服前压缩指数 C_s 随固化剂掺量的增加略有减小;当竖向压力大于屈服应力时,结构性被破坏,故压缩量突增,孔隙比变化量较大,然而不同固化剂掺量下屈服后压缩曲线平行,屈服后压缩指数 C_c 随着固化剂掺量的增加略有增大。屈服后压缩曲线随着固化剂掺量的增加逐渐右移,即屈服应力随着固化剂掺量的增加而增加。

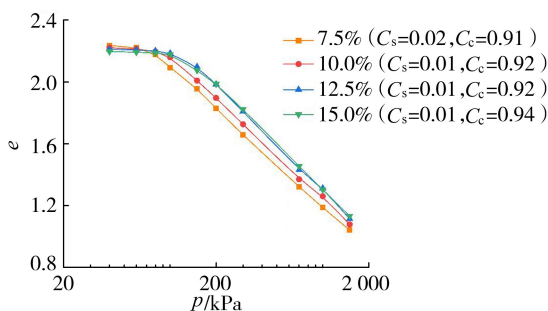


图2 不同固化剂掺量下 e - $\lg p$ 压缩曲线

屈服前后压缩性差异大,结构性对理化复合法改性淤泥的压缩性具有重要影响,因此有必要明确固化剂掺量对结构性的影响。图3为理化复合法改性淤泥的屈服应力 p'_y 随固化剂掺量的变化规律。当固化剂掺量较小时($w_c = 7.5\%$),在30 kPa恒压下,淤泥养护1 d后的屈服应力(73.10 kPa)远大于预压应力(30 kPa),因此理化复合法固化淤泥强度增长是固结和固化耦合作用引起的。随着固化剂掺量进一步增加,屈服应力逐渐增大,意味着固化剂掺量的增加会导致理化复合法改性泥浆的结构性和强度进一步提升。分析可知,固化剂掺量增加会导致固化反应增强,产生更多固化胶凝材料,因此改性淤泥的屈服应力和强度才显著增加。由图3还可知,屈服应力与固化剂掺量具有明显线性关系,线性拟合公式见图3。当利用理化复合法改性淤泥作为填料应用于路堤等建筑工程时,可以根据该式计算其屈服强度,或者根据强度要求利用该公式开展固化剂掺量设计工作。

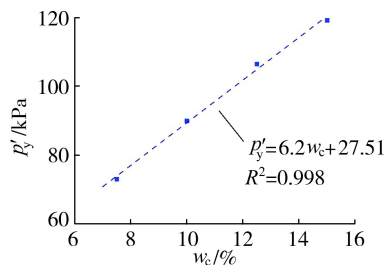


图3 屈服应力随固化剂掺量变化规律

2.2 养护时间的影响

图4为不同养护时间下理化复合法改性淤泥的 e - $\lg p$ 压缩曲线。养护时间为0 d的压缩曲线呈近似直线形态,这一现象与前述压缩曲线特征不一致。究其原因,固化剂的固化反应强烈依赖养护时间,当养护时间过短时,固化作用还未发挥或较弱,理化复合法改性淤泥与普通高含水率淤泥一样不具备结构强度,因此没有明显屈服点。随着养护时间的延长,固化反应不断进行,压缩曲线不断右移,屈服应力随养护时间逐渐增大。同时,可以观察到,除个别数据点外,理化复合法改性淤泥屈服前压缩指数总体上随养护时间增大逐渐减小,养护时间由0.5 d延长至3 d时,屈服前压缩指数减小了22%;然而养护时间对屈服后压缩指数影响较小,养护时间由0.5 d延长至3 d时,屈服后压缩指数仅增大了5%。

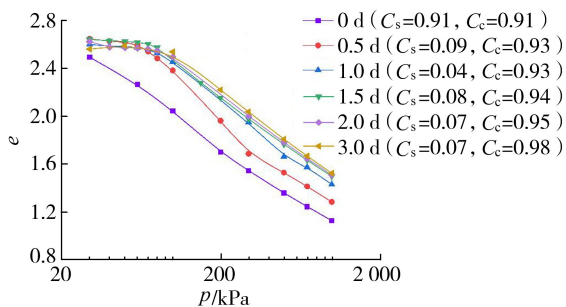


图4 不同养护时间下 e - $\lg p$ 压缩曲线

图5为理化复合法改性淤泥的屈服应力与养护时间之间的关系。由图5可知,屈服应力随养护时间延长呈先快速增长后慢速增长的变化规律,与固化淤泥强度随时间的增长规律类似。究其原因,随着养护时间延长,固化作用逐渐减缓,所以屈服应力增长速率随之减慢。根据试验数据特征,采用对数

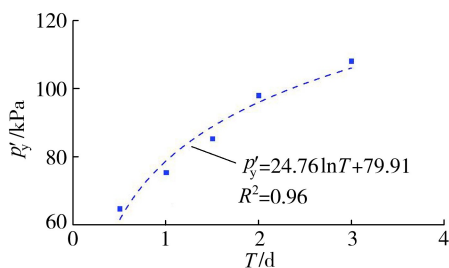


图5 屈服应力随养护时间变化规律

函数对其进行拟合,具体拟合公式见图 5,试验数据与该公式基本吻合,决定系数高达 0.96。故理化复合法改性淤泥填料化利用时,可参考该公式对屈服应力进行预测,进而获取压缩曲线。

2.3 分级加载总时长的影响

制样过程中采用分级加载方法替代实际中固结固耦合作用下有效应力逐渐增大的过程,也代表了不同的固结速度。不同分级加载总时长下理化复合法改性淤泥的 e - $\lg p$ 曲线如图 6 所示。由图 6 可知,分级加载总时长较大的淤泥屈服前压缩曲线位于分级加载总时长较小的淤泥屈服前压缩曲线的上方,屈服后压缩曲线接近平行。究其原因,随着分级加载总时长的延长,固结速度较慢的试样在固结过程中固结作用发展越充分,因此制样过程中理化复合法改性淤泥排水量减少,孔隙比较大。而加载完成时的较大含水量进一步减缓了后续固结作用,因而加载总时长较长的工况,屈服应力较小。

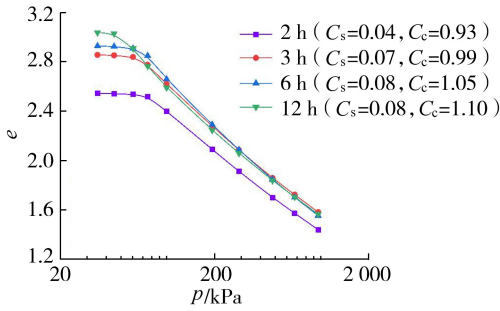


图 6 不同分级加载总时长下 e - $\lg p$ 压缩曲线

图 7 为屈服应力和分级加载总时长之间的关系。由图 7 可知,理化复合法改性淤泥屈服应力随加载进程总时长的延长而线性递减;淤泥屈服应力对分级加载总时长较为敏感,若分级加载总时长相差 24 h,理化复合法改性淤泥屈服应力将会减小 58 kPa,对于分级加载总时长为 2 h 的工况来说,相当于减小了 80% 的屈服应力。综上所述,理化复合法改性淤泥填料化利用时,需要重视分级加载总时长也就是固结速度对加固过程的影响,建议实际施工中增大渗透系数以提高固结速度。

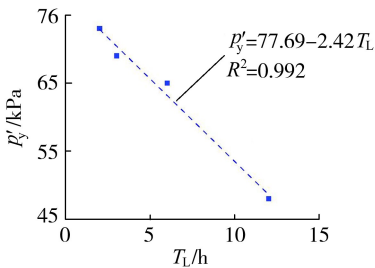


图 7 屈服应力随分级加载总时长变化规律

2.4 絮凝剂掺量的影响

在淤泥脱水过程中,合适的絮凝剂掺量会加快

排水速率,改善淤泥脱水性能,因此有必要分析絮凝剂掺量(本文中研究中指阴离子聚丙烯酰胺掺量)的影响。由图 8 可知,阴离子聚丙烯酰胺掺量 w_p 为 0.150% 时,理化复合法改性淤泥养护后孔隙比最小,脱水效果最好。屈服后压缩指数是屈服前压缩指数的 20 倍左右, w_p 为 0.175% 时,理化复合法改性淤泥屈服后压缩指数最大。

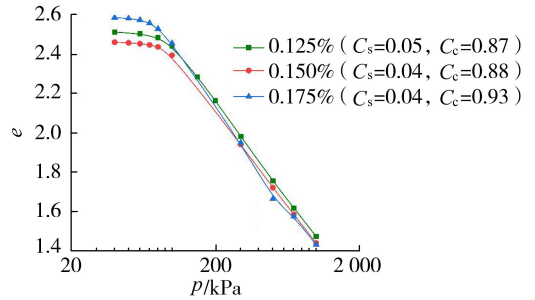


图 8 不同絮凝剂掺量下 e - $\lg p$ 压缩曲线

理化复合法改性淤泥的屈服应力和阴离子聚丙烯酰胺掺量之间的关系如图 9 所示。由图 9 可知,理化复合法改性淤泥的屈服应力随阴离子聚丙烯酰胺掺量的增多呈先增后减的变化规律,存在峰值。图中峰值位于阴离子聚丙烯酰胺掺量为 0.150% 附近,与最优脱水效果的掺量一致。分析原因可知,当 w_p 为 0.125% 时,由于絮凝剂量少,未能将土颗粒完全絮凝成团,不能为后续固化反应的进行提供更加优越的环境(屈服应力较小);当 w_p 为 0.175% 时,由于过量的絮凝剂容易将成团的土颗粒包裹住,从而滞后了后续固化反应的进行(屈服应力降低)。

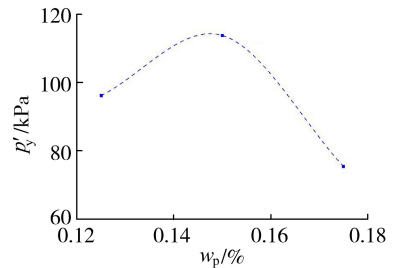


图 9 屈服应力随阴离子聚丙烯酰胺掺量变化规律

3 归一化评价

Burland 通过对初始含水量为液限的 1.0~1.5 倍范围内的重塑土压缩曲线进行分析,提出了重塑土归一化的固有压缩曲线的概念,并引入归一化参数孔隙指数 I_v ^[19]:

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} \quad (1)$$

式中: e_{100}^* 为有效应力等于 100 kPa 时对应的孔隙比; e_{1000}^* 为有效应力等于 1 000 kPa 时对应的孔隙比。

此后大量学者使用该方法来评价结构性土的压缩特性^[20]或者在此基础上衍生出其他归一化指数来评价土体的压缩特性^[21-22]、预测结构性土的压缩曲线^[23-25]以及建立结构性土的压缩模型^[26]。本文采用归一化参数孔隙指数差 ΔI_v (理化复合改性淤泥孔隙指数与重塑土孔隙指数的差值) 来进一步分析不同初始条件下理化复合改性淤泥的压缩性,如图 10 所示。

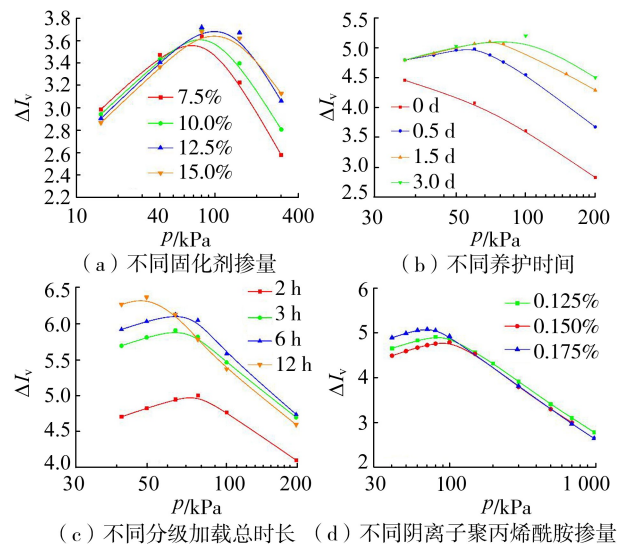


图 10 不同初始条件下 ΔI_v - $\lg p$ 曲线

图 10 中不同初始条件下理化复合改性淤泥的 ΔI_v 均为正数,说明在竖向压力 30~1 000 kPa 范围内,淤泥压缩曲线均位于固有压缩曲线的上方,表明由于结构性的存在产生了有别于重塑土的附加孔隙比。除了养护时间为 0 d 工况,其余工况下理化复合改性淤泥的孔隙指数差随竖向压力增长呈现先增后减的变化规律,存在拐点 (p'_y, I_{vmax})。若 ΔI_{vmax} 较大,意味着由于结构性引起的孔隙比差异越大,那么屈服后压缩性必然增大; p'_y 越大则抵抗外荷载能力越强,因此 ΔI_v - $\lg p$ 曲线能够较好地反映理化复合改性淤泥的压缩性与结构性。

由图 10 还可知,固化剂掺量、养护时间、阴离子聚丙烯酰胺掺量和分级加载总时长对理化复合改性淤泥的压缩性与结构性具有显著影响。理化复合改性淤泥的拐点将会随着固化剂掺量以及养护时间的增大而向右上方移动,可见屈服后压缩性和屈服应力将会增大;理化复合改性淤泥的拐点随分级加载总时长的增大逐渐向左上方移动,意味着屈服后压缩性随之增大,而屈服应力将会随之减小;存在一个中间阴离子聚丙烯酰胺掺量,其拐点位于右下方,此时理化复合改性淤泥的压缩性最小,屈服应力最大。

4 结 论

a. 理化复合改性淤泥压缩曲线呈现双阶段变化趋势:前期由于结构性的存在,压缩曲线几乎水平,压缩性很小;后期由于结构性的破损,压缩曲线发生陡降,压缩性突增,屈服后压缩指数为屈服前压缩指数的 20 倍左右。

b. 固化剂掺量、养护时间、絮凝剂掺量以及分级加载总时长对理化复合改性淤泥结构性具有显著影响:屈服应力随固化剂掺量增加以及分级加载总时长减小而线性增大;随养护时间延长呈对数增长规律;存在一个最优絮凝剂掺量,使其具备最优絮凝脱水以及结构性增长效果。

c. 理化复合改性淤泥的 ΔI_v - $\lg p$ 曲线具有先增后减的变化趋势,存在明显的拐点 ($p'_y, \Delta I_{vmax}$),屈服时由于结构性引起附加孔隙比较大,导致屈服后压缩性提升,结构性增强,抵抗外荷载能力将提高。

d. 在理化复合改性淤泥作为填土的工程应用中,应重视理化复合改性淤泥配比,选取合适的固化剂掺量、絮凝剂掺量,不仅能节约经济成本,还能有效改善淤泥脱水性能,提高其抵抗外荷载能力;应控制分级加载总时长在 2 h 内,发挥理化复合改性淤泥最佳优势;可根据本文提供的经验公式来估计理化复合改性淤泥抵抗外荷载能力。

参考文献:

[1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41. (Zhu Wei,Zhang Chunlei,Liu Hanlong,et al. The status quo of dredged spoils utilization [J]. Environmental Science & Technology,2002,25(4):39-41. (in Chinese))

[2] 前瞻产业研究院. 2014—2018 年中国疏浚工程行业发展前景与投资战略规划分析报告[R]. 北京:前瞻产业研究院,2014.

[3] 王瑞彩,吴腾. 改良垃圾焚烧底渣固化疏浚淤泥性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):93-100. (Wang Ruicai,Wu Teng. Experimental study on the performance of solidified dredged sludge by improved municipal solid waste incineration bottom ash [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(1):93-100. (in Chinese))

[4] 史燕南,占川,张超杰,等. 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):89-94. (Shi Yannan,Zhan Chuan,Zhang Chaojie,et al. Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):89-94. (in Chinese))

- [5] 周志美,贾东洋,邹非凡,等. 鄱阳湖固化淤泥耐蚀性能与微观结构试验研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):98-106. (Zhou Zhimei, Jia Dongyang, Zou Feifan, et al. Experimental study on corrosion resistance and microstructure of solidified sediment from Poyang Lake [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(6):98-106. (in Chinese))
- [6] 郑耀林,章荣军,郑俊杰,等. 絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(8):3107-3114. (Zheng Yaolin, Zhang Rongjun, Zheng Junjie, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8):3107-3114. (in Chinese))
- [7] 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]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(5):10-18. (Xu Zhihao, Zhang Rongjun, Zheng Junjie, et al. Experimental study on flocculation-solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5):10-18. (in Chinese))
- [8] 蒋大鹏,罗章,康宸瑞,等. 盾构泥浆脱水处理与资源化利用研究进展[J]. 环境化学,2025,44(7):2617-2638. (Jiang Dapeng, Luo Zhang, Kang Chenrui, et al. Research progress on dewatering treatment and resource utilization of shield tunneling slurry [J]. *Environmental Chemistry*, 2025, 44(7):2617-2638. (in Chinese))
- [9] 屠林伟. 理化复合法在淤泥(浆)固化处理中的适用性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [10] 陆展. 絮凝-固化联合处理超高含水率淤泥浆强度特性试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [11] 孙晓辉,郭柯雨,姬凤玲,等. 盾构泥浆絮凝-固化联合作用试验研究及宏微观探析[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(4):602-610. (Sun Xiaohui, Guo Keyu, Ji Fengling, et al. Macro- and micro-coupling effect of flocculation-solidification of waste shield slurry [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(4):602-610. (in Chinese))
- [12] 徐志豪. 基于理化复合法的流态淤泥填料化利用技术的机理与效益[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [13] Guo Wei, Chu Jian. New observational method for prediction of one-dimensional consolidation settlement [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(6):516-522.
- [14] Zhang R J, Santoso A M, Tan T S, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(12):2170-2181.
- [15] Liu Sijie, Zhang Rongjun, Zheng Junjie, et al. Strength development behavior of cement-treated mud with emphasis on early-stage performance [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(9):04023144.
- [16] 吴敏,黄英豪,尹洪斌,等. 典型无机絮凝剂对疏浚淤泥絮凝效果及出水水质影响研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(增刊1):79-83. (Wu Min, Huang Yinghao, Ying Hongbin, et al. Influences of typical inorganic flocculants on flocculation effects of dredging materials and quality of effluent water [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(S1):79-83. (in Chinese))
- [17] Lei Huayang, Xu Yinggang, Li Xin, et al. Effect of polyacrylamide on improvement of dredger fill with vacuum preloading method [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(9):04019193.
- [18] 石修松,杨健,万星,等. 非均质固化渣土的压缩特性与微观结构分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2024,54(5):1170-1181. (Shi Xiusong, Yang Jian, Wan Xing, et al. Analysis on compression characteristics and microscopic structure of heterogeneously stabilized lumpy soils [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(5):1170-1181. (in Chinese))
- [19] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3):329-378.
- [20] Chiu F C, Zhu W, Zhang L C. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials [J]. *Engineering Geology*, 2009, 103(1/2):1-12.
- [21] Liu M D, Carter J P. Modelling the destructuring of soils during virgin compression [J]. *Géotechnique*, 2000, 50(4):479-483.
- [22] Liu M D, Carter J P. Virgin compression of structured soils [J]. *Géotechnique*, 1999, 49(1):43-57.
- [23] Du Y J, Horpibulsuk S, Wei M L, et al. Modeling compression behavior of cement-treated zinc-contaminated clayey soils [J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(5):1018-1026.
- [24] Horpibulsuk S, Rachan R, Suddepong A, et al. Compressibility of lightweight cemented clays [J]. *Engineering Geology*, 2013, 159, 59-66.
- [25] Horpibulsuk S, Bergado D T, Lorenzo G A. Compressibility of cement-admixed clays at high water content [J]. *Géotechnique*, 2004, 54(2):151-154.
- [26] 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. (Ding Jianwen, Wan Xing, Feng Xusong, et al. Compression model for solidified soil of dredged clays with high water content [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(2):369-374. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-02 编辑:俞云利)