

水泥-粉煤灰固化海相淤泥质软土 力学特性室内试验研究

刘振建¹, 姚 达^{2,3}, 邱成春¹, 芦业磊^{2,3}, 刘 旭¹, 徐 可¹

(1. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000;

3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:针对滨海城市淤泥质软土的特殊地质条件引起的加固难题,依托淮河入海水道深厚软土段堤基加固工程,以水泥-粉煤灰为固化剂,开展了海相淤泥质软土固化室内试验,结合无侧限抗压强度和直接剪切测试,分析了淤泥固化土强度随水泥掺量、养护龄期、水泥-粉煤灰混合比的变化规律。结果表明,淤泥固化土的无侧限抗压强度和抗剪强度均随水泥掺量和养护龄期的增加而增大;粉煤灰的加入可显著提升淤泥固化土的无侧限抗压强度,增幅在10%~20%之间;淤泥固化土的黏聚力和内摩擦角与水泥掺量和养护龄期正相关,粉煤灰的加入使固化土黏聚力显著增大,内摩擦角的变化不显著。研究结果为指导海相淤泥质软土加固工程设计提供了理论和试验依据。

关键词:水泥-粉煤灰;海相淤泥质软土;无侧限抗压强度;抗剪强度;室内试验研究

中图分类号:TV42

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2024)11-0034-0005

Laboratory experimental study on the mechanical properties of cement-fly ash solidified marine silty soft soil

LIU Zhenjian¹, YAO Da^{2,3}, QIU Chengchun¹, LU Yelei^{2,3}, LIU Xu¹, XU Ke¹

(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

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

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

Abstract: In response to the reinforcement difficulties induced by the special geological conditions of silty soft soil in coastal city, an laboratory test was carried out on the solidification of marine silty soft soil using cement-fly ash as a solidifying agent based on the reinforcement project of embankment foundation of Huaihe River estuary channel. Combining the unconfined compressive strength (UCS) and direct shear tests, the variation of the strength of silty solidified soil with cement dosage, curing age and cement-fly ash mixing ratio was analyzed. Results indicate that both the UCS and shear strength of silt stabilized soil increase with the increasing cement content and curing age. The addition of fly ash can significantly increase the unconfined compressive strength of silt-solidified soil, with an increase of between 10% and 20%; The cohesion and internal friction angle of silt-solidified soil are positively related to the cement content and curing age. The addition of fly ash significantly increases the cohesion of solidified soil, but the change in internal friction angle is not significant. The research results provide theoretical and experimental basis for guiding the design of marine silty soft soil reinforcement engineering.

Key words: cement-fly ash; marine silty soft soil; unconfined compression strength; shearing strength; laboratory experimental study

收稿日期: 2024-07-31

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练项目(202310305131H)

作者简介: 刘振建(1988—),男,讲师,博士,主要从事岩土工程技术及应用研究。E-mail: zjliu@ycit.edu.cn

海相淤泥质软土属软弱地基,具有压缩性高、强度低、承载力弱等特点,对滨海城市建筑、码头、海港、堤坝等工程建设和运维带来很大挑战^[1]。在众多软土地基加固技术中,水泥土搅拌桩已成为最常用的方法,其原理是应用特制的机械将固化剂注入土层进行原位搅拌,利用固化剂与土体间的物理化学反应改变土性,形成整体、稳定的复合地基,从而优化软土地基的工程性质。该技术具有工艺简单、施工方便、成本低等优点,已在国内外软土地基加固领域得到了推广应用^[2-4]。

固化剂的类型及其掺量是影响水泥土搅拌桩加固效果的关键要素之一。传统水泥土搅拌桩一般以水泥为固化剂,其掺量一般为15%~20%^[5]。然而,水泥生产过程中将消耗大量的能源和资源,同时会排放大量的二氧化碳等温室气体,因此,在保证加固效果的前提下,利用低碳、廉价、利废材料部分或完全替代水泥,是目前工程中常用的方法。国内外学者已对多种固化剂进行了比选,取得了丰富的研究成果。如,王东星等^[6]利用活性MgO-粉煤灰固化淤泥,揭示了其宏观效能及内在机制;任瑞波等^[7]利用水基聚合物-水泥固化黏土,明确了固化剂掺量对强度的影响,并探讨了强度形成机理;李丽华等^[8]利用稻壳灰-水泥进行淤泥固化,发现稻壳灰能显著提高固化土强度,其最优掺量为15%;王宁等^[9]应用水泥-废旧混凝土细骨料固化海相淤泥,发现固化土的无侧限抗压强度随水泥和废旧混凝土细骨料掺量增加而增大;杨振甲^[10]采用矿渣-粉煤灰二元地聚物固化淤泥,从微观角度揭示了其固化机理。

粉煤灰是火电厂燃煤产生的大宗固体废弃物,也是一种优质的建筑材料,已被广泛应用于建筑工程领域。研究表明,粉煤灰的火山灰效应可有效改善混凝土的物理性能,提高其强度和耐久性^[11-12]。基于此,本文依托淮河入海水道深厚软土段堤基加固工程,以水泥-粉煤灰为固化剂,开展海相淤泥质软土固化试验研究,分析水泥掺量、养护龄期、水泥-粉煤灰混合比对固化土强度的影响,揭示水泥-粉煤灰固化土的强度发展规律,为指导海相淤泥质软土加固工程设计提供理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥取自位于盐城市阜宁县境内的淮河入海水道深厚软土段,采样深度为3~5 m。淤

泥为灰色粉质黏土,在场内分布广泛,具有较强代表性,其基本物理参数列于表1。

表1 淤泥的基本物理参数

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	比重	塑性指数	孔隙比
41.7	53.1	24.7	2.68	22.1	1.15

试验用水泥选用42.5级普通硅酸盐水泥,粉煤灰取自山东烟台某火电厂。水泥和粉煤灰的主要化学成分及含量如表2所示。

表2 原材料主要化学成分及含量

原材料	化学成分含量/%					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO
水泥	21.51	4.22	64.52	4.23	0.32	1.74
粉煤灰	54.66	10.05	19.45	7.06	2.38	1.15

1.2 试样制备

按照表3所列的试验方案,将水泥、粉煤灰、淤泥搅拌均匀后制样。其中,1~3组为对照组,在淤泥中只掺入水泥,掺量分别为13%、15%和18%;4~6组为试验组,掺入水泥-粉煤灰混合物,水泥掺量分别为10%、13%、15%,粉煤灰掺量均为6%。首先将固化剂配置成水灰比为0.8的浆液,然后应用小型搅拌机将固化剂与淤泥进行充分混合。

表3 试验方案

组别	组号	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	水灰比
对照组	1	13		0.8
对照组	2	15		0.8
对照组	3	18		0.8
试验组	4	10	6	0.8
试验组	5	13	6	0.8
试验组	6	15	6	0.8

无侧限抗压强度试验采用静压法制备试件,其尺寸为 $\phi 40\text{ mm}\times h 80\text{ mm}$,试样脱模后进行标号、称重、密封,然后放入标准养护室进行恒温恒湿养护($T=(20\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$; $RH\geq 90\%$),养护龄期分别为7、28、60、90 d。

直接剪切试验采用击实法制备环刀试样,其尺寸为 $\phi 61.8\text{ mm}\times h 20\text{ mm}$,试验前将试样放入标准养护室进行养护,养护龄期分别为7 d、28 d。

1.3 试验方案

满足设定的养护龄期后,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)开展无侧限抗压强度试

验和直接剪切试验。为缩减误差,每组试验制备3个平行试样,取其平均值作为最终的结果。

无侧限抗压强度测试应用电动无侧限压力实验仪,其最大轴力为3 kN,精度为1 N,加载速率设为1 mm/min。将待测试样两端涂抹一层凡士林,放入仪器上下传压板正中间,打开仪器开关,开始试验并记录数据,直至试样破坏。

直接剪切试验采用快剪法,应用全自动四联直剪仪,通过加砝码控制法向压力,压力值分别设置为100、200、400、600 kPa,剪切速率设置为0.8 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 水泥掺量及龄期对固化土强度的影响

对照组淤泥固化土无侧限抗压强度随水泥掺量及养护龄期的变化规律如图1所示。由图可知,随着水泥掺量的增加,试样的无侧限抗压强度单调递增,这是由于水泥掺量的增加有利于水化反应进行,产生更多的胶凝物质,使淤泥固化土强度提高。养护龄期28 d试样的无侧限抗压强度约为养护龄期7 d试样的1.5倍,养护龄期60 d试样的无侧限抗压强度约为养护龄期7 d试样的2.5倍,养护龄期90 d试样的无侧限抗压强度相比养护龄期60 d的试样增长不明显。可见,在最初的28 d内,固化土的强度增长尤为明显,随着养护龄期的延长,无侧限抗压强度的增长速率逐渐趋于缓慢。

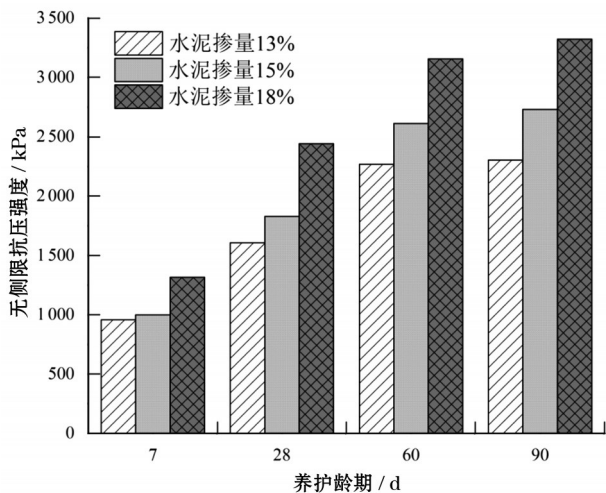


图1 无侧限抗压强度随水泥掺量及养护龄期的变化

对照组淤泥固化土抗剪强度随水泥掺量和法向应力的变化规律如图2所示。同时,根据抗剪强度值,得出不同条件下的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,见表4。

结合图2和表4可知,与无侧限抗压强度类似,

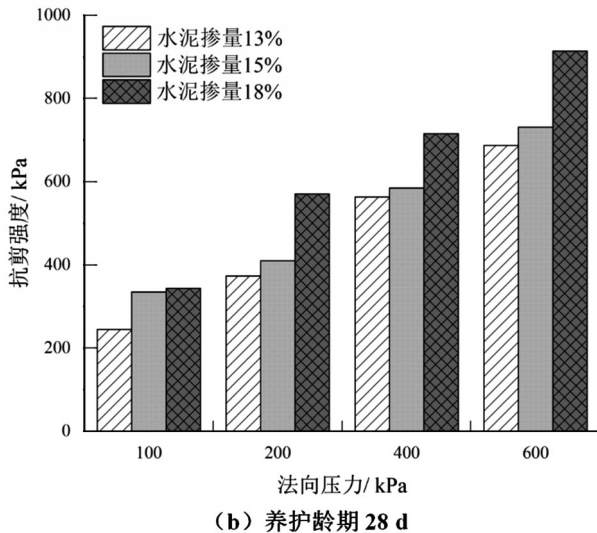
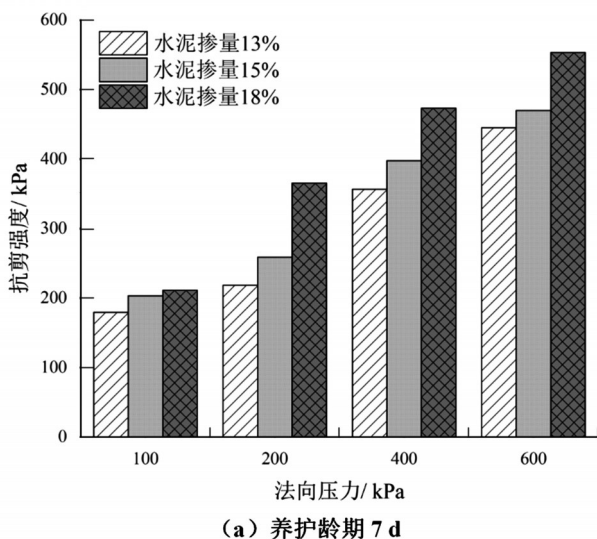


图2 抗剪强度随水泥掺量及养护龄期的变化

表4 不同水泥掺量的黏聚力和内摩擦角

水泥掺量	养护龄期/d	c /kPa	$\varphi/(^{\circ})$
13%	7	120.2	28.91
	28	175.8	38.95
15%	7	153.9	28.78
	28	238.6	37.93
18%	7	177.7	33.83
	28	291.2	46.69

试样抗剪强度也随着水泥掺量和养护龄期的增加而增大。养护龄期从7 d增加到28 d时,相同法向压力下的剪应力明显增加;当养护龄期和法向压力相同,剪应力随水泥掺量的增加而显著增大;当水泥掺量相同时, c 和 φ 的值均随养护龄期增加而增大;当养护龄期相同时, c 和 φ 的值均随水泥掺量增加而增大。

2.2 水泥-粉煤灰对固化土强度的影响

试验组淤泥固化土的无侧限抗压强度试验结果如图3所示。由图3可知,无侧限抗压强度随水泥掺量和养护龄期的增加呈现递增趋势。

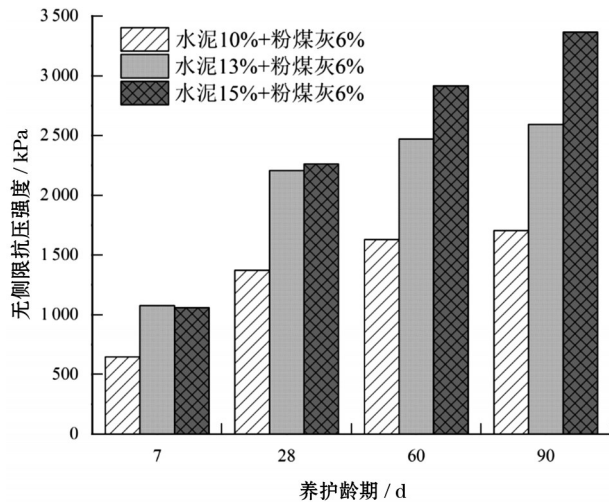


图3 无侧限抗压强度随水泥-粉煤灰掺量的变化

为便于对比,将水泥掺量为13%和15%的试验组与对照组绘制于同一坐标系,结果如图4所示。由图4可知,养护龄期为7d时,粉煤灰的加入对试样无侧限抗压强度的提升效果不明显;随着养护龄期的延长,粉煤灰的作用效果开始逐渐显现。水泥掺量为13%时,粉煤灰的加入使无侧限抗压强度提升约10%;水泥掺量为15%时,粉煤灰的加入使无侧限抗压强度提升约20%。总体来看,粉煤灰的加入有利于试样强度的提升,增幅与水泥掺量和养护龄期有关。

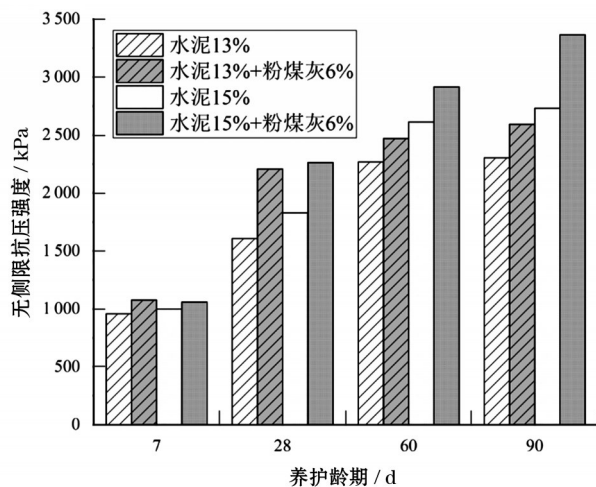
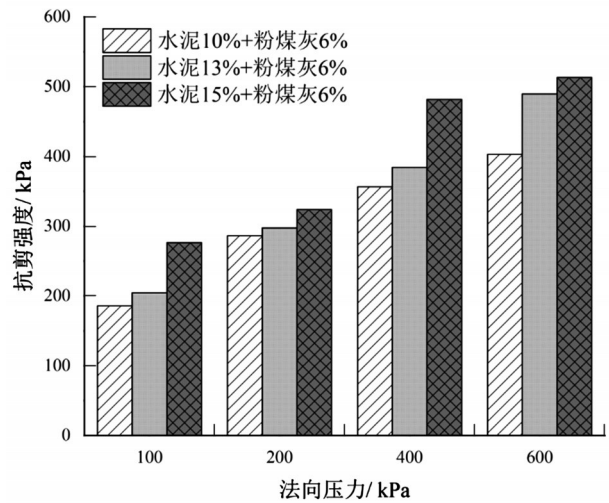
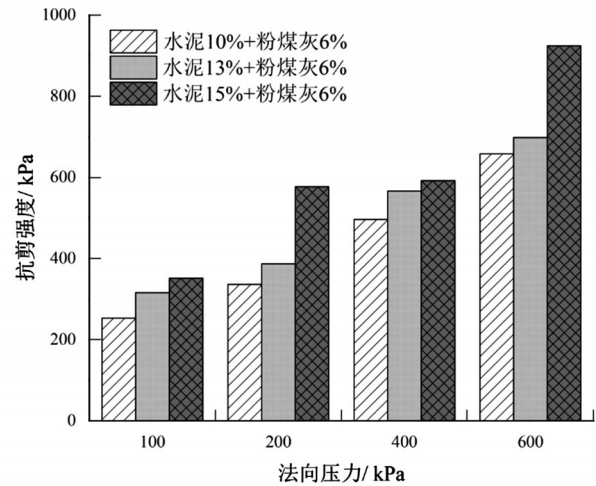


图4 试验组与对照组无侧限抗压强度对比分析

试验组淤泥固化土的抗剪强度随水泥掺量和法向应力的变化规律如图5所示。由图5可以看出,剪应力随竖向压力、水泥-粉煤灰掺量和养护龄



(a) 养护龄期 7 d



(b) 养护龄期 28 d

图5 抗剪强度随水泥-粉煤灰掺量的变化

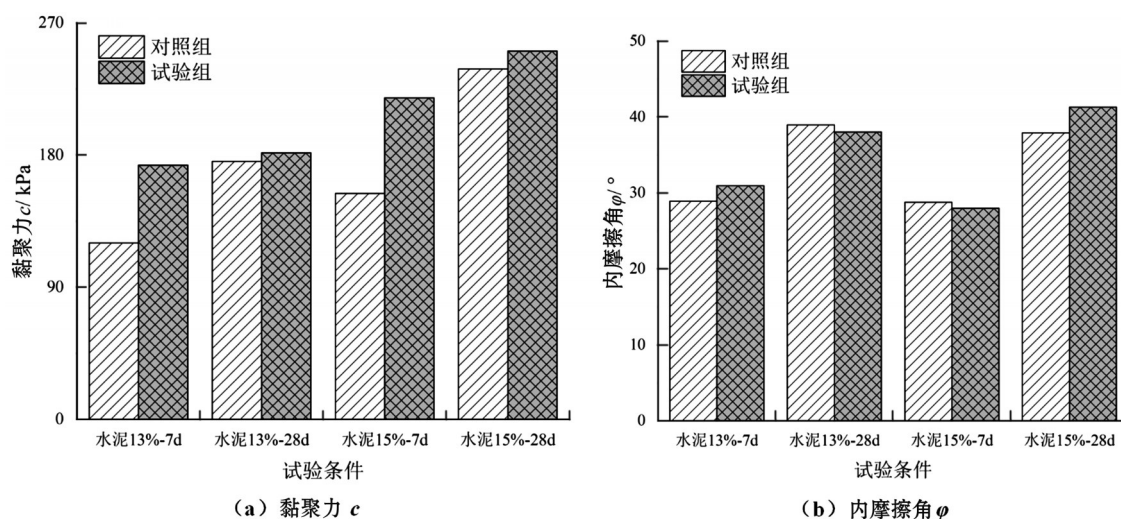
期的增加而增大。

根据抗剪强度数据,获得不同水泥-粉煤灰掺量下的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的值,见表5。将表5中水泥掺量为13%和15%的 c 和 φ 值与表4中对照组的相应数据进行对比分析,结果如图6所示。

由表5可知,相同水泥-粉煤灰掺量下, c 和 φ 的值与养护龄期呈正相关关系;相同养护龄期下, c 的

表5 不同水泥-粉煤灰掺量的黏聚力和内摩擦角

项目	天数 / d	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
水泥 10%+ 粉煤灰 6%	7	144.5	22.13
	28	174.9	30.86
水泥 13%+ 粉煤灰 6%	7	173.2	30.97
	28	181.6	38.04
水泥 15%+ 粉煤灰 6%	7	218.9	27.98
	28	250.9	41.30

图6 试验组与对照组的 c 和 ϕ 值对比分析

值随水泥掺量增加而单调递增, ϕ 的值随水泥掺量的变化规律不明显。由图6可知,养护龄期为7 d时,试验组的 c 值较对照组显著增加,养护龄期为28 d时,试验组与对照组的 c 值较为接近,说明粉煤灰加入有助于提升淤泥固化土的早期强度,对其长期强度的影响不显著。另外,不同养护龄期、不同水泥掺量下试验组与对照组的 ϕ 值较接近,没有表现出明显的规律。

3 结 论

本文依托淮河入海水道深厚软土段堤基加固工程,以水泥-粉煤灰为固化剂,开展了海相淤泥质软土固化试验研究,主要结论如下:

(1)淤泥固化土的无侧限抗压强度和抗剪强度均随水泥掺量和养护龄期的增加而增大;

(2)粉煤灰的加入可显著提升淤泥固化土的无侧限抗压强度,增幅在10%~20%之间;

(3)淤泥固化土的黏聚力和内摩擦角与水泥掺量和养护龄期正相关,粉煤灰的加入使固化土黏聚力显著增大,内摩擦角的变化不显著;

(4)煤灰加入有助于提升淤泥固化土的早期强度,对其长期强度的影响不显著。

参考文献:

- [1] 吕业锋,杜建成,唐昌意,等.海相淤泥水泥土变形特性试验研究[J].建筑结构,2023,53(15):152-156,95.
- [2] 姚达,王希晨,赵虎,等.三维水泥土搅拌桩成桩工艺现场试验[J].江苏水利,2023(7):63-67.
- [3] 章定文,曾彪,刘涉川,等.考虑胶结损伤的水泥土搅拌

桩加固路堤破坏特征[J].中国公路报,2023,36(10):131-141.

- [4] CEN H, ZONG Z, HUANG D, et al. Study of the dynamic interactions between helix-stiffened cement mixing piles and soft soil under oblique incidence of SV waves in arbitrary space [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 171:106388.
- [5] 于志龙,陈子明,刘华,等.连宿高速公路连云港段双向搅拌喷喷桩试桩数据分析[J].现代交通技术,2024,21(1):34-40.
- [6] 王东星,王宏伟,王瑞红.活性MgO-粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3717-3725.
- [7] 任瑞波,宋扬,王振,等.水基聚合物-水泥复合固化土强度规律研究[J].山东建筑大学学报,2023,38(4):58-65.
- [8] 李丽华,韩琦培,杨星,等.稻壳灰-水泥淤泥固化土力学特性及微观机理研究[J].土木工程学报,2023,56(12):166-176.
- [9] 王宁,边晓亚,陈家乐,等.水泥-废旧混凝土细骨料固化海泥的强度和变形特性[J].武汉工程大学学报,2023,45(2):233-236.
- [10] 杨振甲,何猛,吴杨,等.矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(2):693-703,724.
- [11] 武亚军,陈宸,崔春义,等.碱渣及粉煤灰对水泥固化底泥强度影响研究[J].大连理工大学学报,2023,63(6):630-636.
- [12] 程强强,姚越,崔胥阳,等.高掺量粉煤灰淤泥固化土无侧限抗压强度试验研究[J].新型建筑材料,2023,50(10):117-120.