



振冲密实法 在人工吹填砂土地基处理中的应用

宋大军¹, 严军², 卢一林², 许奎鑫¹, 徐小迟¹, 高文斌¹, 程昭¹

(1. 长江武汉航道工程局, 湖北 武汉 430014; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要: 吹填土含水率较高, 有着低强度、高压缩性、欠固结等不足, 现有强夯、加填料固结等方式加固效果不理想。依托厦门大小嶝造地工程, 通过控制不同变量, 如振冲频率、振冲方式和施工手段, 开展人工吹填砂土地基加固试验, 确定适合吹填砂土地基的频率参数和振冲方式。结果表明: 振冲密实法能够满足吹填砂土地基的加固要求, 施工后承载力和标贯击数得到较大提高, 加固后承载力达到 150 kPa, 一半的试验区标贯击数超过 30 击, 满足后续施工标准要求, 证明了振冲密实法适用于吹填砂土地基的加固, 土体达到中密状态; 该方法能够降低施工消耗, 提高经济效益。

关键词: 振冲; 吹填砂土; 加固效果

中图分类号: TU472; U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0188-06

Application of vibro-compaction method in treatment of artificial dredger fill sandy soil foundation

SONG Dajun¹, YAN Jun², LU Yilin², XU Kuixin¹, XU Xiaochi¹, GAO Wenbin¹, CHENG Zhao¹

(1. Changjiang Wuhan Waterway Engineering Bureau, Wuhan 430014, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Dredger fill with high moisture content, has disadvantages of low strength, high compression, and underconsolidation. It is unsatisfactorily reinforced by strong tamping and consolidation with filler. Relying on Daxiaodeng land creation project in Xiamen, we apply different parameters of vibro-compaction to the reinforcement of artificial dredger fill sandy soil foundation, such as vibration frequency, vibration mode and construction method, and determine the frequency parameter and vibration mode suitable for dredger fill sandy soil foundation. The results show that dredger fill sandy soil foundation is effectively reinforced by vibro-compaction method. After the construction treatment, the bearing capacity of the foundation and the standard penetration hit number are improved. After being worked, the foundation has a bearing capacity of 150 kPa, and the standard penetration hit number for about half of test area exceed 30, which meets the standard for subsequent construction. The soil reaches medium density state. It proves that the vibro-compacting method is suitable for the reinforcement of dredger fill sandy soil foundation. The method can reduce the construction consumption, and improve the economy and benefit.

Keywords: vibroflotation; dredger fill sandy soil; reinforcement effect

最近十几年, 随着全国经济的发展, 城市发展对土地资源的需求突飞猛进, 尤其以上海、大连、厦门等沿海城市最为迫切, 导致厦门等城市大兴填海造陆工程, 这些工程前期最重要的一步便是加固通过吹填土形成的地基。填海工程围堰

造陆形成的土地基主要由吹填土^[1]、淤泥等形成, 地基复杂且承载力不高, 无法满足建筑需要, 要想满足提高地基承载能力和稳定性, 则迫切需要一种成熟的技术可适用于加固人工吹填土地基, 本文即是开展振冲密实法对人工吹填砂土地基的

收稿日期: 2023-12-31

作者简介: 宋大军 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道施工管理。

加固处理研究。

振冲密实法^[2]是一种利用振冲器产生的振动和高压水冲的作用达到液化土地基^[3]、重新排列砂土颗粒、密实砂土结构、提高地基承载能力的方法。振冲密实法施工时间短、施工要求不高且无需增加向土地基中增加填料,常被应用于地基处理工程中。一般认为,振冲密实法^[4]可用于中砂地基和黏粒含量小于 10% 的粗砂地基,因吹填砂土地基^[5]通常具有地下水位高、含水率高、地基复杂、稳定性不高等不利条件,对于吹填砂土地基的应用则较为常见,但一般都是施工经验,缺乏具体参数指导。因振动密实采用高频振动破坏土体结构,能够有效降低土体含水率、提高地基承载力和抗剪能力,无需额外填料,施工方便,满足吹填土地基的加固形式,故采用此方式展开研究。

厦门大小嶝造地工程采用耙吸船采运、绞吸船吹填海砂的方法填海造陆,形成的陆域砂土主要包含粗砂和中砂,对振冲密实法有着一定的适用性。故在此工程基础上,提出振冲密实法^[6]加固吹填砂土地基的应用研究,为后续施工设计、指导施工、控制成本、提高质量提供一定的指导作用。

1 振冲密实法加固原理

使用吊机悬吊振冲器在点位正中,振冲器在水平振动作用、高压水冲和自身重力作用下按照一定的速度沉入孔底,在注水后,外部激振的反复作用挤密周围砂土^[7],砂土的孔隙水压力上升,孔隙水无法及时排出,使得骨架应力逐渐消失,砂土处于悬浮状态,几乎完全丧失抗剪能力,发生砂土液化现象。短暂的砂土液化能够快速重新排列砂土颗粒,排出孔隙水,颗粒孔隙减少,同时上层砂土自行沉降,砂土地基更加密实,砂土地基承载能力、抗剪能力和抗液化能力得到了较大的提高。砂土抗剪强度的计算公式为:

$$\tau = (\sigma_0 - p_w) \tan \varphi \quad (1)$$

式中: p_w 为孔隙水压力, σ_0 为有效压力, φ 为动力作用下土的内摩擦角^[8]。

砂土受到外部振动作用时,其抗剪强度的计

算公式为:

$$\tau = [\sigma_0 - (p_{w0} + \Delta p_w)] \tan \varphi \quad (2)$$

式中: Δp_w 为振动过程中孔隙水压力变化大小, p_{w0} 为振动前孔隙水压力。

由式(1)、(2)可知,随着振动过程中 Δp_w 逐渐增大, p_{w0} 与 Δp_w 之和趋近于 σ_0 ,此时砂土抗剪强度逐渐减小至消失,砂土发生液化。砂土液化后在振冲器振动作用和上层砂土自重作用下砂土重新密实^[9],排出孔隙水,达到减小孔隙、提高密度和承载力的目的。

2 工程概况和试验方案

2.1 工程概况

厦门大小嶝岛造地工程为厦门新机场建设的前期工程,填海形成陆域以沿海滩涂、淤泥、吹填砂土为主,选取造地标段 2 进行振冲试验,此次施工面积为 29.414 万 m^2 ,试验区取其中的 3 000 m^2 。

2.2 试验方案

试验场地为大小嶝造地工程(面积约 9.81 km^2)陆域形成及地基处理的 8.23 km^2 造地工程,采用振冲技术,处理深度约 8.6 m,区域内地震烈度为 7 度。

振冲处理现场根据振冲方式、振冲频率、施工工艺^[10],把施工区划分出 6 个 500 m^2 、共 3 000 m^2 的试验区,见图 1。试验区振冲参数^[11]见表 1,其中振冲方式分为单机振冲和双机共振;施工工艺分为一次下沉、提杆后结束(直插)和一次结束后二次下沉(反插)。振冲器参数见表 1,土层物理力学参数见表 2,Ⅳ区和Ⅴ区布置见图 2。试验后标贯孔位取四振孔中心(以 3 m 间距正三角形布置为例),见图 3。

表 1 试验区振冲参数

试验区	振冲频率/ kW	布点 方式	振冲 方式	施工 工艺
I	100		单振	振动直插
II	100		共振	振动直插
III	100	正三角形	单振	振动反插
IV	100	布置	共振	振动反插
V	130		单振	振动直插
VI	130		共振	振动反插

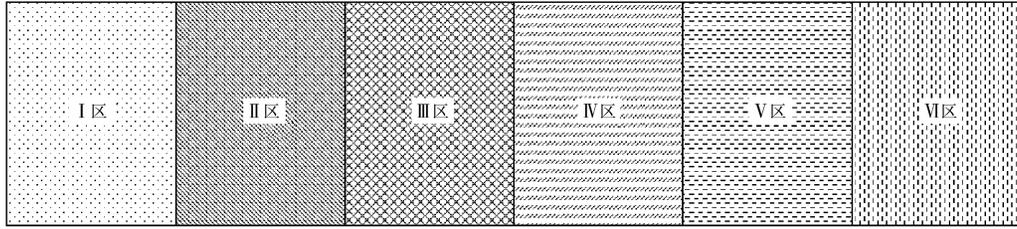


图1 振冲处理试验区分布

表2 土层物理力学参数

土层名称	厚度/m	密度/(t·m ⁻³)	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
①吹填淤泥	1.5~3.0	1.50	3	4.5	15.0	0.30
②吹填砂砾	2~4	1.65	25	18.7	25.0	0.30
③粉质黏土	2.5	1.86	5	40.0	13.1	0.35
④吹填砂砾	3	1.82	20	20.0	20.8	0.30
⑤海积黏土	10	1.63	15	10.0	15.0	0.30

表3 振冲器参数

型号	电机功率/kW	力矩/(N·m)	转速/(r·min ⁻¹)	激振力/kN	振幅/mm	振冲器尺寸/mm	
						外径	长度
ZCQ-100	100	83.9	1 460	190	8	420	3 100
ZCQ-130	130	102	1 480	220	10	420	4 470

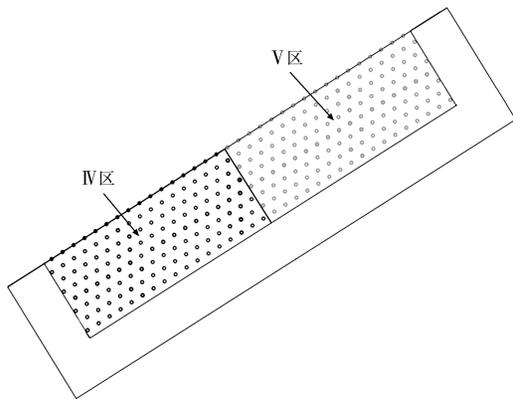


图2 IV和V区布置

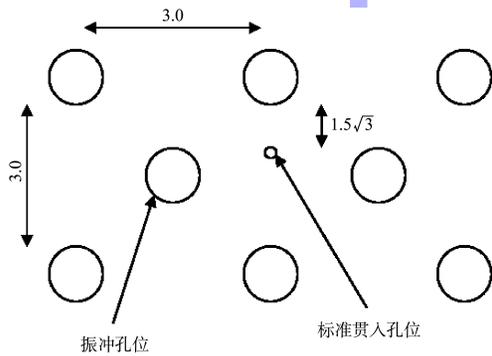


图3 标准贯入孔位 (单位: m)

3 施工设备

施工设备包括移动吊机、振冲器、高压水泵等,根据试验前测试的土体固有频率采用 ZCQ-100 和 ZCQ-130 规格振冲器,各项参数见表 3。

4 施工质量控制措施

1) 施工前应检查振冲器的性能,电流表、电压表的准确度;施工中应检查密实电流、供水压力、供水量、孔底留振时间、振冲点位布置、振冲器施工参数等。

2) 振冲施工操作时,确保施工振冲频率、振冲时间、水压、水量等参数合适。

5 试验结果分析

5.1 密实后沉降量

根据振冲频率(100 和 130 kW)、振冲方式(单振和共振)、施工工艺(一次沉杆和反插沉杆)把振冲试验区分作 6 个单独小型试验区,在施工中记录单独试验区的沉降量,并对施工前与施工后的不同区域土体开展标准贯入试验、荷载试验和环刀法试验,依据试验结果进行对比分析。

对比 I、III 区, II、IV 区, V、VI 区的沉降发现,采用直插和反插的工艺对沉降量的影响不

大, 平均仅提高 4.2%, 考虑一次直插完成地基密实后, 二次反插基本不再提高, 因此吹填砂土适合振冲密实法, 一次施工即可完成。试验区沉降量见表 4。振冲完成后对地面进行面夯碾压, 面夯碾压后对照试验区的沉降量差距在 1 cm 左右, 可忽略不计。直插相比反插一次施工消费更低、经济性高, 因此可采用直插式施工。

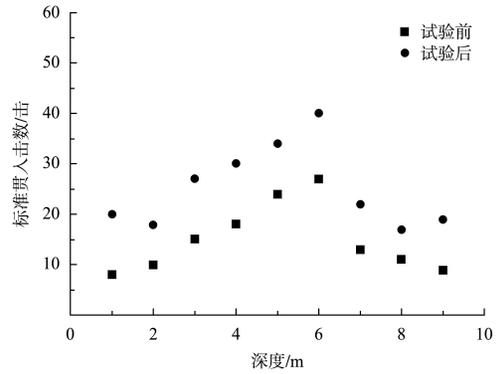
表 4 试验区沉降量

振冲区	振冲方式	振冲功率/kW	施工工艺	沉降量/cm
I 区	单振	100	振动直插	40.25
II 区	共振	100	振动直插	45.89
III 区	单振	100	振动反插	42.80
IV 区	共振	100	振动反插	46.85
V 区	单振	130	振动直插	46.53
VI 区	共振	130	振动反插	47.22

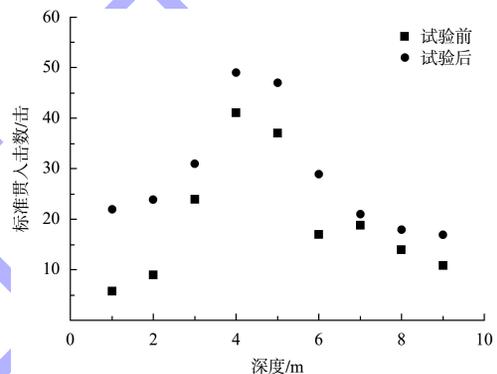
5.2 处理前后标准贯入试验结果

处理区试验前后的标贯击数对比见图 4。可以看出: 1) 采用 100 kW 单机直插振冲对试验 I 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 15 击, 振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 25.22 击, 提高了 68.15%; 2) 采用 100 kW 双机直插振冲对试验 II 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 19.78 击, 振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 28.67 击, 提高了 44.94%; 3) 采用 100 kW 单机反插振冲对试验 III 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 15.89 击, 振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 26.78 击, 提高了 68.53%; 4) 采用 100 kW 双机反插振冲对试验 IV 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 13.67 击, 振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 30.56 击, 提高了 120.58%; 5) 采用 130 kW 单机直插振冲对试验 V 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 21.69 击, 振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 35.34 击, 提高了 62.91%; 6) 采用 100 kW 双机反插振冲对试验 VI 区处理, 振冲处理前吹填砂土地基的全深度标贯击数为 21.44 击,

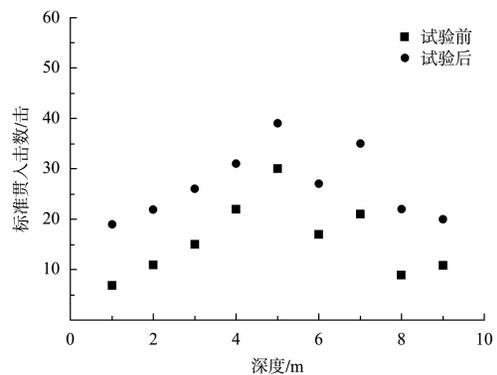
振冲处理后吹填砂土地基的全深度标贯击数提高到 30.67 击, 提高了 43.01%。



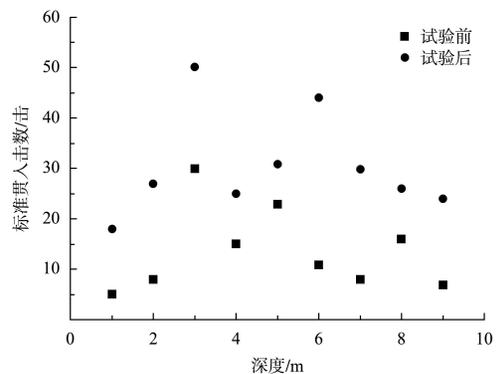
a) I 区



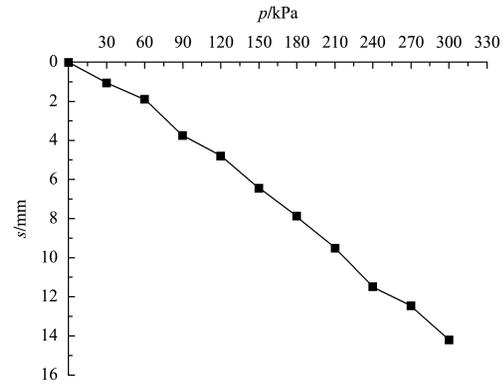
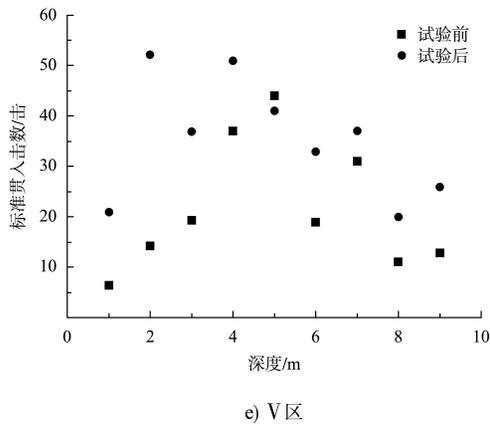
b) II 区



c) III 区

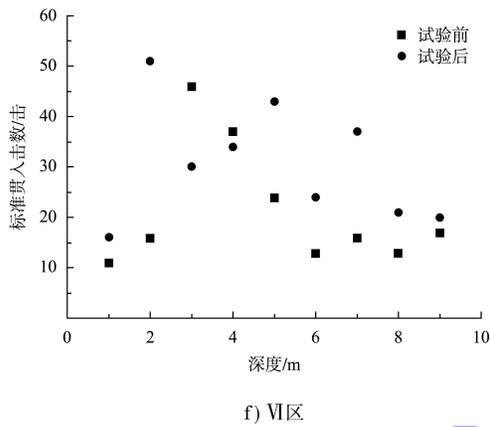


d) IV 区



e) V区

图6 V区 p-s 曲线



f) VI区

图4 各试验区试验前后标贯击数对比

5.3 处理后试验区静载试验结果

试验后对不同试验区进行静载试验^[12]，结果见图5。测得试验区全部满足地面承载力特征值120 kPa要求，其中Ⅲ区承载力最低，为标准的113.67%；V区的承载力最高，为标准的125.00%。取V区数据绘制 p-s(荷载-沉降)曲线，见图6。

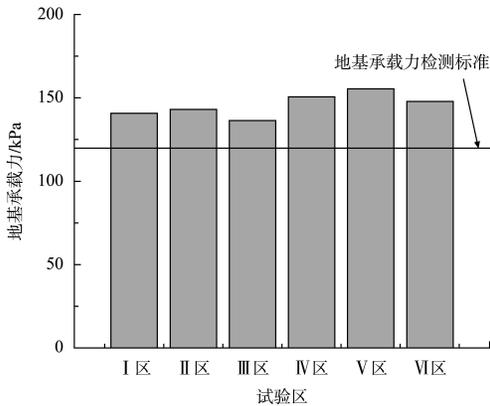


图5 静载试验结果

5.4 试验结果分析

对比表4的沉降量可知，振动反插沉降量比直插平均提高4.22%，共振方式比单振平均提高11.74%；130 kW功率平均提高8.14%；同时采用反插和共振提高仅提高8.94%；提高功率、反插和共振共同使用提高17.32%。就沉降量而言，共振提高最多，反插提高最少。

对比标贯试验结果，共振平均提高14.42%，除Ⅱ区与Ⅳ区相差较大，其余试验区采用反插和提高功率差别不大，甚至会略微降低，考虑到因为吹填砂土地基过于松软，过高的振动频率反而会影响孔隙水的排出，从而影响到土体地基的标贯击数。

标贯击数最大值基本出现在4~7 m，浅层和深层土体提高量反而不高，分析认为：浅层土体上部为淤泥、人工杂填土等材料，缺乏上覆土体，且深部土体加固后上浅层加固后土体自然沉降，导致土体强度进一步下降；深层土体的物理特性和浅层不同，其受到上部土体作用后，土体颗粒排列更加紧密，试验留振时间30 s较短，能量无法充分传递的目标层，从而限制了加固效果。

承载力指标中共振平均提高5.8%，反插和提高频率还会降低承载力，分析原因为过高的频率导致下层土体密实度非常高，土体沉降量过大，加固土体大部分分布在下层，上层土体密实程度不足，承载力反而会下降，试验区均满足承载力要求120 kPa^[13]，最低超过标准13.67%。

6 结论

1) 试验后吹填砂土地基标贯击数至少提高 40%, 试验区承载力均满足工程的沉降量要求和吹填砂土地基承载力要求, 满足地基处理标准和后续施工质量要求。

2) 当单机振冲、振动直插和分层留振密实可满足标贯击数 20 击、承载力 120 kPa 标准要求时, 证明该方法能够满足基本地基处理要求, 出于施工效率和经济性考虑, 不再使用双机振冲和反插工艺提高加固效果。

3) 对留振时间能否提高密实度等尚未验证, 应继续开展不同留振时间的振冲试验, 并分析其对深层土体的加固效果。

4) 本文仅验证振冲密实法能够完成吹填砂土地基的基本加固, 尚未考虑如何更好地提高处理效率和加固效果, 振冲后标贯击数出现的反弯点离散性较强, 应再次对均匀吹填地基开展试验, 找到更加适合吹填砂土地基的振冲间距范围、激振力等参数进一步提高土体密实度。

参考文献:

- [1] 河海大学, 上海港湾基础建设(集团)有限公司. 吹填砂土地基处理技术规范: GB/T 51064—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [2] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望: 纪念中国土木工程

学会岩土工程分会地基处理学术委员会成立三十周年[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

- [3] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
- [4] 李继才, 丛建, 曹军. 振冲法加固砂土地基工艺选择及施工参数控制[J]. 水运工程, 2018(10): 197-202.
- [5] 吴民晖, 刘海旺. 振冲密实法处理吹填砂地基的现场试验研究[J]. 科学技术创新, 2022(13): 137-140.
- [6] 叶青. 无填料振冲法在机场吹填砂地基处理中的应用探讨[J]. 四川建筑, 2023, 43(3): 151-153.
- [7] BSI. Geotechnical design-part 2: ground investigation and testing: BS EN 1997-2: 2007[S]. London: BSI, 2007.
- [8] 秦志光, 袁晓铭, 牛犇, 等. 深水海洋环境下砂土换填地基振冲加固应用研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1940-1946.
- [9] 周健, 崔积弘, 贾敏才, 等. 吹填细砂软弱地基处理试验研究[J]. 岩土力学, 2008(4): 859-864.
- [10] 李博. 无填料振冲挤密法在砂土地区地基处理中的应用[J]. 铁道建筑, 2011(7): 78-80.
- [11] 王德咏, 陈华林, 梁小丛, 等. 静力触探技术在吹填砂地基处理全过程中的应用[J]. 水运工程, 2018(5): 176-182.
- [12] 魏红, 栾明龙, 袁鸿鹄. 振冲法处理某闸基液化砂土工应用效果分析[J]. 施工技术, 2011, 40(17): 88-90.
- [13] 中交天津港湾工程研究院有限公司, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程地基基础试验检测技术规程: JTS 237—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)

(上接第 175 页)

- [6] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 城市道路路线设计规范: CJJ 193—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 陈水安, 屈荣英. 湛江软土工程特征[J]. 西部探矿工程, 2005(4): 91-92, 94.
- [8] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879-1884.
- [9] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [10] 李建忠. 真空堆载联合预压法加固码头堆场火山灰软基效果分析[J]. 水运工程, 2023(3): 165-172.
- [11] 徐妍彦, 刘均卫, 陈娜, 等. 某大型散货码头堆场地基

处理方案[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(5): 131-138.

- [12] 徐志飞. “长板-短桩”在软土路基处理中的应用[J]. 路基工程, 2021(5): 158-162.
- [13] 徐刚, 袁静波. 港区道路及堆场病害原因分析与对策[J]. 中国港湾建设, 2014(7): 20-22.
- [14] 汪日灯, 袁静波. 重型荷载下港口道路和堆场的地基工作区及压实深度研究[J]. 水运工程, 2009(7): 165-168.
- [15] 彭再权. 集装箱重箱堆场铺面结构的探讨[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(12): 258-259.
- [16] 徐希忠, 韦金城, 闫翔鹏, 等. 长寿命沥青路面研究现状及展望[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 36-43.

(本文编辑 赵娟)