



深厚软土地基深水板桩码头变形控制优化设计

周清泉, 尤坛洪, 江义

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对软土区采用深层水泥搅拌桩(DCM)加固的板桩码头结构, 板桩变形控制是设计难点之一。以深厚软土地基的某深水板桩码头为研究对象, 通过 PLAXIS 软件进行有限元模拟, 分析在不同 DCM 置换率下码头前墙受力与变形的特性, 比较 DCM 及拉杆的不同布置模式下的前墙位移, 研究码头后方堆载预压对锚碇墙和土体变形的影响, 最终对地基处理工序、DCM 置换率及布置范围、拉杆布置进行优化设计。设计方案保证经济合理的同时, 较好地限制了板桩的变形, 缩短了施工工期, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 组合板桩码头; 深层水泥搅拌桩; 置换率; 前墙变形

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0032-06

Optimal design of deformation control for deep water sheet pile wharf on deep soft soil foundation

ZHOU Qingquan, YOU Tanhong, JIANG Yi

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: For the sheet pile wharf on soft soil whose foundation is treated by deep cement mixing (DCM), the deformation control of sheet pile is one of the design difficulties. In this paper, a deep-water sheet piled wharf on deep soft soil is researched. Finite element simulation is carried out by PLAXIS software. The internal force and deformation characteristics of the front wall under different replacement ratios of DCM are analyzed, the deformation results of front wall from different layout of DCM and tie rods are compared, and the influence of rear preloading on the deformation of anchor sheet pile and soil is studied. Finally, the foundation treatment procedures, DCM replacement ratio and layout, and tie rod arrangement are optimized and designed. The design scheme can better limit sheet pile deformation and shorten the overall construction period while ensuring the economy of the scheme, which can provide reference for similar projects.

Keywords: combined sheet pile wharf; deep cement mixing pile; replacement ratio; deformation of front wall

在深厚软土地基建造码头时, 若采用高桩或重力式结构, 码头驳岸结构或基床软土置换的建造成本往往较高; 若采用板桩结构, 码头的综合成本相对较优, 但板桩变形控制及其软基处理需重点关注。板桩码头软基处理采用深层水泥搅拌桩法(DCM), 提高地基土的竖向及剪切承载力, 且效果明显。该方法在国内水运工程中已成功运用, 但现有规范体系尚缺少对采用 DCM 加固的板

桩码头结构设计技术的系统指导。近年来, 围绕采用 DCM 地基加固的板桩码头设计, 秦网根等^[1]研究采用水泥搅拌桩加固的板桩码头受力和变形特性, 以及不同水泥掺入比对码头变形的影响; 李春阳等^[2]通过有限元分析比较采用不同土体本构计算组合板桩码头的变形差异; 林先炜等^[3]通过数值模拟研究了设置卸荷平台和排水通道、合理布置搅拌桩等措施对控制板桩码头变形的作用。

收稿日期: 2023-07-16

作者简介: 周清泉 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计与研究。

其中, 关于 DCM 的布置模式, 多侧重于规律性研究, 未形成兼顾功能性和经济性的完整设计方法。

本文以某深水板桩码头为例, 对 DCM 搅拌桩布置、地基处理工序、拉杆布置等问题展开有限元分析和优化设计, 设计方法和成果可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

研究对象为境外某 5 万 t 集装箱码头工程。工程设计高水位 2.40 m, 设计低水位 0.30 m, 50 a 重现期有效波高为 0.3 m。码头前沿设计泥面高程为 -14.0 m。码头所在区域泥面高程约 0.5 m, 地基表层为淤泥、松散粉质细砂, 底部持力层为坚硬黏土, 表层软土和底层坚硬黏土之间存在一定的中密砂过渡。钻孔土样的有机质含量在 3% 以下, 土样 pH 值基本大于 7.0, 其中淤泥层取样含水量最高达 80%, 土体参数见表 1。

表 1 土体物理力学指标

土层名称	天然密度/ (t·m ⁻³)	直剪快剪强度		不排水 抗剪强度/ kPa
		黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	
回填砂	1.8	0	30	-
①松散粉细砂	1.8	1	28	-
②淤泥	1.9	6	11	30(45)
③中密砂	1.9	3	34	-
④坚硬黏土	2.0	45	23	200

注: 括号内数字表示粉质黏土经堆载预压处理后的不排水抗剪强度按 45 kPa 考虑。

2 板桩码头设计方案

码头采用板桩结构, 码头宽 42 m, 顶高程 3.7 m。码头前墙采用 $\phi 2000$ 钢管桩/AZ26 钢板桩组合板桩墙, 锚碇墙采用 AZ26 钢板桩。前墙主桩底高程为 -25.0 m, 锚碇墙底高程为 -15.0 m。前后墙通过 M130 拉杆连接, 拉杆布置间距为 3.464 m。码头后轨轨道梁下方采用直径 1200 mm 钢管桩, 桩间距为 6.928 m。码头设计断面见图 1。

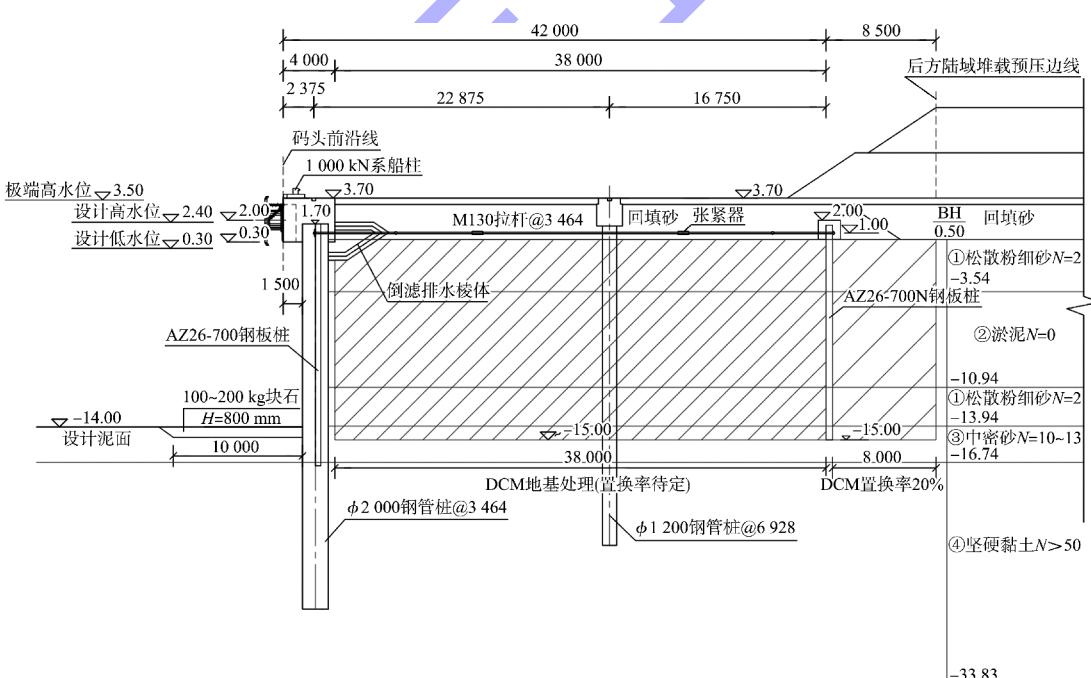


图 1 码头标准断面 (尺寸: mm; 高程: m)

码头前墙与锚碇墙之间的地基采用 DCM 加固 (置换率待定), DCM 加固区底高程为 -15.0 m, 锚碇墙后 8 m 宽范围内 DCM 置换率取 20%。码头后方陆域即锚碇墙的陆侧范围采用堆载预压地基

处理, 堆载总高度为 7.0 m, 堆载预压边线距码头前沿线 50.5 m。堆载砂下设塑料排水板, 排水板布置间距为 1 m, 排水板打至软土层以下 1 m。

关于码头的设计荷载, 自前沿线向岸侧 42 m

范围内按 30 kPa 均载计算, 自前沿线向岸侧 42~50 m 范围按 20 kPa 均载(车道)计算, 自前沿线向岸侧 50~100 m 范围按 60 kPa 均载(重箱区堆载)计算。

3 码头力学性能分析

3.1 有限元模型

通过 PLAXIS 2D 软件建模, 采用梁单元模拟码头前墙和锚碇墙, 锚杆单元模拟拉杆, 平面类型为 3 节点单元模拟土体。模型主要对码头拉锚体系进行分析, 未对码头后轨轨道梁及其下方桩基进行建模。有限元模拟施工步骤为: 1) 施工码头前墙内侧进行降水, 形成码头区域干地施工条件; 2) 在码头锚碇墙后方陆域进行分级堆载预压地基处理; 3) 堆载卸载, 之后施工锚碇墙进行码头区域 DCM 地基处理; 4) 对拉杆施加拉杆预紧力; 5) 回填中粗砂至拉杆高程, 并进行拉杆终紧; 6) 继续回填至码头设计高程; 7) 码头前沿疏浚至设计泥面高程-14.0 m; 8) 施加使用期设计均载。

为更好地模拟土体的弹塑性特性, 对原状土赋予小应变硬化本构^[4]。而 DCM 加固水泥土的应力应变曲线趋于脆性材料特质, 水泥土受压破坏时的轴向应变很小^[5], 不符合小应变硬化本构在循环荷载作用下的滞回特征, 因此对 DCM 加固

土采用摩尔库仑本构进行模拟。

关于水泥土抗剪强度的取值, JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[6] 规定水下水泥搅拌桩可按下式计算:

$$\tau_{ak} = 0.3f_{cu} \quad (1)$$

式中: τ_{ak} 为水泥土抗剪强度, f_{cu} 为室内配比试验水泥土抗压强度。

但该规范未对陆上水泥搅拌桩抗剪强度取值进行说明。本文参照美标《路堤和基础支护的深层水泥搅拌》的规定, 水泥土抗剪强度取为不固结不排水抗剪强度按下式计算:

$$S_{dm} = 0.5f_c f_r f_v q_{dm} \quad (2)$$

式中: S_{dm} 为现场水泥土抗剪强度; q_{dm} 为现场水泥土无侧限抗压强度, 取 900 kPa; f_c 为养护系数, 养护时间为 28 d 时取 1.00, 养护时间为 365 d 时取 1.48, 本次计算取 1.00; f_r 为强度残余系数, 通常为 0.65~0.90, 路堤工程推荐采用 0.80, 本次计算取 0.80; f_v 为场地变异系数, 需根据水泥土质量保证率确定, 当进行结构稳定计算且现场水泥土合格率达 90% 以上时可取 1.15。

关于水泥土的弹性模量, 按照美标规定取为水泥土无侧限抗压强度的 300 倍, 即 270 MPa。DCM 复合土的抗剪强度和弹性模量均按其置换率进行等比折算。土体计算参数见表 2。

表 2 土体刚度和固结计算参数

土层名称	泊松比	弹性模量 E/MPa	切线刚度 E_{od}/MPa	割线刚度 E_{50}/MPa	卸载弹性模量 E_{ur}/MPa	初始剪切模量 G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$	m	初始孔隙比 e	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
回填砂	0.25	—	30.0	30.00	90.0	150	0.000 1	0.5	0.50	8.640
松散粉细砂	0.30	—	6.5	6.50	32.5	65	0.000 1	0.5	0.50	1.728
粉质黏土	0.30	—	2.5	3.75	20.0	50	0.000 1	1.0	1.10	5.184×10^{-2}
中密砂	0.25	—	12.0	12.00	36.0	60	0.000 1	0.5	0.50	8.640
坚硬黏土	0.20	—	21.0	21.00	63.0	105	0.000 1	0.5	0.78	0.864×10^{-3}
DCM 水泥土	0.30	270	—	—	—	—	—	—	0.70	0.864×10^{-3}

3.2 码头前墙受力及变形特性

为分析前墙后的 DCM 地基加固对前墙受力、变形的影响, 分别计算前墙后的 DCM 置换率为 40%、55% 和 70% 时, 码头前墙在使用期的水平位移。图 2 表明, 当前墙后的 DCM 置换率为 40% 时,

前墙变形呈现较明显的鼓腹效应, 即板桩墙沿其高度的中间位置变形较大。随着前墙后 DCM 置换率的提高至 55%、70%, 沿板桩墙高度的各点水平位移逐渐减小, 且前墙鼓腹效应逐渐消失。

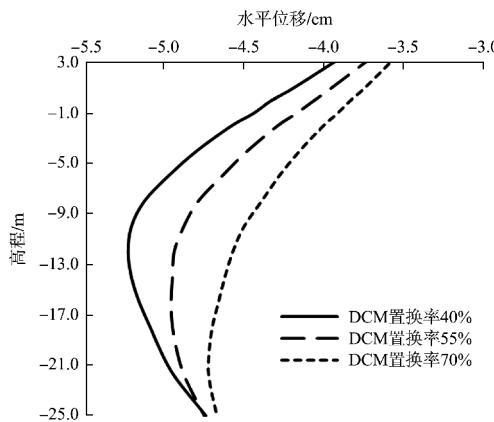


图2 DCM置换率对码头前墙使用期水平位移的影响

当DCM置换率达55%时, 前墙最大水平位移为-5.0 cm, 出现在高程-14.0 m处, 桩底处位移为-4.8 cm, 鼓腹效应基本消除。当DCM置换率达70%时, 前墙最大水平位移出现在板桩墙桩底, 板桩墙自桩顶至桩底位移逐渐增加。板桩墙底的水平位移受前墙后DCM置换率的影响较小。由图3可知, 随着DCM置换率的增加, 在前墙后的DCM加固深度范围内, 即高程-15.0~0.5 m范围的主动土压力几乎不变。进一步分析计算结果表明: 在使用期均载作用下, 码头宽度范围内的DCM复合土尚处于弹性范围, 未形成破裂面, 墙后DCM置换率提高造成的前墙变形减小, 主要由前墙后DCM复合土的刚度增加所致。

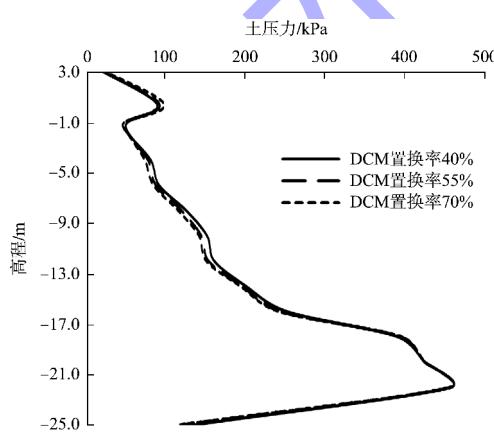


图3 DCM置换率对码头使用期前墙主动土压力的影响

4 板桩码头优化设计

4.1 码头前墙至锚碇墙范围DCM布置优化

码头前墙至锚碇墙待处理的软土范围宽38 m, 考虑设计方案的经济性, 该范围内DCM综合置換

率取55%, 在加固土总方量相同的前提下, 设计4种DCM布置方式(模式1~4), 以 $\sum(A_i \times B_i)$ 的形式表达, 其中 A_i 表示各DCM加固区布置宽度, B_i 表示DCM置換率, 各加固区自码头前沿向陆侧依次相加。

由图4可知, 在模式1~4中, 模式4对应的前墙变形最小, 模式1对应的前墙变形最大。计算结果表明: 在码头区域均匀分配DCM置換率所对应的前墙变形最小。在DCM综合置換率不变的前提下, 若盲目提高前墙后或锚碇墙前的DCM置換率, 降低其他区域DCM置換率, 均将导致前墙变形增加。在模式4的基础上, 为进一步研究提高锚碇墙前DCM的置換率对前墙位移的影响, 增加模式5的计算分析, 发现模式4和5的前墙位移在高程-6.0 m以上基本一致。因此, 对码头前墙至锚碇墙范围内的DCM置換率统一取55%。相应的DCM平面布置见图5。

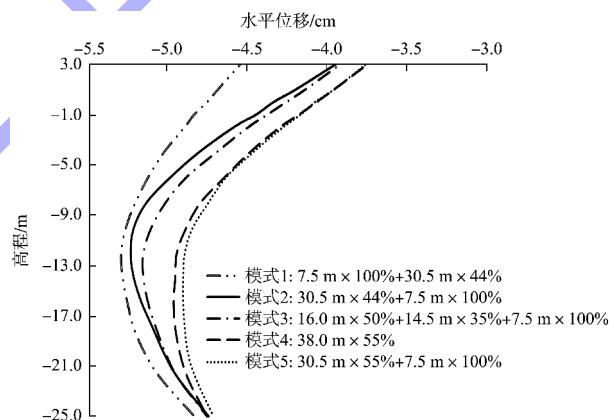


图4 DCM布置对码头使用期前墙水平位移的影响

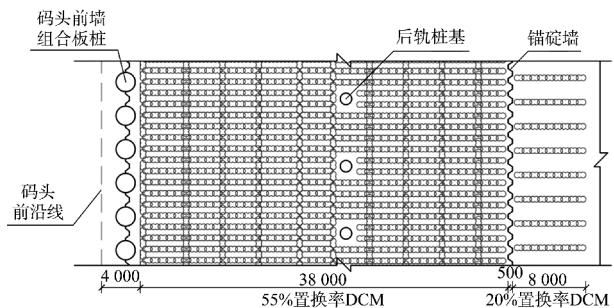


图5 DCM平面布置 (单位: mm)

4.2 地基处理工序及锚碇墙附近DCM布置优化

工程地基处理包括码头后方陆域堆载预压和码头区域DCM加固。按原定施工步骤, 码头锚碇

墙和 DCM 施工需待后方陆域堆载预压完成后进行, 这将造成较大的施工进度压力。为了同步施工码头区域 DCM 和后方堆载预压, 并限制土体及锚碇墙在后方堆载作用下的侧向变形, 计算 4 种施工工序模式(根据施工经验, 锚碇墙需先于 DCM 施工, 以防止水泥土溢浆影响锚碇墙沉桩)见表 3。其中, 后方陆域分两级堆载, 第 1 级加载至 3.5 m 高度, 历时 30 d, 第 2 级加载至 7.0 m 高度, 按固结度达 90% 控制。

表 3 计算模型

施工工序模式	模型工况描述
1	施工锚碇板桩→后方陆域堆载预压
2	施工锚碇板桩→锚碇板桩后 DCM 地基加固(8 m 宽、20% 置换率)→后方陆域堆载预压
3	施工锚碇板桩→锚碇板桩前、后同步 DCM 地基加固(墙前 4 m 宽、55% 置换率, 墙后同模型 2)→后方陆域堆载预压
4	施工锚碇板桩→锚碇板桩前、后同步 DCM 地基加固(墙前 8 m 宽、55% 置换率, 墙后同模型 2)→后方陆域堆载预压

由图 6 可知, 无 DCM 支挡的锚碇墙在后方堆载产生的侧推力作用下, 桩顶水平位移近 10 cm。在锚碇墙前、后同步进行 DCM 加固, 限制变形的效果明显好于仅在锚碇墙后加固。模型 3 的桩顶位移 3.0 cm, 桩底位移 2.1 cm。模型 4 的桩身各点位移更加趋于一致, 桩顶与桩底位移均为 1.9 cm。由图 7 可知, 模型 3、4 的码头区地表水平位移明显小于模型 1、2。在堆载影响下, 模型 4 锚碇墙前的 DCM 加固区变形趋于整体平动。计算结果表明: 采用模型 4 对应的 DCM 布置及地基处理工序可通过 DCM 墙的抗剪作用, 有效控制锚碇墙和墙前土体在堆载作用下的变形, 避免后续拉杆张拉时遇到板桩偏位的情况, 并保证与后方堆载同步施工的码头其他区域 DCM 的成桩质量。

综上, 将地基处理施工工序优化为首先施工锚碇墙, 锚碇墙前 8 m 宽、55% 置换率 DCM 和锚碇墙后 8 m 宽、20% 置换率 DCM, 待 DCM 养护

龄期达 28 d 以上; 其次进行后方陆域的堆载预压, 并同步从码头前沿向陆侧施工其余区域 DCM。

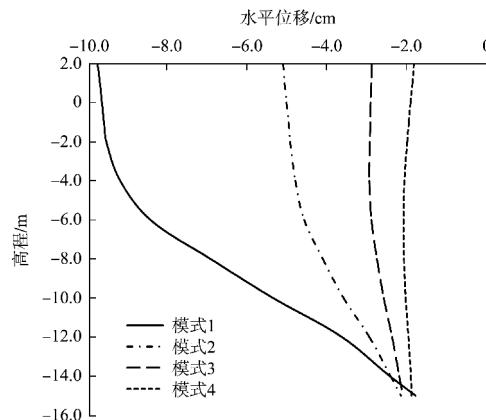


图 6 不同计算模型的锚碇墙水平位移

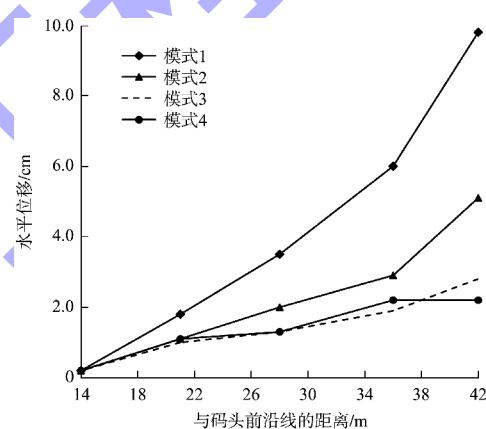


图 7 不同计算模型的地表水平位移

4.3 拉杆布置优化设计

为进一步控制码头前墙变形及前后轨距的偏差, 拟对拉杆布置进行优化, 采用 PLAXIS 3D 软件建模, 通过梁单元模拟轨道梁及后轨梁下的钢管桩。分析不同拉杆布置形式对前后轨变形的影响, 如仅布置单层拉杆(码头前后墙通过拉杆连接)、在前轨梁和后轨梁之间增设第 2 层拉杆, 并改变其间距等。由图 8 可知, 设置双层拉杆后, 前墙桩顶和入土部分的最大变形均小于设单层拉杆的变形, 而加密第 2 层拉杆间距对码头前墙变形的影响较小。3 种布置模式的拉杆应力均在容许应力范围内。综上, 在前轨梁和后轨梁间增设第 2 层拉杆, 拉杆布置间距为 6.928 m。

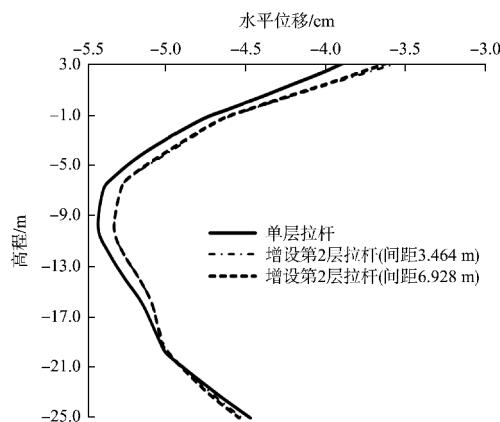


图8 拉杆布置对码头使用期前墙水平位移的影响

5 结论

- 1) 为减小板桩码头前墙变形且经济合理, 对前墙至锚碇墙范围内 DCM 置换率统一取 55%。
- 2) 为缩短工期, 在前墙至锚碇墙范围 DCM 置换率统一取 55%的前提下, 地基处理施工工序为: 先施工锚碇板桩, 再在锚碇板桩前、后施工一定宽度 DCM, 最后进行后方陆域堆载预压和码头其余区域 DCM 施工。

3) 为控制码头前墙变形及前后轨距偏差, 在前、后轨梁间增设第 2 层拉杆, 拉杆布置间距为 6.928 m。

参考文献:

- [1] 秦网根, 蔡正银, 关云飞, 等. 不同地基处理方式下组合式板桩码头结构的受力变形分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 158-162.
- [2] 李春阳, 刘洋. 深水板桩码头变形计算方法 [J]. 水运工程, 2022(10): 90-93.
- [3] 林先炜, 杨克勤. 大型深水板桩码头水平位移控制 [J]. 水运工程, 2022(5): 33-37, 49.
- [4] 刘志祥, 张海清. PLAXIS 高级应用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 赵娟)

- (上接第 19 页)
- [9] KOLOVOS K G, ASTERIS P G, COTSOVOS D M, et al. Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin [J]. Construction and building materials, 2013, 47: 1026-1036.
 - [10] 陈海斌, 郑世华, 钟煌亮. 湖泊疏浚淤泥固化试验研究 [J]. 水运工程, 2012(12): 230-233.
 - [11] 毛林清. 碱激发胶凝材料固化/稳定化含铬电镀污泥研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
 - [12] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTGE 51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
 - [13] 北京建筑材料科学研究院总院有限公司, 福建省建筑科学研究院. 土壤固化外加剂: CJ/T 486—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
 - [14] 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所. 固体废物浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法: HJ/T 300—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
 - [15] 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所, 中国环境科学研究院环境标准研究所. 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别: GB 5085. 3—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
 - [16] 包建平, 朱伟, 汪顺才, 等. 固化对淤泥中重金属的稳定化效果 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 24-28.
 - [17] 周恒宇. 不同钙系地聚合物固化淤泥质软土力学特性及耐久性研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.

(本文编辑 王璁)