



深厚软土条件下接岸结构稳定及 变形协调分析

刘晓鹏, 储小欢, 吴哲丰, 李业伟

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对深厚软土地基条件下港口接岸结构后方大荷载堆载易出现沉降超标、稳定性不足, 且传统地基处理方法针对性差、加固效率低的问题, 以宁波舟山港金塘港区大浦口集装箱码头工程为依托, 开展分区差异化地基处理设计与应用研究。采用理论计算、数值模拟与现场实测相结合的方法进行沉降预测与稳定性分析。研究表明, 分区差异化设计下, 工后沉降控制在30 cm以内, 不同区块间差异沉降小于5 cm, 满足堆场的使用要求; 实测数据显示, 相同荷载条件下, 真空联合堆载预压与堆载预压的加固效果偏差不超过10%, 分区减载方案使接岸结构施工工况及地震工况整体稳定安全系数分别提高26%、23%, 均达到规范要求。研究验证了分区差异化地基处理方法的可行性与优越性, 解决了深厚软土地基大荷载堆载的变形协调与稳定性难题, 为我国沿海深厚软土地区同类港口接岸结构地基处理工程提供了可复制、可推广的设计方案与技术参考。

关键词: 深厚软土; 接岸结构; 稳定性; 沉降控制; 分区差异化设计; 地基处理; 变形协调

中图分类号: U652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0220-07

Stability and deformation compatibility analysis of shore connection structures under deep soft soil conditions

LIU Xiaopeng, CHU Xiaohuan, WU Zhefeng, LI Yewei

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the problems of excessive settlement, insufficient stability, poor pertinence and low reinforcement efficiency of traditional foundation treatment methods induced by large-load stacking behind port shore connection structures under deep soft soil conditions, this paper presents a study on the design and application of zoned differentiated foundation treatment based on the Dapukou container terminal project in Jintang port area, Ningbo-Zhoushan Port. A combination of theoretical calculation, numerical simulation and on-site measurement is adopted for settlement prediction and stability analysis. The research results indicate that under the zoned differentiated design, the post-construction settlement is controlled within 30 cm, and the differential settlement between different blocks is less than 5 cm, which meets the service requirements of the yard. The measured data show that under the same load condition, the deviation in reinforcement effect between vacuum combined surcharge preloading and surcharge preloading does not exceed 10%. In addition, the zoned load reduction scheme increases the overall stability safety factors of the shore connection structure under construction conditions and seismic conditions by 26% and 23% respectively, both of which meet the requirements of the specification. This study verifies the feasibility and superiority of the zoned differentiated foundation treatment method, solves the deformation compatibility and stability issues associated with large-load surcharge preloading on deep soft soil foundations, and offers a replicable and scalable design scheme and technical reference for similar foundation treatment projects of shore connection structures in coastal deep soft soil regions of China.

Keywords: deep soft soil; shore connection structure; stability; settlement control; zoned differentiated design; foundation treatment; deformation compatibility

收稿日期: 2025-09-30 录用日期: 2025-10-18

作者简介: 刘晓鹏(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程工程地质、地基处理设计工作。

随着国家发展规划的不断推进,长三角、京津冀以及山东等区域的世界级海洋港口群建设步伐正全面加速^[1-3]。港口规模的扩大与功能的升级不仅对工程整体质量提出了更高标准,也使得港区内不同功能区域间的变形协调成为确保码头高效、安全运行的基础前提。因此,如何有效控制并降低各区域间的差异沉降,成为当前港口建设中亟待破解的重要工程问题。

工程界在软土地基处理与差异沉降控制方面已积累了一定经验。在软土特性分析与方案选型方面,赵树光等^[4]与顾敏智等^[5]分别结合盐田港与鱼山海域工程,探讨了复杂软土层分布特性及地基处理方案的优化比选;针对沉降变形的精确预测,燕继宇等^[6]深入剖析了软基沉降计算中应力与应变固结度的转换关系。在沉降控制实践中,邵吉林等^[7]和张会荣等^[8]针对已建港区不均匀沉降过大的成因,提出了基础改良与科学维护的应对策略。

而深厚淤泥质土地基是造成差异沉降的重要因素,预压法是目前最广泛采用的加固工艺^[9-10]。此外,胡成超等^[11]也验证了水泥搅拌桩等复合地基技术在特定软弱土层中的处置效果。然而,现代港口往往伴随着回填土层厚、设计使用荷载大的特点,这迫使工程必须施加极高的预压荷载。这种大面积、高强度的预压虽能有效减小工后沉降,却不可避免地对接岸结构(如岸壁、防波堤等)的整体稳定性构成了严峻威胁。针对这一沉降控制与结构稳定之间的矛盾,周清泉等^[12]通过优化软基处理置换率与空间布置,有效限制了深水板桩码头的受力变形;许增会等^[13]重点研究了海堤不同地基加固工艺衔接位置的过渡处理方法,为控制局部滑移与不均匀沉降提供了重要参考;此外,梁丰收等^[14]与孙昌利等^[15]亦分别从桩基组合方案及堆载超载诱发失稳的角度剖析了接岸结构的承载与滑移机制。

综上所述,现有研究为港口软基处理与变形控制提供了理论与实践基础。但在面临地质条件复杂、荷载分布不均的大型综合性港口项目中,

传统的全局统一加固方式难以兼顾变形协调的有效性、安全性与经济性。本文提出一种“分区差异化”的地基处理设计方法,通过对比分析实测数据、理论计算与数值模拟的沉降规律,对接岸结构在差异化处理下的差异沉降和稳定性进行系统分析,旨在为类似复杂工况下的港口地基处理提供兼顾沉降与稳定的解决方案。

1 工程概况

宁波舟山港金塘港区大浦口集装箱码头工程建设规模为3个7万吨级、2个10万吨级大型集装箱泊位(可兼靠15万吨级大型集装箱船舶),设计年吞吐量为250万TEU。

金塘港区大浦口集装箱码头工程分为两个阶段建设,地基处理主要包括海堤吹砂轨道式集装箱门式起重机(rail-mounted gantry crane, RMG)重箱区、海堤吹砂辅建及道路区、老大堤堤脚区及老大堤堤身区。其中二阶段实施总面积约150万m²,接岸结构部分实施时间为2016—2017年,实施范围见图1。

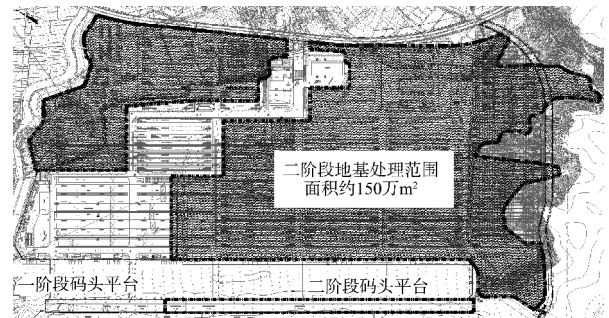


图1 地基处理二阶段实施范围

Fig. 1 Two-phase implementation scope of ground improvement

2 工程地质条件

场地内地基土主要为由高压缩性的流塑状淤泥质土和软弱黏性土组成的海相沉积层,层底高程约-30 m,物理力学性质差,具有含水量高、孔隙比大、天然强度低及沉降变形大等特点,是主要压缩层;场区下部土层均由具中等或低压缩性的黏性土、砾砂、碎石土或基岩组成。土体力学指标见表1,典型地质断面见图2。

表 1 土层物理力学指标
 Tab. 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

层号	岩土名称	含水量 / %	天然重 力密度 / (kN·m ⁻³)	固结快剪		直剪快剪		标准贯 入击数 / 击	十字板 原状土不排水 抗剪强度/kPa
				黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)		
① ₂	淤泥质粉质黏土	43.5	17.9	16.2	10.1	10.8	2.1	1	9.5
② ₁	淤泥质粉质黏土	40.8	17.9	16.8	10.1	18.2	3.6	2	19.6
② _{2a}	淤泥质粉质黏土	37.7	17.9	18.9	11.2	20.5	3.8	4	26.3
② _{2b}	粉质黏土	32.3	18.7	22.7	12.2	25.4	7.2	4	28.8
③ ₁	黏质粉土	30.4	18.9	17.0	27.6	24.6	14.2	-	-

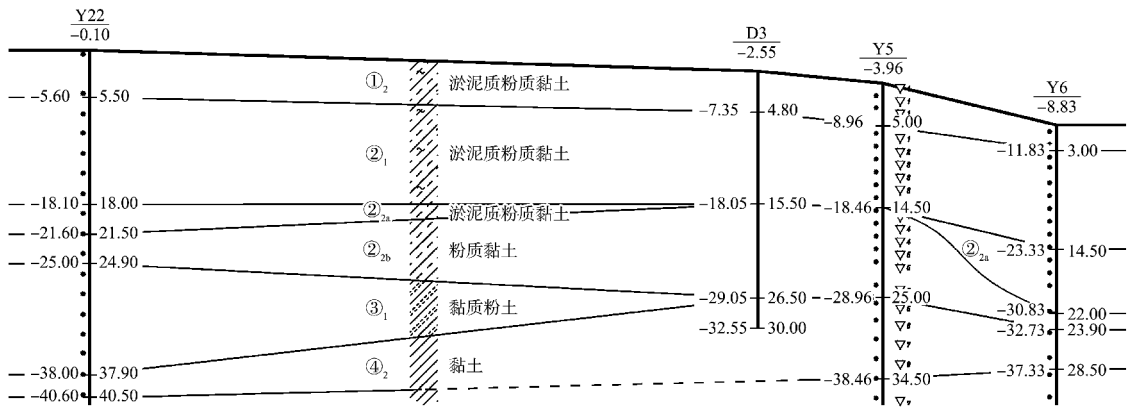


图 2 典型地质断面 (单位:m)
 Fig. 2 Typical geological section (unit: m)

3 地基处理方案设计

场地设计高程为 5.80 m，结构层厚度按 0.8 m 计，则处理完成后土基顶面验收高程为 5.00 m。高程起算面为当地理论最低潮面。

根据计算结果，确定各区域的处理方式为：老大堤后方重箱堆场区域采用堆载 120 kPa、恒载

90 d；在新老大堤之间重箱堆场区域采用真空预压 80 kPa+堆载 40 kPa、恒载 90 d；空箱堆场、道路及辅建区采用堆载 70 kPa、恒载 90 d 进行处理；新大堤 30 m 范围内采用堆载 20 kPa，恒载 90 d。接岸结构后方地基处理断面见图 3。

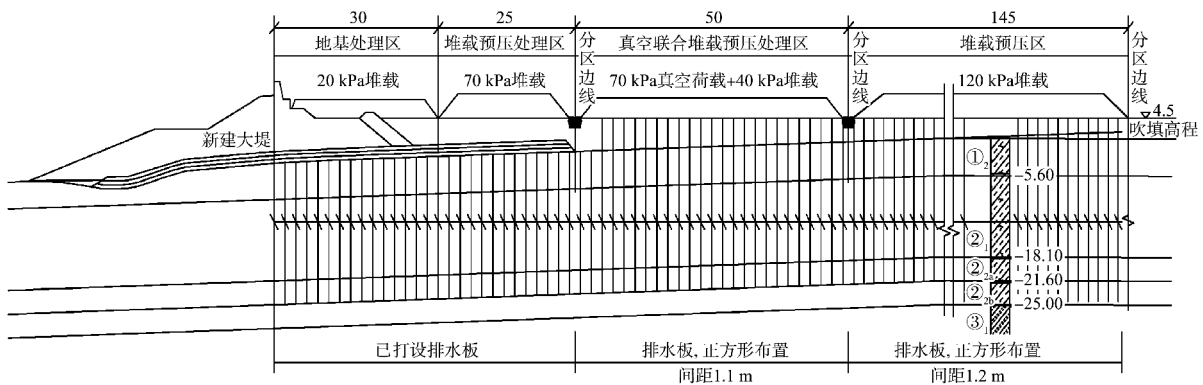


图 3 接岸结构后方地基处理断面
 Fig. 3 Section of ground improvement behind the shore connection structure

主要工艺流程。1) 堆载预压区：吹填砂至高程 4.20 m→打设塑料排水板→回填开山石→堆载

预压→卸载→场地平整普夯至高程 5.00 m→交工验收。2) 真空联合堆载预压区：吹填砂至高程

4. 20 m→打设塑料排水板→抽真空→回填开山石→堆载预压→卸载→场地平整普夯至高程 5.00 m→交工验收。

4 荷载条件

集装箱设计堆高为 5 层, 箱角荷载 228.6 kN/角, 荷载标准值 50 kPa; 重箱区采用电动轮胎式场桥 (electric rubber-tired gantry crane, ERTG) 堆取设备方案时, 最大轮压 320 kN, 每腿 4 轮; 重箱区采用 RMG 堆取设备区域, 轮压 280 kN, 单侧 12 个轮; 60ft 集装箱运输半挂 (tractor-trailer-60ft, TR-60) 重载行驶, 荷载标准值 20 kPa。

5 沉降计算分析

5.1 理论沉降计算

1) 总沉降采用分层沉降总和法计算。2) 荷载主要为吹填砂自重、道堆面层结构自重及堆场荷载。重箱堆场设计荷载标准值为 50 kPa, 空箱、辅建及道路区域荷载标准值均按 20 kPa 考虑。3) 根据 JTS 147—2017《水运工程地基规范》^[16] 中的地基处理压缩层计算深度要求, 计算土层取至④₂ 土层底。4) 重箱区域面层结构统一按 0.8 m 厚计算, 重力密度取 23 kN/m³; 辅建及空箱区域面层结构统一按 0.75 m 厚计算, 重力密度取 23 kN/m³。5) 沉降计算中的水位参考一阶段, 取 2 m。6) 吹填砂及堆载料重力密度取 18 kN/m³。7) 固结计算公式: 天然地基固结度按太沙基固结理论进行计算固结度计算。8) 工后沉降。经计算, 按 30 a 使用期考虑工后沉降量, 各分区计算结果见表 2。

表 2 沉降计算结果

方案	施工期沉降/cm	工后沉降/cm
堆载 120 kPa	203.70	18.61
真空 80 kPa+堆载 40 kPa	190.69	26.70
堆载 70 kPa	149.94	22.04
堆载 20 kPa	104.36	9.32

5.2 数值模拟分区沉降计算

采用 Plaxis 有限元软件对各区域沉降进行分析, 建立计算模型, 见图 4, 其中真空 80 kPa+堆载 40 kPa 区通过定义水头高度调整负压, 计算结

果云图见图 5。从图中可以看出, 累计沉降最大点发生在堆载 120 kPa 土层顶面中心处为 2.09 m, 比理论计算值高 0.05 cm。

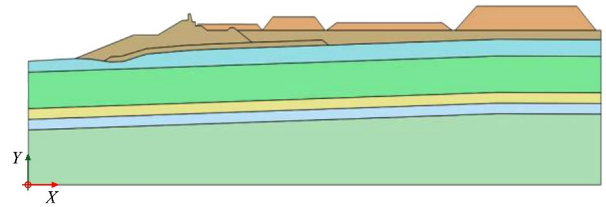


图 4 Plaxis 计算模型

Fig. 4 Plaxis calculation model

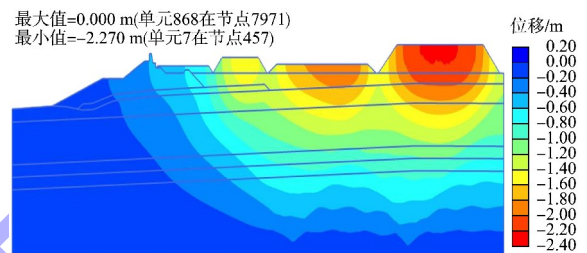


图 5 计算结果云图

Fig. 5 Calculation result contour plot

通过计算云图可以看出, 各区域沉降数值计算结果与理论沉降计算结果接近。各区堆载两侧的工后沉降差值见表 3。同时, 由于附加应力的相互影响, 各分区之间的差异沉降小于表 3 中的计算值, 不均匀沉降小于 2‰。

表 3 差异沉降计算

方案	工后差异沉降/cm
堆载 120 kPa 与真空+堆载 40 kPa	-3.2
真空 80 kPa+堆载 40 kPa 与堆载 70 kPa	-1.5
堆载 70 kPa 与堆载 20 kPa	-4.7

注: “-”表示前者比后者工后沉降小。

6 接岸结构的稳定性分析

该工程地基为强度很低的淤泥质土, 施工期新建大堤稳定计算采用十字板剪切强度的有效固结应力法 (改进 $\varphi=0$ 法, φ 为土的内摩擦角)。堆载预压逐级加载过程中, 可以考虑由固结度引起的地基土强度和承载力的提高。

计算软件采用北京理正《复杂土层土坡稳定计算软件》, 依据《浙江省海塘工程技术规定》^[17] 进行计算。

6.1 全堆载预压条件下稳定性分析

针对项目典型断面，研究全堆载预压条件下的土坡稳定，即真空 80 kPa+堆载 40 kPa 按堆载预压 120 kPa 考虑时计算新建大堤的稳定情况。施工工况为海堤后方堆载荷载分别为 20、70 和 120 kPa，按不利工况即海测水位为设计低水位 0.36 m、岸侧水位为设计高水位 3.59 m 考虑。

经计算，施工工况整体稳定安全系数为 1.232，地震工况整体稳定安全系数为 0.91，施工工况计算结果见图 6。

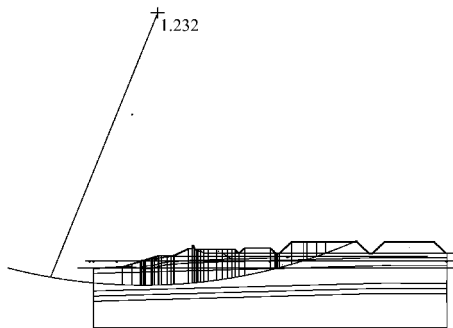


图 6 全堆载条件下稳定性计算断面
Fig. 6 Section for stability calculation under full surcharge loading

6.2 分区设计条件下的接岸结构稳定性分析

针对项目典型断面，按分区设计条件下分析新建大堤的土坡稳定，施工工况为海堤后方堆载荷载分别为 20、70、40 和 120 kPa，按不利工况即海测水位为设计低水位 0.36 m、岸侧水位为设计高水位 3.59 m 考虑。

经计算，施工工况整体稳定安全系数为 1.556，地震工况整体稳定安全系数为 1.125，施工工况计算结果见图 7。

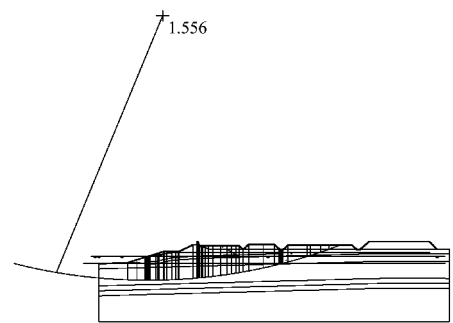


图 7 分区设计条件下稳定性计算断面
Fig. 7 Section for stability calculation under zoning design

7 实测沉降与计算值对比分析

7.1 施工期沉降对比分析

各区域卸载时，依据 JTS 147—2017《水运工程地基规范》，采用双曲线法推算最终沉降量，相应各区监测点的平均最终沉降、固结度和残余沉降见表 4。其各区域残余沉降均小于设计要求的 300 mm，平均固结度均大于 85%，满足设计要求。

表 4 堆载施工期实测沉降值
Tab. 4 Measured settlement during surcharge loading construction period

方案	施工期平均沉降/cm	施工期固结度/%
堆载 120 kPa	176.20	91.7
真空 80 kPa+堆载 40 kPa	159.60	95.7
堆载 70 kPa	52.26	90.9
堆载 20 kPa	21.15	-

从实测沉降计算来看，越靠近新建大堤，施工期堆载施工期平均沉降值与与计算值相差越大，主要原因是海堤施工过程中已插设排水板，且海堤沉降基本稳定后才实施的堆载预压，大部分沉降在海堤实施阶段已完成。

堆载 120 kPa 区域和真空 80 kPa+堆载 40 kPa 区域从施工期平均沉降值对比来看，均较计算值小 30 cm 左右。从大浦口集装箱码头项目的地基处理实施来看，该区域真空联合堆载预压与堆载预压加固效果接近。

7.2 使用期沉降

宁波舟山港金塘港区大浦口二阶段工程于 2016、2017 年分区域陆续进行地基处理并陆续卸载。该工程于 2023 年 4 月完成面层施工，之后进行了约 6 个月的观测期，平均沉降速率为 0.02~0.03 mm/d。2023 年 7—10 月，部分点沉降速率为 0.06 mm/d，初步推测年平均沉降量 1 cm 左右。同时，从监测结果来看，接岸结构后方未见明显不均匀沉降，地基处理分区设计效果取得了良好的工程验证。

8 结语

1) 深厚软土地基条件下，通过荷载分区设

计、差异化加固工艺,工后沉降控制在30 cm以内,不同区块间差异沉降小于5 cm,不均匀沉降小于2‰,满足堆场的使用要求,为类似高荷载港口工程提供重要技术参考。

2) 通过理论计算与现场实测沉降计算数值的对比分析,验证了在宁波大浦口地区真空联合堆载预压与堆载预压加固效果接近。

3) 深厚软土条件下接岸结构后方地基处理分区设计可有效的提高了新建海堤的稳定性。全堆载工况下安全系数仅1.232(地震工况0.91);分区设计后,安全系数提升至1.556(地震工况1.125),施工工况及地震工况整体稳定安全系数分别提高26%、23%,验证了分区荷载对边坡稳定的积极作用。

4) 从工程实践来看,深厚软土条件下接岸结构后方地基进行分区设计后,在各区域不同使用条件下,控制地基沉降效果良好,有效减少了不同分区之间的差异沉降。

参考文献:

- [1] 巩聪聪,马文凯.大项目+Ai 山东港口提速世界级海洋港口群建设[J].山东国资,2025(3):35-36.
GONG C C, MA W K. Big project+Ai Shandong port speeds up the construction of world-class marine port groups[J]. State-owned assets of Shandong, 2025(3): 35-36.
- [2] 连玉明.加快建设京津冀世界级港口群[J].北京观察,2024(3):39.
LIAN Y M. Accelerating the construction of Beijing-Tianjin-Hebei world-class port group [J]. Beijing observation, 2024(3): 39.
- [3] 刘波.加快建设长三角世界级港口群[J].唯实,2024(2):69-71.
LIU B. Accelerating the construction of world-class port groups in the Yangtze River Delta [J]. Reality only, 2024(2): 69-71.
- [4] 赵树光,杨秋芳.盐田港东作业区软土特性及地基处理方案比选[J].水运工程,2025(3):145-151,181.
ZHAO S G, YANG Q F. Soft soil characteristics and comparison of foundation treatment schemes in east operation area of Yantian Port [J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 145-151, 181.
- [5] 顾敏智,赵树光.鱼山海域软土分布特性及其地基处理方法[J].水运工程,2021(5):146-150.
GU M Z, ZHAO S G. Soft soil distribution characteristics and ground treatment in the Yushan sea area [J]. Port & waterway engineering, 2021(5): 146-150.
- [6] 燕继宇,伍琪琳,李建宇.软土地基沉降计算中的固结度分析[J].水运工程,2021(9):174-177,215.
YAN J Y, WU Q L, LI J Y. Analysis of consolidation degree in settlement calculation of soft soil [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 174-177, 215.
- [7] 邵吉林,陈世俊,曹玉泉.软土地区集装箱堆场不均匀沉降成因研究:以温州港码头为例[J].中国水运,2016(4):253-255.
SHAO J L, CHEN S J, CAO Y Q. Study on the causes of uneven settlement of container yard in soft soil area: taking Wenzhou Port wharf as an example [J]. China water transport, 2016(4): 253-255.
- [8] 张会荣,姚紫涵.湛江港深厚软土地区码头堆场工后沉降分析及处理措施[J].水运工程,2024(10):170-175,193.
ZHANG H R, YAO Z H. Analysis and treatment measures for post construction settlement of stockyards in deep soft soil areas of Zhanjiang Port [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 170-175, 193.
- [9] 郭印,孙华波,王健,等.太仓煤堆场软黏土地基堆载预压处理效果分析[J].工程勘察,2014,42(4):34-37.
GUO Y, SUN H B, WANG J, et al. Analysis on the effect of soft ground improvement by preloading with surcharge in Taicang coal storage yard [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2014, 42(4): 34-37.
- [10] 黄彬.堆载预压联合强夯法在散货堆场地基处理中的应用[J].水运工程,2016(11):179-183.
HUANG B. Application of preloading and dynamic compaction on foundation treatment of bulk yard [J]. Port & waterway engineering, 2016(11): 179-183.
- [11] 胡成超,王凌霄,王艳萍,等.马来西亚东海岸码头

堆场泥炭土地基中水泥搅拌桩的处置效果及参数分析[J]. 水运工程, 2023(11): 204-210.

HU C C, WANG L X, WANG Y P, et al. Treatment effect and parameter analysis of cement mixing pile in peat soil foundation of wharf yard on east coast of Malaysia[J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 204-210.

[12] 周清泉, 尤坛洪, 江义. 深厚软土地基深水板桩码头变形控制优化设计[J]. 水运工程, 2024(3): 32-37.

ZHOU Q Q, YOU T H, JIANG Y. Optimal design of deformation control for deep water sheet pile wharf on deep soft soil foundation[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 32-37.

[13] 许增会, 高晓兵. 海堤不同地基加固衔接位置的处理方法[J]. 水运工程, 2021(5): 22-25, 90.

XU Z H, GAO X B. Treatment method of connection position between different foundation reinforcement of sea embankment [J]. Port & waterway engineering, 2021(5): 22-25, 90.

[14] 梁丰收, 王俐. 海工码头接岸结构选型与设计[J]. 水

道港口, 2023, 44(2): 238-244.

LIANG F S, WANG L. Land-connecting structure selection and design of a marine wharf [J]. Journal of waterway and harbor, 2023, 44(2): 238-244.

[15] 孙昌利, 贾恺, 张婉莹, 等. 软土地基海堤滑移事故原因分析[J]. 广东水利水电, 2024(4): 70-73, 83.

SUN C L, JIA K, ZHANG W Y, et al. Causes analysis of sea wall sliding accidents on soft soil foundation[J]. Guangdong water resources and hydropower, 2024(4): 70-73, 83.

[16] 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, 2017.

Code for foundation of port engineering: JTS 147-2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

[17] 浙江省海塘工程技术规定[S]. 杭州: 浙江省水利厅, 1999.

Technical regulations for seawall engineering in Zhejiang Province [S]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Department of Water Resources, 1999.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 166 页)

[8] 赵璐, 姜琳, 李永正, 等. 基于改进 ILOS 与双闭环 PID 的欠驱动船舶循迹控制[J]. 中国造船, 2025, 66(1): 122-133.

ZHAO L, JIANG L, LI Y Z, et al. Tracking control for underactuated autonomous ships based on improved ILOS and PID with dual closed-loop[J]. Shipbuilding of China, 2025, 66(1): 122-133.

[9] SUTULO S, SOARES C G. Nomoto-type manoeuvring mathematical models and their applicability to simulation tasks[J]. Ocean engineering, 2024, 304: 117639.

[10] 吴新骅, 鲁韵. 一种基于 Stewart 六自由度船舶约束模型试验平台的水动力系数测量方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(3): 465-471.

WU X X, LU Y. A method for measuring hydrodynamic

coefficients based on 6-DOF Stewart captive model test platform[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2023, 47(3): 465-471.

[11] 张国庆, 张显库. 船舶运动数学模型与 MATLAB 仿真[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.

ZHANG G Q, ZHANG X K. Mathematical models of ship motion and MATLAB simulation [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2020.

[12] 朱彬华, 刘作飞, 杜新文, 等. 航道设标弯曲半径快速估算方法[J]. 水运工程, 2024(9): 113-116.

ZHU B H, LIU Z F, DU X W, et al. Fast estimation method for bending radius of channel marking [J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 113-116.

(本文编辑 赵娟)