



罗源湾 2×5 万吨级码头结构选型

郑天立

(中国铁建国际集团有限公司, 北京 100855)

摘要: 由于地质条件复杂, 罗源湾北岸 2×5 万吨级码头结构选型较为困难。为了解决此问题, 对类似地质条件下的码头结构展开了调研和对比分析, 进行码头结构方案优选。从技术可行性和经济合理性角度, 对优选的透空式前板桩高桩码头结构进行分析。同时收集了码头实测数据, 并与计算结果进行对比, 从而验证了透空式前板桩高桩码头结构的可靠性和经济合理性。

关键词: 前板桩高桩码头; 透空结构; 结构选型

中图分类号: U 656.1⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0061-06

Structure selection for 2×50,000 DWT wharf in Luoyuan bay

ZHENG Tian-li

(CCRC International Co., Ltd., Beijing 100855, China)

Abstract: Due to the complex geological condition, it has a great difficulty to select the structure for the 2×50,000 DWT wharf in Luoyuan bay. To tackle this problem, research and comparative analysis of the wharf structure under similar geological conditions are carried out, and the structure scheme of the wharf is optimized. From the perspectives of technical feasibility and economic rationality, the optimal high piled wharf with the top opened frontal steel sheet pile structure is analyzed. At the same time, the measured data of the on-site survey and operation parameters of the completed wharf are collected and compared with the calculated results, thus verifying the reliability and economic rationality of the structure of the pile high piled wharf with top opened frontal steel sheet piles.

Keywords: high piled wharf with frontal sheet piles; open structure; structure selection

1 工程概况

拟建码头工程位于罗源湾北岸的碧里作业区, 地理坐标为北纬 26°28'10"、东经 119°40'28"。罗源湾是福建省五大深水港湾之一, 水深湾阔, 掩护条件良好, 是少有的适宜港口工程开发建设的优质港湾^[1]。从 2005 年初, 在罗源湾北岸狮岐码头(B3 泊位)建设的基础上进行扩建, 在毗邻 B3 泊位东侧的碧里地区, 兴建 2×5 万吨级码头工程。根据拟建港区复杂的地质情况, 采用了新颖的透空式前板桩高桩码头结构形式^[2]。

2 地质条件

根据初步设计阶段详细地质勘探资料, 港区自上而下主要分布有第四纪全新世滨海相沉积形成的灰色淤泥(Q_4^m), 第四纪晚更新世冲洪积形成的灰黄色黏土(Q_3^{al+pl})、冲洪积形成的灰黄色碎砾石(Q_3^{al+pl})、湖沼沉积形成的灰色黏土(Q_3^{lk})、洪积坡积形成的碎砾石混黏性土(Q_3^{al+dl})及黏性土混碎砾石(Q_3^{al+dl})等, 第四纪风化残积土, 基岩为燕山期形成的花岗岩(γ_{53}), 花岗岩球状风化广泛分布, 局部分布第四纪风化残积土。

场地表层广泛分布流塑状淤泥，厚度在 5.00~25.90 m。黏土、碎砾石、碎砾石混黏性土之间间断性分布淤泥质黏土夹层。

3 码头结构选型

从初勘地质分析，揭掉表层 12~18 m 流塑状淤泥以后下覆土层以黏土（标贯击数 N 在 7~15 击）、黏土混碎石和碎砾石混黏性土为主，这些土层硬度介于软土和硬土之间，单纯考虑这几层土，重力式、板桩和高桩码头都可以选择。但是在详勘阶段发现这些土层之间广泛分布着淤泥质黏土夹层，厚度约 1~2 m，这也是在初期未揭示出软弱夹层结构的主要原因。另外部分软土夹层随陆域山势向海侧倾斜趋势明显，因此重力式码头方案是不合适的，改为高桩码头结构方案。

3.1 案例借鉴

借鉴南方沿海地区两个典型项目遇到的深厚软黏土地基超常规沉降和位移问题。

案例 1 为华东沿海某工程，码头结构采用常规的陆连桥式高桩码头，码头后方陆域护岸距码头平台后沿仅 80 m。护岸底部打设了塑料排水板，采用分层填筑的方式形成护岸。该工程陆域护岸的设计顶高程是 9.0 m，但是填筑到 5.0 m 高程时，护岸产生较大位移，将建好的引桥桩基向海侧推移了 30~50 cm，引堤头部 100 m 范围也发生了不均匀沉降，局部下陷形成了倒坡。

案例 2 为华南沿海某外资海港工程，也是采用陆连桥式的高桩码头，后方陆域护岸区域表层流塑态软土层较厚，护岸底部打设了排水砂井后进行分级回填。但是在回填后方陆域时，护岸开始出现较大变形，导致前方的码头平台报废，产生了巨大的经济损失。

罗源湾北岸湾地质结构与以上两案例类似，

如沿用陆连桥式的高桩码头结构风险较大，须另辟蹊径，优选新的码头结构方案。

3.2 方案确定

查询资料发现，拟建港区与蛇口港二突堤和三突堤地质地层分布类似，主要土层的标贯击数也非常接近，该码头采用了前板桩与高桩组合结构方案^[3]，其泊位总长 270 m，码头前沿水深-14.0 m。蛇口港二突堤项目结构简单，施工速度快，安全可靠。以蛇口港项目为基础，又参考汉堡港安特沃德集装箱码头的新型透空式前板桩高桩码头结构，最终确定本项目采用顶部透空式前板桩高桩码头结构的混合结构^[4-6]，见图 1、2。高桩平台前端采用了斜拉板桩结构，前板桩采用刚度大、易于施打的组合 BOX 钢板桩结构将部分组合桩顶打设至-8.0 m 高程，使得前板桩墙此高程以上为透空结构；斜拉桩采用钢管桩，码头平台采用钢筋混凝土梁板结构。平台下每隔 7.98 m 设 1 榆高桩排架，其中包括 1 对叉桩和 2 个直桩。

对比发现，将斜拉板桩设置在高桩平台前面可以显著降低结构造价，并增加码头和护岸结构的稳定性。主要优点：1) 通过码头平台下部回填平台和岸坡的缓冲，板桩结构挡土高度可以降至 8 m 左右，显著降低挡土板桩结构承受的土压力作用，加之透空式结构，剩余水压力作用不存在了，结构受力显著变小；2) 由于板桩前移，板桩后的回填平台对护岸结构的压坡稳定作用明显，再加上板桩的挡土作用，使码头护岸结构的稳定性显著提高；3) 与后板桩相比，斜拉前板桩结构兼做码头平台的支撑结构，节省了码头平台前排的直桩。4) 采用顶部透空式前板桩高桩码头结构，使得码头结构和后方陆域紧密衔接，形成了连片式布置的满堂式码头，码头与后方的水平运输更方便，有效提升了码头的使用效率。

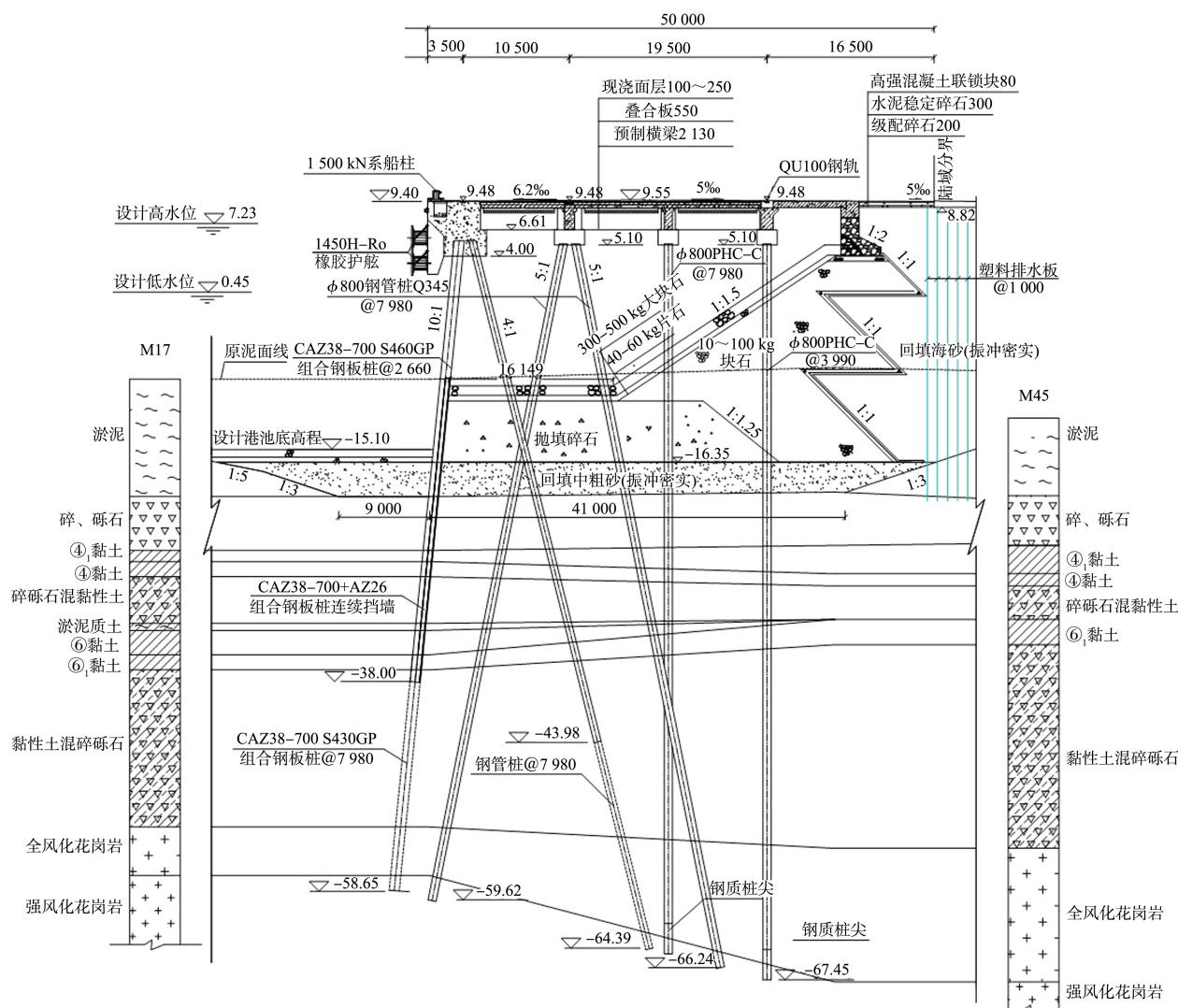


图1 码头典型断面 (高程: m; 尺寸: mm。下同)

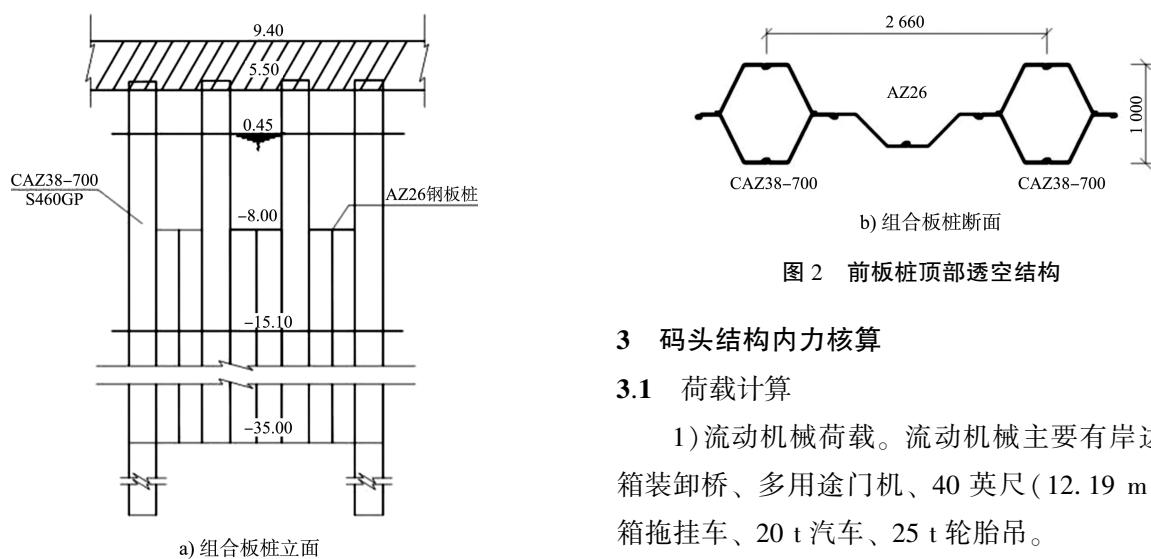


图2 前板桩顶部透空结构

3 码头结构内力核算

3.1 荷载计算

1) 流动机械荷载。流动机械主要有岸边集装箱装卸桥、多用途门机、40英尺(12.19 m)集装箱拖挂车、20 t汽车、25 t轮胎吊。

2) 码头面均布荷载 $q=30 \text{ kPa}$ 。

3) 船舶作用力。系缆力: 系缆力按 9 级风考虑, 风速 $v=22.6 \text{ m/s}$, 超过 9 级风时, 船舶须离开码头到锚地停泊。计算得到 5 万吨级船舶系缆力为 650 kN, 10 万吨级船舶系缆力为 1 159 kN。船舶挤靠力: 在风和水流力作用下, 船舶挤靠力为 122.4 kN。船舶撞击力: 船舶以 $v=0.15 \text{ m/s}$ 靠岸时的撞击能量 $E_c=246.65 \text{ kJ}$ 。在 $H=1.50 \text{ m}$ 横浪作用下, 系泊船舶有效撞击能量 $E_{wo}=3 071 \text{ kJ}$; 分配到每个护舷的有效撞击能 $E_w=1 151.6 \text{ kJ}$ 。选用高反力型 1 450 H 鼓型橡胶护舷, 设计吸能量 1 472 kJ, 最大变形时吸能量 1 590 kJ, 总反力小

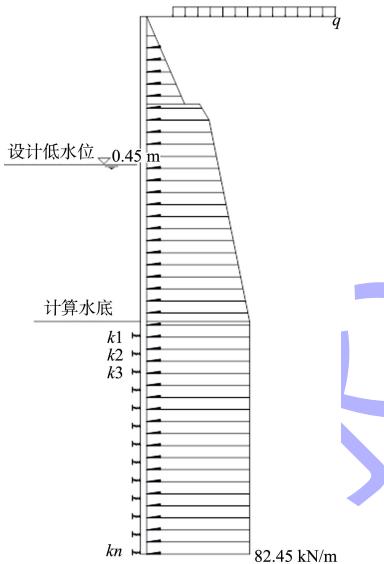
于 2 300 kN, 计算取值为 2 220 kN。

3.2 空间杆系有限元模型

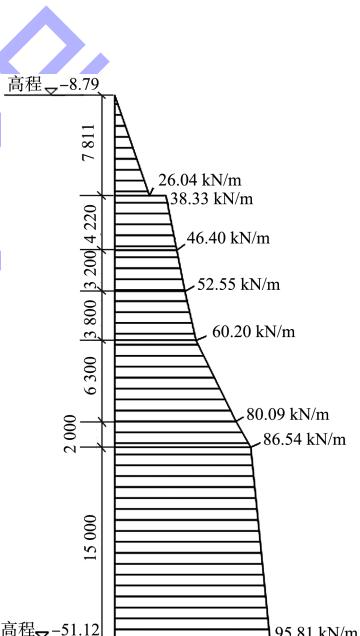
码头结构变形和内力计算采用空间杆系有限元模型, 用 m 法模拟桩土之间的作用。根据《工程地质手册(3 版)》和《板桩码头设计与施工规范》相关规定选取土的 m 值^[7-8], 并根据实际情况进行修正。码头平台开挖基槽底面以下 8 m 范围的土层, m 值取 2 000 kN/m⁴; 8 m 以下范围 m 值均取 4 000 kN/m⁴。

3.3 板桩墙后土压力计算

板桩结构内力的计算采用竖向弹性地基梁法, 前板桩挡土面以下土压力按朗肯土压力计算, 见图 3。



a) 竖向弹性地基梁法



b) 朗肯土压力 (高程: m; 厚度: mm)

图 3 计算图示

3.4 内力和形变计算结果

考虑各种不利工况组合, 用 STAAD 有限元

软件对空间杆系有限元模型进行计算, 结果见表 1。

表 1 基桩内力

桩基	组合应力/MPa	轴向压力/kN	轴向拉力/kN	最大弯矩/(kN·m)	跨中最大位移/mm	顶端最大位移/mm
钢板桩	270	6 216	-	1 908	82	45
斜拉桩	119	2 549	384	50	-	-
海叉桩	209	7 614	-	228	-	-
向岸叉桩	129	5 437	956	222	-	-

考虑基槽开挖回填影响, 采用二维应变分析, 用 Goodman 界面单元对前板桩和土相互作用进行数值模拟^[9], 计算出板桩变形和回填岸坡的沉降

位移, 板桩变形计算结果为 87 cm, 比空间杆系模型计算结果(82 cm)略大。

4 码头整体稳定性核算

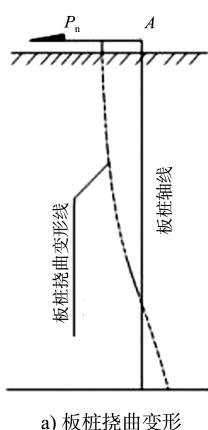
4.1 软土夹层的不利影响

由于拟建码头区域地质地层分布复杂, 是典型的软硬相间结构地层, 并且软夹层分布较为广泛, 码头岸坡存在深层复式滑动的可能。

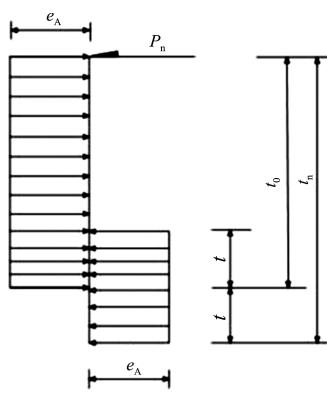
4.2 板桩的阻滑作用

《板桩码头设计与施工规范》规定, 板桩码头的整体稳定性可只考虑滑动面通过板桩桩尖情况, 如果桩尖附近有软土层时, 还应计算滑动面通过软土层的情况。由于设计方案板桩桩尖底高程在-42~-38 m, 并且嵌入较硬土层, 从桩尖和桩尖以下滑动的可能性不大。通过计算板桩截桩力与其产生的抗滑力矩, 并将其代入板桩桩尖以上软土层的滑动稳定性计算中, 即可推算出考虑板桩截桩力的整体滑动计算结果。

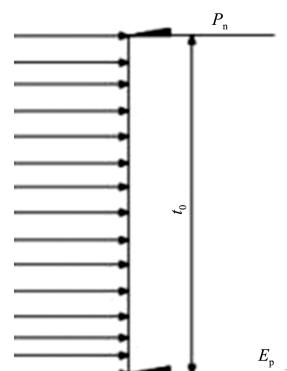
计算过程采用极限状态设计法, 通过单宽板桩的设计抗弯能力推算出板桩结构的截桩力^[10-11], 见图4。



a) 板桩挠曲变形



b) 板桩土压力



c) 板桩右侧土压力简化为集中力

图4 板桩截桩力计算图示

考虑板桩达到抗弯极限状态时, 单宽板桩的极限抵抗弯矩为 M_0 , 通过力的平衡分析, 可以推导出:

$$P_n = \sqrt{2e_A M_0} \quad (1)$$

$$P_n = \sqrt{2e_A \sigma W_0} \quad (2)$$

式中: P_n 为板桩达到极限抗弯状态时在 A 点的单宽板桩墙截桩力; σ 为板桩的极限抗拉强度; W_0 为单宽板桩墙的截面模量。从式(2)可以看出, 板桩截桩力与板桩的材质、截面模量和 e_A 的大小相关: 板桩强度越高、截面模量越大, 板桩的截桩力越大。将板桩截桩力产生的抗滑力乘以最不利滑弧半径, 即可导出板桩抗滑力矩, 将其计入最不利滑弧的抗滑力矩, 除以最不利滑弧的滑动力矩, 即可推算出考虑板桩截桩力后的整体稳定计算结果。验算表明, 设计方案选用高强组合钢板桩(CAZ38-700 S460GP)可以显著增加前板桩抗滑能力。

4.3 整体稳定计算结果

工程后方堆场设计荷载较大, 在使用期满载的情况下, 不考虑板桩抗滑作用时, 复式滑动计算结果不足 0.8, 针对各断面圆弧滑动的计算结果为 0.878~1.162, 最不利的 3 个断面危险滑弧计算结果见表 2。考虑前板桩的抗滑作用后, 所有断面的最危险滑弧计算结果均大于 1.2。

表2 危险滑弧计算结果

计算断面	地质断面	稳定系数	滑弧深度/m	滑动土层
1e-1e	17~17'	0.913	33.32	④ ₁ 黏土下
1f-1f	18~18'	0.878	27.30	④ ₁ 黏土下
1k-1k	24~24'	0.967	30.30	④ ₁ 黏土下

5 码头结构方案实施效果

优选后码头平台结构后方护岸的稳定性好, 60 万 m³疏浚弃土变成了可以直接利用的陆域回填料。在增加 4 万多 m²的陆域使用面积的同时, 减少了大量陆域开山回填量。初步设计概算为 10.32 亿元, 较原设计方案(10.80 亿元)节省投资 4 800 万元, 未包括增加 4 万多 m² 的土地价值^[12-13]。从 2009 年 1 月码头投产试运营至 2012 年 11 月, 2 个泊位完成吞吐量 1 937.13 万 t, 停靠船舶 1 209 艘次, 生产运营经济效益显著。

6 结论

1) 在复杂地质环境地区建设港口, 宜在广泛调研的基础上进行对比分析, 并结合自然条件特点和业主使用要求, 合理选择码头结构。

2) 施工期和运营期的监测结果显示, 顶部透空式前板桩高桩码头在罗源湾北岸具有较好的适用性, 观测期内 50 个沉降位移观测点的累计位移量和沉降量分别在 6、4 mm 以内, 满足设计和现行港口工程规范要求。

3) 前板桩高桩码头采用满堂式布置, 给码头运营带来了便利, 技术和经济指标优于传统的陆连桥式高桩码头。

参考文献:

[1] 交通部天津水运工程科学研究所.福建省罗源湾潮流、波浪及泥沙运动分析研究[R].天津:交通部天津水运工程科学研究所, 1999.

(上接第 46 页)

[7] OCIMF. Anchoring systems and procedures: [S]. Livingston: Witherby Publishing Group Co., Ltd., 2010

[8] DELTARES. Anchor Tests German Bight: report 1207052-002-003[R]. Delft: Deltares, 2013

[9] SINCOCK P, SONDHI N. Drag anchors for floating systems: OTH 93 395[M]. Berkshire: MSL Engineering Limited, 1993.

[10] UFC. Military Harbors and Coastal Facilities: 4-150-06[S]. Washington D.C.: Department of Defense, 2010.

- [2] 刘进生, 刘永绣.卸荷式板桩码头结构在汉堡港的应用[J]. 港工技术, 2005(4): 20-21, 32.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司.板桩码头设计图集[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [4] 交通部第一航务工程局设计院高桩码头研究小组.关于改进高桩码头形式的探讨[J].水运工程, 1976(1): 2-5.
- [5] 章琦, 刘耘东.洋山港三期驳岸回填施工及位移影响分析[J].中国港湾建设, 2014(6): 20-22.
- [6] 中交水运设计院有限公司.福州港罗源湾港区碧里作业区 4 号、5 号泊位工程初步设计(变更报告) [R]. 北京: 中交水运设计院, 2008.
- [7] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第三航务工程局有限公司.板桩码头设计与施工规范: JTJ 290—1998[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [8] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[M].3 版.北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [9] 清华大学岩土工程研究所.福州港罗源湾港区碧里作业区 4 号、5 号泊位岸坡变形有限元分析[R].北京: 清华大学岩土工程研究所, 2005.
- [10] 交通部第一航务工程勘察设计院.海港工程设计手册[M].北京: 人民交通出版社, 1994.
- [11] 陈万佳.港口水工建筑物[M].北京: 人民交通出版社, 1997.
- [12] 段可可.板桩高桩码头应用及推广研究分析[J].中国水运(下半月), 2011, 11(1): 230-231, 234.
- [13] 南京水利科学研究院.福建罗源湾鲁能码头监测总报[R].南京: 南京水利科学研究院, 2011.

(本文编辑 武亚庆)

- [11] Ramnas Offshore AB. Ramnas Offshore Chain Brochure[R]. Ramnas: Ramnas Offshore AB, 2019.
- [12] International Association of Classification Societies. Requirements Concerning Mooring, Anchoring and Towing [S]. London: The Nautical Institute, 2017.

(本文编辑 郭雪珍)