



开敞式海域复杂流态下新型码头结构设计

张蕊¹, 冯浩¹, 潘文博²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456)

摘要: 某工程地处开敞式海域复杂地形区, 潮流特征复杂、风浪及码头下方水深变化大, 为满足复杂建港条件下船舶的安全靠离泊, 采用密排导流桩与高桩码头相结合的混合结构, 通过潮流、波浪、系泊物理模型试验验证该新型结构的应用效果, 确定系、靠泊作业标准。试验结果表明: 该结构可有效改善流态、减小横流强度, 并通过调整导流桩间距改变导流效果, 进而降低工程投资。新型码头结构整体受力可充分发挥各部分功能作用, 实现改善码头前沿水域水文条件, 达到工程技术和经济的平衡, 旨在为类似复杂建港条件下的码头结构设计提供借鉴。

关键词: 开敞式海域; 混合结构; 导流设施; 码头结构; 作业标准

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0008-07

Design of new wharf structure under complex flow conditions in open sea area

ZHANG Rui¹, FENG Hao¹, PAN Wenbo²

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

2. National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology,
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: A certain project is located in an open sea area with complex terrain, complex tidal characteristics, and large changes in wind, waves, and water depth below the dock. To meet the safety of ship berthing and disembarking under such complex port construction conditions, a hybrid structure combining closely arranged diversion piles and high pile docks is adopted. The application effect of this new structure is verified through physical model tests of tidal currents, waves, and mooring, and the standards for mooring and berthing operations are determined. The experiment shows that this structure can effectively improve the flow state and reduce the cross flow intensity. At the same time, the diversion effect can be changed by adjusting the spacing between the diversion piles, reducing the engineering investment. The overall stress of the new dock structure can fully utilize the functions of each part, improve the hydrological conditions of the dock front water area, and achieve a balance between engineering technology and economy. The aim is to provide reference for the design of dock structures under similar complex port construction conditions.

Keywords: open sea area; hybrid structure; diversion facility; wharf structure; operating standard

自新中国成立以来, 中国沿海港口的发展经过了恢复发展建设期、快速发展建设期、高速高等级发展建设期、平稳发展建设期4个阶段^[1]。目前对不同地区建港适应性的研究已有长足发展, 外海开敞式码头港址的选择通常选择在地形较缓、

地质条件好、水流平顺的位置, 以满足使用要求。但为满足港区统一规划以及集约利用岸线资源等因素, 加之大量综合条件较好的港址已被开发的现实情况, 建港条件日趋复杂。尤其岛屿附近可供利用的自然岸线往往掩护条件差, 水深变化剧

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 张蕊(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水工结构设计工作。

烈,浪、潮、流水动力作用显著^[2]。因此,在该类区域建设码头时改善码头前沿水域的水文条件极为重要。

为在水流条件较差的区域建设码头,通常采用配套建设导流堤结构,通过建设实体导流堤以归顺水流,并在导流堤掩护水域内建设码头,该设计方式已成功应用于很多工程,理论研究也比较成熟^[3]。上述研究主要集中在实体式导流堤等建筑物,一定程度上改变了海域的自然条件。但随着大规模的港口建设,该类结构大量应用,近岸生态环境恶化的问题日益突出,越来越难以适应新时期生态文明发展要求。因此,研究开发节约资源、环境友好的新型导流设施意义重大。

本文以典型工程为例,针对外海复杂建港条件下的高桩导流设施结构进行研究,采用码头与高桩导流设施相结合的混合结构,在改善码头前沿水域水文条件的同时,实现工程技术和经济的平衡。总结设计要点,旨在为类似复杂建港条件下的码头结构设计提供参考。

1 开敞式海域自然条件特点

1.1 潮流不规则,流态复杂

开敞海域近岸的潮流泥沙条件一方面受到区域潮流动力、大范围泥沙环境的影响,另一方面也受到局部多变地形的约束,产生一定的不规则特性。

在地质复杂区域,较大型岛屿存在连续平顺的长岸线,或是经人工整合的岛群可以形成连续平顺的长岸线,上述两种情况下可以保证较长岸线范围内潮流平顺。对于面积相对较小的海岛,或大型岛屿的局部岬角,其流态的主要特征为:受岸线自身地形或周边汊道分流影响,存在涨落流向分离、挑流、回流等不利流态。利用该类岸线布置码头泊位,码头前缘线的方位难以同时与涨、落主流向保持平顺,泊位局部(常为端部)与水流存在一定夹角,泊位区的横流影响较为显著,采取措施归顺水流成为建设码头关键技术的难题之一^[4]。

1.2 波高大,波周期长

开敞式海域特别是群岛外沿紧邻外海,所在水域的开阔度通常在 180° 以上,易受到开阔海域形成的大浪影响,除波高较大外,还可能存在长周期浪的影响。针对强浪向、常浪向缺乏必要掩护的区域建港,其波浪问题的重要性相对突出。

1.3 地形起伏大,地质分布不均、承载力差异大

开敞海域近岸地质条件特点包括:岩面总体上由陆地向海侧倾斜,地质岩面起伏大,岩面覆盖层薄厚不一,且总体较薄^[5]。针对非裸岩区域,岩面上部所覆盖的软土常为有一定厚度的高压缩性淤泥质土,承载力较差,呈流塑状态,大部分软基与基岩之间缺少过渡层。因此,在该地质条件下,结构与地质的适应性是码头结构选型的难点。

2 开敞式海域导流设施结构

2.1 实体导流结构

1) 随着《海域使用管理法》的实施,海域使用权审核日趋严格。为了加强海域使用管理,维护国家海域所有权和海域使用权人的合法权益,促进海域的合理开发和可持续利用,相关部门制定了《海域使用管理法》,在审核海域使用申请的工作中,必须严格执行本法,各级人民政府及海洋行政主管部门应当严格按照本级的审批权限行使审批权^[6]。而建造实体式导流堤是一种永久性改变海域自然属性的特殊用海方式,在管理办法日趋收紧的当下,在外海建设实体导流设施获批较为困难。

2) 实体导流堤建筑物对环境的影响需要严格评估。随着大规模的港口建设,尤其是实体式导流堤等建筑物的建设,一定程度上改变了海域的自然条件,近岸生态环境恶化的问题日益突出,因此未来的港口建设和规划必须走自主创新、节约资源和环境友好之路。为实现港口建设和海岸带开发的可持续发展,势必更加重视港口工程对海洋生态环境影响的研究,同时加强工程的环境影响评估,以及对环境友好型港口和海岸建筑物新结构形式的研发都将成为未来工程建设重点方向。

3) 水深地质条件对实体导流堤的工程经济性影响较大。针对码头配套建设导流堤的形式已有许多成功案例。在地质条件较好的区域, 实体导流堤作为码头的配套水工建筑物, 工程投资占比可控制在合理范围内。但是随着港口岸线的持续开发, 天然良好的港址非常稀少。在水深较深、淤泥层较厚的海域, 采用实体式导流堤改善码头前自然条件, 一方面需要对地基进行处理, 使工程投资越来越高; 另一方面, 随着水深的增加, 斜坡堤工程投资成几何级数增长。因此, 在深水、地质条件较差的海域建设实体式导流堤, 其工程经济性较差。

2.2 低透空率高桩导流结构

2.2.1 高桩码头+独立透空式导流结构

为提供结构整体性抵抗水平荷载, 导流结构可采用梳式密排斜桩+斜顶桩相结合的形式, 上部现浇桩帽连成整体。该结构将码头与导流设施两种透空结构独立开来, 导流设施两侧可分别建设码头结构, 通过导流设施自身发挥归顺水流的作用。其主要特点包括:

1) 码头与导流设施相互独立, 导流设施仅承受波浪力、水流力, 受力清晰、简单。

2) 为方便施工通常导流设施的上部桩帽高程需要在施工水位以上, 而非功能要求, 因此结构经济性较差。

3) 与实体结构相比, 透空式导流结构导流桩间隙有一定的透浪系数, 波浪壅高较小^[7], 透水构筑物对环境的影响小, 可通过调整透空率控制导流效果^[8], 但独立透空式导流结构桩基数量通常较多, 且桩基仅承受水平荷载而无竖向荷载, 因而不仅费用高, 且桩基承载力得不到充分发挥。

2.2.2 高桩码头+密排桩的组合结构

高桩码头+密排桩的组合结构仍为低透空率高桩导流结构^[9], 基于大量工程经验, 对透空式导流结构进行优化。优化后结构的创新点主要有:

1) 导流设施上部结构及码头桩基采用传统的高桩结构形式, 上部结构连成整体, 导流桩基与

结构桩联合受力, 共同承担码头上部荷载及船舶荷载, 结构整体受力更好。

2) 发挥高桩结构本身对于深水、软土地质、外海开敞式海域适应性好的优点, 而且由于密排导流桩之间仍有一定空隙, 其结构本身为透水建筑物, 因此对于海洋环境影响较小。

3) 将导流桩布置在海侧码头前沿, 可使导流设施对停泊水域的掩护效果充分发挥, 导流设施平面总长更短、更经济。

3 工程实例

3.1 工程概况

某码头工程位于典型开敞式海域, 自然条件下工程水域流态紊乱, 局部有回流, 局部垂向上潮流呈旋转性分布, 流向分散、流速强、横流大。工程受到相邻工程影响陆域围垦范围有限, 码头前沿局部流态较为复杂(图 1); 工程位置三面向外海开敞, 既受 SSW—SSE 向外海波浪的影响, 同时受 SW—N 向波浪的影响, 波浪掩护条件一般; 工程地质条件复杂特性明显, 典型剖面见图 2, 码头下方水深变化大, 且深水区岩面覆盖层又相对较薄, 水深较浅区软土覆盖层深厚但天然地基承载力较差, 良好持力层埋深较深, 因此水流、波浪、地形及地质条件均较为复杂, 成为工程建设的技术难点。

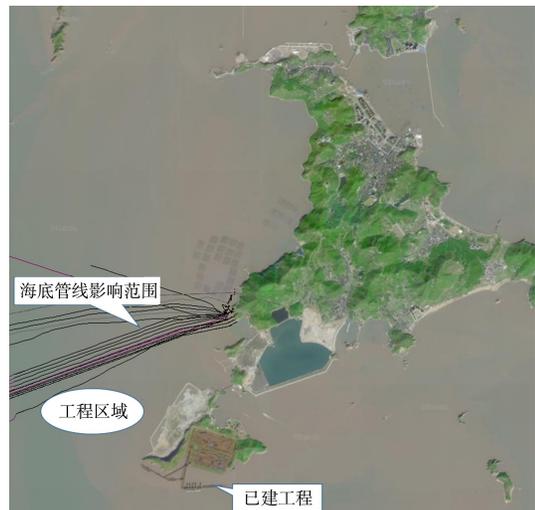


图 1 工程位置

Fig. 1 Project location

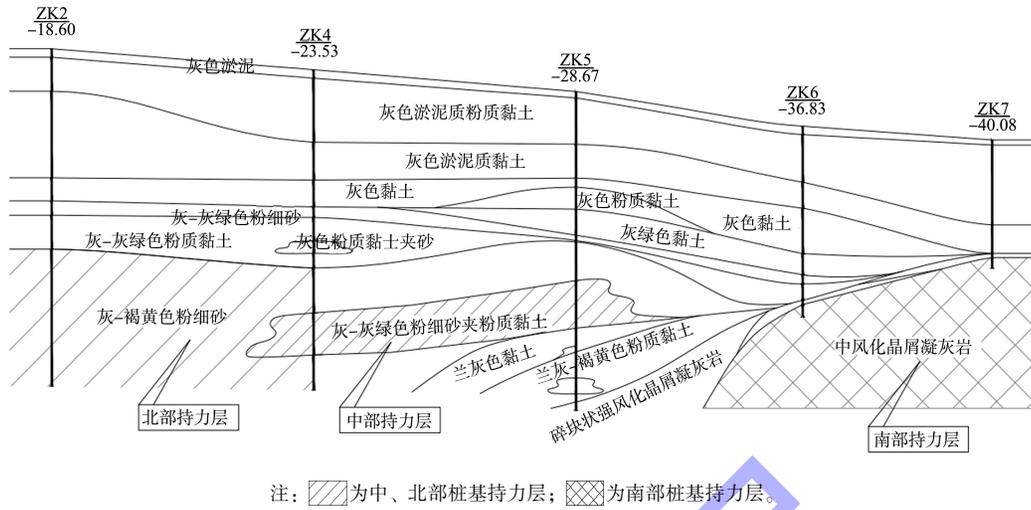


图 2 工程典型剖面
Fig. 2 Typical cross-section of project

3.2 结构方案设计

3.2.1 结构选型

码头结构选型与自然条件、使用要求、施工技术、工程投资密切相关, 主要从以下几个方面考虑: 1) 地质勘察表明: 工程区表层分为发育厚度较大的高压缩性淤泥质土, 承载力较差, 因此宜采用质量轻、透空性好的高桩板梁式码头结构, 通过桩基将码头结构自身重力和使用荷载传递到

深层桩基持力层。2) 大范围潮流数学模型试验表明: 在不考虑导流措施, 仅实施陆域围垦和码头建议的情况下, 拟建码头水域整体处在落潮形成的逆时针回流区内, 码头前沿水流流速和夹角均较大, 横流影响难以控制; 而在装船码头前沿增设高桩导流设施后, 码头前沿流态在涨落潮时段均得到明显的归顺, 见图 3、4。



图 3 无导流设施工况流场表层流迹
Fig. 3 Surface flow trace under conditions without diversion facilities

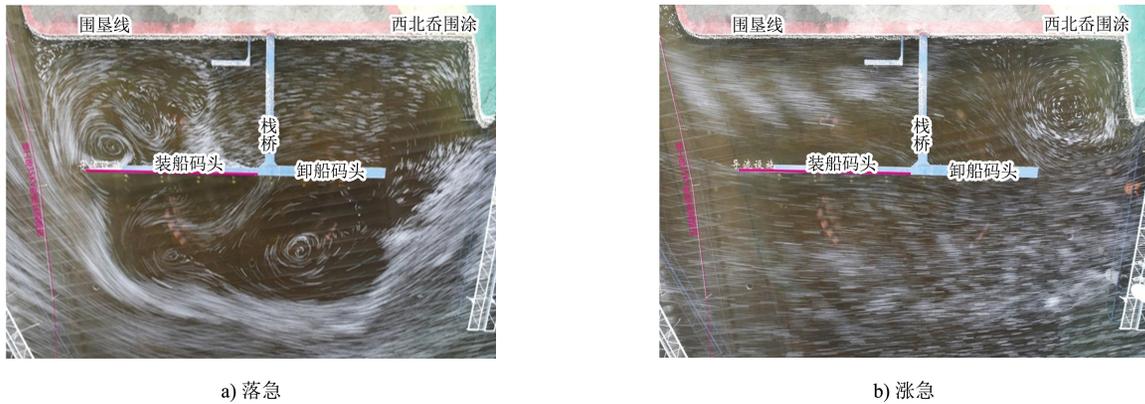


图 4 建导流设施后流场表层流迹

Fig. 4 Surface flow trace after construction of diversion facilities

3.2.2 结构方案

码头结构采用高桩梁板与框架相结合，排架间距 10.5 m，每榀排架布置 7 根桩基，分别为 1 根 $\phi 1\ 600\text{ mm}+6$ 根 $\phi 1\ 500\text{ mm}$ 钢管桩。为归顺水流，码头采用框架结构，前部设置导流密排斜桩，下部增设横向承台、纵向帽梁和立柱。导流密排斜桩布置于纵向帽梁下方，采用 $\phi 1\ 600\text{ mm}$ 钢管桩(间距 2.1 m)，且桩基两侧设肋板，相邻密排桩间形成 0.4 m 透浪空间。为确保结构刚度，排架跨

中增设 2 根 $\phi 1\ 500\text{ mm}$ 钢管桩作为斜顶桩。密排桩及斜顶桩桩顶通过纵向帽梁连成整体，帽梁与前桩帽相连接，形成以导流设施相结合的整体结构。纵向帽梁底高程确定时，需兼顾码头上部结构所受波浪力最小化，以及现场浇筑施工的可行性，通过码头沿纵向梁系、走道板以及纵向帽梁结构高程差异的设置，在码头前沿形成 3.26 m 净空的透浪空间，以减少波浪壅高对码头面高程和结构受力的影响。低透空率密排斜桩码头结构断面见图 5a)，三维空间见图 5b)。

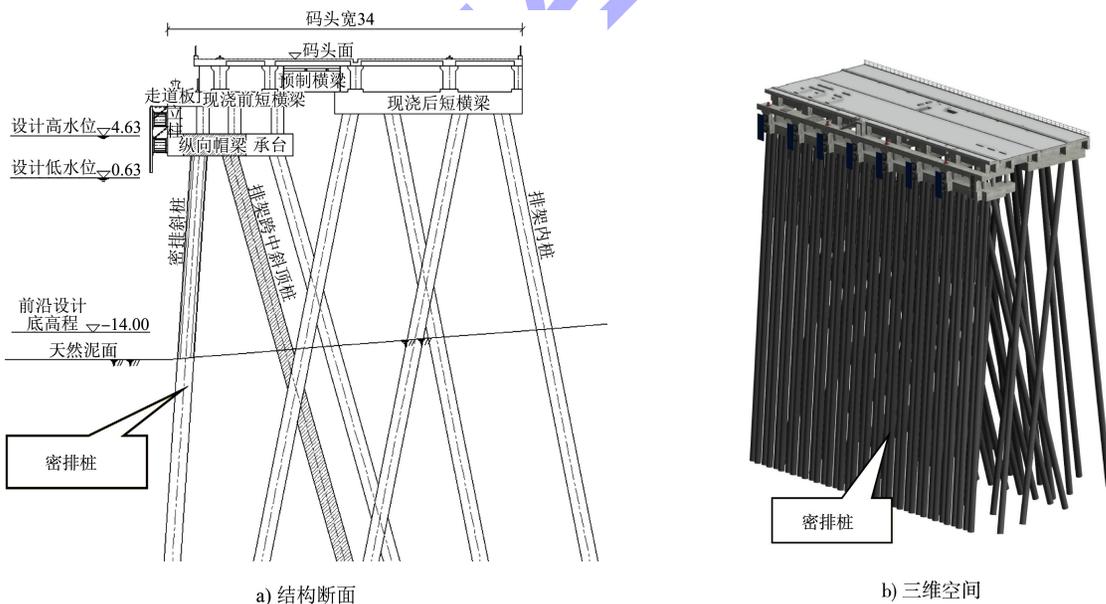


图 5 低透空率密排斜桩码头 (单位: m)

Fig. 5 Closely arranged inclined pile wharf with low permeability ratio (unit: m)

3.3 应用效果

为验证码头前线位置布置的合理性，并且定性、定量分析码头下方采用桩基结构导流设施的

应用效果，考虑到波浪对于低透空率梳式密排斜桩码头的影响，其作用效应相对较为复杂，需要分析波浪对于结构以及船舶系靠泊作业影响^[10]，

分别开展潮流、波浪整体以及系泊物理模型试验。

3.3.1 潮流模型影响

1) 综合分析码头前沿的横向流速、横流强度、平面影响范围、透空率等多方面因素。与无导流措施相比, 码头工程采取同透空率的导流桩方案横流强度减小, 导流设施透空率越低, 实施后横流改善效果越明显。

2) 与码头方位角 154° 平面布置方案相比, 160° 码头平面布置方案更顺应涨落流向, 横流更小, 当港池内落潮时, 大于横向流速 0.3 m/s 的范围明显减小, 可从 45.8% 降至 27.8% 。

3) 采取导流措施后, 对码头中部涨落潮流归顺效果较好, 码头端部流态改善效果不显著, 应在端部延长导流结构, 确保船舶停泊范围流态良好。

4) 当水流与码头夹角一定时, 横向推开流流速比例与来流流速的大小之间无显著关系, 基本稳定在某一个数值附近。排架间距内布置 4 根导流桩时, 在 0.5 倍船宽处, 垂直于码头水流穿桩剩余流速占来流流速的断面平均值约 39% , 个别位置最大横向推开流比例可达 52% 。如导流桩数目减少为 3 根或取消, 随着透空率的增加, 在 $0.5 \sim 1.0$ 倍船宽范围内, 横向推开流流速占来流流速的比例逐渐增大, 特别是无导流桩工况时, 断面横

向推开流最大流速可达来流流速的 95% 以上, 码头结构桩群几乎没有掩护作用。

3.3.2 波浪物模影响

重点测试不同方向、水位和重现期波浪作用下, 结构的波浪反射、透射情况及结构受到的波浪荷载, 主要结论如下:

1) 90° 横浪作用下, 低透空率密排斜桩式码头结构对波浪有一定的反射效应, 且不同位置处的波浪反射情况有所不同: 1.0 倍船宽位置综合波高 $> 50\%$ 船宽位置综合波高 > 1.0 倍波长位置综合波高。 1.0 倍船宽位置综合反射系数最大为 $C_{R,H_{13\%}} = 1.45$, 综合透射系数最大为 $C_{T,H_{13\%}} = 0.40$ 。

2) 与 90° 横浪作用相比, 在 25° 斜向浪作用下, 结构前方的波浪反射效应有所降低。试验条件下, 1.0 倍船宽位置综合波高 $> 50\%$ 船宽位置综合波高 > 1.0 倍波长位置综合波高, 1.0 倍船宽位置的综合反射系数最大为 $C_{R,H_{13\%}} = 1.19$ 。

3) 25° 斜向浪作用下, 波浪沿结构传播, 传播过程中未出现类似直墙结构中易出现的延堤波现象。原因为密排斜桩采用两侧带有竖向肋板, 且桩基布置时采用在同一纵轴线前后交错布置 (图 6), 对沿结构传播的波浪存在有效的能量损耗, 使结构受力更有利。

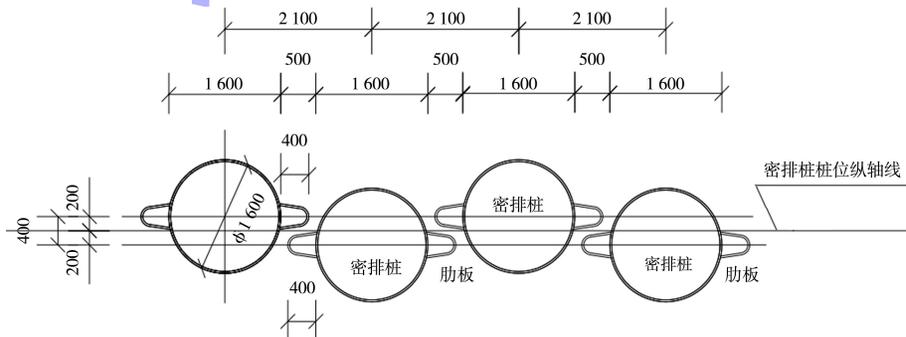


图 6 密排斜桩平面布置 (单位: mm)

Fig. 6 Plan layout of closely arranged inclined piles (unit: mm)

3.3.3 系泊影响

结合波浪物模影响结论, 试验选取波浪反射更为不利的 90° 横浪作为波浪控制条件开展研究,

主要结论如下:

1) 单纯波浪作用: 90° 横浪 $H_{4\%} = 1.2 \text{ m}$ 、平均周期 $T = 6.0 \text{ s}$ 、设计高水位、压载工况下, 船舶

最大系缆力为 364.9 kN, 满足规范要求;

2) 风、浪、流联合作用下, 船舶最不利工况为设计高水位、压载、90°横浪、吹开风、涨急流作用;

3) 水位和载位的影响与运动响应规律一致。

横浪条件下, $H_{4\%} \leq 1.2$ m、平均周期 $T \leq 6.0$ s、吹开风速 $v = 13.8$ m/s、涨急流, 船舶动力响应满足船舶作业标准(由船舶运动量控制); $H_{4\%} \leq 1.4$ m、平均周期 $T \leq 6.0$ s、吹开风速 $v = 24.4$ m/s、涨急流, 船舶动力响应满足离泊标准(由缆绳张力控制)。

顺浪条件下, $H_{4\%} \leq 1.5$ m、平均周期 $T \leq 6.0$ s、吹开风速 $v = 13.8$ m/s、涨急流, 船舶动力响应满足船舶作业标准; $H_{4\%} \leq 2.0$ m、平均周期 $T \leq 6.0$ s、吹开风速 $v = 24.4$ m/s、涨急流, 船舶动力响应满足船舶离泊标准。

4 结语

1) 开敞式海域普遍具有风大、浪高、流急、地质复杂等共性特征, 尤其是潮流受海底地形起伏的影响, 普遍存在涨落潮往复流、横流、转流等特征, 在合理确定码头前沿线位置和方位角前提下, 还需采用一定的结构辅助措施归顺水流、满足船舶系靠泊的要求。

2) 试验结果表明, 采用桩基结构导流设施可改善流态、使横流强度减小, 效果显著。通过调整导流桩基间距改变阻流效果, 实现功能要求, 并降低工程投资, 可验证工程实施效果, 同时可以确定系靠泊作业标准, 为安全作业提供依据。

3) 与单独设置导流设施相比, 导流桩与码头结构相结合的混合形式整体受力可充分发挥各部分功能作用, 实现技术、经济的平衡。可为类似复杂流态条件下的码头结构设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等. 中国沿海港口建设状况及

发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1211-1217.

Ji Z Z, Yang X Y, You Z J, et al. Construction state and development trend of coastal ports in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1211-1217.

[2] 陈刚, 李冰, 孙士勇. 外海岛礁地形大型泊位平面设计要点[J]. 水运工程, 2013(10): 143-148.

Chen G, Li B, Sun S Y. Design essentials for plan of deep-water berth in sea island topography[J]. Port & waterway engineering, 2013(10): 143-148.

[3] 康苏海, 吕彪. 新海港挡流导堤建设方案比选研究[C]//中国海洋协会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 舟山: 中国海洋协会, 2019: 555-559.

Kang S H, Lyu B. Comparative research on construction schemes of current-blocking island embankment of new harbor[C]. China Oceanic Association. The 19th China Marine (Coastal) Engineering Academic Symposium. Zhoushan: China Oceanic Association, 2019: 555-559.

[4] 叶宇旻, 张卓先. 码头桩基阻流设施效果潮流物理模型试验研究对比分析[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(4): 36-40, 45.

Ye Y M, Zhang Z X. Comparative analysis of tidal current physical model study on the effect of wharf pile foundation choke flow facilities[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(4): 36-40, 45.

[5] 张蕊. 油品码头桩基优化设计和施工工艺[J]. 水运工程, 2021(5): 127-132.

Zhang R. Optimization design and construction technology for pile foundation of oil wharf[J]. Port & waterway engineering, 2021(5): 127-132.

[6] 刘英姿. 管好用好海域实现可持续发展: 在《中华人民共和国海域使用管理法》正式实施之际访国家海洋局局长王曙光[J]. 资源与产业, 2002(1): 13-15.

Liu Y Z. Managing and utilizing maritime space soundly, realizing sustainable development: covering director general of State Oceanic Administration P. R. China[J]. Resources & industry, 2002(1): 13-15.