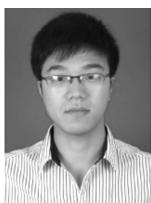


· 港 口 ·



复杂自然环境下防波堤工程设计

姜宁林，刘全兴

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司，湖北 武汉 430060)

摘要：防波堤作为码头结构的掩护主体，在码头的平稳可靠运行中起着重要的支撑作用，防波堤的平面布置及结构选型是设计工作的重点和难点。以具体工程为依托，针对强浪、骤淤等复杂的自然条件，对不同的防波堤平面布置方案、防波堤结构方案开展可行性及经济性的比选分析。根据综合分析结果，提出将防波堤堤头布置在破波带以外的平面方案，并提出深水区块石防波堤+浅水区混凝土单板桩防波堤的组合结构方案，具有较好的经济效益。

关键词：复杂自然环境；平面布置；防波堤结构

中图分类号：U 656.2

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)06-0056-06

Design of breakwater engineering under complex natural environments

JIANG Ninglin, LIU Quanxing

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: As the main protection part of the wharf structure, the breakwater plays an important role in supporting the stable and reliable operation of the wharf. The layout and structure selection of the breakwater are the key and difficult points of the breakwater design work. Based on specific projects, this study compares the feasibility and economy of different breakwater layout and structure schemes under complex natural conditions such as strong waves and sudden siltation. According to the comprehensive analysis results, the study proposes the layout of arranging the breakwater head outside the surf zone and puts forward the combined structure scheme of rock slope breakwater in deep water areas and concrete single sheet-pile breakwater in shallow water areas, which has excellent economic benefits.

Keywords: complex natural environments; layout; breakwater structure

防波堤是港口工程中的重要建筑物，对于波浪条件恶劣的地区，防波堤的布置主要考虑其阻隔或消弱波浪作用，维护港池内水域平稳，满足船舶安全作业的需要。对于泥沙运动活跃的地区，防波堤也用于拦截挟沙的水流，改变泥沙淤积区域或者范围，防止或减轻泥沙在港池或航道的淤积，满足船舶进出港的航行吃水要求^[1-3]。

对于大部分的港口工程来说，码头一般会布置在风浪条件相对良好的区域。但海外工程的一些码头作为大型电厂、大型能源项目的配套工程，其位置需要适应后方电厂、矿厂等的总体选址要

求，所面对的风、浪、地质等自然条件往往比较复杂。对于这类自然条件复杂的港口工程，防波堤的建设应综合考虑其掩护功能及经济性的需要，进行防波堤的平面布置及结构设计比选。

1 依托工程

1.1 工程概况

为满足孟加拉电力供应，降低其国内电价成本需求，根据孟中印缅经济走廊项目框架协议，孟加拉某私有发电企业与某中资发电企业组成合资公司，开发建设孟加拉某 2×660 MW 燃煤发电

收稿日期：2022-08-05

作者简介：姜宁林（1987—），男，硕士，高级工程师，从事港口海岸工程结构设计。

工程, 该工程位于孟加拉南部, 孟加拉湾以西, 距离吉大港约 40 km。

为保证燃煤电厂所需煤炭的稳定供给, 规划建设 1 个专用煤炭进口码头, 码头的设计船型为 6 000 吨级驳船, 码头主体结构包括 2 个 6 000 吨级卸船泊位, 接岸引桥以及南、北 2 条防波堤。码头和防波堤平面布置见图 1。

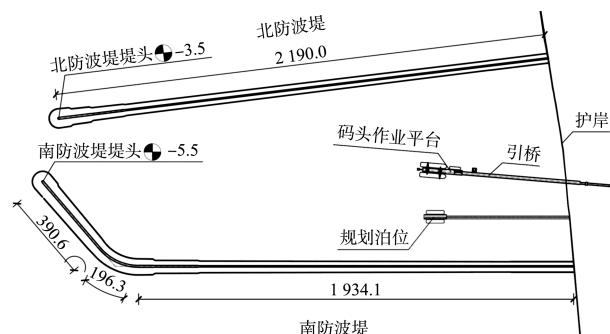


图 1 码头和防波堤平面布置 (单位: m)

1.2 主要自然条件

1.2.1 水位条件

本工程的水位条件: 设计高水位为 4.91 m, 设计低水位为 0.43 m, 极端高水位为 9.51 m (50 a 一遇)。孟加拉湾是全球受风暴潮影响最为强烈的区域, 在风暴增水的作用下, 极端高水位要远高于设计高水位。

1.2.2 波浪条件

工程位于孟加拉湾, 直面印度洋, 防波堤掩护范围的泥面高程在 -5~5 m (海图基准面起算)。工程所在位置最大波高 9.08 m, 周期 14.52 s, 波长 159 m。根据本工程波浪数学模型报告成果^[4], 防波堤所在位置处设计波要素 (100 a 一遇, 极端高水位) 见表 1。

表 1 防波堤设计波要素

泥面 高程/m	$H_{1\%}$ m	$H_{4\%}$ m	有效波高 H_s /m	平均波高 H_m /m	平均周期 T_m /s	平均波长 L_m /m
-4.3	9.26	8.20	7.01	4.85	14.52	170.44
-0.4 (7.17)	(7.17)	6.37	4.67	14.52	142.75	
1.0 (6.15)	(6.15)	(6.15)	4.68	14.52	132.87	
2.0 (5.20)	(5.20)	(5.20)	3.96	14.52	122.72	
4.0 (4.13)	(4.13)	(4.13)	3.15	14.52	109.71	

注: () 表示波浪破碎。

1.2.3 泥沙条件

本工程近岸水体含泥量高, 泥沙运动活跃, 骤淤情况突出。工程所在区域有多条河流, 挟带大量泥沙入海, 近岸水体常年浑浊, 含沙量 1.09 kg/m³。通过泥沙数学模型、物理模型试验进行分析, 工程建设后港池内平均淤积强度为 3.35 m/a, 平均淤积量约 132.79 万 m³/a。

1.2.4 地形和地质条件

本工程近岸海底地形平缓, 浅滩范围分布广。场地原始地貌为海滩及滨海地貌, 海面较为宽阔。海底地形起伏较小, 距海岸 0~1 700 m 为潮间带, 涨潮时被海水淹没, 低潮时部分出露; 距岸 1 700~3 200 m 区域地形变化不大, 高程在 -6.0~-2.0 m。

根据地勘报告, 工程所在区域土层分布从上往下分别为: ①粉质黏土(很软混砂)、②粉质黏土(很软-软, 混砂不均)、③粉质黏土(很软-软, 混砂较多)、④粉质黏土(硬, 局部较软, 局部有粗颗粒)以及⑤黏土。

1.2.5 地震条件

根据孟加拉国家建筑规范 (Bangladesh National Building Code, BNBC)^[5] 提出的地震带划分图, 本工程位于第 3 带, 其地震带系数 (seismic zone coefficient) $Z=0.28$, 属于高震区。

1.2.6 市场条件

由于河口三角洲的特殊地质构成, 其他国家随处可见的岩石成了孟加拉国非常稀缺的资源, 防波堤建设所需的大量块石需要从印度、马来西亚等周边国家进口, 若采用全块石防波堤结构, 防波堤的总造价过高, 将对整个工程的经济可行性产生影响。为降低防波堤工程总造价, 需综合考虑其他可行的结构形式。

2 防波堤平面布置

根据本工程的自然条件, 平面布置主要解决以下问题: 1) 设计水位情况下, 阻隔或消弱波浪, 降低港内波高, 保证船舶装卸作业的安全可靠, 满足码头有效作业时间及吞吐量要求。2) 设计水

位情况下, 阻隔或消弱波浪、水流, 考虑航道口门的宽度及方位, 以满足船舶顺利进入航道的要求。3) 极端水位情况下, 阻隔泥沙, 综合平衡维护性疏浚与工程总造价, 确保维护性疏浚不影响码头的正常作业需要。

根据上述防波堤设计功能的需要, 通过开展波浪、泥沙专题研究, 对单防波堤、岛式防波堤、双环抱式防波堤的平面方案进行比选, 最终确定

采用双环抱式防波堤平面布置方案。

对于双环抱式的防波堤平面布置方案, 进一步针对堤头位置、防波堤长度进行多方案比选, 在港内作业波高及泥沙回淤量可接受的前提下, 尽量减小防波堤投资, 尽可能做到投资与减淤效果协调统一^[6-7], 不同的防波堤平面布置方案见图 2。不同堤头位置、防波堤长度方案下的泥沙回淤情况及建设+运营总成本见表 2。

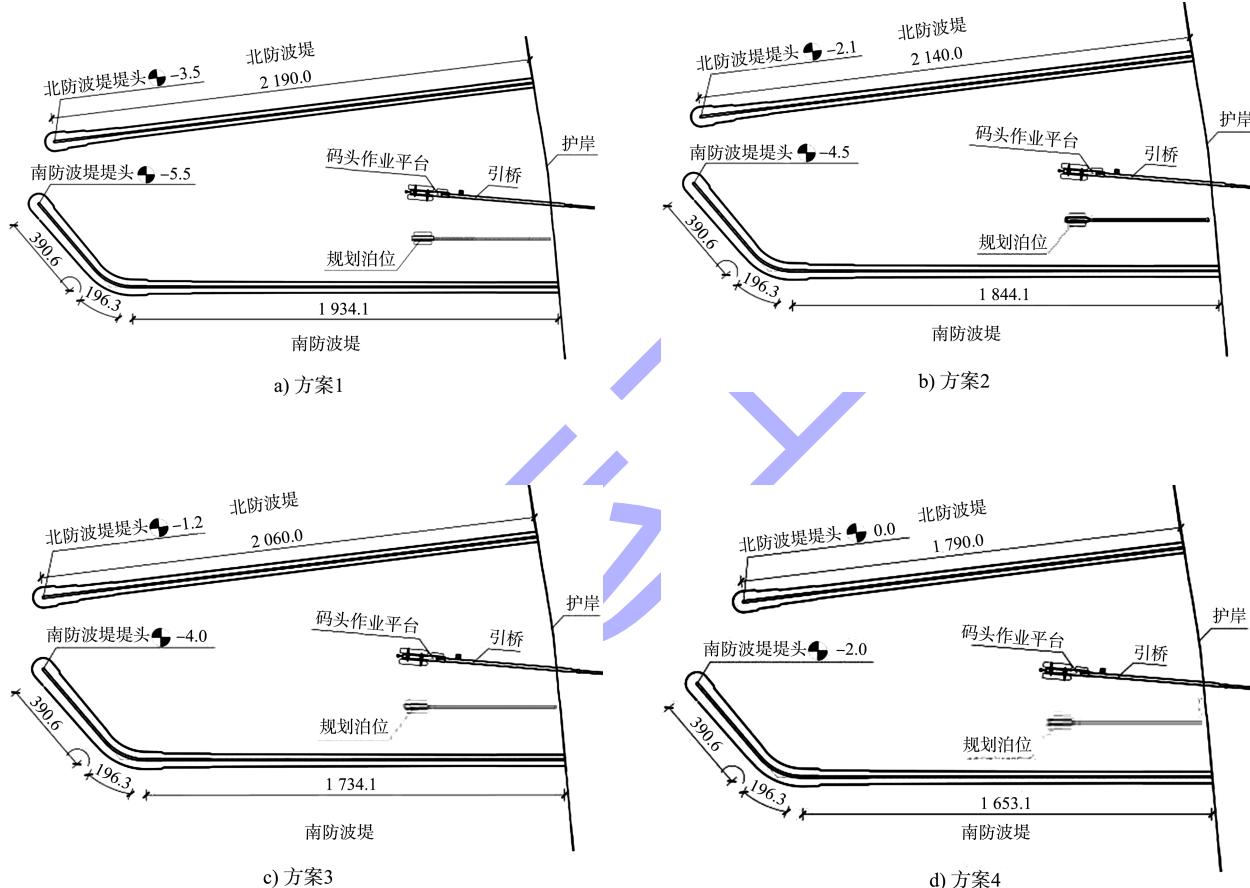


图 2 防波堤平面方案比选 (单位: m)

表 2 不同堤头位置、防波堤长度方案比选

方案	布置特点	泥沙回淤/(万 m ³ · a ⁻¹)	建设+运营总成本/亿美元
1	南堤长 2 521 m, 堤头高程-5.5 m; 北堤长 2 190 m, 堤头高程-3.5 m	132.79	3.47
2	南堤长 2 421 m, 堤头高程-4.5 m; 北堤长 2 140 m, 堤头高程-2.1 m	162.89	3.78
3	南堤长 2 321 m, 堤头高程-4.0 m; 北堤长 2 060 m, 堤头高程-1.2 m	184.04	4.00
4	南堤长 2 240 m, 堤头高程-2.0 m; 北堤长 1 790 m, 堤头高程 0.0 m	237.92	4.70

注: 运营期为 30 a。

根据表 2 的对比结果, 防波堤长度越长, 泥沙年回淤量越小, 虽然建设期成本较高, 但是总的建设+运营成本却较低。考虑到码头后期的运营, 经

综合比选, 推荐采用的防波堤平面方案为: 南堤总长 2 521 m, 堤头高程-5.5 m, 北堤总长 2 190 m, 堤头高程-3.5 m。南、北堤堤头均位于破波带以

外, 可以显著提高防波堤的挡沙效果。

3 防波堤结构设计

防波堤结构主要分为斜坡式和直立式两大类。斜坡式防波堤根据堤心材料的不同可分为块石防波堤和袋装砂防波堤; 直立式防波堤根据形成直立式岸壁材料的不同可分为重力式直立堤和桩式直立堤。此外, 半圆形防波堤、桩基透空堤等在特定的环境条件下也有所应用。

3.1 块石防波堤

防波堤堤顶高程一般根据越浪量控制要求进行确定^[8]。本工程位于孟加拉湾, 若考虑极端高水位的设计工况, 防波堤堤顶高程超过 15.0 m, 防波堤造价将非常高, 影响整个工程的经济可行

性。风暴潮期间码头停止运营, 可不考虑风暴潮期间防波堤的阻隔或消弱波浪作用, 仅考虑防波堤的挡沙作用, 防波堤堤顶高程可大幅降低。考虑到施工期人员和设备的通行安全, 防波堤堤心石的顶高程应高出设计高水位。据此, 防波堤堤顶高程取 8.3 m, 堤顶宽度考虑摆放 3 块扭王字块体, 斜坡坡比为 1:1.5。堤心采用抛填 5~500 kg 块石, 护面采用扭王字块, 其质量根据波浪的不同取 10~35 t, 护面块体下设块石垫层。防波堤两侧设置抛石护底, 根据地勘资料揭示, 土层以粉质黏土为主, 护底部分须先开挖后换填护底块石^[9], 块石防波堤结构见图 3。块石防波堤平均造价约为 24.10 万元/m。

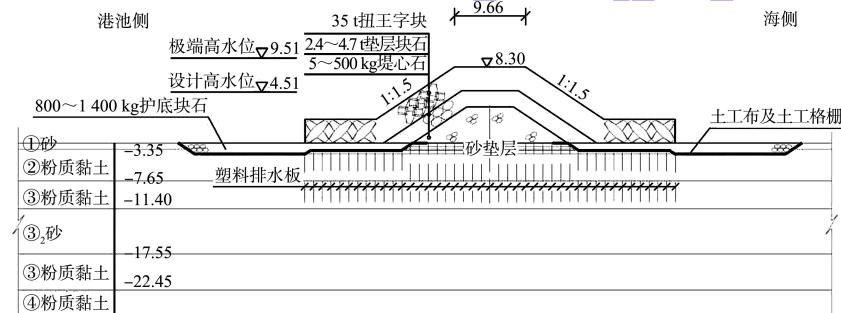


图 3 块石防波堤断面 (单位: m)

3.2 袋装砂防波堤

袋装砂防波堤的整体结构与块石防波堤类似, 堤顶高程的确定与块石防波堤一致。堤心部分采用袋装砂结构, 外侧护面坡比为 1:2, 袋装砂防波堤

结构见图 4。本工程所在地区地震峰值加速度为 0.28g, 属于高震区, 袋装砂结构在地震荷载作用下易液化, 虽然该方案造价相对较低, 但可靠性相对也较低。袋装砂防波堤平均造价约为 21.76 万元/m。

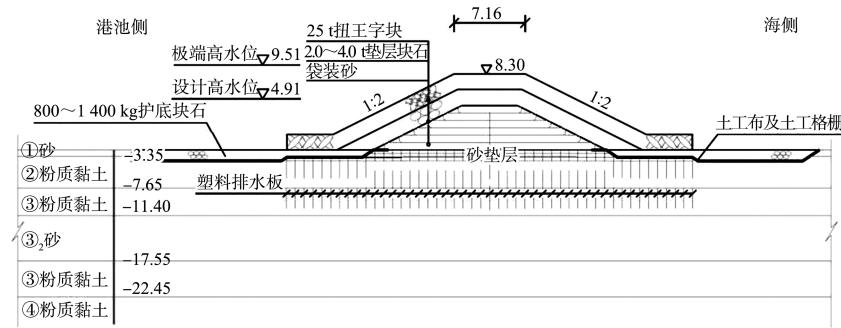


图 4 袋装砂防波堤断面 (单位: m)

3.3 半圆形防波堤

针对孟加拉国石料严重缺乏, 石料进口费用高的突出问题, 设计中考虑了半圆形防波堤的方

案。半圆形防波堤的堤身采用半圆形构件, 下部设置抛石基床, 两侧伸出拱圈形成悬臂底板, 底板两侧设置护底块石, 与块石防波堤一致, 半圆

形防波堤顶高程定为 8.3 m，半圆形防波堤结构见图 5。本工程极端工况下波浪大，根据稳定性需要，半圆形沉箱的质量较大，底板两侧需要设置

较厚的护底块石，这些因素导致半圆形沉箱防波堤的造价相对较高。半圆形防波堤平均造价约为 28.05 万元/m。

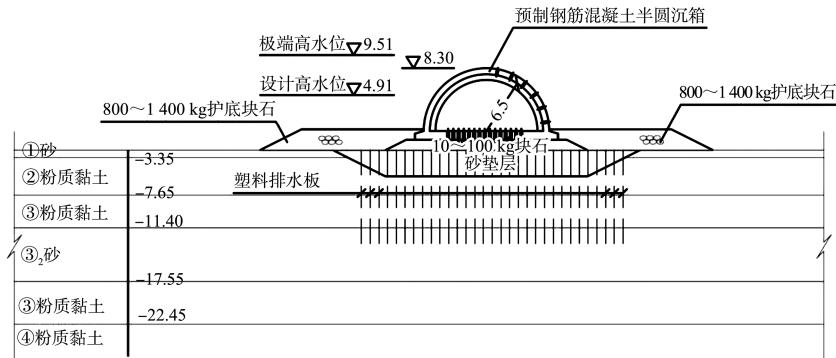


图 5 半圆形防波堤断面 (单位: m)

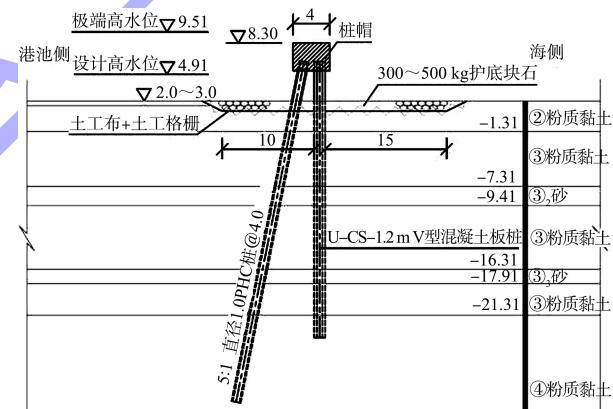
3.4 混凝土单板桩防波堤

为了减少块石用量，考虑采用混凝土单板桩防波堤结构。该结构依靠自身刚度及嵌入地基部分的土体侧向抗力承受波浪及水流荷载。因此，混凝土单板桩所能承受的波浪、荷载相对有限。对于本工程来说，近岸海底地形平缓，浅滩范围分布广，浅滩区域波浪、水流等条件相对较好，可以考虑采用混凝土单板桩防波堤结构。

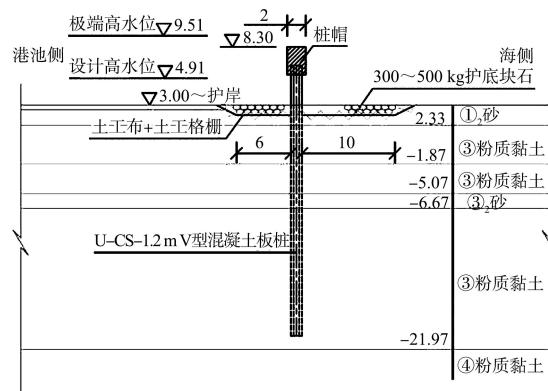
经计算，海底高程 2.00 m 至陆域部分可采用混凝土单板桩防波堤结构。根据海底高程的不同，混凝土单板桩防波堤结构可进一步优化为 2 部分：1) 带斜撑的板桩防波堤，海底高程为 2.00~3.00 m；2) 不带斜撑的板桩防波堤，海底高程为 3.00 m 至陆域，不需要设斜撑^[10]，具体结构见图 6。板桩防波堤泥面位置采用 300~500 kg 块石进行护底，护底块石下方设有土工布及土工格栅。与块石防波堤一致，板桩防波堤顶高程为 8.3 m。带斜撑、无斜撑的混凝土单板桩防波堤平均造价分别约为 12.07 万、9.22 万元/m。

根据上述分析，袋装砂防波堤在高震区抗震不利，半圆形防波堤造价较高，这两种结构均不建议采用。块石防波堤安全可靠，但石料用量大，工程投资大；混凝土单板桩防波堤能节省石料用量，工程投资小，但其承受自然荷载能力有限，不适用于水深较深的海域。综合考虑块石防波堤

和混凝土单板桩防波堤的特点，最终采用深水区域为块石防波堤、浅水区域为单板桩防波堤的组合方案，在保证结构安全可靠的前提下，能够尽量减少工程投资，降低防波堤造价，最终的防波堤平面布置见图 7。



a) 带斜撑的板桩防波堤



b) 不带斜撑的板桩防波堤

图 6 混凝土单板桩防波堤断面 (单位: m)

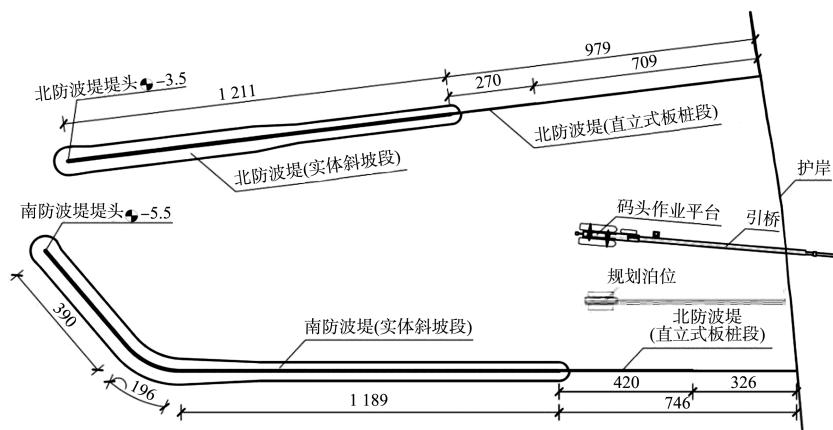


图7 块石防波堤+单板桩防波堤的组合结构平面布置(单位:m)

4 结语

1) 防波堤的设置对于维护港池内平稳波高、减少港池淤积发挥着重要作用。对于自然条件复杂的工程, 防波堤的设计应综合考虑其掩护功能的需要以及工程投资情况进行多方案比选分析。

2) 防波堤的平面布置需要考虑阻隔或消弱波浪、防止泥沙淤积以及方便船舶顺利进入航道等的要求。对于易发生强浪、骤淤的工程, 需通过开展波浪、泥沙专题研究, 对防波堤的布置形式、堤头位置、长度等进行分析, 在港内作业波高及泥沙回淤量可接受的前提下, 尽量减小防波堤投资, 尽可能做到投资与减淤效果协调统一。

3) 对于较长的防波堤, 从岸边到防波堤堤头, 波浪、水流等自然条件差异显著。结构设计中, 可根据波浪、水流等自然条件的不同, 选择不同结构形式的防波堤。根据实际工程案例分析, 深水区采用块石防波堤、浅水区采用混凝土单板桩防波堤是合理可行的, 特别是在石料缺乏国家或地区, 这种组合结构既能满足结构安全可靠的需要, 也可达到节省工程投资的有益作用。

4) 平面布置与结构选型是防波堤工程设计工作的重点和难点, 特别是面对强浪、骤淤等复杂的自然环境时, 更应慎重考虑。本文基于具体工程, 提出将防波堤堤头设置在破浪带以外的平面方案, 提出深水区块石防波堤+浅水区单板桩防波堤结构方案, 可为类似工程项目提供解决问题的方法和思路。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [3] 刘立华, 赵序. 印尼西爪哇 INDRAMAYU(3×330 MW)电厂项目防波堤设计[J]. 水运工程, 2010 (2): 104-109.
- [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 孟加拉煤炭进口码头泥沙物模试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [5] Housing and Building Research Institute. Bangladesh nation building code [S]. Dhaka: Housing and Building Research Institute, 2015.
- [6] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 孟加拉煤炭进口码头潮流泥沙数模试验报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 孟加拉煤炭进口码头 3D 波浪物模试验报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [8] The EurOtop Team. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures [M]. London: European Research Council Press, 2018.
- [9] Civil Engineering and Building Structures Sector Committee. Maritime structures-part 7: guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7 [S]. London: Civil Engineering and Building Structures Sector Committee, 1991.
- [10] 姜宁林, 黄胜. 板桩防波堤在海外浅海区域工程中的应用[J]. 水运工程, 2021 (11): 50-54, 80.

(本文编辑 王璁)