



港口长周期波问题的应对措施

周 剑¹, 解东升¹, 李培良², 付博新¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 针对长周期波带来的港口作业问题, 研究国外港口缓解长周期波成功案例, 凝练出抑制长周期波波源、优化平面布局、构建消波结构物、改进系泊配置、开发预报系统等5个方面的应对措施。研究表明, 抛石斜坡堤(宽度不小于30 m)、真空系泊系统(MoorMasterTM、Auto Moor等)和液压系泊系统(ShoreTension[®])为行之有效且低成本的对策, 可供类似工程参考。

关键词: 长周期波; 消波结构物; 系泊系统; 长周期波预报系统

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0087-09

Countermeasures against problems of long-period wave in ports

ZHOU Jian¹, XIE Dong-sheng¹, LI Pei-liang², FU Bo-xin¹

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

2.Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Regarding the problems of port operations caused by long-period waves, we study the successful cases of long-period wave mitigation in foreign ports, and propose five countermeasures including restraining long-period wave sources, optimizing plane layout, constructing wave absorbing structures, improving mooring configuration and developing prediction system. The study shows that rubble mound breakwater(width not less than 30 m) and vacuum mooring system(MoorMasterTM, Auto Moor, et al.) and hydraulic mooring system(ShoreTension[®]) are effective and low-cost countermeasures, which may serve as reference for similar projects.

Keywords: long-period wave; wave absorbing structure; mooring system; long-period wave forecast system

长周期波是指周期在几十秒到几个小时的海面波动, 通常在30 s以上, 介于涌浪和潮波之间, 一般包括次重力波(碎波拍、边缘波)、副震荡(假潮)、气象海啸、海啸等。长周期波波长长、能量大、难耗散, 常规的传统消浪措施很难起到效果, 常导致港口装卸中断、系泊缆绳断裂、码头岸壁损坏、护舷和船体损伤, 甚至人员伤亡等问题。如果进一步和港口发生共振, 会带来更大灾害。

国外对长周期波对策研究较多。日本沿海开发技术研究中心^[1]发行了“港内长周期波影响手册”, 涉及平面布局、消波结构物、长周期波预警

等对策; 平石哲也等^[2]研究了抛石斜坡堤、涡流结构等长周期波吸收构造物, 评估了各种对策的适用性; Caro等^[3]指出改进系泊系统可缓解长周期波问题。国内尚无针对长周期波应对措施的研究, 但我国承建的斯里兰卡汉班托塔港^[4-5]、尼日利亚莱基港^[6-7]、秘鲁钱凯港^[8-9]均面临长周期波问题挑战, 其中钱凯港预期使用4~6组ShoreTension[®]缓解长周期波问题。

本研究搜集了受长周期波影响的港口分布, 重点分析长周期波潜在应对措施, 为工程建设提供指导。

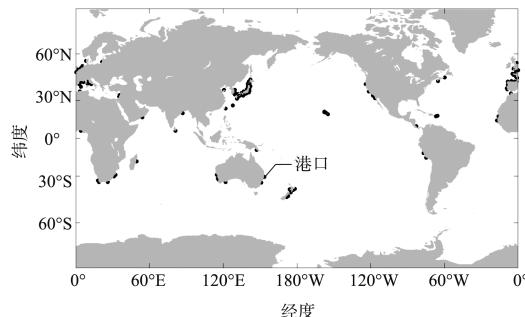
1 全球长周期波影响下港口分布

研究表明^[10-11]，南非、澳大利亚南部、新西兰、秘鲁智利沿岸、日本沿岸、阿拉斯加湾沿岸等区域为次重力波影响严重区域，法国、葡萄

牙等区域多发生副震荡、气象海啸现象。我国港口次重力波影响有限，以副震荡为主^[12]。表 1 列出受长周期波影响的港口，图 1 为相应各港口位置分布。

表 1 受长周期波影响的港口

国家	港口
日本	苦小牧港、秋田港、石卷港、志布志港、常陆那珂港、能代港、高知港、那霸港、金沢港、鹿岛港、新宫港、阿连渔港、八户港、赤羽根渔港、长崎港、古平渔港、久慈港、酒田港、日立港、三隅港、小名浜港、田子浦港、细岛港、仙台新港、香住渔港、新潟港、熊本县天草下岛、熊石渔港、铫子渔港、远别渔港
澳大利亚	杰拉尔顿港、埃斯佩兰斯港、肯布拉港、双岩石码头、科夫斯港、汤斯维尔港、弗里曼特尔港
新西兰	利特尔顿港、塔拉纳基港、吉斯伯恩港（伊斯特兰港）、蒂马鲁港、惠灵顿港
南非	伊丽莎白港、库哈港、库贝赫核电站取水池、萨尔达尼亚港、理查兹贝港、开普敦港、德班港
丹麦	措斯明讷渔港
阿曼	萨拉拉港
斯里兰卡	汉班托塔港
法国	巴约纳港、瑟堡港、图迪港、旺德尔港、敦刻尔克港、马赛港、鲁瓦扬港、布雷斯特港、勒孔凯港、塞特港、加来港、迪耶普港、勒阿弗尔港、孔卡诺港、莱萨布勒多洛讷港、土伦港、索兰扎拉港
韩国	墨湖港、浦项港、甘川港
中国	花莲港、龙口港
荷兰	鹿特丹港、泰尔斯海灵港
英国	塔尔伯特港、多佛港、肖勒姆港、桑德兰港、巴罗因弗内斯港
西班牙	费罗尔港、希洪港、毕尔巴鄂港、拉科鲁尼亚港、布拉内斯港、西乌达德拉港
葡萄牙	卡斯卡伊斯港、雷克索斯港、锡尼什港
加拿大	下桑迪角港、格莱斯贝港
美国	蒙特雷港、新月城港、长滩港、北卡罗来纳州 DUCK 镇 FRF 码头 夏威夷希洛港、夏威夷哈雷瓦港、夏威夷卡胡伊港、夏威夷巴伯斯角港
秘鲁	钱凯码头、马尔科纳码头
墨西哥	恩塞纳达港
哥斯达黎加	莫因港
波多黎各	瓜尼卡港
意大利	马里纳迪卡拉拉港、罗马游艇码头
立陶宛	克莱佩达港
印度	巴拉迪布港
以色列	海法港
黎巴嫩	贝鲁特港
伊朗	诺沙尔港
摩洛哥	拉腊什港
毛里塔尼亚	友谊港
塞内加尔	达喀尔港
阿尔及利亚	阿尔及尔港
尼日利亚	莱基港、拉各斯港
塞内加尔	达喀尔港
马达加斯加	塔马塔夫港
俄罗斯	图阿普谢港、索契港
格鲁吉亚	巴统港



注: 图中黑点为港口。

图1 受长周期波影响的港口分布

2 长周期波应对措施

为了提高船舶系泊安全性和装卸效率, 并确保船舶靠离泊的定时性和稳定性, 有必要采取长周期波对策。一般有2种措施: 1)减少波浪对船舶的作用; 2)改变船舶系泊系统的响应。前者为“硬解决方案”, 涉及港口基础设施的变化, 如通过修改港口布局减少波浪传入、增设消波构筑物降低目标泊位反射系数等; 后者为“软解决方案”, 通过改善系泊系统缓解长周期波问题, 或构建预警系统指导船舶作业。

2.1 抑制长周期波生成或传入

长周期波的生成与短波破碎密切相关。通过修改地形、构建波聚焦或散焦结构等方式, 降低长周期波能量, 改变长周期波传播方向, 是解决长周期波港口问题的手段之一。如消减地形(变缓、变平)、改变进港航道走向、建设波散焦丘等形式, 减少长周期波产生, 从而减少长周期波传入港内。

2.2 优化平面布局

合理的港口平面布局可以改善港内泊稳度。对于新建港口, 规划时通过优化调整平面方案, 减少长周期波能传入。而老港可以通过延长旧防波堤或新设防波堤和消波构造物(如人工岸滩)来降低港内长周期波能量。

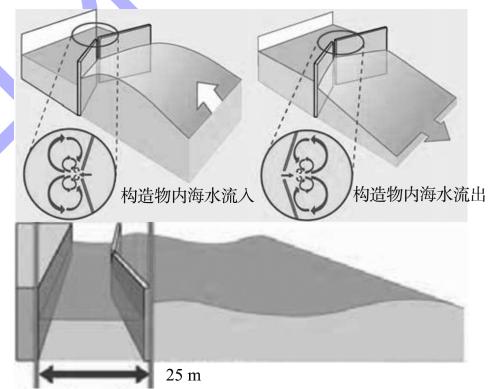
长周期波进入港池可能会激发港池的共振。港池自然周期与水深、港口几何形状和尺寸密切相关, 合理的布局可以避免共振。例如罗马游艇码头防波堤、消波岸滩、消波港池的应用(图2), 有效改善了港内泊稳问题。



图2 罗马游艇码头长周期波消波措施

2.3 构建消波结构

通过在港口内建设人工岸滩、消波结构物等消波设施, 可以降低港内长周期波反射造成的放大效应, 将波高降低到装卸限制波高以下, 进而改善港内泊稳度。图3a)为涡流消波结构^[13], 由导水板和消能室构成, 利用涡流耗散进行消波; 图3b)为抛石堤消波, 也可结合开缝沉箱等形式进行组合, 利用碎石层摩阻、紊流、压力差(消能池)进行消波。



a) 涡流消波

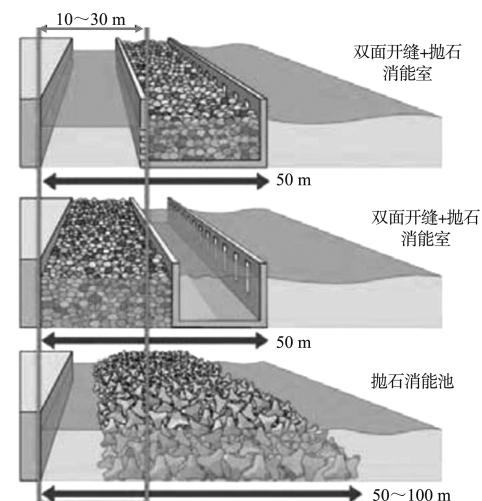


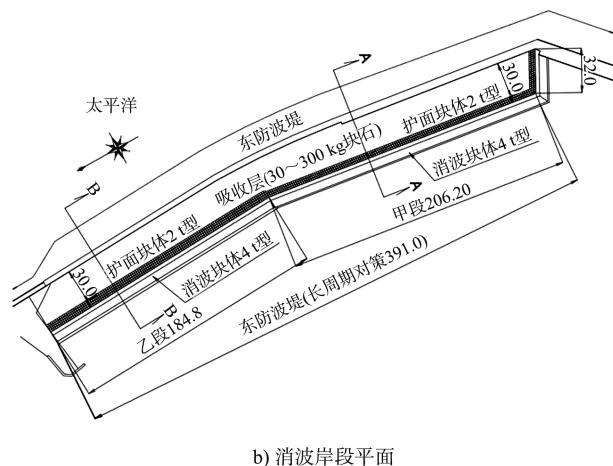
图3 典型消波结构物形式

抛石斜坡堤比较常见^[14], 反射系数分布在0.6~1.0(周期越大, 反射系数越大), 其缺点是需

要足够长度和宽度(宽度一般不小于 30 m), 占用岸线多; 但建设成本低, 施工便利, 如日本苦小牧港成功应用抛石斜坡堤^[15](图 4)缓解港内长周期波问题。



a) 消波岸段卫星遥感



b) 消波岸段平面

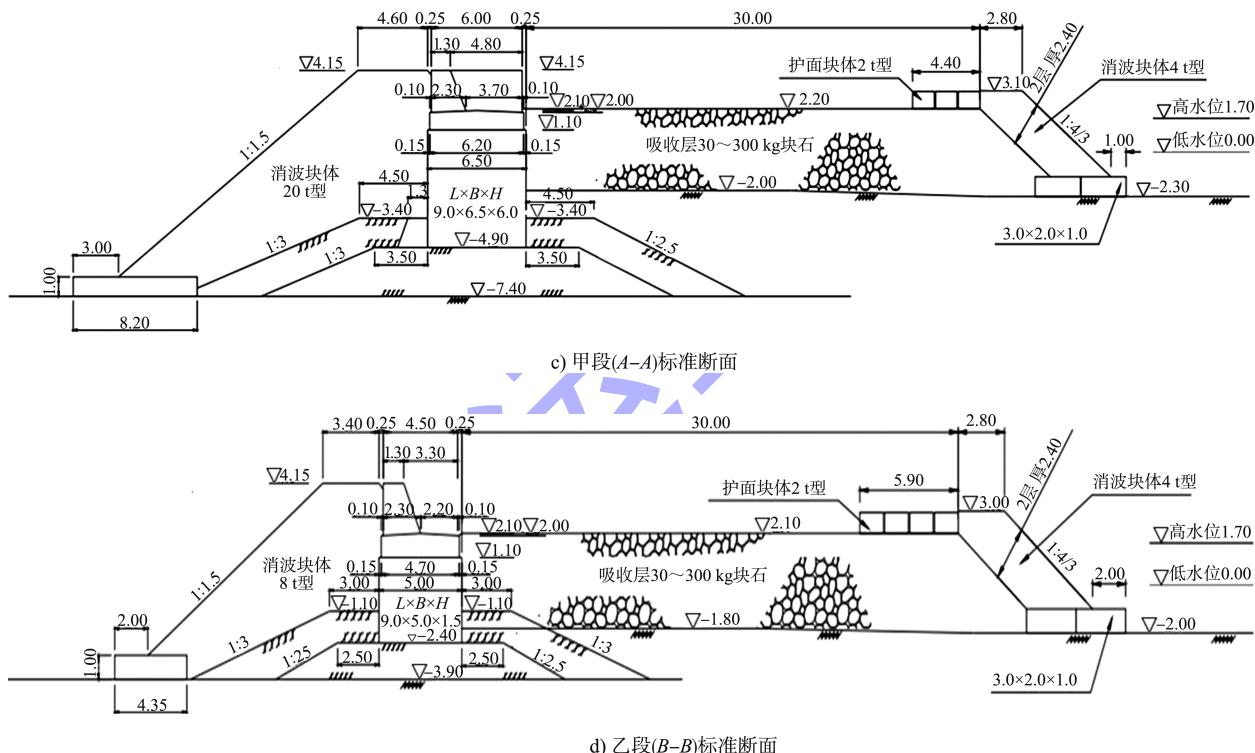


图 4 日本苦小牧港长周期波消波措施 (单位: m)

2.4 改进系泊配置

针对长周期波带来的系泊问题, 另一个有效措施是修改系泊系统, 通过改变船舶系泊系统的响应提高操作安全性和减少船舶在泊位的停机时间。常规操作包括增设岸基系泊缆、使用充气式护舷、使用恒张力绞车、采用真空系泊系统(MoorMasterTM、Auto Moor 等)和液压系泊系统(ShoreTension[®])等。真空系泊系统广泛应用在阿曼萨拉拉、南非库哈、澳大利亚杰拉尔顿等港口; 液压系统也在澳大利亚埃斯佩兰斯和杰拉尔顿、新西兰塔拉纳基、葡萄牙

锡尼什、智利阿里卡等港口得到应用。另外, 改良系泊系统亦可防止共振, 通过改变系泊系统的自然周期, 使其偏离波浪的主周期, 从而避免与长周期波发生共振。另外, 拖船辅助系泊也是有效手段之一。

没有通用规则可定义最合适的系泊系统, 每个特定案例都需要对停泊船舶及其系泊系统进行联合动力学分析, 根据评估结果优化完善系泊布局, 尽量抑制船舶过度运动。

2.5 开发长周期波预报系统

通过开发长周期波预报系统, 可合理安排船

舶装卸以及靠离泊情况, 规避风险。常用方法有长周期波浪数值预报^[16]和经验模型预报^[17]。前者根据波浪观测、气象信息等进行数学模型计算; 后者构建长周期波与短波经验关系。2种方法在日

本高知港(图5)^[18]、八户港、鹿岛港、常陆那珂港、苦小牧港, 澳大利亚杰拉尔顿港、新西兰塔拉纳基港等均得到应用。

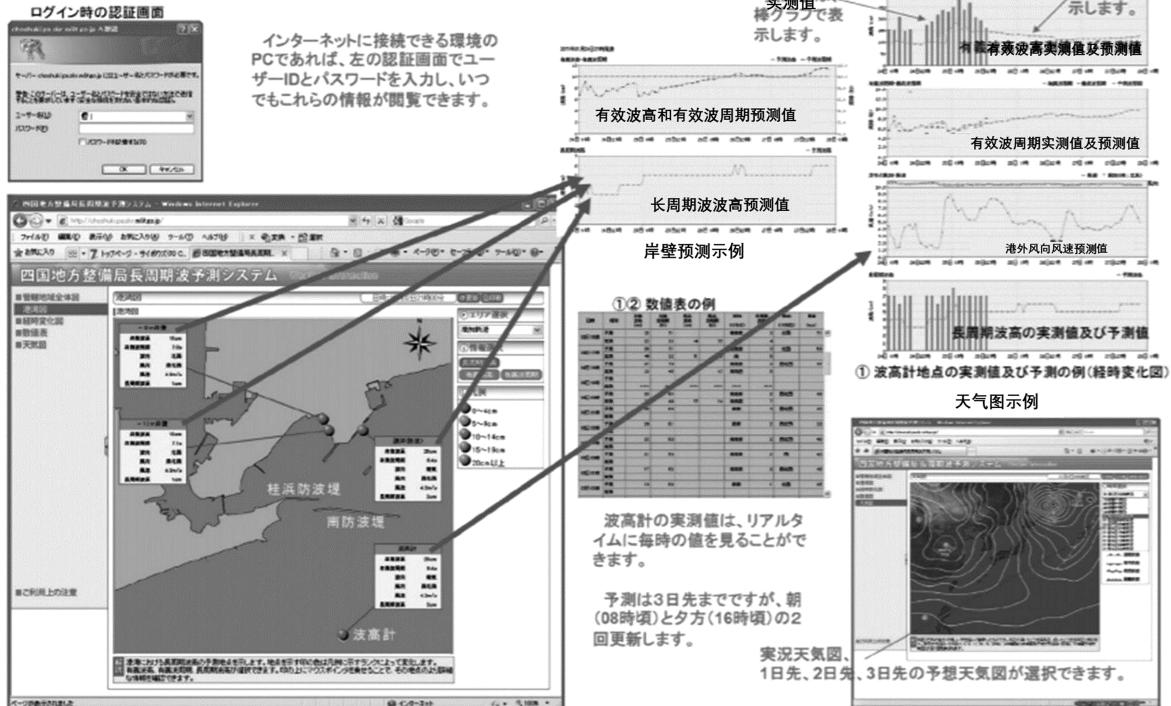


图5 日本高知港长周期波预测系统

以上对策可在一定程度上缓解长周期波带来的问题。相对来说, 构建消波结构物和改进系泊系统是行之有效且低成本的对策。但是对于长周期波影响, 没有统一完美的解决方案, 所有最优措施均是根据实际情况平衡的结果。图6为长周期波对策概念图。

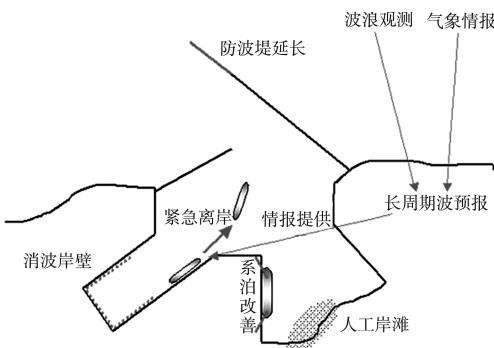


图6 长周期波对策概念图

3 案例

3.1 澳大利亚杰拉尔顿港

杰拉尔顿港位于澳大利亚西海岸, 在珀斯北部375 km, 长周期波是其系泊问题的根源。为了改善长周期波问题, 提出如下改进措施。

1) 改造防波堤。最初设想的解决方案是延长西防波堤, 但投入资金非常大, 能否获得足够效益值得商榷。研究发现^[19], 现有西防波堤向北延伸350 m可有效降低港池第二模态长周期波(周期45 s, 长周期波高度降低35%, 系泊运动量改善20%), 但对第一模态90 s无影响。而满载巴拿马型船主要受90 s长周期波响应, 所以效果有限。

2) 疏浚。长周期波沿着浅礁区和航道边缘传播。通过改变航道线形或尺寸(航道或礁坡加宽、

变平)来缓解长周期波问题,但需要付出相当大的财政和生态成本。

3)改进系泊系统。通过增设岸基系泊缆、安装软护舷(充气式护舷)、采用真空系泊系统 MoorMasterTM和液压系泊系统 ShoreTension[®](图 7)等措施,缓解长周期波影响。

4)开发长周期波预报系统。开发波浪预报系统以管理泊位运行(图 8)。在无其他措施的条件下,如果预测的长周期波高度(在 25~120 s 的周

期范围内)超过临界条件 0.20 m,则将船舶撤离泊位。



图 7 采用 ShoreTension[®] 系统的散货船“KS Flora”

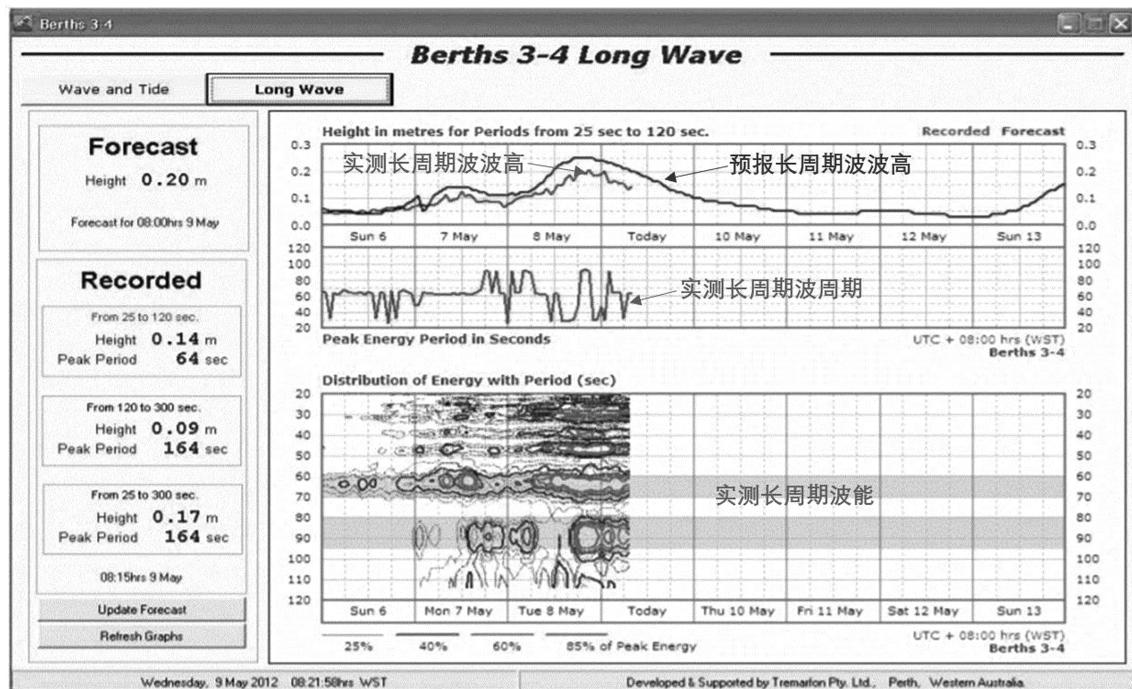


图 8 杰拉尔顿港长周期波预报系统

3.2 日本秋田港

秋田港位于秋田市西北,港口深受长周期波影响,尤其是外港区域,因港内的反射和共振,长周期波较港外放大,使得系泊船大幅度移动,导致系泊缆断裂等问题,系泊障碍在冬季 12 月至次年 2 月尤为显著。在无消波措施的情况下,实际装卸效率均低于目标装卸效率 97.5%。

2004—2005 年开展长周期波对策设施的配置计划讨论,包括防波堤延伸和港内消波构造物,前者延长防波堤、缩小港口,抑制长周期波侵入;后者在港口内配置消波构造物(图 9),防止反射

引起波高增大,最终采用港内消波措施^[20]。外港前消波于 2008 年完成,水深-8.5 m,抛石斜坡堤(顶宽 10 m),反射率 0.92;绿地护岸前消波于 2009 年完成,水深-6 m,抛石斜坡堤(顶宽 10 m),反射率 0.76;南防波堤消波于 2010 年完成,位于防波堤内侧,水深-14.5 m,抛石斜坡堤(顶宽 10 m),距防波堤 30 m,反射率 0.88;绿地护岸直角消波于 2011 年完成,水深-13 m, L 形开缝护岸,宽 20 m,反射率 0.89。各消波断面形式见图 10。采用消波构筑物后,长周期波高降低至原来的一半左右,装卸工作率超过基准 97.5%。

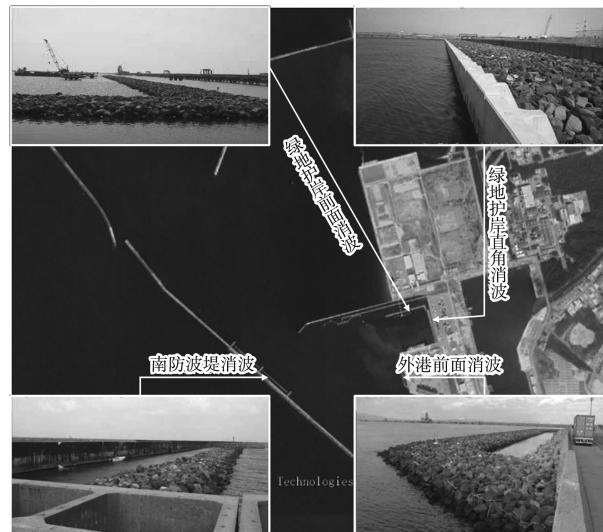


图9 秋田港消波构筑物现状分布

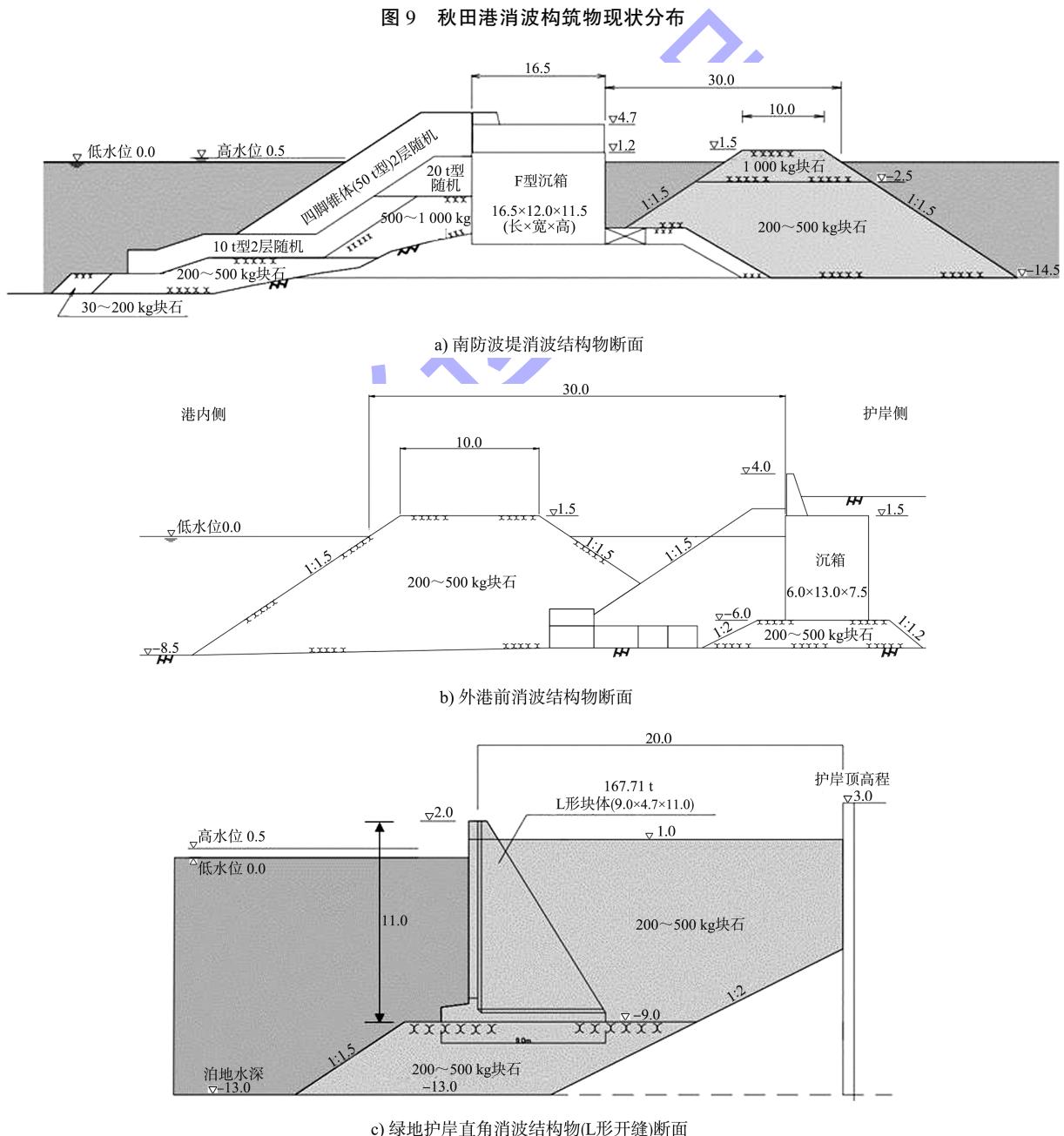




图 10 秋田港消波结构断面形式 (单位: m)

3.3 阿曼萨拉拉港

萨拉拉港位于阿曼苏丹国多法尔地区南部, 在萨拉拉市以西约 15 km。6—9 月夏季季风期间(当地称为“Khareef”), 外海涌浪传入近岸水域产生长周期波, 经过岸滩反射和防波堤绕射传入港内, 导致集装箱船装卸因船舶过度运动而中断, 降低货物转运作业效率。

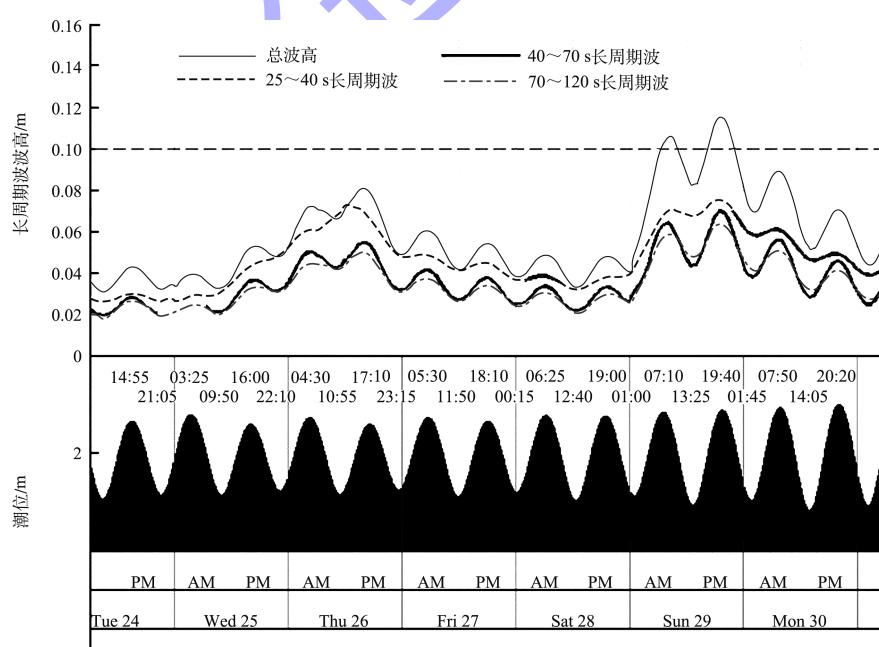
为了降低长周期波影响并扩展港口, 远期规划建议建设 3.7 km 北防波堤为扩建的集装箱码头提供掩护。北防波堤建成后, 同样波浪条件下, 系泊船舶运动量可减小 50% 以上, 可明显改善港内泊稳条件。

当前阶段, 萨拉拉港主要采用自动系泊系统

抑制 Khareef 季节发生的船舶纵移运动, 同时通过实时监测系统, 为仍然使用传统系泊系统的泊位提供问题预警。与传统缆绳系泊相比, 采用自动真空系泊系统 MoorMasterTM 纵移可降到 2 cm 以内, 装卸效率大幅提升。

3.4 新西兰塔拉纳基港

塔拉纳基港位于新西兰北岛西海岸新普利茅斯, 每年受长周期波影响的系泊问题可达 6.5%~8.0%。考虑到防波堤投资过大, 塔拉纳基港采用长周期波预报系统进行指导靠离泊工作(图 11), 后来进一步增加液压系泊动力系统 ShoreTension[®] 消除长周期波带来的影响。



注: Moturoa 泊位, 长周期波波高阈值 0.1 m。

图 11 塔拉纳基港长周期波预警系统

4 结论

长周期波主要应对措施如下:

- 1) 控制长周期波波源生成或传入港内;
- 2) 优化平面布局, 减少长周期波传入, 避免

港内共振;

3) 构建消波结构物(宽度一般不低于30 m),降低港内反射系数;

4) 改进系泊配置,增设真空系泊系统、液压系泊系统等系泊设施;

5) 开发长周期波预警系统,使港口有富余应对;

6) 构建消波结构物和改进系泊系统是行之有效且低成本的对策,可作为优选措施。

参考文献:

- [1] 沿岸開発技術研究センター. 港内長周期波影響マニュアル[M]. 東京都: 沿岸開発技術ライブラリー, 2004.
- [2] 平石哲也, 平山克也, 小澤敬二, 等. 長周期波対策工の消波性能について[R]. 横須賀: 港湾空港技術研究所資料(No. 1205), 2009.
- [3] CARO R V, FORMOSO F, LÓPEZ M, et al. A review of ship mooring systems[J]. Brodogradnja, 2018, 69(1): 123-149.
- [4] DONG G, ZHENG Z, MA X, et al. Characteristics of low-frequency oscillations in the Hambantota Port during the southwest monsoon[J]. Ocean engineering, 2020, 208: 107408.1-107408.28.
- [5] GUO L, MA X, DONG G. Performance accuracy of surfbeat in modeling infragravity waves near and inside a harbor[J]. Journal of marine science and engineering, 2021, 9(9): 918.1-918.18.
- [6] 李继选, 赵津京. 利用数学模型进行港内长周期波浪风险分析[J]. 水运工程, 2018(5): 30-34.
- [7] DEYZEN A V, BEIMERS P B, LEM J C, et al. To improve the efficiency of ports exposed to swell[C]// Australasian Coasts & Ports Conference. New York: Curran Associates, Inc., 2015.
- [8] PRDW. Moored ship response study[R]. Cape Town: PRDW, 2019.
- [9] Aktis Hydraulics. Chancay: metocean & moored ship response study[R]. Hanzelaan: Aktis Hydraulics, 2020.
- [10] WIEGEL M F. Mapping port operability indicators across

the world: Screening the suitability of port locations related to metocean conditions[D]. Delft: Delft University of Technology, 2020.

- [11] SHOM. Rapport technique final du project NIVEXT[R]. Brest: SHOM, 2015.
- [12] 李培顺, 曹丛华, 江崇波, 等. 龙口港的假潮及成因探讨[J]. 海洋通报, 2003, 22(5): 1-8.
- [13] 山下徹, 中嶋さやか, 津田宗男, 等. 涡消波型長周期波対策構造物に関する研究[G]//沿岸技術研究センター論文集, 東京都: 一般財団法人 沿岸技術研究センター, 2011: 33-36.
- [14] 山田晶子, 国柄広志, 爲廣哲也, 等. 石巻港における長周期波の消波対策に関する検討[J]. 海洋開発論文集, 2005, 21: 785-790.
- [15] 松野健, 矢野隆博, 葛西弘行, 等. 苫小牧港西港区における長周期波対策工に関する現地観測[J]. 土木学会論文集B2(海岸工学), 2011, 67(2): I_681-I_685.
- [16] MCCOMB P, JOHNSON J D L. A high-resolution weather forecasting tool for marine operations management in ports and harbours[C]// 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference 2011 and the 13th Australasian Port and Harbour Conference (COASTS and PORTS 2011). Perth: Engineers Australia, 2011: 287-292.
- [17] MCCOMB P, ZYNGFOGEL R, GOMEZ B P. Predicting infragravity waves in harbours-an evaluation of published equations and their use in forecasting operational thresholds[C]// Coastal Engineering Proceedings. Sydney: American Society of Civil Engineers, 2020.
- [18] 三村正樹, 石本真憲, 菊地洋二, 等.「高知港長周期波予測システム」の構築について[J]. 土木学会論文集B2(海岸工学), 2011, 67(2): I_161-I_165
- [19] MOLEN W V D, SCOTT D, TAYLOR D, et al. Improvement of mooring configurations in Geraldton Harbour [J]. Journal of marine science and engineering, 2015(12): 1-20.
- [20] 国土交通省東北地方整備局秋田港湾事務所. 平成24年度秋田港長周期波対策検討業務報告書[R]. 秋田: 秋田港湾事務所, 2013.