

涌浪作用下港内波况试验研究

李 辉, 毛艳军, 王昊天, 桑高亚, 郑振钧, 马小舟*

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要:基于秘鲁钱凯港的防波堤三维整体模型试验结果,研究了涌浪绕射、透射联合作用对港内波况的影响。分析了不同波向、不同谱峰周期的入射波条件下港内不同功能区的波况分布规律,并对比分析了具有不同周期的入射波对港内不同区域波高的影响,兼顾分析了波向的影响。结果表明,在涌浪作用下,受透射、绕射影响,不同入射波条件下港内比波高分布规律相关性较好,距离口门越近、入射波波长越长,港内比波高越大;入射波周期对港内波况影响的差异和对波向的敏感性因港内不同区域而不同;防波堤阻挡效果好的波向,其入射波对港内的影响较小;对于受防波堤掩护性较好的内侧泊位,应重点关注泊位处的低频波浪对系泊的影响。

关键词:涌浪;透射;绕射;比波高

中图分类号:TV139.2

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)01-0010-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.01.002

引用格式:LI H, MAO Y J, WANG H T, et al. Experimental study on the state of waves within harbor under the action of surges[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(1): 10-19. 李辉, 毛艳军, 王昊天, 等. 涌浪作用下港内波况试验研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 10-19.

涌浪是指风浪离开风区后所形成的波浪,周期范围约为 8~30 s。相比于周期小于 8 s 的风浪,涌浪具有波长长、穿透性强等特点^[1]。对于有防波堤(特别是可透水的抛石堤)掩护的港域,涌浪对港内波况和船舶泊稳条件的影响不容忽视。针对涌浪的强透射性,张志等^[2]、谭忠华等^[3]对涌浪作用下防波堤透浪对港内波况的影响进行了研究。张志等^[2]研究发现涌浪的透射波浪对港内泊位的系泊稳定有明显影响,谭忠华等^[3]发现透射系数与波高呈负相关、与周期呈正相关。李继选和赵津京^[4]应用 MIKE 21 BW 模型研究了长周期波作用下港内船舶泊稳情况,结果表明系泊船对长周期波敏感性较强。上述研究多是在单向规则波或单向不规则波下进行的。许多学者采用多向不规则波进行了进一步的研究。俞聿修和柳淑学^[5]基于模型试验,认为使用不规则波进行试验能更好地反映实际港内波况,并研究了波浪的波向、航道布置对口门和港内波况的影响,建议以口门处波高为基准研究港内波况。乔吉平等^[6]将港内波浪进行长短波分离,研究了单向与多向不规则波作用下港内波高的分布规律,建议应用单向波来设计规划港口建设,偏于安全。吴月勇等^[7-8]根据天然海浪的特点,研究了单向与多向涌浪联合绕射、反射作用对港域波况的影响。Sakakibara 和 Kubo^[9]根据现场观测和数值模拟,研究了长周期波对船舶装卸作业效率的影响,并对船舶的低频运动提出了改进意见。López 和 Iglesias^[10]对位于西班牙 Ferrol 港的船舶观测,发现港内的涌浪成分对船舶的升沉、横摇、纵摇等垂直方向的运动有显著的影响。

上述研究未系统地研究涌浪联合绕射、透射作用对港内波况的影响。本文基于秘鲁钱凯港三维整体物理模型试验,选取不同波向和波要素的组合作为入射波工况,研究了绕射、透射联合作用下港内不同区域的波高随周期的分布规律,分析了周期和波向对港内同一位置波况的影响,以及周期和波向对港内特定位置的

收稿日期:2020-11-02

资助项目:国家重点研发计划项目——海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究(2017YFC1404200);中央高校基本科研业务费资助项目——汉班托塔港长周期波浪模拟预报研究(DUT20ZD402)

作者简介:李 辉(1995—),男,硕士研究生,主要从事低频波浪以及港湾振荡方面研究。E-mail: huili_95@163.com

* **通信作者:**马小舟(1977—),男,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事近岸波浪非线性变形方面研究。E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

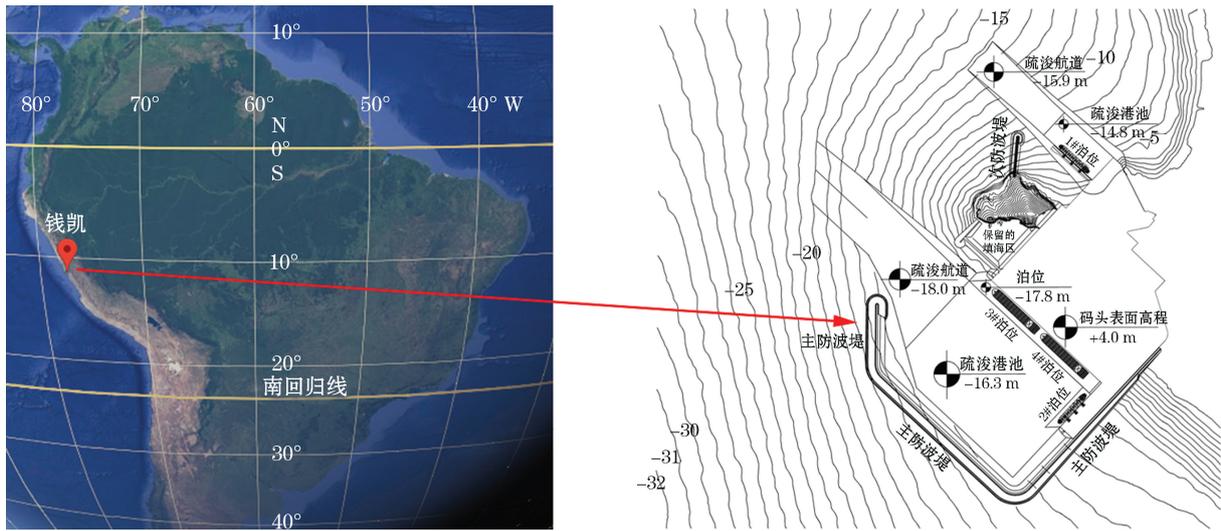
(李 燕 编辑)

波浪响应的影响。并对不同区域的波况条件进行评估,对港口设计建设具有参考意义。

1 模型试验设置

1.1 模型布置

钱凯港位于秘鲁中部的钱凯湾,该港为天然深水良港,能够满足大型船舶的挂靠需求。该港建设规划一期工程将兴建 4 个泊位,其中 2 个为多用途泊位,2 个为集装箱泊位。码头类型为高桩码头。工程布置图如图 1 所示,港域底高程 -16.3 m ,泊位底高程 -17.8 m 。该港地处南太平洋西海岸,波浪涌浪成分占比较大,经常受涌浪影响,工程设计超出了规范的指导范围^[11-12],需要物理模型试验进行论证,为设计提供依据。



注:图中等值线为水深(m)

图 1 工程位置与布置

Fig.1 Location and layout of the project

试验在 $34\text{ m} \times 55\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ 的多功能综合水池进行。该水池配有“U”型多向造波机系统,能够模拟规则波和多种频谱的不规则波,多向波浪的方向范围为 $\pm 45^\circ$ 。试验波高测量采用 DS30 型多通道波高采集系统。

模型采用正态比尺,为 $1:70$ 。模型布置图见图 2。试验地形和护面块石等的加工满足几何相似、弗劳德数相似和斯特劳哈尔数相似^[13]。码头按照高桩码头布置进行同比尺缩放,以保证泊位处数据的准确性。造波机边界水深取原型 -30 m 处水深,以静水位为基准,极端高水位取 $+1.60\text{ m}$,极端低水位取 -0.2 m 。水池两侧和尾端均布置有消浪装置,可有效吸收波能,减小边界效应对试验的影响。

为了模拟防波堤透射现象,在选取防波堤堤心石时,除质量和尺寸按照比尺缩小外,还应控制中值粒径和级配。但如果堤心石仅按照几何比尺进行缩放,会导致防波堤的透浪特性被低估。因为湍流耗散需要满足雷诺相似准则,而试验是按照重力相似进行设计的,在模型比尺下孔隙率较小,带来了较大的水体耗散。为了保证透浪试验模拟的准确性,要通过增大堤心石的几何尺寸对堤心石进行修正。参考 Hughes^[14] 计算修正系数 K ,取 $K=1.63$ 。堤心石尺寸及中值粒径在按比尺换算基础上,再乘修正系数 K 得最终试验用的堤心石尺寸。

图 2 中给出港内波高仪位置,其中 B1~B7 为泊位处测点;C1、C2 为航道测点,其中 C1 作为口门处位置

测点;P1~P5 为非靠泊区域测点。本试验主要探索主防波堤后港内的波高分布情况,并未涉及次防波堤,因此次防波堤区域不安置波高仪。本文以港内波高与口门处 C1 波高的比值(比波高)表示港内波况分布。小比尺下航道的折射效果不明显,因此对于口门区域,本文重点分析波浪的绕射现象。由于试验的设计考虑了防波堤的透射性,因此对港内区域,本文会同时分析绕射、透射的联合作用。

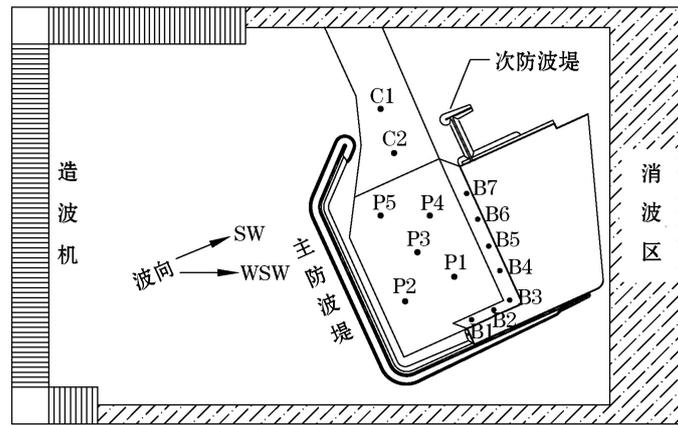


图2 试验模型布置

Fig.2 The layout of the experimental model

1.2 试验波要素

结合实测资料,选取 2 种典型波向(SW 向和 WSW 向),其中 WSW 向在试验中为正向入射。试验入射谱采用 JONSWAP 谱模拟不规则波,选用的目标谱公式如下^[15]:

$$S(f) = \beta_1 H_{1/3}^2 T_P^4 f^{-5} \exp[-1.25 (T_P f)^{-4}] \cdot \gamma \exp[-(f/f_P - 1)^2 / (2\sigma^2)], \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{0.06238}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \cdot (1.094 - 0.01915 \ln \gamma), \quad (2)$$

式中, f 为频率, T_P 为谱峰周期, γ 为谱峰升高因子, f_P 为谱峰频率, $H_{1/3}$ 为有效波高, σ 为峰形参数。结合该工程的实际海域波浪情况,谱峰增长因子 γ 取 1.0。

波要素采取有效波高 $H_{1/3}$ 和谱峰周期 T_P 。试验采用单向不规则波,波向采用 SW 和 WSW 两种,试验水位分高水位(+1.6 m)和低水位(-0.2 m)两种。具体波要素见表 1。每组工况进行 3 遍试验,每遍试验 327 s,对应原型 45 min,检查试验的可重复性,并取平均值作为最终结果。

2 试验结果和讨论

2.1 非靠泊区域的波浪条件

2.1.1 周期对非靠泊区域波况的影响

将上述 16 个工况的试验结果分别按相同的波向和水位分为 4 组工况组合进行分析。港域测点的比波高见图 3、图 4。对比同一测点的 4 种柱状图,在相同的波向及水位条件下,非靠泊区域的比波高与入射波周期密切相关,总体上表现为入射周期越大,港域内比波高越大。并且在非靠泊区域,同一测点下,入射周期差异越大,测点比波高值差异也就越大。图 4 中,在非靠泊区域深处的 P1 点,防波堤阻挡性较差的 WSW 向工况下,入射周期带来的比波高差异比较明显,进一步说明了长波对港内的影响较大。同样,在受堤头绕射影

响较大的 P4、P5 测点,长周期入射波带来的比波高更大,这源于长波具有的强绕射性。

表 1 试验波要素、工况表

Table 1 Wave elements and working conditions for the experiment

工 况	波 向	水位/m	$H_{1/3}/m$	T_P/s
SW-L-1	SW	-0.2	3.3	14
SW-L-2		-0.2	3.8	17
SW-L-3		-0.2	3.9	18
SW-L-4		-0.2	4.3	20
SW-H-1		+1.6	3.3	14
SW-H-2		+1.6	3.8	17
SW-H-3		+1.6	3.9	18
SW-H-4		+1.6	4.3	20
WSW-L-1	WSW	-0.2	3.3	14
WSW-L-2		-0.2	3.8	17
WSW-L-3		-0.2	3.9	18
WSW-L-4		-0.2	4.3	20
WSW-H-1		+1.6	3.3	14
WSW-H-2		+1.6	3.8	17
WSW-H-3		+1.6	3.9	18
WSW-H-4		+1.6	4.3	20

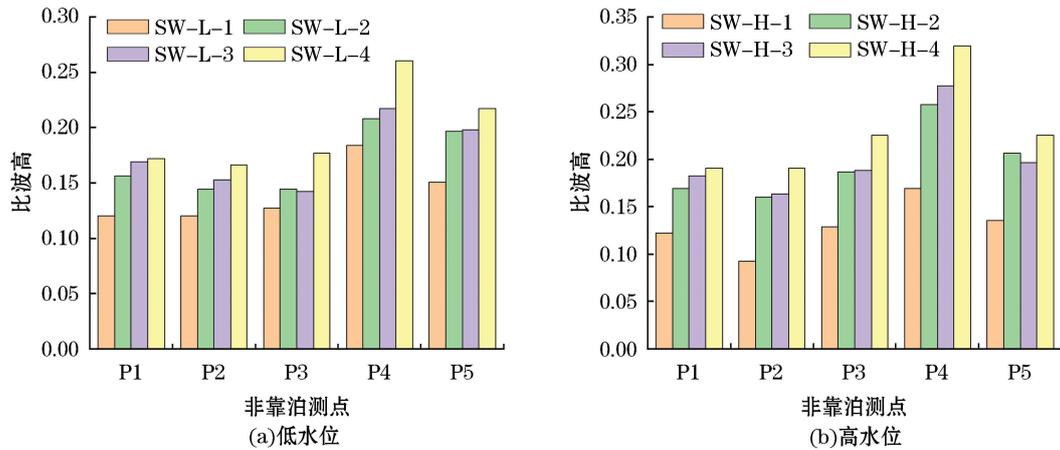


图 3 SW 波向的非靠泊区域波况

Fig.3 Wave states in the non-mooring areas with a wave direction SW

对于测点的比波高,各工况组合下测点波况规律基本一致。在港口内部,P1 点的比波高略高于 P2 点的比波高,这在 WSW 波向的工况(图 4)下更加明显。随着距离口门越来越近,比波高逐渐增大,但 P5 点比波高小于 P4 测点值。由于堤头 AB 段防波堤的存在,对靠近防波堤的测点形成了更好的保护,在距离口门相

同距离的情况下,靠近防波堤的测点比波高更小,表现为 P2 比波高低于 P1 比波高, P5 比波高低于 P4 比波高。但随着离防波堤越来越远,这种保护的影响逐渐减小,甚至可以忽略。而 WSW 波向下,防波堤对港内的掩护性较差,这对于距离防波堤较远的 P1 测点影响较大,表现出 P1、P2 测点的差幅比在 SW 波向下的情况大。图 3b 和图 4b 中,在涌浪波的较强透射性下,即使较为安全的 P2 测点,在入射周期较长的工况下 (SW-H-4),其比波高依然能达到 0.2。因此,在有涌浪作用下的港口设计中,透射波的影响必须考虑在内。

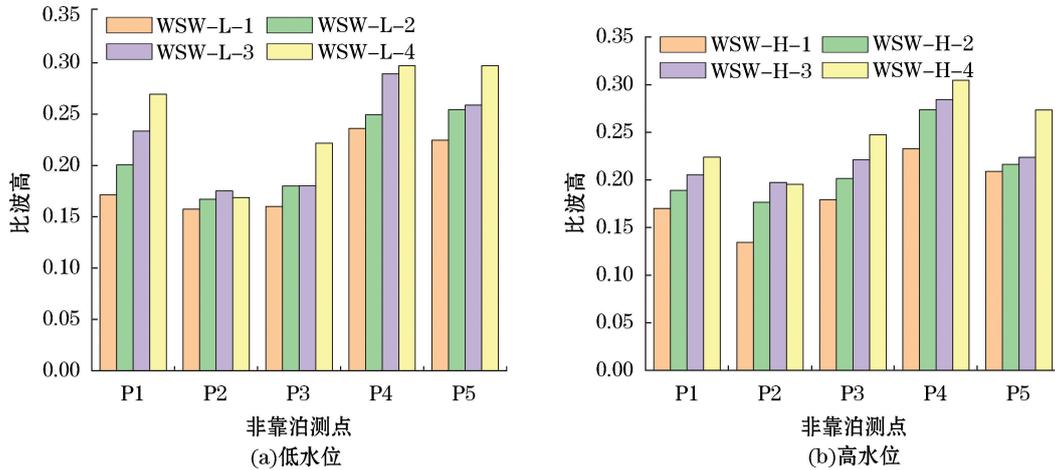


图 4 WSW 波向的非靠泊区域波况

Fig.4 Wave states in the non-mooring areas with a wave direction WSW

2.1.2 波向对非靠泊区域波况的影响

为了明确波向的影响,试验选取编号为“1”和“4”的入射工况,对应入射周期为 $T_p = 14\text{ s}$ 与 $T_p = 20\text{ s}$,比较相同周期下不同波向对于非靠泊区域波况的影响,见图 5。防波堤阻挡性较好的 SW 向下,非靠泊区域的比波高值更小。随着入射周期增大,波向对非靠泊区域的波况影响变小,不再完全符合防波堤阻挡性差异的一般规律,波向影响的差异因不同位置而不同。对于长周期入射波,波浪的透射作用更强,这对靠近防波堤的测点(如 P2)影响较大,因此表现出与防波堤更接近垂直的 SW 波向下比波高较大。这表明在某些情况下,即使防波堤对正向来浪阻挡性更好,但强透射性带来的影响不可忽略。虽然,总体上 WSW 向入射波对港内的波况影响更大(表现为比波高更大),但对于港内不同的位置,因受涌浪强透射性以及防波堤布局和其他构筑物的影响,导致长周期入射下港内非靠泊区域对波向的敏感性可能不如短周期入射强。

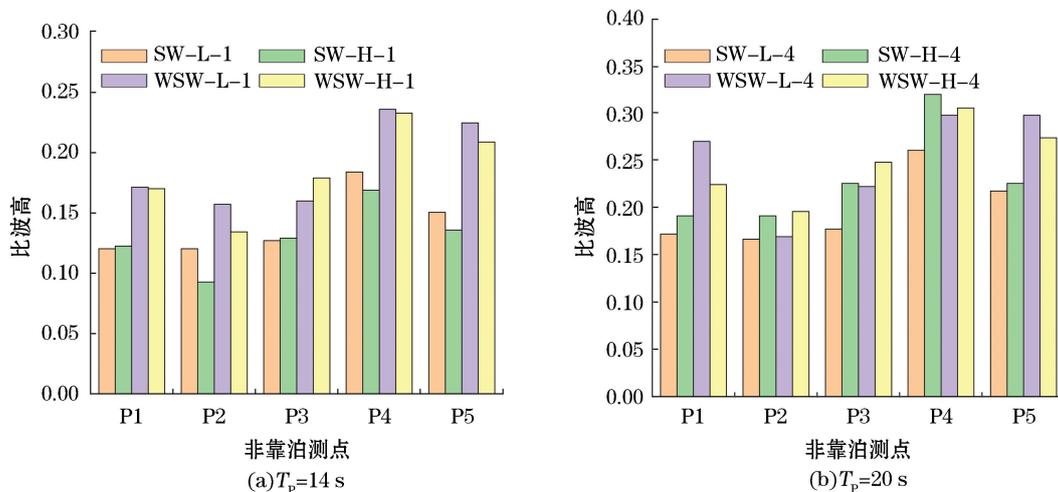


图 5 波向对非靠泊区域波况的影响

Fig.5 Influence of the wave direction on the wave state in the non-mooring areas

2.2 泊位处的波浪条件

2.2.1 周期对泊位波况的影响

波向 SW 的波况分布见图 6,波向 WSW 的波况分布见图 7。B1~B7 测点位置逐渐靠近口门。除了高水位工况下的个别点,对于同一工况,各泊位测点的变化规律基本相同。结合图 2 可以发现,最安全的泊位位置在 B3 处,该点距离口门最远,距离防波堤也最远,由透射和绕射产生的波高在该点也最小。B4~B7 测点,离口门越近,泊位波浪受堤头绕射作用占主导地位,受绕射影响越大,比波高值也越大。B1、B2 测点是在港域内测的,受绕射影响较小,但不同于 B3,B1 处比波高小于 B2 处,可能是因为 B1 处于泊位端部,外侧有宽敞水域,波浪经口门传播至此后可以继续在泊位端部向外绕射,从而比波高较小,这在对港内影响较大的 WSW 波向的工况下表现更明显。

在波向、水位相同的情况下,不同周期的入射波对泊位波况影响的分布规律与泊位的位置有关。在防波堤阻挡性相对较好的 SW 向工况下,在港域深处、受掩护性较好的 B1~B3 处测点,入射周期越长,比波高越大;距离口门越近,入射周期的影响开始减小,甚至出现入射周期越短比波高越大的情况。在防波堤阻挡性相对较差的 WSW 工况下,入射周期的影响更加明显,不仅表现在港内深处的测点,大部分泊位测点均表现出相同的规律,即入射周期越长,比波高越大,涌浪对港内泊位的影响较大。

另外,图 6b 和图 7b 中,高水位工况下泊位的比波高分布较离散。分析认为由于码头结构为高桩码头,低水位情况下净水面未触及码头上部结构,波浪未受影响,规律性较好;高水位情况下净水面触及到码头上部结构的底部,波浪相当于受到部分直立壁的影响,虽然很小,但相对于本身并不大的港内波高来说其影响不可忽视。从而造成波高测量不确定性增大,结果离散型较大。结合非靠泊区域波况的图 4b 和图 5b,没有码头的影 响,港域处低水位和高水位净水面均未与任何构筑物接触,与图 6a 和图 7a 低水位情况类似,缺少了影响波浪作用的因素,呈现出比波高结果规律一致。这也验证了本文对泊位高水位结果离散性大所做出的分析。

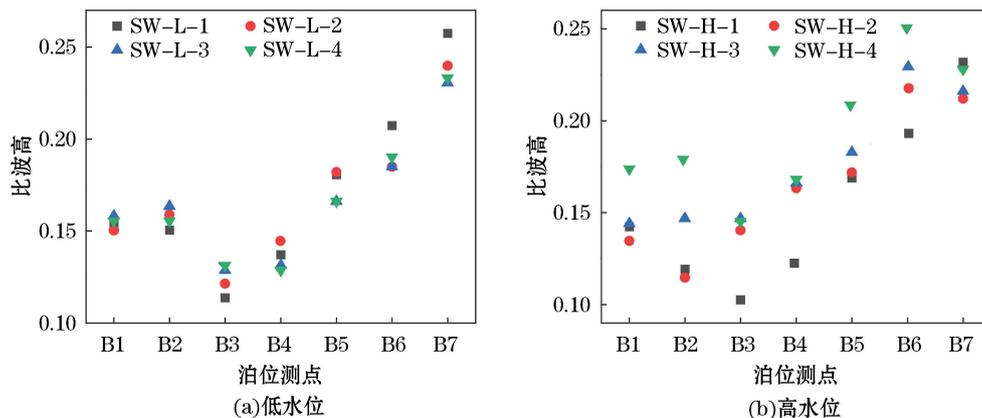


图 6 SW 波向的泊位波况分布

Fig.6 Distribution of the wave state at the berths with a wave direction SW

2.2.2 波向对泊位波况的影响

同样选取编号为“1”和“4”的入射工况,对应入射周期为 $T_p=14\text{ s}$ 与 $T_p=20\text{ s}$,比较相同周期下不同波向对于泊位波况的影响,见图 8。与非靠泊区域波况结果相同,两组结果均显示 WSW 向的比波高整体大于 SW 向,这也与防波堤对两种波向阻挡性优劣相一致。如前所述,泊位处的测点距离防波堤较远,透射波的影响在泊位处影响较小,因此涌浪入射下,波向对港内泊位处波况的影响仍然大致符合防波堤阻挡性差异的一般规律。值得注意的是,对于入射周期较短的组($T_p=14\text{ s}$),随着距离口门越来越远,波向的影响逐渐减小(图 8a);而对于入射周期较长的组($T_p=20\text{ s}$),波向对靠近口门的泊位测点的波况影响也比较大(图 8b)。

这也与上述入射周期越长对港内泊位波况影响越大的结论一致。

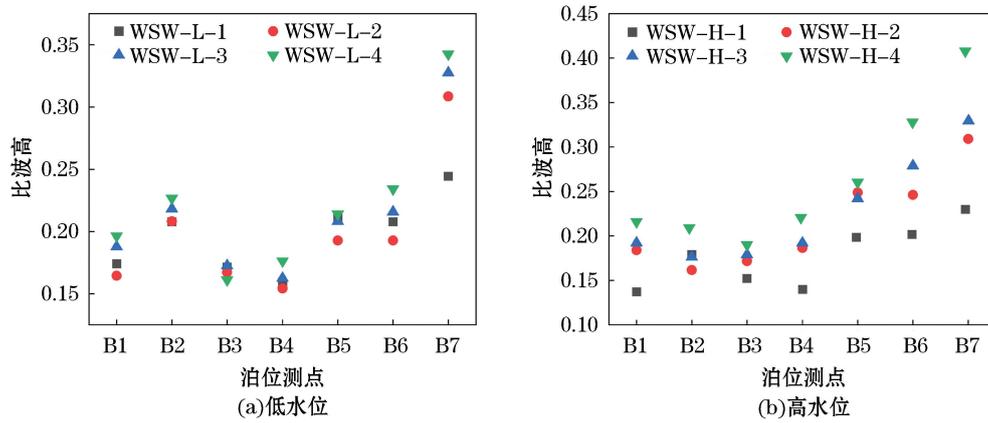


图7 WSW波向的泊位波况分布

Fig.7 Distribution of the wave state at the berths with a wave direction WSW

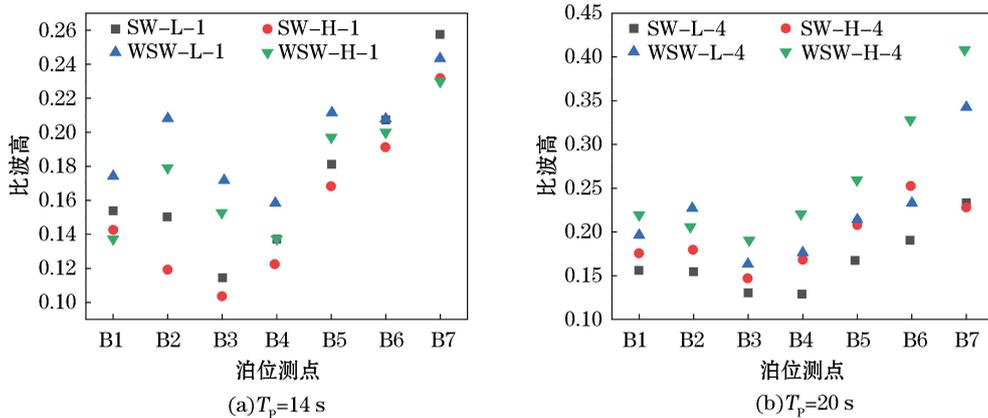


图8 波向对泊位波况的影响

Fig.8 The impact of the wave direction on the wave state at the berth

2.2.3 泊位处波浪的频谱分析

防波堤往往对高频波也即短波有着很好的掩护效果,但是对低频波也即长波的掩护效果较差,甚至低频波还会在港内得到积蓄、放大。因此,本文采用快速傅里叶变换(FFT),计算口门和各泊位处的波面过程线所对应的频谱结果,来分析不同频率波浪在港内外的差异。这里选取工况 SW-H-4 和 WSW-H-4,对应上述分析中比波高最大的工况。选取泊位的 4 个测点(即 B1、B3、B5、B7)与口门处测点 C1 的频谱进行对比(图 9,图 10)。为了更好地表示低频范围内谱值 $S(f)$ 的对比,横坐标采取对数形式。

图 9 和图 10 分别展示了波向 SW 和 WSW 下,四处测点与口门 C1 处的频谱图,图中左侧垂直虚线代表截止频率的位置。与前述图 6b 展示的结论一致,B3 的频谱曲线有着最小的谱密度值。防波堤能阻挡住大部分的入射波浪。但对比 C1 的频谱曲线,四处测点在低频范围(图中两条垂直虚线之间)的 $S(f)$ 均比 C1 的 $S(f)$ 大。与图 9 结论一致,图 10 中,防波堤对于高频波浪有较好的阻挡,但不能阻止低频波浪在港内的放大。同时,波向 WSW 是防波堤阻挡性较差的一个方向,这在图 10 中 B7 与 C1 的对比图中可以体现,高频组分 B7 的 $S(f)$ 明显大于其他泊位测点的 $S(f)$,这也与不同波向下防波堤阻挡性差异的结论一致。而低频范围的波浪对于船舶的横荡、纵荡运动影响巨大。这部分波浪不仅与外海入射波浪的周期有关,还可能与波浪在港内的非线性相互作用有关。

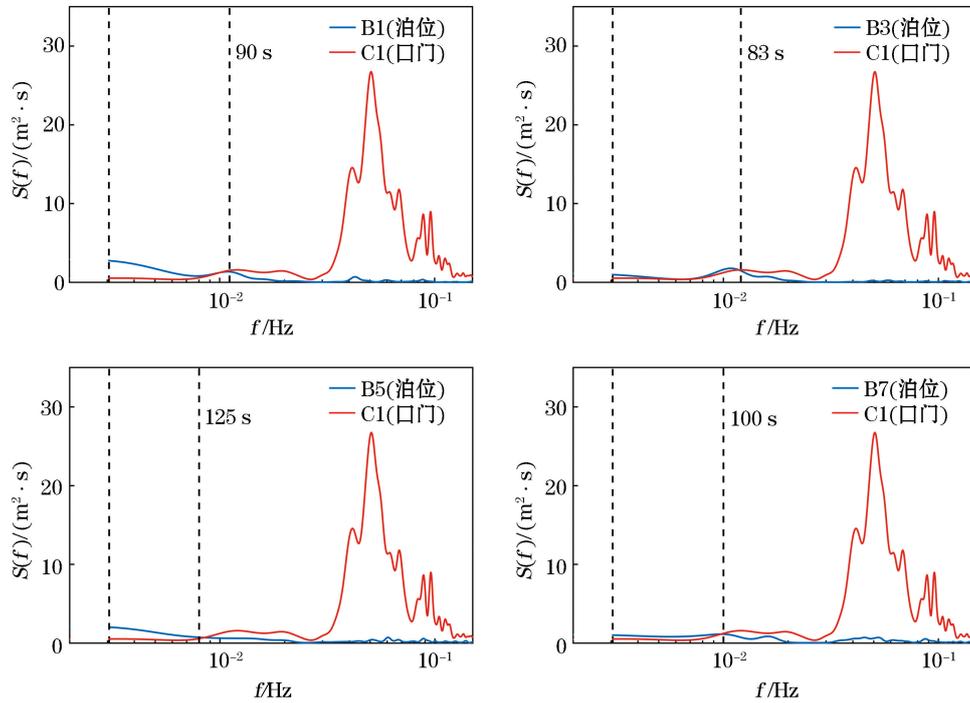


图 9 波向 SW 下泊位与口门的频谱图

Fig.9 Frequency spectrums at the berth and entrance with a wave direction SW

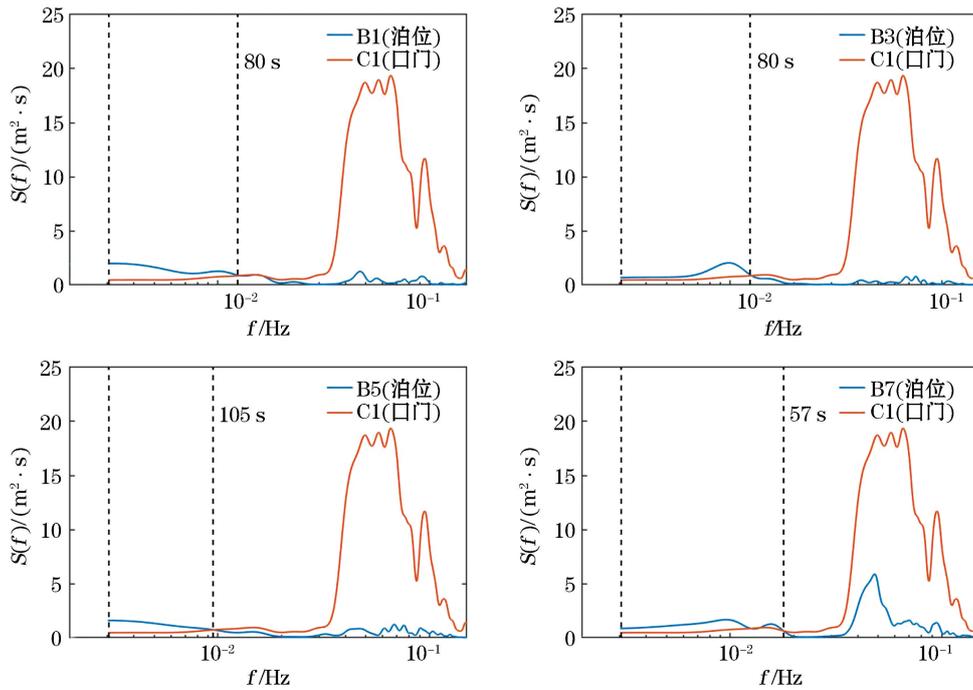


图 10 WSW 波向下泊位与口门的频谱图

Fig.10 Frequency spectrums at the berth and entrance with a wave direction WSW

以对频谱图的积分值表示波能。表 2 给出了 SW、WSW 波向工况下,四处测点在低频范围(图中竖直虚线包含的范围)内,泊位测点处的低频波能与口门处低频波能的比值。比值大小的分布与泊位的位置并无明

显规律。但 B1、B5 测点是值得关注的,尤其是 B1 测点,虽然该处泊位离口门最远,但却有着较大的低频波能,B5 测点也是如此。相比之下,B3、B7 测点的低频波能较小。因此,对于外海入射波中有着较大的低频波分量的海域,其港口的建设应充分考虑港内低频波的放大对系泊的影响。

表 2 泊位与口门的低频波能比值

Table 2 Low-frequency wave energy ratio of the berth to the entrance

波 向	B1 波能/C1 波能	B3 波能/C1 波能	B5 波能/C1 波能	B7 波能/C1 波能
SW	2.90	1.46	3.17	1.78
WSW	2.56	1.86	2.51	1.70

3 结 论

本文基于秘鲁钱凯港防波堤三维整体模型试验,研究了涌浪绕射、透射联合作用对港内波况的影响,结论如下:

- 1) 涌浪作用下,受透射、绕射影响,不同工况下港内比波高分布规律相关性较好,距离口门越近,受绕射影响越大,比波高越大;
- 2) 不同周期的入射波作用下,港内同一位置比波高差异明显,周期越长,港内比波高越大;
- 3) 受防波堤对不同波向入射波阻挡性的差异,涌浪下波向对港内的影响符合常规规律,即防波堤阻挡效果好的波向,其入射波对港内的影响较小;
- 4) 对于涌浪,防波堤对高频组分阻挡性较好,但不能有效阻挡低频组分,甚至低频组分在港内会有不同程度的放大。

无论是泊位还是港域测点,靠近口门处波浪绕射占主导作用。随着深入港内,波况愈加复杂,波浪绕射、透射叠加作用,且随位置的改变,入射波影响的程度也不同。总的来说,尽管有防波堤的掩护,但涌浪对于港内波高的影响仍较强。例如,强绕射性使得靠近口门的位置(P4、B7)比波高甚至达到 0.4 以上(图 7b),这对于港内船舶的泊稳是非常不利的。港内深处比波高有所减小,但波浪作用较为复杂,在某些工况下(图 7a),同一泊位的两个测点的比波高差别较大,波动幅度较大,这与泊位的位置和入射工况有关。并且对于泊位处,低频波浪组分相对于入射波的放大情况也需引起重视,容易造成船舶的横荡、纵荡等运动。因此在涌浪作用的港口,建议必要情况下进行系泊船试验以验证校核,并结合泊位的功能特性,给出合理的设计。

参考文献 (References):

- [1] YANG X Z. The characteristics of long-period waves and their influence on the dynamic characteristics of moored ships[J]. The Port Engineering, 1989(6): 37-43. 杨宪章. 长周期波的特性及对系泊船舶动态特性的影响[J]. 港口工程, 1989(6): 37-43.
- [2] ZHANG Z, KONG Y N, CHENG P J. Analysis of influence of long-period transmitted wave through breakwater on mooring stability in the harbor[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(6): 561-566. 张志, 孔友南, 程培军. 长周期波作用下防波堤透浪对港内系泊稳定影响分析[J]. 水道港口, 2017, 38(6): 561-566.
- [3] TAN Z H, CHEN H B, YANG H L, et al. Riprap dike long period wave penetration and its influence on mooring conditions of wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(7): 59-65. 谭忠华, 陈汉宝, 杨会利, 等. 抛石堤长周期波浪透浪作用及对码头系泊条件的影响[J]. 水运工程, 2019(7): 59-65.
- [4] LI J X, ZHAO J J. Risk analysis of long-period wave in harbor basin by using numerical model[J]. Port & Waterway Engineering, 2018 (5): 30-34. 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.
- [5] YU Y X, LIU S X. Three-dimensional model test of harbour engineering with multi-directional waves[J]. Port Engineering Technology, 1994(1): 1-10. 俞聿修, 柳淑学. 港口整体模型的多向不规则波试验研究[J]. 港工技术, 1994(1): 1-10.
- [6] QIAO J P, WU Y Y, ZHAO D, et al. Experimental study on long-period wave of berths under irregular wave[J]. Journal of Waterway and Har-

- bor, 2019, 40(2): 163-169. 乔吉平, 吴月勇, 赵地, 等. 不规则波作用下的泊位长周期波浪试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(2): 163-169.
- [7] WU Y Y, CHEN G P, YAN S C, et al. Experimental study on wave conditions in harbor area under irregular wave[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(9): 94-98, 107. 吴月勇, 陈国平, 严士常, 等. 不规则波作用下的港域波浪条件试验研究[J]. 水运工程, 2017(9): 94-98, 107.
- [8] WU Y Y, CHEN G P, YAN S C, et al. Experimental study on combined diffraction-reflection characteristics of harbor wave[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(4): 330-336. 吴月勇, 陈国平, 严士常, 等. 港域波浪联合绕射、反射特性试验研究[J]. 水道港口, 2017, 38(4): 330-336.
- [9] SAKAKIBARA S, KUBO M. Characteristics of low-frequency motions of ships moored inside ports and harbors on the basis of field observations[J]. Marine Structures, 2008, 21(2-3): 196-223.
- [10] LÓPEZ M, IGLESIAS G. Long wave effects on a vessel at berth[J]. Applied Ocean Research, 2014, 47: 63-72.
- [11] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [12] U.S. Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual[M]. Washington D. C: U. S. Army Corps of Engineers, 2002.
- [13] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wave Model Test Regulation: JTJ/T 234-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001. 中华人民共和国交通运输部. 波浪模型试验规程(JTJ/T 234-2001)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [14] HUGHES S A. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering[M]. Singapore: World Scientific, 1993.
- [15] YU Y X, LIU S X. Random wave and its applications to engineering (4th Edition)[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011. 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用(第四版)[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011.

Experimental Study on the State of Waves Within Harbor Under the Action of Surges

LI Hui, MAO Yan-jun, WANG Hao-tian, Sang Gao-ya, ZHENG Zhen-jun, MA Xiao-zhou
(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Compared with wind waves, surges with longer period can more easily cause adverse effects to the productive activities in the harbor, so that more and more attention has been paid to the impact of surges in today's harbor design. Based on the three-dimensional overall model test results of the breakwater in the Chancay Port of Peru, the influence of the combined action of surge diffraction and transmission on the state of waves within the harbor is studied. The distribution of wave states in different functional areas of the harbor under the condition of incident waves with different wave directions and different spectral peak periods is analyzed, and also the influence of the incident waves with different periods on the wave heights as well as the wave directions in different areas of the harbor is compared and analyzed. The results have showed that under the surge action the distributions of wave height ratio within the harbor under different incident wave conditions have better correlations due to the affection by transmission and diffraction. The closer the distance to the entrance and the longer the wavelength of the incident waves, the greater the wave height ratio within the harbor. The influence of the incident wave period on the wave state in the harbor and the sensitivity of the wave state to the incident wave direction vary in different areas within the harbor. In the areas where breakwater has a better function for blocking the wave direction, the influence of the incident waves on the inner parts of the harbor is small. For berths which are well protected at the inner side of the breakwater, the impact of the low frequency waves on the mooring should be focused on.

Key words: surge; diffraction; transmission; wave height ratio

Received: November 2, 2020