



港池长周期波浪振荡试验研究

薛智博¹, 刘远超², 王闻恺¹

(1. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 港池长周期波浪振荡对港内泊稳条件极为不利, 严重危害港内船舶的正常停靠与作业。通过物理模型试验, 对某港内长周期波浪振荡和放大情况进行研究。结果表明, 在短周期波浪作用下, 港内发生了明显的长波振荡, 5.47 m 波高作用下港池长周期波浪波高可达 0.4 m, 在 633、320 和 200 s 附近的长波谱图均有明显峰值。通过港内外波浪能量对比发现, 0.008 Hz 以下频率港外波浪能量远不及港内波浪, 港域内部在 320 和 200 s 附近的长波能量最大被放大 5 倍。研究结果可为类似工程长周期波浪防治提供参考。

关键词: 长周期波浪; 模型试验; 长波振荡

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0030-05

Experimental study of long-period wave oscillation in harbor

XUE Zhibo¹, LIU Yuanchao², WANG Wenkai¹

(1. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China;

2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Long-period wave oscillation leads to extremely terrible wave conditions in the harbor, which seriously jeopardizes the normal docking and operation of ships in the port. The oscillations and amplifications of long-period waves in a harbor are studied by physical model tests. The results show that long-period oscillations obviously occur in the harbor basin under short waves, and the long-period wave height reaches to 0.4 m under 5.47 m incident wave height. Wave energy in the port is amplified in the port at the wave period nearly equivalent to 633, 320 and 200 s. Through the comparison of wave energy inside and outside the harbor, it is found that the wave energy outside the harbor at a frequency below 0.008 Hz is far less than the wave inside the harbor, and the long-wave energy inside the harbor area near 320 s and 200 s is amplified by 5 times. The results can be beneficial for the prevention of long-period waves in similar projects.

Keywords: long-period wave; physical model test; long-period wave oscillation

在港口建设中常修建防波堤对港域进行掩护。防波堤的建设可以有效减小短波波高, 但对波长较长的长周期波浪防御性较差。长周期波浪一般指周期大于 30 s, 波长为几百米至几千米的小幅波浪。长波特性与短波差异很大, 其引起港口作业条件恶化前的现象并不如短波直观。虽然外海长周期波浪自身波高值较小, 但当入射波浪的频率与港口自身固有频率比较接近时, 港内水域会发生强迫振动, 港域波高幅值将剧烈上升, 其振幅可达到入射波浪振幅的数倍, 从而发生港口共

振^[1], 进而危害港域泊稳条件。

20 世纪 50 年代开普敦的桌湾港 (Table Bay Harbour, Cape Town) 出现假长周期振荡, 港内船舶发生破坏性事故^[2], 1979 年 3 月 21 日 Hibiya 等^[3]在日本长崎港 (Nagasaki Port) 发现了最大波高达 2.78 m 的大幅度长波振荡。针对港口长周期波浪的研究, 20 世纪 40—50 年代, Wilson^[4-5]根据潮位记录数据、物理模型试验和水动力理论方程, 首先对桌湾港假潮振动的特点及产生机制进行研究, 并找到了南大西洋、桌湾和桌湾港的共振频率。

收稿日期: 2022-09-20

作者简介: 薛智博 (1991—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为港口航道与海岸工程。

McComb 等^[6]结合多种数值模拟方法, 利用杰拉尔顿港(Port of Geraldton)研究了长波和短波的侵入机制和缓解方法。Wang 等^[7]基于线性浅水近似, 通过匹配渐进法得到了垂直入射波诱发的矩形港池纵向振荡解析解, 分析了指数形式水深的矩形港池振荡的一般特征。史力生等^[8]基于滨海核电站取水口工程的波浪整体模型试验, 分析了取水明渠内长周期波动产生的条件及影响因素。尽管很多学者针对长周期波浪开展了研究, 但是尚停留在根据实测数据的观察与分析以判断是否有港口共振现象发生。有些研究着眼于某些特定理想港池的共振频率, 从而防止与港池共振频率相近的波浪侵入港池, 以避免港口共振现象的发生。本文采用物理模型试验研究某港域的长周期波浪振荡情况, 并对其振荡机制进行分析。

1 物理模型试验概况

某海工工程规划模型平面布置如图 1 所示, 包括取水明渠、排水明渠、大件码头、护岸和干施工围堰。各分项工程平面规划方案分别为: 取水明渠由南北两条取水堤环抱而成, 口门朝向 NNE, 两堤堤头相距 240 m, 取水南堤堤顶高程为 12 m。北部护岸挡浪墙顶高程为 16 m。港池底高程为 -9 m, 港域外部高程为 -11 m。

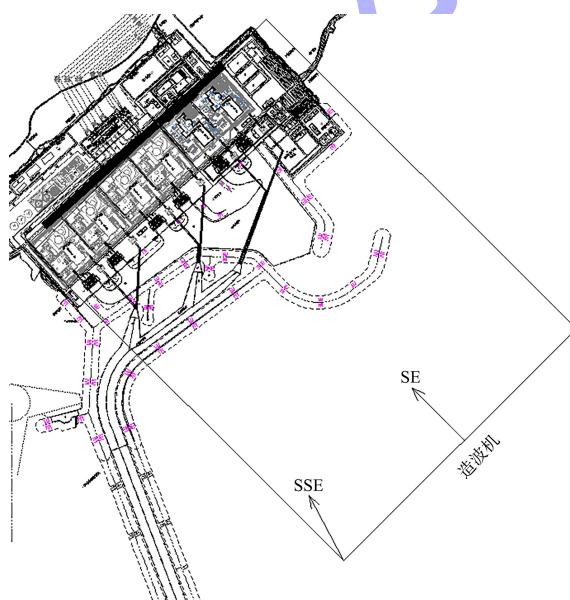


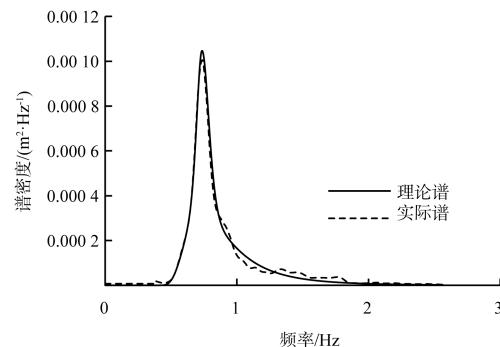
图 1 取水口平面布置

模型试验在 $60.0 \text{ m} \times 40.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ (长×宽×高)的大型波浪港池中进行。港池一端装有多向不规则波造波机系统, 可按要求模拟规则波和各种谱型的不规则波; 港池四周装有消浪设施以减小波浪的二次反射。试验比尺采用 1:80。

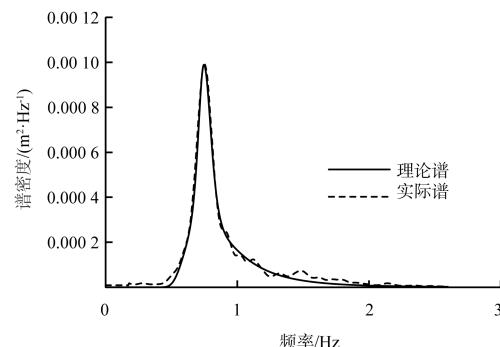
表 1 为本次物理模型试验的波浪要素, 试验采用的不规则波为 JONSWAP 谱, 谱峰参数取 3.3; 波浪数据采集频率为 0.010 9 Hz, 采集时长 278 s, 可以精确地捕捉到波高的变化过程。图 2 为率定波浪要素试验谱图与期望谱图的对比。试验共布置 41 个波浪测点, 其中测点 1~35 布置在港口取水渠内, 用以测量取水渠中波浪绕射及长周期波的产生及传播情况; 测点 41 布置在港外。测点布置见图 3。

表 1 试验波要素

潮位 D/m	有效波高 H_s/m	谱峰周期 T/s	波向	重现期/a
5.90	5.47	10.2	SE	100
	5.47	10.2	SSE	100
3.91	5.15	10.2	SE	100
	5.15	10.2	SSE	100



a) 入射波向 SSE, $H_s=5.47 \text{ m}$, $T_p=10.2 \text{ s}$



b) 入射波向 SE, $H_s=5.15 \text{ m}$, $T_p=10.2 \text{ s}$

图 2 物理模型试验理论谱和实际谱对比

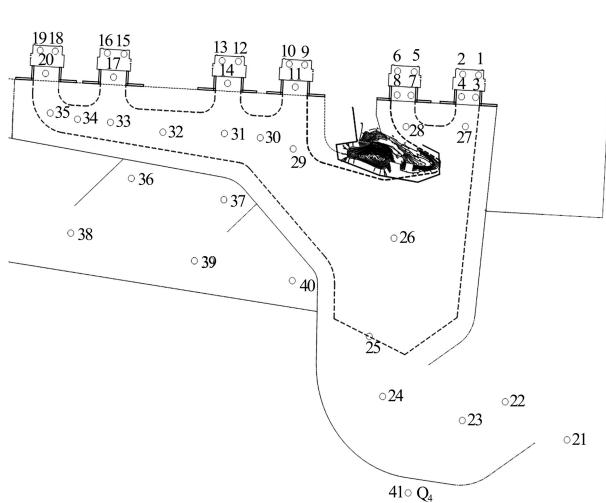


图 3 测点布置

2 长波试验结果

2.1 长波时间序列

为了直观地展示港内的长波振荡情况, 提取港内取水口外测点 28、35 的波浪时间序列进行分析。利用低通滤波器滤除短周期波浪, 展示了入射波向 SSE、 $H_s = 5.47$ m 时, 振荡频率 $F_z < 0.033$ Hz 以上长周期波浪 30 s 时间序列, 得到波面高度时间序列结果, 见图 4。可以看出, 在各工况下, 港内发生了明显的长周期波浪振荡现象, 其振荡波高在 0.4 m 左右。进一步对长波振荡周期进行分析发现, 长周期波浪的振荡频率随测点位置和周围防波堤布置的不同而存在一定差异。其中 320 s 左右的波浪振荡最为明显, 在港域的各个位置都能探测到该频率波浪的存在, 各工况下其振动波高可达到 0.3 m; 200 s 左右的波浪振荡幅度也可达到 0.2 m; 75~90 s 和 110~130 s 的波浪也有不同程度的振荡现象。对比左部取水口测点 35 和右部取水口测点 28 可知, 其长周期波浪成分能量存在差异。由于测点 35 位于狭窄取水口通道, 其长波振荡能量以较长周期(300~320 s)为主, 其余部分频率的振荡相对微弱; 而测点 28 不同频率的波浪能量则比较均匀, 其能量分布范围相对较宽。

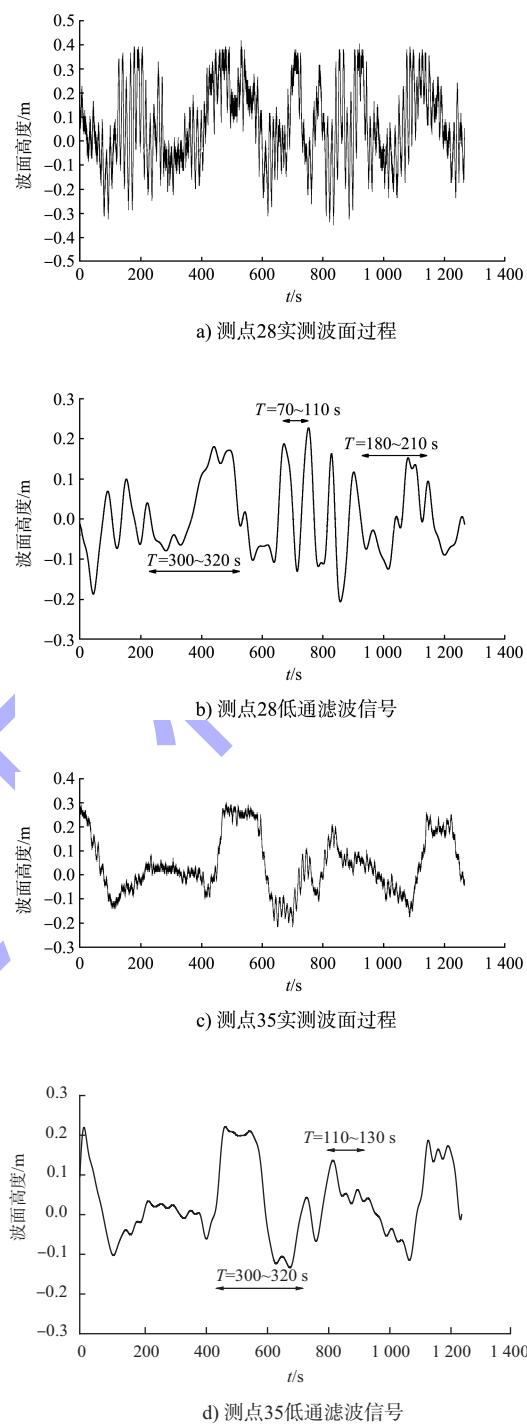


图 4 过滤前后波面高度时间序列对比

2.2 低频波浪能谱

为进一步分析港域长周期波浪的振荡频率, 采用低通滤波器对港内测点的低频波浪谱进行分析, 得到图 5 所示低频波能谱。在不同工况下, 港域长周期波浪能量均在 320 s 附近发生明显振

荡, 同时在 180~210 s 附近存在次峰, 在 0.007~0.015 Hz(对应于 66~142 s)区间内也存在着不同程度的长波振荡。不同工况下港域长波的振荡频率基本一致, 但也存在一定差异。在入射波向 SSE、 $H_s = 5.47 \text{ m}$ 的入射波浪下, 波浪能量在 633 s 附近存在次峰, 表明在波浪作用下, 港池很有可能发生 633 s 的长周期振荡。对比测点 28 和 35, 二者在长周期波浪主频上基本一致, 部分次峰频率值和波浪能量存在差异, 说明对于不规则港口, 港池长周期振荡频率和能量由港域形状和尺度确定, 而部分长周期能量与港域局部布置也有一定关系。

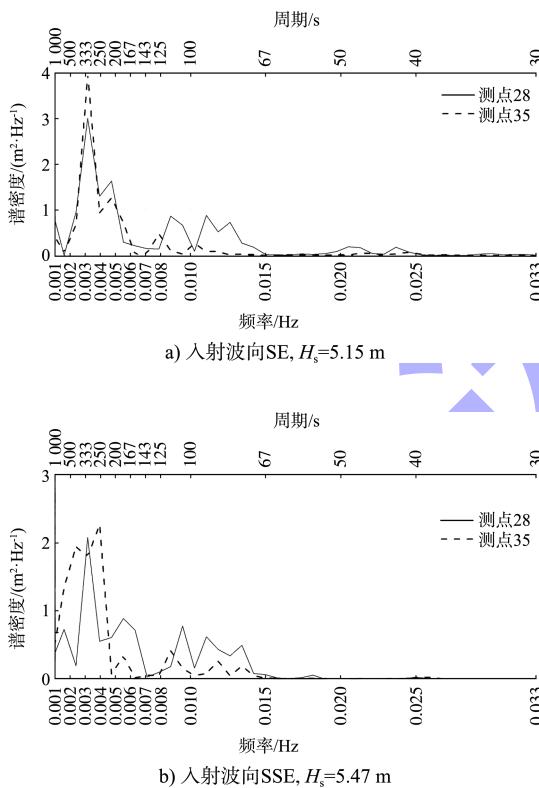


图 5 港内测点低频波浪能谱

为研究港内长周期波浪振荡的原因, 将港外口门外测点和港内测点的能谱进行对比分析。取口门外测点 21 作为参照, 与港内各测点能谱进行对比, 见图 6。

对比发现, 港外同样存在长周期波浪成分。各工况下, 即使入射波浪的谱峰周期为 10.2 s, 在港外仍不可避免地产生了不同频率的长周期波浪。港内外测点的能谱分布存在着巨大差异, 港

外测点的长波能量主要集中于 30~100 s, 而港内波浪的能量频率则集中于 66 s 以上。以 0.008 Hz 作为分界点, 0.008~0.033 Hz 港外波浪能量大于港内波浪能量, 在小于 0.008 Hz 部分港内长波能量大于港外, 说明波浪传播过程中在港外产生了长周期波浪成分, 并一起向港域传播, 然而由于 30~60 s 的长周期波浪成分绕射能力相对较弱, 在传播过程中能量逐渐损耗, 港池的振荡频率也大于 66 s, 因此也未发生长周期振荡。而大于 66 s 的长周期成分在传播过程中被港池捕获, 当波浪的频率与港池的自振频率趋于一致时, 港池发生长周期振荡。并且对比港内外能量的差异可以发现, 在小于 0.008 Hz 部分港内波浪能量最大可达到港外测点长波能量的 4 倍。因此, 港内波浪的长周期能量来源为港外波浪频率与港池频率一致而发生共振, 导致长周期波浪能量被放大。共振放大的波浪周期介于 125~1 000 s, 是一种部分共振放大的现象。因此, 对长周期波浪振荡主要针对 125~1 000 s 之间的长周期成分讨论, 周期低于 125 s 的成分判定为均由港外正常绕射进入。

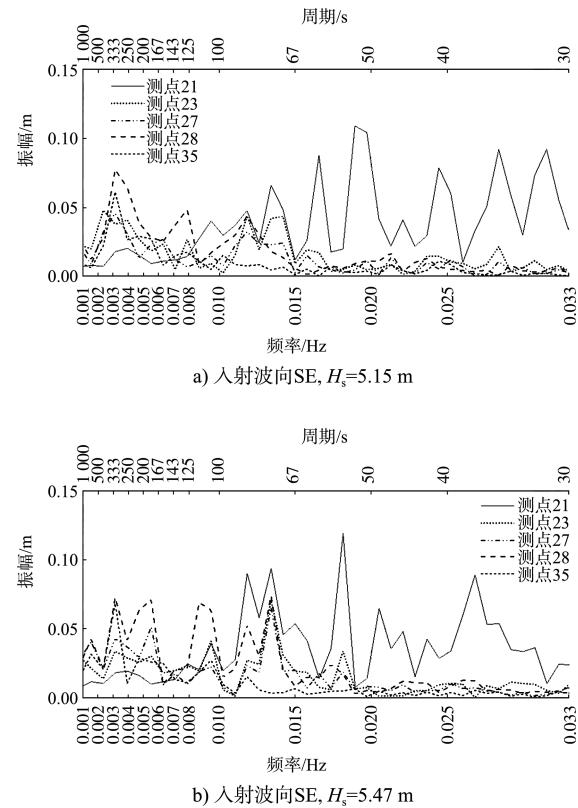


图 6 港内外测点低频波浪能谱对比

为了解港池长波振荡的产生,进一步对频率0.008 Hz 以下的低频波浪能量进行能谱对比,对0.008 Hz 以上的绕射波浪不予考虑。港外测点采用21,港内采用25和28,见图7。结果表明,在0.008 Hz 以下,港外测点也存在长波能量,港内取水口能量则远高于港外,长波能量被港口捕获,其放大幅度达到3~5倍。并且在320 s 和200 s附近,长波能量放大幅度尤其明显,且出现了峰值,其对应频率很可能与港池的自振频率一致。

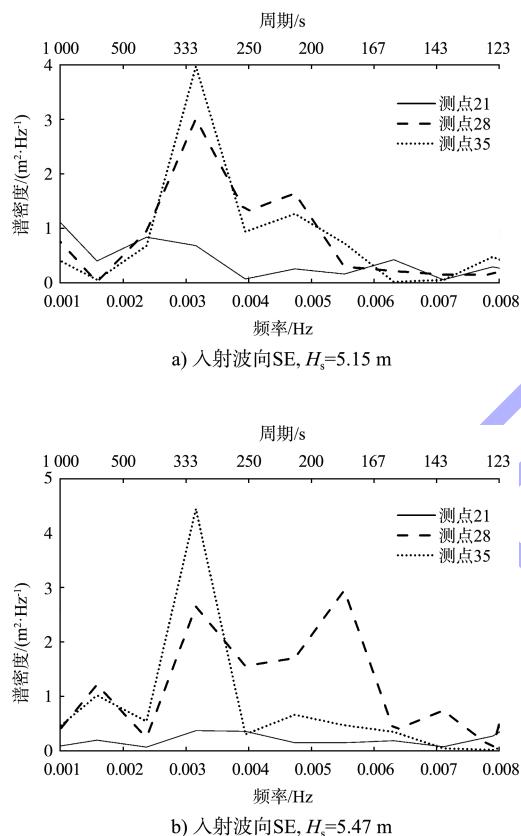


图7 港内外测点低频能谱对比

(上接第29页)

参考文献:

- [1] 左其华,杨正己.航槽对不同入射角波浪传播的影响[J].水运工程,1996(1): 1-8.
- [2] 吴达开.小迎浪角时长直航道对波浪传播与变形影响的数值研究[J].水运工程,1997(1): 3-13.
- [3] 陈汉宝,孙精石.航道引起波能集中现象的试验研究[J].水道港口,2000(3): 13-16.
- [4] 赵智帮,刘子琪,孙精石,等.深水航道对波浪传播影响规律的研究[J].中国港湾建设,2001(6): 9-15.

3 结论

1) 在短周期波浪作用下,港内发生了明显的长波振荡,5.47 m 波高作用下港池长周期波浪波高可达到0.4 m,在633、320 和200 s 附近的长波谱图均有明显峰值。

2) 通过港内外波浪能量对比发现,0.008 Hz 以下频率港外波浪能量远不及港内波浪,港域内部在320 和200 s 附近的长波能量最大被放大5倍。

参考文献:

- [1] 马小舟,刘斌,王岗,等.孤立波作用下细长港响应的数值研究[J].计算力学学报,2013,30(1): 101-105.
- [2] WILSON B W. Table bay as an oscillating basin [C]// sminnesota international hydraulic convention. Minnesota: ASCE, 2010.
- [3] HIBIYA T, KAJIURA K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay [J]. Journal of the oceanographical society of Japan, 1982, 38(3): 172-182.
- [4] WILSON B W. The mechanism of seiches in Table Bay Harbour, Cape Town[J]. Coastal engineering, 1953: 52-78.
- [5] WILSON B W. Origin and effects of long period waves in ports [J]. Coastal engineering, 1957: 211-218.
- [6] MCCOMB P, JOHNSON D, BEAMSLEY B. Numerical model study to reduce swell and long wave penetration to Port Geraldton[J]. Coastal engineering, 2009: 490-496.
- [7] WANG G, ZHENG J H, LIANG Q H, et al. Theoretical analysis of harbor resonance in harbor with an exponential bottom profile[J]. China ocean engineering, 2015, 29(6): 821-834.
- [8] 史力生,潘军宁.滨海核电站取水渠长周期波动现象及其消减[J].水利学报,2009,40(2): 201-207, 213.

(本文编辑 王传瑜)

- [5] 李思源,白志刚,王广聚.减少航道外波浪集聚对策研究[J].海洋技术,2002,21(3): 56-61.
- [6] 董利民,刘爱珍.人工航道对波浪传播规律的影响[J].水道港口,2006,27(2): 74-78.
- [7] SLOTH P. Port of Lekki-evaluation and assessment of wave conditions[R]. Copenhagen: DHI, 2014.
- [8] 王科华,任赵飞,周智鹏,等.工程海域波浪特征分析方法比较[J].海洋工程,2022,40(3): 149-158.

(本文编辑 王璁)