



不同混合浪表征方法下港内波况数值模拟*

申明航¹, 郑振钧^{1,2}, 董华韦¹, 郑艳娜³, 马小舟¹, 董国海¹

(1. 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;

2. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 以一组波浪参数描述波浪的总体表征法在精确表征混合浪时具有局限性, 通过将波浪频谱划分为独立波系并以参数化形式表征每个波系的多波系表征法, 可以更精确地表征混合浪。通过数值模拟方法探讨混合浪的不同表征方法对港内水体扰动的影响, 运用不同的表征方法对秘鲁钱凯湾的3个实测波浪谱进行重构, 作为数值模拟的输入波谱, 并且检验总体表征法在描述混合浪时引入的典型误差。结果表明, 长涌浪波系对港内水体扰动有显著影响, 对其能量水平的高估或低估会导致相应的误差; 与多波系表征法相比, 总体表征法得到的平均波向往往与实际不符, 会导致对防波堤掩护效果的误判。

关键词: 混合浪; 水体扰动; 总体表征法; 多波系表征法; 双峰谱

中图分类号: O353.2; U652.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0048-08

Numerical simulation of sea state within harbor forced by mixed waves characterized by different methods

SHEN Minghang¹, ZHENG Zhenjun^{1,2}, DONG Huawei¹, ZHENG Yanna³, MA Xiaozhou¹, DONG Guohai¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering, Ministry of Communications, Nanjing 210029, China;

3. School of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: The overall characterization method of waves using a single set of wave parameters has limitations when representing mixed waves accurately. By using multimodal characterization method to partition the wave spectrum into independent wave systems and representing each system in a parameterized form, mixed waves can be more accurately characterized. We investigate the influence of mixed waves condition characterization methods on water agitation in harbor through numerical simulation. We select three measured wave spectra of Chancay Harbor in Peru to theoretically reconstructed under different characterization methods, serving as input spectra for numerical models, and examine the typical errors introduced by the overall characterization method in describing mixed waves. The results show that wave conditions within the harbor are significantly impacted by the long swell system, and overestimation or underestimation of its energy levels leads to corresponding errors. Compared to the multimodal characterization method, the overall characterization method often yields average wave directions that do not align with reality, resulting in a misjudgment of the protective effect of breakwaters.

Keywords: mixed waves; water agitation; overall characterization method; multimodal characterization method; bimodal spectrum

收稿日期: 2024-01-22

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071060); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52301312); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金项目(YK223001-5); 中央高校基本科研业务费资助项目(DUT22LAB101、DUT22RC(6)006); 辽宁省教育厅资助项目(LJKZ0717)

作者简介: 申明航(1998—), 男, 硕士研究生, 从事近岸波候研究。

通讯作者: 郑振钧(1994—), 男, 博士, 助理研究员, 从事港湾振荡致灾机理及防灾减灾研究。E-mail: zjzheng@dlut.edu.cn

波浪的表征方法是波浪相关研究的基础。海洋中的波浪通常假设由有限个不同方向和频率的单色波叠加而成^[1]。对于起源于同一气象事件的波浪, 其频率和方向往往比较相似, 在海浪谱中呈现集中的特征, 称为波系^[2]。不同波系混合叠加的波浪为混合浪, 其往往呈现双峰甚至多峰特征。海洋中的波浪多以混合浪的形式存在。

在很长一段时间里, 波浪采用总体表征法, 即使用一组典型的波浪参数表征波浪^[3](例如谱峰周期、平均波向和有效波高)。然而, 一组波浪参数不足以精确表征多个波系共存的复杂海况。因此, 混合浪中波系的划分必不可少。通过谱分割的方法可以实现波系的划分, 根据海浪谱的维数, 可以将谱分割的方法分为一维谱方法和二维谱方法。一维谱方法是通过求解分离频率^[4-5]或者使用双峰谱模型拟合实测谱^[6]的方式划分波系。与一维谱相比, 二维谱方法利用分水岭算法^[7-9]将海浪谱划分为独立的波系。这类方法同时考虑全频域和全方向上的波浪信息, 能够给出更准确的结果。基于谱分割的结果, 用多组波浪统计参数表征混合浪(即多波系表征法)^[10]分析复杂海况。

本文以东南太平洋海域秘鲁钱凯湾为例。此海域海况复杂且常年遭受南太平洋西风带传来的涌浪侵袭。与风浪相比, 涌浪具有长周期的特性更加接近港口本征频率, 易引发港内水体振荡, 从而可能对港口造成更大的损害^[11]。根据实测的波浪资料选取 3 个典型工况, 分别采用两种方法(即总体表征法和多波系表征法)表征入射波浪, 使用 FUNWAVE-TVD 模型进行数值模拟, 对比两种方法定义的混合浪作用下的港内波况。

1 数值模型及验证

采用数值模型 FUNWAVE-TVD 进行研究, 模型是 Shi 等^[12]基于 Boussinesq 方程开发的开源软件, 基本控制方程为弱非线性、弱频散性的

Boussinesq 型方程, 能够有效模拟波浪反射与折射、波浪破碎及波生流等^[13]波浪现象。该模型已被广泛应用于实际工程问题。

工程位于秘鲁钱凯湾附近海域。大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室曾对秘鲁钱凯湾开展过物理模型试验, 因此选择使用此物理模型试验的部分工况及相应的试验结果^[14]对数值模型的有效性进行验证。工况参数见表 1。

表 1 秘鲁钱凯港物理模型试验部分工况参数

| 工况 | 波向 | 水位/m | 有效波高 H_s /m | 谱峰周期 T_p /s |
|--------|----|------|---------------|---------------|
| SW-L-2 | SW | -0.2 | 3.8 | 17 |
| SW-L-3 | SW | -0.2 | 3.9 | 18 |
| SW-L-4 | SW | -0.2 | 4.3 | 20 |

基于港口区域的陆上及水下地形数据建立模型计算域。计算域大小为 $4.5 \text{ km} \times 3.2 \text{ km}$ (长 \times 宽), 网格边长在 x 与 y 方向上均为 5 m , 在主防波堤的港口内设置 8 个测点。为避免边界发生波浪的二次反射, 在边界周围设置厚 200 m 的海绵层, 数值模型的平面布置见图 1。入射波浪采用 JONSWAP 谱造波, 为了能够较好地拟合实测谱形, 模型验证过程中谱峰升高因子取 1.0 。

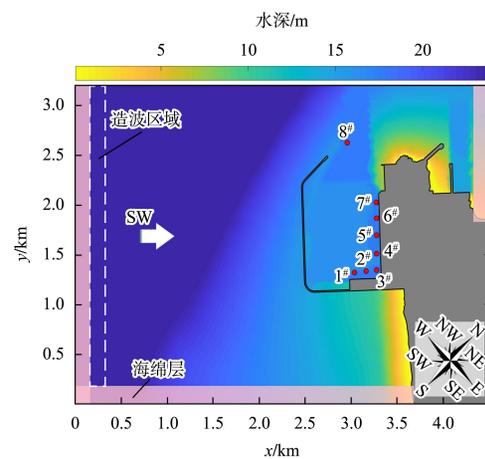


图 1 秘鲁钱凯港数值模型计算域

试验结果以 8# 测点的有效波高为标准值, 计算得到其余 7 个测点的比波高。对比不同工况下物理模型试验与数值模拟的结果, 见图 2。可以看到, 两者的结果总体上比较吻合, 表明数值模型的有效性。

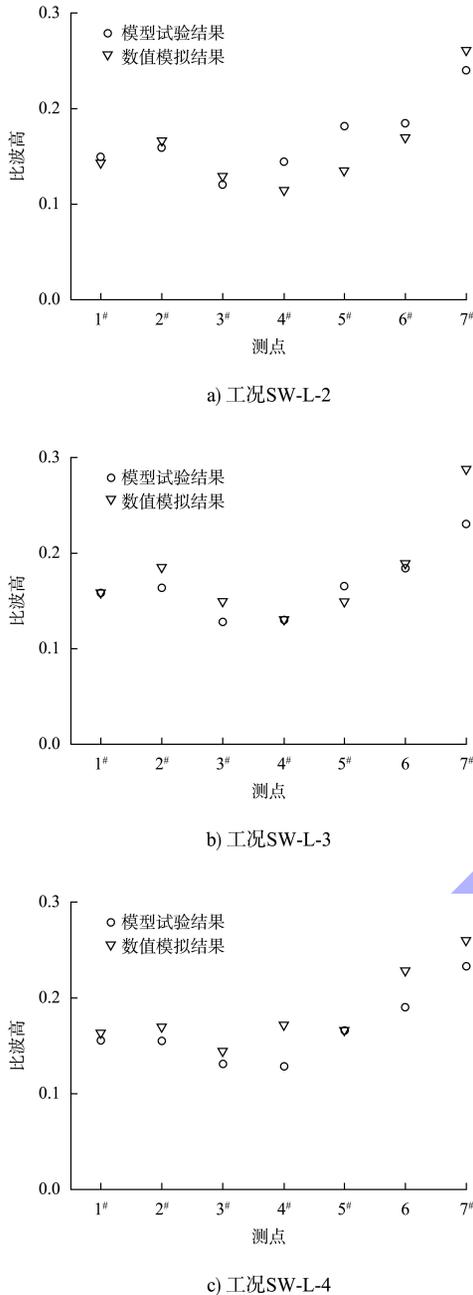


图2 秘鲁钱凯港模型试验结果和数值模拟结果对比

2 数值模拟工况选取

2.1 计算域设置

考虑到后续试验工况包含较短周期波浪，网格尺寸相较于波长过大，导致入射波浪传播不稳定，将计算域的网格边长缩小为 1.5 m。同时，将计算域缩小到钱凯港主防波堤掩护的港口范围以提高计算效率，即 x 方向 1.95 km、y 方向 2.25 km，见图 3。计算域内共布置 5 个测点，借以了解入射波浪传播进入港口的过程。计算域四周边界为固壁

边界，在计算域边界四周分别设置海绵层(东、西两侧海绵层厚 250 m，南、北两侧海绵层厚 200 m)。防波堤外侧设置宽 30 m 的消浪层，吸收港外波浪能量。

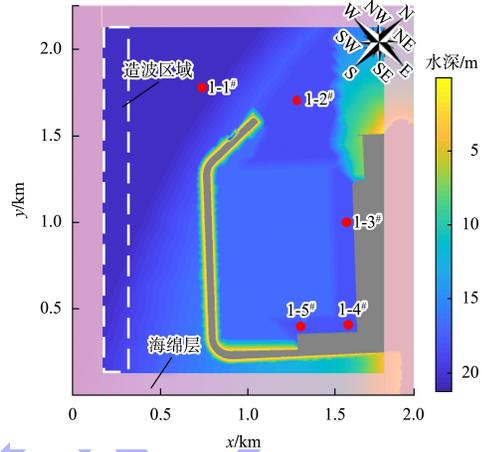
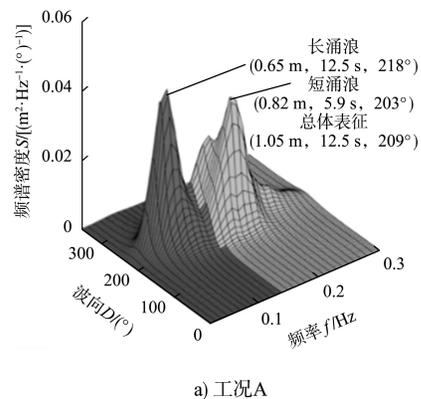


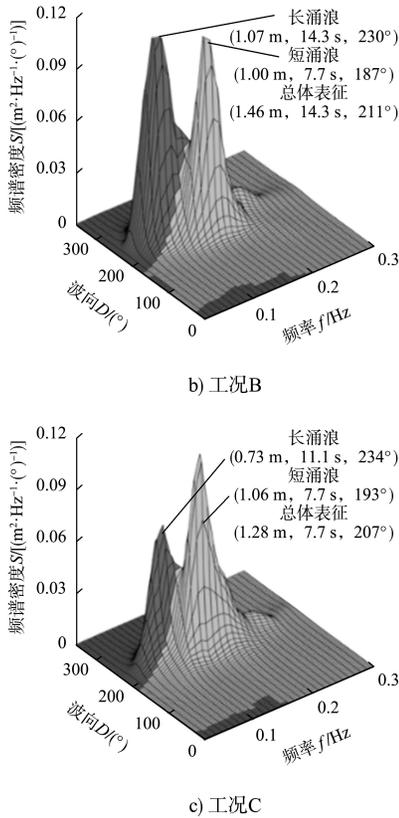
图3 秘鲁钱凯港主防波堤区域数值模型计算域

2.2 试验工况的选取

根据 2018-07-19—2018-10-10 期间钱凯港的实测波浪资料，剔除异常数据后，得到 938 个波浪谱数据。利用 MOP 方法^[15]对波浪谱进行波系划分，根据所含波系数量，将波浪谱分为单峰谱、双峰谱和多峰谱 3 类，分别占比 59.9%、37.7% 和 2.4%，考虑到双峰谱占比远高于多峰谱，仅考虑双峰特征的情况，分别针对两种方法定义的波浪参数进行模拟。

从实测数据中选取 3 个典型的具有双峰特征的波浪谱作为试验工况 (工况 A~C)，其用总体表征法描述时会出现典型的误差，致使对比结果更加显著，见图 4。





注: 图中括号内数值依次为有效波高 H_s 、谱峰周期 T_p 、波向 D 。

图 4 试验工况的双峰谱及两种表征方法下的波浪参数

由图 4a) 可看出, 工况 A 的两个波系的波向较为接近, 仅相差 15° ; 基于总体表征法计算的平均波向与两个波向的差值较小; 然而, 由于长涌

浪波系包括频谱的峰值, 导致总体表征法采用长涌浪的谱峰周期作为整体的谱峰周期, 而不是采用波浪能量占主导的短涌浪波系对应的谱峰周期, 最终出现谱峰周期不匹配, 导致高估长涌浪波系能量的情况。由图 4b) 可看出, 工况 B 的两个波系能量非常接近, 与工况 A 相比, 工况 B 两个波系的波向明显不同; 基于总体表征法计算的平均波向是 211° , 与两个波系的波向相差较大 (230° 和 187°); 同样, 总体表征法的谱峰周期与长涌浪波系一致, 相应地高估了长涌浪波系能量。由图 4c) 可看出, 工况 C 的两个波系方向相差较大, 与工况 A 相比, 采用总体表征法的谱峰周期与主导的短涌浪波系的谱峰周期相一致, 但是长涌浪波系会被忽略, 即低估了长涌浪波系的能量。

针对上述 3 种情况, 分别使用两种方法获取相应的波浪参数, 见表 2。

为了简化计算, 采用两个不同角度的单向不规则波叠加的方法模拟入射波浪, 单向不规则波采用 Goda 改进的 JONSWAP 谱模拟^[16], 根据实测数据分析, 当谱峰升高因子取 3.3 时 (工况 B₁ 的长涌浪取 1.0), 能够很好地拟合实测谱形, 工况 A 的两个入射波浪的海浪谱见图 5。

表 2 入射波浪的波浪参数

| 工况 | 多波系表征法 | | | | | | 总体表征法 | | |
|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|----------------|---------|---------|----------------|
| | $H_{s,1}/m$ | $T_{p,1}/s$ | $D_1/(^\circ)$ | $H_{s,2}/m$ | $T_{p,2}/s$ | $D_2/(^\circ)$ | H_s/m | T_p/s | $D_M/(^\circ)$ |
| A ₁ | 0.65 | 12.5 | 218 | 0.82 | 5.9 | 203 | - | - | - |
| A ₂ | - | - | - | - | - | - | 1.05 | 12.5 | 209 |
| B ₁ | 1.07 | 14.3 | 230 | 1.00 | 7.7 | 187 | - | - | - |
| B ₂ | - | - | - | - | - | - | 1.46 | 14.3 | 211 |
| C ₁ | 0.73 | 11.1 | 234 | 1.06 | 7.7 | 193 | - | - | - |
| C ₂ | - | - | - | - | - | - | 1.28 | 7.7 | 207 |

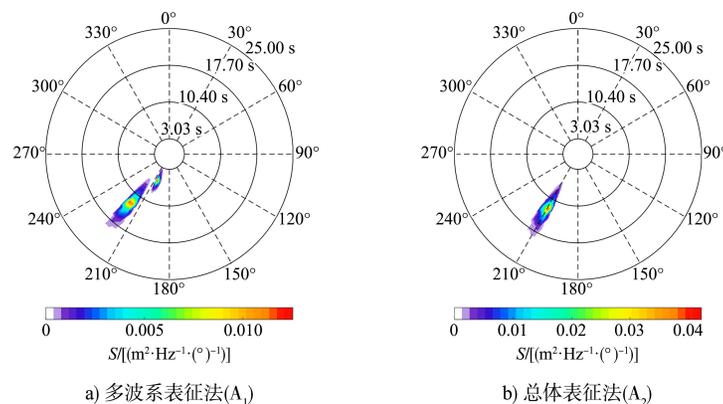


图 5 工况 A 不同表征法下入射波浪的海浪谱

3 试验结果与分析

3.1 特征波高分布

两种方法表征的入射波浪的波浪能量是一致的,但是不同的表征方法,波浪能量在方向和频域上的分布差异很大,这种差异对于评估港内水体扰动具有较大的影响。评估港内的水体扰动在很大程度上依赖于有效波高,它能够直观地反映测点处波浪能量的大小。5个测点处3个工况不同表征方法的 H_s 见图6。由于防波堤的存在,无论采用何种方法表征波浪,港内 H_s (1-3[#]、1-4[#]及1-5[#]测点)均显著低于港口外部。然而,工况B与C显示,采用多波系表征法的港内 H_s 大于采用总体表征法的 H_s ,但是对于工况A,则完全相反,原因是入射波谱的谱形差异造成的。

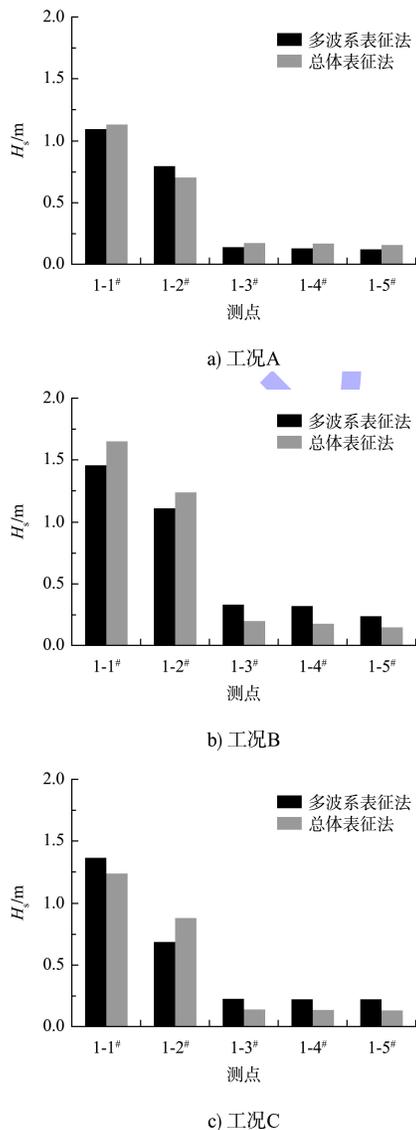


图6 不同表征方法下的有效波高(H_s)对比

如2.2节所述,工况B₁和C₁内两个波系方向相差较大,其中长涌浪波系的波向是西南偏西方向,而防波堤是由东南至西北方向布置,因此防波堤对其掩护效果较差。而采用总体表征法定义的单峰谱波浪,其平均波向均是西南偏南方向,防波堤的掩护效果较好,导致工况B₁、C₁的港内 H_s 分别大于工况B₂、C₂。由于工况A₁两个波系的方向相差不大,总体表征法得到的波向与多波系表征法的较为接近,波向的影响相对较小。但是,工况A₂定义的人射波谱高估了长涌浪的能量,由于长涌浪的绕射作用较强,防波堤对于长涌浪的掩护效果低于短涌浪,致使工况A₂的港内 H_s 大于工况A₁。

次重力波是指周期在30~300s之间的长波^[17],主要由短波群间非线性相互作用产生。次重力波是诱发港口振荡最常见的因素^[18],在涌浪主导的海域下,港口面临的安全威胁更大^[19]。因此,确定不同波浪表征方法对港口内外次重力波的影响至关重要。

次重力波的有效波高通过下式计算:

$$H_{IC} = 4\sqrt{E_{IC}} \quad (1)$$

$$E_{IC} = \int_{0.0033}^{0.0330} S'(f) df \quad (2)$$

式中: H_{IC} 为次重力波有效波高, E_{IC} 为次重力波频谱的零阶谱矩, $S'(f)$ 为波浪频谱密度。

不同表征方法下的次重力波波高(H_{IC})对比见图7。可以看出,与 H_s 相比,次重力波有效波高在传入港口时衰减程度相对较低,而且次重力波在港内传播时,由于波浪的非线性作用,波浪能量在港内衰减的同时部分能量由高频向低频移动,导致港内的 H_{IC} 有一定的升高趋势。与 H_s 相似,工况B和C采用不同方法表征波浪时,波向相差较大,导致总体表征法低估了港内 H_{IC} 。而工况A受到波向的影响较小,次重力波波高受到长涌浪能量的影响被高估。需要注意的是,工况B采用总体表征法的入射波浪高估了长涌浪的能量,理论上港内 H_{IC} 同样被高估,但是由于波向的影响,总体上表现出总体表征法低估 H_{IC} 的情况。

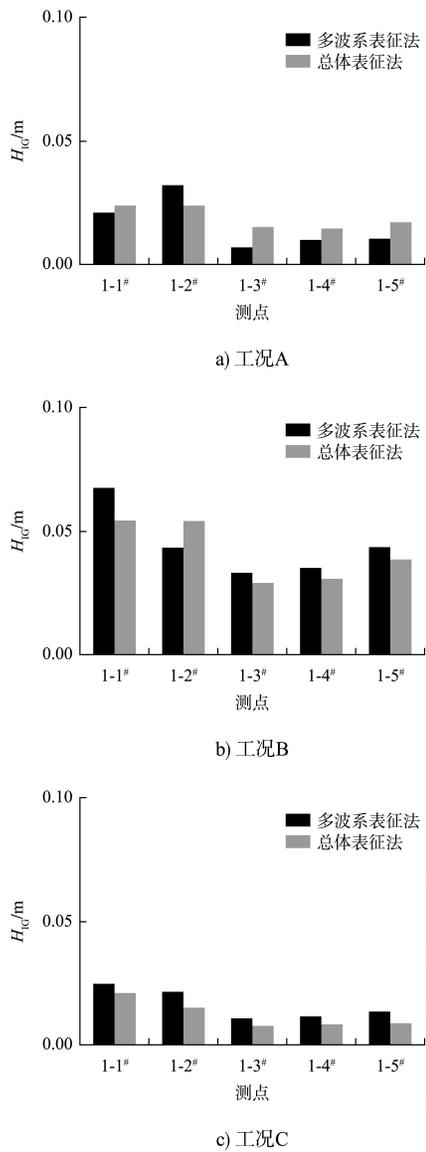


图 7 不同表征方法下的次重力波波高 (H_{IC}) 对比

3.2 波浪频谱分析

采用傅里叶变换分析测点处波浪能量在频率上的分布特征以及波浪传入港口过程中波浪频谱的演变。以工况 A 为例, 选取 1-1[#]、1-2[#](港口口门)、1-5[#]测点的波浪频谱进行分析。不同表征方法下波浪频谱的演变过程见图 8。

由图 8 可看出, 两种波浪表征方法均表现出波浪在进入港口时, 波浪能量急剧减小的情况。此外, 由图 8a) 的工况 A₁ 可看出, 波浪在传入港口过程中, 短涌浪的谱峰相较于长涌浪下降得较快, 在 1-5[#]测点处波浪频谱显示波浪能量集中在长涌浪对应的频率上, 表明港内水体受短涌浪的影响较小。

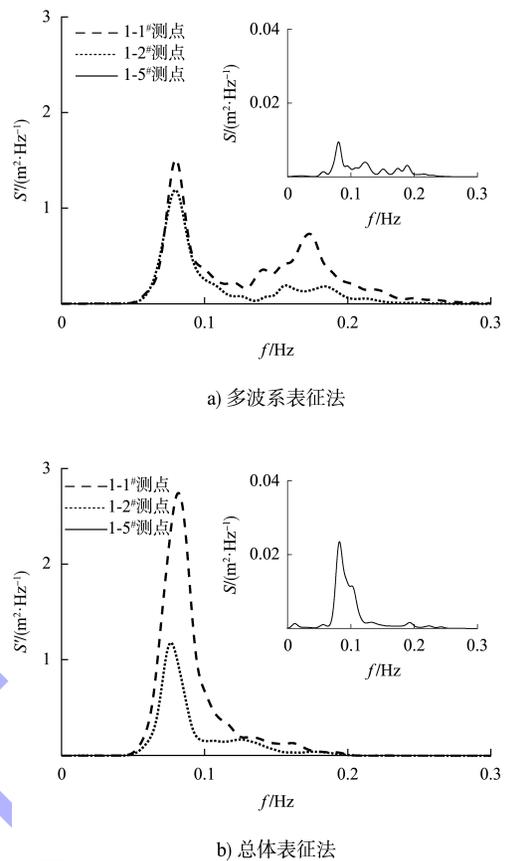
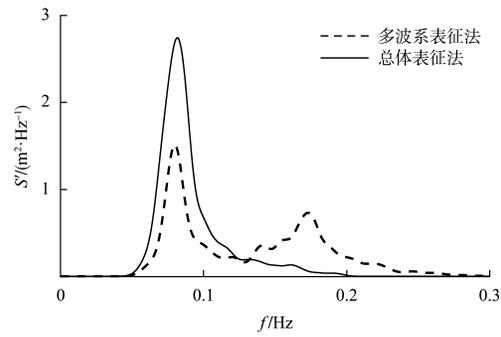
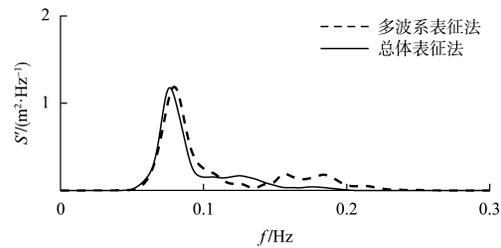


图 8 工况 A 在不同波浪表征方法下波浪频谱的演变

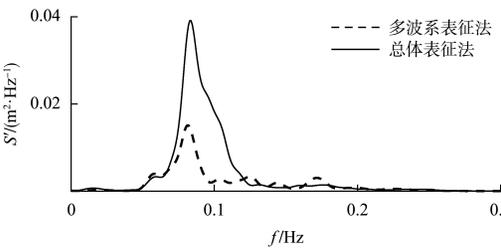
工况 A~C 中 4 个测点(即 1-1[#]~1-3[#]、1-5[#]测点, 其中 1-3[#]与 1-4[#]测点频谱相似, 故仅分析 1-3[#]测点)处不同波浪表征方法下波浪频谱的比较结果见图 9~11。以工况 A 为例, 由图 9a) 可看出, 在 1-1[#]测点, 不同波浪表征方法中波浪频谱的能量分布完全不同, 基于频谱分割的多波系表征方法保持了波浪的双峰特性, 而总体表征方法波浪的能量更多集中在长涌浪谱峰频率的附近; 由图 9b) 可看出, 波浪传播至口门处时(即 2[#]测点), 由于防波堤的保护以及波浪浅化作用和底摩擦的影响, 使得高频波浪能量迅速衰减, 而低频波浪能量衰减较小; 另外, 由图 9c)、d) 可看出, 对于工况 A, 采用总体表征方法高估了长涌浪的能量, 使得港内的波浪能量高于多波系表征方法的波浪能量。由于长涌浪在港内水体扰动中起着至关重要的作用, 这部分能量被高估, 将对准确评估港内水体扰动产生直接影响。



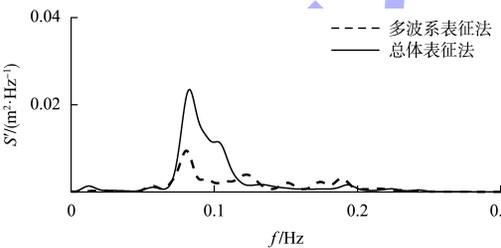
a) 1-1#测点



b) 1-2#测点

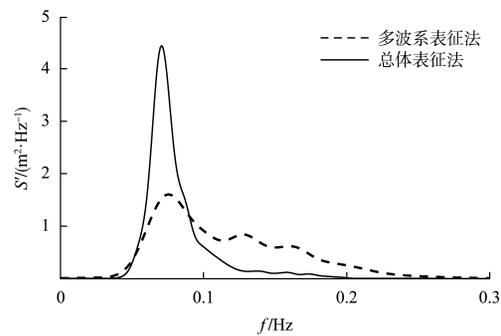


c) 1-3#测点

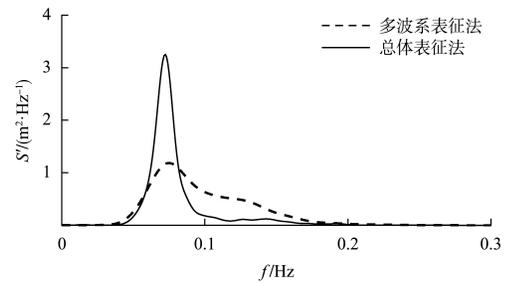


d) 1-5#测点

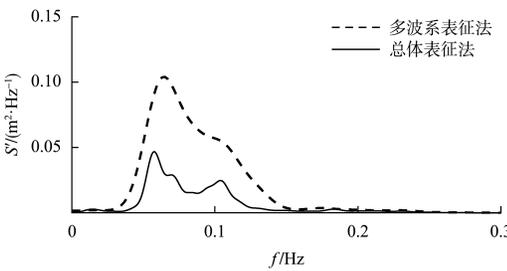
图9 工况 A 各测点波浪频谱对比



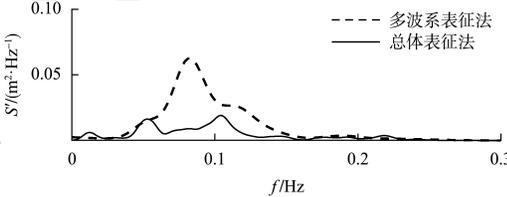
a) 1-1#测点



b) 1-2#测点

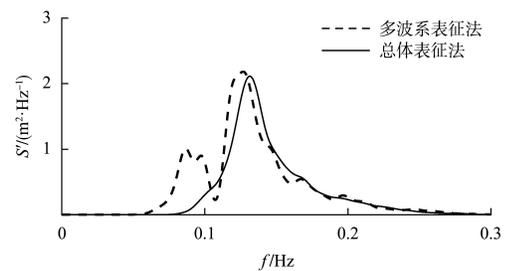


c) 1-3#测点

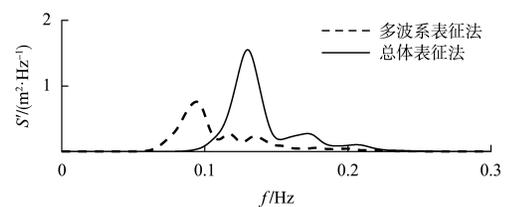


d) 1-5#测点

图10 工况 B 各测点波浪频谱对比



a) 1-1#测点



b) 1-2#测点

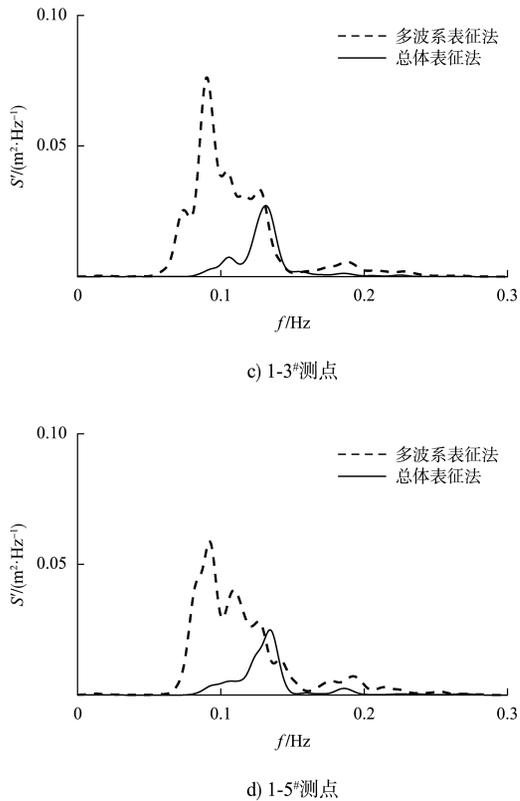


图 11 工况 C 各测点波浪频谱对比

4 结论

1) 采用两种不同的波浪表征方法得到的入射波浪频谱具有很大差异。基于频谱分割的多波系表征法保持了混合浪的多波系特征, 更准确地描述了混合浪。而总体表征法将整个波谱作为一个波系, 往往放大或忽略了某些主要频率和方向上的能量。

2) 长涌浪系统对于港内水体扰动具有显著影响。长涌浪能量被高估的情况下, 港内水体的扰动更加明显, 同样, 长涌浪能量被低估甚至忽略会导致更小的水体扰动。

3) 对于两个波系的波向相差较大的情况, 采用总体表征法得到的平均波向与实际波向差异过大, 导致对防波堤掩护效果的误判, 出现长涌浪能量被高估的情况下, 港内水体扰动却更小的结果。

参考文献:

- [1] PIERSON W J, NEUMANN G, JAMES R W. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics [M]. Washington: Hydrographic Office, 1958.
- [2] HASSELMANN S, BRÜNING C, HASSELMANN K, et al. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra [J]. Journal of geophysical research-oceans, 1996, 101 (7): 16615-16629.
- [3] LOBETO H, MENENDEZ M, LOSADA I J, et al. The effect of climate change on wind-wave directional spectra [J]. Global and planetary change, 2022, 213: 103820.
- [4] WANG D W, HWANG P A. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2001, 18(12): 2052-2062.
- [5] EARLE M D. Development of algorithms for separation of sea and swell: MEC-87-1 [R]. Massachusetts: National Data Buoy Center, 1984.
- [6] 朱绍华, 于文太, 李广帅, 等. 基于双峰海浪谱的风浪和涌浪分离应用研究 [J]. 中国造船, 2017, 58 (4): 160-167.
- [7] VOORRIPS A C, MAKIN V K, HASSELMANN S. Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model [J]. Journal of geophysical research-oceans, 1997, 102(3): 5829-5849.
- [8] HANSON J L, PHILLIPS O M. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2001, 18 (2): 277-293.
- [9] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(1): 107-122.

(下转第 91 页)