



双色波作用下港池长周期波浪模拟研究

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: 防波堤对长周期波浪的掩护较差, 长周期波浪容易直接侵袭港内, 恶化港内作业条件。依托物理模型试验结果, 基于 BW 数值模型研究双色波作用下港池长周期波浪产生机制。对 BW 数值模型进行验证, 模型与试验结果吻合良好。在频率分别为 f_1 和 f_2 的双色波作用下, 波浪间发生非线性作用产生 Δf 、 $2f_1-f_2$ 、 $2f_2-f_1$ 、 $2f_1+f_2$ 、 f_1+f_2 、 $2f_2$ 等频率的波浪, 当产生的长周期波浪 Δf 与港口自振频率趋于一致时, 长周期波浪波高被港池捕捉发生共振而放大。随着双色波入射波高、调谐率的增加, 波浪之间的非线性作用增强, 长周期波高显著增大。

关键词: 长周期波浪; 数值模型; 双色波; 非线性作用; 入射波高; 调谐率

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0043-06

Long-period wave numerical modeling in harbour basin under bichromatic waves

XUE Zhibo¹, LIU Yuanchao², WANG Wenkai¹

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

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

Abstract: The breakwater has poor protection against long-period waves, which can easily invade the harbor directly and worsen the operating conditions in the harbor. This paper relies on the physical model test results and the BW numerical model to study the generation mechanism of long-period waves in the harbor pool under the action of two-color waves. The BW numerical model is verified, and the model agrees well with the test results. Under the action of two-color waves with frequencies f_1 and f_2 respectively, nonlinear interactions occur between waves to produce waves with frequencies such as Δf , $2f_1-f_2$, $2f_2-f_1$, $2f_1+f_2$, and f_1+f_2 . When the wave frequency Δf equals to the harbour natural frequency, the wave height of such wave frequency will amplify. The nonlinear interaction of waves is positively associated with the increment of wave height and tenability, which results in the increase of long-period wave height.

Keywords: long-period waves; numerical model; bichromatic wave; nonlinear interaction; incident wave height; tunability

在港口的建设中, 常修建防波堤对港域进行掩护。防波堤的建设可有效减小短波波高, 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。由于其特性与短波差异较大, 长波引起港口作业条件恶化前的现象没有短波直观。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较为接近时, 港内水域发生强迫振动, 港域波高幅值将剧烈上升, 其振幅可达入射波浪振幅的数倍, 从而发生港口共振^[1], 危害港域泊稳条件。

20 世纪 50 年代开普敦的桌湾港 (Table Bay Harbour) 出现假长周期振荡, 港内船舶发生破坏性事故, 1979 年 3 月 21 日 Hibiya 等^[2]在日本长崎

收稿日期: 2023-02-25

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。

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^[3-4]根据潮位记录数据、物理模型试验和水动力理论方程, 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。McComb 等^[5]结合多种数值模拟方法, 利用杰拉尔顿港(Geraldton Port)研究了长波和短波的侵入机制和缓解方法。Wang 等^[6]基于线性浅水近似, 通过匹配渐进法得到垂直入射波诱发的矩形港池纵向振荡解析的解, 分析了指数形式水深的矩形港池振荡的一般特征。史力生和潘军宁^[7]基于滨海核电站取水口工程的波浪整体模型试验, 分析取水明渠内长周期波动产生的条件及影响因素。很多学者针对长周期波浪开展了研究, 但很多尚停留在实测数据的观察与分析上, 以判断是否发生港口共振现象。另外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, 避免港口共振现象的发生。本文基于某实际港域对长周期波浪的产生机制开展研究。

1 模型验证

1.1 模型简介

MIKE21-BW 波浪数值模拟模型由丹麦水利研究所开发, 该模型基于 Madsen 等^[8-9]提出的改进频散关系和变浅性能的 Boussinesq 方程, 采用交替方向隐格式(ADI)进行时域内的求解。经过长期发展, BW 模型可以较好地描述近岸水域波浪传播过程中发生的折射、绕射、反射和非线性波-波相互作用。

1.2 模型验证

基于物理模型试验验证数值模型的合理性。物理模型布置见图 1, 测点布置见图 2, 波浪要素见表 1。其中, 物理模型试验在 40 m×60 m×1.5 m(宽×长×深)的波浪水池中进行。港池由南北两条取水堤环抱而成, 口门朝向北-北东, 港池采用斜坡式防波堤和护岸, 护面块体为扭王字块, 其按照菱形定点随机摆放, 试验中护面块除保持几何相似

外, 还保持质量相似。试验对港池进行精确模拟, 港池底高程设置为-9 m, 港域外部高程为-11 m。港池四周装有消除二次反射波浪的设施, 波浪采用 DJ 800 采集, 试验比尺为 1:80, SE 和 SSE 方向模型布置见图 1。

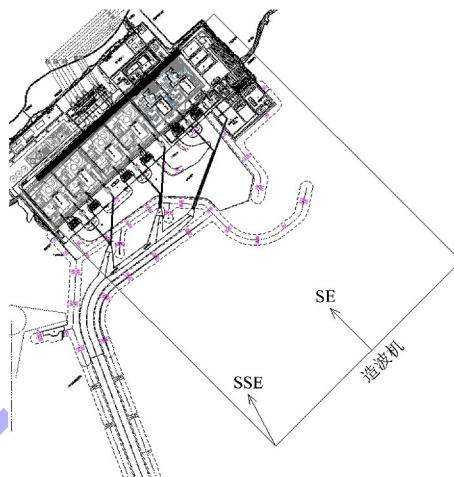


图 1 模型布置

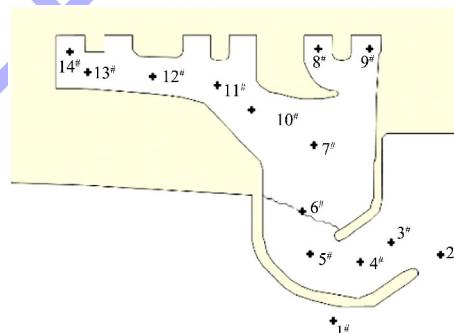


图 2 测点布置

表 1 试验波要素

潮位/m	H_s/m	T/s	方向	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

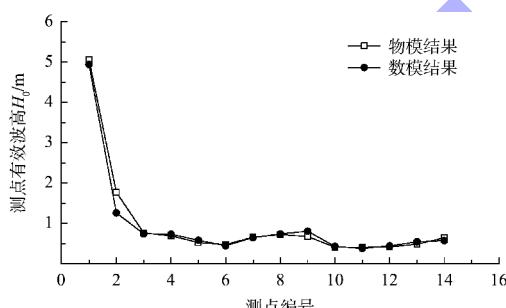
数值模型完全按照物理模型布置, 将物理模型试验的平面布置以及试验水池按照 1:80 进行同比放大, 得到港域地形数值模型图。波浪数学模型的计算范围是 1 600 m×5 000 m, 地形设置与物理模型完全相同, 模型的空间步长采用 10 m。为消除二次反射影响, 模型四周外侧设置海绵层。采用 MIKE21 自带的内部造波源进行波浪的输入,

造波线设置在模型边界的海绵层端部。采用表 1 物理模型试验的波要素输入到造波线, 波浪的时间步长、模拟时间与物理模型试验一致。港域所有防波堤均为斜坡式结构, 其反射系数设置为 0.25~0.40, 模拟防波堤扭王字块体的反射作用。港域内侧取水口为直立式结构, 其反射系数取 0.90。

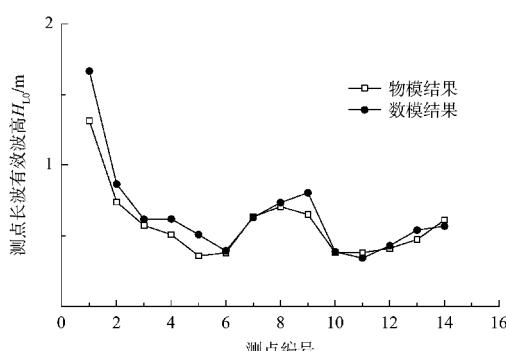
分别对 MIKE21-BW 模型港池内长周期波浪的周期和波高进行验证。在波高验证中, 分离测点波浪时间序列, 并对测点波高和分离出的长波波高进行验证; 在周期验证中, 对长波序列的周期(波浪周期大于 30 s)进行验证。

1.2.1 波浪波高验证

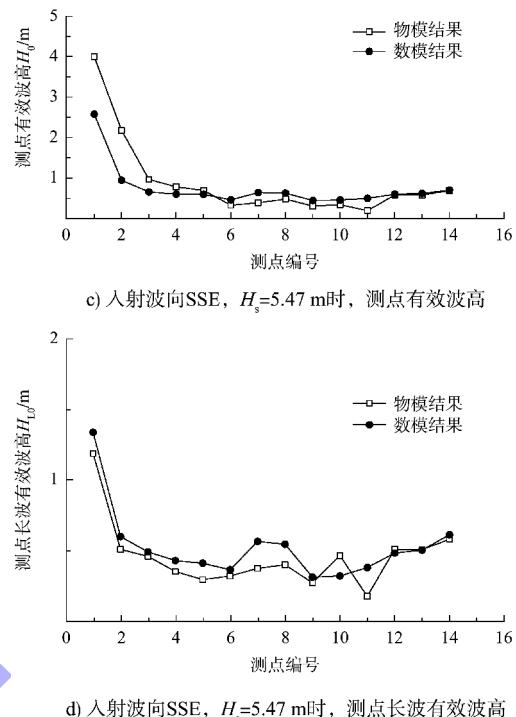
利用傅立叶变换分离长周期波浪序列, 将长周期波浪的有效波高与物理模型试验中长周期波浪的有效波高进行对比, 得到港内测点数值模型与物理模型波高对比, 见图 3。可知数值模拟结果与物理模型试验中测点总波高、长周期波高变化趋势及规律均较为一致, 结果吻合度良好。



a) 入射波向 SE, $H_s=5.15$ m 时, 测点有效波高



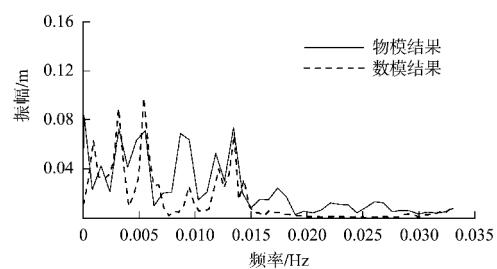
b) 入射波向 SE, $H_s=5.15$ m 时, 测点长波有效波高



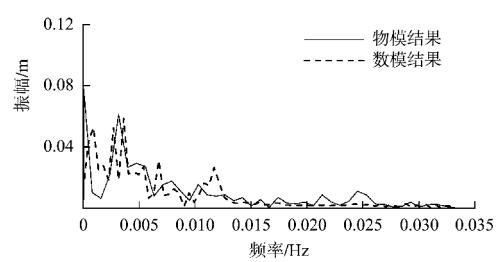
c) 入射波向 SSE, $H_s=5.47$ m 时, 测点有效波高
d) 入射波向 SSE, $H_s=5.47$ m 时, 测点长波有效波高

1.2.2 波浪周期验证

利用傅立叶变换进行滤波处理, 分离出各测点大于 30 s 的长周期波浪, 统计长周期波浪的振幅频率。选取 8#、9#、13#典型测点得到幅频对比, 见图 4。由图可知, 港内测点长波浪周期的数值模拟结果和物理模型试验结果趋于一致, 吻合度较高, 即本数值模型可较好地模拟港内长周期波浪传播情况。



a) 8# 入射波向 SE, $H_s=5.15$ m



b) 13# 入射波向 SE, $H_s=5.15$ m

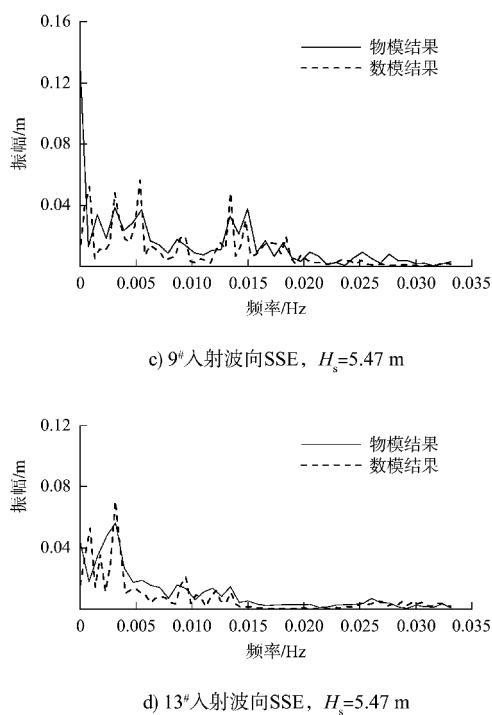


图 4 数模和物模长周期波的幅频对比

2 港池的长波振荡产生机制

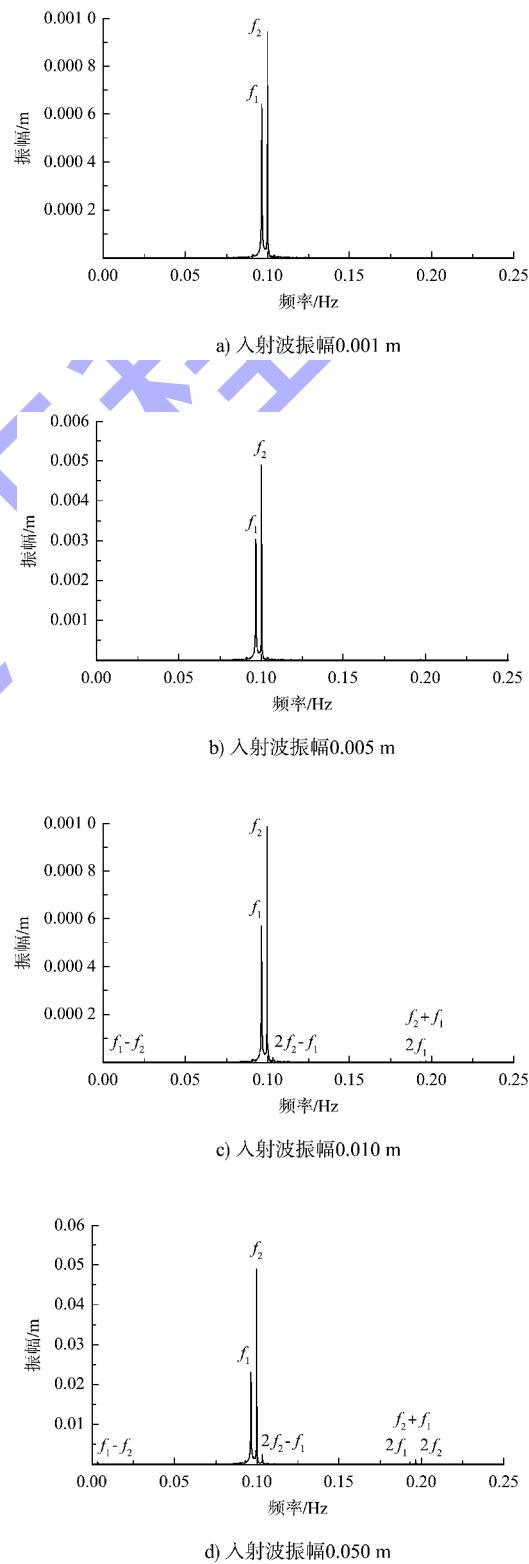
2.1 双色波振幅对长周期波浪的影响

在该模型的基础上，开展长周期波浪振荡的产生机制研究。根据刘远超等^[10]的研究成果，港域内发生了 300 s 左右的长周期振荡，因此采用频率为 f_1 和 f_2 的双色波作为入射波要素，其中 $f_1 = 0.09653\text{ Hz}$, $f_2 = 0.10000\text{ Hz}$, $\Delta f = 0.00347\text{ Hz}$, 对应周期为 288 s，从而研究该振荡模态下的长波产生机制。

入射波浪的振幅共设置 6 组工况，每组工况 f_1 和 f_2 的振幅均相同，6 组振幅工况取值区间为 0.001~0.500 m，计算时间步长取 0.1 s，每个测点的波面过程取 9 万个数据点。

不同振幅的双色波作用下，港外测点 1# 的波幅见图 5。在不同的波浪振幅下，港外测点的波浪振幅存在差异。其中入射波浪振幅 $a_1 = a_2 = 0.001\text{ m}$ 时和 $a_1 = a_2 = 0.005\text{ m}$ 时，测点的波浪振幅图中只存在 $f_1 = 0.09653\text{ Hz}$ 和 $f_2 = 0.10000\text{ Hz}$ 两个频率的能量成分。随着波浪振幅的继续增加，除了 f_1 和 f_2 以外，港外测点的波浪振幅图相继出现了

$\Delta f = f_2 - f_1$ 、 $2f_2 - f_1$ 、 $2f_1$ 、 $f_1 + f_2$ 等其他频率成分，并且波浪振幅越大，其余频率成分的波浪振幅也越明显。当振幅为 0.5 m 时，可以看到 f_1 、 $2f_1 - f_2$ 、 $2f_2 - f_1$ 、 $2f_1$ 、 $f_1 + f_2$ 、 $2f_2$ 的能量成分非常明显，并且出现了振幅很弱的 $3f_2 - f_1$ 、 $3f_2 - 2f_1$ 、 $3f_1 - 2f_2$ 等频率成分。



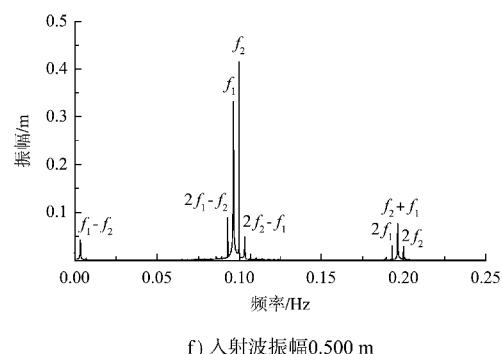
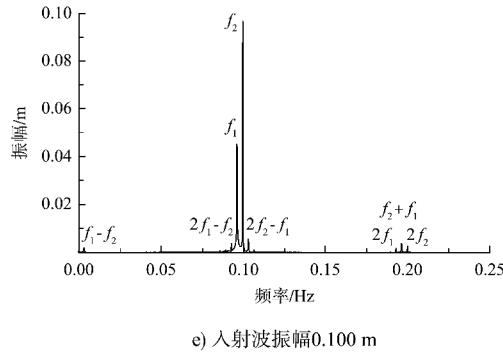


图 5 不同振幅下港外测点的振幅

其中, 差频成分 $\Delta f = 0.00347 \text{ Hz}$ 为长周期波浪, 其对应的波浪周期为 288 s。随着入射波浪振幅逐渐增加, 差频成分对应的能量也逐渐增加。由于入射波浪仅为双色波, 从其余频率波浪成分的出现可以推断, 波浪之间发生非线性作用使得能量发生了转移, 所以测点对应 f_1 和 f_2 成分的波浪幅值低于入射波浪。并且波浪之间的非线性作用与入射波浪振幅有关, 入射波浪振幅较小, 非线性作用很弱, 随着波浪振幅增加, 波浪间非线性作用显著增强, 产生了差频成分、和谐成分等其他的频率成分, 各成分之间的能量传递也显著增强, 并且波浪振幅较大时, 波浪间能量传递过程也愈加复杂和剧烈。

对港内外测点的波幅进行对比, 进一步分析港内长周期波浪振荡的情况。取港内测点 8[#]、14[#]与港外测点 1[#]进行傅里叶变换分析, 结果见图 6、7, 可知虽然港外测点存在 Δf 、 $2f_1-f_2$ 、 $2f_2-f_1$ 、 $2f_1$ 、 f_1+f_2 、 $2f_2$ 等波浪成分, 然而港内测点除了部分 f_1 和 f_2 成分波浪绕射进入港内外, 只有 Δf 成分的波浪, 其余成分波浪在港内各测点均未发现。

由图 6b) 和 7b) 长周期波浪成分 Δf 的波幅对比, 可以明显看到港内 $\Delta f=0.00347 \text{ Hz}$ 的低频波浪被明显放大, 港内测点的 0.00347 Hz 的低频波浪振幅是港外测点的 2~3 倍, 其来源一方面可能是波浪的进一步非线性作用, f_1 和 f_2 的高频波浪能量逐渐转移到 Δf 的低频波, 导致其振幅增大; 另外一方面可能是频率为 Δf 的低频波进入港内, 港口共振导致长周期波浪振荡, 振幅被放大, 波浪波高急剧增加, 从而恶化港内作业条件。

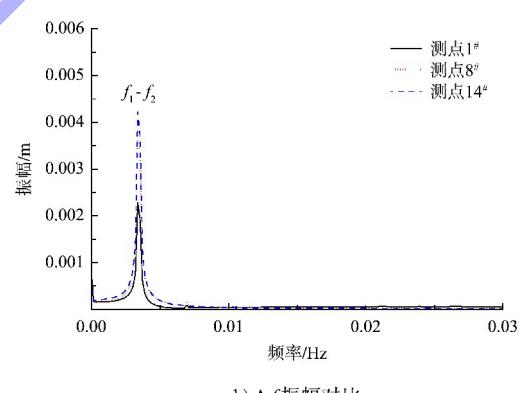
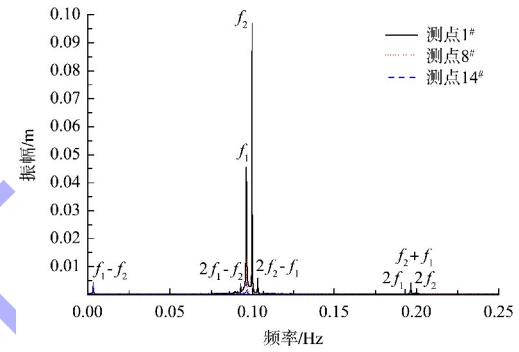
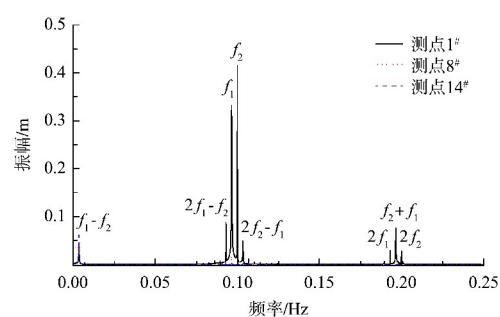


图 6 振幅 0.100 m 下港内外测点波幅对比



a) 低频振幅对比

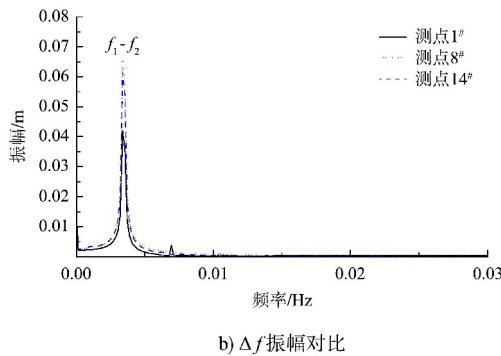


图 7 振幅 0.500 m 下港内外测点振幅对比

2.2 长波波高随入射波陡的变化规律

提取测点 1# 的数据进行傅里叶变换, 以长周期波浪比波高 H_L/H_0 为纵轴 (H_L 为测点长波波高, H_0 为入射波高), 入射波陡 H_0/L 为横轴, 研究波浪的差频作用随入射波高的变化规律, 见图 8。

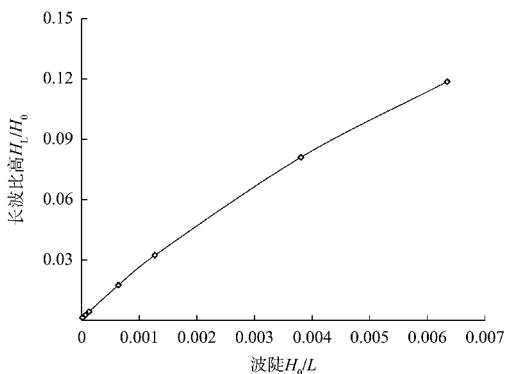


图 8 港域长波随双色波入射波高的变化规律

随着双色波入射波陡 H_0/L 的逐渐增加, 港域长周期波浪波高在入射波群波高中所占的比重 H_L/H_0 也逐渐增加, 即波浪的非线性作用愈加明显, 差频作用产生的长周期波浪波高也越大。

而对港内的波浪情况, 取图 7 中港内测点 14# 的长周期波和短周期波分别分析, 可以发现在振幅为 0.500 m 的双色波作用下, 港内测点 14# 的波序列中 f_1 和 f_2 对应的振幅分别为 0.023 和 0.021 m, 而 Δf 的振幅达到了 0.062 m, 由于此时港内发生长周期振荡, 港内测点的长波波高被放大, 而短波波高由于绕射能力弱, 波高已大大减小。

因此, 港内长周期波浪发生的原因在于入射双色波发生非线性作用, 波浪产生了差频成分, 并进一步传播至港内, 当产生的低频波浪与港口自振频

率趋于一致时, 港内长周期波浪波高被共振放大。并且长波波高与入射波浪的波高呈正相关, 波浪波高越大, 波浪间非线性作用越剧烈, 传播至港内的长波波高越大, 长周期振荡波高也越大。

2.3 双色波调谐率对长波波高的影响

为研究双色波中两个波浪的调谐率对港域长周期波浪波高的影响, 计算过程中, 保持一个单频波的波浪振幅 $a_1=0.500$ m 不变, 变化另一个单频波的振幅, 其变化幅度取值为 0.010~0.500 m。

如图 9 所示, 长波相对波高 H_L/H_0 随双色波调谐率 a_2/a_1 的变化而变化, 调谐率逐渐增大, 各测点的长波相对波高也逐渐增加。双色波的振幅相等时, 波浪间的非线性作用最显著; 振幅差异越大, 其非线性作用愈不明显。

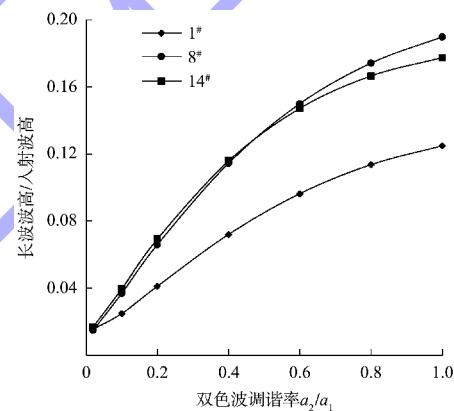


图 9 长波相对波高随调谐率的变化规律

3 结论

1) 基于 MIKE21-BW 模型计算港域长周期波浪的扰动和分布情况, 并与整体物理模型试验结果进行对比分析, 两者吻合良好, 验证了 BW 模型计算港内波浪的合理性。

2) 频率为 f_1 和 f_2 双色波作用下, 波浪间发生非线性作用产生 Δf 、 $2f_1-f_2$ 、 $2f_2-f_1$ 、 $2f_1+f_2$ 、 $2f_2$ 等频率的波浪, 当产生的长周期波浪 Δf 与港口自振频率趋于一致时, 长周期波浪波高被港池捕捉发生共振而放大。

3) 长周期波浪与双色波的振幅、入射波高、调谐率成正相关。随着波浪振幅、入射波高、调谐率的增加, 波浪之间的非线性作用增强, 长周期波高显著增大。

(下转第 54 页)