

· 综 合 ·



水流中由双色波群 在潜堤上激发的低频长波研究

于 博¹，任效忠²，朱 浩¹

(1. 大连中交理工交通技术研究院有限公司，辽宁 大连 116000；2. 大连九成市政设计有限公司，辽宁 大连 116000)

摘要：双色波群经过试验水槽内的曲线潜堤生成低频波浪，比较纯波作用和逆流作用时波群生成低频波浪的特性差异。造波系统采用二阶造波理论，二阶伪自由长波得到有效抑制。试验重点观察了谐波的生成、短波的阻隔、特别观测了长波在波浪阻隔点处的穿透问题。详细阐述了低频波浪在阻隔点前后的衍生过程。

关键词：波群；波流相互作用；低频波浪；破波拍

中图分类号：TV 139.2 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)12-0001-09

Long wave generation by bichromatic wave groups with current on submerged sill

YU Bo¹, REN Xiao-zhong², ZHU Hao¹

(1. CCCC & Dut Institute of Communications Technology Co., Ltd., Dalian 116000, China;
2. Dalian Jiucheng Municipal Design Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: Low-frequency waves generated by a submerged curvilinear sill due to bichromatic wave groups with and without an opposing current are studied experimentally in a laboratory flume. Second-order wave maker theory is used in the generation of the primary waves and the spurious long waves are significantly suppressed. The generation of harmonics, wave blocking of the short waves and especially the penetration of long waves through the “blocking point” are observed. The evolution of long waves before and after the blocking point is described in detail.

Keywords: wave group; wave-current interaction; low-frequency wave; surf beat

破碎带外的破波拍最初是由 Munk^[1] 和 Tucker^[2] 观测到并命名的。这种现象是由周期为 30 ~ 300 s 的受迫波浪产生的，这些波浪也被称为次重力波。观测到的长波被视为是破碎带内入射的主波群的节拍现象。Longuet-Higgins^[3] 和 Stewart^[4] 把这些自由长波视为波群在破碎带内破碎释放出约束长波与其岸线反射的产物。这一理论被 Masselink^[5] 的现场观测结果和 Ruesink^[6] 的试验结果所验证。Baldock^[7] 认为只有与波陡较小的主波群一同传播的约束长波才能够被释放自由传播。另一个可接受的自由长波的生成机制是短波群破碎点移动产生的辐射应力的变化。这一生成机制已经被 Masselink^[5]

的场地斜坡试验所验证，也同时被 Madsen^[8] 的数学模型结果所验证。基于一系列的陡坡和缓坡试验，董国海等研究结果表明，两种低频波浪的生成机制与 Battjes 等^[9] 提出的正规化坡度参数具有很强的相关性。

波和流是海洋水动力研究中两种非常重要的因素，波流相互作用现象非常频繁。因此基于流体的波浪研究对于海岸和近岸水体研究都是非常重要的。波浪与沿波浪传播方向逐渐增大的逆流相互作用，终有一点流速与波浪的能量传递速度相抵消，此处相对于固定坐标的能量传递消失了。这就成为波浪阻隔，这个点被称为波浪阻隔点。

收稿日期：2015-01-07
作者简介：于博（1981—），男，博士，工程师，从事低频波浪生成机制研究和港口工程设计。

在阻隔点附近, 波浪的波长和波幅发生了剧烈的改变, 伴随着阻隔产生的耗散和波浪的破碎, 波浪的波长迅速变小, 波峰变得尖陡。波浪的阻隔和破碎对波浪的波幅变化和波浪能量谱的变化^[10-12]有很大的影响。

海洋中大部分的流体运动为均匀流^[11], 包括潮汐和海洋环流。关于波群和均匀流相互作用的试验研究和数值模拟研究已经持续了几十年。Smith^[13]首先得到一个规则波与渐变均匀流相向传播的渐近解, Smith^[13]通过多尺度分析和渐进拓展得出: 在阻隔发生时, 主要发生反射而不是破碎。Peregrine^[14]通过均匀流理论和傅里叶变换也得到了一个类似的解。Shyu 等^[15]通过流体研究阻隔和斜向传播的波浪反射。Chen 等^[16]基于高阶 b 方程研究了均匀斜坡上强逆流作用下的波浪变形, Chen 等^[17]基于椭圆余弦方程使用有限元模型模拟了港口口门处的波流相互作用现象。

目前波流相互作用的试验研究领域主要在以下几个方面有进展: Lai 等^[18]重点研究了单色波群与逆流和顺流的相互作用, 试验重点观测了波浪在逆流作用下的阻隔和破碎现象, 同时也发现多普勒频移色散关系在波浪破碎和不破碎的情况下都是正确的; 近期, Chawla 等^[19]使用对比分体水槽, 对比渐变水深和常水深, 通过标记波陡较大的波幅变化从而预测阻隔点和波浪的能量耗散。

波流相互作用生成低频波浪的试验研究非常少。董国海等^[20]对在顺流和逆流作用下双色波群生成的约束长波进行了初步的试验研究, 重点关注波流共存条件下低频波浪的变化。

本文研究了在曲线潜堤地形下受渐强逆流作用的双色波群生成的低频波浪。

1 试验介绍

1.1 波浪水槽和测量仪器

试验水槽长 50 m、宽 3 m、最大水深 0.7 m。水槽一端布置液压活塞式造波机, 另一端布置被动消浪装置。x 轴原点为造波板振幅中心位置, x 轴正向与波浪传播方向相同。z 轴正向为静水面向上。试验地形见图 1, 地形为砂质土堆积而成,

表面使用水泥覆盖。潜堤顶端距静水面 0.5 m。

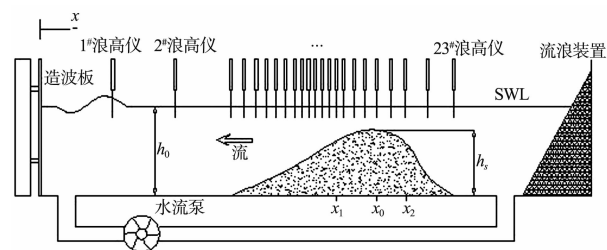


图 1 试验水槽和试验仪器布置

地形曲线使用指数函数和椭圆曲线定义, 定义方程为:

$$z+h=\begin{cases} h_s \cos \theta_1 \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2}{b_1^2 \cos^2 \theta_1} + \frac{1}{2} \tan^2 \theta_1 \right] & x \leq x_1 \\ h_s \sqrt{1-(x-x_0)^2/b_1^2} & x_1 < x < x_0 \\ h_s \sqrt{1-(x-x_0)^2/b_2^2} & x_0 \leq x < x_2 \\ h_s \cos \theta_2 \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x-x_0)^2}{b_2^2 \cos^2 \theta_2} + \frac{1}{2} \tan^2 \theta_2 \right] & x \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 是静水深; b_1 、 b_2 、 h_s 、 x_0 是定义坡面的参数; $x_i (i=0,1,2)$ 是 4 段曲线的分界点 (图 1); θ_1 和 θ_2 定义方程 $\theta_i = -\arctan [b_i z_x(x_i)/h_s] (i=1,2)$; 为了得到非对称曲面, 定义 $b_1 = 4.0$ m, $b_2 = 2.5$ m。剖面最高点在 $x_0 = 20.2$ m, 最高点处的静水深 h_s 为 0.4 m, 坡度 z_x 最大的两点为 $x = x_1$ 和 x_2 , 坡度分别为 0.125 和 0.2。

试验沿水槽中心线 (图 1 中 SWL) 设置 23 个电容式浪高仪来测量波高, 第 1 个浪高仪布置在 $x=5$ m, 此浪高仪采集数据作为造波初始波高。第 3 ($x=13$ m)、第 19 ($x=20.2$ m) 和第 23 个 ($x=25.8$ m) 浪高仪分别测量坡面的初始点、高峰点和结束点。由于波浪阻隔和波浪破碎最易发生于剖面顶端, 故此处浪高仪加密布置, 布置间距为 0.25 m。

1.2 波浪参数

在现有的波浪试验设计里, 总计进行了 44 组双色波波浪试验, 每组双色波由 2 组正弦信号叠加, 表达式如下:

$$\eta = a_1 \cos(k_1 x - 2\pi f_1 t) + a_2 \cos(k_2 x - 2\pi f_2 t) \quad (2)$$

式中: η 是波群波高; a_i 、 f_i 、 $k_i (i=1,2)$ 是组成波

的波幅、频率、波数。所生成的双色波群特征值主要有：群频率 $f_g = f_1 - f_2$ ，主频率 $f_m = (f_1 + f_2)/2$ 和调制比例 $\delta = a_1/a_2$ 。本试验主要进行了 4 种工况的研究，频率和波幅的参数见表 1。由表 1 可见，本文采用的强调制双色波群($a_2/a_1 = 0.8$)群频率均为 0.1 Hz，而对于主频率，BS1、BS2 要远远大于 BS3、BS4。

表 1 双色波群参数					
工况	a_1/m	a_2/m	f_1/Hz	f_2/Hz	a_2/a_1
BS1	0.030	0.024	1.05	0.95	0.8
BS2	0.045	0.009	1.05	0.95	0.2
BS3	0.025	0.020	0.65	0.55	0.8
BS4	0.037 5	0.007 5	0.65	0.55	0.2

1.3 流

本试验采用多普勒声学流速计 (ADV) 测量流速，采样频率 25 Hz。ADV 流速计不仅可以测量三维流速，也可以测量传感器距离池底的距离，进而可以测量流速剖面。忽略流体垂向速度的情况下，流向和展向的流速剖面均可测量。图 2 为 $x = 5\text{ m}$ 且水深 0.3 m 在水槽宽度方向上各点的平均流速剖面曲线，可见各个 y 值为展向位置变化。由于池底和池壁都存在摩擦，所以流速在垂向和展向都只存在非常微弱的切变。因此，垂向上流速的变化忽略不计。基于均匀流假设，平均流速表达式定义为：

$$U_0 = -Q/(bh) \tag{3}$$

式中： Q 为体积流量； h 是水深； b 是水池宽度； Q 由水池流速泵限定。由图 3 可见，测量值与理论值具有很好的一致性。

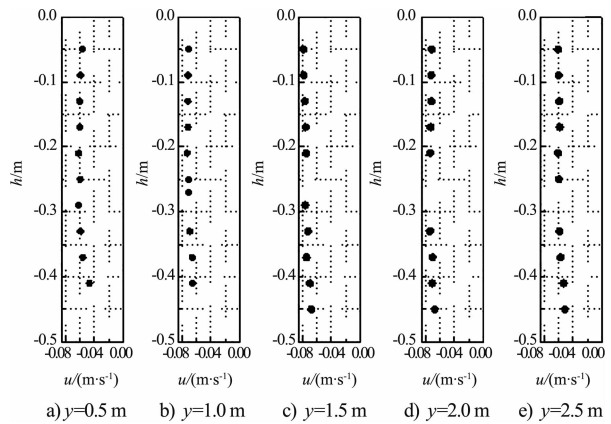


图 2 $x = 5\text{ m}$ 处水槽宽度方向上(水流展向)各深度平均流速

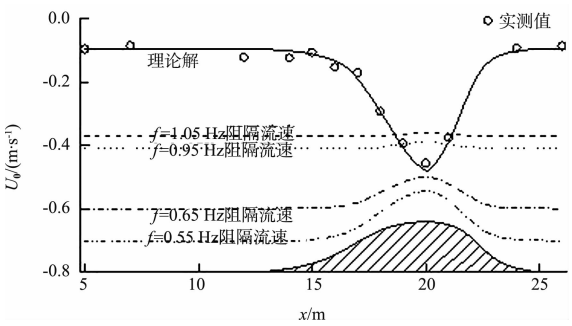


图 3 水槽各处平均流速理论值、实测值与各频率波浪在水槽各处的阻隔流速

流速为 U 的均匀流对于单向传播的波浪的主要影响是基于多普勒频移的波浪频率改变。因此波浪角频率与流速的相关参数为 σ 和波数 k ，相关表达式为

$$\omega = \sigma + kU = \sqrt{gk \tanh(kh)} \tag{4}$$

式中： h 为静水水深； g 为重力加速度。 U 为正时是顺流、为负时是逆流。对于一个流速足够大的逆流，波浪被阻隔，阻隔发生的流速被定义为阻隔流速 U_b 。从数学角度出发，要求 $k > 0$ ，如果 $U > U_b$ ，那么式(4)存在两个解；如果 $U < U_b$ ，那么式(4)没有实数解；如果 $U = U_b$ ，那么式(4)存在唯一解。相应地，对于在表 1 中列出每个频率在水池中各处的解析解可以通过迭代得出，如图 3 中 $U_0(x)$ 所示。由图 3 可见，当水深变浅，波浪的阻隔流速变小，这种趋势对于频率较低的波浪更为明显。而其中波浪频率为 1.05、0.95 Hz 的曲线与 U_0 相交，这表明工况 BS1、BS2 很有可能在试验地形的前坡发生阻隔现象。

2 试验结果分析

2.1 波群形状和谱的特性分析

在讨论试验结果之前，首先讨论一下波浪在潜堤上的变形。在纯波情况下，来浪方向潜堤上的波浪主要发生非线性变浅作用，主要是波峰变陡、波谷变坦。在这个过程中会生成超谐波和次谐波。当波浪传播至潜堤后坡，波群会释放锁相谐波，随着水深逐渐增大，波群会发生反变浅现象。当逆流与波浪共同作用时，波浪的变形会更为复杂，除了波浪的变形，多普勒频移效应会变得非常重要，在迎浪坡上，波浪可能会在渐强流

的作用下发生破碎或者阻隔。

本文选择试验布置的 23 个浪高仪中的 4 个 ($x=5.0$ 、 17.0 、 18.75 、 20.2 m) 浪高仪采集的信号来描述双色波群在潜堤上的变形。图 4、5 为工况 BS1、BS4 两组试验在纯波和逆流作用下, 在 4 个采集点所得到的波面过程线。工况 BS1 的主频率为 1.0 Hz , 而工况 BS4 的主频率为 1.0 Hz 。两种工况下, $x=5.0\text{ m}$ 处采集的波面过程线很好地体现了双色波群调制信号。随着水深的逐渐减小, 非线性变浅效应逐渐显现, $x=17.5\text{ m}$ 处的波面过程线体现了这一点。对于工况 BS1, 在图 4 中组成波中频率较大的 f_1 已经在 $x=18.5\text{ m}$ 处被阻隔了, 同样的现象也可在图 5 中得到印证。因此, 此处之后的波面过程线更类似于单色波序列。当流体速度在潜堤前坡上逐渐增大之后, 波群短波完全被阻隔, 只有低频波浪穿“流”而过。对于工况 BS4 也发生了类似的现象, 只不过此工况下波浪的变浅变形更显著。

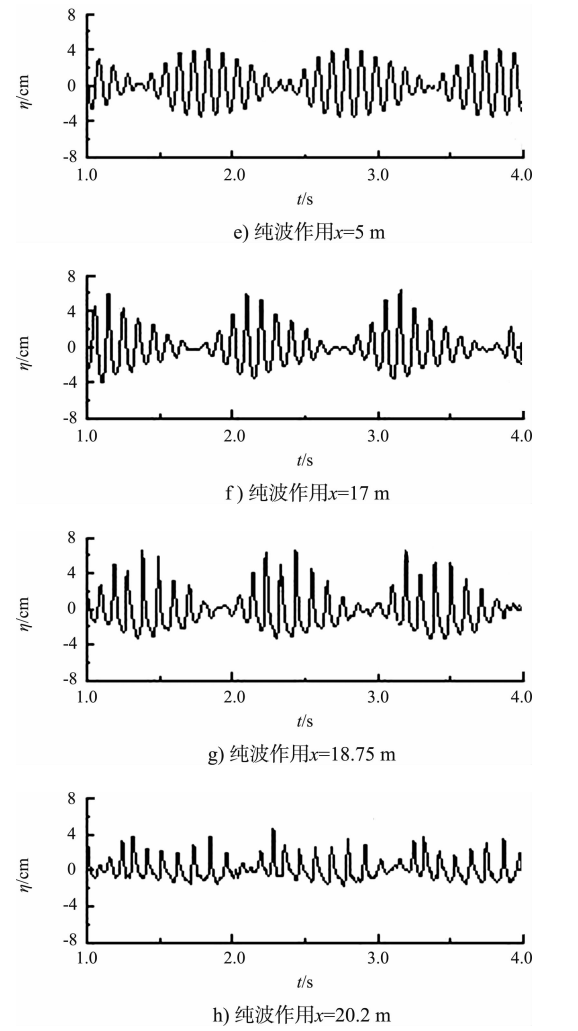
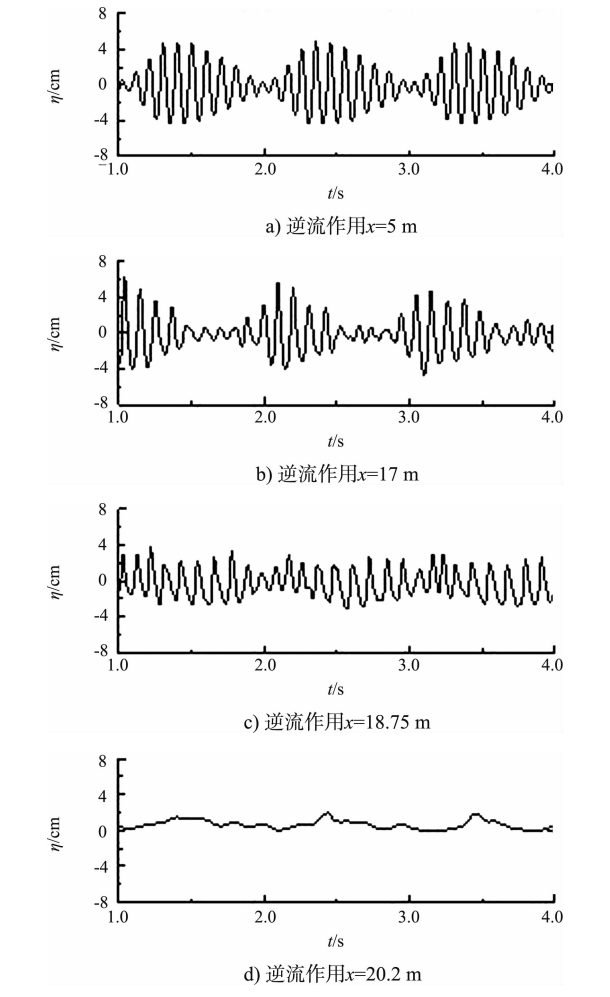
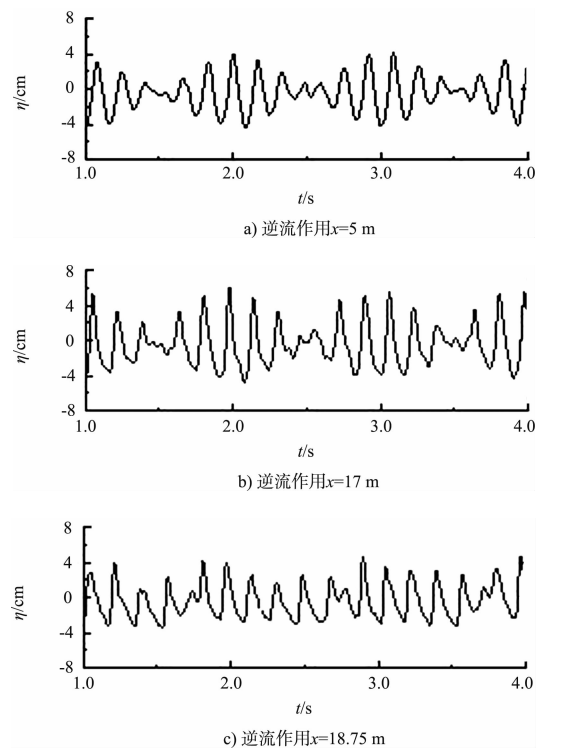


图 4 工况 BS1 的波面历时曲线



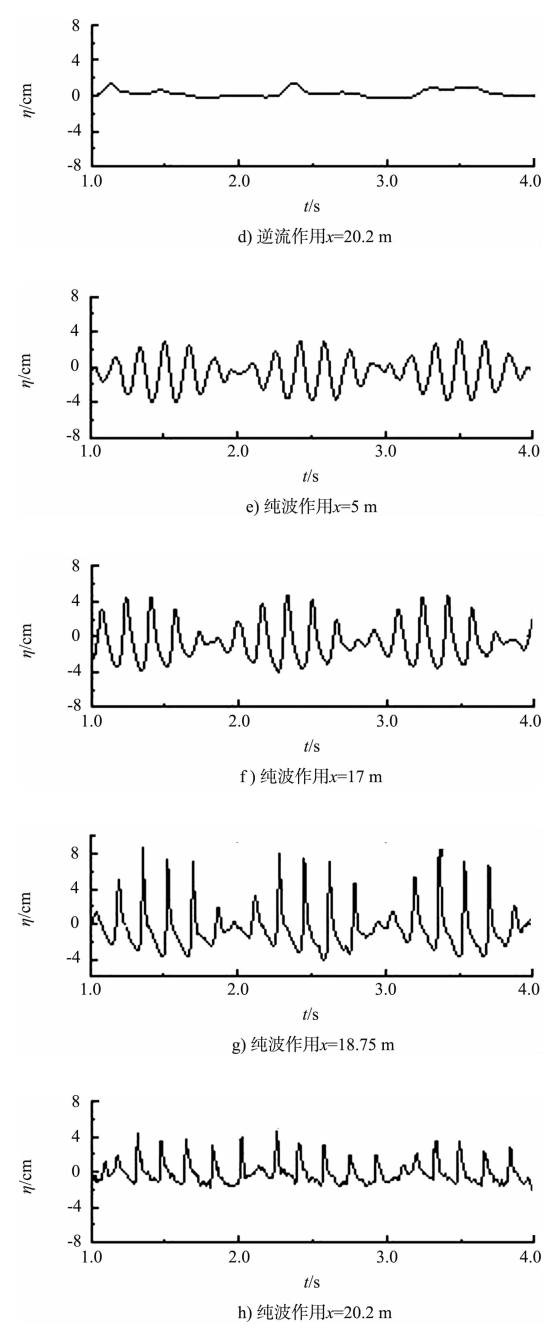
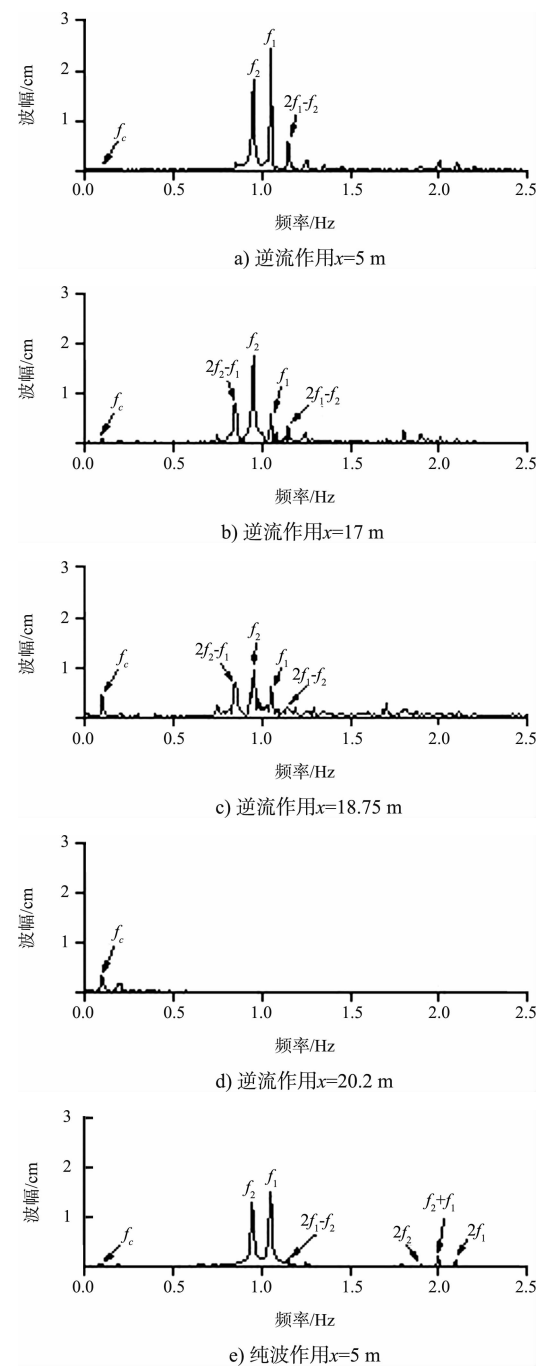


图 5 工况 BS4 的波面历时曲线

当波群传播过潜堤的时候, 强烈的非线性相互作用不仅发生在两种组成波之间, 也发生在波浪和水流之间。不同位置的波浪谱对这种非线性相互作用能够简单明了地作出解释。图 6 和图 7 显示了在逆流作用下 $x = 5、17、18.75、20.2$ m 共 4 点处工况 BS1 和工况 BS4 的波幅谱。在起始参考点 ($x = 5$ m) 处, 波浪序列为典型的双色波群形态。由于逆流的作用, 工况 BS1 下频率较大的频率为 f_1 , 损失了大部分的波能, 此成分的波能从

$x = 17$ m 处迅速衰竭, 以至于没有发生破碎和阻隔, 而两种频率为 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 在 $x = 17$ m 开始生成。由此可见, 当波群传播至潜堤前坡并受渐强流作用, 高频的短波成分更容易被阻隔。工况 BS1 中, $x = 18.75$ m 处主频和超谐波频的波能由于受到逆流的作用明显耗散了, 而此处与波群频率相同的次谐波开始生成并迅速成长。虽然波群组成短波成分发生阻隔, 但波群仍然能够在阻隔发生之后继续保持群频率。频率为 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 的谐波的生成可能是因为边带不稳定^[21]。



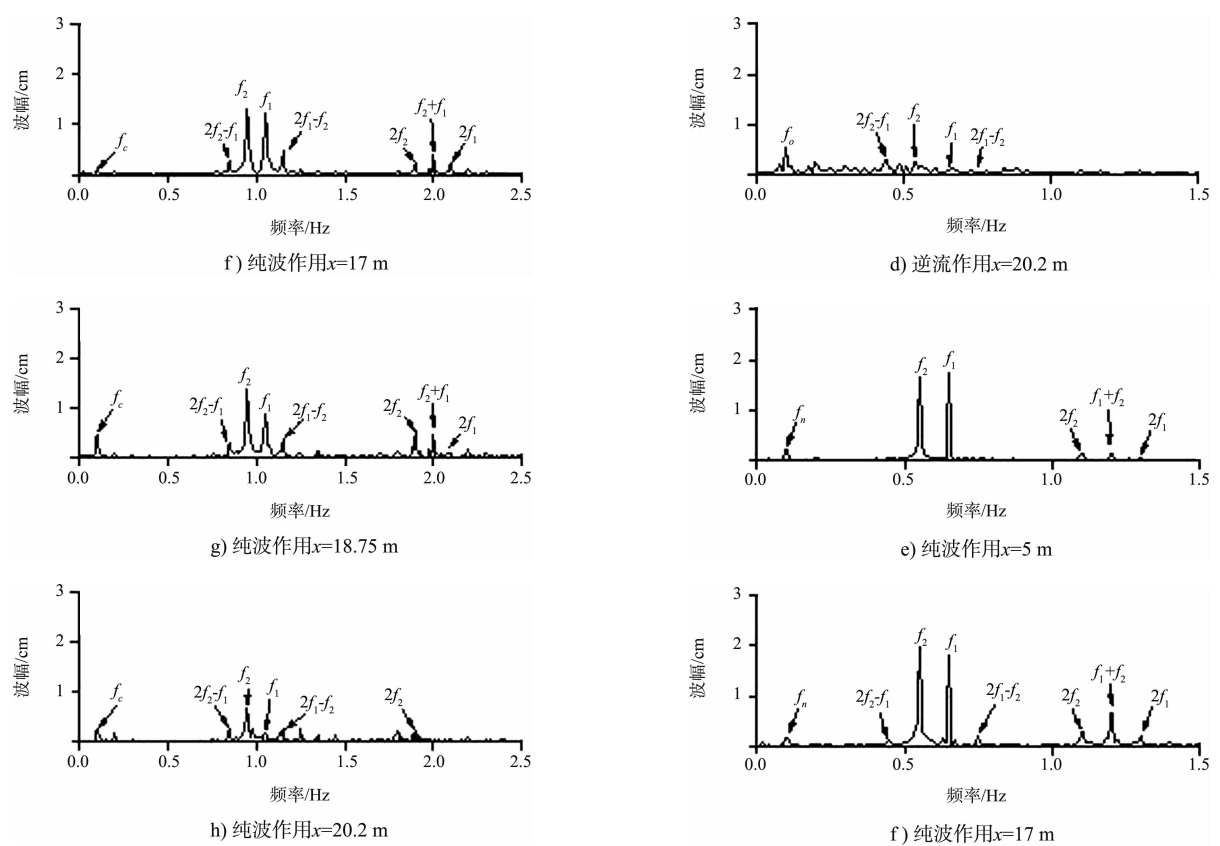


图 6 工况 BS1 波幅谱

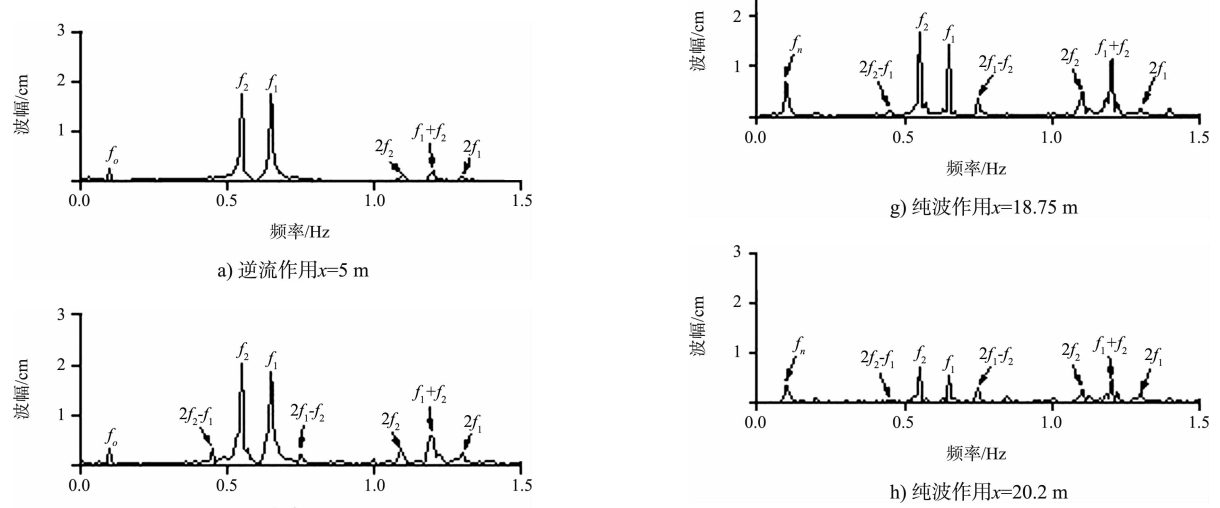
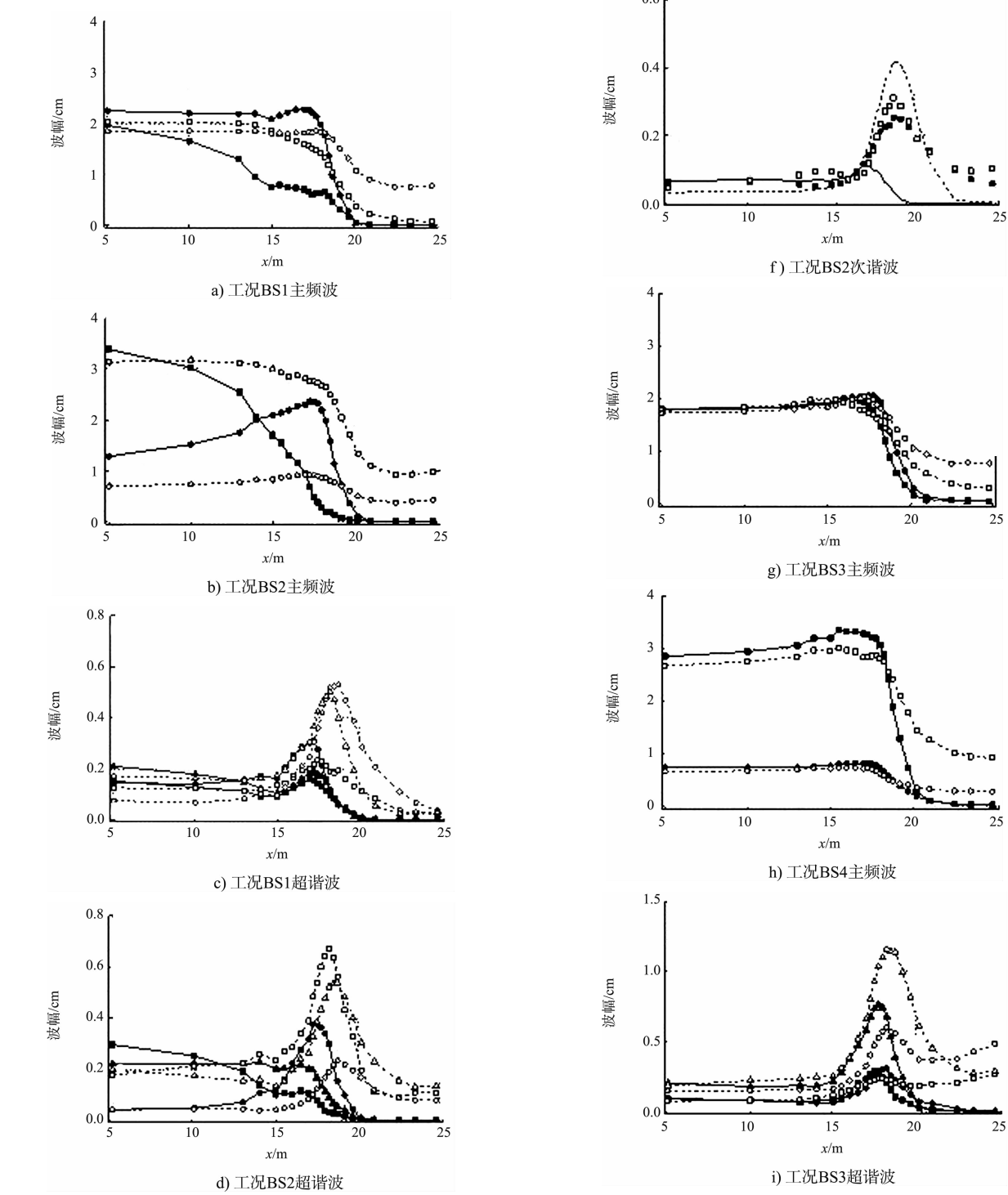


图 7 工况 BS4 波幅谱

2.2 低频波浪和新波态生成

由图 4、5 可见，在水槽中生成了低频能量波动。在地形顶端附近阻隔点发生之前，低频波浪以约束长波的形态与短波群共同存在。当短波群发生阻隔后，低频波浪以自由长波的形态被释放自由传播。

针对全部 4 组工况, 通过谐波分析来展示以波群频率传播的长波的波幅沿水槽的变化(图 8)。图 8 的波幅分析再一次验证波群中频率较大(1.05 Hz)的短波能量更容易发生耗散, 从波群开始传播能量就开始发生明显的耗散。在破碎发生前, 这种能量的耗散必然会向其他频率的波浪成分发生转移。超谐波在主频波发生破碎后能量耗散也非常剧烈。



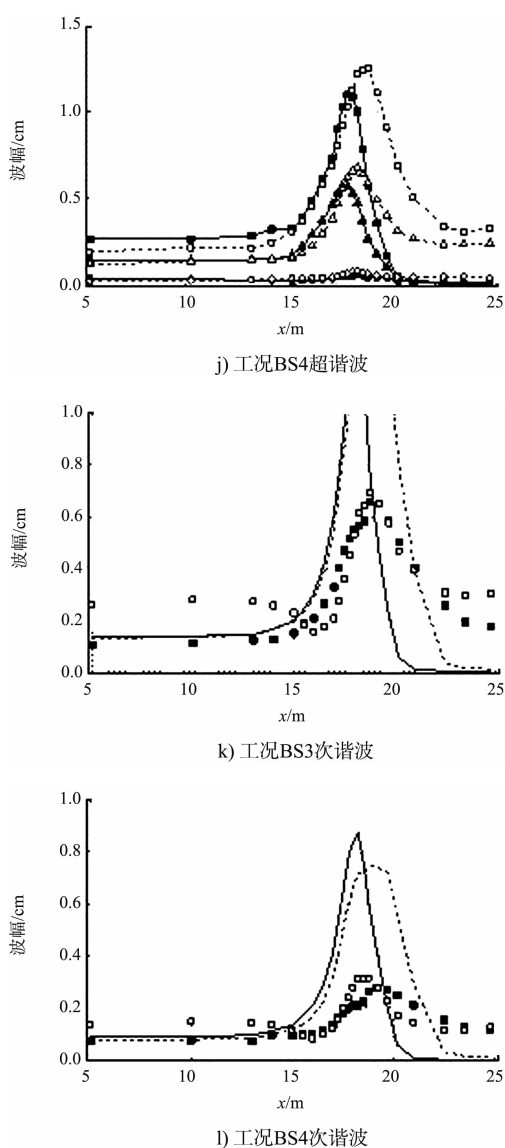


图8 主频波(f_1 、 f_2)、超谐波($2f_1$ 、 $2f_2$ 、 $f_1 + f_2$)和次谐波($2f_1 - f_2$)波幅沿水槽的变化

在所有工况中,地形前坡上低频波浪的能量增长都非常迅速。但是,当主频波破碎后,低频波依然保持增长。因此当主频波发生剧烈破碎的时候,部分能量转移到了次谐波群。当主频波破碎后约束长波被释放。

Longuet-Higgins 等^[3]推出由双色波产生的次谐波的局部解。此局部解和试验值的对比见图8。主频波的波幅由谐波分析得到,波数由多普勒频移色散方程得到,局部解与试验值在弱流作用下一致性较好。在坡后,水深增大反变浅现象发生。

3 结论

本文通过波浪水槽研究了逆流作用下的双色波群的波浪变形问题,重点关注了碎波拍(以群频率传播的低频波浪)的生成。研究发现:波群中高频组成波(1.05 Hz)较为不稳定,它的能量传递到其他频率的波浪成分。生成了频率为 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 的波浪成分。约束长波的能量即使在短波群发生阻隔或者破碎的情况下,能量依然会持续增长,并且在波群短波发生破碎后以自由长波的形式自由传播。

参考文献:

- [1] Munk W H. Surf beats[J]. Transactions American Geophysical Union, 1949, 30(6): 849-859.
- [2] Tucker M J. Surf beats: Sea waves of 1 to 5 minutes period[C]//Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. London: The Royal Society, 1950: 565-573.
- [3] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with applications to surf beats[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 13: 481-504.
- [4] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress in water waves: A physical discussion with applications[J]. Deep-Sea Research, 1964, 11(4): 529-562.
- [5] Gerhard Masselink. Group bound long waves as a source of infragravity energy in the surf zone[J]. Continental Shelf Research, 1995, 15(13): 1 525-1 547.
- [6] Ruessink B G, Kleinham M G, Beukel PGL den. Observations of swash under highly dissipative conditions[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(2): 3 111-3 118.
- [7] Baldock T E. Long wave generation by the shoaling and breaking of transient wave groups on a beach [C]//Proceedings of Mathematical Physical and Engineering Sciences, 462 (2070). London: The Royal Society, 2006: 1 853-1 876.
- [8] Madsen P A, Sørensen O R, Schäffer H A. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part ii: Surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(4): 255-287.

[9] Battjes J A, Bakkenes H J, Janssen T T, et al. Shoaling of subharmonic gravity waves [J]. Journal Geophysical Research, 2004, 109(2) : 1-15.

[10] Nwogu. Effect of steady currents on directional wave spectra [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. USA: ASME, 1993: 25-32.

[11] Yao A, Wu C H. Energy dissipation of unsteady wave breaking on currents[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(10) : 2 288-2 304.

[12] Soares C G, Pablo de H. Experimental study of the transformation of wave spectra by a uniform current [J]. Ocean Research, 2006, 33(4) : 293-310.

[13] Smith R. Reflection of short gravity waves on a non-uniform current[J]. Math Proc Camb Philos Soc, 1975, 78(3) : 517-525.

[14] Peregrine D H. Interaction of water waves and currents[J]. Advance in Applied Mechanics, 1976, 16: 9-117.

[15] Shyu J H, Tung C C. Reflection of oblique waves by currents: Analytical solutions and their application to numerical computations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 396: 143-182.

[16] Chen Q, Madsen P A, Schäffer H A, et al. Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach[J]. Coastal Engineering, 1998, 33(1) : 11-39.

[17] Chen W, Panchang V, Demirbilek, Z. On the modeling of wave-current interaction using the elliptic mild-slope wave equation[J]. Ocean Engineering , 2005, 32(17-18) : 2 135-2 164.

[18] Lai R J, Long S R, Huang N E. Laboratory studies of wave-current interaction: Kinematics of the strong interaction [J]. Journal of Geophysical Research , 1989, 94(11) : 16 201-16 214.

[19] Chawla A, Kirby J T. Monochromatic and random wave breaking at blocking points [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2002, 107(7) : 3 067.

[20] Dong G, Ma X, Perlin M, et al. Experimental study of the transformation of bound long waves over a mild slope with ambient currents [J]. Coastal Engineering, 2009, 56: 1 035-1 042.

[21] Benjamin T B, Feir J E. The disintegration of wave trains on deep water: Part 1. Theory [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 27: 417-430.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程竣工

近日，中交集团公司多家单位参与设计建设的长江南京以下 12.5m 深水航道一期工程顺利通过竣工验收。

工程的竣工标志着长江干线太仓—南通段 12.5 m 深水航道进入正式运行，“十二五”全国内河水运投资规模最大、技术最复杂的国家重点工程圆满收官。竣工后的航道水深可满足 5 万吨级集装箱船舶全潮及 10 万吨级以上游轮减载乘潮通航的要求，航道通过能力增加 50% 以上，直接拉动沿江地区国民生产总值 238 亿元。

(来源：三航局、水规院)