

· 综合 ·



# 分段式造波机生成斜向波浪特性的理论研究\*

周政, 柳淑学, 李金宣

(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:** 分段式造波机是实验室模拟真实海浪以及研究波浪特性的重要设备。单元造波板的相对宽度和波浪周期是影响分段式造波机生成波质量的重要因素。通过数值模型研究分段式造波机生成斜向波浪的理论特性, 分析了波浪周期与相对造波板宽度对波浪传播的影响, 总结分段式造波机的有效区域范围的变化规律, 可为实际试验提供参考。

**关键词:** 分段式造波机; 理论特性; 有效区域

中图分类号: O 353.5; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0001-08

## Theoretical study on properties of oblique waves generated by segment wavemakers

ZHOU Zheng, LIU Shu-xue, LI Jin-xuan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The segment wavemaker is an important laboratory equipment in the study of properties of wave and the stimulation of real sea wave. Relative width of wavemaker and wave period are significant factors which influence the quality of waves generated by segment wavemakers. The theoretical properties of oblique wave generated by segment wavemakers are studied through numerical model. The influence of wave period and relative width of wavemaker on wave propagation is analyzed, and the variation of effective test area of serpent-type wavemakers is concluded. The results may serve as reference for the practical use.

**Keywords:** serpent wavemaker; theoretical property; effective test area

波浪作用是海洋工程建筑物上的主要荷载。真实的海浪具有多向不规则的特性, 在实验室水池中更好地模拟海浪对于研究波浪传播、波浪与结构物作用具有重要的意义。长久以来, 国内外海洋工程工作者致力于在水池中生成与海浪相近的三维短峰波, 以便更加精确地进行模型试验。

20世纪50年代法国 Sogreah 实验室研制出分段式造波机生成了斜向规则波, 推动了实验室造波技术的发展。20世纪70年代英国爱丁堡大学建造了分段式混频造波机, 基于线性叠加原理生成了三维随机波浪。此后挪威流体力学实验室<sup>[1]</sup>建造

了能够生成均匀方向谱波浪的造波机, 其各造波单元的操作彼此独立、运动的相位各不相同。20世纪80年代初日本港湾工程研究所 Takayama<sup>[2-3]</sup>从理论上推导了单块造波板生成波浪的计算公式, 对其产生波浪进行了理论研究, 并通过试验验证了其有效性。并由此利用线性叠加原理, 考虑到相邻造波板间运动的相位差, 建立了分段式造波机生成斜向规则波理论公式, 并对其生成的斜向规则波特性进行了研究。20世纪90年代俞聿修等<sup>[4]</sup>和柳淑学<sup>[5]</sup>针对实验室造波进行了大量研究, 通过试验研究了分段式造波机特性, 总结了多向随机波浪的实验室模拟方法。为了更好地模拟真实的

收稿日期: 2015-11-25

\*基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金(51579038); 国家重点基础研究发展(973)计划资助项目(2013CB036101, 2011CB013703)

作者简介: 周政(1990—), 男, 硕士研究生, 从事随机波浪模拟研究。

海浪,近些年来,国内外许多科研机构制造了双边多单元造波机,李俊等<sup>[6]</sup>展开了相应研究,实验室造波理论与技术得到进一步发展。

但受造波板的总体宽度及单板宽度的影响,分段式造波机产生的波浪具有一定的不均匀性,同时受波浪边界绕射的影响,对于斜向波浪,波浪的有效试验区域小于理论区域。因此,本文将基于以上研究成果,通过数学模型研究分段式造波机生成波浪的特性,系统地分析波浪周期与相对板宽对波浪传播的影响,并给出有效实验区域范围的变化规律,以便为实际应用提供参考。

## 1 分段式造波机生成波浪理论

### 1.1 单板造波公式

假定水是无黏、无旋和不可压缩的,水深  $h$  均匀,水底不可渗透,造波板的运动相对于水深和波长很小,即生成波浪为微幅波。图1为单元宽度为  $b$  的造波板生成波浪示意图,图2为坐标定义,流体的速度势  $\Phi$  满足拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

根据微幅波假定,水面边界条件为:

$$\left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间;  $g$  为重力加速度。水底面条件为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (3)$$

造波板和半无限长墙壁的边界条件为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} \omega \left( Y_p + Y_f \frac{h+z}{h} \right) \cos(\omega t) & |x| \leq b/2 \\ 0 & |x| \geq b/2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Y_p$ 、 $Y_f$  分别为造波板平移和转动在水面处的幅值;  $\omega$  为圆频率。有限宽度的造波板生成的波浪呈散射状传播且波幅在传播过程中逐渐减小,因此,距离造波板中心足够远的一点处应满足如下的辐射条件:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{k}{\omega} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

式中:  $r$  是距离造波板中心足够远的一点离坐标原

点的距离;  $r (= \sqrt{x^2 + y^2})$ ;  $k$  为波数。对于微幅波,满足下式:

$$\eta = - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (6)$$

根据以上方程与边界条件并略去定常波, Takayama<sup>[2]</sup> 推导了其生成波浪的公式,得到单块造波板生成波浪的波面公式为:

$$\eta(x, y, t) = (Y_p \alpha_p + Y_f \alpha_f) \left\{ \sin(\omega t) \cdot \int_{-\frac{kb}{2}}^{\frac{kb}{2}} N_0 [\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}] dq + \cos(\omega t) \cdot \int_{-\frac{kb}{2}}^{\frac{kb}{2}} J_0 [\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}] dq \right\} \quad (7)$$

式中:  $J_0(x)$ 、 $N_0(x)$  分别为零阶贝塞尔和纽曼函数;  $\alpha_p$ 、 $\alpha_f$  分别为造板水平移动和转动时产生波浪的传递函数。

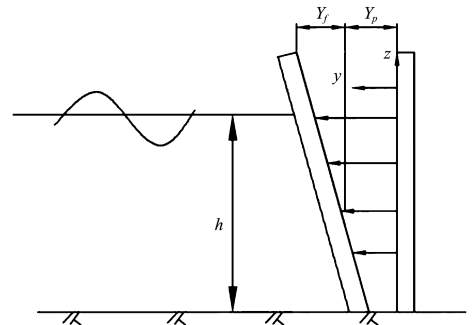


图1 造波板生成波浪示意图

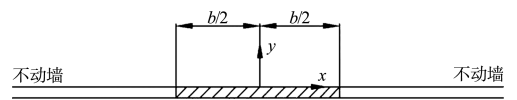


图2 坐标定义

### 1.2 分段式造波机生成斜向规则波

分段式造波机由若干独立造波单元组成,利用波浪叠加原理,对式(7)进行叠加可以得到  $N$  块板产生的斜向规则波波面公式,但相邻各板间存在固定的相位差  $\varepsilon$  (图3),有

$$\frac{2\pi}{L_y} y - \omega t = \frac{2\pi}{L_y} \left( y - \frac{b}{\tan \theta} \right) - (\omega t + \varepsilon) \quad (8)$$

$$L_y = L / \sin \theta \quad (9)$$

可得到固定的相位差

$$\varepsilon = - \frac{2\pi}{L} b \cos \theta = - k b \cos \theta \quad (10)$$

根据叠加原理得到斜向规则波波面计算公式:

$$\eta(x,y,t) = \sum_{i=N^-}^{i=N^+} (Y_p\alpha_p + Y_f\alpha_f) \{ \sin(\omega t - ikb\cos\theta) \cdot \int_{(i-\frac{1}{2})kb}^{(i+\frac{1}{2})kb} N_0 [\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}] dq + \cos[(\omega t) - ikb\cos\theta] \int_{(i-\frac{1}{2})kb}^{(i+\frac{1}{2})kb} J_0 [\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}] dq \} \quad (11)$$

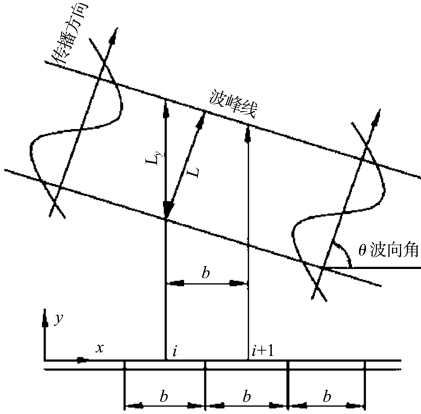


图 3 分段式造波机生成斜向波浪示意图

### 1.3 分段式造波机生成斜向不规则波公式

斜向不规则波可以看成由无限振幅、频率和相位各不相同的斜向规则波叠加而成, 对于各组成波, 每块造波板的随机相位应相同<sup>[7]</sup>, 斜向不规则波波面公式如下:

$$\eta(x,y,t) = \sum_{m=1}^{m=M} \sum_{i=N^-}^{i=N^+} \frac{a_m}{2} [N_{im}^*(x,y) \sin(\omega_m t - ikb\cos\theta + \varepsilon_m) + J_{im}^*(x,y) \cos(\omega_m t - ikb\cos\theta) + \varepsilon_m] \sin\theta \quad (12)$$

式中:

$$N_{im}^*(x,y) = \int_{(i-\frac{1}{2})kb}^{(i+\frac{1}{2})kb} N_0 [\sqrt{(k_m x - q)^2 + (k_m y)^2}] dq \quad (13)$$

$$J_{im}^*(x,y) = \int_{(i-\frac{1}{2})kb}^{(i+\frac{1}{2})kb} J_0 [\sqrt{(k_m x - q)^2 + (k_m y)^2}] dq \quad (14)$$

$$a_m = \sqrt{2S(\omega_m) \Delta\omega} \quad (15)$$

$$\Delta\omega = (\omega_H - \omega_L) / m \quad (16)$$

$$\omega_m = \omega_L + (m-1/2) \Delta\omega \quad (17)$$

式中:  $S(\omega)$  为不规则波浪的频谱;  $\varepsilon_m$  为  $[0, 2\pi]$  内均匀分布的随机数;  $\omega_L$ 、 $\omega_H$  分别为谱在低频侧

和高频侧的截止频率;  $M$  为频率分段数, 可取为 50~100。

### 1.4 最大波角与规则波波长的关系

如图 3 所示, 斜向规则波传播角度与规则波波长有如下关系<sup>[8]</sup>:

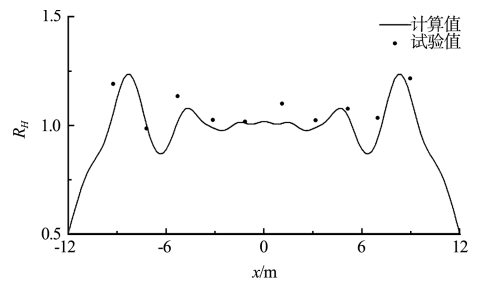
$$\cos\theta = \frac{L}{N_0 b} \quad (18)$$

式中:  $N_0$  为造波机参与一个完整周期规则波模拟的造波板个数。在满足如上条件时,  $N_0$  越大或  $b$  越小, 所生成的波浪效果越理想。但由于客观因素的制约, 实际中对于特定的造波机, 在  $b$  固定的情况下, 所模拟的斜向规则波波角受  $N_0$  制约, 为模拟出理想的斜向规则波,  $N_0$  应满足  $N_0 \geq 4$ 。

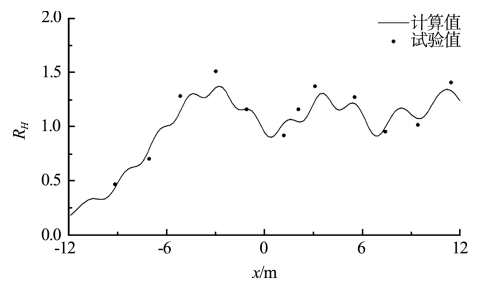
## 2 模拟计算结果分析

### 2.1 数值模型验证

为验证本文数值计算方法的可行性, 基于文献[5]的试验结果进行模型验证。该试验模型的主要参数为: 造波板总宽 24 m、单板宽 0.8 m, 水深 0.5 m, 规则波与不规则波无因次波高对比结果见图 4、5。从图中对比结果可以看出, 理论计算结果与试验结果基本是一致的, 可以说明本文理论方法是有效的。



a)  $T=1.5$  s,  $y=6$  m,  $\theta=90^\circ$



b)  $T=1.5$  s,  $y=6$  m,  $\theta=60^\circ$

图 4 规则波对比

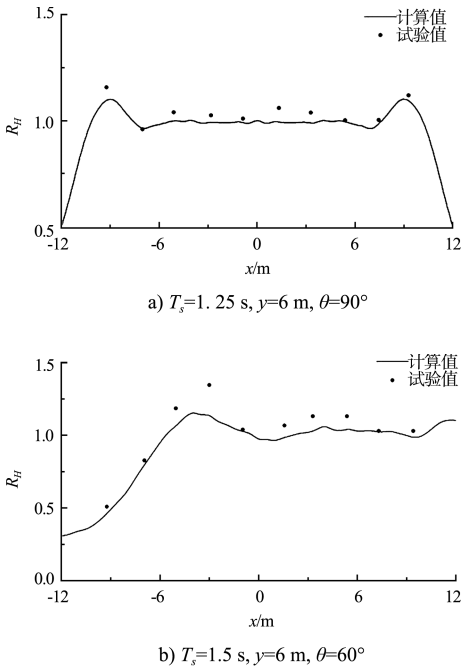


图5 不规则波对比

### 2.2 造波机布置与计算参数

本文将参考大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室综合水池的相关造波机参数进行模拟，水池长 50 m、宽 34 m，水池短边处安装有分段式造波机，由 70 块板宽为 0.4 m 的造波单元组成，总宽 28 m。

水深取为 1.0 m，规则波各组次波浪周期分别取为 1.0、1.25、1.5 s；单向不规则波各组次波浪有效周期分别取为 1.5、1.75、2.0 s；斜向波角度取  $\theta=45^\circ$  与  $\theta=60^\circ$ ；单向不规则波浪频谱采用布-光易谱(B-M 谱)。

分段式造波机生成波浪的有效区域范围是影响物理模型试验的重要因素，对于波向角为  $\theta$  的斜向波浪，其理论有效区域为图 6 中实线所包围区域。但在实际模型试验中，受单元造波板相对宽度与波浪绕射等因素影响，实际有效试验区域范围会有所减小，其实际有效区域为图 6 中虚线与造波机所包围区域。文献[5]通过试验研究了有效区域的缩减范围，并给出了波向角缩减值。本文将通过数值模拟给出波浪周期与单元造波板相对宽度对波浪传播的影响，并给出有效试验区域范围变化规律。

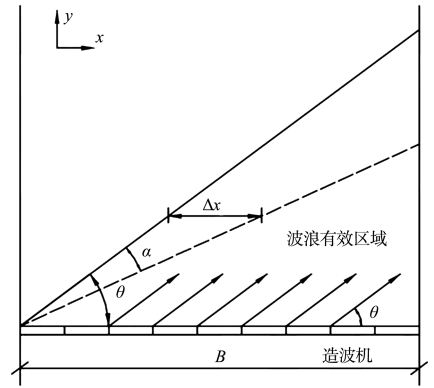
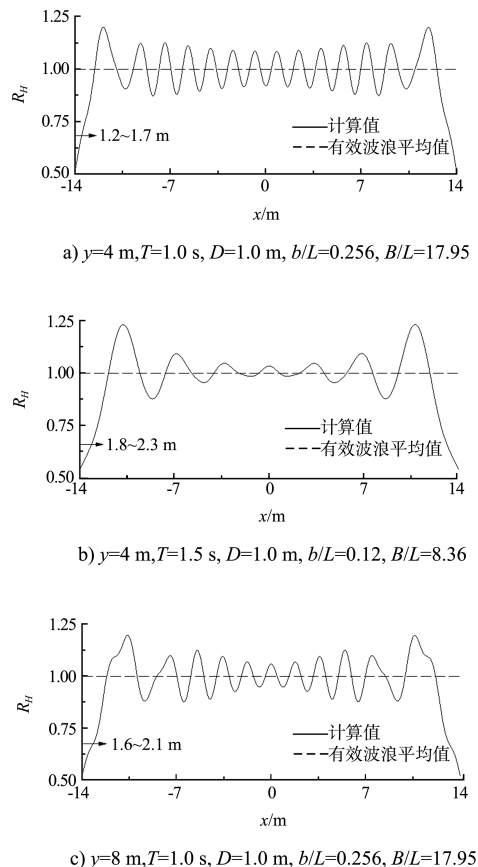


图6 斜向波浪有效区域

### 2.3 规则波计算结果

本文首先对正向规则波 ( $\theta=90^\circ$ ) 的模拟结果进行分析。图 7 为计算所得  $T=1.0\text{ s}$  和  $T=1.5\text{ s}$  的正向规则波沿  $y=4\text{ m}$  和  $8\text{ m}$  断面处的无因次波高  $R_H$  的分布，其中实际有效区域取  $R_H>0.8$  部分，图中箭头标出了各组次实际有效区域的缩减值，若需要波高更稳定的有效区域，可将所得实际波浪外边界向内推移 0~0.5 m。



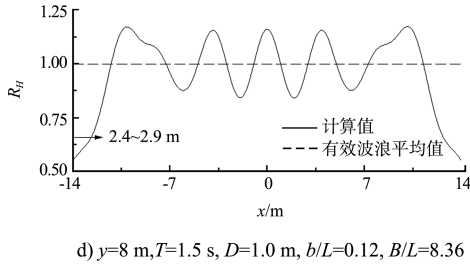


图7 正向规则波在不同水池断面处的无因次波高分布( $\theta=90^\circ$ )

从图7可以看出,所得无因次波高值围绕均值震荡,具有一定的不均匀性,误差一般在10%左右,波长越长则误差越大,最大可达20%左右,波浪的不均匀性在两端靠近边界处最为明显,这是因为边界对波浪的影响在两端最为明显。生成正向规则波时,所有造波单元均按照同一频率往复运动,各板间无相位差,周期越大则波浪受两端边界的影响越大、波浪的不均匀性越强、实际有效区域的缩减值也越大。

进一步,本文对 $\theta=60^\circ$ 与 $\theta=45^\circ$ 、 $T=1.0$  s与 $T=1.5$  s的斜向波进行了计算分析,图8、9分别给出了计算结果,图中所示有效波浪平均值是由理论波浪外边界向内推移2 m后余下区域的波高平均值,实际波浪外边界通过有效波浪平均值减去波高最大值与有效波浪平均值的差值确定。

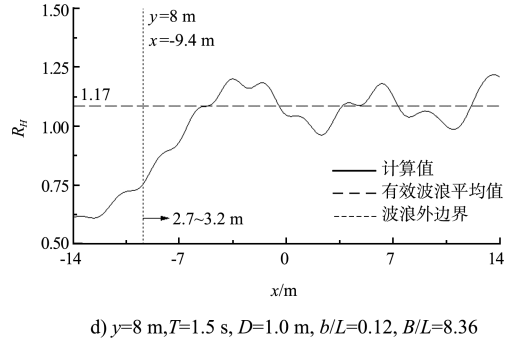
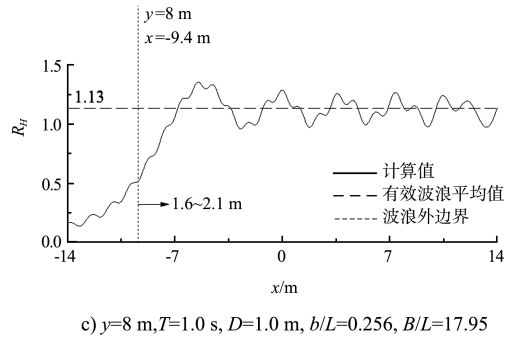
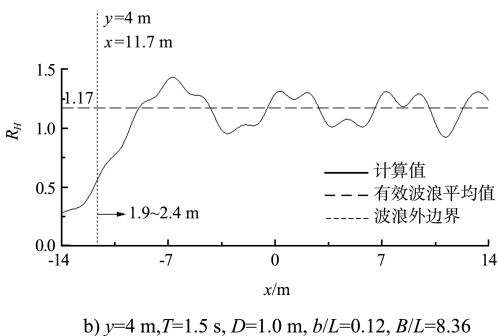
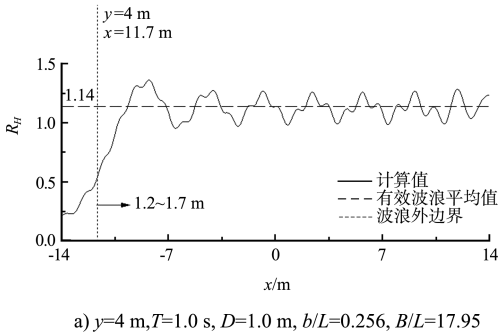
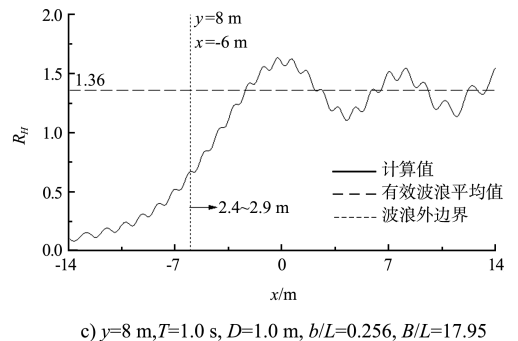
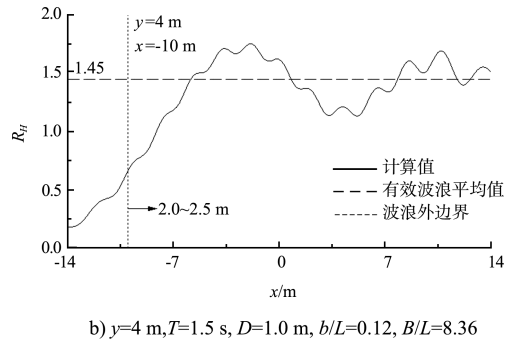
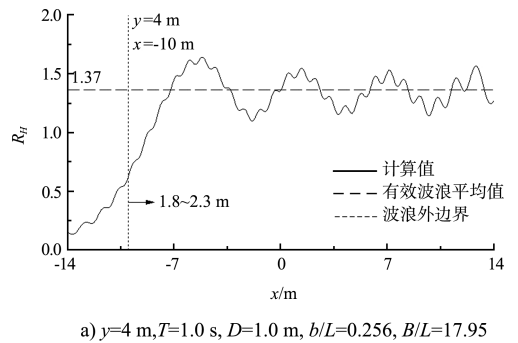
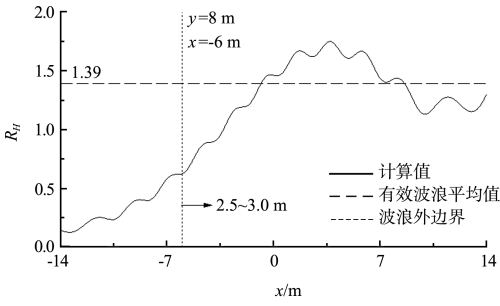
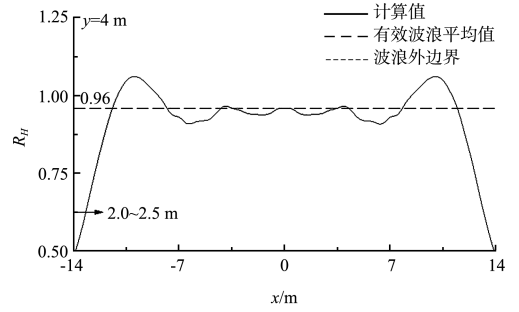


图8  $\theta=60^\circ$ 时斜向规则波在不同水池断面处的无因次波高分布

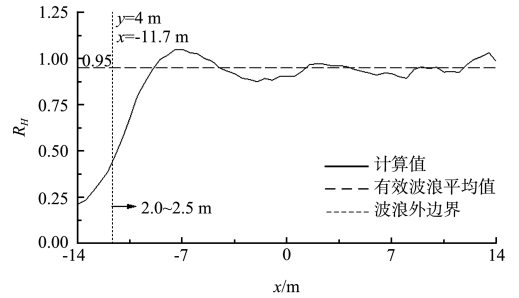




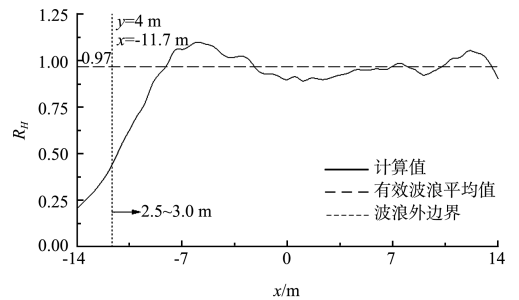
d)  $y=8\text{ m}, T_s=1.5\text{ s}, D=1.0\text{ m}, b/L=0.12, B/L=8.36$



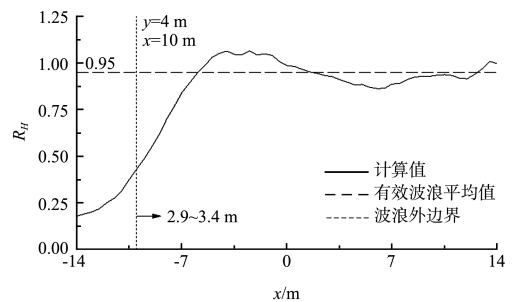
b)  $T_s=2.0\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=90^\circ$



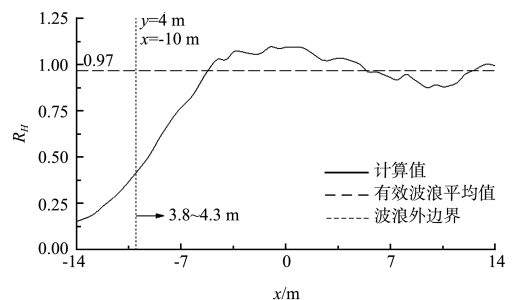
c)  $T_s=1.5\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=60^\circ$



d)  $T_s=2.0\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=60^\circ$



e)  $T_s=1.5\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=45^\circ$



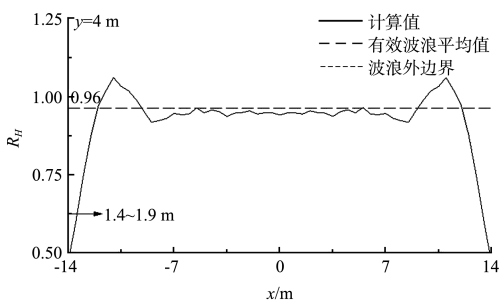
f)  $T_s=2.0\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=45^\circ$

图9  $\theta=45^\circ$ 斜向规则波在不同水池断面处的无因次波高分布

从图8、9可以看出，波向角越小、波浪的周期越大则波浪的均匀性越差。波浪在斜向传播的过程中，外侧会受到绕射影响，长波尤为显著，导致实际有效区域变小。相对板宽越小，参与生成一个完整斜向规则波模拟的造波单元越多，波高的不均匀性越大、变化趋势越明显。距离造波板较远处的斜向波有效区域缩减值不稳定，波向角越小不稳定性越强，原因是受造波板总宽度限制，波向角较小时距离造波板较远的区域波形完整的波浪较少、规律性较差。

### 2.4 不规则波计算结果

图10为不规则波计算结果，可以看出，不规则波稳定性优于规则波，误差一般不超过10%，波动趋势和规律同规则波相近，有效波浪平均值与有效区域范围的确定方式与斜向规则波相同。斜向不规则波是由无限频率不同的斜向规则波叠加而成，少部分高频波浪波长过短，无法满足式(18)，此时无法生成完整的波形，还会在水池中产生不同于目标波向角的杂波，影响波浪的模拟质量，这也是造成不规则波的无因次有效平均波浪值略小于1.0的原因。因此，在斜向不规则波的模拟过程中，应根据波向角合理选取周期，减少不满足式(18)的组成波以消除或减弱杂波，提高波浪模拟质量。

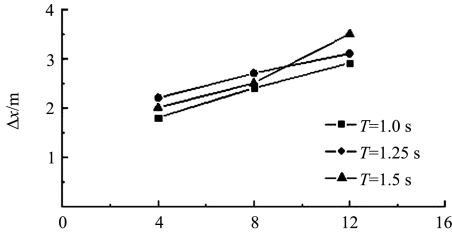


a)  $T_s=1.5\text{ s}, D=1.0\text{ m}, \theta=90^\circ$

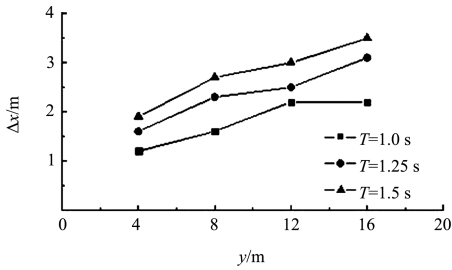
图10 斜向不规则波在不同水池断面处的无因次波高分布

### 3 有效区域变化规律分析

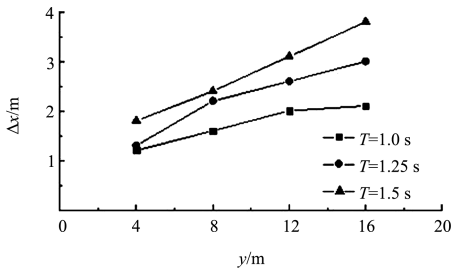
图 11、13 分别给出了不同周期规则波与不规则波有效区域的横向缩减值  $\Delta x$  与距造波板的纵向距离  $y$  的关系。通过上述数据的拟合值得到各不同波向角波浪有效范围边界缩减值  $\alpha$  与随波浪周期的变化 (图 12、14)。



a)  $\theta=45^\circ$

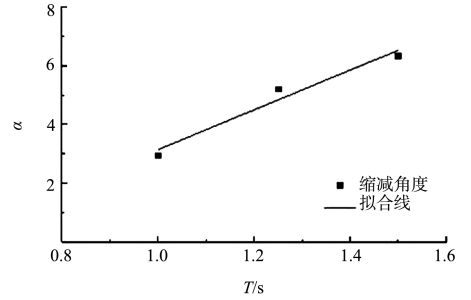


b)  $\theta=60^\circ$



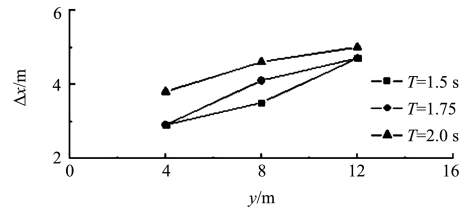
c)  $\theta=90^\circ$

图 11 规则波有效区域缩减值变化

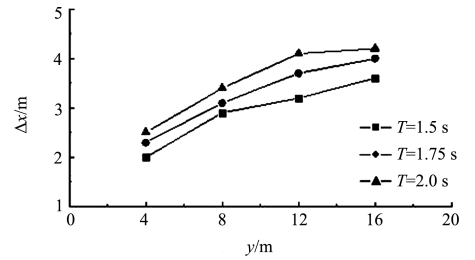


c)  $\theta=90^\circ$

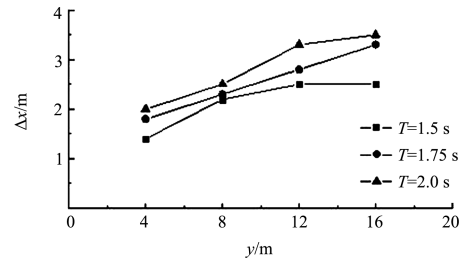
图 12 规则波角度缩减值随周期的变化



a)  $\theta=45^\circ$

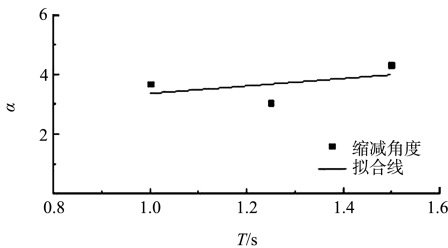


b)  $\theta=60^\circ$

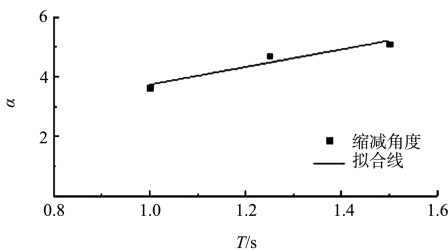


c)  $\theta=90^\circ$

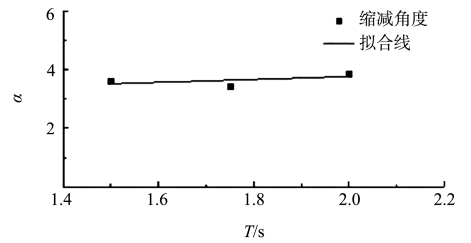
图 13 不规则波有效区域缩减值变化



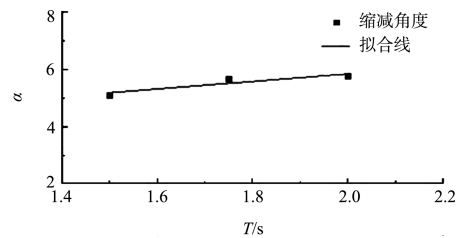
a)  $\theta=45^\circ$



b)  $\theta=60^\circ$



a)  $\theta=45^\circ$



b)  $\theta=60^\circ$

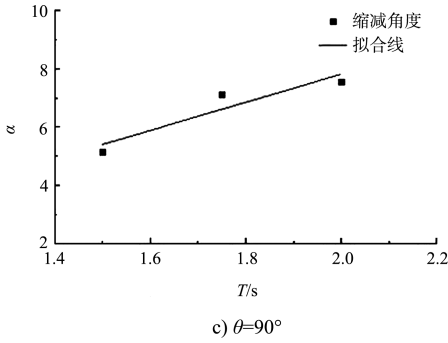


图 14 不规则波角度缩减值随周期的变化

由图 11、13 可以看出, 对于同一角度不同周期的波浪,  $\Delta x$  随波浪周期的增大而增大; 对于同一周期不同角度的波浪,  $\Delta x$  随波向角  $\theta$  的增大而增大; 同时,  $\Delta x$  随  $y$  值的增大而增大。由图 11 可以看出, 对于同一角度不同周期的规则波, 有效范围边界缩减值  $\alpha$  随波浪周期的增大而增大; 对于同一周期不同角度的规则波, 波向角越大,  $\alpha$  值越大; 同时, 波向角越小,  $\alpha$  随波浪周期的变化趋势越缓慢。由图 12、14 可以看出, 对于不规则波,  $\alpha$  的变化规律与规则波相似, 但其随波浪周期的增大趋势变缓。

根据分析结果可得,  $\Delta x$  随  $y$ 、 $a$  波浪周期均呈近似线性变化规律, 分段式造波机生成的波浪有效区域应根据距造波机纵向距离  $y$  处的横向缩减值  $\Delta x$  与波浪有效范围边界缩减值  $\alpha$  划分, 从而得到更加精确的有效区域范围。

#### 4 结语

1) 受板总宽、波浪绕射等因素综合影响, 正向规则波沿水池分布具有一定的不均匀性, 波高误差一般在 10% 左右, 长周期波浪较短周期波浪误差一般偏大; 正向不规则波波面变化趋势与规则波相近, 均匀性优于规则波, 有效波高误差一般不超过 10%。正向规则波波面均匀性优于斜向

规则波, 正向不规则波与斜向不规则波波面均匀性无较大差别。

2) 板总宽一定时, 相对板宽越小, 斜向规则波沿水池分布的不均匀性越大, 但是不规则波的不均匀性好于规则波。

3) 分段式造波机生成波浪的有效区域应根据横向距离的缩减值  $\Delta x$  与有效区域边界角度的缩减值  $\alpha$  划分, 具体缩减值由波向角、距造波板距离与波浪周期共同决定, 波浪周期增大、距造波板距离增大以及波向角增大,  $\Delta x$  与  $\alpha$  的值增大。

#### 参考文献:

- [1] Naeser H. Generation of uniform directional spectra in a wave basin using the natural diffraction of waves [R]. Norway: Fluid Dynamics Laboratory, 1979.
- [2] Takayama T. Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wavemakers [J]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1982, 21(2): 3-47.
- [3] Takayama T, Hiraishi T. Fundamental characteristics of oblique regular waves and directional random waves generated by a serpent-type wave generator [J]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1987, 26(5): 101-136.
- [4] 俞聿修, 柳淑学. 多向随机波的实验室模拟 [J]. 海洋工程, 1993, 11(1): 40-49.
- [5] 柳淑学. 分段式造波机生成波的方法和特性 [J]. 海洋工程, 1994, 12(1): 81-93.
- [6] 李俊, 陈刚, 杨建民. 海洋工程试验中多单元造波机波浪模拟方法 [J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 37-42.
- [7] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011: 1-4.
- [8] 李俊, 陈刚, 杨建民. 双边多单元造波机造波性能分析 [J]. 海洋工程, 2012, 30(2): 32-37.