

直立堤前波浪和波压力概率特征

黄培基 赵炳来

(国家海洋局第一海洋研究所)

随着海上石油、矿物资源的开发和航运事业的发展,要求在海上建立更多的水工建筑物和码头。目前,直墙式水工建筑物仍是工程建设中广为采用的结构型式,为选取其最优结构,必须知道该建筑物前波浪及作用力的概率特征,这关系到工程设计中对直墙式水工建筑物的稳定性和强度的计算。因此,研究自然条件下直立堤前的波浪、波压力概率特征,对建立一种考虑海浪的不规则性来计算作用于直立堤上波压力的工程计算方法是具有重要意义的。

自六十年代末,国外就开始观测和研究海浪对直立堤的作用^[9,10,12]。近年来,我们在一些海港对海浪及其对直立堤的作用进行了观测和研究^[1,2]。有的海港直立堤地处开阔的海岸带,夏季受东南向风浪侵袭,堤身结构为沉箱式置于暗基床上,海底较平缓。基床高程-6.0m,潮差3—4m,高潮时堤前水深可达10m左右。

测站设在离堤头40m处,于临海侧面不同高程上(标高为-5.2m, -2.2m, -0.2m, +1.8m, +2.8m, +3.8m。此处标高以潮高基准面为0,上为正,下为负),安装了测波压力的传感装置,堤面上和离堤450m外海处安有电阻式测波杆,对堤面不同高程上的波压力、堤前海面波动、入射波进行了同步连续记录。

本文基于该港直立堤前实测资料,对波浪、波压力连续记录进行了统计分析和谱分析,研究了在堤前海浪不破碎条件下,波浪和波压力的概率分布特征、波压力谱分量随深度衰减特征及堤前波压力谱结构。

一、直立堤前波浪和波压力的概率分布

海浪为一随机现象,由它引起的力也具有随机性质。因此,当海浪同直立堤相互作用时,作用于堤面上的波高、总压力以及堤面上任意一点的波压力和其它表征波浪对堤作用的动力学量都可视为具有一确定分布规律的随机量。对于在深水条件下,这种分布规律分析研究认为:堤前波高和堤面不同高程上的波压力幅度及峰、谷总压力的分布均遵循瑞利(Rayleigh)分布^[9,11]。而对于在浅水条件下的分布规律还很少研究。为此,我们将直立堤前波浪、波压力观测记录进行了统计分析。

1. 堤前波高和堤面不同高程上波压力幅度的累积概率分布函数

如前所述,在深水条件下,堤前波高和堤面任意点波压力幅度都遵循瑞利分布。而在浅水条件下,即不符合瑞利分布,据文献[3]的研究结果得

$$F(h) = \exp \left[-\Gamma^{K(H^*, B)} \left(\frac{1}{K(H^*, B)} + 1 \right) \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)^{K(H^*, B)} \right], \quad (1)$$

其中

$$K(H^*, B) = (5 - B)/(2 - 1.5H^*), \quad (2)$$

$$B = \begin{cases} \bar{C}/U = \bar{\tau}g/2\pi U, & \text{当 } \bar{C} \leq U \\ 1, & \text{当 } \bar{C} > U \end{cases}, \quad (3)$$

$$H^* = \bar{h}/d, \quad 0 \leq H^* \leq 0.5$$

\bar{h} ——平均波高; $\bar{\tau}$ ——平均周期; d ——水深; U ——风速; g ——重力加速度; H^* ——浅水因子; B ——风浪成长阶段因子, 当 $B = 1$ 时, 风浪达充分成长状态。显然, (1) 式在 $H^* = 0, B = 1$ 时, 即为瑞利分布。

为寻求实测资料反映何种分布, 分别计算出每次记录的无因次波高 (h/\bar{h}) 和无因次波压力幅度 (P/\bar{P}) 的累积率曲线, 并确定出累积率为 1, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 90% 的无因次波高和无因次波压力幅度值。然后将上述各累积率之值, 按(2)式计算的相应 K 值点绘在图 1 上。图上的实线表示(1)式按不同累积率绘出。

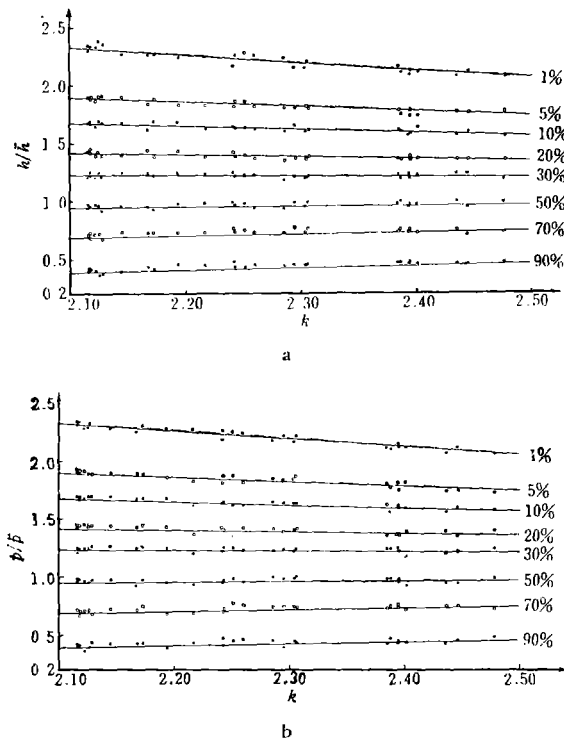


图 1 波高和波压力幅度实验累积分布(点)与按(1)式计算值(实线)的比较

Fig. 1 Comparison of the empirical cumulative distribution (dots) of Wave height and range of Wave pressure fluctuation with the value (line) calculated by eq. (1)

图 1a 为堤前实测波高分布, 图 1b 为堤最底层上所测波压力幅度的分布, 其它中间层次也有类似的分布图。由图上实测资料点距来看, 都与(1)式中相应理论累积率值相接近。由此可以认为, 浅水直立堤前波高和堤面不同高程上波压力幅度符合(1)式分布律, 并且波压力幅度实际上不随测点标高而变化。

2. 堤前表面波周期和堤面不同高程上波压力周期的累积分布函数

关于波周期分布,许多研究者^[6,8]的分析和观测结果都表明,在一级近似下,不论水深大小,风浪和涌浪直至破碎区以前,其无因次周期 $(\tau/\bar{\tau})$ 的分布曲线是不变的。其分布函数为:

$$F(\tau) = \exp\left[-\Gamma^4\left(\frac{5}{4}\right)\left(\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right)^4\right] \quad (4)$$

为分析直立堤前波周期和堤面不同高程上波压力周期分布,现将其实验累积分布以专门的函数坐标纸作图。图2为一例子,图上曲线为(4)式。

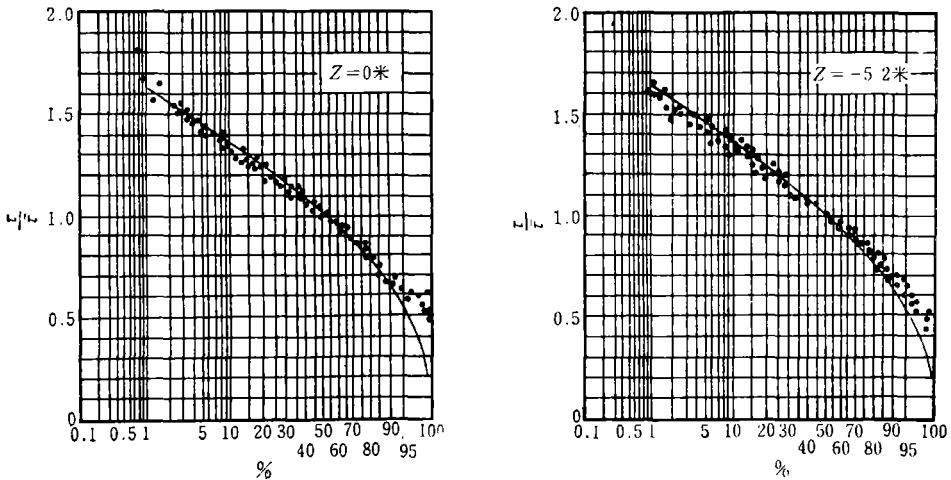


图2 波周期和波压力周期实验累积分布(点)与理论累积分布(曲线)的比较

Fig. 2 Comparison of the empirical period cumulative distribution (dots) of wave and range of wave pressure fluctuation with the theoretical cumulative distribution (curve)

图2上 $Z=0$ 为堤前表面波周期分布, $d=-5.2\text{m}$ 为堤最底层上波压力周期分布,其他中间层次也有类似的分布。

分析波周期和波压力周期实验累积分布表明,浅水直立堤前波周期和波压力周期分布可按(4)式计算,而且波压力周期分布实际上并不随测点标高变化。

3. 总压力累积分布函数

总压力是海浪对直立堤作用的一个最重要的特征量。目前对波浪总压力的研究都是以单个波的波峰或谷击堤时的值来分析的。

为分析总压力分布特征,据27次实测连续记录于每个波峰、波谷相位计算出峰总压力 (R_t^+) 和谷总压力 (R_t^-) ,分别求出无因次峰 (R_t^+/\bar{R}^+) 、谷 (R_t^-/\bar{R}^-) 总压力累积率曲线,并确定出累积率为1,5,10,20,……90%的无因次峰、谷总压力值。又以每次实测的 H^* , B 值,按

$$F(R_t^\pm) = \exp\left[-\Gamma \frac{5-B}{2-1.5H^*} \left(\frac{2-1.5H^*}{5-B} + 1\right) \left(\frac{R_t^\pm}{\bar{R}^\pm}\right)^{(5-B)/2-1.5H^*}\right] \quad (5)$$

计算出上述各累积率的无因次峰、谷总压力及其对实测值的相对差,并分别统计了该相对差在给定范围 $(-5\sim+5\%, -10\sim+10\%)$ 内的出现率,计算了平均绝对差,给出了相应累积率的最大相对差,结果列入表1。

表 (Table) 1

相 对 差		累 积 率 %							
		1	5	10	20	30	50	70	90
-5—+5%	R ⁺	100	100	100	100	100	100	100	81.48
	R ⁻	96.30	100	100	100	100	100	96.30	74.07
-10—+10%	R ⁺	100	100	100	100	100	100	100	96.30
	R ⁻	100	100	100	100	100	100	100	100
最大相对差	R ⁺	-4.11	3.84	4.32	4.96	4.09	4.21	4.34	10.25
	R ⁻	7.27	3.26	3.01	3.55	4.07	-4.21	5.63	-8.89
平均绝对差	R ⁺	0.03	0.02	0.02	0.02	0.025	0.01	0.02	0.01
	R ⁻	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02

由表 1 看出, 相对差在 -5—+5% 范围内的各累积率相对应的出现率是很高的, 最低为 74.07, 而平均绝对差, 最大也不超过 0.035。因此, 可认为海浪作用于浅水直立堤上的峰、谷总压力分布函数可按(5)式计算, 并与堤前波高具有同一分布律。

上述各要素的累积分布函数的分析结果是有重要意义的。利用这些分布规律, 就可以据浅水直立堤前已知的平均波高、堤面不同高程上平均波压力幅度、平均波周期以及平均总压力求得任意给定所需累积率的值。

二、波压力随深度的衰减

波浪和波压随深度衰减的研究, 开始只在外海或大洋上^[6,13]和在无任何障碍物的近岸区^[6]进行了研究。七十年代初已有深水条件下直立堤前波浪与波压力随深度衰减的研究^[9,11]。我们根据实测资料分析研究了直立堤前波压力谱分量随深度的衰减规律和波压力谱高频段的结构。

1. 波压力谱分量随深度的衰减

于每次记录曲线, 以等时间间隔 ($\Delta t = 0.75$ 秒) 同步摘取堤前海面波动、和堤面不同高程上波压力的纵坐标值, 计算出各自的谱密度。以标高 -0.2m, -2.2m 和 -5.2m 上的波压力谱作为分析波压力谱分量随深度衰减的原始数据, 求得的实测结果同有限深度的小振幅波动理论结果作比较。谱分量随深度衰减系数按有限深度的小振幅波动理论得

$$r(\omega, Z, d) = \text{ch}k(d+Z)/\text{ch}k(d+Z_0), \quad (6)$$

其中 d ——堤前水深; k ——波数, 它应满足

$$\omega^2 = gk \text{th} kd. \quad (7)$$

图 3 表示标高为 -2.2m 和 -5.2m 水层上实测波压力谱分量衰减系数(小圆点)与公式(8)计算值(实曲线)的比较。

比较表明, 在 $0.5 < kd < 1.15$ 范围内, 波压力谱低频分量随深度的衰减符合有限深度

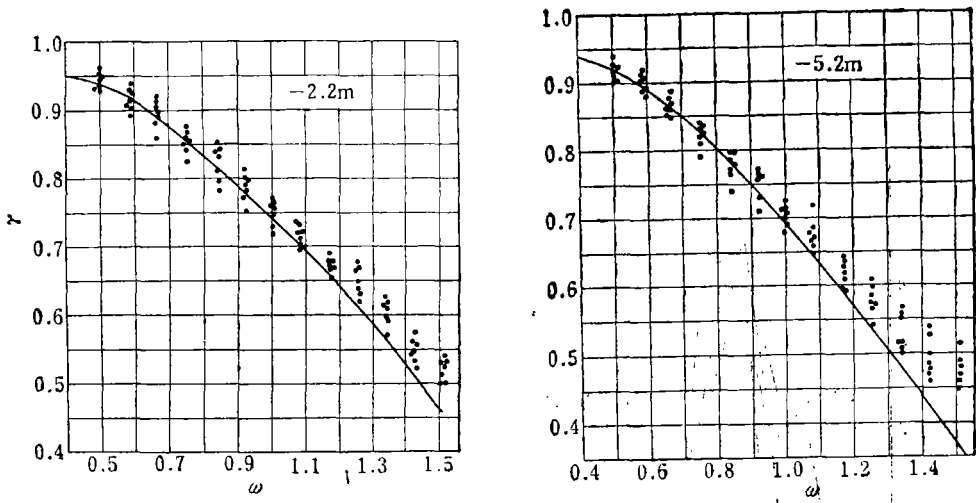


图3 实测波压力谱分量衰减系数(小圆点)与小振幅波动理论结果(实曲线)的比较

Fig. 3 Comparison between the measured attenuation coefficient (dots) of wave pressure spectral components and the result (curve) of small amplitude wave theory

的小振幅波动理论结果。而当 $kd > 1.15$ ，波压力谱分量(相对波压力谱的高频部分)随深度的衰减具有比较缓慢的趋势，这是由于波浪同直立堤相互作用的非线性效应所致。

2. 波压力谱平衡范围随深度的变化

风浪谱中一个最重要而具体的假说即是当频率 ω 足够大时，符合 Phillips 平衡范围^[4,5,7]。在此平衡范围内，波能仅与表征波峰破碎机制的物理参量有关，而与风浪产生的外界因素无关。若仅限于考虑不受海水表面张力和海水分子粘滞影响的波动频率范围内，平衡范围的结构只取决于频率 ω 和重力加速度 g 。又据量纲分析可得

$$S(\omega) = \beta g^2 \omega^{-5}, \quad (8)$$

其中 β 为无因次常量，采用 7.8×10^{-3} ^[7]。

目前多数测得的风浪谱基本证实了 Phillips 提出(8)式的平衡范围^[5,7]。对于海面以下不同深度水层上的波压力谱高频段结构还很少研究。1973年，Цыплухин 和 Попов^[14]分析了 Сочи 和 Шехарис 港直立堤前不同深度上的波压力谱后指出，公式(8)中频率(ω)的指数从5.0(深度 $Z = -0.6\text{m}$)变到8.0(深度 $Z = -11.2\text{m}$)。这结果从量纲上分析是不妥的，因为公式(8)中 ω 的指数一变，谱密度的量纲也变了。

为研究直立堤前波浪及各不同深度上波压力谱高频部分的结构，将实测的堤前波浪和堤面不同高程上的波压力谱密度值点绘成图4。其中图4a为堤前风浪谱，图4b为标高 -2.2m 上的波压力谱。

由图4a可知，直立堤前风浪谱的高频部分可用(8)式(图中粗斜直线)来描述。从图4b看出，波压力谱高频部分随深度的增加几乎平行偏离粗直线。由此可认为波压力谱平衡范围结构中 ω 的指数仍为5，不随深度的增加而变化，但其谱密度值则随深度的增加而减小。

由(8)式得

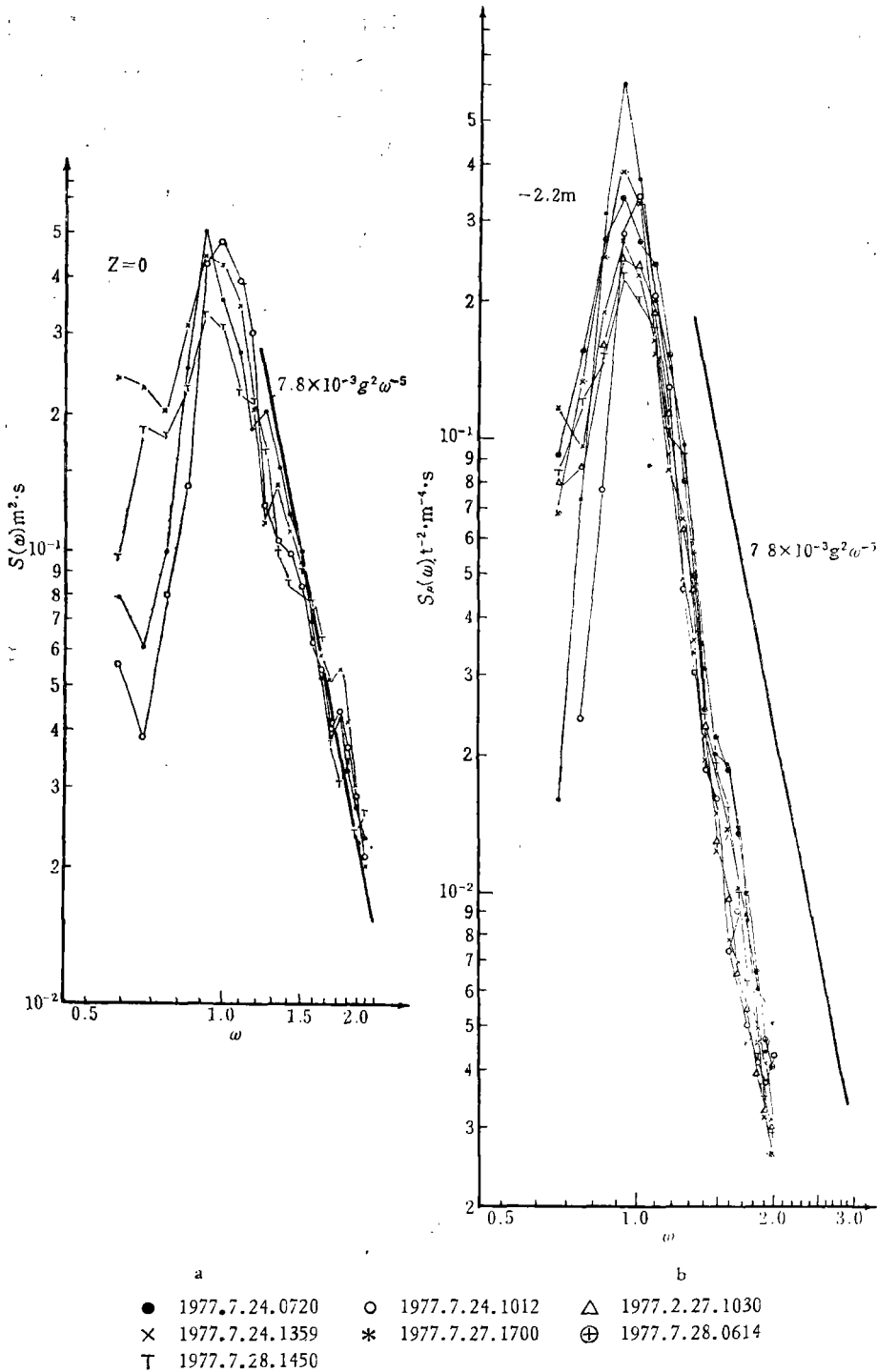


图 4 实测堤前波浪和波压力谱,斜直线为式(8)

Fig. 4 The observed spectra of waves and wave pressure fluctuations at a vertical breakwater and the computed spectrum in high frequencies, of which the oblique line from the eq. (8)

$$\beta = S(\omega) \cdot \omega^5 / g^2, \quad (9)$$

将实测谱值按(9)式计算并绘成图。

图5给出了标高-0.2m层上不同次观测得的 β 值,其它水层上也同样可得类似图解。由于每次观测时潮位不同,故标高-0.2m层所示的每次观测时的实际深度是不一样

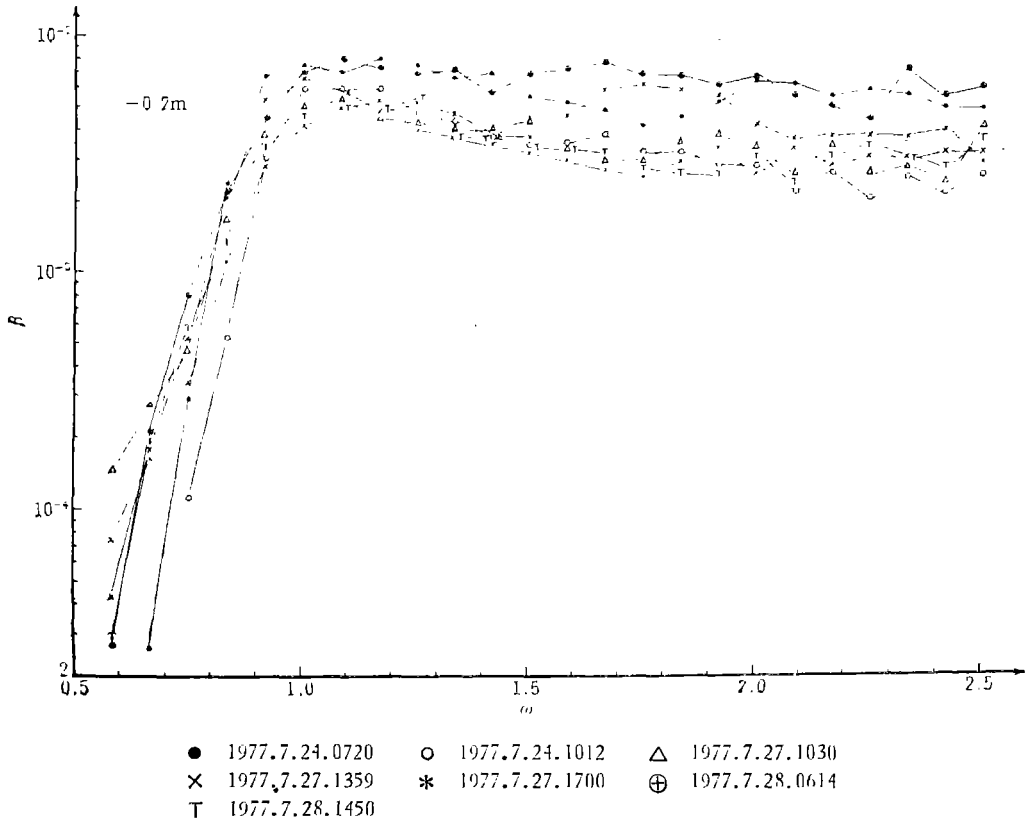


图5 -0.2m水层上波压力谱 β 值

Fig. 5 The β values of wave pressure spectra at level $Z = -0.2m$

的。因此,在图5上的每次实测的 β 值线亦有所差异。但当 $\omega > \omega_{max}$ 后,每次实测的 β 值基本上不随 ω 变化,而是在某一 β 值上下波动,这是由于观测及谱分析中的误差所致。由此对 $\omega > \omega_{max}$ 的每次实测不同深度上的 β 值求平均,将所得的 β 值以无因次参量 $Z\omega_{max}^2/g$ 为横坐标,绘成图6。这里 ω_{max} 为谱峰值频率。

由图6看出,在海面($Z = 0$ 时),平均 β 值为 7.8×10^{-3} ,随 $Z\omega_{max}^2/g$ 的增大, β 值变小。可求得

$$\beta = \beta_0 \exp[-4\pi Z\omega_{max}^2/5g], \quad Z\omega_{max}^2/g \leq 0.75 \quad (10)$$

其中 $\beta_0 = 7.8 \times 10^{-3}$ 。

上述分析表明,堤面不同高程上的波压力谱平衡范围随深度的变化可用

$$S_p(\omega) = \beta_0 \omega^{-3} g^2 \exp[-4\pi Z\omega_{max}^2/5g], \quad (11)$$

来描述。

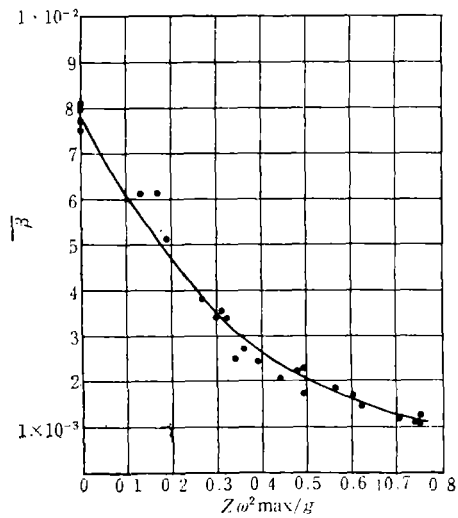


图6 β 值与参量 $Z\omega^2_{max}/g$ 之关系, 实曲线为式(10)

Fig. 6 The relation between the β value and the nondimensional parameter $Z\omega^2_{max}/g$, of which the curve from the eq. (10)

三、结 语

1. 在浅水条件下, 直立堤前不同高程上波压力幅度的累积分布实际上是不随堤面上测点高度变化的, 符合(1)式分布律。作用于堤上的峰、谷总压力的累积分布与堤前波高累积分布是一致的, 其分布函数可按(5)式计算。

2. 周期的累积分布同样也不随堤面上测点的高度变化, 而遵循(4)式的分布律。

3. 分析直立堤不同高程上波压力谱表明, 在 $0.5 < kd < 1.15$ 的整个范围内, 波压力谱低频分量随深度的衰减可按有限深度上的小振幅波动理论结果来计算。当 $kd > 1.15$, 波压力谱分量(相对波压力谱高频部分)随深度的衰减具有比较缓慢的趋势。我们认为这与波浪同直立堤相互作用的非线性效应有关, 须建立不规则波同直立堤相互作用的非线性模式来解释。

4. 直立堤前波浪和堤面不同高程上波压力谱高频部分存在一个符合 Phillips 的平衡范围。随深度的增加, 平衡范围结构中 ω 的指数基本不变, 而 β 值则将随着无因次参量 $Z\omega^2_{max}/g$ 的增大而减小, 其变化可用(11)式来描述。

参 考 文 献

- [1] 刘来臣、郭大勇、黄培基, 1980. 沙子口波浪站. 海洋湖沼通报 1: 71—75.
- [2] 黄培基、杨克奇、吕常五、刘来臣, 1979. 海浪对直立堤作用力的研究. 海洋学报 1(2): 311—322.
- [3] 黄培基、赵炳来、刘来臣、蒲书箴, 1980. 以风浪成长阶段因子为参量的波高分布. 海洋学报 3(4): 639—654.
- [4] Phillips, O. M., 1958. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *Jour. Fluid Mech.* 4: 426—434.
- [5] Гаджиев, Я. З., В. П. Красяцкий, 1978. О равновесном интервале в частотных спектрах ветровых волн в море конечной глубины. Изв. АН СССР, Физик атмосферы и океана 14 (3): 335—339.
- [6] Глуховский, Б. Х., 1966. Исследование морского ветрового волнения. Л. Гидрометеоздат, стр.

- 284.
- [7] Лавидан, И. Н., Л. И. Лопатухин, И. В. А. Рожков, 1978. Веровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. *Л. Гидрометеоиздат*, стр. 284.
- [8] Крылов, Ю. М., 1966. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. *Л. Гидрометеоиздат*, стр. 254.
- [9] Крылов, Ю. М., В. Ф. Цыплухин, 1973. Исследование вероятностной структуры поля волн и волновых давлений у глубоководной плотной преграды. *Океанология* **13** (2): 203—209.
- [10] Крылов, Ю. М., В. Ф. Цыплухин, 1974. Исследование силового воздействия нерегулярных волн на глубоководную стенку. *Труды Союзморниипроекта* **36**(42): 151—164.
- [11] Крылов, Ю. М., В. Ф. Цыплухин, Э. Н. Кривцова, 1973. Статистические характеристики морских волн у оградительного мола вертикального типа в условиях больших глубин. *Труды Союзморниипроекта* **34**(40): 16—27.
- [12] Никеров П. С. и др. 1971. Волноизмерительная станция в порту шешхарис на Черном море. В кн: Информационные материалы по гидрометеорологическим приборам и методы наблюдений. *Сб*, 46. М. *Гидрометеоиздат*, стр. 21—25.
- [13] Цыплухин, В. Ф., 1963. Результаты инструментального изучения затухания волн с глубиной в океане. *Океанология* **3**(5): 833—839.
- [14] Цыплухин, В. Ф., Г. И. Попов, 1973. Затухание морских волн с глубиной у оградительного мола вертикального типа. *Труды Союзморниипроекта* **34**(40): 50—54.

THE PROBABILITY CHARACTERISTICS OF THE WAVE AND WAVE PRESSURE AT A VERTICAL BREAKWATER

Huang Peiji and Zhao Binglai

(First Institute of Oceanography, National Bureau of Oceanography)

ABSTRACT

In this paper, based on simultaneous continuous data of the incident waves, the water level elevations and the wave pressures at different heights upon a vertical breakwater in a certain harbour, statistical and spectral analyses of waves and wave pressures are presented. Under the condition that the waves in front of a breakwater are not broken, studies were made on the characteristics of probability distribution of waves and wave pressures, the regularity of the spectral component's attenuation with depth and the structure of the high frequency band of wave pressure spectrum.

The result of analysis shows that practically the distributions of wave heights in front of the vertical breakwater and the fluctuation range of wave pressures at different heights and wave periods do not vary with the heights of measuring points on the vertical breakwater and are determinable theoretically. The distribution of the crests and the troughs of the total pressure of waves upon the vertical breakwater is the same as that for the wave heights.

An analysis of the spectra of wave pressures at different heights upon the vertical breakwater shows that in the range of $0.5 < kd < 1.15$, the attenuation of low frequency pressure spectral components with depth can be calculated by means of the small amplitude wave theory. In case of $kd > 1.15$, the attenuation of the high frequency pressure

spectral components with depth tend to slow down. In our judgement it can be attributed to the effects of the nonlinearity of the wave-breakwater interaction.

There exists an equilibrium range in conformity with Phillip's hypothesis in high frequency bands of wave spectra in front of the vertical breakwater and pressure spectra at different heights. The power of frequency, ω , in $s(\omega) = \beta g^2 \omega^{-5}$ cannot vary essentially with the increase of the depth, but β decreases as the nondimensional parameter $Z\omega_{max}^2/g$ increases, where ω_{max} denotes the frequency of spectral peak.