

直立堤浮托力的概率特征*

黄培基 陈雪英 胡泽建

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

提要 本文基于 1987 和 1988 年夏季在古镇口港同步连续观测的波浪、波压力和浮托力资料, 分析研究了浮托力的概率特征、浮托力沿堤底面的变化及其谱特征。结果表明, 浮托力幅度和周期的累积分布实际上不随测点在堤底面上的位置变化, 可用公式表示。浮托力沿堤底面宽度近似呈线性衰减, 前趾浮托力最大, 后趾不为零, 呈梯形状。文中还给出了计算最大峰、谷总浮托力的方法。

关键词 直立堤 浮托力 概率特征

海浪对直立堤作用引起的堤底浮托力是关系到直立堤稳定性的重要因素。中国^[1]、日本^[2]、美国^[3]等的设计规范或手册中, 关于直墙式结构物浮托力的计算仍采用规则波的研究结果, 并以直墙前趾浮托力与墙底波压力相等, 后趾浮托力为零的三角形分布来计算总浮托力。但有些室内物模实验资料证实, 直墙后趾浮托力不为零, 呈梯形分布^[2,6]。自 60 年代末, 国内外开展了海浪与直立堤相互作用的观测研究工作。针对实测波压力的随机性, 用概率论方法对其分布规律进行了分析研究^[3,4,11,12], 然而关于浮托力的这种研究结果还没有见到。

1987 年和 1988 年夏季, 在古镇口港东防波堤上进行了海浪与直立堤相互作用的观测工作。测站设在该堤离岸 850m 的实验沉箱上, 此处基床高程 -11.0m, 潮差 3—4m。堤临海侧面不同高程上, 安装了波压力传感头, 堤底横断面不同距离上安装了浮托力传感头, 堤临海侧面上还安有接触式测波杆, 离堤 1000m 的外海处安放了超声波测波仪, 对堤面不同高程上的波压力、堤底面不同宽度上的浮托力、堤前海面波动和入射波进行同步连续记录。将实测资料进行了统计分析和谱估计。统计分析中, 浮托力幅度和周期与相应波浪分析中以上跨零点法定义的波高和周期的含义相同。谱估计采用了 Blackman-Tukey 的谱估计方法。本文基于上述的统计分析和谱估计结果, 研究了浮托力的概率特征、浮托力沿堤底面的变化及谱特征, 最后讨论了最大峰、谷总浮托力的计算。

一、直立堤浮托力的概率分布

深水条件下, 分析研究认为, 堤前波高、堤面不同高程上的波压力及峰、谷总压力的分布均遵循 Rayleigh 分布^[11,12]。浅水条件下, 近年来的分析研究表明, 堤面不同高程上的波压力幅度和波总压力幅度具有与堤前波高相同形式的分布, 符合以浅水因子和风浪成

* 国家自然科学基金资助项目, 编号: 4860223。

接受日期: 1991 年 3 月 28 日。

长阶段因子为参量的 Weibull 分布^[3,4]。为探讨直立堤浮托力的分布规律,我们将实测的浮托力记录进行了统计分析。

1. 堤底面不同宽度上浮托力幅度的累积分布函数

如上所述,浅水条件下,堤面不同高程上波压力幅度遵循下式的分布律^[3,4]:

$$F(P) = \exp \left[-\Gamma^{k(H^*, B)} \left(\frac{1}{K(H^*, B)} + 1 \right) \left(\frac{P}{\bar{P}} \right)^{K(H^*, B)} \right] \quad (1.1)$$

其中

$$K(H^*, B) = (5 - B)/(2 - 1.5H^*) \quad (1.2)$$

$$B = \begin{cases} \bar{C}/L = g\bar{\tau}/2\pi U, & \text{当 } \bar{C} \leq U \\ 1, & \text{当 } \bar{C} > U \end{cases} \quad (1.3)$$

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

式中, \bar{h} 为平均波高; $\bar{\tau}$ 为平均周期; \bar{C} 为平均波速; d 为水深; g 为重力加速度; H^* 为浅水因子; B 为风浪成长阶段因子,当 $B = 1$ 时,风浪达充分成长状态。显然,在 $H^* = 0$, $B = 1$ 时,即为 Rayleigh 分布。

浮托力幅度是否遵循(1.1)式分布? 为寻求实测浮托力反映何种分布,据实测浮托力连续记录资料,分别计算出每次记录的无因次浮托力幅度 (P_u/\bar{P}_u) 的累积率曲线,并确定出累积率为 1, 5, 10, 30, 50, 70, 90% 的无因次浮托力幅值。然后将上述各累积率之值,按(1.2)式计算出的相应 k 值点绘在图 1 上。由图 1 实测资料点距看,都与(1.1)式中相应计算的累积率值相接近。由此可认为,直立堤底面不同宽度上的浮托力幅度分布符合(1.1)式的分布律,且浮托力幅度分布不随堤面测点位置变化。

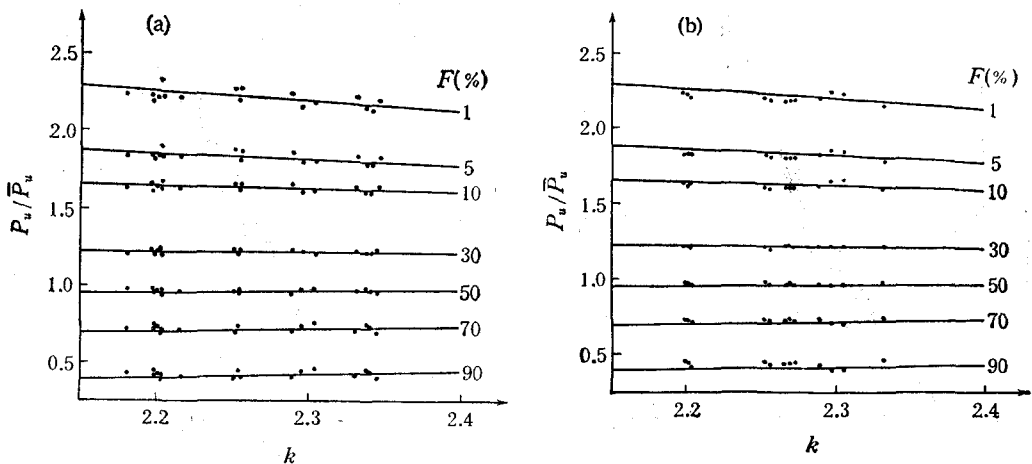


图 1 浮托力幅度实验累积分布(点)与按(1)式计算值(实线)的比较

Fig.1 Comparison of the empirical cumulative distribution (dots) of the fluctuation range of uplifting pressure with the value(line) calculated in Eq.(1.1)

(a) 堤底面 1 号点(临海侧); (b) 堤底面 4 号点(临港侧)。

2. 堤底面不同宽度上浮托力周期的累积分布函数

关于波浪周期的分布,早期不少作者,例如 Крылов^[10], Bretsencider^[7], 假定经典

流体力学中波长和周期的关系适用于海浪, 并认为波长(或周期平方)与波高一样遵循 Rayleigh 分布, 因而周期遵循下式的分布律:

$$F(\tau) = \exp\left[-\Gamma^4\left(\frac{5}{4}\right)\left(\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right)^4\right] \quad (1.4)$$

在有些以实测资料为基础讨论周期分布的文献中, 也认为可以用(1.4)式来逼近实测周期分布。Давидан 等人^[3]用 Weibull 分布

$$F(\tau) = \exp\left[-A\left(\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right)^k\right] \quad (1.5)$$

$$A = \Gamma^k\left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (1.6)$$

来拟合实测资料。经分析大量实测资料后, 他们认为波周期分布中指数 k 为 3 比为 4 更逼近实测经验分布。

为分析堤底面不同宽度上的浮托力周期分布, 将每次实测资料计算出无因次浮托力周期 $(\tau_u/\bar{\tau}_u)$ 实验累积分布, 并点绘成图 2。由图 2 看出, 所测资料的浮托力周期实验累积率点都基本上分布在(1.5)式中 $k=3$ 和 5 的两分布线之间。说明以(1.5)式描述浮托力周期分布是合适的, 但 k 值不能用一个常数, 这也与前述浮托力幅度分布一样, 随每次观测的条件(浅水因子和风浪成长阶段因子)不同, k 值会有变化, 它们之间的关系将有待进一步分析。

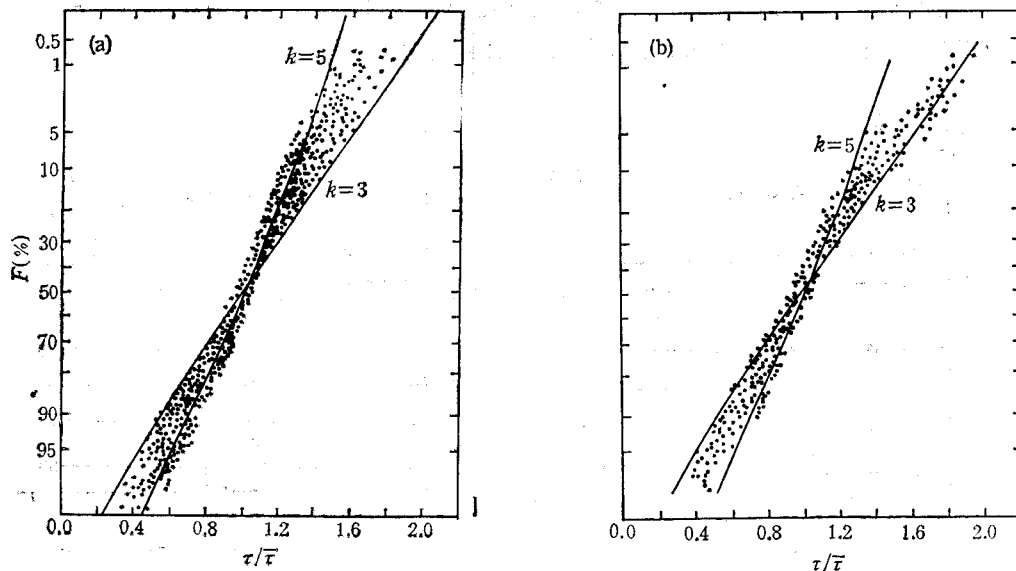


图 2 浮托力周期实验累积分布(点)与按(1.5)式中 $k=3$ 和 5 的计算值(实线)的比较

Fig.2 Comparison of the empirical period cumulative distribution (dots) of uplifting pressure with the value (line) calculated in Eq. (1.5) when $k=3$ and 5

(a) 堤底面 1 号点(临海侧); (b) 堤底面 4 号点(临港侧)。

3. 总浮托力幅度的累积分布函数

将堤底面不同宽度上的浮托力记录曲线, 经数字化离散后, 按同步求其面积和就可获

得总浮托力随时间的变化曲线。为分析总浮托力幅度 (R_u) 的分布特征,据 15 次实测浮托力资料求出每次实测无因次总浮托力幅度值。又以,每次实测的 H^* , B 值,按

$$F(R_u) = \exp \left[-\Gamma^{\frac{5-B}{2-1.5H^*}} \left(\frac{2-1.5H^*}{5-B} + 1 \right) \left(\frac{R_u}{\bar{R}_u} \right)^{\frac{5-B}{2-1.5H^*}} \right] \quad (1.7)$$

计算出上述各累积率的无因次总浮托力幅度值及其对实测值的相对差,并分别统计该相对差在给定范围($-5\% \sim +5\%$, $-10\% \sim +10\%$)内的出现率和相应累积率的最大相对差(表 1)。

表 1 各累积率相对差的出现率

Tab. 1 The occurrence probability of relative error for every cumulative probability

相对差	累积率(%)							
	1	5	10	20	30	50	70	90
$-5\% \sim +5\%$	96	100	100	100	100	100	98	96
$-10\% \sim +10\%$	100	100	100	100	100	100	100	98
最大相对差	5.65	4.45	3.57	3.30	1.72	-2.13	-5.50	-11.23

由表 1 看出,相对差在 $-5\% \sim +5\%$ 范围内的各累积率相应的出现率是很高的,最低为 96%,最大相对差的绝对值也不大于 11.23。因此,直立堤总浮托力幅度分布函数可用 (1.7) 式表示,并与海浪作用于直立堤上的波总压力幅度具有同一分布律^[3]。

二、直立堤浮托力沿堤底面宽度的变化及谱特征

直立堤浮托力沿堤底面宽度的变化关系到总浮托力的计算,但以实测资料分析其沿堤底面宽度的变化,前趾浮托力与堤底波压力之间的关系的研究结果还未见报道。我们据实测资料做了分析研究。

1. 堤底面同步浮托力的变化

浮托力为一随机量,且峰浮托力和谷浮托力对堤底面作用的方向恰相反。今将堤底面不同测点的每次同步记录,分别统计最大峰、谷浮托力 ($P_{u,\max}^{\pm}$)、十分之一峰、谷浮托力 ($P_{u,1/10}^{\pm}$)、三分之一峰、谷浮托力 ($P_{u,1/3}^{\pm}$) 以及峰、谷平均浮托力 (\bar{P}_u^{\pm}) 之值,并以每次堤前的有效波高 ($h_{\frac{1}{2}}$) 和海水的标准容重 (γ_0) 之乘积对上述各统计特征值进行无因次化处理,又将堤底面宽度变换成相对宽度 (\bar{L}) 为 1,绘成图 3。由图 3 可以看出,直立堤底面上同步无因次峰、谷特征浮托力以前趾最大,沿堤底面宽度近似呈线性衰减,但至后趾不为零,呈梯形状分布,且无因次谷特征浮托力稍大于无因次峰特征浮托力。

2. 前趾浮托力与堤底波压力的关系

表 2 给出了同步实测的前趾浮托力 (P_u) 和堤底波压力 (P_d) 的各特征值之比。由于现场堤底面 1 号测点离向海侧面尚有 0.8m 的距离,所以前趾浮托力值是按上述浮托

力沿堤底面宽度变化规律,依堤底面上各测点实测值,采用拉格朗日插值多项式外延求得的。

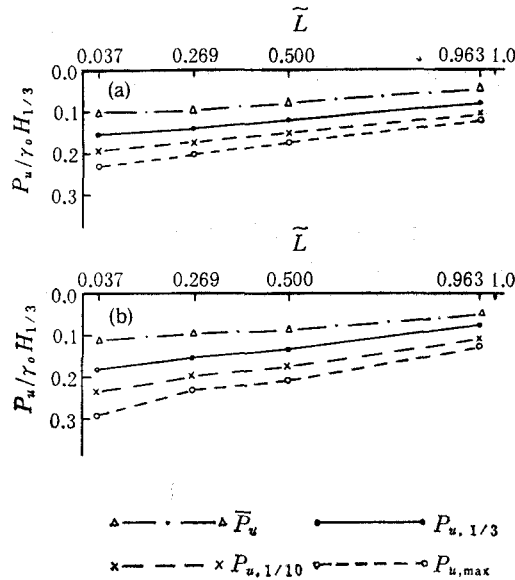


图 3 无因次峰 (a)、谷 (b) 特征浮托力沿堤底面的变化

Fig. 3 The variation of the characteristic values of the crest (a) and the trough (b) of nondimensional uplifting pressure along the bottom section of the vertical breakwater

表 2 前趾浮托力和堤底波压力之比值

Tab. 2 The ratio of the uplifting pressure at the fore toe to the wave pressure at the bottom of vertical breakwater

项 目	\bar{P}_d / \bar{P}_u		$P_{d,1/3} / P_{u,1/3}$		$P_{d,1/10} / P_{u,1/10}$	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
幅度	1.071	0.035	1.076	0.042	1.084	0.095
峰	1.047	0.038	1.041	0.024	1.043	0.043
谷	1.087	0.045	1.082	0.050	1.086	0.080

由表 2 看出,两者无论是幅度,还是峰、谷的各特征值之比均在 1.04—1.09 之间,说明堤底波压力微大于前趾浮托力。这也表明,目前直立堤设计中取前趾浮托力等于堤底波压力来计算,对堤的设计将是偏安全的。

3. 直立堤浮托力的谱特征

图 4 为一次实测浮托力资料谱估计结果的示例。由实测资料分析表明,总浮托力谱谱峰频率与堤底面不同宽度上的浮托力谱谱峰频率基本一致,其谱形也很相似。堤底面不同宽度上的浮托力谱谱峰频率基本相同,但其谱峰值随离临海侧面的距离增大而减小。值得指出的是,靠港侧面 4 号测点的浮托力谱,有时其谱的低频部的谱密度值比其它测点

浮托力谱大,这可能是有时受港内副振动影响所致。

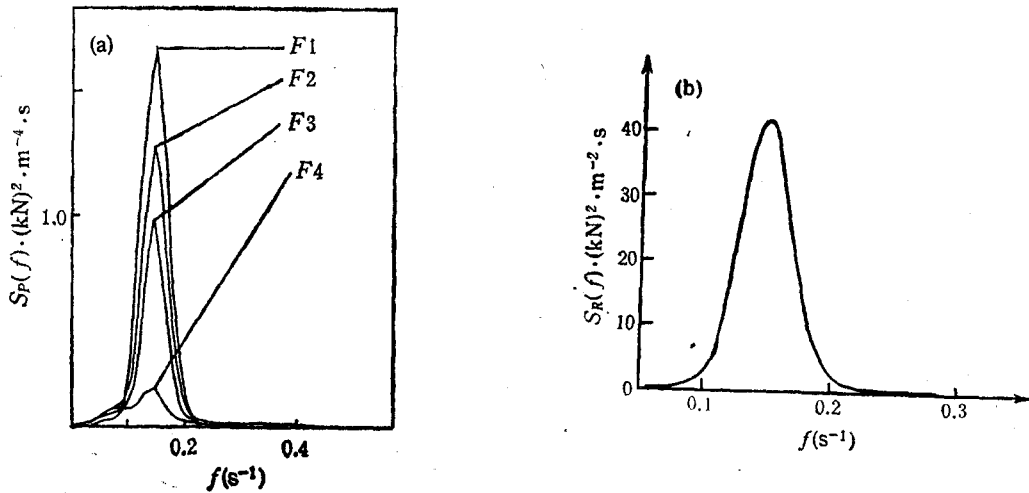


图4 1988年9月10日13:18时实测浮托力谱(a)、总浮托力谱(b)
Fig. 4 The spectra of uplifting pressure (a) and of total uplifting pressure (b)
observed at 13:18, Sept. 10, 1988

为实际计算浮托力和总浮托力的需要,我们检验了堤底面不同宽度上浮托力幅度平均值(\bar{P}_u)和总浮托力幅度平均值(\bar{R}_u)与浮托力谱零阶矩(m_{0P})和总浮托力谱零阶矩(m_{0R})之间的关系(图5)。

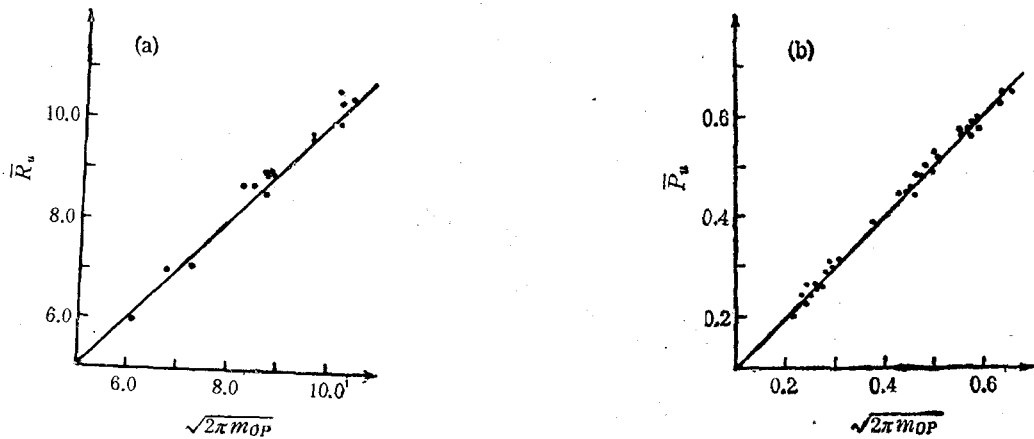


图5 浮托力(a)、总浮托力(b)平均幅度与相应谱零阶矩之关系
Fig. 5 Relation between the mean value of the fluctuation range of uplifting pressure (a)
and total uplifting pressure (b) and the zero-order moment of the corresponding spectrum

由图5可知,在一级近似下,理论关系

$$\bar{P}_u = \sqrt{2\pi m_{0P}} \quad (2.1)$$

$$\bar{R}_u = \sqrt{2\pi m_{0R}} \quad (2.2)$$

是适用的。

三、最大总浮托力的计算

实际工程设计的计算中,最关心的是当波峰、波谷击堤时的最大峰、谷总浮托力 (R_u^\pm)

表 3 由 \bar{R}_u 计算的 $R_u^{+,1\%}$ 和 $R_u^{-,1\%}$ 与实测值之比较(1988年)

Tab. 3 Comparison of $R_u^{+,1\%}$ and $R_u^{-,1\%}$ between the value calculated by \bar{R}_u and the observed value (1988)

观测 日期 时间	实 测			$R_u^{+1\%} (9.8 \times 10^3 \text{N/m})$				$R_u^{-1\%} (9.8 \times 10^3 \text{N/m})$			
	\bar{R}_u	$K(H^*,B)$	$R_{1\%}$	计算	实测	差($\pm\Delta$)	$\pm\Delta\%$	计算	实测	差($\pm\Delta$)	$\pm\Delta\%$
8月9日 08:20	7.1	2.20	16.0	7.5	8.5	-1.0	-11	8.5	9.7	-1.2	-12
8月9日 09:20	6.1	2.22	13.7	6.4	6.6	-0.2	-3	7.3	7.6	-0.3	-4
8月26日 16:00	7.0	2.21	15.8	7.4	7.5	-0.1	-1	8.4	8.6	-0.2	-2
9月10日 07:47	9.0	2.30	19.8	9.1	8.8	0.3	3	10.7	10.3	0.4	4
12:29	10.0	2.33	21.8	9.7	10.1	-0.4	-4	12.1	12.1	0.0	0.0
13:07	10.7	2.29	23.5	10.4	10.6	-0.2	-2	13.1	13.9	-0.8	-6
13:18	9.7	2.29	21.3	9.6	10.3	-0.7	-7	11.7	13.2	-1.5	-11
14:15	9.1	2.25	20.2	9.2	9.5	-0.3	-3	11.0	10.8	0.2	2
14:29	10.5	2.25	23.4	10.3	10.5	-0.2	-2	13.1	14.3	-1.2	-8
15:41	9.8	2.20	22.2	9.9	9.2	0.7	8	12.3	12.2	0.1	1
15:55	9.0	2.20	20.4	9.3	9.7	-0.4	4	11.1	11.6	-0.5	-4
16:09	8.7	2.20	19.7	9.0	8.4	0.6	7	10.7	10.2	0.5	5
16:20	9.1	2.20	20.6	9.3	8.9	0.4	4	11.3	11.2	0.1	1
16:33	8.8	2.20	19.8	9.1	8.7	0.4	4	10.7	10.0	0.7	7

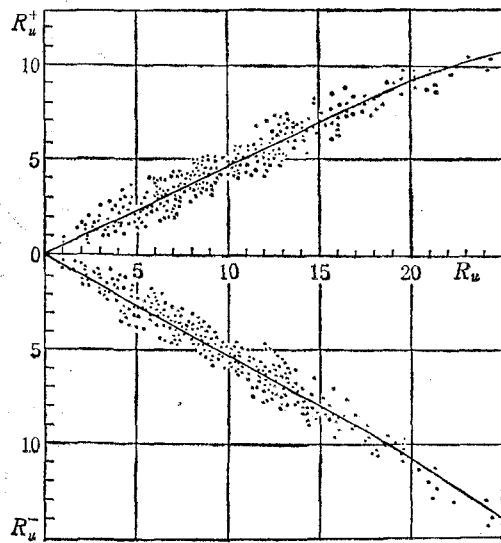


图 6 R_u^+, R_u^- 与 R_u 之间的经验关系

Fig. 6 The empirical relation between R_u and R_u^+, R_u^-

值。目前在实际的计算中都是取其累积率为1%之值作为最大峰、谷总浮托力之标准。

为计算峰、谷总浮托力之需要,利用实测浮托力记录计算出每次的总浮托力随时间的变化曲线,从中摘取 R_u^+ , R_u^- 与 R_u 之值点绘成图6。据实测资料求得它们之间的平均关系(图中的实线)。

由此,最大总浮托力的计算可归结如下:当已知总浮托力谱,可用(2.2)式由其谱的零阶矩计算出总浮托力幅度平均值 (\bar{R}_u),再以它的分布函数(1.7)式算出累积率为1%的总浮托力幅度值 ($R_{u,1\%}$),然后由图6求出峰 ($R_u^{+,1\%}$)、谷 ($R_u^{-,1\%}$) 总浮托力之值。

今以14次实测总浮托力幅度平均值,按上述过程计算出的最大峰、谷总浮托力值与实测最大峰、谷总浮托力值列于表3。由表3可知,计算的最大峰、谷总浮托力与相应实测值的最大相对差分别为11.0%和12.0%。因此,当总浮托力幅度平均值精确给定后,用上述方法计算出的最大峰、谷总浮托力值的精度是令人满意的。

四、小 结

1. 浅水条件下,直立堤底面不同宽度上浮托力幅度的累积分布实际上不随堤底面测点位置变化,符合(1.1)式分布律。作用于堤底面的总浮托力幅度的累积分布与作用于堤面上的总波压力幅度累积分布是一致的,其分布函数可用(1.7)式描述。

2. 浮托力周期的累积分布也不随堤底面测点位置变化,可用(1.5)式描述,但其指数 k 不为一常数,随每次观测的波浪条件不同而异,就分析的资料而言, k 值介于3—5之间。

3. 浮托力沿堤底面宽度近似呈线性衰减,前趾浮托力最大,后趾不为零,呈梯形状分布。实测堤底波压力微大于前趾浮托力,两者的比值为1.04—1.09。

4. 总浮托力谱与堤底面不同宽度上的浮托力谱谱形相似,其谱峰频率也基本一致。实测资料表明,总浮托力谱的零阶矩与总浮托力幅度平均值之可按线性波浪理论关系(2.2)式计算。

5. 该港实测资料验证表明,文中给出的计算最大峰、谷总浮托力的方法,其计算值与实测值间最大相对差分别为11.0%和12.0%,就实际工程设计的计算要求而言,是可用的。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部,1988,港口工程技术规范(1987)(上卷),人民交通出版社,720。
- [2] 水利系水道及港口专业浅水波浪研究组,1959,直立外堤断面的模型实验研究,大连工学院学刊,4: 95—113。
- [3] 黄培基,1982,作用于直立堤上的波总压力概率分布,海洋学报,4(6): 763—770。
- [4] 黄培基、赵炳来,1983,直立堤前波浪和波压力概率特征,海洋与湖沼,14(4): 367—376。
- [5] 日本运输省港湾局、港湾技术协会(王秀化等译),1983,日本港口设施技术标准,人民交通出版社,217。
- [6] 谷本胜利、高桥重雄、铃村谕司,1980,鹿岛港北海滨直立消波护岸の波压观测アヘタ解析,港湾技研资料,350: 1—30。
- [7] Bretschneider, C.L., 1963, A one dimensional gravity wave spectrum, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Easton USA, Not. Acad. Sci. N.Y., pp. 41—57。
- [8] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1975, Shore Protection Manual, Volume II, U.S. Government Printing Office, Washington, pp. 214。
- [9] Давидан, И.И. и др., 1978, Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс,

- Л. Гидрометеониздат, стр. 284.
- [10] Крылов, Ю. М., 1956, Статистическая теория и расчет морских ветровых волн, Ч. 1, *Труды ГОИН*, **33(45)**: 5—79.
- [11] Крылов, Ю. М., Цышлухин, В. Ф., 1973. Исследование вероятностной структуры поля волн и волновых давлений у глубоководной плотной преграды, *Океанология*, **13(2)**:203—209.
- [12] Крылов, Ю.М., В.Ф. Цышлухин, Э.Н. Крицова, 1973, Статистические характеристики морских волн у ограждающего мола вертикального типа в условиях больших глубин, *Труды Союз-морнишпроекта*, **34(40)**:16—27.

PROBABILITY CHARACTERISTICS OF UPLIFTING PRESSURE UPON A VERTICAL BREAKWATER

Huang Peiji, Chen Xueying, and Hu Zejian

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266003)

ABSTRACT

Simultaneous and continuous observations of wind waves, wave pressures and uplifting pressures upon the vertical breakwater in Guzhenkou Harbor were made in the Summer of 1987 and 1988. In this paper, based on the statistical and spectral analyses of the above-mentioned observation data and under the condition that there is no wave breaking in front of the vertical breakwater, studies on the characteristics of probability distribution of uplifting pressures and variation of synchronous uplifting pressures and its spectral characteristics along the bottom section of the vertical breakwater were carried out, then the calculation for the maximum crest and trough of the total uplifting pressure was discussed.

Results of analysis show that the cumulative distribution of the fluctuation range and the period for the uplifting pressures do not vary with positions for the measuring points on bottom section of the vertical breakwater which may be denoted by formulas, that the cumulative distribution of the fluctuation range for the total uplifting pressure is consistent with that for the total wave pressure upon the vertical breakwater, and that the uplifting pressure along the bottom section of the vertical breakwater appears linearly attenuated, i.e. maximum uplifting pressure at the fore toe, and not equal to zero uplifting pressure at the rear toe, of the vertical breakwater. The wave pressure actually measured at the bottom of the vertical breakwater is slightly greater than the uplifting pressure measured at the fore toe of the vertical breakwater. The verification of measured data indicates that the method given in this paper for calculating the maximum crest and trough of the total uplifting pressure is applicable as far as the need for the design calculation of the practical engineering concerned.

Key words Vertical breakwater, Uplifting pressure, Probability characteristics,