

渤海海浪波高群性特征的分析*

范顺庭 王以谋 王 涛

(中国科学院海洋研究所)

海面上的海浪经常有这种现象:几个波高较大的波一连串地相继出现,构成一个群,称为波群。波群不但有较大的能量,而且历时时间较长,因此有很大的破坏力,很多海上建筑物常常受其威胁或遭到破坏。

本文根据在渤海西部某石油平台上观测的海浪资料对该海域的波群进行了统计分析。观测所用的仪器是本所研制的 CBS-IV 型垂线测波仪。海浪传感器悬挂在石油平台下面,当地水深约 20m。每天观测 8 次,大风天气加测,有时每小时观测 1 次。本文分析所用海浪记录是平均波高大于 0.6m 的记录。

一、有关波群特征的一些定义

对任何一条海浪记录均可做出它的峰包线和谷包线,峰、谷包线间的铅直距离代表波高的变化。图 1 是海浪波群示意图,虚线是它的波包线,图中出现三个波群。以平均海平面以上某一高度 ρ_0 (水平) 做一条水平线与峰包线相交,交点为 a、b、c、……f。把时段 ab、cd、ef 称为在水平 ρ_0 下的波群历时长度(简称波群长度或群长),分别用 t_1 、 t_2 、 t_3 表示。时段 ac、ce 称为波群重复出现的历时长度(简称波群重复出现长度),分别用 T_1 、 T_2 表示。波群历时长度和波群重复出现长度都可视为随机变量,这对研究会有很多方便。研究波群特征主要是研究波群的平均历时长度和波群平均重复出现长度,以及它们的出现率;因为波群多伴随大波出现,所以还要研究波群中的最大波群性特性。这些研究都属波高群性特征的研究。

二、在统计意义下导出的波群特征

如果波列中每一个波都看成是各自独立、互不相关的波浪系列,那么,在水平为 ρ_0 下的波群长度就可以用波群内包含的波个数的多少来做为波群长度的量度,称之为波群连长,如图 1 的 l_1 、 l_2 、 l_3 等。同样,把波群连长的第一个波开始到下一个波群连长的第一个波结束中间包含的波的个数称为波群连长重复长度(简称波连重复长度),如图 1 的 L_1 、 L_2

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2944 号。
收稿日期:1996 年 7 月 26 日。

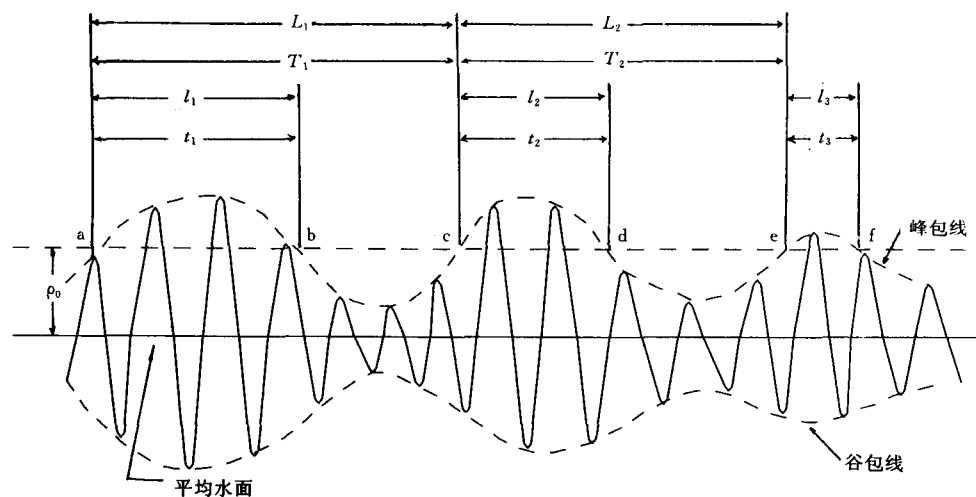


图 1 窄带谱情况下波群历时长度和波群波长示意图

ρ_0 ——水平高度; a、b、c、d、e、f——水平线 ρ_0 与峰包线的交点; t_1, t_2, t_3 ——波群长度;

l_1, l_2, l_3 ——波连长度; T_1, T_2 ——波群重复长度; L_1, L_2 ——波连重复长度

等。波群连长和波群连长重复长度都可以用波高系列来表示,如图 2。相应地把图 2 中的 l_1, L_1 称为波高连长和波高连长重复长度。连长与连长重复长度以波的个数来记,为了叙述方便,下文中不再标述这个单位。当给定某一水平的波高时,波高连长和波高连长重复长度也就随之确定了(见图 2)。本文得到的结果是波高连长和波高连长重复长度的统计结果,是按波高系列分析得到的。

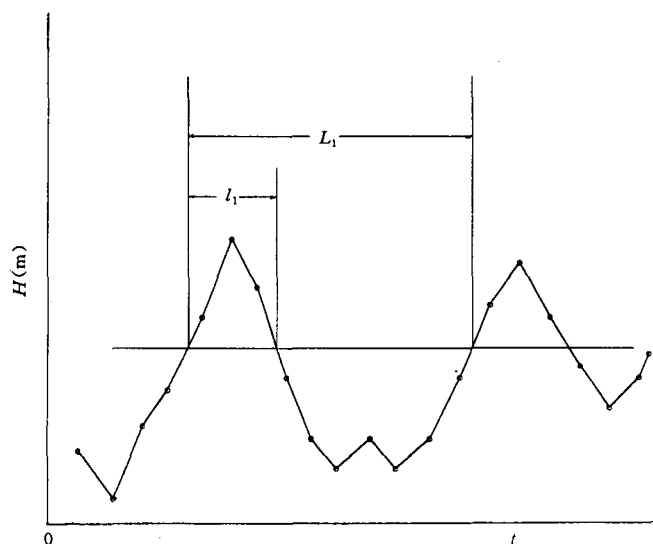


图 2 波高连长和波高连长重复长度

l_1 ——波高连长; L_1 ——波高连长重复长度

由波高相互独立的假定,波高连长为 j 的波群出现的概率 $P_l(j)$ 可表示为(文圣常等, 1989)

$$P_l(j) = (1 - p)p^{j-1} \quad (1)$$

因此可通过式(1)计算波高连长的平均值 $\bar{l}$ 和它的均方值 $\bar{l}^2$

$$\bar{l} = \sum_{j=1}^{\infty} jP_l(j) = \frac{1}{1-p} \quad (2)$$

$$\bar{l}^2 = \sum_{j=1}^{\infty} j^2 P_l(j) = \frac{1+p}{(1-p)^2} \quad (3)$$

由此可得到它的标准偏差 σ_l

$$\sigma_l = \sqrt{\bar{l}^2 - (\bar{l})^2} = \frac{\sqrt{p}}{1-p} \quad (4)$$

波高连长重复长度为 j 的概率 $P_L(j)$ 可表示为

$$P_L(j) = \frac{p(1-p)}{2p-1} [p^{j-1} - (1-p)^{j-1}] \quad (5)$$

同样可以得到波高连长重复长度的平均值 $\bar{L}$ 和它的标准偏差 σ_L

$$\bar{L} = \frac{1}{p} + \frac{1}{1-p} = \frac{1}{p(1-p)} \quad (6)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{p}{(1-p)^2} + \frac{(1-p)}{p^2}} \quad (7)$$

如果波高按 Rayleigh 分布理论来讨论,则理论上波高超过有效波高的概率是

$$P(H > H_{1/3}) = 0.1346 \quad (8)$$

将式(8)的值代入式(2)和式(4)可得到 $\bar{l} = 1.16, \sigma_l = 0.42$ (见表 1 的理论计算)。将式(8)的值代入式(6)和式(7)可得到 $\bar{L} = 8.57, \sigma_L = 6.91$ 。

事实上,实际的海浪并不是像所假定的那样波列中的波各自独立互不相关,所以上述的理论结果并不一定符合实际。从已发表的文章看,理论结果小于实际统计的结果。

三、渤海波群的统计分析

对渤海波群,我们选取平均波高大于 0.6m 的 120 条海浪观测资料对波群做了统计分析。下面是统计分析结果。

1. 波群的连长

在我们的分析中,波群连长是用波高连长表示的,其结果是波高连长的统计结果。表 1 列出了渤海西部在有效波高 $H_{1/3}$ 的水平(即 $\rho_0 = H_{1/3}$)下所做的统计结果,同时还列出了其他海区已有的统计结果和合田(1976)就日本近海所做的统计结果,以及按波高服从 Rayleigh 分布所做的理论结果。

表 1 波群连长统计表

海 区	连 长	1	2	3	4	5	6	7	8	合计	平均连长	标准差
渤海西部 (资料数量:120 组)	出现次数	483	169	60	26	8	1	2	0	749	1.56	0.59
	出现频率(%)	64.49	22.56	8.01	3.47	1.07	0.13	0.27	0.0	/	/	/
胶州湾 (资料数量:854 组)	出现次数	617	166	50	14	2	4	1	0	854	1.4	0.78
	出现频率(%)	72.2	19.4	5.9	1.6	0.23	0.47	0.12	0	/	/	/
连云港 (资料数量:100 组)	出现次数	1595	478	130	36	9	4	2	1	2255	1.41	0.76
	出现频率(%)	70.7	21.1	5.8	1.6	0.46	0.17	0.09	0.04	/	/	/
日本近海 (资料数量:171 组)	出现次数	1327	374	122	37	9	2	1	0	1872	1.42	0.77
	出现频率(%)	70.9	20.0	6.5	2.0	0.48	0.11	0.05	0.0	/	/	/
理论计算	出现次数	1931.3	262.8	35.4	4.8	0.6	0	0	0	2255	1.16	0.42
	出现频率(%)	86.5	11.7	1.6	0.21	0.03	0.0	0.0	0.0	/	/	/

从表 1 看到,连长为 1 的波群在渤海西部出现的频率比其他海区小,更小于理论值。连长大于 1 的波群在渤海西部出现的频率一般比其他海区都大,也大于理论值。在渤海西部波群的平均连长都大于上述其他几个海区,也大于理论值。

2. 波群连长的重复长度

表 2(a)列出了渤海波群连长出现的重复长度的统计结果,同时列出了胶州湾已有的统计结果,表 2(b)还列出了连云港已有的统计结果。

表 2(a) 波群连长重复长度统计结果

海 区	重复长度	2—5	6—9	10—13	14—17	18—21	22—25	≥26	合计	平均长度	标准差
渤海西部	出现次数	201	175	101	64	31	32	25	629	9.95	0.76
	出现频率(%)	32.8	27.8	16.1	10.1	4.9	5.1	4.0	/	/	/
胶州湾	出现次数	218	178	104	71	48	42	101	784	12.80	11.7
	出现频率(%)	31.6	21.7	13.3	9.1	6.1	5.4	12.9	/	/	/

表 2(b) 波群连长重复长度统计结果(连云港)

重复长度	7—8	8—9	9—10	10—11	11—12	12—13	13—14	14—15	15—16	合计	平均连长	标准差
出现次数	3	14	33	19	18	7	4	1	1	100	10.38	1.54
出现频率(%)	3	14	33	19	18	7	4	1	1	/	/	/

合田(1976)就日本近海求得的波群连长的重复长度是 $\bar{L}=10.71$ 。从表 2 看,渤海西部波群的重复长度小于其他海区,与理论值较接近(前面已述理论结果 $\bar{L}=8.57$)。

3. 包含最大波高 $H_{\max}$ 的波群连长

这里所说的最大波高 $H_{\max}$ 是指在一次观测中波高出现的最大值。表 3 列出了包含最大波高的波群连长的统计结果。

表 3 包含最大波高的波群连长统计表

海 区	连 长	1	2	3	4	5	6	7	8	合计	平均连长	标准差
渤海西部 (资料数量:120 组)	出现次数	37	39	21	11	5	1	2	0	116	2.03	0.58
	出现频率(%)	31.9	33.6	18.1	9.5	4.3	0.9	1.7	0.0	/	/	/
胶州湾 (资料数量:854 组)	出现次数	22	25	13	6	0	3	1	0	70	2.29	1.34
	出现频率(%)	31.4	35.7	18.6	8.6	0	4.3	1.4	0	/	/	/
连云港 (资料数量:100 组)	出现次数	38	31	14	9	3	2	2	1	100	2.27	1.51
	出现频率(%)	38	31	14	9	3	2	2	1	/	/	/
日本近海 (资料数量:171 组)	出现次数	43	62	39	19	5	2	1	0	171	2.36	1.18
	出现频率(%)	25.1	36.3	22.8	11.1	2.9	1.2	0.6	0.0	/	/	/
理论计算	出现次数	86.5	11.7	1.6	0.2	0	0	0	0	100	1.16	0.42
	出现频率(%)	86.5	11.7	1.6	0.2	0	0	0	0	/	/	/

从表 3 看出,在渤海西部,包含最大波高 $H_{\max}$ 的波群连长可达到 7,出现率最大的是连长为 2 的波群,其次是连长为 1 的波群,然后随着连长的增大出现率越来越小。

近年来,海洋学者常用 Weibull 分布来描述海浪波高的分布,并在海浪研究领域不断扩大其应用范围。这里我们也用实测的波高数据按三参数的 Weibull 分布

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (9)$$

拟合了波高的概率分布曲线(见图 3),得到的分布函数是

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-0.01}{1.06789}\right)^{1.75886}\right] \quad (10)$$

图 3 中带 * 号的曲线是实测波高的统计结果。从图 3 可看到,所拟合的理论曲线与实测统计结果十分一致。

为了计算在 Weibull 分布下波高连长的平均值,我们计算了 $H_{1/3}$ 波高相对于平均波高的无维波高值,并统计了无维波高的平均值,结果为 1.631(图 3 中 c 点的横坐标),它所对应的概率值是 0.1245(图 3 中 c 点的纵坐标)。如同应用 Rayleigh 分布一样,把这个概率值代入公式(2)和式(4)可得到:

$$\bar{l} = 1.142, \quad \sigma_l = 0.403,$$

再将此值代入式(6)和式(7)就可得到:

$$\bar{L} = 9.17, \quad \sigma_L = 7.526$$

比较利用 Rayleigh 分布得到的结果和利用 Weibull 分布得到的结果可以看到,就平均连长 $\bar{l}$ 而言,后者的结果小于前者的结果;就平均重复长度 $\bar{L}$ 而言,后者的结果大于前者的结果。

从以上分析看到,无论利用 Rayleigh 分布还是利用 Weibull 分布,得到的平均连长的理论值都小于实际的统计值。分析波群连长的理论值小于实际统计值的原因,除了相邻的波高之间存在弱相关外[如 Rye(1974)得到的相邻波高间的相关系数平均为 0.24],在我们做连长统计时,对每一条资料两端的波连(认为是不完整的波连)不统计其连长,对于有限的资料,这就可能增大连长的平均值,致使实际统计的平均连长大于理论计算的连长。

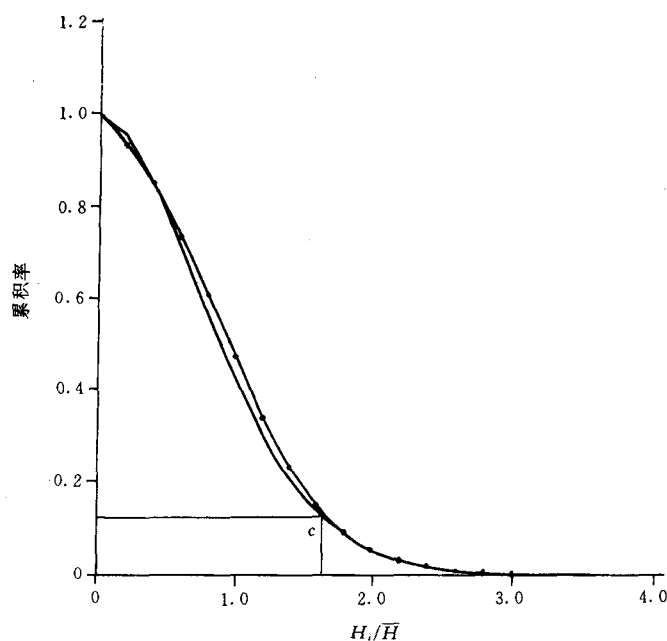


图 3 波高分布图

c ——波高为 1.631 与概率为 0.1245 的交点

四、以谱矩估计的波群特征

基于波包络理论,波浪的群性特征还可以通过谱的矩来估计(文圣常,1984),水平为 ρ_0 (这里 ρ_0 取 $\frac{1}{2}H_{1/3}$)的波群平均历时长度可通过下式得到

$$\bar{\tau}(\rho_0) = \sqrt{\frac{2\pi}{\mu_2} \frac{m_0}{\rho_0}} \quad (11)$$

式中 m_0 为谱的 0-阶原点矩, μ_2 为谱的 2-阶中心矩,谱的 K -阶原点矩和 k -阶中心矩由下式计算

$$m_k = \int_0^{\infty} \omega^k S(\omega) d\omega = (2\pi)^k \int_0^{\infty} f^k S(f) df \quad (12)$$

$$\mu_k = \int_0^{\infty} (\omega - \langle \omega \rangle)^k S(\omega) d\omega = (2\pi)^k \int_0^{\infty} (f - \langle f \rangle)^k S(f) df \quad (13)$$

式中 $\langle \omega \rangle = 2\pi \langle f \rangle = \frac{m_1}{m_0}$, $\langle f \rangle$ 为平均频率。

波群历时长 $\tau(\rho_0)$ 除以平均周期 T 就可以得到波群的平均连长。波群平均连长的计算公式是

$$\bar{l} = \sqrt{\frac{m_2}{2\pi\mu_2}} \frac{\sqrt{m_0}}{\rho_0} = \frac{\sqrt{\frac{m_0 m_2}{2\pi\mu_2}}}{\rho_0} \quad (14)$$

波群连长的重复长度计算公式为

$$\bar{L} = \sqrt{\frac{m_2}{2\pi\mu_2}} \frac{\sqrt{m_0}}{\rho_0} \cdot \exp\left(\frac{\rho_0}{2m_0}\right) = \bar{l} \exp\left(\frac{\rho_0}{2m_0}\right) \quad (15)$$

由于不同海区的海浪有不同的谱特征,而且谱宽度 ϵ 也不完全相同,海洋学家又导出了在不同谱宽度下波群连长的计算公式。

对窄带谱,Ewing(1973)给出了如下计算公式

$$\bar{l} = \frac{Q \sqrt{\frac{m_0}{2}}}{\rho_0} = \frac{Q}{\rho_0} \sqrt{\frac{m_0}{2}} \quad (16)$$

$$\bar{L} = \frac{Q \sqrt{\frac{m_0}{2}}}{\rho_0} \exp\left(\frac{\rho_0^2}{2m_0}\right) = \frac{Q}{\rho_0} \sqrt{\frac{m_0}{2}} \exp\left(\frac{\rho_0^2}{2m_0}\right) = \bar{l} \exp\left(\frac{\rho_0^2}{2m_0}\right) \quad (17)$$

式中 Q 为谱的尖度参数,由下式定义

$$Q = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (18)$$

对中等宽带的谱,Ewing(1973)给出了如下计算公式

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} \sqrt{\frac{m_2}{2\pi\mu_2}} \cdot \frac{\sqrt{m_0}}{\rho_0} \quad (19)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} \sqrt{\frac{m_2}{2\pi\mu_2}} \cdot \frac{\sqrt{m_0}}{\rho_0} \exp\left(\frac{\rho_0^2}{2m_0}\right) = \bar{l} \exp\left(\frac{\rho_0^2}{2m_0}\right) \quad (20)$$

式中谱宽度参数 ϵ 由下式计算

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (21)$$

对宽带谱,合田(1976)给出了如下计算公式

$$\bar{l} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)} \quad (22)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)} + \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right) \quad (23)$$

式中 $k = \frac{\rho_0}{\sqrt{m_0}}$

合田(1976)指出,用波群的平均历时长度除以平均周期来表示波群的平均连长时,在宽带谱的情况下,由于波形变化急剧,波群的历时长度较短,用上述方法得到的连长或平均连长可能会小于1。在分析波群时,波个数以整数计算,所得连长或平均连长应大于1,为此,经合田修正后的连长公式为

$$l' = \frac{1}{1 - \exp(-\frac{1}{i})} \quad (24)$$

五、渤海西部的波谱模式及其在波群分析中的应用

我们应用上述理论公式对渤海西部的波群也做了分析。下面陈述分析结果。

公式(11)–(23)涉及到三个参量,它们是波谱的矩和谐宽度及谱尖度。由于不同时刻的海浪有不同的谱矩,要对每一条海浪观测资料做谱分析求得上述三个参数会给分析工作带来诸多麻烦,因此,我们根据多年的观测资料和它们的谱分析结果,找到了渤海西部海浪谱的一个通式,利用它可达到预期的结果,这个通式的表达式为

$$S(\omega) = 0.484 H^2 \bar{T} (\frac{\omega}{\omega_m})^{-6} \exp[-(\frac{\omega}{\omega_m})^{-5}] \quad (25)$$

式中 H 为十分之一大波的平均值 $H_{1/10}$, $\bar{T}$ 为平均周期, ω_m 为谱峰值频率。

为了表明通式的实用性,图4给出了一个实例进行比较。图中的实线为实测资料的分析结果,虚线为用通式所得计算结果。从图中可以看出,两者符合得相当好。利用通式(25)和渤海西部海浪的平均状况可以计算得到渤海西部在平均状况下的波谱特征,进而可计算出波谱的矩,由此得到渤海西部波群的统计特征。

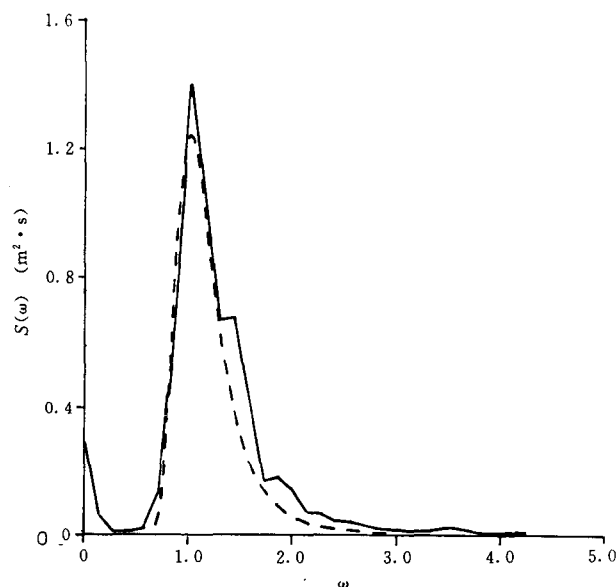


图4 波谱图

我们对120组海浪资料的 $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ 波高和平均周期 $\bar{T}$ 做了统计平均,得到了它们的平均值,将这些值代入公式(25),就可得到在平均状况下的谱值和矩,再根据连长公式,得到所要计算的连长。

表3是根据谱矩计算的结果。各阶矩由公式(25)计算得到,平均历时长度 $\bar{\tau}(\rho_0)$ 按公

式(11)计算, $\bar{l}$ 、 $\bar{l}'$ 按公式(14)和(24)计算,连长重复长度 $\bar{L}$ 按公式(15)计算。

表4 波群的历时长度、连长与连长重复长度

	I	II	III
$\bar{\tau}(\rho_0)$	4.1565	4.0787	3.9863
$\bar{l}(\rho_0)$	0.6042	0.8041	0.7859
$\bar{l}'(\rho_0)$	1.24	1.41	1.39
$\bar{L}(\rho_0)$	9.9	8.1	8.7

其中 I 是用一条观测资料(1992 年 4 月 5 日 20 时)计算得到的结果; II 是用该组资料统计得到的 $H_{1/10}$ 和 $\bar{T}$ 代入式(25),再求其矩得到的结果; III 是以全部 120 组资料得到的 $H_{1/10}$ 和 $\bar{T}$ 的平均值,再代入式(25),然后求其矩得到的结果。

从表 4 可看到, I、II、III 所表示的波连的各种长度特征在数值上大致相近,而 II 和 III 的值基本一致。I 表现有个例的特征,但与 II 和 III 相差不大。比较表 3 与表 1 可知,由实测记录得到的连长是 1.56,表 3 中的计算值为 I: $\bar{l}'(\rho_0)=1.41$; II: $\bar{l}'(\rho_0)=1.39$,两者比较接近;由实测记录得到的连长重复长度是 $\bar{L}(\rho_0)=9.95$,表 3 中的计算值是 II: $\bar{L}(\rho_0)=8.1$; III: $\bar{L}(\rho_0)=8.7$,两者也相差不大。由此可见,通过式(25)得到的连长特征可以反映渤海西部的波群特征。

作为公式(19)——(23)(带有谱宽度参数 ϵ)的一个应用,我们用 $H_{1/10}$ 和 $\bar{T}$ 得到的统计平均值通过式(25)可以得到 ϵ ,所得结果是 $\epsilon=0.54$ 。由于宽谱和窄谱没有一个确切的数量概念,如果把 $\epsilon>0.5$ 的谱视为宽谱(常德馥,1987),则由公式(22)和(23)计算得到的 $\bar{l}=1.19$, $\bar{L}=7.48$,与实际统计的结果比较接近。由此可见,在宽谱情况下,渤海西部波群连长的理论值与实测统计值比较接近。

六、结论与讨论

1. 本文对渤海西部海域的海浪波群进行了分析。从对海浪实测记录的分析结果看,渤海西部的波群连长为 1 的波群出现的频率比其他海区(如胶州湾、连云港)小,而连长大于 1 的波群出现的频率比其他海区大,可以说渤海西部波群是多发区。

2. 在统计意义下,按波高的概率分布得到的连长,不管按何种分布形式(如 Rayleigh 分布、Weibull 分布),理论值都小于实测值;连长重复出现长度,渤海西部小于其他海区,与理论值比较接近。

3. 在实际应用中,不可能用大量的波浪资料来统计得到每个海区海浪的波群连长特征,从我们的分析看到,如果能知道海区的波谱模式和该海区海浪的平均状况,也可以得到该海区海浪的波群连长特征。

4. 一般认为当谱宽度参量 $\epsilon \rightarrow 0$ 时,相应的波谱为窄带谱;当 $\epsilon \rightarrow 1$ 时,相应的波谱为宽带谱。从我们的分析及对胶州湾波群的分析(常德馥,1987)看到,如果把 $\epsilon>0.5$ 的谱视为宽谱,则表 2 中的结果(宽谱)比较接近实际统计的结果,即是说理论值与实测值比较一致。在实际的海浪中, $\epsilon \rightarrow 0$ 和 $\epsilon \rightarrow 1$ 的波谱基本不会出现。

参 考 文 献

- 文圣常等, 1984, 海浪理论与计算原理, 科学出版社, 206—208。
常德馥, 1987, 胶州湾波群的统计分析, 海岸工程, 6(1): 37—43。
葛明达, 1986, 连云港的波群统计分析, 黄渤海海洋, 4(2): 9—14。
合田良富, 1976, 波の连りの统计的性质について, 港湾技术研究所报告, 15(3): 3—19。
Ewing, J. A., 1973, Mean length of runs of high waves, *J. Geophys. Res.*, 78(12): 1933—1936。
Rye, H., 1974, Wave group formation among storm waves, *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.* 1(7): 164—183。

STATISTICAL ANALYSIS OF WAVE GROUP IN THE WEST OF BOHAI SEA *

Fan Shunting, Wang Yimou, Wang Tao

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

ABSTRACT

This paper reports results of study on the wave groups in the west of the Bohai Sea by statistical analysis, using data from wave observation records on an oil platform in that area. The analysis showed that, in the west of the Bohai Sea, wave groups average length 1.56 waves; that in average, 9.95 waves reappear; and that the length of a wave group including the maximum wave can reach 7 waves, average length of 2.03 waves. Comparison of the above results with those observed in Jiaozhou Bay, Lianyungang Bay etc., and results obtained from Rayleigh distribution and Weibull distribution that the average length of wave groups in the west of the Bohai Sea is larger than that observed in Jiaozhou Bay and Lianyungang Bay, and even larger than the calculated length. The average reappearance length of wave groups are less than those observed in Jiaozhou Bay and Lianyungang Bay.

* Contribution No. 2944 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.