



基于实测数据的最大波高公式探究*

文 铖^{1,2}, 陶爱峰^{1,2}, 李 硕², 颜 晋², 曹广随²

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在海岸及海洋防灾减灾以及设计波浪的推算中, 最大波高的计算是至关重要的。基于瑞利分布的最大波高公式, 不能体现谱宽因素的影响, 由该公式得出的理论最大波高要高于实际值。通过分析挪威海 10 年实测波浪定点观测数据, 发现随着谱宽的增加, H_{\max}/H_s 逐渐减小, 并拟合出包含谱宽参数的最大波高公式, 简单易用, 实用性强。

关键词: 最大波高; 实测; 谱宽; 公式

中图分类号: U 652. 3; P 731. 33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)06-0023-05

DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2017.06.004

The research of maximum wave height formula based on the measured data

WEN Cheng^{1,2}, TAO Ai-feng^{1,2}, LI Shuo², YAN Jin², CAO Guang-sui²

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The maximum wave height is significantly important for the prevention of coastal and marine disaster as well as for the calculation of design wave. The maximum wave height formula based on the Rayleigh distribution can not reflect the influence caused by spectral width. Thus, the theoretical value of maximum wave height obtained by that formula is higher than the real value in practice. Through analyzing the 10-years' measured data of Norwegian Sea, we find that H_{\max}/H_s decreases gradually with the increase of spectral width. A maximum wave height formula with spectral width as an influence factor is deduced, which is easily to use and has good practicality.

Keywords: maximum wave height; measured data; spectral width; formula

在海岸及海洋防灾减灾中以及设计波浪的推算中, 最大波高的计算是至关重要的。为计算出海浪的最大波高, 前人分别通过理论推导和实测数据分析得到最大波高公式。Longuet-Higgins^[1]最早给出基于瑞利分布的最大波高公式:

$$H_{\max}^* = \left(\frac{\ln N}{2} \right)^{1/2} H_s \quad (1)$$

式中: H_{\max}^* 为理论最大波高; N 为统计时间段内的实测波数; H_s 为有效波高。该最大波高的计算公式是基于瑞利分布得到的理论公式, 而瑞利分布是基于窄谱条件下假设得到的, 因此它不能体现

海浪谱宽对波高统计分布的影响, 从而与观测的分布有一定的偏离, 所以对最大波高的公式的改进就十分有意义。

目前已有研究者从谱宽对波面高度分布以及海浪波高分布的影响进行理论研究, 这些分布公式对最大波高公式的研究具有很好的参考价值。Naess^[2]发现谱宽对最大波高的估值有显著影响, 丁平兴等^[3]提出包含谱宽参数的波面高度分布公式, 侯一筠^[4]提出包含谱宽参数的波高分布公式, 但已有的非线性公式, 表达式复杂、计算麻烦, 或其中有关参数不便确定, 因此在实际问题中仍

收稿日期: 2016-12-01

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579091, 41106001)

作者简介: 文铖 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事水波动力学研究。

很少应用，对最大波高的推算仍有困难。仅有 Ochi^[5] 推导出当谱宽 $\varepsilon < 0.9$ 且 N 较大时， N 个系列波的包含谱宽参数的最大波高公式。

在实测数据分析方面，通过对墨西哥湾海浪记录的分析，Forristall^[6] 建议采用一个经验修正系数带入基于瑞利分布得到的最大波高公式，使得波高的分布更加吻合威布尔分布。Feng^[7] 在 Forristall 的基础上结合挪威海数据提出一个新的含有 H_s 的经验拟合公式。已有的基于实测数据分析得到的最大波高公式，均未考虑谱宽因素影响，对最大波高的公式改进具有明显的不足。

本文通过分析挪威海定点 10 年的船测波面资料，对每组波面数据进行处理，从理论角度结合谱宽因素进行分析，得出改进后的最大波高公式，对海浪预报、海洋防灾减灾等具有重要的指导意义。

1 数据分析

为了结合谱宽因素分析最大波高公式，结合挪威海定点 10 年的海洋气象船 Polarfront 测得的波面资料，得到最大波高公式。海洋气象船 Polarfront 位于海洋气象站 Mike (OWS Mike, 66°N, 2°E, 水深 2 000 m, 图 1)，该区域位于深水区，可以忽略水深对最大波高的影响。英国国家海洋研究所在 1950 年开发出 SBWR 方法来测量海洋表面高程，通过利用平台的水面跟踪性能来捕捉长波，利用船体上的压力传感器来测量短波。

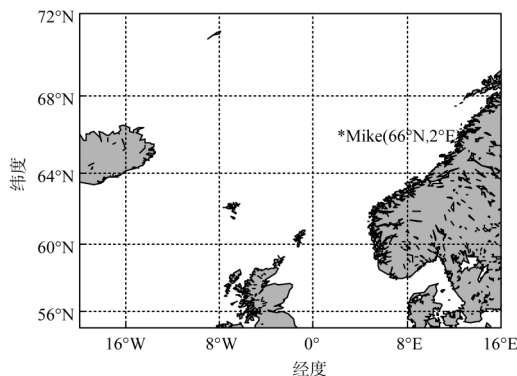


图 1 海洋气象站 Mike

SBWR 系统记录了在 2000—2009 年这 10 年里每个周期的海面高程，具有很好的连续性。其中在 2004 年的第 250 d 以前，采样周期为 90 min，每次采样持续 30 min，采样周期内每 0.59 s 采样一次，此后，采样周期为 45 min，采样时间不变。Feng 对挪威海定点 10 年的船测波面资料进行了数据质量监管，删除可疑数据，本文所有分析都是基于 Feng 处理后的数据。

本文通过上跨零点法得到每笔数据的 30 min 内最大的波高，定义为 H_{max} 。同时定义有效波高 H_s 如下式：

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2)$$

式中： m_0 为谱的零阶矩，其采样频率范围为 0.04~0.50 Hz。

2 最大波高公式

目前已有研究者从谱宽对波面高度分布以及海浪波高分布的影响进行理论研究，波面高度分布以及海浪波高分布对最大波高的推算具有重要的指导作用。

Huang^[8] 利用 Stokes 展开，导出深水波面高度分布公式，见式 (3)。同时 Huang 等引入显著斜率 ξ ，定义 $\xi = \sigma/\lambda$ 。其中， σ 是为波面高度均方差； l 为对应于功率谱峰值频率的波长，因为 $\lambda = 2\pi/k$ ，故 $k\sigma = 2\pi\xi$ 。于是，深水波面高度分布仅依赖于 σ 和 ξ 两个参数。丁平兴等考虑到 Huang 在推导式 (3) 时做的窄谱假定以及该实验风浪的谱宽度大部分超出 0.5 的事实，为使该分布能较好地拟合实验结果，用 $(1-\varepsilon)\xi$ 取代 ξ ，理论结果与实验更为符合，其中 ε 为谱宽度。公式中 $P(\eta)$ 和 k 分别为深水波面高度分布、统计波数，不过 H_η 、 J_η 、 N 、 R 参数计算复杂，不易在实际中运用。

$$P(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}H_\eta} \left[\frac{J_\eta}{\sqrt{R}} + \frac{9}{8} \cdot \frac{k^2 \sigma^2}{NR^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3)$$

侯一筠采用风浪谱参量化的方法将随机波面无因次化，把波面与波高概率分布的各阶矩展开为谱宽度根方的幂级数，并由此导出波面与波高的统计分布。在准确至 β^3 阶时，波高累积率函数如下：

$$F(H) = (1-\alpha) e^{-\frac{H^2}{8\beta^2}} + \alpha e^{-\frac{H^2}{8(\beta^2+\gamma\beta^3)}} \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{B} \quad B = \frac{m_0}{f_p S(f_p)} \quad (5)$$

式中: f_p 为谱峰频率; $S(f_p)$ 为谱峰频率处对应的谱值; B 为谱宽度参量; α 、 γ 为需要确定的参数。

以上两种改进后的分布公式, 表达式复杂, 计算麻烦, 或其中有关参数不便确定, 因此在实际问题中仍很少应用, 对最大波高的推算仍有困难。

当考虑谱宽对最大波高的影响时, Ochi 推导出当谱宽 $\varepsilon < 0.9$ 且 N 较大时, N 个系列波的最大波高和谱宽参数 ε 的关系, 见式 (6)。在此公式中, 当谱宽为 0 时, 等于基于瑞利分布得到的最大波高公式。

$$H_{\max} = 2 \left[2 \ln \left(\frac{2\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1+\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot N \right) \right]^{1/2} \cdot \sqrt{m_0} \quad (6)$$

$$\varepsilon = [1 - m_2^2 / (m_0 m_4)]^{1/2} \quad (7)$$

$$m_i = (2\pi)^i \int_0^\infty f^i S(f) df \quad (8)$$

3 结果分析

3.1 谱宽的选取

经典最大波高公式都是以波高分布符合瑞利分布为理论基础推导得到的, 基于瑞利分布得到的波高的理论概率分布如下式:

$$\bar{H} \cdot f(H) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{\bar{H}} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中: $f(H)$ 为波高的理论概率分布函数; \bar{H} 为平均波高。令 H/\bar{H} 为 x 轴, $\bar{H} \cdot f(H)$ 为 y 轴, 可以绘制波高的理论概率分布图, 即瑞利分布图。

以某一组数据为例 (图 2), 可看到基于瑞利分布得到的理论值高估了小概率大波。基于瑞利分布得到的最大波高公式, 并未考虑谱宽因素。但实际海况中理想的窄谱条件是极少的, 海浪的频谱结构是复杂和多样的, 会呈现单峰、双峰谱和多峰谱, 波谱的宽度能影响到波浪的一些重要特性, 所以对最大波高公式进行修订是十分必要的。通过对挪威海定点 10 年的船测波面资料的初

步处理分析, 并结合前人对最大波高公式的研究, 考虑谱宽因素的影响, 分析谱宽对最大波高的影响, 提高对最大波高的计算准确度。

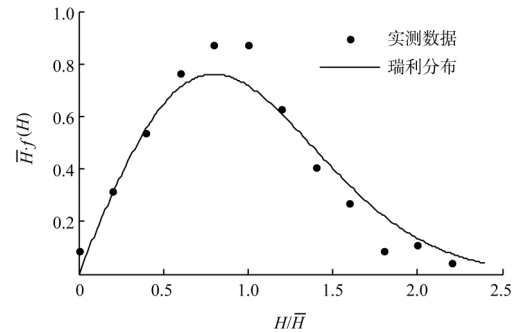


图 2 波高分布理论与实际对比

海浪是一种随机过程, 可以看作由很多频率不同的简谐波叠加而成。通常海浪的谱在不同情况下的宽窄程度各不相同, 现已提出几种表示海浪谱宽度的参数。Cartwright 等^[9]、Longuet-Higgins^[10] 分别提出两种不同的谱宽参数 ε 和 ν , Rye^[11] 发现虽然对于 JONSWAP 谱, $\gamma = 7.0$ 时要比 $\gamma = 1.0$ 时谱宽窄很多, 但由算得的 ε 和 ν 谱宽参数差别很小。其中 ε 和 ν 谱参数的计算随着海浪谱积分上限取值不同而变化, 说明 ε 和 ν 往往不能确切的表征谱能量集中的程度。Goda^[12] 建议用尖度 Q_p , 此方法可以避免谱宽值受到海浪谱积分上限取值的影响, 更加符合实际情况。 Q_p 为谱的尖窄程度, 见式 (10), 计算谱宽的时候一般取 $1/Q_p$ 。白噪声时 $Q_p = 1$; 通常风浪时, $Q_p = 2$; 一般海浪 $Q_p = 1 \sim 4$ 。

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df \quad (10)$$

3.2 谱宽影响

通过分析挪威海 10 年实测数据, 分别计算出各种参数值, 进而研究最大波高与谱宽之间的关系。图 4a) 是谱宽和 H_{\max}/H_s 的散点图, 无法看出 H_{\max}/H_s 随谱宽的变化趋势。通过把数据按照谱宽大小由 0.2 至 0.7 分为 15 段, 每段求得该段所有数据 H_{\max}/H_s 平均值, 得到 H_{\max}/H_s 平均值随谱宽的变化规律 (图 4b))。随着谱宽的增加, H_{\max}/H_s 逐渐减小。当谱宽为 0.2 时, H_{\max}/H_s 为 1.61, 之后平稳

降至 1.54, H_{max}/H_s 的总体波动范围区间仍较大, 说明对最大波高的预测仍有很大的提升空间。

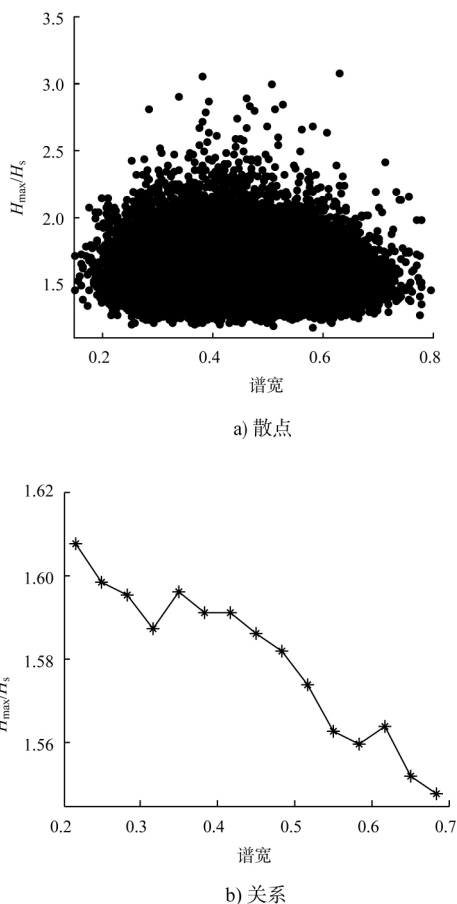


图 4 H_{max}/H_s 和谱宽的散点与关系

当对总体数据按波数进行分段, 消除波数的影响后, 得到了谱宽参数和 H_{max}/H_s 在不同波数区间的趋势图(图 5)。随着谱宽的增加, H_{max}/H_s 逐渐减小, 并且在各个波数区间内有较好的一致性。当波数位小于 200 时, H_{max}/H_s 最小, 在 1.55 左右波动; 当波数大于 300 时, H_{max}/H_s 最大, 在 1.65 左右波动。随着波数的增加, H_{max}/H_s 也均增加, 在不同谱宽范围内也有较好的一致性。

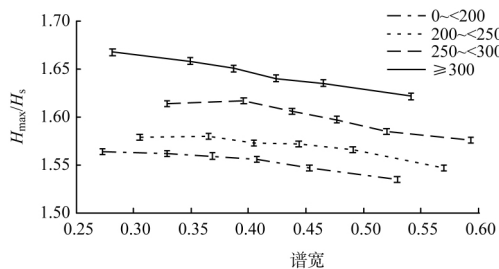


图 5 不同波数区间 H_{max}/H_s 随谱宽的变化趋势

3.3 最大波高公式改进

前人通过研究发现在瑞利分布的假设下, H_{max}/H_s 与 $\sqrt{\ln N}$ 线性相关, 变化趋势较为相似。基于上述结论, 本文在式 (1) 的基础上加入谱宽参量, 谱宽取值范围为 0.2 ~ 0.7。考虑到图 5 中 H_{max}/H_s 随着谱宽的增加而线性下降, 提出一个新的拟合公式:

$$\frac{H_{max}}{H_s} = \frac{\sqrt{\ln(N)}}{1.4114} - \frac{0.1813}{Q_p} \quad (11)$$

图 6 为最大波高的理论值 H_{max}^* 与实际最大波高 H_{max} 的比值随着 H_s 在不同公式计算情况下的对比。本文式 (11) 相较于基于瑞利分布公式得到的式 (1) 和 Forristall 公式, 以及 Ochi 推导出包含谱宽参数的式 (6), 有更好的拟合效果。从图中可以看出, Ochi 推导出包含谱宽参数的式 (6) 虽然对式 (1) 进行修正, 适当降低了基于瑞利分布公式得到的理论结果偏大的缺点, 可是在实际情况中依然偏大。本文公式基于实测数据进行分析, 得到包含谱宽参数的最大波高公式, 克服了基于瑞利分布公式得到的理论结果偏大的不足和 Forristall 公式结果偏低的缺点。

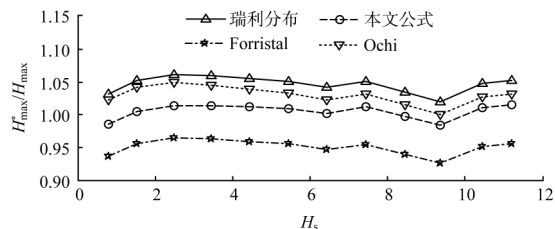


图 6 不同公式理论最大波高和实测最大波高比值

4 结语

1) 针对前人基于实测数据分析最大波高与谱宽参数关系的不足, 通过分析挪威海 2000—2009 年的定点船测波面资料, 研究 Goda 谱宽参数对最大波高的影响, 发现随着谱宽的增加, 在各个波数区间范围内, H_{max}/H_s 的平均值均逐渐减小, 有较好的一致性。

2) 考虑到谱宽对最大波高公式的影响, 在基于瑞利分布得到的最大波高公式的基础上加入 Goda 谱宽参量, 提出一个新的最大波高拟合公

式, 通过与前人公式的对比, 克服了 Longuet-Higgins 和 Ochi 基于瑞利分布公式得到的理论结果偏大的不足和 Forristall 经验公式结果偏低的缺点, 得到较好的拟合效果。

参考文献:

- [1] LONGUET-HIGGINS M S. On the statistical distribution of the heights of sea waves [J]. Journal of marine research, 1952(11): 245-266.
- [2] NAESS A. On the distribution of crest to trough wave heights[J]. Ocean engineering, 1985, 12(3): 221-234.
- [3] 丁平兴, 侯伟. 海浪非线性性的实验研究——I. 波面高度分布的非正态性[J]. 海洋学报, 1992, 14(6): 25-31.
- [4] 侯一筠. 非线性海浪波面与波高的统计分布[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(5): 425-432.
- [5] OCHI M K. Stochastic analysis and probabilistic prediction of random seas [J]. Advances in hydroscience, 1982, 13(6): 217-375.
- [6] FORRISTALL G Z. On the statistical distribution of wave heights in a storm [J]. Journal of geophysical research oceans, 1978, 83(5): 2353-2358.
- [7] FENG X, TSIMPLIS M N, QUARTLY G D, et al. Wave height analysis from 10 years of observations in the Norwegian Sea [J]. Continental shelf research, 2014, 72(1): 47-56.
- [8] HUANG N E, LONG S R, TUNG C C, et al. A non-Gaussian statistical model for surface elevation of nonlinear random wave fields [J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1983, 88(12): 7597-7606.
- [9] CARTWRIGHT D E, LONGUET-HIGGINS M S. The statistical distribution of the maxima of a random function [J]. Proceedings of the royal society of London (mathematical and physical sciences), 1956, 237: 212-232.
- [10] LONGUET-HIGGINS M S. The statistical analysis of a random moving surface [J]. Philosophical transactions of the royal society of London (mathematical and physical sciences), 1957, 249(966): 321-387.
- [11] RYE H. Ocean wave groups [D]. Trondheim: University of Trondheim, Norwegian Institute of Technology, 1982.
- [12] GODA Y. Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation [J]. Report of the port and harbour research institute, 1970, 9(3): 3-57.

(本文编辑 王聰)

~~~~~

## • 消 息 •

### 振华重工打造国内第四个自动化码头

近日, 振华重工承建的唐山堆场自动化码头项目首船设备抵达京唐港码头, 并在 10 天内实现实船作业, 标志着振华重工继厦门、青岛、洋山之后打造的第四个自动化总承包码头——唐山堆场自动化码头迎来关键节点。

该项目于 2016 年 8 月 15 日开工。振华重工作为总承包商, 为唐山港提供 5 台岸桥、12 台轨道吊, 以及地面、中控等配套系统。目前, 首批设备 5 台半自动岸桥已顺利到港, 振华重工调试组在 5 天内完成岸桥的高压送电, 又连续 5 天不间断作业, 完成总计超过 3 000 自然箱的实船作业, 实现了 10 天内超短时间高质量单机实船作业, 与国外自动化码头现场调试相比, 速度提升 60% 左右。

唐山港是国内第四个自动化码头, 投产后, 对于推动京津冀地区协同发展、实现京津冀地区一体化具有重要意义。

[http://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/201705/t20170523\\_88715.html](http://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/201705/t20170523_88715.html) (2017-05-23)