

白浪覆盖率模式中参量的研究*

于定勇¹ 刘华兴¹ 李晶² 李翠琳¹ 徐德伦³

(1. 中国海洋大学工程学院 青岛 266100; 2. DHI-NTU Water & Environment Research Center, School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore; 3. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100)

提要 在波面位移为正态过程的假定下, 推导出一种以平均周期和风速为参量的白浪覆盖率公式

$W = 1 - \Phi \left(5.11094 \left(\frac{\bar{T}}{U_{10}} \right)^{0.7576} \right)$ 。依据摩擦风速和 U_{10} 的表达式, 进一步推导出白浪覆盖率依赖于摩擦

风速的形式 $W = 1 - \Phi \left(0.5227 \left(\frac{\bar{T}}{U_*} \right)^{0.7576} \right)$ 。考虑到在实际应用中, 经常需要用波龄描述波浪的状态,

将白浪覆盖率表示成一种形式简单的波龄的函数 $W = 1 - \Phi(3.6496\xi^{0.7576})$, 与 Monahan 等的海上测量数据符合良好。

关键词 白浪覆盖率, 风浪破碎概率, 摩擦风速, 波龄

中图分类号 P731.21

海浪破碎是一个重要的海洋现象, 它与海洋研究的许多领域, 特别与海洋工程、海-气相互作用和海洋遥感有密切关系。白浪是波浪破碎的结果, 白浪覆盖率是白浪的一个简单统计特征量。

海洋白浪覆盖率早期的研究始于现场观测。现有的大多数白浪研究都把工作重心放在通过海上观测导出白浪覆盖率 W 与海面风速 U_{10} 的关系上(Monahan, 1971; Toba *et al*, 1973; Holthuijzen *et al*, 1986)。虽然前期的现场观测得到的数据方差较大, 但仍有学者(Ross *et al*, 1974; Wu, 1979; Monahan *et al*, 1981)试图通过实测数据将白浪覆盖率与风速经验性的联系起来。其中, Wu(1979)和 Monahan 等(1981)分别给出了下面的经验公式:

$$W = 2.95 \times 10^{-5} U_{10}^{3.75} \quad W = 1.7 \times 10^{-6} U_{10}^{3.75}$$

式中, U_{10} 为海面 10m 高处的平均风速。

海洋白浪覆盖率理论模式的研究始于 80 年代中期。Snyder 等 (1983)最先对平稳均匀波场的白浪作了统计描述, 并在此基础上提出一个白浪覆盖率的简单模式

$$W = 1 - \Phi \left(\frac{\beta g}{m_4^{1/2}} \right) \quad (1)$$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-y^2/2} dy \quad (2)$$

式(1)中, m_4 为海浪频谱的四阶矩; βg 为波面向下临界加速度; β 为常数。

上述的白浪覆盖率模式是在波面位移为正态过程的假定下导出的, 虽然忽视了海浪非线性效应, 但它形式简单(仅依赖于 β 和 m_4), 容易发展成可供实际应用的形式, 而且 Glazman(1986)提出的用频率软截除法计算海浪谱高阶矩, 为该模式发展成为实际应用的形式提供了可能和方便。

Xu 等(2000)利用在渤中 8 号采油平台获得的数据, 将 Snyder(1983)提出的白浪覆盖率模式发展成一种可供实际应用的形式。选择 $\beta=0.3$ 导出

$$W = 1 - \Phi(0.29 \tilde{X}^{0.25}) \quad (3)$$

其中 $\tilde{X} = \frac{gX}{U_{10}^2}$ 为无因次风区, 为便于计算, 将式(3)的

* 国家自然科学基金项目, 50479028 号; 国家自然科学基金重大基金项目, 40490263 号。于定勇, 教授, Email: dyyu01@ouc.edu.cn
收稿日期: 2007-10-05, 收修改稿日期: 2008-05-14

积分形式化成含有误差函数 erf 的形式

$$W(\%) = 50[1 - \operatorname{erf}(0.205\tilde{X}^{0.25})] \quad (3)$$

运用 matlab 软件可使计算简便迅速地在计算机上实现。同样, 破碎波概率 B 与无因次风区的关系为:

$$B = \exp\{-0.042\tilde{X}^{0.5}\} \quad (4)$$

显然, 所谓与无因次风区的关系, 就是与风速和风区的关系。Xu 等(2000)提出的式(3)和(4)合理地解释了深水破碎波不仅仅依赖于风速, 还依赖于风区(或风时)。

式(3)所示白浪覆盖率模式虽然具有参量少、形式简单、实用性强等特点, 但是由于在一般情况下风区的长度难以确定, 所以在实际工程中难以应用。本文中作者在式(3)的基础上导出一种新的白浪覆盖率模式, 此模式将 W 与易于测量的海上平均周期和风速联系起来。

1 白浪覆盖率与周期和风速的关系

对于正态海浪, 波面位移的平均周期

$$\bar{T} = 2\pi \left(\frac{m_0}{m_2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

其中, m_0 和 m_2 分别为海浪频谱的 0 阶矩和 2 阶矩。

对于 JONSWAP 谱, 矩 m_j 与无因次矩 M_j 有关系式(Glazman, 1986)

$$m_j = \alpha g^2 \omega_p^{j-4} M_j \quad (6)$$

其中, $\alpha = 0.076\tilde{X}^{-0.22}$ (Hasselmann, 1974)

将(5)、(6)两式合并得

$$\bar{T} = 2\pi\omega_p^{-1} \left(\frac{M_0}{M_2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

对于无因次峰频 $\tilde{\omega}_p = U_{10}\omega_p/g$, 有 $\tilde{\omega}_p = 22\tilde{X}^{-0.33}$ 则

$$\tilde{\omega}_p = 22\tilde{X}^{-0.33} \frac{g}{U_{10}} \quad (8)$$

将其代入式(7)得到

$$\bar{T} = \frac{\pi U_{10}}{11g} \tilde{X}^{0.33} \left(\frac{M_0}{M_2} \right)^{1/2} \quad (9)$$

将式(9)与式(3)合并, 则

$$W = 1 - \Phi \left[0.29 \left[\frac{11g}{\pi U_{10}} \left(\frac{M_2}{M_0} \right)^{1/2} \bar{T} \right]^{0.25/0.33} \right] \quad (10)$$

对于 JONSWAP 谱, $M_2=0.5046$, $M_0=0.3050$ 。将其

带入上式得

$$W = 1 - \Phi \left[5.11094 \left(\frac{\bar{T}}{U_{10}} \right)^{0.7576} \right] \quad (11)$$

此模式将白浪覆盖率以工程实际中易于测量的周期与风速表示出来, 是 Xu 等(2000)模式的实用化形式。

海上观测时摩擦风速 U_* 的大小是大家都比较关注的, 因此本文中作者进一步将对 W 与 U_* 的表达式进行推导。

10m 风速与摩擦风速有关系式

$$U_{10} = \frac{U_*}{\kappa} \times \left(\ln \left(\frac{10}{z_0} \right) - \psi(z-L) \right) \quad (12)$$

其中 κ 为 von karman 常数, 一般取 0.4;

$$z_0 \text{ 为粗糙度, } z_0 = \begin{cases} 0.03 & \text{地面} \\ 0.003 & \text{海面} \end{cases}$$

ψ 为稳定度订正函数, 为 z/L 的函数; L 为 Monin-Obukhov 长度;

通常情况, 不知道稳定条件的情况下, 可以按中性稳定条件计算, 此时 $\psi=0$, 此时就是严格的对数风廓线, 则上式简化为

$$U_{10} = 20.2793U_* \quad (13)$$

将此式代入式(11)得

$$W = 1 - \Phi \left[0.5227 \left(\frac{\bar{T}}{U_*} \right)^{0.7576} \right] \quad (14)$$

该模式将白浪覆盖率与摩擦风速联系起来, 是基于 Xu 等(2000)模式的另一种参量化形式。

2 白浪覆盖率与波龄的关系

在实际应用中, 经常需要用波龄描述波浪的状态, 因此, 将白浪覆盖率 W 用波龄 ξ 表达出是同样具有重要意义。

波龄的概念主要是为了描述风浪的成长状态而引入的。波龄 ξ 为主组成波的相速度 c_p 与海面上 10 m 高处的风速 U_{10} 之比, 利用重力波的频散关系, 相速度可通过与主组成波对应的峰频或周期计算得到。

$$\xi = \frac{c_p}{U_{10}} = \frac{g}{2\pi f_p U_{10}} \quad (15)$$

对于 JONSWAP 谱(Hasselmann, 1974), 峰频与无因次风区有关系式

$$f_p = \frac{3.5g}{U_{10}} \tilde{X}^{-0.33} \quad (16)$$

f_p 为峰频, U_{10} 为海面 10 m 高处的平均风速。

将式(15)、(16)与式(3)合并推得白浪覆盖率与波龄的关系式

$$W = 1 - \Phi(3.6496\xi^{0.7576}) \quad (17)$$

或:

$$W(\%) = 50 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.29}{\sqrt{2}} (7\pi\xi)^{0.25/0.33} \right) \right] \quad (17)'$$

同样地, 将(15)、(16)代入式(4)可得波浪破碎概率与波龄的关系:

$$B = \exp\{-0.042 \times (7\pi\xi)^{1.515}\} \quad (18)$$

3 比较与验证

为了检验上述理论推导出的白浪覆盖率和波浪破碎概率模式与实际符合的情况, 作者将模式(17)同收集到的 Monahan 等(1971)和 Lafon 等 (2004)观测到的海洋白浪覆盖率数据绘于图 1。同时, 分别计算白浪覆盖率理论模式和两组实测数据的均方误差, 并将比较结果列于表 1。从图 1、表 1 所见, 本文中作者推导的白浪覆盖率能够合理地拟合几乎所有的数据点, 而且, 更令人满意的是, 曲线的变化规律与数据点的分布规律吻合良好。

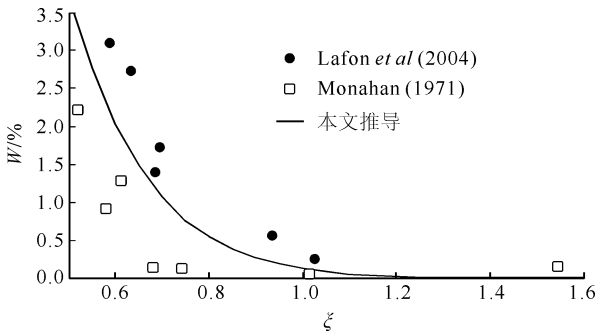


图 1 白浪覆盖率 W 与波龄 ξ 的关系曲线及观测数据

Fig.1 The dependence of whitecap coverage W on wave age ξ given by Eq. 17

表 1 本文中推导的白浪覆盖率模式与 Monahan(1971)和 Lafon 等(2004)观测数据的比较及方差计算

Tab.1 The comparisons of W with field data and their variances

Monahan(1971)	本文推导	Lafon et al(2004)	本文推导
0.0005	0.0011	0.0141	0.0119
0.0015	1.3×10^{-5}	0.0057	0.0021
0.0127	0.0187	0.0274	0.0167
0.0221	0.0332	0.0026	0.0011
0.0091	0.0232	0.0173	0.0111
0.0013	0.0121	0.0311	0.0223
0.0012	0.0081		
方差	7.51×10^{-5}		4.17×10^{-5}

对于本文中作者推出的波浪破碎概率模式(18)的验证, 同 Longuet-Higgins 等(1983)于荷兰近海的 Nordwijk 观测平台实测数据相比较绘于图 2。同时, 将实测数据与理论推导出的风浪破碎概率的方差列于表 2。从图 2、表 2 中可以看出, 作者推导的破碎概率与实测数据能够良好符合, 其中偏离曲线较远的 3 个点为 Longuet-Higgins 在大雨条件下测得, 故在方差计算中不予考虑。

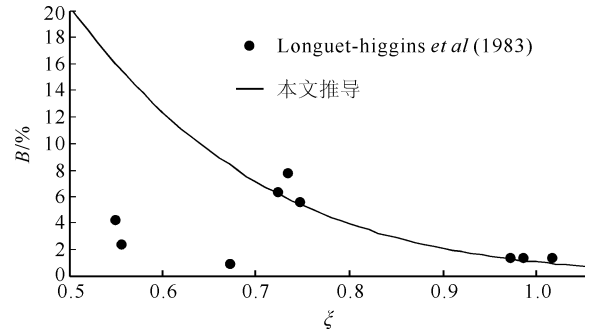


图 2 波浪破碎概率 B 与波龄 ξ 的关系曲线及同 L-H 观测数据的比较

Fig.2 The wave breaking probability B versus wave age ξ

表 2 本文中推导出的波浪破碎概率 B 与 L-H 观测数据的比较及方差计算

Tab.2 The comparisons of B with field data and their variances

Longuet-Higgins et al(1983)	本文推导
0.0243*	0.1559
0.0098*	0.0836
0.0634	0.0625
0.0777	0.0589
0.0566	0.0543
0.0422*	0.1609
0.0143	0.0096
0.0141	0.0119
0.0143	0.0130
方差	6.47×10^{-5}

*大雨条件下观测

4 结语

在波面位移为正态过程的假定下, 本文中推导出白浪覆盖率 W 与周期和风速的关系式、 W 与周期和摩擦风速的表达式及 W 与波龄的函数这三种模式, 参量较少且易于测量, 形式简单, 便于理论研究和实际应用。

参 考 文 献

徐德伦, 于定勇, 2001. 随机海浪理论. 北京: 高等教育出版社,

- 390
- Glazman R E, 1986. Statistical characteristics of sea surface geometry for a wave slope field discontinuous in the mean square. *J Geophys Res*, 91: 6629—6641
- Hasselmann K, 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Boundary Layer Met*, 6:107—127
- Huang N E, Larry F B, Steven R L *et al*, 1986. An Analytical Model for Oceanic Whitecap Coverage. *J Phys Oceanogr*, 16: 1597—1604
- Holthuijsen L H, Herbers T H C, 1986. Statistics of breaking waves observed as whitecaps in the open sea. *J Phys Oceanogr*, 16(2): 290—297
- Lafon C, Piazzola J, Forget P *et al*, 2004. Analysis of the variations of the whitecap fraction as measured in a coastal zone. *Boundary-Layer Meteorology*, 111: 339—360
- Longuet-Higgins M S, Smith N D, 1983. Measurement of breaking waves by a surface jump meter. *J Geophys Res*, 88:9823—9831
- Monahan E C, 1971. Oceanic whitecaps. *J Phys Oceanogr*, 1:139—144
- Monahan E C, O’Muircheartaigh I G, 1981. Improved statement of the relationship between surface wind speed and oceanic whitecap coverage as required in the interpretation of satellite data; *Oceanography from Space*. In: Gower J F R ed. New York: Plenum Pub, 751—755
- Ross D B, Cardone V, 1974. Observations of oceanic whitecaps and their relation to remote measurements of surface wind speed. *J Geophys Res*, 79:444—452
- Snyder R L, Kennedy R M, 1983. On the formation of whitecaps by a threshold mechanism, part I, Basic formalism. *J Phys Oceanogr*, 13:1482—1492
- Toba Y, Chaen M, 1973. Quantitative expression of the breaking of wind waves on the sea surface. *Records Oceanography Works Japan*, 1—11
- Wu J, 1979. Spray in the atmospheric surface layer: Laboratory study. *J Geophys Res*, 84:1693—1704
- Xu D, Liu X, Yu D, 2000. Probability of wave breaking and whitecap coverage in a fetch-limited sea. *J Geophys Res*, 105: 14253—14259

THE PARAMETERS IN WHITECAP COVERAGE MODEL

YU Ding-Yong¹, LIU Hua-Xing¹, LI Jing², LI Cui-Lin¹, XU De-Lun³

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100; 2. DHI-NTU Water & Environment Research Center, School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore; 3. College of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

Abstract A simple formula is analytically derived based on a Gaussian wave field, which is used to estimate the spatial fraction of breaking sea surface at an instant time, i.e., whitecap coverage W . The resulting whitecap coverage is related to wind speed and wave average period. According to the relation between friction speed U_* and U_{10} , this derived formula is further expressed with U_* . As a wave age is often used to describe the wave state in practice, whitecap coverage is expressed as a simple function of the age. The results of the new model and regarding field data agreed well.

Key words Whitecap coverage, Wave breaking probability, Friction speed, Wave age