

粗糙度与风浪特征量关系的研究*

文 凡 苏泽宇 吕红民

(中国海洋大学物理海洋实验室 青岛 266003)

提要 在实验室风浪槽中观测风浪和风速,研究粗糙度与波面特征量的关系,发现风浪谱宽度增加,粗糙度增大。在窄谱时,粗糙度随谱宽的增加变化不明显,当波陡降低,粗糙度降低;在宽谱时,当谱宽度增加,即使波陡降低,粗糙度仍可增大。这一结果表明,波陡不足以完全决定粗糙度。当风浪波龄增加,粗糙度呈下降趋势,但由于谱宽度对粗糙度的影响,当波龄增加,部分波浪可有较大的粗糙度。由于这一因素,在粗糙度与波龄关系的观测结果中,数据点的散落不完全由观测误差造成。

关键词 粗糙度,谱宽度,波陡

中图分类号 P731

海面粗糙度的研究对风与浪能量与动量交换及海洋遥感等的研究具有重要意义。Charnock (1955) 最早提出粗糙度依赖于风速,由量纲分析导出粗糙度与风速的关系;Hsu (1974) 提出粗糙度依赖于波陡。近年来大量观测表明粗糙度与风浪状态有关,Smith (1992)、Donelan 等(1993)、Johnson 等(1998) 的研究表明,随着风浪波龄增加,粗糙度降低。但在上述研究中,粗糙度随波龄变化的观测结果存在差异,且部分观测数据点散落程度较大。Donelan 等(1993) 认为,涌浪的存在是造成数据点散落的重要原因。新近 Taylor 等(2001) 研究了粗糙度与波面特征量的关系,分析了大量观测资料得到粗糙度与波陡的关系。由于 Taylor 以波面特征量研究粗糙度,所得结果同样适用于涌浪存在时情形。但在 Taylor 的研究中仍存在数据点散落,而且对于波龄较短的风浪,其结果与实验观测结果有较大差异。这表明粗糙度可能与波面其他特征量有关。

波面何种特征量决定粗糙度是迄今未有定论的问题。Donelan (1982) 提出长波和短波两种波动决定粗糙度;Kitaigorodskii (1973) 等提出粗糙度依赖于风浪谱的某种积分形式,也就是说,粗糙度与风浪谱形有关。作者通过在实验室风浪槽中观测风浪和风速,研究粗糙度与波面特征量关系,这对

深入认识粗糙度和风与浪相互作用的物理机制具有重要意义。

1 实验

实验在中国海洋大学物理海洋实验室大型风浪槽中进行,在风浪槽中同时观测风浪和浪上方风速廓线。由风速廓线计算粗糙度,研究粗糙度与风浪特征量关系。风浪槽长 65m,宽 1.2m,高 1.4m。在风浪槽中取 10 个观测点,观测点位置分别为 7m、10.7m、14.35m、18m、21.7m、25.4m、29.05m、32.75m、36.4m、41m。实验时选用 4 种参考风速:4m/s、6m/s、8m/s、10m/s;水深为 0.73m。

风浪波面高度的测量使用钽丝测波仪和能够自动采集数据的采集系统。风速廓线的测量使用精密压力传感器和皮托管测风探头,输出信号经适当变换后送到 14 位精度的 A/D 数据采集卡,对应风速测值误差小于 0.1m/s。利用电脑控制的测量坐标支架及控制驱动设备,带动传感器精确定位和移动,定位精度为 0.5mm。本实验采用逐点垂向的扫描方式测量不同高度处的风速,获得波浪上方风速垂向分布。在垂直方向取 13—15 个测点,测点间距为 20mm。每个测点连续采集 100 个数据取平均值,共扫描 4 次;每个测点的采样时间累计为 40s。

波浪上方风速随高度变化呈对数分布:

* 国家自然科学基金资助项目,40106001 号。文凡,博士,副教授, E-mail: fanwen@ouc.edu.cn

$$U(z) = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

其中 U 为风速; u_* 为摩擦风速; z_0 为粗糙度; $K=0.4$, 为 Karman 常数; z 为高度。

以公式(1)形式对观测的风速数据由最小二乘法拟合得到波浪上方风速廓线; 由风速廓线计算粗糙度和摩擦风速, 风速廓线延伸得到 10m 高度处风速; 由测得的波面资料进行谱估计, 计算得到波浪能量、主频波频率、波龄、波陡和谱宽等特征量。

2 实验结果

图 1a 和图 1b 为粗糙度随波龄的变化图。图 1a 横轴为 10m 高度处风速 U_{10} 与主频波相速 C_p 之比(即波龄的倒数), 纵轴为粗糙度 z_0 与波高 σ 之比。图 1b 横轴为摩擦风速 u_* 与主频波相速

C_p 之比。由图 1a 和图 1b 可看出, 随着波龄的增加, 粗糙度呈下降趋势, 这与 Smith(1992)、Donelan 等(1993)、Johnson 等(1998)的结果特征相符。图 1a 在波龄为 0.1 附近, 部分波浪的粗糙度较大(圆圈点), 该特征将在下面讨论。图 1b 情形与图 1a 类似, 在波龄为了附近, 部分波浪的粗糙度较大(圆圈点)。

图 1c 为粗糙度 z_0 随波陡变化图, 横轴为波高 σ 与主频波波长 L_p 之比。图 1c 中波陡降低, 粗糙度呈下降趋势, 与 Taylor 等(2001)的结果相同。但图 1c 中出现一个值得注意的特征, 即在波陡为 0.08 附近, 当波陡下降, 部分波浪的粗糙度继续下降, 而另一部分波浪的粗糙度明显上升(圆圈点)。这一变化特征表明, 在波面特征量中波陡可能不是影响粗糙度的惟一因素。

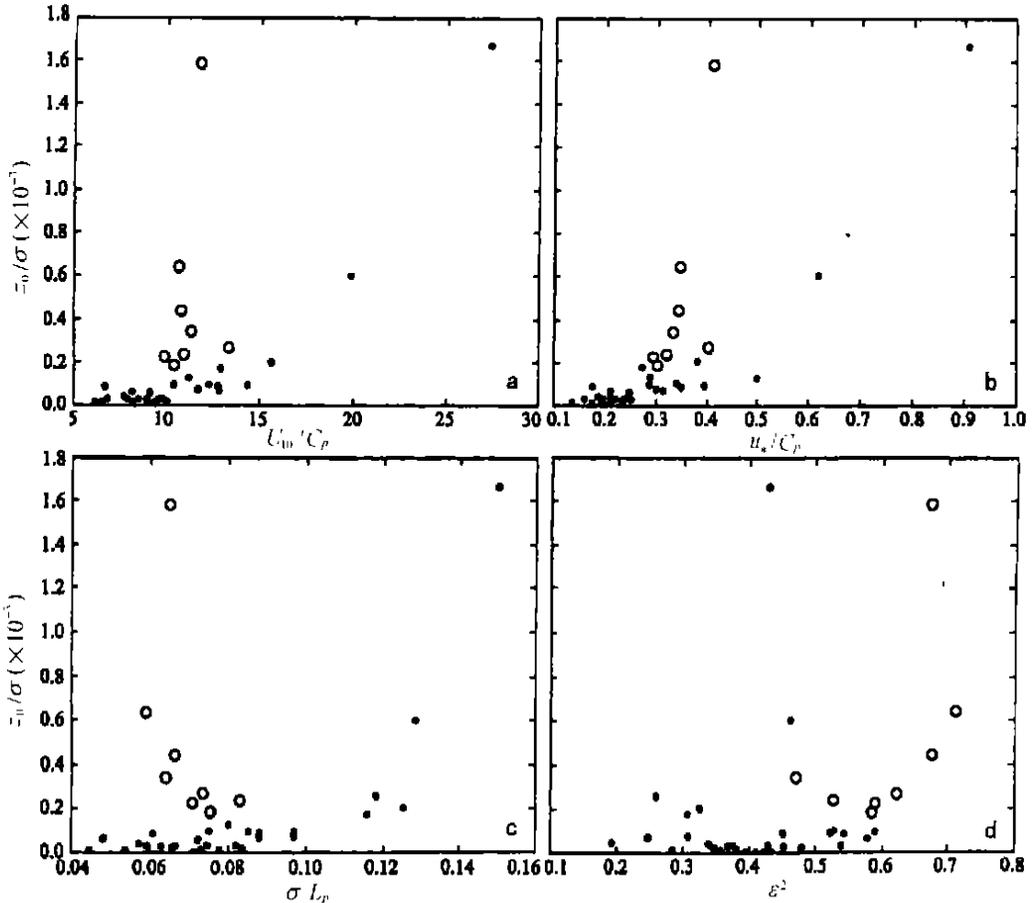


图 1 粗糙度与波龄(a. 以 U_{10} 无因次化), (b. 以 u_* 无因次化), 波陡(c. z_0 以 σ 无因次化)及谱宽度(d. z_0 以 σ 无因次化)的关系

Fig. 1 Relationship between roughness and wave age(a. scaling with U_{10}), (b. scaling with u_*), wave steepness(c. z_0 scaling with σ) and spectral width(d. z_0 scaling with σ)

图 1d 为粗糙度随风浪谱宽度 ε 变化关系图。由图 1d 可见, 在谱较窄时, 粗糙度随谱宽度的增加变化不明显。当谱较宽时, 随着谱宽度的增加, 粗糙度开始明显增大(圆圈点)。特别值得注意的是图 1c 和图 1d 的比较, 图 1c 中的圆圈点波浪恰好为图 1d 中的圆圈点波浪。在图 1c 中, 波陡高于 0.08 的波浪谱较窄, 对于这些波浪, 随着波陡的降低, 粗糙度降低。对波陡低于 0.08 的波浪, 部分波浪的谱较窄, 另一部分波浪的谱较宽。对于较窄谱对应的浪, 当波陡下降, 粗糙度继续降低; 而对于较宽谱对应的浪, 当谱宽增加, 即使波陡降低, 粗糙度仍然增大(圆圈点)。这表明, 粗糙度受波陡和谱宽度的影响, 窄谱时, 谱宽度影响较小, 宽谱时, 谱宽度影响增大。

图 1c 中使用波高 σ 对粗糙度 z_0 无因次化[与 Taylor 等(2001) 选用方法相同]。由于 z_0/σ 和 σ/L_p 中含有同一参量 σ , 可能会导致 z_0/σ 和 σ/L_p 的某种自相关。图 2a 为 $z_0 g/u_*^2$ 与 σ/L_p 关系图, 图 2b 为 $z_0 g/u_*^2$ 与 ε^2 关系图。使用这一无因次方法可避免自相关的出现。图 2a 中的圆圈点波浪与图 2b 中圆圈点波浪相同。由图 2a 和图 2b 可见, 在宽谱时, 当谱宽度增加, 即使波陡下降, 粗糙度仍可增大。

在 Taylor 等(2001) 的结果中, 当波浪波陡降低, 粗糙度虽呈减小趋势, 但其中部分数据点粗糙度明显偏大, 呈现散落(其中的 RASEX 结果和 AD96 结果)。按照图 1c、1d、2a 和 2b 的分析, 造成以上情形的原因很可能是谱宽度对粗糙度的影响, 宽谱对应的波浪粗糙度较大。

粗糙度与波面特征量的关系一直是风与浪相互作用研究中的难题。Donelan(1982) 提出, 粗糙度由长波和短波共同决定; Kitaigorodskii(1973) 等提出, 粗糙度依赖于风浪谱的某种积分形式。Donelan 和 Kitaigorodskii 的理论结果有很大差异, 但在这些理论中有一个重要共识, 即单尺度波动特征量不足以决定粗糙度, 粗糙度由多种尺度的波动决定。这意味着风浪谱形(或者说与谱形直接相关的特征量, 如谱宽)是影响粗糙度的重要因素。

粗糙度与波龄的关系出现与图 1c 类似的情形。将图 1d 与图 1a 和图 1b 比较, 图 1d 中圆圈点波浪与图 1a 和图 1b 中圆圈点波浪相同。这说明当风浪波龄增加, 粗糙度虽呈减小趋势, 但宽谱对应的波浪粗糙度偏大。

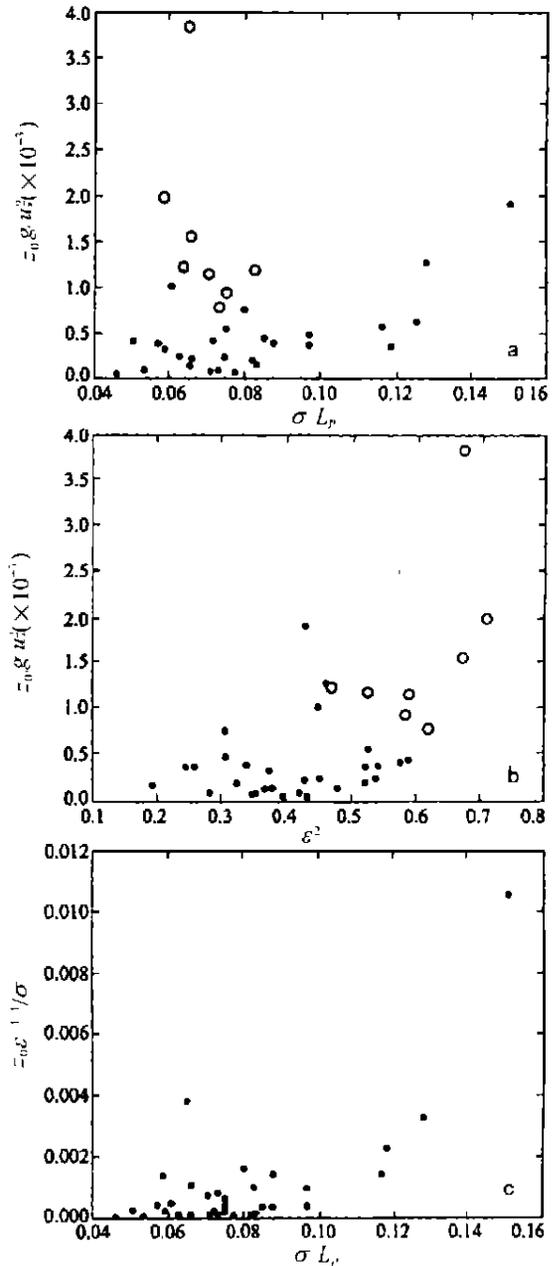


图 2 粗糙度与波陡(a. z_0 以 u_* 无因次化), 谱宽度(b. z_0 以 u_* , 无因次化), 谱宽度和波陡(c.) 的关系
Fig.2 Relationship between roughness and wave steepness(a. z_0 scaling with u_*), spectral width(b. z_0 scaling with u_*) and spectral width and wave steepness(c)

在迄今对粗糙度随波龄变化的研究中, 各观测结果差异较大, 部分观测结果中数据点散落程度较大。在散落数据点中粗糙度较低的点被认为是由涌浪引起(Donelan *et al.*, 1993), 粗糙度较高的点常被认为是由观测误差引起。按照上面关于谱宽度与粗糙度关系的分析, 在谱较宽时粗糙度较

大,因此即使排除观测误差因素,观测结果中仍可出现粗糙度升高的点。

Vickers 等(1997)曾经注意到数据点中谱宽度的影响,他在分析观测结果后提出,粗糙度与波龄关系的拟合曲线中的参数依赖于谱宽度。

Toba 等(1990)在分析了海上观测资料和实验室资料后提出,粗糙度随风浪波龄增加而增大。这一结果与现今多数观测结果相反。Donelan 等(1993)认为,Toba 等(1990)分析中存在缺陷(比如 Toba 分析中由经验公式估计出的 u^* 高于实际的摩擦风速)。但 Toba 等的部分结果可能是正确的,也就是说,虽然粗糙度随风浪波龄增加呈总体下降趋势,但其中部分波浪的粗糙度可增大。在这种情况下,如果认为粗糙度单调下降,粗糙度增大的数据点将被误认为是由观测误差引起的数据散落点。

根据图 1c 和图 1d 的观测结果可得出粗糙度随波陡和谱宽度变化的关系式为:

$$\frac{z_0}{\sigma} = 3.4 \left(\frac{\sigma}{L_p} \right)^{3.6} \varepsilon^{4.4} \quad (2)$$

以上经验关系适用谱宽度范围为 $\varepsilon > 0.4$ 。

在 Donelan 等(1993)的研究中,部分为实验室风浪随波龄变化观测结果。Donelan 等(1993)的实验室观测结果中风浪波龄的倒数 U_{10}/C_p 在 20 至 40 之间。图 1a 中有两个点对应的 U_{10}/C_p 高于 20。如果将 Donelan 等(1993)所得曲线延伸至较高波龄处与本文中的结果比较,图 1a 中粗糙度偏低,这可能是由各风浪槽间的某种系统差异造成。实验室风浪槽的壁面和消浪装置处的波浪反射是影响实验室风浪粗糙度的重要因素(Donelan *et al.*, 1993)。不同风浪槽中所得风浪粗糙度可能不同。另外,Donelan 等(1993)实验中风浪波龄极短。波龄极短风浪的粗糙度显著高于波龄较长风浪(在本文实验中发现这一特点)。将极短波龄风浪的粗糙度曲线延伸至较高波龄处所得粗糙度可能会偏高。

另外应注意的是实验室风浪粗糙度观测结果与海上风浪观测结果差别较大,海上风浪粗糙度显著高于实验室风浪(Donelan *et al.*, 1993),并且实验室风浪由于受风区限制,波龄较短。粗糙度与

谱宽度关系有待于海上进一步观测。

3 结语

作者在实验室风浪槽中观测风浪和风速,研究粗糙度与波面特征量的关系时发现,当风浪谱宽度增加,粗糙度增大。在窄谱时粗糙度随波陡降低而降低;在宽谱时,当谱宽度增加,即使波陡降低,粗糙度仍可增大。这一结果表明,波陡不足以完全决定粗糙度。当风浪波龄增加,粗糙度呈下降趋势,但由于谱宽度对粗糙度的影响,当波龄增加,部分波浪可有较高的粗糙度。由于这一因素,在粗糙度与波龄关系的观测结果中,数据点的散落不完全由观测误差造成。

参 考 文 献

- Chamock H, 1955. Wind stress on a water surface. *Quart J Roy Meteor Soc*, 81: 639—640
- Donelan M A, 1982. The dependence of the aerodynamic drag coefficient on wave parameters. *First Int Conf on Meteorology and Air-Sea Interaction of the Coastal Zone. The Hague Netherlands, Amer Meteor Soc*, 381—387
- Donelan M A, Dobson F W, Smith S D *et al.*, 1993. On the dependence of sea surface roughness on wave development. *J Phys Oceanogr*, 23: 2143—2149
- Hsu S A, 1974. A dynamic roughness equation and its application to wind stress determination at the air-sea interface. *J Phys Oceanogr*, 4: 116—120
- Johnson H, K, Hojstrmp J, Vested H J *et al.*, 1998. Dependence of sea roughness on wind waves. *J Phys Oceanogr*, 28: 1702—1716
- Kitigorodskii S A, 1973. *The Physics of Air-Sea Interaction. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem*, 1—273
- Smith S D, 1992. Sea surface wind stress and drag coefficients: The HEXOS results. *Boundary-Layer Meteor.* 78: 121—141
- Taylor P K, Yelland M J, 2001. The dependence of sea roughness on the height and steepness of the waves. *J Phys Oceanogr*, 31: 572—590
- Toba Y, H Iida, Kawamura H *et al.*, 1990. Wave dependence of sea surface wind stress. *Phys Oceanogr*, 20: 705—721
- Vickers D, Mahrt L, 1997. Fetch limited drag coefficients. *Bound-Layer Meteor.* 85: 53—79

DEPENDENCE OF SURFACE ROUGHNESS ON SPECTRAL WIDTH AND WAVE STEEPNESS

WEN Fan, SU Ze-Yu, L Hong-Min

(*Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

Abstract The study of surface roughness is important in wave modeling and in remote sensing at sea. In the past four decades, extensive studies have been made on the roughness. On the basis of dimensional analysis Charnock (1955) suggested that the roughness depends on wind speed. Observations in recent years showed that the roughness decreases with wave age. More recently Taylor (2001) studied the dependence of the roughness on the state of the waves and found that the roughness increases with wave steepness. However, considerable scatter exists in some of Taylor's results. This indicates that surface roughness may depend on some other factors in wind wave fields. In this paper we study the roughness by analyzing wind and wave data in an experiment made in wind wave channel.

The experiment was made in the wind wave channel in the Laboratory of Physical Oceanography in Ocean University of China. The wave surface displacements and the vertical wind profiles over the wave field were measured at ten fetches in the channel. Wind and wave data showed that the roughness decreases with wave age, which is in agreement with many results in current observations. However, it is found that for some waves the roughness increases with wave age. By studying the relation between roughness and wave steepness, it is found that the roughness increases with wave steepness. This is in agreement with Taylor's result. However for some waves the roughness increases when wave steepness decreases. This indicates that wave steepness is not sufficient in determining the roughness. It is influenced by some other factors in wind wave fields.

By further analyzing the data it is found that the roughness increases with spectral width. For waves with broad spectrum the roughness is remarkably higher than waves with narrow spectrum. For narrow spectrum, the roughness decreases when wave steepness decreases. For broad spectrum the roughness may be high even for low wave steepness and high wave age. This indicates that spectral width is important in determining the roughness.

The question on which factor in wind wave field is important in influencing surface roughness has been extensively discussed in theory. It is believed that surface roughness is determined by multi-scale waves. Single-scale waves are not sufficient in determining the roughness. This implies that the shape of the spectrum (or variables that reflect the spectral shape, such as spectral width) is important in determining the roughness.

The low roughness in some waves in ocean is caused by swells. The observed high roughness in high wave age is often attributed to errors in the observations. From the above analysis we consider that the high roughness in some results may be due to the broad spectrum of the waves.

Vickers (1997) noticed the influence of spectral width on the roughness. He found that the variations of the coefficients in the relationship between roughness and wave age could be explained by the influence of the spectral width. In analyzing field and laboratory data, Toba found that the roughness increases with wave age. This is contrary to many results in current observations. Donelan (1993) pointed out some flaws in Toba's analysis. However some results in Toba's analysis may be correct. That is, although the roughness has a tendency of decrease when wave age increases, for waves with broad spectrum the roughness may be high even for high wave age.

Key words Roughness, Spectral width, Wave steepness