

斜波输沙规律的初步研究*

陈江波, 周济福

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要: 自然情况下, 近岸水波的非线性效应不可忽视, 深入探讨斜波对泥沙输运的影响规律具有重要意义。本文采用非简谐振荡平板诱导的流动模拟斜波边界层流动, 利用大涡模拟方法模拟典型斜波边界层的壁面切应力过程, 并将其应用于计算斜波的输沙率, 对比典型的实验数据验证了模拟结果的可靠性。在此基础上, 研究了外流速度过程特征对输沙率的影响规律, 初步获得了斜波波形偏斜指数与输沙率的关系。

关键词: 斜波, 大涡模拟, 输沙率, 波形偏斜指数

1 引言

泥沙运动是河口海岸地区的一种基本的物质运动, 岸滩演变、港口回淤、航道淤积、水工建筑物基础淘刷等许多实际工程问题都与波浪作用下的泥沙运动有关, 高雷诺数下波所诱导的湍流边界层流动行为是其中的关键科学问题, 过去的相关研究大多基于线性波理论。然而, 自然情况下, 近岸水波的非线性效应不可忽视, 深入探讨非线性波对泥沙输运的影响规律具有重要意义。

Ribberink & Al-Salem, Nadaoka, et al. 利用 U 型振荡水槽来产生非线性波, 研究发现波的非线性对湍流边界层以及泥沙输运有重要影响^[1-3]。Dibajnia & Watanabe 在振荡水槽中研究了非线性、非对称、无规则振荡波的输沙规律, 他们用波浪叠加的泥沙起动机理, 从速度分布获得与实验吻合良好的净输沙率^[4-5]。Watanabe & Sato 在实验中, 进一步考虑了加速度的不对称度对泥沙输运的影响^[6]。Nielsen, et al.等^[7-9]改进 Meyer-Peter & Müller^[10]输沙公式, 分析了加速度对 Sheet Flow 近壁面切应力和输沙率的影响。Suntoyo, et al.研究了粗糙床面上的锯齿波湍流边界层及泥沙输运规律, 综合考虑速度和加速度以及瞬时波边界层摩擦系数对泥沙输运的影响, 提出可以直接计算壁面切应力的新方法^[11], 在此基础上得到斜波 (Skew wave) 的输沙率, 其结果与 Watanabe & Sato^[6]吻合良好, 比 Nielsen^[9]的模型吻合程度更高。

* 本研究得到国家自然科学基金项目资助 (批准号: 11172307, 10932012)。

本研究以斜波为例，采用大涡模拟方法获得壁面切应力过程，并应用于研究斜波输沙的规律。首先采用大涡模拟方法获得了 Watanabe & Sato^[6]实验 1 ~ 33 各组次的壁面切应力过程，然后利用 Watanabe & Sato^[6]的实验数据，对 Suntoyo, et al.^[11]的输沙率计算方法进行验证分析。然后，进一步探讨了波形偏斜指数对泥沙输运的影响。

2 输沙率计算方法

Suntoyo, et al.^[11]提出瞬时输沙率可表示为

$$q(t) = A \text{sign} \{ \tau^*(t) \} |\tau^*(t)|^{0.5} \left\{ |\tau^*(t)| - \tau_{cr}^* \right\} \sqrt{(\rho_s/\rho - 1) g d_{50}^3} \quad (1)$$

其中， ρ_s 是泥沙密度， ρ 是水的密度， g 是重力加速度， d_{50} 是泥沙平均粒径。 A 是系数，其大小跟波形参数有关，实际计算中根据实验结果与数值模拟结果对比分析选取， $\tau^*(t)$ 为 *Shield* 数，

$$\tau^*(t) = \frac{\tau_0(t)}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} \quad (2)$$

$\tau_0(t)$ 是瞬时壁面切应力。 τ_{cr}^* 是泥沙起动的临界 *Shield* 数，可以根据 Tanaka & Van To^[12]的方法计算。对式 (1) 进行周期平均可以得到净输沙率 q_{net} ，积分仅仅在 $|\tau^*(t)| > \tau_{cr}^*$ 所在的相位区间，当 $|\tau^*(t)| < \tau_{cr}^*$ 时积分为 0。通过大涡模拟可以获得瞬时壁面切应力 $\tau_0(t)$ ，在此基础上可很方便地计算出净输沙率。

3 壁面切应力的大涡模拟

利用 Watanabe & Sato^[6]的实验数据开展研究，因此首先需要获得与实验各组次外流速度相应的壁面切应力过程，这里采用大涡模拟方法^[13-14]获得壁面切应力。

Watanabe & Sato^[6]的实验波形为前倾波 (Forward-leaning wave)，如图 1 所示。波形偏斜指数定义为

$$\alpha = \frac{2T_{cu}}{T} \quad (3)$$

式中， T_{cu} 是波速上升阶段零点和波峰之间的时间。 $\alpha=0$ 表示锯齿波， $\alpha=0.5$ 表示正余弦波。

Watanabe & Sato^[6]没有给出速度的直接表达式，但其加速度近似于一阶椭圆余弦波，本研究采用 Abreu, et al.^[15]的一阶椭圆余弦波近似公式获得加速度的变化，然后对加速度进行时间积分可获得速度的变化。

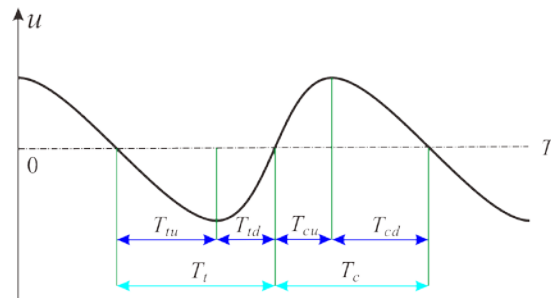
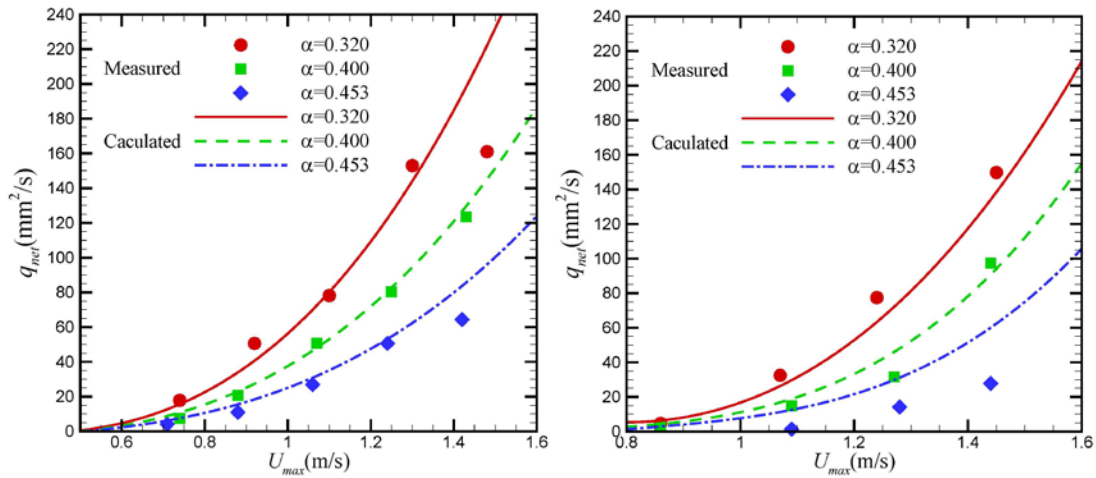


图 1 前倾波示意图

4 结果与分析

如图 2 所示，净输沙率的实验值与数值解吻合很好，随着速度最大值 U_{\max} 的增大，净输沙率 q_{net} 也随之增大，这与实际情况是相符的，同时波形偏斜指数 α 越小，说明波形偏斜得越大，净输沙率也愈大。



(a) $d_{50}=0.20\text{mm}$, $T=3\text{s}$

(b) $d_{50}=0.20\text{mm}$, $T=5\text{s}$

图 2 不同波形偏斜指数下速度最大值与净输沙率的关系

速度最大值 U_{\max} 相同时波形偏斜指数与净输沙率的关系如图 3 所示，可见速度最大值相同的情况下，随着波形偏斜指数增大，净输沙率近似于线性减小。由此可以推断，速度最大值相同时，正余弦波的净输沙率最小，锯齿波的净输沙率最大。

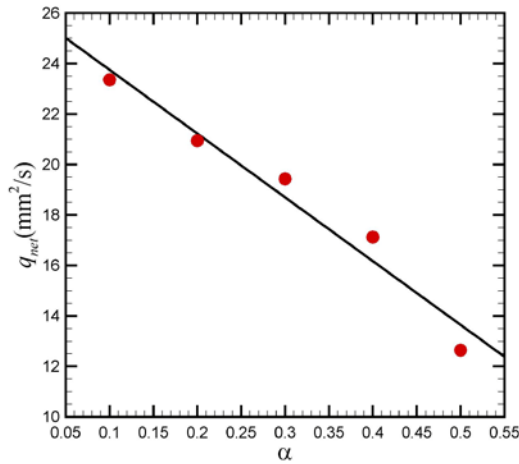


图 3 速度最大值相同时偏斜指数与净输沙率的关系 ($T=3s$, $U_{max}=1.00m/s$)

Suntoyo, et al^[11]和 Nielsen^[9]曾分别提出不同的净输沙率计算方法, 并将计算结果和 Watanabe & Sato^[6]的实验测量结果进行了对比分析, 两者的线性相关系数分别为 $R^2=0.655$ 和 Nielsen^[9]的 $R^2=0.557$ 。

我们对本研究关于输沙率的计算结果与 Watanabe & Sato^[6]的实验结果也进行了对比分析。如图 4 所示, 净输沙率线性回归相关系数 $R^2=0.8059$, 明显地优于 Suntoyo et al.^[11]和 Nielsen^[9]的结果。从线性相关系数 R^2 来看大涡模拟壁面切应力很好地反映了实际情况, 能够比较好地预测输沙率变化情况, 但系数 A 的选取需要大量的实验与数值分析, 对应于 $\alpha=0.320$ 、 0.400 、 0.453 , 经验证系数 $A=11$ 是合适值。

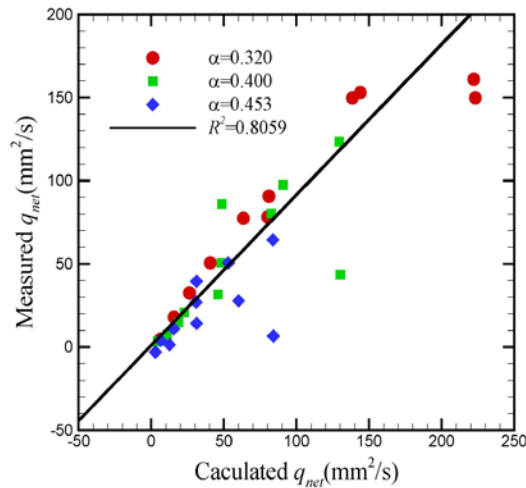


图 4 实验测量与数值模拟净输沙率的相关程度

5 结论

本研究采用大涡模拟方法,在详细模拟 Watanabe & Sato^[6]实验的基础上,初步研究了前倾波的输沙特性,主要结论如下:

(1) 基于大涡模拟方法获得的壁面切应力过程,得到 Watanabe & Sato^[6]各组次实验的斜波净输沙率,数值模拟结果与相应实验数据的吻合情况比 Suntoyo et al.^[11]及 Nielsen^[9]计算结果精度更高。

(2) 速度最大值越大和波形偏斜指数越小,净输沙率越大;当速度最大值保持不变时,随着波形偏斜指数增大,净输沙率近似于线性减小。

参 考 文 献

- 1 Ribberink, J. S., and Al-Salem, A. A., 1995. Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layers. *Coast. Eng.*, 25, 205–225.
- 2 Nadaoka, K., Yagi, H., Nihei, Y., and Nomoto, K., 1994. Characteristics of turbulent structure in asymmetrical oscillatory flow. *Proc. Coastal Engrg.*, 41, 141–145.
- 3 Nadaoka, K., Yagi, H., Nihei, Y., and Nomoto, K., 1996. Turbulent structure of asymmetrical oscillatory flow. *Proc. Coastal Engrg.*, 43, 441–445.
- 4 Dibajnia, M., and Watanabe, A., 1992. Sheet flow under nonlinear waves and currents. *Proc. 23rd. ICCE.*, 2015–2028.
- 5 Dibajnia, M., and Watanabe, A., 1998. Transport rate under irregular sheet flow conditions. *Coast. Eng.*, 35, 167–183.
- 6 Watanabe, A., Sato, S., 2004. A sheet flow transport rate formula asymmetric forward leaning waves and currents. *Proc. 29th ICCE*, Lisbon, World Scientific, 1703–1714.
- 7 Nielsen, P., 2002. Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling. *Coast. Eng.*, 45, 53–60.
- 8 Nielsen, P., 2006. Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and boundary layer streaming. *Coast. Eng.*, 53, 749–758.
- 9 Nielsen, P., and Callaghan, D. P., 2003. Shear stress and sediment transport calculations for sheet flow under waves. *Coast. Eng.*, 47, 347–354.
- 10 Meyer-Peter, E., and Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport. *Proc. 2nd Congress of the Int. Ass., Hydra. Str. Res.*, Stockholm.
- 11 Suntoyo, Tanaka, H., and Sana, A., 2008. Characteristics of turbulent boundary layers over a rough bed under saw-tooth waves and its application to sediment transport. *Coast. Eng.*, 55, 1102–1112.
- 12 Tanaka, H., Van To, D., 1995. Initial motion of sediment under waves and wave-current combined motions. *Coast.*

Eng., 25, 153–163.

13 陈江波, 2012. 非对称波边界层流场及泥沙输运规律. *中国科学院研究生院硕士学位论文*.

14 J. B. Chen, J. F. Zhou and Q. Zhang., 2011. Large-eddy Simulation of Asymmetric Wave-induced Flow. *Proceeding of the Sixth International Conference on Fluid Mechanics*, 304-307.

15 Abreu, T., Silva, P. A., Sancho, F., and Temperville, A., 2010. Analytical approximate wave form for asymmetric waves. *Coast. Eng.*, 57, 656–667.

A preliminary study on sediment transport under skew waves

J. B. Chen, J. F. Zhou^{*}

(Key Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing, 100190, Email: zhoujf@imech.ac.cn)

Abstract: In natural circumstance of coastal areas, the nonlinearity of water waves is no negligible, which is meaningful for sediment transport. This paper uses the nonharmonic oscillatory plate to induce near-wall flow for simulating nonlinear wave boundary layer. The wall shear stress of skew wave boundary layer is obtained by using large eddy simulation approach. Firstly we verify the sediment transport rate with experimental data under skew waves. Then the relation between flow field and sediment transport rate under skew waves is explored.

Key words: nonlinear waves, large eddy simulation, sediment transport rate, wave skewness