

沿岸流不稳定运动对时均沿岸流影响

任春平^{*1}, 邹志利²

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过物理模型实验以及数值方法研究了沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响. 首先简要介绍了沿岸流不稳定运动测量实验并给出了测量结果; 然后建立了考虑沿岸流不稳定运动的数学模型, 该模型中引入了沿岸流不稳定运动引起的辐射应力项, 为了使数值分析与实际情况相吻合, 该模型中考虑沿岸流不稳定运动引起的辐射应力由实验中观测到的结果求得. 利用求得的应力项, 粗略分析了沿岸流不稳定运动引起的侧混系数的范围, 结果表明该范围为 0~0.04. 利用该模型数值分析了沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响, 结果表明其影响很小.

关键词: 沿岸流; 沿岸流不稳定运动; 波浪破碎; 辐射应力

中图分类号: P731.21 **文献标志码:** A

0 引言

沿岸流对近岸区域污染物、泥沙等的运动等起着很重要的作用. Fleming 等^[1] 研究指出 10% 的沿岸流预报误差可能导致 70% 的沿岸输沙误差. 而引起沿岸流预报误差很重要的因素之一就是伴随时均沿岸流而产生的沿岸流不稳定运动以及相关研究的不深入. 许多学者都指出近岸泥沙运动、海岸韵律地形的形成与沿岸流不稳定运动有很大关系并且通过现场以及实验室实验证明观测到了沿岸流不稳定运动^[2~9].

但所有上述研究对于工程实际应用中所采用的时均沿岸流与沿岸流不稳定运动之间的关系没有进行过研究. Putrevu 等^[10] 理论分析了沿岸流不稳定运动引起的混合系数的量级, 但没有分析不稳定运动对时均沿岸流的影响. Özkan-Haller 等^[11] 数值研究了沿岸流不稳定运动引起的侧混对时均沿岸流的影响, 研究表明由沿岸流不稳定运动引起的动量混合比由涡黏性引起的大很多, 前者最大值约为波浪辐射应力最大值的 1/2, 所以对时均沿岸流影响较大, 但对于平直斜坡上的情况没有分析. Reniers 等^[9] 在有坝地形上观测到了沿岸流不稳定运动, 并通过比较垂直岸线的两

个截面上时均沿岸流分布来说明沿岸流不稳定运动对时均沿岸流影响很小. 但 Reniers 等只是分析了有坝地形上的情况, 而没有分析平直海岸上的情况. 而国内学者邹志利等^[12~15] 仅报道了在实验室中观测到了沿岸流不稳定运动以及用剪切不稳定理论分析了实验结果.

本文介绍在坡度为 1:40 和 1:100 的平直斜坡上的沿岸流不稳定运动实验, 并给出观测到的沿岸流不稳定运动实验结果. 然后建立考虑沿岸流不稳定运动的数学模型, 该模型中考虑沿岸流不稳定运动引起的辐射应力, 该辐射应力由实验中观测到的结果求得. 利用该模型数值分析沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响.

1 实验简介

实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的多功能综合水池进行^[13]. 该水池长 55 m, 宽 34 m, 深 1.0 m, 实验地形为坡度均匀的平直海岸, 坡度为 1:40 和 1:100 (见图 1); 图 2 给出了平面斜坡的剖面以及流速仪的具体布置. 坡前静水深为 0.45 m. 海岸与造波板成 30°, 以增加海岸线的长度. 模型与其三面水池壁都留有宽度

2 考虑沿岸流不稳定运动的二维时均沿岸流模型

将二维连续方程和动量方程沿水深积分,并在短波周期上做时间平均,可得

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} \rho u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} (\rho uv) dz - p_b \frac{dh}{dx} + \overline{\tau_{bx}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} \rho v dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} (\rho uv) dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz - p_b \frac{dh}{dy} + \overline{\tau_{by}} = 0 \quad (3)$$

式中:横线表示在短波周期上做时间平均; h 为静水水深; ρ 为流体密度; p 为流体压力; p_b 为水底处流体压力; τ_b 为水底摩擦剪应力; d 为包含平均水面变化 $\bar{\eta}$ 的水深, $d = h + \bar{\eta}$. $Q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz$, $Q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz$. 假定:

$$\eta = \bar{\eta} + \tilde{\eta} \quad (4a)$$

$$u = U' + \tilde{u} + u' \quad (4b)$$

$$v = V' + \tilde{v} + v' \quad (4c)$$

式中: $\bar{\eta}$ 为平均波面升高; U' 、 V' 分别为沿岸流不稳定运动波动周期上时间平均得到的水平速度,假定 U' 、 V' 沿水深为常数; $\tilde{\eta}$ 和 \tilde{u} 、 \tilde{v} 分别为短波波面升高和水平速度; u' 和 v' 为波浪破碎产生的湍流脉动速度.于是有

$$Q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz = Ud \quad (5a)$$

$$Q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz = Vd \quad (5b)$$

对本文研究的沿岸流不稳定运动问题,其包含定常和非定常部分:

$$U' = U + \tilde{U} \quad (6a)$$

$$V' = V + \tilde{V} \quad (6b)$$

即流速分解为近岸流场时均速度(U, V)和由沿岸流不稳定运动引起的速度(\tilde{U}, \tilde{V}). U' 为在沿岸流不稳定运动波动周期上进行的平均,而 \tilde{U} 为沿岸流不稳定运动引起的随时间缓慢变化的速度.引入辐射应力

$$S_{xx} = \int_{-h}^{\eta} (\rho \tilde{u}^2 + p) dz - \frac{\rho g d^2}{2} \quad (7)$$

$$S_{xy} = \int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{u} \tilde{v} dz \quad (8)$$

$$S_{yy} = \int_{-h}^{\eta} (\rho \tilde{v}^2 + p) dz - \frac{\rho g d^2}{2} \quad (9)$$

由沿岸流不稳定运动所引起的侧向混合应力:

$$S'_{xx} = \int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{U}^2 dz = \rho \tilde{U}^2 (\bar{\eta} + h) \quad (10)$$

$$S'_{yy} = \int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{V}^2 dz = \rho \tilde{V}^2 (\bar{\eta} + h) \quad (11)$$

$$S'_{xy} = \int_{-h}^{\eta} \rho \tilde{U} \tilde{V} dz = \rho \tilde{U} \tilde{V} (\bar{\eta} + h) \quad (12)$$

式(10)~(12)中的横线表示在测量的流速时间历程上平均.

将式(4a)~(4c)代入式(1)~(3)得

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial(Ud)}{\partial x} + \frac{\partial(Vd)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho d} \times \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial S'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S'_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho d} + A_{mx} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho d} \times \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S'_{yx}}{\partial x} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho d} + A_{my} \quad (15)$$

式(13)~(15)为考虑沿岸流不稳定运动引起的侧混应力的控制方程.该控制方程中沿岸流不稳定运动影响由 S'_{xx} 、 S'_{xy} 、 S'_{yy} 、 S'_{yx} 所表达,由于在沿岸方向地形不变,仅计算 S'_{xx} 、 S'_{xy} 即可.本文通过实验测得流速,求得 S'_{xx} 、 S'_{xy} 代入上述控制方程中分析沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响.

本文采用基于矩形网格的有限差分法——ADI法对该模型进行求解^[16].利用波能守恒方程计算波浪场^[17],在考虑沿岸流不稳定运动时计算波浪场的参数与不考虑沿岸流不稳定运动时计算时均沿岸流的一致^[13].

(1) 固定边界

$$U = 0, V = 0, \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \quad (16)$$

(2) 开边界(水边界)

对于外海边界有

$$U = 0, V = 0, \eta = 0 \quad (17)$$

对于侧边界(与海岸相连的水-水边界)有

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0, \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \quad (18)$$

式中: n 为边界的法向.

(3) 初始条件

$$U = 0, V = 0, \eta = 0 \quad (19)$$

3 沿岸流不稳定运动对时均沿岸流影响

利用实验测得的流速时间历程可以由式(10)~(12)计算出沿岸流不稳定运动引起的辐射应力. 对于每个位置处测得的速度在测得的时间上进行平均. 计算 S'_{xx} 和 S'_{xy} 所用的流速时间历程采用滤波后的时间历程, 图 4 给出了对应图 3 时间历程滤波后的结果, 在实际计算 S'_{xx} 和 S'_{xy} 时取

150 s 以后的结果, 因为从测量结果看沿岸流不稳定运动只有在 150 s 之后才随着沿岸流稳定地出现. 图 5 和 6 分别给出了波况 1~9 计算的 S'_{xx} 和 S'_{xy} . 由图 5 和 6 可以看出由沿岸流不稳定运动引起的 S'_{xx} 和 S'_{xy} 的变化趋势与沿岸流分布基本相似, 都是在向岸和离岸方向逐渐减小(波况 2 和 3 仅在时均沿岸流最大值附近($x=4\sim 6$ m))呈现出

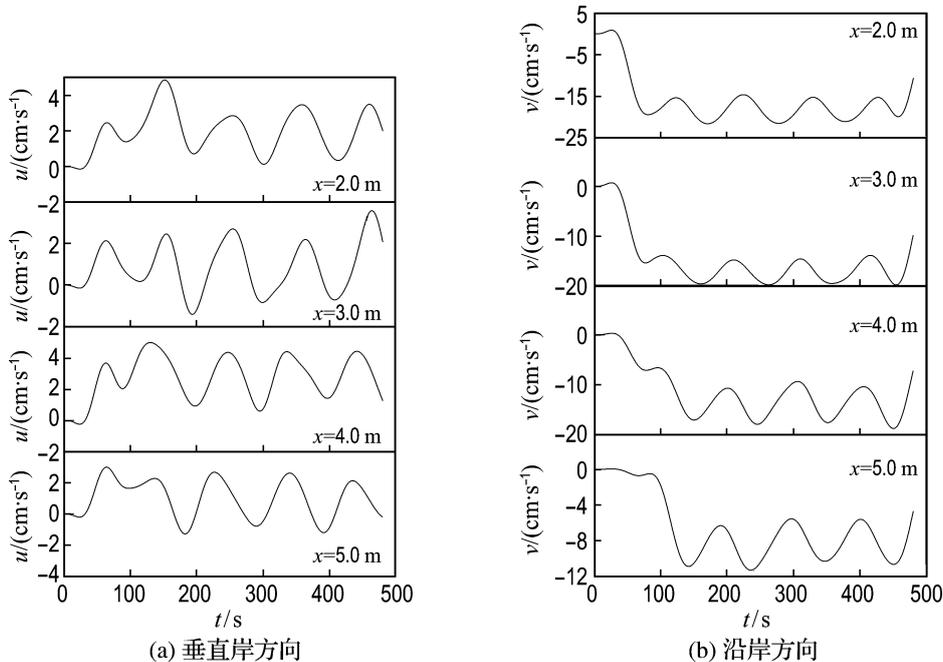


图 4 对应图 3(波况 8)滤波后流速时间历程

Fig. 4 Filtered time series for Case 8 corresponding to Fig. 3

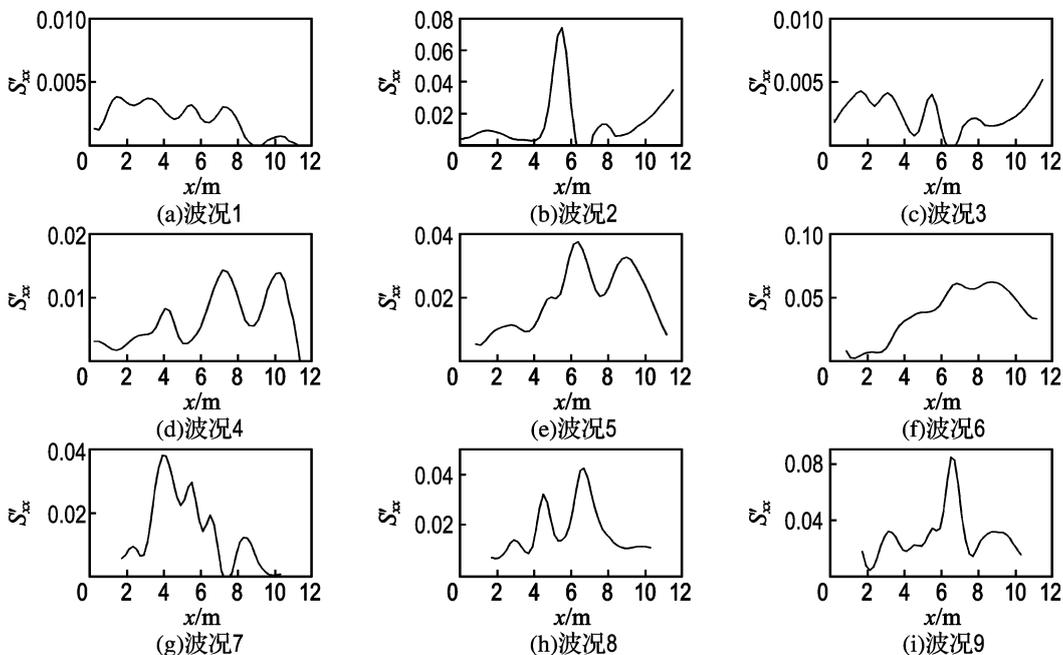


图 5 波况 1~9 用实验测得的流速时间历程计算的 S'_{xx}

Fig. 5 Calculated results (S'_{xx}) with experimental time series for Cases 1-9

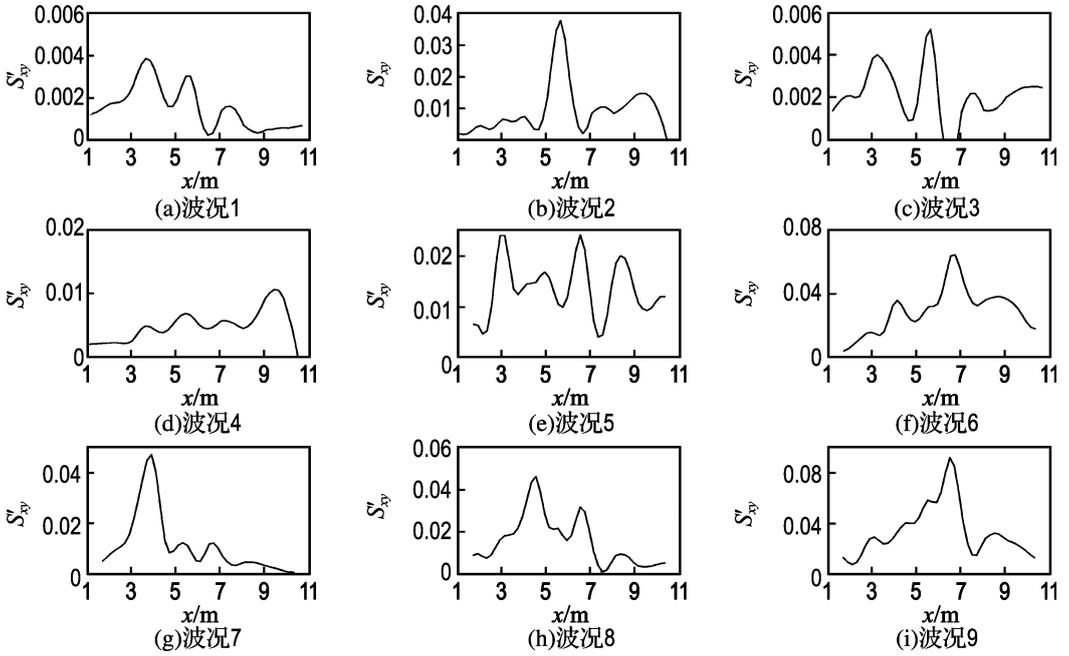


图 6 波况 1~9 用实验测得的流速时间历程计算的 S'_{xy}

Fig. 6 Calculated results (S'_{xy}) with experimental time series for Cases 1-9

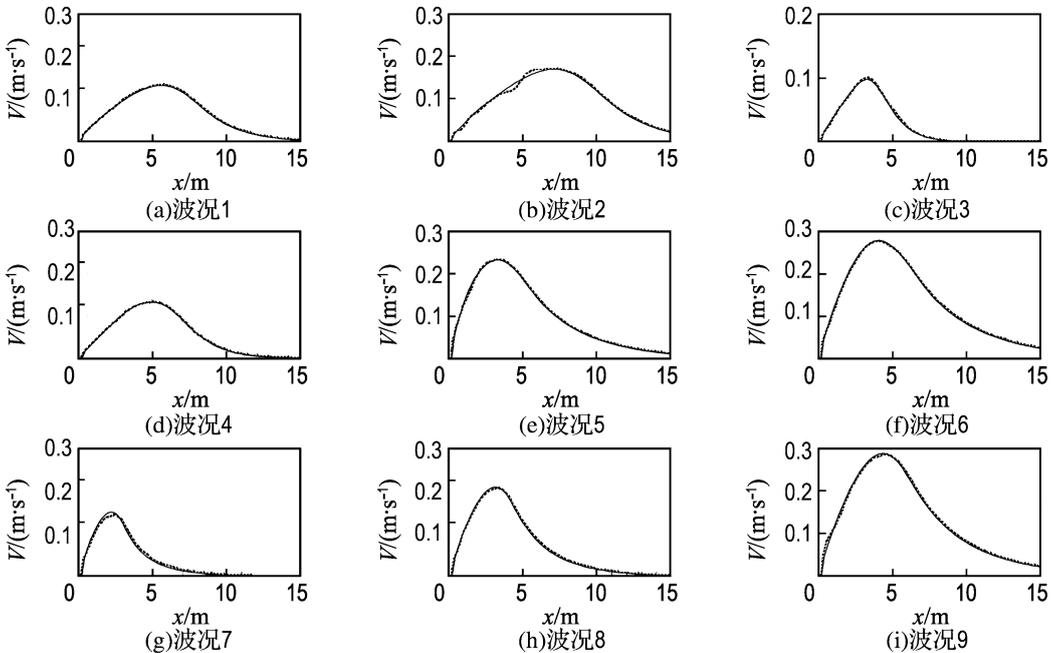
这样的变化趋势,这可能是由于靠近岸边非线性的影响或者滤波过程中截取时间历程引起的).由此也可看出沿岸流不稳定运动在时均沿岸流最大值附近的强度最大,这与文献[11]的分析结果相一致.

图 7 给出了考虑沿岸流不稳定运动影响和忽略不稳定运动后计算的时均沿岸流比较,由图可以看出考虑了不稳定运动影响后对时均沿岸流的

计算影响不大.

4 沿岸流不稳定运动引起的侧混系数

为了为实际应用提供相关的参数,用实验测得的流速时间历程分析了由沿岸流不稳定运动引起的侧混系数的大概范围.



—— 忽略不稳定运动的影响 - - - - 考虑不稳定运动的影响

图 7 波况 1~9 考虑和忽略沿岸流不稳定运动计算的时均沿岸流比较

Fig. 7 Comparisons between time-averaged longshore currents suppressing and including the instability for Cases 1-9

将沿岸流不稳定运动引起的侧混应力 S'_{xy} 用侧混系数来参数化,有如下表达式:

$$\frac{dS'_{xy}}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\rho \mu_s h \frac{dV}{dx} \right) \quad (20)$$

由 $\mu_s = \beta x_b \sqrt{gh}$, 得 $\mu_s = S'_{xy} / \rho h \frac{dV}{dx}$, 进而可得沿岸流不稳定运动引起的侧混系数 $\beta = \mu_s / x_b \sqrt{gh} = S'_{xy} / \rho h \frac{dV}{dx} x_b \sqrt{gh}$. 根据沿岸流不稳定运动剪切不稳定理论, 时均沿岸流从最大值向离岸方向的剪切力 V_x 会出现最大值(即由该剪切力引起沿岸流不稳定运动, 因而该区域内沿岸流不稳定运

动获取能量最大)^[18], 而本文研究沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响, 因而计算时取此范围内的侧混系数, 由于在 $dV/dx = 0$ 时, 属于不连续点, 求出的 β 在该不连续处无物理意义, 而目前一般都侧混系数在整个破波带内取作一个常数. 因而, 本文将 β 极大值出现后的稳定值作为沿岸流不稳定引起的侧混系数. 图 8 给出了波况 1~9 由实验数据计算的沿岸流不稳定引起的侧混系数. 由图可以看出从极大值出现后 β 基本接近于一个常数, 例如波况 5, 从 $x = 6$ m 后 β 约为 0.02, 本文 β 的取值就是在极大值出现后的稳定值. 从 9 种波况的结果可以初步估计 β 在 0~0.04.

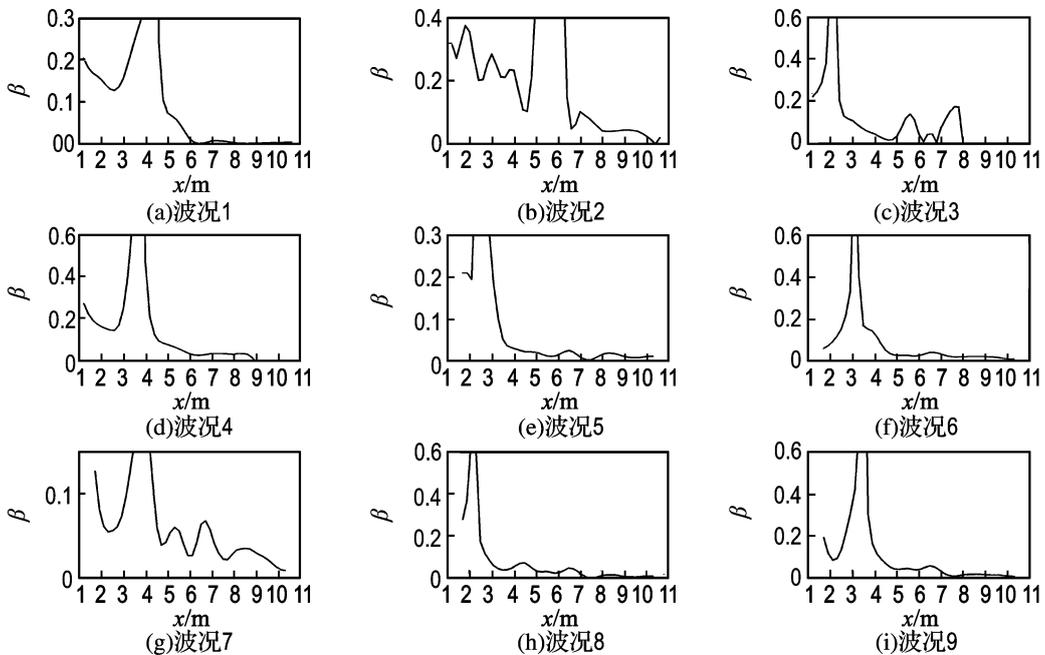


图 8 波况 1~9 沿岸流不稳定运动引起的侧混系数

Fig. 8 Calculated lateral mixing coefficient caused by the instability of longshore currents for Cases 1-9

5 结 语

本文在二维浅水方程中引入由沿岸流不稳定运动引起的辐射应力项建立了考虑沿岸流不稳定运动的波生沿岸流模型. 为了使数值分析与实际情况相近, 通过实验测得的速度时间历程求得了沿岸流不稳定运动引起的辐射应力项, 并代入控制方程数值分析了沿岸流不稳定运动对时均沿岸流的影响, 结果表明此种影响很小. 本文仅是对该问题的初步分析, 因为沿岸流不稳定运动是一个十分复杂的现象, 本文仅用在不规则波平直斜坡情况下的实验结果来对该问题进行分析, 而其他地形情况又是如何, 可不可以将该结论推广到其他情况, 需要进一步的研究. 另外, 本文利用直接测得的流速时间历程计算沿岸流不稳定运动引起的辐射应力, 这在

多大程度上能模拟沿岸流不稳定运动引起的辐射应力还需进一步探讨, 本文只做一个初步的探讨, 在以后的研究中可以更加精确地分析由实验测得的速度计算沿岸流不稳定引起的误差为多少等来进一步对沿岸流不稳定问题进行深入的研究, 这对于分析研究沿岸流不稳定运动对沿岸污染物输运物质的影响有很重要的作用. 最后利用求得的应力项, 粗略分析了沿岸流不稳定运动引起的侧混系数的范围, 结果表明该范围为 0~0.04.

参 考 文 献:

- [1] FLEMING C A, SWART D H. New framework for prediction of longshore currents [C] // **Proceedings of Coastal Engineering**. New York: American Society of Civil Engineers, 1982

- [2] SMITH G G, MOCKE G P. Interaction between breaking/broken waves and infragravity-scale phenomena to control sediment suspension transport in the surf zone [J]. *Marine Geology*, 2002, **187**:329-345
- [3] AAGAARD T, GREENWOOD B. Suspended sediment transport and the role of infragravity waves in a barred surf zone [J]. *Marine Geology*, 1994, **118**(3-4):23-48
- [4] SANCHEZ M O, LOSADA M A, BAQUERIZO A. On the development of large-scale cusped features on a semi-reflective beach; Carchuna beach, Southern Spain [J]. *Marine Geology*, 2003, **198**(3-4):209-223
- [5] COCO G, O'HARE T J, HUNTLEY D A. Beach cusps: A comparison of data and theories for their formation [J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, **15**(3):741-749
- [6] OLTMAN-SHAY J, HOWD P A, BIRKEMEIER W A. Shear instabilities of the mean longshore current 2. Field observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, **94**(C12):18031-18042
- [7] CROWSON R A, BIRKEMEIER W A, KLEIN H M, *et al.* SUPERDUCK nearshore process experiment: Summary and studies CERC field research facility [R] // *Technical Report*. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center, 1988
- [8] NOYES T J, GUZA R T, ELGAR S, *et al.* Field observations of shear waves in the surf zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(C01031):doi:10.1029/2002JC001761
- [9] RENIERS A, BATTJES J A, FALQUES A, *et al.* A laboratory study on the shear instability of longshore currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C4):8597-8609
- [10] PUTREVU U, SVENDSEN I A. Shear instability of longshore currents — A numerical study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5):7283-7303
- [11] ÖZKAN-HALLER H T, KIRBY J T. Shear instabilities of longshore currents; Flow characteristics and momentum mixing during superduck [C] // *Proceedings of Coastal Dynamics*. New York: American Society of Civil Engineers, 1997
- [12] 邹志利, 任春平, 金红, 等. 沿岸流不稳定性运动实验研究 [C] // 第十二届中国海洋工程会议论文集. 北京: 海洋出版社, 2005:334-338
- [13] 任春平. 沿岸流不稳定性运动的实验研究及理论分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009
- [14] 任春平, 邹志利. 沿岸流不稳定性运动的实验研究及理论分析 [J]. *海洋学报*, 2008, **30**(5):113-123
- [15] REN Chun-ping, ZOU Zhi-li. Laboratory study and analysis of the instability of alongshore currents [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **28**(4):1-11
- [16] 唐军. 近岸波流共同作用下污染物运动的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005
- [17] ZOU Zhi-li, WANG Shu-ping, QIU Da-hong, *et al.* Longshore currents of random waves on different plane beaches [J]. *China Ocean Engineering*, 2003, **17**(2):265-276
- [18] BOWEN A J, HOLMAN R A. Shear instabilities of the mean longshore current 1. Theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, **94**(C12):18023-18030

Effects of instability of longshore currents on mean longshore currents

REN Chun-ping^{*1}, ZOU Zhi-li²

(1. College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The effects of instability of longshore currents on the mean longshore currents were investigated by physical modeling and numerical method. Firstly, the experiments for measuring instability of longshore currents were introduced and experimental results were given. Then, the mathematical model including the instability of longshore currents was built. In the model, the radiation stress due to the instability of longshore currents was calculated using the measurement velocity time series in order to simulate the real situation well. At the same time, the lateral mixing coefficient caused by instability of longshore currents was obtained. The coefficient is approximately 0-0.04. The effects of the longshore currents instability on the mean longshore currents were analyzed using the presented model. The analytical results show that the effects of the longshore currents instability on the mean longshore currents are small.

Key words: longshore currents; instability of longshore currents; wave breaking; radiation stress