

DOI: CNKI: 32-1309/ P. 20110514. 1449. 014

近岸波生流运动三维数值模拟及验证

解鸣晓^{1,2}, 张 玮³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;

2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 开发建立了近岸波生流运动三维数值计算模式。模式中, 引入了三维时均剩余动量、破波表面水滚、波浪水平与垂向紊动作为主要驱动力, 同时考虑了波流共同作用的底部剪切力。推导了可综合反映底坡、能量传递率和密度影响的水滚能量传输方程; 将 Larson-Kraus 的二维波浪水平紊动系数表达式拓展至三维。采用大量实测数据和文献资料测试验证了所建模式, 表明所建模式可有效模拟波浪增减水、底部离岸流、沿岸流、裂流、堤后环流等不同维度的波生流现象。此外, 研究也表明破波水滚效应可解释波生流峰值向岸推移的物理现象, 从而在模拟中不能忽略; 破波带内沿岸流速垂向较为均匀的现象与波浪附加垂向紊动有关。

关键词: 三维波生流; 时均剩余动量; 破波水滚; 波浪紊动; 模式验证

中图分类号: TV148.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)03-0391-09

波生流是近岸地区的重要水动力现象, 其直接影响海岸地貌演变与输沙过程。随波浪入射条件与地形的差异, 波生流呈现出不同的形态。当波浪正向入射时, 平面形成增减水, 并在破波带内产生底部离岸流(undertow); 当斜向入射时, 则会形成指向下游的沿岸流。此外当沿岸地形不均匀的条件下, 波浪折射将导致裂流结构。在实际近岸地区, 几种波生流结构叠加在一起, 构成了复杂的螺旋型近岸流体系。

以往对波生流现象的研究集中于其平面分布特征, 对垂向结构的探索较少。波生流的首要驱动力为波生时均剩余动量, 在二维数值模拟中, 剩余动量多沿用辐射应力概念, 可解释增减水、沿岸流及裂流等平面现象。然而, 辐射应力为水深积分值, 无法描述波生时均剩余动量的垂向分布规律, 而这一特征对描述波生流垂向结构, 尤其是底部离岸流有至关重要的作用。基于不同假设, 近年来, 国内外许多学者分别推导了时均剩余动量的垂向分布公式^[1-3]。然而, 对时均剩余动量的研究目前仍停留在理论分析阶段, 其有效性仍需数据检验。此外, 当波浪破碎时, 波峰处产生大量掺气的卷崩状水体, 引起动量向岸传递, 从而使得最大减水点和沿岸流峰值位置等向岸推移, Svendsen^[4]将这一现象称为表面水滚(surface roller)。Dally 和 Brown^[5]首次建立了描述水滚发展的能量传输方程; Tajima 和 Madsen^[6]、Goda^[7]分别修正了 Dally-Brown 方程, 其中前者引入了水滚能量传递率的概念, 可区分不同破波类型; 后者补充了不均匀底坡对能量损耗的贡献。然而, 以上两种水滚模型中均假设水滚体密度与海水密度相等, 与实际情况存在一定出入。波浪质点运动以往复振荡的形式出现, 形成与紊流类似的特征, 引起动量的水平与垂向层间传递, 而针对这一动力特征的研究较少。Putrevu 和 Svendsen^[8]提出了波浪紊动动量传递模型, 然而其模型公式十分复杂。因此, 与潮流类似, 当前多数采用紊动粘性或掺混系数进行参数化, 并认为波生紊动与波高、周期和水深等因素有关。

当前对波生流的研究虽已有丰富成果, 然而大多为单一性分析, 致力于解决某一种波生流现象, 而未能有效融合。此外, 虽然当前存在众多理论, 但缺少实际数据的检验。因此, 本文将综合考虑多种动力因子, 建立一个较为全面的三维波生流数值计算模式, 并利用不同维度的水槽数据进行测试, 并论证模式的适

收稿日期: 2010-06-25; 网络出版时间: 2011-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110514.1449.014.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(TKS100102)

作者简介: 解鸣晓(1982-), 男, 山东青岛人, 博士, 主要从事海岸动力学方面研究。

E-mail: crabsaver@163.com

定性和通用性。

1 波生流计算模式建立

1.1 控制方程

在 Longuet-Higgins 对辐射应力的原始推导过程中,波浪时均动水压强采用垂向平均值。因此,亦有部分学者质疑在三维水动力方程中时均剩余动量的存在性。然而,在当前河口海岸水动力学的三维方程中,多采用垂向静压假设。在这一前提下,时均剩余动量在垂向是存在的。

水动力方程的基本形式采用经雷诺时均的三维 Navier-Stokes 方程组,模型中采用静压假设和 Boussinesq 假设。在对波生流的模拟中,引入时均剩余动量、破波水滚和波浪修正的紊动掺混效应,方程基本形式见式(1)~式(3)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial \omega U}{\partial \sigma} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_{mc} D \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[A_{mc} D \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_{mc}}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) - \frac{D}{\rho_w} \left(\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{D}{\rho_w} \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial VUD}{\partial x} + \frac{\partial \omega V}{\partial \sigma} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_{mc} D \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_{mc} D \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_{mc}}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) - \frac{D}{\rho_w} \left(\frac{\partial M_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{D}{\rho_w} \left(\frac{\partial R_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right)$$

式中 σ 为垂向坐标; η 为自由水面; t 为时间; x 和 y 为水平坐标; U 和 V 为水平流速分量; ω 为 σ 坐标系下的垂向流速分量; D 为水深; g 为重力加速度; M 为时均剩余动量; R 为破波水滚动量; K_{mc} 为波流共存的垂向紊动粘性系数; A_{mc} 为波流共存的水平紊动粘性系数; ρ_w 为水体密度。

1.2 三维波生时均剩余动量

从不同假设出发,许多学者各自推导了时均剩余动量垂向分布的表达式,其中应用较多的公式主要有 Mellor 公式^[1]、Xia^[2]公式和 Zhang 公式^[3]。本文采用 Zhang 公式^[3],其从 N-S 方程的垂向动量方程出发,假设水体无粘,密度不随时空变化,波浪采用线性波理论,其具体形式见式(4),式中 E 为波能; n 为波能传递率; k 为波数; δ 为克罗内尔标记; i, j 分别代表 x, y 方向。

$$M_{ij}(\sigma) = En \frac{k_i k_j}{|\vec{k}|^2} \frac{2k \cosh^2 |\vec{k}| (1 + \sigma) D}{|\vec{k}| D + \sinh |\vec{k}| D \cosh |\vec{k}| D} + \delta_{ij} \left[\frac{E |\vec{k}|}{2 \sinh^2 |\vec{k}| D} \sinh 2 |\vec{k}| (1 + \sigma) D - \frac{2E |\vec{k}|}{\sinh 2 |\vec{k}| D} \sinh^2 |\vec{k}| (1 + \sigma) D \right] \quad (4)$$

1.3 破波引起的表面水滚

当波浪破碎时,表面的卷曲(卷破波)或翻滚(崩破波)水体将导致表面动量的向岸传递,使得波生流的峰值向破波带内推移。Dally 和 Brown^[5]首次建立了水滚能量平衡方程,较好地解释了这一现象。Tajima 和 Madsen^[6]改进了 Dally-Brown 公式,并引入了“水滚传递率”的概念以区分不同破波类型。此外 Goda^[7]进一步对方程中的耗散项作了修正,考虑了不均匀底坡对能量损耗的贡献。

然而,文献[6-7]在推导中实际上认为水滚密度 $\rho_r = \rho_w$,而这一论断值得商榷。事实上,波浪破碎时,波峰表面的水滚体以白浪的形式传递,水滚体中掺有大量气泡,从而密度应小于海水密度。因此,笔者结合文献[5-7]的公式,重新建立了一个向岸传递、同时考虑水滚动量传递和水滚体密度影响的方程,形式如式(5)。

$$\frac{\partial}{\partial x}(ECn\cos\theta) + \alpha \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho_R A_R}{2T} C^2 \cos\theta\right) = -\frac{K_R}{D} \frac{\rho A_R}{2T} C^2 \quad (5)$$

式中 α 为水滚能量传递率, 取值在 $0 \sim 1.0$ 之间; A_R 为水滚面积; ρ_R 为水滚密度; $E = 1/8\rho_w g H^2$ 为波能; C 为波速; θ 为波向; T 为波周期; $K_R = 0.375(0.3 + 2.4s)$, 与地形相关, 其中 s 为底坡坡度。当沿程波浪参数确定后, 取破波点外 $A_R = 0$, 然后自破波点向岸迭代求解。

尽管破波水滚发生在波峰顶端, 然而其动量传递仍有一定下传。水滚动量的垂向分布采用 Haas 和 Warner^[9] 提出的反三角函数表达形式 $R_z(\sigma) = 1 - \text{th}(2\sigma h/H)^4$, 其中水滚面积的分层比例见式(6), 水滚能量表达式见式(7)。

$$R_{zn}(\sigma) = R_z(\sigma) / \int_{-1}^0 R_z(\sigma) d\sigma \quad (6)$$

$$E_R(\sigma) = \rho_R A_R R_{zn}(\sigma) C/2T \quad (7)$$

得到水滚能量 $E_R(\sigma)$ 后, 类似于时均剩余动量, 可得到水滚动量表达式, 见式(8)至式(10)。

$$R_{xx}(\sigma) = 2E_R(\sigma) \cos^2\theta, R_{yy}(\sigma) = R_{yx}(\sigma) = 2E_R(\sigma) \sin\theta \cos\theta, R_{yy}(\sigma) = 2E_R(\sigma) \sin^2\theta \quad (8)$$

1.4 波流共同作用下的底切力

波流共同作用下底切力的确定主要存在两种基本思路, 其一是采用紊流闭合模型求解边界层内流速; 其二是采用波浪摩阻系数的概念, 其中后者更易于应用至较大范围的水动力模式中。Soulsby 等^[10] 归纳了多家底切力公式, 并拟合出一个通用公式, 较为全面, 形式见式(9)。

$$\frac{\tau_{cw}}{\tau_c + \tau_w} = \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \left[1 + b \left(\frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^p \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^q \right] \quad (9)$$

式中 τ_{cw} 为波流共同作用的底切力; $\tau_c = \rho C_D u_c^2$ 为潮流引起的底切力, u_c 为近底参考点处流速, C_D 为潮流摩阻系数; $\tau_w = 0.5\rho f_w u_w^2$ 为波浪引起的底切力, $u_w = H\pi/T \sinh(kD)$ 为波浪底部最大质点流速, f_w 为波浪摩阻系数; b 、 p 、 q 为经验系数, 采用文献[10]中的推荐值。

1.5 波流共同作用下的紊动系数

波浪附加紊动包括水平紊动和垂向紊动两个方面。在当前模拟技术中, 对波流共同作用下的紊动特征尚未十分清晰。因此与文献[2]类似, 在波流共同作用的紊动描述中, 文中分别单独求解水流与波浪引起的紊动系数 A_M 与 K_M , 并将其线性叠加, 可表达为

$$A_{Mc}(\sigma) = A_M(\sigma) + A_w(\sigma) \quad (10)$$

$$K_{Mc}(\sigma) = K_M(\sigma) + K_w(\sigma) \quad (11)$$

1.5.1 水平紊动系数

水流引起的水平紊动系数 $A_M(\sigma)$ 采用 Smagorinsky 方程求解, 形式见式(12), 其中 Δx 和 Δy 为 x 和 y 方向的空间步长; C_s 为经验系数, 取值在 $0.1 \sim 0.2$ 左右。

$$A_M = C_s^2 \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

针对波浪水平紊动系数, Goda^[7] 曾对多家公式进行了比较, 并指出 Larson-Kraus 公式^[11] 在沿岸流的模拟中效果最佳, 该公式认为波浪引起的水平紊动与最大流速和波高有关。因此, 本文中将沿用 Larson-Kraus 公式中的思路, 具体形式见式(13)。

$$A_w = \lambda u_{\max} H \quad (13)$$

式中 λ 为无因次系数; u_{\max} 为波浪底部最大质点流速。值得注意的是, Larson-Kraus 表达式无法描述水平紊动的垂向分布, 而实际上由于波浪质点振荡的幅度在垂向有所区别, 因此水平紊动亦应在垂向有所差异。因此, 笔者采用线性波理论修正式(13), 将 u_{\max} 采用 $u_{\max}(\sigma)$ 替换, 得到式(14)。

$$A_w(\sigma) = 2\lambda H^2 \cosh((1 + \sigma)kD) / T \sinh(kD) \quad (14)$$

1.5.2 垂向紊动系数

水流引起的垂向紊动系数 $K_M(\sigma)$ 采用 Mellor-Yamada 紊流闭合方程求解, 由于原始方程形式冗长, 为节省篇幅不在此罗列。对波浪垂向紊动的研究相对较为匮乏, 前苏联学者 Бацкировр 和 Жуковец 认为紊动系数在垂向应有一定的分布, 并利用紊流理论结合线性波理论对波浪紊动现象进行了推导, 经 σ 坐标转换, 其表达式见式(15), 其中 b 为无因次系数, 量级为 10^{-3} , 需在模拟过程中进行率定。

$$K_w(\sigma) = bgTH\cosh(k(1 + \sigma)D)/4\pi\cosh kD \quad (15)$$

1.6 Stokes 漂流

值得注意的是, 在数值模拟过程中, 由于波生时均剩余动量推导采用了广义 Lagrangian 平均法 (GLM), 因此所得流速亦为 Lagrangian 体系下, 但是, 实测流速数据为 Eulerian 体系下, Haas 和 Warner^[9] 指出两者相差 Stokes 漂流 (Stokes drift), 其计算公式如下:

$$U^s = \frac{2k_x}{c} \frac{\cosh 2kD(1 + \sigma)}{\sinh(2kD)} \left(\frac{E}{\rho_w} + \frac{DgA_R}{L} \right), \quad V^s = \frac{2k_y}{c} \frac{\cosh 2kD(1 + \sigma)}{\sinh(2kD)} \left(\frac{E}{\rho_w} + \frac{DgA_R}{L} \right) \quad (17)$$

式中 U^s 、 V^s 分别代表 x 、 y 方向的 Stokes 漂流流速。

在以下对实测资料的验证中, 均采用 Eulerian 体系下的流速, 因此, 计算输出的流速在验证前应首先进行转换, 其转换关系如下:

$$(U, V)^E = (U, V)^L - (U, V)^S \quad (18)$$

式中 E 、 L 分别代表 Eulerian 体系和 Lagrangian 体系。

1.7 求解技术

方程求解技术采取内外模式分裂法, 平面求解采用显式差分, 垂向求解采用隐式差分。网格配置采用 Arakawa-C 网格, 其中时均剩余动量项和水滚动量项均布置在网格中心。波浪近岸增水将引起漫滩, 动边界处理采用 Oey 提出的 OGCM 法^[12]。

2 模式验证

模式建立后, 需采用一定数量的实验数据对模式进行测试, 以保证其适用性与通用性。因此, 以下将对不同维度的波生流现象进行模拟和验证, 其中包括一维 (1D) 的波浪增减水、垂向二维 (2DV) 的底部离岸流、准三维 (quasi-3D) 的沿岸流, 以及平面二维 (2DH) 的裂流、堤后环流现象等, 分别从不同角度考察所建模式在不同维度及工况下对实测现象的描述力。

2.1 底部离岸流现象

Ting 和 Kirby^[13] 利用波浪水槽进行了多组试验, 详尽研究了不同破波类型、规则与不规则波条件下的底部离岸流特性。试验水槽长 40.0 m, 地形坡度 1:35, 静水深设置为 0.40 m。本文采用规则波条件下的卷破波 (plunger) 为例进行验证, 其中波浪自正向入射, 深水波高 0.128 m, 波周期 5.0 s, 破碎波高 0.188 m。在波高沿程分布的确定中, 由于在临近破碎的区域, 强烈的非线性效应使得波形改变, 波峰陡峭波谷平坦, 甚至出现孤立波。这样的动力条件使得大部分波浪数值模式在破波点附近区域失效, 因此文中采用拟合实测数据的方式对波浪参数进行确定, 拟合情况见图 1, 其中 P1 至 P7 代表实验中的观测断面位置。

数学模型中的输入参数见表 1。增减水、流速垂向分布验证情况见图 2 和图 3, 图中纵坐标 z/D 代表相对水深。图中看出, 计算增减水梯度较实测值偏大。实际上, 在该试验中增减水数值仅在毫米量级, 在仪器测量误差内, 从而其数值并非严格可靠, 特别是在崩破波工

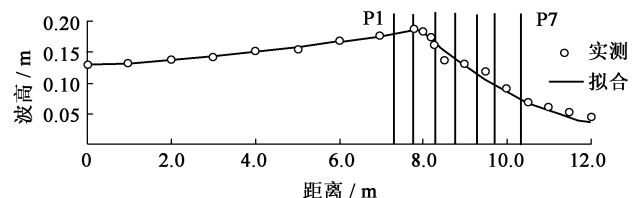


图 1 Ting-Kirby 算例沿程波高拟合情况

Fig. 1 Comparison of the observed and fitted wave heights for the Ting-Kirby case

况下, 实测值甚至未出现减水现象, 从而不能完全作为判断数学模型精度的依据。至于流速垂向分布, 尽管量级和分布形态近似一致, 计算流速梯度较之实测值显得更加均匀。经分析, 临近破碎的波浪形状接近椭圆余弦波, 然而文中采取的时均剩余动量公式为基于线性波理论推导所得, 从而实际中强烈的非线性效应使得在线性波理论下推导的动量传递与真实破波条件有一定出入, 因此得到的垂向结构也应有所差异。尽管如此, 图2和图3中仍反映出所建模型有效把握了增减水和底部离岸流的整体分布形态, 能够合理描述波浪引起的垂向时均流场结构, 所模拟得到的分布规律和量级均合理。

表1 数值试验输入参数

Table 1 Input parameters for the numerical experiments

算例	水平步长/m	垂向层数	时间步长/s	b	α	$\rho_R / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	λ
Ting-Kirby	0.1	11	0.015	0.001	0.60	900	0.20
Visser	0.2	6	0.030	0.001	0.40	900	0.40
UKCRF	0.1	4	0.010	0.001	/	/	0.40
Nicolson	20.0	6	3.000	0.001	/	/	0.40

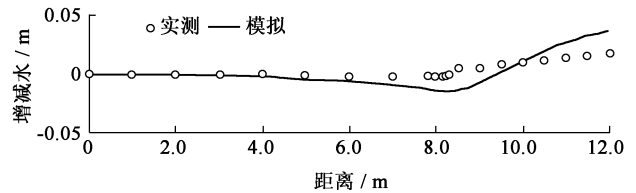


图2 Ting-Kirby 试验增减水验证

Fig. 2 Comparison of the observed and simulated wave set up/down for the Ting-Kirby case

此外, 图4中示意了底部离岸流的垂向分布结构, 流场显示破波带内表层离岸流动, 底层向岸流动, 其中越向近岸, 底部离岸流越强。这一流场特征与 Svendsen^[14]的描述是一致的。

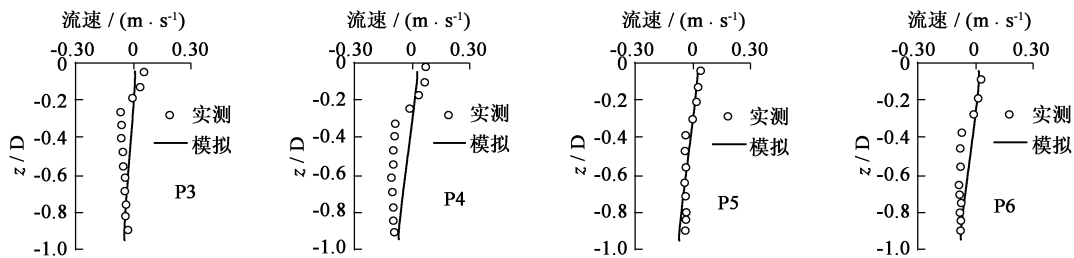


图3 Ting-Kirby 试验垂向流速结构验证

Fig. 3 Comparison of the observed and simulated current speeds for the Ting-Kirby case

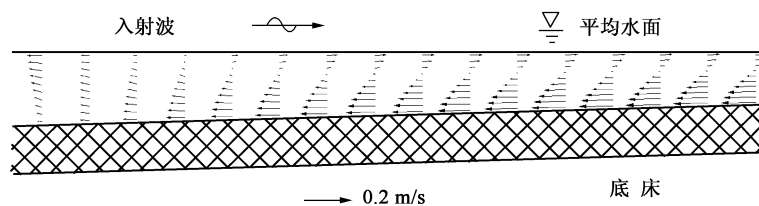


图4 Ting-Kirby 试验垂向流速结构示意图

Fig. 4 Velocity vectors of the undertow structure for the Ting-Kirby case

2.2 沿岸流现象

沿岸流验证采用 Visser 建立的高精度沿岸流水槽^[15]。试验中地形坡度为 1:20, 坡前水深 0.35 m。数值试验中选取 4 组对模型进行验证。其中波浪条件为卷破波, 波浪入射角度为 15.4°, 入射波高 0.078 m, 波周期 1.02 s。模型输入参数见表 1, 波高沿程分布与流速验证见图 5。

图 5 中显示, 所得沿岸流结构与实测值达到相当良好的相关度。通过引入水滚效应, 沿岸流的峰值位置和垂向平均流速的数值均与实测值吻合。理论分析表明, 沿岸流主要驱动力为时均剩余动量的沿岸分量 M_{xy} 、破波水滚动量 R_{xy} 、床面阻力与紊动掺混。当波浪与岸线存在夹角入射时, 剩余动量的沿岸侧向分量将驱动水体在沿岸方向产生稳定的净流动。在破波点附近, 波高迅速变化导致动量梯度增大, 因此沿岸流速较

高；而在深水区域，尽管波高较大，但沿程波高差异很小，从而形成的动量梯度远较破波带内低，因此在破波带外的沿岸流速很低，并向离岸方向减小直至为零。在水平紊动掺混的作用下，沿岸流分布呈现类似抛物线的形状。

值得指出的是，区别于潮流的近对数分布形态，观测数据显示破波带内沿岸流速的垂向分布较为均匀。这种特征与波浪引起的附加垂向紊动掺混有关，其中较大的附加粘性可使得流速垂向剖面更加均匀。因此，图6中进一步验证了不同观测断面的垂向流速分布，图中 V 代表当层流速， V_{ave} 代表垂向平均流速。图6显示出，当引入波浪垂向紊动效应后，所模拟得到的沿岸流垂向梯度总体来讲与实测值规律更加相近。

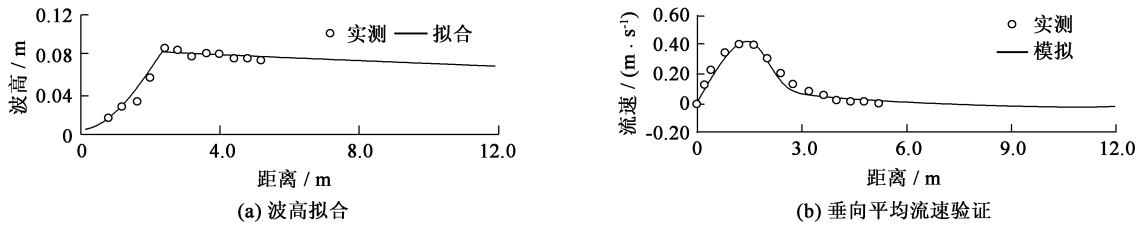


图5 Visser 试验波高与沿岸流验证情况

Fig. 5 Comparison of the observed and simulated parameters for Visser case

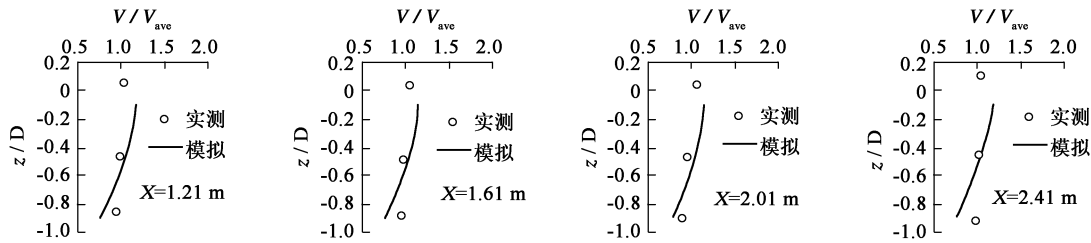


图6 Visser 试验沿岸流垂向流速分布验证

Fig. 6 Comparison of the observed and simulated longshore current profiles for the Visser case

2.3 裂流现象

以上探讨的底部离岸流和沿岸流现象均为沿岸地形均匀平直条件下的流态。然而，实际海滩剖面在沿岸方向是不规则变化的，这种地形的沿程不均匀将会导致裂流现象。Borthwick 和 Foote^[16]建立了 UKCRF 水槽，并研究了正弦波状地形下、不同入射角度的波生裂流结构，水槽地形见图7(a)。本文中采用波浪正向入射的算例进行验证，其中入射波高0.125 m，波周期1.2 s。数学模型输入条件见表1，所模拟得到的垂线平均流场结果见图7(b)，实测数据见图7(c)。

通过与实测数据的对比，所模拟的裂流流场无论是流流量级还是环流位置、分布规律均与实测资料吻合良好，证明了本文中模型在裂流现象研究的适用性。值得一提的是，Rogers 等^[17]亦采用 Godunov 模式对 UKCRF

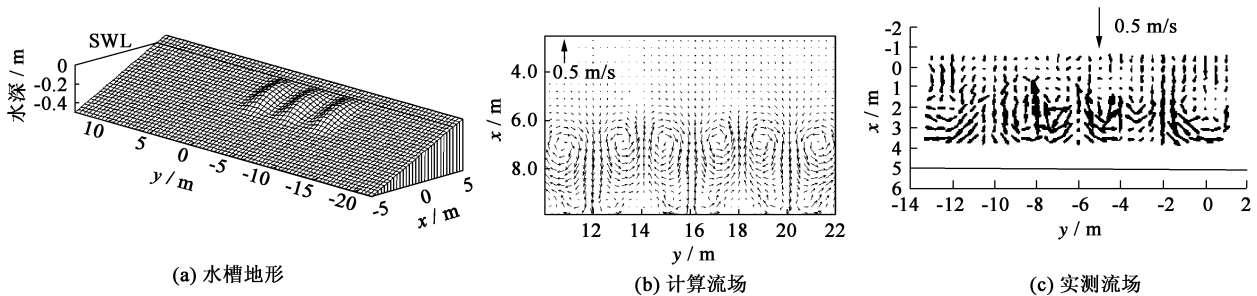


图7 计算地形与垂线平均流场验证

Fig. 7 Comparison of the observed and simulated parameters for the Borthwick-Foote case

算例进行研究, 得到的流场形态与图 7(b) 十分类似, 从而认为所建模式可以很好地模拟这一物理现象。

2.4 堤后环流现象

经验和观测均显示, 离岸堤后的波影区内将形成对称立轴环流结构, 这是由于波浪绕射形成堤后波影区剩余动量的各向梯度, 从而驱生了环形的时均流。为了评价近岸波生流模型的适用性, Nicholson 等^[18]就此现象建立了数值试验对几种较为成熟的二维数值模式进行比较, 其中包括 DHI 模式、DH 模式、HR 模式、STC 模式以及 UL 模式等。本文中采用其数值试验对所建模型进行考察, 可将本文模式与国际上广受承认的数值模式进行对比。

数值试验地形采用均匀坡度的平直岸滩, 底坡选取 1:50。离岸方向 220 m 处设置防波堤, 堤长 300 m, 宽 40 m。波浪自 -12 m 等深线正向入射, 深水波高 2.0 m, 周期 8.0 s。数值模拟输入参数见表 1。

为节省篇幅, 图 8 中仅给出与 DHI 模式计算结果的对比示意图, 图 8(a) ~ 图 8(c) 为本文模式计算值, 图 8(d) ~ 图 8(f) 为 DHI 模式计算值。图中显示出, 本文模式所得的环流运动规律与 DHI 模式相近。至于差异, 这是由于波生流模型是直接驱动力是波浪参数, 而各家模型中所采用的波浪数值模式均不同, 因此波浪参数势必有所差异; 此外, 以往的波生流数值模式中未考虑波浪紊动作用, 也是形成差异的另一个原因。

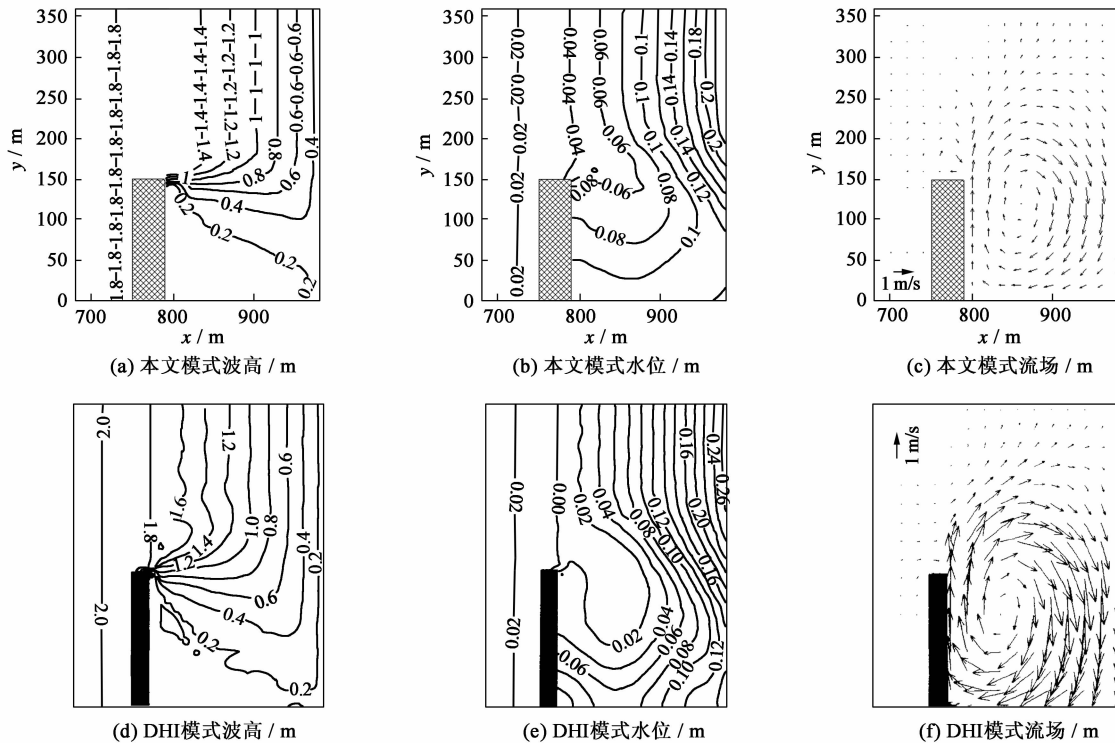


图 8 本文模式与 DHI 模式计算波浪场、水位场与流场对比示意图

Fig. 8 Comparison of the simulated parameters between our model and DHI model for the Nicholson case

综上所述, 文中所建的波生流三维计算模式可有效描述不同维度的波生流现象。无论是 1D 条件下的增减水、2DV 条件下的底部离岸流垂向分布、准 3D 模式的沿岸流及其垂线分布, 以及 2DH 条件下的裂流和堤后环流平面分布, 均可与实测数据或文献资料达到良好的一致性。此外, 模拟得到的垂线平均流速结果亦与国际上较为成熟的二维数值模式结果相近, 从而进一步证明了所建模式的可靠性和稳定性。

3 结 论

(1) 开发建立了近岸波生流运动三维计算模式。引入了三维波生时均剩余动量、破波表面水滚、波生水平与垂向紊动效应作为波生流的主要驱动力。此外也考虑了波流共同作用下的剪切力。

(2) 推导了综合考虑底坡、能量传递率和水滚体密度的破波水滚能量传输方程；将 Larson-Kraus 的二维波浪水平紊动表达式拓展至三维，可反映波浪紊动的垂向分布。

(3) 利用大量试验数据和文献资料，对所建模式进行了充分测试和检验。模拟了 2DV 条件下的底部离岸流，准 3D 条件下的沿岸流的水平、垂向分布，2D 条件下的裂流、堤后环流等经典波生流现象。计算结果表明所建模式可以很好的模拟各种维度下的波生流现象，所得结果与实测数据吻合良好，且其 2D 结果与国际上较为成熟的 2D 数值模式亦达到良好的一致性。

(4) 破波水滚效应在波生近岸流的研究中十分重要，不能简单忽略。通过引入修正过的水滚传输方程，可很好的模拟波生流峰值向岸推移的物理现象。

(5) 通过引入波浪引起的附加紊动效应，可较好的解释破波带内沿岸流速垂向较为均匀这一物理现象。

参考文献：

- [1] MELLOR G L. Some consequences of the three dimensional current and surface wave equations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 33: 1978-1989.
- [2] XIA H Y, XIA Z W, ZHU L S. Vertical variation in radiation stress and wave-induced current [J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51: 309-321.
- [3] ZHANG D. Numerical simulation of large-scale wave and currents[D]. Singapore: National University of Singapore, 2004.
- [4] SVENDSEN I A. Wave heights and set-up in a surf zone [J]. *Coastal Engineering*, 1984, 8: 303-329.
- [5] DALLY W R, BROWN C A. A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C12): 24873-24883.
- [6] TAJIMA Y, MADSEN O S. Shoaling, breaking and broken wave characteristic[C] // Proc 28th Conf. World Scientific, Cardiff, Wales, 2002: 222-234.
- [7] GODA Y. Examination of the influence of several factors on longshore current computation with random waves [J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53: 157-170.
- [8] PUTREVU U, SVENDSEN I A. Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 1999, 18(3): 409-427.
- [9] HAAS K A, WARNER J C. Comparing a quasi-3D to a full 3D nearshore circulation model: SHORECIRC and ROMS[J]. *Ocean Modeling*, 2009, 26: 91-103.
- [10] SOULSBY R L, HAMM L, KLOPMAN G, et al. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer [J]. *Coastal Engineering*, 1993, 21: 41-69.
- [11] LARSON M, KRAUS N C. Numerical model of longshore current for bar and trough beaches [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1991, 117(4): 326-347.
- [12] OEY L Y. An OGCM with movable land-sea boundaries [J]. *Ocean Modelling*, 2006, 13: 176-195.
- [13] TING F C K, KIRBY J T. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone [J]. *Coastal Engineering*, 1994, 24: 51-80.
- [14] SVENDSEN I A. Mass flux and undertow in a surf zone [J]. *Coastal Engineering*, 1984, 8: 347-365.
- [15] VISSER P J. Laboratory measurements of uniform longshore currents [J]. *Coastal Engineering*, 1991, 15: 563-593.
- [16] BORTHWICK A G L, FOOTE Y L M. Nearshore measurements at a cusped beach in the UK Coastal research Facility[C] // Coastal Dynamics'97. Plymouth: ASCE, USA, 1997: 953-962.
- [17] ROGERS B D, ALISTAIR G L, TAYLOR P H. GODUNOV-type model of wave-induced nearshore currents at a multi-cusped beach in the UKCRF[C] // 28th International Conference of Coastal Engineering. Cardiff Wales: World Scientific 2002.
- [18] NICHOLSON J, BROKER I, ROELVINK J A, et al. Intercomparison of coastal area morphodynamic models [J]. *Coastal Engineering*, 1997, 31: 97-123.

3D numerical modeling of nearshore wave-induced currents

XIE Ming-xiao^{1,2}, ZHANG Wei³

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A three-dimensional (3D) numerical model for nearshore wave-induced currents is established, in which the phase-averaged 3D residual momentum flux, surface roller and wave turbulence are introduced as driving forces, and the wave-current combined bottom shear stress is taken into account. An energy balance equation of the surface roller is derived, considering the bottom slope, energy transmission rate and roller density. The Larson-Kraus formula for the 2D wave turbulent mixing coefficient is extended to its 3D form. A number of experimental cases are used to validate the model, including the wave setup/setdown (1D), undertow (2-DV), longshore current (Q3-D), rip current (2-DH) and the circulation behind a detached breakwater (2-DH). The validation results show that the model is able to effectively describe the wave-induced current phenomena of various dimensions, and the incorporation of the surface roller is mandatory. The uniformity of the longshore current speed profile in the surfzone is related to the vertical turbulent mixing in the effect of waves.

Key words: 3D wave-induced current; phase-averaged residual momentum; surface roller; wave turbulence; model validation

气候变化与水问题国际研讨会在南京召开

“气候变化与水问题国际研讨会”(International Symposium on Climate Change and Water)于2011年4月20~21日在南京召开。会议由南京水利科学研究院、水利部应对气候变化研究中心、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、中国水利学会水文专业委员会、国际水文科学协会中国国家委员会主办,河海大学、中国水利水电科学研究院、北京师范大学、南京大学、中山大学、水利部水科学与水工程重点实验室、国家重点基础研究发展计划“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”、(中-英-瑞)中国适应气候变化项目、水利部公益性行业重大科研专项“气候变化对我国水安全的影响及适应对策”、《水科学进展》编辑部等共同协办。本次会议旨在探讨全球气候变化背景下的水问题。会议收到研究论文130余篇。参会代表来自16个国家和地区,共170余人。

中国工程院院士、南京水利科学研究院院长张建云教授、荷兰三角洲研究院科技院长 Huib de Vriend 教授、澳大利亚水质研究院院长 Michael R. Moore 教授、河海大学水文学院院长余钟波教授、IAHS 秘书长 Pierre Hubert 博士、美国海洋大气局卫星应用及研究中心主任 Alfred Powell 教授、国家气候中心任国玉教授、HR Wallingford 水工研究所技术主管 David M Ramsbottom 教授、中国水利水电科学研究院严登华教授、美国 Ohio 州立大学地球科学院院长 Frank Schwartz 教授、北京师范大学夏星辉教授、美国河畔科技公司总裁及首席执行官 Larry Brazil 博士等12位专家先后做大会主旨报告,涉及气候变化影响及适应、水环境变化、新技术应用等众多方面的研究进展、应用研究。

本次研讨会根据议题设置了4场分会场报告,共有61个报告在各分会场交流。来自国内外气候变化与水问题主要的研究和管理组织的参会代表就气候变化模拟、气候变化对水环境的影响、流域水文模拟及气候变化评估、气候变化减缓和适应等方面进行了深入交流和讨论。本次会议在深入探讨气候变化与水问题研究领域的研究进展、交流研究成果、启发研究思路、促进国内外广泛的交流与合作、寻求气候变化应对策略等方面将起到积极的促进作用。

(贺瑞敏)