

一种适用于潜坝流场计算的全流模型

宋志尧 李荣辉

(河海大学海岸及海洋工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 根据浅水方程的基本假定 ,针对工程问题研究的实际需要 ,结合动量系数的定义 ,从理论上建立了一种适用于潜坝水流场计算的全流模型 .该模型是对浅水方程模型的推广 ,适用于潜坝等工程建筑物的水流场数值计算 .

关键词 浅水方程 动量系数 潜坝 全流模型 流场

中图分类号 :TV131.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2002)03-0024-04

在河口与海岸工程研究中 ,随着水动力学和数值方法的发展 ,数学模型及其数值模式已逐渐替代物理模型 ,成为许多工程问题研究的重要手段 ,且应用日益广泛 .浅水方程是研究河口与海岸水动力数学模型的基本控制方程 ,它是三维天然水流在宽浅水域的简化形式 ,水体运动简化为均匀流动 ,一般适用于天然缓变地形 ,对一些因工程 (如疏浚、潜坝等) 引起的突变地形是不适用的 .

丁坝是河口与海岸工程中一种常见的整治建筑物 ,起着挑流、导流、束水和攻沙的重要作用 .潜坝是丁坝一种 ,在河口与海岸水域 ,高水位时它淹没在水下 ,而低水位时露出水面 .对这一工程问题的水动力学研究 ,许多数值模式只作了简单的处理 ,如套用堰流公式或简单改变地形以增加局部粗糙度等 ,这在理论上是不严格的 ,因为数学模型的控制方程并没有根本变化 .

动量系数是反映流速垂线分布非均匀程度的一个重要参数 ,理论上对三维天然水流而言 ,该系数可理解为其水深平均二维动量方程中对流项的修正系数 ,故也常称为动量修正系数 .Falconer^[1]、宋志尧^[2]和章卫胜曾对此作过一定的研究 .动量系数是水深平均的二维水流方程与浅水方程的区别所在 ,但在许多河口与海岸水动力研究中两者是等同的 ,而且动量系数都是 1 .

本文针对潜坝引起的突变地形 ,从三维天然水流的运动方程出发 ,结合浅水方程的基本假定 ,通过变量间的等量置换 ,并引入动量系数 ,从理论上建立了一种适用于潜坝水流场计算的全流模型 .该模型是浅水方程模型的推广形式 ,适用于潜坝等工程建筑物的水流场数值计算 .

1 全流方程与浅水方程

天然水流是三维的 ,数学模型最终必须以三维形式模拟水动力过程 ,才能全面地反映其特征 .但对许多工程问题的研究 ,则常常进行必要的简化 ,如刚盖假定、Boussinesq 假定、静压近似和摩阻项近似等 ,全流模型就是其中最常用的 .在笛卡尔坐标系中 ,全流模型的控制方程应该表示为

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \tag{1}$$
$$\begin{aligned} &\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{xx}\bar{U}^2D) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{xy}\bar{U}\bar{V}D) = \\ &\bar{f}VD - gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H D \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{g}{C^2} \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \bar{U} \tag{2} \\ &\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{yx}\bar{U}\bar{V}D) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{yy}\bar{V}^2D) = \end{aligned}$$

收稿日期 2001-12-04

基金项目 河海大学科技创新基金(2001401143)

作者简介 宋志尧(1964 —) 男 ,浙江余姚人 ,副研究员 ,博士 ,主要从事河口、海岸水动力学理论和数值模拟技术等研究 .

$$-f\bar{U}D - gD\frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H D \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{g}{C^2} \sqrt{U^2 + V^2} \bar{V} \tag{3}$$

式中： $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ ——水深平均流速在笛卡尔坐标 x 和 y 方向的分量； η ——水位； D ——总水深， $D = h + \eta$ ， h ——静水深； β ——动量系数； C ——谢才系数； ρ_0 ——水的密度； g ——重力加速度； $f = 2\Omega \sin \varphi$ ——科氏力系数（ Ω 为地球自转角速度， φ 为水域的地理纬度）； A_H ——水平方向的涡粘系数； τ_{sx} 、 τ_{sy} ——风应力在 x 和 y 方向上的分量。

对三维水平流速 u 和 v ，各动量系数定义为

$$\beta_{xx} = \int_0^D u^2 dz / (\bar{U}^2 D) \quad \beta_{xy} = \beta_{yx} = \int_0^D uv dz / (\bar{U} \bar{V} D) \quad \beta_{yy} = \int_0^D v^2 dz / (\bar{V}^2 D) \tag{4}$$

对浅水而言，由于水平尺度远大于垂直尺度，因而许多天然流态，其垂向流速分量比水平方向的流速分量要小的多，并且流动的垂直加速度也远小于重力加速度，因而引入静压近似是合适可行的。另一方面，无论经验的流速分布公式，还是实测流速的分析计算^[2,3]，都表明浅水运动的各动量系数非常接近 1，平均约为 1.07，因此取各动量系数为 1 的对流项近似也是合理的。事实上，对流项近似下的全流方程（1）~（3）也就是常说的浅水方程，全流模型就是浅水方程模型，而在许多应用计算中，两者也常常是不加区分的。

2 推广的浅水方程

在河口与海岸等浅水地区，潜坝等整治工程的实施，一般用水力学方法进行近似处理^[4,5]，即（a）坝上下游单宽流量相等（b）坝上下游水位满足宽顶堰流公式：

$$\begin{aligned} \text{当 } \eta_d \geq \frac{2}{3} \eta_u + \frac{1}{3} \eta_0 \text{ 时} \quad & q = \alpha \sqrt{2g} (\eta_d - \eta_0) (\eta_u - \eta_d)^{3/2} \\ \text{当 } \eta_d \leq \frac{2}{3} \eta_u + \frac{1}{3} \eta_0 \text{ 时} \quad & q = \frac{2\alpha}{3} \sqrt{2g/3} (\eta_u - \eta_0)^{3/2} \end{aligned}$$

式中： q ——越坝单宽流量； α ——流量系数（介于 0.8 与 1.0 之间）； η_0 ——坝顶水位； η_u ——潜坝上游水位； η_d ——潜坝下游水位。使用这公式是有条件的，一是适用于恒定的非惯性流动，二是没有考虑风作用和柯氏力作用，况且流量系数的选取也会因人而异，这都会影响工程计算的精度和可信度。

从全流方程与浅水方程之间的联系可见，均匀流条件下的全流方程就是浅水方程。根据潜坝周围的流动特性，在潜坝附近，流速垂直分布是不均匀的，而在潜坝处，流速垂直分布应分为两段，上段越坝流速是均匀的，但下段因坝体阻隔，流速为零。通过对动量系数的计算和分析，发现尽管在潜坝周围流速垂直分布出现不均匀现象，但动量系数的变化却是连续的。据此，由水深平均的概念，从全流方程的角度，可对浅水方程进行推广，以利于工程的应用。

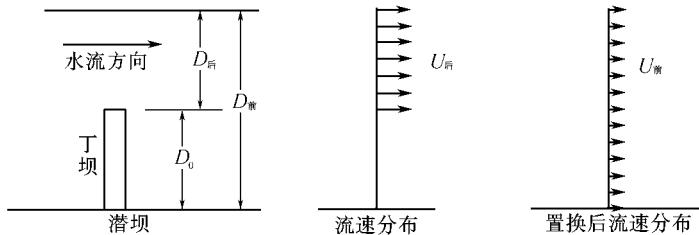


图 1 潜坝及流速分布

Fig.1 Sketch of submerged dike and velocity profile

以 x 方向的越坝流动为例（如图 1），在潜坝处，工程前后有两个水深 $D_{前}$ 和 $D_{后}$ ，因而工程前后也有两个相对应的水深平均流速 $U_{前}$ 和 $U_{后}$ 。如果潜坝高为 D_0 ，根据越流条件（即流量相等）对 $U_{前}$ 和 $U_{后}$ 进行等量置换，即将越坝平均流速置换为全水深（包括坝高）的平均流速，则

$$D_{前} = D_{后} + D_0 \tag{5}$$

$$U_{前} = U_{后} D_{后} / D_{前} \tag{6}$$

同时，动量系数依定义（4）则为

$$\beta = D_{前} / D_{后} \tag{7}$$

通过等量置换，方程（2）（3）有

$$\frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{xx}\bar{U}^2D) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{xy}\bar{U}\bar{V}D) = \bar{f}VD - gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H D \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \beta_{xx} \frac{g}{C^2} \sqrt{\beta_{xx}^2 \bar{U}^2 + \beta_{yy}^2 \bar{V}^2} \bar{U} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{yx}\bar{U}\bar{V}D) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{yy}\bar{V}^2D) = -\bar{f}\bar{U}D - gD\frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H D \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \beta_{yy} \frac{g}{C^2} \sqrt{\beta_{xx}^2 \bar{U}^2 + \beta_{yy}^2 \bar{V}^2} \bar{V} \quad (9)$$

当各动量系数都取1时,方程(8)(9)就是常用的浅水运动方程,因此,方程(8)(9)是浅水运动方程在潜坝工程条件下的一种推广。

3 模型说明

a. 在模型方程(8)(9)中,流速值为 $U_{\text{前}}$ 或 $V_{\text{前}}$,因此工程应用时,无需改变潜坝处的水深,只需改变潜坝附近的动量系数,但计算结果在潜坝处应恢复为越坝流速,即 $U_{\text{后}} = \beta U_{\text{前}}$ 。

b. 当(8)(9)置换为越坝流速 $U_{\text{后}}$ 或 $V_{\text{后}}$ 时,潜坝处的水深应是坝顶至水面的高度,推广的浅水运动方程还可写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} &= \bar{f}\bar{V} - g\beta_{xx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 D} - \frac{g}{C^2 D} \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \bar{U} \\ \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} &= \bar{f}\bar{U} - g\beta_{yy} \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 D} - \frac{g}{C^2 D} \sqrt{\bar{V}^2 + \bar{U}^2} \bar{V} \end{aligned} \quad (10)$$

由于潜坝处的动量系数肯定大于1,而且有时比1要大得多,因此,计算潜坝附近的平面流场时,应用浅水方程只简单地改变潜坝处的水深,这在理论上是存在缺陷的。

c. 对恒定的 x 方向流动,假定水流垂直越过潜坝,且不考虑惯性作用、扩散作用、风作用、柯氏力和底床摩阻力,当 $\beta_{xx} = 1$ 时,由方程(10),通过伯努利方程和室内试验可得宽顶堰流公式,因此,宽顶堰流公式只是本文所建立的全流模型的一种简化形式。

d. 考虑到水平方向的涡粘系数 A_H 在模型及其计算中的特殊性,不同模型方程其值的选取是不一样的,因此本文暂不考虑这一区别。

4 结 论

本文针对研究工程问题的实际需要,分析讨论了全流方程和浅水方程之间的区别和联系,根据浅水方程的基本假定,引入动量系数的概念和定义,从理论上建立了一种适用于潜坝水流场计算的全流模型。分析研究表明,现有数值模式对潜坝所作的简单处理,如应用堰流公式或简单改变地形等,在理论上都是不严格的;而本文所建立的模型是对浅水方程模型的理论推广,可有效地应用于潜坝等工程建筑物的水流场数值计算。

参考文献:

- [1] Falconer R A, Owens P H. Numerical modelling of suspended sediment fluxes in estuarine waters[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1990, 31: 745 ~ 762.
- [2] 宋志尧. 海岸河口三维水流场垂向级数解模型[D]. 南京:河海大学, 1999.
- [3] Falconer R A. Numerical model of tidal circulation in harbors[J]. J of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 1980, 106 (WW1): 13 ~ 48.
- [4] Dronker J J. Tidal computations in rivers and coastal waters[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1964. 56 ~ 57.
- [5] Usseglio-Polatera L M, Hamm L. Numerical modelling of submersible dikes in tidal flow[A]. In: Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Water[C]. University of Bradford, 1991. 135 ~ 144.

Depth-Averaged Mathematical Model for Calculation of
Flow Field over Submerged Dikes

SONG Zhi-yao , LI Rong-hui

(Research Institute of Coastal and Ocean Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract: Based on the basic assumptions of the shallow water equation and demands of research on engineering problems , in combination with the definition of momentum coefficient , a depth-averaged mathematical model is developed theoretically for calculation of flow field over submerged dikes. The model is an extension of the shallow water equation model , and can be applied to simulation of flow fields for such engineering structures as submerged dikes.

Key words : shallow water equation ; momentum coefficient ; submerged dike ; depth-averaged model ; flow field

· 简讯 ·

移民与社会发展国际研讨会在南京举行

“ 移民与社会发展国际研讨会 ” 于 2002 年 5 月 12 日至 14 日在中国南京举行 , 会议由水利部水库移民开发局主办 , 世界银行、亚洲开发银行、国土资源政策法规司与耕地保护司、国务院三峡建设委员会移民开发局办公室、河海大学等协办 , 河海大学移民研究中心承办。来自世界银行、亚洲开发银行等国际机构与澳大利亚、南非、德国、土耳其、印度、越南、加拿大、英国、美国、喀麦隆、法国等 11 个国家的大学和研究机构的 30 名国际专家、学者和水利部、国土资源部、三峡建设委员会、财政部、铁道部、国内 7 所大学与研究机构、有关省 (市) 移民管理部门、项目实施机构和项目业主单位的 100 多名专家、学者、管理人员和实际工作者参加了会议。Michael Cernea , Ted Downing , Stephen Lintner , Deniel Gibson , Susanna Price 等国际知名社会学家和移民专家参加了研讨会。会议以移民与社会发展为主题 , 就移民政策、理论与实践、移民收入与生活水平恢复、移民风险与重建、移民与反贫困、移民权益保护、移民科学的建立与发展等内容进行了广泛的交流和热烈的讨论。

会议共收到国内外论文 170 多篇 , 经专家审定 , 共有 120 多篇论文收入大会论文集 , 其中国际机构和国外作者的论文 25 篇 , 有 50 篇论文在大会上宣读交流。本次大会专家云集 , 是世界历史上有关非自愿移民方面规模最大、人数最多的一次盛会 , 标志着世界移民科学发展的新阶段。

本次会议研讨的要点如下 : 非自愿移民不仅仅是项目建设问题 , 而是一个复杂的社会经济问题 , 必须制定系统的适合本国国情的移民政策 , 并且通过相关的法律和行政规章来规范移民活动 , 保护移民和利益相关者的权益。移民搬迁安置后的生产、生活水平恢复和发展问题是移民必须解决的主要问题。会议就移民安置模式、收入恢复的监测与评估、收入恢复的评价体系与指标 , 进行了广泛的研讨。收入恢复的关键取决于合适的安置模式和科学的管理方法。移民搬迁面临着社会关系和生产网络的破坏 , 而且远迁者面临的是一个陌生的环境 , 加之搬迁时生产的暂时中断 , 决定移民安置不仅仅是简单的补偿与家园的重建 , 而是面临着种种风险 , 其中最大的风险就是贫困风险。对这些风险如何评估、风险因素如何控制等都是关系到移民的发展问题 , 也是专家学者关注和研究的课题。围绕 Michael Cernea 博士的移民风险模型 , 会议收到有关论文 7 篇 , 结合不同国家和工程的实际 , 从理论、实践上进行了深入的探讨。移民风险可以通过建立科学适用的系统进行预测、诊断和控制。

移民研究应多视角去考虑。移民与反贫困、移民参与和协商、移民权益的保护、移民社会调适 (经济和文化等方面的整合) 等都是今后在理论研究和实践探讨上应该强调的问题。

世界非自愿移民活动走过曲折、艰苦的道路 , 从一般关注到广泛的研究 , 从工程视角探讨到多视角研究 , 移民科学取得了巨大进展。经济学、社会学等多学科的溶入 , 将会使移民学科更加丰富和完善 , 将推动移民工作迈上新的里程。

河海大学移民研究中心
余文学、施国庆供稿