

高桩码头对河道流场影响的数值模拟

李光炽¹,周晶晏²,张贵寿³

(1. 河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学交通与海洋工程学院,江苏 南京 210098;
3. 绍兴文理学院土木工程系,浙江 绍兴 312000)

摘要 在讨论高桩码头对河道流场影响数值模拟方法的基础上,为确保流场模拟精度,采用正交边界拟合坐标变换法模拟弯曲变化的河道计算域,应用二维全隐式耦合联解模型离散控制方程、矩阵追赶法求解代数方程。同时引进过水率和修正糙率的概念并提出了间接等效模拟高桩码头对流场影响的方法。算例表明,该方法是行之有效的。

关键词 二维水流模拟 矩阵追赶法 高桩码头

中图分类号 TV131.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)02-0216-05

探讨码头建设对河道流场的影响,对工程规划设计和运行管理来说,是十分必要的。不同形式的码头对河道流场的影响是不同的,本文结合工程实际研究高桩码头对河道流场的影响。高桩码头对河道流场影响的模拟可采用物理模拟方法或数值模拟方法。对于大尺度的流场模拟,从经济和技术角度考虑,数值模拟具有较大的实用价值。

高桩码头对河道流场影响的数值模拟,包括河道流场模拟和码头工程对河道流场作用的模拟。对河道流场模拟,考虑河道计算区域尺度和工程建筑物尺度相差悬殊,通航河道的平面边界弯曲复杂,为保证计算精度,采用正交边界拟合坐标下的全隐式差分耦合联解模型。对码头工程影响的模拟可采用直接模拟法或间接模拟法,综合考虑精度要求和模拟成本,本文采用间接等效模拟方法。

1 基本方程及边界条件

描述平面二维水流运动的基本方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = q \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} u - fv = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} v + fu = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t, x, y ——自变量时间及平面坐标; h ——水深, $h = Z - Z_D$, Z 为水位, Z_D 为河床高程; u, v —— x 和 y 方向的流速; n ——河床糙率; f ——柯氏系数; E_x, E_y —— x 和 y 方向上的离散系数; q ——源项。

对于固壁边界,采用不穿透条件

$$V \cdot n = 0 \quad (n \text{ 为固体边界的法向矢量}) \quad (2)$$

对于自由边界(一般为上、下边界),采用如下边界条件:

$$\begin{cases} \text{上边界: } Z_{\text{上}} \text{ 为已知,假定水位无横比降} \\ \text{下边界: } Z_{\text{下}} \text{ 为已知,假定水位无横比降} \end{cases} \quad (3)$$

对于河道型计算区域,由于其边界复杂,且长、宽尺度相差悬殊,因而在直角坐标系下对上述定解问题进行求解存在着复杂边界不易拟合、网格多等困难。为此,采用正交边界拟合坐标变换:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P(\xi, \eta, x, y) \qquad \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta, x, y) \tag{4}$$

通过方程式(4)的变换,可把 xOy 坐标平面上复杂的计算域转换成 $\xi O\eta$ 平面上的矩形域, xOy 平面上的曲线网格变成 $\xi O\eta$ 平面上间距为 1 的正方形网格. P, Q 为待定因子,适当选择 P, Q 可使网格疏密根据需要分布,或使曲线网格正交.采用新坐标系统的自变量 t, ξ, η 后,基本方程式(1)变成^[1]

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (g_\eta u_* h) + \frac{\partial}{\partial \eta} (g_\xi v_* h) \right\} = 0 \\ &\frac{\partial u_*}{\partial t} + \frac{u_*}{g_\xi} \frac{\partial u_*}{\partial \xi} + \frac{v_*}{g_\eta} \frac{\partial u_*}{\partial \eta} + \frac{u_* v_*}{J} \frac{\partial g_\xi}{\partial \eta} - \frac{v_*^2}{J} \frac{\partial g_\eta}{\partial \xi} + \frac{gn^2 u_* \sqrt{u_*^2 + v_*^2}}{h^{\frac{4}{3}}} - f v_* + \frac{g}{g_\xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} = \\ &\quad \frac{1}{g_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (E_\xi A) - \frac{1}{g_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (E_\eta B) \\ &\frac{\partial v_*}{\partial t} + \frac{u_*}{g_\xi} \frac{\partial v_*}{\partial \xi} + \frac{v_*}{g_\eta} \frac{\partial v_*}{\partial \eta} + \frac{u_* v_*}{J} \frac{\partial g_\eta}{\partial \xi} - \frac{u_*^2}{J} \frac{\partial g_\xi}{\partial \eta} + \frac{gn^2 v_* \sqrt{u_*^2 + v_*^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + f u_* + \frac{g}{g_\eta} \frac{\partial Z}{\partial \eta} = \\ &\quad \frac{1}{g_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (E_\xi A) + \frac{1}{g_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (E_\eta B) \\ &A = \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (u_* g_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (v_* g_\xi) \right\} \qquad B = \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (v_* g_\eta) - \frac{\partial}{\partial \eta} (u_* g_\xi) \right\} \end{aligned} \right. \tag{5}$$

式中: u_*, v_* ——沿 ξ 和 η 方向的流速; g_ξ, g_η ——曲线网格的长度和宽度, $g_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}$, $g_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$; J ——曲线网格的面积, $J = g_\xi g_\eta$; u_*, v_* 与 u, v 之间的变换关系为

$$u_* = \frac{1}{g_\xi} \left(u \frac{\partial x}{\partial \xi} + v \frac{\partial y}{\partial \xi} \right) \qquad v_* = \frac{1}{g_\eta} \left(u \frac{\partial x}{\partial \eta} + v \frac{\partial y}{\partial \eta} \right)$$

通过正交变换,把原来在 xOy 坐标系统中利用方程(1)求解变量 Z, u, v 变为在 $\xi O\eta$ 坐标系统中利用(5)求解 Z, u_*, v_* .

2 全隐式耦合联解模型

2.1 节点布置

采用控制体积法离散方程,为了更好地模拟边界条件,变量交错布置,即在网格中心布置水位变量,在网格四边布置相应的流速变量.对于具有 $(2N+1)(2M+1)$ 的计算网格,上、下边界布置水位,水位 Z 有 $(N+1)M$ 个节点,流速 u 有 NM 个节点,流速 v 有 $(N+1)(M+1)$ 个节点.考虑到两岸固壁边界条件(2),通过正交变换,两岸流速 $v=0$,待求的流速 v 有 $(N+1)(M-1)$ 个节点.

2.2 方程离散

对河道流场的模拟,由于流态变化剧烈,网格长宽尺寸相差悬殊,在河宽方向上的网格宽度一般均较小,为了确保较高的精度要求,采用全隐式离散、矩阵追赶法求解.差分离散方法如下:时间项采用向前差分,扩散项采用中心差分,对流项采用逆风格式,非线性项采用局部线性化方法.对方程(5)离散,写成向量形式为

$$AZ_k \cdot Z_{k-1} + BZ_k \cdot Z_k + CZ_k \cdot Z_{k+1} + DZ_k \cdot V_k + EZ_k \cdot U_{k-1} + FZ_k \cdot U_k = HZ_k \qquad (k = 2, 3, \dots, N) \tag{6}$$

$$AU_k \cdot Z_k + BU_k \cdot Z_{k+1} + CU_k \cdot U_{k-1} + DU_k \cdot U_k + EU_k \cdot U_{k+1} + FU_k \cdot V_k + GU_k \cdot V_{k+1} = HU_k \qquad (k = 1, 2, \dots, N) \tag{7}$$

$$AV_k \cdot Z_k + BV_k \cdot U_k + CV_k \cdot U_{k+1} + DV_k \cdot V_{k-1} + EV_k \cdot V_k + FV_k \cdot V_{k+1} = HV_k \qquad (k = 2, 3, \dots, N) \tag{8}$$

式中: Z_k —— k 断面水位 Z 的向量, $Z_k = (Z_{k,1}, Z_{k,2}, \dots, Z_{k,m})^T$; U_k —— k 断面流速 U 的向量, $U_k = (U_{k,1}, U_{k,2}, \dots, U_{k,m})^T$; V_k —— k 断面流速 V 的向量, $V_k = (V_{k,2}, V_{k,3}, \dots, V_{k,m})^T$; $AZ_k, BZ_k, CZ_k, EZ_k, FZ_k$ —— $M \times M$ 阶系数矩阵; DZ_k —— $M \times (M-1)$ 阶系数矩阵; HZ_k —— M 维向量; $AU_k, BU_k, CU_k, DU_k, EU_k$ —— $M \times M$ 阶系数矩阵; FU_k, GU_k —— $M \times (M-1)$ 阶系数矩阵; HU_k —— M 维向量; AV_k, BV_k, CV_k —— $(M-1) \times M$ 阶系数矩阵; DV_k, EV_k, FV_k —— $(M-1) \times (M-1)$ 阶系数矩阵; HV_k —— $M-1$ 维向量.

2.3 矩阵追赶法求解

联立方程组(6)~(8)及上、下游边界条件(3)可得到一组完备的线性代数方程组.该方程组可采用直接法^[1](如矩阵追赶法)或迭代法^[2]解得 u, v, Z . 本文用矩阵追赶法进行求解.

矩阵追赶法是针对二维河道水流计算特性所提出的求解离散后的线性代数方程组的一种算法.以上、下游边界均为水位已知的情况简要介绍如下.

将边界条件(3)及对称假定 $U_0 = U_1$ 代入式(7),令 $k = 1$,求得

$$U_1 = UZ_1 \cdot Z_2 + UU_1 \cdot U_2 + UV_1 \cdot V_2 + UF_1 \quad (9)$$

将式(3),(9)代入式(8)可求得

$$V_k = VZ_k \cdot Z_k + VU_k \cdot U_k + VV_k \cdot V_{k+1} + VF_k \quad (k = 2, 3, \dots, N) \quad (10)$$

将式(3),(9),(10)代入式(6)可求得

$$Z_k = ZZ_k \cdot Z_{k+1} + ZU_k \cdot U_k + ZV_k \cdot V_{k+1} + ZF_k \quad (k = 2, 3, \dots, N) \quad (11)$$

将式(9),(10),(11)代入式(7)可求得

$$U_k = UZ_k \cdot Z_{k+1} + UU_k \cdot U_{k+1} + UV_k \cdot V_{k+1} + UF_k \quad (k = 2, 3, \dots, N) \quad (12)$$

按上述步骤逐步递推追赶至 $k = N$ 为止,最后可得

$$U_N = UZ_N \cdot Z_{N+1} + UU_N \cdot U_{N+1} + UV_N \cdot V_{N+1} + UF_N$$

将下边界条件式(3)及对称假定 $U_{N+1} = U_N$ 代入式(12),得 U_N 后逐步回代可求得 $Z_{N-1}, V_{N-1}, U_{N-1}, \dots, U_1$,完成该步长的求解.其中: UZ_k, UU_k, ZZ_k, ZU_k —— $M \times M$ 阶矩阵; UV_k, ZV_k —— $M \times (M-1)$ 阶矩阵; VZ_k, VU_k —— $(M-1) \times M$ 阶矩阵; VV_k —— $(M-1) \times (M-1)$ 阶矩阵; UF_k, ZF_k —— M 维向量; VF_k —— $(M-1)$ 维向量.

3 高桩码头影响模拟

高桩码头由桩支撑,对水流的影响为支撑桩对水流的作用.支撑桩的直径较小,通常为几十厘米到 1 m.如果直接模拟这种作用,计算单元网格尺寸必须与之匹配在 1 m 以内.对于河道(如长江)这样大的区域,因为桩的尺度与河道的尺度相差悬殊,如果用桩的尺度作数值模拟分析,则用如此小的计算单元网格,其代价是十分昂贵的.若用河道尺度进行模拟分析,则不易模拟出桩对水流的影响.为寻找一种可行的模拟方法,本文在分析高桩码头对流场影响的基础上,引进过水率和修正糙率的概念.

a. 码头平台和引桥支撑桩的存在,使得有效过水面积减小,从而产生阻水作用.为模拟这种作用,引进过水率的概念.过水率为工程后过水面积与工程前过水面积的比值.在连续方程模拟计算中应用过水率来计算单元间的水量交换,同时计算支撑桩对调蓄能力的影响,考虑支撑桩的阻水作用.

b. 由于支撑桩的存在,水流阻力增加了.支撑桩阻力用绕流阻力公式进行模拟,即

$$F_D = C_D DH \rho \frac{u^2}{2} \quad (13)$$

式中: C_D ——绕流阻力系数; D ——桩的直径; H ——水深; ρ ——水的密度; u ——水流流速.

$$\text{河床阻力为} \quad F_R = \rho g R J \Delta x \Delta y = \rho g u^2 \frac{n^2}{H^{1/3}} \Delta x \Delta y \quad (14)$$

式中: ρ ——水的密度; g ——重力加速度; n ——河床糙率; H ——水深; u ——水流的流速; Δx ——计算单元长度; Δy ——计算单元宽度.

K 个支撑桩与河床对水流的总阻力为

$$F = KF_D + F_R = \rho g u^2 \frac{\Delta x \Delta y}{H^{1/3}} n^2 \left(1.0 - \frac{K\pi D^2}{4\Delta x \Delta y} + \frac{KC_D}{2gn^2} \frac{DH^{4/3}}{\Delta x \Delta y} \right) = \rho g u^2 \frac{\Delta x \Delta y}{H^{1/3}} n_r^2 \quad (15)$$

由此可见,用修正糙率 n_r 代替河床糙率 n ,则可考虑到支撑桩对水流的阻力作用.修正糙率为

$$n_r = n \sqrt{1.0 - \frac{K\pi D^2}{4\Delta x \Delta y} + \frac{KC_D}{2gn^2} \frac{DH^{4/3}}{\Delta x \Delta y}} = \alpha n \quad \alpha = \sqrt{1.0 - \frac{K\pi D^2}{4\Delta x \Delta y} + \frac{KC_D}{2gn^2} \frac{DH^{4/3}}{\Delta x \Delta y}} \quad (16)$$

因此,由单元长度、宽度,河床糙率和水深以及计算单元包含的支撑桩的数量、直径可计算出包含支撑桩对水流作用的糙率修正系数 α 及河床修正糙率 n_r .所以,采用这种等效方法可模拟支撑桩对水流的作用.

4 算 例

张家港市沿江经济技术开发区某企业拟在长江澄通河段浏海沙水道右岸兴建专用码头,码头泊位平面总长 302 m,其中码头桩台平面尺度为 272.0 m×24.0 m,上、下游各设有 1 座平面尺寸为 6.0 m×6.0 m 的系缆墩,通过钢联桥与桩台相连.2 个 5 000 t 级泊位,2 座 64 m×9 m 的引桥使码头桩台与岸边连接.为评估码头工程对长江水流的影响,应用本文模型进行计算.

根据水文资料,选取长江江阴水文站到天生港水文站之间的河段为计算区域.通过正交边界拟合坐标变换得到计算网格,如图 1 所示.

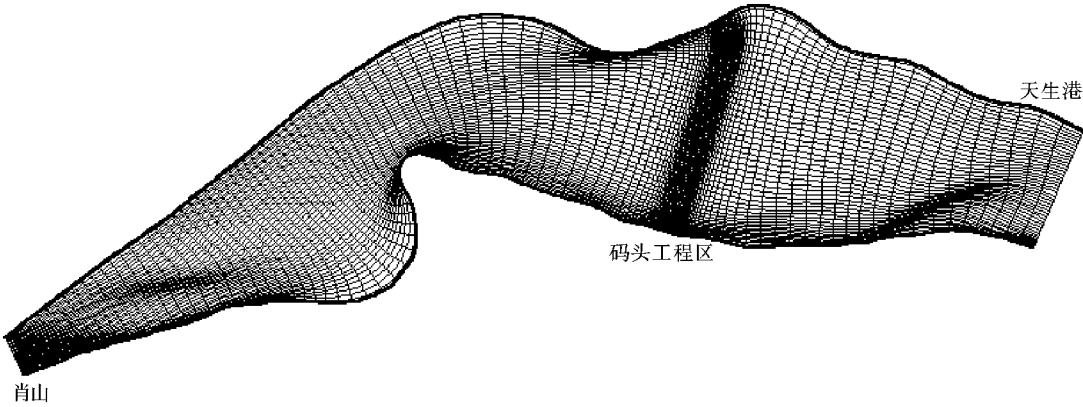


图 1 计算区域网格

Fig.1 Networks for computation

考虑到计算区域属平原感潮河段,河床比较平坦,河床的粗糙度主要与高程有关.高程较低的深槽,糙率相对较小.高程较高的滩地,糙率相对较大.假定糙率是河床高程的函数,即

$$n(x,y) = n(z_d(x,y))$$

(17)

式中: n ——河床糙率; z_d ——河床高程.这样由河床高程分布可得到糙率平面分布.应用 2002 年 6 月 29 日至 6 月 30 日的全潮水文测验资料,对模型进行验证计算,计算时糙率取值为 0.010~0.025.模拟计算结果与实测结果的比较如图 2、图 3 所示.从图 2、图 3 可见,无论是水位过程还是流速过程,计算与实测吻合良好.这表明,本文模型能模拟实际流动,可应用于工程设计的计算.

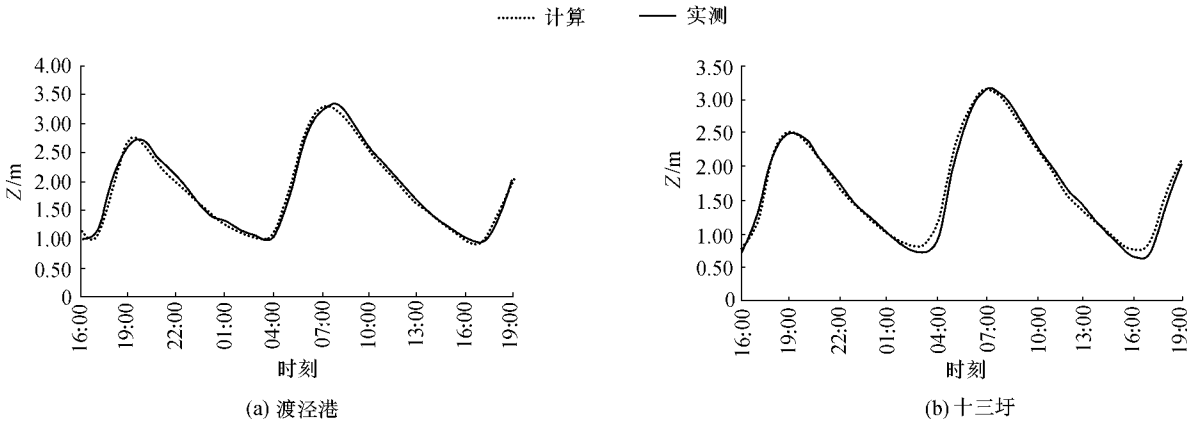


图 2 计算水位与实测水位的比较

Fig.2 Comparison of calculated tidal level with measured data

为评估码头工程对长江水流的影响,选取江阴水文站和天生港水文站设计潮位过程作为上、下边界计算条件,分别计算工程前后的流场,比较各点流速影响的最大值,得出了码头工程对长江流场影响的包络图(图 4).从图 4 可见,兴建码头对流场的影响主要表现在码头对水流的阻碍作用,即使得流速减小,减速最大值为 0.059 m/s.码头平台位置有个流速减小了 0.01 m/s 的区域.该区域最大长度为 3 675 m,最大宽度为 195 m,形态为沿岸指向上游的狭长条.这说明码头工程对长江流场的影响局限于工程所处位置的岸边,阻力作用使岸

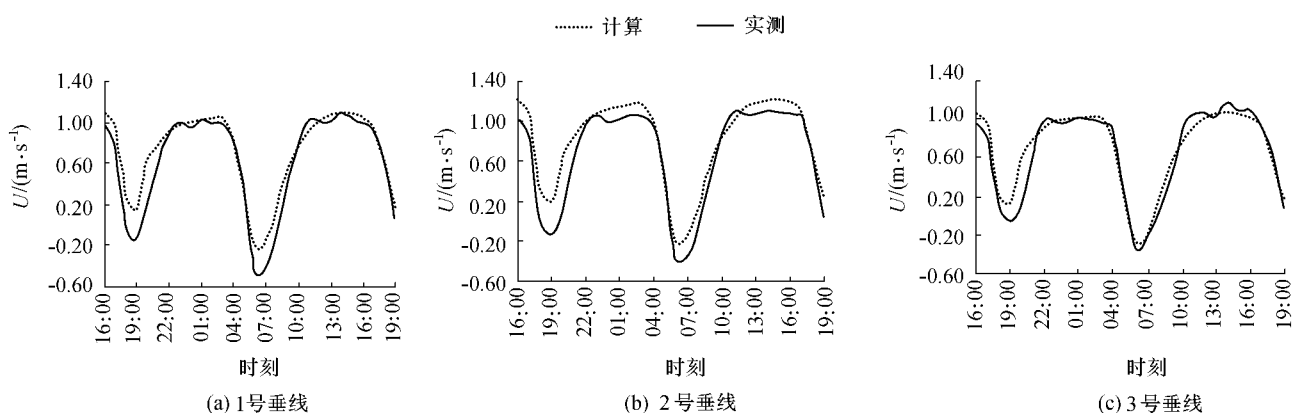


图3 计算流速与实测流速的比较

Fig.3 Comparison of calculated flow velocity with measured data

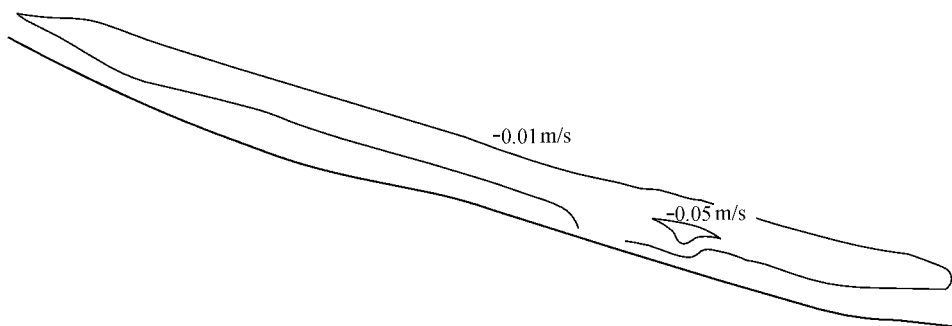


图4 码头对流场影响的包络图

Fig.4 Envelope of effect on flow field induced by standing pile wharf

边的流速减小. 流速的重新分布, 使码头前沿航道流速略有增大, 增加值最大为 0.004 m/s . 综上所述, 本文模型结果合理, 可应用于类似问题的分析.

参考文献:

- [1] 王船海, 梁金焰, 林金裕, 等. 闽江口河网二维潮流数学模型[J]. 台湾海峡, 2002, 21(4): 389—399.
- [2] 李光炽. 流域洪水演进模型及其参数反问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.

Numerical simulation of river flow patterns affected by standing pile wharf

LI Guang-zhi¹, ZHOU Jing-yan², ZHANG Gui-shou³

- (1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
3. Department of Civil Engineering, Shaoxing Univ., Shaoxing 312000, China)

Abstract: Based on the analysis of numerical methods for simulation of river flow patterns affected by standing pile wharfs, the boundary fitted orthogonal coordinate system is used for simulation of the computation region with varying curved boundaries, and the full-implicit coupled solution model and matrix chase-after method are adopted to solve the algebraic equation. These means ensure the accuracy of calculation. By introduction of the concepts of overflowing rate and revised roughness, an indirect equivalent simulation method is proposed. Examples show that the method is effective.

Key words: 2-D flow simulation ; matrix chase-after method ; standing pile wharf