

文章编号 : 1005-9865 (2008) 01-0051-06

# 后台阶下游床面冲刷过程数值模拟研究

刘春嵘<sup>1</sup>, 呼和敖德<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 力学与航空航天学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:**以床面瞬时剪应力作为泥沙起动及输运的水动力机制,建立了结构物周围复杂流场下床面局部冲刷的数学模型。并应用大涡模拟方法对后台阶下游三维湍流流动进行数值模拟,得到台阶下游床面瞬时剪应力的分布规律。为了确定床面瞬时剪应力与泥沙上扬通量的关系,先应用数学模型对不同模型参数下,冲刷开始后 5 分钟时台阶下游床面形状进行试算。通过试算与实验结果比较,确定床面瞬时剪应力与泥沙上扬通量关系中需要的模型参数。进一步对冲刷开始后 30 分钟内台阶下游床面演化规律进行模拟,模拟结果与实验结果相符合。

**关键词:**局部冲刷; 泥沙起动; 后台阶流; 大涡模拟; 瞬时剪应力

**中图分类号:** TV142      **文献标识码:** A

## Numerical Investigation on the local scour at the downstream of the backward-facing step flow

LIU Chun-rong<sup>1</sup>, HUHE Ao-de<sup>2</sup>

(1. College of Mechanics and Aerospace, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Assuming that the instantaneous bed shear stress is the hydrodynamic mechanism of sediment incipience and transportation, the numerical model of the local scour under the complex flows around the structures is presented. The method of large eddy simulation is employed to simulate the three dimensional turbulence at the downstream of the backward-facing step flow, and the distribution of the instantaneous bed shear stress at the downstream of the step is obtained. In order to determine the relation between the pick-up flux and the instantaneous bed shear stress, the formations of the bed at the downstream of the step at 5 minutes after the beginning of the scour are simulated according to different model parameters. The model parameters needed to calculate the pick-up flux are determined by comparing the results of numerical simulation and experiment. The process of the scour at the downstream of the step during 30 minutes after the beginning of the scour is simulated, and the results of the simulation and the experiment agree well.

**Key words:** local scour; sediment incipience; backward-facing step flow; large eddy simulation; instantaneous bed shear stress

结构物周围床面的局部冲刷是自然界和工程界广泛存在的现象。由于这种现象对结构物的危害很大,长期以来工程界和学术界对此极为关注,并在这方面做了大量研究工作。由于局部冲刷是结构物周围复杂流动与底床泥沙运动相互耦合作用的结果,问题十分复杂,理论分析困难很大。目前这方面的工作主要以物理模型实验和数值模拟为主。

物理模型实验是在研究局部冲刷问题中最为普遍采用的方法,但该方法的费用高、周期长,且某些相似参数难以保证。近年来随着计算机技术的高速发展,结构物附近床面局部冲刷过程的数值模拟研究越来越受到人们的重视。Ushijima<sup>[1]</sup>、Olsen<sup>[2]</sup>等采用  $k-\epsilon$  模式对圆柱周围的三维流动进行了数值模拟,并根据床

收稿日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10602017)

作者简介: 刘春嵘(1972-),男,云南昆明人,博士,主要从事局部冲刷、多相流动方面的研究。

面平均剪应力得到了推移质和悬移质输沙率及床面演化规律。Li<sup>[3]</sup>和 Liang<sup>[4]</sup>对振荡流作用下管线附近床面的局部冲刷过程进行了数值模拟,发现除了涡的挟沙作用外,管线附近复杂环流对泥沙输运也起到了重要作用。国内关于这方面的研究也有一些报道。例如,刘德良等<sup>[5]</sup>采用缓坡方程和浅水环流方程计算获得了床面剪应力分布,并通过床面剪应力分布与泥沙起动应力的比较给出了波流作用下大尺度圆柱周围局部冲刷的最大深度。

目前关于床面局部冲刷数值模拟的大部分研究工作一般都以床面平均剪应力作为泥沙起动及输运的水动力因素来建立泥沙运动方程的底边界条件。在复杂流动情况下,只以床面平均剪应力作为泥沙起动及输运的水动力因素并不合适。刘春嵘等<sup>[6,7]</sup>对振动格栅产生的湍流及后台阶流动中泥沙的起动进行了研究,发现即使在床面平均剪应力为零的情况下,泥沙也可能被扬起。近年来,也有些研究工作考虑了压力梯度、脉动压力、湍流强度、瞬时剪应力等水动力因素对泥沙起动及输运的影响<sup>[8,9]</sup>,但这些工作仅仅是一些初步的探索,并未系统地建立诸水动力因素与泥沙起动及输运的定量关系。

为了体现在床面平均剪应力为零情况下的局部冲刷,采用床面瞬时剪应力作为泥沙起动及输运的水动力因素,并以后台阶下游床面冲刷过程作为研究对象来研究床面瞬时剪应力与冲刷率及上扬通量的定量关系。后台阶流动几何形状简单,却包含了流动分离、再附、湍流及旋涡运动等三维复杂流动的特征,采用这种流动作为研究对象,既便于数值模拟,又能反映复杂流动下床面冲刷的主要动力因素。采用大涡模拟方法对后台阶下游的三维湍流进行数值模拟,得到了床面瞬时剪应力,计算出床面形状随时间的演化规律,然后通过和实验结果的比较来确定瞬时剪应力与上扬通量的定量关系。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

局部冲刷过程的控制方程包括结构物周围湍流流动、泥沙输运、床面运动三部分。

采用大涡模拟 (LES) 方法计算结构物周围的湍流流动,控制方程为滤波后的三维不可压 N-S 方程和连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中:  $u_i$ 、 $p$ 、 $\mu$  分别为流体的速度分量、压力、密度和粘性系数,  $\tau_{ij}$  为 N-S 方程滤波后的亚格子应力,在此采用标准 Smagorinsky-Lilly 模式模拟亚格子应力:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

式中:  $\bar{S}_{ij}$  是应变率张量,  $\mu_t$  为湍流粘性。

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\mu_t = (C_s V^{1/3})^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

其中,  $V$  为网格体积;  $C_s$  为模型系数,其值和流动有关,取  $C_s = 0.1$ 。

泥沙输运包括悬移质输沙和推移质输沙两部分组成。悬移质输沙和推移质输沙分别由以下方程描述<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(u_j - v_s) c] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial (c_b)}{\partial t} + \frac{\partial (u_s c_b)}{\partial x_1} + \frac{\partial (w_s c_b)}{\partial x_2} = E_b - J_{bs} - v_s c_b \quad (7)$$

式中:  $c$ 、 $c_b$  分别为悬移区和推移层内的泥沙浓度,  $u_s$ 、 $w_s$  为推移层内泥沙的水平运动速度,  $v_s$  为泥沙的沉降速度,  $b$  为推移层的厚度,  $E_b$  为床面上泥沙的上扬通量,  $J_{bs}$  为悬移区与推移层界面上的泥沙通量,  $\frac{\partial c}{\partial x_j}$  为扩散系数。

床面运动由下面的控制方程描述<sup>[11]</sup>:

$$(1 - p) \frac{\partial h_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{ai}}{\partial x_i} = v_s c_b - E_b \tag{8}$$

其中,  $q_{ai} = \begin{cases} 0 & \left| \frac{\partial h_b}{\partial x_i} \right| \leq \tan \theta_0 \\ - C_q \left[ \left| \frac{\partial h_b}{\partial x_i} \right| - \tan \theta_0 \right] \text{sign} \left( \frac{\partial h_b}{\partial x_i} \right) & \left| \frac{\partial h_b}{\partial x_i} \right| > \tan \theta_0 \end{cases}$ ,  $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$

式中:  $h_b$  为床面高度,  $p$  为泥沙的空隙率,  $\theta_0$  为泥沙在静水中的休止角,  $q_{ai}$  为床面坡度大于  $\theta_0$  时由重力引起的输沙率,  $C_q$  为常数。

### 1.2 边界及初始条件

以后台阶下游床面冲刷过程为对象,介绍流体运动方程与泥沙输运方程及床面运动方程的边界及初始条件。计算采用直角坐标系,计算域的范围为:  $-2D \leq X \leq 20D$ ,  $h_b \leq Y \leq 5D$ ,  $0 \leq Z \leq 5D$ ,  $D$  为台阶高度。图 1 为计算域。

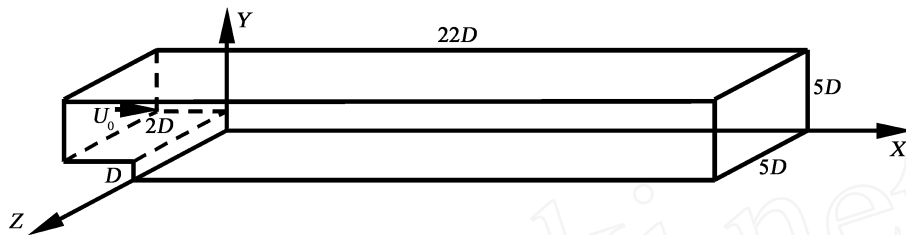


图 1 计算区域

Fig. 1 Computational domain

#### 1.2.1 流体运动与泥沙输运方程边界条件

入口处 ( $X = -2D$ ) 流速剖面采用层流边界层的分布规律,泥沙浓度取  $c = 0$ 、 $c_b = 0$ 。上边界 ( $Y = 5D$ ) 及侧边界 ( $Z = 0, 5D$ ) 采用对称边界条件。台阶下游底边界 ( $Y = h_b$ ), 流场计算采用无滑移条件。关于泥沙输运方程的边界条件,只要给出床面上泥沙的上扬通量  $E_b$  和悬移区与推移层界面上的泥沙通量  $J_{bs}$  就可确定了。台阶上游底边界 ( $Y = D, -2D \leq X \leq 0$ ) 及台阶垂直面上 ( $X = 0, 0 \leq Y \leq D$ ), 流场计算采用无滑移条件。泥沙输运方程的边界条件为对称边界条件。

#### 1.2.2 初始条件

对于流场的初始条件,首先采用  $k-\epsilon$  模式求解定常模型。将定常模型的计算结果作为大涡模拟计算的初始条件。对于泥沙输运和床面运动方程的初始条件,取  $c = 0$ ,  $c_b = 0$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流动特征

为了保证流场计算的可靠性,首先对床面未发生变化时的流场进行了数值模拟。模拟的来流平均流速  $U_0 = 20 \text{ cm/s}$ ,流动的雷诺数  $Re = \frac{U_0 D}{\nu} = 5000$ 。模拟结果发现后台阶下游的瞬时流场表现出很强的非定常性。当流体越过台阶时,在台阶下游形成剪切层,在距离台阶一定距离处,流动失稳,有展向涡卷起。随着涡的卷起,流动开始出现三维性,展向涡发生扭曲,形成三维结构。接着剪切层卷起,形成大尺度的流动结构。其中包含许多小涡的大尺度流动结构向下游不断增大并与床面发生作用,在继续向下游运动的过程中逐渐耗散。从剪切层脱落下来的涡又不断地卷并到大尺度结构中,并和床面相互作用,使得大尺度结构在再附点附近来回振荡。图 2 给出了不同时刻下台阶下游的涡量分布图,由图 2 可清楚地看到大尺度流动结构的振荡过程。Le<sup>[10]</sup>的直接数值模拟结果也发现了后台阶下游大尺度流动结构的振荡过程,这与本文的结果是一致的。大尺度流动结构在再附点附近的振荡行为,导致该区域出现很高的瞬时剪应力。图 3 给出某一时刻 ( $t = 1.2 \text{ s}$ ) 台阶下游床面的瞬时剪应力,由图可知,瞬时剪应力最高时可达  $3\tau_0$ ,  $\tau_0$  为远下游的床面平均剪应力。

将计算得到的瞬时流速进行统计得到平均流速场。图 4 给出了由本文计算得到的平均流速剖面与 Jovic<sup>[11]</sup>的实验结果对比。由图 4 可以看出,本文的计算结果和实验符合较好。根据本文计算得到的台阶下

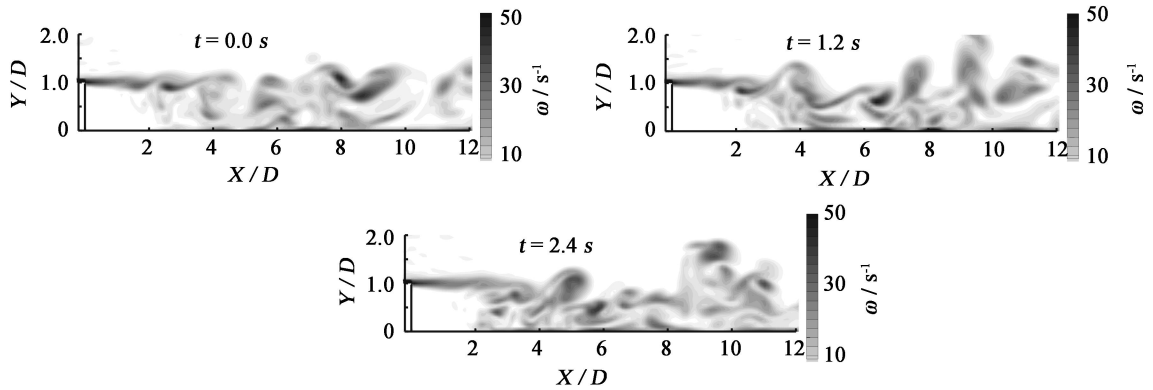


图 2 台阶下游垂直断面瞬时涡量场  $Z = 2.5 D$

Fig. 2 Instantaneous span wise vorticity contours at the downstream of the step  $Z = 2.5 D$

游平均流速剖面可计算出  $Re = 5000$  时再附点距台阶的距离为  $X_r = 6.0 D$ 。Jovic 的实验结果及 Le 的直接数值模拟结果分别为  $X_r = 6.0 D \sim 6.1 D$ ,  $X_r = 6.28 D$ 。这与本文的结果都比较一致。根据平均流速剖面,可计算出台阶下游床面平均剪应力,如图 5 所示。在靠近台阶区 ( $X < 2 D$ ), 床面平均剪应力很低;随着距台阶距离的增加,床面平均剪应力逐渐增大,在回流区内达到第一个峰值,约为  $-0.7 \tau_0$ ,在再附点附近降到最低值;在再附点的下游,随距台阶距离的增加,床面平均剪应力继续增大,大约在台阶下游  $11 D$  达到第二个峰值,其值约为  $1.1 \tau_0$ ;随距台阶距离继续增大,床面平均剪应力逐渐趋于远下游的平均剪应力。由此可见,再附点附近床面平均剪应力与瞬时剪应力的分布有很大区别。

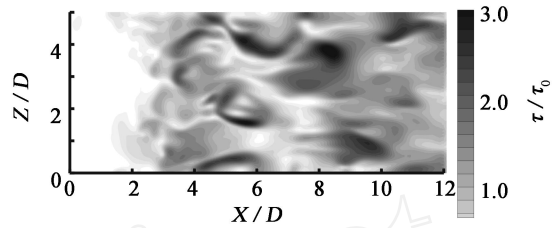


图 3 台阶下游壁面瞬时剪应力分布

Fig. 3 The instantaneous bed shear stress at the downstream of the step

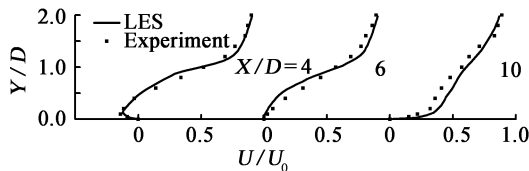


图 4 后台阶下游的平均流速剖面  $Z = 2.5 D$

Fig. 4 Mean stream wise velocity profiles at the downstream of the step  $Z = 2.5 D$

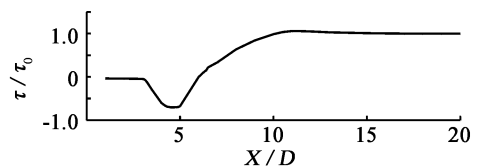


图 5 台阶下游床面平均剪应力  $Z = 2.5 D$

Fig. 5 Mean bed shear stress at the downstream of the step  $Z = 2.5 D$

## 2.2 模型参数

为了计算床面的演化过程,必须给出泥沙的沉降速度、泥沙的扩散系数、考虑泥沙休止角对床面形状影响时所引入的常数  $C_q$ 、推移层内泥沙的水平运动速度、推移层的厚度、床面上泥沙的上扬通量及悬移区与推移层界面上的泥沙通量等模型参数。关于泥沙沉降速度前人已进行了大量研究,这里不再赘述,采用斯托克斯阻力公式进行计算。泥沙扩散系数  $= \frac{\mu}{S_c}$ ,取  $S_c = 1$ 。常数  $C_q$  的值,取 0.01。推移层内泥沙的水平运动速度的分量  $u_s, w_s$  分别为  $u_s = U_s \cos \alpha, w_s = U_s \sin \alpha$ ,  $\alpha$  为壁面附近的水流方向与  $x$  轴的夹角,  $U_s$  为沙颗粒在水平面内运动速度的大小,  $U_s$  及推移层的厚度  $b$ , 床面上泥沙的上扬通量  $E_b$  可由 Rijn<sup>[12]</sup> 给出的公式计算:

$$\frac{U_s}{u_*} = 9 + 2.6 \log D_* - 8 \left( \frac{c}{c_*} \right)^{0.5} \quad (9)$$

$$\frac{b}{d} = 0.3 D_*^{0.7} \left( \frac{c}{c_*} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$$E_b = \rho_s \left( \frac{c}{c_*} \right)^{0.5} g d \quad (11)$$

式中:  $p = K_{cs} D^{0.3} \left( \frac{c}{c_c} \right)^{1.5}$ ,  $D^* = d \left[ \frac{(s - \rho) g}{2} \right]^{1/3}$ ,  $s$ 、 $d$  为泥沙的密度和直径,  $\nu$  为水的运动粘性系数,  $g$  为重力加速度,  $c_c$  为泥沙起动的临界剪应力。在 Rijn 公式中的床面剪应力采用的是平均床面剪应力, 而此采用的是瞬时床面剪应力, 因此,  $K_{cs}$ 、 $c_c$  需根据实验结果重新标定。在推移层和悬移区交界面上的泥沙通量由下面公式计算:

$$J_{bs} = (u_r + \tilde{u}_r - v_s) c \tag{12}$$

其中,  $u_r$  为流场大尺度涡引起的流体的垂向速度, 其数值由大涡模拟的计算结果直接给出,  $\tilde{u}_r$  为小尺度涡引起的流体的垂向速度。假设小尺度涡各向均匀同性,  $\tilde{u}_r$  的概率密度满足高斯分布, 可得

$$J_{bs} = \frac{\sqrt{k_s}}{\sqrt{3}} e^{-\frac{3(u_r - v_s)^2}{4k_s}} (c_b - c_1) + (u_r - v_s) \left( c_b \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx + c_1 \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \tag{13}$$

式中:  $\tilde{u}_r = \frac{v_s - u_r}{\sqrt{2} k_s}$ ,  $c_1$  为悬移区与推移层相邻网格上的泥沙浓度,  $k_s$  为亚格子湍流动能。

### 2.3 床面演化规律

在数值模拟中, 采用粒径  $d = 425 \mu\text{m}$ 、密度  $s = 1400 \text{ kg/m}^3$  的模型沙。该模型沙起动的临界剪应力根据文献[13]的方法得到  $c_c = 0.12 \text{ N/m}^2$ 。常数  $K_{cs}$  的值根据后台阶下游床面冲刷过程的实验结果进行标定。根据文献[13]介绍的方法, 用摄像机记录下床面形状随时间的变化过程, 从而可得到冲刷开始后 5 分钟时床面形状的实验结果。然后, 采用不同的  $K_{cs}$  对冲刷开始后 5 分钟时的床面形状进行试算。将试算结果和实验结果进行比较, 从而找到计算和实验结果最为符合时所对应的  $K_{cs}$  值。图 6 给出了当  $K_{cs} = 0.00075$  时, 冲刷开始后 5 分钟时床面形状的计算和实验结果, 由图可知, 计算和实验结果符合较好。因此, 数值模拟计算中取  $K_{cs} = 0.00075$ 。

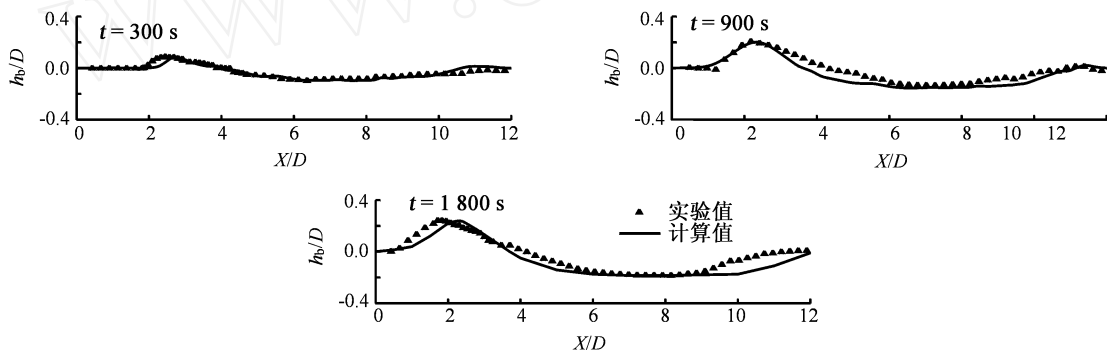


图 6 台阶下游床面形状演化过程  $Z = 2.5D$

Fig. 6 The evolving process of bed formation at the downstream of the step  $Z = 2.5D$

给定  $c_c$ 、 $K_{cs}$  后, 采用提出的数学模型对后台阶下游床面演化过程进行数值模拟。模拟结果发现在冲刷的初始阶段, 大尺度流动结构振荡范围内的床面首先开始冲刷, 形成冲刷坑, 冲刷坑的最大深度大约出现在平均再附点附近。再附点上游(回流区)床面抬升, 出现回流区局部淤积。约在台阶下游  $4D$  处出现冲淤平衡点。随着冲刷时间的增长, 回流区的淤积不断地向上游移动, 冲刷平衡点下游的冲刷坑不断发展。图 6 给出了不同时刻下由本文计算得到床面形状及文献[10]的实验结果。由图可知, 计算得到的回流区局部淤积位置及冲刷坑最大深度位置和实验结果都比较符合。因此, 采用床面瞬时剪应力作泥沙起动及冲刷的水动力机制, 能够反映后台阶下游床面局部冲刷的本质。

### 3 结 语

采用床面瞬时剪应力作为泥沙起动及输运的水动力机制建立了结构物周围局部冲刷的数学模型, 并用大涡模拟方法对后台阶下游的三维瞬时流动进行了数值模拟, 得到台阶下游的床面瞬时剪应力分布。数学模型预测的台阶下游床面演化规律与实验结果相符合。由此可得到: 床面瞬时剪应力是结构物周围复杂流动下床面局部冲刷的重要水动力因素; 床面瞬时剪应力与泥沙上扬通量的关系可通过重新标定床面平均剪

应力与泥沙上扬通量关系中的某些系数来得到。

#### 参考文献：

- [1] Ushijima S. Arbitrary Lagrangian-Eulerian numerical prediction for local scour caused by turbulent flows [J]. J of computational physics, 1996, 125: 71 - 82.
- [2] Olsen NRB. Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth [J]. J Hydr Res, 1998, 36(4) : 579 - 589.
- [3] Li F, Cheng L. Numerical model for local scour under offshore pipelines [J]. J Hydr Engrg, 1999, 125(4) : 400.
- [4] Liang D, Cheng L, Li F. Numerical modeling of scour below a pipeline in currents. II: Scour simulation [J]. Coastal Eng, 2005, 52(1) : 43 - 62.
- [5] 刘德良, 李玉成. 波浪作用下大尺度圆柱周围局部冲刷深度简化数值模型[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6) : 866 - 869.
- [6] 刘春嵘, 呼和敖德. 各向同性均匀湍流近壁结构及泥沙起动[J]. 海洋工程, 2003, 21(3) : 50 - 55.
- [7] Liu C R, Huhe A D, Tao L B. The coherent structure in backward-facing step and its role on sediment pickup [A]. Advances in Hydro-Science and -Engineering Proceedings of the 6th International Conference on Hydro-Science and -Engineering[C]. Brisbane, Australia, 2004. 238 - 240.
- [8] Dou X B. Using A 3-D Model to predict local scour [A]. Water Resource Engineering 98[C]. ASCE, Memphis, Tennessee, Edited by Steven R *et al*, 1998. 198 - 203.
- [9] Jia Y. Simulation of scour process in plunging pool of loose bed-material [J]. J Hydr Engrg, ASCE, 2001, 127: 219 - 229.
- [10] Le H, Moin P, Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 330: 349 - 374.
- [11] Jovic S, Driver DM. Backward-facing step measurement at low Reynolds number,  $Re_h = 5000$  [J]. NASA Tech Mem, 1994, 108807.
- [12] Rijn V. Sediment transport, Part I: Bed load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1984, 110(10) : 1431 - 1455.
- [13] 刘春嵘. 复杂流动下底床局部冲刷实验和数值模拟研究[D]. 中国科学院博士论文, 2003.