

河道泥沙沉积的水沙参数规律研究

郭真 田鹏

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：对曲流河模型中的水流、泥沙输移和沉积进行了计算模拟分析。采用 FLUENTTM 程序中的雷诺应力输运模型对河道水流特性进行评价，包括平均流速场和雷诺应力分量。将模拟结果与已有的河流模型实验数据进行了比较和讨论。对单个颗粒进行拉格朗日追踪，分析了不同粒径颗粒在曲流河中的输运和沉积。特别关注了河流弯道模型中不同粒径颗粒的沉积模式。对物理河道中的水流流态也进行了研究。采用基于弗劳德数的缩尺比为 1:100，并对物理模型和河工模型中的水流流态进行了比较。结果表明，平均流量表现出动态相似性，但物理河道的紊流参数与模型存在差异。更值得注意的是，物理模型和河流模型中的颗粒沉降特征并不符合预期的相似比例尺。

关键词：河流演变；泥沙输运；水沙参数；规律研究

DOI: 10.69979/3029-2727.24.05.019

引言

了解控制河流泥沙输运的机制对水力学、水文学和水资源领域具有重要意义。河流中的水流一般是三维的、非定常的、湍流运动状态，涉及不同相的相互作用。因此，准确分析弯道水流和泥沙输移是一项相当困难的工作。虽然已经发表了许多关于该课题的书籍和论文，但对沉积物再悬浮、运输和沉积的微观力学细节还没有完全了解。研究河流流动的传统方法是基于现场测量、实验室实验和简化的深度平均计算机模型。现场测量是相当繁琐和昂贵的。也存在与实验室模型研究相关的问题。由于一个或多个主导无量纲参数的差异，实验室模型很难满足与原始物理系统动态相似的原则。因此，从实验室数据到现场应用的流动条件的直接外推并不总是可能的。将河流中的泥沙输运与相应的模型研究联系起来的尝试更是值得商榷。

本文研究了曲流河模型中的水流和泥沙的输移和沉积。首先研究与 Shiono 和 Muto^[6] 试验研究中使用的相同的河流模型。随后分析了与实验室尺度模型具有相同弗劳德数的物理尺度曲流河模型。使用 FLUENTTM 程序，对实验室河流和物理河流的平均流量特性、湍流强度和沉降模式进行了评估。将实验室尺度模型的计算结果与 Shiono 和的实验数据进行了对比^[6]进行了讨论。

1 流动模拟

由于河流中的水流处于紊流运动状态，因此使用合适的紊流模型对平均流场进行评估是非常重要的。

FLUENTTM 程序提供了使用 k-ε 或雷诺应力输运模型 (RSTM) 的选项，它是洗烫衣物等人^[7]开发的简化版本。虽然 k-ε 模型在工业应用中得到了广泛的应用，但它也存在一些缺点。其采用的各向同性涡粘性限制了其适用性，导致模型无法处理湍流正应力效应。

2 平均流量河流模型

对于不可压缩流体流动，给出了连续方程和动量平衡方程为：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2)$$

其中 $\partial \bar{u}_i$ 为平均速度， x_i 为位置， t 为时间， $\bar{p}$ 为平均压力， ρ 为常质量密度， ν 为运动粘度， R_{ij} 为雷诺应力张量。

RSTM 提供了用于评估湍流应力分量的微分输运方程，即：

$$\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \left(R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (3)$$

其中，湍流生成项定义为：

$$P_{ij} = -R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}, \quad P = \frac{1}{2} P_{ij} \quad (4)$$

P 为波动动能生成量。式中： ν_t 为湍流(涡动)黏度； $\sigma_k=0$ ， $C_1=1.8$ ， $C_2=0.6$ 是经验常数。

湍流耗散率 ε 的输运方程给出如下形式：

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C^{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C^{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: k 为脉动动能, ε 为湍流耗散率。常数的取值为:

$$\sigma^{\varepsilon} = 1.3, C^{\varepsilon 1} = 1.44, C^{\varepsilon 2} = 1.92 \quad (6)$$

采用 FLUENTTM 程序中的 RSTM 和标准壁面函数边界条件, 计算了河道中的平均流速场和雷诺应力分量。

3 结果与分析

(1) 模型

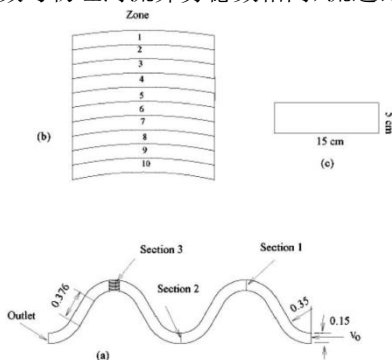
Shiono 和 Muto^[6] 使用激光多普勒测速仪对实验室尺度的曲流河模型中的水流条件进行了一系列详细的实验测量。他们报告了河道流动的案例。在本研究中, 所研究的河工模型几何形状与文献^[6]中对主槽水流的实验测量结果相同。假设河流纵坡为 0.001。

河流的蜿蜒形状通过连接 60 个内部半径为 35 cm 的圆和 37.6 cm 长的直线段来模拟, 如图 1 所示。在图 1a 中确定了河流弯曲处的 1-3 段, 并对其中的二次流模式进行了详细的研究。在第三个弯道(断面 3), 将河床划分为 10 个等面积区域进行颗粒沉积分析。用于河湾沉积分析的区域的具体情况见图 1b。实验室河工模型断面为宽 15 cm、高 5 cm 的矩形, 如图 1c 所示。

对物理尺度(自然尺度)河流的流态也进行了评价。采用弗劳德数标度将实验室模型和物理河流的参数联系起来。弗劳德数确定为:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \quad (7)$$

其中 V 为平均流速, L 为长度尺度(水深), g 为重力加速度。假定物理(自然)河流比实验室模型大 100 倍。即物理河道的宽度和深度分别为 15 和 5 m。为保持实验室弗劳德数与物理河流弗劳德数相同, 流速比变为 1:10。



(2) 结果与分析

① 水流结果

从河工模型 1-3 断面和出口断面的超压(流体静力学以外的总压)可以发现, 过剩压力的值在流向方向上是减小的。超压最大值出现在流道中截面附近, 但向流道内壁方向。

第 1-3 段和出口段。这里湍流强度定义为速度波动的 RMS 与平均流速的比值。湍流强度相对较低, 在 0.02 ~ 0.04 之间, 在不同弯道截面上湍流强度大致相同。这一趋势与 Shiono 和 Muto 的数据基本一致。

对矩形断面天然河流也进行了计算机模拟。如前所述, 采用 1: 100 的长度比例。基于弗劳德数标度法, 假定物理河道的入口流速为 2 m / s, 以保持与流速为 0.2 m / s 的实验室模型的动态相似性。然而, 物理模型的雷诺数为 107, 而实验室模型的雷诺数为 104。对于物理河道处的次级流态。

二次流的总体特征与实验室模型定性相似, 但存在定量差异。河床附近从外弯到内弯的单调运动现在被扭曲, 出现了速度方向相反的小段。最大流速为 2.3 m/s, 出现在弯道内侧附近。在高雷诺数下, 轴向速度剖面更加平坦, 更接近充分发展的湍流流动。速度的最大值也明显地向内壁移动。

② 沉积物结果

对于小颗粒, 颗粒沉积的模式大致是均匀的。对于直径小于 40 μ m 的颗粒, 沉积率小于 10 %, 并且在横截面上近似为常数。对于大于 1000 μ m 的颗粒, 沉积颗粒的百分比变得与颗粒直径无关。大部分颗粒不在弯道处沉积, 而是通过出口离开。

4 结论

(1) 在物理(自然尺度)河流中, 存在着床面附近二次流方向发生逆转的区域。

(2) 对比相同弗劳德数的物理河和实验室模型河中的流态发现, 二次流和紊动强度没有得到合理的比尺, 不服从(动态)相似律。这是由于实验室模型和物理河道中水流雷诺数不同造成的。

(2) 弯道上形成的二次流漩涡影响了颗粒物的沉积形态。

(3) 在河流模型中, 沉积速率剖面一般在弯道内侧附近达到峰值。然而, 物理河流的颗粒沉积在弯道截面上大致是恒定的。

(4) 基于弗劳德数标度的颗粒沉积模式在模型和物理河流之间没有表现出相似性。

(5) 颗粒沉积速率由无量纲弛豫和流动雷诺数控制, 无量纲弛豫时间相等的颗粒在实验室河流模型和物理尺度河流中的沉积速率不同。

参考文献

- [1] 薛强, 高博远, 段辰宇, 等. 基于 FLOW3D 的集成式水下基盘泥沙冲淤三维数值模拟[J]. 水道港口, 2024, 45(03): 333-338+414.
- [2] 李志赞. 阿尔塔斯水电站泥沙淤积计算与分析[J]. 浙江水利科技, 2024, 52(03): 52-56. DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv. 2024. 03. 009.
- [3] 韩睿. 基于改进的径向基神经网络模型的水库异重流泥沙淤积量模拟[J]. 水利技术监督, 2024, (01): 148

-151.

- [4] 田赞. 汛期水位变化对水库泥沙淤积影响研究[J]. 水利技术监督, 2024, (01): 199-202.
- [5] 张月嫦. 大沙河水库泥沙淤积下溢洪道水力模型试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(10): 42-46.
- [6] Shiono K, Muto Y. Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow[J]. J Fluid Mech, 1998, 376: 221-261.
- [7] Launder BE, Reece GJ, Rodi W. Progress in the development of a Reynolds stress turbulent closure[J]. J Fluid Mech, 1975, 68: 537-538.
- 作者简介: 郭真, 1975.08, 本科, 一直从事水利工程建设管理, 履历: 任总经理、副董事长等职务.