

トレンチ内の流れと浮遊砂濃度分布の数値シミュレーション

Mathematical Simulation of Flow and Suspended Load in Open Channels with a Trench

藤田正治*・道上正規**・檜谷 治***

By Masaharu FUJITA, Masanori MICHIE and Osamu HINOKIDANI

In this paper a mathematical method to calculate longitudinal and vertical flow velocity and non-equilibrium concentration of suspended load in open channels with a trench is discussed. This method is based on 0-equation turbulence model and two dimensional diffusion equation of suspended sediment. Using this method, the velocity profiles and the concentration distributions are simulated for some trenches with different ratio of the depth to the length. These results show that the flow structure that consists of main flow and circular flow can be simulated precisely and the concentration can not be calculated correctly without the estimation of two dimensional flow structure.

Keywords: turbulence model, suspended load, trench, mathematical simulation

1. まえがき

河川や湖沼にトレンチを開削すると、流速や乱れの強さがその箇所では減少し、流水中の浮遊物質は、他の箇所に比べてトレンチ部に多く堆積する。そこで、河川や湖沼の浮遊物質の堆積を防止軽減したり、堆積物を排除する方法としてトレンチを利用したものが考えられる。すなわち、河川の高水敷や湖沼の広い範囲に堆積する土砂をトレンチ部に集中的に堆積させて、それを一括して排除するというような方法である。このような手法の効果を明らかにするためには、任意の流水や流砂条件に対して、どのようなトレンチの形状が適当であるかを調べる必要がある。そのためには、トレンチ内の2次元な流れと非平衡浮遊砂の挙動を同時に解析できる数値計算法を開発して、それを使って検討するのが有効である。

本研究は、矩形断面の開水路の一部に流れと直角方向に、トレンチを全幅に渡って設置した場合のトレンチ内の主流方向および鉛直方向の流速分布および非平衡浮遊砂濃度分布を計算する方法を提示し、そのモデルの有効性について検討するものである。とくに、濃度分布の計算に流れの二次元解析の結果を使うことの必要性についても考察する。

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

(〒680 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101)

2. トレンチ内の流れの数値シミュレーション

2. 1 実験

トレンチ内の流れの特性を把握するために、以下のような実験を行なった。実験には、長さ9m、幅0.3m、深さ0.3mの矩形断面水路を使用し、トレンチを上流より約5mの位置に、流れ方向に直角に全幅に渡って設置した。実験は表-1に示す一定の流水条件のもとに、表-2に示す3種類の形状のトレンチを用いて行なった。流水の条件は、流量 $Q=0.78$ l/s、トレンチ部以外の水深 $h_0=1.45$ cm、平均流速 $u_0=17.9$ cm/s、摩擦速度 $u_{*0}=1.2$ cm/s で、トレンチの長さ L は20cm、深さ D は、0.9cm、1.9cm および3.0cm の3種類である。トレンチ内の流速は、レーザー・ドップラー流速計を用いて流下方向と鉛直方向について測定し、水面から1.5cm の範囲ではプロベラ流速計を用いて流下方向の流速のみ計測した。なお、流れはトレンチ外で等流となるようにした。

図-1 (a)、(b)、(c) にトレンチ内の平均流速分布をベクトル表示したものを示す。 L/D が小さくなるほど、トレンチ底面での逆流領域が流下方向に広がり、再付着点距離が長くなり、また、逆流の流速も大きくなることからわかる。すなわち、トレンチの長さが一定のとき、トレンチが深いほどトレンチ内のローラー状の流れが大きくなることが考察される。図-2はケース2の場合の流れ関数 $\phi/(u_{*0}h_0)$ の分布を示したものであり、トレンチ入口から5cm 付近に負のピークが見られる。この位置は各ケースで異なり、ケース1でトレンチ入口から2.5cm、ケース3で10cm 付近であり、深いトレンチほど下流に移動する。

表-1 実験条件

i	Q (l/s)	h_0 (cm)	u_0 (cm/s)	u_{*0} (cm/s)	R_e	F_r
1/1000	0.78	1.45	17.9	1.2	2600	0.48

表-2 トレンチの形状

ケース	D (cm)	L (cm)	L/D
1	0.9	20.0	22.2
2	1.9	20.0	10.5
3	3.0	20.0	6.7

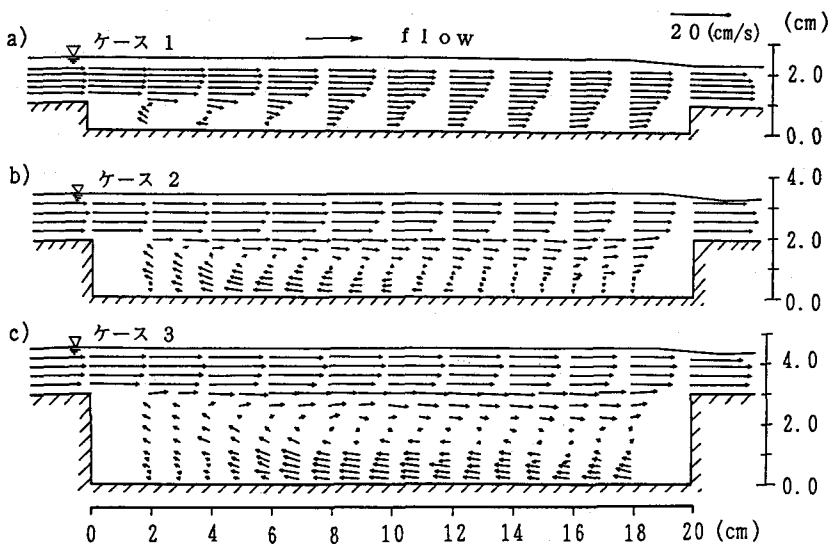


図-1 (a)、(b)、(c) トレンチ内の流れ

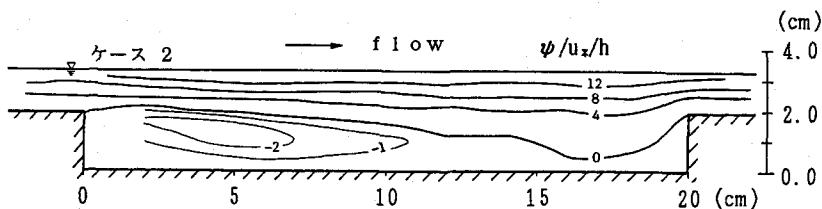


図-2 流れ関数の分布

2. 2 流れのシミュレーション

解析方法には従来道 supra¹⁾が提案しているモデルを用い、鉛直2次元解析を行った。座標系は図-3の通りであり、基礎式は以下の通りである。ただし、静水圧近似の仮定を使っている。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

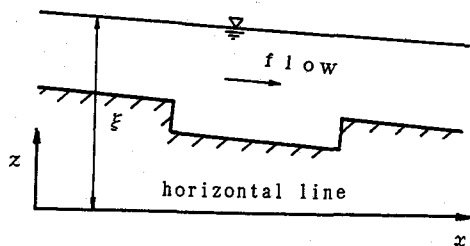


図-3 座標系

ここに、 u, w : x および z 方向の流速、 g : 重力加速度、 ξ : 水位、 $\varepsilon_x, \varepsilon_z$: x および z 方向の渦動粘性係数である。ただし、鉛直方向の渦動粘性係数は以下に示すようなParabolic-Constant型のものを与え、流下方向の拡散項は無視した。

$$\varepsilon_z = \kappa u_* h (1 - z^*/h) (z^*/h) \quad (z^*/h < 0.5) \quad (3) \quad \varepsilon_z = 0.25 \kappa u_* h \quad (z^*/h \geq 0.5) \quad (4)$$

ここに、 z^* : 河床からの高さ、 h : 各地点の水深、 κ : カルマン定数、 u_* : 各地点の摩擦速度で、 u_* はトレンチ部でもトレンチ内の水深と河床勾配から計算する。境界条件は、水面で $\varepsilon_z \partial u / \partial z = 0$ 、河床で $u = w = 0$ とし、上流端では等流水深 h_0 と流速分布として一様な平均流速 u_0 を与えた。

図-4 (a)、(b)、(c) は、各ケースの主流方向の流速 u および水面形の計算値と実験値を示したものである。水位の計算値が少し過大評価されている。また、流速の計算値はトレンチ出口で実験値と異なっているが、その他の所では良く一致している。図-5 (a)、(b)、(c) は鉛直方向の流速 w の計算値を実験値とともに示したもので、計算値は実験値の傾向をある程度再現しているが、トレンチ出口では実験値が正であるのに対して計算値は負となっているなどあまり適合しているとは言えない。以上のように、本計算法では、静水圧近似を仮定していることや渦動粘性係数を簡単な式で扱っていることなどのために、流速や水面形の計算値は実験値と必ずしも一致していないが、深いトレンチほどローラー状の流れが強くなることなど全体的な流れの様相はほぼ再現できている。

3. 浮遊砂濃度分布のシミュレーション

3. 1 基礎式

基礎方程式としては次式に示す拡散方程式を用いた。

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + (w - w_0) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(E \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ここに、 C : 浮遊砂濃度、 w_0 : 粒子の沈降速度、 E : 鉛直拡散係数であり、渦動粘性係数の平均的な値 $(1/6) \kappa u_* h$ を与えるものとする。境界条件は 以下のようである。

$$\text{水面: } (w - w_0) C - E \partial C / \partial z = 0 \quad (6) \quad \text{河床: } -E \partial C / \partial z = q_{s0} \quad (7)$$

$$\text{上流端: } C = C_0(z) \quad (z^* > D) \quad (8) \quad \text{上流または下流の壁面: } uC = 0 \quad (9)$$

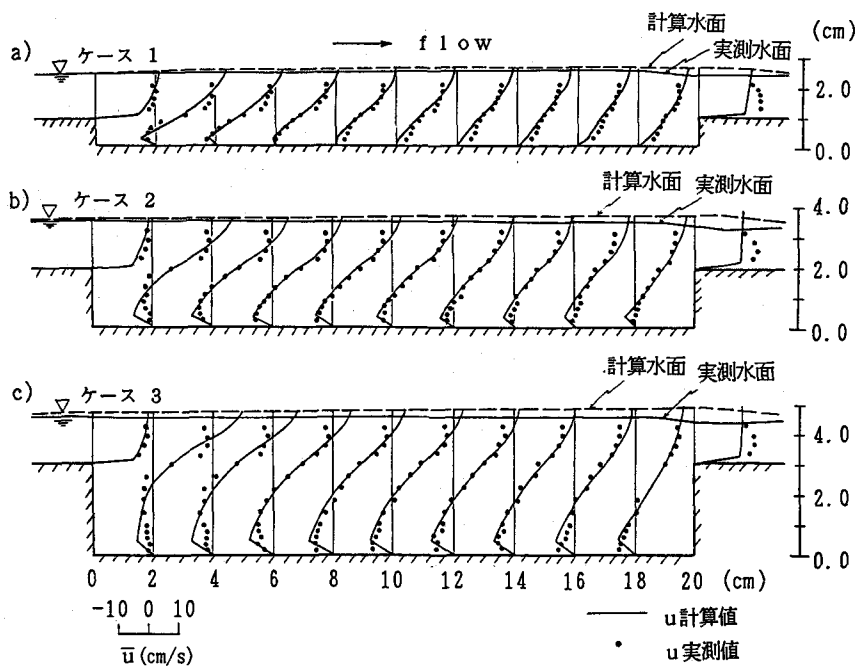


図-4 トレンチ内の主流速の計算値と実験値の比較

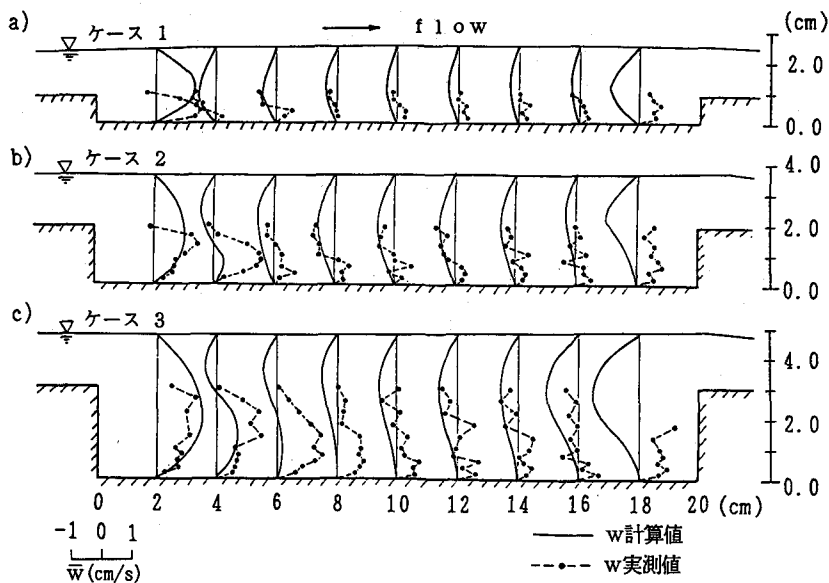


図-5 トレンチ内の鉛直方向の流速の計算値と実験値の比較

ここに、 C_0 ：トレンチ入口における浮遊砂濃度分布、 $q_{s,u}$ は河床からの砂粒子の浮上量である。浮上量は芦田・道上の平衡状態の底面濃度 C_b の計算式²⁾を用いて式(10)で求められる。

$$q_{s,u} = p_r C_b w_0 \quad (10)$$

ここに、 p_r ：河床に占める砂粒子の割合である。ただし、 C_b の計算に必要な摩擦速度は、底面付近の速度勾配の計算値と平均的な渦動粘性係数 E から求められるものとする。式(5)は差分法で解かれるが、移流項には解の安定性を考慮して風上差分を用いる。

3. 2 濃度分布の計算値と計算値の比較

2. で述べた実験と同一の条件に対して、粒径 145μ 、比重 1.18 の塩化ビニール性粒子を 0.178g/s の割合で給砂し、浮遊砂濃度分布や堆積形状の変化を計測した。ここではこの実験で測定された浮遊砂濃度分布のシミュレーションを行なう。計算に必要な境界条件は以下のように決めた。本実験では図-6に示すように、初期の段階では砂粒子はトレンチ上流側の隅角部付近に堆積し、その後デルタが下流に進行している。初期の隅角部付近の堆積範囲は、2. で述べた流れ関数の負のピークの位置にはほぼ対応している。また、この領域では流速が小さく浮遊粒子は再浮上することなくほぼ純堆積しているものと考えられる。そこで、初期の段階では、トレンチ上流端から流れ関数の負のピークの位置までは、 $p_r=0$ すなわち純堆積の条件とした。その下流およびデルタの下流では、固定床がもし洗掘される場合は、 p_r を1以下の適当な値を求め、堆積も洗掘も生じないようにして、浮上量を計算した。また、 $C_0(z)$ は、初期の段階ではトレンチ入口における実測の浮遊砂濃度分布に掃流砂の濃度を河床付近に加えて求め、デルタの進行過程では、実験結果に基づき掃流砂濃度の60%を河床付近の浮遊砂濃度に加えて求めた。

図-7(a)、(b)、(c)の実線および描点は、ケース1、2、3の場合の給砂開始直後の濃度分布の計算値と実験値を示したものである。実験値はケース1、3のみ示している。ケース1の底面付近で両者に多少の差異は認められるものの、非平衡浮遊砂濃度分布の変化過程がよく再現されている。図-8は、ケース1の場合のデルタが少し進行した時点における濃度分布の計算値と実験値を比較したものである。両者は良好に一致していることがわかる。このように、本モデルによってトレンチ内の濃度分布が的確に計算できる。

3. 3 濃度分布の計算値に及ぼす逆流および二次流の効果

本研究では、主流速だけでなく逆流や二次流の流速の計算結果を使って、濃度分布を計算することが特徴である。そこで、逆流や二次流が、濃度分布の計算結果にどのように影響するかを検討して、このように詳細に流れを計算して濃度を求める必要性について検討する。

図-7(a)、(b)、(c)の一点鎖線は、流れを一様流、すなわち u に断面平均流速を用い、 w を無視した場合の濃度分布の計算結果である。ただし、浮上量算定に必要なトレンチ内の摩擦速度は、トレンチ内の抵抗係数が $\phi (=u_0/u_{*0})$ に等しいものとして計算した。これらと本モデルの結果である実線を比べると、二次流や逆流を考慮した場合と考慮しない場合では、濃度分布がかなり異なり、前者の方がトレンチ内の上流側の河床付近で濃度が大きくなるのがわかる。これは、下流側の底面付近の浮遊砂が逆流によって上流側に移流されるためだと考えられる。ただし、ある程度下流側では両者の間に大きな差異はなかった。また、トレンチ内のローラー状の流れに浮遊砂が捕捉されるため、逆流や二次流を考慮すると濃度が少し大きくなって、

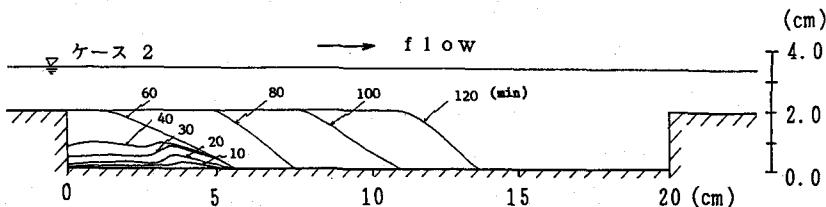


図-6 トレンチ内の堆積形状

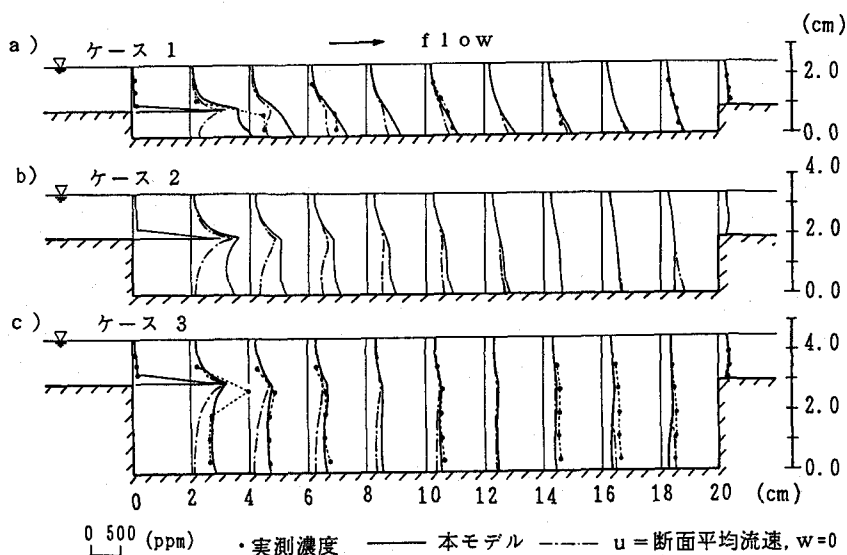


図-7 (a)、(b)、(c) 浮遊砂濃度分布の計算値と実験値の比較

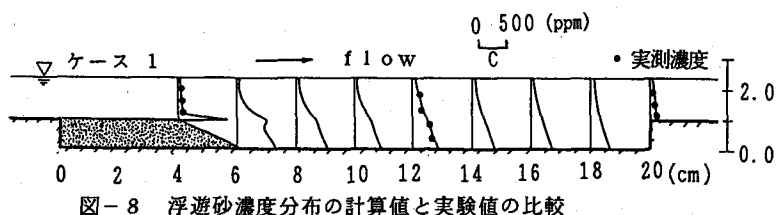


図-8 浮遊砂濃度分布の計算値と実験値の比較

いる。このように、逆流や二次流によって、トレンチ内の濃度分布は影響され、それを考慮しないとくに上流側の河床付近で濃度分布が正確に計算できない。

4. あとがき

以上、トレンチのある開水路の流速分布や浮遊砂濃度分布を計算する方法について提案し、その妥当性について検討した。その結果、静水圧近似やParabolic-Constant型の渦動粘性係数を用いて、流れの様相がほぼ再現できることや浮遊砂の非平衡過程が解析できることがわかった。また、濃度分布は逆流や二次流の影響を強く受け、本モデルのような詳細な流れの解析をしなければ濃度分布を的確に再現できないことがわかった。なお、本実験では、トレンチを深くするとローラー状の流れが強くなり、トレンチ内外の掃流力の差があまり変わらなかったため、あまり、浮遊砂が堆積しなかった。効率的に浮遊砂を堆積させるために必要なトレンチの形状や河床材料（例えば浮遊砂を吸着するようなもの）について今後検討する必要がある。なお、本研究を遂行するにあたり、実験や数値計算において安井秀則君および太田知章君（当時学生）の協力を得た。ここに、記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 道上正規・檜谷 治：不透水制周辺の準三次元流計算、第44回年講Ⅱ-251。
- 2) 芦田和男・道上正規：浮遊砂に関する研究(1)－河床付近の濃度、京大防災研年報、第13号B、1970。