

○アジア航測株式会社 北原 一平  
建設省土木研究所 水山 高久  
建設省土木研究所 井良沢 道也

### 1. はじめに

砂防でも最近では浮遊砂の重要性が認識されるようになってきた。浮遊砂に関する既往の研究は多いが、急勾配水路の浮遊砂の機構はほとんど解明されていないのが実態である。本研究では、急勾配水路の実験によって測定された浮遊砂の濃度分布、流速分布、流砂の移動速度等のデータを用いて、急勾配水路の浮遊砂量を算定するための検討を行う。

### 2. 実験の概要

実験に用いた水路は、幅30cm、長さ10m、片面ガラス製のものである。使用した砂は、粒径0.2mm、0.4mm、1.0mmの一樣砂で、水路上流端より給砂した。水路底面には、供給する砂の粒径dの等倍、2倍、4倍の径の砂粒を貼りつけた。水路勾配は、1/50、1/20、1/10、1/6.7、流量は5、10、20、30ℓ/secとし、水路に堆積が生じない限界の給砂を行い、水路下流端で全流砂量を測定した。また、ビデオカメラにより水路側面から撮影を行い、撮影結果から、画像解析装置により粒子の移動速度、移動方向を読み取った。流速分布は、プロベラ流速計または超音波流速計により測定した。土砂濃度分布は、5mm×30mmの取り入れ口を持つ採取装置により深さ方向に5mm毎に流水および浮遊砂を採取し、濃度分布を測定した。

### 3. 基準面高、基準面濃度の検討

既往の研究には大きく分けるとEinstein<sup>1)</sup>に始まる掃流層の上限で浮遊砂濃度が掃流砂濃度に接続すると考えるモデルとLane-Kalinske<sup>2)</sup>によって提案され、芦田・道上<sup>3)</sup>によって発展させられたモデルがある。浮遊砂の基準面高については両モデルとも物理的な意味づけはなされておらず、慣用的に0.05h～0.1hを用いているのが現状である。浮遊砂の基準面高の定義は人により様々であり、また、既往の研究はほとんどが緩勾配の水路における実験である。そこで、今回の検討ではまず実験時に水路側方から撮影したVTR映像を観察した。VTR映像で明瞭に粒子が認められるのは粒径1mmの実験だけであった。この観察から底部を流下する高濃度の粒子層は掃流砂のように思えたが、それが完全に掃流的な流れとはっきり分かるのは水路勾配が1/50だけであり、勾配が急になると現象としての境界はどこなのかは分からない。そこで水路底部の土砂濃度が高い部分とそれより上部の濃度の低い部分との境界の高さを読み取った。また、濃度分布から基準面と思われる高さを読み取った。図1に粒径1mmの実験ケースの勾配別の平均値を濃度分布から読み取った基準面高と対比して示す。図2にはVTR映像から読み取った粒子の流速分布図に両方の基準面高をいれたものも示す。これから次のことが分る。

- ① 水路底部の土砂濃度が高い部分とそれより上部の濃度の低い部分との境界を基準面とすると粒径1mmのケースでは既往の研究でよく用いられている0.05hはまったく適用できない。
- ② 濃度のグラフから読み取った基準面高とVTR映像から読み取ったものはあるケースではよ

く一致するものの、平均にするとVTR映像から読み取った値の方が大きくなる傾向にある。

③ 流速分布は大きく見て速度の遅い部分と速い部分に分けられる。基準面高と流速分布との対応をみるとVTR映像から読んだ基準面高よりも土砂濃度分布から読んだ値の方が前述の流速の接合部により一致している。

④ 高濃度の層は勾配の増加と共に厚くなる。VTR映像からは掃流層が勾配の増加と共に厚くなるように観察されることから、基準面高の増加は掃流層の勾配による増加と関係していると考えられる。しかし $w_0$ を沈降速度とすると浮遊限界として一般に $w_0/u_* = 0.7 \sim 1$ と言われており、 $1\text{mm}$ の粒子の $w_0 = 9.8\text{cm/s}$ に対し、 $w_0/u_* \leq 1$ になるのは $1/50$ だけであること、および一般に掃流層厚は粒径の数倍程度と言われていることを考慮するとこの境界が基準面であるとはつきり言い切ることとはできない。

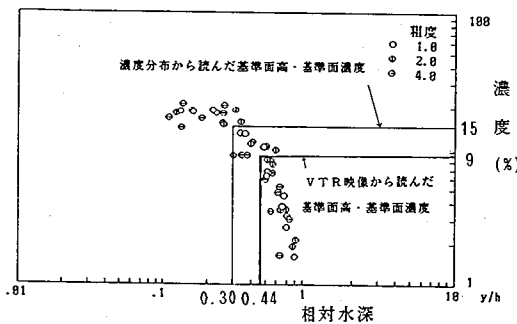


図1 基準面高と濃度分布(1mm, 1/6.7)

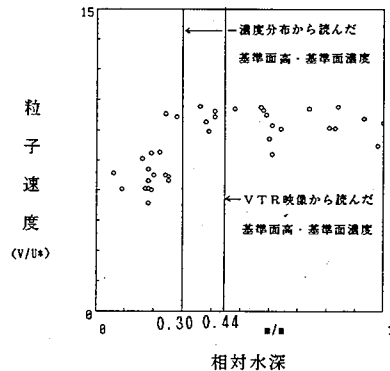


図2 相対水深と粒子速度分布の関係(1mm, 1/6.7, 30 /s, 2d)

#### 4. 流速式の検討

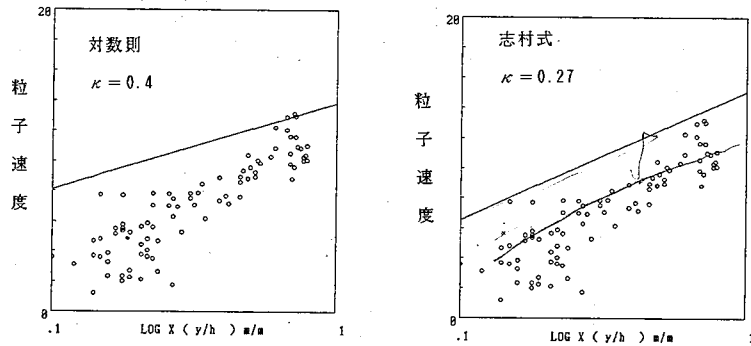
対象とした実験ケースの深さ別の流速については実験時に計測したものの流れに浮遊砂を含むことによる影響で一定した傾向が得られず、あまり正確な資料とはいえない。ただし、平均流速については10断面の水深を計測した平均値と流量から求めているためデータとしての信頼度は高いものと考えられる。また、粒子速度分布もVTR映像から画像解析装置によって計測しているので横方向の誤差はあるもののかなり正確であると考えられる。そこで粒子速度分布と既往の流速分布式である対数則を比較した。対数則は次のように表される。

$$u/u_* = U/u_* + 1/\kappa + 1/\kappa \ln(z/h) \quad (1)$$

浮遊砂の存在によるカルマン定数 $\kappa$ の変化については志村<sup>4)</sup>と日野<sup>5)</sup>の検討がある。両式による $\kappa$ の変化を計算した結果、両方の値は近い値となった。図3に $\kappa = 0.4$ の場合と志村による $\kappa$ による対数則と実測の粒子速度との比較の例を示す。実測の粒子速度は $u_*$ で無次元化してある。これから次のことが分かる。

- ① 粒子速度分布は対数上でも直線にならない。これは表面に近いところでは粒子の速度差が非常に小さいからである。
- ② 図中では実線の方がほとんどの粒子速度より上にあることから分るように粒子速度はどのケースでも流速よりも遅い。これより粒径 $1\text{mm}$ の粒子では粒子と水流との間に速度差があることは明らかである。この事実は拡散係数 $\epsilon_s$ と渦動粘性係数 $\epsilon_m$ を $\epsilon_s = \beta \epsilon_m$ とおいて導いているラウス式の $\beta$ に影響を与えるものと考えられる。

- ③ どのケースの粒子速度分布も  $\kappa=0.4$  よりも志村式の傾きに近い。これより、流速分布の  $\kappa$  は  $d$  浮遊砂の存在により減少している可能性が高いと考えられる。ただし、それは底面にかなり近い部分に限られ、逆に水面に近い方では流速差は小さくなっており、みかけ上、 $\kappa$  は増加している。
- ④ 浮遊砂量式を求める場合、浮遊砂濃度は底に近い程高いため、流速分布も上部よりは下部を正確に推定する方がよい。したがって、流速式として一定の  $\kappa$  を定めるならば  $\kappa$  は志村式にしたがって小さくする必要がある。



5. 浮遊砂濃度分布式の検討

図3 粒子速度と対数則の比較 (1mm, 1/20, 10 /s, 2d)

各粒径について勾配別に浮遊砂の濃度分布とラウス式<sup>6)</sup>との対応を比較した。パラメータとして基準面高、基準面濃度およびカルマン定数にかかる係数  $B$  を変化させ、実測値と式の対応を検討した。図4に実験条件の違いによる相対水深と濃度との関係を、図5に粒径および勾配別の相対水深と濃度との関係を示す。これから次のことが分かる。

- ① 深さに対する濃度勾配はほぼ2つの部分に分けられ、底の方は濃度が高く濃度勾配が小さいのに対し、上の方は濃度勾配が大きい。これは1mmの粒径で顕著である。1mmの粒径ではVTRの観察から2つの部分の境界が基準面高に対応しているものと考えられる。
- ② 水路勾配が大きいほど2つの部分の境界面は水路面から上昇する。
- ③  $B$  を大きくすることにより式と実測値の対応をよくすることはできるが、水路勾配が急になるほど  $B$  を大きくしなければならない。 $B$  の値は一般に1.2程度といわれている。基準面高を勾配と共に高く設定する場合は粒径1mmで1/6.5のとき  $B=1.5$ 、0.4mmでは  $B=2$ 、0.2mmでは  $B=3.3$  になる。基準面高を一般に用いられている0.05hとすると  $B$  はさらに大きくなる。
- ④ 基準面高の設定は難しく、既往の研究でも saltation モデルからの推定などはあるがほとん

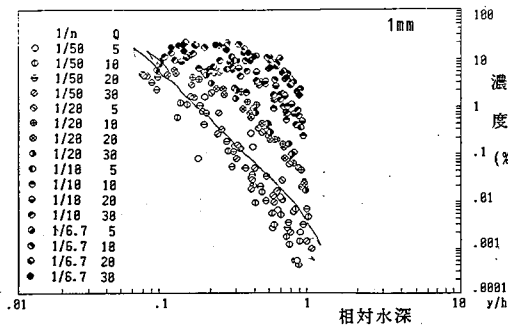


図4 相対水深と濃度の関係

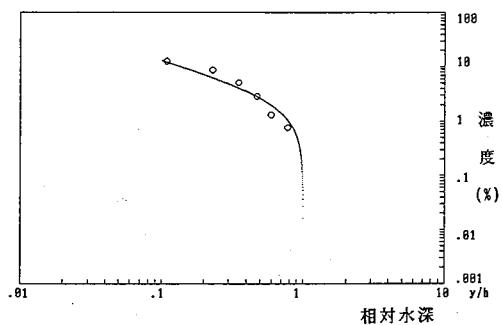


図5 粒径・勾配別の相対水深と濃度の関係 (1mm, 1/10, 30l/s, 2d)

どの場合0.05h ~ 0.1hを用いている。本研究ではVTRの観察や濃度分布の考察から基準面高は大きいので一応0.1hを用いて実測の濃度分布との対応を見たが、 $\beta$ の値の取り方によってある程度ラウス式を実測値に合わせることができた。基準面高の理論的な説明は現段階では難しいのでとりあえず $\beta$ の値を経験的に与え基準面高としては0.1hを用いるのものとした。

## 6. 浮遊砂量式の検討

一般に浮遊砂量は次式で定義される。

$$q_s = \int_h^a u \cdot C(y) dy \quad (2)$$

流速分布式はカルマン定数の勾配による変化を考慮した対数流速式

$$u/u_* = U/u_* + 1/\kappa + 1/\kappa \ln(z/h) \quad (3)$$

を用いる。浮遊砂土砂濃度式としては同様にカルマン定数に掛かる係数 $\beta$ の勾配による変化を考慮したRouse式を用いる。

$$C(y)/C_a = \left[ \frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{z = w_* / \beta \kappa u_*} \quad (4)$$

上式を变形したのが次式である。

$$q_s = q_{CB} \left( \frac{a}{h-a} \right)^z \left[ \left( 1 + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{3/2}} \int_{a/h}^1 \frac{1}{\eta} - 1 \right)^z d\eta + \frac{1}{\kappa} \frac{n\sqrt{g}}{h^{3/2}} \int_{a/h}^1 \ln \eta \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)^z d\eta \right] \quad (5)$$

表1 勾配別のパラメータ

	1mm		0.4mm		0.2mm	
	Ca(%)	$\beta$	Ca(%)	$\beta$	Ca(%)	$\beta$
1/50	3	1.2	4	1.2	4	1.0
1/20	7	1.4	10	1.4	10	1.1
1/10	13	1.9	17	1.9	17	1.3
1/6.7	20	2.5	25	2.5	30	1.5



ここに、 $\eta = y/h$ 、 $C_a = C_b$ としている。

粒径1mmの勾配別のパラメータは表1の通りである。式(5)と表1のパラメータを用いて計算した浮遊砂量と実験で計測した全流砂量を比較したところ計算値の方がかなり大きい結果となった。この原因としては次のことが考えられる。図4に示したようにどの粒径でも濃度分布に対して一番支配的なパラメータは勾配であり、流量と粗度の影響は小さい。とくに流量が違っても深さ方向の濃度分布は無次元化された相対水深と明確な対応関係にある。このように濃度分布自体は流量が異なってもほぼ同じ曲線にのるものの、流量の違いによってサンプルを採取できる最低の深さが異なるため、今回設定した基準面高、基準面濃度では流量の小さい場合は過大になる。したがって、今後は流量の違いを評価していかなければならない。さらに、今後の課題としてはトレーサー等を使った流速分布の正確な把握、基準面高、基準面濃度の理論的根拠の考察、浮遊砂拡散係数 $e_s$ と渦動粘性係数 $e_m$ の比である $\beta$ の考察等があげられる。

## 参考文献

- 1) Einstein, H.A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flow s. USDA, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, No. 1026, 1959
- 2) Lane, E.W. and Kalinske, A.A.: Engineering calculation of suspended sediment, Trans. A.G.U., 1941
- 3) 芦田和男、道上正規: 浮遊砂に関する研究(1) 京都大学防災研究所年報、第13号、1970
- 4) 志村博康: 浮遊砂を有する水流の諸特性について、土木学会論文集、第46号、1957
- 5) 日野幹雄: 粗面水路における土砂流の抵抗法則及びその応用、土木学会論文集、第95号、1963
- 6) Rouse, H.: Experiments on the mechanics of sediment suspension, Proc. 5th Int. Congress of Applied Mech., 1938