

埼玉大学工学部

正会員

山坂昌成

東京工業大学工学部

正会員

福岡捷二

1. はじめに 従来、流路境界面に作用するせん断力分布の不明確なために、振幅解析には平均的なせん断力が用いられることが多かった。^{1,2)}本研究では、最初に流路横断面形状の変化過程を実験的に検討し、これと流砂量式よりせん断力分布を記述する式を見出す。つぎに、導いたせん断力分布式を用いて流路の振幅解析を行う。

2. 振幅実験 長さ 8m、幅 40cm の可変勾配水路に粒径 0.067cm の砂を 1/400 の勾配に敷き均し、水路中央に底面幅 5cm、斜面角 30°、高さ 6cm の台形の溝を切り、これに 2.0ℓ/s の流量を通水し、流路横断面形状の変化過程をポイントゲージによって測定した³⁾。中流部のほぼ等流域とみなせる地点における流水断面積、水面幅、水位、中央水深の時間変化を表-1に示す。振幅が進行するに従って、油辺長が増大するため流水断面積はやや増大し、水位も若干上昇する傾向にある。

通水時間 t (min)	流水断面積 A (cm ²)	水面幅 B (cm)	中央水深 h _{cc} (cm)	水位 H ₀ (cm)
10	52.1	24.8	3.20	53.01
20	56.7	27.2	2.86	53.14
30	57.4	28.8	2.60	53.20
45	57.8	30.7	2.47	53.27
60	56.9	31.5	2.28	53.27
75	60.4	32.2	2.23	53.32
90	60.8	32.6	2.20	53.29
120	69.0	33.6	2.29	53.37

表-1 実験結果の概要

3. せん断力分布の算定 流路の振幅は、側岸の浸食、浸食土砂が河床への堆積により生じ、側岸、河床の浸食または堆積速度と横断方向流砂量は、等流状態のとき次の流砂の連続式により関連づけられる。

$$\partial(H_0 - h) / \partial t + (1/\lambda) \partial q_{by} / \partial y = 0 \quad \dots (1)$$

ここに、 H_0 は水位、 h は水深、 y は横断方向座標、 λ は砂の空けき率である。(1)式より、流路の振幅は横断方向流砂量の場所的な変化に支配される。横断方向流砂量は河床の横断勾配や流路境界面に作用するせん断力と強い関係をもつため、流路の振幅過程を定量的に取り扱うためには、従来、不明確であった流路境界面に作用するせん断力分布の適切な評価が必要となる。

実測の横断方向流砂量との関連で、せん断力の分布式を導くために、まず横断方向流砂量を算定する。横断方向流砂量は、横断面形状の変化過程を詳細に調べ、(1)式を適当な境界条件のもとに積分することにより得られるが、実験では厳密な等流とはならなかったため、測定された横断面形状は、流下方向に平均化された横断面形状に対する誤差を含み、理想的な対称形とはならなかったり、局部的に横断勾配が急変したりする。そこで、測定された横断面形状を連続な関数形で置き換えることにする。側岸部付近の exponential 形状⁴⁾に注目し、横断面形状の対称性、 $y = \pm b$ 時 $h = 0$ を考慮して、横断面形状を次のように表す。

$$h = H \left\{ 1 - \left\{ \exp\left(-\frac{by}{D}\right) + \exp\left(-\frac{by}{D}\right) - \exp\left(-\frac{2by}{D}\right) \right\} \right\} \quad \dots (2)$$

(2)式には、ある状態の断面に対し、 H 、 b 、 D の定数が含まれるが、流水半断面積が $Q = \int_0^b h dy$ と表されることを考慮し、せん断力がゼロとなる水深において水中安息角、すなわち $\theta_y(b) = \phi$ をとるものとする、 H 、 D は、 Q 、 b 、 ϕ により一義的に決定される。また、中央水深は(2)式で $y=0$ とおくことにより、

$$h_{cc} = H / \left\{ 1 - 2 \exp\left(-\frac{b}{D}\right) + \exp\left(-\frac{2b}{D}\right) \right\} \quad \dots (3)$$

で与えられる。図-2は、 $\tan \phi = 0.75$ とし、実測された流水断面積、水面幅を与えて(2)式で表される横断面形状と実測形状との比較を示した

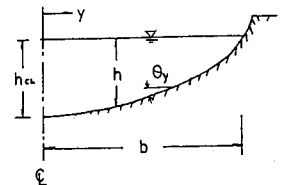


図-1 記号の定義

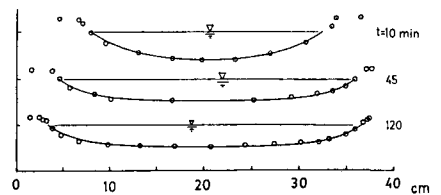


図-2 (2)式と実測の横断面形状の対比

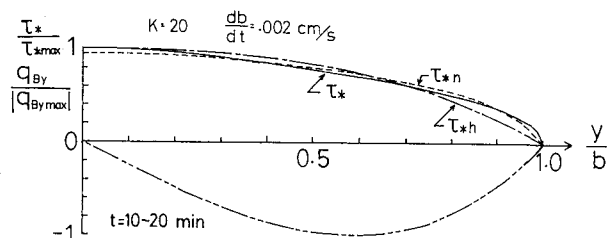


図-3 横断方向流砂量とせん断力の分布

もである。振幅段階によらず両者の対応は良好である。(2)式を時間微分して

(1)式に代入し、適当な境界条件のもとにこれを積分すると横断方向流量 Q_{py} が、また、(2)式を横断距離 y で微分すると横断勾配 $\tan \theta_y$ が求まる。さらに、等流状態の振幅過程においては、境界面に横断方向のせん断力が作用しないため、縦断勾配が非常に小さいとき、次の流量式⁵⁾によりせん断力の分布が算定される。

$$\frac{Q_{py}}{\sqrt{(B/B-1)g d^3}} = K \frac{Z_{kco}}{\mu_s} \sin \theta_y \left\{ Z_s^2 + \left(\frac{Z_{kco}}{\mu_s} \sin \theta_y \right)^2 - Z_{kco} \cos \theta_y \right\} \quad \dots (4)$$

本研究では、実験的事実をもとに、近似的に $\frac{dh}{dt}=0, \frac{dQ}{dt}=0$ とし、水面上の側岸高が極めて低いことから $Q_{py}(b)=0$ を仮定する。これら4条件のもとでは、 $\frac{dh}{dt}, \frac{dQ}{dt}$ は $\frac{dy}{dt}$ の関数となる。図-3に、実験された振幅速度を与えて計算された横断方向流量(二点鎖線)と無次元せん断力(実線)を示す。流量式の比例定数 K は、せん断力の総和が $\rho g h i$ に等しくなるように定める。同図中の一点鎖線は $Z_n = \rho g h i \cos \theta_y$ により算定した無次元せん断力 Z_n の分布を示すが、実際のせん断力分布 Z_s は側岸付近で Z_n より大きくなる。これは次の理由による。 Z_n を算定する断面分割法においては、図-4に示すIの分割面に流体間のせん断力が作用しないと仮定し、重力とつり合い式よりせん断力を算定するが、実際には横断方向の流速差のためにせん断力はこのような分布にはならない。厳密なせん断力分布は、等流速線を求め、これに直交する断面分割(同図II)の方法により算定すれば良いが、これは極めて困難である。そこで、境界面の法線による分割法⁶⁾(同図III)に補正係数 α を導入した次式によりせん断力の分布を検討する。

$$Z_n = \rho g h i \cos \theta_y \left[1 + \alpha \left\{ \frac{1}{2} h \frac{\partial h}{\partial y} + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] \quad \dots (5)$$

$\alpha=0$ が図-4のIの分割法に対応し、 $\alpha=1$ がIIIの分割法に対応する。IIの分割法によるせん断力分布は $\alpha>1$ の補正係数を必要とする。断面変化過程より求められたせん断力分布を(5)式で近似すると、 $\alpha=2$ 程度の補正係数を用いたとき両者の対応が最も良い(図-3の Z_s と Z_n)。他の振幅段階においても同様な検討を行うが、比例定数 K は約20、補正係数 α は2となる。

4. 振幅解析

振幅過程にある流路境界面に作用するせん断力の分布が明らかとなり、以下の方法により流路の振幅解析が可能となる。図-5に解析の流れ図を示す。前節と同様に横断面形状を(4)式で与え、流路の連続式を $\frac{dh}{dt}=0, \frac{dQ}{dt}=0, Q_{py}(b)=0, \theta_y(b)=\phi$ の条件のもとに積分すると横断方向流量 Q_{py} が得られ、これを流量式に代入し、 Z_s について解くと、せん断力の分布が振幅速度 $\frac{dy}{dt}$ と横断方向座標 y の関数として表される。一方、横断面形状が与えられると、(5)式よりせん断力分布が算定される。この二つのせん断力は、本来すべてが地点で一致しなければならないが、(5)式は近似式であるため、どのような振幅速度を選んでも両者がすべてが地点で一致することはない。そこで、流路断面全体としての両者の誤差が最小となるように振幅速度を決定する。解析結果を図-6に示す。○印、◇印がそれぞれ実験された水面幅、中央水深を示し、実線は $t=20 \text{ min}$ の水面幅を初期条件として計算された水面幅、中央水深の時間変化を示す。実験値と計算結果の対応は良好である。振幅に支配的である側岸付近のせん断力分布を適切に評価することにより、流路断面を連続した形状として扱った振幅解析が可能となった。

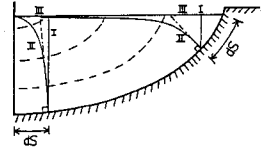


図-4 横断断面分割法

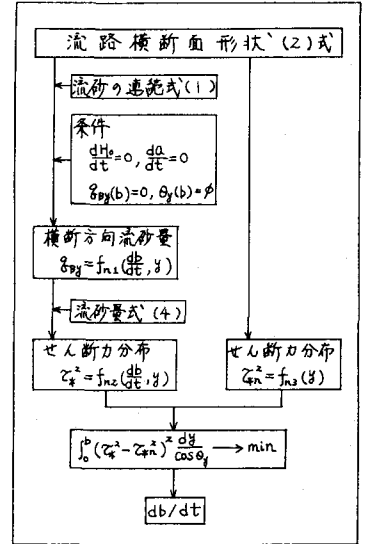


図-5 解析の流れ図

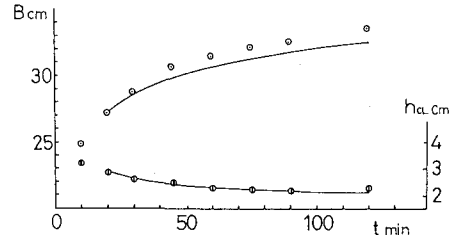


図-6 振幅解析の結果および実験値

1) 平野: 論文報告集第210号。2) 藤田: 京大工学部論文, 1980。3) 竹内: 福岡山版: 第38回年報。4) IKEDA: ASCE HY DIV., 1981。5) 福岡山版: 第27回年報。6) 澤井: 論文報告集第246号