

京都大学工学部 正 員 中川博次

京都大学工学部 正 員 楠津家久

京都大学大学院 学生員 門田章宏

1. はじめに

実河川においては、洪水時に巨大なボイル渦が観測されることが多く、また浮遊砂輸送も洪水時に激しく起こる。したがって、非定常開水路流における乱流構造やせん断特性を解明することは、流砂の運動機構を考える上で重要な課題である。摩擦速度あるいは河床せん断応力は、乱流理論において、また Rouse 公式に代表されるように土砂水理学においても最も重要な因子である。そこで、本研究は、流れの非定常性によるせん断応力特性の変化に注目し、レーザ流速計と流量自動制御装置を用いて実験を行い、その理論的考察を行うものである。

2. 実験および非定常パラメータ

実験に用いた水路は、長さ 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型循環水路である。水路床には、一様な粒径 (12mm) のガラスビーズを均一な高さで敷きつめた Nikuradse 粗面を用いた。また、非定常流を発生させる直前のベースフローの流量 $Q_b = 2.5(\ell/s)$ 、水深 $h_b = 4.0\text{cm}$ 、水路勾配 $i = 1/10^3$ とした。表-1 に示すように、増水時間 (= 減水時間) T_d を 4 通りに変化させた。表中の添え字 p は、ピークフロー時における値を示す。

表-1 水理条件

RUN	R-1	R-2	R-3	R-4
$T_d(\text{sec})$	30	60	90	120
$Q_p(\ell/s)$	7.5	7.5	7.5	7.5
$h_p(\text{cm})$	5.55	5.78	5.92	5.92
F_{rp}	0.458	0.431	0.416	0.416
$\alpha(\times 10^{-3})$	2.09	1.23	0.90	0.68

本研究では、流れの非定常性によるせん断応力特性の変化に着目しており、次式で表される非定常パラメータ α を用いることにする¹⁾。

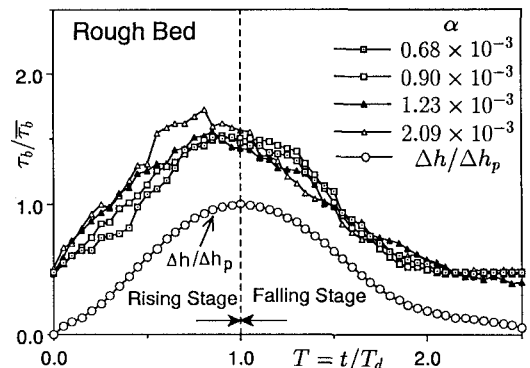
$$\alpha \equiv \frac{(h_p - h_b)/T_d}{U_c}, \quad U_c \approx \frac{U_{mp} + U_{mb}}{2} \quad (1)$$

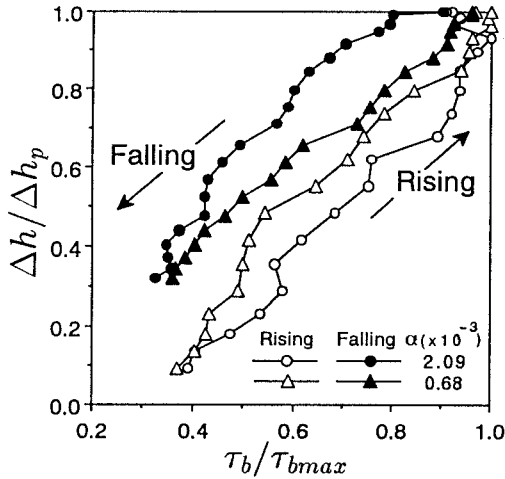
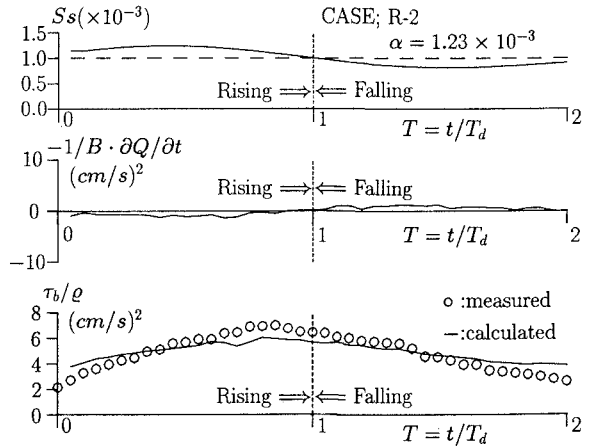
ここで、 U_{mb} および U_{mp} は、それぞれベース時、ピーク時の断面平均流速である。

3. 河床せん断応力の時間変化特性

フーリエ成分法を用いて決定した平均流速の分布から、内層 ($y/h \leq 0.2$) において、対数則が成立し、Karman 定数 κ が主流の条件によらず 0.41 の普遍定数であることが分かっている²⁾ ので、対数則の成立範囲での直線の勾配から摩擦速度 U_* を評価した。図-1 は、増水期および減水期における河床せん断応力 $\tau_b \equiv \rho U_*^2$ とベースフローからの水深変化 Δh の時間変化を示したものである。図中の T は増水時間 T_d で無次元化された時間で、0~1 が増水期、1~2 が減水期に相当する。この図から、水深がピークとなる時間 ($T = 1$) より以前に τ_b が最大値をとり、その時間遅れは非定常性が大きくなる (α の値が大きくなる) ほど大きくなることが分かる。図-2 は、水深変化 Δh に対する τ_b の変化を時間をパラメータにとって示したものである。ここでは、最も非定常性の大きいケース (R-1) と最も小さいケース (R-4) のみを表示した。 τ_b は、増水期から減水期にわたって反時計まわりのループを描いており、非定常性の大きいケースの方が、このループの描く面積が大きい (増水期から減水期にわたる τ_b の変化が大きい) ことが分かる。

次に、河床せん断応力の時間変化に関して、理論的考察を行う。非定常開水路流れに関する運動量方程式は、N-S 方程式の長時間平均である Reynolds 方程式から次のように導かれる。

図-1 河床せん断応力 τ_b の時間変化

図-2 水深変化に対する τ_b の時間変化図-3 τ_b の実験値と理論値との比較

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = gS_s + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau}{\rho} \right), \quad S_s = \sin \theta - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 U および V は、それぞれ主流方向、鉛直方向の平均流速成分であり、 S_s は水面勾配である。非定常性の強い流れでは、 $|\partial U / \partial t| \gg |\partial U^2 / \partial x|$ 、 $|\partial UV / \partial y|$ であり、全せん断応力および河床せん断応力は式(2)を、任意の y から自由水面 $y = h$ まで積分することにより次式のようになる。

$$\frac{\tau}{\rho} = gS_s(h - y) + \int_h^y \frac{\partial U}{\partial t} dy, \quad \frac{\tau_b}{\rho} = gS_s h - \int_0^h \frac{\partial U}{\partial t} dy \cong gS_s R - \frac{\partial Q}{B \partial t} \quad (3)$$

ここに、 R は径深、 B は水路幅である。径深 R は側壁の影響を考慮する場合に適用される。 S_s の項にある $\partial h / \partial x$ は、 $-1/c \cdot \partial h / \partial t$ で近似し、波速 $c = \sqrt{gh}$ とした。

図-3は、河床せん断応力に関して、式(3)を用いて計算した理論値 τ_b と実測値 $\tau_b \equiv \rho U_*^2$ との比較を示すものである。式(3)を用いて計算した理論値と実測値は、ほぼ一致している。また、非定常項 $-1/B \cdot \partial Q / \partial t$ は、河床せん断応力のほぼ30%を占めるが、それ以外の70%の部分は S_s の項が占めていることが分かる。河床せん断応力は、増水期で増加し、水深のピーク時より以前に最大値を迎え、減水期で減少する。

4. おわりに

本報告では、非定常開水路流における河床せん断応力の時間変化特性を理論的及び実験的に検討し、以下の結論を得た。

河床せん断応力 τ_b の時間変化は、水深の変化に対し位相差を伴い、非定常性が大きくなるほど(非定常パラメータ α が大きくなるほど)、その位相差(遅れ時間)は大きくなる。また、同一水深に対して、増水期の河床せん断応力が、減水期のそれより大きくなり、その結果、反時計まわりのループを描くことが大きな特徴である。Reynolds方程式から計算された河床せん断応力は、実測値と良好に一致し、非定常性による影響が、全河床せん断応力のほぼ1/3を占め、比較的大きいことが分かった。

最後に、本研究を遂行するにあたり、住友財団から助成を得たことを記し、これに感謝する。

参考文献

- 1) 中川・瀬津・石田・門田・藤本(1993); 水工論文集, 第37巻, pp.593-598.
- 2) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993); *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema出版社