

早稲田大学 大学院 学生員 関根 正人
早稲田大学 理工学部 正員 吉川 秀夫
パシフィック・コンサルタンツ 正員 藤堂 正樹

1. はじめに

開水路流れをその河床状態によって大別すれば、固定床流れと移動床流れとに分けられる。両者の根本的な差異は、主として、流砂の存在の有無にあり、同一条件下で両者を比較した場合、移動床の方が、少なくともこの土砂粒子を流送する分だけ、流水のもつエネルギーが小さくなっていると考えられる。そこで、流砂の、流れへの影響をエネルギーの授受という立場から捉えるとともに、主として流砂量に代表される流砂現象をエネルギーの考え方から把握するのが本研究の目的である。

2. 実験概要

全長6m、幅20cm、高さ40cm、河床勾配 7.0×10^{-3} の亚克力製水路に、粒径5mm、比重2.5のガラスビーズを敷き並べ、流量を変えることにより流れを変えて実験を行なった。測定は、限界掃流力前後の各1回を1組として行なった。限界掃流力前の測定は、その流れが固定床流れと同じ扱いが可能であるとの考えから、固定床での相当粗度 k_s を求めるために行なったもので、測定によれば、 k_s は粒径のほぼ1.6倍になることがわかった。これにより、固定床での流れも上記の k_s を用いて説明できると考えられる。さて、限界掃流力後の移動床流れでは、ピトー管及び静圧管により流速分布と動水勾配とを、さらに水深をそれぞれ測定するほか、ロータリーカメラにて粒子の運動をビデオに記録することにより、粒子の移動速度及び存在確率を求めることにした。また、下流端にて流砂量の測定も行なった。測定条件及び結果の一部をTABLE 1に示しておく。ここに、 Q は流量、 q_b は単位幅当りの流砂量、 $\bar{u}$ は平均流速、 $\bar{v}$ は粒子の断面平均移動速度であり、また、表中のRUN 2-1~2については別の水路でのデータであるが、付記しておく。

3. 流砂による水深変化

固定床流れと移動床流れを、流量及び河床勾配が同一であるという条件の下で比較すると、外的には、その差異として水深変化が見られた。すなわち、移動床での水深 h_m と固定床での水深 h_s との間には、

$$h_m - h_s = \Delta h > 0 \quad (1)$$

なる関係が見られた。固定床では、河床せん断力 τ_0 と水の重力の流れ方向成分とが釣り合う。すなわち、

$$\tau_0 = \rho_f g h_s i_0 \quad (2)$$

これに対し、移動床では、さらに流砂に対して抗力が作用することになり、流れ自身は河床せん断力のほかに、この抗力に相当する力と釣り合うだけの重力を持たざるを得ない。すなわち、

$$\tau_0 + \tau_D = \rho_f g h_m i_0 \quad (3)$$

従って、河床単位面積上に存在する粒子に作用する抗力を τ_D とすれば、この τ_D の分だけ水深が上昇すると考えられる。すなわち、

$$h_m - h_s = \Delta h = \frac{\tau_D}{\rho_f g i_0} \quad (4)$$

となり、この τ_D は、

$$\tau_D = \frac{q_b}{\bar{v}} \frac{3\rho_f}{4d} \int \{f(z) dz C_0 (u-v)^2\} \quad (5)$$

で求められる。ここに、 ρ_f, ρ_s は水及び粒子の密度、 $f(z)$ は z の位置での粒子の存在確率密度、 C_0 は抗力係数、 u, v は z の位置での水及び粒子の速度である。以上のような考え方から、式(4),(5)により各RUN毎に算出した Δh と、実験に基づく Δh とを比較すると、両者がほぼ一致することが確認された。これにより、流砂の存在により水深が高くなること、及び、これが主として流れが粒子に及ぼす抗力によること、などが確かめられ

た。なお、この水深の増大をエネルギーの立場から見ると、水深が上昇した場合、流量一定の条件下では流速が減少することになり、その結果として、流れ自身のエネルギーが減少していることになる。

4. 流水から流砂へのエネルギー供給率

流水のもつエネルギーの内的消費として考えられることとして、流砂へのエネルギー供給が考えられる。流水のもつエネルギー E_w 及び、粒子のもつエネルギー E_s を以下のように定義する。すなわち、

$$E_w = \sum \rho_f \Delta x \Delta z \left(\frac{u^2}{2} + g z \right) \\ = \left(\rho_f \Delta x h g \right) \left(\alpha \frac{\bar{u}^2}{2g} + \frac{h}{2} \right) \quad \Delta x = 1 \quad (6)$$

$$E_s = \sum \frac{\rho_s \pi d^3}{6} N f(z) \Delta z \left(\frac{v^2}{2} + g z \right) \\ = \rho_s \frac{q_b}{v} \sum f(z) \Delta z \left(\frac{v^2}{2} + g z \right) \quad (7)$$

であり、ここに、 α はエネルギー補正係数である。これにより、流れ全体のもっているエネルギーのうち、粒子が保持しているエネルギーの割合、言いかねば、流れから流砂へのエネルギー供給率 k_e は

$$k_e = \frac{E_s}{E_w + E_s} \quad (8)$$

で表わされる。そこで、実験結果に基づき、この k_e と無次元せん断力 τ_* との関係を調べると、FIG. 1 のようになり、この曲線は、流砂量曲線と類似の傾向を示しており、流砂量と k_e との間には密接な関係があると考えられる。

5. む す び

流量及び河床勾配を一定にしておいて、固定床と移動床とを比較すると、外的には移動床の方が水深が高くなる。これは、移動床において流水が粒子に対して与える抗力によって説明でき、この抗力の分だけ移動床の方が水深が高くなると考えられる。さらに、エネルギーという観点から見ると、流水自身のもつエネルギーは、移動床の方が小さく、両者の差は、主として流砂が移動するのに保持しているエネルギー及びそれに付随するものであると考えられる。また、流れ全体の持つエネルギーの内訳として、流砂へのエネルギー供給率を考えることにすると、この値は、FIG. 1 よりわかるように、河床せん断力と、さらには流砂量と深い関係にあると考えられる。

今後は、さらに広範囲にわたって実験を重ね、エネルギーの関係から流砂現象の検討をすすめていくつもりである。なお、本研究をすすめるに当たって、松梨史郎氏（早大大学院）に助言・助力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

GROVE KARL GILBERT : THE TRANSPORTATION OF DÉBRIS BY RUNNING WATER

TABLE 1

RUN	Q l/sec	q_b 10^{-2}	h cm	I 10^{-3}	u_* cm/sec	τ_*	$\bar{u}$ cm/sec	$\bar{v}$ cm/sec
1-1	5.5	1.13	5.5	7.33	6.29	0.054	74.7	23.9
1-2	6.3	4.24	6.0	8.00	6.86	0.064	77.1	25.9
1-3	7.0	14.2	6.4	8.00	7.08	0.068	80.4	27.4
1-4	9.4	21.7	7.3	10.0	8.46	0.097	89.4	30.9
1-5	10.5	21.4	8.0	8.67	8.24	0.092	83.2	30.8
2-1	3.0	7.86	6.3	10.7	8.13	0.090	68.0	21.7
2-2	4.0	20.0	7.0	12.6	9.30	0.118	81.6	27.1

q_b : cm³/sec cm

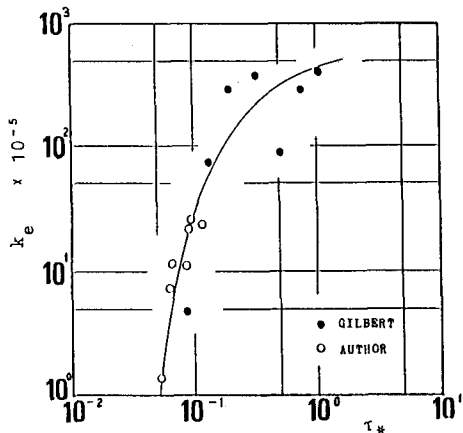


FIG. 1 $\tau_* \sim k_e$