

舞鶴工業高等専門学校 正員 田中祐一朗

1. はしがき：移動床開水路の抵抗の問題は、河川水理学上の基本問題として従来より種々の研究が行われてきたが、未だ十分な解明を見ていない。これは河床に形成される Sand Wave が抵抗に重要な役割を果すことが知られていけり、その流水条件による複雑な変化によって、その形状の予測と抵抗要素としての役割についての考察が十分ではないことに起因するものと思われる。そこで本研究は抵抗の予測という実用的見地から、河床形状の予測とそれを用いた抵抗の算定法について抵抗分離法の立場から若干の考察を加えるものである。

2. 河床波の形状予測：i) 河床波の平均波高と伝播速度、この問題に関して著者は先に、平衡河床波上の流れについての解析からこれらを予測する式を提案した。¹⁾ すなわち、変形せずに伝播する平衡河床波上の流れについて、微小振中の仮定により線型化して基礎式より、水深、摩擦速度等を場所と時間の関数として表示し、この結果を Brown 型の流砂量式と流砂の連続式に代入することにより、河床波の伝播速度を予測する次式を得る。

$$\omega = \frac{2m + 1 - \tau_c/\tau_m}{(1-E)(1-\tau_c/\tau_m)} \cdot \frac{\delta_{bm}}{h_m(1-F_m^2)(1+9/4)} \quad (1)$$

ここに E ：砂の空隙率、 δ_{bm} は平均量を表す。

この(1)式と砂運や砂堆の場合には右部の流砂は零であり、また遷移河床ではレストでも谷でも流砂は零という条件により、若干の仮定を用いて波高についての次式を得る。

$$K = \frac{\Delta}{h_m} = \frac{2(1-\tau_c/\tau_m)}{2m + 1 - \tau_c/\tau_m} \cdot \frac{|1-F_m^2|}{(1+9/4)} \quad (2)$$

$$\text{ここに、} \lambda = 2\pi h_m(1-F_m^2)/\omega \cdot \lambda \quad (3)$$

であり、 λ は河床波の波長、 Δ は波高である。

この(1)、(2)式は実測値との対応も良好であり、さらに河床波が平衡河床から発生して発達、崩壊過程を経て平坦となり、再び反砂堆が形成されるという連の現象を定性的にも極めてうまく説明している。図-1は(2)式と Yalin の予測²⁾との比較を示したもので、 F をパラメータにして著者の線は Yalin の実線より実測値との適合性もよい。この(2)式と同様の結果は最近 Gill によっても得られている。³⁾

ii) 河床波の波長、実測値によって波高と波長の相関を調べると 0.2 ~ 0.4 程度の値であって、両者の間には相関は無いと思われる。そこで波長については上での考察と全く別の方法で取り扱う必要があるため、次元解析の手法を用いることにする。

$\lambda = f(U, \rho, d, \nu, g, \tau)$ …… (4) を考え、これをπ定理によって整理することにより

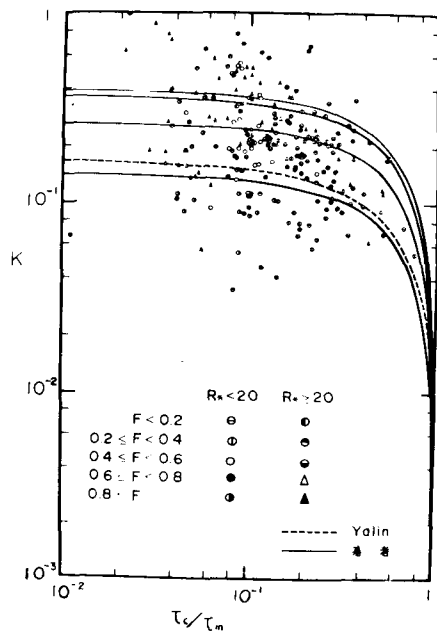


図-1. Yalin と著者の波高予測法の比較

次の無次元式を得る

$$\lambda/d \text{ or } \lambda/r = f(F, R_*, h/d) \quad (5)$$

ここに、 d : 砂の粒径、 R_* : 砂粒に関するレイノルズ数である。図-2は h/λ の、図-3は d/λ の R_* による変化を調べたものであり、この二つの図から R_* が 10 ~ 20 を境にしてその特性が顕著に変化している。この境界は砂連と砂堆の区分を意味しているものと思われる。以下限界値として $R_{*c} = 20$ を用いる。図-4は λ/r と d/r の関係を調べたものであり、この

図から
 $R_* > 20$
以上のものは散乱
している
が $R_* < 20$
以下のものはほぼ
一本の線

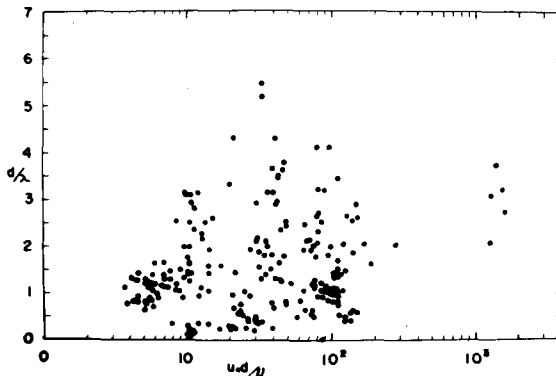


図-3. d/λ の R_* による変化

について、図-3. d/λ の R_* による変化について。このことから砂連の波長に関して次のような経験式を得る。 $\lambda = 750d$ (6) これは先に Yalin の得た $\lambda = 1000d$ とほぼ一致しているが、係数についてはいづれが妥当かは断言できない。図-5は λ/d と h/d との関係を調べたものである。この図から $R_* > 20$ の場合はよいまとまりを示しており、これらの集の平均値として砂堆の場合の波長を求める経験式として、 $\lambda = 5h$ (7)

を得る。これは Yalin の得た結果と一致している。反砂堆は開水路においてのみ現われるもので、水面波が大きな影響を及ぼし、この意味でフルード数 F の効果が重要であることが知られている。

この意味から F と $2\pi h/\lambda$ との関係を調べたものが図-6であり、実は一本の線上にきれいに集まっている。このことから反砂堆の場合の波長を求める経験式として、 $\lambda = 2.3 \pi F^{3/2} h$ (8)

を得る。また砂州や交互砂礫堆の場合には水路の三次元的変動について考える必要があり、このような場合について着者は水面の横振動を考慮してより次式を得ている。⁴⁾

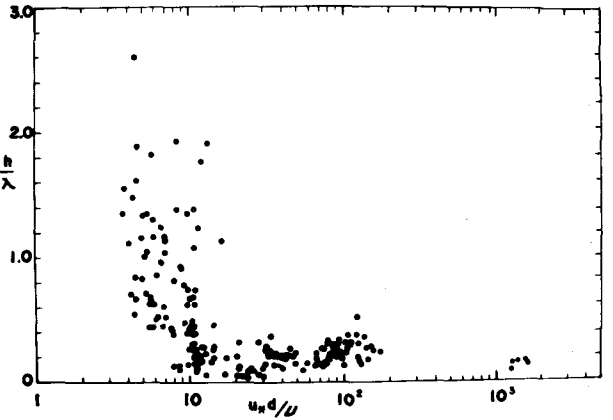


図-2. h/λ の R_* による変化

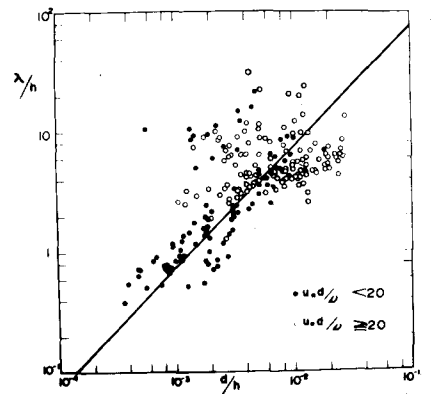


図-4. λ/r と d/r との関係

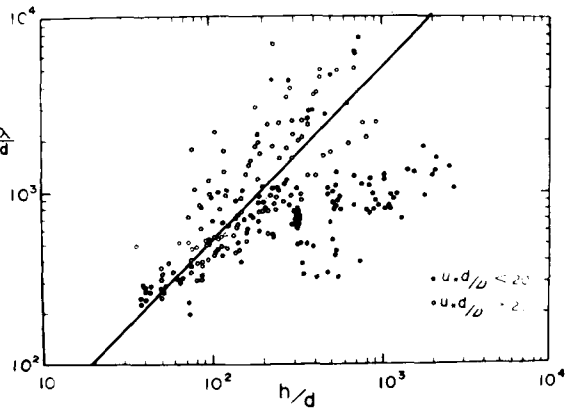


図-5. λ/d と h/d との関係

(9)

3. 抵抗係数の算定: i) 平河河床の場合、河床波が存在せず平河の場合、平板粗面上の流れとして扱われ、耐敷別が成立することは実験的にもよく知られている。しかし、

(10)

図-6. F と $2\pi R/\lambda$ との関係

The diagram shows two vertical forces, \$W_1\$ and \$W_2\$, acting at horizontal distances \$\lambda_1\$ and \$\lambda_2\$ from a datum (D.L.). The resultant force \$R\$ acts at a distance \$\bar{x}\$ from the datum. The principle of moments is applied about the datum:

$$W_1 \lambda_1 + W_2 \lambda_2 = R \bar{x}$$

where \$R = W_1 + W_2\$.

圖-7. 記号説明図

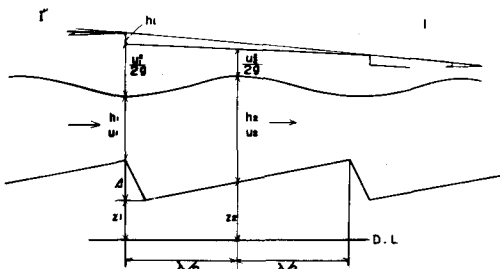
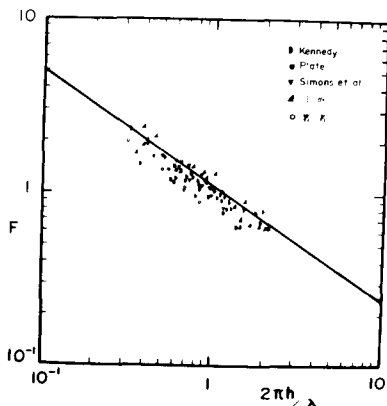
圖-7. 記号説明図

(13)

を得る。また断断面間にエネルギーの保存を考えるとにより、糸状滴の水頭名は次のようになる。

(19)

b). 摩擦抵抗. 摩擦抵抗は河床波の波高が減少し、平坦にはなった場合先の平滑河床へスムーズに移行することをも考慮して、(10)式と同様の対数則を用いることにする。F.D.V. 摩擦抵抗を考える領域とし



では一波長中クレストから後流域の部分を除いたものについて考えることにし、後流域の長さを

$$l_0 = \varepsilon d \quad (24)$$

とおくことにすると、摩擦抵抗は次のようになる。

$$I'' = k_f / \lambda$$

$$= \frac{F_m (1 - \varepsilon d / \lambda)}{\{6.0 + 5.75 \log(R/k_f)\}} \quad (25)$$

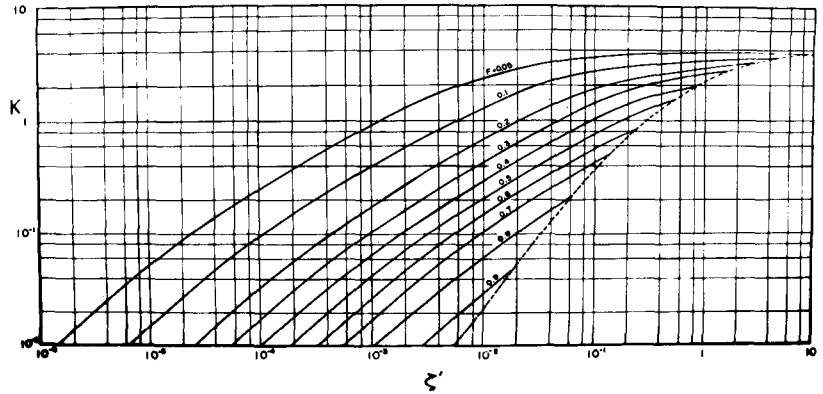


図-8. z' の計算図表

ここで k_f は先の (11) 式を用い、 ε は $0.1 \sim 1.0$ の値を用いる。 k_f の計算の簡易化のためにこれを計算図表として示したものが図-9である。以上の I' と I'' から全抵抗は次のように求められる。 $I = I' + I''$ (26)

iii). 反砂堆の場合。この場合は河床波は存在するが、剥離域を有しないことが大きな特長である。したがって、抵抗の算定という実用的見地からは対数則の適用が十分と思われる。しかしこの場合は流砂量が多くするため、流砂濃度によるカルマン定数 K の変化を考慮する必要がある。これについては日野の簡易式を用いることにすると、

$$F_m / \sqrt{I} = y_m = 8.5 - \frac{1}{K} + \frac{2.3}{K} \log(R/k_f) \quad (27)$$

$$K/K_0 = 2 / \{1 + \sqrt{1 + 5.2 K_0 S}\} \quad (28)$$

$$S = (\sigma/\rho - 1) W C / U I \quad (29)$$

で抵抗は算定できる。ここに $K_0 = 0.4$ 、 W : 砂の沈降速度である。(27) 式の計算のための K をバウヤーとして計算図表として示したものが図-10である。

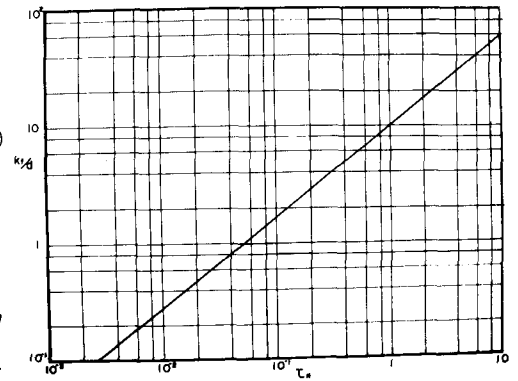


図-9. k_f の計算図表

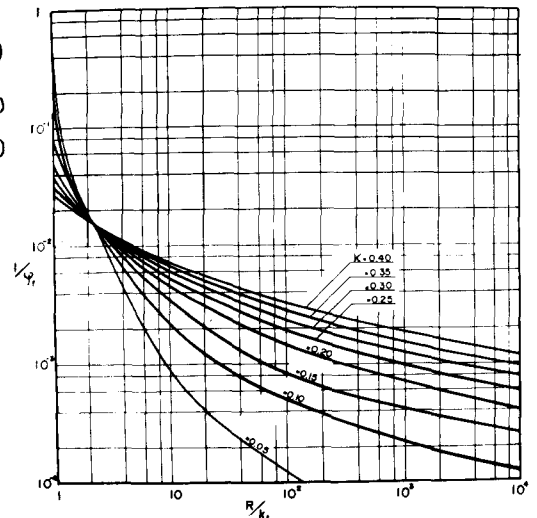


図-10 y_f の計算図表

4. おわりに：以上によって移動床開水路での抵抗は水深 h 、この配工、粒径 d 、水路巾 B だけから若干の試算によって容易に算定することが可能となった。算定の具体例およびその精度等については講演時に述べる。以上本研究は著者のこれまでの研究を取りまとめるとともにその一部に若干の修正を行ったもので、長い間に亘って終極的指導員に京大防災研の芦田教授に感謝する次第です。

- 1) 田中, 正・A・H・R. 1969. 2) Yalin, A. S. C. E. HY5, 1964. 3) Gill, A. S. C. E. HY12, 1971.
4) 石原ら応用水理中工. 5) 日野, 土木学会論文集, 92, 1960.