

北大工 正 員 ○ 岸 力
北大工 正 員 黒木 幹男
北大工 学生員 今泉 正次

1 研究の方法

移動床流れにおける河床形態には小規模河床形態と中規模河床形態とがある。この報告は小規模河床形態を対象とし、長方形断面を持つ流路で行なわれた実験資料を解析したものである。

移動床流れの抵抗則は河床形態によって異なる特性を示すであろう。例えば、砂甞の波長は、土木学会小委員会報告(1972)によれば、ほぼ水深によって規定され $L \approx 5d$ (L : 波長, d : 水深) であるに対し、反砂甞の波長は、Kennedy(1969)によれば $L \approx 2\pi F_r^2 d$ (F_r : フルード数) で F_r 数によって変化する。また平坦河床あるいは反砂甞河床の抵抗を考える場合には、単に幾何学的な形状ばかりでなく、流砂濃度による抵抗減少効果を無視することはできない。[若川・福田(1971)]
他方、水深-流速関係の予測という立場で考えると、Vanoni-Brooks(1957)によって指摘された流運(あるいは抵抗)の多価性を考察するには少なくとも河床形態との関連をしらべる必要があろう。著者らは、河床形態毎に実験資料を分類し抵抗則をしらべることにした。

2 移動床流れにおける抵抗の表示

河床波を伴う流れにおいても流速分布の対数則が成立すると仮定し、木理的に粗な流れに対して式(1)を適用する。

$$\varphi_0 = \frac{v}{u_*} = 8.5 - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} \log_e \left(\frac{R}{k_s} \right) \quad (1)$$

ここに、 φ_0 : 流速係数、 v : 平均流速、 u_* : まさう速度、 R : 径深、 k_s : 等価砂粗度、 K : カルマン定数。

ここで Englund(1967)に倣ひ、 $K=0.4$ と仮定し、さらに粗さセン断力(有効セン断力) τ_*' を導入して式(1)を書き直すと式(2)が得られる。

$$\varphi_0 = 7.66 \left(\frac{R}{2d} \right)^{1/6} \cdot \left(\frac{\tau_*'}{\tau_*} \right)^{2/3} \quad (2)$$

ただし、 d : 河床砂の平均粒径、 τ_* : 無次元化された河床セン断力で式(3)で定義される、 τ_*' : 粗さセン断力(有効セン断力)で式(4)および(5)で定義される。

$$\tau_* = \frac{R}{d} \cdot \frac{I}{s} \quad (3)$$

ただし、 I : エネルギー勾配、 s : 河床砂の水中比重。

$$\tau_*' = R I' / ds = R' I' / ds \quad (4)$$

$$v = \sqrt{g R' I} [6.0 + 5.75 \log_{10} (R' / 2d)] \\ = 7.66 (R' / 2d)^{1/6} \quad (5)$$

式(2)において右辺第2項 $(\tau_*' / \tau_*)^{2/3}$ が河床波による抵抗の増加をあらわしている。

3 種々の河床形態における河床セン断力 τ_* と粗さセン断力 τ_*' の関係

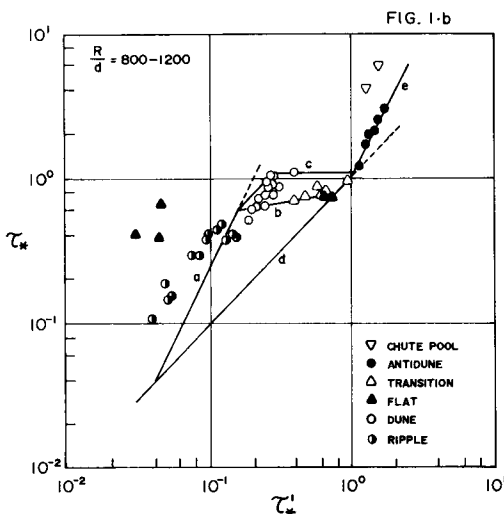
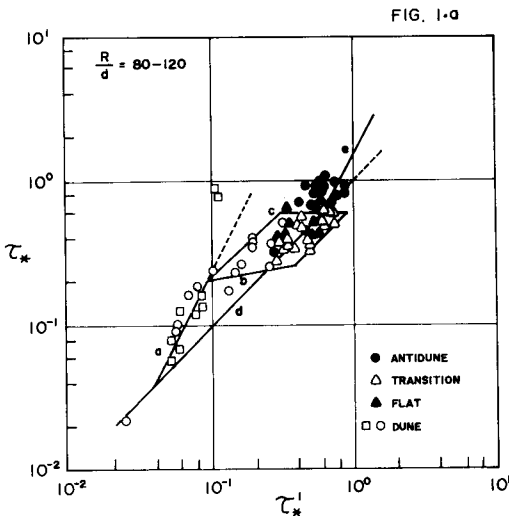
Englund は、河床形態が同一ならば、 τ_*' は τ_* のみの関数となり、式(4)が成立すると主張し、その根拠として抵抗の相似仮説を提唱した。

$$\tau_*' = f(\tau_*) \quad (6)$$

この研究の目的の一つは、式(6)の成立を検討することであつた。 τ_*' と τ_* の関係が R/d に独立に定まるかどうかをしらべ図-1に示した。図-1(a)および(b)はそれぞれ $R/d \approx 100$

およそ 1000 の実験資料を比較した結果である。図において式(6)の関係はほぼ a~c の 5 曲線に分類されること成为る。曲線 b および c は砂堆河床(曲線 a) から他の河床形への移行をあらわしている。曲線 b は砂堆河床から遷移、平坦河床を経て反砂堆河床へ移行する場合をあらわすに對し、c は砂堆河床から直接反砂堆河床に移行する場合をあらわしている。曲線 d は遷移河床、および平坦河床をあらわし、曲線 e は反砂堆河床を示している。

図に明らかなように、式(6)は一般的には成立せ



ず式(7)を用いるべきこと成为る。

$$\tau_*' = f(\tau_*) \cdot F(R/d) \quad (7)$$

ただし、 f 、 F はそれぞれ τ_* および R/d のみの関数をあらわしている。

4 抵抗則とその適用範囲

図-1 で曲線 a および c の適用範囲は、河床形態の領域区分における砂堆領域および反砂堆領域である。Grande-Raju の方法にしたがって領域区分を行ない図-2 に示した。図中の曲線 ① ② ③ はそれぞれ図-1 における曲線 a, c および c の適用限界をあらわしている。

1) 砂堆河床

図-1 において曲線 a は式(8)の関係をあらわしている。

$$\tau_*' = 0.21 \tau_*^{1/2} \quad (8)$$

式(8)を式(2)に代入すると砂堆河床の抵抗則として式(9)が導かれる。

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{8}{f}} = 2.7 \left(\frac{R}{2d} \right)^{1/6} \tau_*^{-1/3} \quad (9)$$

ただし、 f : Darcy-Weisbach の摩擦係数。また図-2 によれば、式(8)が成立する τ_* の上限は式(10)で与えられる。

$$I/s = 0.02 (R/d)^{-1/2} \quad (10-1)$$

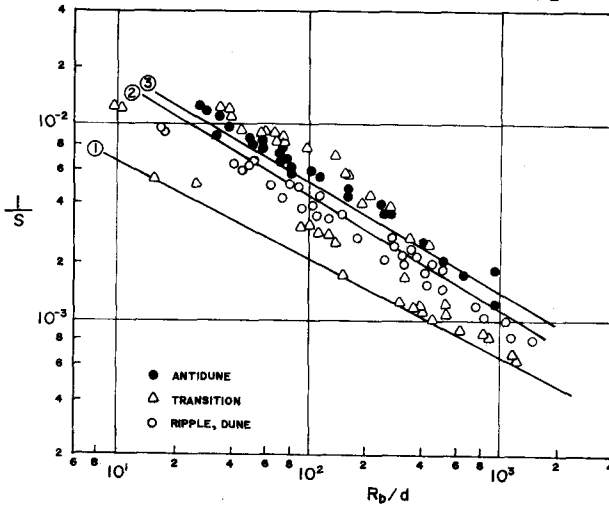
$$\tau_* = 0.02 (R/d)^{1/2} \quad (10-2)$$

式(9)に式(10)を代入すると、式(11)が得られる。砂堆河床の区分線上では流速係数 φ_0 が水理条件、粒径に無関係に一定値をとる。

$$\varphi_0 = \text{const.} = 8.9 \quad (11)$$

この性質は、小委員会報告(1971)および猪・渡辺・定村(1971)の報告に示された結果と一致している。式(8)において $\tau_*' = \tau_*$ とおけば、平坦河床上における砂の移動限界が得られるが、計算結果は $\tau_{*c} = 0.044$ となる。これら 2 つ

FIG. 2



3) 砂堆河床からの移行

図-1における曲線bは、流速係数 φ_0 の不連続的な急増をあらわし、河床は砂堆-遷移-平坦河床と変化している。これに対し、曲線cは曲線aから移行して $\tau_*' \propto \tau_*$ の関係を示し、その後不連続的に反砂堆河床に移る。したがって、流速係数 φ_0 は、反砂堆が発生するまでは、式(11)に与えられた一定値 ($\varphi_0 = 8.9$) をとる。

5 実験値との比較

前節において、 τ_* と τ_*' の関係を通し抵抗実験式を求めたが、あら

め、これらの式と実験値とを比較する。

図-3(a)および図-3(b)はそれぞれ図-1(a)および(b)に示した実験値を流速係数に書き直したものである。図によると、遷移、平坦河床における φ_0 の上限値を除いては、前述の実験式が、移動床流れの抵抗則をよくあらわしている事がわかる。

図-1(a)において $R/d \cong 100$ の実験値では平坦河床のとき $\tau_*' > \tau_*$ となる例が多数みられる。式(2)によれば、 $\tau_*' \leq \tau_*$ でなければならぬから、実験結果は流砂による抵抗減少効果を示すものであろう。 φ_0 の上限値は、式(2)に $\tau_*' = \tau_*$ の場合であるが、さらにこれを変化すれば φ_0 は式(16)に近似できる。

$$\varphi_0 \cong 7.66 (K_0/K_c)^{1/2} (R/2d)^{1/6} \quad (16)$$

ただし、 K_0 : 清水流におけるカルマン定数 (=0.4)、 K_c : 土砂流におけるカルマン定数。式(16)を τ_* と τ_*' の関係に直すと式(17)になる。

$$\tau_*' = (K_0/K_c)^{3/4} \tau_* \quad (17)$$

の性質は、式(8)の妥当性を裏付けるものである。

2) 反砂堆河床

反砂堆河床では図-1から $\tau_*' \propto \tau_*^{1/2}$ の性質がみられる。また図-2において、反砂堆河床の発生限界をあらわす曲線②は式(12)に与えられている。

$$1/S = 0.07 (R/d)^{-3/5} \quad (12-1)$$

$$\tau_* = 0.07 (R/d)^{2/5} \quad (12-2)$$

したがって、図-1において反砂堆河床に対する曲線cは式(13)になる。

$$\tau_*' = (0.07)^{1/2} (R/d)^{1/5} \tau_*^{1/2} \quad (13)$$

また式(2)に式(13)を代入すれば、反砂堆河床に対する抵抗則として式(14)が得られる。

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \frac{7.66}{2^{1/6}} \cdot (0.07)^{1/5} \cdot (R/d)^{3/10} \tau_*^{-1/5} \\ &= 2.8 (R/d)^{3/10} \tau_*^{-1/5} \end{aligned} \quad (14)$$

なお、実験資料によって式(12)と Fr 数の関係をしらべると、式(12)は式(15)と対応していることがわかった。

$$\tau_* > 1, \quad Fr = 1 \quad (15-1)$$

$$\tau_* < 1, \quad \tau_* Fr^2 = 1 \quad (15-2)$$

図-3(a)の○印を附した測点について、志村(1957)の式によって k を求めると(流砂量は測定されている) $k=0.25$ であった。式(16)で求めた φ_0 の上限値は図で見られる通り、実験値とよく合っている。図中の破線は式(16)で、 $k=k_0$ と置いた φ_0 の値を示す。

同様に図-3(b)の○印を附した測点について k を計算した。この例では $k=0.24$ であった。しかる φ_0 の上限値は図にみられる通り、式(16)で $k=k_0$ と置いた値に近い結果となった。

この傾向は、既に図-1(a)および(b)にみられ

たものであるが、これが単に実験誤差によるものか、あるいは何等かの物理的意味を持つかは明らかでない。今後さらに検討を要すると思われる。

参考文献

- 1) Englund, F. (1967): closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 93, No. HY4, July.
- 2) Kennedy, J.F. (1969): The Formation of Sediment Ripples, Dunes, and Antidunes, Annual Review of Fluid Mechanics, W.R.Sears, ed., vol. 1.
- 3) 吉川秀夫・福岡捷二(1971): Characteristics of Open Channel Flow with Sediment 東京工大, 土木工学科研究報告, No.10, 6月.
- 4) 志村傳康(1957): 河床砂を有する水流の諸特性について, 土木学会論文集, 才46号
- 5) 土木学会小委員会報告(1972): 移動床流れにおける粗度と河床形状(Ⅱ), 水理委員会小委員会, 河床形状部会, 水理講演会, 2月
- 6) 椿・渡辺・定村(1971): 砂石築堆の形成について, 土木学会年次講演会講演集
- 7) Vanoni, V.A. and Brooks, N.H. (1957): Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams, Rep. No. E-68, Sedimentation Laboratory, C.I.T., December.

