

北海道大学工学部 正 員 工博 ○岸 力
 首都高速道路公団 正 員 工修 鈴木 刻之
 北海道大学大学院 学生員 黒木 幹男

1. 概 要

岸は福岡とともに1966年に河床粒子の Saltation の機構に関する理論を発表した。その後、岸・鈴木によってこの理論に修正が加えられてきた。本研究もこれまでに発表した理論をさらに修正発展させたもので、主たる修正点は揚力分布の仮定を改めたことである。さらに粒子の最大垂直速度の発生高さの解析によって揚力の存在を確認した。

2. 揚力分布の仮定の修正

前論文では砂粒子に働く揚力を Yalin に従った次の様に仮定した。

$$\frac{L_0}{G} = \frac{\psi}{\psi_c} e^{-\alpha(y/D)} \quad (1)$$

(1)の仮定では粒子の限界移動時には、河床の揚力は $L = G$ となる。さらに前論文で求めた係数値によれば、椿[1966]によって指摘されたように限界掃流力は $\tau_c \doteq 0.3(\beta_s - \beta)gD$ となり、実測値にくらべて過大である。以上の2点から前論文で用いた揚力分布の仮定を改めることを考へた。

Chapril[1958]によれば、砂の移動限界時には

$$L_0 = CR_{x0} = 0.85 R_{x0} \quad ; \quad L_0, R_{x0} \text{ などは砂表での値}$$

とされているが、この関係が粒子の移動時にも成立するものと考へ(1)の代りに(2)を用いる事にした。

$$L = L_0 e^{-\alpha(y/D)} = CR_{x0} e^{-\alpha(y/D)} \quad (2)$$

3. 砂粒子の Saltation の理論

水平方向の運動方程式は

$$(M + \frac{1}{2}m)(dC_x/dt) = R_x \quad (3)$$

また垂直方向の運動方程式は、上昇域と下降域とに分けると夫々

$$(M + \frac{1}{2}m)(dC_y/dt) = L - R_y - G \quad (4)$$

$$(M + \frac{1}{2}m)(dC_y/dt) = R_y - G \quad (5)$$

(4)を無次元化して解くと

$$\zeta_{yb}^2 = \left\{ \frac{1-Z}{K_y F_b^2 Z} - \frac{4ZCK_{x0}}{4K_y Z - \alpha(2+Z)} \right\} e^{-\frac{4ZK_y}{2+Z}\eta} + \frac{4ZCK_{x0}}{4K_y Z - \alpha(2+Z)} e^{-\alpha\eta} - \frac{1-Z}{K_y F_b^2 Z} \quad (6)$$

また(4)を変形して解けば

$$\frac{d\zeta_{yb}}{d\eta} = \frac{1}{\left(\frac{Z}{2+Z}\right)\left(\frac{CK_{x0}}{K_y} e^{-\alpha\eta} - \zeta_{yb}^2 + \frac{Z-1}{K_y F_b^2 Z}\right)} \quad (7)$$

(6)および(7)から粒子の上昇域の運動時間 θ_{AB} が求められる。

また(5)を無次元化して解くと

$$\zeta_{yb} = \frac{1-Z}{K_g F_b^2 Z} \left\{ 1 - e^{-\frac{4Z K_g}{2+Z} (\eta - \eta_{\max})} \right\} \quad (8)$$

および

$$\theta_{yb} = \frac{2+Z}{4} \sqrt{\frac{K_g \eta_{\max}}{1-Z}} \log_e \left\{ \frac{\sqrt{(1-Z)/K_g F_b^2 Z} + \zeta_{yb}}{\sqrt{(1-Z)/K_g F_b^2 Z} - \zeta_{yb}} \right\} \quad (9)$$

(8)および(9)から粒子の下降域の運動時間 θ_{BC} が求められる。

次に水平方向の運動方程式(3)を変形して解くと

$$\zeta_{xb} = \bar{\beta}_b - \frac{\bar{\beta}_b (1 + \frac{1}{2} Z)}{\bar{\beta}_b \theta_{xb} + (1 + \frac{1}{2} Z)} \quad (10)$$

しかし(10)が成立するのは粒子が上昇域にある間であり、下降域では流体と粒子の相対速度が無視できる程に小さくなると仮定するから、(10)の右2項は無視される。

これらの関係から粒子の平均移動速度は次式で表わされる。

$$(\zeta_{xb})_m = \frac{1}{\theta_{ABC}} \left\{ \int_0^{\theta_{AB}} \zeta_{xb} d\theta_{xb} + \int_{\theta_{AB}}^{\theta_{BC}} \zeta_{xb} d\theta_{xb} \right\} \quad (11)$$

なお数値計算においては K_{x0}, K_g は Schlichting の球の抵抗係数から、それぞれ $1/3$ および $3/4$ とした。また本論文の記号は前論文とほぼ同様であるが、代表速度として U^* の代りに河床流速 $U_b = 8.5 U^*$ を用いた。式中 $F_b = U_b / \sqrt{gD}$ である。

上述の諸式から求めた粒子運動の理論軌道と実測軌道との比較の一例を図-1. に示す。

また諸係数を算定し実測の $\eta_{\max}$ の値を(6)に適用して、 $\eta = \eta_{\max}$ のおいて $\zeta_{yb} = 0$ となるような場力減衰係数 α の値を求めた。

これによると α の値は前論文で述べたように一定値ではなく、 Y/Y_{cr} によって直線的に変化することが判った。

α の変化の様子は図-2 に示す。

図-2

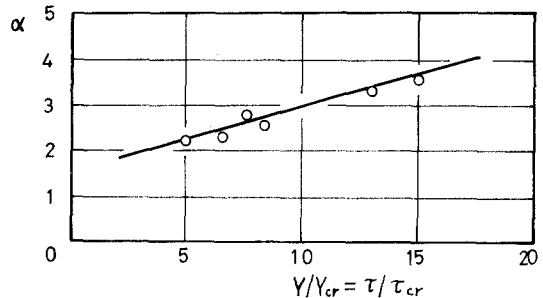
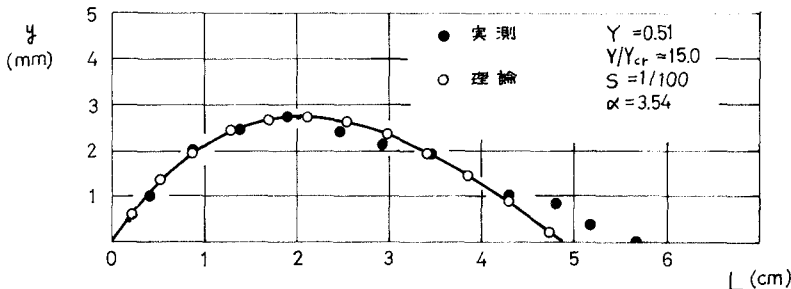


図-1



4. 粒子運動の変動性

前述の理論によって砂粒子の平均的な運動を説明することができた。しかし砂粒子の運動はこの実験においては、1回の跳躍が $1/10$ sec 程度であり、個々の粒子運動には流水の乱れによる影響が表われる。

1) 粒子の移動速度

実験の結果では、粒子の移動速度には上限が存在し、 $Y/Y_{cr} > 8$ の範囲では剪断力 Y による粒子速度 $(\bar{u}_{xb})_m$ の変化は極く緩かくなっている。 $Y/Y_{cr} < 8$ の範囲では $d(\bar{u}_{xb})_m/d(Y/Y_{cr}) \propto (Y/Y_{cr})^{-1.5}$ である。従って、 Y/Y_{cr} が大きい場合には $(\bar{u}_{xb})_m$ は一定値に近く、観測値の分散は小さいと考へられる。これに対して、 Y/Y_{cr} が小さい場合には $(\bar{u}_{xb})_m$ は Y の変化によって敏感に変化し、観測値の分散も大きくなると考へられる。

平均速度 $\bar{C}_x$ と標準偏差 σ との比 $\sigma/\bar{C}_x$ と Y/Y_{cr} との関係は図-3の様になる。この図からも判る様に $Y/Y_{cr} > 8$ の範囲では $\sigma/\bar{C}_x \div 0.16$ と一定値となっている。

また粒子速度の分布型をしらべたところ $5 < Y/Y_{cr} < 15$ の範囲ではどの実験結果も正規分布に従うことがわかった。

2) 粒子の跳躍高

実験結果から、粒子の跳躍高をしらべその分布を図-4に示した。

この図からも判るように、粒子の跳躍高は対称に分布しておらず、 Γ -分布に近い非対称分布になっているのが特徴的である。

跳躍高の分布が非対称となる理由の1つは、粒子の最大垂直速度の発生する高さの分布型が非対称であることであると考へられる。

また粒子の最大垂直速度の分布はほぼ対称的な分布と見做されるが、測定値の分散は、平均速度の分散より可成り大きくなっており、

$\sigma/\bar{C}_{y_{max}} \div 0.3 \sim 0.5$ にも達する例も存在する。

5. 揚力の存在

著者らは、この研究の当初から流水中を運動する砂粒子には揚力が作用するとの仮定を用いてきた。剪断流の場合では、壁面近傍に置かれた円柱に揚力が作用することは、木谷有江[1968]によって理論的にも実験的にも、証明されている。

図-3

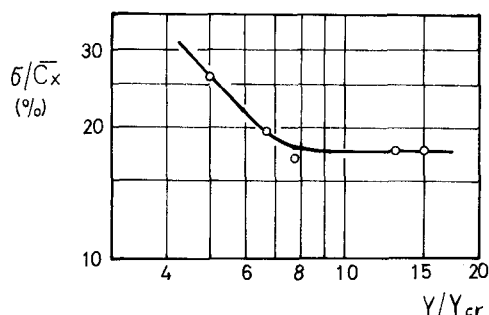
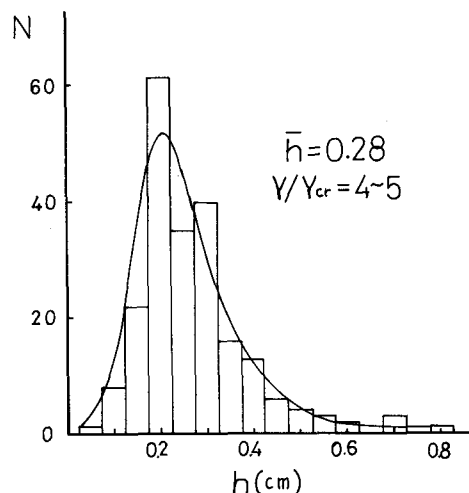


図-4



しかし、砂粒子の Saltation を粒子相互の衝突によって発生するとして、揚力の存在を仮定しない他の理論も提案されている。果して運動中の粒子に揚力が作用するかどうかは、単に粒子の軌道をしらべるだけでは判定できない。著者の理論によっても、また衝突の理論によっても粒子の軌道形状を説明することが可能であり、軌道形状は単に、理論中に含まれるパラメーターの数値の違いに過ぎない。この点をさらに追究し、Saltation の真の機構を探ることは、現象の本質に関する重要な問題である。

もし揚力場が存在して粒子が静止の状態から運動を始めるとすれば、最大垂直速度の発生位置は河床ではなく、河床から或程度の高さの点に存在するはずである。これに対して粒子が衝突によって運動を始めるとすれば、最大垂直速度の発生位置は、河床面になければならない。

この最大垂直速度の発生位置をしらべるために、実測写真から時間毎における粒子の位置を読みとって、各位置における粒子の垂直速度を解析し、その変化の様子を求めた。この解析の結果に依れば、最大垂直速度の発生位置は河床面にはない事が明らかになった。さらに、最大垂直速度の発生位置は揚力係数によって変化することが判った。この揚力係数は前述の様に Y/Y_{cr} の増加関数であり、結局、 Y/Y_{cr} の値が大きくなる程、最大垂直速度の発生位置は河床面に近づく傾向がある。

しかし、 $Y/Y_{cr}=1.3$ の場合におい

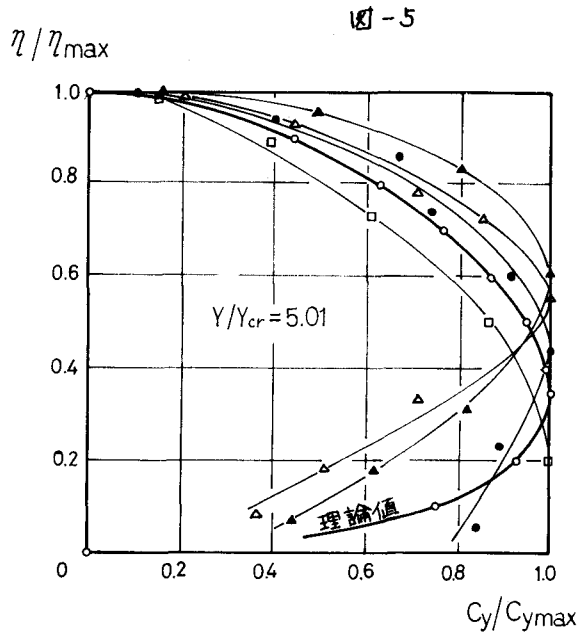
ても $(\eta/\eta_{max})_{C_y=C_{ymax}}=0.33$

であり零ではなかった。

更に解析結果の中で $\eta/\eta_{max} < 0.15$ の例を、仮に河床面での最大垂直速度があらわれる衝突型の運動と考へても、この型に含まれるものは全体のうちの約 10% にすぎなかった。

従って、本研究の結果では、揚力の存在は確実であり、衝突によって Saltation に移行する粒子の数は極く少ないことが結論できると考へる。

粒子の垂直速度の変に一例を、実測値と理論値とを比較して図-5 に示す。



参考文献

岸 力・福岡捷二； 河床粒子の Saltation の機構と流砂量

土木学会第 10 回水理講演会講演集，1966

岸 力・鈴木剣之； 流れによる河床砂の Saltation の機構

土木学会第 22 回年次学術講演会講演概要集，1967