

粗面上の球状粒子に働く抗力の測定 ——露出度と後流の効果——

京都大学工学部 正員 中川 博次
京都大学工学部 正員 辻本 哲郎
京都大学大学院 学生員 ○村上 正吾

1. まえがき 最近粒子の運動理論を精密化した掃流砂モデルも研究されつつあるが、その基本となる河床粒子に働く流体力の評価の問題についてはまだ充分な情報が得られていない現状である。著者はすでに片持梁と歪ゲージを用いた抗力測定装置を試作し、最密六角形ハータンの粗面上に置かれた粒子に働く抗力を実測、球の中心位置での流れの局所流速を代表流速とした抗力係数 C_D の値は完全粗面乱流時では球の静水沈降速度に対するそれに近い値であることを確認している。¹⁾ 本報では同装置を用いて、さらに抗力に対する露出度及び周囲の粒子による後流の効果などについて基礎的な実験を行った結果について述べる。なお、実験装置の概略は図-1に示す。

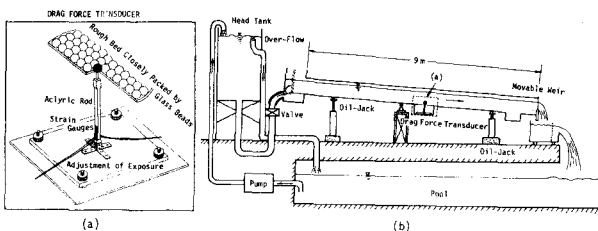


図-1 実験装置概略

2. 露出度による抗力の違い 河床面に存在する砂礫といえどもそれぞれ流れに対する露出度合は異なり、そのため当然個々の砂礫に働く抗力も異なる。その検討の一助として、図-2に示すような理想的状態で露出度 H_e を各種変えて抗力 D を測定した。その結果、図-3に示すように無次元抗力強さ $D/\rho u_*^2 d^2$ と相対露出度 $H_{e*} \equiv H_e/d$ との関係を得た。図-3に破線で示される実験式は、

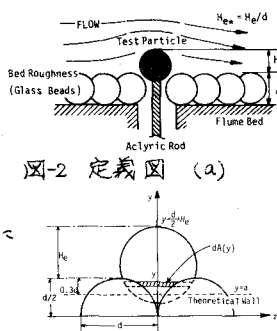


図-2 定義図 (a)

図-4 定義図 (b)

図-3 無次元抗力強さと相対露出度との関係

$$D/\rho u_*^2 = 13.5 (H_e/d) \quad (1)$$

で、完全露出時 ($H_{e*}=1.0$) の抗力係数 C_D は約0.6である。いま C_D が H_{e*} によって変化せず、図-4に示すような流れに抵抗する面積の変化で抗力に変化すると考え、次式で抗力と露出度との関係を試算した。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho \int_a^{H_e + \frac{1}{2}} \{u(y)\}^2 dA(y) \quad (2)$$

ここで $u(y)$ については完全粗面乱流に対する数則(組し u_{τ}^+)を用い、 $y=a$ を対数則の基準面とした。この結果は図-3に実線で示され実験値ともよく適合している。なお図-5には抗力変

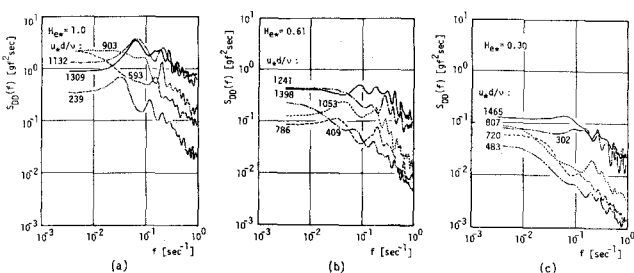


図-5 露出度の違いによる抗力変動の周波数スペクトルの変化

動の周波数スペクトルの露出度による相違が示されている。

3. 直上流側に存在する粒子の後流の効果 次に流れ方向に2つの粒子を距離 s だけ離して置き(ともに $He^* = 1.0$)、下流側粒子に作用する抗力 D と s の関係を調べた。流れの条件は砂粒 Reynolds 数($Re^* \equiv U_* d/\nu$)で500~1000程度で6ケース実施し、その結果は図-6に示される。これによると粒径の5~6倍以内の距離だけ上流に粒子が存在するときその影響が有意であることがわかり、これは上流側粒子の後流の効果と予想される。図中の実線は、

$$D/\rho u_*^2 d^2 = [(s/d)^{4.5} / \{10^{-7} + 6.7 \times 10^{-11} (s/d)^{4.5}\}]^{1/9} \quad (3)$$

で与えられる実験式を示す。上記の効果を上流側粒子の後流の流速分布で説明し得るかどうかを検討するため、粗面上の孤立粒子($He^* = 1.0$)まわりの流速分布の測定を行った。とくに流れ方向に沿っての粒子中心高さでの局所流速 u_0 の変化についての結果は図-7に示す通りで、抗力と同様 $(s/d) > 5 \sim 6$ 程度で上流側粒子の影響は消滅している。但しこの図から容易にわかるように $D \sim u_0$ と考えると C_D の値は必ずしも一定にならず、図-7と式(3)を用いて逆算した C_D の値は図-8に示されるように上流側粒子に接近するにつれて大きくなっている。

これは上流側粒子のすぐ下流では流況が複雑で単に u_0 の大きさだけで表現し得ないこと、上流側粒子による遮蔽で着目粒子の流れに対して露出する面積が減少すること等によると考えられ、図-6あるいは式(3)に示されたような結果の説明には粒子後方の流況と、着目粒子の流れに当る面積減を表わす適切なモデルが必要であろう。

4. 粗面上の粒子数密度の効果 次に粗面上にいくつかの数密度 n_p (個/cm²)で露出した粒子が存在する条件で抗力を測定し、図-9に示すような無次元抗力 $D/\rho u_*^2 d^2$ と無次元露出粒子数密度 $N^* \equiv n_p \cdot A_p \cdot d^2$ ($A_p = \pi d^2/4$)の関係を求めた。これらの測定値は砂粒 Reynolds 数が500~1200程度の実験で得られたもので、 N^* が大きくなると N^* に反比例して $D/\rho u_*^2 d^2$ の減少することが認められる。図に実線で示される実験曲線は、 $D/\rho u_*^2 d^2 = (0.0004 + 15.6 N^{*3})^{-3} \quad (4)$

5. あとがき 本研究では主として河床砂礫に作用する流体力を正當に評価するための基礎的知見を得る目的で、露出度と上流側粒子の後流の効果に着目して球状粒子に作用する抗力の特性を調べた。その結果としていくつかの新たな知見が得られたが、実際の砂礫床では砂粒子の露出度や突起砂粒の分布は複雑となっており、まずこれを適切にモデル化するとともに各効果の重ね合せについての検討が必要である。また変動特性の把握とモデル化、さらに抗力と揚力の同時計測技術の開発も今後の研究課題としたい。

<参考文献> 1) 中川・辻本・細川: 床面に沿って運動する粒子の運動と流体力について, 第23回水理講演会論文集, 1979.

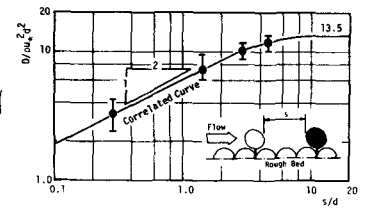


図-6 直上流側粒子の影響

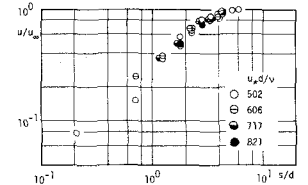


図-7 粒子後方の局所流速の変化

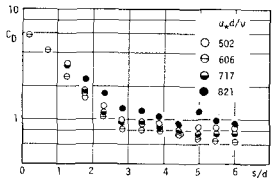


図-8 $C_D = D / (\frac{1}{2} \rho u_0^2 \frac{\pi}{4} d^2) \sim s/d$

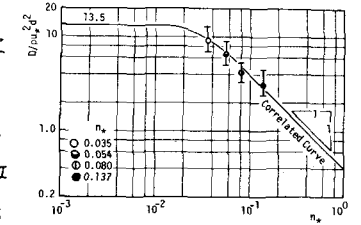


図-9 粒子数密度の抗力に対する影響