

1. はじめに

土石流は、土砂や岩塊を高濃度に含有しながら水と一体となって渓谷を高速で流下するため、砂防ダムなどの施設をしばしば破壊する。そのため、土石流の流体力、特に衝撃力の評価は防災対策上重要となっている。土石流の衝撃力は、巨視的な流体力によるものと巨礫などの単一粒子の衝突力に起因したものとに区分されている¹⁾。しかしながら、巨礫とそのマトリクスを構成する土砂粒子とが同程度の大きさである場合には、このような区別は困難となるため、前者の流体力から衝撃力を算定する必要が出て来る。巨視的な流体力については、まず水山ら²⁾は家屋単位幅当たりに働く土石流の流体力を、実質上、抗力係数 $C_D=2$ において評価している。この値は清水流が正四角柱に作用する場合の抗力係数とほぼ同じ値であるが、土石流の場合にそのような値をとる根拠は明らかではない。次に、橋本ら³⁾は、土石流あるいは乾燥粒子流を円柱や球などの物体に定常的に衝突させる実験を行い、抗力を測定した。その結果、抗力は粒子の衝突などに起因して激しく変動し、その平均と変動成分とに分けて考察する必要があることを明らかにした。本研究は、抗力の変動成分を衝撃力に起因したものと考え、従来の成果³⁾のレビューを基に、土石流の衝撃力の評価法について考察を行ったものである。

2. 高速・高濃度流の流況を規定するパラメータ

流体力に関する議論の準備として、高速・高濃度流の運動を規定するパラメータについて考察してみる。運動方程式において各項のオーダー比較を行うと、 U を流れの代表流速、 L を代表長さとして、慣性項は U^2/L 、衝突応力項は $(\sigma\rho_i)d^2F(C)U^2/L^3$ と見積もられる。それらの比をとると

$$\frac{\text{慣性項}}{\text{粒子間衝突応力項}} = \frac{U^2/L}{(\sigma\rho_i)d^2F(C)U^2/L^3} = \left(\frac{L}{d}\right)^2 \frac{\rho_i}{\sigma F(C)} \quad (1)$$

となる。ここに σ は粒子密度、 C は粒子の体積濃度、 ρ は間隙流体の密度、 $\rho_f = \sigma C + \rho(1-C)$ は流れ全体の密度としている。また粒子間の衝突応力については、多くの式が提案されているが、ここでは椿ら⁴⁾の式を用いる。 d は粒子の直径、 $F(C)$ は粒子の体積濃度 C の関数で、例えば椿ら⁴⁾は、 C_c を最密充填濃度として $F(C) = (C/C_c)^2 / (1 - C/C_c)$ のように導いている。これは濃度 C の増加関数である。

従って、 L/d が大きく、 C が小さい領域、すなわち $N_L \equiv \frac{L}{d} \sqrt{\frac{\rho_i}{\sigma F(C)}}$ が大きい領域では運動方程式における慣性項が卓越する。逆に、 L/d が小さく C が大きい領域、すなわち N_L が小さい領域では運動方程式における粒子間応力項が卓越することとなる。

円柱や球のまわりの流況を考える場合には、代表スケール L としてそれらの直径 d_L が考えられる。したがって、2個の無次元量の無次元径 d_L/d および粒子濃度 C が、あるいは1個の無次元量 $N_p \equiv \frac{d_L}{d} \sqrt{\frac{\rho_i}{\sigma F(C)}}$ が抗力評価のパラメータとなるものと考えられる。

3. 平均抗力評価のための抗力係数

実験水路に円柱を設置し、土石流を定常的に衝突させた。抗力はひずみゲージを用いて検出し統計処理を行った。ひずみ変動 ε' の出力波形の一例を図-1に示す。

図-2は抗力の平均値について抗力係数を求め、無次元量 N_p との関係を表したものである。ここに、縦軸は、土石流の抗力係数 C_D と清水流の抗力係数 C_{DW} との比によって表わされている。ここに $F(C)$ 中の $C=0.6$ とした。実験値は、種々の輸送濃度 C_T や無次元径 d_L/d を持つにもかかわらず、単一の無次元量によってうまく整理されることが分かる。 N_p が大きくなると抗力係数比は減少して1に近づき、小さくなると抗力係数比は大きくなる。このことは、 N_p

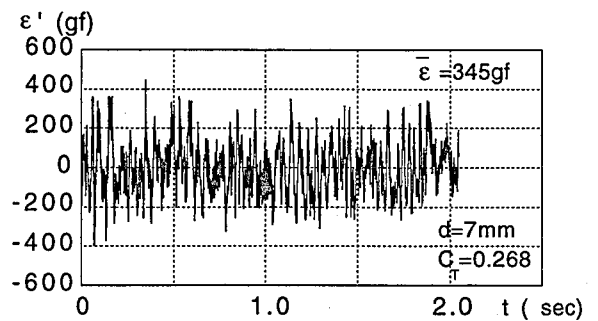


図-1 土石流における円柱のひずみ変動の一例

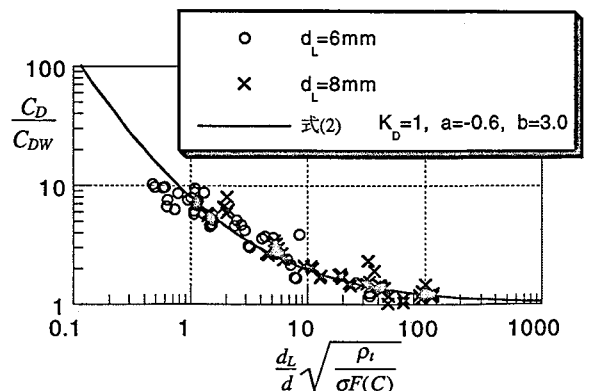


図-2 土石流における円柱の抗力係数と無次元量 N_p との関係

の大きい領域では土石流があたかも清水流のように挙動していることを示している。清水流の抗力係数 C_{DW} は乱流抵抗の領域内で測定されており、従って、 N_p の大きい領域の流れでは、抗力係数 C_D は土石流の乱流抵抗によるものと考えられる。また、 N_p の小さい領域では粒子の円柱への衝突・接触作用が支配的となり、 C_D の大きな値の原因となっている。特に $N_p=1$ 付近では抗力係数 C_D は清水流の抗力係数 C_{DW} の $a=10$ 倍にも達することが分かる。

4. 抗力係数に関する考察

抗力係数について微視的な視点から考察を行う。まず、簡単な乾燥粒子流の場合について考える。円柱に対して一様な速度 u 、濃度 C の乾燥粒子群が衝突する場合を考えると、抗力係数が理論的に導かれる。その結果、 C_{DP} は濃度には依存せず、 d/d_L のみに関係することが理解される。しかしながら、図-2 などの考察を基に土石流における抗力係数 C_D として次式を仮定することにする。

$$\frac{C_D}{C_{DW}} = K_D \left\{ \left(\frac{d_L}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right)^a + 1 \right\}^b \quad (2)$$

ここに、 C_{DW} は清水中の乱流領域における物体の抗力係数である。流れの密度は $\rho = \sigma C + \rho(1-C)$ である。実験結果に適合するように、式中の係数 K_D 、 a 、 b を決定すると、図-2 の曲線のようになる。ここに $K_D = 1.0$ 、 $a = 0.6$ 、 $b = 3.0$ 、 $C_s = 0.6$ とおいた。

5. 衝撃力の評価

本研究では抗力の変動成分を衝撃力に起因したものと考えている。平均抗力 \bar{D} は前章の成果により抗力係数を用いることにより求められるので、抗力の変動成分をなんらかの方法により評価できれば衝撃力を推定することができる。橋本ら³⁾ は、抗力の変動成分は正規分布に従って変動することを明らかにしている。その確率密度関数 $p(z_i)$ は、 D_i を抗力、 \bar{D} を平均抗力、 s を抗力の標準偏差とし、 $z_i = (D_i - \bar{D})/s$ とおいて

$$p(z_i) dz_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z_i^2}{2}\right) dz_i \quad (3)$$

とあらわされる。また、変動係数 $C_v = s/\bar{D}$ は図-3 のようになることが実験により見出されている³⁾。同図には、乾燥粒子流、清水流の場合の抗力の変動係数も参考までに示している。以上のことから、構造物の設計時には、例えば、抗力変動の非超過確率が 90% となるような値 D_{90} をもって衝撃力を代表させることが考えられる。すなわち次式

$$\int_{-\infty}^{z_{90}} p(z_i) dz_i = 0.9 \quad (4)$$

を満たす z_{90} を用いて

$$D_{90} = \bar{D} + s z_{90} = (1 + C_v z_{90}) \bar{D} = (1 + C_v z_{90}) a \frac{\rho_t}{\rho} \bar{D}_w \quad (5)$$

と求められることになる。ここに標準偏差は $s = C_v \bar{D}$ より得られ、 $a = C_D/C_{DW}$ 、 \bar{D}_w は清水流の平均抗力である。

例として、土石流中の土砂の粒径 d や濃度 C が大きくなるような領域、すなわち無次元量 $N_p \approx 1$ 付近の領域を考えると $a \approx 10$ 、 $C_v \approx 1$ 、 $z_{90} = 1.28$ 、 $\rho_t/\rho = \sigma C/\rho + 1 - C = 1.8$ となるので、 $D_{90} = 41 \bar{D}_w$ を得る。従って、土石流の衝撃力は清水の平均抗力の 41 倍にも達することが理解される。

6. おわりに

円柱に作用する土石流の抗力は激しく変動する。それを平均と変動成分とに分け、前者については抗力係数を導入し、後者については確率密度関数、変動係数を導入してそれぞれの評価法を示した。抗力変動は土石流の衝撃力に起因したものであると考え、非超過確率が 90% となるような値 D_{90} をもって衝撃力を算定すると、無次元量 $N_p \approx 1$ 付近の領域では土石流の衝撃力は清水の平均抗力の 41 倍にも達することが分かった。

参考文献

- 1) 水山：砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点，新砂防，vol.112，1979.
- 2) T.Mizuyama and Y.Ishikawa：PREDICTION OF DEBRIS FLOW PRONE AREAS AND DAMAGE, HYDRAULICS/HYDROLOGY OF ARID LANDS, 1990.
- 3) 橋本・村上・平野・烏野：土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究，土木学会論文集，No.565/II-39，1997.
- 4) 椿・橋本・末次：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，No.31，1982.

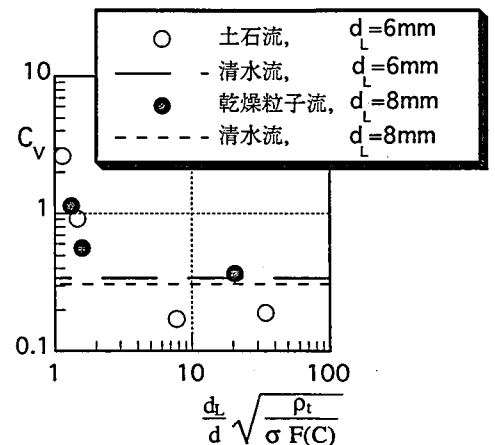


図-3 抗力の変動係数と無次元量 N_p との関係