

円柱に作用する粒子流の流体力

九州大学工学部 学生員○山下 広秋
九州大学工学部 正 員 平野 宗夫
九州大学工学部 正 員 橋本 晴行
九州大学大学院 学生員 村上 浩史

1. はじめに

土石流を考慮した構造物の設計を行う場合、構造物に作用する土石流の流体力を把握しておく必要がある。本研究では、土石流の流体力のうち粒子による影響を明らかにするために、実験水路において粒子流を円柱に衝突させ、その流体力を測定する実験を行った。そして粒子流の流体力による抗力係数を土石流の粒子のみによる抗力係数と比較しながら考察を行った。

2. 実験方法

実験には、図-1の様な幅15cm、長さ5.0mの側面、河床ともにアクリル板の可変勾配水路を用いた。水路の上流端にはホッパーが設けてあり、ホッパーの開き角度を調節することにより供給砂量を調節出来るようになっている。下流端から0.5mの位置の水路中央部には直径 $d_L=8\text{mm}$ 、長さ $l=38.5\text{cm}$ のアルミ製円柱を河床に対して垂直に設置した。円柱の上端を固定して、下端は自由に振動出来るように河床から $\delta=1.5\text{mm}$ 、 $\delta=3.7\text{mm}$ のクリアランスを保つ。実験方法は、まずホッパーの中に均一粒径 d の砂を入れて水路を所定の勾配 θ_0 に設定し、ホッパーの底板を開き、粒子流を発生させる。粒子が落下して円柱に衝突した時のひずみを円柱の上端に貼ったひずみゲージにより、サンプリング周波数1kHzで検出する。このひずみと流体力との関係は、粒子流が衝突する円柱棒の先端部分に分銅を載下して得られた検定曲線を利用する。下流端では、流れが定常になってからバケツで流れを採取し、単位幅流量 q_s を求める。また、下流端から0.55mの位置でビデオ撮影することにより、層厚 h および流速 u を測定し、濃度 C を求めた。実験条件を表-1に示す。

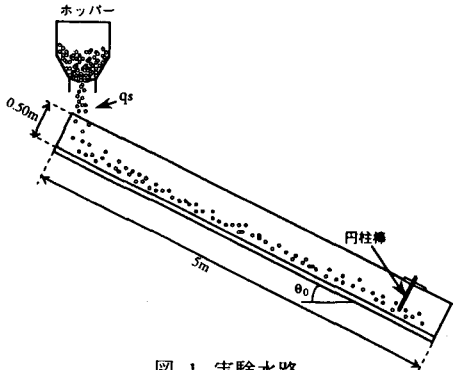


図-1 実験水路

表-1 実験条件

$d(\text{mm})$	σ/p	$\delta(\text{mm})$	$q_s(\text{cm}^2/\text{s})$	θ_0
0.17	2.61	3.7	100	30°
		1.5	190	35° 40°
			340	40°
0.55	2.65	3.7	230	35°
0.8	2.64	3.7	230	35°
1.9	2.61	3.7	200	30° 35°
4.4	2.59	1.5	180	30°
			380	28° 30°
			150	30°
7	2.63	1.5	350	30°

3. 実験結果と考察

円柱に作用する単位長さ当たりの平均流体力 D は、土石流については水流相の流体力と粒子相の衝突・接触に起因する流体力との線形和であると仮定すると

$$D = \frac{\rho(1-C)}{2} u^2 d_L C_{DW} + \frac{\sigma C}{2} u^2 d_L C_{DP} \quad (1)$$

となる。ここに ρ 、 σ はそれぞれ水、粒子の密度、 C は粒子濃度、 u は流速、 d_L は円柱の直径、 C_{DW} 、 C_{DP} はそれぞれ水流の流体力、粒子の衝突力による抗力係数である。

一方、粒子流では間隙流体は空気であり、 $\rho=0$ とおけるので粒子流の流体力は

$$D = \frac{\sigma C}{2} u^2 d_L C_{DP} \quad (2)$$

となる。従って、式(2)の D 、 C 、 u に実験で得られた測定値を代入することにより粒子流の抗力係数を求めることができる。

ところで、高速・高濃度流の運動方程式において、各項のオーダー比較を行ってみると

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

となる¹⁾。ここにUは代表流速、Lは代表長さ、また、F(C)は粒子濃度Cの増加関数である。よって、より無次元量L/dとCが重要なパラメーターとなることが見出される。この実験のように円柱の抗力を考える場合には、代表長さLを円柱の直径 d_L として考えるのが最適である。そこで、粒子流の C_{DP} を無次元径 d_L/d 、粒子濃度Cに対してプロットしたものが図-2、3である。図-2においては、 d_L/d が小さくなるほど、すなわち粒径dが大きくなるほど抗力係数 C_{DP} は大きな値となっている。これは、粒径dが大きくなると、粒子間の衝突・接触作用が大きくなることによるものと考えられる。また、図-3においては、Cが大きくなるに従い C_{DP} の値が増加する傾向がある。その変化の割合は粒径dが大きいかほど小さくなっている。

土石流において、流体力D、流速u、粒子濃度C、水流の抗力係数 C_{DW} の測定値を式(1)に代入すると C_{DP} を得ることができる。その結果を粒子流の場合と同じく、無次元径 d_L/d と粒子濃度Cに対してプロットしたものを図-4、図-5に示す。この場合も図-2、図-3と同様に、図-4では d_L/d が小さく、図-5ではCが大きくなるに従って C_{DP} の値が増加している。さらに、図-3と図-5を同一の図に示したものが図-6である。粒子流の抗力係数 C_{DP} は土石流のそれとうまく一致していることが分かる。これは、式(1)による土石流の抗力係数 C_{DP} の算定がほぼ妥当であることを示している。

4. おわりに

粒子流の抗力係数 C_{DP} は、無次元径 d_L/d が小さくなるほど、また濃度Cが大きくなるほど、大きな値となることがわかった。また、粒子流の抗力係数 C_{DP} は、土石流における粒子相の衝突・接触力による抗力係数によく一致しており、土石流の平均流体力の算定式における仮定が妥当であったと言える。粒子流では、実験に適した広範囲にわたる濃度の流れを発生させるのは困難ではあるが、さらに多くの実験結果が得られれば以上の結果が一層明らかになるであろう。

<参考文献>

- 1) 平野宗夫・橋本晴行・福富章・田熊幸二・パルー・ムハマド・サレー：開水路における高濃度流の無次元パラメーター，水工学論文集，第36巻，1992.

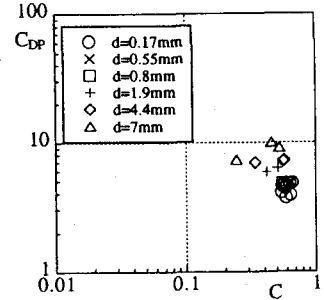
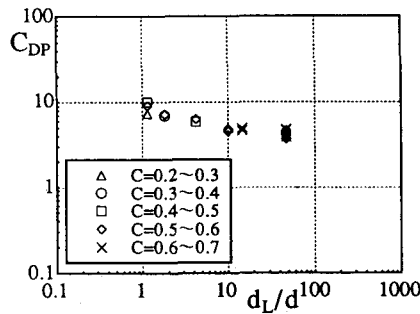


図-2 抗力係数と無次元径との関係(粒子流) 図-3 抗力係数と濃度の関係(粒子流)

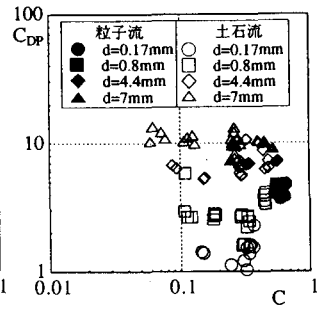
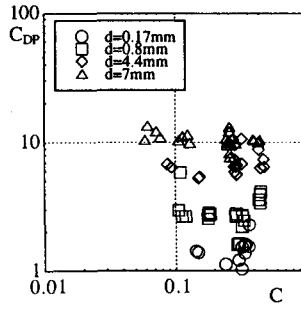
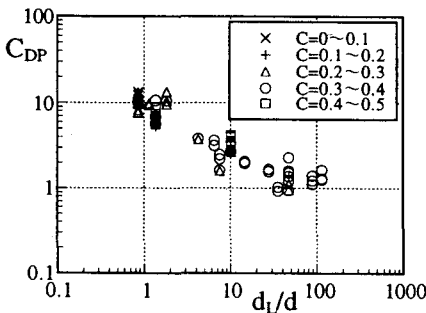


図-4 抗力係数と無次元径との関係(土石流) 図-5 抗力係数と濃度の関係(土石流) 図-6 抗力係数と濃度の関係