

円柱に作用する土石流の流体力の特性

九州旅客鉄道(株) 正 員 〇田熊 幸二 九州大学工学部 学生員 村上 浩史
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 福富 章

1. はじめに

土石流を考慮した構造設計を行う場合、構造物に作用する土石流の流体力を把握する必要があるが、土石流の流体力の評価が十分になされていないのが現状である。そこで本研究では、円柱に土石流を衝突させる実験を行い、円柱に作用する土石流の流体力を測定し、水流と比較しながらその特性について考察したものである。

2. 実験方法

使用した水路は長さ12m、幅12.5cmの可変勾配水路(図-1)で、その上流側7.0mの部分移動床、下流側5.0mの部分ベニヤ板かアクリル板で滑面固定床とした。下流端から1.05m地点には直径 $d_L=6\text{mm}$ 、8mm、長さ $L=32.5\text{cm}$ 、38.5cmのアルミ製円柱棒を固定床面に垂直に設置しておく。円柱棒の上端はアングルに固定し、下端は自由に振動できるように床面に対して

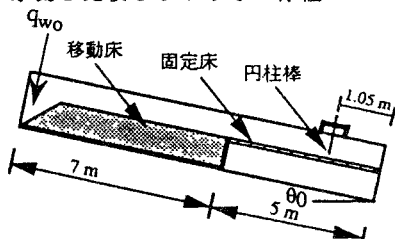


図-1 円柱の抗力測定のための水路

表-1 抗力測定に関する実験条件

$d_L(\text{mm})$	σ/p	θ_0	$d_L(\text{mm})$	$Q_{w0}(\text{cm}^2/\text{s})$	固定床材料
0.07	2.63	14°	8	100	ベニヤ板
0.09	2.60	14°	8	100	ベニヤ板
0.17	2.61	4°~18°	6, 8	100, 200	ベニヤ板, アクリル板
0.29	2.62	14°	8	100	ベニヤ板
0.55	2.65	14°	8	100	ベニヤ板
0.80	2.64	8°~18°	6, 8	100, 200	ベニヤ板, アクリル板
1.24	2.65	14°	8	100	ベニヤ板
1.90	2.61	14°	8	100	ベニヤ板
4.40	2.59	4°~18°	6, 8	100, 200	ベニヤ板, アクリル板
7.00	2.63	8°~18°	6, 8	100, 200	ベニヤ板, アクリル板

$\delta=1\text{mm}$ 、 2mm 、 3.3mm のclearanceを保つ。

実験方法は、まず平均粒径 d の河床材料を水路の上流の移動床部に厚さ10cmで敷き詰め、水路を所定の勾配 θ_0 に設定する。次に、河床を浸透水で飽和状態にした後、水路上流端から単位幅流量 q_{w0} の水を急激に供給して土石流を発生させる。実験条件を表-1に示す。発生した土石流は、流下して円柱棒に衝突する。その時の円柱棒のひずみを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。また同時に下流端では、流れを採取することにより、土砂と水を合わせた全流量 q_t や土砂粒子の輸送濃度 C_T を、水路側方からはビデオ撮影することにより、水深 h をそれぞれ測定する。ひずみから抗力を算定するには、円柱棒の先端に分銅を載荷して得た検定曲線を利用する。さらに比較のため、同一流量の清水を流して水流による抗力も測定する。

3. 実験結果と考察

(1) 平均流体力

抗力係数 C_D を導入すると、円柱の単位長さなりに働く抗力 D は

$$D = \frac{\rho_t}{2} u^2 d_L C_D \quad (1)$$

と表される。ここに $\rho_t = \sigma C + \rho(1-C)$ である。滑面固定床においては濃度と流速が比較的一様であるので、式(1)では $u \equiv \bar{u} = q_t/h$ 、 $C \equiv C_T$ と置くことができる。従って、 D 、 $\bar{u}$ 、 C_T の測定値を代入すると抗力係数 C_D の実験値を求めることができる。

図-2は、粒子輸送濃度をほぼ一定に保ったときの円柱の無次元径 d_L/d による抗力係数 C_D の変化を示したものである。ここに、土石流による抗力係数 C_D は清水流の抗力係数 C_{Dw} で規格化されている。規格化抗力係数 C_D/C_{Dw} は d_L/d の小さな所では d_L/d に対して急減するが、 $d_L/d \geq 50$ では、1の値に漸近する。このことは、 d_L/d の大きな領域では土石流があたかも清水流のような単一流体として挙動していることを示唆している。清水流の場合、レイノルズ数 $Re = u d_L/\nu = 10^4 \sim 2 \times 10^4$ の範囲で抗力係

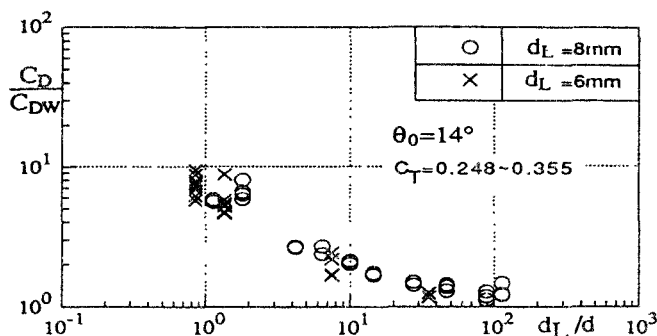


図-2 円柱の抗力係数と無次元径との関係

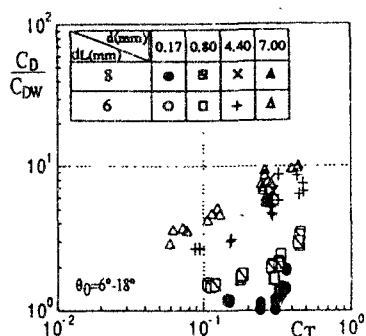


図-3 円柱の抗力係数と粒子輸送濃度との関係

数 C_{DW} が測定されており、乱流抵抗の領域内である。従って、 d_L/d の大きな所では、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、 d_L/d の小さな所では、粒子の円柱への衝突・接触作用が重要となり、 C_D の大きな値につながっている。

図-3 は、 d_L/d をパラメーターとした時の規格化抗力係数 C_D/C_{DW} と輸送濃度 C_T との関係を示している。抗力係数は C_T とともに増加することが分かる。その増加の割合は、 d_L/d が大きいほど、すなわち粒径が小さくなるほど小さくなっている。当然、 C_T が減少すると C_D/C_{DW} は 1 に近づいていく。

(2) 流体力の変動特性

円柱棒を一つのシステムと考えると、この系の入力は土石流、水流の流体力で、出力はひずみ量である。このシステムを線形系であると仮定すれば、流体力のフーリエ変換を $F(f)$ 、ひずみ量のフーリエ変換を $E(f)$ とすると次式の関係が成り立つ。

$$E(f) = H(f) \cdot F(f) \quad (2)$$

ここに $H(f)$ は、周波数応答関数である。土石流、水流に対応する物理量を添字 D 、 W で表すと

$$E_D(f) = H(f) \cdot F_D(f) \quad (3) \quad E_W(f) = H(f) \cdot F_W(f) \quad (4)$$

であるから、辺々比をとると

$$\frac{E_D(f)}{E_W(f)} = \frac{F_D(f)}{F_W(f)} \quad (5)$$

となる。図-4 は、 $d=0.8\text{mm}$ 、 $\theta_0=14^\circ$ 、 $d_L=8\text{mm}$ における平均値からの変動ひずみの $E_D(f)$ である。図-5 は同条件における水流の $E_W(f)$ との比 $E_D(f)/E_W(f)$ であり、周波数全域において水流に比べ土石流の $E_D(f)$ が 2~3 倍程度大きいことが分かる。なお、平均流体力の比は 2.77 である。

4. おわりに

土石流の抗力係数 C_D は、土石流の砂粒径と砂粒子濃度が大きくなる程、大きな値を示す傾向にある。さらに、土石流の流体力は水流に比べ大きいことがわかったが、今後は周波数応答関数 $H(f)$ を定め、上記システムにより $F_D(f)$ を解明することが課題である。

なお、流体力の算定に際し、九州大学工学部烏野清助教授に多大の教示を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

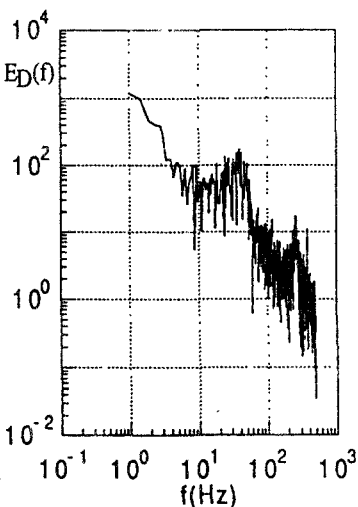


図-4 スペクトル解析

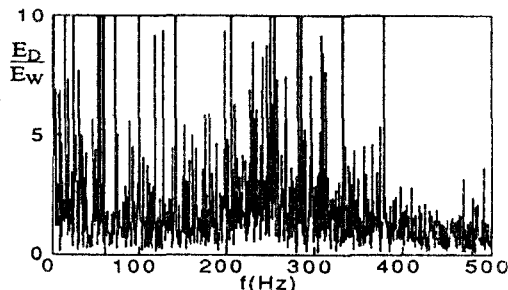


図-5 スペクトルの比