

(24) 土石流・落石群の衝撃力評価のための水理学的アプローチ

九州大学 工学部 平野 宗夫
 九州大学 工学部 ○橋本 晴行
 九州旅客鉄道(株) 田熊 幸二
 九州共立大学 工学部 烏野 清

1. はじめに

土石流や崩土、落石群などは土砂や岩塊を含有しながら、高速で斜面を流下するため、強烈な破壊力を有し、砂防ダムやロックシェッドなどの施設をしばしば破壊する。そのため、これらの施設計画に際しては、まず土石流や崩土、落石群の衝撃力を正確に算定しておくことが必要である。

土石流などの衝撃力に関する研究には、2つのアプローチがある。ひとつは、土石流から単一の礫を抽出して、その衝突をモデル化する方法であり、ふたつめは、流体力の観点から衝撃力を取り扱う方法である。前者には水山らの研究¹⁾がある。彼らは土石流の衝突を、鋼球の落下衝撃で代用して衝撃応答を調べている。後者には、仲野ら²⁾や三好ら³⁾および大同⁴⁾の研究がある。仲野らや三好らは実際に崩土や土石流を堰などに衝突させて、その衝撃力を実験的に調べている。大同は堤体に衝突する土石流を非圧縮性完全流体とみなしてモデル化し、衝撃力をポテンシャル理論から求めている。

本研究は後者の範疇に入るもので、土石流や崩土、落石群を連続流体として水理的に取り扱い、それらによる衝撃力について流体力の変動の観点から接近を試みる。その手始めとして、円柱に働く流体力の平均値について実験・理論両面から検討を行うものである。

2. 高速・高濃度流を規定するパラメーター

抗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ーについて考察してみよう。図-1に示すような2次元定常流の流れ方向の運動方程式は次式によって与えられる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_l} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここに ρ_l は流れの密度、 p は流れの重力成分や粒子間の接触力⁵⁾を含む圧力、 τ_{zx} 、 τ_{xx} は粒子間の衝突応力である。間隙水の乱れによるReynolds応力は、粒子間応力に比較して微小だとして無視している。

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、ここでは土石流や乾燥粒子流に適用可能な椿・橋本ら⁵⁾の式を基に、次のようにおく。

$$\tau_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C) (du/dz)^2 \quad (2)$$

$$\tau_{xx} = K_{xx} \sigma d^2 F(C) (du/dz)^2 \quad (3)$$

ここに、 σ は粒子密度、 d は粒子の径、 $F(C)$ は粒子の体積濃度 C の関数で、例えば椿・橋本ら⁵⁾は C を粒子の最密充填濃度として

$$F(C) = \frac{(C/C^*)^2}{1 - (C/C^*)} \quad (4)$$

のように導いている。これは濃度 C の増加関数である。

さて、式(1)における各項のオーダー比較を行ってみよう。 U を流れの代表流速、 L を代表長さとする、慣性項は U^2/L 、衝突応力項は $d^2 F(C) U^2/L^3$ と見積られるので、その比をとると

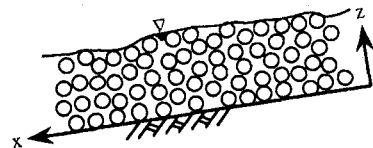


図-1 高濃度流における座標の定義

$$\frac{\text{慣性項}}{\text{粒子間衝突応力項}} = \frac{U^2 L}{d^2 F(C) U^2 L^3} = \frac{1}{F(C)} \left(\frac{L}{d}\right)^2 \quad (5)$$

となる。従って、無次元量 L/d と C が、高濃度流を規定する重要なパラメーターであることがわかる。すなわち、濃度 C が大きく、 L/d が小さな値を取る時、粒子間応力が卓越し、その逆の場合は慣性項が卓越することになる。代表長さ L としては、円柱の抵抗を考える場合は円柱の径 d_L が最適であろう。

以下においては、このような考察を基に土石流や崩土、落石群における円柱の抗力を調べる。

3. 土石流の流体力

3.1 実験方法

使用した水路は長さ12m、幅12.5cmの可変勾配水路で、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(図-2)。滑面にしたのは一様な濃度・速度分布を得るためである。下流端から1.05m地点には直径 d_L 、長さ L_0 の円柱を固定床面に垂直に設置しておく。円柱としては $d_L=6\text{mm}$ 、 $L_0=32.5\text{cm}$ と $d_L=8\text{mm}$ 、 $L_0=38.5\text{cm}$ の2本のアルミ製円柱棒を用いた。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 $\delta=1\text{mm}$ 、 2mm 、 3.3mm のいずれかの clearance を保つ。

まず、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、水路の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た。その実験条件を表-1に示す。ここに、 d は平均粒径、 σ/ρ は砂の比重、 θ_0 は水路勾配、 q_{w0} は単位幅当りの供給水量である。発生した土石流は、流下して円柱棒に衝突する。その円柱棒のひずみを上端に貼ったひずみゲージにより検出する。サンプリングは周波数1kHzで、土石流の先端から約15秒間行い、定常状態の部分について処理を行った。下流端では、流れをバケツで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した。

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した。これにより清水の抗力係数 C_{DW} を求めた。

さて、円柱の単位長さ当りに働く抗力 D は、水流相の流体力と粒子相の衝突・接触力との和であるとする

$$D = \frac{\rho(1-C)}{2} u^2 d_L C_{DW} + \frac{\sigma C}{2} u^2 d_L C_{DP} \quad (6)$$

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、 C_{DW} 、 C_{DP} はそれぞれ水流相の流体力および粒子相の衝突・接触力による抗力係数である。滑面固定床においては濃度・速度分布が比較的一様であるので、式(6)では $u \doteq \bar{u} = q/h$ 、 $C \doteq C_T$ とおくことができる。従って、 D 、 u 、 C_T 、 C_{DW} の測定値を代入すると抗力係数 C_{DP} の実験値を求めることができる。

表-1 土石流における抗力測定に関する実験条件

$d(\text{mm})$	σ/ρ	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

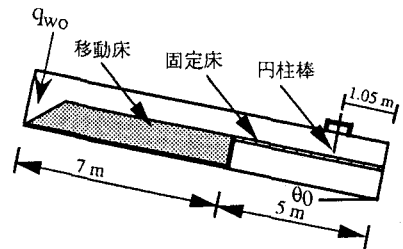


図-2 円柱の抗力測定のための水路

3・2 実験結果

第2章において、円柱の無次元径 d_L/d および粒子濃度 C が抗力の評価のパラメーターとなることが分かった。

図-3はひずみの出力波形の1例である。粒子の衝突などにより激しく変動していることが分かる。一方、式(6)により抗力係数 C_{DP} を求める際に利用される \bar{u} 、 C_T の測定値は流れの採取時間内での平均値である。従って、ひずみもその間の平均値を用いる。

図-4は、円柱の無次元径 d_L/d による粒子相の抗力係数 C_{DP} の変化を示したものである。抗力係数 C_{DP} 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の値に漸近し、水流の抗力係数 C_{DW} に近い値となる。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に挙動していることを暗示している。清水流の場合、レイノルズ数 $Re = \bar{u} d_L / \nu = 10^4 \sim 2 \times 10^4$ の範囲で抗力係数 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、抗力係数は土石流の乱流抵抗によるものと考えられる。これは、第2章の結果と対応している。また、 d_L/d の小さな領域では、粒子の円柱への衝突・接触作用が重要となり、 C_{DP} の大きな値につながっている。

図-5は、 d_L/d をパラメーターとした時の抗力係数と輸送濃度 C_T との関係を示している。抗力係数は C_T とともに増加の傾向にある。

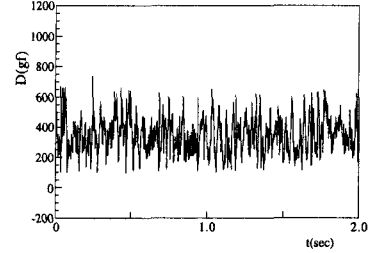


図-3 土石流の衝突による円柱のひずみの出力波形 ($d=7\text{mm}$, $d_L=8\text{mm}$, $\theta_0=14^\circ$, $C=0.268$, $q_s=440.7\text{cm}^2/\text{s}$, $\bar{D}=345\text{gf}$)

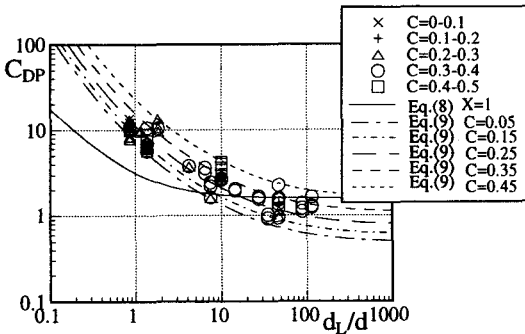


図-4 土石流における円柱の抗力係数と無次元径との関係

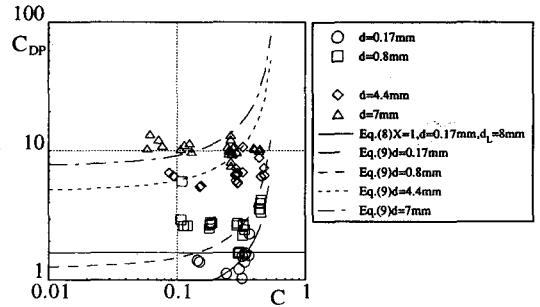


図-5 土石流における円柱の抗力係数と濃度との関係

4. 崩土・落石群の流体力

4.1 実験方法

実験に使用した水路を図-6に示す。長さ5.0m、幅は15cmであり、側面、河床ともにアクリル板の可変勾配水路である。そ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 、長さ L_0 の円柱を河床に対して垂直に設置した。使用した円柱は $d_L=8\text{mm}$ 、 $L_0=38.5\text{cm}$ のアルミ製円柱棒である。円柱の上端を固定し、下端は自由に振動出来るように河床とのクリアランス δ を保つ。実験方法は、まずホッパーの中に粒径 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いて、乾燥状態の粒子流を発生させる。粒子が流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。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、単位幅流砂量 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 および表面流速 u_s を測定し、濃度 C を求める。実験条件を表-2に示す。

さて、円柱の単位長さ当たり働く抗力 D は、間隙流体が空気であることから

$$D = \frac{\sigma C}{2} u^2 d_L C_{DP} \quad (7)$$

とおける。ここに、 σ は粒子の密度、 C は粒子濃度、 u は流速、 C_{DP} は粒子相の衝突・接触力に起因する抗力係数である。滑面固定床においては濃度・速度分布が一様であるので、式(7)では $u \equiv \bar{u}$ 、 $C \equiv C_T$ と置くことができる。従って、 D 、 u 、 C_T を測定することにより、抗力係数 C_{DP} の実験値を得ることができる。

4.2 実験結果

図-7は、ひずみの出力波形の1例である。土石流の場合と同様に粒子の衝突により激しく変動しており、 C_{DP} の決定においてはその平均値を用いた。

図-8,図-9は、抗力係数 C_{DP} を無次元径 d_L/d 、および粒子濃度 C に対してプロットしたものである。無次元径 d_L/d は小さくなるほど、濃度は大きくなるほど抗力係数 C_{DP} は大きくなる傾向がある。これは、図-4, 5で示した土石流の場合とはほぼ同じ結果である。即ち、 d_L/d が小さく C が大きな領域では

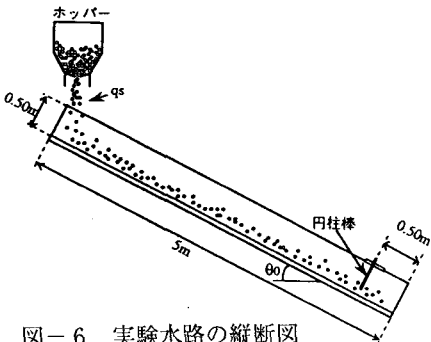


図-6 実験水路の縦断面図

表-2 崩土・落石群における抗力測定に関する実験条件

d (mm)	σ/ρ	δ (mm)	q_s (cm ² /s)	θ_0
0.17	2.61	3.7	100	30°
			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°
			180	30°
4.4	2.59	1.5	380	28° 30°
			150	30°
7	2.63	1.5	350	30°

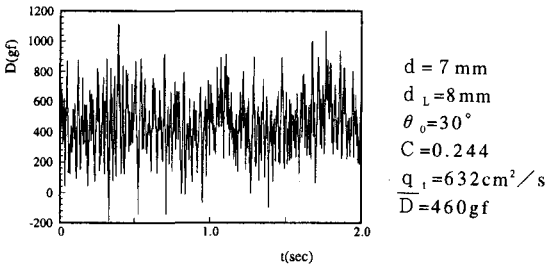


図-7 崩土・落石群の衝突による円柱のひずみの出力波形

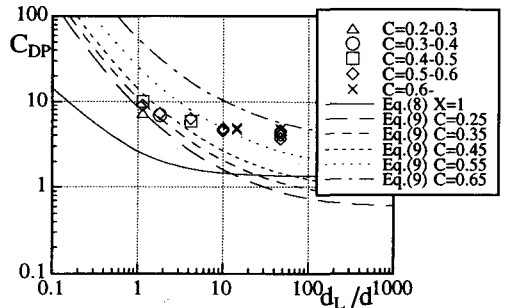


図-8 崩土・落石群における円柱の抗力係数と無次元径との関係

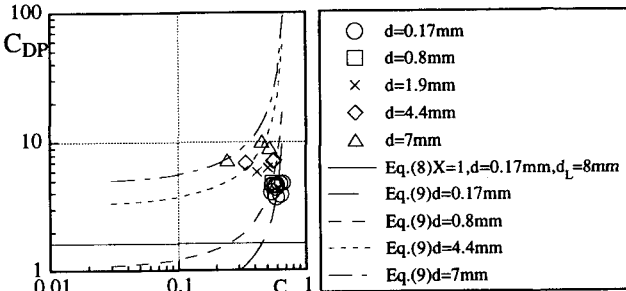


図-9 崩土・落石群における円柱の抗力係数と濃度との関係

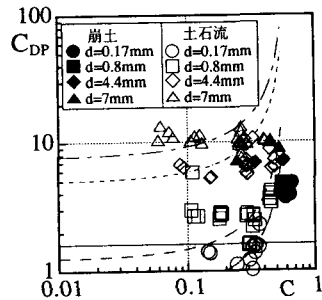


図-10 土石流と崩土・落石群における抗力係数の比較

粒子の衝突・接触作用が重要となり、 d_L/d が大きい領域は乱流の効果が重要となると考えられる。

図-10は、土石流と崩土、落石群のそれぞれにおける抗力係数を比較したものである。ほぼ同じような値を示すことが分かる。

5. 抗力係数に関する考察

粒子と円柱との衝突に関する微視的考察によると、衝突力の抗力係数は、

$$C_{DP} = \frac{4}{3} \left(1 + \frac{\rho}{2\sigma} \right) \left\{ \left(\frac{d_L}{d} \right)^{-1} + 1 \right\} X \quad (8)$$

となる。ここに、 X は多体衝突効果を考慮した補正係数で、 $X=1$ の時、単一粒子が連続的に円柱に衝突する場合を表す。 $X=1$ とおいた場合を図-4, 5, 8, 9に実線で示した。式(8)は粒子濃度 C には無関係であり、無次元径 d_L/d への依存性も弱い。従って実験値に適合するためには補正係数 X は d_L/d と C の関数であることが必要である。そこで X を無次元径 d_L/d の関数と粒子濃度 C の関数との積であると仮定して

$$C_{DP} = \frac{4}{3} \left(1 + \frac{\rho}{2\sigma} \right) \left\{ \left(\frac{d_L}{d} \right)^{-1} + 1 \right\} \frac{1}{1-C/C^*} \left\{ a \left(\frac{d_L}{d} \right)^{-1} + b \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

とおく。式(9)による計算結果を図-4, 5, 8, 9に示す。ここに、 C_c は最密充填濃度で、 $C_c=0.7$ とした。また、 a, b は実験結果に適合するように決定され、 $a=4.22, b=0.0841$ とおいた。

6. おわりに

土石流や崩土、落石群の衝撃力を流体力の変動としてとらえ、まず、その平均流体力の予測のための抗力係数の評価式を提案した。それは土石流にも、崩土、落石群にも適用が可能であることが分かった。今後は、流体力の変動について調べる予定である。

最後に、本研究に際して防衛大学の林建二郎助教授には貴重な助言をいただいた。また実験やデータ整理などにおいては、九州大学の池松伸也技官および院生の福富章(現・道路公団)、村上浩史、学部生の山下広秋の3氏には多くの助力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水山高久・伊卷幹雄：砂防ダムに対する土石流衝撃力実験，土木技術資料，Vol.22，NO.11，1980.
- 2) 仲野公章・右近則男：崩壊土砂が擁壁に及ぼす衝撃力に関する実験，昭和61年度砂防学会研究発表会概要集，1986.
- 3) 三好岩生・鈴木雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究，新砂防，Vol.43，NO.2(169)，1990.
- 4) 大同淳之：土石流が構造物に作用する衝撃力，土木学会第46回年次学術講演会概要集，1991.
- 5) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：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.317，1982.