

土石流の流下時の分級と 構造物に作用する衝撃力の数値移動床実験

福田 朝生¹・福岡 捷二²

¹正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: t-fukuda@tamacc.chuo-u.ac.jp

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授(同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

数値移動床水路を用い、固定床水路上を土石流が流下し構造物に衝突する数値実験を実施した。解析結果から構造物に作用する平均衝撃力を求めたところ、上流から接近する土石流の運動量フラックスだけでなく、構造物を越流する際に変形する土砂に作用する重力も、平均衝撃力に大きく影響することを明らかにした。また、上流から接近する土石流の運動量フラックスは時間的に緩やかに変化した。一方、土石流は流下時に分級が生じ先端に大きな石が集まるため、粒子衝突による大きな局所衝撃力は、衝突の初期に発生頻度が高く、その後接近粒子の細粒化とともに急速に減少し、平均衝撃力とは異なる時間変化を示すことを確認した。さらに、土石流流下時の大きな粒子の浮き上がりは、水面勾配が下流に向かって緩やかになる場で活発に生じることを明らかにした。

Key Words: debris flow, impact, particle collision, segregation, numerical movable-bed channel

1. 序論

土石流による河川・砂防施設や建物の被害は毎年のように生じている。土石流の被害軽減のためには、土石流の流下機構と構造物に衝突する際の土石流の力学の理解が必要である。構造物の安全性を評価する上で土石流の衝撃力は異なる2つのスケールの外力の把握が重要である。1つは構造物に作用する水深スケールの外力(平均衝撃力と呼ぶ)であり、もう一方は、巨石が衝突する面積のスケールの外力(局所衝撃力とよぶ)である。平均衝撃力は、構造物の滑動、転動などの安定性検討上重要な外力であり、局所衝撃力は、巨石の衝突による構造物の局所的な破壊に対する安全性検討上把握が必要な外力である。平均衝撃力の実験では^(例えば 1), 2)、時間的に変化する水理量や衝撃力を計測することは可能であるが、衝撃部の粒子群や水に作用する力を計測することは難しい。既往の研究²⁾や設計³⁾において、構造物に作用する衝撃力は以下の式で推定されることが多い。

$$F_{imp} = C_m H_m U_m^2 \quad (1)$$

ここに F_{imp} は構造物に作用する単位幅当たりの衝撃力、 H_m は土石流の水深、 U_m は土石流の水深平均流速である。以後式(1)を簡易式と呼ぶ。この簡易式の係数 C_m は実験によって1.5~3.0の値をとることが報告されており²⁾、平均

衝撃力といえども、推定方法は十分確立されてるとはいえない。一方、土石流を形成する巨石の衝突による局所衝撃力は計測は著しく困難であり、また、局所衝撃力と強く関係すると考えられる土石流流下時の分級機構は十分に明らかにされていない。このように土石流の衝撃力の推定法や構造物の安定性の評価には課題が多い。

実験では水や粒子に作用する力を計測することが困難であるため、数値実験で移動床の力学を考察する研究も行われている^(例えば 4)。数値実験で水と粒子運動を考察する為には個々の粒子の運動や衝突、粒子形状に応じた粒子周囲の流れを解析できることが必要である。また、水と粒子の物性値を直接使い、恣意的に変更できる変数が少ない解析モデルが望ましい。そのため、多くの土石流解析^(例えば 5)のように粒子衝突応力の構成則を用い粒子群の運動方程式を解く手法は、構成則のあいまいさが残るため、この目的の解析に適さない。著者ら⁶⁾は、数値実験で水と粒子の運動を考察するため、種々の形状の粒子群とその周りの水の三次元運動を解析することができる数値移動床水路を構築した。この数値移動床水路では、種々の形状の粒子群は、球体連結モデルで作成され、これらは個別要素法(DEM)により解析される。また、粒子よりも小さい計算格子を用い、粒子周りの流れを直交格子差分法で詳細に解き、粒子に作用する流体力を抗

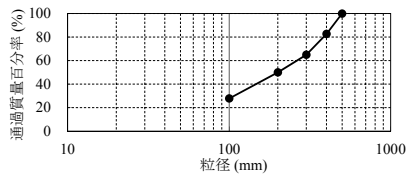


図-1 数値実験に用いた粒子の形状と粒度分布

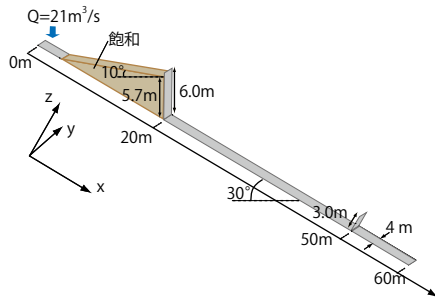


図-2 水路諸元等の条件と座標の定義

力係数を用いず流れ場から直接求める固液混相流解析法を用いている。高濃度土砂流に対する数値移動床水路の適用性を確認するため、土石流水路実験結果を解析した⁷⁾。この解析では、粒子径の1/4の格子サイズを用いて流れを詳細に解くことで、水の粘性係数等を恣意的に変化させることなく一般的な物性値を用いても、粒子速度や土砂濃度の鉛直分布、水と土砂の流出量を定量的に説明できることを示した。また、球では、粒子間摩擦角などの定数を変化させても礫形状粒子群と水の運動を説明することは出来ないことを示した。

粒子周りの流れの解析から流体力を直接求める固液混相流解析法による移動床の研究例として、別府ら⁸⁾は、二次元のMPS-DEMカップリングで土石流の解析を行っている。別府らは、粒子の乱れた挙動に対し水の粘性を調整し安定化を図り解析を行っている。また、水と粒子運動の詳細な考察には三次元解析が必要である。Vowinkelら⁴⁾は直交格子有限体積法と球による三次元固液混相流解析で移動床の解析を行っている。このように三次元固液混相流解析も行われているが、粒子には球が用いられており、非球形の実際の礫群の運動を説明できる解析法となっていない。本研究では著者らの数値移動床水路で、土石流水路実験に対する適用性の確認された既往研究⁷⁾と同一の物性値を用い、混合粒径石礫群の土石流が構造物に衝突する数値移動床実験を行う。数値実験結果の考察から、土石流流下時の分級と、構造物に作用する平均衝撃力、巨石群衝突による局所的衝撃力を推定し、土石流の力学と衝撃力について明らかにする。

2. 数値計算法

(1) 水の運動の解析法

数値移動床水路における水の運動の解析では、石礫部分を密度の異なる流体として取り扱い、粒子よりも小さ

表-1 解析に用いた定数

$\Delta x \Delta y \Delta z$: 流体計算格子サイズ	0.025	m
Δt : 流体運動計算時間ステップ	1.0×10^{-4}	s
$\Delta t'$: 粒子運動計算時間ステップ	2.0×10^{-6}	s
ρ_w : 水の密度	1,000	kg/m ³
ρ_s : 粒子密度	2,650	kg/m ³
μ_w : 粘性係数	8.9×10^{-4}	Pas
C_s : Smagorinsky 定数	0.173	
E : 弾性係数	5.0×10^{10}	Pa
ν : ボアソン比	0.33	
b : 反発係数	0.70	
ϕ_p : 粒子間摩擦角	26.6	°
流体計算格子数	122,880,000	
石の数	54,244	

な計算格子を用い、固液混相流場の一流体モデルを用いて非圧縮性流れとして解析する。水の運動解析に用いる連続式、運動方程式は以下のとおりであり、乱流モデルとして Smagorinsky モデルを用いている。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ 2(\nu + \nu_t) S_{ij} \} \quad (3)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{kl}S_{kl}} \quad (4)$$

ここに u_i は、流体計算格子内で質量平均した流速であり、下付きの指標は、各方向成分を示す、 ρ は、格子内で体積平均した密度、 g は重力加速度、 p は、圧力と SGS 応力の等方成分の和、 ν は動粘性係数、 S_{ij} は、ひずみ速度テンソル、 C_s は Smagorinsky 定数である。粒子に作用する流体力は、混相流体に作用する式(3)の右辺第2項と第3項で評価される応力項に密度 ρ を乗じ、粒子部分について体積積分することにより求めている。水面に応力ゼロの境界条件を与え、水面変化は、密度関数の輸送を解いて評価した。解析法の詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

(2) 粒子群の運動の解析法

数値移動床水路では、小球を隙間がないように連結させた粒子のモデルを用い、粒子の運動は、以下の並進と回転の運動方程式より解析される。

$$M\ddot{r}_i = Mg_i + F_i^f + F_i^c \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_i = I_i^{-1} \{ R_{ji} (N_i^f + N_i^c) - \varepsilon_{j'k'l'} \omega_k I_{l'm'} \omega_{m'} \} \quad (6)$$

ここに、指標 i は空間に固定された座標の成分を、 $i'-m'$ は石礫に固定された座標の成分を示す。 M は石礫の質量、 n は石礫の重心位置、 F_i は石礫表面に作用する力、 ω は角速度、 N は石礫に作用するトルク、 R_{ij} : 空間座標系から石礫に固定された座標系への座標変換行列、 I は慣性テンソル、上付の f, c は、流体力および接触力を示す。

3. 構造物に作用する衝撃力の解析条件

数値実験に用いた粒子群の粒度分布と粒子の形状を図-1に示す。数値実験では、粒径 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m

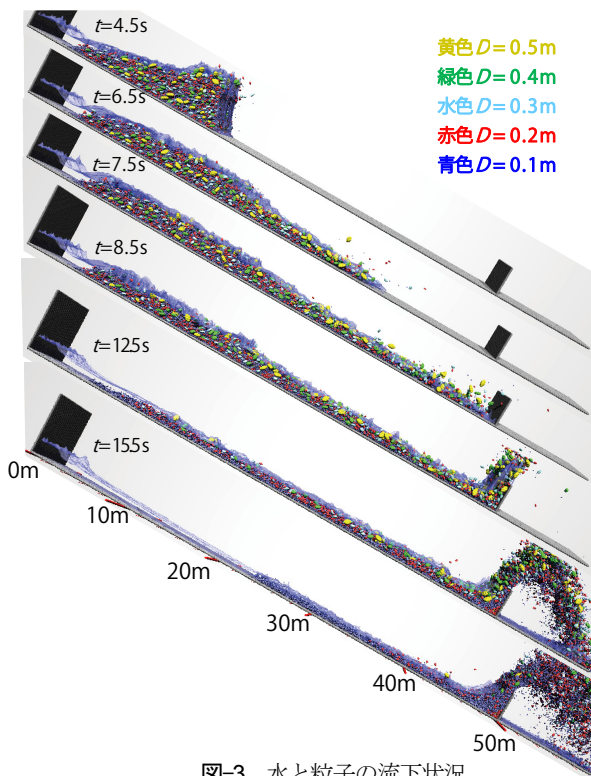


図-3 水と粒子の流下状況

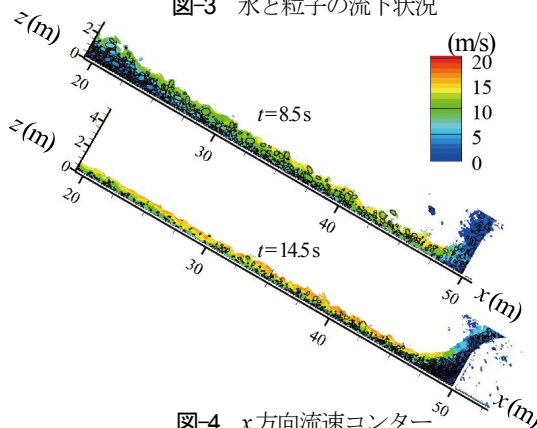


図-4 x方向流速コンター

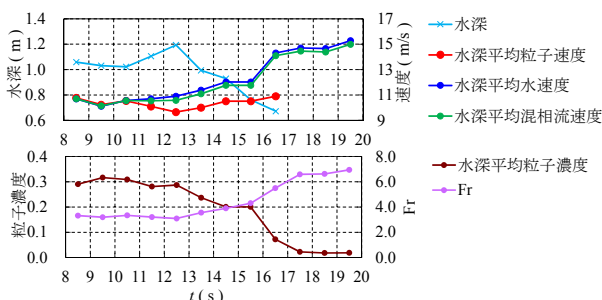


図-5 $x=40\text{m}-45\text{m}$ 区間の平均の水理量の時間変化

の5種類の実スケール粒子群を用いた。図-2に水路諸元等の条件と座標の定義を示す。水路長60m、幅4mの水路を用い、構造物は、文献¹⁾²⁾と同様に水路底面に垂直な構造物とした。側壁の影響を除き分級に及ぼす底面の影響に着目して考察するため横断方向には周期境界条件を与え、下流端は圧力ゼロの条件を与えた。上流から21 m³/sの流量を定常通水し、水が土砂止め堰から越流を開始した時間($t=4.0$ s)に瞬時に堰を取り除き、水と土砂を一気に流下させた。表-1に解析に用いた定数を示す。

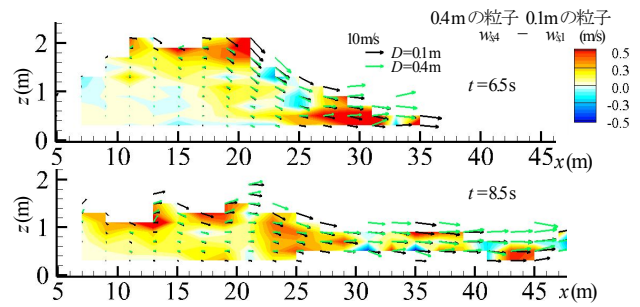


図-6 大きな粒子と小さな粒子のz方向速度の差

4. 解析結果と考察

(1) 土石流の流下過程

数値移動床実験の土石流の流下状況を図-3に示す。本実験は勾配30°と比較的急な条件で行ったため、粒子群は構造物に衝突後、構造物前面でほぼ一定の堆積形状を保ち、上流から流下する土砂が無くなると、構造物前面に堆積していた土砂は水流によって構造物を越流し下流に流下した。図-4に水路中央部の流下方向流速コンター図を、図-5には衝突直前の $x=40\text{m}-45\text{m}$ における水深、平均速度と粒子濃度およびフルード数を示す。構造物直前の濃度は $t=12.5$ s程度までほぼ等しくその間の水深平均の流速 U_m は、10~11 m/s程度であり、混相流平均の速度で求めたFrは概ね3.2程度である。濃度が減少する $t=12.5$ s以降は、水深 H_m が減少に転じ流速が増加しており、土砂混入が流れに対し大きな抵抗となっていたことがわかる。

(2) 石礫の分級機構

図-3より、初期ではほぼ均等に粒度が分布していた堆積土砂が、構造物近傍まで流下すると衝突の初期には大きな粒子が多く、衝突終了時には小さな粒子だけが流下していることがわかる。すなわち、鉛直分級が生じ上層の高流速に乗って大きな粒子は先端に集まり縦断的に分級が生じている。図-3で見られる粒径集団の分布は分級の時間積分の結果であるため、瞬間的分級の進行の程度を説明していない。分級機構を考察する為には、瞬間的な場の平均値としての大きな粒子の鉛直速度と小さな粒子の鉛直速度およびその差(分級速度)をまず明確にする必要がある。このような分級速度は、実験で計測することは容易ではなく、また、数値解析から分級機構を検討している研究^(例えば9)でも考察されていない。

図-6には、2番目に大きな0.4mの粒子と最も小さな0.1mの粒子の底面に垂直なz方向の粒子速度の差を求め、その空間分布とそれぞれの粒径粒子の平均速度ベクトルを図示した。この図の粒子の速度は、解析領域を x, y, z それぞれの方向に2m, 4m, 0.2mの格子に分割し、格子内の粒子の平均値として求めている。また、コンター図は大小粒子のz方向の速度差であるため、大きな粒子が同

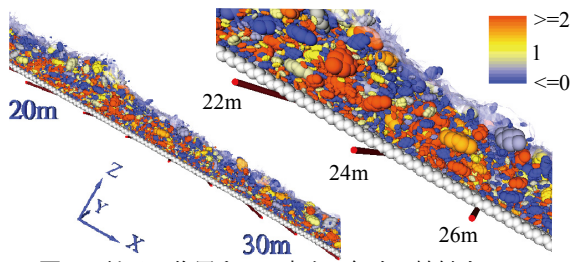


図-7 粒子に作用する z 方向の無次元接触力($t=8.5s$)

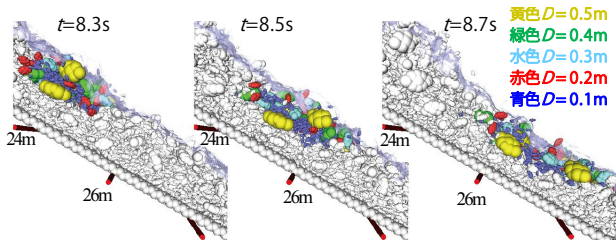
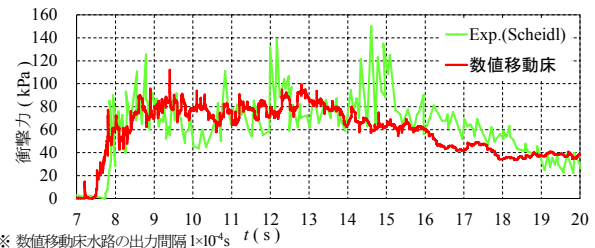


図-8 水面勾配が緩やかになる場の鉛直分級の様子

じ z 位置で流下し、小さな粒子のみ沈降する場合も正の値として示される。図-6より大きな粒子と小さな粒子の鉛直方向の速度差は、ほぼ全体的に生じており、粒子運動が活発な水面付近(水面下1m程度)や、下流に向かって水面勾配が緩やかになる地点($t=6.5s$ の $x=30m$ 付近や $t=8.5s$ の $x=25m$ 付近)で顕著に生じている。水面勾配が緩やかになる区間で大きな粒子が小さな粒子に対し相対的に上昇する要因を調べる。図-7は図-6の $t=8.5s$ の $x=25m$ 付近の状況を調べるため、粒子に作用する z 方向の粒子間の接触力の和 F_z^c を粒子の水中重量の z 方向成分 $(\rho_g - \rho_w)V_g g \cos\theta$ (ρ_g, ρ_w : 粒子と水の密度, V_g : 粒子体積, θ : 水路勾配)で除し(無次元接触力)値毎に色付けたものである。図-7左図の遠景より、無次元接触力は25m上流で全体的に赤色で1より大きく、下流で青色が多く1以下に遷移している。また、右の拡大図より小さな粒子ほど青色となり、小さな粒子は水中重量を支える十分な接触力を得ることが出来ていないことがわかる。図-8は $t=8.3s$ に $x=23m$ から25m, $z=0.8m$ 以上にある粒子について色をつけ、その移動過程を $t=8.7s$ まで追跡したものである。図より小さな粒子が選択的に河床方向に落ち込んでいる。水面勾配が緩くなる地点では、上記のように大きな粒子と小さな粒子の力の差が顕著に生じるため、分級がより進行しやすくなることが確認された。

(3) 平均衝撃力に関する考察

本節では、土石流が構造物に作用する平均衝撃力について考察するため、構造物近傍の運動量保存則により、平均衝撃力の形成要因を調べる。ここで衝撃力とは、構造物が粒子と水から受ける力の和である。図-9に構造物に作用する平均衝撃力の時間変化の解析結果を示す。図は構造物の高さ(3m)と横断幅(4m)で除し応力の次元に換算している。また、図にはマクロチェックとして底面に垂直な構造物の衝撃力を水路実験で計測した Scheidl ら¹⁾



※ 数値移動床水路の出力間隔 $1 \times 10^{-4}s$
 ※ Scheidl らのデータについては、論文中のグラフをトレースして読み取ったため、高周波数成分までは正しく原著のデータを再現できていない。

図-9 平均衝撃力の時間変化

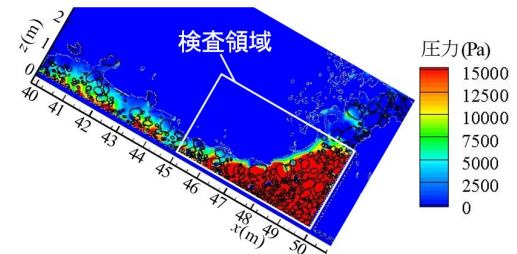


図-10 圧力分布($t=10.5s$)と検査領域の関係

の結果について示す。ここでは衝撃力の値を一定比率で拡大して示した。粒子径などの条件が実験とは異なるため必ずしも一致する必要はないが、本数値実験で得られた波形は、実験で計測された底面に垂直な構造物に作用する衝撃力の波形に近い時間変化を示している。本数値実験の平均衝撃力は $t=9s$ 程度まで上昇し、その後13s付近まではほぼ一定値が続く。 $t=13s$ 以降は、図-5に示すように、土石流の粒子濃度が小さくなるため、衝撃力は減少している。次に図-10に示す検査領域を設定し、検査領域を対象に、 $x(=x_l)$ 方向の運動量保存則(式(7): 検査時間 T で平均化して示した)を構成する各項を解析結果から求め、平均衝撃力の形成要因を調べる。

$$\frac{\int_V \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} dV dT}{T} = \frac{\int_S \rho u_i u_j n_j dS dT}{T} + \frac{\int_S \sigma_{ij} n_j dS dT}{T} + \frac{\int_V \rho g_i dV dT}{T} \quad (7)$$

ここに V は検査領域、 S は検査領域境界面であり、 ρ , u_i は運動方程式(2)に用いるものと同一である。右辺第2項、第3項の面積積分は、分割した境界面毎の諸量の時間積分の和として表すことができる。したがって、式(7)より以下の x 方向の運動量保存式を得る。

$$F_{imp} = F_{in} + M_{in} + F_g + F_b + M_{out} - \Delta M \quad (8)$$

ここに式(7)の左辺より ΔM が、右辺の第1項より $M_{in} + M_{out}$ が、第2項より $F_{in} + F_b - F_{imp}$ が、第3項より F_g が導かれている。各項は、図-11に示す成分に対応し、 F_{imp} は平均衝撃力、 F_{in} は検査面上流端に作用する力、 M_{in} は検査面上流端から流入する運動量フラックス、 F_g は検査面内の土石流に作用する重力、 F_b は検査領域底面に作用する力、 M_{out} は構造物上部から流出する運動量フラックス、 ΔM は検査領域内の土石流の運動量の増加率である。これらの各項の時間変化を解析結果から調べたものを図-12に示す。0.1s毎の出力結果を基に、検査時間 $T=1s$ として整理しており、目的とする衝撃力の中の各成分の増減の傾向が明確に表れている。図の各項の値は、単位横断距

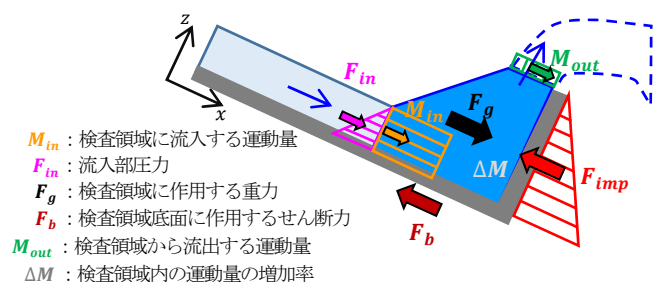


図-11 検査領域内の運動量保存則を形成する成分

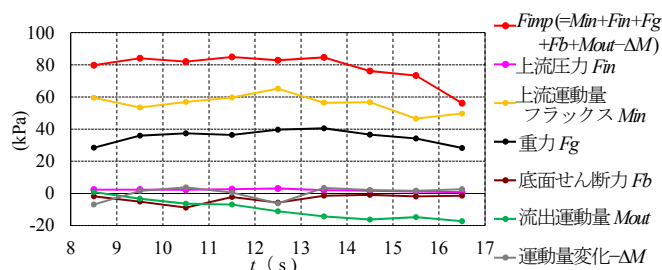


図-12 運動量保存則を形成する成分の時間変化

離，単位高さあたりにの応力の次元に換算したものである。衝撃力が最も大きくなる $t = 12.5$ s では上流から流入する運動量フラックス M_{in} に対し，衝撃力の合計 F_{imp} は 1.3 倍（簡易式(1)の $C_m = 1.3$ に相当）となっており，運動量フラックス M_{in} より大きな衝撃力となっている。 $F_{imp} - M_{in}$ を補う要因として他の項を見ると重力 F_g が M_{in} について正の大きな値を示している。すなわち，図-10 に示すように，河床に平行に近い水面形を持つ土石流が，衝撃部付近では構造物を乗り越える際に変形し，当該部分に作用する重力が衝撃力に大きく作用していることになる。したがって簡易式(1)において係数 C_m が 1 より大きくなる要因は，変形部分に作用する重力を正しく見積もることが出来ていなかったことが主要因といえる。この項は特に急勾配区間で重要となる。例えば，砂防堰堤を土石流が流下する際，越流部では土石流の越流とともに運動量が通過し堰上がりは生じないが，非越流部では堰上がりが想定される。設計では簡易式(1)を用い係数 $C_m = 1.0$ として平均衝撃力が見積もられる³⁾が，上流から接近する土石流の水深から推定される水位より上部まで構造物があり，堰堤直上が急勾配である場合には，堰上がり部に作用する重力には十分留意する必要がある。

(4) 局所衝撃力の考察

土石流に対する構造物の安定性を検討する際には，前節で考察した平均衝撃力に対する検討だけではなく，巨石衝突による局所的に大きな衝撃力に対する検討も必要である。巨石衝突に対する構造物の安定性を考察する為には，巨石の衝突が繰り返し作用する場合に，構造物が所定の機能を発揮できるかどうかを検討する必要がある。本節では，このような検討を行う上で必要となる局所衝撃力の大きさ毎の発生頻度について明らかにする。図-

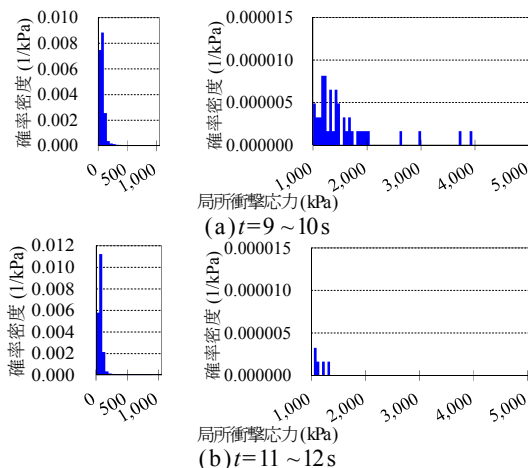


図-13 各時刻の局所衝撃力の頻度分布

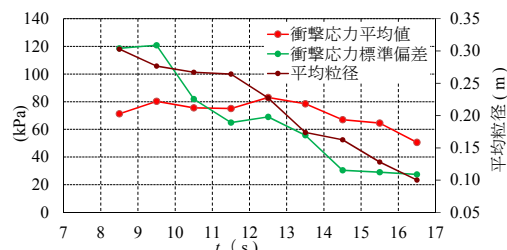


図-14 局所衝撃力の平均値と標準偏差および接近土石流の平均粒径の時間変化

13は構造物に作用する衝撃力を空間について 0.1 m メッシュで平均化し，時間について 0.1 s で平均化した応力を求め，空間的に分布する局所応力の大きさ毎の頻度分布であり，その時間変化を示している。図-9 に示したように平均衝撃力の時間変化は， $t = 9$ s ~ 13 s にかけてほぼ一定となっているが，図-13 に示す 1,000 kPa 以上の局所衝撃力の発生頻度は， $t = 9 \sim 10$ s に対し $t = 11 \sim 12$ s は，大きく減少している。平均衝撃力と局所衝撃力の時間変化の傾向を調べるため，図-14 には，局所衝撃力の平均値と標準偏差の時間変化を示した。図中には，接近土石流の粒径として $x = 40$ m から $x = 45$ m の間の平均粒径の時間変化も合わせて示した。この図より，衝撃力の平均値は， $t = 9$ s から 13 s 程度までほぼ一定となっているが，標準偏差は，衝突の初期から常に減少している。図-12 に示す接近土石流の運動量フラックス M_{in} はほぼ平均衝撃力の時間変化の傾向に近いので，衝突初期から常に減少する局所衝撃力の標準偏差の時間変化の傾向は，接近土石流の運動量フラックスでは説明できない。一方，図-14 に示した接近土石流の平均粒径は，標準偏差と同様に衝突初期から徐々に減少している。このことから，大きな局所衝撃力の頻度の推定には，接近土石流の粒径の見積もりが必要であり，このためには，流下土石流の分級機構の把握が必要であることを示している。

次に局所衝撃力の値を考察する。衝突時には圧縮のみならず，衝突部周辺ではせん断力も作用する。コンクリートのせん断応力の強度を 530 kPa¹⁰⁾ とすると，解析結果では 1,000 kPa 以上の局所衝撃力も見られる（図-13 参

照) ことから、コンクリートは局所的には破壊を生じることが想定される。一方、これらの衝撃は、一度に構造物全体には作用しない。そのため、例えば数値移動床水路を活用するなどして局所衝撃力の発生頻度を推定し、繰り返し載荷に対する構造物の安全性評価法を検討していくことも考えなければならない。

本研究は、衝撃力と運動量の関係を明確な条件のもと考察するため固定床条件で解析を行った。実際の土石流は河床の土砂を巻き込んだ流れとなる。今後は、移動床の条件でも数値実験を実施し、土石流の流下過程と構造物に作用する衝撃力の理解を深めたい。

5. 結論

数値移動床実験を用い、土石流の流下時の水理諸元の変化、分級機構及び構造物に作用する平均衝撃力と局所衝撃力を計測した。これらの検討より、以下の主要な結論を得た。

- 1) 構造物に平均的に作用する土石流の衝撃力は、上流から接近する運動量フラックスのみでは過小評価され、構造物を乗り越える土石流に作用する重力の影響を正しく考慮することが重要である。この力の発生要因を考慮すると、接近土石流の水深から推定される水位よりも高い位置まで堰上がりが可能となる構造物や、構造物前面の斜面勾配が大きな場合に、上流から接近する土石流の運動量フラックスよりも大きな平均衝撃力が構造物に作用すると考えられる。
- 2) 構造物に接近する土石流の平均粒径が大きいほど、石礫粒子衝突により生じる大きな局所衝撃力の発生頻度が高くなることを確認した。また、土石流の流下過程では、大きな粒子は分級により先端に集まる傾向を有するため、大きな局所衝撃力が作用する時間は、初期の大きな粒子が衝突する時間になると推定される。
- 3) 大きな粒子と小さな粒子の鉛直方向への移動の速度差

を調べた結果、大きな粒子の浮き上がり現象は、特に下流に向かって水面勾配が緩やかになる区間で活発に生じていることを明らかにした。

参考文献

- 1) Scheidle, C., Chiari, M., Kaitna, C., Müllegger, M., Krawtschuk, A., Zimmermann, T. and Proske, D.: Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach, *Surveys in Geophysics* Vol.34, pp.121-140, 2013.
- 2) 石川信隆, 井上隆太, 林建二郎, 長谷川祐治, 水山高久: 土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2006.
- 3) 土石流・流木対策設計技術指針解説, 国土技術政策総合研究所資料, 第 905 号, 2016.
- 4) Vowinkel, B., Kempe, T. and Fröhlich, J.: Fluid-particle interaction in turbulent open channel flow with fully-resolved mobile beds, *Advances in Water Resources*, Vol. 72, pp. 32-44, 2014.
- 5) Suzuki, T. and Hotta, N.: Development of modified particle method for simulation of debris flow using constitutive equations, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 9. No. 4, 2016.
- 6) Fukuoka, S., Fukuda, T. and Uchida, T.: Effects of sizes and shapes of gravel particles on sediment transports and bed variations in a numerical movable-bed channel, *Advances in Water Resources*, Vol.72, pp.84-96, 2014.
- 7) 福田朝生, 福岡捷二: 土石流水路実験結果を用いた数値移動床水路による高濃度粒子群と水流の力学的相互作用の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_859-I_864, 2016.
- 8) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久: 修正 MPS 法による土石流の段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会, Vol.63., No.6 pp.32-42, 2011.
- 9) 前田健一, 舘井恵, 福岡雅俊: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.
- 10) 長野県土木設計基準 第 3 章砂防施設的设计, 2014.11.1

(2016.9.30 受付)

NUMERICAL MOVABLE-BED EXPERIMENT ON GRAIN SIZE SEGREGATION OF DEBRIS FLOWS AND IMPACTS ON STRUCTURES

Tomoo FUKUDA and Shoji FUKUOKA

Mixed-size debris flow impact against a vertical structure was simulated by a numerical movable bed channel. The simulation result brought that the average impact on the structure was affected by the gravity force on debris flow deforming in front of a structure as well as the momentum flux of debris flows coming from the ustream. Momentum flux of the simulated debris flow varied moderately with respect to time. However, the particles of simulated debris flow segregated while flowing down and large particles gathered around the front of the flow. The frequency of large impact of particle collisions was therefore high in the initial stages of the impact and become low immediately due to decreasing of size of coming particles. It was clarified from differences of vertical velocity between moving large particles and small particles that large particles moved upward actively where the flow surface transitioned to mild slope in the downstream direction.