

14. 流水を考慮した DDA による落石挙動の基本検討

Basic study of falling rock behavior using DDA considering a influence of current

○佐々木勝司, 佐々木猛, 河又健時, 太田守彦 (サンコーコンサルタント (株))
村上和哉 (埼玉大学), 大西有三 (京都大学大学院)

1. はじめに

我が国は地殻変動帯に位置し, 急峻な山地と軟弱な地質から構成されている。そのため, 崖崩れ, 土石流, 地すべりといった自然地盤災害が多発している。これらは台風や集中豪雨に伴って非常に大規模な被害を及ぼすこともある。

従来, 節理性岩盤急崖斜面からの落石について, DDA (不連続変形法) を用いてその挙動を検討し, 対策工設計に適用している。落石現象は急崖斜面から空中を落下するのみではなく, 比較的緩斜面であるが流水のある沢地形を落下することもあり, この場合に沢の流水が落石運動に影響を及ぼすことが考えられ, 流水に土粒子を含んだ流水による落石挙動への影響を検討し, 安全かつ経済的な落石防護工の設計を実施する必要がある。

本報告は, 流水の影響を受けた落石の挙動を定式化し, 流水の有無, 流水の単位重量および斜面勾配を変化させた落石挙動の基礎検討である。

2. 流水を考慮した DDA

流水の影響は, 図-1 に示すように, 流水中の落石にはその運動エネルギー以外に, 浮力 (揚力) と流体力および抗力が作用するものとしている。

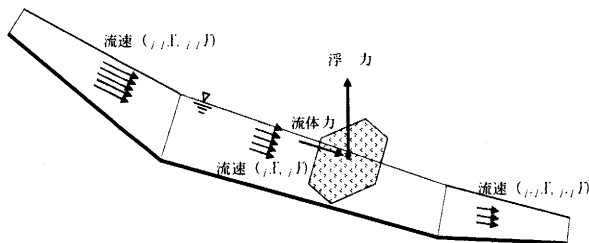


図-1 流水による浮力と流体力

このときの解析・仮定条件は以下の①～⑧である。

- ①流水の領域は, 流速により領域を区分し, 解析斜面内の任意区間に任意の水深で設定する。
- ②落石が流水の領域に入っているかを自動判定する。
- ③落石が流水領域内に存在する場合, 流水中の落石の面積を求める。
- ④この面積に泥水の単位重量を乗じた値を, 落石の重心に浮力として与える。
- ⑤流水の流速は, Manning の平均流速公式を適用する。既往文献¹⁾より, 流速は, 粗度係数 n (本研究では山地水路であると仮定して 0.05 に設定), 径深 R (本研究では幅 1m 深さ 1m の矩形水路を仮定), 動水勾配 i (流域の斜面勾配より算出) の関数となり, 流水領域内で適用する。
- ⑥落石の速度と流水の速度差を, 流体力として, 落石の重

心に作用させる。

⑦この場合の有効面積は, 落石が水中に没している面積の等価な辺長 (面積の平方根) を仮定する。

⑧流体力には抗力係数を乗ずる。

流体力 (F_D) は次式¹⁾で定義する。

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_w A V^2$$

C_D : 抗力係数

ρ_w : 流体の単位重量

A : 流れ方向の投影面積

V : 流速

3. 解析条件

3.1 解析断面モデル

本検討では, 二つの傾斜面と水平面とで構成された解析モデルを定義する。図-2 に示すように, 落石は上位の急勾配の上位斜面から落下し, 流水領域である下位斜面に入って流水の影響を受けるという条件であり, 落石は流水領域より 15m 上部から落下させる。設定した下位斜面勾配に対して斜面長 100m の区間を流水領域とし, 水深は 1m とする。また下位斜面末端の水位面からは徐々に水深を減じ, 下位斜面末端から 50m の地点で水深が 0 となるよう一次関数的に低下させる。落石ブロックは対辺の距離が水深と等しい 1m の正八角形ブロックとした。

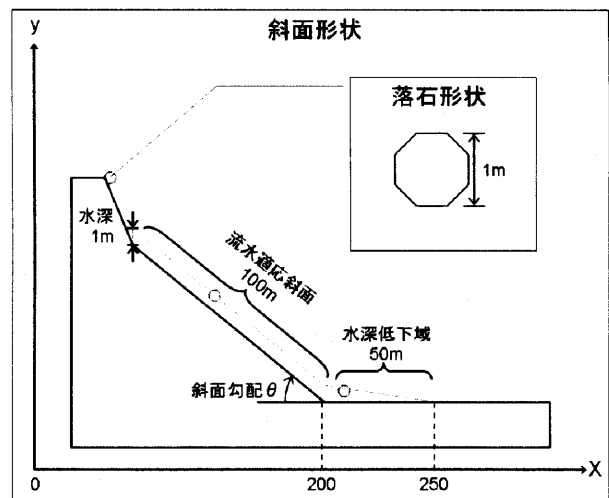


図-2 流水を考慮した落石モデル

3.2 パラメータスタディ

本研究では, 流水の影響を検討するため, 流水がある場合とない場合の落石挙動について検討する。また流水がある場

合は、流水の単位重量と斜面勾配の変化による影響について検討する。

下位斜面勾配は 5° 、 10° 、 20° 、 40° の4ケース、流水の単位重量は10、12、14、16 (kN/m^3)の4ケース、および流水を考慮しないケースとし、これらの組み合わせにより表-1に示すように解析ケースを設定している。

表-1 解析ケース

		斜面勾配 θ			
		5°	10°	20°	40°
流水あり	単位重量 10kN/m^3	Case01	Case05	Case09	Case13
	単位重量 12kN/m^3	Case02	Case06	Case10	Case14
	単位重量 14kN/m^3	Case03	Case07	Case11	Case15
	単位重量 16kN/m^3	Case04	Case08	Case12	Case16
流水なし		Case17	Case18	Case19	Case20

通常、水の単位重量には 10 kN/m^3 を用いるが、ここでは土粒子や小礫を含むような混濁流を想定し、流水の単位重量を設定している。既往文献²⁾による上々堀沢での石礫型土石流における実測値では密度 $=15\sim18.5\text{ kN/m}^3$ および蔣家溝での粘性土石流における実測値 $17\sim23\text{ kN/m}^3$ といった参考値があるが、ここでは単一の落石(=単位重量 25 kN/m^3)を含む流水となることを考慮し、参考値よりやや低い値を設定した。これより(斜面勾配4ケース)×(流水なし1ケース+流水の単位重量4ケース)=20ケースでのモデル解析を行う。

3.3 物性値の設定

DDAにおいて物性値は、本来各種試験により設定すべきであるが、本研究ではパラメータスタディーであることから、岩盤等級区分から推定する物理定数の範囲表³⁾を用いる。落石と岩盤斜面とを区別し、分類表より解析に必要な各物性値を決定し、表-2に示す。本落石解析での落石の粘着力は0とする。

表-2 入力物性値

	地盤	落石
ジョイントの摩擦角($^{\circ}$)	35	40
ジョイントの粘着力(kPa)	0	0
単位重量(kN/m^3)	25	25
ヤング率(GPa)	8.0	2.0
ポアソン比	0.25	0.25
粘性係数	0.1	0.1
速度エネルギー比	0.64	0.81

4. 解析結果

4.1 流水の単位重量によるX方向速度

流水の単位重量の相違により、X方向速度分布がどう変化するかを斜面の勾配毎にまとめ、図-3(1)～(4)に示す。

○斜面勾配 5° では全落石が上位斜面下端に達し、そこから落石は流水の影響を受けるが、下部斜面の10m以内の位置で停止している。流水の影響を若干受けるが、最終到達距離の差はない。

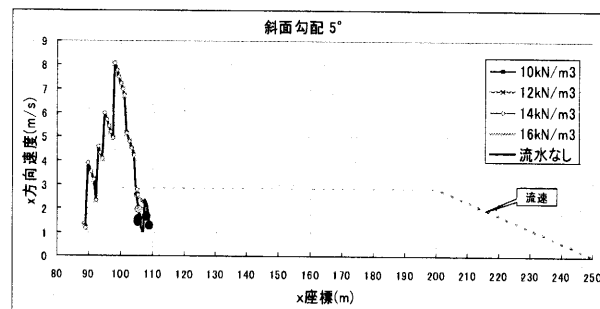


図-3(1) 斜面勾配 5° の時のX方向速度

○斜面勾配 10° では「流水なし」および流水の単位重量 12 kN/m^3 のケースを除いては水平面まで落石が到達している。流水領域では、落石が跳ねている場合にX方向速度が増加し、斜面と接触するときに速度が低下している。流速は落石のX方向速度の上限値に近い値を示している。

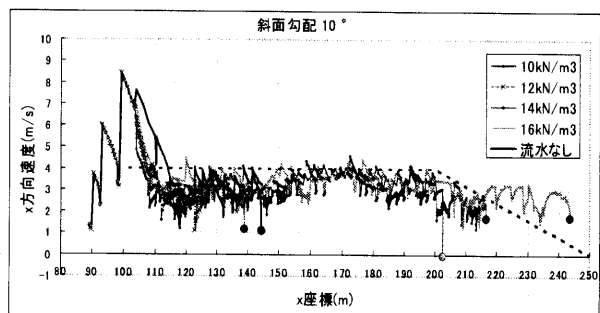


図-3(2) 斜面勾配 10° の時のX方向速度

○斜面勾配 20° では、流水がある場合に水平面まで全落石が達しており、ほぼ単位重量に比例して到達距離が大きくなっている。また、流水がない場合は下位斜面のほぼ中央で停止している。下位斜面の流水領域でのX方向速度は、流速を少し下回る速度である。

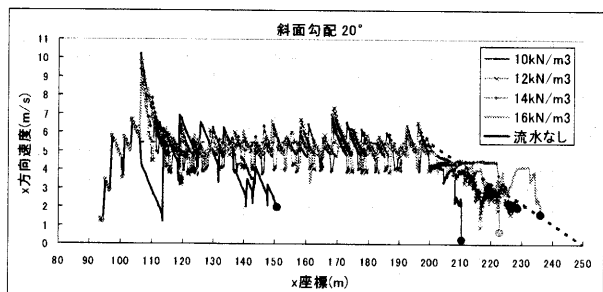


図-3(3) 斜面勾配 20° の時のX方向速度

○斜面勾配 40° では、全ケースにおいて下位斜面から水平面部まで落石が達し、その到達距離も単位重量に比例している。流水なしのケースでは、水平面到達後、10m程度で停止している。下位斜面での「流水なし」のX方向速度は、

流水があるケースと比較して大きなX方向速度を示す。また流水領域における落石のX方向速度は、流速がほぼ中央値となる速度である。

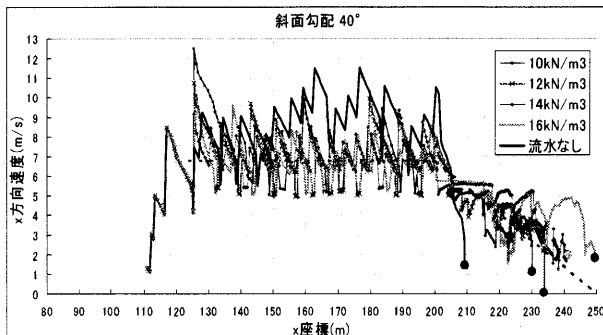


図-3(4) 斜面勾配 40° の時のX方向速度

4.2 斜面勾配によるX方向速度

下位斜面の勾配の相違により、X方向速度分布がどう変化するかを流水の単位重量毎にまとめ、図-4(1)~(4)に示す。

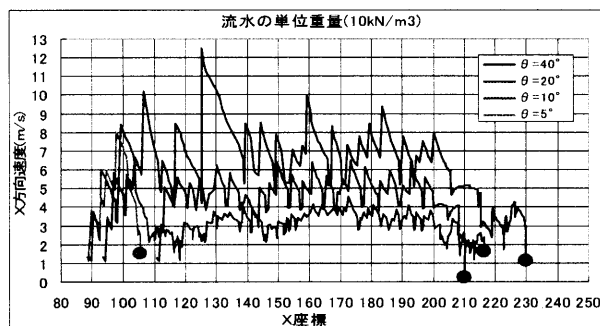


図-4(1) 流水の単位重量 10kN/m³ の時のX方向速度

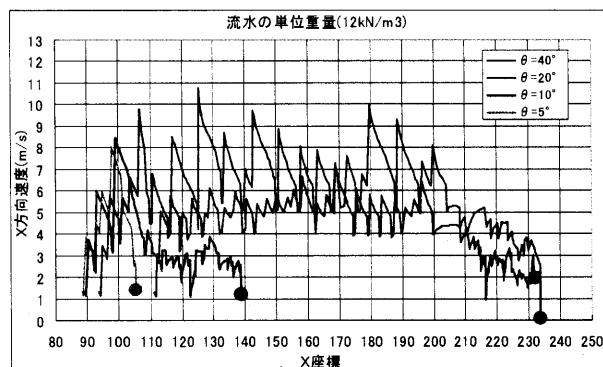


図-4(2) 流水の単位重量 12kN/m³ の時のX方向速度

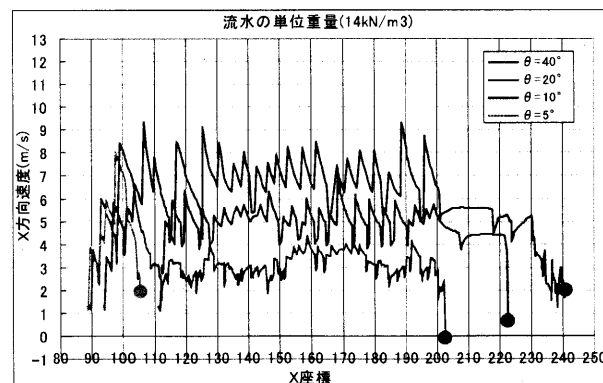


図-4(3) 流水の単位重量 14kN/m³ の時のX方向速度

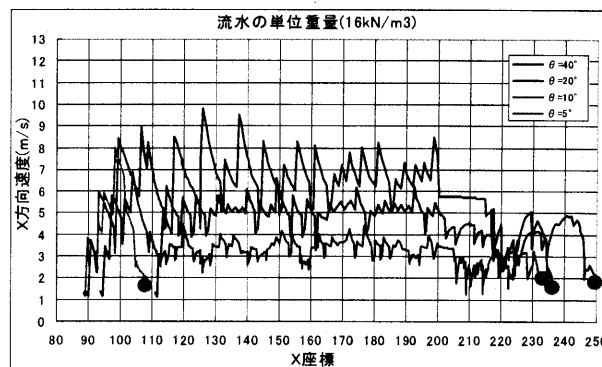


図-4(4) 流水の単位重量 16kN/m³ の時のX方向速度

- ①流水の単位重量が同一であれば、斜面勾配が増加すれば、相対的にX方向速度も増加する一般的傾向である。この傾向は流水の単位重量が変化しても同様の傾向を示す。
- ②流水領域におけるX方向速度の振幅を比較すると、傾斜勾配 θ が大きくなるにつれ速度振幅も大きくなり、これは落石の速度増加により、落石が斜面との接触後に強く反発している結果と考えられる。
- ③落石のX方向速度は、落石が斜面に接触するか否かで速度は大きく変化するが、下位斜面での落石のX方向平均速度を求め、図-5に示す。

落石のX方向の平均速度においても、斜面勾配の増加に伴いX方向の平均速度が確実に増加しているのに対し、

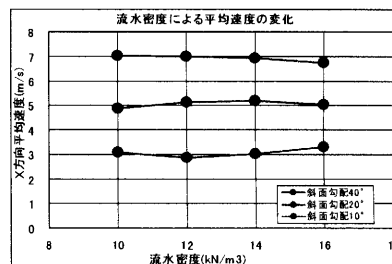


図-5 斜面勾配毎の平均速度

流水の単位重量の変化に対しては顕著な平均速度の増減が認められない。これは、流水の速度が地形勾配の関数であり、落石に作用する流体力が、地形条件に大きく左右されることを示している。

4.3 流水の単位重量による落石到達距離

落石あるいは岩盤崩壊が崩落に伴いどこまで達するかを予測することは、対策工を検討する上で重要なことである。流水の単位重量と斜面勾配の関係から、落石の到達距離を検討した結果を図-6に示す。本研究においては、落石のX方向速度が 2m/s 以下を示し、かつ十分なステップ数が続いたときおよびX方向速度がマイナス（落石が山側への移動）となったときを落石の停止と判断している。

図-6から、以下のことが言える。

- ①流水の有無による落石到達距離の差は、斜面勾配 $\theta=10^\circ$ 、 20° で顕著であり、流水の影響が強く作用している。斜面勾配 $\theta=40^\circ$ になると、この差は減少し、到達距離に流水の影響が軽減しているように判断できる。
- ②流水の単位重量毎の落石の到達距離は、斜面勾配 θ の増加に伴い到達距離が大きくなっている。ただし、流水の単位重量が 10kN/m³ では、斜面勾配 10° と 20° が逆転してい

る。これは、落石形状が八角形のために、落石と斜面との接触時の形状に関与している可能性がある。

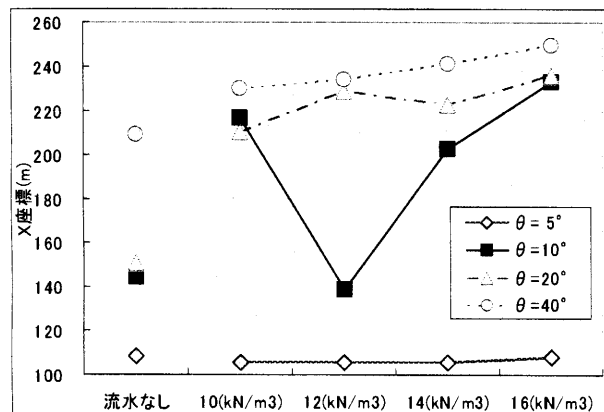


図-6 落石の到達距離

- ③流水の単位重量=10kN/m³を除けば、斜面勾配 θ の増加に伴い、最終到達距離も大きくなり、かつ、流水の単位重量の増加に伴う最終到達距離は、データに多少のばらつきはあるが増加の傾向が見られる。
- ④斜面到達直後に停止した $\theta=5^\circ$ の結果を除けば、緩傾斜および流水の単位重量が小さいときに最終到達距離のばらつきは大きくなり、流水の単位重量が大きい傾斜地形ではばらつきも少ない結果である。
- ⑤斜面勾配 $\theta=40^\circ$ 流水の単位重量 10kN/m³での最終到達距離は、斜面勾配 $\theta=10^\circ$ および 20° における流水の単位重量 16kN/m³での最終到達距離とほぼ同じ値となっている。よって流水の単位重量が最終到達距離に与える影響は大きく、流水の単位重量の設定を厳密に行う必要がある。

4.4 落石の運動エネルギーによる比較

流水の単位重量と斜面勾配が、落石のX方向速度と到達距離に及ぼす影響を検討している。これらの結果から、落石対策工の設置箇所の選定に有効な情報を得ることができる。落石防護工の設計においては、落石の運動エネルギーを用いるので、運動エネルギーによる検討を行う。

落石による全運動エネルギーは線速度エネルギーと回転エネルギーの和から得る⁴⁾。

$$E = E_v + E_r$$

$$= (1/2) * m * v^2 + (1/2) * I * \omega^2$$

ここで、 E ：落石の全運動エネルギー

E_v ：落石の線運動エネルギー

E_r ：落石の回転エネルギー

m ：落石の重量

I ：落石の回転モーメント

ω ：回転角速度 である。

斜面勾配 40° において流水の単位重量の変化による落石中の運動エネルギー変化を図-7に示す。

「流水なし」の場合は、落石が斜面に接触することによるエネルギー収支が大きく、大きく跳ねていることを示している。流水がある場合は、流水による流体力が落石の運動エネルギー変化を緩衝している。また流水の単位重量が大きいほど、運動エネルギーの緩衝作用は大きく、運動エネルギーは

より一定値を示す傾向があり、また、落石の最終到達距離が長くなる傾向がある。

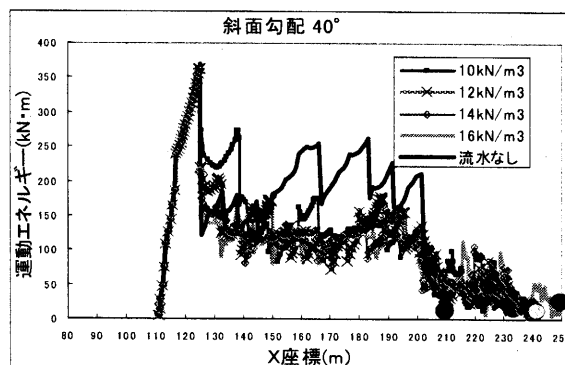


図-7 流水の単位重量による運動エネルギー

5. まとめ

本研究では、落石挙動に及ぼす流水の影響をDDA（不連続変形法）により検討している。斜面勾配を 5° 、 10° 、 20° 、 40° に、また、流水の単位重量を10, 12, 14, 16kN/m³に変化させてパラメータスタディーを行っている。落石形状は1mの正八角形、斜面長は100m、水深は1mとしている。

斜面が緩傾斜（本解析では傾斜 5° ）の場合は、流速が遅いために、流水の影響は認められず、斜面途中で停止する結果である。しかし、斜面勾配が急傾斜になるに伴い、流速も増加するので落石のX方向速度は増加する。

落石のX方向速度は、流水の速度に近い値を示し、斜面勾配が急になるにつれて落石速度が流速を上回る傾向がある。しかし、同一斜面勾配であれば流水の単位重量は、落石のX方向速度にほとんど影響を及ぼしていない。

流水の有無が落石到達距離に及ぼす影響は、緩傾斜および急峻な斜面では比較的少ないが、中間的な斜面勾配（本研究では斜面勾配 10° 、 20° ）で顕著である。ただし、斜面勾配が増加するにつれ到達距離は大きくなる。

流水の単位重量の増加に伴い、落石の到達距離は増加し、その影響度は多大である。

流水の有無が落石の運動エネルギーに影響を及ぼし、流水がある場合には落石の運動エネルギー変化を緩衝している傾向があり、流水の単位重量が大きいほどこの緩衝作用は大きい。

本研究により、流水は落石の運動エネルギーを平滑化し、低減する作用が認められるが、落石の到達距離を延ばす作用があると考えられる。

今後、多くの実例に適用してより精度を向上させる必要があり、落石群かつ形状の異なる落石に適用し、落石相互の干渉と挙動も検討する必要がある。

参考文献

- 1) (社) 土木学会: 水理公式集 [平成 11 年版]
- 2) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社
- 3) 吉中龍之進, 桜井春輔, 菊池宏吉: 岩盤分類とその適用
- 4) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000