

II-108

土石流の相似律に関する考察

関西電力（株）正員 中村博久，正員吉川 太，正員副田悦生
 関電興業（株） 正員松下 寛
 （株）新日本技術コンサルタント 正員大概英樹

1. はじめに： 山間部の急傾斜地や扇状地への構造物立地に際しては，土石流災害が危惧され，計画段階において対土石流安全性の検討を実施し，設計・施工へと反映させなければならない。対象となる地点の地形条件を考慮した3次元的な土石流の流下・堆積現象を評価するためには，模型実験による検討が有効な手段として適用される。模型実験の解釈においては，現象の相似性が必ず問題となるが，土石流現象の場合，流れの抵抗や侵食・堆積機構等に未解明な点があり相似律について明らかにされていない。本報告は既往の運動モデルから得られる相似条件について考察するとともに，2次元水路における基礎実験を実施し，土石流実験の相似律について検討した内容についてまとめたものである。

2. 相似パラメータの抽出： 芦田・江頭¹⁾によると，土石流の運動量保存則は次式で与えられる。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - g \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho-1)h}{(\sigma/\rho-1)C+1} \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \frac{v \cdot D}{C_* \cdot h} - \frac{(\sigma/\rho-1)Cg \cos \theta}{(\sigma/\rho-1) \cdot C+1} \cdot \mu_k - \frac{v^2}{\{(\sigma/\rho-1)C+1\}h} \cdot f_b \cdots (1)$$

ここに， v ：断面平均流速， t ：時間， x ：流下方向距離， g ：重力加速度， θ ：河床勾配， h ：流動深， σ および ρ ：固相および流体相の密度， C ：土石流濃度， C_* ：河床堆積物濃度， μ_k ：動摩擦係数， f_b ：抵抗係数， d ：粒径であり， f_b は C および h/d の関数である。また， D は堆積速度であり，土石流運動諸元および θ ， C_* によって決まる。いま，各パラメータの代表量を $v_0, t_0, L, \dots$ とし， $v=v_0 v'$ ， $t=t_0 t'$ ， $x=L x'$ ， $h=L h'$ ・・・のように表示し，(1)式を v_0^2/L で無次元化すると次のような相似パラメータを得る。

$$\textcircled{1} v_0^2/gL, \textcircled{2} \theta_0, \textcircled{3} \left\{ -\frac{(\sigma/\rho-1)}{(\sigma/\rho-1) \cdot C+1} \right\}_0, \textcircled{4} C_0, \textcircled{5} \frac{D_0}{v_0 C_{*0}}, \textcircled{6} \mu_{k0}, \textcircled{7} \{(\sigma/\rho-1) \cdot C+1\}_0, \textcircled{8} f_{b0}$$

実物と模型において現象が相似であるためには，上述のパラメータが両者で一致する必要がある。すなわち模型において， $\textcircled{1}$ についてはフルード数 $F_0(=v_0/\sqrt{gL})$ が一致する必要がある， $\textcircled{2}$ については河床勾配（地形形状）が， $\textcircled{3}$ ， $\textcircled{4}$ ， $\textcircled{7}$ は土石流濃度および砂礫比重が一致することが要求される。 $\textcircled{6}$ については μ_k を一致させる必要がある， $\textcircled{5}$ ， $\textcircled{8}$ は C_{*0} とその他の相似パラメータが一致しておれば自動的に相似性が満足される。

3. 2次元実験による検討

3.1 実験方法： 実験水路は長さ4 mの上流側流下用水路と長さ3 mの下流側堆積用水路（両者とも幅10 cm 矩形断面で水路床は実験砂を貼り付けた。側壁は透明アクリル製で挙動観察が可能である。）とかなり，接続点でそれぞれ独立に勾配を変化できる構造となっている。

実験は，上流側水路勾配（ θ_u ）を 18° とし，上流端より給水しながら，給砂装置を用いて所定の濃度（ $C=0.4$ ）になるようなほぼ均等な粒度分布を示す砂を給砂し，表-1 実験条件および流動深測定結果定常な土石流を発生させた。下流側水路勾配（ θ_d ）は 4° ， 6° および 8° に設定し，ビデオカメラと35 mm スチールカメラにより，上流水路流下中の流動深（ h ）と下流水路での堆積形状を測定することとした。今回の実験は，流動深と堆積形状に及ぼす粒径比の効果を調べるために2種類の材料を用いて表-1に示す条件で実施した。

材料	d (mm)	σ/ρ	μ_k	$\frac{q\tau}{(\text{cm}^2/\text{s/cm})}$	h (cm)
川砂	1.4	2.65	0.601	150	1.4
	2.8	2.65	0.610	425	3.0
軽量骨材 (メグライト)	1.4	2.02	0.603	150	2.0
	2.8	2.02	0.607	425	3.2

土石流流量 q_r はフルード則①を念頭に置いて与えた。この時、 θ (②) と C (③, ④, ⑦) および σ/ρ は各材料毎にはほぼ一致しており、測定結果から C^* (⑤, ⑧) も一致している。 μ_k (⑥) についても各ケースとも同一と見なすことができよう。なお、 μ_k については芦田・江頭ら²⁾によると $\mu_k \approx 0.8 \tan \phi_r$ (ϕ_r : 安息角) でほぼ評価できることが報告されている。

3.2 検討結果

○土石流流動深： 実験が相似性を保っているとすれば $d=2.8\text{mm}$ に対する流動深は $d=1.4\text{mm}$ のそれと比べ2倍になるはずである。

表-1 に示す実験結果では、川砂の実験ではこの関係がほぼ満足されているが軽量骨材を用いた実験で上記の関係が成立しているとは言い難い。この原因は定量的には不明であるが、軽量骨材は川砂に比べ吸水性が高く、粒径（比表面積）の異なる材料の吸水率の違いによって濃度や比重変化の程度、さらには、 μ_k への影響などが考えられる。

○土石流堆積形状： 一例として $\theta_d = 4^\circ$ の時の実験における堆積形状を図-1 に示す。《対象時点は粒径比に応じてフルード則に対応させ、形状比較は $d_m=1.4\text{mm}$ の実験を縮尺=1/50, $d_m=2.8\text{mm}$ を1/25とした想定現地スケールで表示した。》

図より堆積形状の相似性はいずれの材料においてもある程度認められる。軽量骨材のケースが堆積表面勾配が小さいのは σ/ρ が小さいためである。これらのことから、縮率の異なる模型実験では前述の相似パラメータを合わせるによりほぼ同一の結果が得られると考えられる。しかしながら次のような問題点もまだ残っている。

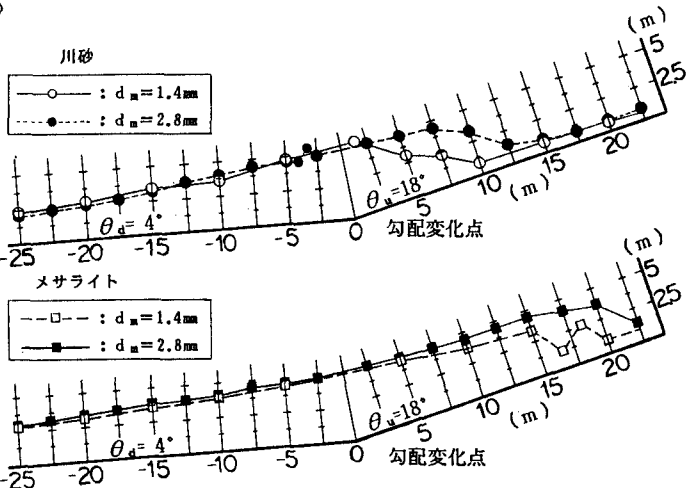


図-1 想定現地スケールに換算した堆積形状比較

- i). 土石流堆積過程では、流水と堆積層との間の水収支にかなり影響を受けるが、材料の透水性に関する相似が満たされていない。
- ii). μ_k 等の材料特性が粒径によって変化することや粒径の不均一性など実験条件としてコントロールすることが困難なものがある。
- iii). 粘土から巨礫を含むような材料を用いた場合には固相と流体相とを分離することが困難である。

4. おわりに： 今回土石流の相似性に関する考察により運動モデルから得られる相似パラメータを抽出し、相似パラメータを合わせた2次元実験によりある程度の相似性が確認された、しかしながら実際の土石流諸元を考え合わせると材料特性の面から実験検討手法についてさらに考察が必要であり、今後の課題である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、多大な御指導を受けた京都大学防災研究所教授芦田和男・助教授江頭進治両先生に心より謝意を表する次第である。

参考文献：1). 芦田・江頭・佐々木；斜面崩壊の発生と土石流の流動機構，京都大学防災研究所年報第30号B-2, PP. 507-526. 1987

2). 芦田・江頭・神矢；斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究，京都大学防災研究所年報第37号B-2, PP. 331-340. 1984