

建設省土木研究所 ○鈴木 浩之 水山 高久 原 義文

## 1、はじめに

土石流に対する砂防施設の一般的な配置としては、上流部に砂防ダムを設け、その貯砂容量によって土石流を捕捉するとともに、ダム下流に導流工を配置して、後続流を安全に流下させようとするものである。しかしながら、土石流の頻発する溪流において常に貯砂容量を確保することが困難な場合には、砂防ダム、床固に流路の固定及び土石流の減勢の効果を期待することもある。このような土石流対策の砂防ダム、床固工の設計の際には土石流の通過を考慮することが必要であるが、土石流が落差部を落下する場合の挙動やエネルギー得失等についての研究はあまりなされていない。しかし、実際には数多くの土石流対策施設が施工されており、その設計には従来の水のみ又は少量の土砂を含んだ流れの基準を適用している。そこで、水の場合の基準で作られた構造物が安全なものであるかを含め、落差部における土石流の挙動を実験水路内で調べ、いくつかの知見を得たので、ここに発表する。

## 2、実験の概要

実験に用いた水路は、幅20cm、全長7mの両面アクリル張りの木製水路で、水路床には実験使用砂（ $d_m=1.7\text{mm}$ 、一様砂）と同じ砂を粗度として張りつけた。実験は固定床と移動床について行ない、水路勾配は固定床の場合20, 25, 30度、移動床の場合15度とした。なお、勾配は落差の前後で同一である落差は、図-1に示すように、上流4m、下流3mの水路の接続する点に設け、固定床の場合、鉛直方向の

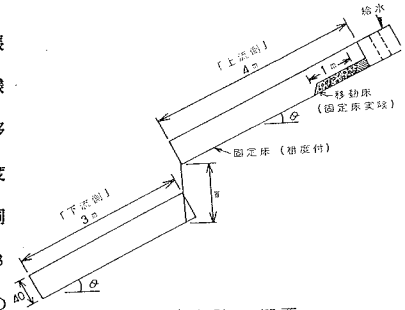


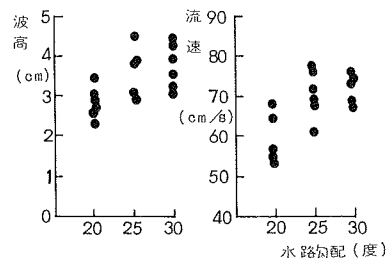
図-1 実験水路の概要

高さで 2.5, 5, 10, 20, 30, 50cm の 6 種類、移動床の場合 20, 30, 50cm の 3 種類とした。土石流は、固定床の場合、水路の上端に厚さ10cm、長さ1mの土砂を敷き、予備実験の結果最も安定した土石流を発生させることのできた  $0.36\text{ l/s}$  の水を与えて発生させた。移動床の場合は、水路全区間に厚さ10cmに土砂を敷き、水路上端より  $0.5, 1.0, 1.5, 1.8\text{ l/s}$  の 4 種類の流量を与えて土石流を発生させた。測定は、水路側面より VTR カメラ 2 台を用いて土石流の流動状況を撮影し、実験終了後、これを解析して、土石流の状況、波高、流速等を読み取った。

## 3、実験結果と考察

## 3、1、発生した土石流の諸元

固定床実験で、上流側の水路で発生した土石流が落差部を通過する直前の波高及び流速と水路勾配との関係を図-2に移動床実験で発生した土石流の波高及び流速と給水量の関係を図-3に示した。固定床の場合、波高、流速ともに勾配の



変化とともに増加する傾向にある。移動床の場合、流速は給水量の増加に従って増加し、波高は給水量の増加に従って低下する傾向にある。

### 3、2、落差部での土石流の挙動

#### 3、2、1、固定床での挙動

固定床実験において、発生させた土石流が落差部でどのような挙動を示すかを、水路勾配30度、落差30cmの流動状況を示した図-4を例として説明する。

上流水路で等流状態になった土石流は、ほとんど流速と波高を変化させないで落差部に達し、落下によって加速される。落下する土石流は、落差が20cm以上の条件では、落下距離の増加に伴い分散し厚さを増している。これは、観察の結果から落下中に土石流の密度が減少しているためと考えられる。また落差が20cm以下の場合は、土石流は分散することなく着地点に達している。着地点に達した土石流の先頭部は、停止することなく流下し、着地後の波高も、落下前とほぼ変わらない。落下点より下流では、比較的短い距離で元の流速に回復している。このように、短い距離で回復しているにも係わらず、すべてのケースで、落下前の流動状況とほぼ変わらない流況を示している。

#### 3、2、2、移動床での挙動

移動床実験では、土石流は、上流より与えた給水量によって異なる挙動を示した。1.0ℓ/s以下の給水量の場合、着地点で一旦堆積して、その後流動するのに対し、それ以上の流量では堆積せずにそのまま流下した。堆積せずに流下するものについては、先に述べた固定床の場合とほぼ同様の挙動を示した。着地点に一旦堆積が発生する例として、給水量0.5ℓ/s、落差50cmの条件での土石流の挙動を図-5に示す。土石流が着地点に達するまでの挙動は、固定床での実験結果とほぼ同様であるため、着地点での土石流の挙動についてのみ示した。

落下した土石流は、河床を3cm程度洗掘して堆積する。堆積は、上流からの土石流の流入により、徐々に大きくなり、図中に矢印で示す、下流側の堆積勾配が35度を越えたあたりから2~6cmの厚さで崩れるように流動し始める。堆積物は流動を開始した後、速度を増減しながら流下する。このように、移動床で流量が小さい時に、落下点に土石流が堆積するのは、河床が十分飽和されていないために、水分が河床に浸透することによるものと考えられる。実験水路の場合、この点が過大に現われる。浸透性の低い材料や実際の土石流の場合これほどの減速はないと考えられる。しかし、実際に昭和53年に焼岳上堰沢に発生した土石流で、土石流が落差部で減速した例も見られる。

### 3、3、落差部での流れの諸元

固定床及び着地点で堆積が生じない移動床実験の結果を清水の場合と比較して検討する。図-6は以下に示す式中の記号を説明したものである。

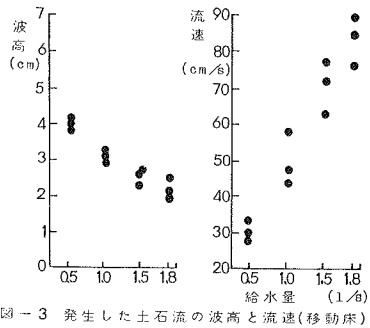


図-3 発生した土石流の波高と流速(移動床)

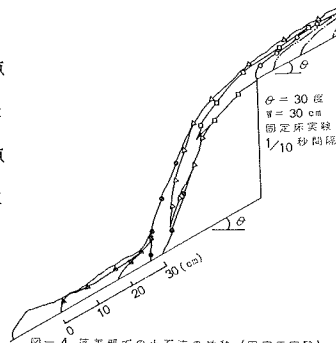


図-4 落差部での土石流の挙動(固定床実験)

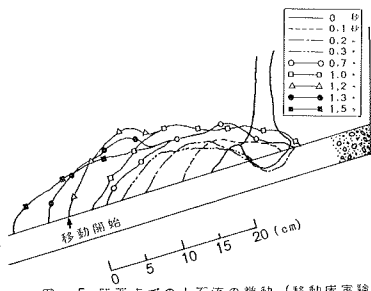


図-5 落下点での土石流の挙動(移動床実験)

3. 3. 1. 飛距離

清水の場合、落差部上流から落下点までの距離は上流水路での水深が  $\alpha hc$  ( $hc$ : 限界水深) で与えられるならば、落差  $W + \alpha hc$  の位置から水平方向に放出された質点の到達距離で与えられる<sup>1)</sup>。

$$\frac{L}{W} = \frac{\sqrt{2}}{\alpha} D^{1/6} (1 + \alpha D^{1/3})^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\alpha$  は上流水路でのフルード数の関数で、水路勾配が緩勾配

ならば、 $\alpha = 0.715$  となることが実験的に確かめられている。D はドロップ数 (落下指数: Drop Number) で、

$$D = q^2 / g W^3 \dots (2)$$

定義される無次元量で、 $q$ : 単位幅流量、 $g$ : 重力の加速度、 $W$ : 落差である。

本報告の場合流れが土石流で水路勾配が急なことから VTR から判読していることから  $D = (V_1 \cdot h_1)^2 / g H^3$  で与える。ここに、 $H = W + \frac{1}{\sin \theta}$  である。また、Rand<sup>2)</sup> は緩勾配の場合の実験式として、 $\frac{L}{W} = 4.30 D^{0.27} \dots \dots \dots (3)$  を与えている。図-7 は、これらの式と筆者の実験結果を比較して示したものである。

土石流の飛距離は、ドロップ数が大きくなると、 $\alpha = 0.715$  とした値よりも小さくなる。これは、土石流の場合、清水と同じ  $q$  を与えた場合、清水に比べ、水路から放出される時の速度が小さくなるためと考えられる。また、通常砂防ダム等の設計の際、飛距離は落差の2倍をとっており、現在の設計基準を適用して砂防ダムを設計しても問題がないものと考えられる。

3. 3. 2. 着地点の波高

清水の場合の着地点の水深  $h_2$  は、平均落下高さが  $(W + \alpha hc / 2)$  であるとして、芦田らは White<sup>1)</sup> の考え方に従った計算式を与えている。

$$\frac{h_2}{W} = \frac{2D^{1/2}}{\left\{2 + \left(\alpha + \frac{1}{\alpha^2}\right) D^{1/3}\right\}^{1/2} + \frac{1}{\alpha} D^{1/6}} \dots \dots \dots (4)$$

また、Rand<sup>2)</sup> による実験式は、

$$\frac{h_2}{W} = 0.54 D^{0.425} \dots \dots \dots (5)$$

図-8 は、(4)、(5) 式と実験結果を比較して示しているが  $\alpha = 0.715$  とした緩勾配の値よりも大きな値を示している。これは、同じドロップ数の条件を考えた場合、土石流の波高は清水よりも大きくなるためと考えられる。また、着地点での土石流の波高の変化が小さいという影響も考えられる。

図-9 は、 $h_1$  と  $h_2$  を比較して示したものであるが、図で見ると落下前と落下後の波高にほぼ変化はなく、土石流が落下によっても波高を変化させないで流下することがわかる。

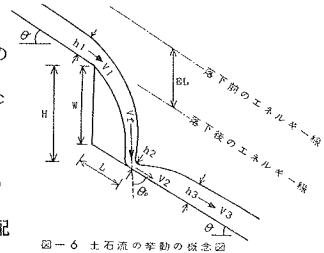


図-6 土石流の挙動の概念図

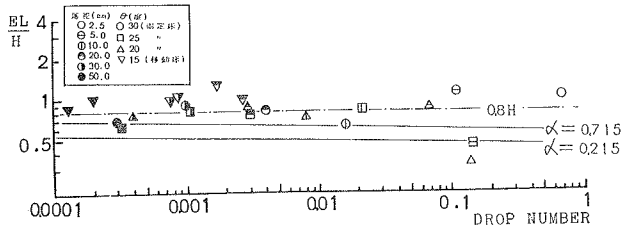


図-7 土石流の飛距離とドロップ数の関係

図-8 落下直後の波高とドロップ数の関係

図-9  $h_1$  と  $h_2$  の関係

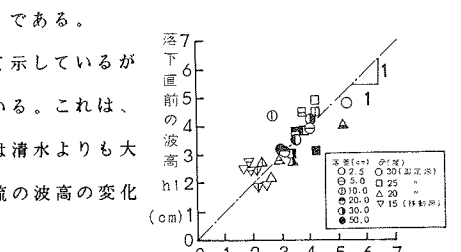
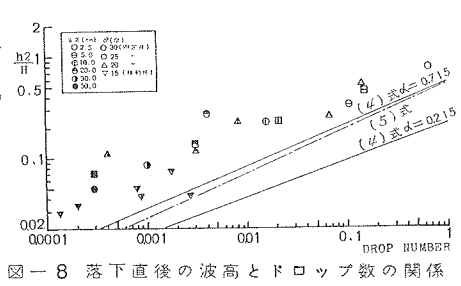


図-9  $h_1$  と  $h_2$  の関係

3. 3. 3. 落下によるエネルギー損失

落下によって失われるエネルギーはベルヌーイの定理から<sup>3)</sup>

$$E_L = (Z_1 - Z_2) + (h_1 - h_2) + \frac{\alpha_c}{2g} (V_1^2 - V_2^2) \dots \dots \dots (6)$$

与えられる。ここで、位置エネルギー差  $(Z_1 - Z_2) = H$  である。エネルギー補正係数  $\alpha_c$  は、ダイラタント流体の場合 1.7 であるが<sup>4)</sup>、ここでは 1.0 とする。一方、清水の場合の上流水路下端での総

$$E_u \text{ は、 } \frac{E_u}{W} = 1 + \left( \alpha + \frac{1}{2\alpha^2} \right) D^{1/3} \dots \dots \dots (7)$$

与えられ、落下点の水深  $h_2$  の所における総エネルギー  $E_1$  は<sup>1)</sup>

$$\frac{E_1}{W} = \frac{2D^{1/2} + \frac{1}{8} \left[ \left\{ 2 + \left( \alpha + \frac{1}{\alpha^2} \right) D^{1/3} \right\}^{1/2} + \frac{1}{\alpha} D^{1/6} \right]^3}{\left\{ 2 + \left( \alpha + \frac{1}{\alpha^2} \right) D^{1/3} \right\}^{1/2} + \frac{1}{\alpha} D^{1/6}} \dots \dots \dots (8)$$

であり、エネルギー損失量の割合  $(E_u - E_1) / W$  がドロップ数と  $\alpha$  の関数として計算される。

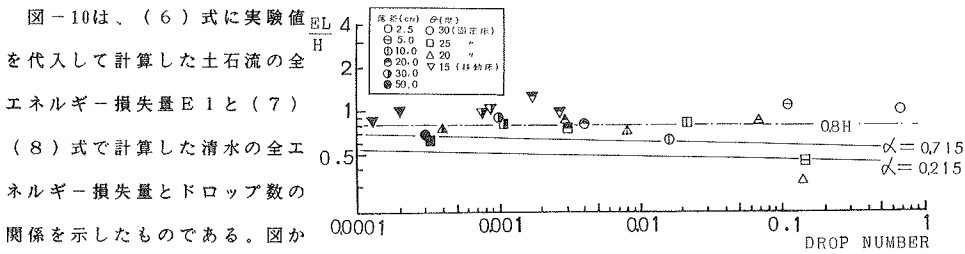


図-10 落下によるエネルギー損失とドロップ数の関係

0.0002 ~ 1.0 の範囲においては、落差の 0.5 ~ 0.6 程度のエネルギーが消費されているのに対し、土石流が落下して固定床に衝突する場合、獲得したポテンシャルエネルギーの 80% が消費されている。また、移動床の場合、獲得したエネルギーのほとんど全部が消費されていることになり、給水量が少ない場合には、一旦停止することも考えられる。

4. 結論

砂防ダムのような落差をもつ地点を土石流がどのように流れるかを実験水路内で観察し、土石流が流下する渓流に建設する砂防ダムや床固の設計に必要な諸元を求めた。実験の結果より、土石流対策砂防ダムの前庭保護工の長さは、清水の場合と同様に考えれば良いことがわかった。

土石流が移動床に落下する場合には、落下によって獲得したポテンシャルエネルギーのほとんどを落下直後に消費し、給水量の少ない場合には減速または一旦停止することもある。従って、土石流が砂防ダムを通過する場合、減勢の意味からは、ダム下流に水叩きを設けるよりも、土石流の飛距離を考慮した上で、副ダム等を設け、サンドクッションで対応した方がよいと考えられる。

参考文献

- 1) 芦田和男, 高橋 保, 水山高久; 流路工計画に関する水理学的研究, 新砂防 Vol. 97 P. 9 ~ 16, 昭和50年11月
- 2) Rand, W; Flowgeometry at straight drop spilways, A. S. C. E, Vol. 81, paper 791, 1955
- 3) 土木学会, 水理公式集, 昭和46年
- 4) 芦田和男, 高橋 保, 道上正規; 河川の土砂災害と対策 - 流砂・土石流・ダム堆砂・河床変動 - P. 116, 森北出版(株), 1983, 7月