

II-124 流下中に落下を伴う土石流挙動の実験的考察

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

1. はじめに： 溪流内の落差工や満砂後の砂防ダムを土石流が通過する時、落下による河床との衝突やその後の局所的な流れによって流下エネルギーを失う。この現象を利用して、土石流の減勢、安全に下流域への導流あるいは、早期に堆積させるといった防災対策が考えられるが、このような地形急変時の土石流挙動については未解明な点が多く、その効果は十分に把握されていない。本報告は、落差によるエネルギー減少効果を調べる第1段階として、一様流下幅の上下水路接続点に落差を設け、下流水路でも堆積しない条件で土石流を供給し、落差付近の土石流挙動を実験的に検討した内容についてとりまとめたものである。

2. 実験： 実験水路は、長さ4mの上流水路と長さ3mの下流水路（両者とも幅10cmの矩形断面で水路床に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。）からなり、水路は、接続点で落差が設けられ、それぞれ独立に勾配を変化できる構造となっている。

表-1 実験条件

θ_u	θ_d	H (cm)	d_m (mm)	μ_k	q_t ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	C_d
18°	18°	5	1.4	0.601	150	0
	15°		2.8	0.610	213	0.2
20°	20°	10	4.2	0.625	390	0.3
	15°		5.6	0.671	425	0.4

実験は、上流側水路端より給水しながら給砂装置を用いて所定の濃度(C_d)になるようほぼ均等な粒度分布を示す砂(比重 $\sigma/\rho=2.65$)を給砂し、定常な土石流を発生させ、ビデオカメラと35mmスチルカメラによる上・下流水路での流動深の計測（流況観察含）と、落下直後の三次元的な流れの部分や落下前・後流下時の横断形状（ポイントゲージによる。）を計測した。

実験条件は、表-1に示した実験変数を組み合わせて設定した。表中、H；落差高、 d_m ；粒径、 μ_k ；動摩擦係数、 q_t ；土石流単位幅流量である。

実験では、土石流が落下して下流水路床に衝突すると、水路横断方向の流速成分が生じ、側壁に沿って盛り上がりながら流下し、その後ある区間流下した所で流動深が最小となり、さらに比較的短い流下長で流動深は回復して平衡状態の流れとなることが確認された。図-1の L_s に相当する区間がこれに要する流下長であり、落差の影響が流れに及ぼす区間と考えられる。

平面図

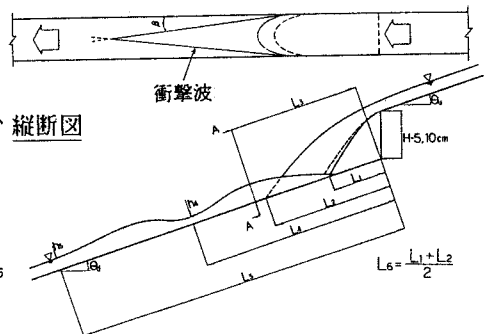


図-1 落差付近の流下形状模式図

3. 減勢効果と落差影響区間(L_s)の検討

3.1 エネルギー水頭変化の検討： 各地点でのエネルギー水頭(H.)を次のように定義する。

$$H_e = Z + h \cos \theta + v^2 / 2g \quad (1)$$

ここに、Z：水路床高、h：平均流動深、v：断面平均流速、 θ ：水路勾配、g：重力加速度である。

上流水路を等流状態で流下してきた土石流は、落差部にさしかかると河床面の摩擦抵抗から開放され、総エネルギーをほとんど失わずに落下し、下流水路床に衝突する。（落下中は、位置エネルギーが運動エネルギーに変換される。）大きな運動エネルギーを持った土石流は、下流水路への衝突によって局所的にエネルギーを損失し、その後、摩擦や衝撃波によって徐々に減勢し等流状態の流れとなる。

ここでは、落下位置（ L_0 ）から等流状態となるまでの平均的なエネルギー水頭の減少率を考え、等流状態の場合のそれ（ $\sin \theta_a$ ）との差として、図-2を参考に以下のように $(\Delta H_e)' / \Delta L$ を定義した。

$$(\Delta H_e)' / \Delta L = (H_{e0} - H_{es}) / (L_s - L_0) - \sin \theta_a \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 H_{e0} 、 H_{es} はそれぞれ上流水路の落下開始地点および L_s 地点のエネルギー水頭である。

$(\Delta H_e)' / \Delta L$ を規定する無次元パラメータとして、落下開始地点でのフルード数 $F_{r0} = v_0 / \sqrt{gh_0}$ （慣性力の大きさ）、 h_0 / H （相対的な落差高）、 h_0 / d_m および $\{(\sigma / \rho - 1) C_d + 1\}$ （流動深に対する抵抗に関与）を考慮し、流動深の計測によって求めた L_s に基づく $(\Delta H_e)' / \Delta L$ とこれらのパラメータの関係を調べた結果、概略的に

$$\frac{(\Delta H_e)'}{\Delta L} = A \cdot F_{r0}^{-1} \left\{ \frac{h_0}{H} \right\}^{-1} \cdot \left\{ \frac{h_0}{d} \right\}^2 \quad \dots\dots (3)$$

[$A=0.00578$: $\theta_a=18^\circ$, $A=0.00858$: $\theta_a=20^\circ$] で表されることがわかった。

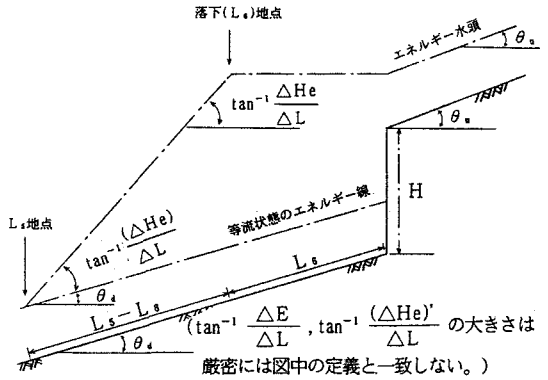


図-2 エネルギー水頭変化模式図

3.2 落差影響区間の推定方法：

落差影響区間（ L_s ）は、 $L_s = L_0 + (L_s - L_0)$ で表される。 L_0 は質点の放物運動を仮定すると $\theta_a \approx \theta_d$ のとき $L_0 = (2 \cdot H \cdot v^2 / g)^{1/2}$ となり、実験結果よりほぼ近似的に推定できることが確かめられている。（ $L_s - L_0$ ）は、 L_0 地点でのエネルギー水頭 H_{e0} （ $\approx H_{e0}$ ）と等流状態（流動深 h_a 、流速 v_a ）を仮定したときの同地点でのエネルギー水頭 H_{es} の差が上記減少率すべて消費されるまでの区間であるから、 L_s の表示式は以下ようになる。

$$L_{sm} = L_0 + (H + L_0 \sin \theta_a + h_a \cos \theta_a + \frac{v_0^2}{2g} - h_a \cos \theta_a - \frac{v_a^2}{2g}) / \{A \cdot F_{r0}^{-1} \left(\frac{h_0}{H} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{h_0}{d} \right)^2\} \quad \dots\dots (4)$$

一方、芦田・江頭らによる等流状態の平均流速の式に基づいて考察すると、次の関係が得られる。

$$h_a / h_0 = v_0 / v_a = \{ \cos \theta_a (\tan \theta_a - k') \}^{1/5} / \{ \cos \theta_d (\tan \theta_d - k') \}^{1/5} \quad \dots\dots (5)$$

$$k' = C_d (\sigma / \rho - 1) \mu_k / \{ C_d (\sigma / \rho - 1) + 1 \}$$

(4)式に(5)式を代入し、実験パラメータと前述の定数Aを用いて計算した L_{sm} と計測による L_s を比較した例が図-3であり、データはばらつくが、ある程度 L_s の計測値を推定することができる。

今後さらに推定精度を向上させるには、局所的に流れが急変する領域におけるエネルギーの散逸構造についてのさらに詳細な検討が必要である。

4. おわりに：

土石流の落下による減勢効果を調べる基礎検討として、エネルギー水頭減少率と落差影響区間の定式化を試み、ある程度の成果を得たが、推定精度向上にはさらに詳細な検討が必要である。また、落下後に扇状地等の土石流堆積域へ流出するような場合の土石流挙動を調べることも今後の課題として興味深いものと考えている。

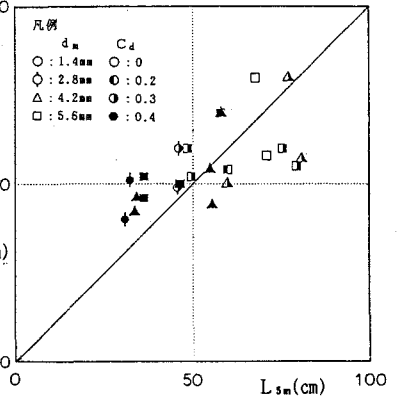


図-3 落差影響区間の計算値(L_{sm})と実験値(L_s)の比較

謝 辞：本研究を実施するにあたり、多大なご指導を受けた京都大学防災研究所教授芦田和男先生ならびに同助教授江頭進治先生に心より謝意を表する次第である。

参考文献：1) 芦田和男・江頭進治・佐々木浩；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