

5 勾配の変化する水路を流下する土石流の流動について

御砂防・地すべり技術センター ○ 菊井稔宏

京都府立大学農学部

大手桂二 水原邦夫 大月哲史

1. はじめに

現在、土石流の理論的解析ならびに定量化が進み土石流現象はある程度解明されてきている。しかしながら、その基礎的研究においては、勾配一定の水路を流下する土石流を対象にしたものが多く、実現象を考えるに当たっては、連続的に変化する溪床を考慮したものも必要であろう。

本研究では、実際の土石流発生溪流を想定し、水路勾配が下流方向に徐々に緩和する砂礫床水路を流下する土石流の流動特性について検討するものである。

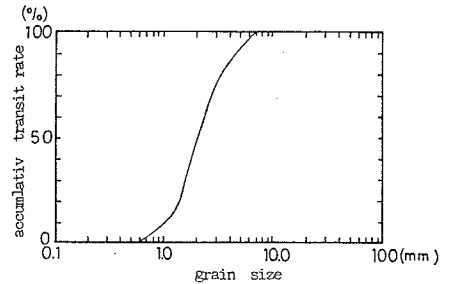
2. 実験方法

実験材料として用いた砂礫の物理特性を表-1、粒径加積曲線を図-1に示す。実験は図-2に示す勾配が連続的に変化する水路（幅20cm高さ25cm、一定勾配の区間長約200cmの両面アクリル板張り矩形断面水路）にあらかじめ表-2に示す条件で砂礫を敷きならし、一定流量の浸透流を与えておく。次に各種設定した流量条件で上流端から清水を給水し土石流を発生させ流下する土石流の状況を35mmモータードライブカメラを用いて撮影し以下の解析に供した。撮影条件を表-3に示す。さらに土石流の濃度を測定するためBタイプ実験で、流下してくる段波部の砂礫を25°・20°・15°区間において先端部とその約50cm後方から採取した。

表-1 実験材料の特性

Properties of material used for the experiments

d_m (mm)	d_{60}/d_{10}	$\tan\phi$	σ (g/cm^3)
3.4	1.95	0.99	2.72



Grain size accumulation curve

図-1 粒径加積曲線

表-2 初期堆積層条件

Initial condition of experimental bed

Experimental type	C_s	D
A-type	0.51	7
B	0.61	7
C	0.61	5

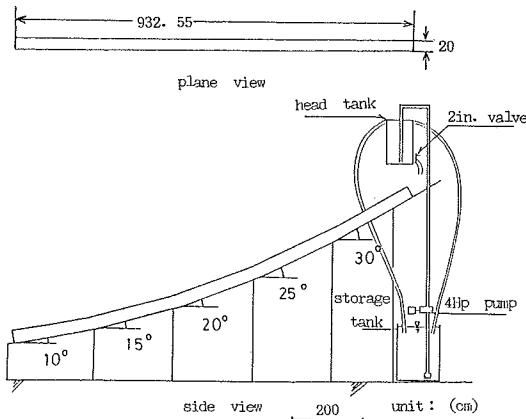
C_s : volumetric density of sediment

D : thickness of sediment (cm)

表-3 撮影に用いたカメラ条件

Experimental camera condition

CAMERA	settlement position	range of vision (cm)	shutter speed (s)	photographing interval (frame/s)
OLYMPUS OM-1	25°upstream	about 80	1/1000	5
NBCN-F	20°upstream	90	1/1000	4
OLYMPUS OM-1	15°upstream	90	1/1000	3



Features of experimental channel

図-2 実験水路の概要

3. 実験結果及び考察

3.1 流速及び波高変化

流下する土石流の流速及び波高は給水強度（単位幅流量）に強く支配され給水強度と流速は比例関係、波高は逆比例の関係を示した。（図-3、4）しかしながら、流下するに従い、それら傾向は徐々に緩和されるようである。

次に各勾配区間での流速と波高の変化を図-5、6に示した。一般に勾配の緩和に伴い、流速が減少すると考えられるが、実験値の20°区間から15°区間に流下した際の変化は逆の傾向を示している。実験中の観察では、土石流段波先端には発生直後、未飽和な部分が存在し流下に伴い徐々に飽和され、勾配15°区間でほぼ飽和状態となる。この段波先端の未飽和部分が流下に対し抵抗として働いており、飽和された状態となる15°区間においては、段波全体としての流動性が增加するものと考えられる。

3.2 濃度変化

Aタイプ実験において段波先端部での濃度を測定したが、上流部（勾配20°区間以上）では非常に高濃度な値を示した（ $C_d \approx 70\%$ 程度）ため、Bタイプ実験においては、段波部の土砂濃度を段波の先端部分と中央部分とに分けて測定した。

土石流の段波濃度は、高橋¹⁾により次の式が与えられその妥当性が確認されている。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (1)$$

ここに、 ρ ：流水の密度、 σ ：砂礫密度、 ϕ ：内部摩擦角、 θ ：水路勾配である。

しかしながら、(1)式は侵食も堆積も示さない定常状態となったものを対象とした場合であり、本実験のように急勾配な上流部で形成された土石流が一気に流下するような場合での検討はなされていない。

図-7にBタイプ実験の濃度測定結果と(1)式の関係を示した。土石流先端部($C_d f$)は、非常に高濃度な値を示しており、流下に従い徐々に飽和されていく過程が説明

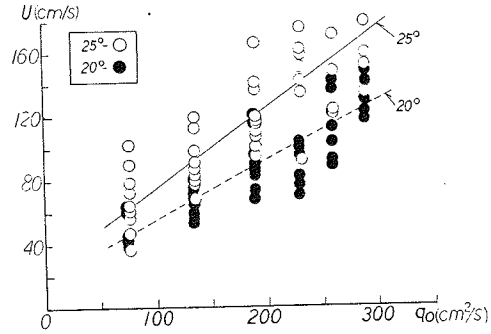


図-3 給水強度と流速の関係

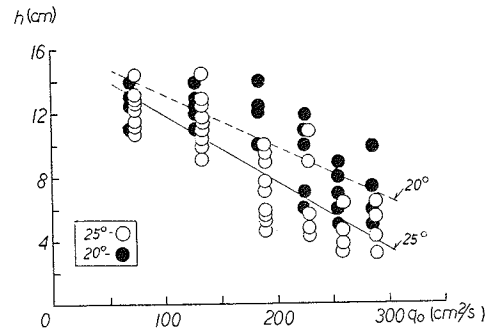


図-4 給水強度と波高の関係

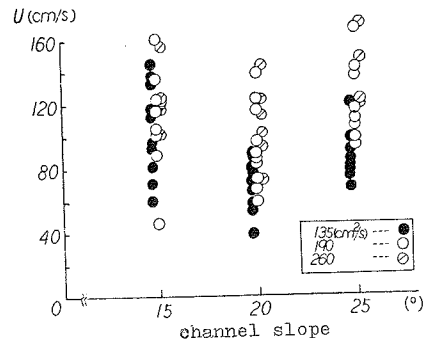


図-5 水路勾配と流速の関係

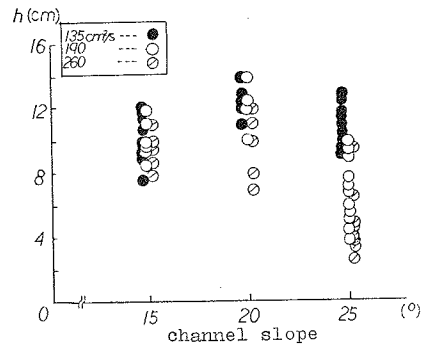


図-6 水路勾配と波高の関係

されよう。

次に段波中央部(Cd)は、勾配25°を流下する際に既に(1)式で与えられる濃度近くに達しており、流下に従い若干の増加傾向を示している。

一般には勾配の緩和に従って、濃度の減少が考えられるが、本実験では各勾配区間の水路長が短く流れが定常状態に達するまでに下流部に流下していること、また、勾配変化率が小さいことなどの理由により急激な濃度変化を示さずに、上流部で形成された土砂濃度を保持しつつ砂礫のフロント部への集中現象により、わずかながらもCdが増加したものと考えられる。

3. 3 流速式及び流速係数について

高橋²⁾によりダイラタント流体として導かれた土石流の流速に関する無次元表示式は、次のとおり。

$$\left(\frac{U}{\sqrt{gd}}\right) / \left(\frac{q_0}{gd^3}\right)^{0.3} = \frac{0.693 \sin^{0.2} \beta \left\{ \left(\frac{C_s}{C_s^*}\right)^{1/3} - 1 \right\}^{0.4} \left\{ C_d + (1-C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\}^{0.2}}{(a_r \sin \phi_r)^{0.2} (1-C_d)^{0.6}} \quad (2)$$

ここに、 β は流動表面の勾配、 U_* は摩擦速度、 ϕ_r は安息角($\approx \phi$)である。

さらに a_r については、Bagnold³⁾の実験結果から

$$\left. \begin{aligned} C_d < 0.81 C_s^* : a_r &= 0.042 \\ C_d \geq 0.81 C_s^* : a_r &= \left[1 / \left\{ \left(\frac{C_s}{C_s^*}\right)^{1/3} - 1 \right\} - 14 \right] \times 0.066 + 0.042 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

を用いて本実験の土石流との適応性を検討した。(図8)

プロットのばらつきの程度は大きいがある程度の妥当性はうかがえよう。

次に抵抗則に関して整理すると

$$\left(\frac{U}{U_*}\right) / \left(\frac{h}{d}\right) = \frac{0.4 \left\{ \left(\frac{C_s}{C_s^*}\right)^{1/3} - 1 \right\} \left\{ C_d + (1-C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\}^{0.5}}{(a_r \sin \phi_r)^{0.5}} \quad (4)$$

となる。Cdをパラメータにして実験値と比較すると(図9)かなり合っているといえよう。

すなわち、土砂濃度を適確に与えられれば、定常状態に達しない場合でもダイラタント流動としての扱いが可能であることがわかる。

また、Aタイプ実験結果を U/U_* と h/d の関係について整理したものが図10である。

無次元表示の形で重回帰分析を行った結果

$$\begin{aligned} U/U_* &= 118.2 \times (q_0/gd^3)^{0.015} \tan \theta^{-0.24} (D/d)^{-0.57} \\ (h/d)^{-0.91} C_s &= -0.7 \end{aligned} \quad (5)$$

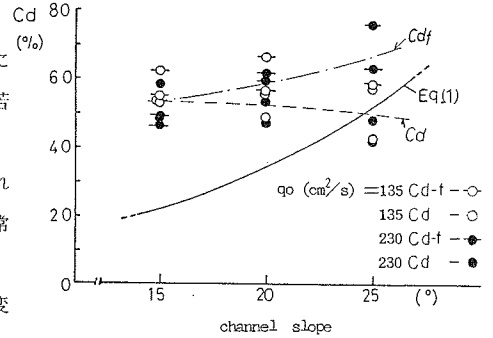


図-7 水路勾配と段波濃度の関係

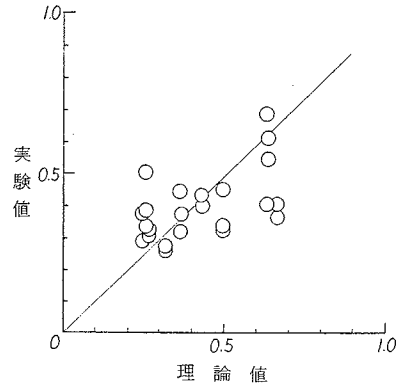


図-8 段波流速の理論値と実験値の比較

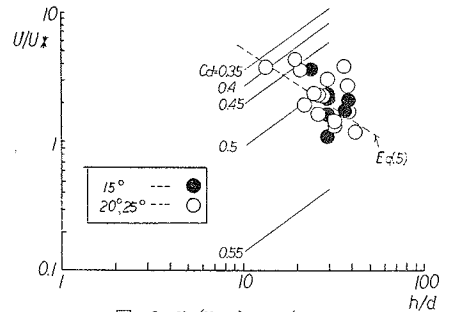


図-9 U/U_* と h/d の関係 (B-Type)

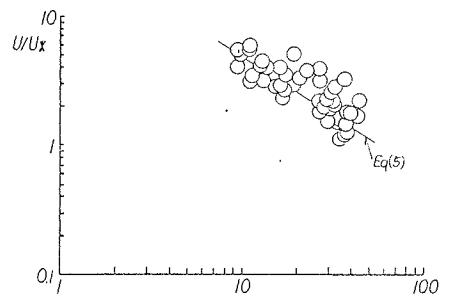


図-10 U/U_* と h/d の関係 (A-Type 25°)

を得た。(R=0.793、RR=0.629)

なお、解析には停止、堆積の傾向を示した15°区間のデータを除いてある。

これによると U/V_c と h/d の関係は給水強度にほとんど関与されず水路床勾配と堆積層の条件によって一定関係を示すようである。しかしながら、(5)式は本実験条件での適用の域を出ないため一般化するにあたり勾配変化率、流下距離、段波先端部濃度等の関係を含めて検討する必要があるが、その点については、今後の課題としたい。

4. 結 論

本実験において明らかとなったことを以下に列挙する。

- 1) 発生した土石流段波の流速、波高は給水強度により特徴づけられ、流速は比例、波高は逆比例の傾向を示す。
- 2) 流下に伴う勾配の緩和により25°区間から20°区間では流速の低下、波高の増大が確認されるが20°から15°区間に流入すると逆に流速の増大、波高の減少傾向がみられる。この現象は、土石流段波先端部砂礫の飽和状態を考えることで説明される。
- 3) 勾配の変化する水路を一気に流下する場合、土石流段波の土砂濃度は(5)式に従わず、上流部で形成された濃度を保持し流下する。また、段波の先端部は発生直後砂礫のみで構成され、高濃度な値を示し、未飽和の状態から徐々に飽和され、飽和されると流動性が增大すると考えられる。
- 4) 本実験のように定常状態といえない場合においても、ダイラタント流動としての扱いはある程度可能である。

5. おわりに

本研究において、各勾配区間の水路長との関係等を議論する必要があるが、勾配一定の直線水路では得られない結果が確認されたことは、実際の土石流の流動中にも十分考えうることであり、今後さらに詳細な検討を加え定量的に把握したいと考える次第である。

参考文献

- 1) 芦田和男・高橋保・道上正規：河川の土砂災害と対策 1983 pp54-144
- 2) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研年報 第20号B-2 pp405-435
- 3) Bagnold, R. A : Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Roy. Soc. A, vol 225, 1954 pp405-435
- 4) 建設省松本砂防工事事務所：焼岳、浦川における土石流調査関係資料集Ⅳ 1971 pp48-49