

土石流の堆積過程に関する研究

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
兵庫 県 ○正員 浜田 士郎
京都大学大学院 学生員 吉田 等

1. まえがき;すでに著者らの行なってきた土石流の発生,流動に関する実験結果は,土石流をダイラタント流体として取り扱うことの妥当性を示すものと思われる。そこで本研究では,発生および流動における力学的条件をふまえた上で,土石流の堆積過程について実験し,若干の考察を行なった。

2. 実験の概要;幅20cm,長さ7mの勾配可変水路の下流端に,幅および勾配可変で長さ3mの両面ガラス張り堆積水路を設け,2つの水路の勾配を,種々組合わせて,土石流の堆積状態を調べた。使用河床材料は, $d_m=3.5$, $C_* = 0.6$, $\tan\phi = 0.8$, $\sigma = 2.65$, また,実験ケースについては,表-1に示す。

θ_0, θ	下流側勾配
20°	20° 18° 16° 14° 7° 0°
17°	17° 15° 13° 11° 5° 0°

表-1 実験ケース

3. 理論的考察および実験結果; 1)最終到達距離; 定常状態の土石流が, 濃度 C_d , 流速 U で, 勾配 θ の固定床面に流出した場合について考える。この時, 土石流が仮に, 勾配変化点からの距離 x にて停止するとしたら, 後続の土石流は, 勾配変化点での高さが h になるまで, 一定勾配の砂堆を形成しながら前方へ乗り上げる。この勾配は, 土石流の発生限界勾配より少し緩い程度である。次に土石流はそ上と始めるが, そ上をしながら乗り越えてくる砂で, x は徐々に増加すると思われる。しかし, ここで, そ上開始直前の状態を考えることにし, 図-1において, h は, $h = \{x \cos(\theta_0 - \theta) \sin \delta / \cos(\delta - \theta_0)\} - x \sin \theta - h_0 \cos \theta$ ----(1)
また, $h = \alpha U^2 / 2g$, ここに, エネルギー補正係数 α は, ダイラタント流体の流速分布式から, 1.7である。したがって最終到達距離は, $x = (\alpha U^2 / 2g + h_0 \cos \theta) / [\{\cos(\theta_0 - \theta) \sin \delta / \cos(\delta - \theta_0)\} - \sin \theta]$ ----(2)となる。図-2は(2)式と実験結果との比較である。ここで

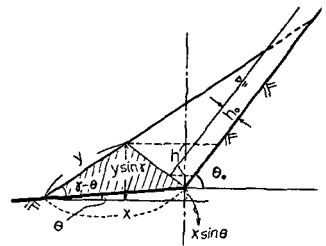


図-1 堆積モデル

実験から, $h_0 = 3$ cm, $\delta = 14^\circ$, $U = 116$ cm/s, および 96cm/sである
2)そ上速度; 図-3のように, 流下する土石流が堆積しながら時間 Δt に Δx だけ上流へそ上した場合を考える。上流から与えられる流量 q_T が, 時間 Δt で Δx に砂を蓄積し, 残りが上流の濃度 C_d よりも低い濃度 C_d' となって流量 q_T' で流下すると仮定しよう。 Δx の部分の砂および水の連続式は, それぞれ, $q_T C_d \Delta t = q_T' C_d' \Delta t + C_* \Delta x h$ ----(3), $q_T (1 - C_d) \Delta t = q_T' (1 - C_d') \Delta t - (1 - C_*) h \Delta x$ ----(4)となる。(3)(4)式から, q_T を消去して, $\Delta x / \Delta t = (C_d - C_d') q_T / (C_* - C_d) h$ ----(5), これはそ上速度を表わしており, $q_T = C_* q_s / (C_* - C_d)$ であるから, そ上速度を v として(5)式は, $v = C_* q_s (C_d - C_d') / (C_* - C_d)(C_* - C_d) h$ ----(6)となる。また, h はそ上とともに減少するので, q_s, C_d, C_d' を一定とすると, (6)式からそ上速度は, そ上するにつれて増加するはずである。図-4は, $\theta_0 = 20^\circ$ の場合の実験結

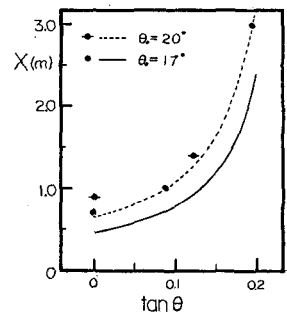


図-2 最終到達距離

果と(6)式による計算値と表わしている。ここで、土石流が、堆積前部の勾配を保ちながら³⁾せ上るとして、 $\delta = 14^\circ$ とした。また、 C_d は砂堆の勾配³⁾で決まり、 $C_d = \rho \tan \delta / (\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \delta) \dots (7)$ とした。図の点線は、実測の q と(6)式に代入した計算値である。ここで、せ上速度が減少しているのは、実験では、堆積層の厚さが薄く、かつ長さが短いため、時間の経過とともに土石流流量 q が逸減したためと思われる。

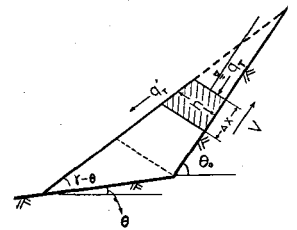


図-3 せ上モデル

ハ)土石流の停止条件：濃度 C_d 、流動層厚さ h の土石流が、勾配 θ から、 θ の固定床水路へ流出した場合を考えよう。河床面において作用するせん断力は、 $T = \{(\sigma - \rho)C_d + \rho\}gh \sin \theta \dots (8)$ 一方、せん断抵抗は、 $T_L = (\sigma - \rho)C_d gh \cos \theta \cdot \tan \alpha \dots (9)$ となる。ただし、 α は動摩擦角である。いま、 $T < T_L$ のとき土石流は減速し、濃度が小さくなるのでなければ、やがて停止するはずである。ところで、 C_d が流動層全体に均等に分布しているものとすれば、 T と T_L の差は水路底面近傍ほど大きいので、底面近傍から停止し、堆積する。堆積層の空隙は、流動層のそれよりも小さいから、流動層の一部分が堆積すれば、結果として、流動層の濃度が減少する。このようにして達成された濃度が、土石流形態を取り得る程度に高濃度であり、かつ、水路勾配がそのような濃度の土石流を流すことができるものであれば、再び定常的な流動に移行することが可能である。ここで、土石流形態を取り得る最高濃度が問題となるが、これは土石流発生限界勾配 θ_m で発生する濃度 $C_{dmin} = \rho \tan \theta_m / (\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_m) \dots (10)$ としてよからう。一方、このような濃度を流し得る最小の勾配⁴⁾は、 $\tan \theta' = C_{dmin}(\sigma - \rho) \tan \alpha / \{C_{dmin}(\sigma - \rho) + \rho\} \dots (11)$ であって、 $\tan \alpha = \tan \phi$ であれば、 $\theta' = \theta_m$ にならないが、一般に $\tan \alpha$ は $\tan \phi$ よりも少し小さいから、 $\theta' < \theta_m$ である。本実験に使用した材料では、 $\theta_m = 14.8^\circ$ 、 $C_{dmin} = 0.30$ であって、い

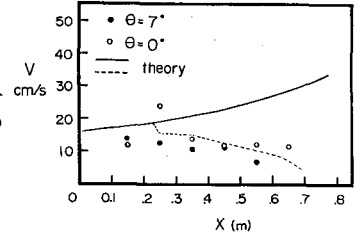


図-4 せ上速度

ま $\tan \alpha = 0.75$ と仮定すれば、(11)式から $\theta' = 14^\circ$ となる。図-5は、堆積水路下端まで到達したケースについて、水路下端で、濃度を測定したものである。図中の実線は、 $\tan \alpha = 0.75$ としたときの、それぞれの勾配での定常濃度で、(11)式から求めたものである。図より明らかなように、実験値と理論値はほぼ合っているが、 $\theta = 11^\circ$ 、 13° では、はずれており、これらの勾配では、もはや土石流として流下できないことがわかる。また、その境界は、図より $C_d = 0.3$ 程度にあると考えられ、土石流の停止限界勾配は、 14° 程度であろうと推定される。このことは、1)における砂堆勾配 δ の値と説明するものである。

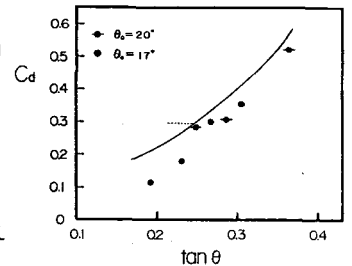


図-5 堆積水路下端での濃度

《参考文献》

- 1) 高橋；土石流の流動に関する研究；第31回土木学会年次講演会（昭和51.10）
- 2) 4) 高橋；土石流の発生と流動に関する研究 京大防災年報 第20号B（昭和52.4）
- 3) 高橋、浜田、吉田；土石流の発生機構に関する実験的研究 第14回災害科学シンポジウム