

II-180 流動土塊の堆積形状の予測法

| | | |
|-----------|---|------|
| 水資源開発公団 | 正 | 神矢 弘 |
| 京都大学防災研究所 | 正 | 芦田和男 |
| 京都大学防災研究所 | 正 | 江頭進治 |
| 京都大学 大学院 | 学 | 佐々木浩 |

1. まえがき 土砂災害の顕在化に伴い、崩壊・土石流の流出危険範囲の予測法を確立することが急務となっている。危険範囲、すなわち、堆積範囲を的確に予測するためには、移動開始から停止に至るまでの過程における抵抗則と侵食・堆積速度の決定機構に関する知見が不可欠である。前者については、これまでの研究によって、移動初期の塑性的な構造を維持した状態の運動や完全に流動化して土石流を形成した状態の運動がある程度評価できるようになっている。一方、後者については、これからの研究成果の蓄積が必要な段階にある。本報においては、侵食・堆積速度に関して適当な仮定を設けて、これを与えることにし、オイラー的およびラグランジュ的モデルによる堆積形状の解析法について検討する。

2. 流動土塊の抵抗則 著者は、先の研究¹⁾において図-1のような流動モデルを考え、流動層 $0 \sim \delta$ におけるせん断抵抗力を次式のように与えている。

$$\tau = \tau_y + \tau_f \text{ ----- (1)}$$

ここに、 $\tau = \rho_m g (h-z) \sin \theta$, $\tau_y = \mu_k (\rho_s - \rho)(1-\lambda)(h-z) g \cos \theta$, $\tau_f = P \ell^2 (du/dz)^2$, $\rho_m = P\lambda + \rho_s(1-\lambda)$, $P =$ 水の密度, $\rho_s =$ 土粒子密度, $\lambda =$ 土層の空隙率, $\ell =$ 混合距離(土粒子間の間隙のスケール), $\mu_k =$ 動摩擦係数。さらに、上式に基づいて流動層の流速分布を求めるとともに、流体抵抗係数 f_b に関する次式を得ている。

$$f_b = \frac{25}{4} \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left\{ \frac{\lambda}{1-\lambda} \right\}^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{h} \right)^{5/2} \right\}^{-2} \text{ ----- (2)}$$

ここに、 $f_b = \{ \rho_m g h \sin \theta - \mu_k (\rho_s - \rho)(1-\lambda) h g \cos \theta \} / P U^2$, $d =$ 土粒子の直径, $h =$ 移動層厚, k_p/k_v は粒子と空隙の形状係数比であって、 $k_p/k_v \doteq 1$ 。土層全体が流動化している場合には $\delta = 1$ である。

3. オイラー的モデルによる堆積形状の予測法 斜面上における流動土塊(土石流)の運動は、移動層厚、粒子径、粒子濃度、斜面勾配、侵食・堆積速度の影響を受けるため、一般には非定常である。とくに、堆積過程においては、勾配の変化や土粒子の堆積が顕著なために運動の非定常性が強くなる。したがって、堆積形状を予測するための基礎方程式には、これらパラメータが十分に考慮されていることが必要である。ここでは、斜面の幅方向の議論を省略し、かつ、一次元解析による堆積形状の議論を行うことにすれば、各保存則は次式のように与えられる。

$$\text{土層の連続式} : \partial h / \partial t + \partial (Uh) / \partial x + eD = 0 \text{ ----- (3)}$$

$$\text{土層中の砂の連続式} : \partial (Ch) / \partial t + \partial (CUh) / \partial x + D = 0 \text{ ----- (4)}$$

$$\text{運動方程式} : \{ (\rho_s - \rho)C + P \} h (2\partial v / \partial t + U \partial U / \partial x) - \{ \rho_s + (e-1)P \} UD = G - P - S \text{ ----- (5)}$$

$$\text{ここに} \begin{cases} G = \{ (\rho_s - \rho)C + P \} h \sin \theta \\ P = \mu_s g h [1/2 (\rho_s - \rho) h \partial C / \partial x + \{ (\rho_s - \rho)C + P \} \{ \partial (h+z_b) / \partial x \}] \\ S = \mu_k (\rho_s - \rho) g Ch \cos \theta + P f_b U^2 \end{cases}$$

$$\text{河床変動式} : \partial z_b / \partial t - (1+e)D/e = 0 \text{ ----- (6)}$$

$$\text{堆積速度の式} : D = \beta (UC - U_\infty C_\infty) \text{ ----- (7)}$$

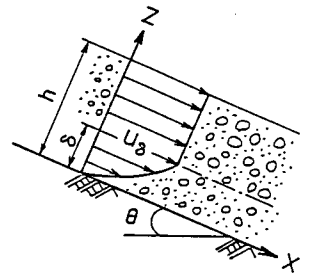


図-1 流動モデル

ここに、 D = 単位時間単位面積当たり土塊から斜面への絶対堆積土量で、 $D < 0$ のときには侵食量を表わす。 e = 堆積層の間隙比、 Z_b = 河床位、 β = 係数である。 $U_{\infty}^1, C_{\infty}^1$ は、任意の地点の条件に対応した平衡速度および平衡濃度であって、それぞれ次式で与えられる。

$$U_{\infty} = (gh)^{\frac{1}{2}}(-b/a)^{\frac{1}{2}} \text{----- (8)} \quad C_{\infty} = \tan\theta / \{(\sigma-1)(\mu_s - \tan\theta)\} \text{----- (9)}$$

ここに、 $a = -f_b / \{(\sigma-1)C+1\}$, $b = \cos\theta[\tan\theta - \mu_s(\sigma-1)C / \{(\sigma-1)C+1\}]$, σ = 粒子比重である。

4. ラグランジュ的モデルによる堆積形状の予測法 上述の方法によれば、堆積形状の時間的・場所的変化の追跡が可能であるが、数値解析そのものが少し複雑であって、予め最終堆積形状を見通すのが困難である。したがって、もう少し簡便な方法によって堆積形状の予測ができれば好都合である。先の研究によれば、土塊全体を質点として扱った解析によって、堆積領域の重心位置は十分に推定されることが判明している。そこで、この事実を拡張して、図2に示すように、土塊を長さ Δx のブロックに分割し、それぞれのブロックに保存則を適用することを考えよう。さらに、簡単のため、各ブロックの運動は独立であると仮定すれば、基礎式は、次のように与えられる。

水の連続式 : $U \frac{d}{dx} \{ \rho(1-C)h \} = -\rho e D$ ----(10)

砂の連続式 : $U \frac{d}{dx} (\rho_s C h) = -\rho_s D$ ----(11)

運動方程式 : $U \frac{d}{dx} (\rho_m U h) = \rho_m g h \sin\theta - \mu_s (\rho_s - \rho) g h \cos\theta - \rho f_b U^2$ ----(12)

河床変動式 : $U \frac{dz_b}{dx} = \frac{1+e}{e} D$ ----(13)

堆積速度の式 : $D = \beta (U C - U_{\infty} C_{\infty})$ ----(14)

このモデルでは、土塊の最終形状だけしか表現し得ないが、より簡単に流動土塊の流出範囲を設定するという意味においては極めて便利である。

5. モデルの適用 水路実験によって得られた結果に基づいて境界条件を設定し、以上の二つのモデルによる数値解析を行い、堆積形状に関する実験値との比較を行う。図-3および図-4にそれぞれの結果を示している。図中添字0を付した諸量は、勾配変点における条件である。計算においては $\beta = 0.1$ としている。図の結果によれば、いずれの解析も、粒径の小さいものほど堆積形状が平坦になるという事実をよく再現しているばかりでなく、堆積形状を適切に表現しているものと思われる。

6. あとがき 流動土塊の堆積形状に関する二つの予測法を提案した。これらはいずれも堆積形状を適切に、表現できるようである。今後、堆積速度 D の決定機構について、検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 芦田・江頭・神矢・佐々木: 斜面における土塊の抵抗則と移動速度, 京都大学防災研究所報第28号B-2, 1985, pp. 297-307.
- 2) Takahashi: Debris Flow. Ann. Rev. Fluid Mech 13, 1981, pp. 57-77

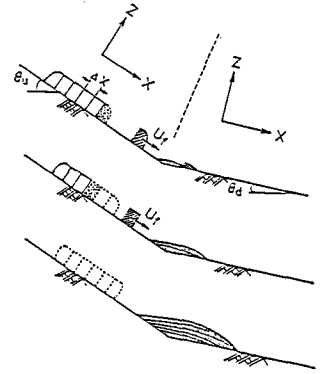


図-2 ラグランジュ的追跡法の概念図

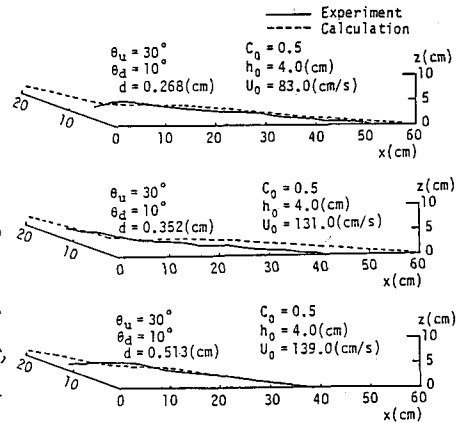


図-3 オイラー的モデルによる堆積形状の比較

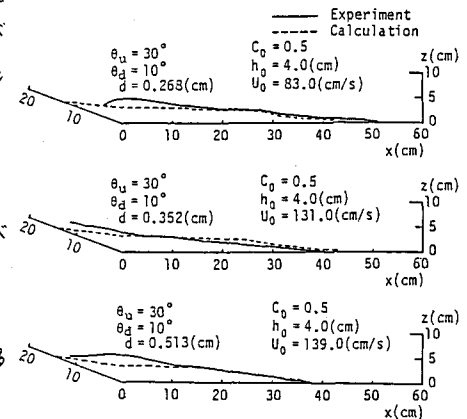


図-4 ラグランジュ的モデルによる堆積形状の比較