

非定常な流れを考慮した土石流の数値シミュレーションに関する研究

財団法人 砂防・地すべり技術センター ○鈴木拓郎

東京大学大学院農学生命科学研究科 堀田紀文

筑波大学生命環境科学研究科 宮本邦明

財団法人 砂防・地すべり技術センター 松井宗廣

1. 背景及び目的

土石流の氾濫範囲の想定や土石流対策施設の効果評価に、数値シミュレーションは有用な手段である。

数値シミュレーションにおける土砂の侵食・堆積は、常に平衡状態が満たされるという考え方と、侵食速度式を経験的に与えるという考え方があるが、最近では侵食速度式を用いる方法が多くなっている。

現在用いられている侵食速度式は、河床勾配に対する粒子濃度の平衡条件に基づいて提案されている。このような侵食速度式は流れの状態が連続的に変化するような条件で導かれたものであり、そのような領域では良好な結果を得ることが出来る。しかし、土石流の構成則は定常・等流の条件の下に考察されているため、特に大きな侵食・堆積を伴う非定常性の強い領域に適用すると、様々な問題が生じる。例えば、堆積速度が流速に比例する形となっているため、不透砂防ダムが設置された領域において、土石流が砂防ダムに衝突して急激に流速が小さくなった場合に堆積速度を過小評価してしまう。

以上を踏まえ、本研究では現状の侵食速度式を用いたシミュレーションにおける問題点を整理する。そして、流れの非定常性を単純に平衡状態からの差として評価することでモデル化し、新たな侵食速度式を提案する。

2. 侵食速度式についての考察

江頭¹⁾は流れの状態が連続的に変化するような条件の下で、侵食・堆積は河床勾配 θ と粒子濃度に対する平衡勾配 θ_e の差に比例するとし、次式のように与えている。

$$\frac{E}{|u|} = \tan(\theta - \theta_e) \cdots (1) \quad \tan \theta_e = \frac{c(\sigma/\rho - 1)}{c(\sigma/\rho - 1) + 1} \tan \phi_s \cdots (2)$$

ここに、 E は侵食速度、 u は断面平均流速、 θ は河床勾配、 θ_e は土砂濃度に対する平衡勾配、 c は土砂濃度、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 ϕ_s は内部摩擦角である。

式(1)のように侵食速度が流速に比例する形となっているため、土石流が砂防ダムなどに衝突して急激に流速が減少する場合に堆積速度が過小評価され、ダムへの堆砂を十分に評価できない、などの問題が生じる。これは侵食速度式が加速や減速などの流れの状態の変化、すなわち非定常な状態を考慮していないからである。

そこで、流れの非定常性を単純に現在状態と平衡状態の差として考えることで、非定常な流れにおける侵食速度を評価することを試みた。

まず、現在状態として任意の単位幅流量 M 、水深 h （または u ）、 c の条件で流下する流体を考える。この条件における平衡状態を考えると、平衡濃度 c_e は次式で示される。

$$c_e = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \cdots (3)$$

この平衡濃度 c_e 、流量 M から、外力とせん断応力が等しくなる平衡水深 h_e を算出する。そして、単位面積当たりに現在存在している土砂量を hc 、平衡状態における土砂量を $h_e c_e$ として、その差に比例して侵食・堆積が生じると考え、侵食速度式を次式のように与えた。

$$E = \frac{1}{\gamma \cdot c_*} (h_e c_e - hc) \cdots (4)$$

ここで、 γ は侵食・堆積速度に関する係数である。 E は速度次元（m/s）であるから、 γ の次元は時間次元（s）となる。 γ の持つ意味を解釈すると、現在状態と平衡状態の差の土砂量を侵食・堆積するのに要する緩和時間と捉えられるが、物理的意味はほとんどない。このように物理的には不合理な係数が残っているが、本論では右辺括弧内の項を検討することを主目的とするため、今後の課題として残しておく。

3. 勾配変化点における堆積過程の数値シミュレーション

15° から 2° へと勾配が急変する条件において、総供給量は一定、すなわち“単位幅流量 $Q(\text{m}^2/\text{sec}) \times \text{供給時間 } t(\text{sec}) = \text{一定}$ ”の条件下で、土砂の堆積過程の数値シミュレーションを実施した。流入土砂濃度は全て一定であり、総供給土砂量も一定となる。 $Q \cdot t = 3000$ として、 $Q = 100, 150, 300, 500$ （それぞれ $t = 30, 20, 10, 6$ ）として計算を行った。最終河床縦断面図を図-1に示す。これまでの侵食速度式を用いた計算では、流量を変化させても最終河床位にはほとんど変化が生じていない。それに対し、本論の式を用いた計算では、流量の違いによって変化が生じている。

これまでの式は堆積速度が速度に比例しており、流入する流量に応じて流速が大きくなるため、総流量が一定であれば、結局最終的にはほとんど同じように堆積してしまう。本論の式では、減速に伴って平衡土砂量が低下して堆積することになるので、規模が大きく減速に距離が必要な条件ほど土砂が下流側に堆積する。実現象を想定すれば、本論の式の結果のように、流動規模により土砂の堆積過程が異なる方が自然な結果ではないかと思われる。

4. 不透過ダムにおける堆積過程の数値シミュレーション

17° から 3° へと勾配が急変する条件において、勾配変化点に不透過ダムを設置し、土砂の堆積過程の数値シミュレーションを実施した。下流側を緩勾配としたのは、土砂が流出したときに容易に堆積するようにして、土砂流出状況を検証するためである。上流から一定土砂濃度 ($c = 0.4$) の土石流を供給し続ける。供給流量 Q は 30, 150 の 2 種類である。初期状態においては河床に不安定堆積物は存在しない（固定床）としている。

堆積過程の結果を図-2に示す。これまでの式の場合、流量が小さい条件では土砂が堆積を開始するまでに時間を要している。これは堆積速度が速度に比例しているためで、ダム天端から越流を開始しないと堆積が始まらない。また、流量が大きいほど砂防ダム上流側に土砂が堆積しやすい結果となっている。

それに対し、本論の式では、これまでの式のような不自然な現象は発生していない。流量が大きいほど堆砂勾配が緩くなり、土砂が下流に流出するという結果となっており、実現象を考えれば定性的には自然な結果と考えられる。

5. まとめ

流れの非定常性を単純に現在状態と平衡状態の差として評価することで、新たな侵食速度式を考案した。これまでの侵食速度式では、勾配急変点や不透過ダムにおける堆積過程などで不合理な結果が得られるのに対し、本論の式では合理的と思われる結果が得られた。しかし、本論の式では物理的に不合理な係数が残っていることなど、今後のさらなる検討が必要である。

6. 参考文献

- 1) 江頭：新砂防，Vol.47，No.2，p-51-56，1993

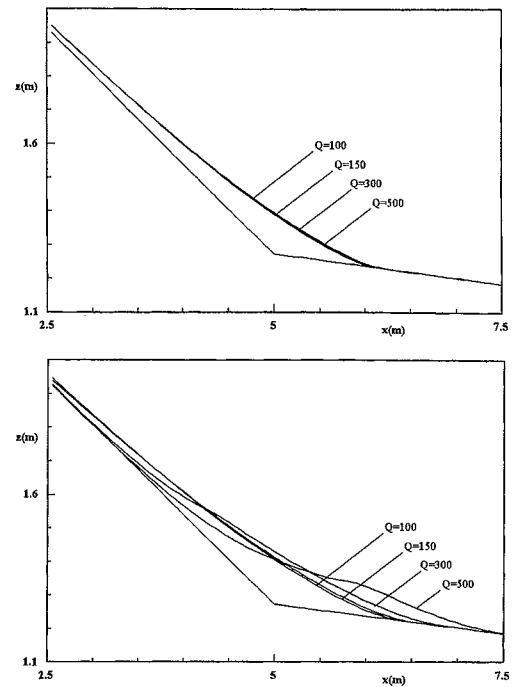


図-1 土砂の最終堆積形状
(上)これまでの式，(下)本論の式

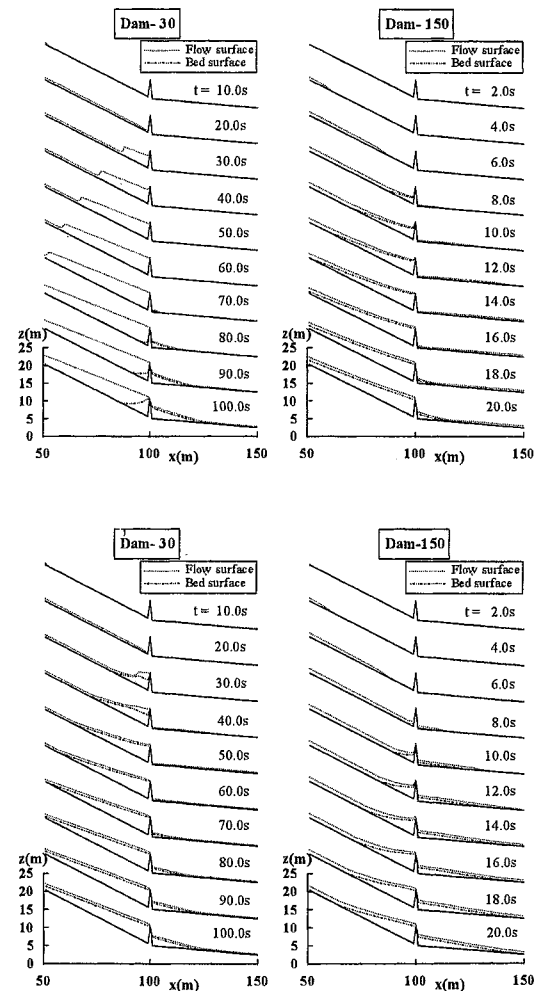


図-2 不透過ダムにおける堆積過程
(上)これまでの式，(下)本論の式