

アジア航測株式会社 〇日暮雅博 富永 健
関西電力株式会社 吉川 太 副田悦生

1. はじめに

問題提起：我国は、国土が狭い上に急峻な地形・脆弱な地質を有し、さらに梅雨期・台風期の豪雨により多量の土砂が山地で生産され下流へ流出する。このように劣悪な自然条件の下で、多くの既存のダムは堆砂が進行し、利水や治水計画等に対する悪影響が顕在化している。また現在は良好なダムサイトが希少であり、新規の大規模ダム建設があまり期待できない状況下では、既存のダムの機能維持を図ることが急務であり、その意味においてもダム堆砂問題は非常に重要な問題である。

砂防分野の貯水池対策：砂防分野では、貯水池上流砂防としてダム堆砂問題を扱っている。貯水池上流砂防計画が従来の砂防計画と異なる点は、従来の砂防計画が一洪水を対象とし河床変動をひき起こす掃流砂を対象としているのに対し、貯水池上流砂防計画では全流量時系列を対象とし掃流砂、浮遊砂、Wash load（以後WLとする）を対象としている。

現状の研究：従来、ダム堆砂に関する多くの調査・研究がなされてきた。しかし、そのほとんどは土砂の移動を生産・流送・堆積システムとして系統的に考察することなく、この過程をブラックボックスとして降雨、地形、地質、植生等の要因とダム堆砂量との関係を直接結びつけ、結論付けたものである。一方、崩壊、土石流、掃流等個々の土砂移動現象については、数多くの研究がなされ、一応の成果を見ているが、これら成果をダム堆砂予測のために系統的にまとめたものは少ない。

研究の目的：本研究は、ダム堆砂現象にかかわる土砂生産・流送を系としてとらえ、合理的なダム堆砂予測手法の作成を目的として実施するものである。

研究結果：土砂生産・流送の形態及び場を考慮した土砂動態シミュレーションモデルを作成し、実験流域でダム堆砂還元計算を実施してモデルの有効性を検討した結果、既往のダム堆砂予測手法に比べて良好な結果を得た。

2. 土砂動態シミュレーションモデルの基本構想

ダム堆砂予測を目的とした土砂動態のモデル化の範囲は、土砂生産及び流送であり、ダム流入土砂量を算定するものである。また目標とするモデル作成のための基本方針は、以下のようである。

- ① 流域を系としてとらえ、上流から下流へ系統的に土砂移動をとらえる。
- ② 堆砂に至る土砂移動現象を生産～流送の過程を踏まえてとらえる。
- ③ 土砂生産については、土砂生産形態を設定し、その形態別に土砂生産の場を設定する。
- ④ 土砂生産形態は、土砂生産において支配的であると考えられる崩壊、裸地侵食、側岸侵食及び土石流発生を対象とする。
- ⑤ 土砂流送形態は、掃流及びWL（浮遊を含む）とする。
- ⑥ 掃流区域では、河床変動計算を実施する。
- ⑦ 砂防ダム等の対策施設効果が表現できるようにする。

⑧ 土砂生産・流送は、降雨・流量等の水文量に対応して発生し、それを時系列的に扱う。

上記の基本方針に基づいて、土砂動態シミュレーションモデルを作成した。モデル作成のための基本フローを図1に示す。

3. 土砂動態シミュレーションモデルの構築

3.1 流域モデル

流域モデルの作成基準は、以下のようである。

- ① 流域をある基準に基づく単元に分割し、上流から下流へ系として配置する。
- ② 流域を分割する基準は、土砂の流送形態区分と谷の発達過程による区分とする。

③ 土砂の流送形態による区分は、河床勾配により土石流区域 ($15^\circ \leq \theta$)、土砂流区域 ($3^\circ \leq \theta < 15^\circ$)、掃流区域 ($3^\circ > \theta$) とし、これを基本単位とする。

④ ③に加えて谷の発達過程を考慮して3～4次流域を単元とし、3～4次流域及びそれらの合流点で分割を行う。

3.2 土砂生産モデル

土砂生産モデルとして、崩壊生産モデル、崩壊時系列変化モデル、裸地侵食生産モデル、側岸侵食生産モデル、土石流発生生産モデルを作成した。

崩壊生産モデル：ある降雨（日雨量）に対する崩壊発生の頻度 (C_n/A) を (1) 式により求めた。崩壊面積は、この頻度に流域面積 (A) 及び1個当りの平均崩壊面積 ($\bar{a}$) を乗じて求めた。

$$C_n/A = \alpha (R-r)^\beta \quad \text{..... (1)}$$

$$C_a = C_n/A \cdot A \cdot \bar{a} \quad \text{..... (2)}$$

C_n : 崩壊個数 (発生)
 A : 流域面積
 $(R-r)$: 崩壊有効雨量
 $\alpha \cdot \beta$: 係数 (過去の崩壊推移より設定)
 C_a : 崩壊面積 (発生)
 $\bar{a}$: 1個当りの平均崩壊面積

崩壊時系列変化モデル：崩壊の復旧及び発生を時系列的にとらえて、ある時期の崩壊面積を (3) 式により求めた。

$$CA_{i+1} = CA_i \cdot r + Ca_i \quad \text{..... (3)}$$

CA_i, CA_{i+1} : $i, i+1$ 時点における崩壊面積
 r : 崩壊継続率

裸地侵食生産モデル：芦田らのガリ侵食式 (4) を用いた。

$$G = \frac{3}{5} \rho \cdot (1-\lambda) \cdot P \cdot K \cdot \alpha^{2/3} \left(\frac{q \sin \theta}{\phi} \right)^{1/3} \cdot \{ (r-f) \cdot \cos \theta \}^{2/3} (a \cdot b)^{2/3} \cdot \frac{b}{b'} \cdot a \quad \text{..... (4)}$$

G : 侵食量, ρ : 粒子の密度, λ : 空ゲキ率, k : 無次元侵食速度, α : レジーム則係数,
 θ : 斜面勾配, ϕ : 流速係数, r : 雨量, f : 浸透能, a : 斜面長, b : 斜面幅, b' : ガリ間隔

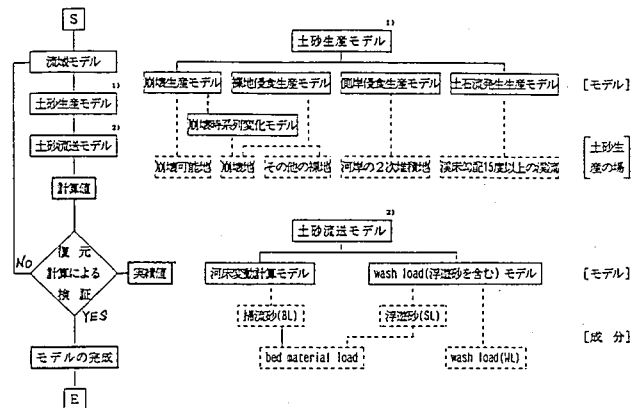


図1 モデル作成のためのフローチャート

側岸侵食生産モデル：芦田らの側岸侵食式（５）を用いた。

$$QD^* = QD / U_* \cdot d = F_{0*} \cdot \tau_*^{1/2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\tau_*^{*SC}}{\tau_*}\right)^3 \left[\left(\frac{h}{d}\right) \left(\frac{1}{\sin \theta_1} + \frac{D}{h} \frac{\cos(\theta_2 - \theta_1)}{\sin \theta_2}\right) \right] \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_*^{*SC} = (\tau_* \cos \theta_1 + \Delta \tau_* c) \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta_1}{\mu}\right)^2 \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \Delta \tau_* c / \tau_*}\right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

QD^* ：無次元侵食量， Q_D ：単位河道当りの侵食量， U_* ：流路中央部の摩擦速度， $F_{0*} = 2 (k_3/k_2) \varepsilon_2 \cdot F_0 = 0.02$ ($F_0 = 0.03, k_2 = \pi/4, k_3 = \pi/6$)， τ_* ：流路中央部の無次元掃流力， ε^2 ：0.5， h ：水深， D ：斜面長， θ_1 ：側岸部傾斜角， θ_2 ：斜面勾配， τ_*^{*SC} ：無次元掃流力， $\Delta \tau_* c$ ：無次元掃流力の粘着力による増分， μ ：砂粒子の内部摩擦係数

土石流発生生産モデル：芦田らの土石流発生条件式（７）を用いた。ここで X の値に対応する発生率によって土石流が発生するものとした。

表．１ 発生危険度と発生率

$$X = Q / \left(\frac{8 \sin \tilde{\theta}}{\tau_* K^3} \cdot g \cdot d^3 \cdot B^2 \right)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

X ：土石流発生危険度， Q ：流量（合理式）， $\tilde{\theta}$ ：15°， f ：摩擦損失係数， g ：重力加速度， d ：粒径， B ：河幅（レジーム則）， K ：0.7

土石流発生危険度	土石流発生率
$X \geq 12.1$	0.818
$12.1 > X \geq 6.1$	0.742
$6.1 > X \geq 3.0$	0.506
$3.0 > X \geq 1.5$	0.387
$1.5 > X \geq 0.76$	0.275
$0.76 > X$	0

3. 3 土砂流送モデル

土砂流送モデルとして，掃流砂を対象とした河床変動計算モデルとWL（浮遊を含む）を対象としたWLモデルを作成した。

河床変動計算モデル：土砂生産モデルによって生産された砂

礫は，流域モデルの単元流域に一時的に貯留され，移動限界条件を上回る降雨（流量）が発生した場合に流砂能力に応じて河床変動計算区域へ給砂する。河床変動計算は（８）式によって実施した。

$$\Delta Z = Z_{t+1} - Z_t = \frac{Q_{B1} - Q_{B2} + Q_{B3}}{B \cdot \Delta x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \Delta t \dots\dots\dots (8)$$

ΔZ ： Δt 時間内の河床変動量， Z ：河床高， Q_{B1} ， Q_{B2} ：上，下流断面の通過流砂量， Q_{B3} ：側方からの給砂量， B ：河幅， λ ：空ゲキ率， Δx ：区間距離

ここで，流砂量式として芦田・高橋・水山式（９）を用い，掃流力として（12）式に示す有効掃流力を用いた。

$$q_B = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \cdot g \cdot d_m^3 \cdot \frac{12 - 24\sqrt{I}}{\cos \theta} \cdot \tau_*^{1.5 - \sqrt{I}} \cdot (1 - \alpha^2 \frac{\tau_*^{*cM}}{\tau_*}) \cdot (1 - \alpha \sqrt{\frac{\tau_*^{*cM}}{\tau_*}})} \dots\dots\dots (9)$$

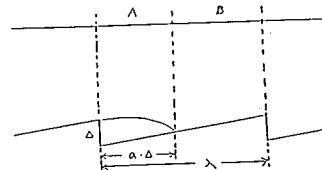
q_B ：単位幅，時間当りの流砂量， σ ， ρ ：砂礫，水の密度， g ：重力加速度， d_m ：平均粒径， I ：河床勾配（ $\tan \theta$ ）， τ_*^{*cM} ：無次元掃流力， α ：定数， τ_*^{*cM} ：無次元限界掃流力

$$\tau = \tau_A + \tau_B \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_A = 1/2 \cdot K \cdot E \cdot a \Delta^2 \cdot 1/h \cdot v^2 / \lambda \dots\dots\dots (11)$$

$$\tau_B = [v / \{6 + 2.51 \ln(h/Ks)\}]^2 \cdot (\lambda - a \Delta) / \lambda \dots\dots\dots (12)$$

τ ：全掃流力， τ_B ：有効掃流力， Δ ：階段状河床の波高， λ ：波長， $a \Delta$ ：剥離長， a ：剥離係数， h ：水深， Ks ：相当粗度， K ：係数（=6）， E ：連行係数（=0.08）， v ：流速



WLモデル：WL（浮遊砂を含む）は，採水調査によってWL量と流量との関係を求め，その関係式から算定

した。WL量と流量との関係は，一般に（13）式で表わすことができる。

$$q_w = \alpha Q^\beta \dots\dots\dots (13)$$

q_w ：WL量
 $\alpha \cdot \beta$ ：係数（ $\beta \approx 2$ ）
 Q ：流量

4. 実験流域での検証及び評価

上記の土砂動態シミュレーションモデルを用いて、実験流域で復元計算を実施して掃流砂量及びWL量を求め、これら計算値とダム堆砂実績値を比較してモデルの有効性を検討した。

実験流域は、流域面積約 280km^2 、起伏量比 0.02、崩壊面積率 0.1%の山地のダム流域で、地質は古生層である。流域モデルを図2に示す。復元期間は、ダム堆砂実績値として信頼性の高い1970年～1980年の10年間とした。WL量は、採水調査結果より得られた(14)式を用いて算定した。

$$QW = 1.353 \times 10^{-7} Q^{2.29} \quad \text{..... (14)}$$

復元計算結果を、図3に示す。復元期間の実績値が約 63万m^3 であるのに対し、計算値は約 55万m^3 でそのうち75%は掃流砂であるという結果を得た。次に各年毎の対応を見ると1970年～1976年間は比較的適合しているのに対し、1976年以降については、傾向は同様であるがその量において計算値が実績値に比べて少ない結果となっている。以上の結果から実績堆砂量との適合性は比較的良好であり、作成したモデルが堆砂予測に有効であることが検証された。なお、捕捉率をBruneの中央曲線で見るとほぼ100%に近く、堆砂量は流入土砂量に近似できると考えて差しつかえないであろう。

一方、図4は既往の代表的な予測手法のうち比較的適合しているものを示したものである。この結果を見ると、今回用いた手法は他の予測手法に比べて適合性が良いのがわかる。

5. おわりに

ダム堆砂予測のための土砂動態シミュレーション

モデルを作成し、実験流域で検証した結果、比較的良好な結果を得、また他の予測手法に比べてもその適合性において良好な結果を得た。今後は他流域での適用を試みるとともに、この結果を踏まえて貯水池内の堆砂形状についての検討を実施する必要がある。またモデルの改良点としては、崩壊生産モデルの物理学的検討、WL量・浮遊砂量の物理学的なモデル化の検討が挙げられる。なお、本研究を実施するにあたり、京都大学防災研究所芦田和男教授、江頭進治助教授には御助言を賜り、ここに記して感謝致します。

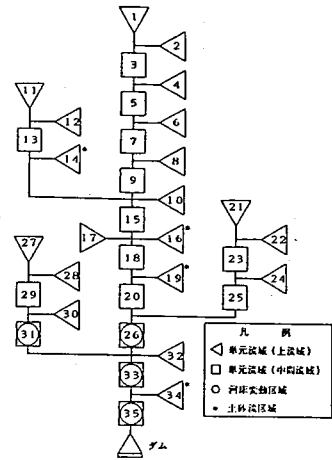


図2 流域モデル

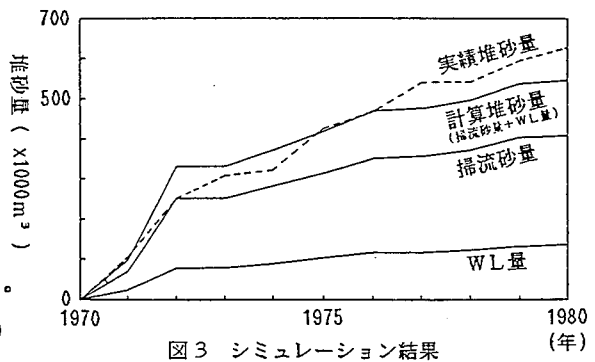


図3 シミュレーション結果

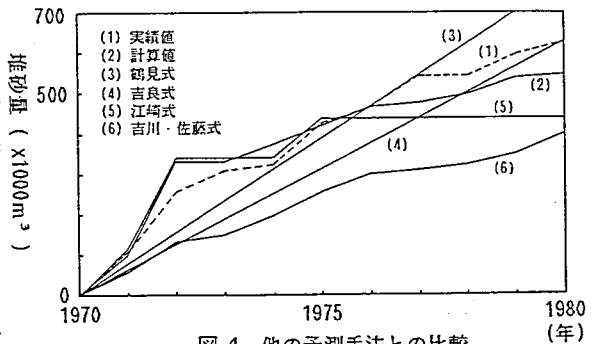


図4 他の予測手法との比較