

ダム堆積物に対する流水掃砂の解析的検討

Analytical Study on Sediment Flushing in the Reservoirs

黒田 重徳* 喜多村 雄一**

By Shigenori KURODA and Yuichi KITAMURA

The sedimentation in the reservoirs is a natural phenomenon, but its progression causes serious problems for reservoir operations and controls. Because it raises water levels, blocks water ways, and reduces the reservoir's capacity, etc. As a countermeasure, mechanical dredging has been applied to its removal from the reservoirs, but sediment flushing has to be available as well. This paper is based on the field survey and its data which derived from the sediment flushing carried out at the TAKI reservoir in 1991. It presents the numerical analysis on river bed formation after the sediment flushing in the reservoir and points out several matters which should be taken into account in the implementation of such a plan.

Keywords : sediment flushing, river bed formation, sediment transport, wash load, numerical analysis

1. はじめに

ダムに流入する土砂に対して、計画段階から貯水池容量のなかに堆砂容量として考慮されているが、実際には、流入土砂の定量的な予測が難しく、これまで多くのダムで計画以上に堆砂が進行してしまうこともあった。また、予想を越えた堆砂などにより、貯水池容量の減少、貯水池上流端での背水位の上昇など各種の問題が発生している。この問題に対して、貯水池内ならびに上流部での機械力を導入した浚渫や掘削等でダム機能の回復に対応するのが一般的であるが、当社では、合わせて自然の流水力を使って効果的に上流部の堆積土砂を貯水池内の死水域に湖内移動をさせる流水掃砂を幾つかのダム貯水池で実施、研究しており、背水位の影響を短期間で大幅に軽減するなどの効果を得ている。

本報告は、当社滝ダムで実施した掃砂結果に基づきこうしたダム堆積物の流水掃砂について、解析的検討を行ったので、その結果について報告するものである。

* 正会員 電源開発株式会社 主査

(〒104 東京都中央区銀座6-15-1)

** MSc 電源開発株式会社 総合技術試験所 課長代理

(〒253 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

2. 流水掃砂の概要

ダム堆積物の流水掃砂を実施した滝調整池は、福島県只見川に位置し伊南川および各支川からの流入量と上流発電所の使用水量（最大375 m³/s）を貯留、調整し発電を行う昭和36年12月運転開始した逆調整池である。流水掃砂の実施期間は、平成3年3月30日から4月9日の間で実施した。この期間、上流の田子倉発電所は融雪水の貯水期にあって、運転を停止しており、①掃砂に伴う有効放流が軽減できること、②電力需要が緩和期にあり需給上問題が少ないこと、そして③過去の実績より融雪による伊南川からの流入量が平均で190 m³/sと多いこと等が配慮されている。掃砂期間10日間は、掃砂効果、水位低下に伴う周辺山地の安定、濁水発生への影響に配慮して、水位低下速度1 m/日による低下水位-8 mまでの水位低下期間に準備期間1日と水位回復期間1日を基本に実施された。また、この掃砂の実施にあたり、水文、気象、水質および河床材料の調査などを行って、水位低下に伴う濁水の状況、堆砂の掃砂状況について把握した。なお、流水掃砂の詳細については既に報告されている¹⁾のでここでは概要だけを報告する。

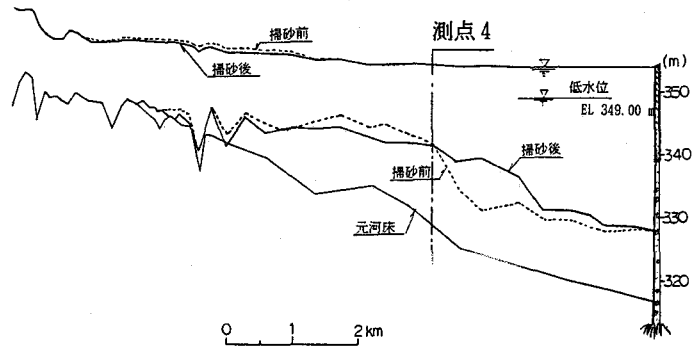


図-1 最深河床縦断（滝調整池）

掃砂前後に実施した堆砂測量結果から、各測点間の掃砂前後の堆砂状況の変化が伺えるが、水位低下に伴う背水端であるダム上流3.2kmの測点4を境に上流部については掃砂効果により堆積土砂量が減少し、下流部については堆砂が進行しておりその収支は約71万 m³であった。滝調整池の最深河床の縦断図を図-1に示す。

河道の横断形状ならびに水面幅については、現地の状況および横断測量の結果と流速、流量測定の関係から推定してみると、 $B = 4.0 \times Q^{0.5}$ であった。ここに、B：河道幅、Q：流量で

ある。特に、堆砂の侵食・堆積現象および濁度を支配する主要なパラメータのひとつである河床材料の調査が掃砂前後において実施された。この調査結果、掃砂前、後に採取された試料の粒度分布（図-2）から、上流域堆砂の下流域移送に起因すると考えられる相対的粗粒化の傾向が認められる。

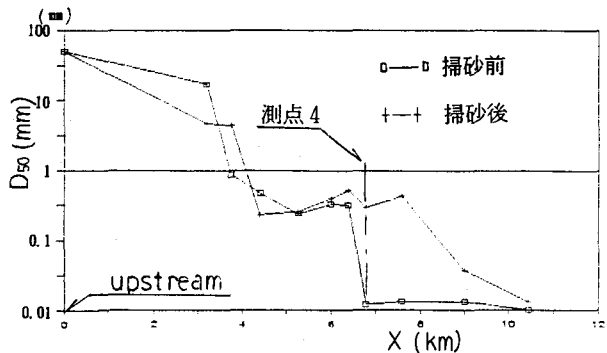


図-2 河床材料 (D_{50}) 縦断変化

3. 解析検討

3.1 解析の概要

ダム貯水池、調整池において今後、流水掃砂を効率的かつ効果的に実施して行くにあたり、貯水池の掃砂

形状を定量的に予測することが大切である。そこで、滝調整池の流水掃砂による堆積物移動の現地調査結果をもとに解析検討を行った。解析にあたっては、デンマーク水理研究所が開発した一次元自由水面（開水路）流れ解析“MIKE-11”を使用した。解析の基礎方程式は、以下のとおりである。

(1) 流れの基礎式

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial X} + \frac{g Q |Q|}{C_z^2 A R_*} = 0 \quad (2)$$

ここに、 A : 流積 (m^2)、 C_z : Chezyの粗度係数 ($\text{m}^{-1/2}/\text{s}$)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 h : 基準水面より測った水位 (m)、 Q : 流量 (m^3/s)、 R_* : 径深 (m)、 α : エネルギー補正係数、 q : 横流入量 (m^3/s) である。

(2) 移流分散の基礎式

$$\frac{\partial A C_w}{\partial t} + \frac{\partial Q C_w}{\partial X} - \frac{\partial}{\partial X} \left(A D_x \frac{\partial C_w}{\partial X} \right) = -A K C_w \quad (3)$$

ここに、 C_w : 流水濃度、 D_x : 移流分散係数 (m^2/s)、 A : 流積 (m^2)、 K : 遅延係数 ($-\text{s}$) である。

(3) 流砂(Engelund-Fredsoe モデル) および河床変動の基礎式

$$\Phi_b = 5 \left[1 + \left(\frac{\pi/6}{\theta'} \frac{\beta}{-\theta_c} \right)^4 \right]^{-1/4} (\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta'}) \quad (4)$$

$$q_s = \int_a^D C \cdot u \, dy \quad (5)$$

$$C = C_b \left(\frac{D-y}{v} - \frac{a}{D-a} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B(1-\lambda)} \frac{\partial S}{\partial X} = 0 \quad (7)$$

ここに、 Φ_b : 無次元流砂量 ($\Phi = qb / \sqrt{(s-1)gd^3}$) であり、 qb : 掃流砂量 ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$)、 θ_c : 限界 Shields数、 θ' : 無次元抵抗係数、 β : 動摩擦係数、 u : 流速 (m/s)、 C : 浮遊砂濃度、 C_b : 底面濃度、 a : 掃流砂層厚 (m)、 D : 水深 (m)、 Z : Rouse定数、 Z : 河床高、 B : 河床幅、 S : 単位幅当たり総流砂量、 λ : 河床の空隙率である。

解析にあたって、流れの計算とは6ポイント Abbot-Ionescuタイプの陰解法（スタッガード・タイプ）であり、移流分散と河床変動計算はBOXタイプの陰解法である。²⁾ 底面濃度の計算は、掃流砂層厚の上限で掃流砂の濃度に接続するものとした。なお、解析にあたって使用した基礎データは、①河床横断、河川平面および縦断面データ、②流入量、貯水池水位等の上下流域境界条件のデータ、③粒径分布等の河床材料データである。

解析計算では、河床横断のデータをそのままの区間距離で使用すると、区間によっては $\Delta x = 64 \text{ m}$ となり、計算の安定条件が厳しく計算時間が長くなる為に、生データを一部省略し、 Δx を出来るかぎり大きくとった。尚、 Δx を変化させることの影響についても検討を実施している。河床変動の計算時間は32bit PCで $\Delta x = 600 \text{ m}$ の場合は $\Delta t = 120 \text{ sec}$ で約1時間前後である。濁水、いわゆるウォッシュロードの生産の移流分散計算では、河床変動計算の結果から得られた計算水理結果を使用するが、 $\Delta x = 600 \text{ m}$ でも約6時間～8時間となる。

3. 2 河床変動計算

(1) 流砂量式の影響

河床変動計算にあたり、いくつかの提案されている流砂量式による河床変動計算を行うと共に、解析条件

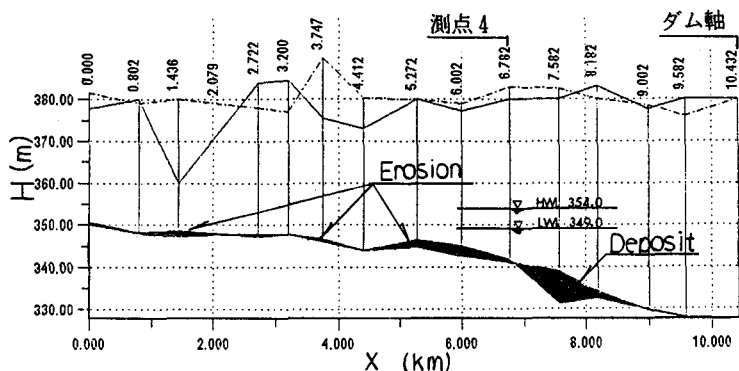


図-3 河床変動計算結果(縦断変化)

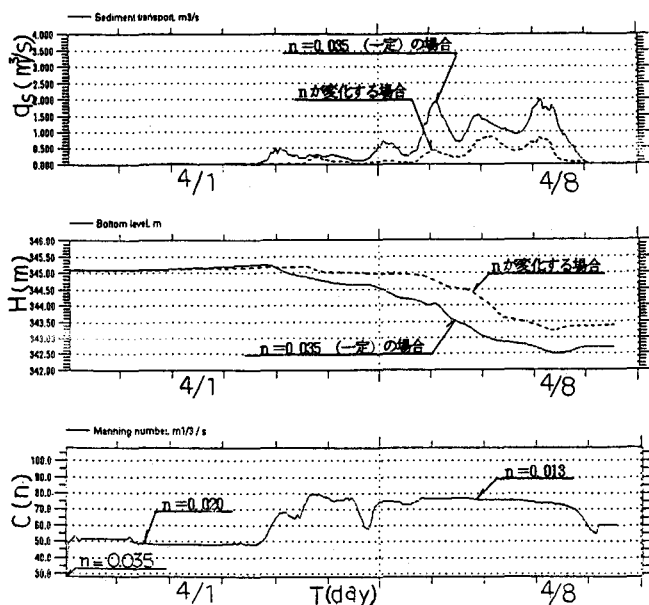


図-4 砂堆による流砂量、河床変動、粗度係数の変化(中流部)

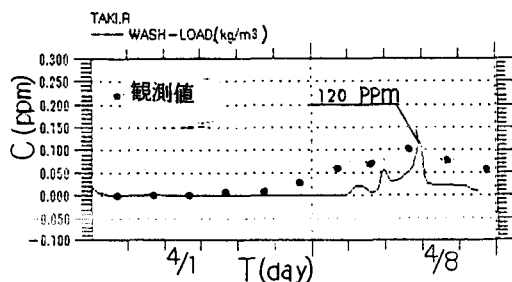


図-5 濁水計算結果(ダム地点)

の違いによる計算結果の比較検討を行った。その結果、いずれの流砂量式でも、主たる掃砂に伴う中流部の河床変動および堆砂デルタ肩の移動については十分再現できている。今回使用した(1)式のEngelund-Fredsoeの式は掃流砂、浮遊砂を河床近傍での流砂濃度によって連続させ、また、河床粗度については砂堆による形状抵抗をも考慮している。その解析結果を図-3に示す。掃砂実績の図-1における中流部を境とした上流部侵食そ

して下流部で堆積の河床形状の変化にはほとんど一致して再現していることがわかる。

(2) 粗度係数の影響

次に、流水と流送土砂の相互作用として河床面では河床波が形成され、河床粗度が変化する。今回、Fredsoeの提案した方法³⁾による砂堆の高さと長さの安定形状の理論とEngelundの流れの抵抗則の方法⁴⁾を適用して、粗度係数を流砂の変化によって形成される砂堆等の形状抵抗(高さおよび長さ)を考えた解析を実施した。中流部での掃砂量と河床変動そして粗度係数の変化を示したのが図-4である。これから、掃砂量の増大に伴って河床が平坦で滑らかになるため、時間の経過とともに粗度係数が小さくなっているのがわかる。しかしながら、砂堆の変化と粗度係数の関係が不明なところも多く今後の

研究課題である。

3. 3 濁質計算

河床変動計算に引き続き、濁質(ウォッシュロード)の生産、移流分散についても解析を行った。滝調整池の堆積物はその粒度分布からもわかる様に、100 μ m以下の濁質、いわゆるウォッシュ・ロードが含まれていることからその生産・移流分散について計算を行った。濁質の生産量については、 $S_o =$

$-(\varepsilon/D)(V/V_{ce}-1)$ 、 $V > V_{ce}$ の場合とし、ここに、 ε ：侵食特性係数、 D ：水深、 V ：流速、 V_{ce} ：侵食限界流速である。沈降量については $S_d = (w \cdot C_w / D)(V/V_{cd} - 1)$ 、 $V < V_{cd}$ の場合で、ここに、 w ：沈降速度、 C_w ：流水濃度、 V_{cd} ：沈降限界流速とした。解析結果は、図-5に示すとおりであり、各地点における濁質の発生量の時系列が示されている。計算値は、実測に比べると発生時期が多少遅れる傾向にあるが、ピーク値は約 120ppm (mg/m^3)となり、実測の 100ppm とほぼ同じ値を示している。濁質の比率が高くなると、その移動に、全体の堆積物の移動が左右される様になり^{5) 6)}、濁質の粘着性を考慮する必要がある。しかし、滝ダムの場合、掃砂前の現地調査では、濁質の含有率が10%~20%程度であり、このことから、濁質が粘着性を発揮せずに細砂を中心とした堆積物の移動と同時に、濁質も流水中に流出したため、実測値が計算値に比べて濁質の発生が早い傾向にあるものと考えられる。

3. 4 水位低下速度

水位低下速度の違いによって、掃砂量や生産される濁質がどのように異なるかを検討した。実績の水位低下によるものと比較して、水位低下速度（実線）として、図-6に示す2ケース（I、II）を検討した。

(1)河川縦断方向の河床変動

河川縦断の変化は、実績に比較して上流部についての変化は、I、IIともほぼ同じであるが、水位低下の期間の長いケースIが、中流部の河床低下や堆砂デルタ肩の進行が大きい傾向にある。

(2)流砂量と河床変動の経時変化

図-7には、中流部の河床変動の経時変化を示している。ケースIでは、

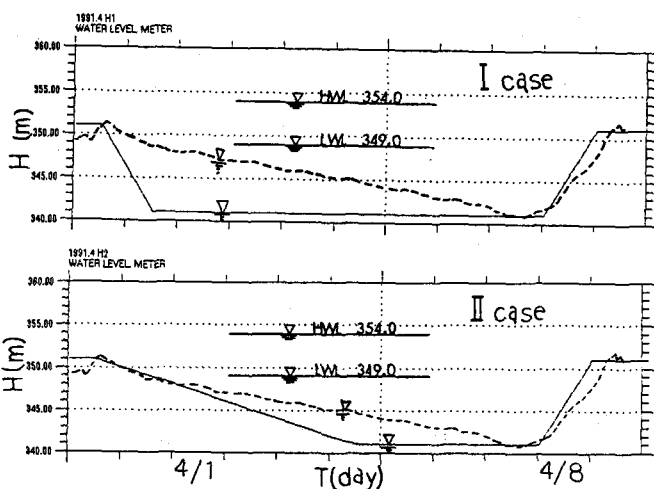


図-6 水位低下の方法（点線は実績）

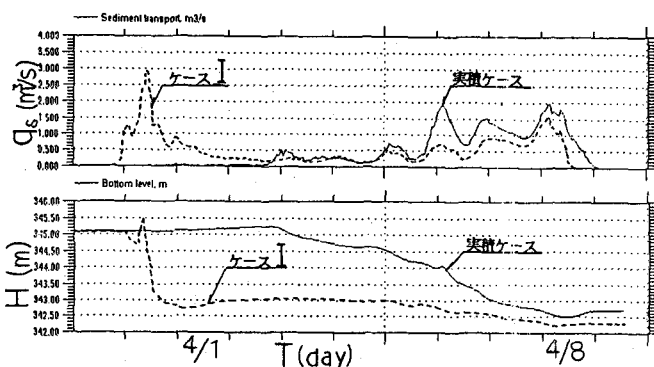


図-7(a) 水位低下速度（ケースI）による流砂量と河床変動

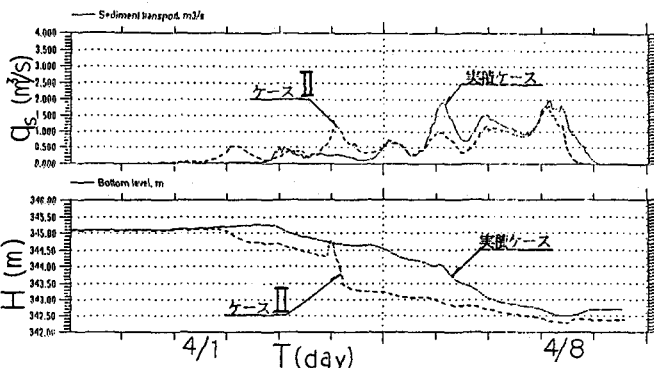


図-7(b) 水位低下速度（ケースII）による流砂量と河床変動

流砂量の変化と同じく水位低下直後に大きな河床変動が発生している。一方実積、およびケースⅡでは、比較的ゆるやかに変化している。

(3)濁質の経時変化

図-8には、ダム地点の濁質の時系列を示している。ケースⅠでは中流部で約5500ppm、ダム地点で約4000ppmの濁水が発生している。また、ケースⅡでも、中流部、ダム地点それぞれ約1000ppmの発生があり、実積が最も低い100ppmとなっている。これから、水位低下速度について、堆砂移動の効果からは、水位低下を急激にしかも長期間実施するのが望ましいものの、逆に濁質の発生面からは、ゆっくり水位低下した方が望ましい。解析結果からも理解されるように、実積の水位低下速度1m/日は、濁質（濁水）発生を抑制する面からは適当であったと思われる。

4. まとめ

滝調整池での掃砂実績を例とした数値解析結果から、水位低下によるダム堆砂の流水掃砂について、明らかにされた点をまとめてみると、

- (1)掃砂する河床変動、掃砂量、濁質の把握が、一次元の解析的な予測計算で十分可能である。
- (2)滝調整池の場合、掃砂量は主として最低水位に達する前後が最も多く、しかも、中流部での移動効果が顕著である。
- (3)堆砂は主として浮遊砂形式で掃砂され、流量が大きい程掃砂も大きくなる。
- (4)濁水の発生原因となる濁質の粘着性は、堆砂に比較的含量が少ない場合粘着性は考慮する必要はない。
- (5)水位低下速度は濁水の発生を抑制する面からは出来るかぎり、緩やかに実施するのが望ましい。

このように、水位低下による堆砂の流水掃砂は、計画を正しく行えば何ら設備導入を必要としない非常に経済的で確実な方法である。近年、河川の上下流全体を眺めた土砂調整がダム設置者の重要な課題となっている。解析的な予測計算が精度良く実施できれば、ダム調整池、貯水池に流入する土砂のコントロールすることも十分可能であろう。

最後に、今後の課題として、掃砂が水みち侵食から進行し側岸侵食へと移行していく現象や、掃砂による河床の粗粒化現象等、掃砂のメカニズムをより良く表現する解析手法の高度化を図って行きたいと考えている。

参考文献

- (1)黒田、倉脇：調整池堆砂の掃流効果について、水工学論文集、1992年2月
- (2)Abbot, M., B., : Computational Hydraulics Elements of the Theory of Free Surface Flows 1979
- (3)Engelund, F., and Hansen, E. : A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Teknik Forlag, Copenhagen, 1967
- (4)Engelund, F., and Fredsoe, J. : Hydraulic theory of alluvial rivers, Advances in Hydro Science, 1982
- (5)岩下、塩田、喜多村：貯水池堆積物の侵食と濁質の流出機構について、電力土木、1988年1月
- (6)鈴木、荒木、袴塚：大規模な貯水池低下を伴う取水設備の改造、電力土木、1992年3月

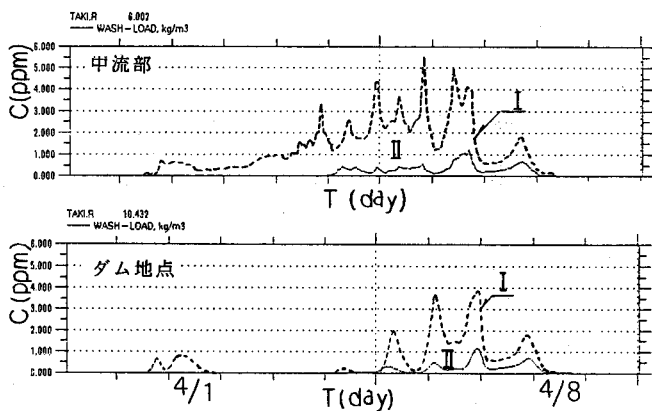


図-8 水位低下の方法による濁水の変化（中流部、ダム地点）