

急勾配トンネル水路の土砂による閉塞現象とその数値解析

Sediment Blockage Phenomenon in A Steep Tunnel and its Numerical Simulation

大本雄二*・中山昭彦**

Yuji OMOTO, Akihiko NAKAYAMA

*正会員 (株)ニュージェック 西日本事業本部 河川・海岸部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

**正会員 ph.D. 神戸大学大学院教授 自然科学研究科地球環境科学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

Mechanisms of sediment transport and the conditions for choking or complete blocking, in particular, of sediment bypass tunnels designed for abating sediment deposition problems in reservoirs created by dams have been studied both experimentally and numerically. Experiments show that the tunnel tends to choke when the sediment discharge is large for the same height of the weir placed to control the water discharge, and when the water discharge is small for the same sediment discharge. A numerical simulation method using the one-dimensional unsteady pipe flow with movable bed model appears to explain the trends of the experiments.

Key Words : sand blockage phenomenon, bed variation analysis, steep tunnel, pipe flow.

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂問題は、日本ばかりでなく、世界的にも重大な関心事であり、Morris¹⁾によると、21 世紀半ばまでに全世界の貯水池の 30% 以上が失われるであろうとされている。

堆砂問題の 1 つの対策手法として、急勾配トンネル水路を用いたバイパス排砂システムが考えられる^{2), 3), 4), 5)}。ここでいうバイパス排砂システムとは、貯水池の末端付近に取水口を、ダム下流に放水口を設けて、出水時に流下する土砂を、急勾配水路を用いて貯水池に流入させずにダム下流に導くものである。この手法の特徴として、堆砂の進行を防ぐばかりでなく、土砂の連続性が確保できる点が挙げられる。

筆者らは、堆砂対策の中でも土砂の連続性が確保できるという点から、バイパス排砂の中でもウォッシュロードから掃流砂までの全粒径を対象としたバイパス排砂システムに着目し、その土砂水理学的特性を明らかにしようとしている^{6), 7)}。

トンネル水路内に掃流砂をも流入させる計画とした場合、土砂水理学上の最も重要な懸案事項は土砂によるトンネル水路の閉塞の有無にあるものと考えられる。それを明らかにするためには、トンネルへの流入土砂量を規定する、取水口部の分派特性を把握し、どのようなメカニズム・条件で閉塞するかを検討しておく必要がある。

管路における沈降性土砂輸送においては、管路の流送、

濃度、粒径、比重、抗力係数、管径などによってどのような流動状態をとるかが変化する。一般に管底部に粒子層が存在する流れは、流速の増加とともに、粒子運動のない堆積層流れから部分堆積層流れ、摺動層流れへと遷移する⁸⁾。

このような過程の中で管路の閉塞を考えた場合、堆積層流れ、部分堆積層流れの状態で、上流から土砂が供給され、管全体の抵抗の増大により流量が減少し、閉塞に至るというメカニズムが想定される。なお、一時的に大量の土砂が流入した場合にも閉塞に至る場合が考えられるが、ここでは対象外としている。

筆者らは、取水口部における分派特性と流量の減少に伴う土砂の管路閉塞を検討するために移動床水理模型実験を行うとともに、急勾配トンネル水路の土砂による管路閉塞に関する数値解析を試み、いくつかの知見が得られたので報告するものである。

なお、移動床水理模型実験については小久保ら^{9), 10)}により一部既発表であるが、未発表のデータについて、整理している。

2. 管路の土砂閉塞現象

2.1 水理模型実験概要

実験装置を図-1 に、主要な実験条件を表-1 に示す。

模型は大きく分けて、河道水路部、バイパストンネル部、帰還水路、給水装置、及び循環水槽からなる。

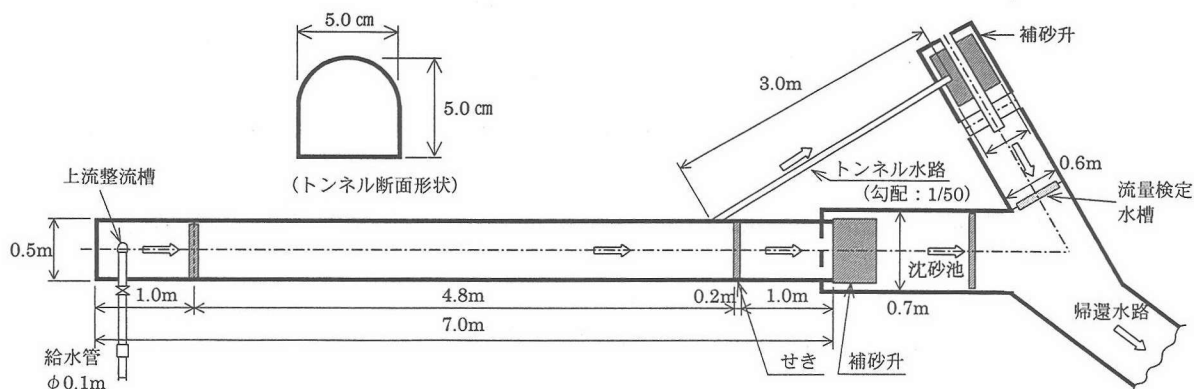


図-1 実験水路模式図

表-1 主な実験条件

流量	2.5~25.0ℓ/s
初期河床勾配	1/30~1/100
給砂量	土研式より算定
河床材料粒径	1.13mm (平均)
せき高	0cm~10cm
せき位置	20cm

※せき高, せき位置はそれぞれトンネル初高, トンネル中心位置を基準とした値。

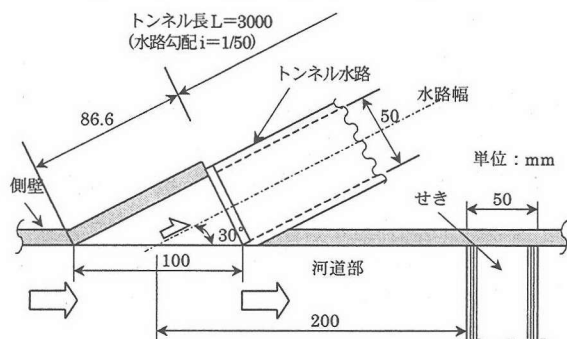


図-2 バイパストンネル接合部付近詳細図

河道部は、幅 0.5m、高さ 0.3m、長さ 7.0m の矩形水路（木製）とし、上流には流水を安定させるための整流槽を 1m 区間確保するとともに若干の固定床部分を設けた。バイパストンネル部は幅 5cm×高さ 5cm×長さ 3.0m の幌型断面パイプ（透明アクリル製）とし、矩形水路の下流端から 1.2m の左岸側に、平面的に河道流向に対して 30° の角度で、縦断的には水路勾配 1/50 で設置した。接続部分の詳細な諸元を図-2 に示す。これらの下流にはそれぞれ幅 0.7m と 0.6m の流量検定水槽（三角堰を使用）と沈砂池を兼ねた帰還水路を設置し、帰還水路を経た流水は循環水槽に送られ、給水ポンプで実験装置上流端に供給される。

実験は、矩形水路の所定の位置にせきを設置し、所定の勾配となるように実験砂を敷き均し、初期河床を整理した。実験砂は、全粒径を対象とする排砂システムであることから、混合砂を用いるべきであろうが、現象を単

表-2 実験ケースおよび閉塞の有無

ケース名	せき高 (取水口数高基準) (cm)	初期河床 勾配	上流流量 (ℓ/s)	給砂量 (空隙なし) (cc/min)	通水時間 (時:分)	実験* 結果
ア	2.5	1/50	20.0	2200	1:30	○
イ	2.5	1/50	10.0	1000	2:12	○
ウ	4.0	1/30	7.8	1600	2:15	●
エ	4.0	1/30	5.0	1000	3:35	●
オ	4.0	1/40	13.0	1900	3:05	●
カ	4.0	1/40	11.0	1600	3:25	○
キ	4.0	1/40	7.3	1000	3:55	○
ク	4.0	1/50	20.0	2200	2:55	●
ケ	4.0	1/50	17.5	1900	2:55	○
コ	4.0	1/50	15.0	1600	2:20	○
サ	4.0	1/50	10.0	1000	3:00	○
シ	5.0	1/50	20.0	2200	1:10	●
ス	5.0	1/50	10.0	1000	2:50	●
セ	6.0	1/50	20.0	2200	0:47	●
ソ	6.0	1/50	10.0	1000	2:00	●
タ	6.0	1/70	20.0	1400	2:15	●
チ	6.0	1/70	15.0	1000	2:45	●
ツ	6.0	1/70	10.0	630	4:55	●
テ	6.0	1/100	20.0	800	6:18	○
ト	6.0	1/100	10.0	370	5:40	○
ナ	10.0	1/50	10.0	1000	3:38	●
ニ	10.0	1/100	20.0	800	6:30	○

*○閉塞しない ●閉塞する

純化して基礎的なデータを取得することを目的として、ほぼ様な平均粒径 1.13mm の寒水石（比重約 2.65）を用いた。

この状態に対し、上流から電磁流量計で計量した所定の流量を定常的に供給するとともに、初期河床勾配を用いて土研式により給砂量を算定して上流端から給砂した。矩形水路内は堰の影響で基本的に堆積過程の河床変動となつて、デルタがせきに達することにより、せきからの越砂が始まる。十分に安定したケースでは、矩形水路内の河床勾配も安定し、ほぼ給砂量とせき付近の流砂量はほぼ同じと見なせるが、閉塞するケースでは、基本的に給砂量と流砂量は一致していないといえる。

計測は、矩形水路内の河床高としたトンネル内河床高と水位、実験装置下流端での土砂量、流量等とし、極力それらの時間変化が把握できるように行った。

通水時間は、閉塞が発生したケースについては閉塞するまで、閉塞に至らなかったケースは十分に安定するま

でとし、概ね1時間～6時間程度とした。

2.2 管路の土砂閉塞現象のメカニズム

(1) 実験ケース

実験ケースは表-2 に示すように 22 ケース行った。

せき高 (図-3 参照) は、トンネル取水口開口高 5cm に対して、その開口高と同じ 5cm とそれよりも低い 4cm, 2.5cm 及びそれより高い 6cm, 10cm を設定した。それぞれのせき高に対して、初期河床勾配、上流流量、給砂量により流砂量を変化させた。

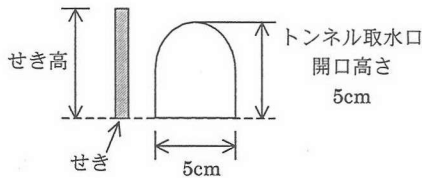


図-3 せき高

(2) 実験結果と閉塞に至る過程

表-2 には、各ケースの閉塞の有無を併記してある。実験ケースにより、閉塞が発生する場合と発生しない場合とがある。せき高が、トンネル取水口部の半分であるせき高 2.5cm の場合には閉塞は発生しなかった。一方、せき高がトンネル取水口部と同程度か高い場合には、給砂量（流砂量）が大きい場合には閉塞するが給砂量（流砂量）が小さい場合には閉塞しない結果となった。

図-4～7 は、閉塞しなかった代表ケースとしてケース〔ケ〕、閉塞に至った代表ケースとしてケース〔ス〕の流量、流砂量の時間変化、トンネル内の河床高の最終形状を示したものである。

以下の記述で流量配分 κ 、流砂量配分 κ_g という表現を用いるが、その定義は以下のようである。

$$\kappa = \frac{Q_T}{Q_T + Q_R} \quad (1)$$

$$\kappa_g = \frac{Q_{bT}}{Q_{bT} + Q_{bR}} \quad (2)$$

ここに、 κ ：流量比、 Q_T ：トンネル流量、 Q_R ：分流後の河道流量（せき越流量）、 κ_g ：流砂量比、 Q_{bT} ：トンネル通過土砂量、 Q_{bR} ：河道下流端土砂量（せき越砂量）である。

まず、閉塞に至らなかったケース〔ケ〕は、最初の 5 分間は給砂による堆砂がせきに達していない状態で、流量比 κ は 0.1 程度であるが、全流砂量がバイパス側に流下している。10 分程度経過後はせき上流に土砂が貯まり始めせきからの越砂が始まり、流砂量比 κ_g は急激に低下をはじめ、それとともにトンネル内には堆砂が見られ

ようになり、トンネル流量が減少して流量比 κ も低減していく。

その後 1 時間程度後には、トンネルから排出される土砂量と河道下流端に達する土砂量の和がほぼ給砂量程度になり、 $\kappa=0.008$ 、 $\kappa_g=0.04\sim0.05$ で安定し、閉塞には至らない。このときの κ_g/κ は 5～6 程度と、川合ら¹¹⁾の既往検討に比べてかなり大きな値を示していることは注目に値する。この原因としては、取水口前面の深掘れ形状が深く関与していると推察される。すなわちせき前面では、流量規模、せき高等に応じて二次流が発達し、すり鉢上の深掘れが形成され、付近の砂はトンネル取水口方向に移動しやすくなっているためと考えられる。トンネル内の最終堆砂形状を見ると、トンネルの上流半分ほどは土砂の堆積により 8 割程度流積が減少しており、この部分は管路流となっているのに対し、トンネルの下流半分は、下流に向かって堆積高が減少する開水路流となっている。

一方、閉塞に至ったケース〔ス〕では、せき高が高く流量が小さいためにケース〔ケ〕に比べてせきに堆砂が達し始めるのが約 30 分後と遅くなる。その後 1 時間位までの間にケース〔ケ〕と同様に越砂が始まり、トンネルからの流出土砂量と河道下流端での土砂量の和が大きくなりつつ、トンネル内の堆積も顕著になりトンネル流量が減少を始める。その後徐々にトンネル内の堆積が進むとともにトンネルの流量、流砂量は減少を続け、トンネル内の堆積がトンネル頂部に達して閉塞に至る。閉塞に至ったときのトンネル内の堆砂形状は図-7 に示すように、トンネル上流側がほぼ土砂で埋まるという形態をとる。

また、せきがトンネル取水口部開口高さより高い場合でトンネルが閉塞に至らない場合の特徴として、トンネル取水口前面の深掘れが存在することが挙げられる。図-8 は閉塞に至らなかったケース〔テ〕のトンネル取水口付近の写真であるが、深掘れが存在することがわかる。

この深掘れの存在、消長は、 κ 、 κ_g 及びトンネルの閉塞に深く関与しているものと推察される。

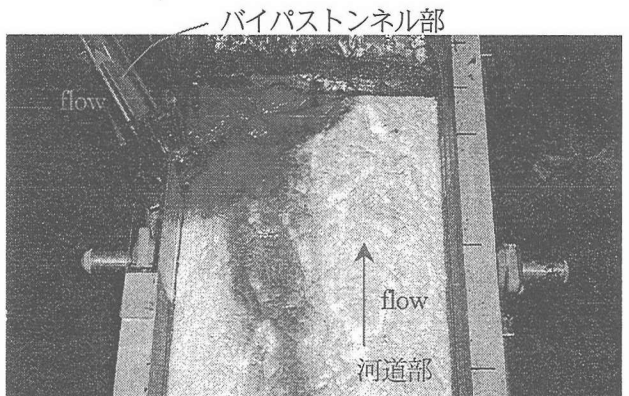


図-8 取水口前面の深掘れの状況

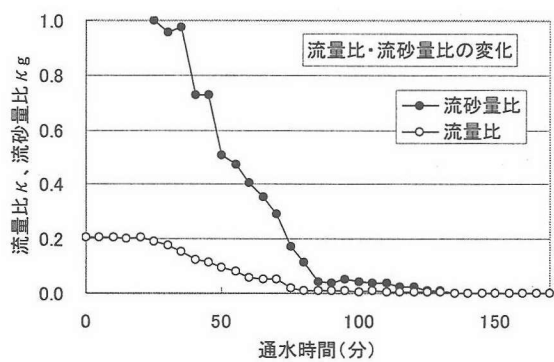
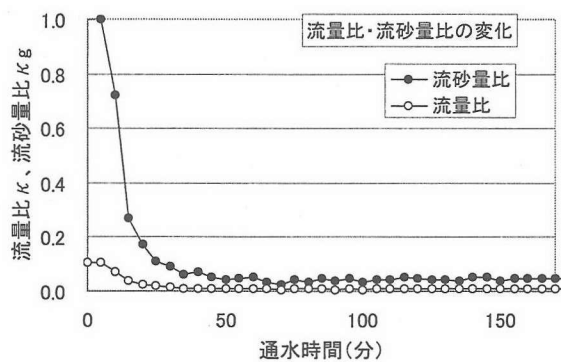
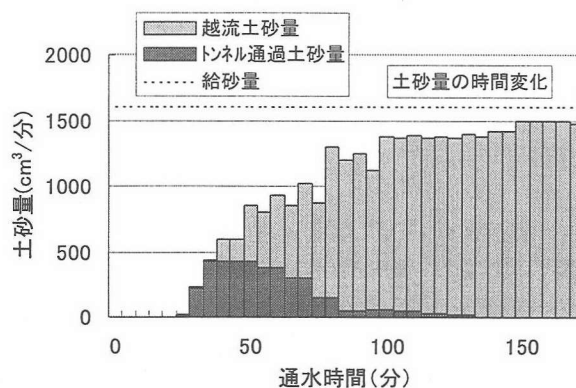
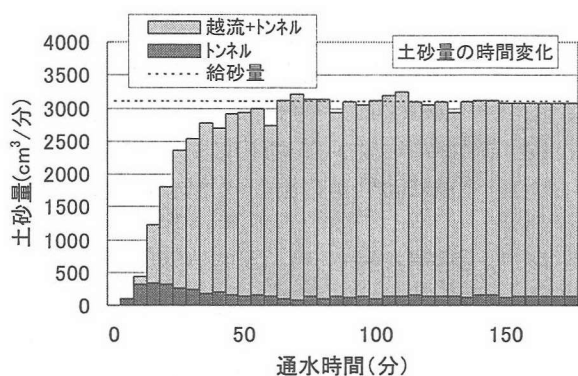
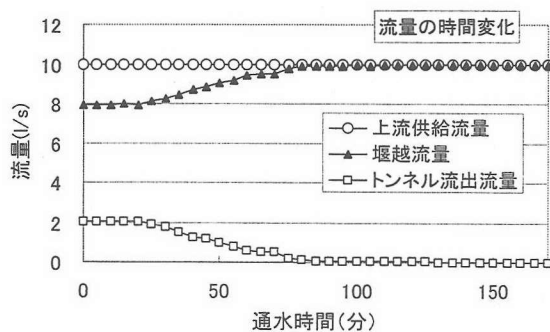
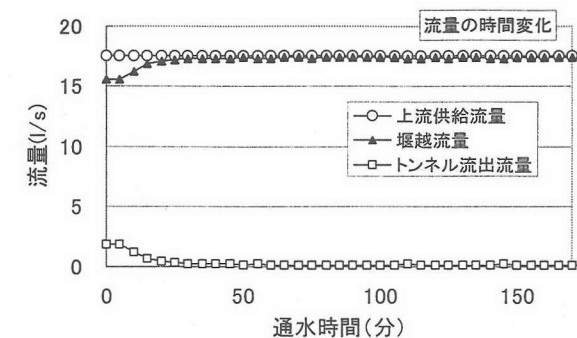


図-4 流量、流砂量の時間変化 (ケース [ケ])

図-6 流量、流砂量の時間変化 (ケース [ス])

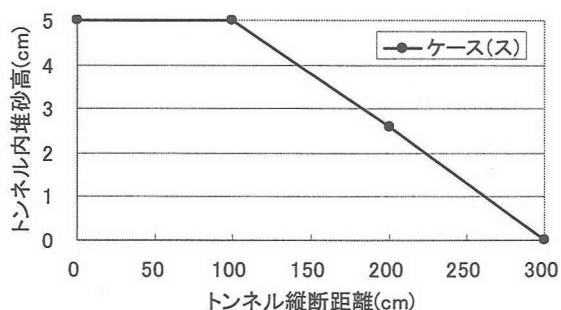
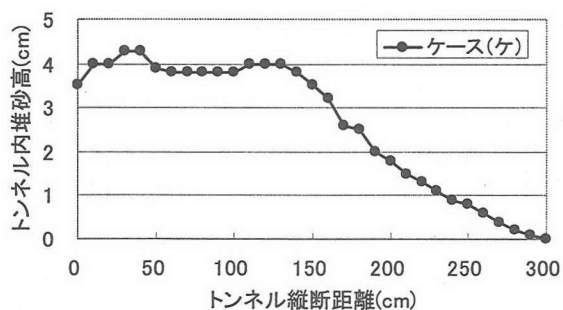


図-5 トンネル内最終河床高 (ケース [ケ])

図-7 トンネル内最終河床高 (ケース [ス])

2.3 土砂による管路の閉塞条件について

図-9は、実験結果に基づく閉塞の有無をせき高4cmと6cmについて無次元河道流量 ($Q/\sqrt{gB_R^5}$ Q :分岐前の河道流量, g :重力加速度, B_R :河道幅), 無次元河道流砂量 (Q_b/u_*d Q_b :分岐前の河道流砂量, d :河床材料粒径) の平面にプロットしたものである。 u_* は実験値に基づき次式により算出した。

$$u_* = \sqrt{ghI_e} \tag{3}$$

ここに g :重力加速度, h :せき直上流の水深, I_e :上流河道の平均的なエネルギー勾配である。

ここで流砂量は、閉塞に至らないケースは、安定した状態でのバイパストンネル流出土砂量+河道下流端土砂量であるが、閉塞したケースは閉塞する直前の河道下流端土砂量を用いて整理した。したがって、ここでの流砂量は、河道における流砂量の大小を評価したもので、トンネル内の流砂量ではないことに留意されたい。

傾向としては、○と●を境界とした閉塞領域が存在する。同じせき高であれば同じ流量でも流砂量が多い場合に閉塞しやすく、同じ流砂量でも流量が少ないほうが閉塞しやすいといえる。また、せき高を W 、トンネル水路幅を B_T としたとき、 $W/B_T=0.8$ と $W/B_T=1.2$ を比べると、同条件であれば $W/B_T=1.2$ のほうが閉塞しやすい傾向にあることがうかがえる。

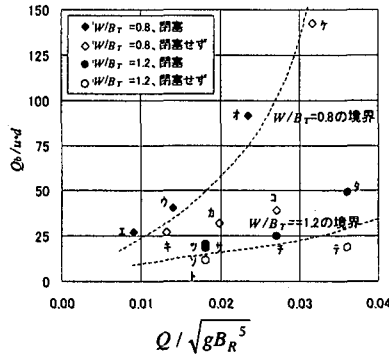


図-9 閉塞の有無と流量、流砂量の関係

これらの実験結果と既往の検討結果(6, 7, 12) から、閉塞が発生するかどうかの条件の1つに、トンネル内に土砂が堆積した場合に取水口部の水位がどのように変化するかが挙げられよう。

すなわち、既往検討の取水口部は、トンネル内に土砂が堆積した場合、取水口部前面水位が上昇する構造になっていて、トンネル内の流量の減少に対して、トンネル内の流量を増加させる方向に作用させることができるのに対して、今回の検討では、取水口部の水位がせきの越

流水深の増加分しか上昇できず、トンネル内の流量を十分に増加させるものとはならない構造であるからである。

このことは、ここで対象としているような自然流下を前提としたバイパス排砂システムの設計にあたっては、取水口前面水位についても考慮しておく必要があることが示唆されるものである。

3. 管路の土砂閉塞現象の数値解析

3.1 数値解析手法

(1) 数値解析手法の概要

筆者らは、流砂を伴った急勾配管路流に対して、開水路流で用いられる河床変動計算手法、すなわち、流れと河床変動を交互に計算する方法を適用し、ある程度の再現性、有用性があることを示した(6, 7)。

ここではそのモデルを用いて、2.の実験現象を再現することを試みた。図-10に計算フローを、図-11に計算モデルのイメージを示す。

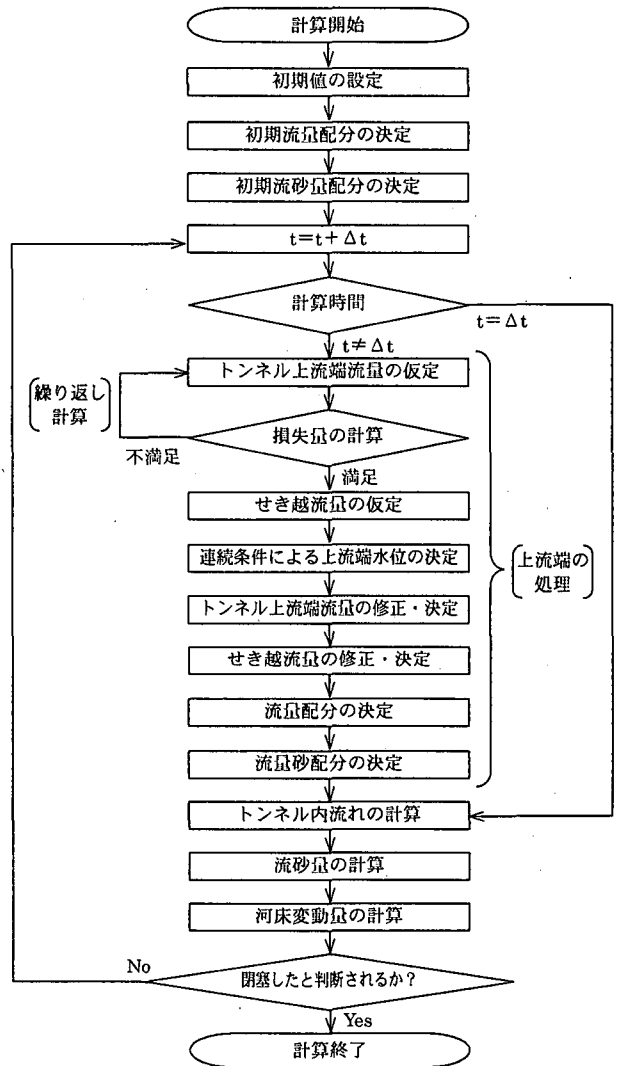


図-10 計算フロー

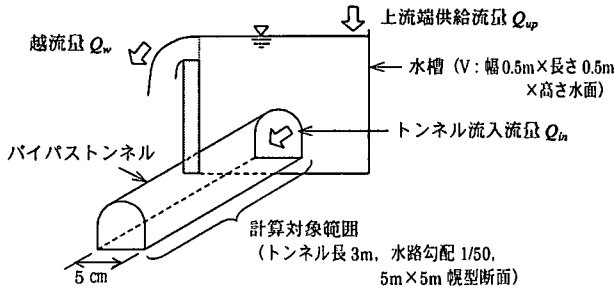


図-11 計算モデルのモデルのイメージ

計算対象範囲は、バイパストンネル部分のみとしているが、トンネル内の堆積に伴うトンネル内流量の減少、せき越流量の増加を表現するために、トンネル取水口上流部に水槽があるものと仮定し、トンネル流量、越流量の算定にあたっては連続条件を満足させるようにした。

(2) 基礎方程式と計算方法

流れの計算は、一次元非常管路流であり、質量保存式、運動量保存式は以下のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g(s_f - s_o) = 0 \quad (5)$$

ここに h : 管底基準のピエゾ水頭, v : 断面平均流速, a : 圧力の伝播速度, g : 重力加速度, s_f : 摩擦勾配, s_o : 管勾配, t : 時間, x : 流下方向距離である。

流れについては、(4)、(5)を連立させて特性曲線法を用いて解いた。また、摩擦勾配は摩擦損失係数を用いて(6)式で評価した。

$$f = 8 \left(\frac{u_*}{v} \right)^2 = I \cdot 4R \cdot \frac{2g}{v^2} \quad (6)$$

ここに f : 摩擦損失係数, $u_* = \sqrt{gRI}$, $R = A/S$, A : 断面積, S : 潤辺, I : エネルギー勾配である。

(6)式のエネルギー勾配を径深分割法¹³⁾ (図12)を採用して、以下の(7)、(8)、(9)式で評価した。

$$R_p S_p + R_s S_s = A \quad (\text{断面分割式}) \quad (7)$$

$$\frac{v}{u_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{u_{*p} R_p}{v} \right), \quad u_{*p} = \sqrt{g R_p I}$$

$$(A_p \text{ 領域の流速の式}) \quad (8)$$

$$\frac{v}{u_{*s}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_s}{k_s} \right), \quad u_{*s} = \sqrt{g R_s I}$$

(A_s 領域の流速の式) (9)

ここに A : 堆砂高を考慮した流積, v : 断面平均流速, $R_p \cdot R_s$: それぞれ $A_p \cdot A_s$ 領域の径深, $S_p \cdot S_s$: それぞれ $A_p \cdot A_s$ 領域の潤辺, k_s : 相当粗度 (粒径使用), ν : 動粘性係数, I : エネルギー勾配である。

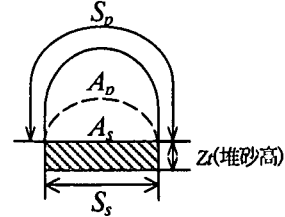


図-12 断面分割説明図

これらの水理量は、ある時間での河床高が既知であるとし、 Δt 秒間の河床変動量が流れに与える影響は無視している。河床高の算定は、河床高を固定した水理量の算定結果に対し、以下の流砂の連続式、流砂量式 (芦田・道上式) により行った。

$$\frac{\partial (Z_s \cdot B)}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (q_B \cdot B) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = 17\tau_{*s}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*s}} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_{*s}} \right) \quad (11)$$

ここに Z_s : 河床高, t : 時間, λ : 空隙率, B : 掃流幅, x : 流下方向距離, q_B : 単位幅掃流砂量, σ : 砂粒子の密度, ρ : 水の密度, d : 粒径, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, τ_{*s} : 無次元掃流力, u_{*c} : 限界摩擦速度, u_{*s} : 摩擦速度 (添え字 s は堆砂部が支配する領域の意) である。

これらの諸式に基づき流れと河床変動を交互に算定することにより、エネルギー高、河床高を順次求めていった。なお、計算時間間隔は $\Delta t = 0.05$ 秒、断面間距離は $\Delta x = 0.1$ m としている。

(3) 上流端流量の処理

実験で観測された現象を、非常流で計算するにあたっては、時間的に変化するトンネル流入流量を適切に設定する必要がある。ここでは、トンネル流入流量の時間変化は、トンネル部のエネルギーの総損失量の時間変化、上流水槽の水位の変化によって規定されるものと考え、以下の考え方により算定した。まず、現在時間 $t=n$ および、1ステップ前の時間 $t=n-1$ の河床高、 Z_s^n , Z_s^{n-1} が既知、現在時間の流量 Q' が既知の状態、現在時間の総

損失量 h_f^n を Z' 、 Q' を用いて算出する。次に Z_s^{n-1} の河床に対して h_f^n となる仮の流量 $Q^{(n+1)}$ を算定する。さらに、 Δt 秒間に Q' と $Q^{(n+1)}$ によって変動する上流水槽水位 H_s の変化割合 $\sqrt{dH_s/dt}$ で $Q^{(n+1)}$ を増減させ、補正值 $Q^{(n+1)}$ を求め、この量を $t=n+1$ でのトンネル上流端流入流量とした。上流水槽水位は、ポンプからの供給流量 Q_{up} とトンネル流入量 Q_{in} 、せき越流量 Q_w の収支として次式により算定した。

$$H_s = f(V) \tag{12}$$

$$V = V_0 + \int Q_{up}(t)dt - \left(\int Q_{in}(t)dt + \int Q_w(t)dt \right) \tag{13}$$

ここに V : 上流水槽に貯まった水の体積、 V_0 : $t=0$ における上流水槽に貯まった水の体積である。
 せき越流量は次式によった。

$$Q_w = CB(H_s - H_w)^{3/2} \tag{14}$$

ここに Q_w : せき越流量、 C : 越流係数、 B : せき幅、 H_s : 上流水槽水位、 H_w : せき高である。

(4) 給砂量

トンネル上流端での給砂量は、現時点では明らかになっていないため、仮の条件として、安定した状態で得られた流量比と流砂量比の関係をj用いて次式で与えた。

$$\kappa_g = \frac{Q_{bin}}{Q_b} = 6 \cdot \frac{Q_{Tin}}{Q_{Tup}} = 6 \cdot \kappa \quad (6\kappa < 1) \tag{15}$$

$$\kappa_g = \frac{Q_{bin}}{Q_{bup}} = 1 \quad (6\kappa \geq 1) \tag{16}$$

ここに Q_{bin} : トンネル流入土砂量、 Q_{bup} : 上流端給砂量、 Q_{Tin} : トンネル流入流量、 Q_{Tup} : 上流端流量
 ただし、計算開始をせき上流が満砂状態になった時点に設定し、 Q_b として上流端の給砂量を用いた。

3.2 数値解析結果

図-13~15に、閉塞に至ったケース〔ス〕の流量比 κ ・流砂量比 κ_g の時間変化、取水口部前面水位の時間変化、トンネル堆砂高の時間変化、をそれぞれ示す。

計算開始時間は、図のj通水時間の30分とし、計算終了は計算で管路流の計算が維持できるまでとした。

流量比 κ 、流砂量比 κ_g の時間変化をj実験値と計算値で比べてみると、j実験値では、閉塞が進行しはじめ、流量が減少したときの流量の減少割合と、j通水時間で40分以降の流量の減少割合とでは、前者のほうが小さいのに対して、計算では、堆砂がある程度進行してからのほうが流量の減少割合が大きくなっている。ちなみに、計算における流砂量比 κ_g が急激に減少をはじめる時間は、給砂量の条件式が(16)式から(15)式に移る時間である。

取水口部前面水位はj実験値が得られていないが、計算開始時の水位と、計算終了時の水位がほとんど変化のない結果となっていることから、2.2で述べたトンネルの閉塞とトンネル内流量の減少、取水口部前面の水位の関係については、j解析的にもある程度示されたと考えられる。

ただし計算は、トンネル堆砂高を示した図-15からもわかるように、管路内の土砂の堆積が管の半分程度となった時点で、計算が終了し、少流量時の水理量の算定、管路内の抵抗則の扱いに課題を残す結果となった。

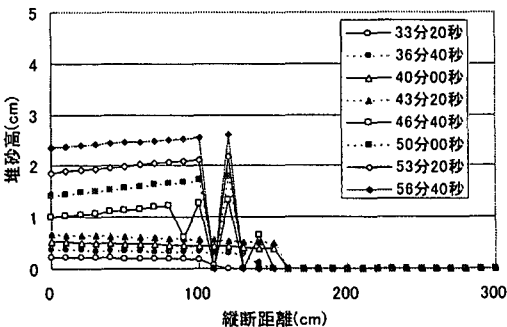


図-15 トンネル堆砂高の時間変化

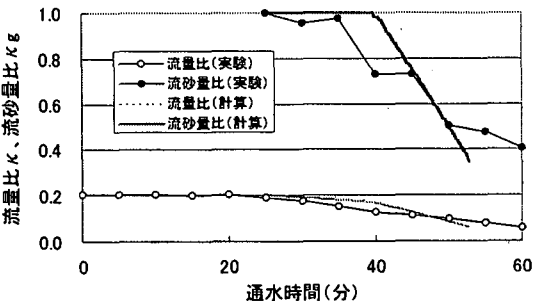


図-13 流量比・流砂量比の変化

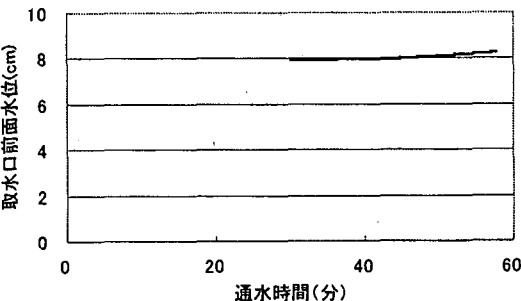


図-14 取水口前面水位の時間変化

3.3 取水口部の合理的構造について

以上の検討から、トンネル閉塞のプロセスの1つとして、①トンネル内での堆砂の発生、②堆砂高の増加、③トンネル流量の減少、④トンネル内土砂流送能力の減少、⑤堆砂高の更なる増加、⑥閉塞という状況が発生し、このプロセスの中で、トンネル流量が減少したときに、取水口部前面水位が上昇できる構造であれば、③ないし④の時点でトンネル流量を増加させ得ることが可能で、その場合には閉塞には至らないということがいえる。

取水口部前面水位の上昇できる構造としては、図-16¹⁴⁾に示す旭ダムバイパス排砂システムのようにせきとオリフィスを組み合わせた構造が挙げられ設計の際の参考になるものと考えられる。

現段階では解析が十分ではないが、今後の研究の進展により、閉塞の回避を考慮したバイパス排砂システムの合理的構造が見出されてくるものと予想される。

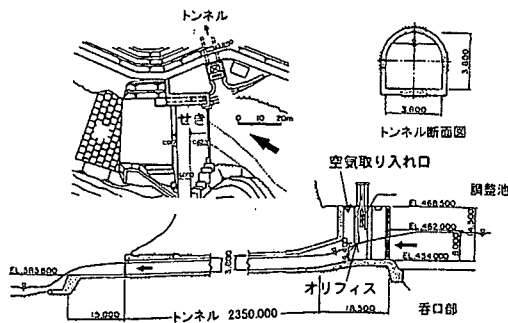


図-16 旭ダムバイパス排砂システム概要図¹⁴⁾

4. おわりに

本研究は、バイパス排砂システムを念頭においた、急勾配トンネル水路の土砂による閉塞現象について、移動床水理模型実験を行うとともに、その現象に対する数値解析を試みた。その結果、移動床水理模型実験からは、せきの高さや流量、流砂量変化によってバイパス水路が閉塞したり、しなかったりという現象の差異が現れ、条件によっては急勾配水路を用いたバイパス排砂システムが閉塞に至る可能性があることを示した。

また、その現象を一次元非定常管路流の計算により評価したところ、計算そのものは改善すべき点があるが、トンネル内の堆砂の発生とトンネル内流量の減少については、ある程度評価可能であることを示すとともに、このような急勾配水路の土砂による閉塞現象を考えていく上で、トンネル内流量の減少や取水口部上流の水位の変化が深く関与していることを明らかにした。

今後は、モデルの改善、精度向上を図るとともに、閉塞条件の明確化、成果の汎用化を試み、バイパス排砂システムの合理的設計手法の確立を図っていきたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、研究データの使用を

快諾頂いた関西電力(株)土木建築室の方々、実験等に御尽力頂いた(株)日本工業試験所の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Gregory L.Morris : RESERVOIR SEDIMENTATION MANAGEMENT : WORLDWIDE STATUS AND PROSPECTS, The 3rd World Water Forum Challenges to the Sedimentation Management for Reservoir Sustainability Proceedings of the Session, pp.97-108,2003.
- 2) 原田稔：貯水池のバイパス排砂システムに関する研究, 京都大学学位論文, 1998.
- 3) 柏井条介：貯水池土砂バイパスの計画検討, 土木技術資料 43-3, pp.36~41, 2001.
- 4) 原田稔, 寺田昌史, 出野尚, 大本雄二：貯水池のバイパス排砂システムによる掃流砂排出システムに関する実験的研究, 水工学論文集 第40巻, pp.813~818, 1996.
- 5) 芦田和男, 原田稔, 小久保鉄也, 大槻英樹, 斎藤憲, 大本雄二：貯水池のバイパストンネル排砂に関する研究(第二報), 河川環境総合研究所報告 第3号, pp.89~106, 1997.
- 6) 大本雄二, 宵田千裕, 中山昭彦：開水路河床変動解析手法の移動床急勾配管路流への適用性, 応用力学論文集 Vol.5, pp.649~656, 2002.
- 7) 大本雄二, 宵田千裕, 中山昭彦：急勾配トンネル水路による掃流砂輸送の研究, 水工学論文集 第47巻, pp.685~690, 2003.
- 8) 野田佳六：土砂の管路輸送, 第22回水工学に関する夏期研修会講義集, pp.A-3-1~16, 1986.
- 9) 小久保鉄也, 加藤雅広, 増田寛：貯水池土砂バイパストンネル取水口部の流量・流砂量配分比に関する実験的研究, 土木学会第54回年次学術講演会概要集Ⅱ-152, pp.304~305, 1999.
- 10) 大東秀光, 加藤雅広, 増田寛：貯水池土砂バイパストンネルの堆砂進行条件について, 土木学会第55回年次学術講演会Ⅱ-255, 2000.
- 11) 川合茂, 芦田和男：固定床開水路分流における流量・流砂量配分比に関する実験的研究, 土木学会論文集 第405号/Ⅱ-11, pp.139~146, 1989.
- 12) 原田稔, 小久保鉄也, 出野尚：貯水池のバイパス排砂システムにおけるトンネル内土砂水理特性, 土木学会論文集, No600/Ⅱ-44, pp.69~84, 1998.
- 13) 芦田和男, 江頭進治, 中島智彦：水平管路における土砂輸送形態と流砂機構, 京大防災研究所年報 第31号 B-2, pp.489~506, 1988.
- 14) 原田稔, 森本浩, 小久保鉄也：バイパス排砂システムの運用実績と効果, 大ダムNo173, pp.39~45, 2000. (2003年4月18日受付)