

貯水池のバイパストンネルによる 掃流砂排出システムに関する実験的研究

Experimental Study on Bypassing Tunnel
of Bed Load Transport in a Reservoir

* * * * *
原田 稔・芦田 和男・出野 尚・大本 雄二

By Minoru HARADA, Kazuo ASHIDA, Takashi DENO and Yuji OHMOTO

As a drastic countermeasure of reservoir sedimentation and turbid effluence over a long term, a bypassing tunnel system is proposed and studied. It can transport both bed load and suspended sediment without passing a reservoir. Two different scaled hydraulic model studies are executed to examine the properties of the bed load in the tunnel and the river bed variation near the entrance of it. Stability of the system on the sediment transport is also discussed through the experimental results.

Keywords: reservoir sedimentation, bypassing tunnel,
bed load transport, hydraulic model study

1. はじめに

ダム貯水池では、堆砂の進行による貯水池機能の低下、微細土砂の貯水池内の滞留による濁水の長期化、土砂供給のなくなったダム下流河道の河床低下、といった土砂問題を^{1), 2)}を抱え、これらの諸問題に対して従来より種々の対策が施されてきた。その1つの手段であるバイパストンネルは、ダム貯水池上流端付近に設けられた取水口からダム下流の吐き口まで、貯水池を経ることなく、洪水時の濁水および土砂を流下させるもので、貯水池への流入土砂量を軽減するとともに、下流河道へ土砂を供給する役目もあわせもつ³⁾(図・1 参照)。

しかし、既往の研究事例は浮遊砂やウォッシュロードを対象としたもので、掃流砂をも対象にしたものは見受けられない。掃流砂を対象とする場合、取水口部、トンネル内、吐き口部各々における

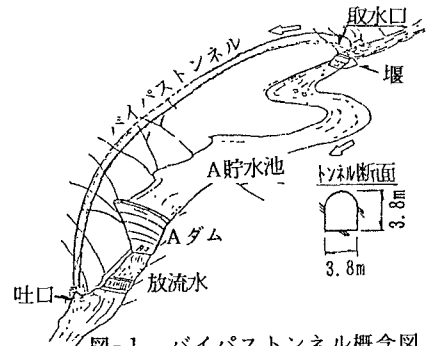


図-1 バイパストンネル概念図

- | | | | | |
|------|-----|----------------|-------------------|--------------------------|
| * | 正会員 | 関西電力株式会社 | 土木建築室長 | (〒530-70 大阪市北区中之島3-3-22) |
| ** | 正会員 | 工博 (財)河川環境管理財団 | 河川環境総合研究所 大阪研究所所長 | (〒540 大阪市中央区大手前1-6-4) |
| *** | 正会員 | 関西電力株式会社 | 土木建築室 | (〒530-70 大阪市北区中之島3-3-22) |
| **** | 正会員 | (株)ニュージェック | 水工部 | (〒542 大阪市中央区島之内1-20-19) |

土砂挙動特性と水理特性、さらに掃流砂排出システムとしての系全体の水理機能とその安定性について十分解明しておく必要がある。著者らはバイパストンネルによる掃流砂排出システムの実用化を目指し、モデル地点を対象に、水理模型実験、数値解析の両面から、これらの研究を進めており、本報告は、現時点までに得られたいくつかの知見についてとりまとめたものである。

2. バイパストンネル設計諸元

A貯水池のバイパストンネルは3.8mの幌型断面で全長約2.4km、トンネル勾配約1/34である。トンネル設計流量は120m³/sで、別途検討された濁水長期化軽減効果とシステムの経済性の最適化から決定されている^{4), 5)}。取水口直下流河道には、貯水池のH.W.L.と同じ標高の天端を有した堰を設け、概ね120m³/sまでの河川流量は、全量バイパストンネルへ、

それ以上の流量のときは貯水池にも流入させる計画である。取水口部はオリフィス構造で、約120m³/s以下の河川流量では開水路流、それ以上の流量のときはオリフィス流となる。

またオリフィス流のときにトンネル内が極力開水路流を維持できるようにオリフィス壁裏面には空気取り入れ口を設けている(図-2参照)。

3. バイパストンネル取水口部周辺の土砂水理特性

3. 1 オリフィス近傍の土砂挙動

取水口部付近の土砂挙動を把握するために、バイパストンネルの取水口部付近とその上流河道を抽出した無歪みの縮尺1/30の模型を用いた実験を行った。

(a) 実験方法

模型装置及び主要諸元の実物値と模型値を整理したものを、後述する縮尺1/70のシステム全体を再現した模型の場合とともに図-2、表-1に示す。実験は、バイパストンネルの有する通水能力が机上検討の結果を満足することを固定床実験で確認した後、移動床の実験へと移行した。移動床実験では、現地河床材料調査をもとに掃流砂のみを対象に、平均粒径、粒度分布が極力現地に近いものになるような混合砂(比重2.65の寒水石)を用いた。給砂は模型上流端より行い、その量は現況河床(堰およびバイパストンネルがない状態)の再現性が良好であった量とした。初期河床は現況河床の平均勾配(1/60)とし、流量は既往の出水データを参考に決定したいくつかのモデルハイドログラフを時系列的に与えた。この条件下で土砂挙動の観察、上流河道部の水位、河床高、バイパストンネル流入土砂量等の計測を行った。

表-1 諸元・水理量の実物値と模型値

諸元	実物値	模型値 縮尺 1/70	模型値 縮尺 1/30
ハイドロトンネル径	3.8m	5.4cm	12.7cm
ハイドロトンネル長	全長2370m	33.9m	2m
抽出	60m	---	---
上流河道再現範囲	700m	10m	20m
下流河道再現範囲	600m	---	---
	300m	4.3m	---
既往最大流量	560m ³ /s	13.7ℓ/s	113.6ℓ/s
トンネル設計流量	120m ³ /s	2.9ℓ/s	24.3ℓ/s
平均粒径d	49mm	0.7mm	1.6mm
上流河道部u _* (50m ³ /s)	31cm/s	3.7cm/s	5.7cm/s
砂粒R _* 数 (=u _* d/ν)	1.5×10 ⁴	約30	約90

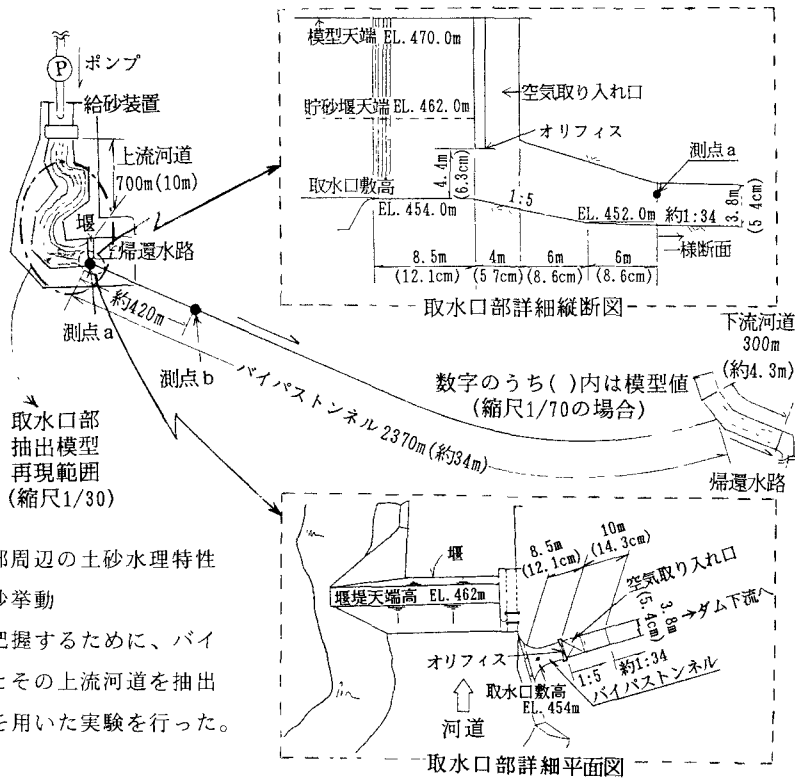


図-2 模型装置

(b) 土砂挙動

バイパストンネル取水口近傍では、取水口部前面の水位と、取水口部前面への堆砂の進行程度によって、一般に大きく以下の5つの状態が現出される（図-3参照）。

- ①開水路流、堆砂小；河道の掃流力に見合った土砂がバイパストンネル内に流入し、下流へと流送される。
- ②オリフィス流、堆砂小；オリフィスにより水位がせき上がり、取水口部前面の掃流力が小さくなるため、河道から供給される土砂量に対してバイパストンネル内に流入する土砂量が極端に少ない状態である。
- ③オリフィス流、堆砂進行中；②の後、湛水池部に土砂が堆積しはじめるが取水口にまでは達しないとき。
- ④オリフィス流、堆砂大；③の後、堰が満砂になり、引き込まれるようにトンネルに土砂が流入する状態。
- ⑤開水路流、堆砂大；取水口前面の掃流力は大きく、多量の土砂がバイパストンネル内に流入する。

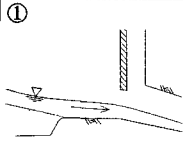
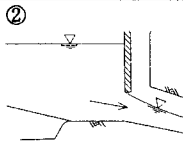
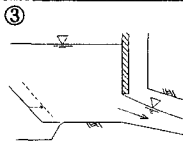
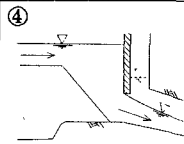
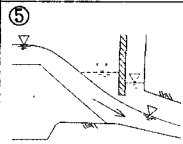
オリフィス部	開水路流	オリフィス流	オリフィス流	オリフィス流	開水路流
流 量	小	大	大	大	小
堆 砂 状 況	小	小	進行中	大	大
流入土砂量	中	小	小	中	大
流況模式図	① 	② 	③ 	④ 	⑤ 

図-3 取水口部付近の状況の分類

例えば、中規模の出水（ピーク流量120㎥/s～200㎥/s）を想定したモデルハイドログラフを通水した場合には①→②→①、あるいは①→②→③→①という経過をたどり、既往最大出水（ピーク流量560㎥/s）を通水したときには①→②→③→④→⑤→①となる。そのときの流量ハイドログラフ、上流供給土砂量およびトンネル流入土砂量の時間的変化を図-4に示す。これらの土砂特性において、特筆すべきことは2つある。1つは、流量が減少し④→⑤へ遷移するときに流入土砂量は急激に増大するものの、バイパストンネル自身が閉塞を防止するような機能を有していることである。これはちょうど出水末期の流量低減期に起こる現象で、オリフィス流となってせき上がっていた状態から、オリフィスが切れて開水路流となり大きな水面勾配がつくとき、取水口前面に堆積していた土砂が崩壊しつつバイパストンネル内に流入する（流入土砂量の増大）。しかしトンネル内の流送能力以上の土砂が流入した場合には、トンネル内に堆積した土砂により、通水能力が減少し、取水口部水位が上昇することによって再びオリフィス流となり、バイパストンネル内への流入土砂量が減少するとともに、トンネル内の流量、掃流力を高め、トンネル内の堆砂を妨げる（閉塞の防止）。

このことは、堰、オリフィス、トンネルを組み合わせたシステムとすることにより、取水口部付近の現象及びトンネル流入土砂量を安定化させることができているといえる。もう1つは、流量ハイドログラフ及び上流河道からの供給土砂量の時間的変化に対して、トンネル流入土砂量は時間遅れを生じ、またその波形も変化することである。これはオリフィスの存在により②、③ないしは④の状態があることに起因する。

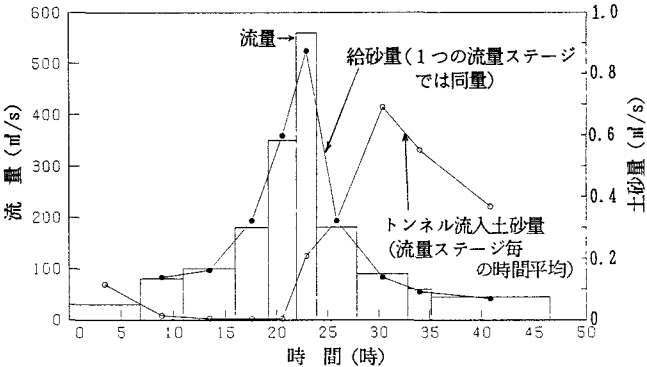


図-4 流量給砂量、トンネル流入土砂量の時間的変化

3. 2 トンネル流入土砂量

(a) トンネル流入土砂量実験式

実験で得られたトンネル流入土砂量を、取水口部付近の水理量を用いてブラウン型の掃流砂量式を模して表現することを考え、次式を得た。

$$\frac{q_B}{u \cdot d} = \alpha \left\{ \frac{u \cdot^2}{(\sigma/\rho - 1) g d} \right\}^\beta \quad \left[\begin{array}{ll} \text{オリフィス時} & \alpha = 2.15, \beta = -0.15 \\ \text{開水路時} & \alpha = 2.24, \beta = 0.64 \end{array} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_B ：単位幅あたりの掃流砂量、
 u ：摩擦速度($=\sqrt{ghI}$ 。： g ：重力加速度、 h ：取水口
前面局所水深、 I ：取水口前面エネルギー勾配)、
 d ：平均粒径、 σ ：砂礫の密度、 ρ ：水の密度である。

(1)式による計算値と実験値を比較したものを、図-5に示す。必ずしも整合性は十分でなく、特にオリフィス流の場合には精度が悪い。これは現象が、取水口部前面の堆砂の崩れ等の局所的な非定常性の強いもので、 u の評価に問題があるためと考えられる。

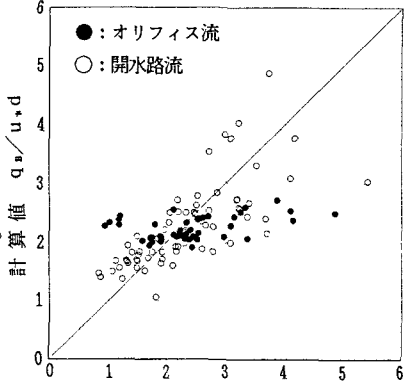


図-5 トンネル流入土砂量の比較

(b) 1次元河床変動計算によるトンネル流入土砂量

(1)式は、本実験におけるトンネル流入土砂量をある程度表現するものであるが、例えば、他地点への適用性等を考慮した場合、 u の評価に問題が残るとともに、上流河道から流送されてくる土砂量との連続性、整合性に曖昧さを残す。そこで、取水口部より上流の河道において1次元の河床変動モデルを構築し、その下流端における流砂量(=トンネル流入土砂量)と実験でのトンネル流入土砂量を比較してみた。ここでの計算モデルでは、実験においてバイパストンネルの存在により取水口上流部ではバイパストンネル側(右岸)に滞筋が固定され、段丘状に水路幅が変化する現象がみられたため、実験で得られた流量と水面幅の関係($B=7\sqrt{Q}$)を用いて滞筋を固定した。また下流端水位は実験での流量と水位の関係を、限界水深とオリフィスの流量公式にモデル化して与え、流砂の連続式として次式を用いた。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{B_B} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (B_B \cdot q_B) = 0 \quad \dots (2)$$

ここに、 z_B ：滞筋幅内の河床高、 B_B ：滞筋幅、
 λ ：空隙率、 q_B ：単位幅掃流砂量(土研式)、
 t, x ：時間及び流下方向の距離である。

図-6に時系列で実験値と計算値を比較しもの一例を示す。100 m^3/s 時にはずれも見られるが、概してトンネル流入土砂量を表現しており、上記モデルによる河床変動計算によってトンネル流入土砂量を評価することが可能であるといえる。

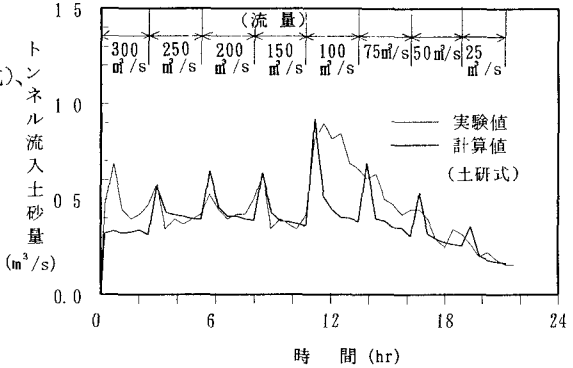


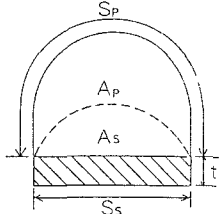
図-6 トンネル流入土砂量の時間変化

4. バイパストンネル内における土砂水理特性

4. 1 定常流時の土砂輸送機能

バイパストンネルのもつ土砂流送能力を確認するために、バイパストンネル部のみを抽出した縮尺1/70の模型において、定常流を通水し給砂量(≒流砂量)を変化させて、トンネル内の状況を観察するとともに、ほぼ定常となった状態でトンネル流量～流砂量～トンネル内堆砂の有無(有る場合はその堆砂高)の関係を調べた。流況観察からトンネル内の現象は大きく①開水路流で堆砂のない場合、②管路流で堆砂のない場

合、③管路流で堆砂のある場合(扱った実験条件の範囲では定常的には堆砂のある開水路流は存在しない)の3つの状態に分類される。図-7に、トンネル流量～流砂量～堆砂高の関係を整理したものをプロット点として示す。トンネル流量100 m^3/s までは、同トンネル流量に対して流砂量が増加した場合①→③に遷移し、およそ流砂量が増加すると堆積高も高くなる傾向が窺える。一方、150 m^3/s 以上の流量では現象が②→③に遷移し、ここでもおよそ流砂量の増加とともに堆砂高が高くなる傾向にある。このことは取水口からのトンネル流入土砂量が増加し、トンネル内に堆積することによって流水断面積が減少するような状況でも、一定流量が流れていれば、流速の増加により掃流力が大きくなるためその土砂量をも掃流し得ること、そのような定常状態ではトンネルが閉塞することではなく、バイパストンネルとして安定して機能することを示している。つまり、取水口部の機構と同様にトンネル自身にも土砂流送現象を安定化させるはたらきがあるといえる。この現象を流水断面Aが管壁に支配される領域 A_p と、砂礫面に支配される領域 A_s とに分けて考えるモデルを用いて計算してみた。計算は、 A_p 、 A_s で平均流速 V 、エネルギー勾配 I が等しいと仮定し、次の式を用いた。



$$Q = V \cdot A \quad (\text{連続式}) \quad \cdots \cdots (3) \quad R_p S_p + R_s S_s = A \quad (\text{断面分割式}) \quad \cdots \cdots (4)$$

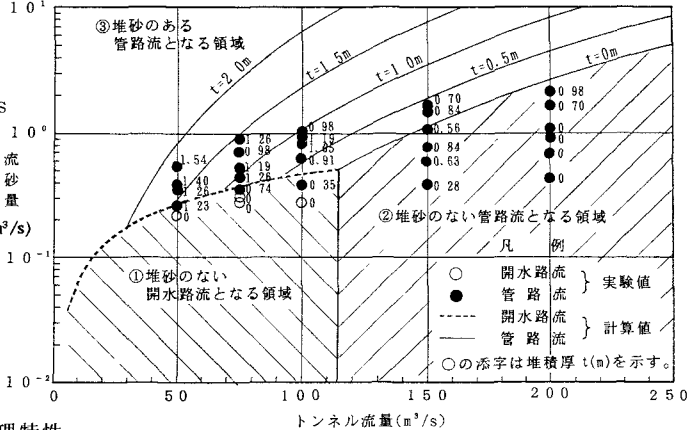
$$\frac{V}{u_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{u_{*p} R_p}{\nu} \right) \quad u_{*p} = \sqrt{g R_p I} \quad (p \text{領域の流速の式}) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\frac{V}{u_{*s}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_s}{k_s} \right) \quad u_{*s} = \sqrt{g R_s I} \quad (s \text{領域の流速の式}) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$q_b = \frac{u_*^3}{(\sigma/\rho - 1)g} \cdot \phi \cdot F(\tau_o/\tau_c) \quad (\text{掃流砂量式}) \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 R_p 、 R_s はそれぞれ A_p 、 A_s 領域の径深、 S_p 、 S_s はそれぞれ A_p 、 A_s 領域の潤辺、 d は砂粒子径、 k_s は相当粗度(粒径を使用)、 q_b は単位幅掃流砂量、 σ は砂粒子密度、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 τ_o は掃流力、 τ_c は限界掃流力、 u_* は摩擦速度、 ϕ は粗度の関数、 F は τ_o/τ_c の関数である。

この計算値は、図-7の中に線として示されており、実験値と計算値は150 m^3/s 以上の流量を除けば概ね合致している。この結果は定常状態でのトンネルの土砂輸送機能は、流水断面を分割する数値(m^2/s)モデルで表現可能であり、計算上も定常状態でのトンネル閉塞の危険性がないことを示すものといえる。



4. 2 非定常流時のトンネル内土砂水理特性 図-7 流量～流砂量～堆砂高の関係

定常状態におけるバイパストンネルの安定性は確かめられたが、取水口部の抽出模型の実験でもみられたように、現象そのものは非定常性の強いものである。そこでバイパストンネルシステム全体が水理的に安定して機能するかを確認するために、バイパストンネルシステム全体を再現した縮尺1/70の模型に、取水口部の抽出模型と同様に中規模出水を数波通水したのちの河床に既往最大出水のモデルハイドログラフ(図-4)を通水する実験を実施した。この既往最大出水通水時には、オリフィス流の180 m^3/s から90 m^3/s に変化する際にオリフィスが切れ、取水口前面の掃流力の増大により急激にトンネル内に土砂が流入して堆積し、開水路・管路混在の状態となった後、45 m^3/s 時にトンネル全長にわたって河床波を伴った堆砂のある管路流が形成される。しかし更に流量が低減すると、開水路流にもどりつつトンネル内の土砂は掃流され、トンネル内

に残存することはない。また、出水によって堰上流部に流送された土砂は、出水後にはほぼ全量下流河道から排出され、堰上流部では出水前の貯砂容量に復している。すなわち上流河道はパイパストネル設置後、ある程度経過した状態では、出水前後でほぼ同様な河床形状となり、浚渫等の人為的操作を施さずとも、自然の営力で貯砂容量を確保することができる。図-8にはこのときの流量低減時における取水口前面水位等の時間的変化を示している。多量の土砂が流入する90 m^3/s 時には取水口前面水位が低下、上昇を繰り返し、それに呼応して測点bでは取水口前面水位の低いときに堆砂し、水位の高いときに堆砂がなくなるという現象がみとれる。この現象は、抽出模型でみられた流入土砂量の増大とトンネル閉塞防止機能である。また、45 m^3/s 時には2mもの堆砂高となるが、通水断面が減少することにより掃流力が高まり閉塞することはない。これは4. 1節の定常流時のような状態が現れたとみなせる。これらの状況により、計画のパイパストネルはゲート操作等を行うことなくおおよそ安定して、上流からの掃流砂を下流河道に流送することができるシステムとなっている。図-4とほぼ同じ条件で、時間ステップを細かくして流量変化をなだらかにした場合の実験を行ったところ、トンネル内の流れと土砂移動の状況は上述の場合と大きく異なった。すなわち、トンネル内の堆砂はオリフィス流から開水路流へ遷移する時点で、取水口付近において一時的に生じるだけで全般的にはトンネル内には堆砂せず、開水路流となった。このことはほぼ同じ流量、流砂量の条件に対して、堆砂のない開水路流と堆砂のある管路流の二つの状態が存在し、どちらの状態になるかは取水口付近の局所的な条件に支配されることを意味するものである。これについては、システムの安定性問題とも関連させて、今後数値計算モデルにより、検討を進めていくつもりである。

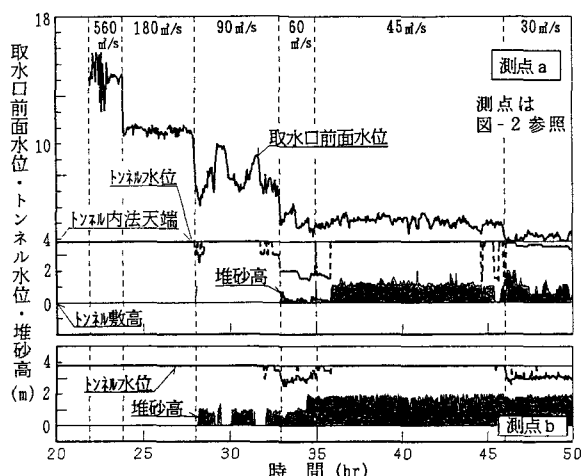


図-8 取水口前面水位・トンネル水位・堆砂高の時間的変化

5. おわりに

本研究から、堰、オリフィス、トンネルを組み合わせた計画のパイパストネルは、トンネル閉塞を回避する機能を有し、1 出水分の土砂はその出水時にほぼ全量下流に流送することができる等、人為的操作なしに安定して下流河道に掃流砂を排出できるシステムであるといえる。今後は、更に実験を進め、システム全体の河床変動を表現できる数値モデルの構築を図るとともに、維持・管理上の問題に対する検討も行っていく予定である。最後に、本研究を進めるにあたって貴重なご助言を頂いた京大 高橋保教授、戸田圭一助教授、立命大 江頭進治教授に感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 吉良；ダムの堆砂とその防除、森北出版、1982
- 2) 芦田；ダム堆砂文献資料集成改訂版、河鍋書店、1976
- 3) 例えば 柏井、本田；土砂バイパス施設分派部の水理的検討、土木技術資料No. 108、1995
- 4) 寺田、原田、芦田；貯水池のバイパス排出システムの計画について、土木学会第50回年講、2-A、1995
- 5) 原田、寺田、出野、葛岡；貯水池のバイパス排出システムによる濁水長期化軽減効果の検討、
水工学論文集 第40巻、1996 (投稿中)
- 6) 芦田、江頭、中島；水平管路における土砂輸送形態と流砂機構、京大防災研年報 第31号 B-2、1988
- 7) 斉藤、大本、原田、芦田、戸田；貯水池のバイパストネル排砂に関する実験的研究、
土木学会第50回年講、2-A、1995