

分派堰を有しないバイパス排砂システムの 適用性検討

STUDY ON APPLICABILITY OF A SEDIMENT BYPASS SYSTEM WITHOUT A DIVERSION WEIR

大本雄二¹・片岡幸毅²・加藤雅広²・村瀬政善¹

Yuji OMOTO, Koki KATAOKA, Masahiro KATO and Masayoshi MURASE

¹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)

²正会員 関西電力(株) 土木建築室 土木保修グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島 3-3-22)

A Sediment bypass system has been proposed as a countermeasure against sedimentation and turbid effluence that occur in reservoirs over a long period of operation. It can transport both bed load and suspended sediment without passing the reservoir. In this study, by hydraulic movable bed model experiment, the possibility of applying a sediment bypass system without a diversion weir for water and sediment to reservoirs with a large amount of sediment is discussed. Experimental results show that it is possible to remove sediment efficiently by a sediment bypass system without a diversion weir, and also that little volume of sediment comes into the reservoir.

*Key Words : sediment bypass system, diversion weir, orifice gate,
hydraulic movable bed model experiment*

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂問題は、貯水容量の減少といった個々のダムへの直接的な影響のみならず、流域を一体とした土砂管理や河川環境の観点からも看過できない重要な問題である。本研究で対象としたバイパス排砂システムは、ダム貯水池の堆砂対策手法の一つで、ダム貯水池からダム下流部の間に設置したバイパス水路により、洪水時に流下する土砂を貯水池に流入させることなく、ダム下流へ導くものである。

関西電力の旭ダム（新宮川水系）では、濁水長期化対策、堆砂対策として、純揚水式発電所の下部池であるため流水の貯留の必要がなく、かつ流域面積が 39.2km² と比較的小さいことから、バイパス排砂システムを適用しており、平成 10 年 4 月以降の運用結果から、両問題に対して十分な効果を発揮していることが確認されている¹⁾ 2) 3)。

一方、旭ダムと類似の流域特性を有する、調整池式発電用の A ダムでは、堆砂の進行に対し河床掘削で対応している。しかし、河床掘削は、土砂運搬能力や土捨て場

の状況から恒久的な対策とはなり得ないことから、恒久的な堆砂対策として、旭ダムと同様にバイパス排砂システムの適用が考えられる。

ところで、旭ダムを含め、現在、運用または計画されているバイパス排砂システムは、貯水池末端付近に取水口が設置されるとともに、流水のコントロールや土砂の分級を目的として分派堰が併設されている。しかしながら、分派堰は大規模な河川横断構造物となるため、景観や環境面への影響、設置に伴うコストなどを考慮すると、可能であるならば分派堰を有しないシステムがより望ましいと考えられる。そのような場合として、ダム堤体と分派堰が近接する場合が考えられ、ダム堤体に分派堰の機能を持たせたバイパス排砂システムが想定される。

A ダムでは、バイパス取水口を堆砂先端付近に配置することにより、取水口とダム堤体を近接させる計画とし、堰の有無による特性の差異を検討するものとした。

本論文では、現地再現模型を用いた移動床水理模型実験に基づく、分派堰の有無による排砂特性の違い、取水口部での土砂の分派特性に関する知見を示すとともに、分派堰を有しないバイパス排砂システムの適用可能性について報告する。

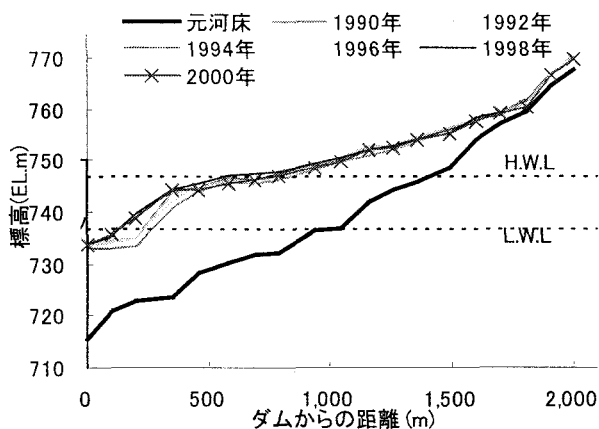


図-1 Aダムの堆砂実績（平均河床縦断面図）

2. 対象地点の特性と堆砂対策手法の選定

図-1はAダムの堆砂の状況であるが、総貯水容量に占める堆砂率が約70%に達するまで堆砂が進行している。それに伴い貯水池末端の水位の上昇、有効貯水容量の減少等の問題が懸念されるようになってきており、効果的な堆砂対策が望まれているのが現状である。

Aダムでは、現在暫定的に河床掘削による対策が既に実施されている。しかし、40～50年以上の期間を対象とすれば、仮に分派堰を有しないバイパス排砂システムを適用できれば、河床掘削より堆砂対策としてのコストは低くなると予想された。

また、河床掘削の場合は、土捨て場用地の確保の必要性、土砂の運搬時の交通公害の発生などの問題もあるが、バイパス排砂ではそれらへの懸念がないうえ、河川の土砂環境を回復、改善するといった効果も期待できる。

ただし、バイパス排砂では、旭ダムなどの既往の事例と同様に分派堰を設けるとした場合、工事費も増加することとなる。特に、対象とするAダムでの取水口計画地点は旭ダムケースと比べ、川幅が広いこともありこの影響は、より顕著となる。

このような背景より、Aダムにおける堆砂対策として、バイパス排砂が適切であると判断し、さらに分派堰を有しないシステムの適用が考えられた。

3. バイパス排砂システムの水理設計

バイパストンネルを平面的にどう配置するかは、取水口部、放水口部の位置、ダムとの離隔、地山との関係等で決まる。Aダムでは、右岸側には公道が走ることからトンネルは左岸側を通ることが前提となる。取水口部位置としては、バイパストンネルに導水する上で有利となるよう流れが左岸側に寄り、かつ現在堆積している土砂も排出できるよう堆砂デルタの先端より下流のダム堤体から約350mの地点とした。放水口の位置は水理的に流

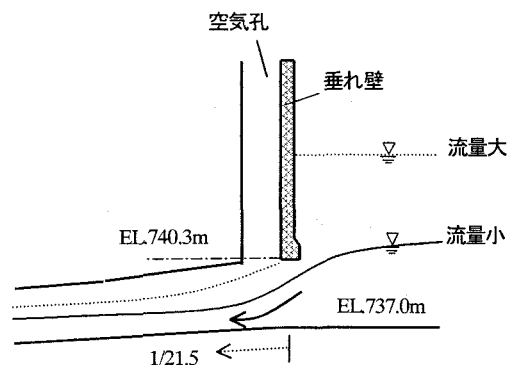


図-2 取水口部オリフィス構造模式図

況が安定するように下流河道の流心にバイパストンネルの流向を向けることが可能な位置として、ダム下流280m地点を選定した。また、バイパストンネルの法線形は、旭ダムで弯曲の影響と推察される横断方向に不均一なライニングの損傷等が見受けられた⁴⁾ ⁵⁾ ことなどから、著しい弯曲は避け、流入部下流と放流部上流はある程度の直線区間を設けるものとした。この結果、トンネルは全長約580mとなった。

次にバイパストンネルの縦断形状であるが、取水口部の敷高は、有効貯水容量の確保、回復が図れることを考慮し最低水位のEL.737mとした。すなわち、これにより取水口部上流の最低水位以上の堆積土砂は、掘削せずともバイパストンネルを使ってダム下流に排出可能となる。一方、放水口部の敷高は、バイパスから排出された土砂によるトンネル放水口の閉塞を回避するため現河床より高いEL.710.0mとした。以上の平面的、縦断的なレイアウトよりバイパストンネルの勾配は1/21.5となる。

トンネルは、1次元河床変動シミュレーションにより求められた既往最大規模の出水で貯水池へ流入すると想定される瞬間最大土砂量(1.04m³/s)を流送可能な流量60m³/sを設計対象流量とする。トンネルの規模は、幌型断面を前提として、8割水深で設計対象流量60m³/sを通水可能な規模を等流計算で算定し、2.7m×2.7mとした。

バイパストンネル取水口部の設計構造を図-2に示す。トンネル取水口は、垂れ壁を設けオリフィス構造とすることにより、大流量時でも設計流量以上(約60m³/s)の流量をトンネルに流入させないようにしている。このオリフィスの効果により、取水口部の流れは、流量が小さい時は開水路状態に、流量が大きくなり取水口前面の水位が上昇するとオリフィス流となる。また、垂れ壁背面に空気孔を設けることで、トンネル内部は常に安定した開水路状態が保たれる。取水口部オリフィスの規模は、幅はトンネルと等しくし、開口高さは流量50m³/s(分派堰がある場合の堰越開始流量)程度まで取水口部が開水路状態となるよう3.3mとした。

有無による効果を比較するための分派堰の天端高は、既往最大規模の出水時にも越流部の水位がH.W.L.(EL.

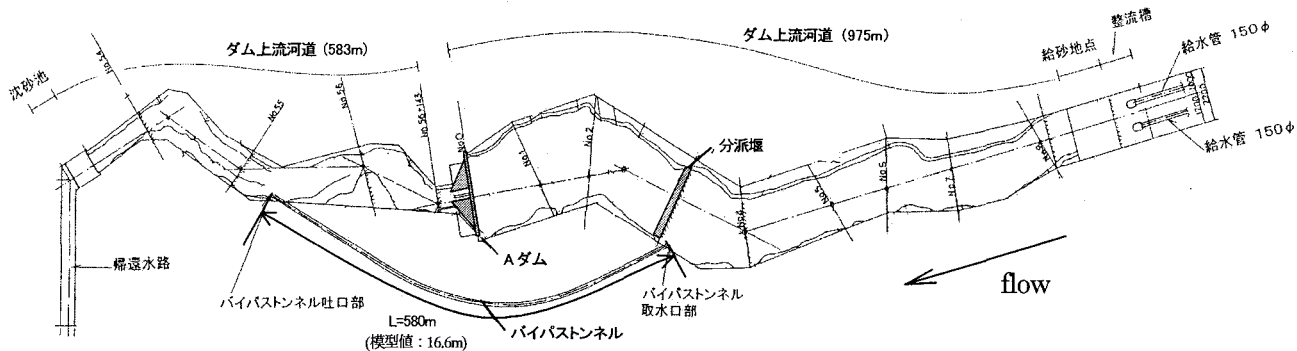


図-3 模型実験装置 (平面図)

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 1/35)
パイパストネル径	2.7m	7.7 cm
パイパストネル長	約 580m	約 16.6m
パイパストネル勾配	1/21.5	1/21.5
オリフィス開口高	3.3m	9.4 cm
再現範囲	約 1.6 km	約 45m
既往最大流量	410m ³ /s	約 56.6L/s
平均粒径	約 20 mm	約 0.6 mm

747m) を上回ることない最高の天端高さである EL.743m とした。この場合、分派堰上流に十分な貯砂容量の確保が可能であることも机上検討において確認している。

4. 水理模型実験の概要

模型実験装置を図-3 に、主要構造物の高さ関係を図-4 に、基本的な実験条件等を表-1 に示す。実験はフルードの相似則を基本とする。模型はダム、バイパストネルも含め A ダムを挟んだ上下流約 1.6 km を対象範囲とし、縮尺 1/35 で現地地形等を再現した。河道地形はモルタル、バイパストネルはアクリル材を使用し作製した。

実験では、上流端より、電磁流量計で計量した所定の流量波形を流入させるとともに、芦田・道上式で算定される水理量に応じた給砂量を与えた。河床材料は現地の平均粒径の縮尺見合いとして、図-5 に示す分布を持たせた材料を使用した。主な測定項目は、水位、河床高、バイパス通過土砂量、貯水池流入土砂量 (堰がある場合は越砂量、堰がない場合はバイパストネルにより排砂されずに堰位置より下流に流下した土砂量、図-6 参照) である。

実験ケースを表-2 に示す。堰ありのケースは、堰天端高 EL.743m の 1 ケースのみを対象とした。与える流量波形は、既往出水のうちピーク流量 100~150m³/s の実績洪水波形の平均波形をモデル化した 110m³/s ピークのハイドログラフ (1 回/年~1 回/2 年の出水規模、洪水継続時間 38h) を 4 波と、既往最大規模のピーク流量 410m³/s

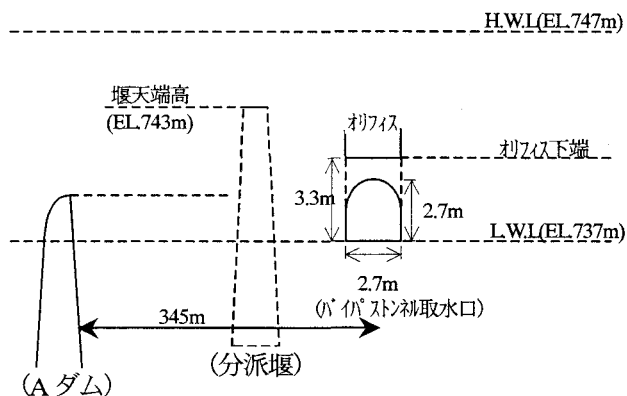


図-4 主要構造物の高さ関係

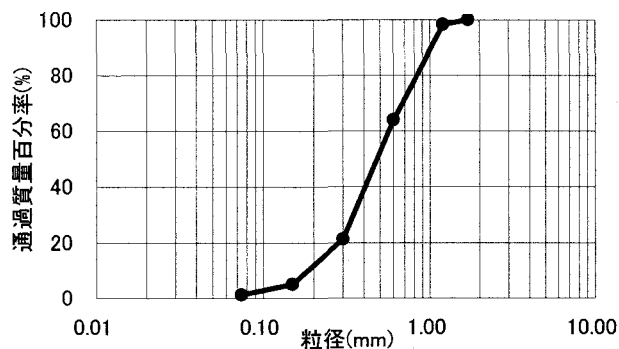


図-5 実験に使用する河床材料粒度分布

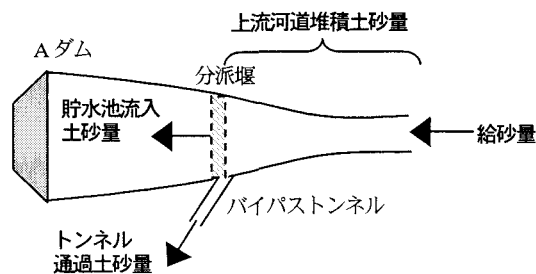


図-6 土砂量の定義

表-2 実験条件・実験ケース

ケース名	分派堰	ハイドログラフ
ケース 1	有	110m ³ /s ピーク 4 波 + 410m ³ /s ピーク 1 波
ケース 2	無	"

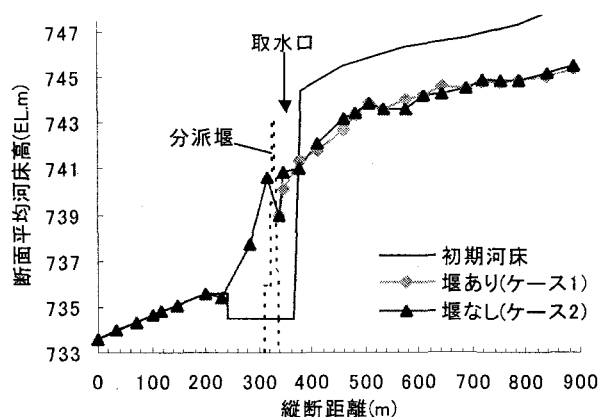


図-7 5波通水後の河床縦断形状 (平均河床)

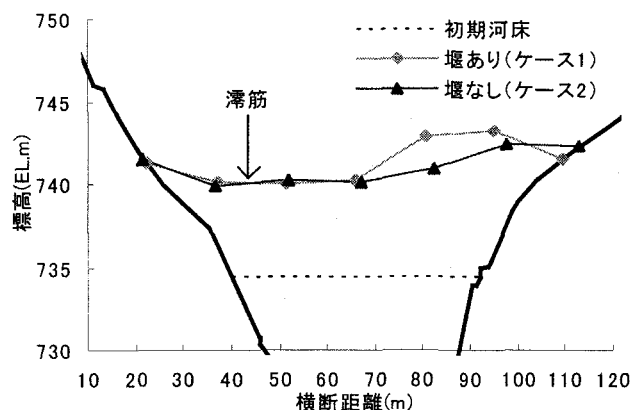


図-8 5波通水後の河床横断形状 (分派堰上流 45m)

の実績洪水波形をモデル化したハイドログラフ (洪水継続時間 45h) を 1 波とした。ハイドログラフの最小流量は、机上検討より現地のアーマコートが破壊される流量として $20\text{m}^3/\text{s}$ とした。

5. バイパス排砂システムの効果

(1) 実験現象

まず、各ケースの実験現象の概要を簡単にのべる。分派堰がある場合 (ケース 1) は、河川流量 $20\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ 程度の小流量時は分派堰により流入する流水、土砂ともせき止められ、全量トンネルへ導かれる。河川流量が増加し約 $50\text{m}^3/\text{s}$ となった時点で、堰からの越流が始まり、貯水池内に水が入る。また分派堰が貯砂堰としての機能を果たすことで、流入土砂を分派堰上流にため込み、出水末期の流量低減期にトンネルより排砂されるといった現象が繰り返され、 $110\text{m}^3/\text{s}$ ピークの出水に対しては越砂はほとんど起きなかった。 $410\text{m}^3/\text{s}$ ピークの出水時は、出水中に分派堰上流部が満砂状態になり、若干の越砂が発生するとともに、流量低減期に滞筋の位置が固定されたことで、堰上流右岸に堆積土砂が残存することとなった。一方、分派堰がない場合 (ケース 2) は、通水開始直後から貯水池側へも流水が分派され、併せて土砂も貯水池側へ流入しトンネル取水口より下流へ堆砂が進行することとなった。ただし、堆砂の進行は小流量時にほとんど起こらなかった。また、堰がないため堆砂形状は貯水池内の堆砂デルタを先端とし一定の勾配を持つ緩やかな形状となり、ケース 1 で見られた右岸側の堆積土砂の残存は見られなかった。図-7、8 は、通水後の河床縦断形状 (平均河床) および分派堰上流 45m 地点の河床横断形状である。縦断図より、堰の有無によらず取水口上流の河床縦断形状にあまり差がないこと、堰がない場合はトンネル取水口より下流まで若干堆砂が進行していることがわかる。また、横断図からは、堰がある場合は右岸側の河床が高くなっているが、堰がない場合は河床上昇の程度が小さいことが確認できる。

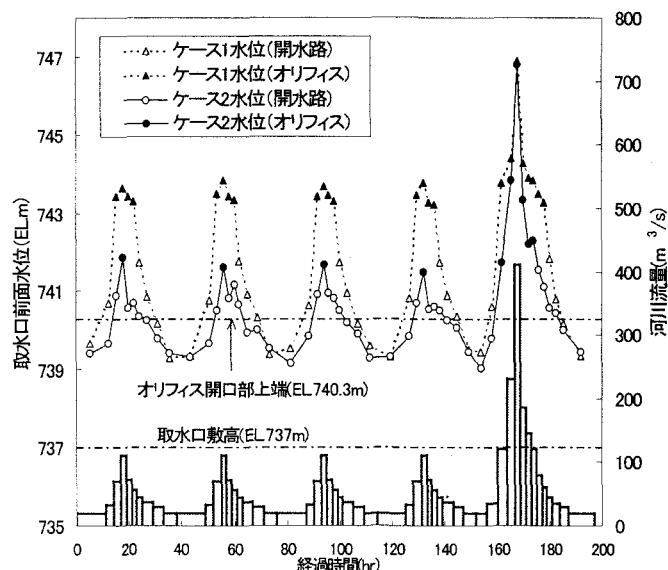


図-9 取水口部水位 (垂れ壁から 6m 上流) と河川流量

(2) 分派堰の有無による現象の差異

実験では、分派堰の有無による現象の差異は取水口部の水位の違いに顕著に現れた。図-9 は取水口前面 (垂れ壁から 6m 上流) での水位の時間変化である。図中の棒グラフは上流端で与えたハイドログラフである。同様の流量条件で比較すると、堰がない場合の方が水位が低く、特に河川流量が大きいほどこの差は大きくなっている。これは、分派堰がない場合は取水口部の水位はダム洪水吐敷高に規定されるが、分派堰がある場合は堰の天端高がダム洪水吐敷高より 4.1m 高いため取水口部水位が基本的には堰天端に規定されるためである。この結果、取水口部の流れが開水路流からオリフィス流へと移行する流量は、分派堰有りで河川流量約 $45\text{m}^3/\text{s}$ 、分派堰無しで約 $110\text{m}^3/\text{s}$ と大きく異なり、同じ流量波形に対して、堰の有無により取水口部が開水路流となる時間に大きな差が生じることとなった。

(3) 土砂収支

図-10 に両ケースの総給砂量、総バイパス通過土砂量、総貯水池流入土砂量 (取水口より下流に流下した土砂量、

図-6 参照), 上流河道堆積土砂量(取水口より上流の河道に堆積している土砂量, 図-6 参照)を比較した。図は縦軸に土砂量を取り, 0 より上が河道堆積土砂量(給砂量込み), 0 より下がバイパス通過土砂量と貯水池流入土砂量を示している。通常, 分派堰があるほうがバイパスへ導ける土砂量が多くなり, 堰位置より下流に流下してしまう土砂量は非常に少ないと考えられるが, 今回の実験では, 分派堰がない場合でもバイパストンネルから排砂されず本来堰がある場所より下流に流下してしまう土砂量はさほど多くなく, バイパス通過土砂量は堰がある場合より多いという結果となった。

この現象は, 前述の取水口部オリフィス部の水位, 貯水位によっておおよそ説明を与えることができる。今回採用したような取水口部にオリフィスを持つバイパス排砂システムでは, 取水口部の流れがオリフィス流か, 開水路流かによってバイパスに流入する土砂量が大きく変化し, 取水口前面の掃流力が大きくなる後者のほうがバイパス通過土砂量が多くなる。したがって, 同様の流量条件に対しては, 取水口部が開水路流となる時間が長くとれる分派堰を有しないほうが, バイパストンネルから排砂できる土砂量が多くなったということである。また, 堰がない場合に, 取水口部より下流に土砂がさほど流下しなかったのは, ダム貯水池の背水の影響がバイパス取水口付近に及び, その付近に発生するダム堤体側のデルタの進行が抑制されるためである。

つまり, 堰がない場合でも, 取水口部オリフィスが開水路流を保つ状態と, ダム堤体側のデルタの進行が抑制される状態が同時に発生することで, 十分なバイパス排砂機能が発揮されたといえる。

ところで, 上述したような評価は, 土砂の収支のみからみたものであり, 水をためて利用するという貯水池の本来の用途から考えると, 流量がどのように配分されたかという観点からの検討も重要となる。図-11 は両ケースのバイパスに導かれた土砂と水の量を比較したものである。これより, 分派堰がない方が排出できる土砂量が多い上, 排砂に際しトンネルに導かれる水は少なく, 排砂効率が良いといえる。水 1m^3 でどれだけの土砂が排砂できたかを見ると堰有りでは $1.97 \times 10^{-3}\text{m}^3$, 堰がない場合は $4.16 \times 10^{-3}\text{m}^3$ となっており, 堰がある場合は堰天端高 EL743m の 1 ケースのみ結果であるが, 堰がない場合の方が約 2 倍も効率よく排砂できている。

(4) 分派特性

バイパス排砂システムの適用にあたっては, 流送可能土砂量の推定や, システム閉塞の観点から, 取水口部での流水と土砂の分派特性の把握も重要となる。図-12 は今回の実験における流量比 κ (バイパス流量/総流量) と流砂量比 κ_g (バイパス流砂量/総流砂量) の関係を, 既往検討結果^{6) 7)}と比較する形で示したものである。具体的に κ , κ_g は次式で定義する。

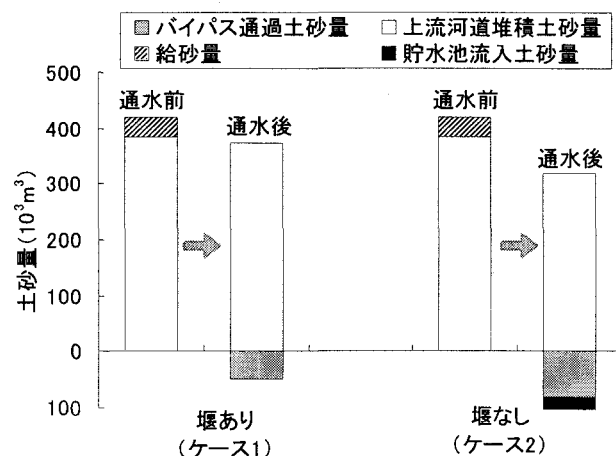


図-10 5波通水後の土砂収支

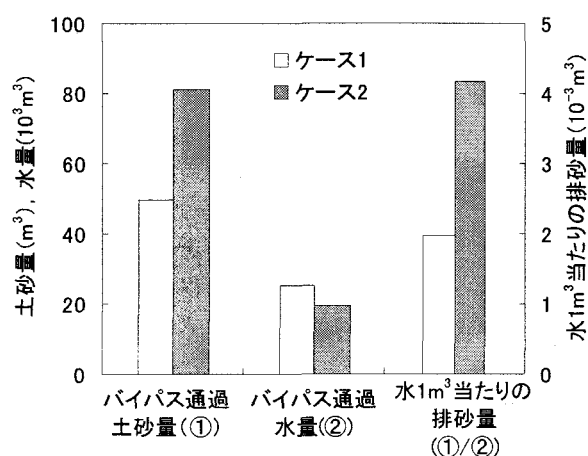


図-11 排砂効率の比較

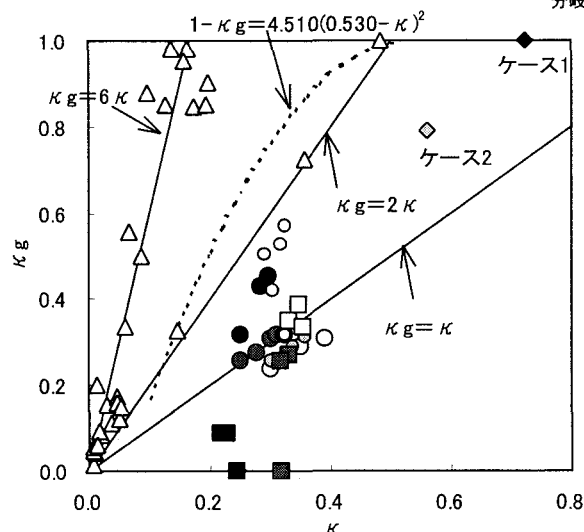
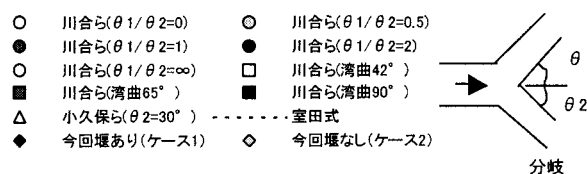


図-12 分流量比 (κ) と分流砂量比 (κ_g) の関係

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

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

ここに、 Q_T :トンネル流量、 Q_R :貯水池流入流量、 Q_{bT} :トンネル流入土砂量、 Q_{bR} :貯水池流入土砂量である。なお、既往検討結果は定常状態で得られた値であるが、今回は非定常実験結果に基づくものであることに留意されたい。

小久保ら⁷⁾によると、堰がある場合の分派特性については、堰がない場合に比べ κ_g/κ が大きくなるという結果が得られている。定常と非定常の違いがあるので一概にはいえないが、川合ら⁶⁾の実験は堰がない場合であるので今回の実験のケース2と、小久保ら⁷⁾の実験は堰がある場合を中心としている（一部堰のないものも含まれている）ので今回の実験のケース1と実験条件が類似していると考えられ、これらを踏まえて κ_g/κ の値を比べてみると、堰がない場合は $\kappa_g/\kappa=1.41$ で既往検討（河合らの結果）と同傾向を示し、堰がある場合は $\kappa_g/\kappa=1.38$ で既往検討（小久保らの結果）より、やや小さい値となった。後者の原因としては、堰がある場合には、小流量時に全流量がバイパストンネルに流入する時間帯が存在するが、 κ 、 κ_g はこれらの時間も含めた全通水時間の総量より算定したものであることから、 κ が実際に分派が起きている時間のみの分派比より過大に評価されるためであると推測される。いずれにしても堰の有無によらず、 $\kappa_g > \kappa$ となっていることから、検討したバイパス排砂システムの掃流砂の排砂効率は高いといえる。ただし、今回対象としたAダムは、取水口計画地点の川幅がトンネル規模に対し比較的大きいため、滞筋の位置により分派特性が大きく変わる可能性があること、堰高については1ケースの検討であるため、必ずしも一般性のある結果ではないことに留意する必要がある。

6. おわりに

本研究では、分派堰の有無によるバイパス排砂システムの排砂効果の違いを移動床水理模型実験により検証した。分派堰がある場合の堰高は1ケースに限定したものであるが、検討の結果以下の知見が得られた。

- (1) 今回の検討条件下では、分派堰がある場合よりもない場合の方がバイパス通過土砂量が増加する、すなわち排砂効率が良くなる。
- (2) 上記の理由として、分派堰がない場合の取水口部の水位がダム洪水吐に規定され、堰がある場合より低くなり、バイパス取水口部が、掃流力の大きい開水路流となる時間が長くなるためである。
- (3) 分派堰がない場合でも、貯水位を適切にコントロー

ルすれば、取水口部に位置する堆砂デルタの進行を抑制することが可能である。

- (4) Aダムでは、仮に、ダム洪水吐き部での水位を、実験条件のような比較的低い状態でコントロールすることができれば、分派堰がなくても効率的な排砂を行いつつ、堆砂デルタの進行を抑制することが十分可能であり、分派堰を有しないバイパス排砂システムが適応可能である。

ただし、今回のような川幅がトンネル規模に対して大きい条件では、滞筋が川幅の一部に固定化されて十分に排砂効果があがらないことも考えられ、効率的に土砂をバイパスに導く工夫等が必要な可能性がある。

今後は、分派堰を有しないバイパス排砂システムの分派特性の把握をさらに進めるとともに、より効率的な排砂効果が得られる適切な水位の制御や運用方法、取水口形状等の設計に関する事項について詳細に検討していく予定である。また、バイパス排砂システムに関しては、トンネルのライニングの摩耗、損傷についての問題も残されており、これについても今後検討していく必要があると考えている。

謝辞: 本検討にあたっては、(財)河川環境管理財団 大阪研究所 芦田和男所長に御指導頂いている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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 No.173, pp.38-44, 2000.
- 2) 齋藤 憲, 大本雄二: 貯水池のバイパス排砂システムについて, 第33回(平成12年度)業務研究発表会論文集, 社團法人建設コンサルタント協会近畿支部, pp.137-142, 2000.
- 3) 竹中秀夫, 大東秀光, 阿部 守: 旭ダムバイパス放流設備の運用実績, ダム技術 No.193, pp.99-102, 2002.
- 4) 片岡幸毅: 旭ダムにおける貯水池の土砂管理について, 第3回世界水フォーラム 流域一貫の土砂管理(貯水池土砂管理に向けた挑戦) 論文集, pp.87-96, 2003.
- 5) 大東秀光, 加藤雅広, 陳 活雄, 齋藤 憲, 大本雄二: バイパス排砂システムの摩耗について, ダム工学会第11回研究発表講演集, pp.28-30, 2000.
- 6) 河合茂, 芦田和男: 固定床開水路分流における流量・流砂量配分化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.
- 7) 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回年会次学術講演会概要集, II-152, pp.304-305, 1999.

(2003. 4. 11受付)