

◆ ダム技術特集 ◆

貯水池土砂バイパスの計画検討

柏井条介*

1. はじめに

河川は水とともに土砂の流路でもある。それ故ダム貯水池に水を貯めると、同時に土砂も堆積する。堆積土砂は貯水容量の減少を招き、ダムの貯水機能を妨げる。貯水池末端付近の堆砂は、貯水池上流の河床上昇の原因となり、通過土砂の捕捉は、下流河床の低下や粗粒化を招く。影響が大きい場合には、海岸線の後退も想定される。こうした貯水池の堆砂に伴う問題に対応するため、下流に土砂供給可能な堆砂対策が求められるようになってきている¹⁾。

本報告で対象とする土砂バイパスは、下流に土砂供給可能な堆砂対策手法の一つであり、施設の概要を図-1に示す。施設は、貯水池末端付近に設けられた洪水分流施設と、分流した流れをダム下流河道まで導くバイパス水路及び下流河道への放流水を減勢させるため必要に応じて設けられる減勢工からなる。

貯水池への土砂の流入は、主として出水時に生じる。土砂バイパスは、この出水時の水量の一部を、上記の施設により分流・バイパスすることにより、併せて土砂も分流・バイパスしようというものである。施設がダム堤体と関係なく設置され、また、出水時に放流量を低減する鍋底カット型の

洪水調節等特殊な場合を除き、貯水池運用計画に与える影響も小さいことから、既設ダムへの適用が比較的容易な方法である。また、流入濁質量を低減させることから、濁水長期化対策としても効果が期待でき、今後の発展が期待されている堆砂対策手法の一つであるが、わが国での設置事例はほとんどなく、その計画手法については、十分に確立されていないのが現状である。

本報告では、洪水調節を目的に含む多目的ダム貯水池を念頭に、土砂バイパス計画の検討方法について、近年の研究成果なども踏まえて考察・提案をする。

2. 計画検討のフロー

2.1 堆砂対策、土砂供給対策計画の中の扱い

土砂バイパスは堆砂対策、或いは下流河道への土砂供給の一手法である。従って、その計画も堆砂対策、土砂供給対策の全体計画の中に位置付けられる必要がある。ここでは、以下の検討に先立ち、土砂バイパス計画の堆砂対策、土砂供給対策計画全体における取扱いについて整理しておく。ただし、堆砂対策、土砂供給対策土砂量が予め与えられているものと仮定する。

堆砂対策、土砂供給対策手法には土砂バイパスの他いくつかの手法があり、現在考えられている手法を文献²⁾をもとに表-1に示す。表は堆砂対策を念頭に作成されたものであるが、掘削・浚渫は、搬出土砂を下流河道に補給することにより、貯砂ダムは、堆砂掘削位置を陸上の定点に固定するという掘削計画の一環として設置される場合に土砂供給対策として位置付けることができる。また、貯水位を一時的に低下させて、貯水池内の土砂輸送力を大きくし、放流と併せて堆積土砂を排出する土砂フラッシングや流入する微細粒子を放流設備を通じて放流する濁水放流は、土砂バイパス

表-1 貯水池の堆砂対策

貯水池への流入土砂の軽減 貯水池内の土砂の排除

- ・ 治山・砂防事業等
- ・ 貯砂ダム
- ・ 土砂バイパス
- ・ 貯水池周辺斜面の安定

- ・ 掘削・浚渫
- ・ 土砂フラッシング
- ・ 濁水放流水

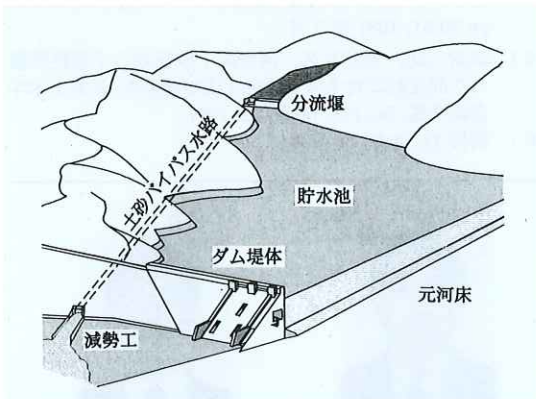


図-1 貯水池土砂バイパスの概要

Planning Examination for Reservoir Sediment Bypassing

と同様に、下流への土砂供給対策の意味をもつものである。

堆砂対策、土砂供給対策は、図に示される各手法を組み合わせることで検討される訳であるが、ここで、土砂バイパス計画検討における他の手法との関係を考えてみると次の通りである。

治山・砂防事業等や貯水池周辺斜面の安定については、堆砂対策以外の目的を主として実施されるものであり、バイパス計画とは独立のものとして扱うことができる。具体的には、これら事業等の影響は、バイパス位置への流入土砂量の軽減として計画に反映させることができる。ただし、治山・砂防事業については、その効果を得るには長期間の年月を必要とし低減量の設定が難しいことから、既設砂防ダムの空き容量等確実に期待されるものを除き、当面の堆砂対策の中では評価されてきていないのが現状である。

掘削・浚渫は、これが分流堰下流で行われる場合には、土砂バイパス量に影響を及ぼすことはない。また、土砂フラッシングや濁水放流は、ダム位置での操作が考えられ、同様にその操作が土砂バイパス量には影響しないものである。従って、土砂バイパス計画の検討は、流入土砂量のみを対象に行えばよく、掘削・浚渫等が土砂バイパス計画の影響を受けることになる。

一方、掘削・浚渫が分流堰上流で実施される場合には、土砂バイパス量に直接影響することになり、掘削・浚渫を念頭に入れた計画検討が必要になる。特定の粒径の土砂供給量が制限される場合や掘削土砂の有効利用を重視するような場合には、生じ得る状況である。掘削位置は分流堰上流が適すると考えられるからであり、この場合、浚渫は考えなくてもよいであろう。このうち土砂供給量の制限については、バイパス計画に先立ち与えられる条件となる。有効利用計画についても、これが将来計画として設定されるのであれば、所与の条件となるが、堆砂容量という長期計画に対して設定するのは難しいと考えられる。この場合には有効利用のための掘削はないものと考えておけば、安全側の計画となる。なお、分流堰上流での掘削理由の一つとして、比較的大きな粒径の土砂バイパス施設内における土砂の堆積や磨耗対策に対する知見が十分でなく、分流堰上流でこれらを捕捉・掘削することが考えられたことが挙げられるが、近年、これら事項に対する技術検討が進められており、本報文ではバイパス対象粒径に対す

る施設機能面からの制約は特に考慮していない。

以上より、土砂バイパス量に影響を与える他の堆砂対策、土砂供給対策は、分派堰上流で実施される砂防ダムでの貯砂や掘削であるが、これらは、土砂バイパス計画に対し、所与の条件として設定される、或いはすることができる。従って、土砂バイパスの計画検討では、土砂バイパス施設能力(或いは施設規模)をパラメータとして、与えられた流入条件、掘削条件に対しバイパス計画案を策定すればよい。全体計画では、分流堰下流のバイパスされない土砂を対象に堆砂対策、土砂供給計画案が策定され、土砂バイパス施設能力(規模)をパラメータとした比較案の中から、適切な施設能力(規模)が選定される。ここで、施設能力(規模)は、具体的には最大分水量からほぼ決まり、分水量ゼロが土砂バイパスを採用しない案となる。

2.2 土砂バイパス計画の検討フロー

2.1の検討結果を受け、ここでは、施設能力(規模)をパラメータとした土砂バイパス計画案策定のためのフローを検討する。

土砂バイパスでは、土砂輸送力として自然の営力である流水の力を用いる。従って、バイパスされる土砂量は、分水量の関数として与えられる。また、後に論じるように分水量とバイパス土砂量の関係は粒径毎に異なり、分流施設の形式・規模や運用方法の影響を受けるものである。従って、バイパス土砂量は分水計画、施設計画を設定の上算定されることとなり、その算定では水と土砂の混合流が扱われる。

上記を考慮して作成した土砂バイパス計画の検討フローを図-2に示す。検討では、まず分派堰・バイパス水路位置候補の抽出(図中I)を行う。このとき複数案の抽出を想定したが、これは例えば本流における適当な位置の選定といった地形・地質的な得失の比較案とともに、大きな支流がある場合に、本流・支流の両者に設置するのか、本流のみに設置するのかといった、施設や分水計画が大きく異なってくるような比較案の抽出を想定したものである。比較案の必要性は、どちらかと言えば後者のケースの方が高いといえよう。次に、施設位置に応じて分水案を設定する(II)。先にも述べたように、バイパス土砂量や施設の建設費用は最大分水量が主たる要因になると考えられることから、ここでは施設能力(規模)が最大分水量で表されるものとし、最大分水量をパラメータとした複数案の設定を考えている。

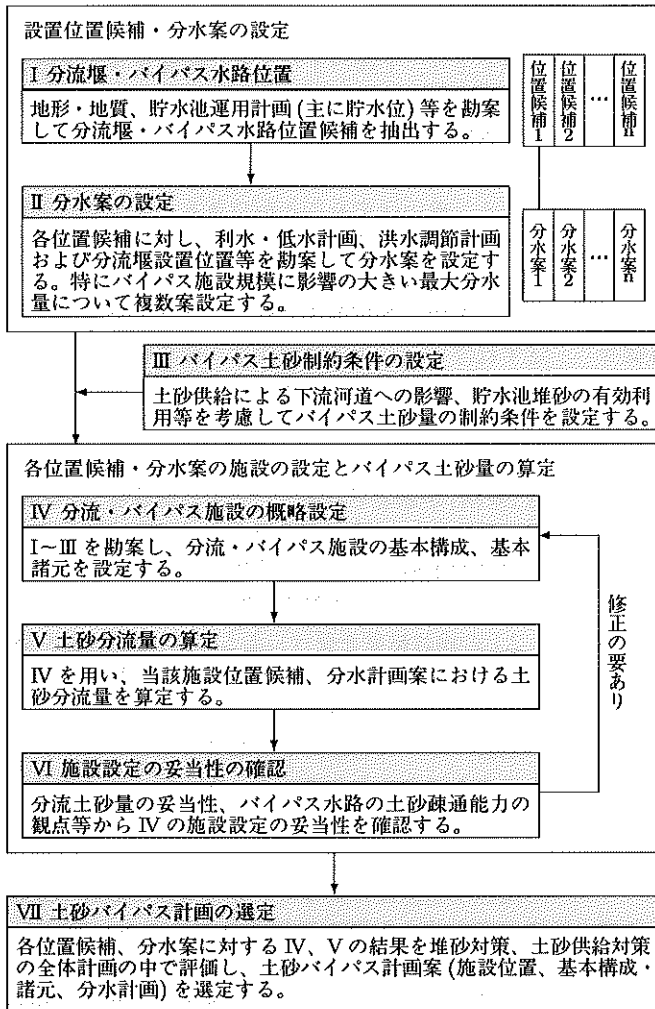


図-2 土砂バイパス計画検討フロー

以上の条件設定に対し、バイパス土砂量を算定するため分流施設等の基本構成、基本諸元を設定する(IV)。分流施設の構成・諸元が設定されることにより、分水操作がより具体的に設定される。施設の具体的姿を描くことは、後に計画の妥当性を検討する上でも必要である。このとき、バイパス土砂の制約条件を考慮しておく必要がある(III)。

土砂バイパスは、基本的には河道を流下してきた土砂の全部又は一部を貯留の影響を小さく通過させるものと考えることができ、従前と比べ過大な土砂量を供給するものではないが、現状の下流河道の河床上昇が顕著である等の場合には、バイパス土砂量は制約を受けることになる。

分流堰位置と施設の基本構成・諸元、分水条件が設定されれば、これに基づきバイパス土砂量の算定が可能になる(V)。土砂の分流現象は、粒径により大きく異なるので、バイパス土砂量は粒径

別に算定する。このことは、流入土砂量についても粒度分布を設定する必要があることを意味している。粒径を考慮した検討は、貯水池の堆砂計画には勿論、総合土砂管理の観点からも重要である。

算定された土砂分流量について、制約条件や最大分流量から概略期待される土砂量との関係から妥当性を確認し、許容できない程度に外れる場合には、施設設定を修正する(VI)。分水案によっては、過剰な分水により制約条件を守れない場合も想定され、その場合には分流堰上流での掘削を導入する。導入が妥当でなければ当該案を破棄する。また、土砂の分流量は、分水操作及び分流堰周辺の施設形状により決まるので、この土砂量が分流施設下流に接続されるバイパス水路により安全に流下できることを確認する(VI)。バイパス水路の疎通能力が不足すると判断される場合には、勾配を変化させる等水路諸元を変化させるか、過剰な土砂の流入のないよう分流堰形状、分水操作を修正しなければならない。

以上の検討により、各位置候補、分水案毎の施設の基本構成・諸元及び分流土砂量が与えられ、全体計画検討において適切な案の選定が行われる(VII)。ここで、全体計画の妥当性を維持するため、土砂バイパス計画それ自体においても、

ある程度適当なバイパス効率を得る必要があることはいままでもない。

以上、土砂バイパス計画の検討フローを概観した。以下に、番号付けを行った各項目毎に具体的検討での留意点を述べる。

3. 各項目の検討留意点

3.1 分流堰・バイパス水路位置候補の抽出

分流堰位置は、分水計画を策定するための重要な因子である。また、分流堰位置を抽出するためには、バイパス水路線形の妥当性(勾配、延長、線形など)に関する配慮が必要である。

分流堰・バイパス水路位置の抽出に当たっては、地形・地質とともに貯水池運用計画、特に貯水位を念頭に入れた検討が必要である。土砂バイパスを出水中に行うものとして、分流堰が水没していれば、分流堰位置の浮遊土砂濃度は河道のそれよ

りかなり小さいものとなるであろう。また、粒径の大きな土砂は、分流堰より高い位置に堆砂の肩を形成しながら流下することになる。こうした状況下では効率的な土砂のバイパスは期待できない。このため、バイパス時の分流堰上流の流れが貯水位の影響を受けないよう、分流堰越流標高は常時満水位、或いは洪水期制限水位上方に設定する必要がある。分流堰位置の抽出は、こうした分流堰越流標高の設定に対し、堰規模が過大にならないよう配慮する必要がある。

位置の抽出において特に問題となるのは大きな支川流入のある場合である。堰位置を合流前・後の何れにするか、合流前に設置するとして、本川、支川の内いくつの川筋を対象に設置するのか、複数設置するとしてバイパス水路は夫々の分流堰毎に独立して配置するのか、堰を結ぶように配置するのかといった種々の比較案が想定される。いたずらに比較案を作成しても無駄な作業が増えるのみであり、比較するに値する適当な案を抽出しなければならない。各川筋毎の集水面積や土砂流入特性、施設規模の妥当性に思慮を巡らした高度な技術的判断が要求される部分である。一般的には、堰数が少なくて済むよう合流点下流に配置するのが適当であるが、合流位置が貯水池の下流寄りである場合には、堰規模が大きくなるとともに、貯水池容量計画にも影響を及ぼすようになり、その合理性が失われる場合が生じる。

3.2 分水案の設定

分流位置が決まれば、分水案を作成することができる。図-3に分流堰位置における分水例を示す。土砂バイパスでは、バイパス開始、終了時以外のゲート操作は困難と考えられることから、一般に越流頂やオリフィスによる自然分水がなされ、図にはその場合に考えられる標準的な場合を示した。図中、バイパスへの分水は水量 Q_A 以上において開始(分流堰ゲートを全開 → 全閉に、バイパス側ゲートを全閉 → 全開にする)され、分流堰上流水位が分流堰越流頂 El_B に達する Q_B までは全量バイパスされる。 Q_B 以上の流入に対しては、分流堰から越流が始まり、流入水は貯水池とバイパス水路の両者に分水され、分流堰の貯留効果が小さいことから、流入ピーク水量 Q_C 発生時近傍においてバイパス水量の最大値 Q_C' が生じる。

ここで、分水案策定における基本水量として、これ以下では土砂移動が生じない、つまり土砂バイパス効果のない水量である土砂移動開始水量、

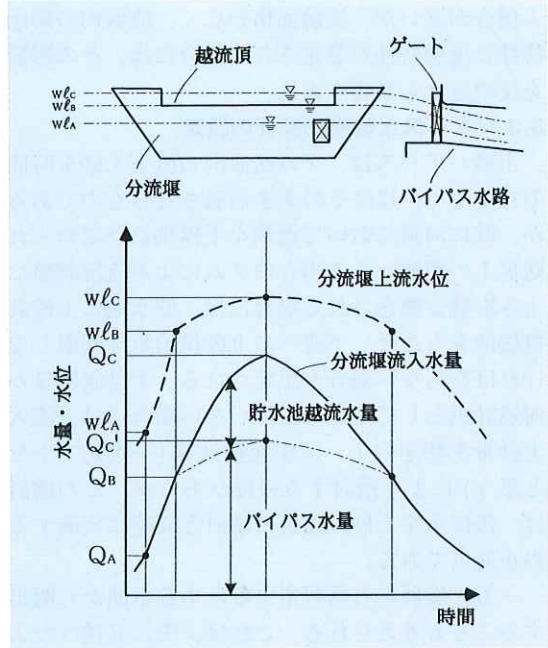


図-3 土砂バイパスにおける分水例
および洪水調節計画における最大放流量が考えられる。土砂移動開始水量以下の水量では、バイパスの意味がないので、多目的ダムでは利水・低水利用のため貯水池側に導水することが望ましい。図では、 Q_A が土砂移動開始流量に相当する。また、洪水調節計画の最大放流量以上の放流はできないから分水最大量 Q_C' は計画最大放流量以下とする必要がある。 Q_C' は計画最大放流量以下において複数ケース設定することとなる。

ここで、図示した $Q_A \sim Q_C'$ 間の操作は、 Q_A 以上では土砂バイパスを優先するとしたものであるが、その妥当性については、利水・低水計画との調整を要するものである。即ち、利水・低水のための貯水位回復操作を優先させるのであれば、 Q_A がダム貯水位回復時点の流入水量の何れか大きいほうがバイパス開始水量となり、バイパス開始水量は $Q_A \sim Q_C'$ 間にも存在し得る。従って、バイパス水量が分流堰流入水量のみからは決まらず、貯水池運用計算の中で設定されることになる。

図-3から推察されるように、具体的な分水量は、施設構成や諸元の影響を受けるものである。従って、詳細な設定はIVの検討を待たなければならない。ここでの作業は、分流堰位置の流入水量データの作成、 Q_A 、 Q_C' の設定及び貯水位回復操作方法の設定が主たる作業となる。分流堰位置の流入水量については、ダム位置での水量を元に分流堰位置の流域面積比を用いて比例計算され

る場合が多いが、流域面積が広く、流域内の降雨特性に地域特性が想定される場合には、その影響を反映させる必要がある。

3.3 バイパス土砂制約条件の設定

土砂バイパスは、ダム建設前の流下土砂を時間差を少なく、ほぼそのまま通過させるものであるが、既に河道において過剰な土砂供給が認められ防災上の問題がある場合やダムによる流況調整による影響が懸念される場合には、貯水池に土砂調整機能をもたせ、下流への土砂供給量を制限しなければならない場合が想定される。土砂制限量が河道計画として与えられていない場合には、流入土砂量を想定の上、河床変動計算（一次元で十分と思う）により検討する必要があるが、この検討は、後に示す土砂分流量の検討と同時に実施するのが適当である。

一方、堆砂を有効利用するため貯水池から搬出することも考えられる。これは、先にも述べたように分流堰上流の捕捉土砂を用いるのが便利であり、土砂バイパス量に影響することが予想される。

従って、こうした有効利用計画については、予め設定しておくのが望ましい。なお、有効利用計画の予めの策定が困難な場合は、これを無視した土砂バイパス計画を検討せざるを得ないが、その結果は貯水池堆砂量、供給土砂量とも大きくなる方向で与えられ、堆砂計画は安全側の計画となる。

3.4 分流・バイパス施設の概略設定

3.4.1 分水と施設

分流施設と分水の大きな関係については、既に図-3に示した通りであり、分流施設の越流頂標高や越流幅、バイパス入口敷高、断面高等を設定してやれば、分水計算が可能になる。図の例は基本構成と考えてよく、 Q_B を $Q_{C'}$ にできるだけ近づけ、バイパス量を大きくするなど、種々の配慮が可能である。ここでは、その詳細については省略するが、夫々の事例毎に工夫することが望まれる。

3.2で利水・低水容量回復操作について述べたが、貯水位回復を優先的に行う場合、分流開始時には分流堰上流の貯留水が放流される。このため、下流河道での水位上昇量を制御するためのゲート開操作或いは施設構成が必要となるので注意を要する。また、洪水調節に関する配慮は、バイパス水量を計画最大放流量以下とすることが前提となるが、洪水調節方式が一定率・一定量調節や自然

調節のように洪水のハイドログラフにより放流量が変化する場合には、バイパス水量もハイドログラフとしてのチェックが必要になり、 $Q_A \sim Q_{C'}$ の経路が洪水調節における放流量を上回らないよう設定する必要がある。

3.4.2 土砂分流と施設

流水による土砂の移動形態は粒径により異なり、移動土砂の濃度分布は、粒径が大きくなるに従って、河床付近の濃度が大きくなる傾向がある。

今、分流堰上流が土砂の堆積によりほぼ満たされている状態を考えると、堆砂面付近の流れを分水することにより、高濃度の流れを分水でき分水量に対する土砂分流量を大きくすることができる。堆砂面勾配にもよるが、こうした分水状況は、分流堰越流頂に対しバイパス呑口敷高を低くするのみでもある程度得ることができる³⁾。図-4に示すように、このときバイパスされる流れは、分流堰上流に渦流を形成するものであり、このような流れを強制的に形成させるための施設として渦動管がよく知られている。

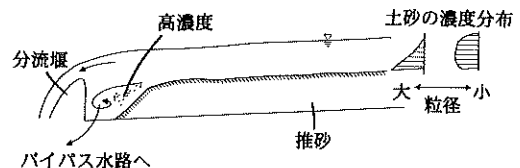


図-4 堆砂面上流れの分水

上記は、分流堰上流がほぼ満砂した状態におけるものであるが、図-3から分かるように、分流堰直上流水位は流入水量により変化し、バイパス期間を通じ一旦上昇したのち降下する。この間比較的大きな粒径の土砂は、水位上昇による堆積と水位低下による移動という土砂フラッシングと同様の挙動を示すことになる(図-5)。このことは、分流堰上流の貯砂容量を大きくすることにより、

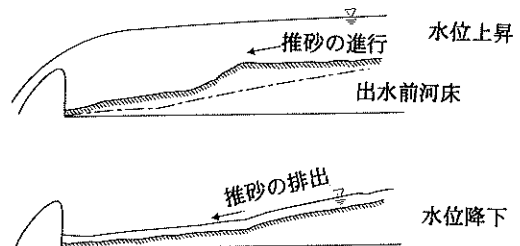


図-5 分流堰上流の堆砂と排出

土砂バイパス量を大きくできることを示唆しているが、粒径の大きな土砂のバイパス量は、先に示した分水方法を工夫することによりかなり大きくすることができる。また、水位低下による土砂の排出は、小流量において多くの土砂バイパスがなされることから、施設内の土砂の堆積や下流水質に対する状況を悪くさせるものである。従って、土砂バイパス効率を大きくするために分流堰上流の貯砂容量を大きくすることは得策ではないであろう。図-5に示す一連の現象は、寧ろ施設内の土砂の堆積や下流水質問題として捉えておく必要がある。

分流堰の構成・諸元の設定は、以上の現象を念頭に、当該貯水池の堆砂特性(量及び粒径)を考慮の上実施する必要がある。堆砂特性の把握については次節に触れる。

3.5 土砂分流量の算定

以上のように、土砂の分流は粒径によりかなり異なり、施設構成の影響を受けやすい。従って、分流土砂量の算定に当たっては、流入土砂量を粒径別に設定する必要がある。分流土砂量の算定は、設定された分水案・施設の水利機能(必要に応じ水利模型実験を用いる)に基づく水利計算、具体的には経年的な河床変動計算により実施するのが適当と考えられ、流入土砂量の粒径別の設定は、河床変動計算上流端での供給土砂量設定の問題に帰着する。ここで、我々は既往のダム堆砂から年間堆砂量及び全堆砂量に対する粒度分布データを入手することができるから、これら堆砂データ及び流量データを用い、河床が比較的安定し、河道線形や断面が特異でない適当な計算上流端断面を選定の上、流砂量式を同定することができる。流砂量式はウォッシュロード、浮遊砂、掃流砂成分に分けて設定されるのが一般的である。堆砂実績は、管理ダムであれば、既往実績がそのまま用いられるし、新設ダムであれば近傍の流域及び貯水池条件が類似した貯水池の堆砂実績のデータから当該ダムでの堆砂量、粒度分布を推定することができよう。こうして把握される堆砂の特性は、3.4での検討にも参照されるものである。この場合、微細粒子については、ダム貯水池を通過する成分があり、堆砂実績は流入土砂量の全量を表すものではないので注意が必要である。ただし、こうした微細粒子は出水時には水と十分に混合していると考えてよく、流入土砂量に対する分流量の比は水の分流量の比とほぼ等しくなる。従って、貯水

池堆砂に寄与する部分のみを取り出した当該流入量時でのバイパス量、貯水池堆砂量を算定することができる。問題は流砂量式の同定にあり、厳密性には多少問題があるが、当面はウォッシュロードと同様に、微細成分の堆砂量が概ね Q^a に比例するものとして a 及び比例定数を求める方法が考えられる。

以上により、分流土砂量が算定される。以下、施設設定の妥当性の確認、土砂バイパス計画の選定へと続くが、その概要については、既に2.2で述べたので、紙面の関係もありここでは省略する。なお、土砂バイパス計画の効率を評価する指標として、バイパス土砂 1m^3 当たりの費用が考えられる。ライフサイクルは堆砂問題において通常考えられている100年とすればよいであろう。その際、水路の維持管理費用を、ライニング方法の検討と併せ考慮しておかなければならないことはいうまでもない。

4. おわりに

以上、土砂バイパス計画の検討方法について考察・提案した。今回示したのは基本となる流れであり、具体的内容については、今後の研究により、計画精度の向上やより効率的なバイパス技術の開発が期待される。特に、粒径別の土砂分流技術や分流土砂量の算定方法、バイパス水路の輸送能力、ライニングや維持管理手法における技術の発展が望まれ、筆者らの重要な課題と考えている。

参考文献

- 1) 建設省河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会報告：流砂系の総合的な土砂管理に向けて、1998/7
- 2) 上阪恒雄：貯水池の土砂管理、ダム技術、No.159, 1999, 12
- 3) 柏井条介、本田敏也、菅原崇之：ダム貯水池の土砂バイパス施設分派特性、土木技術資料、No.37, Vol.12, 1995.

柏井条介*



国土交通省土木研究所ダム部
水工水資源研究室長
Josuke KASHIWAI