

発電用ダムにおける堆砂特性を考慮した通砂運用効果の検討

恩田 千早¹・角 哲也²

¹正会員 電源開発株式会社 土木建築部 (〒104-8165 東京都中央区銀座六丁目 15-1)
E-mail:chihaya_onda@jpower.co.jp

²正会員 博士(工) 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:sumi.tetsuya.2s@kyoto-u.ac.jp

ダムの持続的管理における課題の一つに堆砂対策がある。堆砂対策の中で出水時の水位低下を伴う通砂運用は、洪水の際に土砂を下流に通過させるため環境適合型である。その土砂通過特性はダムの堆砂特性、出水時の洪水吐数高およびダム直上流河床高に対する水深の比（クレスト／河床水深比）などのパラメータが支配的と考えるが、系統的に検討されたものはほとんどない。本論文では、発電用ダムの通砂特性について、クレスト／河床水深比に着目し、出水時の水位低下と貯水池の土砂捕捉率の関係を既往検討から推定し、複数ダムを例に河床変動解析により通砂運用効果を検証した。更に、通砂運用に伴う土砂掘削量の低減による便益や減電コストを用いて総合的な経済性を検証し、今後、発電用ダムに通砂運用を幅広く導入していく可能性と課題を明らかにした。

Key Words: Reservoir sedimentation, Hydropower, Sediment sluicing, Economic evaluations

1. はじめに

エネルギー資源の少ない我が国の中で、再生可能、純国産、そしてクリーンなエネルギーの供給源として、水力発電の位置づけは重要なものとなっている¹⁾。

一方で、高度経済成長期から現在まで多く整備されてきた水力発電設備を持続的に使用していくための大きな課題として堆砂対策がある。国内外の多くの地点でその実施、検討が行われているものの課題が多い。

水力発電にとってダムは、自然の川の流れを一時的に貯留することにより、電気の需要に応じ、発電エネルギーを生み出すことができる発電施設の一部である。しかし、川には水とともに上流域で生産された土砂も流れ、土砂は流速が遅くなるダム湖に一時的、または一部は半永久的に堆積してしまうことが多い。

堆積した土砂はダム湖容量の減少、ダム湖上流部の河床や洪水位の上昇等の局地的な影響だけでなく、海岸も含めた下流域への土砂供給の減少による物理的変化、生態系へと流域全体に影響を及ぼす²⁾。

その影響を排除するため様々な堆砂対策技術が地点特性に応じて検討されており、場所や方法により分類したものが図-1³⁾である。通砂運用とは、この中で土砂の通

過をダム湖内で実施するスルーシングのことである。

通砂運用は、出水時に水位を低くすることで流入土砂のダム湖内捕捉率を低減させ、基本的には全ての流入土砂をそのまま流下させることである。

通砂運用の事例としては、鯖石川ダム（新潟県）で平成 23 年の融雪期に実施され、一定の効果が確認されている。また、耳川水系（宮崎県）の西郷ダム、山須原ダムでは洪水吐ゲートを改造し、これまでより水位低下を図り通砂効果を期待した運用が計画されている⁴⁾。

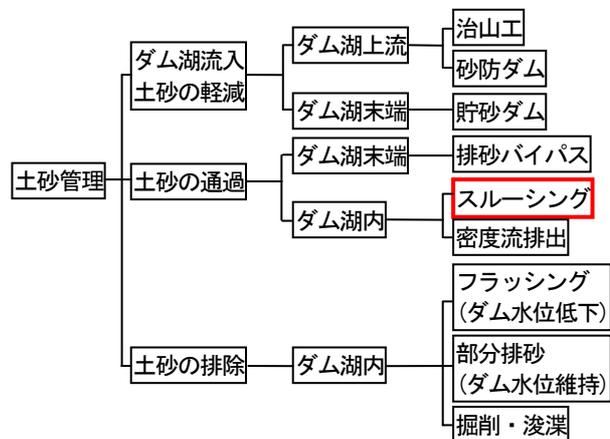


図-1 ダム湖土砂管理方法分類³⁾

このように通砂運用は、設備を改造し水位低下を図るハード対策と、既存設備のみを利用し運用変更により水位低下を図り、容易に対応できる可能性があるソフト対策に大別できる。しかし、通砂運用の適用性を評価するのに、地点毎に河床変動解析を実施するのでは、河床材料の粒径調査なども必要となり、時間と費用を要する。

よって、通砂運用効果を簡易に推定する手法が望まれる。また、発電用ダムの場合、運用方法によっては堆砂排除費用と溢水による減電などの費用のトレードオフが生じることから、経済性評価が必要である。

そこで、本研究では、発電用ダムの通砂特性について、クレスト/河床水深比に着目し、出水時の水位低下と貯水池の土砂捕捉率の関係を既往検討から推定する。そして、2地点のダム調整池を例に通砂運用効果を検証する。具体的な検証にあたっては、電源開発(株)が所有・管理しているダム調整池について、運用方法を検討し、河床変動解析を行って効果を明らかにするとともに、経済性について評価を行う。

2. 発電用ダムの通砂運用効果の推定

堆砂対策技術を選定するに当たっては、貯水池回転率や貯水池寿命といったパラメータから、適性がある堆砂対策を導く方法が図-2⁹⁾のとおり提案されている。今回検討対象である2つのダム(Aダム、Bダム)は何れもフラッシング排砂が適用性の高い対策と分類されている。

奥村らの検討⁹⁾によれば、調整池を堆砂の分布域に応じて池タイプ、中間タイプ、川タイプに分類し、川タイプについては出水時のダム水位低下運用により堆砂対策が達成される可能性があること、中間タイプについては洪水吐高率(ダム高に対する洪水吐越流頂から満水面の比)が50%程度となると掃流砂、浮遊砂を含めた土砂捕捉率は0%となり通砂が実現可能であることが示されている。ここで、洪水吐高率は設備形状から設定され判り易い指標である反面、運用上、出水時の水位低下レベルを評価する際に、ハードのみで決定される洪水吐高率からはソフト的な貯水位運用による効果を評価できない課題があった。

それゆえ、ダム調整池の堆砂形状に影響する因子として、出水時のクレストにおける水深(出水時水位から洪水吐越流頂の高さ)とダム上流における水深(出水時水位から現在河床(堆砂を考慮)の高さ)の比率(クレスト/河床水深比(図-3))から土砂捕捉率を推定し、通砂の適性があるダム調整池の特性を検討した。

出水時の水位以下の貯水容量(H-V(水位容量)曲線より計算)と年間平均流入水量(ダム水位計測値を基に計算)から算定される貯水池回転率からBrune⁷⁾曲線で算

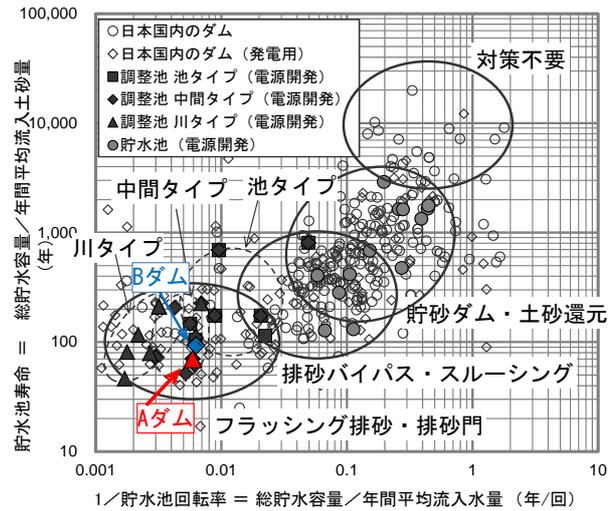


図-2 貯水池回転率と寿命による堆砂対策区分

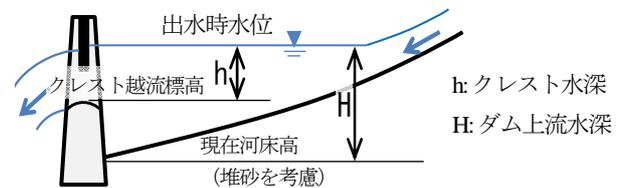


図-3 クレスト/河床水深比(h/H)のイメージ

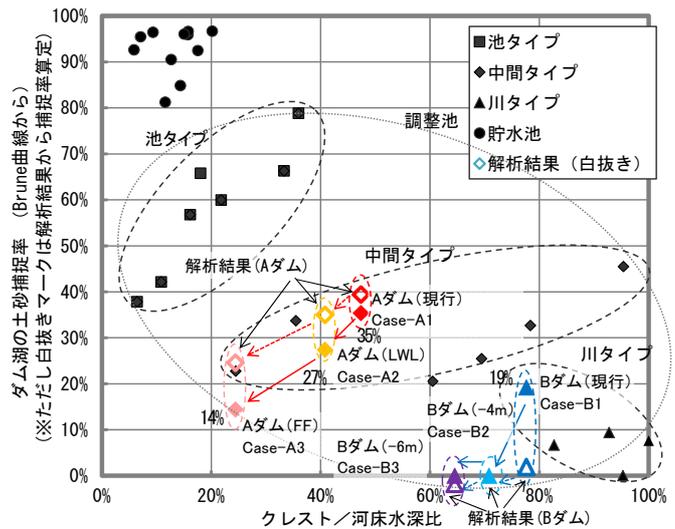


図-4 クレスト/河床水深比と土砂捕捉率の関係

表-1 検討ケース毎 出水時の水位低下幅

Aダム (中間タイプ)		Bダム (川タイプ)	
Case-A1	現行水位	Case-B1	現行水位
Case-A2	低水位 (LWL)	Case-B2	低水位(LWL)-4m
Case-A3	フルフロー水位 (FF)	Case-B3	低水位(LWL)-6m

定した土砂捕捉率とクレスト/河床水深比の関係を整理したものが図-4である。Brune曲線は総貯水容量から算定された曲線であるが、大半の土砂は出水時に流入することから、ここでは出水時の貯水容量が土砂捕捉率に大きく影響するのではと仮定して整理した。ここで、出水時の水位低下効果を評価するため、奥村らが提案した分類⁹⁾の中間タイプであるAダムと川タイプであるBダム

について、各 3 ケース算定した値も図-4 に示した。各ケースの出水時の水位は表-1 のとおりである。

図-4 によると、Brune 曲線から算出される土砂捕捉率では A ダムは出水時に水位を現行 (Case-A1) より約 3m 低下させる低水位 (Case-A2) にすると 35%→27%に低減する。また、水位を約 9m 低下させフリーフロー (洪水吐自由越流) 水位 (Case-A3) にすると、土砂捕捉率は 14%まで低減する。一方、B ダムは現行水位 (Case-B1) に比較し、出水時の水位を低水位-4m (Case-B2) にすると、土砂捕捉率は 19%→0%になる。低水位-6m (Case-B3) としても同様に土砂捕捉率は 0%である。

この出水時の水位低下を考慮した Brune 曲線から推定された土砂捕捉率について、4 章で河床変動解析モデルより算定された土砂捕捉率と比較して検証する。

3. 検討対象ダムにおける通砂計画検討

(1) 現在までの堆砂状況および堆砂対策

A ダム、B ダムの両地点のダム調整池の概要を表-2 に、堆砂進行の状況を図-5 に示す。共に竣工から 60 年近く経過し、全堆砂量について A ダムは堆砂排除していることから至近は漸減傾向であり、B ダムは堆砂排除しているものの至近、増加傾向を示している。

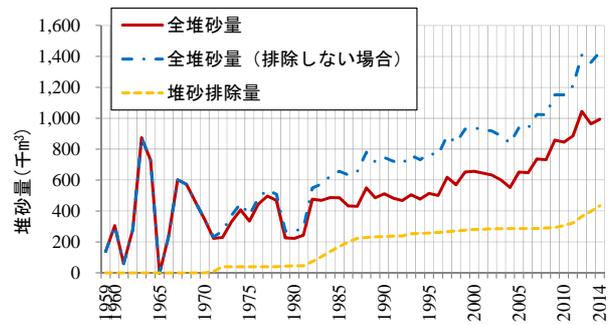
総貯水容量に対する全堆砂率について A ダムは 33% であり、B ダムは 10%となっているが、有効貯水容量内堆砂量はどちらも小さく、発電への影響は殆ど無い。

A ダムでは、背水影響を回避するために浚渫船により年間約 15 万 m^3 の堆砂排除を実施している。将来的に、上流ダムからの排砂が計画されており、上流ダムからの排砂は出来るだけ下流河川へ供給したいことから通砂運用が検討されている。

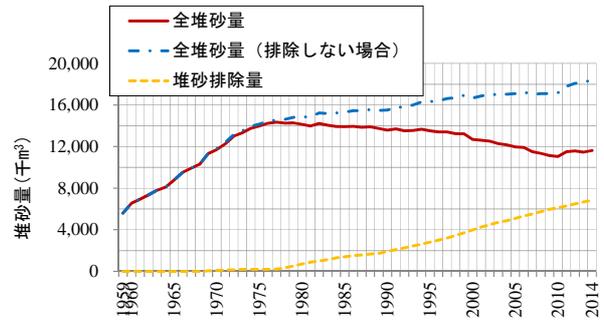
B ダムでは、背水影響を回避するために毎年一定期間はダム水位を低下させて年間約 4 万 m^3 の陸上掘削による堆砂排除を実施している。今後、河川環境改善と経済的なダム管理を目的として、通砂運用を本格的に実施するべく、まずは試験運用を開始している。

表-2 検討対象 2ダムの概要

ダム名	A	B
地域	中部地方	九州地方
堤高(m)	89.0	26.5
洪水吐高(m)	13.5	14.3
利用水深(m)	4.0	2.0
当初総貯水容量(千 m^3)	34,700	9,930
全堆砂率(%)	33	10
有効貯水容量(千 m^3)	7,750	2,230
有効貯水容量内堆砂量(千 m^3)	1,000	0
年平均堆砂量(千 m^3)	110	23



(a) Aダム



(b) Bダム

図-5 堆砂進行状況

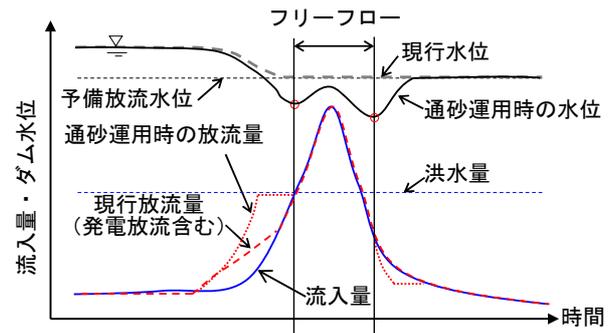


図-6 ダム水位の低下方法検討例

(2) ダム水位の低下方法

通砂運用では出水時にダム水位を低下することで、掃流力の増加による通砂効果を期待している。そのため、ダム水位の低下方法については、出水前の水位低下と出水後の水位回復のタイミングと流量の関係が重要となる。地点毎に特性が異なることから水位、流量ともに上流のダム群、下流のダムおよび河川への影響を考慮して設定する必要がある。

a) Aダムのケース

図-6 のとおり、A ダムは出水が予想される際、洪水量 (1,800 m^3/s) まで流入量が増加する前に水位を低下させる。洪水量までに放流量は流入量以上として、水位低下させる。なぜなら、流入量が洪水量以上となると、ダム下流へ危険が生じる恐れがあることから放流量は流入量以上に増加させることができない。出水のピーク時に掃流力効果を高めるためには、洪水量までに水位を低下させる。本地点の出水傾向として、流入量の増加が非常

に早いケースがある。既往出水を用いて、ダム放流開始タイミングを既往操作と同時にフリーフロー（洪水吐自由越流）水位まで水位を低下可能か否か検討したところ、十分な水位低下ができないケースがあった。水位低下を確実に実施するには、放流開始判断を既往のタイミングより早める必要がある。

一方、水位回復のタイミングは、洪水量（1,800m³/s）を下回る時と、冠水リスク低減に効果ある地点の堆積土砂の移動限界摩擦速度を下回る流入量（1,200m³/s）の時について、通砂量、減電時間を比較検討し後者が有利と検討している。水位回復基準の流量を決定する際に、通砂量と減電量はトレードオフの関係にあり、個別地点で各々検討する必要がある。

b) Bダムのケース

Bダムの場合も洪水量になるまでに水位低下する計画としており、その方法は図-6と同様である。実施時期については、Bダムでは鮎の遡上期、産卵期を避けるよう6～9月の4ヵ月間を設定している。開始判断基準は既往の降雨予測データと流入量データから設定している。

4. 河床変動解析を用いた通砂効果の検証

(1) 河床変動解析

a) 解析モデル

河床変動解析は一次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。流量と水位を毎時データとし、不等流計算で射流が発生した場合は限界水深に置換して計算した。粗度係数は既往洪水痕跡の逆算から設定した。モデルは100mm程度の掃流砂、浮遊砂、粒径0.1mm以下のウォッシュロードまでを扱うものであり、掃流砂量式および浮遊砂濃度式は芦田・道上式⁸⁾を用いた。ウォッシュロードは移流拡散方程式を用いた。交換層は最大粒径程度として設定した。流入土砂量について、ウォッシュロードは出水時のSS観測値を基に設定し、掃流砂・浮遊砂はAダムでは調整池内堆砂量及び粒度から流量と流砂量の回帰式を設定し、Bダムでは上流端地形および河床材料粒度を基に平衡給砂により設定した。モデルの検証は記録が残存している期間とし、Aダムが26年間、Bダムが27年間の実績データにより行い、累計堆砂量は5%程度の誤差であり、シルト・砂・礫の比率は最大2割程度、河床高は最大2m程度の誤差で概ね整合した。解析期間の間にAダムでは既往最大流量の出水実績および累計450万m³の堆砂排除実績が含まれ、Bダムでは設計洪水量を超過した出水実績および累計24万m³の堆砂排除実績が含まれている。

b) 解析条件および検討ケース

解析は現在河床を初期河床とし、解析モデル検証に使

用した実績データを流入量、ダム水位の与条件として、Aダムの場合は今後26年間、Bダムの場合は今後27年間について予測した。検討ケースは表-1のとおり、出水時の水位のみケース毎に変更した。Aダムの場合は、上流ダムで計画中の排砂操作も考慮して流入土砂量を現行より増加させて検討した。また、Aダムは上流背水影響を回避するような河床を設定し、その河床上の土砂を毎年維持掘削するような設定とした。なお、堆砂排除はモデルでは年末に一括して排除区間から差し引く設定としている。

c) 河床変動解析結果

図-7は、Aダムの解析期間26年間の土砂量および26年後の河床高の差を示している。Aダムは背水影響回避のために堆砂排除が必要なことから、堆砂排除量を含めて検討している。Case-A1（現行）に比較して、Case-A2（低水位）およびCase-A3（フリーフロー水位）では、堆砂排除量および堆砂量が減少し、通砂量が多い結果となり、通砂運用効果が確認された（図-7(a~d)）。

Aダムの土砂捕捉率では、クレスト/河床水深比からの推定値（図-4）と河床変動解析値（図-7(a)）を比較すると、通砂運用により前者は35%→14%へと低減し、後者は39%→25%へ低減し、概ね同様の傾向を示す結果となった。粒度構成比として通砂量はシルトが8～9割を占め残りが砂分であり、堆砂量と堆砂排除量の合計は砂

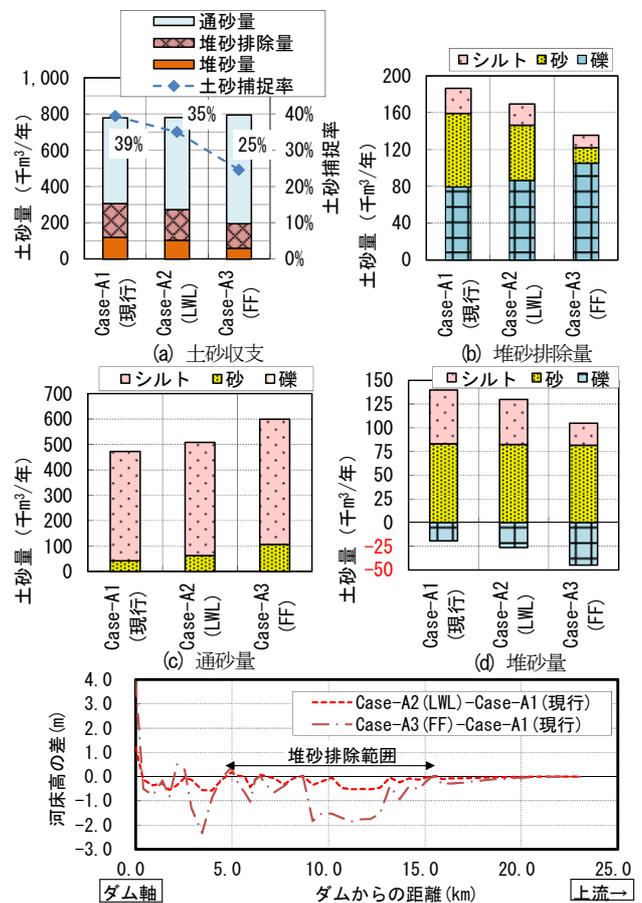


図-7 Aダム河床変動解析結果

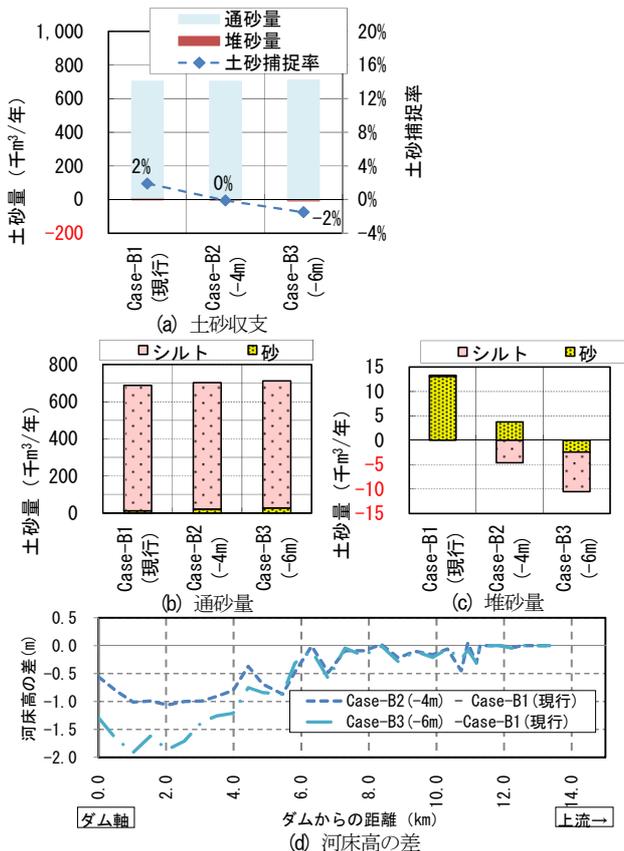


図-8 Bダム河床変動解析結果

が5割を占め、礫が2~3割を占める(図-7(b~d)). Case-A3の通砂運用でも礫はダム下流へ流出しない結果となった。

河床高の差として、Case-A3 - Case-A1はCase-A2 - Case-A1より部分的に大きい、全域に及ぶものでない(図-7(e)). 河床が洗掘され通砂していることと想定している。またダムより約15kmまでは、各ケースの差が生じており通砂運用の効果が及ぶことが分かる。

図-8は、Bダムの解析期間27年間後の結果である。Bダムは通砂運用のみで堆砂量が0となる見込みが得られた。Case-B1(現行)に比較して、Case-B2(LWL-4m)およびCase-B3(LWL-6m)は、堆砂量が減少し、通砂運用効果が確認された(図-8(a~c)).

Bダムの土砂捕捉率では、クレスト/河床水深比からの推定値(図-4)と河床変動解析値(図-8(a))を比較すると、通砂運用により前者は19%→0%へと低減し、後者は2%(Case-B1)→0%(Case-B2)へ低減を示す結果となった。粒度構成比として、通砂量はシルトが95%超を占め、堆砂量は砂の堆積量に左右される結果となった(図-8(b~c)). Bダムは、Aダムに比較して粒度構成としてシルトが大半を占め、砂・礫が少ない特徴がある。この要因もあり、クレスト/河床水深比による推定値(図-4)が河床変動解析値(図-8(a))よりも大きい結果となることが推測される。

河床高の差(図-8(d))から、Case-B3とCase-B2の差

表-3 堆砂対策費用の比較(今後30年間)

	Case名	項目	30年分費用(億円,比率)	
Aダム	Case-A1 (現行)	堆砂排除	270	
		計	270	(1.00)
	Case-A2 (LWL)	堆砂排除	264	
		計	264	(0.98)
	Case-A3 (フリーフロー (FF))	通砂に伴う減電	110	
		護岸補修	450	
堆砂排除		204		
	計	260	(0.96)	
Bダム	Case-B1 (現行)	堆砂排除	24	
		計	24	(1.00)
	Case-B2 (LWL-4m)	通砂に伴う減電	2	
		護岸補修	15	
		計	17	(0.71)
	Case-B3 (LWL-6m)	通砂に伴う減電	2	
護岸補修		18		
計		20	(0.83)	

による通砂運用効果はダムから6.0km付近まで及び、Case-B1との差は8.0km付近まで及ぶことが分かる。

(2) 経済性評価

表-3は、A、Bダムによる水位低下運用および掘削排除に要する費用を整理したものであり、発電設備の総合耐用年数を勘案し今後30年間を対象としているが社会的割引率は用いていない。費用項目は既の実施している社内地点および他河川での例に基づき設定した。発電用ダム湖の堆砂対策において、発生する減電については、水位低下時間、水位低下頻度等から算出している。

表-3からAダムでは、Case-A3で通砂運用しても合計額はCase-A1と5%も変わらない。堆砂排除費用は約2割減少するが、減電および護岸補修(異形ブロック設置等)の費用が増嵩し全体額は大きく変わらない。一方、Bダムについては、通砂運用するCase-B2は、Case-B1より約30%経済的となるが、Case-B3のように更に出水時水位を低下すると護岸補修費用が増え、全体費用が増嵩することが想定される。

5. まとめと今後の課題

本論文では、発電用ダムの通砂運用効果について、出水時の洪水吐とダム上流河床の水深比(クレスト/河床水深比)から土砂捕捉率を推定した。その土砂捕捉率と河床変動解析結果を比較検証した。合わせて経済性を評価した。得られた主要な結論は以下のとおりである。

a) クレスト/河床水深比から算定した土砂捕捉率と河床変動計算から算定した土砂捕捉率の比較検証

- ・中間タイプであるAダムでは、通砂運用による効果

をクレスト/河床水深比から推定した土砂捕捉率と河床変動解析による土砂捕捉率を比較すると両者とも約20%に低減し、類似の結果を得ることができた。

- ・川タイプである B ダムでは、同様に比較すると、土砂捕捉率では 19%→0%、河床変動解析では 2%→0%と結果は異なるが、土砂捕捉率が 0%になるという点では同様の結果を導くことができた。
- ・このことから、中間タイプおよび川タイプのダムであれば、出水時の水位低下効果をクレスト/河床水深比から推定した土砂捕捉率で概ね評価する可能性があることが分かった。ただ、河床状況を詳細検討するためには河床変動解析が重要である。

b) 経済性評価

- ・中間タイプの A ダムの場合、既存設備を利用した（ソフト対策）通砂では経済的に有利にならないが、川タイプの B ダムでは有利であることを確認した。
- ・A ダムの場合、通砂運用を実施しても堆砂排除の 30 年分費用が 204 億円に上る。その費用があれば、既設ダム堤体を改造し（ハード対策）、通砂効果を増大させる余地があるものと思われる。但し、既設ダム堤体の改造に当っては構造安定上や、ダム機能を維持しながらの施工等の課題が想定される。

c) 今後の課題

- ・環境影響は通砂運用効果を検討する上で重要項目の一つであることから、今後検討を行う予定である。具体的な環境影響としてダム下流は砂やシルトが流下しやすくなり、濁度上昇により魚類等や下流域の取水に影響を与える可能性がある一方、礫表面のクレンジング効果や、また栄養塩、ケイ酸やフルボ酸鉄などの供給による流域の物質循環の回復によるプラス面も期待される。
- ・今回の検討では、通砂運用をしても礫など粒径が大きいとダムを通過させることは困難であった。貯水池回

率から土砂捕捉率を推定するには、流入土砂の粒度構成比の概念を含めて考える必要がある。

- ・利水ダムにおいては、経済的な理由から堆砂掘削除去を主とした堆砂対策が取られるケースが多い。一方、流砂系総合土砂管理の観点から、下流への適正な土砂供給の必要性は今後増大すると想定され、通砂運用や排砂バイパストンネルの導入などが有効と考えられる。これらを推進するには、ダム管理者の視点による部分最適ではなく、流域管理の視点からの全体最適な土砂管理を進める必要があり、そのためには公的な促進制度の導入も考慮に値すると考えられる。
- ・さらに、経済的な問題だけでなく、多くのステークホルダーの合意形成には流域管理に関係する諸機関の積極的な関与が必要と考える。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、水力発電について、[http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/]、最終検索 2016 年 9 月 29 日。
- 2) 角哲也：貯水池土砂管理の現状と将来、電力土木、No.338, 2008.
- 3) 角哲也：排砂効率および環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択、第 2 回東アジア地域ダム会議、2005.
- 4) 吉武宏晃ら：耳川水系ダム通砂に向けた土砂動態計算モデルの構築と活用、電力土木、No.376, 2015.
- 5) 角哲也：土砂管理で「千年ダム」の実現を、季刊河川レビュー、新公論社、2005.
- 6) 奥村裕史、角哲也：水力発電用ダム調整池における堆砂特性等を考慮した水位低下運用によるスルーシグ排砂、水工学論文集第 55 巻、2010.
- 7) Brune, G. M.: Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, 34-3, pp.407-418, 1953.
- 8) 芦田和男、道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 206 号、pp.59-69, 1972.

(2016.9.30 受付)

EFFECTS OF SEDIMENT SLUICING OPERATION IN HYDROPOWER DAMS CONSIDERING PROPERTIES OF RESERVOIR SEDIMENTATION

Chihaya ONDA and Tetsuya SUMI

Reservoir sedimentation is one of the most important problems for sustainable management of hydro-power dams. Among several countermeasures, sediment sluicing is characterized in the sediment routing options which can be environmental friendly since it enables to pass through sediment from reservoir to downstream river mostly in natural flood events. Property of passing sediment can be classified depending on Depth of reservoir, Capacity-inflow and Capacity-sediment inflow ratios. In this study, the properties of hydropower dams which will define effects of sediment sluicing were analyzed such as relations of trap efficiency of reservoirs and the ratio of flood water depths above river bed and spillway crest elevation. For the case study, sediment sluicing effect was analyzed in two dam reservoirs by comparing sediment budget with 1D numerical model and economic analysis to evaluate all sediment management costs. These results showed the possibility that sediment sluicing can be installed in many hydropower dams.