

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ング排砂

SEDIMENT SLUICING MANAGEMENT BY DRAW DOWN OPERATION
IN HYDROPOWER REGULATING RESERVOIRS
CONSIDERING PROPERTIES OF SEDIMENTATION AND FACILITY CONDITION

奥村 裕史¹・角 哲也²
Hirofumi OKUMURA and Tetsuya SUMI

¹正会員 工修 電源開発株式会社 西日本支店 (〒530-6691 大阪市北区中之島6-2-27)

²正会員 工博 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Reservoir sedimentation is one of the most important problems for securing long term achievement of water power operation in the future. In order to solve the problem, we have to note that there are two major types of water power stations, which are storage type and regulating type, respectively. We have already discussed that we have to focus on sedimentation management in regulating type reservoirs more than storage type ones from the view point of flood disaster prevention in reservoir areas. In this paper, we study on technical and economical feasibility of sediment sluicing management by numerical analysis, and we found that it is very much advantageous in both way. We also analyze the relation between trap efficiency of reservoir sediment and proportion of spillway gate size and dam height, and get some outcomes which are useful for dam gate remodeling.

Key Words: Reservoir sedimentation, Hydropower station, Regulating reservoir, Sediment sluicing

1. はじめに

水力発電設備を持続的に使用するにあたり、最重要課題はダム湖における堆砂対策である。著者らは既に、発電用ダム湖を貯水池と調整池に分けて、それぞれの堆砂状況および堆砂問題について分析を行った¹⁾。その結果、洪水災害の発生防止の観点から、調整池の堆砂対策を優先的に実施するべきであることが分かった。

調整池は発電利用水深が数mと小さく、常に高い水位を保っているため、池の高い位置に堆砂が生じやすい特性がある。この特性は、出水時に調整池周辺の水位上昇をまねく原因であるが、一方、堆砂位置とダム水位運用との間の強い相関関係を示唆するものである。この関係を利用し、出水時にダム水位を低下させスルーシング排砂を行うことは堆砂対策として有効である。調整池は上流に貯水池を有していることから、ダム水位を一時的に低下させても、洪水後に貯水池からの水の補給で水位回復が容易であり、発電運用に与える影響は小さい。

著者らは、堆砂が調整池全域にわたって生じているか、出水時に調整池が川状態となっているか、池状態となっ

ているかの2点により調整池を3タイプに分け、表-1に示す通り、タイプ毎にダム水位低下運用によるスルーシング排砂を主たる方法とする堆砂対策を提案した¹⁾。

本論文では、タイプ毎に提案した堆砂対策について、川タイプと中間タイプの調整池において河床変動解析を行い、有効性および経済性について評価を行う。また、スルーシング排砂に大きく係るダム湖の土砂捕捉率について、河床変動解析結果を基に分析を行う。土砂捕捉率については、貯水池回転率から求める方法がBrune²⁾や江崎³⁾らにより示されているが、その適用性について限界が指摘されており⁴⁾、本論文では、河床変動解析結果および比流出土砂量により算定する方法を検討する。

2. 水力発電用ダム調整池の堆砂対策

図-1は、貯水池回転率と貯水池寿命との関係から、貯水池を区分して適用性の高い堆砂対策を示したものである⁵⁾。貯水池回転率が大きく、貯水池寿命が小さいほど、フラッシングやスルーシング等の貯水位低下操作を加味した排砂工法の適用性が高いことが示されている。

表 - 1 調整池のタイプ分けおよびタイプ別堆砂対策

タイプ	堆砂位置および出水時水位の概略図	平均ダム高	平均設計洪水量	平均洪水吐高/ダム高	対象ダム数(割合%)	著者が提案する堆砂対策
池タイプ	出水時調整池は池状態 堆砂は全域に生じていない	58m	2,700m³/s	13%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位を低下させ、有効貯水量内や洪水位を上昇させる範囲に堆砂させず、ダム堤体付近等の洪水位に影響しない位置に堆砂させる。 ・ 調整池上中流域に堆砂が進行する場合は掘削排除を行う。
中間タイプ	出水時調整池は池状態と川状態 堆砂は全域に生じている	42m	4,000m³/s	29%	9 (48%)	・ 出水時にダム水位を低下させ、有効貯水量内や洪水位を上昇させる範囲に堆砂させない。将来的には洪水吐ゲートからの排砂を目指す。 ・ 調整池上中流域に堆砂が進行する場合は掘削排除を行う。
川タイプ	出水時調整池は川状態 堆砂は全域に生じている	27m	8,000m³/s	54%	5 (26%)	・ 出水時にダム水位を低下させて、洪水吐ゲートから排砂を行う。

電源開発株式会社が所有管理する水力発電用調整池についての整理である

図中に電源開発株式会社が所有管理する発電用貯水池および調整池をプロットしたが、両者のプロット範囲は異なっている。貯水池は貯砂ダムや土砂還元による堆砂対策が適しており、調整池は排砂工法による堆砂対策が適していることが分かる。

調整池について、表 - 1で示した3つのタイプ毎に区分し点線で示した。貯水池回転率が大きく、貯水池寿命がやや小さい方に川タイプ、逆に貯水池回転率が小さく、貯水池寿命がやや大きい方に池タイプが存在し、その間に中間タイプが位置している。これは、川タイプの方が池タイプに比較して水の力をより大きく利用できることを示し、表 - 1で提案している堆砂対策と整合している。

図 - 1は区分毎に適用性の高い堆砂対策を示すものであるが、例えば、排砂工法の内容は様々である。調整池タイプ毎に詳細な対策内容の設定が必要であると考える。

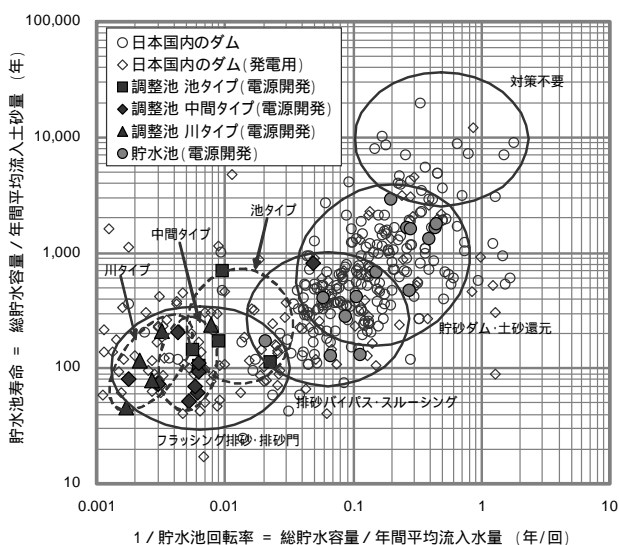


図 - 1 貯水池回転率と貯水池寿命による堆砂対策区分

3. 川タイプ調整池のダム水位低下運用堆砂対策

水力発電用ダム調整池の川タイプにおける、ダム水位低下運用による堆砂対策について、A調整池を対象に河床変動解析による検討を行う。A調整池は総貯水量9,930千m³、流域面積1,629km²、供用開始は昭和33年9月であり、中流域の洪水位上昇抑制を目的として、現在、掘削排除による堆砂対策を実施している。

(1) 河床変動解析モデルおよび検討ケース

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。モデルは、粒径100mm程度の掃流砂から、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⁶⁾を用いた。流入土砂量については、上流端地形および河床材料粒度、調整池内堆砂量および粒度を基に設定した。モデルの精査は、現在河床に至るまでの28年間の実績データにより行い、河床位変化、河床材料粒度等を概ね整合させた。当該28年間の間には、既往最大流量6,350m³/secの出水実績、累計約20万m³の堆砂排除実績が含まれている。

表 - 2 A調整池(川タイプ)河床変動解析検討ケース

ケースNo.	内容
CASE - A1	今後28年間、堆砂対策を実施せず
CASE - A2	今後28年間、出水時にダム水位を低下させる運用を行う。流量が1,000m³/secを越えるとゲート開放へ移行しダム水位を低下させる。流量ピーク後200m³/secを下回ると水位回復へ移行する。
CASE - A3	今後28年間、毎年30,000 m³の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離3,000mから5,500mの範囲で行う。

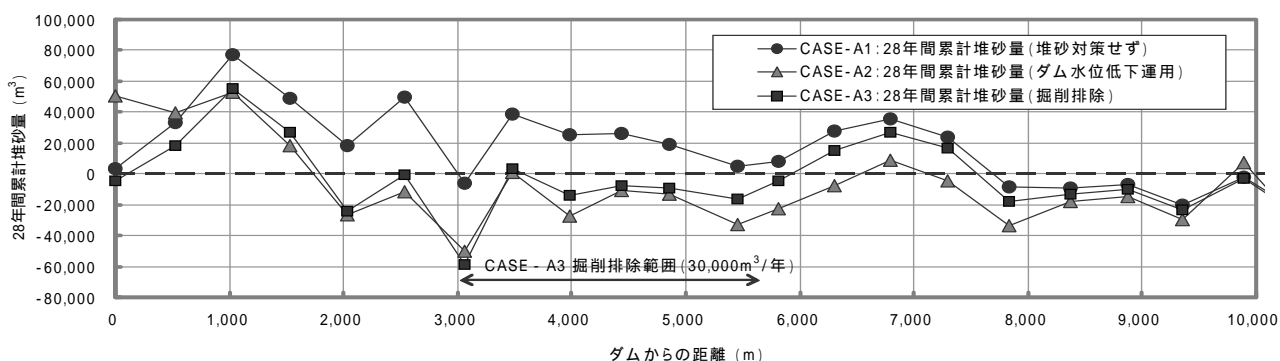


図 - 2 A調整池（川タイプ）河床変動解析結果（位置別28年間累計堆砂量）

解析は現在河床を初期河床とし、解析モデル精査に使用した実績データを流入量等の与条件として、今後の28年間について行った。検討ケースは表 - 2に示すとおりである。

(2) 河床変動解析結果

図 - 2は、解析期間28年間に堆砂が生じる位置を示すものである。CASE - A1では調整池の下流域から中流域にかけて堆砂量が増加する。一方、CASE - A2とCASE - A3では、下流域のダム地点付近では堆砂量が増加するものの、ダムより2,000mから6,000mの中流域では堆砂量が減少する。この堆砂量の減少が中流域で洪水水位を低下させるのに有効に働き、これら2つのケースが堆砂対策として有効であることが示された。これらは、堆砂対策手法は異なる（水位低下運用と掘削排除）ものの、対策により形成される河床位は類似しており、ほぼ等しい効果が得られる対策とみなすことができる。

図 - 3は、解析期間28年間の調整池内累計堆砂量の経年変化を示すものである。CASE - A1は、経過20年目程度までは年間20,000m³程度の堆砂進行であるが、以降の堆砂量はほぼ平衡状態である。当該平衡状態においては、出水時の洪水水位は高い位置に保持されるため、洪水被害対策の観点から、この状態を許容することはできない。

CASE - A2とCASE - A3は、堆砂量は増減をするものの、ほぼ平衡状態である。ただし、図 - 2で示したとおり、堆砂量は中流域で減少、ダム堤体付近で増加し、堆砂位置は変化している。この変化により、堆砂量は変化せずとも、洪水水位上昇の抑制は達成されることとなる。

以上の河床変動解析により、CASE - A2およびCASE - A3の堆砂対策の継続的な実施が有効と確認された。

(3) ダム水位低下運用による堆砂対策の経済性評価

表 - 3は、これらダム水位低下運用および掘削排除に要する費用を概算で整理したものであり、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、既に実施している社内地点および他河川での例等⁷⁾を基に設定した。発電用ダム湖の堆砂対策において、特に発生する発電量減少（減電）についても、費用項目

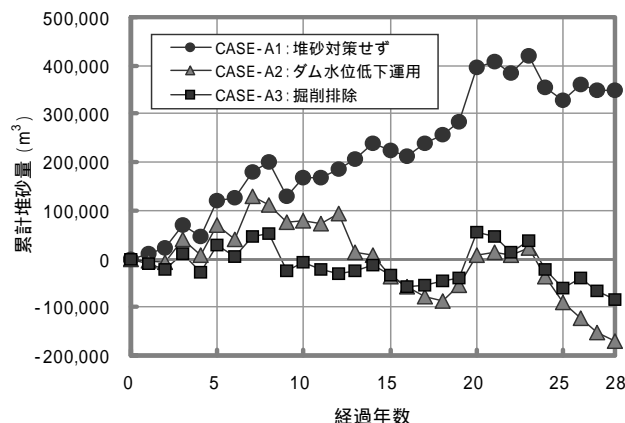


図 - 3 A調整池（川タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量経年変化）

表 - 3 A調整池（川タイプ）堆砂対策費用（今後30年間）

対策方法	項目	30年間の費用
ダム水位 低下運用 (CASE - A2)	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	126
	調査検討（河川影響他）	430
合計		1,066
掘削排除 (CASE - A3)	掘削運搬土捨	3,300
	掘削に伴う減電	540
	土捨場整備	510
	調査検討（土捨場他）	80
合計		4,430

単位：百万円

として計上した。これらの堆砂対策の効果はほぼ同等であるが、30年間の費用はダム水位低下運用による対策の方が、掘削排除費用の約4分の1程度と経済的である。

ダム水位低下運用によるダム下流への土砂供給については、費用便益分析⁸⁾等により経済的に評価し、費用化する事も可能である。また、掘削排除した堆砂は土捨場まで運搬して処理すると仮定したが、現実的には土捨場を継続的に確保していくことは非常に難しい。

これらの結果から、川タイプの発電用ダム調整池においては、堆砂対策として、出水時にダム水位低下を行い、流入土砂および堆積土砂をスルーングさせる方法が物理的に可能であり、経済的に有利であることが示された。

4. 中間タイプ調整池のダム水位低下運用堆砂対策

川タイプに続いて、水力発電用ダム調整池の中間タイプにおける、ダム水位低下運用による堆砂対策について、B調整池を対象に河床変動解析による検討を行った。B調整池は総貯水量4,240千 m^3 、流域面積217 km^2 、供用開始は昭和35年7月であり、中流域の洪水水位上昇抑制を目的として、現在、堆砂対策の準備検討を行っている。

(1) 河床変動解析モデルおよび検討ケース

河床変動解析は川タイプ同様に次元不等流混合粒径河床変動モデルを用いて行った。モデルの精査についても同様に、現在河床に至るまでの22年間の実績データにより行った。当該22年間の間には、既往最大流量2,248 m^3/sec の出水実績、累計約10万 m^3 の堆砂排除実績が含まれている。解析は現在河床を初期河床とし、解析モデル精査に使用した実績データを流入量等の与条件として、今後の22年間について行った。検討ケースは表-4に示すとおりである。

(2) 河床変動解析結果

図-4は、解析期間28年間に堆砂が生じる位置を示すものである。全ケースで、調整池上流域において堆砂量増加傾向、ダム付近において減少傾向が見られる。中間タイプは調整池全域に堆砂が生じるものであるが、川タイプと比較してダム高があり、洪水吐高率（ダム高に対する洪水吐越流頂から満水面までの高さの割合）も小さいことから、ダム堤体背面に堆砂が生じる容量がある。

CASE - B1は、下流域で数十万 m^3 の堆砂、中流域で数十万 m^3 程度の堆砂が生じ、上流域では平衡状態である。CASE - B2は、ダム付近での堆砂がCASE - B1と同様に多く、中流域で数万 m^3 程度の堆砂が生じている。このため、必要な中流域での洪水水位の上昇抑制が実現できず、十分な堆砂対策とはならない。CASE - B3は、平均年間堆砂量相当である30,000 m^3 を掘削排除することから、おおよそ現在河床を維持し、中流域の洪水水位の上昇抑制を達成する。CASE - B4は、ダム付近で数十万 m^3 近い堆砂

表-4 B調整池（中間タイプ）河床変動解析検討ケース

ケースNo.	内容
CASE - B1	今後22年間、堆砂対策を実施せず
CASE - B2	今後22年間、出水時にダム水位を低下させる運用を行う。流量が500 m^3/sec を越えるとゲート開放へ移行しダム水位を低下させる。流量ピーク後150 m^3/sec を下回ると水位回復へ移行する。
CASE - B3	今後22年間、毎年30,000 m^3 の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離1,200mから1,800mの範囲で行う。
CASE - B4	今後22年間、CASE - B2のダム水位運用に加えて、毎年15,000 m^3 の調整池内堆砂掘削排除を行う。掘削排除はダムからの距離1,000mから1,600mの範囲で行う。

が生じるものの、中流域で堆砂が減少し、CASE - B3と同じく中流域の洪水水位の上昇抑制を達成する。

図-5は、解析期間22年間の調整池内累計堆砂量の経年変化を示すものである。CASE - B1は、22年間で年間平均30,000 m^3 程度の堆砂進行が見られる。CASE - B2は、出水時にダム水位低下運用を行うものの、ダム付近の堆砂が進行するため、堆砂量は毎年20,000 m^3 程度増加する。CASE - B3は、累計堆砂量が現状のまま維持され、毎年30,000 m^3 の掘削排除による対策が継続的に有効であることを示している。CASE - B4は、対策開始13年目以降、累計堆砂量が180,000 m^3 程度で維持されており、ダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる対策が継続的に有効であることを示している。

河床変動解析により、中間タイプであるB調整池においては、ダム水位低下運用による堆砂対策だけでは不十分であり、掘削排除による対策、またはダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる対策の有効性が示された。

(3) ダム水位低下運用による堆砂対策の経済性評価

表-5は表-3と同様に、ダム水位低下運用のみによる堆砂対策、掘削排除による堆砂対策、およびダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる堆砂対策について、それぞれに要する費用を整理したものである。

CASE - B2は、費用は小さいものの堆砂対策として不十分である。堆砂対策として有効であるCASE - B3と

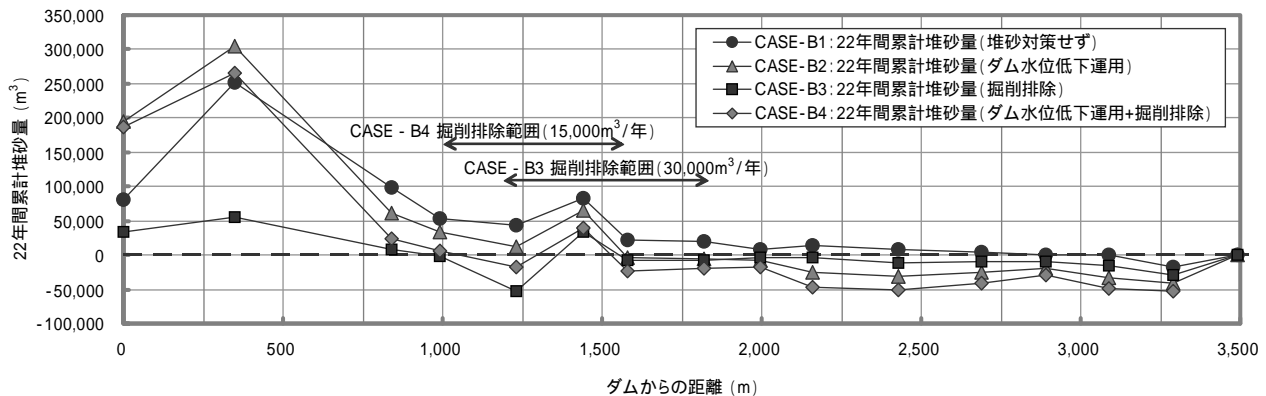


図-4 B調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（位置別28年間累計堆砂量）

CASE - B4を比較すれば、対策を掘削排除のみにより行うCASE - B3よりも、ダム水位低下運用により水の流れを利用するCASE - B4の方が費用を年間数千万程度小さくできることが分かった。

これらの結果から、中間タイプの発電用ダム調整池においては、出水時にダム水位を低下させる運用のみでは堆砂対策として不十分であり、ダム水位低下運用に加えて掘削排除を実施することにより、持続的な堆砂対策が実現することになり、さらに掘削排除のみによる堆砂対策よりも経済的に有利であることが示された。

5. ダム湖の土砂捕捉率、洪水吐高率と堆砂対策

(1) ダム湖の土砂捕捉率と堆砂対策

川タイプA調整池および中間タイプB調整池について、河床変動解析結果を評価するために、ここでは、ダム湖における土砂捕捉率を検討する。比較のために、伝統的に用いられるBrune曲線およびダム湖に流入する土砂を流域の比流出土砂量から推定して実績ダム堆砂量との関係から推定したものを表 - 6に示す。ここで推定比流出土砂量は、芦田⁹⁾、上阪¹⁰⁾らが河川を土砂生産状況に応じてグループに分けたものを基に概略設定しており、天竜川水系は2,000m³/km²/年、構造線沿いの河川は1,000m³/km²/年、その他の河川は500m³/km²/年とした。

表 - 6より、河床変動解析結果から算出される土砂捕捉率は、水位低下運用をしない場合と推定比流出土砂量から算出される場合がほぼ一致しており、推定比流出土砂量がほぼ妥当な数値を与えているものと考えられる。Brune曲線から得られる土砂捕捉率は、貯水池回転率のみから推定されたものであるため、流域特性等が反映された河床変動解析モデルや推定比流出土砂量から得られる土砂捕捉率と常に同程度となるものではない。

A調整池、B調整池ともに、解析結果において、ダム水位低下運用を行うことにより土砂捕捉率が低下していることが分かる。これは、堆砂対策としてダム水位低下運用が効果的であることを示すものである。

(2) 洪水吐高率と堆砂対策

図 - 6に、電源開発株式会社が所有管理する調整池（川タイプ、中間タイプ、池タイプ）を対象に、実際の洪水吐高率とダム湖の土砂捕捉率の関係を示す。ここで土砂捕捉率は、A調整池、B調整池と同様に、それぞれのダム湖流域の推定比流出土砂量と実績堆砂量を用いて算出したものを用いている。

プロット分布状況から、土砂捕捉率は洪水吐高率が低い範囲で100%近くであるが、洪水吐高率が50%程度まで増加すると土砂捕捉率が0%程度（土砂スレーシングの実現）となる。現状の洪水吐形状で土砂捕捉率が0%付近になっているのは、川タイプの調整池が多い。A調

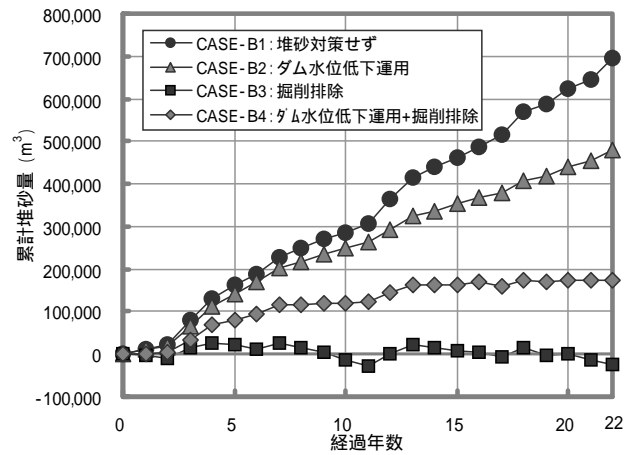


図 - 5 B調整池（中間タイプ）河床変動解析結果（累計堆砂量経年変化）

表 - 5 B調整池（中間タイプ）堆砂対策費用（今後30年間）

対策方法	項目	30年間の費用
ダム水位 低下運用 (CASE - B2)	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	105
	調査検討（河川影響他）	430
合計		1,045
掘削排除 (CASE - B3)	掘削運搬土捨（水中掘削）	4,500
	揚土場等浚渫設備工	140
	土捨場整備	510
	調査検討（土捨場他）	80
合計		5,230
ダム水位 低下運用 + 掘削排除 (CASE - B4)	排砂に伴う減電	300
	洪水吐・護岸補修	210
	補修に伴う減電	105
	掘削運搬土捨（水中掘削）	2,700
	揚土場等浚渫設備工	140
	土捨場整備	390
調査検討（河川影響、土捨場他）	510	
合計		4,355

単位：百万円

表 - 6 A調整池およびB調整池のダム流入土砂捕捉率

調整池	根拠	条件	土砂捕捉率
A調整池	Brune曲線	使用開始当初	30.3%
	Brune曲線	現在（平成20年）	28.4%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施	0.0%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施せず	3.5%
	推定比流出土砂量	500m ³ /km ² /年	2.0%
B調整池	Brune曲線	使用開始当初	42.5%
	Brune曲線	現在（平成20年）	29.6%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施	43.4%
	河床変動解析結果	ダム水位低下運用実施せず	60.4%
	推定比流出土砂量	500m ³ /km ² /年	62.2%

整池およびB調整池の解析結果における土砂捕捉率との整合性が高いことから、これらのプロット値については一定の信頼性があると判断できるが、推定流出土砂量の設定はあくまでも概略値であることに注意が必要である。

B調整池ダムの現状の洪水吐では、ダム水位低下運用によって土砂捕捉率が60%程度（B1）から40数%程度（B2）に改善する。しかし、これだけでは洪水位の上昇が抑制されず、堆砂対策としては不十分である。そこで、B調整池の洪水吐を改造して現状よりも切り下げ、洪水吐高を増加させた場合の今後の22年間について河床変動解析による比較計算を行った。解析ケースを表-7、得られた洪水吐高率と土砂捕捉率の関係を図-6に示す。

その結果、図中の点線が示すとおり、洪水吐高率の増加（B5、B6、B7）にともない、土砂捕捉率はさらに低下することがわかる。洪水吐高率が40%程度（B7）となるように洪水吐を切り下げた場合、捕捉率0%が達成され、中間タイプのB調整池も川タイプと同様な土砂スルーシグが実現することとなる。

B調整池において洪水吐高率を40%にするためには、現在の洪水吐クレストを5.5m低下させることが必要であり、洪水吐改造には一時的に多大な費用を要する。しかし、表-5に示したように、堆砂対策として掘削排除を行う場合の費用は年間175百万円であるのに対し、ダム水位低下運用のみを行う場合の費用は年間35百万円である。差額の年間140百万円、および今後の発電所の持続的使用を考えると、経済性のある対策と考えられる。

6. おわりに

本論文では、発電用ダム調整池の堆砂対策について、ダム水位低下運用の有効性と経済性について分析を行った。また、河床変動解析により、土砂捕捉率と洪水吐高率の関係について整理をおこなった。得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 川タイプ調整池について河床変動解析を行った結果、ダム水位低下運用のみで堆砂対策が達成されることを確認した。ダム水位低下運用による堆砂対策は、掘削排除と比較して経済性が高い。
- (2) 中間タイプ調整池について、河床変動解析を行った結果、ダム水位低下運用のみでは堆砂対策を達成することはできず、掘削排除と組み合わせて実施する必要があることを確認した。ダム水位低下運用と掘削排除の組み合わせによる堆砂対策は、掘削排除のみによる堆砂対策と比較して経済性が高い。
- (3) 洪水吐高率とダム土砂捕捉率の関係について検討した結果、洪水吐高率が50%程度の場合、土砂捕捉率は0%程度となり、土砂のスルーシグが実現可能であることが分かった。

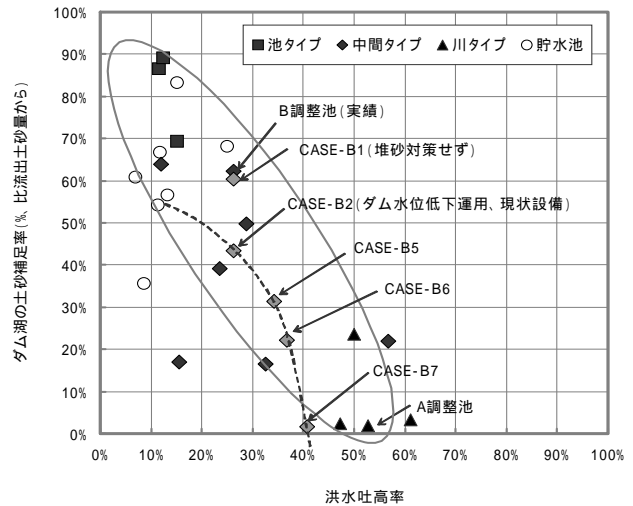


図-6 洪水吐高率と流入土砂捕捉率との関係

表-7 B調整池（中間タイプ）洪水吐高検討河床変動解析ケース

ケースNo.	内容
CASE - B5	洪水吐クレストを3.0m下げて（洪水吐高率34.2%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。
CASE - B6	洪水吐クレストを4.0m下げて（洪水吐高率36.8%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。
CASE - B7	洪水吐クレストを5.5m下げて（洪水吐高率40.8%）、今後22年間、出水時にダム水位低下運用を行う。

- (4) 中間タイプのB調整池において、洪水吐改造によるスルーシグ排砂について検討を行った結果、数m程度の洪水吐クレストの低下により、土砂捕捉率0%程度に改善できることが分かった。

なお、調整池のうち残る池タイプについても、堆砂対策の有効性、経済性について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 奥村裕史, 角哲也: 発電用ダム貯水池および調整池における堆砂等の特性を考慮した堆砂対策, 電力土木, No.350, 2010.
- 2) Brune, G. M.: Trap efficiency of reservoirs, Trans. AGU, 34-3, pp.407-418, 1953.
- 3) 江崎一博: 貯水池の堆砂に関する研究, 土木研究所報告129号, 1966.
- 4) (社)日本大ダム会議土砂管理分科会: 土砂管理分科会報告書 - 貯水池の土砂動態と土砂制御工法 -, 大ダムNo.212, pp.12-129, 2010.
- 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) 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.
- 7) 富田邦裕, 角哲也ら: 河川における総合土砂管理の経済評価 - 矢作川におけるダム長寿命化と環境改善を組み合わせた費用便益評価 -, 河川技術論文集, 第16巻, 2010.
- 8) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析(共通編)に関する技術指針, 2009.
- 9) 芦田和男ら: ダム堆砂に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 17(B), pp.555-570, 1974.
- 10) 上阪恒雄: 貯水池の土砂管理, ダム技術No.159, pp.4-23, 1999. (2010.9.30受付)