

上流域河道内からの土砂流出を考慮した 流込み式水力発電所の流入土砂対策検討

THE STUDY IN MEASURES AGAINST SEDIMENTATION IN RUN-OFF-RIVER HYDRO POWER PLANT CAUSED BY SEDIMENT RUNOFF FROM UPSTREAM CHANNEL BED

河内 友一¹・細田 尚²・大久保 賢治³

Yuichi KOUCHI, Takashi HOSODA and Kenji OKUBO

¹ 中国電力株式会社エネルギー総合研究所 (〒739-0046 東広島市鏡山三丁目9番1号)

E-mail: 260113@pnet.energia.co.jp

² 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-3 号棟)

E-mail: hosoda@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

³ 岡山大学大学院環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

E-mail: okubo@cc.okayama-u.ac.jp

Key Words: hydro-power-plant, run off river type, sedimentation, suspended load, bed load

1. はじめに

近年の温室効果ガス削減に対する関心の高まりおよびエネルギーセキュリティの面から、化石燃料を使用しない純国産エネルギーである水力発電所は重要性を増している。しかし、水力発電所では発電用水として河川水を取水するために、河川流水中の土砂に起因した発電の制約などの問題が生じることがある。

水力発電所の型式の一つである流込み式では、出水時には流水中の土砂が掃流状態・浮遊状態で取水口から導水路へと流入する。この対策として取水口付近には排砂門・沈砂池などの設備が設けられているが、大規模な出水時にはその設備の処理能力を超えた土砂が導水路に流入し、長期間の発電停止を余儀なくされることがある。既設水力発電所の有する利点を十分に発揮させるためには、これらの問題を解決し、発電電力量を増加させることが重要である。

水力発電所の土砂流入対策としては、排砂門等の設備を設置・改良するハード対策と排砂門運用方法の変更、取水制限等のソフト対策が考えられるが、これらの対策を比較検討する上では発電所土砂流入現象を時系列で定量的に再現するモデルを構築することが求め

られる。流域規模の土砂生産については既に、砂田ら¹⁾、守利ら²⁾、舛屋ら³⁾、橋本ら⁴⁾など多くの研究が実施されており、高橋ら⁵⁾は土砂生産から貯水池の長期の堆積土砂量を予測している。さらに、筆者ら⁶⁾は、上流河道内からの土砂流出を考慮した流込み式水力発電所の1出水時における流入土砂現象の再現を試み、実用的な精度で流入土砂量を再現している。

そこで、本研究では、出水時の発電所上流河道域からの土砂流出およびその土砂の発電所流入現象を再現するモデルを用い、発電所土砂流入対策案を比較検討し、それらの流入土砂低減効果を定量的に評価した。

2. 対象とした流込み式水力発電所

今回の研究対象とした水力発電所は最大取水水量13.5m³/sの流込み式水力発電所であり、岡山県の一級河川の比較的上流域に位置している。この水力発電所の取水口は図-1に示しているとおり幅30m程度の河川湾曲部の内岸側に位置し、排砂門は河川の取水口下流側左岸に露頭岩が発達しているため、景観面に配慮して右岸側に設けられている。このように、この水力発

電所は湾曲部内岸側に堆積した土砂が取水口内に流入しやすい平面レイアウトとなっている。この対策として取水口に沈砂池を設けるとともに、沈砂池底部に揚砂装置と渦動管を組み合わせた排砂装置が設置されている。しかし、大規模な出水時においては、この装置の排砂能力を越える土砂が取水口に流入し、導水路にまで大量の土砂が堆積する現象が生じている。

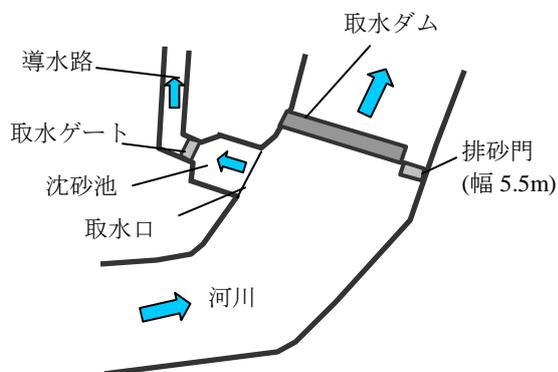


図-1 対象とした水力発電所の取水口付近概要図

平成 16 年 10 月には台風 23 号による大規模な出水が発生し、この発電所では大量の土砂が沈砂池および導水路に堆積した(図-2)。この結果、出水途中で発電停止状態となり、出水後に発電所導水路内を抜水して土砂の取り除き作業を実施する必要が生じた。



図-2 平成 16 年台風 23 号出水時の沈砂池内土砂流入状況

この規模の出水はそれほど頻発するものではないが、比較的中規模の出水でも土砂が堤内に堆積するとともに取水口にも流入し、恒常的に沈砂池や取水口前面河道の土砂取り除き作業を実施している。

3. 再現モデルの概要

この水力発電所の土砂流入現象を再現するためのモデルは上流域河道モデルと取水口周辺モデルの 2 つを組み合わせたものとした。今回の再現計算に使用した式とモデルの一覧を表-1 に示す。

取水口内への土砂流入低減策として出水中の取水制限などがあるが、この判断基準として上流域の雨量を用いて数時間後の意志決定を行えるものが望ましい。こ

表-1 再現モデルに使用したモデル・式

領域	項目	使用したモデル・式
山地斜面	流れ	中間流・表面流統合型キネマティックウェーブモデル ⁷⁾
	土砂生産	山地斜面からの土砂生産は無視
上流河道	流れ	開水路 1 次元非定常流 (移流項 TVD-MUSCLE) ⁸⁾
	掃流砂量 (混合砂礫)	芦田・道上式
	限界掃流力 (混合砂礫)	Egiazaroff・浅田式 ⁹⁾
	浮遊砂 (混合砂礫)	1 次元連続式 (移流項 TVD-MUSCLE) ⁸⁾
	浮遊砂浮上量 (混合砂礫)	芦田・藤田式 ¹⁰⁾ (平均粒径で礫頂から浮上面の距離を評価) ⁶⁾
	河床交換層	平野の式
発電所取水口周辺	流れ	一般曲線座標系平面 2 次元非定常流 ¹¹⁾ (移流項 TVD-MUSCLE) ⁸⁾
	掃流砂量 (混合砂礫)	芦田・道上式
	限界掃流力 (混合砂礫)	Egiazaroff・浅田式 ⁹⁾
	浮遊砂 (混合砂礫)	一般曲線座標系平面 2 次元連続式 (移流項 TVD-MUSCLE) ⁸⁾
	浮遊砂浮上量 (混合砂礫)	芦田・藤田式 ¹⁰⁾ (平均粒径で礫頂から浮上面の距離を評価) ⁶⁾
	河床交換層	平野の式
	安息角を越えた場合の処理	隣接する最急勾配の格子への強制的な土砂移動

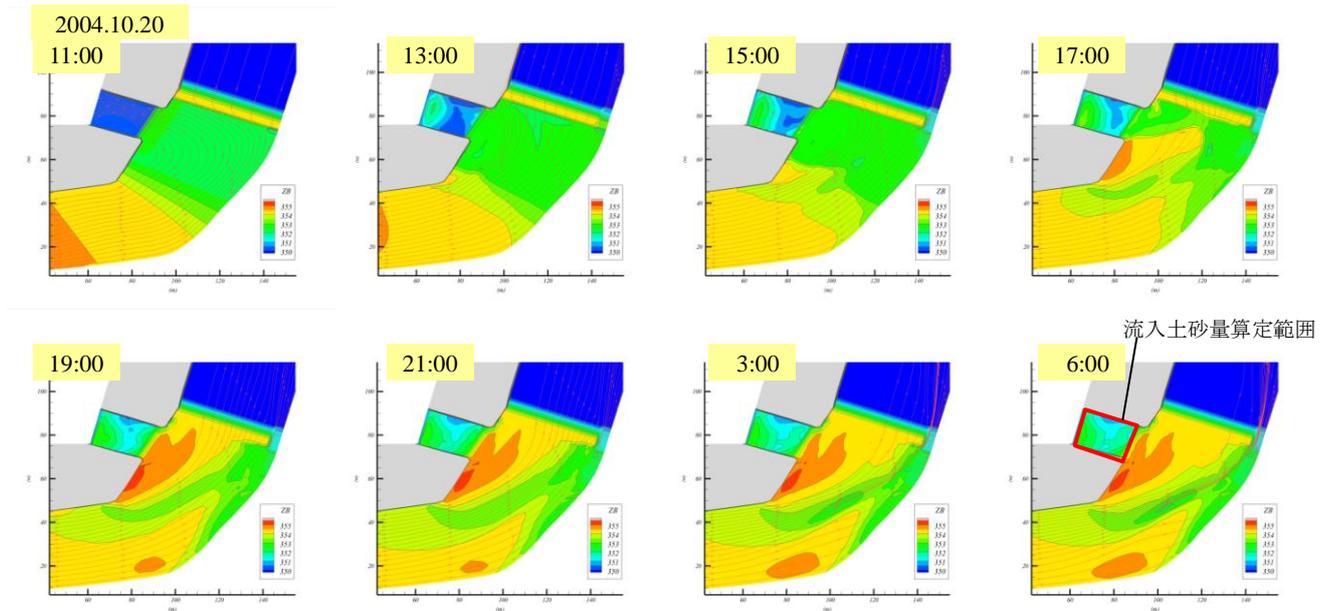


図-5 取水口付近の河床高コンターの時系列

次に、上流域河道モデルによる水・土砂流出の計算結果を上流端境界条件として、取水口付近河道の平面2次元解析を実施した。平面2次元解析河床コンター図および流線の時系列結果を図-5に示す。

出水期間中に取水ダム上流右岸側で計測した水位と、平面2次元計算結果の水位を時系列で比較すると図-6に示すとおりであり、両者は概ね一致している。

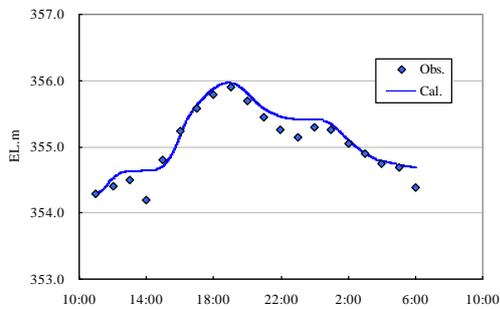


図-6 水位実測値と計算値の比較

また、取水口から実際に流入した土砂量は沈砂池内および導水路内の流入土砂の合計 543m^3 であった。一方、再現計算の流入土砂量(図-5 6:00 に示す範囲)は 560m^3 であり、ほぼ一致した。なお、計算では導水路を含めておらず計算上流入土砂は沈砂池ですべて堆積する。出水後に取水口沈砂池内および導水路内の15箇所サンプルした流入土砂の粒径分布は図-8のとおりであった。この結果から、ほとんどの土砂が浮遊砂として流入しており、取水口の一部に比較的大きい粒

径の土砂が掃流砂として流入していることが推測される。計算結果から得られた流入土砂の粒径分布は実測した流入土砂平均の粒度分布と比較するとやや細粒分が多いものの、概ねその分布形状が再現できている。

以上の検討により、数値解析により土砂流入現象が再現でき、再現モデルは対策案を比較検討に十分な精度があるといえる。以下ではこのモデルを用いて土砂流入対策案を検討する。

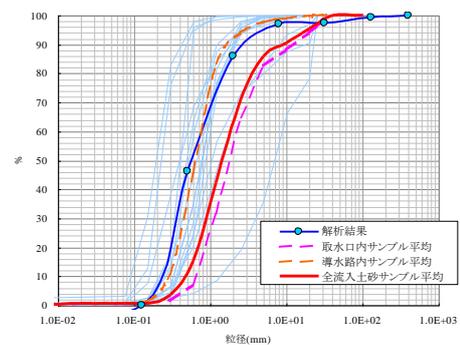


図-7 流入土砂粒径分布の実測値と計算結果の比較

5. 対策案の検討

(1) 検討した対策案

検討する対策案は、現在の排砂設備を改良するハード対策として、現在取水口の反対側にある右岸側の排砂門を左岸側に移設する場合と左岸側に増設する場合を設定した。さらに、現状の設備のままで発電所の運

用方法を変更するソフト対策として、排砂門を出水初期に全開とする場合と取水停止を出水初期に行う場合を想定した。設定した対策案は計 7 案でその一覧を表-3 に示す。なお、実際には排砂門の開度は下流の水位を急激に変化させないように設定しなければならないが、今回は対策の効果を比較することが目的であるため、周辺の水位変動までは考慮していない。排砂門運用の変更で土砂流入対策効果が得られると判断され現地に適用する場合には、実運用上は下流域への水位の影響を考慮した運用を実施しなければならない。

表-3 土砂流入対策案検討ケース

対策内容と ケース番号	排砂門位置 右:右岸 左:左岸	取水条件	排砂門 運用
現状	C-0	現状排砂門(右)	18:00 停止
設備 対策	C-1	排砂門移設(左)	18:00 停止
	C-2	排砂門増設(左右)	18:00 停止
排砂門 運用対策	C-3	現状排砂門(右)	18:00 停止
	C-4	現状排砂門(右)	18:00 停止
取水 運用対策	C-5	現状排砂門(右)	13:00 停止
	C-6	現状排砂門(右)	14:00 停止
	C-7	現状排砂門(右)	15:00 停止

(2) 各対策案の比較

a) 排砂門を移設・増設する場合

現状の排砂門は取水口の対岸である右岸側にあるために、効率的な排砂効果が得られていない可能性がある。そこで、取水口近傍の取水ダム左岸側に排砂門を移動した場合(C-1)と左岸側に追加して設置する場合(C-2)の流入土砂量を計算した。このときの排砂門、取水等の運用条件は現状と同様とした。

流入土砂量の時系列計算結果と運用条件を図-8 に示す。排砂門を左岸側に移設した場合および増設した場合とも、現状よりも取水口内への流入土砂量はそれぞれ 27%, 19%増える結果であった。

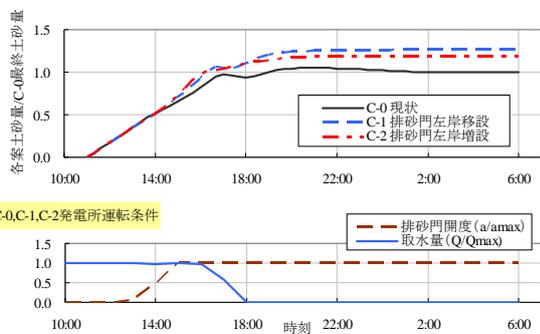


図-8 排砂門を移設、増設した場合の流入土砂時系列

図-9 に現状 (C-0) と排砂門移設 (C-1) の 15:00 時点の浮遊砂濃度コンター図を示す。これより排砂門を左岸

に移設することで取水口側に高い浮遊砂濃度の流れを集中させていることがわかる。取水口内の流入土砂は浮遊状態で流入してくるものがほとんどを占めているため、C-1 の流入土砂量は C-0 を上回ったと考えられる。また、C-1, C-2 の計算結果では排砂門の直近は排砂されていたが、取水口前面には現状と同様に土砂が堆積しており、排砂効果が局所的であった。

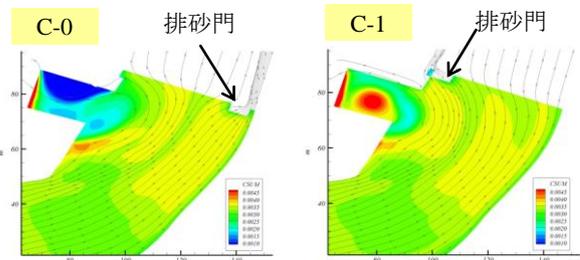


図-9 排砂門位置による浮遊砂濃度分布の比較

b) 排砂門運用方法の変更する場合

現状の右岸側にある排砂門の運用方法を変更することによる流入土砂量低減量を評価した。出水初期に全開とした場合(C-3)および排砂門を出水期間中全閉で保持する場合(C-4)の計算結果を図-10 に示す。

排砂門全閉を保持した場合では現状よりもやや多い土砂が流入し、現状の操作でもある程度の排砂効果があることがわかる。一方、排砂門を初期(12:00)に全開にした場合には、その直後から流入土砂量の低減効果が得られており、その低減効果は 8%程度であった。

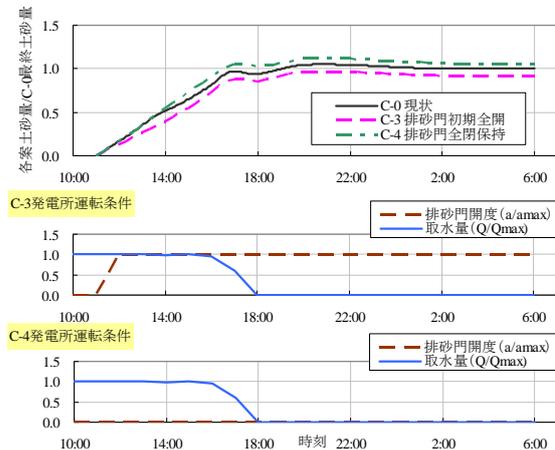


図-10 排砂門運用方法を変更した場合の流入土砂時系列

c) 出水初期に取水停止する場合

出水初期に取水を停止する場合(C-5~C-7)の流入土砂量低減量を評価した。このときの流入土砂量時系列を比較すると図-11 のとおりであり、取水を停止したと同時にほとんど土砂流入がなくなり、取水時間を変更してもその傾向は変わらない。したがって、取水を停止あ

るいは制限することは比較的大きな土砂量低減効果が得られると考えられる。しかし、出水期はいわば発電用水が豊富にある状態であるため、取水制限することは溢水電力を増加させることになるため、取水制限の量や時間はこれらを考慮した最適なものである必要がある。

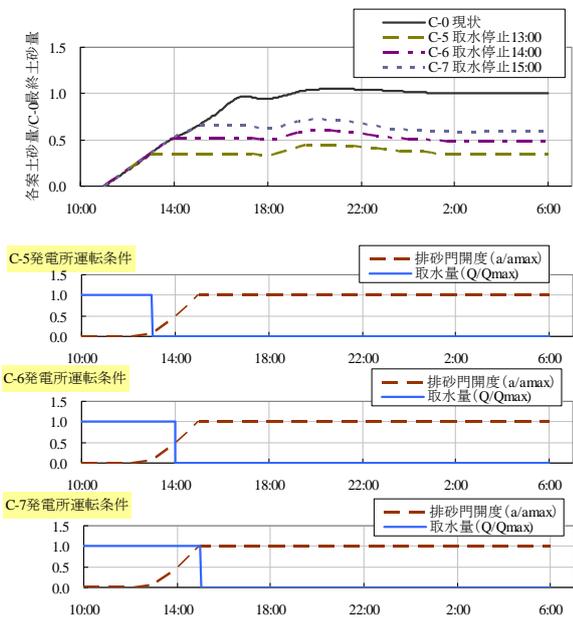


図-11 取水停止した場合の流入土砂時系列

d) まとめ

土砂流入再現モデルを用いて、発電所の設備を変更するハード対策と運用方法を変更するソフト対策について比較検討した。図-12 にその結果を示す。これより排砂門を移設・増設する大規模な改修を実施しても逆効果であると予想される。また、効果は限定的であるが排砂門を出水初期に全開にすることは有効な対策である。さらに、取水停止は非常に有効な対策であるといえる。

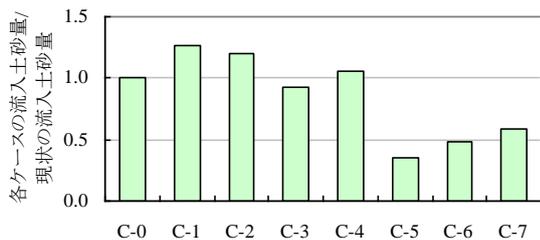


図-12 各ケースの流入土砂量比較

6. おわりに

出水時の流入土砂が問題となっている流込み式の水力発電所を対象として、以上の検討を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 上流河道域からの流入土砂量を考慮したモデルにより、取水口流入土砂現象が再現できた。再現モデルによる流入土砂量およびその粒度分布は観測結果と概ね

一致し、実用上の精度を有していた。

(2) 再現モデルにより、ハード対策、ソフト対策として7案の対策を比較検討した。この結果、排砂門を追加するなどの大規模なハード対策より運用方法を変更するソフト対策の方が効果的であると考えられた。

今後の課題としては、以下の点が上げられる。

(1) 今回の検討は1出水のみを対象としたものであり、モデルの再現性については様々な規模の出水で検証するとともに、その精度を高めていく必要がある。

(2) 運用方法の変更についても同様に様々な出水規模で検討を加え、溢水電力と堆積土砂取り除き費用を考慮した最適な運用方法を選定する必要がある。

(3) 取水停止などの運用方法の意思決定を行うためには出水時の流域からの水・土砂の流出量予測が重要であり、さらに予測精度を高める必要がある。

謝辞：最後に、本研究を実施する上でご協力いただいた岡山大学環境学研究科の皆様には謝意を表します。

参項文献

- 1) 砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系 全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.37-44, 1994.
- 2) 守利悟朗, 椎葉充葉, 堀 智晴, 市川 温: 流域規模での水・土砂動態のモデル化および実流域への適用, 水工学論文集, 第47巻, pp.733-738, 2003.
- 3) 舩屋繁和, 清水康行, ウォンサ サニット, 村上泰啓: 流域規模での洪水流出および土砂流出特性について, 水工学論文集, 第50巻, pp.319-324, 2006.
- 4) 橋本晴行, 朴崎燦, 高岡広樹, 荒渡光貴: 山地流域における豪雨時の水と土砂の流出解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.745-750, 2003.
- 5) 高橋 保, 井上素行, 中川 一, 里深好文: 山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測, 水工学論文集, 第52巻, pp.613-618, 2001.
- 6) 河内友一, 細田尚, 大久保賢治: 上流域河道内からの土砂流出を考慮した流込み式水力発電所土砂流入現象の再現, 水工学論文集, 第52巻, pp.745-750, 2008.
- 7) 土木学会編, 水理公式集例題プログラム集[平成13年度版], 第1編水文編, p14, 2002.
- 8) 細田尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No.533, pp.267-272, 1996.
- 9) 浅田宏: 山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究, 電力中央研究所報告, 総合報告 No2, 1976.
- 10) 芦田和男, 藤田正治: 平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp.107-116, 1986.
- 11) 長田信寿: 一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値計算, 水工学における計算機利用の講演会講義集, 土木学会, pp.45-72, 1999.
- 12) 池淵周一, 椎葉充晴, 宝馨, 立川康人: エース水文学, 朝倉書店, pp.101-102, 2006.

(2008.5.16 受付)