

石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた 流域河床変動予測 — 奔別川（三笠ぼんべつダム）を事例として —

札幌開発建設部 河川計画課 ○山川 貴大
奥山 昌幸
ダム事業対策官 正国 之弘

ダムの建設にあたっては、土砂供給の変化が河川環境へ及ぼす影響の的確な把握と、それに伴うダム貯水池・下流河道等での適切な対応が重要である。流水型ダムである三笠ぼんべつダムが建設される奔別川は石礫のある河川であり、このような河川の河床変動解析については有効な解析手法が最近の研究により示されている。そこで本稿は、石礫河川の特性を踏まえた平面二次元河床変動解析モデルを構築し、石礫河川における流水型ダムでの土砂の補足・流下現象を検証し、下流河道の適切な管理に資することを目的とする。

キーワード：河床変動解析、石礫河川

1. 背景と目的

近年、河川横断構造物等の設置により、上流からの土砂供給状況が変化し、下流へ流下する河床材料の減少が危惧されている。また、これにより下流河道の河床低下や滯筋の固定化及び河床の岩盤露出等が問題視されている。このため、新たなダムの建設にあたっては、下流の土砂環境へ及ぼす影響の的確な把握と下流河道での適切な対応の検討が必要である。

幾春別川総合開発事業において計画されている三笠ぼんべつダムは全国でも事例の少ない流水型ダムであり、通常は水を貯留せず、洪水時のみ湛水する。このため、通常のダムと比べて下流河道の土砂環境への影響は小さいとされており、事業実施にあたり、貯水池内の堆砂及び下流河道環境への影響検討を行った結果、ダム供用に伴う河道状況の変化は局所的なものであり、下流河川に与える影響は小さいことを確認している。

また、三笠ぼんべつダムが建設される奔別川は石礫の多い河川である。石礫河川とは、砂・砂利(2~64mm)や礫(10~20cm)に加え、巨石(概ね30cm以上)等、多様な河床材料で構成されている河川のことをいう。このような河川においては砂礫を主な河床材料とする通常の河川とは異なり、巨石の影響を考慮した河床変動解析モデルが土砂動態をより適切に表現できる場合があることが指摘されている¹⁾。

このような巨石が存在する急流河川を対象とした研究として、長田ら²⁾の研究がある。長田らは石礫河川の土砂移動機構に着目した二次元河床変動解析法を構築し、常願寺川における大規模現地実験結果の再現計算を行う

ことでモデルの精度向上を行い、その有効性を示した。一方、既往の流水型ダムでは、巨石の影響を考慮した検討を行った事例はない。

そこで本稿では、奔別川の河道・土砂特性を踏まえた上で、長田らの構築した石礫河川における二次元河床変動解析モデルを適用することにより、流水型ダムの設置が石礫河川の土砂環境へ及ぼす影響を検証するものである。

2. 三笠ぼんべつダムと奔別川の特徴

(1) 三笠ぼんべつダムの特徴

三笠ぼんべつダムは全国でも事例の少ない流水型ダムである。治水専用ダムであるため、一般的な多目的ダムと比べて以下の特徴がある。

- 平常時においても河川としての流れの連続性が確保され、水とともに土砂を流下させる。
- 洪水時には、洪水吐の流水能力以上は一時的に貯留されて、ピーク流量低下に貢献する。
- ダム湖の出現が時間的に限定されることから、水域環境、生態系に及ぼす影響は通常のダムに比べて格段に小さいことが期待される。

三笠ぼんべつダムは、ゲートのない常用洪水吐のほか、貯水池内に堆積する土砂を下流へ流下させるための排砂路がある。この排砂路にはゲートを設置し、非洪水期にゲートを開けることで融雪出水等によって貯水池内に堆積した土砂を流下させる。洪水期には排砂ゲートを閉め、常用洪水吐より平水時の流水を確保しつつ、洪水時には

4. 砂礫モデルによるダム下流河道の再現性検証

図1に示したとおり、3.2k付近の治山堰堤を境にしてその上下流区間で河床材料特性が異なっている。そのため、本検討では3.2kより下流を下流区間(ダム下流河道)、3.2kより上流を上流区間(貯水池)とし、石礫の多い下流区間の河床変動動態の把握を試みることにする。

石礫モデルによる河床変動解析を実施するにあたり、従来の河床変動解析に用いられる砂礫モデルによって、現況河道をどの程度再現できるのか確認を行った。

(1) 計算条件

検討範囲は、治山堰堤、ダムサイトを含む奔別川0k～7.3kとした。検証対象期間は、H16年からH23年までの8年間とし、同期間中の観測流量を上流端境界条件とした。

(2) 検証結果

砂礫モデルによる河床変動解析結果を図2に示す。

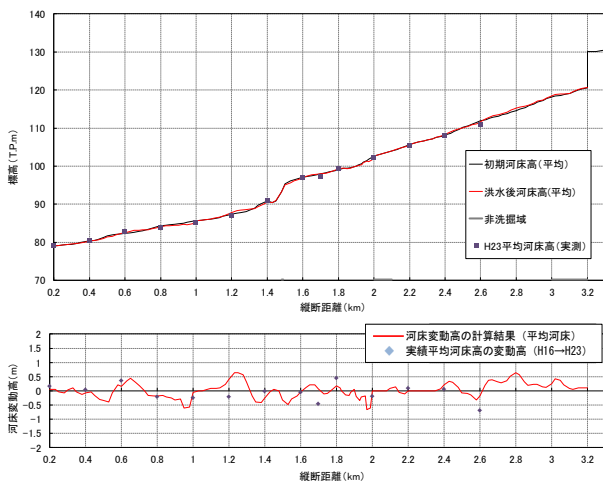


図2 砂礫モデルによる再現検証結果

砂礫モデルでは、1kより下流側の洗掘、堆積傾向を概ね再現できているが、1kより上流側の洗掘・堆積位置や断面平均の河床変動、最深河床高の再現性は低い。

2. (2)の河床構成材料現地調査結果で述べた通り、3.2kより上流区間では砂礫が比較的卓越している一方、3.2kより下流区間には石礫が多く分布している。砂礫モデルでは巨石の影響を考慮していないため、河床変動状況を適切に表現できなかったと考えられる。

以上の再現検証結果より、下流区間におけるダム建設後の河床変動解析に、砂礫モデルを用いることは適当でないと考えられる。

5. 奔別川石礫モデルの構築

前章の結果より、奔別川下流区間については砂礫モデルによる河床変動解析が適さないことが示唆された。そこで次に石礫モデルによる再現性検証を試みることにするが、奔別川における河床変動予測の精度向上のために

は奔別川の河床材料特性をモデルに反映し、精度を向上させる必要がある。

そこで、奔別川における石礫の移動特性及び巨石の遮蔽効果を把握するため、マーキングした石礫を用いた調査を実施した。

(1) 石礫の移動特性調査

【調査概要】

ダムサイト上流及び下流に、マーキングした石礫を配置し、出水後移動した石礫の個数を調査した。石礫の設置は融雪出水前の平成27年3月20日に実施し、その後は、融雪出水後の6/12～13(春期調査)、夏期出水後の8/27(秋期調査)に追跡調査を実施した。石礫の配置箇所・個数及び調査期間中の河道流量を以下に示す。

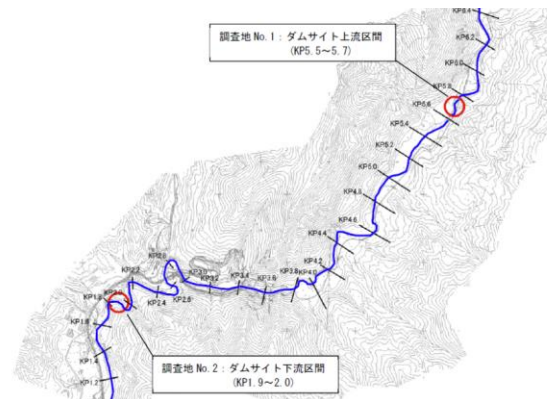


図3 石礫の設置箇所

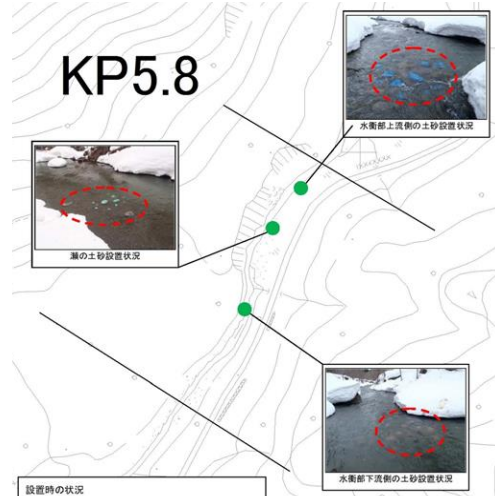


図4 石礫配置状況(上流区間)

表2 配置した石礫の個数

調査地点	粒径区分	配置個数		
		水衝部淵 下流側	淵	水衝部淵 上流側
調査No.1 ダムサイト上流区間 (KP5.6～5.7)	小 (10cm程度)	16	8	16
	中 (30cm程度)	8	4	8
	大 (50cm程度)	4	2	4
調査No.2 ダムサイト下流区間 (KP1.8～2.0)	小 (10cm程度)	16	8	16
	中 (30cm程度)	8	4	8
	大 (50cm程度)	4	2	4

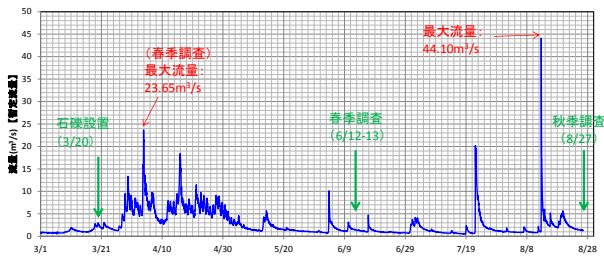


図5 調査期間中の流量 (新奔別地点)

【調査結果】

春期及び秋期調査時の調査結果を以下に示す。

表3 配置石礫の移動状況 (春期調査 6/12-13)

調査地点	粒径区分	移動個数/配置個数(移動率)			
		①水衝部瀾下流側	②瀾	③水衝部瀾上流側	①～③合計
調査地No.1 ダムサイト上流区間 (KP5.6～5.7)	小 (10cm程度)	16/16 (100.0%)	8/8 (100.0%)	14/16 (87.5%)	38/40 (95.0%)
	中 (30cm程度)	6/8 (75.0%)	4/4 (100.0%)	5/8 (62.5%)	15/20 (75.0%)
	大 (50cm程度)	0/4 (0.0%)	0/2 (0.0%)	1/4 (25.0%)	1/10 (10.0%)
調査地No.2 ダムサイト下流区間 (KP1.8～2.0)	小 (10cm程度)	14/16 (87.5%)	8/8 (100.0%)	14/16 (87.5%)	36/40 (90.0%)
	中 (30cm程度)	2/8 (25.0%)	3/4 (75.0%)	3/8 (37.5%)	8/20 (40.0%)
	大 (50cm程度)	0/4 (0.0%)	0/2 (0.0%)	2/4 (50.0%)	2/10 (20.0%)

表4 移動状況 (秋期調査 8/27)

調査地点	粒径区分	移動個数/配置個数(移動率)			
		①水衝部瀾下流側	②瀾	③水衝部瀾上流側	①～③合計
調査地No.1 ダムサイト上流区間 (KP5.6～5.7)	小 (10cm程度)	16/16 (100.0%)	8/8 (100.0%)	16/16 (100.0%)	40/40 (100.0%)
	中 (30cm程度)	8/8 (100.0%)	4/4 (100.0%)	8/8 (100.0%)	20/20 (100.0%)
	大 (50cm程度)	4/4 (100.0%)	2/2 (100.0%)	2/4 (50.0%)	8/10 (80.0%)
調査地No.2 ダムサイト下流区間 (KP1.8～2.0)	小 (10cm程度)	16/16 (100.0%)	8/8 (100.0%)	16/16 (100.0%)	40/40 (100.0%)
	中 (30cm程度)	8/8 (100.0%)	4/4 (100.0%)	8/8 (100.0%)	20/20 (100.0%)
	大 (50cm程度)	4/4 (100.0%)	2/2 (100.0%)	4/4 (100.0%)	10/10 (100.0%)

融雪時の最大流量23.65m³/sでも50cm大の礫の移動が確認された。また、夏期出水の最大流量44.1m³/sでは、設置した礫のほとんどの移動確認された。

(2) 巨石の遮蔽効果調査

【調査概要】

石礫モデルのパラメータである、遮蔽率を評価するため、現地調査を実施した。調査期間は平成27年8月11日～21日とした。

大きな粒子の遮蔽領域を評価するため、石礫(大粒径:50cm)の周辺に、平均粒径程度以下(5～10cm程度)の礫を着色して並べ、出水後にその礫の流失範囲、埋没範囲を調査した。石礫の設置箇所及び設置状況を以下に示す。

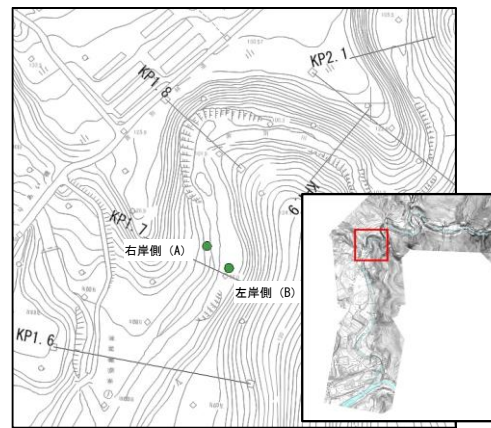


図6 石礫の設置箇所



図7 石礫の設置状況

【調査結果】

調査の結果、右岸側(A)地点、左岸側(B)地点ともに、巨石の上下流の石礫は流失していた。また、左岸側(B)地点の巨石(50cm程度)が若干下流側に移動していた。

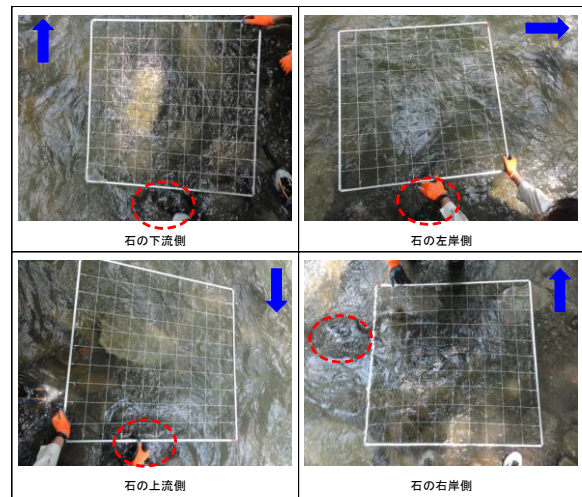


図8 調査結果 (右岸側(A)地点)

以上の結果より、遮蔽の対象となる巨石が完全に水没する場合は背後の遮蔽域は明確に現れないと考えられる。

(3) 現地調査結果を踏まえた石礫モデルの再構築

以上の調査結果より石礫の移動特性を再現できるパラメータを設定し、4.と同条件で現況河道の再現検証を行った。

石礫の移動特性調査結果より、春期調査期間において、

粒径区分「小 (10cm)」は 90%が移動し、粒径区分「中 (30cm)」及び粒径区分「大 (50cm)」はそれぞれ 40%、20%が移動している。投影係数をパラメータとして、感度分析を行い、移動割合を最も再現できる投影係数を設定した。なお、粒径毎に適合性の良い移動割合が異なるため、本検討においては粒径毎に異なる投影係数を与えるものとした。

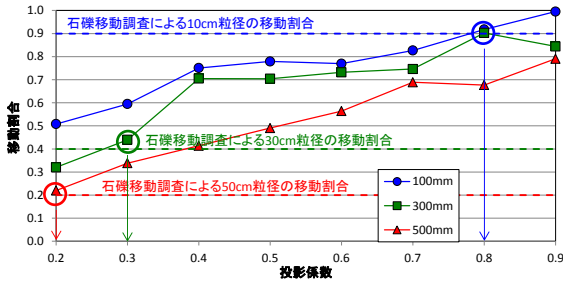


図 9 投影係数と移動割合

巨石の遮蔽効果調査結果より、50cm～1m 程度の礫の背後に設置した石礫は、40m³/s 程度の出水ですべて移動していることから、遮蔽率を 0 と設定した。

以上の調査結果を踏まえたパラメータを用いて、石礫モデルにより再現検証を行った結果の一部を以下の図に示す。平均河床高、最深河床高ともに、解析値は実績値の変動量・変動傾向を概ね再現できている。ただし、湾曲部の洗掘、落差工上下流の変動が大きい。

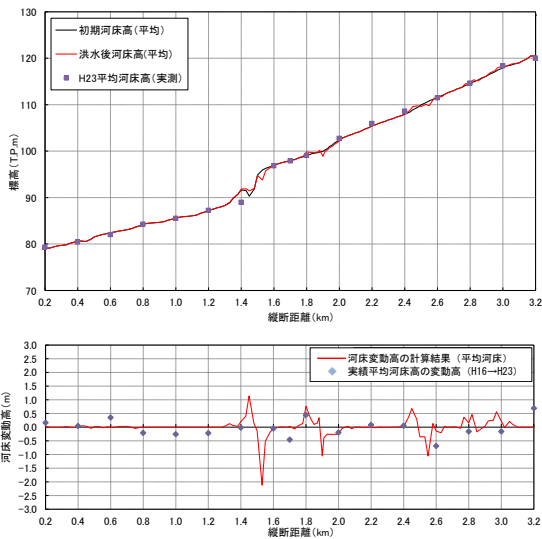


図 10 平均河床高の検証結果

以上の結果より、下流区間におけるダム建設後の河床変動解析については、石礫モデルを用いることとする。

6. 下流区間の河床変動予測

(1) 上流区間 (貯水池) からの流入量条件

三笠ぼんべつダムが建設されると、洪水調節が行われ、ダム下流区間への流出量・土砂流出量が変化するため、

ダム下流区間の物理環境を把握するためには、上流区間 (貯水池) からの流入量・土砂流入量を境界条件として設定する必要がある。

上流区間 (貯水池) については、貯水池管理上、長期的な視点での堆砂予測が重要であることから、浮遊沙も考慮できる混合粒径モデルによる解析が適当である。よって、同区間については混合粒径モデルによる解析を行った。また、流水型ダムは図に示す様にモデル化を行った。

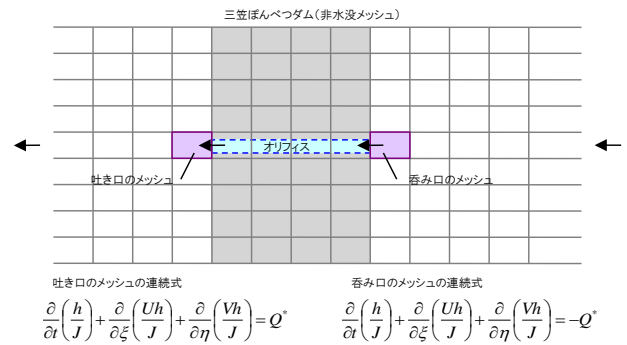


図 11 流水型ダムのモデル化

(2) 計算条件

洪水時におけるダム貯水池内の堆積と融雪期における土砂フラッシュのプロセスを検討するため、以下の2つの条件で解析を行った。

- ①計画規模洪水+融雪出水規模 (1/100+平成15年融雪)
- ②実績洪水10カ年 (平成16~25年)

(3) 予測計算結果

上記の条件の下、前章で得られたパラメータを用いた奔別川石礫モデルによる河床変動予測結果 (計画規模+融雪出水) を以下に示す。

①ダム無しの場合、計画規模の流量が流下することにより、下流全区間にわたって大きく洗堀・堆積が進む。一方②ダム有りの場合、洪水が貯留されることからピーク流量・流出土砂量が小さくなるまで、下流河道の変動量も小さくなる。

1.5k付近の落差工上下流部の洗堀及び堆積傾向は、ダムができることにより小さくなる。

また、既往10カ年洪水前後と比較すると、ダム有り無しによって下流河川への土砂動態に大きな差異は見られなかった。

これらの結果から得られた知見を以下に示す。

- ダム整備後は、ダムによる流量の調節が行われることから、下流区間の堆積・洗堀傾向は小さくなる。
- 奔別川周辺に重要な施設や道路等が無いことから、堆積・洗堀が生じても緊急的に対策を講じる必要性はない。ただし、KP1.5付近の落差工上下流は変動が比較的大きい。

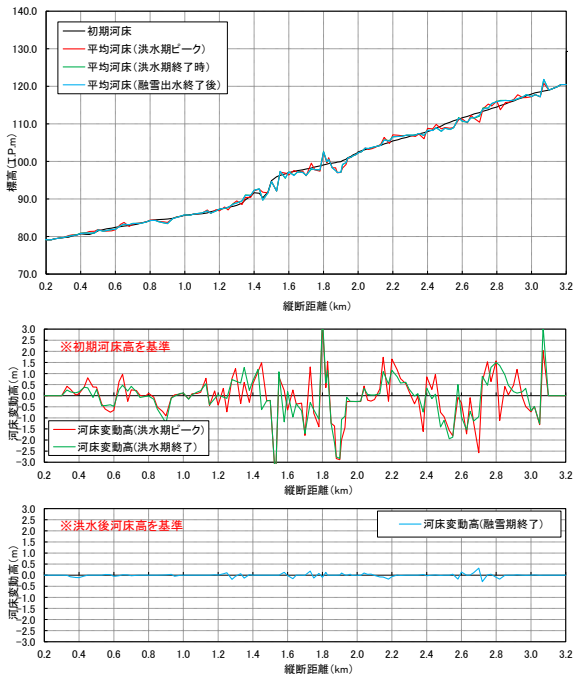


図 12 河床変動予測結果【①ダム無しの場合】

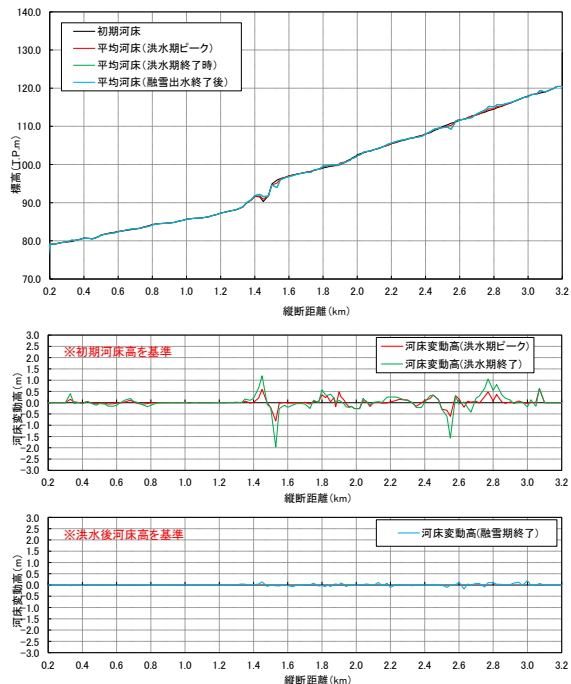


図 13 河床変動予測結果【②ダム有りの場合】

7. 下流区間の対策案検討

ダム整備後においても洗掘、堆積が生じる箇所に対し、洗掘・堆積を抑制できる対策案を設定し、その効果について感度分析を行った。

ここでは、ダム建設後のダム下流河道において、最も変動が大きい区間である1.5km 付近の堰堤上下流区間について、対策工を検討する。落差工上流側では、大きな

Takahiro Yamakawa, Masayuki Okuyama, Yukihiro Masakuni

流速が生じるために、河床が洗掘されると予測される。そのため、落差工上流箇所には巨石を配置することで、洗掘を防止することが可能かについて石礫モデルを用いて検討を行った。予測結果を以下に示す。

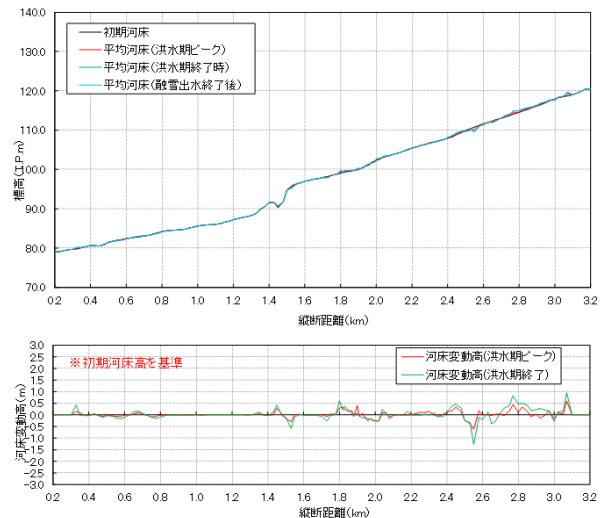


図 14 対策案実施後の予測結果（巨石設置）

以上の結果から、巨石設置によって、堆積・洗掘を50cm程度軽減できることが確認できた。

8. まとめ

本検討を通して得られた知見を以下に示す。

- 現地調査の結果、奔別川では石礫の影響は比較的小さい可能性が示された。また、調査結果を反映することで奔別川の土砂動態モデルの精度向上を確認できた。
- ダム建設後の奔別川下流区間の土砂動態について河床変動予測を行った結果、計画規模+融雪出水後には局所的に堆積・洗掘が発生するが、河道計画特段大きな懸念は生じない。
- 局所的に堆積。洗掘が生じる箇所について対策案の検討及び効果検証を行った結果、巨石設置案が有効であることが示された。

本検討において、ダム下流河道の全川の傾向を把握することができた。今後、ダム建設後の下流河道管理にあたっては、河道環境のモニタリングを適切に実施し土砂環境の変化に注視しながら、必要に応じて本稿で示した対策実施に向けて更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術—実務上の課題と調査・研究の方向性，河川技術論文集，第14巻，2008
- 2) 長田健吾，福岡捷二：石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究，河川技術論文集，第15巻，2009