

豊平川の河道特性に応じた河川改修について —大型模型実験による土砂還元対策検討—

札幌開発建設部 河川計画課

○盛内 政孝

宮下 綾太

高橋 洋介

豊平川は、都市部を流れる河川として全国屈指の急流河川である。これまで豊平川では床止や高速流対策等の河道整備が行われてきたが、直轄上流部にて河床洗掘が生じ、既設護岸の沈下や根入れ不足など流水の作用に対する安全性が損なわれている箇所がある。現在、河床洗掘対策を実施中であるが実施後も局所洗掘が懸念される。

本論は、懸念事項の解消に向け、土砂還元対策について大型模型実験等の検討結果を報告するものである。

キーワード：河床洗掘対策、土砂還元対策、大型模型実験

1. はじめに

豊平川における河川整備は、札幌市街地の発展とともにに行われてきた。明治14年の現況河道なりの堤防整備に始まり、昭和25年～昭和48年にかけて急流河川特有の河床低下に伴う低水護岸や既設工作物の保護を目的とした床止群の整備、昭和46年からは札幌市の都市化に伴う河川空間の利用促進や堤防の保護、流路の安定化を目的とした河道の複断面化及び高水敷の造成といった様々な整備が行われてきた。

昭和56年洪水以降、河道内の河岸侵食及び土砂堆積が進行したことで、平均年最大流量規模の出水により河道の固定化（二極化）が進行した。これまで扇状地特有の網状河道を有し横断方向に自由に蛇行していた河道から、縦断方向への変化が顕著となる河道変化により、河床低下傾向となっている。しかし、豊平川左右岸では市街化が進み、引き堤などによる河道の拡幅は困難な状況にある。

このような背景から、豊平川の8号床止から上流区間（KP17.4～KP21.4）（以降、「床止上流区間」）では河床洗掘対策として、帯工・河道整正・護岸根継ぎの実施に併せ局所洗掘対策が求められている。

本論では、河床洗掘対策実施後の局所洗掘に対する土砂還元による効果について、大型模型実験等の検討結果を報告するものである。

2. 豊平川上流域の現状と課題

床止上流区間は平均河床勾配1/160の急流区間となっているが、床止のような大規模な横断工作物による縦断規制は実施していない。また、直轄区間の上流端部



図-1 豊平川上流端付近の状況（2020撮影）

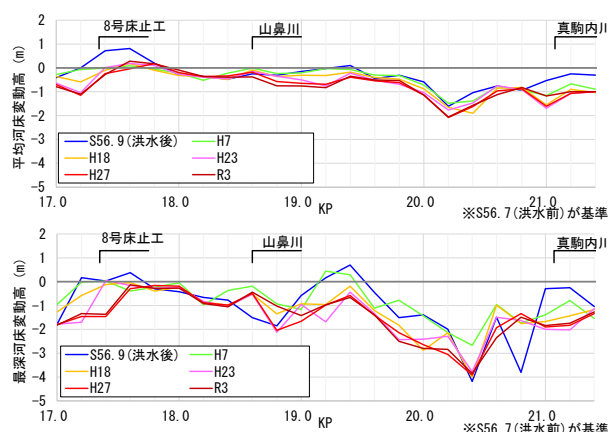


図-2 昭和56年8月洪水前からの対比変動高縦断図

（五輪大橋）は、かつては砂礫に覆われていたが、現在は一部の河床表層に砂礫が残存しているものの、ほとんど露岩している状況となっている（図-1）。また、流域

内においてはダムや砂防堰堤等で土砂移動が制限された状態であり、継続的な土砂供給が限定されている状態となっている。

昭和56年頃までの低水護岸整備後、昭和56年8月洪水を経て、河道内の堆積土砂で形成される中州と滞筋の比高差が拡大し、河床洗掘が進行（以降、「二極化」）した。図-2に昭和56年洪水前の河床高に対する平均及び最深河床高の対比変動高縦断面図を経年的に整理した。平均及び最深河床高共に経年的に低下傾向を示し、さらに最深河床高は平均河床高よりも低下傾向が大きく、二極化が進行していることを示している。

河床洗掘の進行に伴い、既設護岸の沈下や根入れ不足が生じており、河床洗掘に起因する護岸被災は堤防決壊を招く可能性があることから、河床洗掘対策の実施が喫緊の課題となっている。

また、豊平川はサケ科魚類が自然産卵する河川であるが、床止上流区間では下流側に比べ産卵床が少ない傾向にあり、河床洗掘に伴う粗粒化や二極化の影響で、さらなる産卵適地の減少が懸念されている。

3. 河床洗掘対策の概要

上記の背景をもとに、大型模型実験及び平面2次元河床変動計算を用いて河床洗掘対策の検討²⁾を行い、帯工7基、河道整正（砂州掘削）、護岸根継ぎからなる対策工の配置検討を行った。令和4年度から対策工の施工を開始しており、令和5年度にはKP19.70地点の帯工が完成予定となっている（図-3、図-4）。

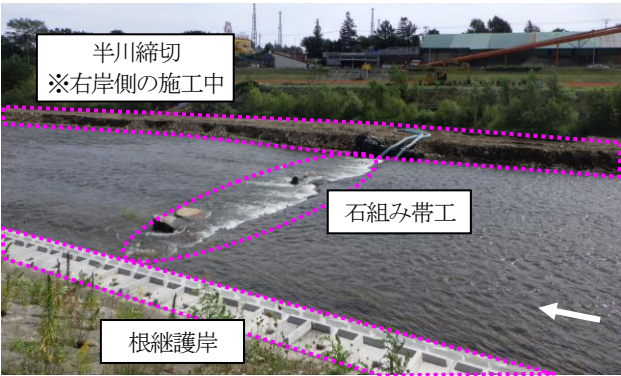


図-3 施工中の帯工（KP19.70）の状況（2023.8撮影）

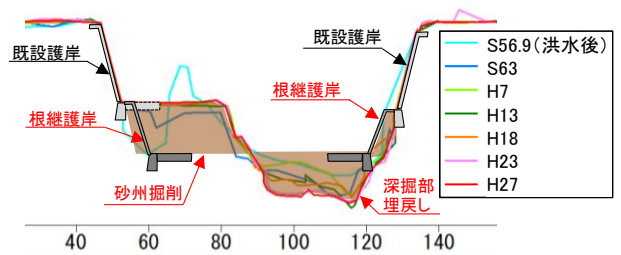


図-4 河床洗掘対策（河道整正・護岸根継ぎ）のイメージ図

対策完了は令和12年度以降を予定しているが、前述のとおり上流域からの土砂供給が期待できない状況であるため、対策実施後も局所的な河床洗掘が懸念される。

このため、直轄上流端付近からの土砂還元により、河床洗掘対策実施後の局所的な河床洗掘抑制やサケ産卵環境創出などに資する土砂還元対策について検討した。

4. 土砂還元対策検討

土砂還元の効果について、大型模型実験と数値解析により検討した。土砂還元の検討を行う場合、土砂の移動特性が結果に大きく影響を与える。ただし、大型模型実験では、構造物・湾曲・混合粒径などの影響が、複雑に影響しあつて土砂移動等の実験結果に反映させるため、土砂移動等の基礎的特性把握のためには、河道条件を直線水路等に単純化するなどした予備実験が必要であると判断した。

(1) 予備実験による基礎的特性把握

土砂還元に関する予備実験は、土砂移動の基礎的特性を把握するための予備実験①と、床止区間の流況特性を把握するための予備実験②の2種類を実施した。実験施設は、国立開発研究法人土木研究所寒地土木研究所（以降、「寒地土研」）と連携し、寒地土研が所有する第4実験棟に室内水路を製作して実施した。実験結果を踏まえ、数値解析により再現計算を行うことで、数値解析に用いる流砂量式の調整等を行った。表-1に予備実験と大型模型実験の実験諸元を示す。

a) 予備実験①：土砂移動の基礎的特性把握

実験水路は、幅0.5m×延長20mの水路を製作し、大型模型実験と同等の単位幅水量に調整し使用した。

実験条件は、流量3ケース（平均年最大流量、中規模出水流量、整備計画流量等）、粒径2ケース（粒度調整あり・なし）、帯工2ケース（あり・なし）を組合せた合計8ケースを想定し、着色砂を用いて流砂量の移動量や帯工周辺の堆積状況等を確認した。

図-5に予備実験①の実験状況を示す。実験結果を踏まえ、数値解析における粒径別の無次元限界掃流力に浅田の式を用いることで、流砂量やアーミングの傾向が概ね一致した。また、土砂還元は現地の河床材料よりも小

表-1 予備実験と大型模型実験の実験諸元

条件	現地	大型模型実験 縮尺S=1/40	予備実験① 縮尺S=1/40	予備実験② 縮尺S=1/50
模型区間L	KP16.5～22.0	延長137.5m	延長20.0m	延長20.0m
低水路幅B	70.0m	1.75m	0.5m	1.4m
堤間幅	200.0m	5.0m	—	4.0m
HWL勾配I	1/153	1/153	1/153	1/153
河床材料d	150.00mm	3.75mm	3.75mm	3.00mm

粒径のものを還元土砂とすることで、帯工下流の深掘れ箇所にも効率的に堆積しやすいことを見出した。

b) 予備実験②：床止区間の流況特性把握

実験水路は、豊平川8号床止付近（KP17.2～17.8）を想定し、模型縮尺1/50の幅4.0m×延長20m程度の水路を製作し使用した。

実験条件は、流量3ケース（平均年最大流量、中規模出水流量、整備計画流量等）を想定し、跳水の発生状況等を確認するとともに、土砂還元を想定した着色砂を用いて床止周辺の土砂堆積状況を確認した。

図-6に予備実験②の実験状況を示す。実験結果を踏まえ、流量規模により主流線が変化する傾向や跳水範囲等は数値解析でも概ね再現することができることを確認した。さらに、数値解析モデルを改良し魚道の隔壁を考慮することで、流向・流速を実験結果に近づけた。また、土砂還元を想定した着色砂は、床止箇所を乗り越え下流のミオ筋部（河床の深掘れ部）に堆積したことから、実際の土砂還元においても河床洗掘抑制に効果的であることを確認した。

ただし、計画規模の流量に合わせて実験水路の粗度付を行った影響で、低流量時の粗度係数が相対的に大きくなっており、低流量時の跳水範囲等の再現性向上は今後の課題である。



図-5 予備実験①の状況（帯工下流への着色砂の堆積）

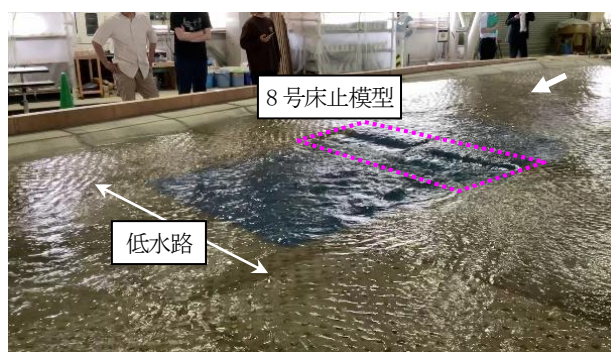


図-6 予備実験②の状況（床止下流の跳水）

(2) 土砂還元の概要

a) 土砂還元の目的

床止上流区間の課題や予備実験結果を踏まえ、土砂還元の目的を床止上流区間に設置する帯工間の局所的な河床洗掘の抑制やサケ産卵環境の創出とした。

b) 土砂還元に必要な質と量

土砂還元に必要な還元材料の質と量は、「下流河川土砂還元マニュアル（案）」³⁾をもとに設定した。土砂還元の試験施工（R2.9）や数値解析による河床変動予測結果を基に設定した。

予備実験①で得られた結果（現地河床材料よりも小粒径の還元土砂の方が、帯工下流の深掘れ箇所にも効率的に堆積しやすい）や、土砂還元の試験施工では下流河川においてサケ産卵環境の創出に良い影響があったことを踏まえ、床止上流区間に必要な土砂還元材料の「質（粒径）」は、床止上流区間よりも粒径の小さい床止区間の河床材料程度（ $d_m=60\text{mm}$ 程度）とした。

また、数値解析による帯工設置後の河床変動予測計算結果から、床止上流区間に必要な土砂還元材料の「量（土量）」は、年間2,000 m^3 （59,900 m^3 /30年）程度とした。

c) 土砂還元場所と形状

土砂還元箇所は、五輪大橋の露岩箇所（KP21.4）とし、置土の高さは、平常時には流出せず出水時の流量の増大に伴って自然に濁水が発生し始める標高以上、かつ、平均年最大流量時に必要な掃流力が確保できる水深をもとに設定した。（図-7）

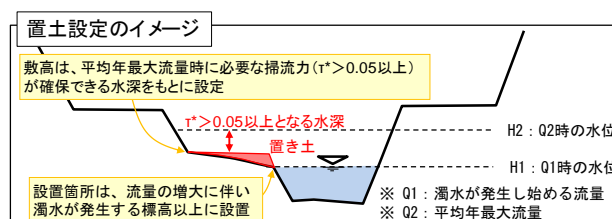


図-7 置土の設定イメージ

(3) 数値解析による土砂還元対策の効果予測

土砂還元を継続的に行った場合の将来的な効果を把握するため、数値解析による将来予測を行った。数値解析には、平面2次元河床変動解析（iRIC-Nays2DH）⁴⁾を用いた。表-2に数値解析の計算条件を示す。なお、計算区間は豊平川KP16.4からKP21.4とし、そのうち検証区間はKP17.4(8号床止め)からKP21.4とした。

計算に使用する河床材料は、平成28年の河床材料調査を基に「河道計画検討の手引き」⁵⁾を参考に、河床変動に寄与しない細粒部を除いて設定した。これは大型模型実験に使用する材料と同様の設定方法である。

置土材料は、上記で設定した $d_m=60\text{mm}$ 程度を還元する場合と、河床材料と同程度の $d_m=125\text{mm}$ 程度を還元する場合を比較した。置土材料は、計算上、毎年流出分を補充した。

また、対象流量は、既往検討を踏まえ近15か年の実績流量をもとに年平均最大流量を設定し、30年分+整備計画流量+15年分とした。

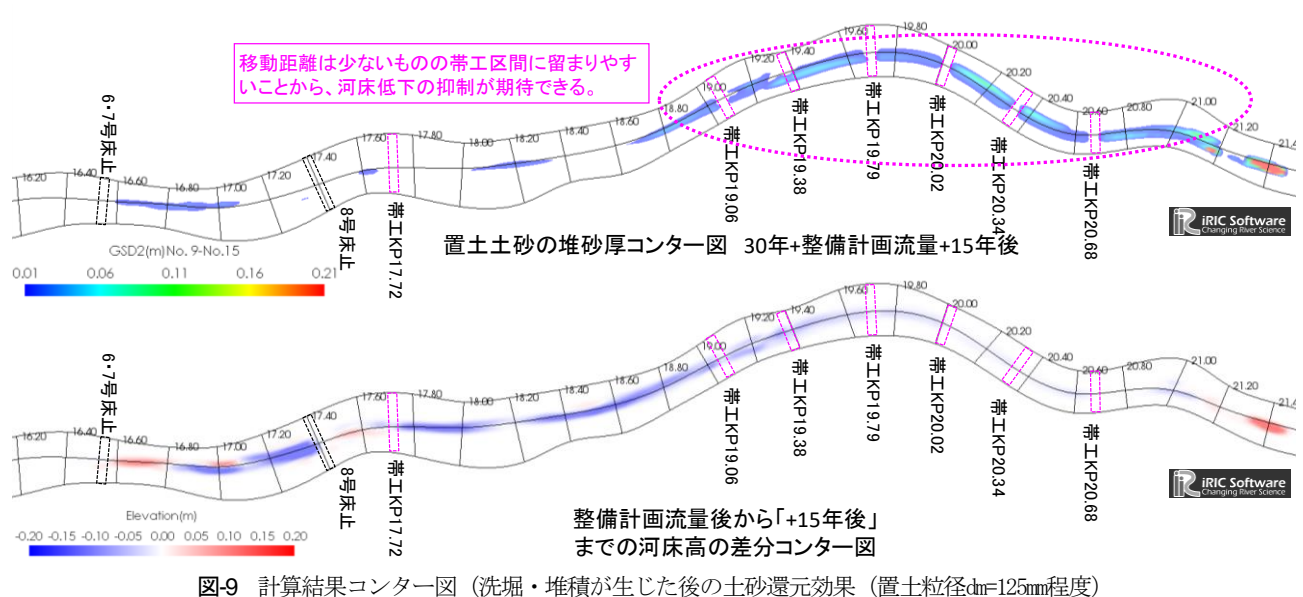
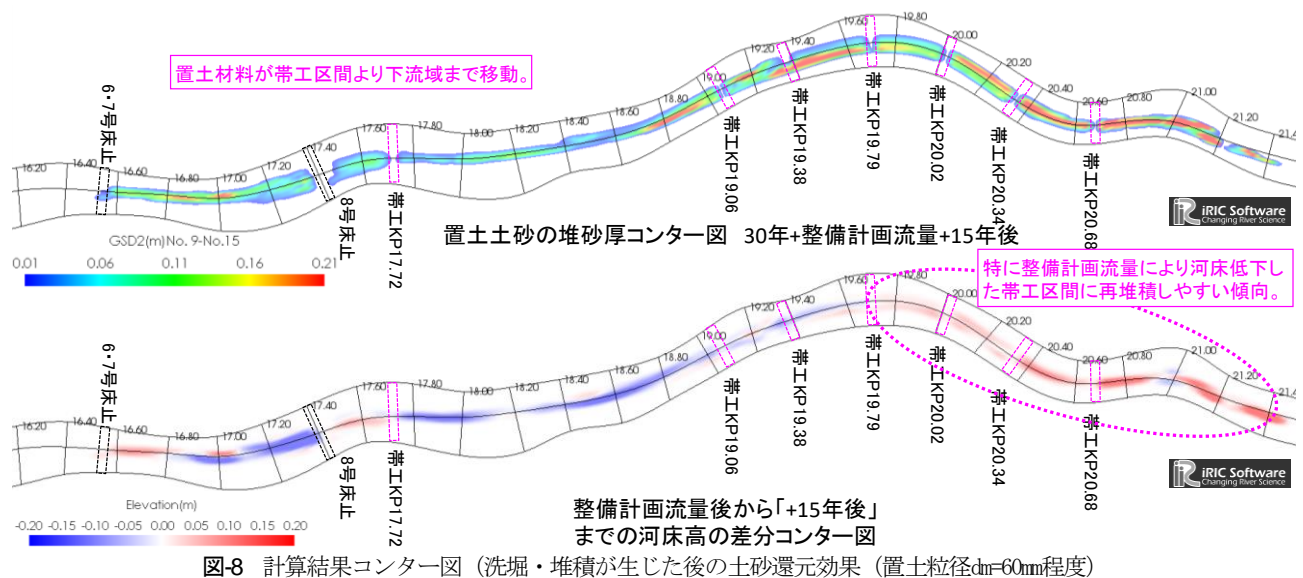
表-2 数値解析の計算条件

項目	設定内容
計算区間	豊平川 KP16.4～21.4
河道形状	令和3年横断+KP19.4～21.2の河道整正反映
平面形状	流下方向：約10.0m間隔 横断方向：約5.0m間隔
粗度係数	低水路：粒径によって変化（マングストリッケー型） 高水敷：計画粗度係数
河床材料	平成28年の平均（全区間同一材料）
樹木	投影面積密度 a_w （透過係数）
置土粒径	$d_m=60\text{mm}$ 程度 $d_m=125\text{mm}$ 程度
置土量	2,000 m^3 ※毎年流出分を補充
対象流量	雁来観測所：30年（15カ年の実績流量×2）+整備計画流量+15年
支川	真駒内川の支川合流を考慮（計画高水流量比）
給砂量	給砂なし ※KP21.0～21.4の露岩考慮
起算水位	等流起算 ※河床勾配1/161
構造物	床止、根固め、帯工

数値解析のうち、図-8、図-9の計算結果コンター図を見ると、置土材料を $d_m=60\text{mm}$ とした場合は、より下流域まで置土材料が移動し、特に整備計画流量により河床洗掘した帯工区間に再堆積しやすい傾向があることから、洪水後の局所洗掘箇所への土砂還元が期待できる。これは予備実験①の傾向とも一致する。一方、置土材料を $d_m=125\text{mm}$ とした場合は、移動距離は少ないものの帯工区間に留まりやすいことから、帯工区間の河床洗掘の抑制が期待できる。また、数値解析上は毎年流出した置土材料を補充しているが、平均年最大流量規模の出水が毎年あるわけではないので、想定した2,000 m^3 /年の土砂還元よりも少ない結果（1,000 m^3 /年）となった。（表-3）

表-3 数値解析による土砂還元量（計算結果）

置土粒径	還元土砂量（数値解析で流下した量）
$d_m=60\text{mm}$	約30,000 m^3 ※1,000 m^3 /年
$d_m=125\text{mm}$	約6,000 m^3 ※200 m^3 /年



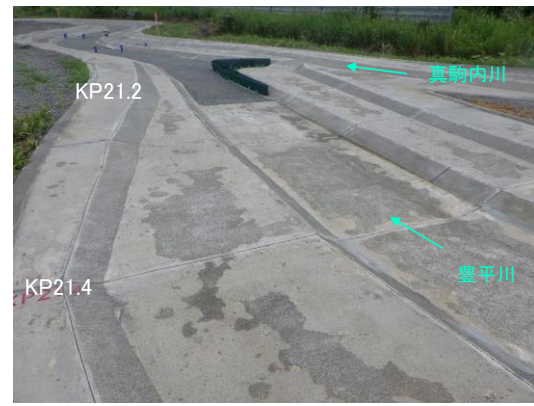


図-10 大型模型実験施設の状況

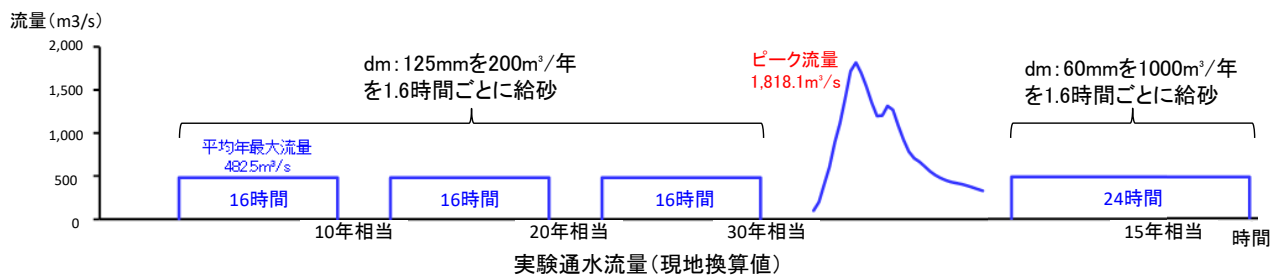
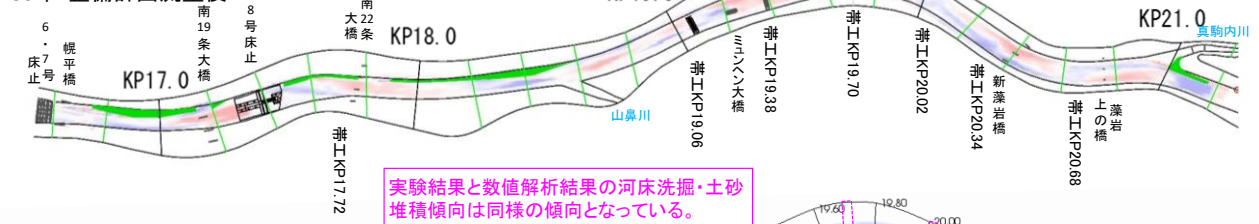


図-11 流量条件図 (大型模型実験)

大型模型実験で得た河床変動コンター図 30年+整備計画流量後



数値解析で得た河床変動コンター図 30年+整備計画流量後

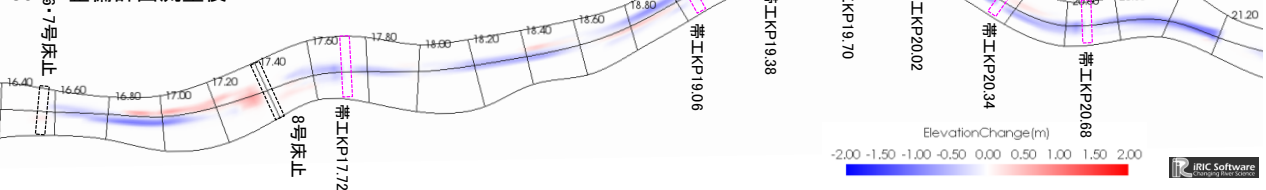


図-12 河床変動高コンター図 (大型模型実験結果と数値解析の比較)

これらの結果を踏まえ、効果的・効率的な土砂還元の方法として、置土材料の粒径を目的別に使い分けことが効果的と考えた。このため、大型模型実験では、30年後までを $dm=125mm$ で土砂還元し帯工区間の河床洗掘を抑制しつつ、整備計画流量後は $dm=60mm$ で土砂還元を行い、局所洗掘箇所への再堆積を促す効果を検証することとした。

(4) 大型模型実験による土砂還元対策の効果検証

大型模型実験は、過年度と同様に寒地土研の石狩実験

場を用いて実施した。実験諸元は前述の表-1のとおりであり、延長137.5mの水路となっている。(図-10)

実験条件は数値解析とほぼ同様となっているが、対象流量については、30年分の長期予測を平均年最大流量で設定し30年分の流砂量が一致するように通水時間を設定し、16時間通水で10年相当の予測とした。(図-11) 河床材料は数値解析と同様に「河道計画検討の手引き」を参考に、河床変動に寄与しない細粒部を除いて現地河床材料の粒度分布を設定した。実験に使用する材料は、精選砂と洗砂利を1対1で混合することで現地と同様の粒度

大型模型実験の整備計画流量後から+15年後までの
河床高の差分コンター図

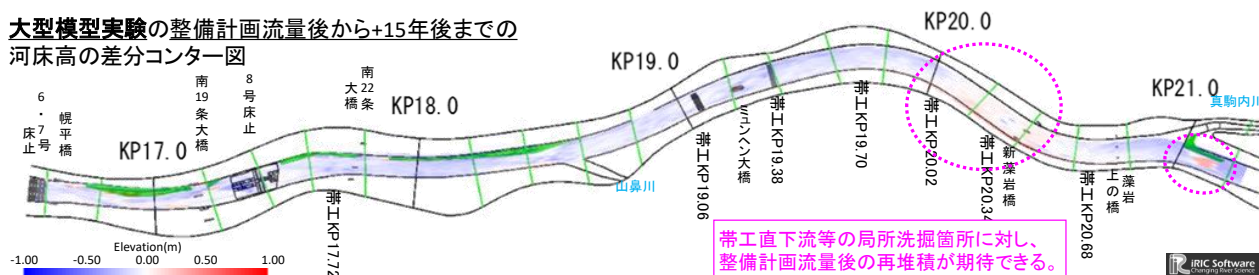


図-13 河床変動高コンター図 (実験結果)

分布となった。置土量は、数値解析による年平均の置土流出量を参考にして設定し、30年後までは $dm=125mm$ を $200m^3/年$ 、整備計画流量後は $dm=60mm$ の材料を $1,000m^3/年$ に相当する土量をKP21.4付近に1年ごと(1.6時間毎)に給砂することとした。

大型模型実験結果と数値解析の比較図によると実験結果と数値解析結果の河床洗掘・土砂堆積傾向は同様の傾向となっている。(図-12) また、置土材料の流下距離は、 $dm=60mm$ の方が $dm=125mm$ よりも広範囲に広がっており流下しやすい傾向となった。これは数値解析と同様の傾向である。さらに、湾曲部外岸で懸念される帯工直下流等の局所洗掘箇所に対し、置土粒径 $dm=125mm$ では30年+整備計画流量後までの河床低下を抑制し、置土粒径 $dm=60mm$ では整備計画流量後の再堆積が期待できる結果となった。(図-13は置土粒径 $dm=60mm$ による整備計画流量後の再堆積)

このことから、置土材料の粒径を目的別に使い分けることで、効果的・効率的な土砂還元方法となることが確認できた。

4. まとめ

(1) 検討結果のまとめ

豊平川の河床洗掘対策の一環としての土砂還元対策について、室内水路による予備実験、平面2次元河床変動解析による数値解析、石狩実験場における大型模型実験等を用いて検討した。検討結果を以下にまとめる。

- 予備実験①では、数値解析における粒径別の無次元限界掃流力に浅田の式を用いることで、流砂量やアーミングの傾向が概ね一致した。また、土砂還元は河床材料よりも小粒径のものを還元土砂とすることで、帯工下流の深掘れ箇所効率的に堆積しやすいことを見出した。
- 予備実験②では、土砂還元を想定した着色砂は、床止箇所を乗り越え下流のミオ筋部(河床の深掘れ部)に堆積したことから、実際の土砂還元においても河床低下抑制に効果的であることを確認した。

- 数値解析や大型模型実験では、湾曲部外岸で懸念される帯工直下流等の局所洗掘箇所に対し、置土粒径 $dm=125mm$ では30年+整備計画流量後までの河床洗掘を抑制し、置土粒径 $dm=60mm$ では整備計画流量後の再堆積が期待できる結果となった。

(2) 今後に向けた課題

上記の結果から、土砂還元対策として置土材料の粒径を目的別に使い分けることで、効果的・効率的な土砂還元方法となることが確認できた。ただし、土砂還元によるサケ産卵環境への影響については、湧水や伏流水等も大きく影響するため、今回の検討では検証が不十分である。(R2.9の土砂還元試験施工では下流河川においてサケ産卵環境の創出に良い影響があったことを確認はしている。)

また、実験にも数値解析にもそれぞれ実現象と一致しない部分があり、想定される流量や植生の影響等の不確定な要素が多いことから、施工後の変化状況を踏まえ逐次検討にフィードバックすることが重要である。

一方、土砂還元に必要な土砂の確保、床止区間下流への影響等、管理上の課題も数多く残っているため、今後も、土砂還元の試験施工やモニタリング等を継続し、引き続き実験や数値解析をとおり効果を検証しながら順応的な管理を進めていく必要がある。

参考文献

- 山上翔吾, 渡邊一靖, 中嶋啓真: 豊平川の河道特性に応じた河川改修について, 第63回(2019年度)北海道開発技術研究発表会論文
- 館野奈々, 大島省吾, 大石兼史: 豊平川の河道特性に応じた河川改修について, 第64回(2020年度)北海道開発技術研究発表会論文
- 国土交通省河川局河川環境課: 下流河川土砂還元マニュアル(案), H23.3
- <https://i-ric.org/ja/>
- 財団法人国土技術研究センター: 河道計画検討の手引き, H14.2