

平成26年度

急流河川における河道安定化工法の効果と 現状の課題について

帯広開発建設部 治水課 ○村井 瞳
武田 淳史
川井 淳一

北海道内の急流河川では、河道の変化に伴う河川管理施設の安全性の低下、河床の露岩、樹林化による礫河原の減少など、治水・環境面で課題が生じている河川がある。このような背景から、「北海道河道技術研究会」において、平成26～28年度の3カ年で今後の急流河川の河道計画・管理における技術向上及び情報共有化に資するための技術資料を作成する計画である。

そこで本報では、水制工を主体として河道の安定化対策を進めてきた札内川の対策の考え方、低水路幅や河床高の経年変化等から、河道の安定化状況や治水上の効果について整理するとともに、現状の課題や取り組みについて報告する。

キーワード：計画手法、河床低下

1. はじめに

(1) 札内川の概要

札内川は、流域面積725km²、幹川延長82kmの十勝川の一次支川で、水源を日高山脈に発し、札内川ダムを經由したのち、人口・資産等が集積する帯広市街地に向けて急勾配（1/110～1/260）で大きく蛇行しながら流下する。土砂産出量が多いことから、札内川沿いには扇状地が形成されており、代表粒径30mm～80mm程度の広い皿形の礫河原が広がる複列砂州河道である。

しかし、近年の調査により戸蔦別川合流点（KP25.0付近）より下流では比較的河床の礫層が薄く、その下には河床低下リスクの高い軟質な地層があることがわかっている。

また、戸蔦別川合流点（KP25.0付近）より上流では河道内で樹林化が進行し、急激に礫河原が減少している。

(2) 水制工とは

水制工は流水を積極的に制御するために河岸からある角度で河川の中心部に向かって突き出した工作物である。

その機能は、①水流に対する抵抗を増して流水を減速させる（減速効果）、②水流に対して直接障害物となり、水流を跳ねて方向を転じさせ、防護すべき箇所を水流を激突させないようにする（水跳ね効果）であり、流路の固定化、土砂沈殿の誘致、導流などは上述の2つの働きを利用してその目的を達するものとされている。

多種多様な水制工においてどちらの効果を目的として設置をしたものか判然としないものも多いが、一般的に減速効果を目的とするものは越流、透過性であることに

対し、水跳ね効果を目的としたものは、非越流で不透過である。

また、水制工は長さを状況に応じて変更するなど段階的な施工が可能であり、柔軟性に富み、経済的な工法と言える。

2. 河道安定化工法の変遷

札内川では、過去より出水毎に砂州の位置、形状が変化し、流向の変化や偏流による洗堀や側方侵食によって、堤防の欠壊や橋梁の流出、浸水被害等が発生したが、それに対し、古くから主に水制工と低水護岸による整備を進めてきており、経験的事実に基づいて改良が加えられ発達してきた。

(1) 昭和20～30年代

当時は河川氾濫や河岸決壊による河道災害が多発しており、その復旧事業に追われていたが、確固たる改修方法は定まっておらず、河道計画を策定するにあたりその方策の確立にも追われていた。

十勝川水系では帯広より下流の緩流部における改修工事は氾濫防止を目的とした堤防第一主義をとったが、上流の急流部においては氾濫の被害より流路の変動による被害のほうがはるかに大きいため、低水路の固定に主眼を置いた。

その際、低水路の固定はその河川特有の蛇行を十分に検討し、生かした形状を見いだすべきとされ、蛇行波長、水衝部の位置が検討された。

そのような中、昭和27年に三島勇は急流河川の改修方

法について新たな河道計画を提唱している。今日では「三島ピッチ」と呼ばれているもので、蛇行流路における水衝部の発生距離（ピッチ）に着目して、蛇行波長に沿った水衝部箇所に護岸と水制を設置し、また、水裏にも水制を配して中州の移動を抑制し、流路を固定するものである。

三島は、航空写真を年次を追って重ねて見ることで、網状に発達した分岐流路の中から一定の波長を持つ蛇行の主流路を見出し、その時左右岸に一定間隔で水衝部が見えてくることにより水衝部に固有のピッチがあることを発見した。

また、当時三島と同時期に在籍した渋谷弘衛は、三島が藤芳義男著「河川の蛇行と災害（昭和24年発行）」も参考にしたのではないかと推察している¹⁾。それは昭和33年の報文²⁾で中谷悟朗が藤芳の蛇行波長を求める式によって三島ピッチが採用された十勝川上流の改修計画の蛇行波長を検証していたためでもある。

中谷悟朗は、藤芳の蛇行論に基づき、蛇行波長を次の式で検証している。

$$L = \frac{\beta}{n} R^{0.7} b^{0.5}$$

ただし、L：蛇行波長、R：径深、b：川幅、n：粗度係数、β：定数（ここでは4、蛇行係数F=β・CのなかのβでありCは流速係数）

この式によって算定された蛇行波長は、支配流量（氾濫流量=当時は無堤のため低水路満流流量）時の水量を用いた場合、改修計画の蛇行波長とほぼ同じ値となっている。

上記のように発見された三島ピッチに沿った水衝部に対し、水衝部を固定し、当時の河状を維持するため、護岸と表-1及び図-1に示す3種類の役割を持つ水制工を配置していった。

特に、護岸水制については、水衝部での護岸被災及び河床の洗掘を減速効果によって防止するものであり、流木等が引っ掛かり不透過となった場合、受ける抵抗が大きくなることから、洪水後、流木等の除去作業も実施し、水制工の透過性を維持していたようである。

また、凸岸に設置された水裏水制は砂州を残すことにより砂州の土砂調節機能を維持するもので、流水を安全に流すだけでなく、土砂輸送も考えていた点で卓越した技術論と言われている。

さらに、この計画では高水敷全部が河道となる洪水でも流心は低水路に大体一致させなければ河道を乱し、低水路の固定ができないものとも考えていたため導流水制も設置している。

以上の考え方から、札内川では当時の流路を活かした河道計画が策定され、昭和30年度に改修工事の実施に至っている。

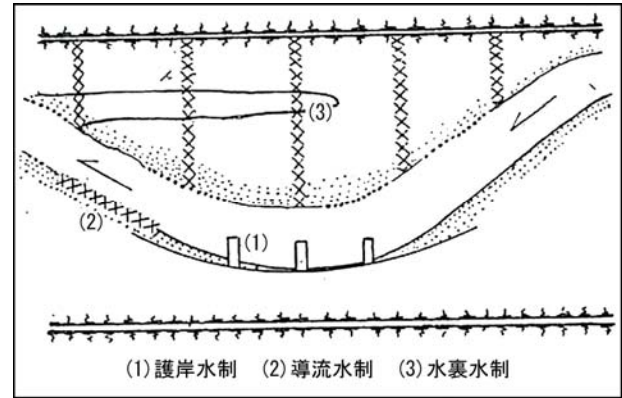


図-1 三島ピッチに基づく水制工設置例

(2) 昭和40～50年代

昭和40年代においては札内川の水制工及び河道安定化対策に関する記述は残されていない。

それ以外に関して言えば、昭和40年の河川法施行を受け、昭和41年6月に策定された十勝川水系工事実施基本計画において、計画高水流量が南帯橋地点で1,600m³/sとされ、その後さらに、昭和47年9月の洪水を契機として、昭和55年3月にも南帯橋地点で2,700m³/sと、現在と同じ計画高水流量に改定されている。

また、昭和40年代には札内川の堤防はほぼ連続していたが、三島ピッチは当時の流路を活かした河道計画のため、蛇行流路の偏向角度が大きく、湾曲部が堤防に接近することになるため、昭和37年8月洪水では、複列砂州河道特有の円形欠壊により、欠壊が堤防にまで及ぶものもあった。

このような状況から、昭和53年からは、山口甲の蛇行論³⁾に基いた砂州形態（単列・複列、蛇行波長、高さ、移動速度）の推定式により河道の安定を議論しており、砂州形態の単列化を図ることが河道災害防止の観点から有利であるとの結論に至っている。

当時の設計方針は以下の通りである。

表-1 三島ピッチ工法における水制工諸元

名称	役割	設置箇所	間隔(m)	長さ(m)	高さ(m)	横断方向の勾配	その他
護岸水制	護岸箇所の流速減退	水衝部の護岸前面	30～40	5～10	-	-	透過、横出し
導流水制	洪水時の計画流心線の維持	水衝部護岸の下流	-	100	1～1.2	-	透過、平行工か鎌出し水制
水裏水制	洪水時の洗堀防止	護岸対岸の高水敷	-	-	-	1/100～1/200	透過、横出し

- ① 水路の平面形状は計画高水流量時の蛇行波長で定め、蛇行流路の偏向角度は20度以下になるよう計画する。
- ② 低水路幅は、計画高水流量はもとより、毎年1度起こる流量（年最大流量の平均値）以上の流量で単列砂州が形成される範囲の拡幅にとどめ、それでも流下能力が不足する河道では横断形を複数断面として低水路断面の安定を図る。
- ③ 扇状地河川で皿形の横断形をしている河道では、蛇行流路に沿って横出し水制を設け単列砂州発生の領域まで低水路幅を抑制する。
- ④ 縦断形は上流端からの流送土砂の変化条件を与えて計画高水流量時の安定河床を検討するほか、粒度別流送モデルで解析を行い、粒度変化を考慮し、既往の流況の繰り返し計算により、粒径、河床変動の幅等を把握した上で決定する。

上記の方針に基づき決定された山口蛇行論に基づく計画河道の諸元を三島ピッチ論に基づく計画河道と比較すると、半蛇行長が770mから1,250mに、流路偏角が29度から16度に、湾曲半径が400mから980mに変更されており、河道法線を河心に移動した新たな河道計画となっていることがわかる。また、砂州の単列化に必要な低水路幅は、当時の札内川での平均年最大流量（580m³/s）時において、戸蔭別川より下流では80m、上流では30mとされた。

この計画河道が完成し、平均年最大流量以上の流量に対して全川単列砂州河道になることにより、水衝部箇所は253箇所から45箇所に軽減され、砂州（＝水衝部）の移動速度及び砂州高も小さくなることから、局所洗堀防止や流下断面の確保にも有利になるとの検討結果が出された。そのため、最終的には護岸整備に係るコストが軽減され、河道災害防止の観点から有利であると考えた。

以上の考え方から、単列砂州発生の領域まで低水路幅を抑制するため、蛇行流路に沿って横出し水制を計画し、同時に、河岸欠壊による乱流助長、生産土砂による砂州の生長による偏流を防止するため、低水路に緊急対策護岸を計画し、河道の安定化を図っている。

(3) 昭和60年代～平成初頭

a) 水制工に関する実験

上述の改修計画に基づく低水路幅を抑制するための水制工や、再度災害防止のための水制工を施工していくにあたり、水制工の平面配置や設計基準を策定するため種々の検討がなされている。

昭和56年度から「水制工の設計基準に関する研究、実施調査要領（案）」（昭和56年12月 北海道開発局 河川工事課）に基づいて始まった既設水制工の現況調査においては、水制工の長さ、高さ、角度、勾配、間隔等の各諸元が把握され、さらに、昭和57年度から59年度には水

制工の経年的な変化を把握するために、抽出した水制工群の平面形、横断形の経年変化及び流速、流行、洗堀、堆砂の調査をしている。

それにより、水制工の諸元が統計的にまとめられ、崩壊している水制工は水制高と下幅の比が0.4以上のものに多いことや水制間隔と水制高の比が25から37と小さく、水制本数が多いほど州のつき具合が安定しているなど、個々の水制工における効果の表れ方についての傾向が示された⁴⁾。

それらの成果を踏まえ、昭和60年度からは実験棟において、札内川の蛇行諸元をフルード相似則により縮尺した水路により、複数の水制工群や種々の水制工諸元に対する減速及び水跳効果の度合い、水制近傍の流れ及び河床変動について検討している。また、昭和63年度からは平成4年度までは石狩水理実験場において大型模型実験により、水制工の平面配置や諸元に対する下流及び対岸への影響、また、計画高水流量流下時の水制の減速効果及び水制工先端部の河床変動について検討している。

実験内容の詳細は既往の報文⁵⁾⁶⁾にあるためここでは省略するが概して以下の結論を得たとと言える。

- ① 頭水制は水制群の中でもとりわけ重要な役割を果たし、かつ水流から受ける負荷も大きいことから根固め等堅牢な施工を要する。
- ② 水制の設置箇所のみ洗堀防止を目的とする場合は水制長と川幅の比が0.1程度のものを細かい水制間隔で多数並べることが望ましい。
- ③ 対岸上流より水制を施工し、流れに対する影響を見極め、対象箇所にも水制を施工し、両者の連携で流れを制御して河道の安定に寄与する。
- ④ 水制長と川幅の比が0.2以上、水制間隔と水制長の比が4以下の時に洗堀の軽減や下流への波及効果が好ましい形で表れる。
- ⑤ 低水時に水跳ね効果をもって河道を維持している水制でも洪水時に流水が水制上を流れた場合、水制が粗度として働き、河岸付近の流速を減速させる。

b) 多自然型の水制工

この頃より、豊かで潤いのある生活環境の創出が強く求められ、河川に対しても自然環境の保全や再生に配慮した整備が求められるようになる。それに対し、総合的な河川空間の整備方針を河川環境管理基本計画により位置づけ、アクア・グリーン・ストラテジー（AGS）という理念のもと多自然型の川づくりを推進することになる。

従来工法は、ブロックむき出し工法が主流であったため、自然河川の観点から違和感があったが、この頃から水制天端部にふとん籠を用いて植生（埋枝工）をし、根付護岸部にも仮締切土を流用した覆土を施工する等、極力コンクリートを隠す工法を実施している。また、自然

の回復力を利用した植生回復を目指し、植生回復条件の調査及び土砂や流木を捕捉しやすいブロック形状を検討する等の試行錯誤を重ねていた。

後年、平成14年の調査で覆土を施工した水制工は植生が顕著に回復しているという調査結果が出ている⁷⁾。

(4) 平成10年代～現在

平成9年の河川法改定に伴い、「治水」、「利水」に加え、「環境」の機能確保も目標とした新たな計画である「河川整備基本方針」および「河川整備計画」が検討されはじめ、十勝川では平成19年3月に「十勝川水系河川整備基本方針（以下「方針」）」を、平成22年9月に「十勝川水系河川整備計画（以下「整備計画」）」を策定している。

上記より抜粋した札内川の目標は次の通りである。

- ① 計画高水流量は南帯橋地点で2,700m³/s、川幅は概ね400mとする。
- ② 洪水による災害の防止又は軽減に関しては、方針に向けて段階的に整備を進め、当面は札内川の南帯橋地点で、戦後最大規模の洪水である昭和56年8月降雨により発生する洪水流量1,400m³/s（戸蔭別川より上流は300m³/s）を安全に流下させることを目標とする。
- ③ 札内川は急流であり、水制等による河道の安定化を図ってきたが、流水の強大なエネルギーにより引き起こされる洗掘や侵食により、堤防が決壊し、洪水はん濫が起こるおそれがある。そのため、引き続き水制等による必要な対策を講じるとともに、洪水時の堤防決壊により市街地に著しい被害が生じるおそれのある区間について、洪水時の洗掘・侵食作用やその対策について調査・検討の上、必要な堤防の保護対策を実施する。
- ④ 十勝川水系を代表する樹木であるケショウヤナギ林が河畔に分布することから、治水面との整合を図りつつ、生息環境の保全に努める。

これらの目標に対し定めた河道計画は、従来のように低水路を一定の幅で制御するのではなく、堤防防護ラインを基本とし、必要に応じて高水敷利用の観点等から低水路河岸管理ラインを定め、河岸侵食防止箇所の重要度を設定することから、川本来の姿を極力保全しつつ、治水、利水上必要な機能が確保できる河道計画となっている。

札内川における堤防防護ラインは、平成13年9月洪水により札内川富士築堤KP20.2において、「河道計画検討の手引き（平成14年2月発行）」で示されるセグメント1の目安値である40mを大幅に超えた58mの河岸侵食を記録していることから、実績値を採り、60mと設定している。河岸侵食対策として数十mの水制工を施工したとし

ても、河道内には数百mの礫河原を残すことになるため、ケショウヤナギなどの礫河原に依存する動植物を中心とする生態系の生息環境を保全することができる。

このような考え方により、水制工の目的は、低水路幅の抑制ではなく、河岸侵食防止を目的としたものとなったため、近年の水制工は表-2に示すとおり水制長が短いものになっている。

表-2 近年の水制諸元

構造項目	～S57年 8月	H3年 ～10年	H11年～	現在
平面配置	6割近くが水衝部	水衝部の位置、上流側からの滞筋を考慮	〃	水衝部
水制長 L	L=低水路幅が0.2～0.6以上など様々	L=低水路幅が0.2程度	L=低水路幅が0.1程度	〃 (20mを標準)
水制間隔 D	D=Lが1.0～5.0が大半	D=Lが1.5～2.0が目安	D=Lが2.0程度	〃 (40mを標準)
水制天端高	水制高+計画高水深0.2～0.6が大半	根付護岸天端高の0.5～1.0m程度	HWL-計画河床高の2～3割程度	HWL-最深河床高の3割程度
水制工の勾配	1/50～1/200程度が大半	1/100程度	〃	〃
根付けの保護	特に決定していない	連節護岸が基本、天端高は計画高水敷高・0.5m程度	連接護岸を基本、天端高は計画高水敷高を基本	連接護岸を基本、天端高は現況高水敷高を基本

また、護岸についても、①護岸に沿いの流れが卓越し発生した生産土砂により生長した砂州の外縁に沿った偏流による災害の発生、②単調な流れによる魚類の生息環境の悪化など、治水面、環境面からの懸念があるため、根固めブロック等の発生材を護岸前面に設置し、多様な流れを創出する等の工夫をしながら再度災害の防止に努めている。

3. 河道安定化工法の効果

各年代の考え方に基づき、昭和23年から平成25年までに全体で648基（工事履歴で確認されたもの）の水制工が設置された。ここでは各種データの経年変化に着目し河道安定化工法の効果を整理する。

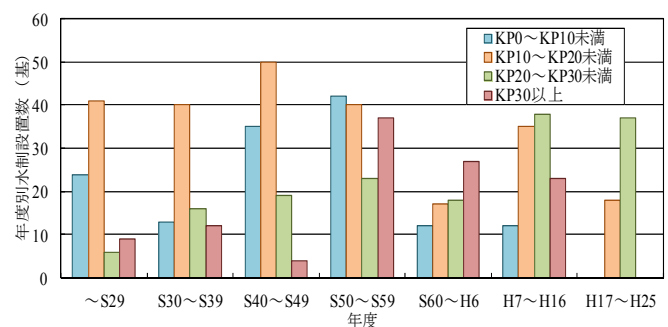


図-2 年度別水制設置数（区間別）

(1) 被災件数の経年変化

札内川における年度別被災延長と南帯橋地点の年最大

流量を表-3 に示す。平成に入ってから1,000m³/s規模の中小洪水に対しては被災延長が少なくなっていることから、これまでの河道安定化対策により河道は概ね安定していると言える。

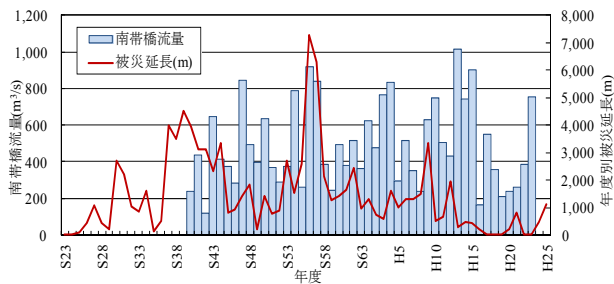


図-3 年度別被災延長と年最大流量

(2) 平面形状の経年変化

写真-1 に示すとおり水衝部が河心へ移動するとともに、高水敷が自然に造成され、単列砂州河道となっている。

平成22年には一部砂州の樹林化が見られる。

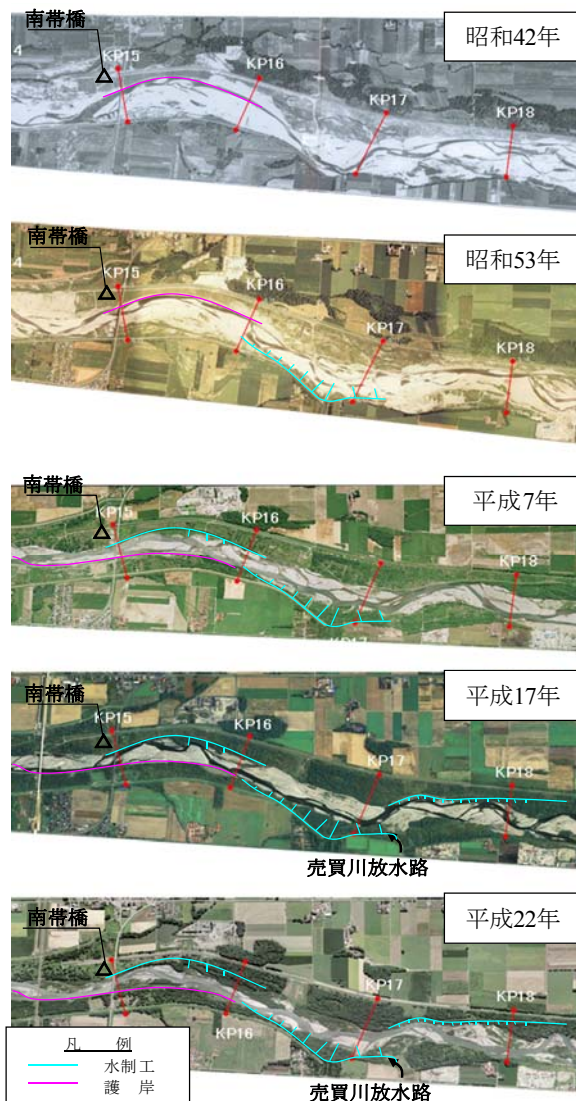


写真-1 南帯橋付近の経年変化

(3) 横断形状の経年変化

図-4に昭和46年を初期河道とした低水路幅の変動量を示す。昭和53年までは主に戸蔭別川より下流の区間で低水路幅が縮小している。その後、平成11年までは全区間で縮小傾向であるが、特に戸蔭別川より上流は平均で約60mも低水路幅が縮小した。これは、図-2に示す年度別水制設置数において見られるように、昭和50年以降、上流区間に設置された水制工が増加し、低水路幅の抑制効果が現れているためと考えられる。その後平成19年にかけて低水路幅は拡幅傾向であるが、上流はまだ縮小幅が大きい。

(4) 縦断形状の経年変化

同じく図-4に昭和46年を初期河道とした平均河床高の変動量を示す。平均河床高については砂利採取の影響が見られるが、その後大きな変動は無い。

4. 現状の課題と取り組み

(1) 樹林化

札内川には北海道指定の天然記念物であるケシヨウヤナギなど礫河原に依存する動植物を中心とする生態系が形成されている。しかし、近年、年最大流量や融雪期流量の減少傾向により、一部区間で礫河原への樹木（主にヤナギ類）の定着がみられ、滞筋の固定化と河床低下が顕著化してきた。また、治水面では流下能力の低下、親水面では「川狩り」に代表される地域の河川利用文化の衰退も懸念されている。

このため、礫河原河川の維持復元を目指し、札内川ダムによる計画放流と流路の一部掘削等の組み合わせによって、流路変動や河床攪乱を促す礫河原の再生の取り組みを行っている。

(2) 河床低下

山口の蛇行論に基づく低水路計画により、低水路の蛇行は抑制され、中小規模の洪水に対しては水制工による河道安定化工法の効果は出ていると言える。

しかし、低水路が直線化することにより、昭和46年と比較し平成23年では、図-5に示すとおり比高差が拡大している箇所が見られ、KP17.0地点では平均年最大水位は約0.8m低下、水面幅は約20m縮小している。それにより、河床の攪乱頻度が減り、砂州の樹林化、滞筋の固定化が進んでいると思われる。

さらに、滞筋が固定化された狭い深い断面に大きな洪水が発生した場合、強大な流水のエネルギーが集中し、水制周りの洗堀や水制裏側からの侵食から水制が被災し、最終的には堤防まで侵食されるおそれがあるという指摘を受けている。

また近年、十勝川流域では各所で鉛直方向に5~8mの河床低下が生じており、河川構造物や河道への大規模

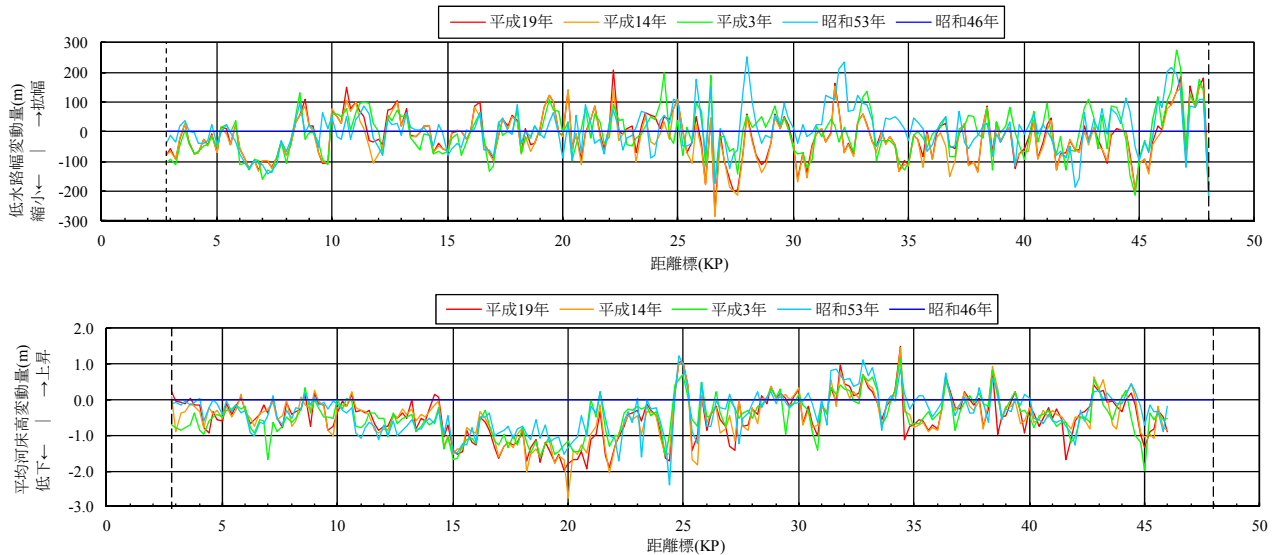


図-4 昭和46年を初期河道とした低水路幅と平均河床高の変動量

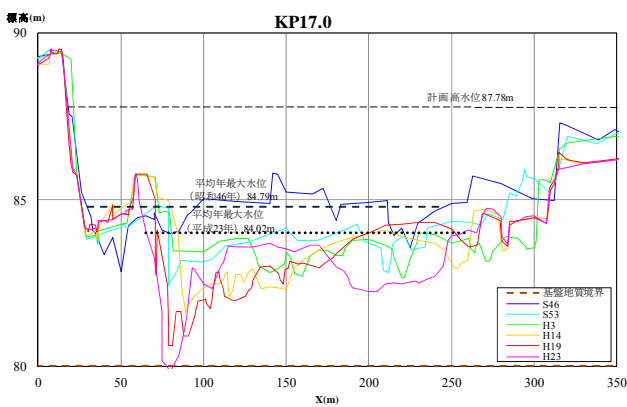


図-5 KP17.0における横断形状の経年変化

な対策を行っている箇所がある。河床低下が進行している箇所はいずれも河床砂礫がなくなり、基盤地質が露出していたが、河床低下量は露出した基盤地質による影響が大きい。そのため、基盤地質の性状や平面的な分布状況を把握し、地質・土砂動態の両面からの河床低下リスク評価を実施した。

その結果、札内川では KP17.0 付近で最深河床部が軟質な基盤地質に近づいていることがわかり、基盤地質に到達することにより、河床低下が進み、滲筋の固定化がさらに助長されるリスクがあることがわかった。

このため、狭い固定流路箇所を是正し、掃流力を低減させることを目標に、流路変動を許容できる最適な川幅を検討する新たな取り組みを実施しているところである。

5. まとめ

急勾配な扇状地河川で流路変動の激しい複列砂州河道の札内川では、河川特有の水衝部のピッチを見つけ、水衝部の河岸河床侵食を防ぐ護岸・水制工とその対岸の土砂調節を行う水制工により流路を固定する河道安定化工法を昭和30年代より実施してきた。

さらに昭和50年代には、護岸と水制工をもって低水路幅をコントロールすることにより、複列砂州河道を単列砂州河道に変えて砂州を安定させる河道安定化工法を実施してきた。

平成10年代からは、環境面にも配慮しながら、堤防防護ラインによる河道計画に基づき河岸侵食対策を実施している。その際、護岸沿いの河床洗堀を抑え、砂州の形成を抑制することにより、砂州の外縁に沿った偏流による再度災害の防止に努めている。

結果、高水敷が自然に造成され、水衝部が河心へ移動するとともに、河道災害件数は減少してきている。これらより水制工を主体とした河道安定化工法の効果はあったと言える。

しかし、近年、年最大流量や融雪期流量の減少傾向、低水路と高水敷の比高差拡大により砂州の樹林化や滲筋の固定化が見られ、大規模な出水による水制工の被災、さらには高水敷や堤防の被災が懸念されている。

それらの課題に対し現在、礫河原再生の取り組みをするとともに、狭い固定流路箇所を是正し、掃流力を低減することを目標に、流路変動を許容できる最適な川幅を検討する新たな取り組みを実施している。

参考文献

- 1)帯広開発建設部：十勝川流域の河道特性,平成 18 年 3 月
- 2)中谷悟朗：十勝川上流の機械掘削工事について,北海道開発局技術研究発表会,昭和 33 年 9 月
- 3)北海道河川防災研究センター：河相変動論,昭和 63 年 6 月
- 4)秋本俊一ら：水制工効果に関する調査報告(第2報),北海道開発局技術研究発表会,昭和 58 年 10 月
- 5)中津川誠ら：水制工の水理機能に関する実験その 2,北海道開発局技術研究発表会,平成 5 年 2 月
- 6)加治昌秀ら：洪水時における水制工の水理機能,北海道開発局技術研究発表会,平成 5 年 2 月
- 7)熊木朋子ら：札内川における工事施工後の自然環境変遷調査について,北海道開発局技術研究発表会,平成 16 年 2 月