

連続帯工群を敷設した直線河道における 交互砂州の挙動

STUDY ON FLUCTUATIONS OF ALTERNATE BARS THROUGH A SERIES OF RIVERBED GIRDLES IN STRAIGHT CHANNEL

早川博¹・後藤悠和²・水上雄樹³

Hiroshi HAYAKAWA, Yuuwa GOTO and Yuuki MIZUKAMI

¹正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²非会員 (株)開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

³非会員 国土交通省東北地方整備局 (〒980-0802 仙台市青葉区二日町9番15号)

Riverbed girdles are one of the consolidation works to prevent bed-degradation and local scour around foundation of revetment in middle and small river channels. This study deals with fluctuations of alternate bars through a series of riverbed girdles in a straight alluvial river. Although the plane shape of riverbed girdle is basically set straight across the channel, we test some kinds of upstream- or downstream-pointing V-shaped weirs for the purpose of maintaining the alternate bars under this channel condition. In order to estimate the functions of a series of riverbed girdles, we apply two-dimensional numerical model Nays2DH and verify the effects of maintaining alternate bars by the experimental study. In cases with series of upstream-pointing V-shaped type with interior angle 80 degree, it is shown that the alternate bars are maintained without becoming extinct.

Key Words: riverbed girdle, alternate bars, Nays2DH, movable bed experiments, bed fluctuation

1. はじめに

国内の直轄一級主要河川の多くは河道整備が進んでおり、最近の局所的集中豪雨による河川災害は、それらの河川に合流する中小河川において多く見られる。中小河川は河川改修に合せて合流点の移動や河道の直線化等により河道延長が短縮した結果、河道が急勾配化し、河床の低下が進んでいる。釧路川の支川、鑑別川の合流部は1988年に合流点の移動と蛇行河川の捷水路化による合流点処理が施され、河床勾配 I が改修前の $I=1/230$ から $I=1/200$ へとやや急になった。合流部の釧路川本川の河床低下が年々進んだ事も相まって、鑑別川の河床低下が進み、特に合流部から約900m上流の下鑑別橋の橋脚周囲の護床工前面が2m以上も低下するまでに至っている¹⁾。また、中小河川の急激な河床低下の例として河床砂礫の流失に伴い基岩の軟岸が露出する河川が挙げられる²⁾。釧路川の支川、久著路川は急激な河床低下に伴って釧路湿原への土砂流入が顕著となり、その抑止対策が進められている³⁾。

このような中小河川の河床低下対策として河床を横断

する形で設置される床止め工があり、一般に構造物の上・下流の水位落差の大きい落差工が河床低下防止を目的とし、落差の低いあるいは落差がない帯工は洪水の乱流による局所洗掘の防止を目的とされる⁴⁾。落差工は河床低下対策として有効な工法であるが、落差ゆえに水生生物の移動を困難とし河川生態系を分断することになる。一方、落差の小さい帯工は単独では直下流河床の局所洗掘が進行するため⁵⁾、河床低下対策として帯工を群として配置することが考えられる。

帯工の平面形状は、本邦の設計手引きでは流れの偏流とそれによる局所洗掘を生じさせないために河岸と直交する直線を基本⁴⁾とするが、米国では河岸に対して角度をもつV字型やU字型、A字型、W字型、J字型等、多様な形状の横断構造物が河道安定工法として用いられている^{6,7)}。原田ら⁸⁾は小型水理模型実験で直線型以外にA型と河道中央部が開いたハ型の帯工について検討し、その結果を踏まえて中央部は直線で左右岸へ斜め部材となる構造を基本型とした帯工の効果を実河川スケールに近い大型水理模型実験で検証している⁹⁾。これらは帯工単独での機能評価であり、帯工群としての効果までは検討していない。

一方、帯工群の機能として阿部ら¹⁰⁾は帯工群敷設によって比較的急勾配の中小河川で形成される交互砂州の挙動が抑制できることを実験的に明らかにし、木村ら¹¹⁾は配置間隔を河川の自由蛇行理論から導出している。

帯工周辺の流れは常・射流混在の複雑な流況を呈するが、内田ら¹²⁾は落差の小さい帯工の場合には局所洗掘現象を鉛直二次元数値計算モデルである程度再現できることを示しており、数値解析モデルによる河床変動解析が可能と考えられる。

以上の既往の研究成果を踏まえ、本研究は前述の釧路川支川鑑別川において、一旦河床低下した区間に連続帯工群を敷設して河床高を元の状態に戻した場合に、瀬や淵をもつ交互砂州が形成される河道へ復元され、平均年最大流量（低水路満杯流量）程度の洪水で河床形態が維持されるかなど、帯工の平面形状の違いによる河床変動特性も考慮し水理模型実験と二次元河床変動解析モデルiRIC Nays2DH¹³⁾によって交互砂州の挙動を検討した。

2. 鑑別川の河床低下対策

釧路川の支川、鑑別川の2条7号区間（釧路川合流点～下鑑別橋）は1985年から1988年にかけて河川改修が実施され、蛇行河道を直線河道にして釧路川との合流点（旧KP72.8）を下流側KP72.0に切り替えた（写真-1）。改修によって計画河床勾配が $I=1/200$ へやや急になって直線化され、更に図-1に示すように低水路河岸の護岸・護床工の敷設が河道中央部の移動床を河床低下させたと考えられる¹⁾。ただし、下鑑別橋上流の約300m地点に床止工が設置されてこの区間は河床低下しておらず、写真-2の橋脚周囲の護床工直下が更に局所洗掘を受けている。

この河床低下対策として、現状の河床を計画河床高まで引上げ、再度の河床低下を防止するため帯工群の敷設が導入された。帯工は河床高の落差が小さいため、上・下流の水生生物の移動を分断する影響が少ない。当該区間の低水路幅 B が $B=30(\text{m})$ であり、現状の河床高を考慮して帯工群の河床勾配を $I=1/167$ とし、帯工を挟む上・下流の護床工を含め幅 5m で落差 0.3m の帯工を間隔 $L=50\text{m}$ で敷設する。高水流量は $Q=510(\text{m}^3/\text{s})$ であるが、河道特性を分析・把握する代表流量として平均年最大流量（低水路満杯流量）が交互砂州などの河床形態を規定する流量である¹⁴⁾ため、平均年最大流量 $Q=78.2(\text{m}^3/\text{s})$ 、河床材料の平均粒径 $d_m=32.5(\text{mm})$ 、粗度係数 $N=0.027$ ¹⁾として等流水深 h_m を求め、図-2の黒木・岸の領域区分図¹⁵⁾にプロットすると、単列砂州領域に◆記号は位置し、現状の河道条件（▲： $I=1/280$ ，移動床川幅 $B'=15\text{m}$ ）では非発生領域にある。したがって、当該区間は交互砂州の形成が想定されるため、瀬や淵をもつ交互砂州が形成される河道へ復元し、継続的に交互砂州を保持できる方策の検討が必要となる。

そこで、本研究では第3章では阿部ら¹⁰⁾の知見を参考に、河岸と直交する直線を基本とする帯工群を敷設した場合の交互砂州の挙動を水理模型実験で観察し、二次元河床変動解析モデルNays2DHでその再現性の検証を行う。第4章では河床変動解析モデルを適用し、異なる平面形状の帯工群を敷設した場合の交互砂州の挙動から、交互砂州を継続的に保持し得る帯工の平面形状を選定し、水理模型実験によってその再現性の検証を行う。



写真-1 鑑別川合流部対象区間

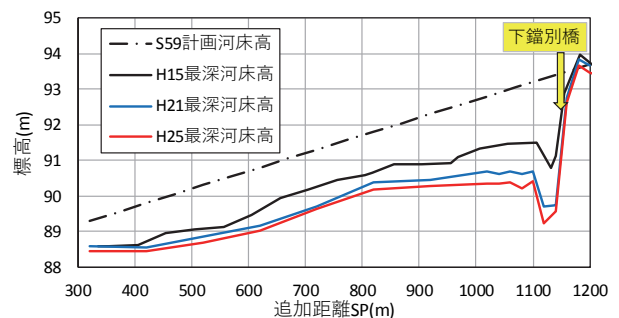


図-1 鑑別川縦断形の経年変化



写真-2 下鑑別橋の護床工（2013年撮影）

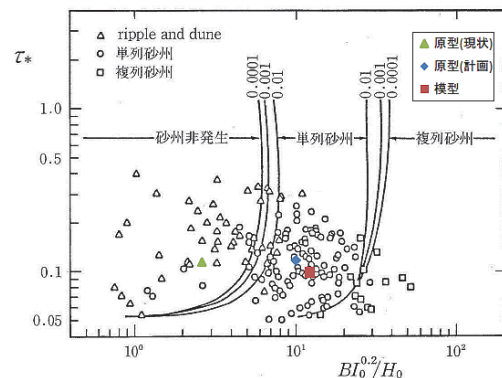


図-2 黒木・岸の領域区分図

3. 標準型帯工群による交互砂州の挙動

標準型帯工群による交互砂州の挙動を把握するため、まず、鑑別川を原型河川とおいた歪模型水理実験を行い、その結果を二次元河床変動解析モデルNays2DHの解析結果と比較し、その再現性の検証を行う。

(1) 歪模型実験

歪模型水理実験手法¹⁶⁾は実験スペースの制約から原型と模型の水平縮尺と鉛直縮尺の比を異にするもので、移動床河川の河床変動を検討する場合に、河床形態の領域区分を支配する無次元パラメータ、例えば無次元掃流力 τ_* や水路幅 B と水深 h の水路幅・水深比 B/h を原型と模型とで一致させることで、河床形態の相似性や再現性に重みをおいた手法である。流れの相似条件(フルード則)は、歪比(=水平縮尺/鉛直縮尺)が大きくなると一致しないため、交互砂州などの鉛直二次元流れ場の河床変動に関しては良好な再現結果が得られているが、段落ち流れ部などの3次元性が強い流れ場では再現結果の補正が必要となる。本研究の帯工周辺では局所洗掘が生じており、その洗掘深を原型値に戻す際には鉛直方向の補正が必要となるが、交互砂州の砂州長など水平方向の原型値換算に補正は必要ない。なお、本論文では河床変動解析モデルNays2DHの再現性に注目するので、原型値への換算は行わない。

歪模型の相似条件は前出の黒木・岸の中規模河床形態領域区分図の無次元パラメータ、無次元掃流力 τ_* (縦軸)と $BI^{0.2}/h$ (横軸)を以下のように一致させる。

$$\tau_* = \frac{h_P I_P}{s_P d_P} = \frac{h_M I_M}{s_M d_M} \quad (1), \quad \frac{B_P I_P^{0.2}}{h_P} = \frac{B_M I_M^{0.2}}{h_M} \quad (2)$$

歪比 n は $n(=B_R/h_R)$ とおき、模型水路幅 $B_M=0.3\text{m}$ 、原型河川の低水路幅 $B_P=30\text{m}$ より、水平縮尺比 B_R は $B_R=B_P/B_M=100$ となる。ここで、添え字 P と M は原型と模型、 R は縮尺比である。原型河川の河床材料の平均粒径 $d_P=32.5(\text{mm})$ に対し、実験砂に東北珪砂4号($d_M=0.75\text{mm}$)を用いると、砂の粒径比が $d_R=43.3$ 、水中比重比が $s_R=s_P/s_M=1.0$ なので、式(1)、(2)を整理して代入すると

$$n^{-6/5} = \frac{d_R s_R}{B_R} \therefore n = \left(\frac{d_R s_R}{B_R} \right)^{-5/6} = 2.07 \quad (3)$$

となる。水路勾配の縮尺比 I_R の逆数が $n(=1/I_R)$ であるので、原型河川の河床勾配 $I_P=1/167$ より模型水路の勾配 I_M は $I_M=1/83.1$ となる。また、流量の縮尺比 Q_R から

$$Q_M = s_R^{-1/6} n^{19/30} B_R^{-5/2} Q_P \quad (4)$$

となる¹⁶⁾ので、模型流量 Q_M は原型の平均年最大流量 $Q_P=78.2(\text{m}^3/\text{s})$ より $Q_M=1.22 \times 10^3(\text{m}^3/\text{s})$ となる。

得られた模型の水理条件から等流水深 h_{mM} を模型河床の粗度係数 N_M を $N_M=0.015$ ¹⁷⁾とおいて図-2に■記号でプロットすると、原型値と一致していないが、近傍の単列砂州領域に位置している。この原型値との差は粗度係数の相似条件¹⁶⁾を満足させることが難しいためである。

(2) 実験結果

歪模型水理実験は水路長14m、水路幅0.3mの可傾斜水路を水路勾配 $I_M=1/83.1$ に設定して砂を初期河床高7cmに敷き均し、平均年最大流量相当 $Q_M=1.22 \times 10^3(\text{m}^3/\text{s})$ を定常流で通水し、上流端で給砂している。帯工模型は水平縮尺比 $B_R=100$ から長さ5cm、幅30cm、高さ7cmの発泡スチロールで作成し、帯工上面と初期河床高を同じくし、帯工による河床高落差は設けない条件である。

帯工群の実験に先立ち、帯工なしの交互砂州形成実験を実施した結果、通水約30分で交互砂州形状は平衡状態に達し、平均砂州長 $L_S=1.26\text{m}$ 、平均砂州波高 $H_S=2.7\text{cm}$ であった。図-3は流下方向10cm、横断方向1cm間隔で計測した河床高等高線図で初期河床高からの変動高で表示している。帯工なしでは水路上流端から7m~10.5m区間に明瞭な交互砂州が形成されており、原型河川では水平縮尺比 $B_R=100$ より砂州長約130m前後の砂州が形成されると想定される。

次に、上流端から9.0m地点に帯工1基を敷設した場合も交互砂州は形成された。本論文では交互砂州が帯工を通過する前後の砂州長、砂州波高の変化を調べるため、着目する砂州の先端が帯工に達した時点(T1)、砂州長の半分まで通過した時点(T2)と1個の砂州が通過し終えた時点(T3)において一旦止水し、河床高を繰り返し計測した。砂州が最上流の帯工を通過し終えたT3時点の河床高について帯工1と帯工なしを比較すると、帯工を

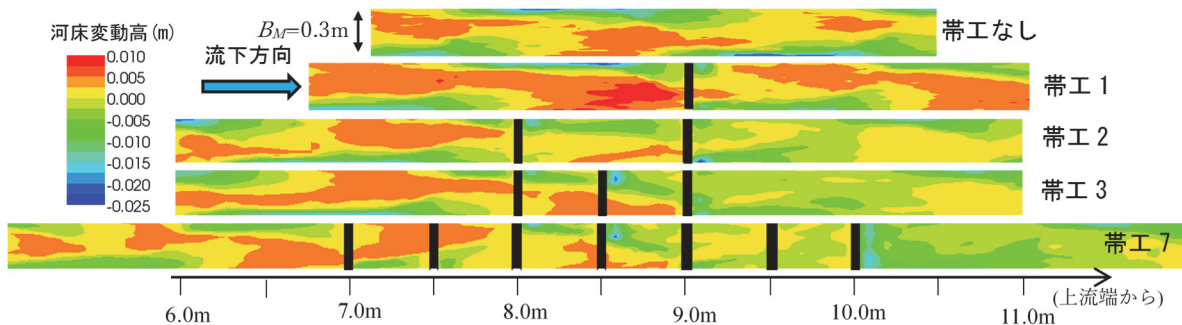


図-3 歪模型水理実験による交互砂州の挙動 (T3時点)

通過した砂州長が短くなっている。帯工2と帯工3の実験は、帯工間隔を砂州長とほぼ等しい場合とその半分にした場合の比較である。阿部ら¹⁰⁾が指摘したように帯工間隔 L が $L/B < 4$ の条件では、砂州長 L_s が帯工間隔 L の影響を強く受け、帯工2の場合は $L_s \approx L$ と短くなっている。また、 $L/B < 1.5$ では複列砂州の形成が指摘され、帯工3では図-3で判読できない規模の複列砂州との共存が観察された。帯工を7基敷設した帯工7では、帯工群を流下するに連れて交互砂州形状が不明瞭になり、最下流の7基目を通過後は、帯工直下の局所洗掘が進むものの、更にその下流域で交互砂州が再形成されていた。

図-4は交互砂州が帯工群を通過した際の砂州形状の変化を示し、T1～T3時点の帯工群の上流、群中と下流に存在する砂州全ての平均値である。なお、帯工1は1基だけなので帯工群内はない。砂州長、砂州波高共に、帯工を通過することによって砂州長は短くなり、波高も低くなることが確認された。また、砂州波高は帯工上流の砂州でも帯工なしより低く、帯工の存在が交互砂州波高の発達を抑制していることがわかる。

(3) 二次元河床変動解析モデルによる再現性の検討

帯工群による交互砂州の挙動を把握するため、本論文では二次元河床変動解析モデルiRIC Nays2DH¹³⁾を帯工群周辺の複雑な局所的流れ場の河床変動計算に適用できるか検討する。iRIC Nays2DHの詳細は参考文献に譲り本論文では詳述しないが、本モデルは流れ場を二次元浅水流モデルで近似しているため、落差工のような落差のある構造物周辺の流況再現には課題が残るものの、落差の小さい帯工へは適用の可能性が高い。

計算条件は歪模型水理実験に則り水理諸量を与え、移流項の差分法にCIP法を、流砂は均一粒径の掃流砂で流砂量式に芦田・道上式を、掃流砂量ベクトル式は渡邊式

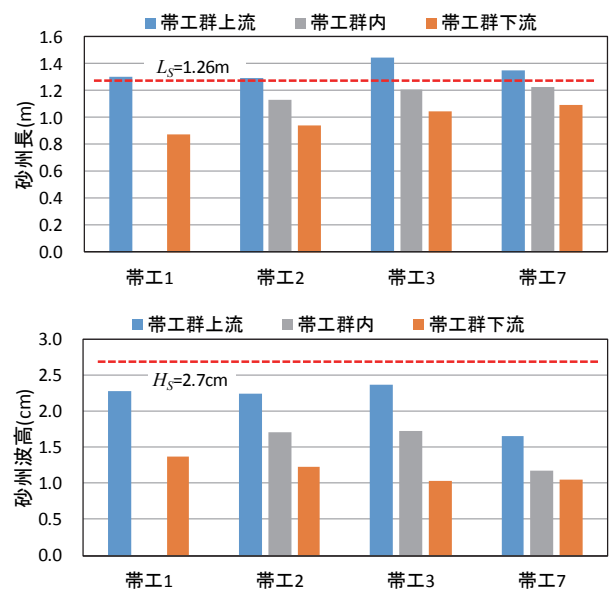


図-4 帯工群による交互砂州形状の変化

を、乱流モデルはゼロ方程式モデルを適用した。計算格子間隔は水路長15mについて流下方向2.5cm、横断方向1cmとし、帯工は2格子(5cm)を固定床と設定した。この固定床とは固定床高が初期河床高と同じで、固定床上に堆積はするが、初期河床高以下に変化しない格子なので、落差のない帯工とみなせる。また、下流端の境界条件は等流条件を与え、水理実験と比較のため非周期境界条件で計算した。

計算結果は通水時間30分以上になると砂州長、砂州波高が実験値と同様に発達し、図-5は最上流の帯工地点に交互砂州先端が到達した時点の河床高（初期河床からの変動高）を比較している。帯工なしでは計算は実験の砂州長と同程度になり、実験より砂州前縁線が明瞭で砂州形状も砂州個体間の違いは少ないが、良好に再現している。帯工の影響は、1基だけの帯工1では砂州波高の低減

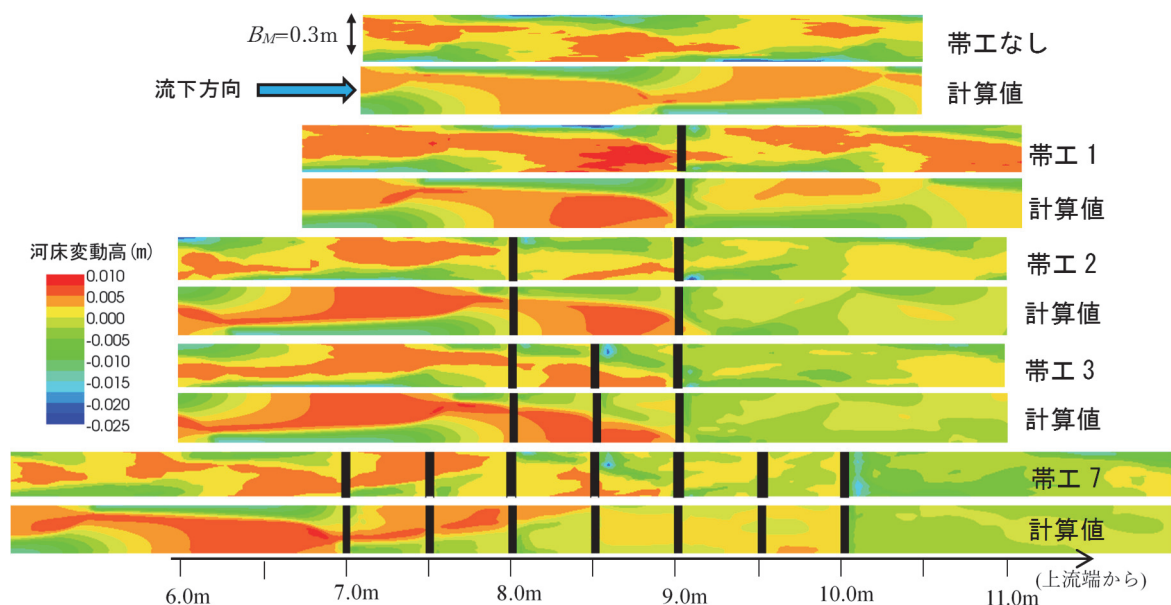


図-5 iRIC Nays2DHによる交互砂州の挙動の較 (T3時点)

効果が再現できている。2基の**帯工2**では実験と同様に砂州長が帯工間隔と同程度になる現象を再現し、帯工間隔を狭くした**帯工3**では、中間にある帯工周辺の河床を良好に再現している。**帯工7**の7基の帯工群の場合は、帯工群中の砂州長が実験より長くなり、砂州形状の変化に及ぼす帯工の影響が弱い。一方、帯工より上流域の砂州は実験と同じく2m程度まで砂州長が延びる傾向を再現している。帯工群通過後の状況は実験と同じく砂州形状が不鮮明である。

以上、実験と計算の比較・検討から、落差のない帯工群周辺の河床変動はiRIC Nays2DHによる二次元数値解析で概ね再現可能と判断される。なお、帯工敷設数が増えるに従い、帯工群中の交互砂州が平坦となって不鮮明になる。その結果、帯工直下の洗掘現象が卓越し始めるため、二次元解析による再現が難しくなっている。

4. 平面形状の異なる帯工群による検討

帯工は河岸と直交する直線を基本⁴⁾とするが、様々な平面形状の帯工^{6,7,8)}が提案されている。本論文では表-1に示す6ケースについて検討し、帯工群として敷設する場合に、帯工群中を通過する交互砂州形状が維持され、河川生態系の保全に求められる瀬や淵をもつ多様な河床形態を保持するとの観点で評価する。なお、帯工本来の河床低下抑制機能を満足することは必須である。

(1) 帯工単体周辺の河床変動

帯工の平面形状による比較は前章と同じ平均年最大流量相当の実験条件を与えた数値計算である。標準型のCase0は帯工直下に横断方向一様に洗掘し深掘れが生じている。また、帯工上流に堆積し易い分、帯工下流に砂が供給され難い。Case1, 2の上流に頂点をもつV字型では、河道中央部に流れが集中して洗掘され易く、両岸側に堆積する傾向である。V字型の中心角が広いCase2ではCase0と同じく帯工に沿って直下部が一様に洗掘されるが、Case1の特性も持ち合わせる。頂部を下流においた逆V字型のCase3, 4では流れが両岸側へ向かい、河岸沿いが洗掘される一方、河道中央部は堆積傾向にあ

表-1 帯工の平面形状

	形状	角度	平面形状
Case0	標準		
Case1	V字	80°	
Case2	V字	140°	
Case3	逆V字	80°	
Case4	逆V字	140°	
Case5	斜め	40°	
Case6	斜め	70°	

流下方向 → 河床高：低 高

る。V字型の中心角が広いCase4はCase0と同じく帯工直下が一様に洗掘される。帯工を河岸に対して斜めに敷設したCase5, 6の場合は、帯工が上流に突き出した河岸の下流側が洗掘され、対岸が堆積傾向にある。帯工と河岸の交角を直角に近づけたCase6はCase0と同様に帯工直下が一様に洗掘される。

(2) 帯工群による河床変動

標準型帯工と同様に、河道に各種帯工群を敷設した場合の交互砂州の挙動について検討する。図-6は前章と同じく帯工7基の帯工群を敷設した河道における交互砂州の挙動を記す。図中の河床高等高線図は上流端から9.0mにある1番目の帯工に砂州が到達した時点(T1)からその砂州が帯工群を通過し、2番目の砂州が帯工に到達する時点(T3)、3番目の砂州が到達する時点(T4)までの状況である。標準型のCase0は帯工群を通過中に交互砂州が不鮮明になり、帯工群の下流域の砂州は認められない。V字型帯工は標準型と比較すると帯工群中を通過する交互砂州の変形は少なく、Case1のT4時点でも帯工群中の交互砂州は残存し、帯工群の下流域にも連続する交互砂州が認められる。Case2は標準型と同様な挙動である。逆V字型帯工のCase3はCase1と同じく斜め型帯工のCase5も同様であり、帯工群中において交互砂州を維持させるためには、帯工は河岸に対して40°程度の傾きが必要になる。

以上の結果を整理すると、帯工群における交互砂州の挙動は、河岸に対して傾きを持つ帯工群が砂州を維持し

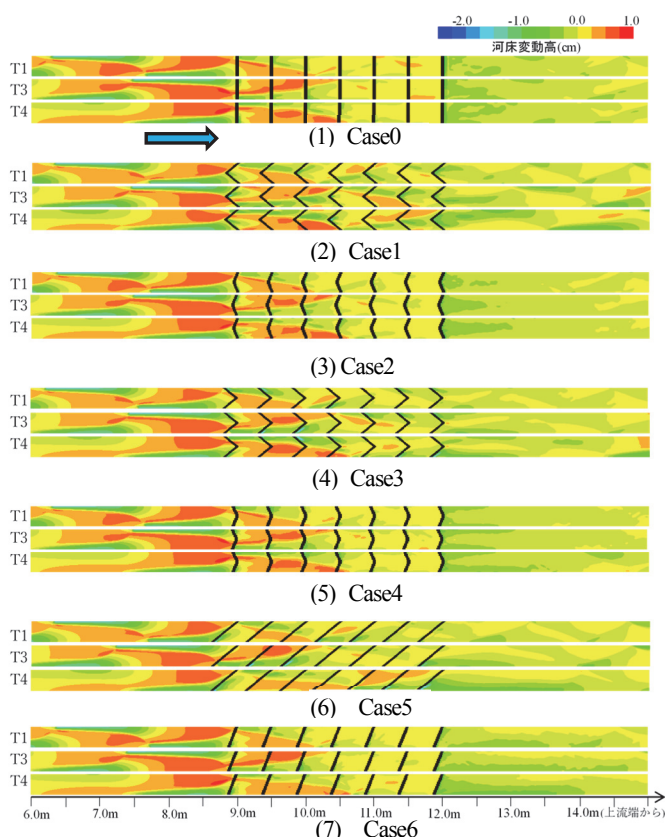


図-6 各種帯工群における交互砂州の挙動

得ることが示された。しかし、逆V字型や斜め型帯工は河岸沿いが洗掘傾向にあるので、Case1のV字型帯工群が河岸の洗掘も抑制され、最良と判断される。

(3) 水理模型実験による検証

Case1のV字型帯工群が数値解析による検討では最良と判断されたので、同じ水理条件の水理模型実験による検証を行う。図-7は上段が通水80分後の河床コンター図と左右岸沿い測線の縦断面図である。下段の計算は実験の交互砂州の位置に近い通水54分後の結果である。計算結果の交互砂州平面形状は実験を良好に再現している。なお、左右岸沿いの縦断面図9.5m付近において、計算値が実験値より帯工直下の洗掘を過大に評価しているのは、平面図の砂州先端位置が実験と計算でずれているためであり、下流に位置する実験の方が埋め戻されたと考えられる。また、計算結果と違いが大きい最後の帯工直下12m付近の洗掘状況は、実験水路が14m地点で下流端となっている影響を受けているためである。

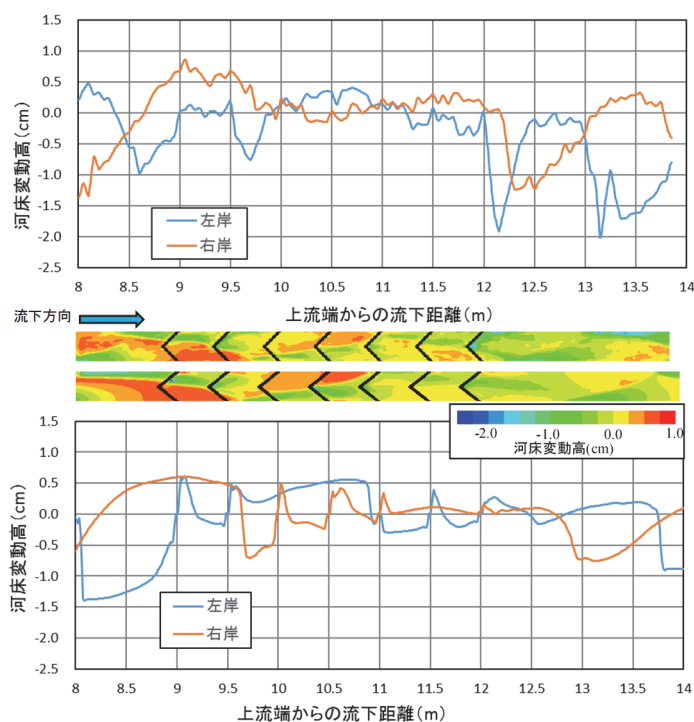


図-7 V字型帯工群における河床高の比較(上：実験，下：計算)

5. おわりに

本研究は河床低下した沖積地中小河川を元の河床高まで戻し、河床低下対策として帯工群を敷設する河道において、再形成される交互砂州の挙動を検討した。二次元河床変動解析モデルによる標準型帯工群の数値解析は水理模型実験結果を良好に再現できることが確認された。また、種々の平面形状の帯工群に対して検討した結果、標準型よりV字型帯工群において交互砂州を維持し得ることが示され、瀬や淵からなる多様性の高い河床形態を保持できる可能性がある。しかし、実河川スケールにおけるV字型帯工群の効果解明は今後の課題である。

謝辞：本研究は(一財)河川財団河川整備基金27年度助成事業の支援を受けている。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部：釧別川河床低下対策検討資料，2014。
- 2) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：軟岩河川の侵食特性調査マニュアル(案)，2015。
- 3) 釧路湿原自然再生協議会：第14回土砂流入小委員会資料，2011。
- 4) 財団法人国土開発技術開発センター：床止めの構造設計手引き，山海堂，pp.90-95，1998。
- 5) 道上正規・鈴木幸一：床固めの水理機能に関する研究，京大防災研究所年報，第32号B-2，pp.1-14，1982。
- 6) U. S. Dept. of Agriculture Portland, Oregon: DESIGN OF ROCK

- WEIR, Technical Notes Engineering-NO.24, 2000.
- 7) D. M. Mooney, C.L. Holmquist-Johnson and E. Holburn: Qualitative Evaluation of Rock Weir Field Performance and Failure Mechanisms, RECLAMATION, Managing Water in the West, U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center, Denver, Co, 2007.
- 8) 原田守啓・高岡広樹・大石哲也・萱場祐一：新しい河道安定工法の実用化に向けた調査研究の取り組み，河川技術論文集，第19巻，pp.87-92，2013。
- 9) 原田守啓・高岡広樹・大石哲也・萱場祐一・藤田裕一郎：平面形状の異なる帯工周辺の河床変動特性に関する実験的研究，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，I_1177-I_1182，2013。
- 10) 阿部宗平・渡辺正幸・泉岩男・池谷浩：単列砂礫堆形成領域での横工の効果，新砂防，121，pp.27-34，2007。
- 11) 木村喜代治・高橋迪夫・長林久夫：流路工における床固工の間隔に関する研究，新砂防，Vol.43，No.2(169)，pp.20-25，1990。
- 12) 内田龍彦・福岡捷二・渡邊明英：床止工下流部の局所洗掘の数値解析モデルの開発，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.45-54，2004。
- 13) iRIC Project : Nays2DH, <http://i-ric.org/ja/software/18/>. (閲覧日：2016年3月)
- 14) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，p.27，1994。
- 15) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96，1984。
- 16) 内島邦秀・早川博：交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則に関する研究，土木学会論文集，No.479/II-25，pp.71-79，1993。
- 17) 早川博・宮本大・夏井皓盛：屈折蛇曲する岩床河川における砂州の移動停止条件に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp.781-786，2011。

(2016. 4. 4受付)