

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

CHARACTERISTICS OF BED DEFORMATION AROUND A RIVERBED GIRDLE
FOR DIFFERENT PLANE SHAPE

原田守啓¹・高岡広樹¹・大石哲也¹・萱場祐一²・藤田裕一郎³
Morihiro HARADA, Hiroki TAKAOKA, Tetsuya OISHI, Yuichi KAYABA and Yuichiro FUJITA

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム (〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6)

³フェロー 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Riverbed girdles are constructed to prevent bed-degradation and local scour around foundation of revetments in small and medium-sized rivers. The plane shape of riverbed girdle is basically set straight across the channel, but some kinds of upstream-pointing weir have been used for the purpose of channel stabilization in North-America. Local scour downstream of the riverbed girdle make drop and disturb the passage of aquatics at normal stage of water. In this study, effects of the plane shape of a riverbed girdle on movable-bed are experimentally examined. Three types of plane shape are examined, straight type, upstream-pointing type and split type. In cases with upstream-pointing types and split types, large scour holes made by parallel helicoidal motion of flow are observed. It is shown that apex angle have an effect on local scour at the tip of riverbed girdles.

Key Words : riverbed girdle, local scour, plane shape, movable bed experiments

1. はじめに

帯工は、主に中小河川において河床高を維持するとともに、流水と流砂を横断方向に整え、局所洗掘を防止する目的で、河床を横断する形で設置される、落差の低いあるいは落差を設けない構造物である。

著者らは、我が国の河川延長の大部分を占める中小河川の河道改修や維持管理における課題を抽出するとともに、多種多様な中小河川の類型化を試みており¹⁾、多数の中小河川の現地調査から、河床材料が流失し河床低下傾向を示している河川を多く確認した。併せて、帯工下流に生じた落差が、水生生物の移動阻害を生じている状況が散見され、今後解決すべき課題の一つと考えた。

しかしながら、帯工が河床低下を防ぐ機能は、帯工直下流が河床低下しはじめて落差を生じたときに初めて発揮されるもの²⁾であることから、帯工は本質的には直下流に落差を生じる構造物である。

道上ら³⁾は、床固め工上下流の河床低下特性、直下流の局所洗掘過程及び時間変化特性を一連の研究により明

らかにしており、潜り噴流により急激に洗掘が進んだのち、底面付近に逆流域を有する波状跳水様の流れに移行して洗掘孔が埋め戻されることを交互に繰り返しながら、全体としては洗掘深と洗掘範囲が拡大することを示している。また、神田ら⁴⁾は護床工下流の洗掘特性について詳細に調べ、洗掘が拡大する時間変化特性は道上ら^{2,3)}が整理したものと同様であることを確認している。近年では、横断構造物下流の洗掘過程や洗掘形状を鉛直二次元の数値解析により精度良く再現・予測した成果⁵⁾も報告されており、河岸と直角に設置された構造物近傍の河床変動については、知見の蓄積が相当進んでいる。

また、床止め工の配置に関連する研究として、砂州の移動に与える影響^{6,7)}、設置間隔が縦断的な河床変動に与える影響に関する研究⁸⁾なども報告されている。

帯工の平面形状については、我が国の技術体系では、流れの偏流とそれによる局所洗掘を生じさせないため、河岸と直行する直線が基本⁹⁾であるが、米国では河岸に対して角度がかなり上流向きにA型の横断構造物が河道安定工法として用いられている(例えば、USDA Rock

weir¹⁰⁾, Rosgen Cross Vane¹¹⁾). Klingeman¹²⁾は、 Λ 型の堰の2辺のなす挟角を30度から180度(直線型)まで変化させた移動床実験により、挟角90~120度では最大洗掘深は増大するが、挟角が60度を下回るあたりから、最大洗掘深が減少し、その発生位置も下流側にシフトする結果を示している。一方、国内のいくつかの中小河川において、上下流の河床を連続した状態に保ちながら上流側の河床高を維持する目的で、 Λ 型の中央部を連結しないハ型の構造物を河床に設置した事例がみられる。

そこで本研究では、帯工の平面形状の違いによる河床変動特性に着目し、(1)直線型、(2) Λ 型、(3)ハ型の帯工について、典型的な中小河川との相似を意識した移動床実験により帯工周辺の河床変動特性を把握し、平面形状及び折り曲げ角度の効果について検討するとともに、平水時に落差を生じにくい帯工の形状について検討した。

2. 実験方法

(1) 実験の概要

実験水路は、長さ8m、底面幅30cm(アルミ製)、側壁高さ20cm(アクリル製)の長方形断面水路である。水路上流端を0mとして、2mから4mの間及び最下流端の1m区間を、水路床より約10cmの高さまで板材を重ねて固定床区間とし、その間の3m区間を深さ約10cmの移動床区間として設定した。移動床区間には、粒径0.6mmのほぼ均一な珪砂(比重2.6、水中安息角34°)を敷き詰め、固定床区間には同じ砂を塗布した粗度板を設置した。水路床勾配 i_b は1/200とし、流量は8.0l/sとした。

これらの実験条件は、扇状地区間における一般的な単断面の中小河川との相似を意識して設定したものであり、実河道との長さ比 h_r を40倍とすれば、河道幅12m、河床材料の代表粒径24mmの河道に、流量比 $Q_r = h_r^{3/2}$ として流量80m³/s程度の出水が流下する状況を模したものとなる。

給砂条件は、局所洗掘の進行過程を明瞭に把握するため、無給砂とした。さらに、帯工上流区間の水路床から供給される流砂の影響を避けるため、実験の対象とする帯工模型は、移動床区間の上流端から50cmの位置に設置して実験を行った。実河川においては帯工上流側区間の河床が低下する過程で、帯工付近に土砂が供給されるが、本実験では給砂がないため、帯工上流側の河床低下がかなり進行した条件を模擬した条件である。一方、下流側については、移動床区間下流端の河床高は固定されていることから、下流端に帯工等の横断工作物が存在し、機能している状態を模擬した条件となっている。

実験ケースは、帯工模型の形状により設定し、各ケースについて、通水開始後10分おきに6回の計測を行い、各計測において、水路中心における水位縦断分布と、1cmメッシュでの河床高を計測した。

水位の計測はサーボ式水位計(KENEK製)、河床高の計測はレーザー変位計(KEYENCE製)により行い、計器を

表-1 帯工模型の形状

ケース	基本形状	角度(狭角)	概要図
Case1	直線型	180度	
Case2	Λ 型	90度	
Case3	Λ 型	53度	
Case4	ハ型	90度	
Case5	ハ型	53度	

固定した台車を縦断方向に往復させながら、計器の出力電圧をAD変換カード(KEYENCE製)を介してノートPCにより記録し、予め用意した検定式により水路床からの比高に換算して整理した。

河床高の計測中は、河床変動を進行させないため、水路下流端をせきあげ、砂の移動を停止させて計測を行った。また、帯工模型周辺の三次元的な流れの構造を砂粒の移動状況から考察するため、ビデオ撮影を実施した。

(2) 帯工模型の形状

帯工模型の形状は、表-1に示すとおり、直線型1ケース、 Λ 型2ケース、ハ型2ケースの計5ケースであり、 Λ 型とハ型については、中央での折り曲げ角度(狭角)が異なるケースについて実験した。折り曲げ角度はKlingeman¹²⁾の実験において洗掘深が最大となった90度と、より洗掘が少ないことを期待した53度とした。これらは構造物が河岸となす角度を慣例的に勾配表示した際の、1割勾配(1:1.0)、2割勾配(1:2.0)にそれぞれ対応する。

横断方向はすべてのケースについて水平とした。帯工模型の材料は、厚さ18mmの木材を加工して製作した。断面は長方形を基本としたが、中央に開口部を有するハ型については、先端部の角を取り丸くした。

ハ型の開口部の幅は、全幅に対して20%(6cm)とした。開口部の幅、帯工の断面形状等は、河床変動特性に与える影響が大きいパラメータと考えられるが、本研究ではまず平面形状の違いに着目してケース設定を行った。

3. 実験結果及び考察

(1) 通水時の流況と河床波の発生状況

全ケースに共通して、通水開始直後から移動床区間全面に砂堆が発生し、水位の上昇がみられた。砂堆の波高は通水開始直後が最も大きく最大2cm程度であったが、時間の経過に伴い上流側の河床が低下するにつれて、波高が低下し、移動速度も遅くなった。砂堆の間隔は平均して20cm程度であった。

河床波により生じた水位上昇の影響を検討するため、各計測時の水位縦断分布及び河床高分布から縦断的なエネルギー勾配を算出した結果、移動床区間における砂堆発生後のエネルギー勾配は1/350から1/400程度であると推定された。移動床区間の洗掘部を除く平均水深は7cm程度であり、摩擦速度 U^* は4.1~4.4cm/s、流速係数 ϕ は約9で、移動床区間の砂粒に対する無次元掃流力 τ^* は0.18~0.20であることから、本実験条件は概ね砂堆の発生領域¹³⁾にあることが確認される。

単位幅流量から求めた限界水深 h_c は4.2cmであり、帯

工模型越流部の流況は、全てのケースにおいて潜り越流状態であった。

(2) 洗掘形状の時間発展と流れ構造の対応

60分通水後の水路中心における河床高縦断分布を図-1に示す。また、河床変動量の平面分布を図-2に示す。ケース毎に通水開始10分後と60分後の状況を示している。

河床高の縦断形(図-1)は、全ケースに共通して、帯工上流側と下流側にそれぞれ河床低下を生じている。本実験は無給砂で実施したため、上流側の河床低下が相当進行した状況における帯工下流側の河床変動傾向を把握している。

なお、図-2に示した平面分布の計測は、計測時に下流端水位をせきあげて河床形状の保持に努めたが、通水中、構造物直近の局所的な流れと砂粒に作用する重力摩擦成分とが釣り合った状態で動的平衡を保っている局所洗掘部斜面は、計測時には洗掘孔に砂が崩れて、水中安息角

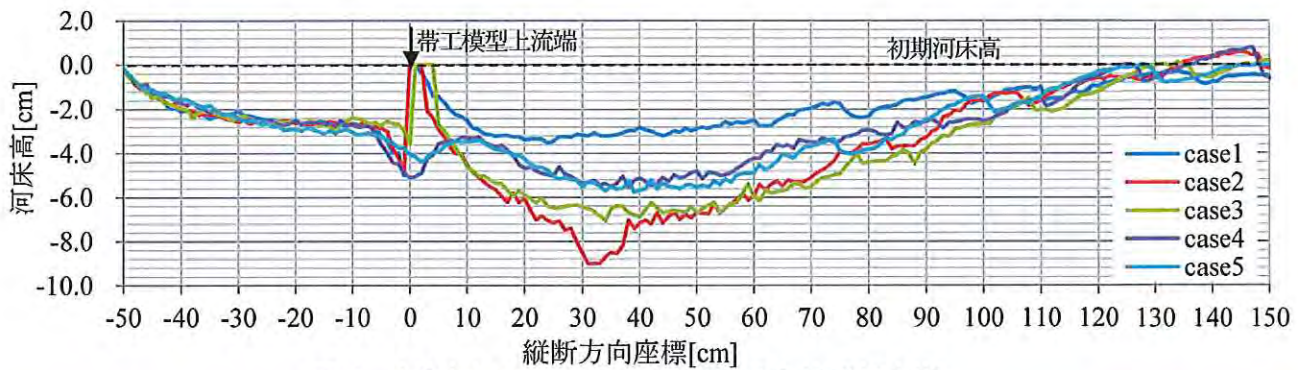


図-1 水路中心における河床高の縦断分布(60分通水後)

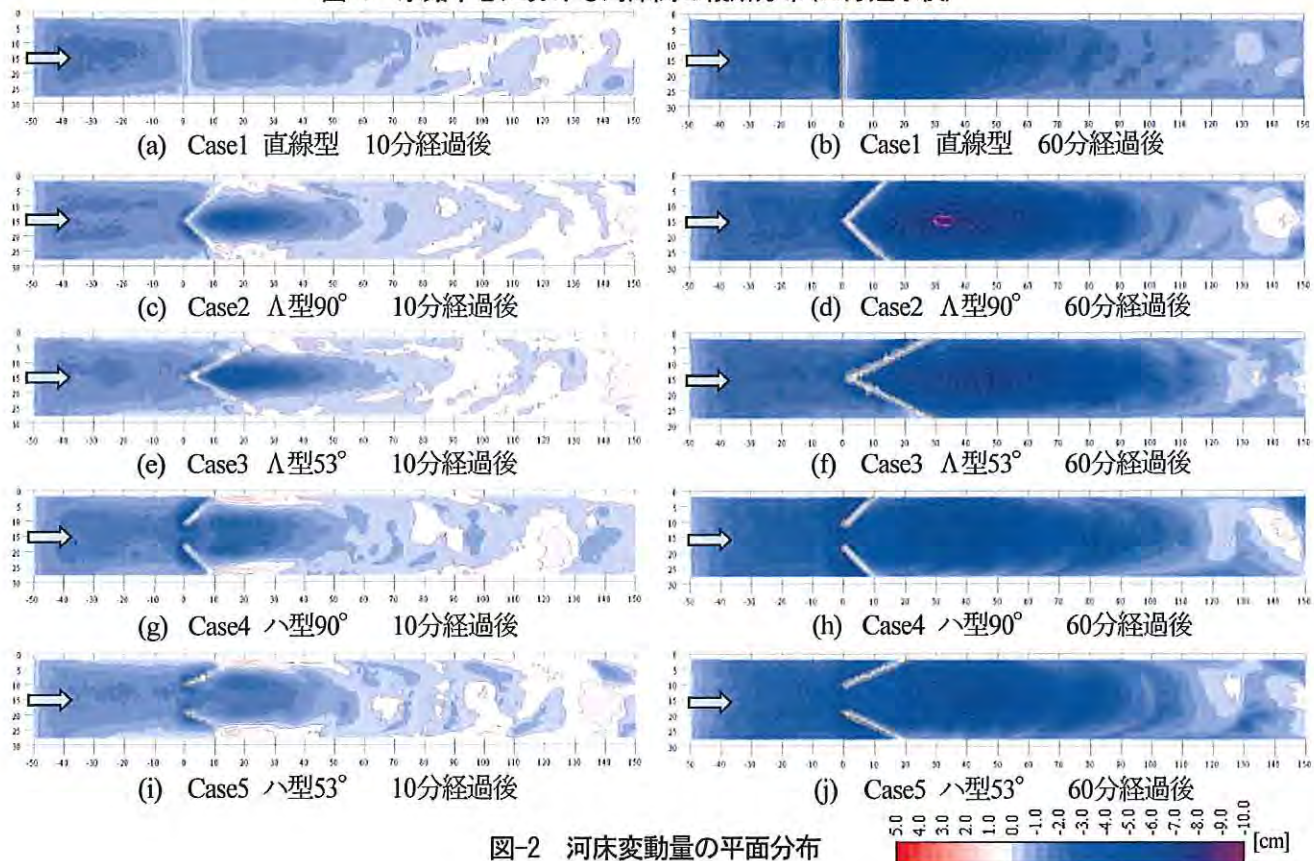


図-2 河床変動量の平面分布

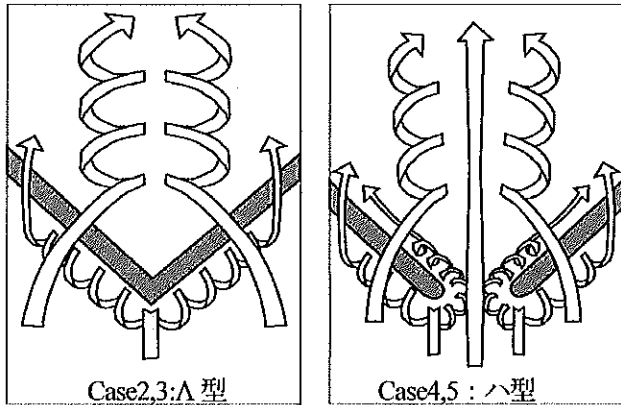


図-3 A型とH型の帯工近傍の流れの構造

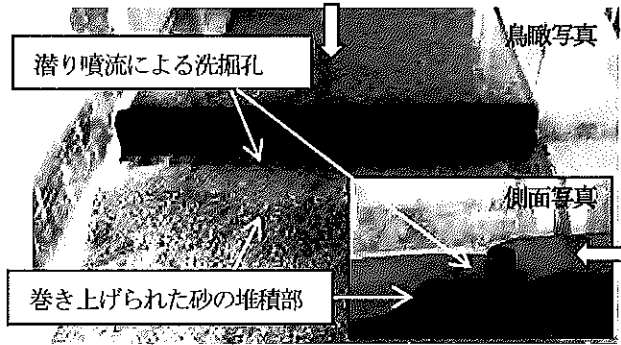


図-4 減水時に形成される小規模な落差

の状態を計測せざるを得なかった。各ケースの河床変動の特徴と時間経過について以下に示す。

Case1: 直線型帯工は、側壁近傍を除いて横断方向に概ね一様な変化を示している。帯工上流側がある程度河床低下を生じると、帯工にぶつかった流れが、局所的な縦渦を形成し、帯工上流側に局所洗掘を生じさせる。

Case2,3: A型帯工は、通水開始直後から帯工下流側の洗掘が進行するとともに、上流側の頂点付近の局所洗掘が発達して、帯工に沿って移動した砂が側壁との接続部を乗り越え、側壁近傍に堆積している状況が確認される。帯工下流側に形成される大きな洗掘孔は、砂粒の移動状況の観察から、帯工を越流する流れが水路中央に集まり、底面中央から側壁に向かって砂を掻き出すように移動させる左右対称な螺旋流によるものであり、村本ら¹⁴⁾が斜め段落ち部で観測した流れの構造、辻本ら¹⁵⁾が、固定床水路に棧型粗度を同様に配置して詳細に計測した並列螺旋流と類似の流れ構造を有していると考えられる。

Case4,5: H型帯工は、下流側の洗掘部の横断面形状が放物線状のA型とはやや異なり、洗掘孔の中央がやや盛り上がり、W型の断面形状を呈すること、開口部に面した模型先端部周辺の局所洗掘が激しいことが特徴として挙げられる。

砂粒の移動状況の観察から、両者の流れの構造を模式的に描けば、図-3のようであり、A型では下流側に大きな洗掘孔を生じさせる並列螺旋流が、H型においては開口部を通過する流れによってその発達が妨げられているであろうこと、一方、H型の開口部近傍の先端部付近には、橋脚基礎の近傍に生じる馬蹄型渦に類似の強い縦渦

が発達しており、局所洗掘が助長されているであろうことなどが、両者の違いを生じていると考えられる。

次に、A型、H型の折り曲げ角度の効果について検討する。図-1に示す河床高の縦断分布に着目すれば、角度が異なるCase2と3、4と5は縦断形にあまり差異が見られないが、構造物先端部近傍の局所洗掘深は、折り曲げ角度が90度であるCase2,4よりも、53度であるCase3,5の方が小さかった。なお、Case2では通水57分過ぎに最深河床部に水路底面が露出し、周囲との不連続を生じている。

図-1より、通水後の帯工上下流の落差に着目すれば、Case4,5のH型は河床高が連続しているのに対し、Case1直線型、Case2,3 A型は帯工自体が落差を形成している。なお、直線型帯工は、図-2(b)に示す状態では帯工直下流に落差を生じていないが、通水終了後の減水時に直下流に小規模の潜り噴流を生じて、局所洗掘が一気に進行する様子が観察され、落差を生じた(図-4)。道上ら^{2,3)}によれば、洗掘過程の進展は、限界水深 h_c と経過時間 t による無次元時間 $(g/h_c)^{1/2} \cdot t$ により表現され、無給砂の条件では無次元時間が 3×10^4 程度から、給砂のある条件では 1×10^5 程度から潜り噴流が生じることが確認されている。すなわち、少ない流量で流入砂が少ない方が、短時間で潜り噴流による急激な洗掘に移行しやすい。実河川にみられる帯工直下流の落差も同様に、減水期に生じているケースが多いことが推察される。

(3) 上下流の侵食量及び最大洗掘深

帯工の主な設置目的である、河床高の維持の観点と構造物の安全性の観点から、各ケースについて定量的な評価を試みる。評価の指標として、初期河床高に対して流失した体積を侵食量と定義した帯工模型上流側及び下流側の侵食量(図-5,6)、帯工模型下流の最大洗掘深(図-7)、模型周辺の局所洗掘深(図-8)を取り上げる。また、これらのまとめを表-2に示す。

図-5によれば、上流側の侵食量は、Case1直線型に対し、Case2~4の方がいずれも大きかった。時間経過に注目すれば、Case2,3 A型とCase4,5 H型の間には形状による差はみられず、むしろ折り曲げ角度の影響がみられた。折り曲げ角度が90度であるCase2,4よりも、53度であるCase3,5の方が侵食量は抑えられており、角度を上流側に向けてより傾けた方が上流側の河床高の維持には効果的である可能性が示唆される。この理由は、図-1,2に示されるとおり、主に模型近傍の局所洗掘によるものと考えられる。図-1に示した水路中心線に沿った河床高の縦断図のうち、帯工模型より上流側に着目すると、縦断形そのものにあまり違いはなく、侵食量に局所洗掘分が占める割合は比較的大きいと考えられる。また、砂粒の移動状況の観察によれば、上流から間欠的に移動しながら流下してきた砂粒が局所洗掘孔に差し掛かると、洗掘孔内に常在する縦渦に巻き込まれ、斜め棧に沿って側壁近傍に運搬されていく様子が確認された。すなわち、局所

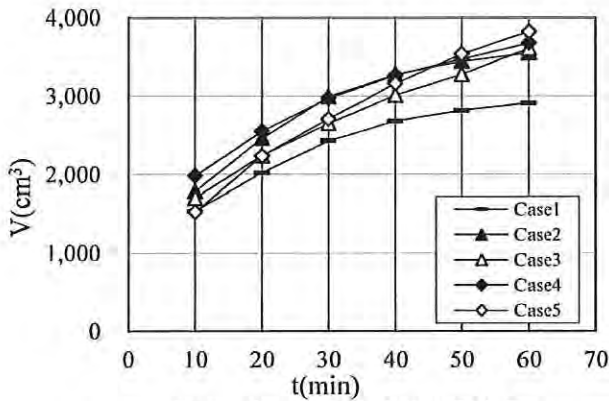


図-5 帯工模型上流側の侵食量

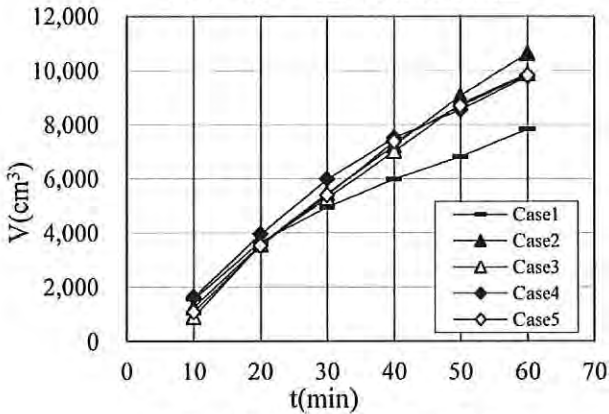


図-6 帯工模型下流側の侵食量

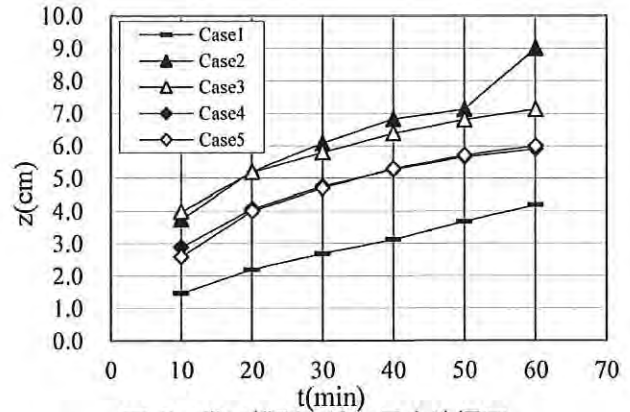


図-7 帯工模型下流の最大洗掘深

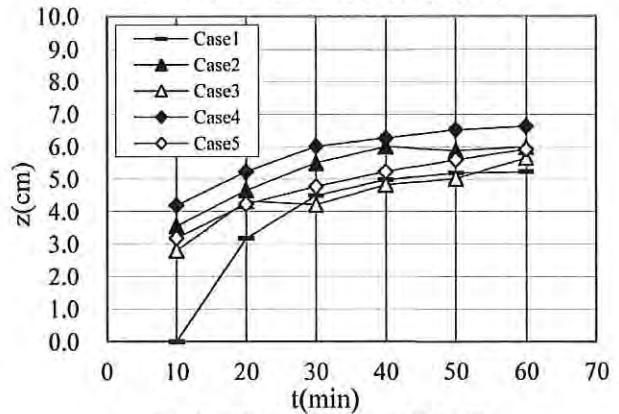


図-8 模型周辺の局所洗掘深

洗掘がより大きい方が上流側の土砂が流出しやすい状況になっていると考えられる。

図-6によれば、下流側の侵食量についても上流側と同様に、直線型が最も少ないが、通水20分までは他のケースとあまり差が生じていない。これは、図-1(c), (e), (g), (i)に示すとおり、 Δ 型及びハ型は、上流側で侵食された砂が側壁との接続部を乗り越えて下流側に堆積しているために、上流側の侵食が先行した分が下流側の侵食量にある程度相殺しているものと考えられる。

次に、構造物の安全性の観点から、洗掘深について検討する。図-7によれば、帯工模型下流側の最大洗掘深は、Case1直線型が最小、Case2,3 Δ 型が最大で、Case4,5ハ型はその中間程度であり、3種の平面形状によって明確に分かれたが、折り曲げ角度の影響は確認されなかった。

最大洗掘深の発生位置は、図-1, 2に示したとおり、いずれのケースも帯工模型及び側壁から離れて位置しており、 Δ 型及びハ型は、直線型に対して最大洗掘深が下流に位置しているが、洗掘深自体が直線型よりも大きいため、帯工直下流の縦断勾配は Δ 型及びハ型の方が大きい。

構造物の安全性に直接的に影響する局所洗掘深は、図-8に示すとおり、通水時間の経過によって傾向が異なるが、30~50分経過時の状況に着目すれば、Case1直線型と折り曲げ角度が53度であるCase3,5が同程度で、折り曲げ角度90度であるCase2,4が最も大きい。

この局所洗掘深を、実験条件の設定にあたって想定した相似比40倍の実河川に置き換えると、実験における洗

表-2 侵食量と洗掘深の定性的まとめ

ケース	基本形状	角度(狭角)	侵食量		洗掘深	
			上流	下流	下流	局所
Case1	直線型	180度	小	小	小	中
Case2	Δ 型	90度	大	大	大	大
Case3	Δ 型	53度	中	大	大	中
Case4	ハ型	90度	大	大	中	大
Case5	ハ型	53度	中	大	中	中

掘深1cmは実河川の40cmに相当する。技術基準書⁹⁾にあつては、帯工の根入れは「最深河床高よりも1m以上行ったほうが良い」とされており、中小河川においては護岸工の根入れも1m程度が一般的であることから、構造物直近の局所洗掘の許容値は、本実験にあつては3cm程度と考えられる。一方、観測された局所洗掘深は5~7cmに達しており、局所洗掘を低減するか、護床工を設置する必要がある。

また、構造物直近の局所洗掘は、構造物自体の安全性のほか、前述のとおり構造物上流側の河床高を維持する機能とも密接に関係していることから、局所洗掘を低減することが必要である。

Δ 型及びハ型の局所洗掘は図-3に示す構造物近傍の流れの構造に強く影響を受けているため、類似の洗掘機構を有する橋脚周りの局所洗掘対策¹⁰⁾等の応用により、低減が可能であると考えられる。局所洗掘深の低減については、今後の検討課題とする。

4. おわりに

帯工の平面形状の違いによる河床変動特性を明らかにするため、(1)直線型、(2)Λ型、(3)ハ型の計5パターン帯工模型を用いた移動床水理実験を無給砂の条件で実施し、平面形状及び折り曲げ角度による河床変動特性を把握した。

- (1) 河岸に直角に設置される直線型帯工に対して、上流側に中央部を突出させたΛ型及びハ型の帯工は、帯工下流の中央部に深い洗掘孔を生じる。これは、斜め部材を越流する際に誘起される左右対称の強い螺旋流による。
- (2) 直線型帯工と比較して、Λ型とハ型は上流側の侵食量が多い。ただし、侵食量に占める帯工直近の局所洗掘の影響が無視できないことから、局所洗掘の軽減により、直線型との差が縮小する可能性がある。
- (3) 横断的に連続したΛ型と中央に開口部を有するハ型の間には、流れの構造の違いに起因する洗掘形状の違いがみられたが、帯工としての機能に明瞭な差は確認されなかった。
- (4) Λ型とハ型の折り曲げ角度の効果は、折り曲げ角度が小さく、上流側に向けてより突出している方が、構造物近傍の局所洗掘が抑制される傾向にあった。

帯工を設置する主な目的である「上流側の河床高の維持」に加えて、「平水時の河床の連続性」を両立する帯工の基本的形状を見出すことを目的に、本研究において検討したハ型帯工は、直線型、Λ型と比較して、下流側河床高が低下したのちも、構造物による落差を生じない点において、河川環境面でのメリットを有している。また、ハ型、Λ型はともに構造物下流の中央に大きな洗掘孔を形成することから、人工的な淵の形成が可能であり、河床形状が単調になりがちな中小河川における淵の創出手法としての応用が期待される。

しかしながら、本論において述べた通り、構造物近傍の局所洗掘の軽減について、さらなる検討が必要である。

また、河川構造物の観点からは、機能性と安全性に加えて経済性が求められる。横断構造物に角度をつけることは、構造物の延長が増加するとともに施工難易度が上昇し、整備コストが増加することから、より安価な構造にすることでコストを縮減するか、より高い付加価値が必要である。

今後、本研究成果を踏まえ、帯工形状の最適化、異なる出水規模における河床の応答、河床材料の混合粒径の効果等について検討を進めていく。

参考文献

- 1) 大石哲也, 高岡広樹, 萱場祐一, 原田守啓: 中小河川の効率的・適確な維持管理に向けて～岐阜県の複数河川を対象にした河道タイプの把握と成立要因の分析～, 河川技術論文集, 第18巻, pp.221-226, 2012.
- 2) 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22号B-2, pp.507-519, 1979.
- 3) 鈴木幸一, 道上正規, 川津幸治: 床固め直下流部の流れと局所洗掘について, 水理講演会論文集, 第26回, pp.75-80, 1982.
- 4) 神田佳一, 村本嘉雄, 藤田裕一郎, 金川靖, 中村元郎: 護床工下流部の局所洗掘, 水工学論文集, 第35巻, pp.501-506, 1991.
- 5) 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.
- 6) 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, 1981.
- 7) 高井和彦, 三輪式: 砂礫堆形成河道における堰下流河床洗掘の実験的研究, 農業農村工学論文集, No.269, pp.47-53, 2010.
- 8) 木村喜代治, 高橋勉夫, 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.20-24, 1989.
- 9) 国土開発技術研究センター: 床止めの構造設計手引き, 山海堂, pp.90-95, 1998.
- 10) U.S. Department of Agriculture Portland, Oregon: DESIGN OF ROCK WEIRS, Technical Notes Engineering-No.24, 2000.
- 11) D.L. Rosgen: The Cross-Vane, W-Weir and J-Hook Vane Structures...Their Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration, Wetlands Engineering & River Restoration 2001(ASCE), Sec.26 Chap.3 pp. 1-22, 2001.
- 12) P.C. Klingeman, S.M. Kehe, Y.A. Owusu: Streambank erosion protection and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions, Water Resource Research Institute Oregon State Univ. Final Technical Completion Report, 1984.
- 13) 山本晃一: 沖積河川 - 構造と動態 -, 技報堂出版, pp.10-45, 2010.
- 14) 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 斜め段落ち流れに関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第21号B-2, pp.277-291, 1978.
- 15) 辻本哲郎, 宮垣圭吾, 森田優子: 棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御, 水工学論文集, 第36巻, pp.259-264, 1992.
- 16) 建設省土木研究所河川研究室: 橋脚による局所洗掘深予測と対策に関する水理的検討, 土木研究所資料, 第1797号, pp.41-58, 1982.

(2012. 9. 30受付)