

環境配慮型帯工の開発に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：自然共生研究センター

研究担当者：萱場祐一、大石哲也、高岡弘樹

【要旨】

本研究では、帯工の適用例が多い中小河川の単断面河道を対象として、従来型の帯工が有する環境面での課題を改善した新たな河道安定工法の実用化について検討を進めた。まず、海外事例・技術基準類を調査した結果、我が国では見られない中央部を上流側に突出させた河道安定工法が複数確認された。また、これらの工法は、縦断的な瀬淵構造を形成し、生物の移動性に配慮していた。次に、中小河川への適用に向けて小型模型水理で実験を行い、帯工左右岸に寄り洲を形成し、直下流に淵を形成する機能を有した河道安定工法の基本形状を見出した。最後に、上記の知見をもとに、構造の異なる 3 基の大型模型を自然共生研究センターの実験河川内に設置して実施した水理実験の結果、縦断的に瀬・淵を伴うことや側岸部の河床低下防止に効果を発揮し、魚類等の遡上への配慮も可能であることを示した。また、構造物表面を構成する素材の粗度によって、下流側流況及び洗掘量が大きく異なることが確認された。

キーワード：帯工、河道安定工法、局所洗掘、移動床実験

1. はじめに

帯工は河床の洗掘を防止し構造物の安定を図るための横断工作物であり、河床高の時空間的変動が大きい中小河川で多用される。帯工下流が洗掘されると、河床の縦断形状が不連続となり、1) 木工沈床、ふとん籠等を用いた透過屈とう型の構造では水が伏流して帯工が露出する、2) コンクリートを用いた不透過非屈とう型の構造の場合は河床との落差が生じる、等により河川景観、生物の移動に対して影響を及ぼすことが多い。また、近年、伝統的な石組構造を応用した分散型落差工¹⁾が提案され、河川生態系に与える好ましい効果についても報告されているが、より広い流程で用いられている従来型の帯工に替わる工法の開発は、未だ為されていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、帯工の適用例が多い中小河川の単断面河道を対象として、従来型の帯工が有する環境面での課題を改善した新たな河道安定工法の実用化について検討を進めた。

2. 海外事例・技術基準類の調査

2.1 調査方法

帯工のように河道安定(Channel Stabilization)の目的で設置される構造物について、主に欧米の技術資料を対象とした情報収集を行った。資料は学術文献のほか、インターネットによるものを含め、構造物

の形状、構造、設計思想、水理的機能等についてとりまとめた。

2.2 調査結果の概要

我が国の技術体系^{例えぼ²⁾}では、帯工の平面形状は、河岸と直交する直線が基本である。帯工形状を曲線型、折線型とした場合、帯工下流で流れが河道の中心に集中し、洗掘が生じやすいこと、洗掘箇所の下流は堆積箇所となって分散した流れは河岸に向かうことが技術書³⁾示されていることにある。

しかしながら、北米・欧州における河道安定工法では、中央部を上流側に突出させた A 型あるいは II 型の平面形状で、横断方向に勾配をつけて中央部を低くした点が共通する複数の工法が確認される（写真 2.1）。抽出された工法の概要を抜粋して表 2.1 に示す。

表 2.1 に示す 4 工法は、流水を河道中央に集め、淵を形成すること、水面落差を一定の幅以内に収めること、横断方向に勾配をつけることによって、流量が変動しても常に流心と水際とが形成されることといった、生物の移動性への配慮が謳われている点において共通している。河道安定工法であると同時に、Step-Pool 状の縦断的な瀬淵構造を模したものとなっていて、非常に興味深い。

これらの工法は、多くの場合、簡易な石組構造又



写真2.1 設置事例の写真

(上段: Rosgen Cross Vane⁴⁾)

(下段: Syvde-type Weir, Google street viewより)

は単体の石が十分大きい捨石構造が基本形とされている。設計手法として、想定される流速に対応する石材の径の目安、洗掘に対する根入れ深さ等について提示されているが、経験的な設計法で構成されており、我が国の床止め工に求められてきた構造物としての堅牢性あるいは河床変動に対する追従性などはあまり考慮されていない。

この理由は以下のように考えられる。これらの工法は、多くの場合、比較的自然度が高い河道の流路変動を制御して、滯筋を同じ場所に維持することを目的としており、河道災害を生じた際のリスクがそもそも小さいと考えられる。また、護岸と組み合わせた設置状態を前提としていないため、河岸を守るための機能を強く期待されていない。さらに、低水

路満杯(Bank full)を上回るような洪水の際は流水が浅い流れのまま横に広がって溢流するような河道のつくりになっていること、そもそも我が国と比較して河況係数が小さく、流水外力の変動幅が限られている等の条件の違いがあると考えられる。

そこで検討する新工法には、これらの与条件の違いを考慮した上で、「河道安定工法により縦断的な瀬淵構造を形成する」というコンセプトを取り入れた工法を検討することとした。

3. 小型模型水理実験

3.1 実験の概要

横断構造物の平面形状の違いによる河床変動特性の把握を目的として、幅 30cm、延長 8m、勾配 1/200 の実験水路において移動床実験を実施した。

なお、従前の検討⁷⁾から帯工の平面形状の違いによる河床変動特性に着目し、直線型に加え、 Δ 型、ハ型の帯工について以下の結果を得ている。

①直線型に対して、 Δ 型及びハ型は、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中央に開口部を有するハ型は、開口部を通過する流れによって螺旋流の発達に阻害される。

また、別途検討している寄り洲の形成を目的としたバープ工法に関する基礎的な実験結果⁸⁾より、以下の結果を得ている。

①越流型水制の上向き角度を大きくするにつれ、局所洗掘深は減少する傾向にあるが、水制を斜めに越流する流れによる下流側の洗掘孔が拡大する。

②水制の先端を低くし、かつ流れの剥離を防ぐ法

表2.1 河道安定構造物の海外事例（抜粋）

名称	USDA / Rock Weir ³⁾	Rosgen / Cross Vane ⁴⁾	WSDOT / Rock Weir ⁵⁾	Syvde-type Weir ⁶⁾
地域	米国, 主に西海岸	米国, 主に中西部	米国, ワシントン州	ノルウェー, Syvde 地方
平面形状	 PLAN ※バリエーション有	 PLAN	 $\angle XYZ = 20 \sim 30^\circ$	 PLAN
横断形状	 SIDE VIEW	 Cross-Section View, without "STEP"	 SECTION A-A	—
構造	簡易な石組又は捨石構造	簡易な石組又は捨石構造	簡易な石組又は捨石構造	木製又は簡易な石組構造

面を設けたケースでは、局所洗掘が大幅に抑制され、さらに水制の根元の高さまで流砂が堆積する。

これらの先行研究を踏まえ、基本形状について再検討した結果、中央部は直線、左右岸にバープ工の機能を付加した斜め部材を有した形状が基本形状として好ましいものと考えた。直線部と斜め部の比率を増減させることで、下流側の洗掘量を制御可能であると考えられたためである。

そこで、左右岸の斜め部材、直線部の比率を、1:1:1とした模型を製作し、既往実験と同様の実験条件を再現して、直線型、 Λ 型と比較した。

3. 2 結果と考察

先行実験⁷⁾の結果より直線型と Λ 型、追加実験で行ったその中間の形状について、流量 8ℓ/s、移動床区間の水路中心における水位・河床高分布から求めた平均水深と平均エネルギー勾配による無次元掃流力が約 0.20、無給砂の条件で 60 分通水した後の河床変動量を図 3.1(a)~(c)に示す。なお、模型の天端高はいずれも平坦に敷きならした初期砂面高に合わせて設置している。この結果、模型下流側の河床変動量は、事前に予想した通り直線型と Λ 型の中間的な傾向となったことから、直線部分と斜め部分の比率を変更することで、下流側の洗掘孔の規模の調整が可能と考えられる。

また、実河川において生じうる状況について検討するため、流量、土砂供給条件を変更した実験ケースとして、前記の条件に加え上流から平衡給砂を行った動的平衡条件における結果と、流量を漸減して河床面に作用する平均的な掃流力が移動限界を上回らない静的平衡洗掘条件を整えた結果とを図 3.1(d)、(e)にそれぞれ示す。移動床区間上流の固定床区間において、流出土砂量に見合う給砂を行った動的平衡条件下においては、模型は進行する砂堆に埋

没・露出を繰り返し、時間平均的には河床面の低下を生じない。一方、静的平衡洗掘では、斜め部材による洗掘孔の発達には模型直下流に限定され、一定規模まで洗掘孔が拡大した後、維持される。本実験では粒径 0.6mm のほぼ均一な砂を使用したことから、粒度分布が広い混合粒径の条件下においては、局所的な掃流力の分布に応じた分級が発生すると考えられ、やや現象は複雑になるが、洗掘を生じる位置や経過等の基本的な振る舞いに大きな差異はないものと考えられる。

したがって、実河川において、上流から土砂供給が維持される場合、流量変動に対して構造物周辺の河床形状は概ね(d)と(e)の間で維持され、平水時の流況において河床材料の移動がほとんど生じない河川では、静的平衡洗掘条件で形成された淵が維持されるものと考えられる。しかしながら、上流からの土砂供給が何らかの理由で減少し、河床低下が継続した場合、下流側の洗掘孔が拡大し続け、(b)のような状況が現出することも想定される。そのため、設計者の視点に立てば、静的平衡洗掘条件によって生じる日常的な姿の想定と、河床低下が継続した際の横断構造物及び下流護岸の安全性を担保する方法の 2 点が主たる検討課題と認識される。

以上を踏まえ、新工法のコンセプトと、それを実現するための方策について、表 3.1 にまとめて示す。

4. 大型模型水理実験

4. 1 実験の概要

小型模型水理実験によって見出した基本形状を基に、構造の違いによる越流流況、景観性を把握するため、より実河川に近い条件・スケールにおける大型模型水理実験を行った。

大型模型実験には、自然共生研究センターの保有

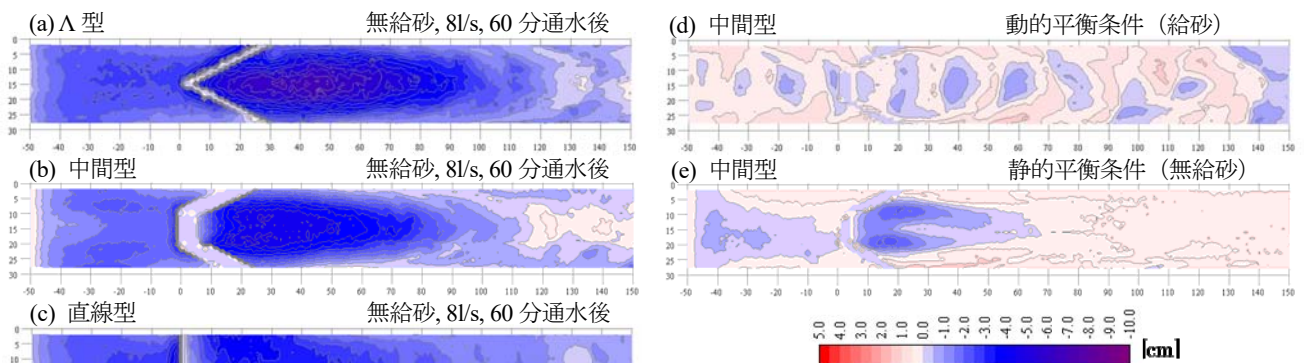


図3.1 通水後の河床変動量（模型形状及び洗掘条件の比較）

表 3.1 工法の基本コンセプト

コンセプト	実現するための方策
上流側の河床高を維持する機能を発揮しながら、不連続な落差を生じさせない	越流部の形状を工夫し、小流量時にも河床面と水面が縦断的に連続する状態を維持する。
直下流に淵を形成し、河床形状と流速・水深分布に多様性をもたせる	平面形状を直線型とΛ型の間中とする。
左右岸に寄り洲を形成して、自然な水際部を形成	斜め部材の形状にパーブ工を応用する。
淵の深さ、範囲を制御し安全性を確保する	直線部と斜め部の比率によって洗掘量を制御する。 複数基配置を基本とする。 最下流に掘れ止めを設ける。

する実験河川を利用した。本実験は、3本ある実験河川のうちA河川の最上流区間に、幅2.5m、延長40m、勾配1/200に設定した区間を設定し、構造が異なる3基の模型を設置した。3タイプの大型模型は、40m区間に10m間隔で設置した。流量は平水流量程度を想定した100l/sから、中小出水を想定した300l/s、年最大流量程度を想定した1,000l/sの間で変化させ、越流流況、河床変動特性について把握した。また、設置対象河川による構造の使い分け、設計手法等について考察した。

実験に用いた土砂は、調達可能な土砂の量、実河川に流入する実験河川の立地特性等を考慮して、木曾川産の洗い砂とした。粒度試験の結果、細粒分2%、砂分71%、礫分27%のやや広い粒度分布を有しており、D60粒径は1.38mmであった。

流速の計測は、3次元超音波流速計 Flow Tracker(Sontek 社製)、河床形状及び水位の計測はトータルステーション(Nikon Trimble 社製)で行った。

4.2 構造物の形状と構造

想定される実河川の河道幅を12mと仮定した場合、小型模型水理実験は1/40スケール、大型模型水理実験は1/5スケールに相当することから、構造物の寸法、構成する材料は実物の1/5程度となるよう設定した(図4.1)。平面形状は、斜め部材と直線部が1:2:1の比率とした。構造物の高さは、直線部を初期河床面に合わせて水平とし、斜め部材の端部は直線部より10cm高く設定した。天端幅を30cmとし、上下流側法面の勾配は上流側を一割五分、下流側は二割に設定した。上流側法勾配については、小型模型実験において一割勾配を採用していたところ、局所洗掘を助長する縦渦が生じたことと、土砂・割栗石等の材料を用いる場合、一割勾配では自立が困難であること等を勘案し、一割五分を採用した。下流

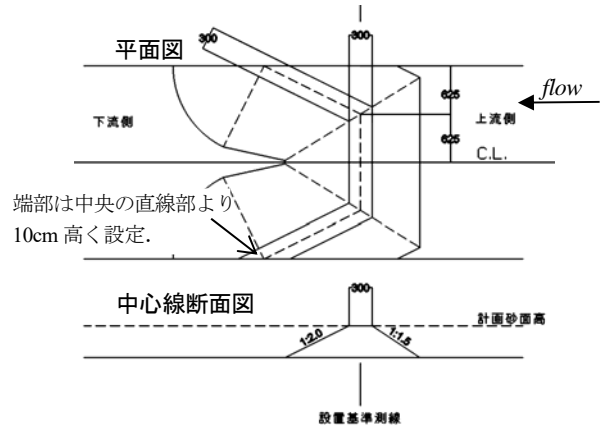


図4.1 大型模型の基本形状



写真4.1 各タイプの外観と設置状況

側の法勾配については、越流部の流況に強く影響することから、さらなる検討の余地は大きい。

構造は、従来の帯工が、本体部分を現場打ちコンクリートとし、上下流に根固めブロック等を用いた護床工を設置するのに対し、より安価であること、曲線等の形状が比較的容易に製作できること等の利点を重視して以下、3タイプを検討した。すなわち、捨石構造の①捨石タイプ、捨石を丈夫なネットで作るんだ②袋詰タイプ、捨石を連節ブロックあるいはブロックマット状の製品で被覆した③ブロック被覆タイプである(写真4.1)。

構造物としての耐久性は、①捨石タイプは捨石単体が流出するか否かによって決定されると考えられる。②袋詰タイプはネットによる拘束の効果を多少は見込むことによって①よりも捨石が多少は流出しにくいと考えられる。③ブロック被覆タイプは、連節構造あるいはブロックマット構造であれば、群体として滑動することが破壊要因となるが、上流側から下流側までを一体の構造とすることで、上流側が土砂によって押さえられるために、護岸として設置する場合よりはかなり大きな流体力に耐えることが

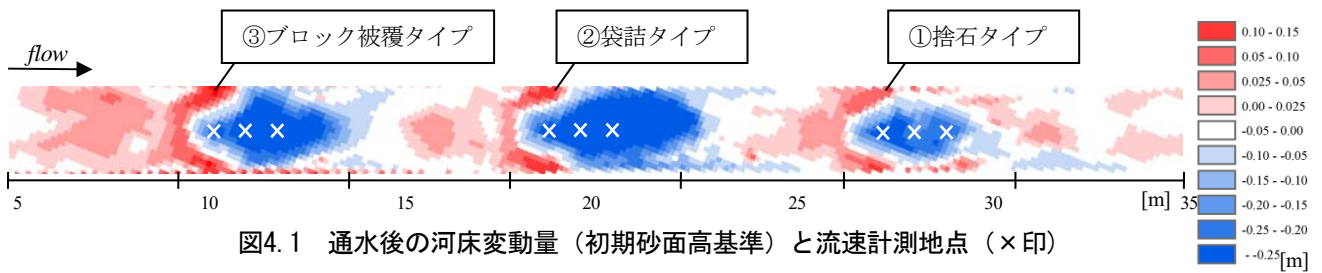


図4.1 通水後の河床変動量（初期砂面高基準）と流速計測地点（×印）

期待される。今後検討すべき課題を含むものの、一般的には後者の構造になるほど外力に対する耐久性は向上すると考えられる。

4.3 結果と考察

流量が 300L/s ケースで、約 24 時間通水した状況下における各模型周辺の河床形状を図 4.1 に、中心線に沿った模型直下流 1m、2m、3m 地点での主流速鉛直分布を図 4.2 に示す。

300L/s 通水を開始し、河床波が十分発達した時点での水位縦断面形と河床形状から求めた代表粒径 1.38mm に対する無次元掃流力 τ^* は約 0.40 であったが、砂堆の発生により各模型上流側の流砂量はかなり抑制されていた。その後、模型直下流の土砂流出が進んだことにより、計測時には水面形が階段状になっていて、各模型間の平均的な無次元掃流力は約 0.20 まで低下していた。

図 4.1 に示すとおり、河床変動量は、最下流の①捨石タイプが最も少なく、中間の②袋詰タイプが最も大きく、最上流の③ブロック被覆タイプがその中間であった。②袋詰タイプは、河床低下によって実験河川の当該区間に設置されているコンクリート底版が露出したため、急激に土砂が流失したと考えられる。②袋詰タイプから流出した土砂が①捨石タイプの区間に流入するという実験系の課題があるため、現時点では、構造と河床変動量の関係について厳密な議論はできていない。

一方、構造の違いは、下流側に形成された淵の内部の流況において明瞭に把握された。図 4.1 に示すとおり、越流部直下流の流速の鉛直分布は、構造によってかなり異なる。①捨石タイプは、底層に沿った流れがきちんと減速されるのに対し、③ブロック被覆タイプは十分に減速されていない。さらに、水面付近の流速が相対的に小さいために、越流部直下において跳水を生じており、その他 2 タイプとは流水表情も異なったものとなっている。②袋詰タイプの 2m 地点では、平滑なコンクリート底版が露出し、底面付近の流速が大きくなっているため、比較は難しい。以上のことから、越流部の流況は、構造物の表面を構成する材料の粗度の影響を強く受けている

ことが確認され、越流部から下流側にかけては構造物表面に適切な粗度を付与することの重要性が示唆された。

また、空間的な水深流速分布の多様性の向上が確認された。越流部においては、流量変動に対し、常に流速の小さい水際部が形成されていることから、水生生物の移動性が確保されると考えられる。ただし、③ブロック被覆タイプは表面が平滑すぎるためか、水際部の水深が薄く、遡上には不適切であるため、適度な粗度の付与が必要であると考えられた。

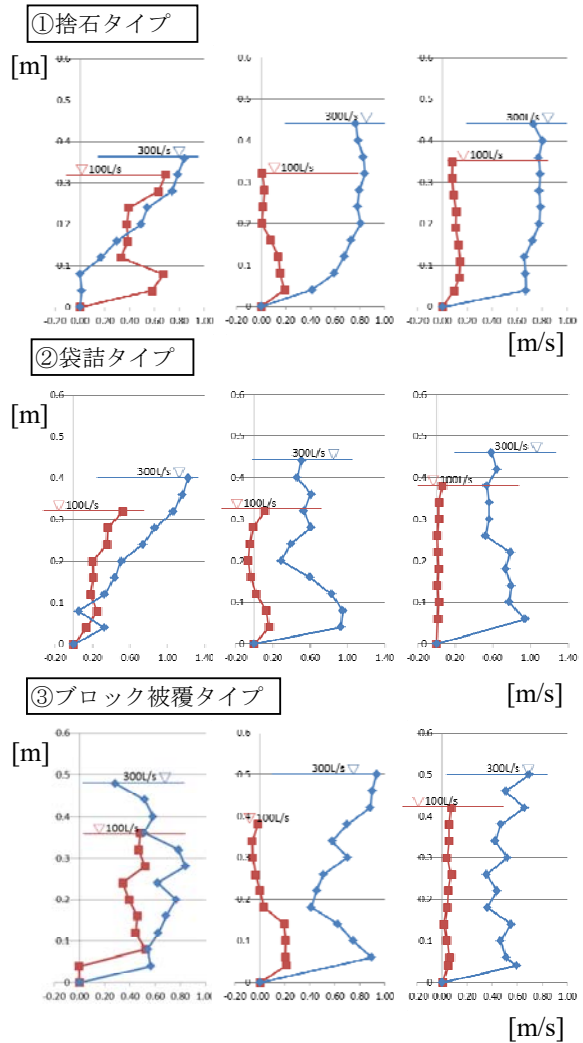


図4.2 河道中心における主流速鉛直分布
(左列:模型1m下流, 中列:2m下流, 右列:3m下流)

また、下流に形成された淵には、三次元的な流れが形成されており、平面的に逆流している領域も見られた。魚類が淵内に定位しようとした際に走流性によって下流側を向く、あるいは複雑な流れに翻弄されることも考えられることから、淵内の流況を整える工夫も必要であると考えられる。

5. おわりに

本報では、従来型の帯工が有する環境面での課題を改善した新たな河道安定工法の実用化の取り組みについて、その概要と現時点で得られている主な成果について報告した。以下に、本報のまとめを示す。

- ・海外事例・技術基準類を調査した結果、我が国では見られない、中央部を上流側に突出させた河道安定工法が複数確認された。河道安定工法であると同時に、縦断的な瀬淵構造を形成し、生物の移動性に配慮している点に共通点が見出された。
- ・小型模型水理実験の結果、帯工左右岸に寄り洲を形成し、直下流に淵を形成する機能を有した河道安定工法の基本形状を見出した。
- ・構造の異なる3基の大型模型を設置して実施した水理実験の結果、同様の形状を有していても、構造物表面を構成する素材の粗度によって、下流側流況及び洗掘量が大きく異なることが確認された。

今後の課題を以下に示す。

本報で示したとおり、新たな河道安定工法の基本形状を見出すことができたが、詳細な点については改善の余地があると考えており、小型模型実験を系統的に実施していく。とくに、直線部と斜め部材の比率の効果、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については検討が必要であると考えている。

また、大型模型水理実験における構造物表面の粗さの違いが、下流側の流況に影響を与えていたことを踏まえ、使用材料の粗度効果の検討が必要である。また、その際、景観面における配慮も同時に盛り込まれるべきである。

一方で、普及のためには安全性を確保できる設計法の整備が必要不可欠である。照査すべき状況としては、構造物本体の表面から破壊に至るケース、下流側の洗掘から本体の破壊に至るケースと、下流側の洗掘が護岸等の周辺構造物の被災につながるケースが想定される。構造物表面の破壊については、護岸の力学設計法⁹⁾における力学照査方法の援用が可

能と考えている。下流側の洗掘深の予測については、従来の洗掘予測式の適用性について検討を行うとともに、効果的な洗掘深の制御方法について、また、複数基配置する場合の縦断的配置の考え方や掘れ止めのための補助構造物の設置等について、モデル河川への適用を前提として、具体的に検討していく。

さらに、実河道への配置計画手法として、湾曲部や砂州により形成される瀬淵構造を活かしながら、これらがともに期待できない区間をどのように抽出し、縦断的にどの程度の間隔で構造物を配置すべきかといった計画論的な議論も重要である。

謝辞：本報の一部は、平成24年度に実施した岐阜大学流域圏科学研究センター藤田裕一郎教授（現フェロー）との共同研究成果に基づくものである。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 福留脩文, 有川崇, 西山穂, 福岡捷二: 石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計, 土木学会論文集 F Vol.66, No. 4, pp. 490-503, 2010.
- 2) 財団法人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.
- 3) U.S. Department of Agriculture Portland, Oregon: *DESIGN OF ROCK WEIRS*, Technical Notes Engineering-No.24, 2000.
- 4) 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.
- 5) Washington State Department of Transportation: *Hydraulics Manual M 23-03.03*, pp.4_23-25, 2010.
- 6) John E. Brittain: Weirs as a Mitigation Measure in Regulated Rivers—The Norwegian Experience, *Canadian Water Resources Journal*, 28:217-229, 2003.
- 7) 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.
- 8) 原田守啓, 高岡広樹, 大石哲也, 萱場祐一, 藤田裕一郎: 設置角度の異なる越流型上向き水制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_1189-I_1194, 2013.
- 9) 財団法人土木技術センター: 改訂護岸の力学設計法, 山海堂, 2007.

A BASIC STUDY ON HOW TO DEVELOP AN ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS RIVERBED GRIDLE

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY 2011-2015

Research Team : Aqua Restoration
Research Center

Author : KAYABA Yuichi, OISHI Tetsuya
TAKAOKA Hiroki, HARADA
Morihiro

Abstract : The purpose of this research is to suggest how to develop a new type channel stabilization structure for small and medium-sized rivers in Japan. At first, some types of overseas structure are shown with their characteristics. Secondly, fundamental shapes of channel stabilization structure which increase habitat heterogeneity are discussed on the basis of experimental results obtained in small-scale and large-scale movable bed experiments with test models. In latter experiment, three large scale models made by different materials are examined, it is confirmed that the surface roughness have effect distinctly on velocity profiles of passing flow.

Key words : channel stabilization, local scour, movable bed experiments, experimental river