

いつの日か魚が帰ってくる、 豊かな川づくりを目指して ～赤谷川災害復旧事業における ステップ&プールの水理模型実験報告～

北島 大基¹・中原 寛人¹・遠山 哲生¹・多田 幸平¹

¹筑後川河川事務所 九州北部豪雨復興出張所

(〒838-1511 福岡県朝倉市杷木池田 483 番地 1 朝倉市役所杷木支所 3 階)

平成 29 年 7 月九州北部豪雨により筑後川右岸流域では多数の人的被害や家屋被害が生じた。その中でも赤谷川流域は被害が甚大であったため、改正河川法に基づく権限代行制度を適用した災害復旧工事に着手している。この災害復旧を行っている赤谷川流域乙石川に設置する落差工について、洪水流の減勢や河川環境改善の観点からステップ&プール構造の設計を行うにあたり、模型実験を活用し最適な河床材料、河床勾配、落差工形状や護床工の設置高等を求める。

Key Words: 九州北部豪雨, 模型実験, 落差工, ステップ&プール

1. はじめに

平成 29 年 7 月 5 日の昼頃から夜にかけて、九州北部の福岡県から大分県に強い雨域がかかり、短時間に記録的な雨量を降らせ、気象庁のレーダー解析（24 時間解析雨量）では、朝倉市で約 1000mm、日田市で約 600mm の記録的な豪雨を観測した。この九州北部豪雨により、同時多発的に斜面崩壊が発生し、大量の土砂や流木が流下した。このため、福岡県の管理河川である赤谷川流域や白木谷川流域等の筑後川右岸流域で多数の人的被害や家屋被害が生じた。特に、被害が甚大であった赤谷川及び乙石川、大山川について、福岡県知事の要請を受け、「権限代行制度」を全国で初めて適用し、福岡県に代わって河川災害復旧工事及び工事を実施するための調査設計、用地取得をすることになった。

赤谷川流域において、平成 30 年応急復旧が完了し、現在、赤谷川の治水安全度を高めるため、川幅を広げ、急な湾曲区間をゆるやかにして流れやすくするとともに、流木等の貯留施設整備など、本格的な改良復旧工事を進めているところである。復興出張所では、災害復旧を行っている赤谷川流域乙石川に設置する落差工について、河川環境の改善、景観の観点からステップ&プール構造の川づくりを目指し、水理模型実験を実施している。本

論文では、水理模型実験により求めた、最適な河床材料、河床勾配、落差工形状と護床工の設置高等について、その有効性を報告する。

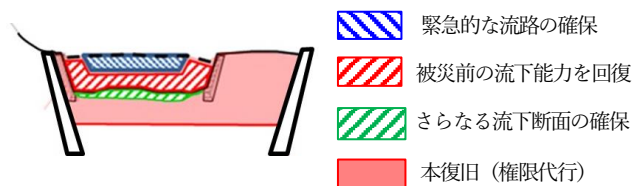


図-1.1 緊急復旧と改良復旧の計画

2. ステップ&プール基本構想（乙石川）

被災前の乙石川は、勾配が急で落差工が連続し、川幅が狭く河道内に巨礫が点在していることから人の利用はほとんどなかったと現場で地域の方々から聞く。また、景観面は河道内は目立たない化粧護岸で、巨礫の置石等による自然な河道などの良い面と、護岸がブロック積と古い石積みが混在していたことや落差工により上下流が

分断されており、魚類が遡上できないことなどの構造面、景観面での改善点があった。



写真-1 被災前の乙石川の河道

平成 30 年 6 月に「美しい山河を守る災害復旧基本方針」が策定され、改良復旧を行うにあたり、洪水時に地域が安心できることはもちろん、日常の中で地域が川と心地よく触れ合えるような魅力ある川づくりを行うことが求められている。乙石川においてもステップ&プールを設置することで、従来生息した魚類の生息環境に配慮した、豊かな川づくりを目指すこととした。

ステップ&プールとは、生産された土砂の中でも比較的大きな礫が集中しているステップと、それらの間の小さな粒径の砂礫で構成されるプールからなる構造であり、この水面が波立つステップ部分では、酸素の供給量が多く、藻類や水生昆虫の生息に良い環境である。流れが緩やかなプール部分では、速い流れを好まない魚類の生息に適しており、細かな砂や泥が堆積するので、砂泥を好む種にとっても重要な生息環境となる。また、出水時は魚類の避難場所としても大きな役割を果たす。なお、乙石川ではステップ&プール構造以外にも豊かな自然景観を創出することで、散策し自然景観を楽しむような利用を想定する。

一方で、乙石川の河床勾配は 1/10~1/30 程度であり、洪水時の河床材料の安定に懸念があったため、水理模型実験を行うことで、ステップ&プール構造と、河川構造物としての安全性の両立が可能か確認することとした。

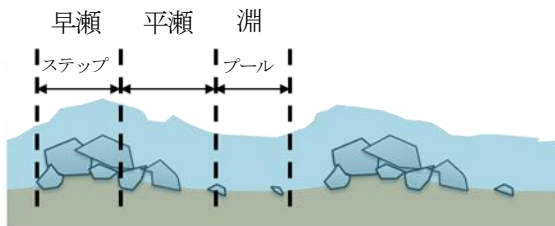


図-21 ステップ&プール構造の瀬淵区分



写真-2 ステップ&プール（乙石川の原風景）

3. 水理模型実験ケースの概要

(1) 設計原案の検証（ケース 1~3）

設計原案である河床材料、河床勾配の条件でステップ&プール構造が形成されるか検証実験を行った。

(2) 落差工の形状方針設定（ケース 4~7）

ケース 1~3 の結果、河床勾配を緩やかにするため、落差工等の構造物の検討を行う必要が生じた。

ケース 4~7 では、まず落差工の形状をスキージャンプ型、斜路式、帯工の 3 タイプで勾配や河床材料、高さを変えながら基準となる落差工の形状や高さを決めることを目的として、実験を行った。

(3) 護床工の検討（ケース 8）

ケース 8 では、ケース 4~7 で最良だった帯工形状の落差工で、護床工設置高さの違いによる洗掘深の関係を把握することを目的とし、3 ケースの設置高さで、実験を行った。

(4) 最良案の設定（ケース 9）

ケース 9 では、今までのケース 1~8 の結果や魚類の遡上を踏まえて、具体的な落差工の形状で洗掘抑制効果を把握し、最良案を検討した。

4. 水理模型実験条件

(1) 実験ケース

本実験では、表 4.1 に示す実験条件と実験ケースに従い、実験を行った。

(2) 実験模型

本実験では、幅 0.5m、延長 14m の 2 次元水路を用い、縮尺 1/10、縦断方向を部分抽出した模型により検討を行った。ケース 1 実験時の写真を、写真 3、ケース 6 実験時の模型図を図 4.1 に示す。

(3) 河床材料

河床の構成材料は、以下の 2 タイプの粒度分布に従うものとし、河床勾配は、1/30 を基本とし、実験砂礫には次式のタルボット型の粒度分布を用いた。

$$P = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^n$$

ここに、 d_{max} は砂礫中の最大径、 P は d の大きさの篩い目を通過する砂礫材の全体に占める重量比率である。

タイプ 1 : タルボット $n=1/2$

・粒度分布 : タルボット型 ($n=1/2$)

・ d_{max} : 約 700~800mm ($d_{84} : 500$ mm)

タイプ 2 : タルボット $n=1/1$

・粒度分布 : タルボット型 ($n=1$)

・ d_{max} : 655mm ($d_{84} : 550$ mm)

(4) 水理条件

通水流量は、計画流量 120 m^3/s までを 10 m^3/s ピッチで通水するのを基本とし、通水時間は、洪水到達時間 0.5 時間 \times 5 出水 = 2.5 時間とした。

(5) 対象構造物

検討対象にした落差工は、以下のものとした。

- ・スキージャンプ落差工 :
- ・斜路式落差工 : 勾配 1 : 5
- ・帯工 (落差工あり) : 落差 0.3m, 0.5m, 0.75m
- ・階段式 (全面魚道タイプ) : 勾配 1 : 1, 勾配 1 : 5

検討対象とした護床工は以下のものとした。

- ・護床工ブロック : 厚底エクスブロック (延長 6m 区間)
- ・シル付き水叩き : 一体もの (シルあり) (延長 7m 区間)

表-4.1 実験条件と実験ケース

目的	調査内容	ケース	検証項目	水理条件		河床条件		構造物			
				通水流量 (m^3/s)	給砂	河床材料	河床勾配	落差工	護床工		
設計原案の検証と問題点と課題の抽出	設計原案である河床材料タルボット $n=1/2$ 、河床勾配 1/30 の条件でステップ・プールの形成状況調査	1	ステップ・プール形成有無と安定河床勾配を把握	10~120	局所洗掘部に投入	タルボット $n=1/2$	1=1/30	/	/		
		2		10~120	なし						
		3		120~170	なし						
落差工形状の方針設定	スキージャンプ型落差工の河床形状調査 (局所洗掘、河床低下)	4	上記安定勾配 1/50 で、落差工構造 (スキージャンプ型、斜路式、帯工) による洗掘状況を把握	10~120	上流河道より自然給砂	タルボット $n=1/2$	1=1/50	/	/		
		5								斜路式 (勾配 1:5、落差 1m)	
	落差あり帯工の河床形状調査 (局所洗掘、河床低下)	6								スキージャンプ型 (落差 1.2m)	
		7								帯工 (落差 0.30m)	
護床工の設置位置の設定	護床工の設置高さ (3タイプ) と河床形状の関係調査	8	耐力を増加させ、安定河床勾配、洗掘抑制効果を把握	10~120	上流河道より自然給砂	タルボット $n=1/1$	1=1/30	/	/		
		落差のある帯工の落差高 (3タイプ) と河床形状の関係調査 (局所洗掘、河床低下)								9	帯工 (落差 0.50m)
										10	帯工 (落差 0.75m)
最良案の設定	落差工と護床工 (3タイプ) と河床形状の関係調査	11	護床工による洗掘抑制を固るため、護床工設置高さの違いによる洗掘深の関係を把握	10~120	上流河道より自然給砂	タルボット $n=1/1$	1=1/30	/	/		
		12								階段式魚道 (勾配 1:1)	
									護床工 (ブロック 6m) 設置高 -0.2m		
									護床工 (ブロック 6m) 設置高 -0.5m		
									護床工 (ブロック 6m) 設置高 -1.0m		
									階段式魚道 (勾配 1:1)		
									階段式魚道 (勾配 1:5)		
									護床工 (一体構造 7m) 設置高 -0.5m		
									護床工 (一体構造 7m) 設置高 -1.0m		
									エンドシル 2基		

※採用した条件

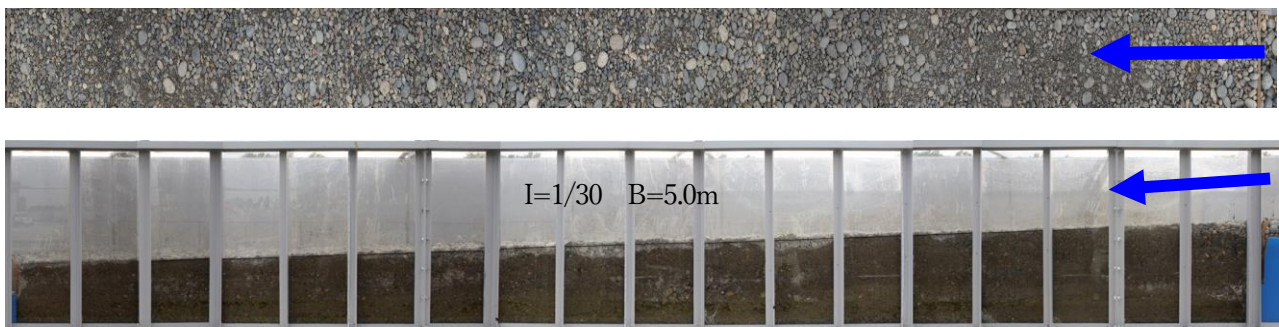


写真3 ケース 1 実験時の初期河床

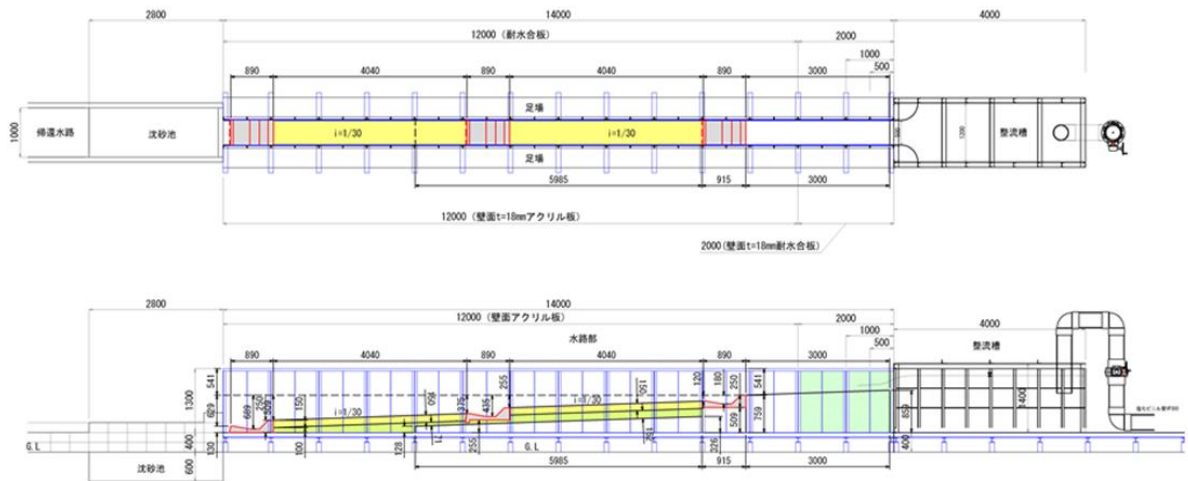


図4.1 ケース6 実験で使用した2次元水路

5. 実験結果

(1) 設計原案の検証 (ケース1～3)

タルボット $n=1/2$ とし、河床勾配 $1/30$ で落差工なしで河床変動 (安定勾配等) を調査した。

ケース2の計画流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ の実験結果は図5.1に示すように洗掘規模が 4.3 m となるため、対策として外力を低下させる方法「河床勾配を $1/50$ とする案」、耐力を増加させる方法「河床材料をタルボット型 $n=1/1$ とする案」の2案で対応するものとした。

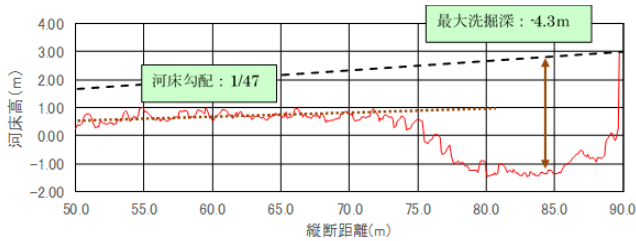


図-5.1 河床形状の縦断図 (ケース2)



写真4 初期河床と計画流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 通水後の比較

(2) 落差工の形状方針設定 (ケース4～7)

a) 河床勾配を $1/50$ とした場合 (ケース4, 5)

設計原案の検証結果を踏まえ、河床勾配は $1/50$ (河床材料タルボット型 $n=1/2$) とし、外力低下を図った。落差工のタイプは①スキージャンプ型、②斜路式 (勾配 $1:5$)、③落差ありの帯工 (落差 0.3 m) とした。

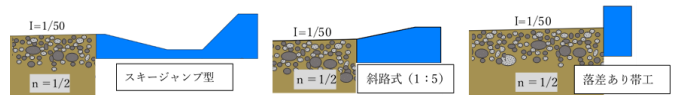


図-5.2 落差工の形状 (ケース4, 5)

実験結果は、図5.3に示すようにスキージャンプ型、斜路式 (勾配 $1:5$) では、洗掘深が約 3 m 程度となるため、最も洗掘深が小さい「落差のある帯工 (落差 0.3 m)」を落差工の基本形状とし、さらに耐力増加を図るため、河床材料タルボット $n=1/1$ にて検討を進めるものとした。

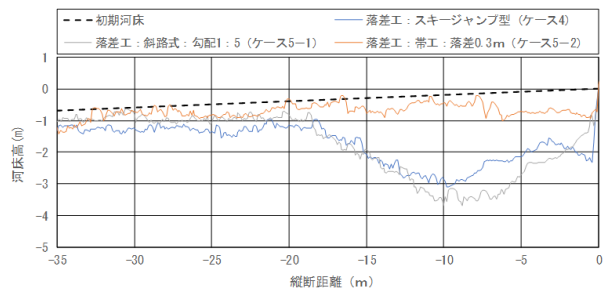


図-5.3 河床形状の縦断図 (ケース4, 5)

b) 河床勾配を $1/30$ とし、河床材料タルボット型 $n=1/1$ とした場合 (ケース6, 7)

河床勾配を $1/50$ とした場合、落差工設置基数が増

え、ステップ・プールの延長が短くなるため、河床勾配は 1/30 に戻し、耐力を増加させるため、河床材料をタルボット型 $n=1/1$ とした。

落差工は、局所洗掘規模が最小となる帯工とし、帯工流下の河床との落差を 0.3m, 0.5m, 0.75m の 3 タイプの落差での効果を調査した。

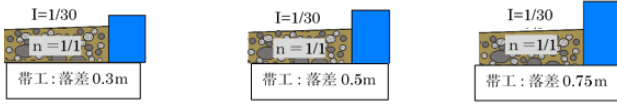


図-5.4 落差工の形状 (ケース 7)

実験結果は、図 5.5 に示すように帯工下流の落差に比例し、洗掘規模が拡大することが分かった。しかし、帯工下流の落差を小さくしすぎると、落差工の設置基数が増え、かつステップ・プールの再現度延長が短くなることにより、帯工下流の落差は 0.5m とし、加えて洗掘抑制とし護床工を設置する方針で検討を進めるものとした。

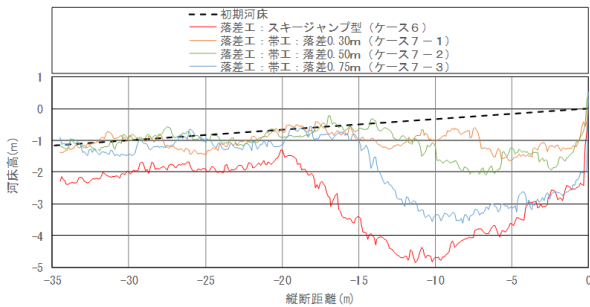


図-5.5 河床形状の縦断面図 (ケース 7)

(3) 護床工の検討 (ケース 8)

河床勾配は 1/30, 河床材料はタルボット型 $n=1/1$ とし、帯工下流の落差は 0.5m とした。護床工 (長さ 6m) を設置するものとし、河床からの設置高さ: -0.2m, -0.5m, -1.0m の 3 タイプで洗掘抑制効果を調査した。

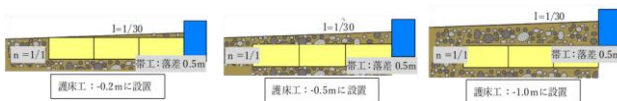


図-5.6 落差工の形状 (ケース 8)

実験結果は、図 5.7 に示すように護床工の敷設高を -0.5m とする場合が最も洗掘規模が小さくなることより、護床工を -0.5m に設置することを中心に具体的な落差工形状について検討を進めるものとした。

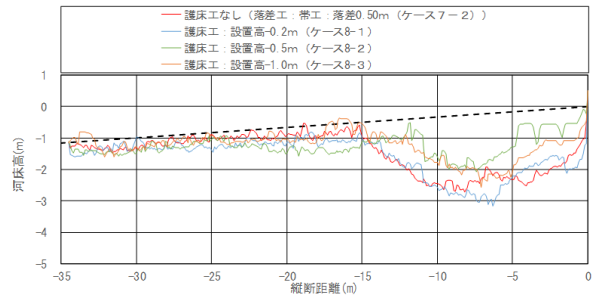


図-5.7 河床形状の断面図 (ケース 8)

(4) 最良案の設定 (ケース 9)

河床勾配は、1/30, 河床材料はタルボット型 $n=1/1$, 落差工の落差は落差 0.5m の階段式 (減勢効果, 魚類の遡上に配慮) とし、勾配 1:1, 1:5 の 2 タイプを調査した。護床工 (延長 7m) は以下の 2 タイプである。

- ・設置深さ: 河床-0.5m, -1.0m,
- ・護床工にエンドシル 2 基を設置 (床番と一体型)

実験結果は図 5.9 に示す河床形状となり、ケース 9-2 が洗掘規模が最も小さい 1m 程度となった。

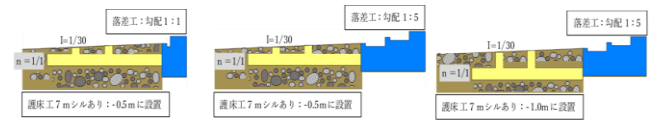


図-5.8 落差工の形状 (ケース 9)

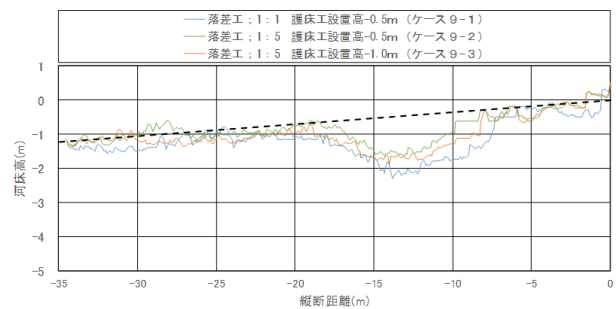


図-5.9 河床形状の縦断面図 (ケース 9)



写真-5 流量 120 m³/s 通水後のケース 9-2 の写真

(5) 模型実験により有効性を確認した、ステップ&プール構造

- a) 河床勾配はケース 2 のタルボット $n=1/2$ 、河床勾配 1/30、落差工無しの実験より、外力を低下させるために 1/50 が良いということになったが、河床勾配 1/50 とした場合、落差工の設置基数が増え、ステップ・プールの延長が短くなるため、河床勾配 1/30 が最良と考えられる。しかし、そのままだとケース 2 より洗掘規模が 4m 以上となってしまうため、河床材料をタルボット $n=1/1$ とし、耐力を増進させるものとした。
- b) 落差工の形状方針は、ケース 4、5①スキージャンプ型、②斜路式(勾配 1:5)、③落差工あり帯工(落差 0.3m)の実験よりスキージャンプ型、斜路式(勾配 1:5)では、洗掘が約 3m 程度となっていることから、最も洗掘が少ない落差工あり帯工(落差 0.3m)を落差工の基本形状とした。そして、基本形状をもとにケース 7 の実験より、落差工の設置基数を増やしてステップ・プールの延長を短くしたくないので、落差は 0.5m とし、減勢効果や魚類の遡上に配慮した、ケース 9 の落差 0.5m の階段式の勾配 1:5 が洗掘規模が小さく良いと考えられる。
- c) 護床工の検討では、ケース 8 の河床から護床工の設置高さ: -0.2m, -0.5m, -1.0m の実験から護床工の敷設高を -0.5m とする場合は、最も洗掘規模が小さくなっており良いと考えられる。また、護床工にエンドシル 2 基(床盤と一体型)を設置したケース 9-2 と、エンドシルを設置していないケース 8-2 を比較すると、ケース 9-2 の洗掘規模が約 1m、ケース 8-2 の洗掘規模が約 1.7m となっており、エンドシルを設置することで落差工下流の局所洗掘を抑制することができていることがわかる。よって護床工は河床から -0.5m の高さにエンドシル 2 基を設置したケース 9-2 の形状が良いと考える。

6. 今後の模型実験と設計の方針

(1) 今後、実験で確認が必要な項目

ケース 9-2 では、計画流量で洗掘深は 1m 程度となったが、超過洪水対策として、河床下-

1~1.5m に巨石、又は根固めブロック等を敷設することで、洗掘抑制がどのくらいできるか確認する。

さらに、完成形の確認として、落差工間隔を計画の 30m とし、計画流量ハイドログラフ 1 波形での河床変動特性を把握する。また、流下能力の観点から、水面変動と計画高水位や天端高(道路高)との確認、粗度係数の妥当性を検証することとする。

(2) 今後、構造検討が必要な項目

落差工については、平常時の流量が少ないため、落差工天端は、フラットではなく、横断方向に緩い勾配(左右岸、中央等を交互に)、切り欠き等を設けて水が流れている部分を多く見せるなどの景観上の検討。また、通常、水が流れていないところの維持管理はどうするか等を検討する必要がある。

護床工については、護床工の端部と淵のところで落差ができ、水脈が離れてるようにみられたので、護床工下流端は、ハンチを設け、局所洗掘部と護床工との落差を緩和させるなどの改善が必要である。

7. おわりに

被災から 3 年が過ぎ、九州北部豪雨復興出張所では、赤谷川流域において、応急復旧が完了し、本格的な改良復旧工事を、地域に寄り添いながら関係機関と一体となって全力で取り組んでいるところである。

将来、魚が帰ってくる事を目指して、より豊かな自然環境を創出するために、ステップ&プールを含めた、魅力ある川づくりを進めていく所存である。



写真-6 現在の乙石川(施工中)