

粗石付護床工ブロックの魚道工への適用と 治水機能に関する一考察

本田 隆秀^{1*}・浅利 修一²・秋野 淳一¹・高澤 浩二¹・高島 清光¹・小林 博²

¹共和コンクリート工業株式会社技術部（〒176-0013東京都文京区小日向4-6-19）

²共和コンクリート工業株式会社技術研究所（〒061-1405 北海道恵庭市戸磯385-36）

* E-mail: honda.t@kyowa-concrete.co.jp

粗石付魚道工は、多様な流れ場を創出することにより様々な水生生物の移動を可能とし、良好な河川景観を創出し周囲の景観になじむため、河川環境の復元の観点から、注目されている。しかし、自然石を用いた粗石付魚道工は、設計手法が確立されておらず、課題が多い。そこで、本研究では、自然河川の礫材を模した粗石付護床工ブロックを勾配1/10と1/20に設置し、水理実験および、ウグイ、タモロコ、モクズガニ他を使用した遡上実験を行った。その結果、粗石付魚道として厳しい条件である縦断勾配1/10で実験に用いた生物の全種の遡上を確認した。また、水理実験での流速と水深の実測データにより、魚類の遡上について検討を簡易に行うことができる水理式を提案した。さらに、擬石の粗度係数が大きな値となり、緩傾斜落差工の本体としての減勢効果についても考察を加えた。

KeyWords: River ecosystem, rough stone, fishway, concrete block, roughness, rubble bed protection

1. はじめに

これまで、河川生態系保全の観点から、多くの魚道が設置されてきた^{1)~6)}。その中で、近年、粗石付魚道を採用するケースが多くなっている^{7)~9)}。この理由として、自然石を用いることの多い粗石付魚道は、現地発生材を用いることにより、経済的なメリットのほか、景観的に溶け込みやすく、自然河川の流れを創出しやすい工法²⁾^{10), 11)}であることが挙げられる。魚道幅が狭くなると、その粗石部の粗度が魚道としての機能に大きく影響することから研究がなされはじめている^{12)~16)}。多くの研究がなされ、設計が簡易に行える水理式が導き出されている階段式魚道^{11), 17)~21)}と比較して、粗石付魚道は粗度となる石材形状や石材間隔、突出高等の魚道の機能を左右するパラメータを多く含んでいる^{13), 14)}。このため、簡易に検討できる粗石付魚道の水理式が確立されていないことから、不自然な流況となり、遡上機能や景観機能に劣る場合もあった(写真-1)。そして、施工現場における粒径選別作業や石材間隔やコンクリートへの埋込み深さの施工管理方法、玉掛け等による石材の吊上げ作業やコンクリート打設時の石材固定方法等、作業の安全性や効率性にも課題を残している。

このような中、円柱状の擬石を等間隔に設置すること



写真-1 粗石付魚道の施工事例

で粗石付魚道の設計が簡易に行える水理式が提案^{15), 16)}され、そして施工現場の効率化を図るためのブロック化により、実用され始めている。しかし、等間隔で配置された粗柱状の粗度であり、維持管理や景観に課題を残している。

本報告では、自然石を模した粗石付護床工ブロックについて、水理実験及び、遡上実験による魚道機能の検証を行うと共に、粗石付魚道の検討時に用いる簡易な水理式を提案する。また、護床工ブロックの大きな粗度に着

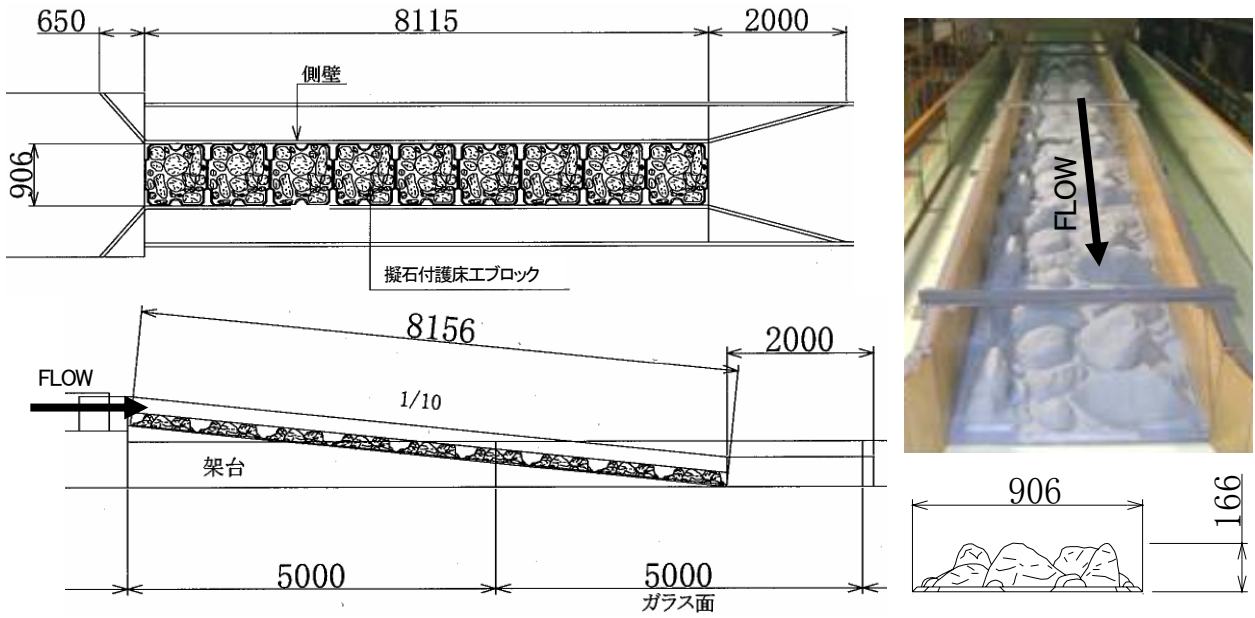


図-1 実験水路の概要図 勾配 1/10 例
 (左上：平面図 左下：縦断面図 右上：水路全景 右下：擬石模様図 引出寸法の単位：mm)

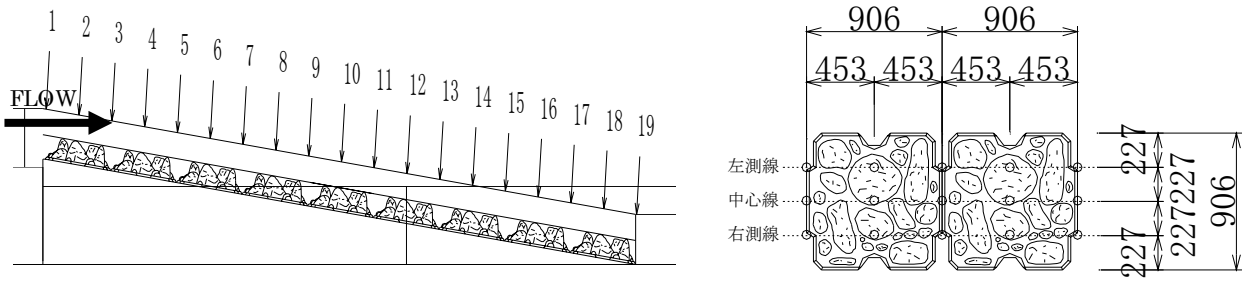


図-2 縦断水面形の測定位置 (左：概略縦断面図 右：計測位置平面詳細図 引出寸法の単位：mm)

表-1 水理実験ケース

ケース名	魚道勾配 (i)	流量Q (m ³ /sec)	水深 (h) (m)
ケース I-1	1/10	0.006	0.042 (1/4h)
ケース I-2		0.018	0.083 (2/4h)
ケース I-3		0.038	0.125 (3/4h)
ケース I-4		0.071	0.166 (4/4h)
ケース II-1	1/20	0.005	0.042 (1/4h)
ケース II-2		0.015	0.083 (2/4h)
ケース II-3		0.032	0.125 (3/4h)
ケース II-4		0.054	0.166 (4/4h)

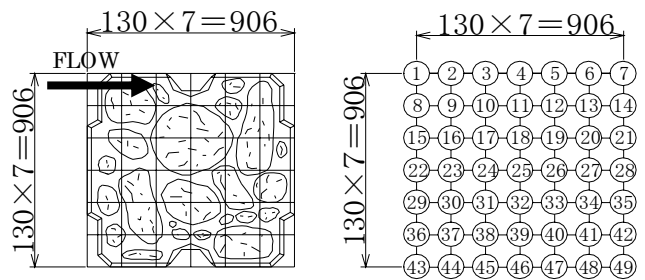


図-3 計測ポイント (引出寸法の単位：mm)

目して、施工現場の事例を交えて魚道工としての遡上機能や景観機能、緩傾斜落差工本体への、特に減勢機能に対して考察を加えた。

2. 魚道機能の実験

実験は、電磁流量计付きの屋内可傾斜台水路を利用し、粗石付護床工ブロックの擬石表面粗度の一部を水路底版に再現して水理実験と遡上実験を行った。

水理実験は、水路勾配を1/10および、1/20の2パター

ンとし、それぞれの勾配に対して流量を変化させて実施した。

遡上実験は、水生生物5種を選定した上で、水路勾配を条件として厳しい1/10に限定して実施した。

本実験施設の縮尺スケールは実験施設の水中ポンプ出力等の能力、試供魚の大きさ、護床工ブロックの大きさ(最小0.5tタイプ)等、実物大で実施可能な規模とした。実物大のスケールに設定したのは、遡上実験の際、魚類の遊泳行動と流れの現象との間に相似則が成り立つかが課題となっている^{15),16)}ためである。

(1) 水理実験

(a) 水理実験施設の概要

本実験の水路施設の寸法は、水路幅 906mm、水路延長 8156mm である。この延長は粗石付護床工ブロック（平面外形 906×906）の 9 個分に相当し、1 個のブロック表面には粗度要素となる擬石模様 23 個を貼付けている（図-1）。

水路上流部には、整流板を設けて流水が安定するようにした。また、ブロック表面の擬石模様は、河川上流域で採取した任意の河床材料 23 個を模ったものである。この 23 個の擬石は、石材径の 1/2 程度が突出するように、はまり石状態で模り（突出高：最大 166mm、平均 68mm、中央値 50mm、最小 25mm）、ブロック表面に任意に配置させたものである。

(b) 水理実験のケースおよび、流速・水深の計測方法
水理実験は、各水路勾配に対して水面高を擬石最高（ $h=166\text{mm}$ ）の 1/4 ピッチで変化させた 4 ケース（以下、水深 $1/4h\sim 4/4h$ ）とした合計 8 ケースを設定した（表-1）。

(c) 水理実験の計測項目と計測地点

縦断方向の水深と斜路中央部のブロック 1 つの擬石表面部の流速・水深を計測した。

縦断方向の水面形を把握するため、ポイントゲージおよび、容量式波高計を用いて水深を計測した。その計測ポイントを図-2に示す。横断方向の水路中央部と水路右側および、左側の計 3 つの縦断断面を計測した。

次に、斜路中央に設置したブロック 1 つの擬石表面の流況を把握するため、三次元電磁流速計および、ポイントゲージを用いて流速・水深を計測した。その計測ポイントを図-3に示す。水深は、1 つのブロックについて、縦断方向および横断方向に 7 側線を設定し、その交点 49 点を計測した。流速は、水深計測した 49 点に対して、水深方向（水路底面垂直方向）に水路底面より 30mm 間隔を基本に測定した。

なお、水位が浅い場合や粗度の位置により測定できない場合には、できる限り計測ポイントに近い位置で計測を行った。

(d) 水理実験の計測結果：縦断方向の水面形

縦断方向の水深を計測した結果例を示す（図-4）。水路勾配 1/20 の水面形は、限界水深に達することなく、最下流のブロックまでほぼ一定水深で流下した（図-4 の下段 2 図）。流水中への空気混入による白濁は側壁観察窓からはほとんど観察されなかった。

一方、水路勾配 1/10 の水面形は、最上流のブロック擬石で一度せき上げ、限界水深程度の水深でせき上げと加速を繰り返し、擬石間を流下した。上流 2 列目のブロックより下流の水位は、各ブロックの同一箇所でも水位がほ

ぼ一定となった。ブロック単位で同一の流況を繰り返して流下していた。なお、勾配 1/10 の流水表面の白濁は水路勾配 1/20 と比較して多く、側壁の観察窓から目視でその層厚は約数 mm \sim 2cm 程度であった。水路全体に白濁が見られたが、大きな擬石背面では、白濁のない流れ場も形成されていた。

(e) 水理実験の計測結果：水路平面上の流況

各ケースの水路底部の流速データを流況計測図として底層 30mm 付近のデータを用いて示す（図-5）。この図は各ケースの底層付近の流況を、ベクトルにより平面二次元成分の流向、コンタにより三次元成分での流速の大きさを表したものである。この流況図は、1 つのブロック表面の流速データを縦断方向へ連続させて流況図としたものである。先に示した縦断方向の水深計測の結果により、ブロック単位での流れを繰り返しながら流下していることから問題ないと思われる。

勾配 1/10、1/20 のいずれのケースも水路中央部で流速の小さな流れ場、側壁沿には流速の大きい流れ場が形成されていた。勾配別に見ると、勾配 1/20 の流況計測図（図-5 右側の 4 つの図）から、水深を増加させても 0 \sim 0.6m/sec 程度以下の流れ場が連続しており、勾配の影響をほとんど受けていない結果となった。一方、勾配 1/10 の流況は、流況計測図（図-5 左側の 4 つの図）より、水深を増加させると 0 \sim 0.6m/sec 程度以下の流れ場が水深 2/4h で一度広がるが、水深が 3/4h、4/4h と増加するに伴い、その流れ場の領域が狭くなり、流速 1m/sec 以上の流速場により分断される結果となった。

(f) 粗石付魚道検討における簡易水理式の提案

一般に魚道機能を検討する際、魚類の遡上速度と魚道内流速を比較して、遡上の可否を判断する^{3),4) 11),20) ~22)}。階段式魚道は多くの研究がなされているが、粗石付魚道の流速や粗度係数を簡易に算出できる水理式が得られている研究成果^{15) 16)}は少ない。

そこで、本研究では粗石付魚道の検討用の簡易式を提案している研究^{15) 16)}を参考に、流量データと水深データから、粗度係数と水深の簡易な関係式を導くこととする。流量データ、水深データ、そしてマンニングの式(1a)と連続の式(1b)を用いて粗度係数を算出する。

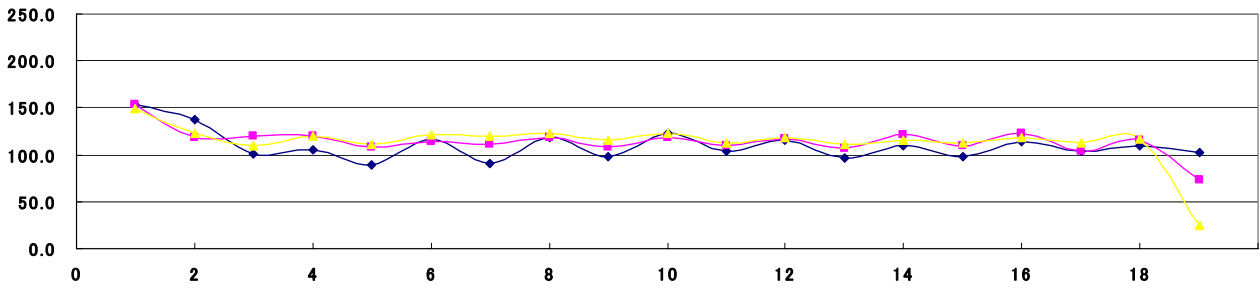
$$V = 1 / n \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (1a)$$

$$Q = V \cdot (A - A') \quad (1b)$$

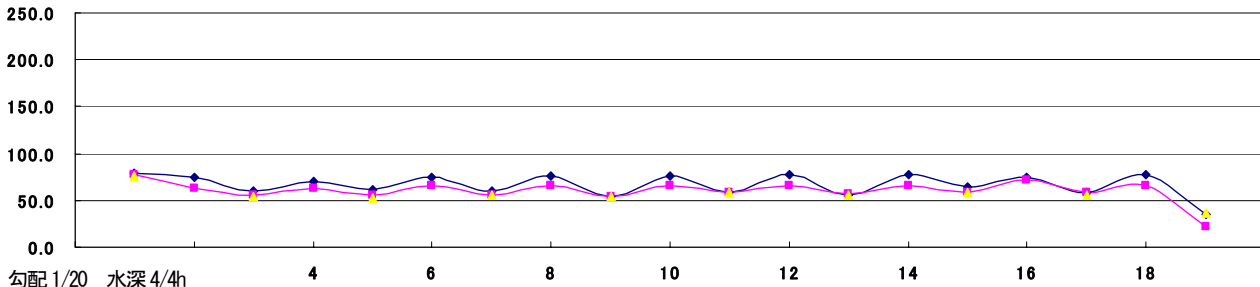
$$R = A / (B + 2h) \quad (1c)$$

ここに、 V ：断面平均流速(m/sec)、 n ：マンニングの粗度係数($\text{m}^{1/3} \cdot \text{sec}$)、 R ：径深 (m)、 i ：水路勾配、 Q ：流量(m^3/sec)、 A ：水面下の擬石粗度の投影面積を含んだ通水断面面積(m^2)、 A' ：擬石粗度の投影面積 (m^2)、 B ：水路幅

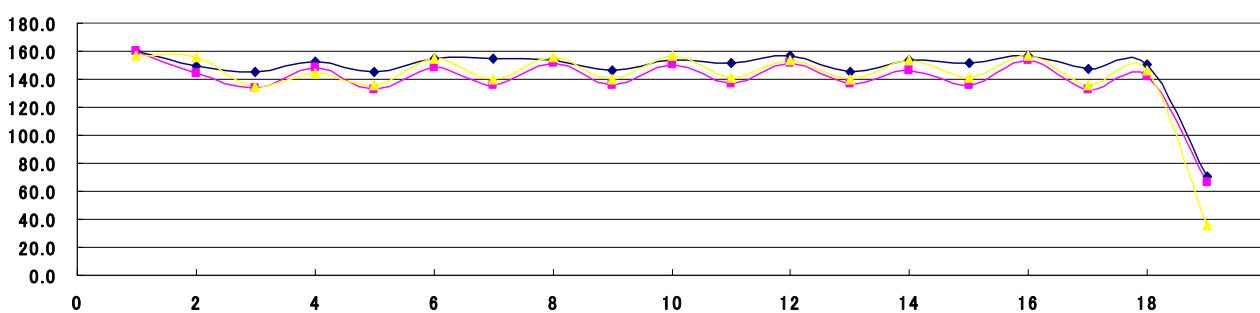
勾配 1/10 水深 4/4h



勾配 1/10 水深 2/4h



勾配 1/20 水深 4/4h



勾配 1/20 水深 2/4h

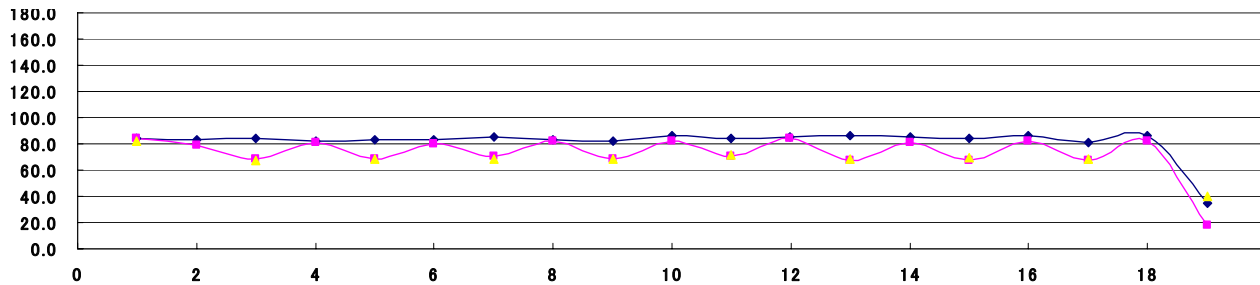


図-4 縦断方向の水深計測結果例 (横軸：側点番号 縦軸：水路底からの水深 単位：mm)



(m), h : 計測平均水深 (m) を示す。

ブロック内7横断ごとに計測した水深データから平均水深 (h) を算出し、各横断における平均水深と側壁、水路底面で囲まれた断面積 (A) と水位以下の擬石粗度の投影面積 (A') をCADデータから求める。その擬石粗度の投影面積を差し引いた通水面積 (A-A') と各横断の平均水深(h), 式(1b)から断面平均流速 (V) を算出する。径深(R)を断面積 (A) と各横断の平均水深(h), 式(1c)から求める。それら得られた値とマンニングの式(1a) から粗度係数を算出する。

この算出された粗度係数(n)と平均水深(h)の関係を示したものが図-6で、勾配1/10では式 (1d)、勾配1/20で

は式 (1e) を得る。

$$n_{1/10} = 0.230 \cdot h^{0.523} \quad (1d)$$

$$n_{1/20} = 0.188 \cdot h^{0.688} \quad (1e)$$

勾配1/10の粗度係数($n_{1/10}$)と平均水深(h)との相関は高く、水深が大きくなると粗度係数も大きくなったが、最大でも0.1程度以下となった。一方、勾配1/20の粗度係数($n_{1/20}$)と平均水深(h)の相関は低いものの、勾配1/10と比較して水深に影響を受けず、0.1程度以上の大きな値を示した。

(g) 簡易式の検証

提案した簡易式(1d)および、(1e)を用いて魚道内の平均流速値 (以下、理論値と呼ぶ) を求め、実測した流速値の最大値、中央値、平均値、最小値と比較する。

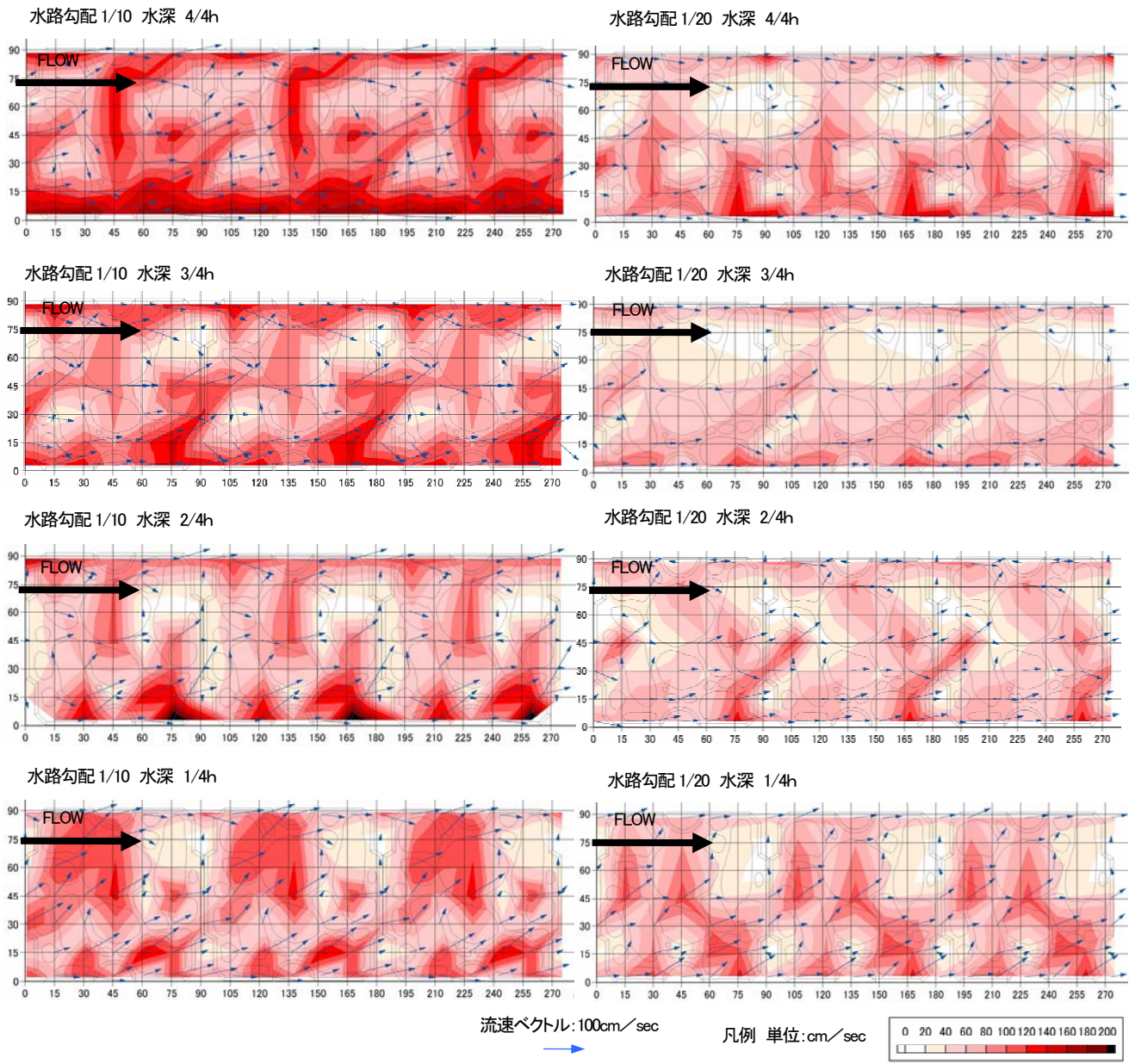


図-5 各ケースの流況計測図 (底層 30mm 付近の例)

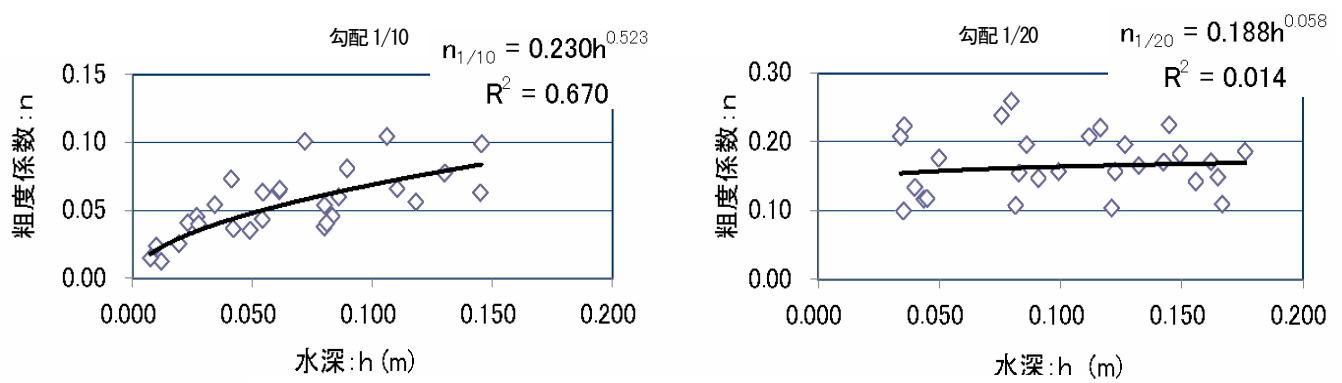


図-6 勾配別の水深と粗度係数の関係

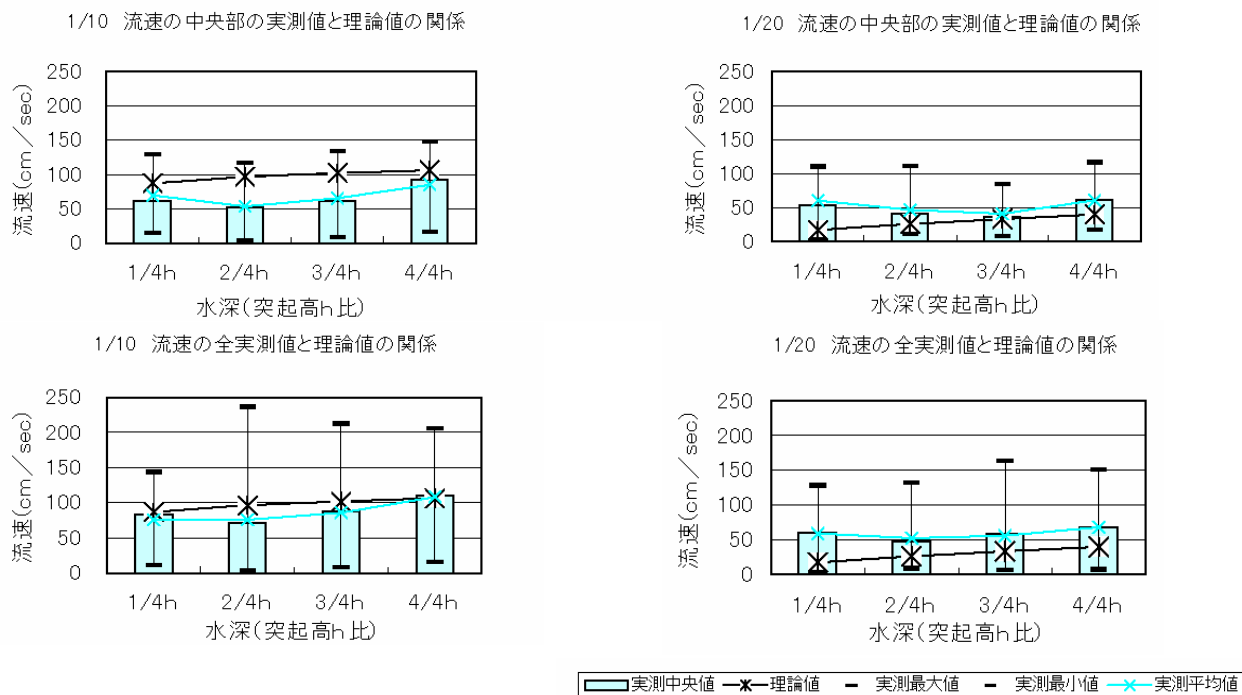


図-7 条件別にみた魚道内流速の理論値と実測値

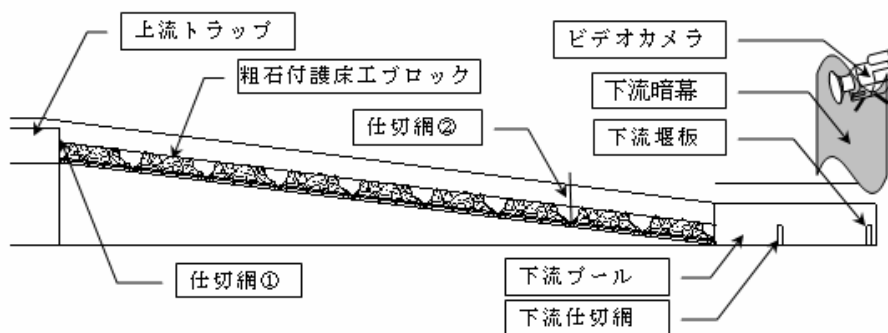


図-8 遡上実験の水路 概略図

比較にあたっては、流況の目視観察と流況計測図(図-5)から、水路側壁部の影響の少ないと思われる中央部(計測ポイント15~35)とブロック全面(計測ポイント1~49)に分けて行った(図-7)。

ブロック中央部の流速は、勾配1/10で実測した平均値および中央値が理論値を下回り、1/20では実測した平均値および中央値が理論値を上回ったが水深の変化によらず最大値でも1m/sec程度以下であった。

ブロック全面の流速は、勾配1/10では水深1/4hから3/4hまで実測した平均値および中央値が理論値を下回ったが水深4/4hで理論値を上回り、勾配1/20では実測した平均値および中央値が理論値を上回ったが0.6m/sec程度以下であった。

(2) 遡上実験

(a) 遡上実験施設の概要

遡上実験は、水理実験で使用した勾配1/10の施設を利用して、遡上実験用に改良して実施した(図-8)。一般に粗石付魚道が機能する勾配は1/20程度より緩勾配であ

る²⁾ことが一般的な知見となっており、本実験では条件として厳しい勾配1/10とした。水路下流に堰板で魚類等を放流できるプールを施すと共に、水路上流には、放流魚を採捕できるトラップを設置した。また、脱着式の仕切網①、仕切網②を用いて、実験終了時の下流プール部、斜路部、上流トラップ部の各エリアへ移動した個体数を把握した。魚類の遊泳行動を把握するためのビデオカメラ撮影及び、目視用の視察台を設けた。観察時の人影等による魚類への影響を軽減するための暗幕を設けた。

(b) 遡上実験のケース

遡上実験のケースは、遊泳魚のウグイを用いて水理条件を変えた3ケースと水深を一定にして底生魚のヨシノボリ属、タモロコ、ドジョウ、モクズガニの4種を用いた4ケースとし、合計7ケースを設定した(表-2)。

(c) 遡上実験の方法

遡上実験では、各ケースで設定した条件下で、下流プールに試供生物を放流し、実験終了時における各エリアへ移動した個体数を把握した。

表-2 遡上実験の実験ケースおよび条件

実験ケース	魚種名	規格 (cm)	数量 (尾)	流量(m ³ /sec) / 水深(m)				実験時間
				0.006 / 0.042	0.018 / 0.083	0.038 / 0.125	0.071 / 0.166	
ケース I'-1	ウグイ	L10	50		2/4h			22時間
ケース I'-2			50				4/4h	22時間
ケース I'-3			25	1/4h ⇔ 2/4h ⇔ 4/4h				約1時間
ケース I''-1	ヨシノボリ	L5	100	1/4h				22時間
ケース I''-2	ドジョウ	L10	100	1/4h				22時間
ケース I''-3	タモロコ	L5	30	1/4h				22時間
ケース I''-4	モクズガニ	L5	13	1/4h				22時間

ウグイ L10: 体長10cm程度
 ヨシノボリ L5: 体長 5cm程度
 モクズガニ L5: 甲幅 5cm程度

表-3 魚類・甲殻類の出現河川数

遊泳魚	順位	1998 ~ 2006	出現 河川 数	底生魚	順位	1998 ~ 2006	出現 河川 数	甲殻類等	順位	1998 ~ 2006	出現 河川 数
2	オイカワ	360	2	ヌマチチブ	337	2	スジエビ	292			
3	コイ	351	3	ドジョウ	334	3	カワニナ	290			
4	アユ	348	4	マハゼ	312	4	アメリカザリガニ	238			
5	ウグイ類	330	5	ナマズ	285	5	テナガエビ	209			
6	ボラ	327	6	カマツカ	269	6					
7	モロコ類	300	7	ウナギ	250	7					
8	メダカ	254	8	ウキゴリ	240	8					
9	モツゴ	242	9	シマドジョウ	172	9					
10	カワムツB型	141	10	アシシロハゼ	84	10					

※出典元:河川水辺の国勢調査 1998~2006年のデータをもとに作成

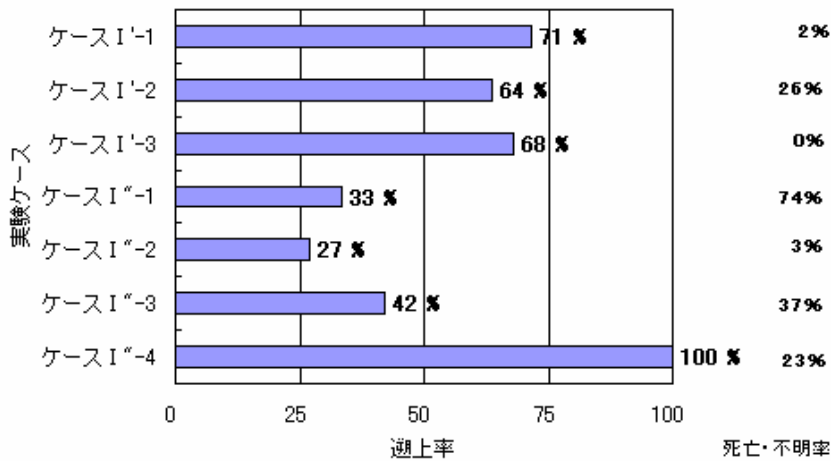
表-4 ケース別の各エリアへの移動個体数・不明個体数

実験ケース	魚種名	採捕場所・個体数(尾)						不明 個体
		上流部		傾斜部		下流部		
		採捕数	死亡	採捕数	死亡	採捕数	死亡	
ケース I'-1	ウグイ	35		0		15	1	4
ケース I'-2		28	7	9		9	2	
ケース I'-3		17		5		3		
ケース I''-1	ヨシノボリ	11	7	4	1	85	66	
ケース I''-2	ドジョウ	26		6		67	2	1
ケース I''-3	タモロコ	8		0		22	11	
ケース I''-4	モクズガニ	10		0		0		3

遡上実験に用いた試供生物は、水辺の国勢調査データ²³⁾の出現頻度の高いものを調べ(表-3)、典型種とした。その中から、魚類の遊泳形態の違いから、遊泳魚ではウグイ、底生魚ではヨシノボリを選定した。本川と水田域を行き来する魚種として遊泳魚にはタモロコ、底生魚にはドジョウを選定した。また、昨今の魚道施設ではバイオロード的な役割を担い始めており^{1), 2), 7), 9), 24)}、魚類以外の水生生物として甲殻類のモクズガニも選定種とした。これら選定にあたっては、入手・飼育の容易さや実験施設への輸送の可否、施設規模と魚体等を考慮して、総合的に判断して決定した。

実験時間は、ウグイの行動周期や既往実験^{9), 16), 21), 22)}を参考に設定した(流量を変化させたケース I'-3を除く)。ウグイ以外の水生生物については既往データに乏

しく、あまり知られていないことから、活動時間を含む昼夜1日とし、実験時間をウグイと同じ条件とした。本実験施設は、生物の活動周期に影響するといわれる照度変化^{1), 21), 22), 25)}が屋外施設と比較して小さく、変化も少ないことから、遡上行動に影響することが予想された。そこで、補足実験として、水生生物、特に魚類においては、流れの刺激によって行動を起こす習性、走流性^{26), 27)}が知られており、この走流性に着目したケースを加えた(ケース I'-3)。このケースでは、魚道内の流速(流量)を変化させ、試供生物へ強制的に刺激を与え、遡上率への影響を比較した。実験時間を約1時間とし、水深を1/4hから2/4h、4/4hへ約10分間隔で増加させた後、同じ間隔で1/4hまで戻すよう流量を制御した。実験終了時に各エリアへの移動個体数を把握した。



※死亡・不明率 = (全死亡個体数 + 不明個体数) / 全放流個体数

※遷上率 = 上流部採捕個体数 / (全放流個体数 - 上流部以外死亡個体数 - 不明個体数)

図-9 ケース別の遷上率 死亡・不明率

(d) 周辺環境条件の計測項目

実験は、平成23年5月31日～6月17日に実施した。遷上実験中は日の入と日の出の時間に合わせて屋内照明を調整し、水路周辺・屋外の照度や水温、気温を合わせて計測した。

(e) 遷上実験の結果

実験に用いた試供生物5種について行った遷上実験7ケースの結果を示す(表-4)。全ての試供生物の遷上を確認した。表-4の死亡、不明個体は実験中に水路外へ飛び跳ねて死亡した個体や水路外へ移動した個体である。

放流数に対するこれら個体数の影響を考慮して上流トラップで採捕された個体数の割合を遷上率(図-9下遷上率の式)とし、放流数に対して、上流トラップ以外で死亡した個体と不明個体の割合を死亡・不明率として解析した(図-9)。

各試供生物の結果を見ると、ウグイを用いたケースでは、遷上率が64%、71%といずれも高い数値を示した。補足ケースとして設定した水深を変化させた約1時間の実験でも、68%と高い遷上率を示した。

モクズガニを用いたケースでは、実験終了時に3個体が不明となったが遷上率100%と高い数値を示した。

ヨシノボリとタモロコでは、遷上率が順に33%、42%とウグイと比較して低かったが、死亡・不明率が順に74%、37%と高かった。

ドジョウも遷上率27%と低い値を示したが、他の生物よりも上下流への行き来が多い状況を目視により確認し、また、上流トラップへ一度入った個体が出たり、入ったりといった繰り返しの行動も確認した。

(f) 周辺環境条件の計測結果

実験時間中の照度は、屋内で0.001～0.011(mW/cm²)、屋外で0.114～4.67(mW/cm²)を示し、屋内に対して屋外の照度は100～400倍程度以上の違いが見られた。水温(気

温)は、ウグイを用いた遷上率の最も高かったケース I'-1では、実験開始時14℃、終了時22℃でその差は8℃(気温差5℃)、ケース I'-2では開始時22℃、終了時24℃でその差は2℃(気温差無し)、ケース I'-3では23℃で水温差・気温差共に無かった。ヨシノボリを用いたケースの水温は、19～22℃でその差は3℃(気温差無し)、ドジョウ、タモロコ、モクズガニを用いたケースの水温は、いずれも実験開始時23℃、終了時25℃でその差は2℃(気温差1℃)であった。

3. 粗石付護床エブロックの魚道工や減勢工への適用と減勢機能に対する一考察

(1) 粗石付護床エブロックの魚道工への適用

一般に粗石付魚道が機能する勾配は1/20程度より緩勾配である²⁾ことが一般的な知見となっており、本実験でも勾配1/20では白濁の殆どない安定した流況が得られていた。

また、魚道としては厳しい機能条件となる勾配1/10ではあるが、水深14hでは試供生物全5種の遷上を確認できた。ヨシノボリ・ドジョウ等の底生魚の突進速度は1m/sec程度^{1),4),5),11)}以下であり、水理実験で得られた流況図から、移動可能であると考えられる。また、水路中央部の底層に流速0～0.6m/sec程度以下の休息可能な流れ場⁴⁾が形成されていた。実際に、全試供生物が1つのブロック内で休息、移動を繰り返している行動を確認しており、最上流への遷上可能な流況が形成されていたことになる。しかし、遊泳力の弱いヨシノボリやドジョウ、タモロコについては遷上した個体数が3～4割程度と低かった。既往の研究でヨシノボリ等の遊泳力の弱い底生魚について実験時間を3日間とした実験^{7),9)}があり、時間が短かったことが遷上率に影響した可能性がある。また、屋外の照



写真-2 落差工下流に設置された護床エブロック



写真-3 粗石付護床エブロックの緩傾斜落差工への適用例

度変化と比較して屋内実験で照度が低く、試供生物の日周期行動への刺激が少なかった²⁵⁾ことも、遡上率を低くした要因の1つではないかと考える。一方で、ウグイに関しては、流量に変化を与えた実験時間が1時間と少なかったが、約1日行った他のケースと同程度の7割の遡上率となったのは、ウグイが走流性を示す魚種²⁶⁾であるからだと思われる。ウグイを用いて遡上の可否を判断する実験としては効率的な検証方法であると考えられる。

そのほか、ウグイを用いたケースでの水温は、実験開始時14℃、終了時22℃でその差が8℃と大きいにも関わらず、高い遡上率を示し、ヨシノボリでは、実験開始時19℃、終了時22℃でその差は3℃と小さいにも関わらず、低い遡上率を示した。ドジョウ・タモロコ・モクズガニでは、いずれも実験開始時23℃、終了25℃でその差は2℃であったが、モクズガニの遡上率は100%、タモロコの遡上率は42%、ドジョウは27%であり、水温やその差による遡上率への影響は明確にはならなかった。

以上のことから、魚道機能を検証する上では厳しい実験条件下でも全試供魚の遡上を確認したことから、本実験に用いた粗石付護床エブロックは、魚道工への適用が可能であることが示唆された。

(2) 魚道検討の簡易水理式の提案

魚道検討で対象魚種の遡上可否を判断する際、一般に、魚道内流速と魚類の突進速度や巡航速度を比較して、遡上や休息が可能かを判断するのが一般的である^{5),9),11)}。本実験で得られた魚道内水深とマンシングの粗度係数の関係式によって簡易に魚道内流速を導くことが出来る。特に、遡上条件として厳しい勾配1/10の簡易水理式(1d)では相関が高く、水深1/4hから3/4hまでは実測した流速の平均値が提案した簡易水理式で求められた理論値を下回る結果となり、魚道検討時の簡易式として適用可能

である。ただし、水深4/4hでは計測した流速の実測値が理論値程度となり、かつ、平均流速1m/sec程度以上となることから、ウグイのような遊泳力のある魚種に遡上が限定されるものと考えられる。

一方、粗石付魚道として機能を発揮する一般的な勾配1/20の簡易水理式(1e)では魚道内水深とマンシングの粗度係数は相関は低いものの勾配1/10と比較して水深に影響を受けず、最低値でも0.1程度の大きな値を示した。この値と簡易水理式(1a)により流速を求めれば実測した平均値や中央値の近似値となる。加えて、ブロック中央部に流速0.6m/sec程度以下の連続した小さな流れ場、最大でも1m/sec程度以下の流れ場が形成され、全試供魚の遡上を確認していることから、水深は限定されるものの、典型種であれば遡上可否を検討せずに魚道工として遡上機能が期待できるものと考えられる。

以上のことから、既往のパラメーターを多く含んだ水理式と比較して、実験結果から導かれた簡易な水理式により、魚道の遡上機能の検討が可能であることが示唆された。

(3) 粗石付護床エブロックの緩傾斜落差工への適用、および、減勢機能に対する一考察

河床の安定を図る落差工や帯工が設置される場合、魚類をはじめとした水生生物の生息環境を分断しないよう、それら施設に魚道機能を付加させることが義務付けられている²⁹⁾。水生生物の生息環境の保全を考えると、横断構造物を設置しない方が望ましい。しかし、各地の河川の現状に目を向けてみると、土砂供給のバランスが崩れ、河床低下による護岸工や橋梁下部工の根入れ不足が問題の1つとなっている。現場によっては、橋梁や護岸の基礎の支持地盤となる岩盤露出、あるいは、岩盤床の洗掘により、構造物の安定性に影響を与える深刻な問題となっている場合もある。

これら対策の1つとして、下流域から低落差工や帯工等を設置して河床の環境改善を兼ねた事業も始まっている。これら構造物には水生生物の移動経路としての機能と河床の安定性といった治水機能が求められている。

この具体的な構造として、河床低下に追従する屈とう性を有する護床ブロックに魚道機能を付加した緩傾斜落差工の構造・工法^{30),31)}が挙げられる。本実験で用いた護床エブロックは、ブロック安定検討に必要な水理特性値を水理実験によって得ており、その中に相当粗度 $K_s=1.151$ が得られている³²⁾。この値で仮に水深を2m程度とした場合の粗度係数を求めれば0.05程度の値が得られる。この値は、一般的な河川の粗度係数0.03と比較して大きいことから、緩傾斜落差工の下流部での流速の低減効果を期待できる。緩傾斜落差工の下流部の流速が小さくなれば、下流の護床工長を短くでき、経済的な施設と

なる。護床工ブロックは、ブロック同士を連結させて河床の安定性を図る構造であることから実績も多く、河川の局所洗掘等にもある程度追従することが確認されている（写真-2）。

一方、橋梁下部工の保護として一部改修された本ブロックを用いた緩傾斜落差工の事例（写真-3）では、施工後の土砂・ゴミ等の堆積は殆ど見られず、本ブロック表面の擬石間にはヒゲナガカワトビケラの営巣や甲殻類の移動が確認されている³³⁾。

以上のことから、粗石付護床工ブロックは、通常水位では魚道工としての遡上機能、計画高水時では緩傾斜落差工の減勢機能を期待できると考える。

4. まとめと今後の課題

(1) 本研究のまとめ

本報告では、粗石付護床工ブロックの粗度に着目した水理実験により魚道設計の簡易式の提案を行い、遡上実験により遊泳形態や生息域の異なる4魚種と甲殻類1種の遡上を確認し、魚道機能を検証した。以下に本実験条件下で自然石を模った粗石付護床工ブロックに関して得られた成果、および本研究で得られた知見をまとめる。

- ・ 粗石付魚道として急勾配である1/10で、自然石を模った粗石付護床工ブロックの魚道機能を確認した。
- ・ 粗石付魚道の遡上条件として厳しい1/10勾配でも、試供生物として用いたウグイ、ヨシノボリ、タモロコ、ドジョウ、モクズガニ全5種の遡上を確認した。
- ・ 粗石付魚道の遡上条件として厳しい1/10勾配でも、粗度高程度までの水深で、魚類等の遡上や休息可能となる流速場を形成した。
- ・ これまでの粗石付魚道で魚道機能を検討する際の水理式は、石材形状・間隔・突出高等の魚道機能を左右するパラメーターを含んでいたが、本研究で提案した簡易な水理式を用いることで魚道検討を行うことができる。
- ・ 河川上流域の河床材料をあまり石状態で模った大きな粗度を有する粗石付護床工ブロックは、洪水時に減勢機能を発揮することを示唆した。

(2) 今後の課題

本実験においては試供魚全ての遡上を確認したが、ヨシノボリとタモロコの死亡率は高く、遡上率が低くなった。本実験施設では水冷式水中ポンプが用いられており、実験中の水温上昇（実験開始と終了時の気温差に比べ水温差が大きい）による魚類へ影響も考えられた³⁰⁾。試供魚の実験施設までの輸送時や飼育時、あるいは実験実施時の環境条件の違いが魚類の遊泳行動に影響を与える可能性があり、魚道実験を実施する際には、これらの点に

も注意する必要がある。ドジョウの低い遡上率は上流トラップに入った個体が出たり入ったりといった行動を繰り返していたためでと考えられ、実験施設（トラップ構造）の改良も必要である。そのほか、遡上実験の試供魚に関しては、実験施設の色による試供魚の挙動の違いや入手前の捕獲方法や飼育方法などの違いについても把握する必要があると考えられる³⁴⁾。

今後、本実験で用いた大きな粗度を有する護床工ブロックについて現地での遡上調査や流況調査を実施して、機能検証する必要がある。また、河川横断構造物の減勢機能の効果、特に、落差工周辺の瀬・淵の連続した流況の形成特性³⁵⁾、その形成された流況について遡上や降下といった魚道機能や景観機能、更には、河床低下等への屈とう性構造の機能等の長期的、かつ、継続的なデータの蓄積が重要である。

参考文献

- 1) 廣瀬利雄ら：最新魚道の設計，ダム水源地環境整備センター，信山社サイテック，1998
- 2) 国土交通省河川局：魚が上りやすい川づくりの手引き，2005(http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kanryo/kankyousakana_tebiki/index.html)
- 3) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995
- 4) 和田吉弘：言いたい放題魚道見聞録，山海堂，2003
- 5) 農林水産省農村振興局整備部設計課：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，農業土木学会，2002
- 6) 九州地方整備局河川部魚道検討会：魚道設計参考資料（案）（魚道設計の考え方），1997
- 7) 中川達郎・野本粹浩：第十堰の魚道設計について，ダム技術，No143，PP.82～87，1998
- 8) 住谷昌宏：長良川河口堰の環境対策について，大ダム，No157，PP.2～20，1996
- 9) 柏井条介・岡村敬子：多様な魚種を対象とした魚道の遡上実験，土木技術資料，Vol. 38，PP.20～25，1996
- 10) ドイツ水資源・農業土木協会（リバーフロント整備センター）：魚の遡上設備とその設計・施工・機能監視 - 多自然型魚道マニュアル，1998
- 11) 建設省土木研究所砂防研究室：砂防溪流における魚道設置の手引き（案），土木研究所資料，1998.
- 12) 岩村勉・板垣博・場淵和三：改良植え石つき斜路型魚道の局所流速（2）-自然石魚道ブロック魚道（勾配1:8）-，多自然型研究，No. 65，PP.19～29，2000
- 13) 河村三郎・宮本晋一：相対水深の小さい流れの抵抗に関する研究，電力土木，No. 263，PP.72～77，1996
- 14) 河村三郎：魚類生息環境の水理学，財）リバーフロント整備センター，PP.1-27，2003
- 15) 桜井力・柏井条介他：コンクリートブロックを用いた粗

- 石式魚道の水理および遡上特性, 水工学論文集, Vol. 44, PP. 1197~1202, 2000
- 16) 国土交通省土木研究所ダム部水工水資源研究室ほか: 粗石魚道のコンクリートブロック化に関する共同研究報告書, 土木研究所共同研究報告書 276 号, 2001
- 17) 北陸土木コンクリート製品技術協会魚道ブロック委員会: プレキャスト魚道ブロック工法の手引き~水路式魚道ブロック工法~, 2007 (http://www.hokudocon.jp/download/data/hokudocon_gyodo.pdf)
- 18) 玉井信行・水野信彦・中村俊六: 河川生態環境工学, 東京大学出版会, 1991
- 19) 房前和朋・島谷幸宏・萱場祐一・傳田正利: 礫河床における魚類の遊泳速度に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 41 卷, 1997
- 20) 鈴木興道: 魚類の設計に資する淡水魚類の耐久遊泳速度, 土木学会論文集, No. 622, VII-11, PP. 107-115, 1999
- 21) 林田寿文・本田隆秀・萱場祐一・島谷幸宏: 階段式魚道における落下流と表面流の発生特とウグイの遊泳行動, 環境システム研究論文集, Vol. 28, PP. 333~338, 2000
- 22) 本田隆秀・林田寿文・萱場祐一・島谷幸宏: 階段式魚道における魚類の行動実験から見た魚道形状・構造に対する一考察, 全国魚道実践会議 2003in 岐阜論文集, PP. 143~150, 2003
- 23) 国土交通省: 河川水辺の国勢調査
http://www3.river.go.jp/index_seibutu.htm
- 24) 安田陽一・大津岩夫・高橋正行: V字溝型魚道の流況特性-原型と模型からの経験-, 河川技術の論文集, Vol. 12, PP. 385~390, 2006
- 25) 井上実・任為公・有元貴文: 河川魚類の明・暗環境における走向行動, 日本水産学会誌, Vol. 12, No.48, PP. 1697~1701, 1982
- 26) 塚本勝己・梶原武: 魚類の遊泳速度と遊泳能力, 水産土木, Vol. 10, No. 1, PP. 31~36, 1973
- 27) 岩井寿夫: アユの走流反応に関する実験的研究, 三重大学水産研報, 第 4 号, PP. 93~105, 1977
- 28) 井上実: 魚の走流性, 月刊海洋科学, Vol. 15, No. 4, PP. 215~218, 1983
- 29) 社) 日本河川協会: 解説・河川管理施設等構造令, PP. 3-7 178-185 222-223, 2000
- 30) 社) 日本河川協会: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説, P. 48-75, 山海堂, 1997
- 31) 財) 国土開発技術研究センター: 床止めの構造設計の手引き, 1999
- 32) 財) 土木研究センター: 護岸ブロックの水理特性値試験報告書, 2011
- 33) 本田隆秀: 緩傾斜粗石付魚道の水際域流況調査報告, 全国魚道実践会議 2008in 岐阜論文集, PP. 61~66, 2008
- 34) 鬼東幸樹: 魚道の流れ特性と魚の遡上特性との関係, ながれ, Vol. 31, No. 1, PP. 19~28, 2012
- 35) 知花武佳: 落差工によって形成される瀬-淵構造の特性, 土木学会論文集 B, Vol. 66, No. 3, PP. 223-234, 2010

(2012. 5. 25 受付)

One consideration about application of the rubble bed protection work concrete block to fishway works and flood control function

Takahide HONDA¹, Shuichi ASARI², Junichi AKINO¹, Koji TAKAZAWA¹,
Kiyomitsu TAKASHIMA¹, Hiroshi KOBAYASHI²

¹Kyowa Concrete Industry Corporation Engineer Department

²Kyowa Concrete Industry Corporation Technical Research Center

The rubble fishway works are attracted attention from the viewpoint of restoration of river environment because it make migration path of various aquatic creatures possible by creating various flow field and create satisfactory river landscape and adopt landscape of periphery. But, design technique of the rubble fishway works which used a native rock is not established and there are many problems. So, in this research, We installed the rubble bed protection work concrete block imitated gravel materials of natural river with grade 1/10 and 1/20, and We did hydraulic model experiment and the going up experiment that used *Tribolodon hakonesis*, *Gnathopogon elongatus*, *Eriocheir japonica* etc. As a result I confirmed going up of all genus of a creature used for experiment with longitudinal slope 1/10 that were severe condition as the rubble fishway. And We suggested the hydrology equation that could do simply examination about going up of fishes by observation data of flow velocity and water depth with hydraulic model experiment. Further I confirmed energy dissipating effect as low pitch falling works because roughness modules of an artificial stone became big value.