

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

HYDRAULIC AND FISH ASCENDING CHARACTERISTICS OF CONCRETE BLOCK STREAM TYPE FISHWAY

桜井 力¹・柏井条介²・佐々木國隆³・岡崎克美⁴・進藤邦雄⁵・岡本俊策⁶
Tsutomu SAKURAI, Josuke KASHIWAI, Kunitaka SASAKI, Katsumi OKAZAKI,
Kunio SHINDOH, Syunsaku OKAMOTO

¹正会員 工修 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 主任研究員 (〒305-0804 つくば市旭1)

²正会員 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 室長 (〒305-0804 つくば市旭1)

³正会員 株式会社ホクエツ設計部 部長 (〒984-0002 仙台市若林区御町東1-1-52)

⁴株式会社テトラ環境事業本部環境エンジニアリング部 課長 (〒160-8350 東京都新宿区西新宿6-3-1)

⁵正会員 共和コンクリート工業株式会社技術研究所 所長 (〒061-1405 北海道恵庭市戸磯385-36)

⁶技研興業株式会社 技術一部 次長 (〒150-0031 東京都渋谷区桜丘町13-10)

From the viewpoint of preservation of the ecosystem of rivers, expectations are on the rise for various fishways for fish migration. Stream type fishways with cobble stones and boulders as roughness elements create a good natural landscape. These type of fishways offer a wide variety of flows with different depths and appear as murmuring little streams or as high-speed rapids. This research aims to develop a new type of fishway which can reduce the costs and time and look like as a natural stream. We analyzed the hydraulic characteristics of a fishway built with concrete blocks that was developed with the earlier mentioned objectives using hydraulic testing. Based on it, a design method was proposed. Further, we conducted ascending tests for many kinds of fish and the results confirmed that this type of fishway is well used by all the tested fish under various flow conditions

Key Words : stream type fishway, hydraulic test, ascending test, concrete block, roughness

1. はじめに

河川の生態系保全の観点から多様な魚種の遡上可能な魚道への期待が高まっている。粗石魚道は粗石を粗度として用いたもので、横断方向にも勾配を付けることによって多様な水深と流速場や、せせらぎ的な流れも形成できる景観上も優れた魚道である。¹⁾しかし、現在用いられている粗石魚道は、自然石を用いてその不定型さや礫間の隙間などを利用するものであり高コストなものである。また、流れは複雑であり種々の魚道条件(幅、縦断勾配、水深など)の設計手法については未だ確立されていない。

本研究は、この粗石魚道をコンクリートブロック化し、コスト低減および工期の縮減等を図ったものである(以下ブロック式魚道と呼ぶ)。実物大モデルによる水理実験を行い、魚道の形成する流速場を測定・解析し、現地の地形や流量条件に合わせた粗度形状や縦横断勾配等の設計手法の提案を試みた。

また、魚道の代表的な対象魚としてアユを、遊泳能力の小さい底生魚としてヨシノボリおよびヌマチチブを用いて、種々の粗度配置および流量条件下に

おける遡上状況を確認した。

2. 粗度配置の検討

ブロック式魚道の検討に先立って、円筒を水路に規則的に配置した魚道についての基礎的な検討を行い、ブロック式魚道を設計する際の粗度規模および配置と得られる流速場の関係を求めた。

(1) 実験方法

実験は幅50cm長さ15m勾配1/20の水路に表-1に示す円筒による粗度を設置して行った。円筒の配置については1~3列とし、流下方向の間隔は20cmとした。計測は、水深、流速および流量について、それぞれポイントゲージ、直径5mmのプロペラ式流速計および電磁流量計を用いて行った。

(2) 実験結果

実験結果を整理するために、ここでは、流速と粗度形状の関係式として以下のマンニングの粗度係数を用いるものとした。

$$n = (R^{2/3} I^{1/2}) / v_e \quad (1)$$

表-1 粗度形状と配置

	粗度配置	縦断形状
ケース1		
ケース2		
ケース3		

ここに、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深、 v_e : 断面平均流速
 なお、径深 R および断面平均流速 v_e は横断方向に粗度のない断面の値を用いている。

水路の抵抗は、流下面積に対する粗度の占める面積の影響が大きいと考えられるので、次の遮蔽率 α を用い、粗度係数 n との関係調べた。

$$\alpha = A_r / A_t \quad (2)$$

ここに、 A_r : 粗度の流下方向の投影面積、

A_t : 粗度を含む水路全体の断面積

図-1 に粗度係数と遮蔽率の関係を示した。粗度は遮蔽率の増加とともに大きくなり、その関係はほぼ以下の近似式で表すことができる。

$$n = 0.0332(1 - \alpha)^{-1.7} \quad (3)$$

なお、上式は流下方向の粗度間距離を 20cm すなわち円筒直径の 2 倍とした場合の関係式である。したがって、適用に際してはこの条件を考慮しておく必要があるが、同時に実施した実験結果によれば径の 1.5~2.5 倍の範囲であれば粗度は $\pm 5\%$ 程度しか変化しておらず、実用上は同様の取り扱いが可能である。²⁾

(3) 粗度配置

図-2 にブロック式魚道断面の基本形状を示した。流速は水深が大きいほど大きくなる傾向があり、流速低減の方法としては、粗度を配置するとともに、水深を小さくする方法がある。アユカケやヨシノボリ等の遊泳力の小さい魚種では魚体自体もそれほど大きくないため大きな水深を要求しない。また、前述の検討から考えても数十 cm/s という小さい流速を水深の大きな領域で確保するのは、遮蔽率が非常に大きくなり、効率的ではない。これらを考慮し、水路の横断方向に水深を変化させる水路を用いることとした(図-2)。水路幅は比較的实施例の多い 2m とした。図中の最高水位および最低水位はこの魚道の利用水深範囲の上下限を示したものである。最低水位はサクラマスなど比較的鱼体の大きな魚種を考慮し、最高水位は流量変化および横断方向

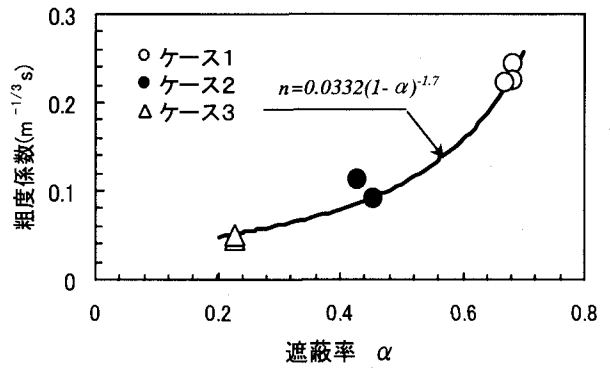


図-1 遮蔽率と粗度の関係

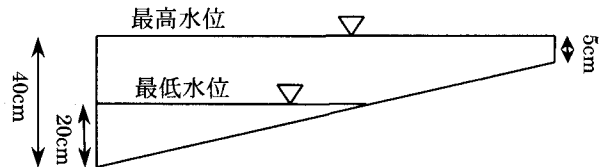
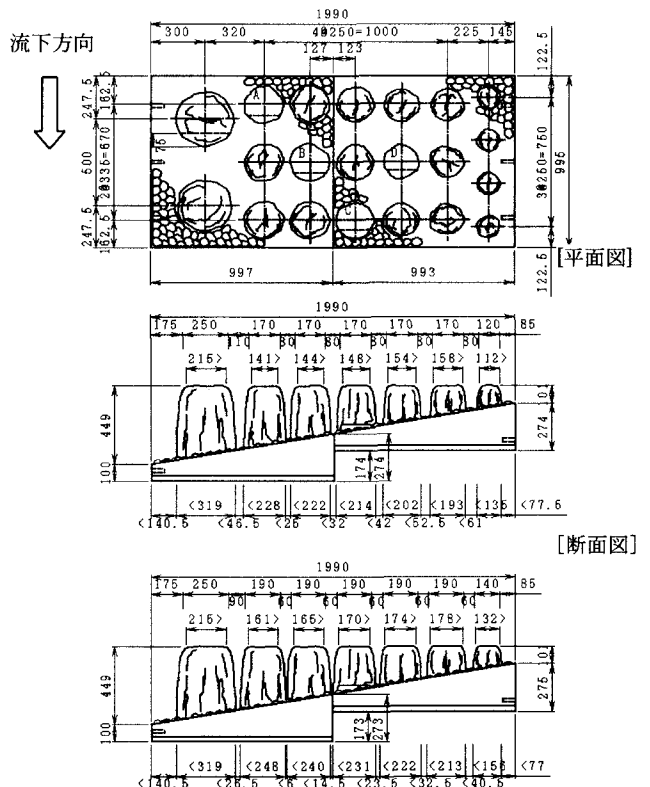


図-2 ブロック式魚道基本形状(横断面)

の勾配を考慮して設定したものである。横断方向の勾配は、幅方向に緩やかな流速変化となり、多様な流速場が得られるように 1/6 程度の勾配とした。

設計流速としては、最高水位において最深部で 1 m/s、最浅部で 0.3m/s として連続的な流速変化を想定した。最高水位を設計の対象としたのは、水位が低下すれば必然的に流速は小さくなり、魚道としては良好な状態に移行すると考えられるためである。1m/s の流速は大型のアユおよび大型魚の巡行速度を想定したものである。また、0.3m/s の流速は別途実施している実験結果¹⁾により、体長 2~4 cm の



注) 断面は上段が 1/8~1/12 勾配、下段が 1/5 勾配

図-3 実験に用いたブロック式魚道

カジカやアユカケが流速 0.4m/s 以下の流速場において遡上していることを考慮したものである。

施工上の都合や魚が遡上できるようにある程度粗度間の幅を確保する必要から、円筒はある程度以上の大きさにする必要があり、粗度係数を連続的に変化させることはできない。したがって、実際の設計に際しては、まず、形状・配置を設定し、これから遮蔽率、粗度係数を求め、流速を計算して想定した値となっているかを検証することになり、多少の繰り返し計算による形状設定が必要となる。

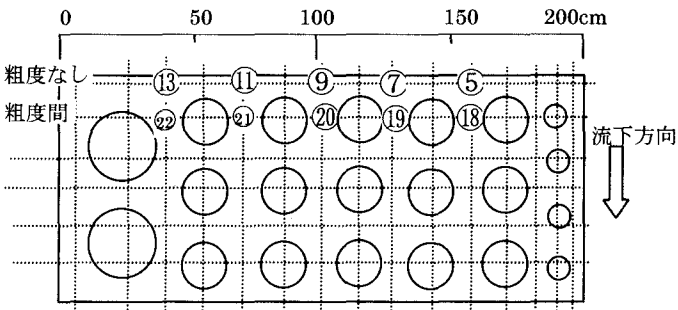
このようにして求めた粗度形状・配置の基本単位をもとに施工性等も考慮して設計したブロック式魚道を図-3に示した。円筒には高さ方向に若干の筋状の凹凸を設けるとともに、脱型を考慮して上部をやや細くしている。また、底部にも底生魚の休憩所となるように石状の凹凸を設けた。コンクリートブロックはこの横断方向2m×流下方向1mを基本単位として、これを流下方向に並べていくこととなる。また、施工上の都合からこの基本単位を2つのブロックで製作している。なお、得られる流速の差がわずかであることから勾配 1/8~1/12 は同一形状とした。この形状において得られる粗度および流速の計算値を図-4に示した。図中の粗度および流速は中央に円柱を1つ含むようにブロック分けした各断面の値を示したものである（以下断面流速と呼ぶ）。最深部が想定した流速よりも大きくなっているのは、大型魚のために粗度の間隔をやや大きく設定したためであるが、特に支障が生じる程大きな流速とはなっていない。

また、1/5 の勾配はこれまでの実績と比較してかなり急勾配となっており、これが実用化可能であれば、魚道設計の自由度をかなり増すことができるものと考えられる。なお、ここで示した魚道形状は、基本的な粗度配置であるが、現場の種々の設計条件に対しても同様の設計手法で形状を決めることが可能である。

3. ブロック式魚道の水理特性

(1) 実験方法

前述の2形状の魚道を実際にコンクリートブロックとして試作し、水理実験を行った。実験を行った流量条件等を表-2に示した。なお、流量 250 l/s



注) 測定は破線で示した測線の各交点で行った。本文図中で引用した測線および測点のみ名称を記入した。

図-5 測線および測点

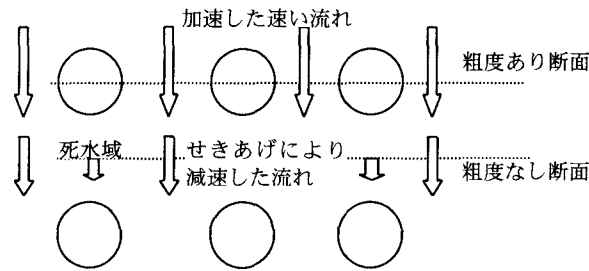


図-6 ブロック内の流況

が最高水位に 50 l/s が最低水位に対応している。各ケースとも上下流の水槽間の落差を 1m とし、この間にコンクリートブロックを敷き並べた。ただし、上流1ブロック分（1m区間）は整流区間として水平にブロックを設置した。測定機器は前述の実験と同様である。また、測定を行った測点および測線を図-6に示した。

表-2 ブロック式魚道の実験条件

	勾配	流量(l/s)
形状1	1/8,1/12	50,100,150,200,250,300
形状2	1/5	

(2) 流速場の特性

流下方向の水深は、上流の水平部を含む2ブロックおよび下流の水槽水位の影響を受けているブロックを除いて各ブロックの同一箇所はほぼ同じ水深となっていた。したがって、流れは等流と見なすことができ、また、ブロック単位でほぼ同一の流況が繰

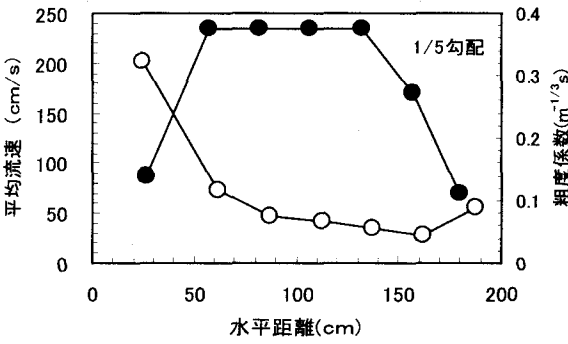
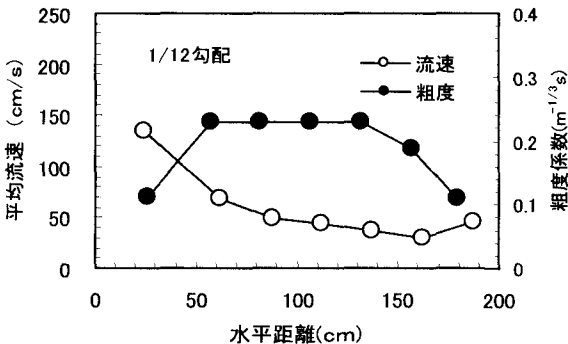


図-4 粗度係数および流速の計算値(横断面)

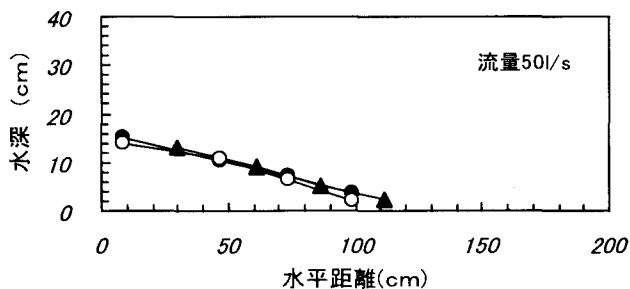
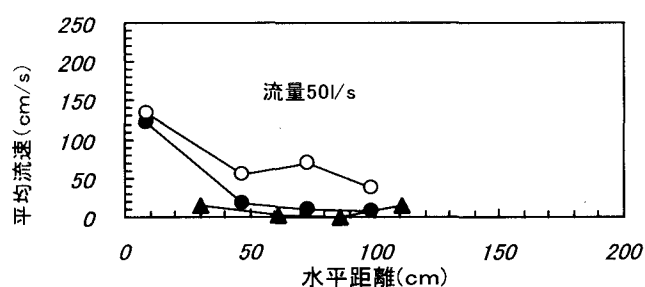
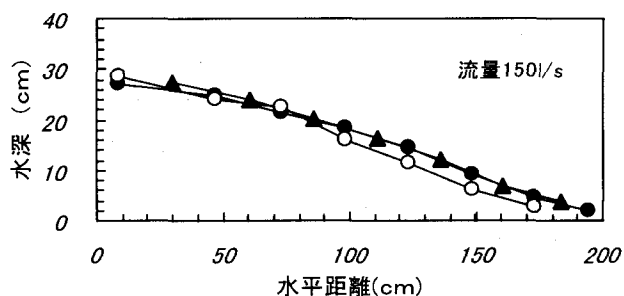
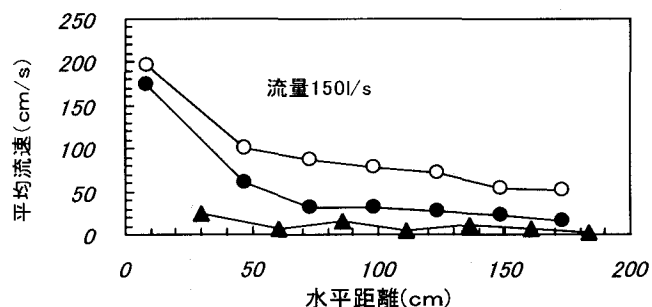
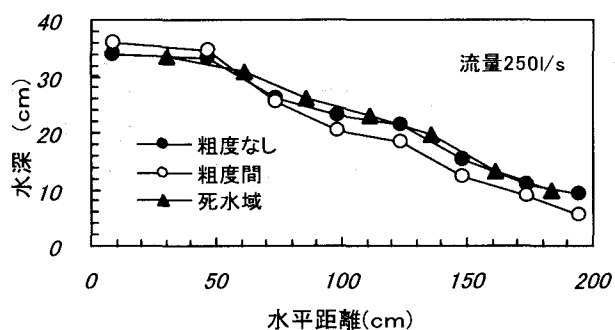
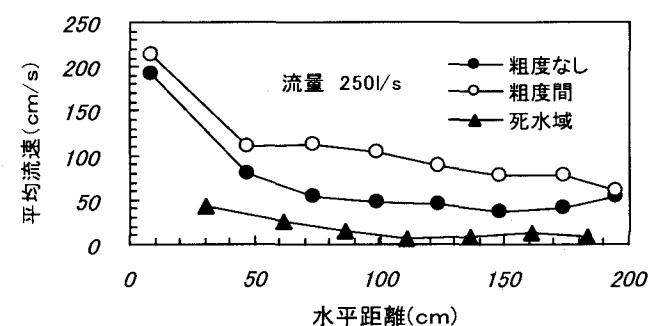


図-7 ブロック式魚道の平均流速分布(横断面)

図-8 ブロック内の水深変化(横断面)

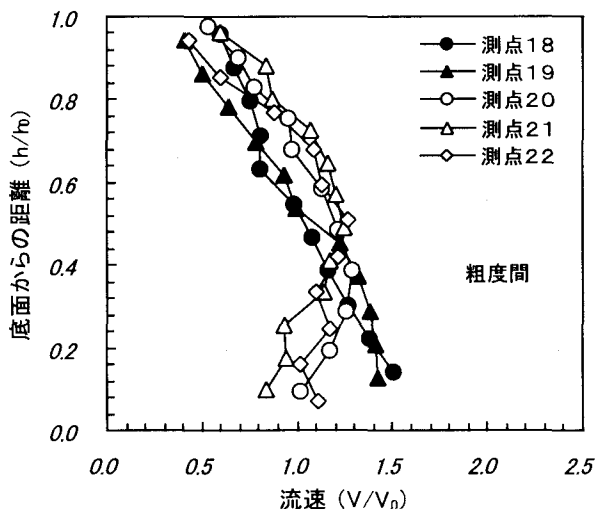
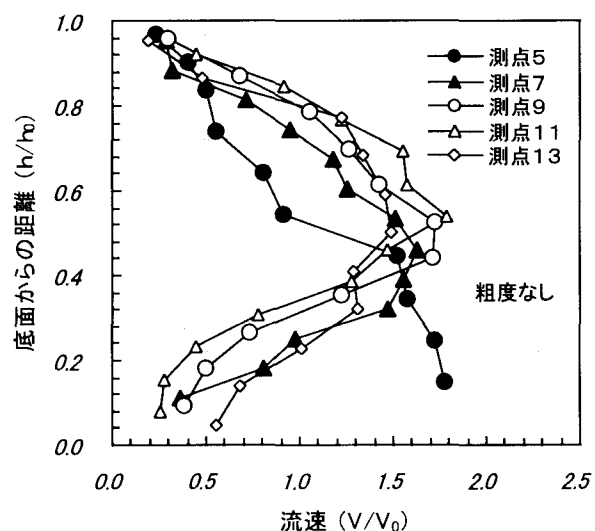


図-9 縦断方向に粗度のない測線における深さ方向の流速分布(勾配1/12、流量 250ℓ/s)

り返されていると考えられる。

各ブロック内の流れは図-6に示すように大きく3つのパターンに区分される。すなわち、横断方向に粗度のない断面では粗度背後の死水域と流速の大きな粗度のない領域の繰り返しとなる。一方、流下方向に粗度のない測線でみると、粗度のない断面で流れがせき上げられることにより減速し、粗度がある領域ではせきあげられた水位によって流れは加速

している。なお、以後簡単のため、流下方向に粗度のない領域のうち横断方向に粗度のある領域を粗度間、粗度のない領域を粗度なしと呼ぶ(図-5)。

図-7, 8は、形状1の勾配1/12のケースについて横断面における深さ方向に平均した流速(以下平均流速と呼ぶ。)と水深の変化を示したものである。流速は最深部を除いてほぼ1m/s以下となっており水深の変化に応じて連続的に緩やかに変化している。

水深も連続的に変化しており、水位は横断方向にほぼ一定となっている。また、粗度なしと粗度間を比較すると、水深の深い領域では大きな減速は見られないものの他の領域では粗度なし断面では粗度間の5～8割程度の減速が生じており、その割合は流量が小さいほど大きい。水深の変化はわずかで数cmの上昇となっている。なお、他形状もほぼ同様の傾向を示している。

勾配 1/12、流量 250ℓ/s 時の水深方向の流速変化を粗度間、粗度ありに分けて図-9に示した。なお、流速は平均流速で、底からの距離は水深でそれぞれ無次元化している。図によれば粗度間、粗度なしとも水深に依らずほぼ一定の分布形状となっていることがわかる。粗度間では底部に行くに従い徐々に流速が大きくなるが、その変化はわずかである。一方、粗度なしの領域ではやや流速の変化は大きくなり、表層部と底部の流速が遅く、中間部で最も流速が大きくなる。こうした傾向および流速の変動幅は、流量、形状および勾配によらずほぼ一定であった。

(3) 設計流速の検証

図-10に粗度なしの測線における断面平均流速（計算値と同様、円柱単位での断面平均流速）の実測値と計算値を比較して示した。底面等に設計上考慮しなかった凹凸を設けたため、各形状とも計算値よりやや小さい値となっているが、流速はほぼ想定した範囲内で連続的に変化しており、提案した設計手法の有効性が確認された。

4. ブロック式魚道の遡上特性

(1) 実験方法

実験は水理実験に用いた施設で行った。流量は、基本形状の最高水位に当たる 250ℓ/s、最低水位に当たる 50 ℓ/s およびこれらの中間の 150 ℓ/s とした。対象魚は、アユおよび底生魚とした。アユは養殖魚であり、底生魚は近傍の河川より捕獲したもので、ヌマチチブとヨシノボリがほぼ同数混在している。アユの実験時間は筆者らが行ったこれまでの遡上実験における検討結果³⁾から、遡上活動が盛んになる照度変化の激しい日出、日没を含む夕方4時から翌朝の9時までとした。底生魚については遡上に時間を要するため¹⁾朝10時から3日目の朝10時までの3日間とし、2日目に一度通水を中断して遡上魚を捕獲した。ともに実験開始1時間前に魚を下流プールへ投入し落ち着かせた後に実験を開始した。

実験尾数は実験の再現性、統計処理の有意性を保つために100尾程度とした。また、遡上実験は、実験時期や実験魚の体調等により遡上意欲が異なってくるため絶対的な評価が難しい。そこで、アユの遡上実験時には、同時に階段式魚道（勾配 1/25、階段数6）においても実験を行い、遡上率を比較した。

なお、実験場所の制約から実験時期および対象魚はケースによって異なっており、勾配 1/8 のブロック式魚道は5月にアユを、勾配 1/12 および 1/5 の魚道は6月にアユを7月に底生魚の実験を行っている。

(2) 実験結果

各形状、流量におけるブロック式魚道におけるアユの遡上率を同日に実施した階段式魚道における遡上率とともに図-11に示した。なお、階段式魚道では、一部かなりのアユが途中プールに留まっているケースが見られたのでプール1段以上遡上した場合も併

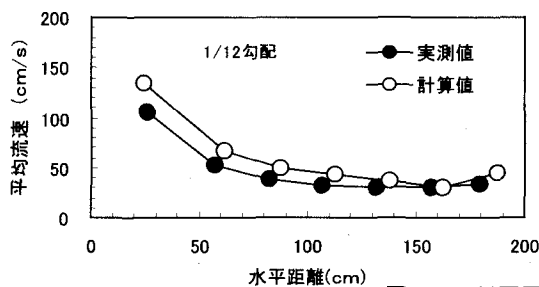


図-10 断面平均流速の実測値と計算値の比較

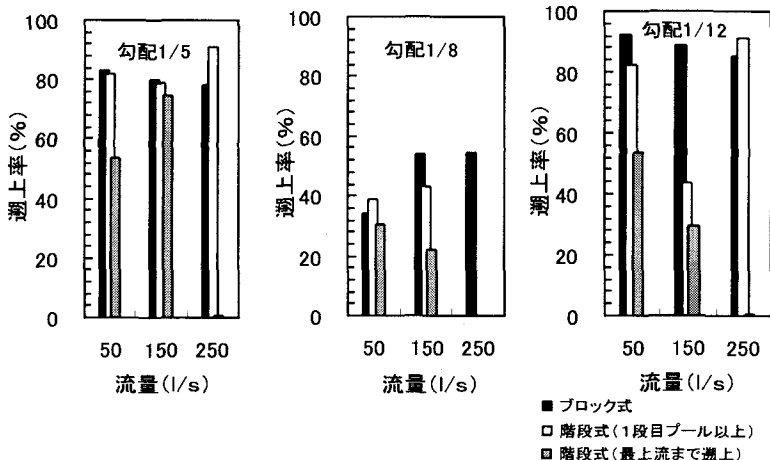
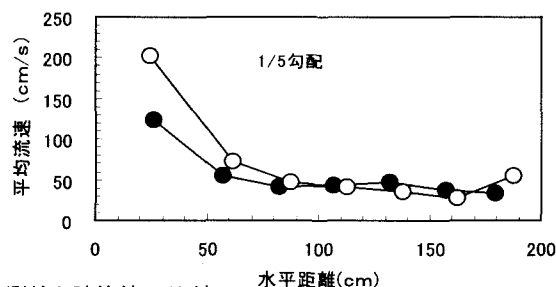


図-11 ブロック式魚道と階段式魚道の遡上率(アユ)

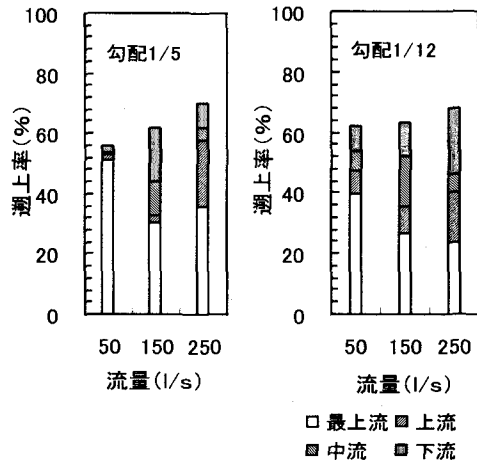


図-12 ブロック式魚道の遡上率(ヨシノボリ他)

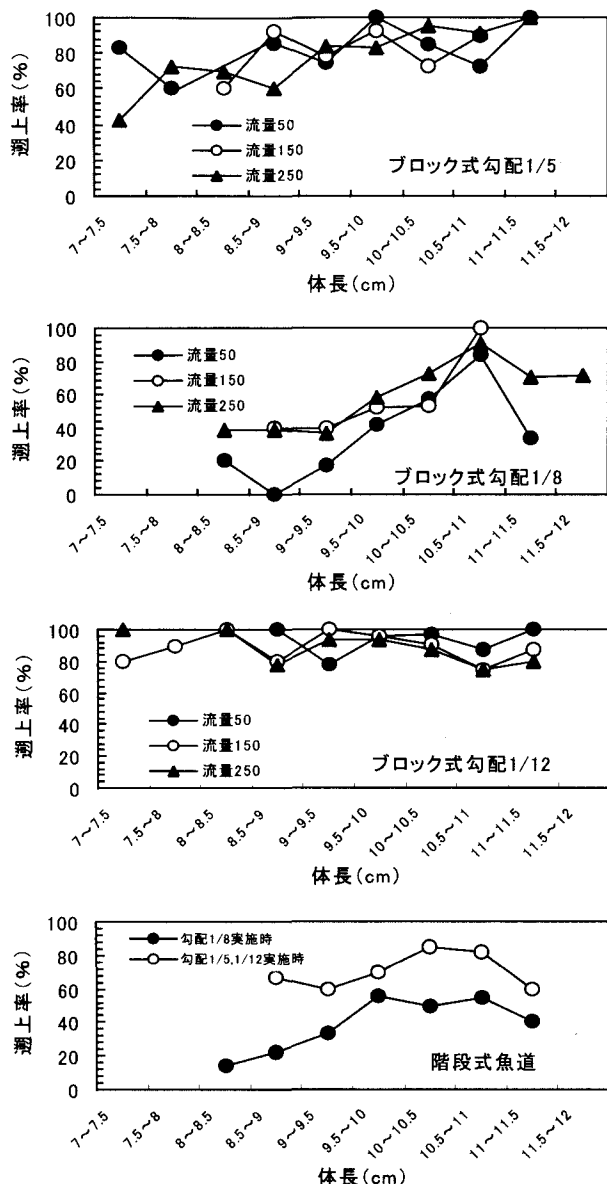


図-13 ブロック式魚道と階段式魚道の体長別遡上率(アユ)

記した。勾配 1/5 および勾配 1/12 のブロック式魚道は流量にかかわらずほぼ 80%以上と階段式とほぼ同程度の遡上率を示している。勾配 1/8 のブロック式魚道はやや遡上率が低く 50%程度に留まっているが、同日に行った階段式魚道も同様に遡上率が低くなっており、実施時期が5月とやや早かったことが原因と考えられる。流速も他勾配の魚道と同様適切に制御されていること、流量の小さいすなわち流速の小さい場合に遡上率が低下していることから遡上意欲が6月の実験時に比較して低かったと推測される。なお、50%の遡上率はこれまでの遡上実験結果と比較して決して低い率ではなく、実用上特に問題はない値と判断される。図-13に、アユの体長別遡上率を示した。勾配 1/8を除いてほぼ体長によらず一定の遡上率を示している。これは、遡上意欲のある魚体であれば体長にかかわらず遡上可能であったことを示していると考えられる。勾配 1/8 のブロック式魚道は、特に流量の小さい、すなわち全体としての遡上率が低かった場合に、より小さい体長

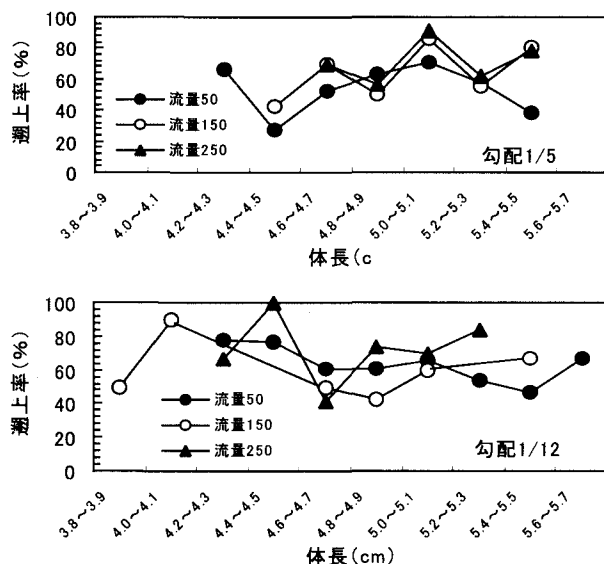


図-14 ブロック式魚道の体長別遡上率(ヨシノボリ)

の魚体の遡上率が低い傾向を示している。図-13に階段式魚道の体長別遡上率を併記したが、同様の傾向が同時期の階段式魚道にも現れており、遡上率の低下は流速等の水理的要因ではないと考えられる。

図-12に底生魚の遡上率を示した。勾配 1/5、1/12ともにほぼ 60%以上の遡上率を示している。図-14は底生魚の体長別遡上率を示したものであるが、アユ同様体長によらず一定の遡上率を示している。

なお、遡上経路については観察が難しく、十分な検証が行えなかった。

5. 結論

本研究ではコンクリートブロックを用いた粗石式魚道の開発を行い、その水理特性および遡上特性を把握し、設計手法を提案した。これらの検討結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 本魚道は、多様な流速場を形成することができる。
 - 2) 本魚道は、勾配を 1/5 と大きく採ることが可能であり、設計の自由度が高い魚道である。
 - 3) 本魚道は、多様な魚種が遡上可能である。
 - 4) 本研究で提案した手法により、実用上十分な精度で必要とされる流速場を有した魚道を設計できる。
- 今後は現地実験等により実用化を図っていくとともに、ゲートへ直接設置すること等を念頭においてさらなる急勾配の検討も進めていく予定である。

本研究にあたり、土木研究所水工水資源研究室 STA フェローシップ研究員 Dr. Kumar 氏に多大な御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柏井条介, 村岡敬子: 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, No. 2, pp. 20-25, 1996
- 2) 野仲典理, G. S. Kumar, 柏井条介: 円筒を用いた水路式魚道の遮蔽率と粗度係数の関係, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 2 部, pp. 258-259, 1999
- 3) 田中和浩: 階段式魚道におけるアユの遡上特性, 土木研究所資料第 34 回土木研究所発表会論文集, 1996

(1999.9.30受付)