

粗度が大きい緩勾配斜路における流水表情

—半球を用いた水理実験—

A Study on the Superficial Texture of Running Water on the Gentle Slope with Rough Surface

池田 大樹* 篠原 修** 逢澤 正行***

by Hiroki IKEDA, Osamu SHINOHARA, Masayuki AIZAWA

1. 背景と目的

近年、河川の機能の一つとして「親水性」が要請されることが多くなってきた。この「親水性」という言葉の表す意味には、実際に水に触れて楽しむことが出来るという身体的な親水性と、堰や落差工などの河川構造物において起こる落水、あるいは流水の持つ表情がもたらす視覚的な親水性の2つがある。後者の視覚的な親水性に関しては、水の表情の魅力を最大限に引き出すための水自体を操作対象としたデザイン方法論が必要である。

既報の一丸らの論文¹⁾、星野らの論文²⁾に於いては、越流型および自由落下型の落水表情を、水理学経験式に基づいて考察し、表情予測図に基づくデザイン方法論を提案した。これらの成果を踏まえ、本研究では緩勾配流水面をもつ構造物を対象として流水表情の分類及びその規定要因の考察を行った。

緩勾配流水面は、昔からある堰や、最近の多自然型工法によって造られた落差工等に見られる。これらの流水面上では流速は越流型や自由落下型に比べて遅くなり、人々が構造物周辺で水に触れて遊ぶことが出来、また全面魚道として、その河川に生きる様々な生物にとって住みやすい環境を提供できる等の、フィジカルな意味での親水性が存在する。さらに、構造物表面の粗度に応じて、水が滑らかに流下する様子が見られたり、埋め込まれた自然石によってあたかも自然の瀬のような泡や飛沫を楽しむことが出来るなど様々な表情を観察することができる。

この様に緩勾配型構造物は様々なメリットがあり、将来河川風景を形づくる上ではその必要性がますます

高まると考えられるが、そのデザインに際しては、水理条件に基づいた流水表情のコントロールはおろか、緩勾配流水面に起こりうる流水表情の把握すらできていないのが現状である。

よって本研究では、緩勾配流水面を持つ構造物を対象として、特に自然石埋め込み面など粗度が大きい場合について、単純化したモデル実験を行うことで表情を分類し、その表情を規定する要因を考察した後、流水表情の予測・制御を可能とするデザイン方法論を提示することを目的とした。

なお、水理学の分野においては「緩勾配」とは流れが常流となるような河床勾配を示すが、Michels.V and M.Lovely⁴⁾によれば、開水路流れにおいて空気混入が起きて白濁するのは

$$I > 0.0865 / R^{0.0834} \quad (I : \text{勾配}, R : \text{径深})$$

とされ、これは実用的な範囲においては大体1/10程度となることにより、本研究に於いては1/10以下の勾配について「緩勾配」と定義することとする。

また、対象とするのは構造物を越流した後の流水面とし、越流部、着水部などの表情については他の機会に譲る。

2. 流水表情の実例

実際に自然石埋め込み面を持つ緩勾配型構造物にお

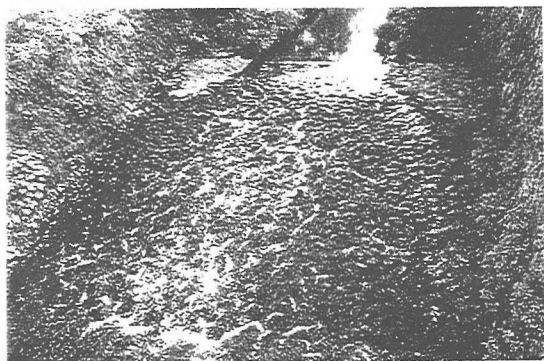


写真1 山口県 一の坂川

キーワード；景観、空間設計、河川構造物

*学生員 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻

**正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

***正会員 東京大学大学院工学系研究科

土木工学専攻 博士課程

(〒113東京都文京区本郷7-3-1)

ける流水表情を観察すると、写真1～3に示したように流量、流速などの河川条件、あるいは埋め込まれた石の配置などの条件によって異なる表情が見られる。写真1の場合には、水面に発生した泡は石の周囲に回り込み、全体としてうろこ状の白みを呈している。写真2の場合には流水面のところどころにおいて水が石に当たって砕け、白い筋を後方へ引いている。写真3では水は石によって激しく泡立ち、流水面全面にわたって白く見える。

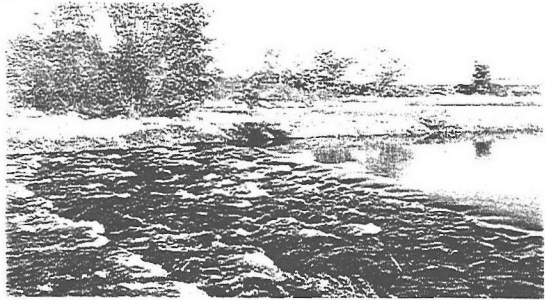


写真2 ドイツ rur川

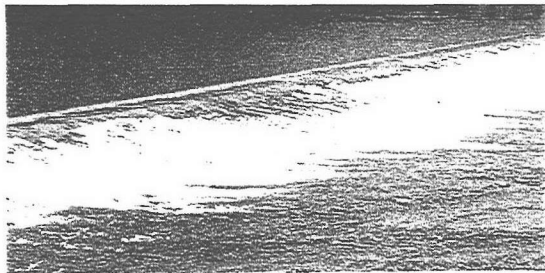


写真3 高知県 仁淀川

3. 実験による流水表情の考察

(1)実験の意義

前章に示した流水表情の違いを規定しているのは、構造物表面の1つの石の周囲における水の動きと、それらが集合した時の総和としての水の表情であると考えられる。しかし、こうした石の周囲における水面形状を規定するといった水理学上の先行研究が見あたなかったため、今回は単純化したモデルを用いて実験を行い、それに基づいて考察を行った。1つの石の周囲に起こりうる表情には、その石が流水中に単独である場合と、上流側にある石によって起こされた乱れの影響を受ける場合の2通りがある。

(2)実験概要

(a)条件設定

実験は長さ30m、幅60cmの水路中に長さ180cm、幅

60cmの木製斜路を設置し、この上を水が流下するようにした。石の代わりに木製の半球を用い、流水中に単独で石がある場合を想定して一つのみ設置した場合と、上流側の半球によって起こされた乱れが下流側半球の表情に影響を及ぼす場合を想定して3行3列に9つの半球を設置した場合とを設けた。この時の半球中心間隔は、予備実験を行った上で上流側の影響が効果的に現れる距離を判断し、半球直径×2.5と設定した。

本研究の目的は半球周りの表情が流量によってどのように変化するかを観察することにある。この時に表情を規定する要因として考えられるパラメータには相対水深 d/r （水深／半球高さ）、フルード数 Fr が挙げられる。そこで、それぞれのパラメータの影響を測定するため、 d/r と Fr を様々に組み合わせて観察を行った。具体的には、図1のようになる。埋め込む半球の直径は玉石を埋め込む場合を想定して3cmと6cm、勾配は前章に於いて定義した「緩勾配」の上限の値である1/10と、1/25、そして流れが常流となる場合として1/1000を採用した。ここで1/25という値を用いたのは、河戸堰（1/23）、山田堰（勾配1/30）など、歴史的な堰の下流法面勾配がおおよそ1/25前後であることによる。なお、常流のときは予備実験において後方への影響が見られなかったため、半球一つのみを設定としている。流量は、本研究の目的を鑑み、半球が水面上に出ている状態から充分潜る状態までが観察できる値として、単位幅流量を $0.001(\text{m}^3/\text{m}/\text{s})\sim 0.024(\text{m}^3/\text{m}/\text{s})$ の中で10段階に変化させた。

流量は水路下流端の三角堰によって、また水深はポイントゲージを用いて計測した。表情については写真、及びVTRによって記録を行った。

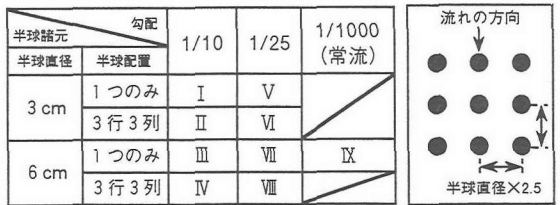


図1 設定条件と3行3列の半球配置図

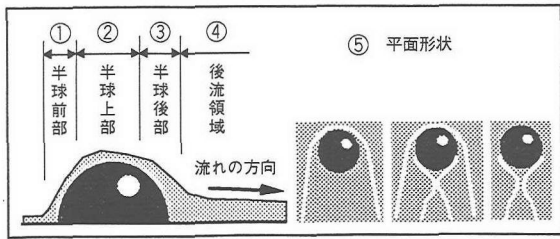


図2 流水過程分析の着目点

(b)分類における着目点

表情を分類する際には、着目点として図2に示すように縦断面的に流水過程を4段階にわけ、これに平面形状を加えた5つを設定し、それぞれにおいて水がどのような動きをするかを観察した。

(3)実験結果

結果的に得られた表情は、半球が1つの時に4種類、3行3列の時に2列目以降の1つの半球周りについて4種類、流れが常流の時に3種類であった。前節において着目点を5つ設定したが、それぞれの着目点における表情変化は独立ではなく、連動して起こった。また、それぞれの設定条件において共通の表情が得られたため、結果として7種類の異なる表情が観察された(表1)。

(a)半球が1つの時の表情

半球が1つの時は、流量の小さい順に以下の4種類

表1 実験結果

流況 及び半球配置	流量			
	流量小 ← → 流量大			
射流 単独	水切り型	ゆらぎ型	滑り型	潜り型
射流 3行3列	水切り型	砕け飛び型	筋飛び型	潜り型
常流 単独	水切り型	盛り上がり型		潜り型

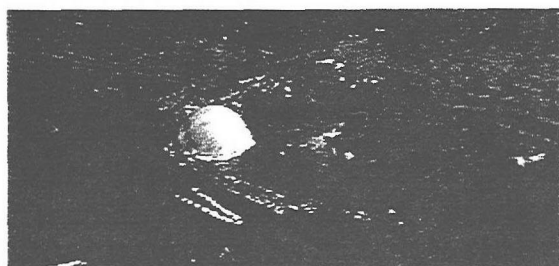


写真4 水切り型 (1つの場合)

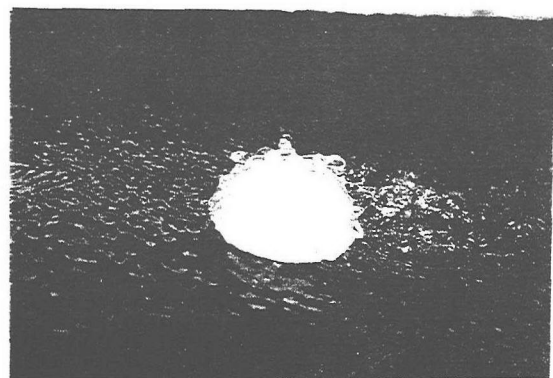


写真5 ゆらぎ型 (1つの場合)

の表情が見られた。

A. 水切り型……水が半球前部において左右に分かれ、半球を越えることなく流れる。後方では下流に行くに従って広がるように波が立つ(写真4)。

B. ゆらぎ型……水が半球上部に達し、ゆらゆらと波立つように揺れながら半球を越えてゆく。半球後部で水が剥離し、後流領域では半球前部で分けられた左右に広がる波と、半球を回り込んで後部で剥離した水によってできる波の両方が見られる。(写真5)。

C. 滑り型……半球上部では水が滑らかに流れ、後部において水が半球から剥離する。剥離長さはゆらぎ型よりも長い。後流域では、半球前部で分かれる波は見られず、半球を回り込んで後部で剥離した水による波のみ観察できる。(写真6)。

D. 潜り型……水の流れの中に半球が完全に潜ってしまい、大きな水の乱れは認められない(写真7)。

(b)半球が3行3列の時の表情

半球を3行3列に並べた場合は、1列目においては半球が1つの時と同じ表情が観察されたが、2列目以降においては水が第1列目の半球を越えるときに乱れが起きるためにゆらぎ型、滑り型の表情は発生せず、その代わりに以下の表情が観察された。つまり、流量が小さい順に水切り型、砕け飛び型、筋飛び型、潜り型の4種類が見られた。

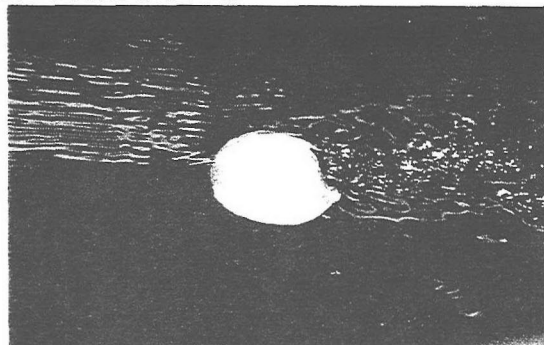


写真6 滑り型 (1つの場合)

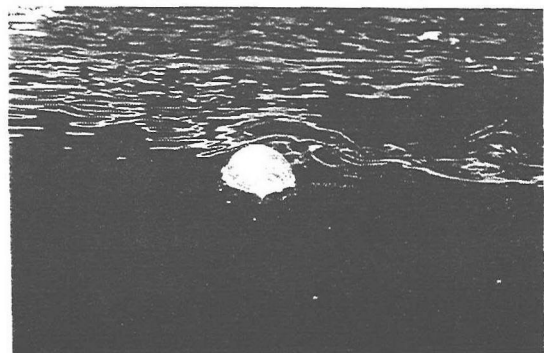


写真7 潜り型 (1つの場合)

E. 砕け飛び型……前列の半球によって起こされた乱れにより、水が半球前部にあたって一部が砕け、飛沫が飛ぶ。飛び散らなかった水は半球をやや乱れながら越えて行く（写真8の3列目）。

F. 筋飛び型……水が半球前部にあたって弾けるが、前列からの水の勢いが強いために弾けた水がまとまって後方へ筋を引くように跳ねる。半球上部、後部においても水は激しく乱れている（写真8の2列目）。

(c)流れが常流の時の表情

勾配が1/1000で流れが常流となったときは、流量が小さい順に水切り型、盛り上がり型、潜り型の表情が観察された。

G. 盛り上がり型……水が半球を越えた後後方で跳水を起こし、水面が一度沈んだあと盛り上がるような形になる（写真9）。

(4)考察

(a)規定要因の考察

表情変化の規定要因を考察するにあたっては、段上がり部における跳水の研究⁵⁾を参考として、表情に影響を与えと考えられるパラメータとして d/r （水深／半球の半径）、およびフルード数（ Fr ）をとりだし、

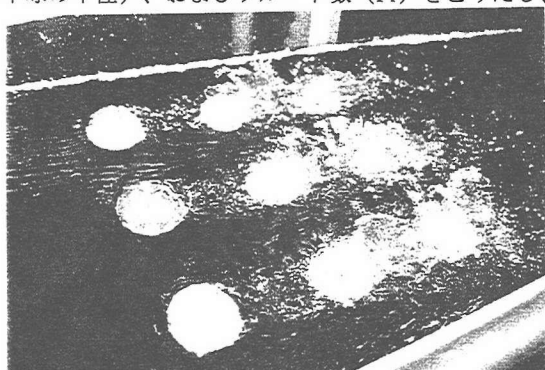


写真8 左から順に滑り型、筋飛び型、砕け飛び型（3列の場合）

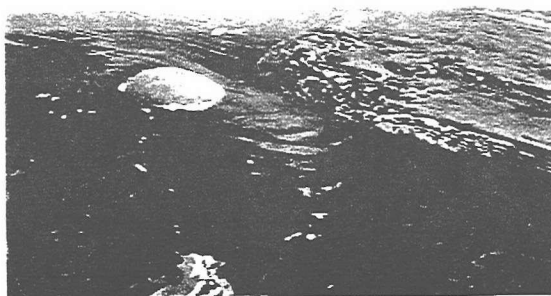


写真9 盛り上がり型（常流の場合）

グラフ上にプロットした（図3～5）。これは、半球の大きさや勾配などの設定条件の影響を受けない無次元量として、表情変化に関係すると思われる上記のパラメータを抽出したものである。

考察の対象としたのは最も単純な例であり、また他の考察の基礎となると考えられる半球が1つのみの場合、および、半球が3行3列に並べられた場合の3列目の表情、及び常流流れの場合である。半球が3行3列の時、同じ列の半球同士は同じ表情を呈するが、下流側の列の半球は、その前列の半球によって起こされた乱れにより、前列とは異なる表情を呈する（詳細は表4）。よって、今回の実験範囲内では乱れ方が最も安定し、後の試設計をする際に参考となると考えられる3列目について考察を行うこととした。

フルード数の計算は実験時に計測した流量と水深の

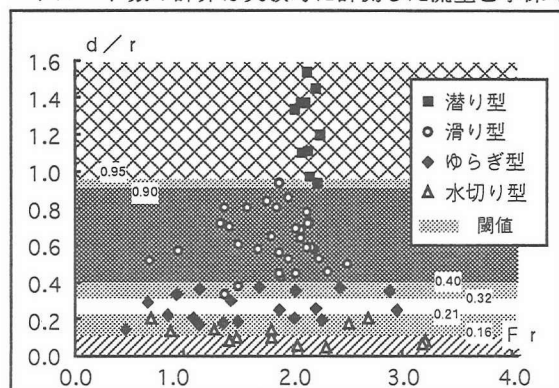


図3 表情領域図（ $Fr - d/r$ 、半球1つ）

表2 射流、半球1つの場合の表情の閾値

水切り型	ゆらぎ型	滑り型	潜り型
0.16～0.21	0.32～0.40	0.90～0.95	

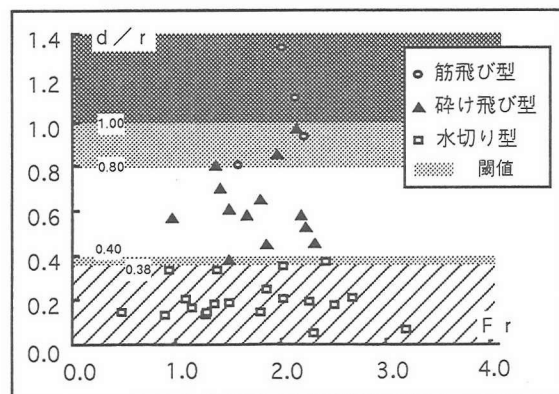


図4 表情領域図（ $Fr - d/r$ 、3行3列の3列目）

表3 射流、3行3列の場合の3列目の表情の閾値

水切り型	砕け飛び型	筋飛び型
0.38～0.40		0.80～1.00

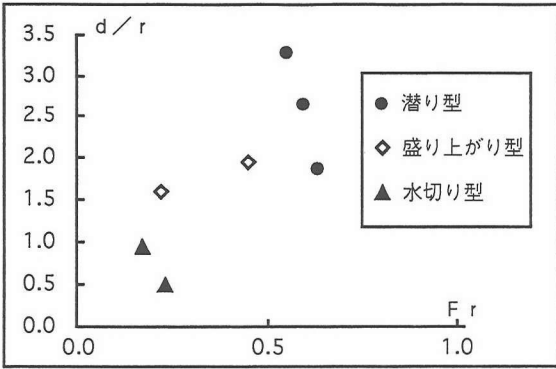


図5 表情領域図 (Fr - d/r , 常流流れ)

値から流速を求めて行った。

結果的には、射流の場合については今回の実験範囲内 ($Fr \leq 3.2$) では、表情変化に大きく影響しているのは半球の高さに対する水深の大きさであり、フルード数はほとんど影響を与えていないことが分かった。ただし、この結果はあくまでも今回の実験の範囲内においてであり、さらに流量を増やす、あるいは勾配を変えるなど実験条件を変えた場合、フルード数の影響が顕著に現れることも充分考えられる。常流の場合についてはデータが少ないために定量的な考察は省略した。

射流の場合についての表情を規定するおおよその d/r の値を表2、3に示す。閾値にある幅があるのは、2つの表情が同じ d/r の範囲に見られたためである。

(b) 表情のシークエンス

半球を3行3列に配置したときの1列目と2、3列目の関係を考察すると、おおよそ次のような結果となった(表4)。

表4 3行3列の場合のそれぞれの表情

列	1 列目	2 列目	3 列目
流量小	水切り型	水切り型	水切り型
	ゆらぎ型	砕け飛び型	水切り型
	滑り型	筋飛び型	砕け飛び型
流量大	潜り型	潜り型	筋飛び型

これは今回の実験についての結果であり、半球同士の間隔を変える、あるいはさらに異なる流水条件下においては異なる結果が得られるものと考えられる。4列目以降については、今回の実験結果からは確かなことは言えないため、さらに列を増やして安定状態となるまでの実験を行う必要がある。

(c) 構造物全体の流水表情の解釈

半球が3行3列の時の結果を基にして第2章の表情

を分析すると、写真1はEの砕け飛び型が集まった表情、写真2はFの筋飛び型が流水面のところどころで出現している表情と考えられる。また写真3の場合は筋飛び型が全面にわたって起きている表情と言える。

4. 津和野川落差工の設計

(1) 設計概要

島根県津和野川において落差工が建設されることとなり、本研究によって得られた知見を実際の設計に活かし、以下のようにデザインを行った。

津和野川の河川条件は以下の通りである。

- ・ 川幅 32.7m
- ・ 流量 (表5)

表5 津和野川の流量変化

	豊水	平水	低水	渇水
流量 (m ³ /s)	4.57	2.70	1.71	0.83
単位幅流量 (m ³ /s/m)	0.140	0.083	0.052	0.025

この落差工は河床掘削に伴って建設されるものであるが、レクリエーションの場としての利用、および生態系への配慮から緩勾配型と決定した。本研究の成果に伴って、緩勾配の流水面を2段構成とし、上段は滑らかな面上で水が転波列を伴って流下する模様が楽しめるようにコンクリート面(粗度小)で勾配を1/15、下段は石によって水が泡立ち、白む表情が見られるように自然石埋め込み面(粗度大)で勾配を1/25とした。下段のデザインは、次節に詳細を示す。それぞれの段の平面形状は江戸時代の「糸流し(兩岸に糸の両端を固定して水に流し、そのときにできる曲線に従って構造物の平面形を決める工法)」に習い、下流側にカーブする懸垂曲線とした。縦断面方向に見たときは、それぞれの段は直線となる。

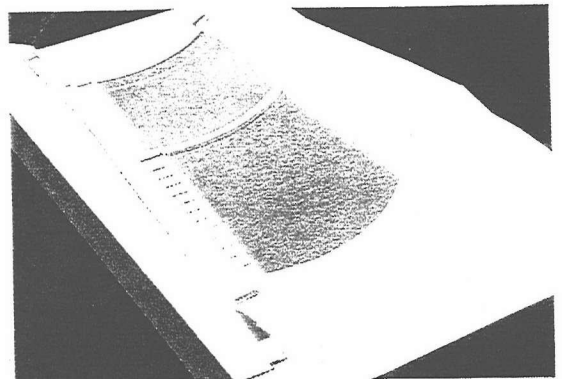


写真10 津和野川落差工模型写真

(2)下段のデザイン

下段のデザインコンセプトは季節による流量変化に伴う表情変化の演出である。前節に示した与条件より、マンニングの平均流速公式を変形して勾配1/25のときの等流水深を求める（粗度係数0.02）と、以下のようになる。

・等流水深 0.027～0.077 (m)

半球3行3列で行った実験結果のうち3列目のデータ（図4）をもとに、水深変化に伴って表情変化を起こすような石の高さを決定する。石の配置は実験と同様に格子状、石同士の中心間隔を石の直径×2.5とする。この時、石の高さを7.5cmと設定すれば、（水深／石の高さ）の値は1.02～0.36となる。このときの津和野川の流量変化は表情領域図上に図6のように示される。

これによれば、石の周囲の表情は流量変化に応じて水切り型～砕け飛び型～筋飛び型へと変化することが予測される（図7、8）。

この様に本論では津和野川における表情予測を行ったが、他の河川においても同様に流量と勾配のデータ

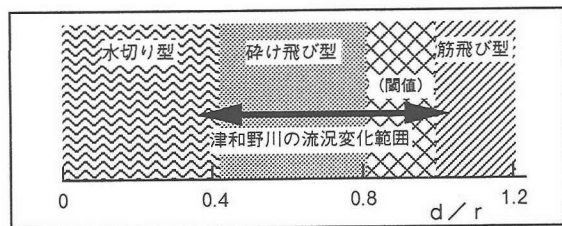


図6 津和野川落差工における表情変化予測

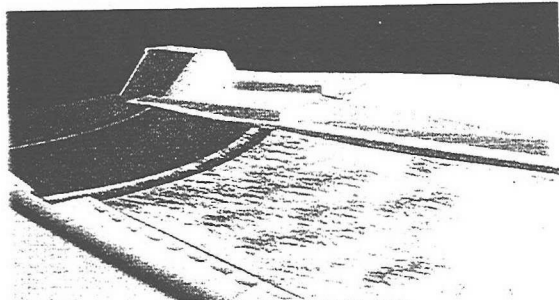


図7 豊水時の予測表情

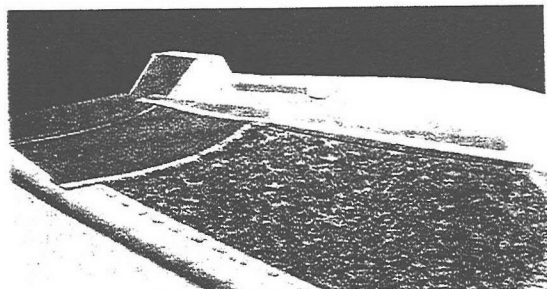


図8 平水時の予測表情

から d/r を求め、表情を予測することができる。

5. 結論

(1)研究成果

本研究の成果は以下の通りである。

・今まで定義されたことの無かった、石（粗度大）の周囲に見られる水の表情を半球を用いた実験に基づき、石が単独である場合については4種類、前列までの石の影響を受ける場合（石の間隔、および d/r の値は今回の実験範囲内に限る）については4種類、また流れが常流となるときは3種類に表情を分類した。

・実験結果を d/r と Fr のグラフ上にプロットし、今回の実験範囲内における流水表情の変化には水深と半球の高さの比が大きく影響することを示した。

・島根県津和野川落差工において、本研究で得られた知見を実際の設計に活かした。

(2)今後の課題

・さらに様々なパターンで実験を行い、上流側の石が起こす乱れの影響や、その下流への伝播具合等を研究し、表情予測の精度を高める。

・現実の流れの中にある石の周囲の表情が実験と一致しているか検証する。

・一つ一つの石の表情と全体の表情との関係をより詳細に検討する。

参考文献

- 1) 一丸義和、篠原修「落水表情に着目した河川横断構造物のデザイン方法論－越流型固定堰の表情予測－」土木計画学研究・講演集No.16(1), 1993
- 2) 星野裕司、篠原修「自由落下型落水形態の水理学的予測手法」土木計画学研究・論文集No.12, 1995
- 3) 土木学会『水理公式集』技報堂、1985、pp.91-93
- 4) Michels.V and M.Lovely: "Some Prototype Observations of Air Entrained Flow", Proc. of Minnesota Int. Hyd. Conv., IAHR, Sept. 1962
- 5) 土木学会『水理公式集』技報堂、1985、pp.309-310

緩勾配流水面を持つ河川横断構造物は、流速が小さいために水に近づきやすく、かつ全面魚道として生態系への配慮をもちえられるという利点があり、また視覚的な親水性という面に関しては、構造物表面の粗度を操作することで様々な表情を演出することが出来る等様々なメリットが存在する。しかし粗度と表情との関係はこれまで論じられたことがなく、水理学において研究がなされていない。そこで本論では半球を用いたモデル実験を行うことで粗度が大きい場合に起こりうる表情を明らかにし、その規定要因について実験範囲内での定量的な考察を行い、実際の構造物の設計に応用した。本論は自然石等を用いる景観デザインの基礎として意義があると考えられる。

A Study on the Superficial Texture of Running Water on the Gentle Slope with Rough Surface

Hiroki IKEDA , Osamu SHINOHARA , Masayuki AIZAWA

A river structure across river bed with gentle slope has many merits. People can approach and fish can swim up easily because of its slow flow, and many kinds of texture can be designed by controlling roughness of surface of a structure. But hydrological relationship between roughness and superficial texture of water has never been studied. In this paper, authors tried to classify the types of texture which can be seen around a stone, determine the factors of the texture by model experiment using half balls, and apply to a real structure.
