

粗度が大きい緩勾配水路における流水表情

—半球を用いた水理実験—

A Study of the Texture of Running Water on the Mild 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」という機能を満たす重要な要素として、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の魅力がある。こうした水の表情の魅力を最大限に引き出すためには、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、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、本研究では緩勾配水路をもつ構造物を対象とした。

緩勾配水路は、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。これらの水路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、本来の意味での「親水性」が存在する。また、表情という面に関しても、多くの場合は水路床に自然石が埋め込まれ、それらによってあたかも自然の瀬のような、様々な水の泡や飛沫を楽しむことが出来る。

この様に緩勾配型構造物は様々なメリットがあり、これからますますその必要性が高まると考えられるが、そのデザインに際し、流水表情のコントロールはおろか、緩勾配水路にはどのような流水表情があるのかすら把握できていないのが現状である。

よって、本研究では、緩勾配水路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する。粗度が小さい場合の流水表情については、転波の発生条件³⁾から表情予測図を作成したが、紙面の都合で省略する。

なお、本研究において「緩勾配」とは $1/10$ 以下の勾配と定義する。

2. 流水表情の実例

自然石埋め込み面を持つ緩勾配型構造物にも、写真1や写真2のように異なる流水表情が見られる。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のに対し、写真2の場合には激しい泡立ちによって水面全体が白んでいる。



写真1 山口県 一の坂川

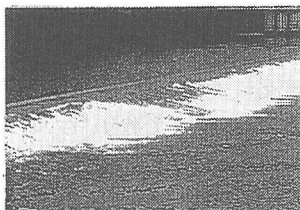


写真2 高知県 仁淀川

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)

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。

(b)半球が3行3列の時の表情

半球を3行3列に並べたときは、水が第1列目の半球を越えるときに起こされた乱れにより、第2列目、第3列目において、ゆらぎ型、滑り型のかわりに以下の表情が新たに見られた(写真5)。

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砕け、飛沫が四散する。

F. 筋飛び型……前列からの水の勢いが大きいため、水が半球前部にあたって弾けるが、それら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。

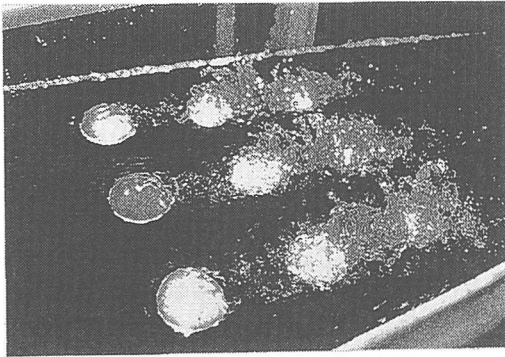


写真5 左から順に滑り型、筋飛び型、砕け飛び型

(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⁴⁾をもとに、表情に影響を与えると考えられるパラメータとして r/d (半球の半径/水深)、およびフルード数(Fr)をとりだし、グラフ上に示した(図2)。これは、例えば同じ水深であっても、流速が大きければ、つまりフルード数が大きければ水が半球の上を越えるといった状況があり得ると予想されたからである。そこで、半球の大きさに影響されない無次元量として上記の値を比較した。結果的には、今回の実験範囲内では、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。

それぞれの表情を規定するおおよその r/d の値は表2の通りである。

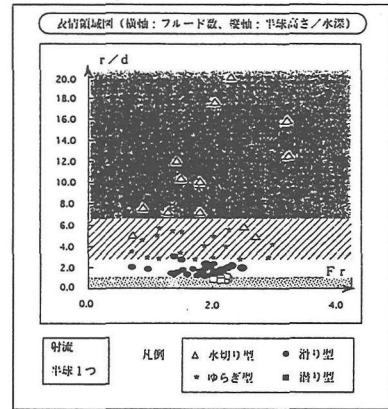


図2 表情領域図

表情	水切り型	ゆらぎ型	滑り型	潜り型
境界となる r/d	~	6.2 ~	2.4 ~	1.2 ~

表2 表情を規定する r/d の値

(b)半球同士の相互作用

半球を3行3列に配置したときの各列同士の関係を考察すると、おおよそ次のような関係が得られた。

- ・ 1列目の表情が水切り型、及びゆらぎ型の時は3列目の表情は水切り型
- ・ 1列目が滑り型の時は3列目は砕け飛び型
- ・ 1列目が潜り型の時は3列目は筋飛び型

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れば異なる結果が得られるものと考えられる。

(c)構造物全体の流水表情に対する関係

半球が3行3列の時の結果を基にすると、写真1はEの砕け飛び型が集まった表情、写真2はFの筋飛び型が集まった表情と言える。

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
- ・ 単位幅流量 0.140~0.025 ($m^3/s/m$)

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、水路上の1つの石の周囲における流水表情とそれらの集合であると考えられる。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らなかったため、単純化したモデルを用いて実験を行い、定性的な考察をした。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)設定条件

実験は単純化のため、石のかわりに木製の半球を用い、これを水路上に張り付け、水を流して流水表情を観察、VTRで撮影した。条件設定は表1の組合せとなる。半球の直径は3cmと6cmとしたが、これは、玉石を埋め込んだときとほぼ同じ条件と言える。一般的に玉石は数cmから10cm程度の高さで埋め込まれるからである。また、半球個数が9つの時は、半球を3行3列の格子状に配置し、半球中心間隔を半球直径×2.5としている。これは上流側の半球まわりで起きた乱れの、下流側への影響を観察するためである。これらそれぞれについて、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。2種類の勾配を設定したのは、同じ流量でも異なるフルード数の条件で観察するためである。

半球諸元		勾配	
半球直径	半球個数	1/10	1/25
3 cm	1個	I	V
	9個	II	VI
6 cm	1個	III	VII
	9個	IV	VIII

表1 設定条件

(b)分類における着目点

表情を分類する際には、流水過程を図1のように5つに分け、それぞれについて水の表情がどの様に変化するかを観察した。

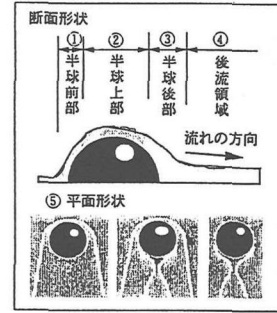


図1 流水過程分析の着目点

(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4種類であった。前節において流水過程を5つに分類したが、それぞれの過程における表情は独立ではない。つまり、例えば過程①と②の表情変化が連動して起こるという具合である。また、設定条件が異なる場合でも同じ表情が見られた場合もあったため、結果として6種類の異なる表情が観察された。

(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て波を引き、半球を越えることなく流れる。

B. ゆらぎ型……水が半球上部に達し、そこにおいてゆらゆらと揺れながら半球を越えてゆく。半球後部で水が剥離し、後流領域では水が乱れる（写真3）。

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。剥離する距離はゆらぎ型よりも長い。後流領域の平面的な幅はゆらぎ型に比べて狭い（写真4）。



写真3 ゆらぎ型

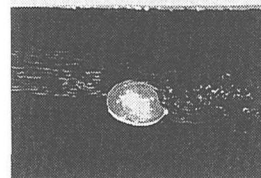


写真4 滑り型

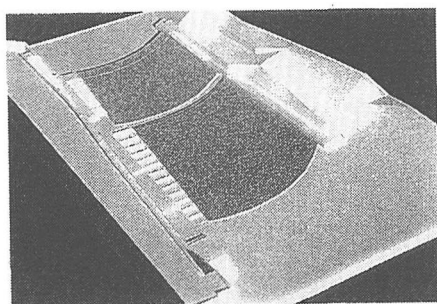


写真6 津和野川落差工模型写真

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、及び生態系への配慮から緩勾配型と決定された。本研究の成果に伴って、流水面を上下2段構成とし、上段をコンクリート面（粗度小）、下段を自然石埋め込み面（粗度大）とした。上段は常に転波が発生し、流下する模様が楽しめるように勾配を決定した。下段のデザインは、次節に詳細を示す。

(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。

対象部諸元：勾配 1/25

水深 0.027~0.077(m)

勾配 1/25、半球3行3列で行った実験結果をもとに、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7cmと設定すれば、（石の高さ／水深）の値は0.91~2.59となる。前章の考察によれば、石の周囲の表情は流量変化に応じて筋飛び型～碎け飛び型～水切り型へと変化することが予測される（図3、4）。

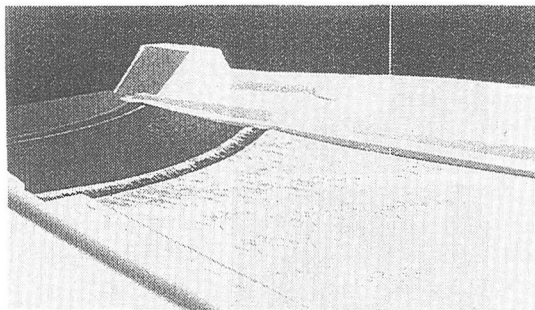


図3 豊水時の予測表情

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（大きな粗度）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種類に分類し、前列までの石の影響を受ける場合（石の間隔、および r/d の値は今回の実験範囲内において）についてはさらに別の2種類に表情を分類した。
- ・実験結果を r/d 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No16(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・講演集No17, 1994
- 3) 土木学会『水理公式集』技報堂、1985、pp.91-93
- 4) 同上、pp.309-310

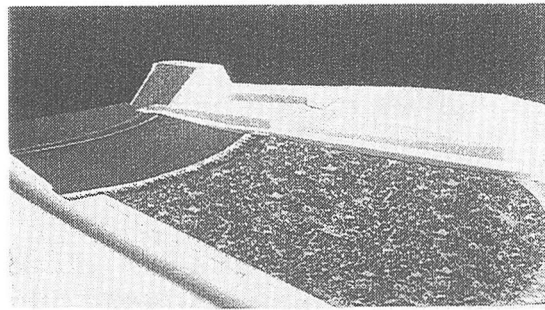


図4 平水時の予測表情