

自由落下型落水形態の 水理学的予測手法

Hydraulic Estimation of the Form of Free Falling Water

星野 裕司* 篠原 修**

by Yuji HOSHINO, Osamu SINOHARA

1. 背景と目的

堰や床固め等の河川横断構造物では、河川の本質である水の流れが落水となって現れ、その表情は常に河川景観の重要な魅力の一つとなる。しかしながら、利水、治水上の要請から設置されている河川構造物の設計においては、残念ながらその落水表情の魅力が考慮されていることは稀である。一方それが作り出す落水表情が主題となる人工の滝においては、そのデザインは専らデザイナーの経験に基づき、客観的な水理学的考察はなされていない。

ともするとデザインとは、デザイナーの主観的な意図や恣意によると考えられているが、水の流れのように自然と強く関わり、自然の表情がその魅力となる構造物においては、自然の合理性に基づくデザイン方法論が存在するはずである。

既報の一丸らの論文¹⁾においては越流型を対象として落水表情を論じた。その成果を踏まえて、本研究では、自由落下型の落水形態を呈する構造物を対象とし、その落水表情を分類し、発生過程を水理学的に考察することで、落水表情の予測、制御を可能にするデザイン方法論を提示する。

2. 落水表情の分類と水理学的考察

(1) 落水表情の分類

落水表情において、最も重要な役割を演じるものは空気混入度、水の白み方である。つまり、その水脈の乱れ方が落水表情に強く影響すると考えられる。

そこでこの視点に立って自由落下型の落水表情を分類すると図1のようになる。

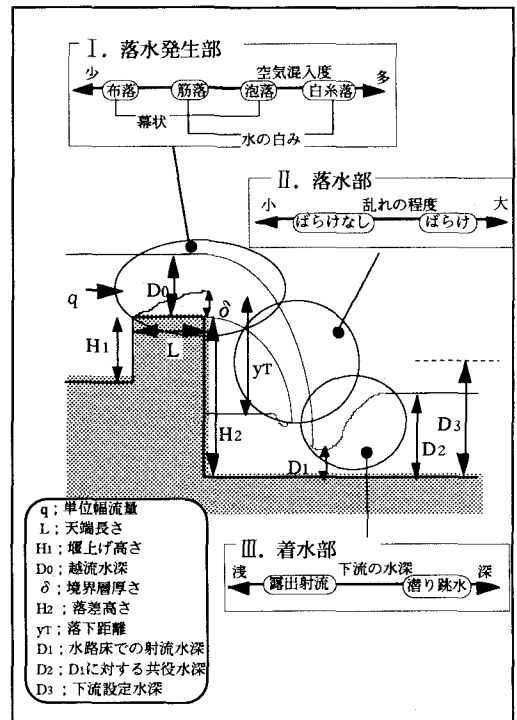


図1 落水表情の分類と規定要因

自由落下型の落水表情は、その発生過程において次の3つに分類できる。落水発生部（落水過程Ⅰ）、落水部（過程Ⅱ）、着水部（過程Ⅲ）である。まず落水発生部において、空気混入度の差によって少ない方から、布落、筋落、泡落、白糸落の4つに分かれる。これらはより大まかに言えば、水の白みがある筋落から白糸落（水の白み）、それが水脈全体に及んでいず、幕状に落ちる布落から泡落（幕状）の2つになる。また落水部においては、水脈の乱れに応じてばらばらと落ちるばらけが生じる。着水部では、跳水の形によって露出射流、潜り跳水に分類される。

キーワード；景観、空間設計

*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

(〒113東京都文京区本郷7-3-1)

次節以降、水理学的考察を行うが、本研究は水理学と対応したデザイン方法論の基礎を与えるものであるため、構造物表面の粗度や、風など2次的な要因は考慮していない。

(2) 落水過程Ⅰ（落水発生部）について

ここで考察したいのは水脈の乱流状態である。なぜならば、まず落水発生部の表情において重要な要因となるのは空気混入の程度であるが、一般に水脈に空気混入が生じるのは乱流境界層が自由表面に達した点から開始されると言われているからである。よってこの過程の水理学的考察においては、その境界層問題を解くことにより水脈の乱流状態を把握し、境界層の厚さを導き出したい。パラメーターは、流水に関しては単位幅流量 (q)、構造物に関しては堰上げ高さ (H_1) と天端の長さ (L) である。次に考察の流れを提示すると以下ようになる。

- i) q 、 H_1 より岩崎公式により越流水深 (D_0)、回流速 (V_0) を求める。
- ii) D_0 、 V_0 と L より物体表面上に発達する境界層のReynolds数を求める (水の白みの評価)。
- iii) Ippen公式²⁾ と乱流境界層内の速度分布の式³⁾を用いて、境界層厚さ (δ) を求める (幕状の評価)。

以上によって得られた落水表情予測図を図2に示す。

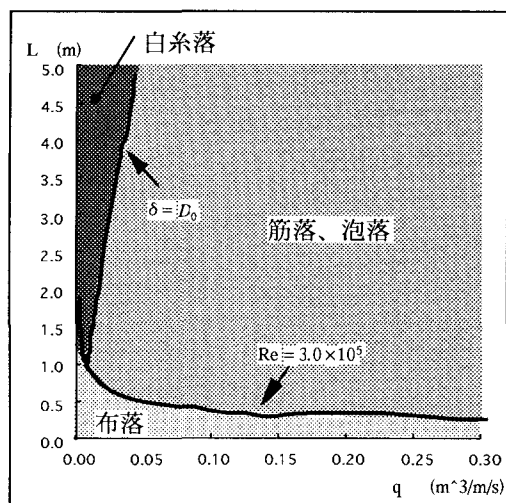


図2 落水表情予測図Ⅰ

(3) 落水過程Ⅱ（落水部）について

ここにおいて用いる理論は、二層流における内部波の安定条件である。つまり自由落下水を空気と水の二層流と考え、その接触面の不安定条件をばらけの条件と考える。パラメーターは、流水に関しては

過程Ⅰと同様に単位幅流量 (q)、構造物に関しては落差高さ (H_2) である。同様に考察の流れを示すと以下になる。

- i) 落下水脈の軌跡曲線⁴⁾ とWHITE式⁵⁾ から上流側に形成される水深 (H_s) を求め、 H_2 との比較より落下距離 (y_T) を求める。
 - ii) Ippen, Harlemanの式³⁾ から落下水脈のFroude数を求め、ばらけ距離 (h) を求める。
 - iii) y_T と h の比較からばらけの評価を行う。
- 落水表情予測図を図3に示す。

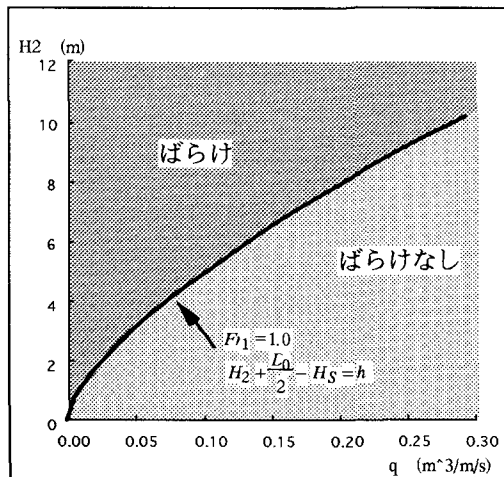


図3 落水表情予測図Ⅱ

(4) 落水過程Ⅲ（着水部）について

パラメーターは、流水に関しては単位幅流量 (q) と下流設定水深 (D_3) であり、構造物に関しては落差高さ (H_2) である。ここでは、跳水の形について水理学的考察を行うが、それは着水時の水路床での射流水深 (D_1) とその共役水深 (D_2)、下流設定水深 (D_3) の関係によって主に決定される。考察の流れを以下に提示する。

- i) (3) の i) で求められた突入角度 (θ)、突入流速 (V_T) と流量一定の法則より水路床での射流水深 (D_1) を求め、その共役水深 (D_2) を求める。
- ii) 安芸⁵⁾ によると下流水位条件、つまり D_2 と D_3 の比較によって、露出射流と潜り跳水に区別される。

落水表情予測図を図4、5に示す。

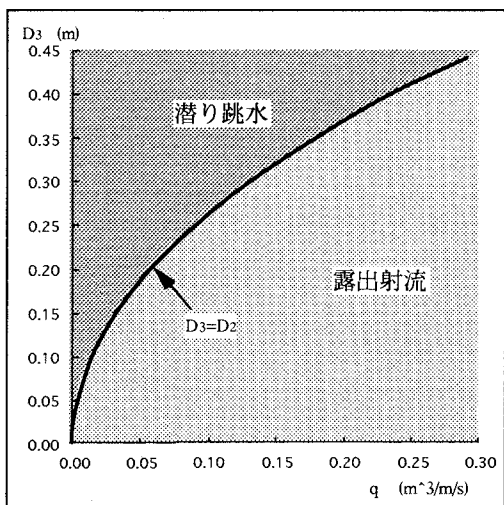


図4 落水表情予測図Ⅲ

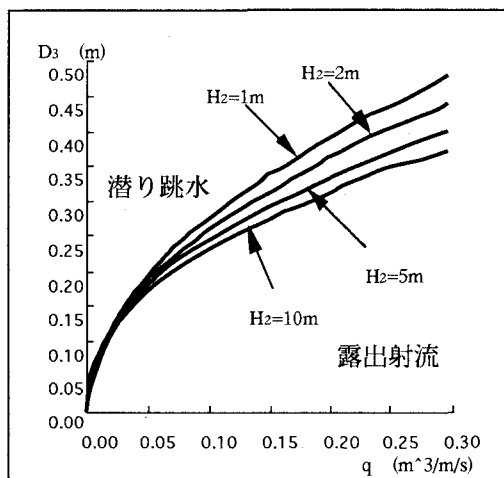


図5 落差高さによる変化

3. 予測モデルの検証

(1) 検証の目的と方法

前章において、落水表情の水理学モデルを構築したが、様々な水理学経験式の複合体であるそれらがそのまま現実の表情に対応できるとは考えられない。そこで現実の表情によって検証を行った。検証の目的は以下の3つである。

- i) 水理学モデルの表情予測図の妥当性の検証
- ii) 経験式における仮定の矛盾や2次的な要因の影響によるモデルと現実の差の検証
- iii) モデルにおける落水表情の分類と現実の落水表情の見え方の関係の考察

落水過程Ⅲに関しては、前述の一丸らの論文その他において既に論じられているので、落水過程Ⅰ、Ⅱを対象とする。

検証対象は、人工の滝（江戸川平成庭園他、首都圏の人工の滝8ヶ所）と砂防工（大河内砂防堰堤他、安倍川砂防堰堤10ヶ所）である。人工の滝は、河川横断構造物に比べて構造物のスケールや流量が絶対的に小さいが、表面粗度などの点でモデルに近い理想的な状況が設定されている。また砂防工においては構造物表面の粗度などの問題があるが、スケールや流量は充分なものを持っている。

これらの諸元（流量、天端長さ、落差高さ）を落水表情予測図に落とし、予測上の表情と現実の表情の比較を行った。

(2) 検証結果とその考察

紙面の都合から詳しい検証内容は省略するが、検証結果と考察を対象別に示すと以下ようになる。

i) 人工の滝

・落水過程Ⅰに関しては、横浜ドッグヤードの滝を除いて全て正しかった。横浜ドッグヤードの滝は、予測では筋落、泡落であるのに、実際は布落で落ちていた。これは、乱流境界層は存在するが、発達が小さく空気混入が生じなかったのではないかと考えられる。空気混入に対する境界層の絶対値条件の検討が必要ではないかと考えられる。

・落水過程Ⅱに関しては、練馬区美術の森と東京都戦没者霊苑以外は全て予測通りであった。この二例は、ばらけと予測されたが、現実の表情はばらけなしである。予測より現実の方が、ばらけが生じにくいのではないかと考えられる。

ii) 砂防堰堤

・落水過程Ⅰでは、全て筋落、泡落と予測された。しかし現実では、正面から見ると白糸落、見る角度を変えると泡落に見え、視点位置によって表情を変えた。つまりある意味では、予測は正しいと考えられるが、実際は予測以上に水の白みが卓越している。これは、予測モデルでは考慮しなかった構造物表面の粗度や接近流速等の強い影響があるのではないかと考えられる。また、視点位置も考慮したより精緻な表情分類も必要だと考えられる。

・落水過程Ⅱについては、金山砂防ダムの第1、2副ダム以外は全て正しかった。それらは、ばらけの表情を呈しているのに関わらず、ばらけなしと予測されている。人工の滝の時と含めて考察してみると、落水過程Ⅱの表情には、落水過程Ⅰにおける表情、乱れが強く影響しているのではないかと考えられる。

4. ケーススタディー予測手法の用い方

本研究で示したデザイン方法論の現実への展開の有効性を示すため、表情予測図を用いて落水表情演出を主目的とした河川横断構造物の設計をケーススタディーとして行った。

基礎データとして、長野県太田切川の河川条件を用いた。諸元は以下の通りである。

・平均河幅 100m

平常時平均流量 約 $4\sim 18\text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$

デザインコンセプトは、落水の多様な表情、流量変化による表情変化の演出である。また、レクリエーションにも利用できることも考慮した。

それらを考慮して設計した構造物は写真1の通りである。

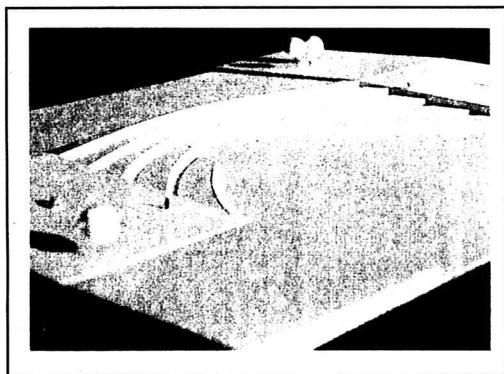


写真1 堰のデザインのスタディー模型

この構造物の落水表情予測の一部を示すと、図6のようになる。これは、多段の最上段と最下段の落水過程Ⅰの表情予測であるが、Ⅰ段はほぼ常に筋落、泡落の領域に属し、Ⅴ段は流量変化、天端長さの変化に応じて、泡落から白糸落の領域に変化することが分かる。このように、表情予測によってデザ

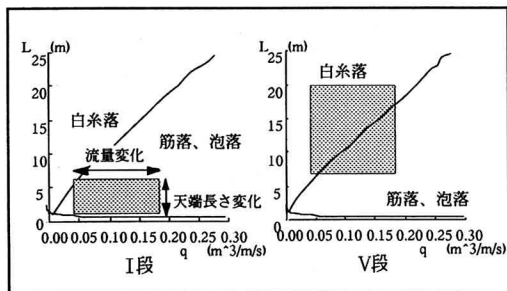


図6 表情予測図Ⅰ（一部）

イナーの恣意性を離れた水理学的合理性に基づくデザインが可能であることが明らかとなった。

5. 結論

（1）研究成果

研究成果は以下の4つである。

i) 水の白み具合、落水の変化、そして跳水の形状に着目して、自由落下型の落水表情を水の白みで4種類、落水の変化で2種類、跳水の形で2種類、計16種類に分類した。

ii) 水理学経験式を整理することで、規定要因と落水表情との対応関係を明らかにし、操作可能な4つのデザインパラメーター（単位幅流量、天端長さ、落差高さ、下流設定水深）を用いて、落水表情予測図を作成した。

iii) 人工の滝と砂防工を対象とし、現実の落水表情によって本論文で提示した落水表情予測図を検証し、その精度と今後の研究課題を明らかにした。

iv) 長野県太田切川流路工の諸元を基礎データとして利用し、落水表情予測図を用いてデザイン方法論の現実への展開の有効性を示した。

（2）今後の課題

i) 本研究で用いた理論モデルの仮定に適合する条件下で水理実験を行い、予測モデルを再検証する。

ii) 本研究では考慮しなかった2次要因（構造物表面の粗度や接近流速など）についても水理学的考察を行い、デザイン方法論の現実への応用の可能性を広げる。

iii) 本論文でも一端を示した視点場の位置や、距離の違いに応じた落水表情の見え方の変化に対して十分な考察を行い、落水表情をより精緻に分類する。

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) 土木学会「水理公式集」技報堂出版 1963
- 3) 本間仁、安芸蛟一「物部水理学」岩波書店 1962
- 4) 柴田道生「実用水工学とその計算例」現代理工学出版 1973
- 5) 一丸義和「河川横断構造物におけるデザイン方法論」東京大学卒業論文 1993