

ステップ・プール構造の落差工設計に向けた模型による実験的検討

An experimental study using a model for the design of a step-pool drop works

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 数馬田貢 (Mitsugu Kazumata)

(独)土木研究所 寒地土木研究所 正 員 林田寿文 (Kazufumi Hayashida)

1. まえがき

自然河川、特にセグメント2に分類される地形における河川では、河道が蛇行することによって、瀬、淵、砂州、伏流水といった、水生生物にとって良好な生息環境や産卵環境が創出され、維持されている。しかし、多くの河川において、流下能力向上、地下水位低下、土地の有効利用などを目的に、直線的な改修が行われた結果、瀬と淵が喪失した。そして、河床低下を防止して河床勾配を安定させるため、落差工が設置された。設置事例が多いコンクリート構造の落差工には、本体を越流する水の侵食作用や、本体下流に発生する射流による局所洗掘防止のため、図-1のように水叩きや護床工の設置が必要となる¹⁾。そのため、コンクリートブロックに覆われた河床材料が無い区間が数十メートルにも及ぶ。また、魚道が設置されているものの、うまく機能していないものが多く、河川生態系に大きな影響が及んでいる。

また、福留らが提唱する石組みによる分散型落差工は、低落差でステップ・プールを繰り返す構造であるため、魚道を設置しなくても魚類の往来が可能であるほか、伏流水の分断が無いので、魚類の産卵環境が保全されることや、山地溪流河川の様な環境が創出されるにも関わらず、プール部で流れが穏やかになるため、緩流性の魚類も豊富に生息することなど、河川環境改善効果が極めて大きい²⁾³⁾。しかしながら、出水時には石組みの石の一部が流失するという問題も発生している²⁾³⁾。その原因は、増水によって流量・流速が増加した流水が、落差工本体を越流し、次の落差工を直撃するため、大きく複雑な力が石に加わり、流失に至ったものと考えられる。

一方著者らは、山地溪流河川や落差工がある河川において、落差工の下流に深く大きいプールがあることで流れが減勢され、穏やかな流れが創出できるのではないかと想定していたが、実際に落差工を設計する際にどの程度の大きさのプールが必要なのかを示した基準や文獻が無いのが現状であった。

そこで本研究では、ステップ・プール構造のプール部分で流速をコントロールすることにより、コンクリート製落差工による河川環境の喪失や、分散型落差工における石組みの石の流失などの問題を解消することを目的に、模型実験を行った。模型実験は、2段のステップ・プール構造の模型を用いて、プールの深さと長さを変化させる方法で行った。その結果から、流水のエネルギーを減衰させるために必要なプールの「深さ」と「長さ」を求めるための簡易な式を導き出したので以下に報告する。

2. 方法

2.1 ステップ・プール構造の模型実験

模型実験を行うにあたり、実河川を参考にすることとした。札幌市内を南から北に貫通する豊平川（河床勾配 1/150～1/300）には、直轄区間だけで6基（1号、3号、4号、5号、6・7号、8号）のコンクリート製床止工が設置されており⁴⁾、落差工に魚道が設置されている。

平成23年9月に高水敷が一部冠水する出水があり（図-7）、出水後に、落差工の射流発生区間の下流に大量の土砂が堆積した（図-8）。そこにはやがて樹木が繁茂し、流下能力の阻害箇所となることが予測されるため、堆積土砂の早急な撤去が必要となる。

そこで、豊平川5号床止（H19施工）における平成23年9月出水の流況を模型で再現し、射流の発生、及び土砂堆積の状況を確認した上で、同じ流量でステップ・プール構造にした場合の流況及び河床材料の移動状況など、その改善状況について検証を試みた。

2.2 模型の概要

本研究の実験に用いた模型（図-2）は、水路延長2.0m、水路幅0.2m、水路深さ0.3m、水路勾配1/500、流量4.2L/sで、下部の水槽の水を水中ポンプで循環させるものである。落差工のパーツが取り替えられる構造

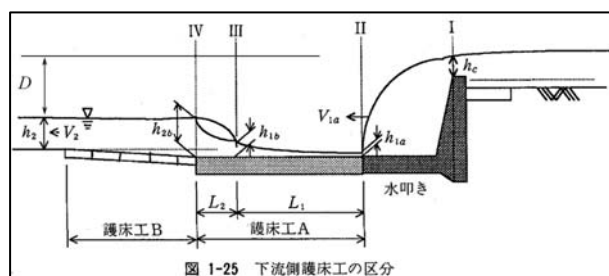


図-1 下流側護床工の区分

出典：河川砂防技術基準(案) 同解説 設計編[1]



図-2 実験に用いた模型

になっており、落差・プールの深さ・プールの延長を変えて、4パターンの落差工を設定した。表-1に各パターンの主な諸元を、図-3～6に各パターンの概略図を示す。それぞれのパターンについて、水を流しながら1段目の落差の上流から砂利（粒径約5～10mm）を供給し、砂利の堆積・洗掘状況によりプールの効果を確認した。なお、ステップ・プール型はいずれも2段構造であるが、上流側を1段目、下流側を2段目と呼び、2段目は1段目の減勢効果の影響が及んでいることから、本研究では1段目のプールでの事象について着目している。

表-1 模型諸元一覧表

ケース 項目	従来型	ステップ・プール型		
		Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
1段目の落差	0.08 m	0.04 m	0.04 m	0.04 m
プール深さ	—	0.65 m	0.25 m	0.65 m
プール長さ	—	0.50 m	0.50 m	0.25 m

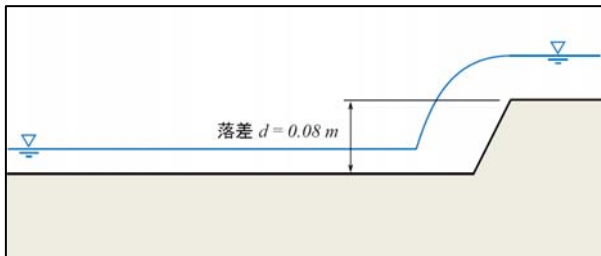


図-3 従来型

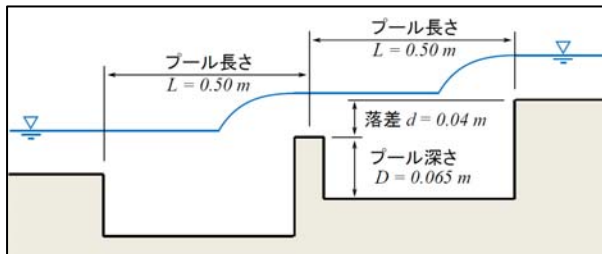


図-4 ステップ・プール型（Aタイプ）

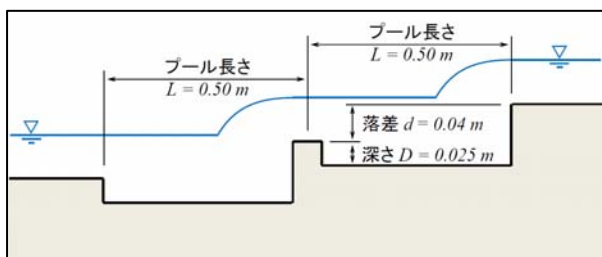


図-5 ステップ・プール型（Bタイプ）

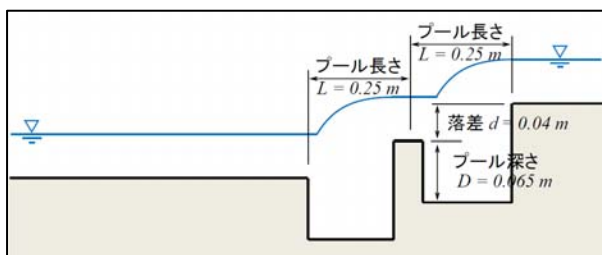
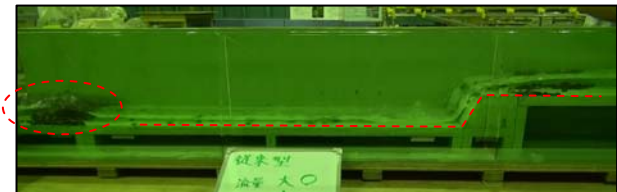
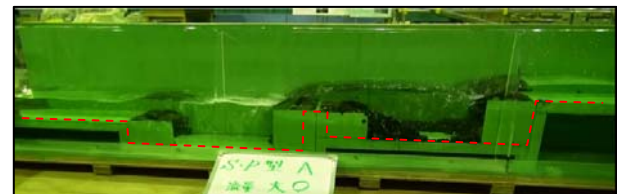
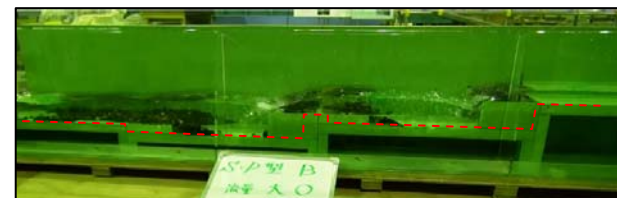
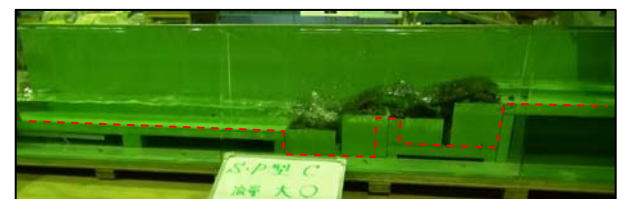


図-6 ステップ・プール型（Cタイプ）

3. 結果

3.1 従来型（図-9）

コンクリート製とステップ・プール構造の流況を比較するために、豊平川5号床止における平成23年9月出水の流況を再現したパターンである。落差工本体を越流した流れは射流となり、その下流の流速が弱まった部分に衝突し、そこで三角波が発生し（図-7）、砂利が堆積する状況（図-8）が再現されている。

図-7 豊平川5号床止（平成23年9月出水）
：三角波図-8 豊平川5号床止（出水後の土砂堆積）
：土砂図-9 従来型
：三角波・砂利 - - - : 図-4に対応する線図-10 ステップ・プール型（Aタイプ）
- - - : 図-4に対応する線図-11 ステップ・プール型（Bタイプ）
- - - : 図-4に対応する線図-12 ステップ・プール型（Cタイプ）
- - - : 図-4に対応する線

3.2 ステップ・プール型 A タイプ (図-10)

落差を越流した流れは、プール内で十分に減勢され、射流は認められなかった。砂利を供給するとプール内下流側には堆積するが、プール内上流側には落差を越流した流水が落下し、砂利を流失させるため、プールが埋没すること無く維持された。つまり、このプールは十分な深さと長さを有しているといえる。

3.3 ステップ・プール型 B タイプ (図-11)

プールが浅いので、落差を越流した流れは、すぐにプールの河床に衝突して流下方向に向かい、プール内に砂利を堆積させることなく、流れは次の落差へ向かっていた。つまり、プール内での減勢効果は不十分であることがわかる。

3.4 ステップ・プール型 C タイプ (図-12)

落差工間隔が狭い（プール長さが短い）と、落差を越流した流れは 2 段目の落差工本体に衝突するので、落差工の天端を飛び跳ねるような乱流となった。また、プール内が死水域となるので、砂利を供給するとプール内が砂利で埋まってしまうが、A タイプの様に流水によってプール内に堆積した砂利が流失することも無かった。つまり、プールの長さは不十分であるといえる。

4. 考察

4.1 模型実験による確認事項

- 1) 十分な深さと長さを有するプールは、洪水時の流れのエネルギーを減衰させることができる。
- 2) 落差工の下流に十分な深さと長さを有するプールを設けることにより、射流の発生が抑えられる。つまり、局所洗掘の危険性が大幅に緩和されるので、河川砂防技術基準(案)にある水叩きが不要となり、護床工を施工する場合でも軽量のコンクリートブロックで済む。
- 3) 福留らが提唱する分散型落差工³⁾を施工する際、落差工の設置間隔（流下方向）を十分にとり（十分な長さのプール）、十分に深いプールとすることにより、洪水時の激しい流れが穏やかになるため、石組みの石の流失を防ぐことができる。
- 4) 従来の落差工の大きな落差を数段に分け、十分な深さと長さを有するプールを設けると、1 段の落差が小さくなり、魚類の遡上が容易になる。
- 5) 十分な深さと長さを有するプール内には、下流側に砂利が堆積する。つまり、砂利が堆積する部分には護床工が不要となり、底生生物の生息環境や魚類の産卵環境が保全される。

4.2 ステップ・プール構造の落差工の設計に向けて

このように、十分な深さと長さを有するステップ・プール構造の落差工には多くの利点が挙げられるが、それを現場に活かすためには、まず設計に使えるように、より定量的なデータを把握する必要がある。本研究では、前述の 4 タイプの模型実験の内、良好な結果が得られたステップ・プール型 A タイプの実験結果の実測値を用

い、また、流れを運動エネルギーとして捉え、自由落下や運動エネルギーの公式から、落差や流速に応じた必要なプールの深さと長さを算出する式を導き出した。以下に式を導き出すまでの根拠と経過を説明する。

4.2.1 基にした公式

$$v = v_0 + g \cdot t \quad \dots (1)$$

$$x = v_0 \cdot t + 1/2 \cdot g \cdot t^2 \quad \dots (2)$$

$$l = v \cdot t \quad \dots (3)$$

$$W = 1/2 \cdot m \cdot v^2 \quad \dots (4)$$

ここに、 v : t 秒後の速度(m/s)、 v_0 : 初速度(m/s)、 x : 落差(m)、 g : 重力加速度(9.8m/s^2)、 l : 移動距離(m)、 W : 運動エネルギー(J)、 m : 物質の質量(kg)

4.2.2 ステップ・プール型 A タイプの実測値 (図-13)

落差 $d = 0.04\text{m}$ 、水位差 $\Delta h = 0.025\text{m}$ 、プール水深 $h_p = 0.115\text{m}$ 、プール深さ $D = 0.065\text{m}$ 、プール延長 $L = 0.50\text{m}$ 、1 段目の落差工を越流する前の流速 $U_1 = 0.60\text{m/s}$ 、1 段目のプール内の下流端の流速 $U_p = 0.18\text{m/s}$ （流速は何れも、流量/(水深・水路幅)から算出した計算値）

4.2.3 必要なプールの「深さ」を算出する式

まず、落差 d (m) から、必要なプール深さ D (m) を求める式を導く。

1 段目の落差を越流し、水位差 $\Delta h = 0.025\text{m}$ 下のプールの水面に落下した時の垂直方向の運動エネルギーを W_V (J) とすると、(1)式と(2)式と(4)式から、

$$W_V = m \cdot \Delta h \cdot g \quad \dots (5)$$

ここで、プール内の垂直方向の運動エネルギーの減勢効果（負の加速度）を a_v (m/s^2) とし、 $h_p = 0.115\text{m}$ の深さを有するプール底面に達するまでに $W_V \rightleftharpoons 0$ になるとすると、

$$m \cdot \Delta h \cdot g - m \cdot h_p \cdot a_v = 0 \quad \dots (6)$$

(6)式に実測値 ($\Delta h = 0.025\text{m}$ 、 $h_p = 0.115\text{m}$) を代入、

$$a_v = 2.13 \text{ m/s}^2 \quad \dots (7)$$

(6)式に(7)を代入して h_p について整理、

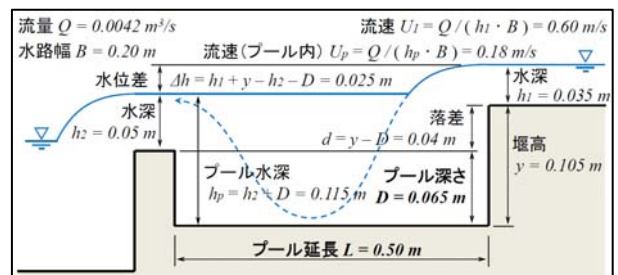


図-13 模型実験結果（実測値）
（ステップ・プール型 A タイプ）

$$h_p = 4.6 \cdot \Delta h \quad \dots (8)$$

(8)式より、水位差 Δh (m) とプール水深 h_p (m) は比例することから、落差 d (m) とプール深さ D (m) も同様に比例すると考えると、実測値 ($d = 0.04\text{m}$ 、 $D = 0.065\text{m}$) から、

$$D = 1.625 \cdot d \div 2 \cdot d \quad \dots (9)$$

4.2.4 必要なプールの「長さ」を算出する式

次に、1 段目の落差工を越流する前の流速 U_1 (m/s) から、必要なプール長さ L (m) を求める式を導く。

流速 U_1 (m/s) で 1 段目の落差を越流し、水位差 $\Delta h = 0.025\text{m}$ 下のプールの水面に落下するまでの水平方向の飛距離を l (m) として、(2)式を t について整理し、(3)式に代入、

$$l = U_1 \cdot (2 \cdot \Delta h / g)^{1/2} \quad \dots (10)$$

(10)式に実績値 ($U_1 = 0.6\text{m/s}$ 、 $\Delta h = 0.025\text{m}$) を代入すると、飛距離 $l = 0.04\text{m}$ となるので、プール長さ $L = 0.50\text{m}$ の内、減衰区間 l_p (m) は、

$$l_p = L - l = 0.46 \text{ m} \quad \dots (11)$$

ここで、プール内の水平方向の減勢効果（負の加速度）を a_H (m/s²) とし、1 段目の落差工を越流する前の流速 U_1 が、プール内で流速 U_p まで減速したとすると、(1)式と(2)式より、

$$U_1^2 - U_p^2 = 2 \cdot a_H \cdot l_p \quad \dots (12)$$

(12)式に実測値 ($U_1 = 0.6\text{m/s}$ 、 $U_p = 0.18\text{m/s}$ 、 $l_p = 0.46\text{m}$) を代入、

$$a_H = 0.35 \text{ m/s}^2 \quad \dots (13)$$

(12)式に(13)を代入して l_p について整理、

$$l_p = (U_1^2 - U_p^2) / 0.7 \quad \dots (14)$$

ここで、水位差 $\Delta h \div$ 落差 d 、また、流速 U_p はプール内で十分減速されるので $U_p \div 0$ と考えると、(10)式と(14)式から、

$$\begin{aligned} L &= l + l_p \\ &= U_1 \cdot (2 \cdot d / g)^{1/2} + 1.43 \cdot U_1^2 \quad \dots (15) \end{aligned}$$

ここで、流速 $U_1 = 6.0\text{m/s}$ として、落差が $d = 0.3\text{m}$ の場合と $d = 1.0\text{m}$ の場合を(15)式で計算してみると、 $d = 0.3\text{m}$ の場合は、 $L = 53.0\text{m}$ 、 $d = 1.0\text{m}$ の場合は、 $L = 54.2\text{m}$ となる。この結果から、落差 d の変化がプール長さ L に及ぼす影響は小さいと考えられるので、(15)式の落差 d を含む項を消去すると、

$$L = 1.43 \cdot U_1^2 \div 1.5 \cdot U_1^2 \quad \dots (16)$$

5. まとめ

1) 落差工の下流に十分な深さと長さを有するプールを設けることで、そこで洪水時の激しい流れのエネルギーが減勢され、河床の安定につながる。また、河川の生態系にとっても、生息環境が改善される。

2) プールの必要深さ $D(\text{m})$ は次式で得られる。

$$D = 2 \cdot d \quad d: \text{落差}(\text{m})$$

3) プールの必要長さ $L(\text{m})$ は次式で得られる。

$$L = 1.5 \cdot U_1^2 \quad U_1: \text{落差工上流の流速}(\text{m/s})$$

6. おわりに

かつての蛇行していた河川は、瀬と淵が形成され洪水時には湾曲部の深くて大きな淵がその流水の勢いを減勢させる役割を担っていた。一方、直線化が進んだ現代の河川には、瀬や淵に代わって落差工が出現した。その結果、魚類の遡上障害や河床材料の流失など、河川環境に大きな影響が生じた。しかし直線化された河川の両岸には既に膨大な資産が張り付き、再び蛇行河川に戻すことは、現実的ではない。そのため、この問題に対する対策として妥当な方法は、ステップ・プール構造を用いることであろう。かつての淵の働きをプールが担うことによって流速を抑え、河川生態系の生息環境が回復し、河床低下防止などの諸々の問題解決が期待できる。

本論文で導き出した 2 つの式は、少ない実験ケースの模型実験によるものであり、今後も改良の余地がある。ただし、今もなお現場では河床低下が進行し、河川環境の悪化が進んでいる。今後、この論文がきっかけとなり様々な研究が進み、実際の出水時のモニタリングなどを基に本研究で導き出した式がより精査され、多くの落差工においてステップ・プール構造が用いられることを願う。そして、全ての河川が治水と環境の両立した河川に改善されることを期待する。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修・社団法人日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説・設計編 [I]、山海堂、1997.
- 2) 福留脩文、有川崇、山路千冬、藤田真二、福岡捷二：魚類定住利用と河床の安定化を目指した溪床復元型全断面魚道の建設とその効果、河川技術論文集第 16 巻、2010.06
- 3) 福留脩文、有川崇、石山穂、福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計、土木学会論文集 F Vol.66 No.4,490-503、2010.10
- 4) 北海道開発局札幌開発建設部：豊平川河川整備計画、2006.