

II-41

ステッププールの部分発生の要因とその発生領域

北海道大学 学生員 上 林 悟

北海道大学 正 員 長谷川和義

1. はじめに

山地河川の河床形態の一種には階段状河床形状があり、リップとステッププールに大別される。この内、リップは河川の横断方向に直線状に大礫が堆積するのに対して、ステッププールは円弧状に堆積するのを特徴とする。このような河床形状によって形成されるプール部は種々の水生生物のすみかとなっていることが知られており、近年、多自然型工法の一環としてこのような河床の人工造成が試みられている。しかし、洪水などによって礫が流されることもあり、この河床形状に関する詳細な研究が必要になっている。また、発達したステッププールは土砂流出の制御に重要な役割を果たしており、このことからこの研究の必要性を指摘できる。しかし、リップ河床に関する研究に比べて、ステッププールの研究は少数にとどまっているのが現状である。長谷川ら¹⁾、²⁾、³⁾はステッププールの成因が射流に乗った定常水面波であると考え、基礎実験を進めてきた。その延長上で、最近移動床実験による研究⁴⁾から発生条件を求めることが可能となった。本論文は、更に一歩進んでステッププールの部分発生を含む広い発生領域を、移動床実験によって明らかにしようとするものである。

2. ステッププールの発生条件

過去の実験で知られた事柄を簡単に述べると、まず、ステッププールとリップには河床波-水面波の干渉過程において違う点があるということである。ステッププールが反砂堆波長と水面波の流下方向波長が一致した場合に形成されるのに対して、リップは、両者が一致しない場合に形成される。ステッププールの場合、反砂堆による強制水面波に水面固有の斜め波が同調して大振幅水面波を形成するため、その水面波の影響を受けて河床波が三次元的に成長するものと考えられる。リップの場合、反砂堆による強制水面波のため水面固有の斜め波が減衰し、水面波は河床波にそれほど影響を与えず、反砂堆のみ残る。このようなことから、反砂堆波長と水面波長とが一致する条件をステッププールの発生条件とし、その流量勾配曲線を求めた。

反砂堆波長と水面波長の一致を条件にして、ステッププールの発生条件を導く。反砂堆波長については、林の発生領域区分線⁵⁾のうちC=0の線上に実測データがよく載ることを利用して、波長とフルード数の関係を(1)式で表す。次に、水面波長には、定常3次元Airy波の波長とフルード数の関係式((2)式)を用いる。実験によれば、かなり大きな振幅をもつ斜め交錯波に対してもこの関係が成り立っているようである。

$$\begin{aligned} Fr^2 &= \frac{\coth(kh)}{kh} && \text{但し、 } k = \frac{2\pi}{\lambda} \\ &\approx \frac{1}{(kh)^2} + \frac{1}{3} && (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Fr^2 &= \frac{\beta h \tanh(\beta h)}{(kh)^2} && \text{但し、 } l = \frac{2\pi}{B/n}, \beta = \sqrt{k^2 + l^2} \\ &\approx \frac{0.83\beta h}{(kh)^2} && (2) \end{aligned}$$

Fr: 平均流速に対するフルード数、 λ : 斜め交錯波の流下方向の波長、B: 水路幅、n: 横断方向波数モード

Origin of partial formation of Step-pool systems and their criteria

By Satoru KANBAYASHI and Kazuyoshi HASEGAWA

これらの二式において、波長が等しいと考えこれを消去し、フルード数の二乗に関してその式を解くと、(3)式ようになる。式(4)は、抵抗則の一般形である。

$$Fr^2 = \frac{-\alpha^2 \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{2\pi h}{B/n} \right)^2 \right\} \pm \alpha \sqrt{\frac{4}{9} \left(\frac{2\pi h}{B/n} \right)^2 - \frac{4}{3} + \alpha^2}}{2 \left\{ \alpha^2 \left(\frac{2\pi h}{B/n} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (3) \quad Fr^2 = \left(\frac{u}{u_*} \right)^2 I \quad (4)$$

この時用いる抵抗則は、石川ら⁶⁾の考案した山地河川でよく適合する(5)式である。

$$\frac{u}{u_*} = 6.5 \left(\frac{h}{d_{84}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

また、(3)、(4)、(5)式より水深hの解を導くと二つの解が存在するが、その解は非常に近い値であり、この二つは同値であると考えることができ、次式のように表現できる。

$$h = 0.1918 \frac{B}{n} \quad (6)$$

よって、発生条件は次式に(6)式を代入したものである。

$$Q = \frac{u}{u_*} h^{\frac{3}{2}} B \sqrt{gI} \quad (7)$$

次に、射流であるという制約条件からFr=1の条件を考えると、(5)式から次式が導かれこれを(7)式に代入したものが射流条件となる。

$$h = \frac{d_{84}}{6.5^4 I^2} \quad (8)$$

最後に掃流力条件であるが、これは、代表粒径 d_{84} 以下の礫が移動する条件と考える。限界掃流力 $\tau_{*c} = 0.05$ を用いて、

$$h = \frac{\tau_{*c} s d}{I} \quad (9)$$

となるので、(5)式を用いて、流路幅10m、河床の代表粒径 $d_{84} = 0.40$ mである河川に関してステッププールの発生条件のグラフを描くと図1の様になる。

3. ステッププールの部分発生条件

実験では、2.で求めた発生条件線からある程度離れた条件の下でもステッププールの発生が認められる。このことから、反砂堆による強制水面波と擾乱による水面波の波長とが完全に一致しなくとも、それらの合成波がある程度の波高を持てばその水面波は河床波の形成に影響を与えると考えることができる。以下、この考えに従って部分発生条件を求める。

まず、反砂堆による水面波と斜め交錯波のx方向波をそれぞれ次式のように仮定する。

$$\xi_1 = A \sin(kx - \omega t) \approx A \sin kx \quad (10)$$

$$\xi_2 = A' \sin\{(k + \delta k)x - \omega t\} \approx A' \sin(k + \delta k)x \quad (11)$$

ξ : 静水水深からの水面高、A, A' : 波高、 δk : 波数の微小なずれ量、 ω : 角周波数

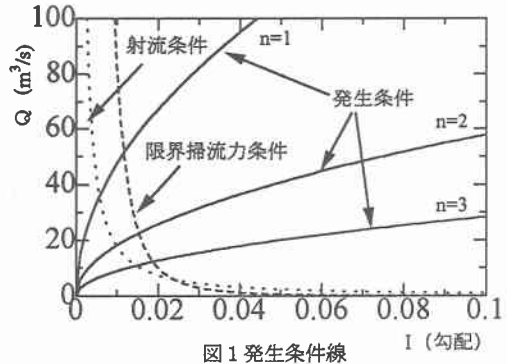
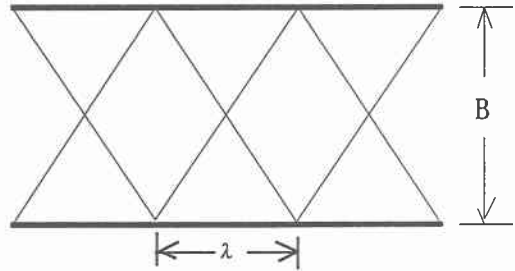


図1 発生条件線



B: 水路幅、n: 横断方向波数モード

これらを $A=A'$ と仮定して合成すると(12)式になり、 δk よりうねりの周期を決定できる。

$$\xi = \xi_1 + \xi_2$$

$$\approx 2A \cos\left(\frac{1}{2}\delta kx\right) \sin kx \quad (12)$$

k と λ の関係から、

$$\frac{1}{2}\delta k \approx \frac{\pi\delta\lambda}{\lambda^2} \quad (13)$$

が成り立つ。今、ステッププールが、水面波の振幅で評価して1.5A以上になる区間で生ずるものと考え、この区間長を 2λ と表せば、うねりの振幅を使って、

$$2A \cos\left(\frac{\pi\delta\lambda}{\lambda^2}\Delta\right) = \frac{3}{2}A \quad (14)$$

となる。これより、

$$\frac{\pi\delta\lambda\Delta}{\lambda^2} = 0.723 \quad (15)$$

更に、 $2\lambda = 4\lambda$ すなわち4つの連なりをステッププール床と見なすものとする、

$$\delta\lambda \approx \frac{\lambda}{9} \quad (16)$$

になる。同様な手法で $\delta\lambda < 0$ の場合に関しても $\delta\lambda$ を求め、その範囲を導き上述条件と合わせると、次式となる。

$$-\frac{\lambda}{9} \leq \delta\lambda \leq \frac{\lambda}{9} \quad (17)$$

2節における λ を $\lambda \pm \delta\lambda$ とおき、それぞれの境界条件曲線を描く。図3の破線がその結果である。

4. 実験による部分発生領域の検証

発生曲線の成立性を検証するために、以下の実験を行った。その際、4波長以上の連続発生をもってステッププールとみなすことにする。実験に用いた水路は、全長10m、幅30cmの循環式可傾斜水路である。また、河床材料には $d_{94}=0.654\text{cm}$ 、 $d_{50}=0.380\text{cm}$ のものを使用した。この材料は、通水により分級した後の表層部分を採取してみたところそれぞれ $d_{94}=1.524\text{cm}$ 、 $d_{50}=0.871\text{cm}$ であった。理論曲線を求める際、後者の代表粒径を用い、抵抗則には実験値と適合するHey式を用いた。ただし、掃流力条件としては、下弦側に d_{50} 、上弦側に d_{max} を与えた。水力条件は、発生条件及びその境界曲線の近傍に設定し、境界の比較がしやすいように一定の勾配に対して幾つかの流量設定を行った。水力条件を表1に、実験結果を図3に示す。図中の黒抜きはステッププール発生であり、白抜きは非発生である。

Run 4, 7の様に水力条件が発生領域中央部に位置するケースでは、非常に高い割合でステッププールが発生した。Run 6, 11の様に $\delta\lambda = \lambda/9$ の発生境界曲線の近傍にあり流量が比較的高い場合は、全河床礫が留まらずに流れることが多く、リブの発達も不十分であった。Run 2は、最大粒径の停止条件をも上回っており、Run 6, 11と同様な結果になった。流量が少ないRun 1, 5, 9は全体を通して河床の変動はあまりなかったが、Run 1, 9では、モード2のステッププールを観察することができた。ただし、モード1のステッププールは発生する事

表1 水力条件

run	I	h (cm)	Q (l/s)
1	0.0637	3.8	10.65
2	0.06114	5.5	21.09
3	0.06114	4.81	16.22
4	0.0384	4.83	15.03
5	0.04006	4.65	11.39
6	0.04168	6.9	23.53
7	0.04082	6.5	18.73
8	0.02858	6.73	15.3
9	0.03044	4.55	10.86
10	0.028	7.65	21.69
11	0.02966	8.45	24.46
12	0.03062	5.65	12.6

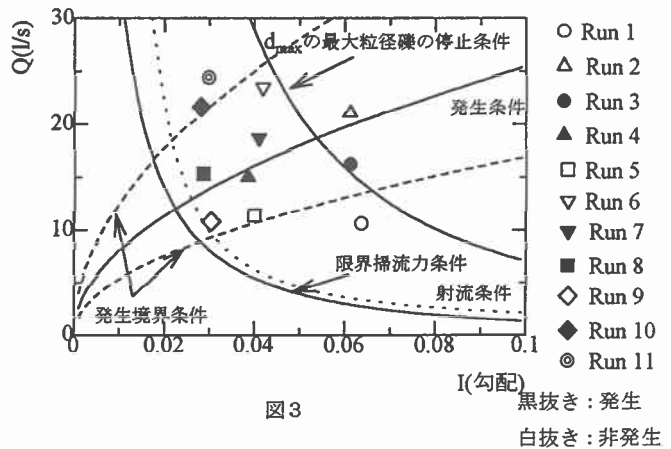


図3

がなかった。最後に Run 3, 8, 10 の様に発生境界曲線付近でステッププールが4波長連続発生した場合、リップの影響が色濃く残っている波長の長いケースが確認された。これをステッププールとみなすか否かは定義上の問題を含み、判定が困難であるが、逆にこの結果はリップからステッププールへの遷移領域にあると考えることができる。よって、この付近が発生境界であることは明らかであろう。

5. まとめ

- 1) 反砂堆波長と斜め交錯波長が一致する条件下でステッププールが発生する。図1に条件線の一例を示した。
- 2) 河床の一部分のみにステッププールの発生することが実験により確認された。
- 3) この現象は、反砂堆による強制水面波と擾乱による水面波の波長のわずかなずれに起因しているようである。
- 4) 3) の解釈から発生領域を導き、実験との比較によってその成立が確かめられた。
- 5) 実験により、ステッププールの波長はリップに比べて短いことが分かっているが、境界条件近傍ではリップ波長に近い三次元的な河床形状も確認されており、これはおそらくリップからステッププールへ成長する過程であると考えられる。

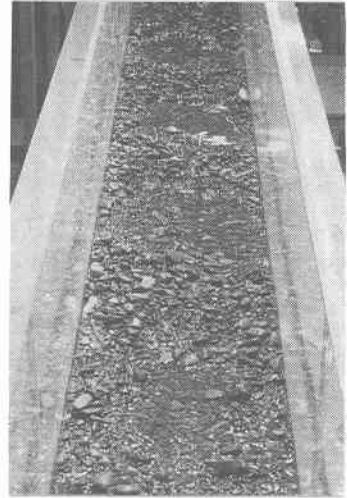


写真1 ステッププール

6. 参考文献

- 1) 長谷川和義・藤田陸博・小野寺正典 (1988) : 定常波を有する流れの河床せん断力、土木学会北海道支部論文報告集、第44号
- 2) 長谷川和義・八木次郎 (1993) : 2次元波状底面の影響を受けた射流における定常水面と流速分布—ステッププールの成因解析—、土木学会北海道支部論文報告集、第49号
- 3) 長谷川和義・富田稔 (1994) : 水面波に同調する河床波上の射流流れに関する実験的研究、土木学会北海道支部論文報告集、第50号
- 4) 長谷川和義・上林悟 (1996) : 溪流における淵・瀬 (ステッププール) の形成機構とその設計指針、水工学論文集 投稿中
- 5) Hayashi, T. (1970) : Formation of dunes and antidunes in open channels, Proc. ASCE, Jour. of Hydraulics Div., Vol. 96, No. HY2, pp431-439
- 6) 石川伸 (1988) : 山地河川における分岐・合流流路の形態とその変動に関する研究、北海道大学平成二年度修士論文

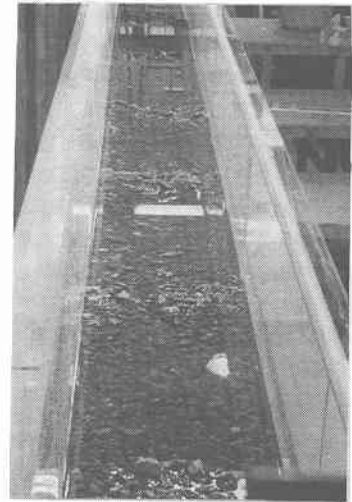


写真2 リップ