

II-17

転波列発達過程の数値計算

東北大学大学院 学生員 ○五十嵐 章
 東北大学大学院 正 員 泉 典洋
 京都大学大学院 正 員 細田 尚

1. はじめに

急斜面の流れには転波列と呼ばれる波列が形成される。雨の日に急斜面上の雨水でできたシートフローを観察すると、ほぼ一定の間隔で横断方向に並んだ波列が観測される。図-1 に水を使ったオブジェに見られる転波列の例を示す。壁面を流れる薄層流上に波列が確認できる。

これまでに転波列に対する研究は数多く行われており、時間により形状を変化させない準定常転波列はフルード数と波長を与えると完全に記述できることがわかっている。しかしその理論では準定常転波列の波長を特定することができない。そこで著者らは準定常転波列の波長の線形安定解析を行い、実際に観測されるような転波列の波長は不安定であり、波長が大きくなるほど波長の成長率は0に近づき無限大の波長は中立安定であるという結果を得ている¹⁾。本研究では数値シミュレーションを行い理論結果の妥当性を検証するとともに、転波列の詳細な発達過程を調べた。

2. 数値計算

2.1 計算条件

開水路1次元非定常流の基礎式として式(1)および(2)を用い、有限体積法に基づき離散化を行った²⁾。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial z_s}{\partial x} = -A \frac{C_f u^2}{R} \quad (2)$$

ここで、 Q :流量、 A :流水断面積、 u :断面平均流速、 θ :水路勾配、 z_s :基準水平面からの水位、 R :径深、 C_f :抵抗係数、 g :重力加速度、 t :時間、 x :流下方向座標である。

水路形状としては長さ600m、幅5mの長方形断面水路を仮定した。等流状態におけるフルード数 F_n 、水路勾配、抵抗係数 C_f 、等流水深 H_n はBrockが行った実験³⁾とほぼ同条件とし、それぞれ3.77、0.05011、0.0035、および0.00788mとした。またメッシュ間隔は流下方向に0.01m、時間間隔は0.001秒である。

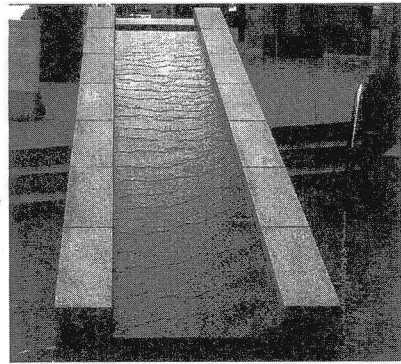


図-1 薄層流上に形成された転波列

2.2 転波列の発生および発達

転波列を発生させるために何らかの方法で擾乱を与える必要がある。ここでは水路上流端において基本流量の5%の擾乱をランダムに与えた。また抵抗係数を水路上の各位置で5%の範囲でランダムに与えた。図-2は水路上流端からの流下距離と時間による平均波長の変化を示している。ここでいう平均波長とは、各点の前後25m（計50m）の区間に存在する転波列の波長の平均をとったものである。 $x/H_n=3000$ 以下の範囲では擾乱が明確な転波列にまで発達しなかった。図-2に示したように時間によらず流下距離が長くなるにつれて平均波長は大きくなるが、 x/H_n が4000を超えると増加率が減少し $L/H_n=800-1000$ のほぼ一定値に漸近する様子がみられる。

2.3 実験との比較

図-2には数値計算によって得られた平均波長とともに、実験による波長³⁾をプロットしている。数値計算と実験では初期に与えられる擾乱の強度の違いから原点がずれる傾向にあるが、発達初期における波長の増加速度はほぼ一致しており、両者の結果はほぼ同一曲線上に位置することがわかる。

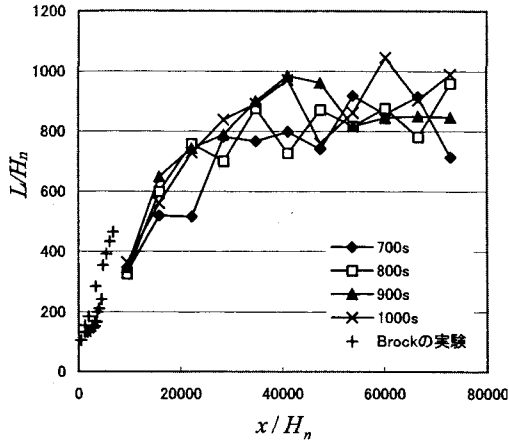


図-2 流下距離による平均波長の変化

表-1 Brock の実験条件³⁾

Case	水路勾配	F_n	H_n
1	0.05011	3.45	0.005232
2	0.05011	3.71	0.007976
3	0.05011	3.81	0.01026

2.4 波長の増大過程

波長が大きくなる原因の1つとして波の合体がある。いくつかの波が存在すると、速い波はほかの遅い波に追いつき合体し1つの波となる。したがって合体により転波列はその波長を増加させる。図-3は数値計算によって再現された転波列の合体の過程を示している。破線の円で囲った波は同一の波である。波高の小さい波が大きい波に追いつき合体し波高、波長ともに大きくなる様子がわかる。波列の合体により波長は大きくなるが、1つの波が複数に分裂し波長が小さくなる現象は実験でも数値計算でも確認されていない。したがって合体が続く限り波長は増大することになる。しかしながら数値計算では図-2に見られるように x/H_n が40000を超えると波長は一定値に漸近している。この原因として次のようなことが考えられる。合体が進んで波長が大きくなればなるほど合体に要する時間と距離は飛躍的に増加する。そのため、波長の増加速度は非常に小さくなり波長は一定値に漸近するように見える。また筆者らの行った線形安定解析の結果から波長が大きくなるほど波長の成長率は0に近づき無限大の波長は中立安定であるという結果を得て

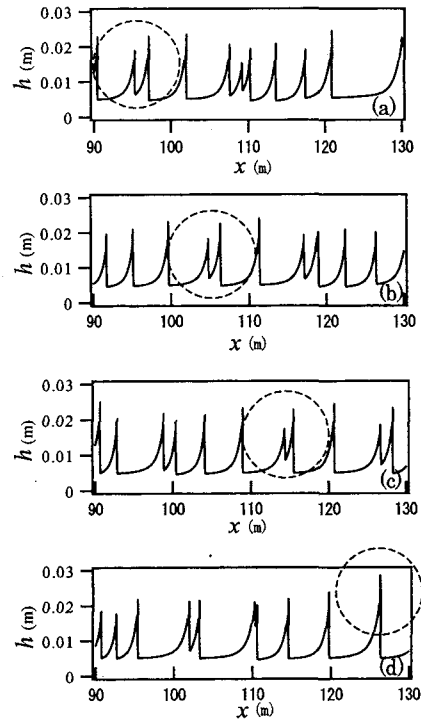


図-3 転波列の合体

(a) $t=170$ s, (b) $t=176$ s, (c) $t=182$ s, (d) $t=189$ s

いる¹⁾。波長が大きくなると擾乱に対して中立安定に近づくため合体が起こるほどの大きな波長の変化は起こらず、波長が一定値に漸近すると考えることができる。

3. まとめ

転波列の数値シミュレーションを行った結果、転波列の波長は流下距離が長くなるにつれては大きくなり、その後波長は一定値に漸近することがわかった。

参考文献

- 1) 五十嵐章, 泉典洋, 転波列の波長に関する研究, 東北支部技術研究発表会, pp.292-293, 2003.
- 2) 細田 尚, 朝位孝二, ダム破壊流れの1次元解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木学会水理委員会基礎水理部会, pp.23-31, 1999.
- 3) Brock, R. R., Development of roll waves in open channels, Report No.KH-R-16, W. M. Kech Laboratory, California Institute of Technology, 226p, 1967.