

# 開水路断面変化部における流れの水利特性について 段上り部における実験的検討

京都大学防災研究所 正 員 今 本 博 健  
京都大学大学院 学生員 ○藤 井 良 啓

開水路断面変化部における流れの水利特性については従来よりかなりの研究がなされており、多くの興味ある結果が得られているが、<sup>1)~4)</sup>断面変化部周辺に形成されるはく離域の特性、遷移部における流れの微視的構造など多くの問題が残されている。本報告は、開水路断面変化部における流れの水利特性を説明するための基礎的段階として、流水断面が鉛直方向に急変する場合を対象とし若干の実験的検討を加えたものであって、はく離域の特性、平均速度分布および乱れ特性についていくつかの興味ある結果が得られている。

## 1. 次元解析法による遷移の分類

図-1に示される記号を用いると、断面Ⅰ～Ⅲ間の運動量方程式は、つぎのように表わされる。すなわち、

$$\rho \beta_3 b_3 u_3^2 - \rho \beta_1 b_1 u_1^2 = \frac{\rho g}{2} \lambda_1 h_1^2 - \frac{\rho g}{2} \lambda_2 (2h_2 - \Delta h) \Delta h - \frac{\rho g}{2} \lambda_3 h_3^2 + W \sin \theta - F_f \quad (1)$$

となる。ここに、 $\beta$  および  $\lambda$  : 運動量および圧力補正係数、 $W$  : 断面Ⅰ～Ⅲ間の流体重量、 $F_f$  : 表面摩擦抵抗、 $\rho$  : 流体密度、 $g$  : 重力の加速度、 $h$  : 水深、 $\Delta h$  : 段上り高(>0)、段落ち高(<0)、 $u$  : 断面平均速度、 $\theta$  : 路床こう配であって、添字は数字の断面での値を示す。

簡単のため、(1)における重力項および表面抵抗を無視するとともに、補正係数については  $\beta = \lambda = 1$  とおけるものとする。さらに、断面変化部における水深  $h_2$  については

$$h_2 = h_1 \quad \text{for } h_1 > h_3 + \Delta h, \quad h_2 = h_3 \quad \text{for } h_1 < h_3 + \Delta h \quad (2)$$

と表わされると仮定すると、連続の条件より (1) はつぎのように書き直される。すなわち、

$$Fr_1^2 = \frac{\psi \{ (1 - \Delta \psi)^2 - \psi^2 \}}{2(1 - \psi)} \quad \text{for } 0 < \psi \leq 1 - \Delta \psi \quad (3)$$

$$Fr_1^2 = \frac{\psi \{ 1 - (\psi + \Delta \psi)^2 \}}{2(1 - \psi)} \quad \text{for } \psi \geq 1 - \Delta \psi \quad (4)$$

あるいは

$$Fr_3^2 = \frac{\phi \{ \phi^2 - (1 + \Delta \phi)^2 \}}{2(\phi - 1)} \quad \text{for } 0 < \phi \leq 1 + \Delta \phi \quad (5)$$

$$Fr_3^2 = \frac{\phi \{ (\phi - \Delta \phi)^2 - 1 \}}{2(\phi - 1)} \quad \text{for } \phi \geq 1 + \Delta \phi \quad (6)$$

ここに、 $Fr^2 = u^2 / \sqrt{gh}$ 、 $\phi = 1/\psi = h_1/h_3$ 、 $\Delta \phi = \Delta h/h_3$ 、 $\Delta \psi = \Delta h/h_3$

以上の誘導過程でなされた仮定は実際現象を単純化し過ぎており、断面変化部における流れの遷移特性を適確に表現するものではないがその単純さは遷移特性の概略を知るにはきわめて好都合である。

いま一例として、 $\Delta h/h_3 = 0.5$  の場合の  $h_1/h_3$  と  $Fr$  との関係を上記の関係式により示すと図-2のようになる。この図を利用して開水路段上り部における流れの遷移を分類すると、図-3に示されるような7種のものに分類されることが知れる。段落ち部の場合についても同様であって、たとえば  $\Delta h/h_1 = -0.5$  の場合、図-2における縦軸の  $Fr_1$  と  $Fr_3$

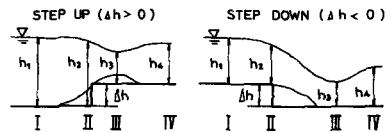


図-1 開水路断面変化部説明図

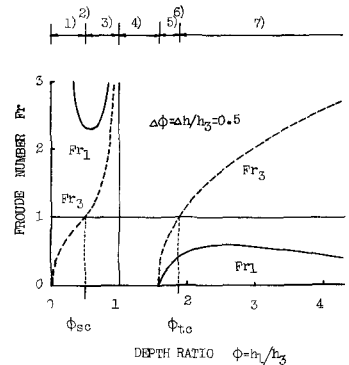
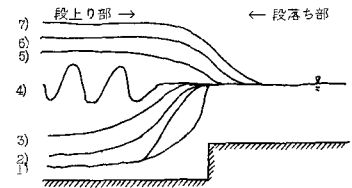


図-2 上下流側水深比とFr数との関係



- |                                         |                                        |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1) $0 < \phi < \phi_{sc}$               | 射流 $\rightarrow$ 変遷断面 $\rightarrow$ 常流 |
| 2) $\phi = \phi_{sc}$                   | 射流 $\longleftrightarrow$ 限界流           |
| 3) $\phi_{sc} < \phi < 1$               | 射流 $\longleftrightarrow$ 射流            |
| 4) $1 < \phi < 1 + \Delta \phi$         | 不安定遷移                                  |
| 5) $1 + \Delta \phi < \phi < \phi_{tc}$ | 常流 $\longleftrightarrow$ 常流            |
| 6) $\phi = \phi_{tc}$                   | 常流 $\longleftrightarrow$ 限界流           |
| 7) $\phi > \phi_{tc}$                   | 常流 $\rightarrow$ 変遷断面 $\rightarrow$ 射流 |

図-3 遷移状況の分類

とを入れかえ、横軸の  $h_1/h_3$  を  $h_3/h_1$  に置きかえるとそのまま利用でき、流れの遷移についても図-3の上流側と下流側とを逆にした7種のものに分類される。ただし、水理跳水と支配断面とは入れかわることになる。

幅400cmの水路における実測値と(6)の関係式とを比較すると図-4のようになり、 $h_1/h_3 > 1$  については両者はかなりよく一致することが知れる。

## 2. 開水路段上り部周辺における流れの局所機構

断面急変部における流れをもっとも特徴づけるものとしては離れ現象が挙げられるが、過マンガン酸カリウムをトレーサーとした可視化法により段上り部周辺に形成されるはく離域の大きさについて検討するとつぎのようである。

上流側のはく離域の長さを  $l_u$ 、下流側のはく離域の長さを  $l_d$ 、高さを  $h_d$  とし、種々の段上り高  $\Delta h$  および流量  $Q$  のもとでの実測値を示すと図-5のようであり、つぎの事項が知れる。すなわち、 $l_u/\Delta h$  と  $h_3/h_1$  との関係は  $\Delta h$  あるいは  $Q$  によって複雑に変化し、 $\Delta h$  を一定に保ち  $Q$  を増加させると  $l_u/\Delta h$  は減少するが、 $Q$  を一定に保ち  $\Delta h$  を増加させると  $l_u/\Delta h$  も増加することが知れる。また、 $l_d/\Delta h$  および  $h_d/\Delta h$  は  $\Delta h$  あるいは  $Q$  に関係なく  $h_3/h_1$  と一義的な関係にあり、前者が  $h_3/h_1$  の1乗に、後者は2乗に比例して増加する傾向を示している。ただし、これらの実測はいずれも下流側水位が調節されない場合についてなされたものであり、 $Fr_3$  は1より若干大きく図-3の7)に相当する遷移流が対象とされている。下流側水位がせき上げられ、流れが5)の常流遷移となるとはく離域の特性も変化し、 $l_d$  についてはせき上げのない場合とほぼ同様の特性を示すが、 $l_u$  および  $h_d$  についてはかなり複雑な特性を示すことになる。

図-6は、路床こう配を  $1/400$  とし、 $Q=3.45 \text{ l/sec}$ 、 $\Delta h=2.16 \text{ cm}$  の下流側水位調節がなされない場合の水面形と上流側路床面からの高さ  $z=2.8 \text{ cm}$  での平均速度  $U$ 、乱れ速度  $u'$ 、乱れエネルギー逸散率  $\varepsilon$  の計測結果を示したものであるが、 $U$  は段上り部直前より急激に増加し  $x=5 \text{ cm}$  付近で最大となるのに対し、 $u'$  は段上り部直前より増加するが最大となる断面位置はかなり下流側に移動し、本実験での計測区間 ( $-30 \leq x \leq 30 \text{ cm}$ ) では最大値に達しないことが知れる。また、 $\varepsilon$  については最大となるのは  $x=5 \text{ cm}$  付近であるが、それより下流での減衰はきわめて緩やかとなっている。

以上のように、開水路段上り部周辺における流れはかなり複雑な性状を示し、その解明には乱流構造をも含めた流れの局所機構の解明が必要となることが知れる。

## 参考文献

- 1) 芦田・荒木：土木研究所報告，101号，昭39。
- 2) 芦田：土木研究所報告，97号，昭35。
- 3) 石原・志方：土木学会論文集，128号，昭41。
- 4) 石原・志方：土木学会論文集，138号，昭42。

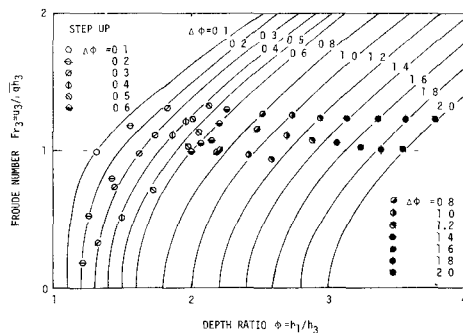


図-4 水深比とFroude数との関係

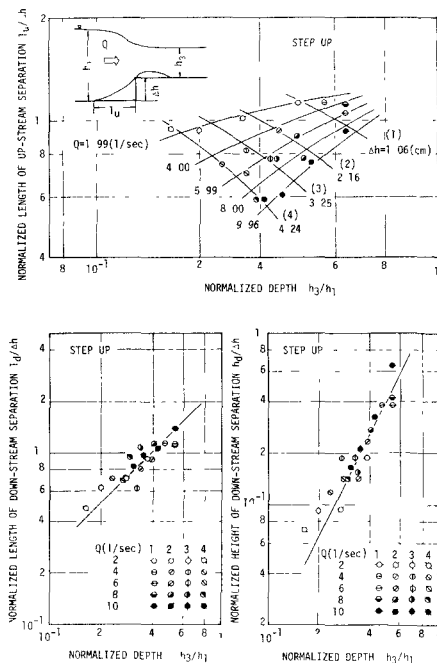


図-5 はく離域の特性

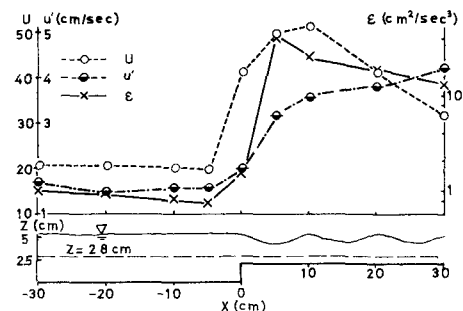


図-6  $U, u', \varepsilon$  の  $x$  方向変化状況