

## 段波伝播解析における底面摩擦抵抗のモデル化

神戸大学大学院 学生員 森本 皓一  
 神戸大学大学院 正会員 宮本 仁志  
 神戸大学大学院 正会員 門田 朗

### 1. はじめに

神戸市都賀川で2008年7月に起きた水難事故に関して、筆者らは突然の水位上昇から救出された人々の証言や事故時のデータから、河道内で段波状の現象が発生したと推定して検討を進めてきた<sup>1)</sup>。都賀川では親水河道がよく整備されている。その河道を伝播する段波現象を明らかにするためには、親水整備による底面摩擦抵抗をモデル化し、解析に組み込む必要がある。本報では、棧粗度<sup>2)</sup>を用いた室内水理実験により、開水路を伝播する段波における底面摩擦抵抗のモデルを検討した。

### 2. 段波の解析モデル

図-1に解析モデルの概要を示す。段波の伝播速度  $C$  で動く移動座標系において、[0]-[1]断面間のコントロールボリューム(以下CVと略記)での質量および運動量の保存を考えると、基礎式は以下ようになる。

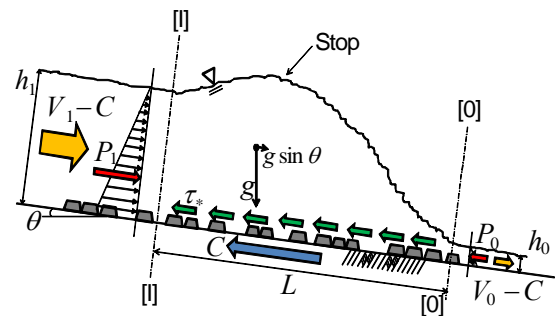


図1 段波モデルの概要

$$h_1(V_1 - C) = h_0(V_0 - C) \tag{1}$$

$$\rho h_0(V_0 - C)^2 - \rho h_1(V_1 - C)^2 = \frac{h_1^2}{2} \rho g \cos \theta - \frac{h_0^2}{2} \rho g \cos \theta - \rho c_f L V_1^2 + K \rho g L \frac{h_0 + h_1}{2} \tag{2}$$

ここに、 $h_1, h_0$  : CVの上・下流側水深、 $V_1, V_0$  : CVの上・下流側流速、 $\rho$  : 流体密度、 $g$  : 重力加速度、 $\theta$  : 河床勾配、 $c_f$  : 底面摩擦係数、 $K$  : CVの形状に関する補正係数、 $L$  : CV区間長である。なお、底面摩擦項( $\rho c_f L V_1^2$ )の代表速度は $V_1$ とした。

式(1),(2)を連立させることで段波の伝播速度  $C$  が次式のように得られる。

$$C = V_1 \pm \sqrt{g \bar{h} \eta \left( \cos \theta + \frac{KL}{\Delta h} \sin \theta \right) - \frac{c_f L \eta}{\Delta h} V_1^2} \tag{3}$$

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$  : CV前後の水位変化、 $\eta = h_0 / h_1$  : 水深比、 $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$  : CVの平均水深とする。

### 3. 水理実験

室内実験では、全長8m、幅0.6mの変勾配型の長方形断面開水路を使用した。水路上流端に設置したスルースゲートを瞬時に開放し、河道内に時間的に集中する流出を模擬した。親水整備による底面摩擦抵抗として、図-2に示すような棧粗度を用いた。実験条件に関しては、流量  $Q$  を2種類(0.02, 0.03m<sup>3</sup>/sec)、相対棧粗度間隔  $s/k$  (ここに、 $s$ : 粗度間隔、 $k$ : 粗度高さ) を3種類(4.5, 9, 18)、水路勾配  $\theta$  を



図-2 棧粗度を設置した実験開水路

キーワード 段波 運動量則 室内実験 底面摩擦係数 親水整備 都市河川

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 宮本仁志 miyamo@kobe-u.ac.jp

3種類(1/30,1/50,1/100)に変化させた。伝播速度  $C$ , CV 区間長  $L$ , およびCV区間の形状補正係数  $K$  の計測には水路側面からのビデオカメラ画像を用いた。既往の棧粗度実験<sup>2)</sup>より河床基準面は,  $s/k=18,9$  のケースでは河床に,  $s/k=4.5$  のケースでは棧粗度上面に設定した。

4. 結果と考察

実験結果を用いて式(3)より段波伝播における底面摩擦係数  $c_f$  を算出した。図-3に水深  $h_1$  と  $c_f$  の関係を示す。図より,  $c_f$  は相対棧粗度間隔  $s/k$  に関して系統的な傾向を示さず, また, 水深  $h_1$  と正の相関があることがわかる。

図-4 は, 既往研究<sup>2)</sup>から得られる定常流における棧粗度の底面摩擦係数  $c_{fn}$  と, 本報での段波における底面摩擦係数  $c_f$  の関係である。これより,  $c_f$  と  $c_{fn}$  の間には水路勾配  $\theta$  に関する有意の相関が認められる。

以上の結果を考慮して次元解析的考察を行うと, 段波伝播現象における底面摩擦係数  $c_f$  は次の関数形をとることが推察される。

$$c_f = f(\Delta h, L, \theta, c_{fn}) = \theta^{a(\Delta h/L)^b} c_{fn} \quad (4)$$

ここに,  $a, b$  は実験定数である。式(4)より, 無次元水位差  $\Delta h/L$  が小さくなるに従って,  $c_f$  は定常流の  $c_{fn}$  に漸近することになる。

図-5 に, 底面摩擦係数に関して実験値  $c_f$  と式(4)から求めたモデル値  $\tilde{c}_f$  (ここでは実験値と区別するため “~” を冠する) の比較を示す。式(4)における実験定数は最小自乗法により同定され, 以下のようなになる。

$$c_f = \theta^{-3.42(\Delta h/L)^{0.86}} c_{fn} \quad (5)$$

図-5 より実験値  $c_f$  とモデル値  $\tilde{c}_f$  は良好に一致しており, また両者の決定係数は  $R^2 = 0.94$  であった。これより式(4),(5)の有効性が明確に確認される。

図-6 に, 式(3),(5)より算出した伝播速度のモデル値  $\tilde{C}$  と実験値  $C$  の比較を示す。 $\tilde{C}$  と  $C$  はほぼ一致しており, 式(4),(5)による底面摩擦係数モデルの有効性がここでも再度確認される。若干の誤差の原因は, CV 区間長  $L$  や形状補正係数  $K$  の計測値がばらつくためと考えられる。

【参考文献】1)宮本, 門田: 突然の濁流の発生条件について, 河川災害に関するシンポジウム, 土木学会都賀川水難事故調査団報告資料「都賀川水難事故調査について」, pp.14-18, 土木学会水工学委員会, 芝浦工業大学, 2009. 2)足立: 人口粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp.33-44, 1964.

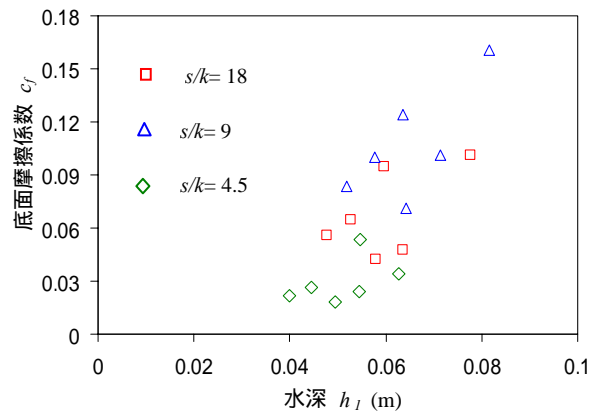


図-3 底面摩擦係数と水深の関係

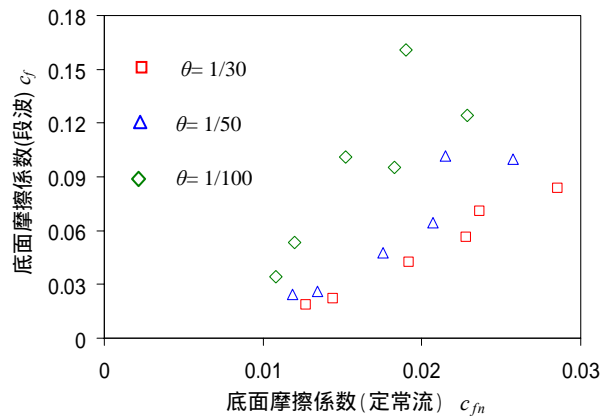


図-4 定常流の棧粗度抵抗と段波の棧粗度抵抗の関係

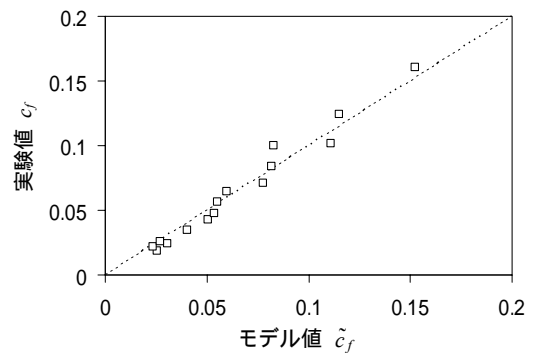


図-5 底面摩擦係数の実験値とモデル値の比較

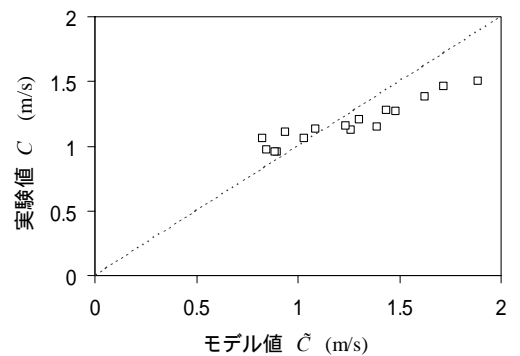


図-6 伝播速度の実験値とモデル値の比較