

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¹⁾。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²⁾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と略紀)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。

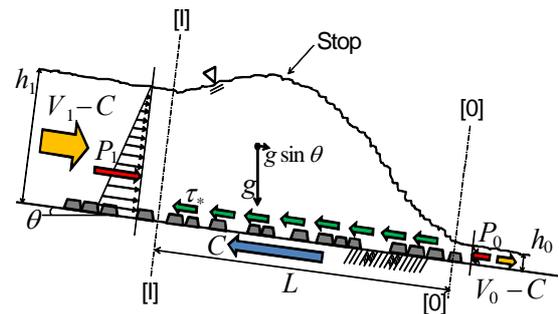


図1 段波モデルの概要

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

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

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、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 θ : 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, 0.03m³/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 θ 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²⁾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²⁾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 θ 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.

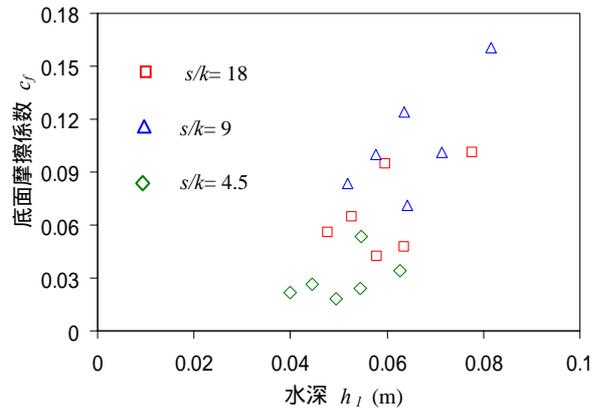


図-3 底面摩擦係数と水深の関係

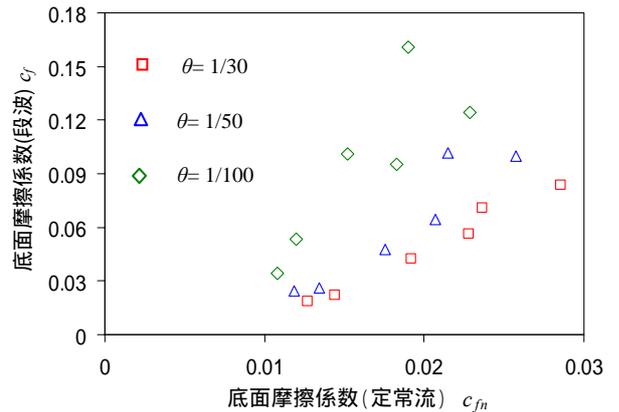


図-4 定常流の棧粗度抵抗と段波の棧粗度抵抗の関係

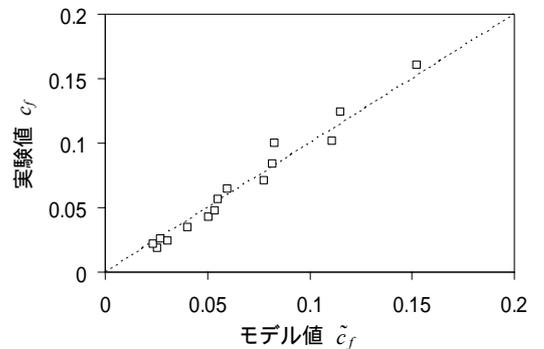


図-5 底面摩擦係数の実験値とモデル値の比較

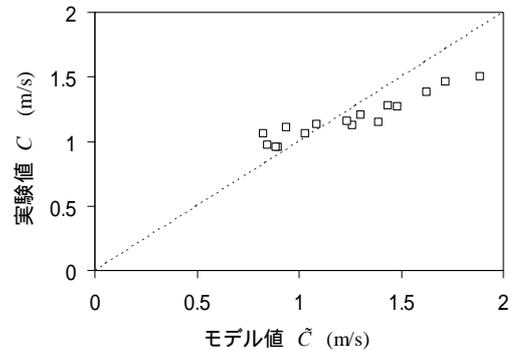


図-6 伝播速度の実験値とモデル値の比較