

第 部門

親水整備河道での段波伝播現象における底面摩擦抵抗に関する実験的検討

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 学生員 門田 朗

1. はじめに

2008年7月、神戸市都賀川で集中豪雨に起因する突然の出水があり水難事故が発生した。筆者らは救出された人々の証言や調査データから河道内で段波が発生したと推定した¹⁾。都賀川は河道内によく整備された親水空間があり、親水整備による底面抵抗が段波伝播に及ぼす影響が無視できないと考えられる。本報では、運動量則をベースにした理論モデルに関して、栈粗度²⁾をもちいた室内水理実験によってモデル中の底面摩擦項の検討を行った。

2. 理論モデル

図-1に理論モデルの概要を示す。段波の伝播速度 C で動く移動座標系で考え、図-1に示す[0]-[1]断面間のコントロールボリューム(以下 CV と略記)における運動量と質量のバランスを考える。定式化に際して考慮した力は、上下流での静水圧、CVに働く質量力、および親水整備を模擬した底面摩擦力である。理論モデルの基礎式を以下に示す。

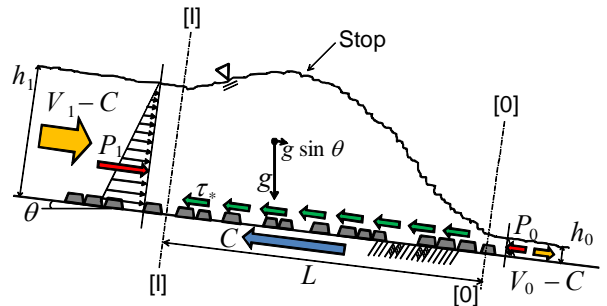


図-1 理論モデルの概要

$$\rho h_0 (V_0 - C)^2 - \rho h_1 (V_1 - C)^2 = \frac{h_1^2}{2} \rho g \cos \theta - \frac{h_0^2}{2} \rho g \cos \theta - \rho c_f L v_*^2 + K \rho g L \frac{h_0 + h_1}{2} \quad \text{(運動量保存式)} \quad (1)$$

$$h_1 (V_1 - C) = h_0 (V_0 - C) \quad \text{(質量保存式)} \quad (2)$$

ここに、 ρ ：流体密度、 h_0, h_1 ：それぞれCV区間前後の水深、 V_0, V_1 ：CV区間前後の平均流速、 θ ：河床勾配、 c_f ：底面摩擦係数、 K ：段波形状に関する補正係数、 g ：重力加速度、 L ：CV区間長、 v_* ：底面摩擦項の代表速度であり、下添字の0・1はそれぞれ段波伝播前・後の物理量を表す。

v_* に関しては V_1 と C が代表速度の候補として挙げられるが、後述のように、水理実験による検討をとおして V_1 が合理的に選択される。式(1),(2)を連立すると伝播速度 C に関して以下の解が得られる。

$$C = V_1 \pm \sqrt{g \bar{h} \eta \left(\cos \theta + \frac{KL}{\Delta h} \sin \theta \right) - \frac{c_{fV} L \eta}{\Delta h} V_1^2} \quad \text{(代表速度が } V_1 \text{ の場合)} \quad (3)$$

$$C = \frac{\Delta h V_1 \pm \sqrt{g \bar{h} \eta (\Delta h + c_{fC} L \eta) (\Delta h \cos \theta + KL \sin \theta) - c_{fC} L \Delta h \eta V_1^2}}{\Delta h + c_{fC} L \eta} \quad \text{(代表速度が } C \text{ の場合)} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$ ：段波伝播前後の水位変化、 $\eta = h_0 / h_1$ ：水深比、 $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$ ：平均水深である。

3. 水理実験

実験には長さ8m、幅60cmの変勾配式の長方形断面開水路を用いた。水路上流端に設置したスルースゲートを瞬時に開口させることにより河道へ時間的に集中する流出過程を模擬した。親水設備に対応する底面摩擦抵抗として栈粗度を設置した。伝播速度 C 、CV区間長 L 、形状補正係数 K を可視化計測するために水路材にはアクリル板を用い、側面からビデオカメラによる撮影を行った。実験では流量 Q を2種類(0.03, 0.02m³/sec)、相対粗度間隔 s/k (ここに、 s :粗度間隔、 k :粗度高さ)を3種類($s/k=18, 9, 4.5$)、水路勾配 θ を3種類(1/30, 1/50, 1/100)

に変化させた。既往の棧粗度実験²⁾から河床基準面は $s/k=18,9$ のケースでは河床とし、 $s/k=4.5$ のケースでは棧粗度上面とした。

4. 結果と考察

図-2 に、実験値を用いて式(3),(4)より求めた底面摩擦係数 c_f を示す。図より底面摩擦係数 c_f は相対粗度間隔 s/k に対して一定とならない。実験ケースを詳細に吟味すると、 c_f は水深 h 、河床勾配 θ によって系統的に変化することがわかった。

そこで、既往の定常流に対する棧粗度抵抗式²⁾を、非

定常現象の段波伝播過程に適用できるように拡張する。次元解析によって、非定常の段波伝播の底面摩擦係数 \tilde{c}_f は以下の関数形が仮定できる。

$$\tilde{c}_f = \theta^{a(\Delta h/L)^b} \cdot c_{fn} \quad (5)$$

ここに、 a, b : 実験定数、 c_{fn} : 定常流に対する棧粗度の底面摩擦係数²⁾である。式(5)の \tilde{c}_f は水位変化 Δh に比べて CV 区間長 L が大きくなると定常流の摩擦係数 c_{fn} に漸近する。最小自乗法によって実験値から式(5)の係数を求めると以下のようなになる。

$$\tilde{c}_{fV} = \theta^{-3.42(\Delta h/L)^{0.86}} c_{fn}$$

(代表速度が V_1 の場合) (6)

$$\tilde{c}_{fC} = \theta^{-66(\Delta h/L)^{2.5}} c_{fn}$$

(代表速度が C の場合) (7)

図-3 に、各代表速度における底面摩擦係数のモデル値 \tilde{c}_{fV} 、 \tilde{c}_{fC} と実験値 c_f を比較する。両図より代表速度をどちらにとってもモデル値と実験値はほぼ同一となることわかる。

図-4 に、式(6),(7)を用いて式(3),(4)より評価した伝播速度のモデル値 \tilde{C}_V 、 \tilde{C}_C と実験値 C の比較を示す。図より、底面摩擦項の代表速度を V_1 とした場合、モデル値と実験値はほぼ同一となる。しかし代表速度を C とした場合、モデル値は実験値の傾向をうまく表せないことがわかる。 C は段波の伝播速度であり、実際の水粒子速度とは異なるため摩擦抵抗項の代表速度にはそぐわないことがわかる。以上より、段波伝播現象に対して、式(6)で与えられる底面摩擦抵抗項の有効性が確認されたといえる。

【参考文献】1) 宮本仁志, 門田 朗: 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, 2009.03.04. 2) 足立昭平: 人口粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第 104 号, pp.33-44, 1964

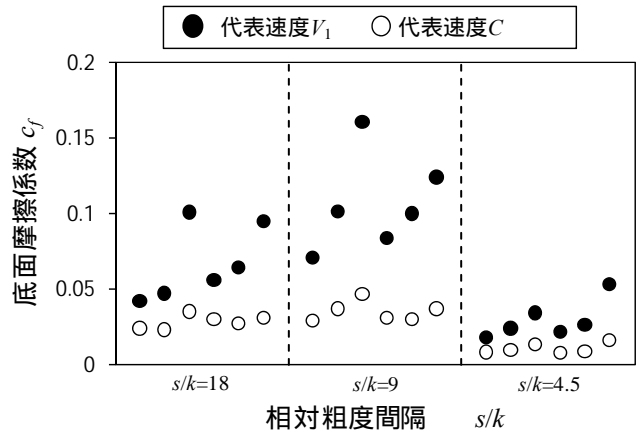
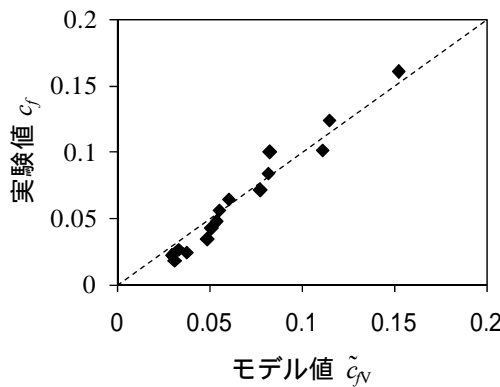
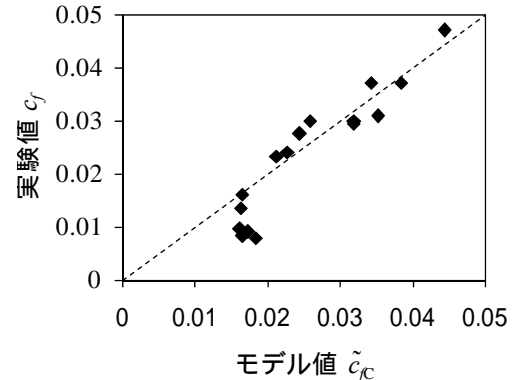


図-2 底面摩擦係数

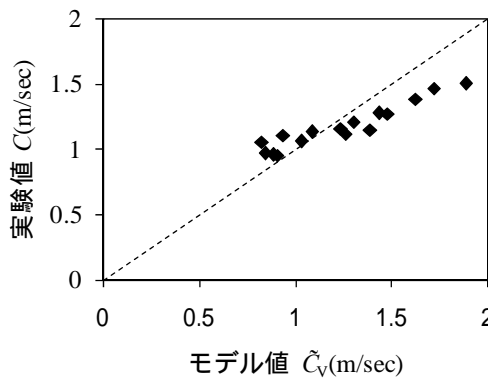


(a) 代表速度 V_1 の場合

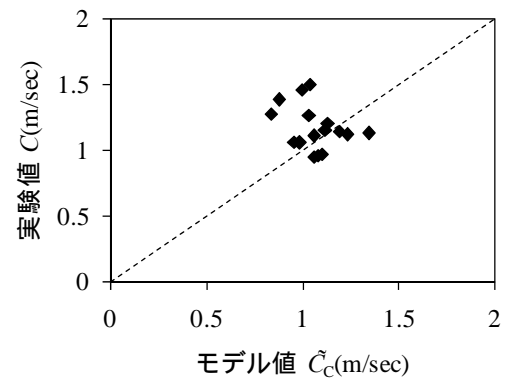


(b) 代表速度 C の場合

図-3 底面摩擦係数



(a) 代表速度 V_1 の場合



(b) 代表速度 C の場合

図-4 伝播速度