

開水路を伝播する段波における底面摩擦抵抗に関する実験と解析

Experimental and analytical investigation of bottom frictional resistance on a hydraulic bore propagating in an open-channel

宮本仁志*・門田 朗**・森本皓一***

Hitoshi MIYAMOTO, Akira KADOTA and Kouichi MORIMOTO

*正会員 博(工) 神戸大学准教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**正会員 修(工) 前神戸大学大学院学生 工学研究科市民工学専攻 博士課程前期課程 (同上)

***学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士課程前期課程 (同上)

In this paper, we analytically and experimentally investigated bottom friction effects on a hydraulic bore propagating in an open-channel. At first, momentum conservation was used to derive an equation for the propagation velocity of the hydraulic bore, in which both the bottom friction and gravitational forces were taken into account. Then, a laboratory experiment was carried out to develop a bottom friction law applied to the hydraulic bore propagation. The friction coefficient was obtained as an extension from the conventional friction coefficient for the steady-state open-channel flows through dimensional analysis. The results obtained in this paper indicated that the bottom friction effect was one of the important components to describe the bore propagation in an open-channel with a rough bed.

Key Words: hydraulic bore, bottom friction, momentum conservation, laboratory experiment

1. 序 論

神戸市の都賀川で 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すすめている¹⁾。図-1 に示すように、都賀川では親水河道が非常に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、現象解析に組み込む必要がある。

段波を含む重力流に関する研究では、従来から多くの研究成果があげられてきた^{2,3)}。河口密度流、火砕流、土石流、雪崩、ダムブレイクなど、その応用対象は広範にわたる。しかしながら重力流の研究では、水平方向の密度差や水位差を第一義的に起動力とする流体伝播現象を対象とするため、底面摩擦抵抗を陽に扱った研究は少ない^{4,5)}。

本論文では、運動量則をベースとして底面摩擦抵抗と水路床勾配の影響を取り入れた解析モデルを構築し、段波の伝播速度の解析解を導く。河道内の親水整備を単純模擬した栈粗度⁶⁾を用いて室内水理実験を行い、開水路を伝播する段波にかかる底面摩擦抵抗をモデル化する。さらに、得られた摩擦抵抗のモデルを用いて運動量保存式の各項のバランスを検討し、開水路の栈粗面を伝播する段波に対する底面摩擦抵抗の影響を議論する。



図-1 都賀川河道内の親水整備

2. 解析モデル

2.1 基礎方程式

図-2 に理論解析のモデルと関連する物理量の概要を示す。現象の定式化に際しては、図-2 (b) に示すように、段波の伝播速度 C で動く移動座標系で考え、水路単位幅を取り扱う。段波の先端部分は流れのエネルギー散逸を伴うた

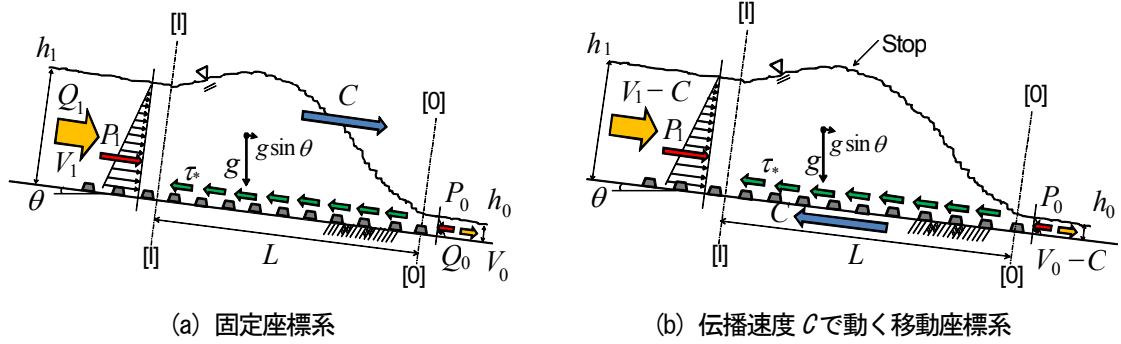


図-2 段波の解析モデルの概要と関連物理量

め、運動量則と質量保存則を用いる。図-2(b)に示す[0]-[1]断面間のコントロールボリューム(以下、CV と略記する)において流下方向の運動量および質量のバランスを考える。考慮した力は、上下流での水圧、CV に働く質量力、および親水整備を模擬した底面摩擦抵抗である。以上より、基礎式である運動量保存式と質量保存式は次のように与えられる。

$$\rho h_0 (V_0 - C)^2 - \rho h_1 (V_1 - C)^2 = \frac{h_1^2}{2} \rho g \cos \theta - \frac{h_0^2}{2} \rho g \cos \theta - \tau_* L + W \sin \theta \quad (1)$$

$$h_1 (V_1 - C) = h_0 (V_0 - C) \quad (2)$$

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 : それぞれ CV 区間前後の流速、 g : 重力加速度、 θ : 水路床勾配、 τ_* : 底面摩擦応力、 L : CV 区間長、 W : CV の水塊重量であり、下添字の 0・1 はそれぞれ CV 区間前・後の物理量を表す。定式化に際しては、[0]断面、[1]断面での水圧は静水圧で近似できると仮定し、親水整備による底面摩擦抵抗 τ_* は乱流抵抗として式(3)で、CV 部分の水塊重量 W は式(4)でそれぞれ与えた。

$$\tau_* = \rho c_f v_*^2 \quad (3)$$

$$W = K \rho g L \frac{h_0 + h_1}{2} \quad (4)$$

ここに、 c_f : 底面摩擦係数、 v_* : 摩擦抵抗則における代表速度、 K : CV 区間の形状に関する補正係数、である。

2.2 段波の伝播速度と抵抗則の代表速度

式(3)における抵抗則の代表速度 v_* に関しては、以下の二つが候補にあげられる: 1) 流速 V_1 , 2) 波速 C 。前者は段波通過後の開水路での平均流速であり、 $V_1 > V_0$ となるため大きいほうの速度を選択している。一方、後者は段波の伝播速度である。底面摩擦応力の表示は、固定座標系から

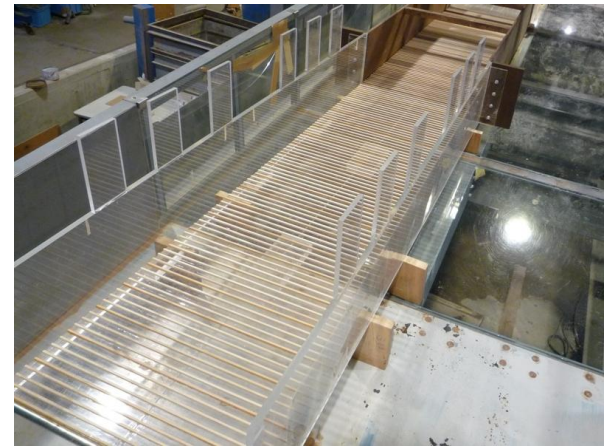


図-3 実験開水路

伝播速度 C で移動する座標系に変換(ガリレオ変換)しても不変である。そのため、ここでは座標系の選択にかかわらず不変となる底面摩擦応力の表示自体を検討していることになる。すなわち段波の波先においては、段波通過後の定常開水路流の平均流速 V_1 に加えて、図-2(b)に示すような相対静止問題を考えたときの底面速度(伝播速度) C もまた底面摩擦抵抗を代表する速度になる可能性が考えられる。本論文では後述のように、室内水理実験の結果を考察することにより、 V_1 と C のどちらが適切な代表速度となりえるのかを実証的に検討する。

段波の伝播速度 C は、式(1), (2)を連立させることにより得られる。代表速度が V_1 , C の場合を示すと、それぞれ式(5), (6)となる。

$$C = V_1 \pm \sqrt{g \bar{h} \eta \left(\cos \theta + \frac{KL}{\Delta h} \sin \theta \right) - \frac{c_f L \eta}{\Delta h} V_1^2} \quad (5)$$

$$C = \frac{\Delta h V_1}{\Delta h + c_f L \eta} \pm \frac{\sqrt{g \bar{h} \eta (\Delta h + c_f L \eta) (\Delta h \cos \theta + KL \sin \theta) - c_f L \Delta h \eta V_1^2}}{\Delta h + c_f L \eta} \quad (6)$$

表-1 実験の条件

case	s/k	Q m ³ /sec	θ
A-1	18	0.03	1/30
A-2			1/50
A-3			1/100
A-4		0.02	1/30
A-5			1/50
A-6			1/100
A-7		0.01	1/30
A-8			1/50
A-9			1/100
B-1	9	0.03	1/30
B-2			1/50
B-3			1/100
B-4		0.02	1/30
B-5			1/50
B-6			1/100
B-7		0.01	1/30
B-8			1/50
B-9			1/100
C-1	4.5	0.03	1/30
C-2			1/50
C-3			1/100
C-4		0.02	1/30
C-5			1/50
C-6			1/100
C-7		0.01	1/30
C-8			1/50
C-9			1/100

表-2 実験計測の結果

case	h_0 m	h_1 m	V_0 m/sec	V_1 m/sec	C m/sec	L m	K	Fr_0	Fr_1
A-1	0.016	0.058	0.39	0.86	1.15	0.76	1.4	0.99	1.52
A-2	0.015	0.064	0.30	0.79	1.12	0.86	1.5	0.77	1.26
A-3	0.017	0.078	0.22	0.64	1.09	0.88	1.5	0.55	0.85
A-4	0.016	0.048	0.39	0.70	0.95	0.65	1.4	0.99	1.49
A-5	0.015	0.053	0.30	0.63	0.97	0.70	1.4	0.77	1.23
A-6	0.017	0.060	0.22	0.56	0.97	0.69	1.4	0.55	0.96
A-7	0.016	0.036	0.39	0.46	0.76			0.99	1.29
A-8	0.015	0.039	0.30	0.43	0.81			0.77	1.14
A-9	0.017	0.042	0.22	0.39	0.86			0.55	0.95
B-1	0.017	0.064	0.29	0.78	1.21	0.68	1.4	0.71	1.24
B-2	0.017	0.071	0.23	0.70	1.16	0.62	1.4	0.55	1.00
B-3	0.019	0.082	0.17	0.61	1.13	0.66	1.4	0.39	0.77
B-4	0.017	0.052	0.29	0.64	1.06	0.57	1.4	0.71	1.27
B-5	0.017	0.058	0.23	0.58	1.06	0.68	1.4	0.55	1.03
B-6	0.019	0.064	0.17	0.52	0.96	0.63	1.3	0.39	0.84
B-7	0.017	0.037	0.29	0.46	0.99			0.71	1.27
B-8	0.017	0.041	0.23	0.40	0.94			0.55	1.00
B-9	0.019	0.046	0.17	0.37	0.96			0.39	0.82
C-1	0.011	0.049	0.16	1.01	1.50	1.02	1.5	0.50	2.09
C-2	0.011	0.054	0.13	0.92	1.46	0.93	1.5	0.39	1.72
C-3	0.013	0.063	0.10	0.80	1.27	0.88	1.5	0.27	1.30
C-4	0.011	0.040	0.16	0.84	1.38	1.14	1.5	0.50	2.14
C-5	0.011	0.044	0.13	0.75	1.28	1.01	1.5	0.39	1.72
C-6	0.013	0.054	0.10	0.61	1.11	0.93	1.5	0.27	1.15
C-7	0.011	0.028	0.16	0.60	1.26			0.50	2.19
C-8	0.011	0.032	0.13	0.52	1.16			0.39	1.66
C-9	0.013	0.039	0.10	0.43	1.00			0.27	1.12

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$: CV 区間前後の水深差,
 $\eta = h_0 / h_1$: 水深比, $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$: 平均水深である.

3. 室内水理実験

3.1 実験水路

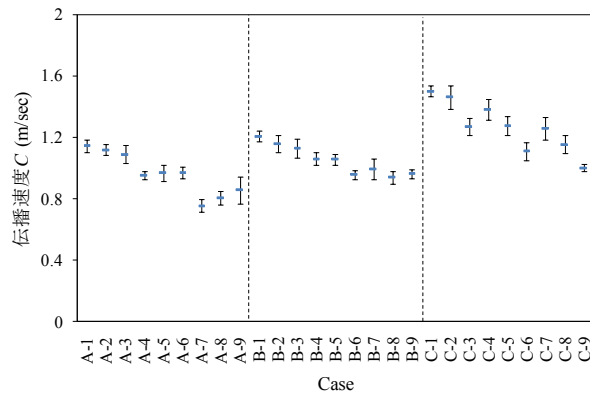
図-3 に実験開水路の写真を示す. 実験には長さ 8m, 幅 60cm, 高さ 25cm の可変勾配式の長方形断面開水路を用いた. 水路上流端に設置したスルースゲートを瞬時に開口させることにより, 開水路へ時間的に集中する流出過程を模擬した. 図-3 に示すように, 親水整備に対応する底面抵抗として栈粗度を一定間隔で設置した. 段波の形状や伝播速度を可視化計測するために水路材にはアクリル板を用い, 側面からビデオカメラによる撮影を行った.

3.2 実験条件

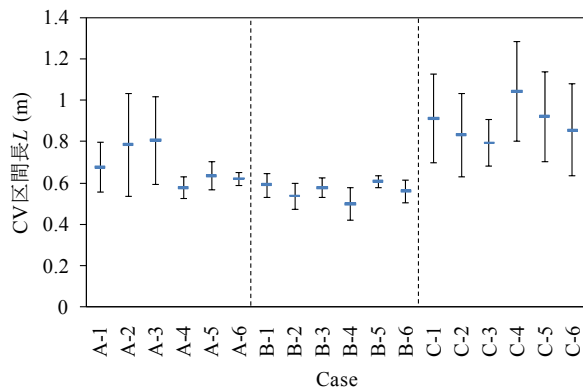
表-1 に実験条件を示す. 実験では流量 Q を 3 種類, 相

対栈粗度間隔 s/k (ここに, s : 粗度間隔, k : 粗度高さ) を 3 種類, 水路床勾配 θ を 3 種類に変化させた. なお, 実験流量 Q はフルード相似則を用いると, 都賀川において 30, 60, 90 m³/sec 程度の流量に対応する. また, 水路床勾配 θ は, それぞれ 1/30(都賀川上流の支川六甲川と杣谷川の合流地点), 1/50(都賀川中流), 1/100(都賀川下流)にそれぞれ対応する.

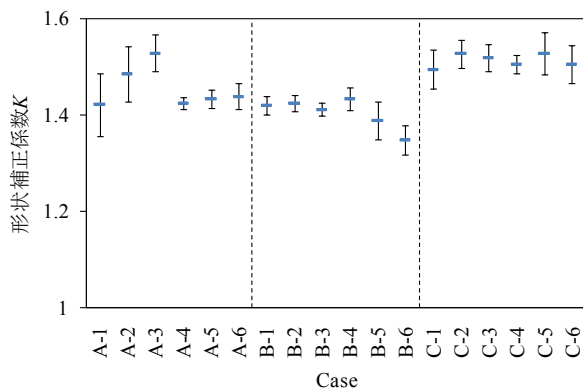
一方, 相対栈粗度間隔 s/k は既往の栈粗度実験⁹⁾を参考に, 抵抗が最大となる $s/k=8\sim12$ を境にして栈型($s/k=9, 18$)を 2 つ, 溝型($s/k=4.5$)を 1 つ設定した. これより, 親水整備の粗密に対応する s/k の影響が広範に検討される. なお, 図-1 に示す都賀川の河道位置では $s/k=30$ 程度と見積られ, 実験では図-1 の状況に比べて密な粗度配置を設定している. さらに相対粗度高さ k/h_1 に関しては, 水難事故の出水時で約 0.2 程度と見積られ, 一方, 実験では平均でおよそ 0.1 程度となる. これより, 水難事故時に限れば粗度としての取り扱いが可能な限界的状況にあると判断される. ただし, 事故時の流量は都賀川の計画高水流量の規模を大幅に下回っており, 今後の出水ではより大きな水深となる可能性も高い. その場合, 粗度としての取り扱いが十分可能であると判断し, 本研究では栈粗度を実験での摩擦抵抗に選択した.



(a) 伝播速度 C



(b) CV 区間長 L



(c) 形状補正係数 K

図-4 画像による段波の物理諸量の測定値

3.3 計測方法

流量 Q は、上流端のスルースゲートにおいて流出量公式⁷⁾を用いて調整した。公式に用いる収縮係数 C_c は、実際の流量と公式からの流量の偏差が最小になるように検討し、Pajer の理論曲線⁷⁾より $C_c=0.6$ とした。

各種水理量の計測区間は、栈粗度を設置した水路下流部 3.8m の中で、段波通過後の流れが等流状態になると判断される 80cm の区間 (上流端より 6.3-7.1m) である。水深 h_0 , h_1 は計測区間の中央部においてデジタル式ポイントゲージを用いて計測した。既往の栈粗度実験⁶⁾より、水路床基準面は $s/k=18, 9$ の A・B ケースでは河床とし、 $s/k=4.5$ の C

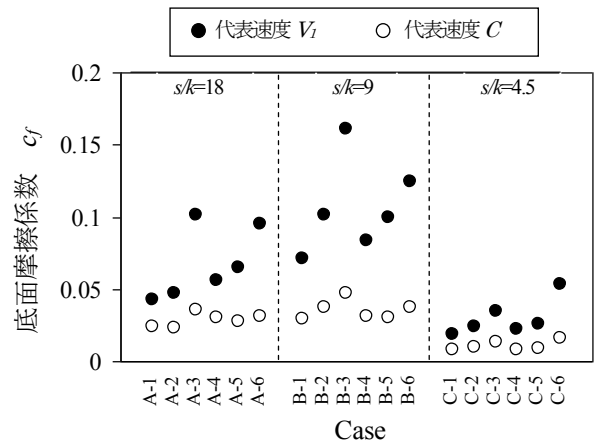


図-5 相対粗度間隔ごとの底面粗度係数

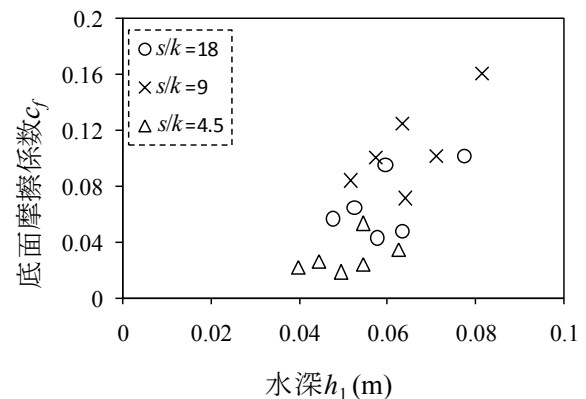


図-6 底面摩擦係数と水深の関係 (代表速度 V_1)

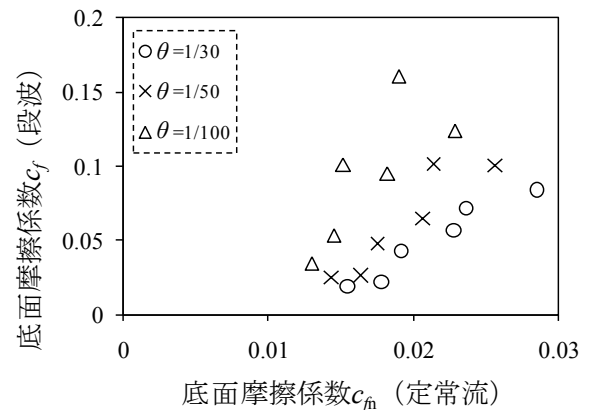


図-7 定常流の栈粗度抵抗と段波の栈粗度抵抗の関係 (代表速度 V_1)

ケースでは栈粗度上面とした。上流側流速 V_1 は流量 Q を流水断面積で除して求めた。一方、下流側流速 V_0 は形状抵抗と重力方向成分のつりあいから算出した。伝播速度 C , CV 区間長 L , 形状補正係数 K は、計測区間の側壁に透明の 5mm 方眼紙を貼り付け、これを側面より 30 コマ/sec のフレームレートでビデオ撮影することにより求めた。

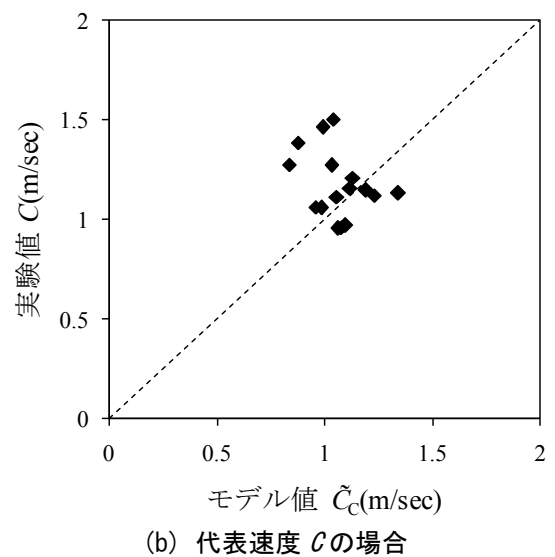
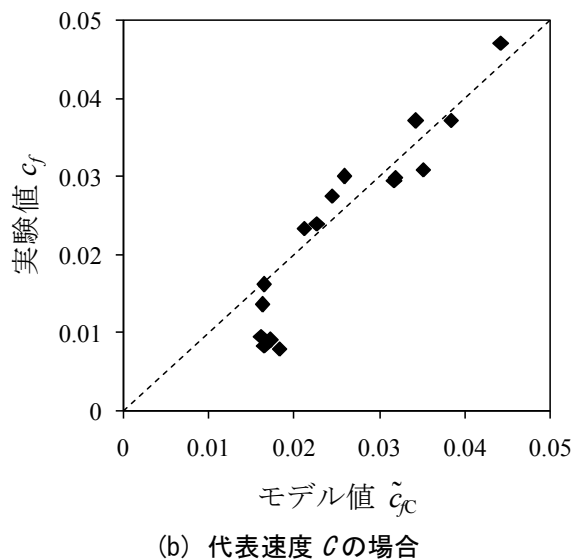
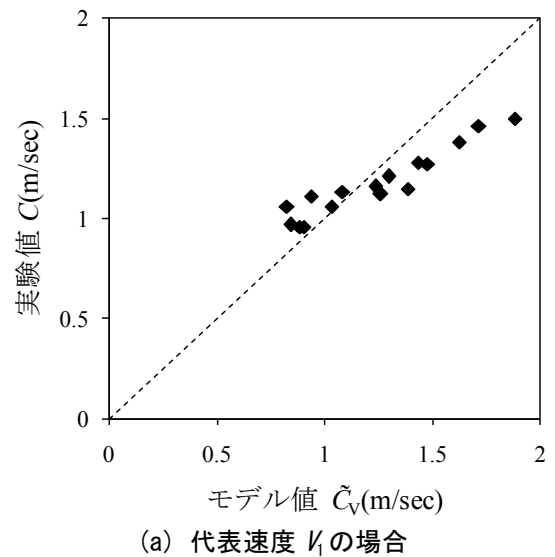
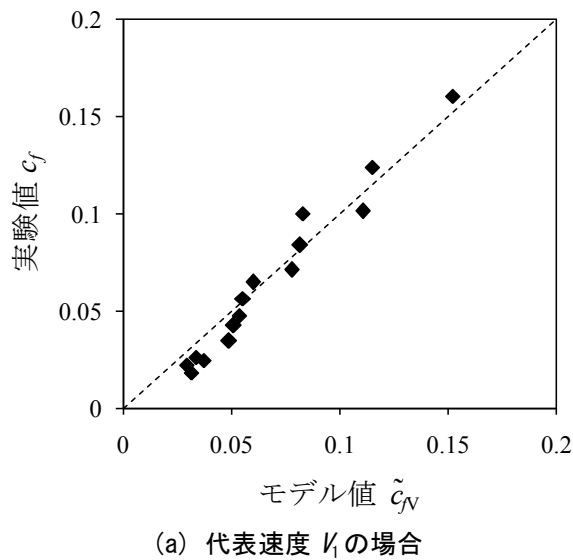


図-8 底面摩擦係数の実験値とモデル値の比較

図-9 伝播速度の実験値とモデル値の比較

4. 結果と考察

4.1 実験結果

表-2 に実験の全般的な計測結果を、図-4 に各ケースの伝播速度 C 、CV 区間長 L 、形状補正係数 K の平均値と標準偏差をそれぞれ示す。表-2 に示す $Fr_0 (= V_0/(gh_0)^{1/2})$ と $Fr_1 (= V_1/(gh_1)^{1/2})$ は、それぞれ CV 区間前後のフルード数である。なお、流量 Q がもっとも小さい $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースでは、水深が比較的緩やかに h_0 から h_1 へと遷移するため、 L および K の計測が困難であった。図-4(a) より、段波の伝播速度 C は流量 Q と正の相関がみられ、 Q の増加に伴い C も大きくなる傾向があることがわかる。また、図-4(c) に示す CV 区間の形状補正係数 K に関しては、ほぼ $K=1.4\sim 1.5$ となっており、 Q の大きいケースでは一定値をとる。一方、図-4(b) に示す CV 区間長 L に関しては、 $L=0.6\sim 1.0\text{m}$ 程度の値をとり、ケースによっては標準偏差

が大きくなっている。また、この整理のみでは、ほかの水理量との系統的な相関関係はみいだせない。 L は段波伝播の際の非常定区間の長さであり、ある程度のばらつきが出ることは十分に予想できるため、この後の検討では各ケースの平均値を用いて解析をすすめる。

4.2 底面摩擦抵抗のモデル化

この節では、式(3)における底面摩擦係数 c_f を、既往の栈粗度の実験式⁹⁾を拡張することによってモデル化するとともに、代表速度 v_* の検討を行う。

図-5 に、実験値を用いて式(5)(代表速度が V_1 の場合)および式(6)(代表速度が C の場合)より算出される底面摩擦係数 c_f を示す。また、図-6 に代表速度が V_1 の場合の底面摩擦係数 c_f と水深 h_1 の関係を、図-7 に代表速度が V_1 の場合の底面摩擦係数 c_f が既往の栈粗度の実験式⁹⁾より求めた定常開水路流に対する底面摩擦係数 c_{fn} の関係を、それぞれ

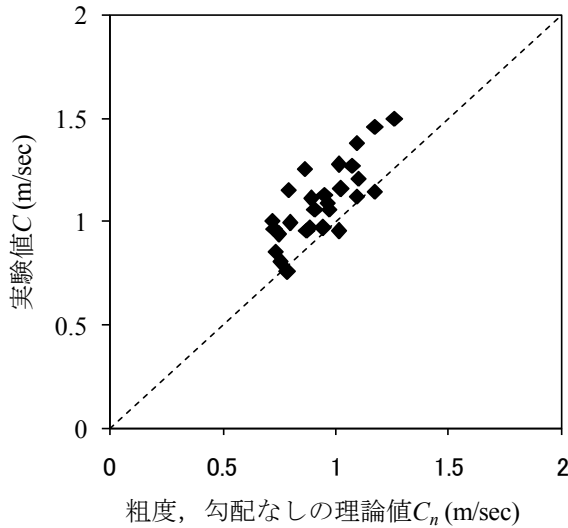


図-10 伝播速度の比較(粗度・勾配なしの場合)

示す。図-5, 6 より、段波における底面摩擦係数 c_f は相対粗度間隔 s/k に対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。さらに図-7 より、段波の c_f と定常開水路流れの c_{fn} の間には、水路床勾配 θ に関して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い、さらに上下流での水位差が小さくなるに従って段波は通常の定常開水路流に移行していくことを考慮すると、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仮定される。

$$c_f = f(\Delta h/L, \theta, c_{fn}) = \theta^a (\Delta h/L)^b c_{fn} \quad (7)$$

ここに、 a, b は実験定数である。式(7)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-8 に、摩擦損失係数に関して実験値 c_f と式(7)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“ $\sim$ ”を冠する)の比較を示す。式(7)における実験定数は最小自乗法により同定され、代表速度が V_1 、 C の場合それぞれ、以下ようになる。

$$\tilde{c}_{fV} = \theta^{-3.42(\Delta h/L)^{0.86}} c_{fn} \quad (\text{代表速度 } V_1 \text{ の場合}) \quad (8)$$

$$\tilde{c}_{fC} = \theta^{-66(\Delta h/L)^{2.5}} c_{fn} \quad (\text{代表速度 } C \text{ の場合}) \quad (9)$$

図-8 より、代表速度をどちらにとってもモデル値 $\tilde{c}_f$ と実験値 c_f は良好に一致することがわかる。また、両者間の決定係数は、代表速度が V_1 の場合： $R^2=0.944$ 、代表速度が C の場合： $R^2=0.836$ であった。これより式(7)～(9)の有効性が確認される。

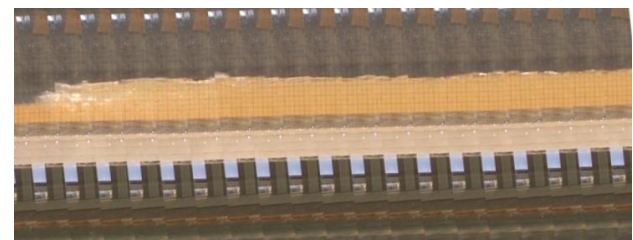
図-9 に、式(8),(9)を用いて式(5),(6)より評価した伝播速度のモデル値 $\tilde{C}_V$ 、 $\tilde{C}_C$ と実験値 C の比較を示す。また、図-10 に、式(5),(6)において底面摩擦係数と質量力を無視し



(a) A-1 ケース ($Q = 0.03 \text{ m}^3/\text{sec}$)



(b) A-5 ケース ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{sec}$)



(c) A-9 ケース ($Q = 0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$)

図-11 段波の先端画像

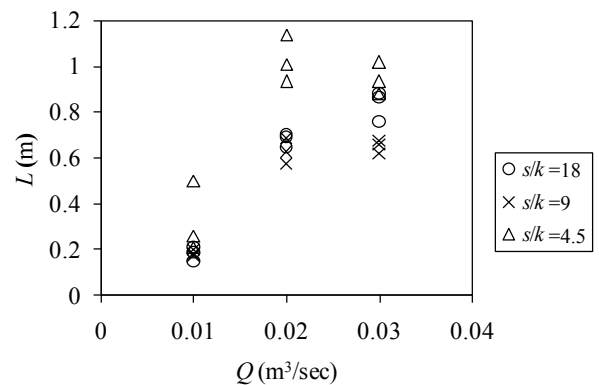


図-12 CV 区間長と流量の関係

て求めた段波の伝播速度 C_n と実験値 C の比較を示す。ここで、 C_n は標準的な水理学の教科書でよく示される以下の式となる。

$$C_n = V_1 \pm \sqrt{\frac{g}{2} \frac{h_0}{h_1} (h_1 + h_0)} \quad (10)$$

図-9 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。一方、図-10 より、本論文で対象とするような

底面摩擦抵抗をもつ急勾配河道においては、従来のような水位差のみを考慮した段波モデルでは伝播速度を小さく見積もることとなる。したがって、本解析モデルで考慮したCV区間に働く質量力および底面摩擦力は無視できないことがわかる。

以上より、段波伝播現象に対して、式(8)で与えられる底面摩擦抵抗則の有効性が示され、代表速度としては流速 V_1 が適切であることが実証的に確認されたといえる。

4.3 コントロールボリュームの形状補正係数と区間長

次に、CV区間長 L および形状補正係数 K を計測できていなかった流量 $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースを検討する。図-11に、各流量のケースにおける段波先端の画像を示す。

CV区間の形状補正係数 K は、本来的には段波先端部での水面の不安定性に対応して増減すると考えられる。本論文においては上述のように、 $Q=0.02, 0.03\text{m}^3/\text{sec}$ のケースで $K=1.4\sim 1.5$ となった。 $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースに関しても同一値が最適となるかを検討するために、実験値と式(5),(8)を用いて $K=1.4$ まわりで感度分析をおこなった。その結果、 K の値にかかわらずほぼ同一のCV区間長 L が得られたため、本論文では $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースに対しても $K=1.4$ とすることにした。

図-12に、実験値と式(5),(8)を用いて算出したCV区間長 L の計算値を示す。図より、 $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ の L は $Q=0.02, 0.03\text{m}^3/\text{sec}$ の L に比べて非常に小さいことがわかる。図-11の段波先端画像を参照すると、 $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースでは $Q=0.02, 0.03\text{m}^3/\text{sec}$ のケースに比べて先端部は小さく、相対的に短い距離で水深が h_0 から h_1 に移行しているものと考えられる。これは図-12に示されている $Q=0.01\text{m}^3/\text{sec}$ のケースの L の傾向とよく合致する。

4.4 運動量保存式の各項比較

解析モデルにおいて、本論文で考慮した底面摩擦抵抗と質量力の相対的な大きさを検討するために、ここでは水位変化(圧力差)による直応力との比較を行った。結果を図-13に示す。図-13(a), (b)より、質量力と底面摩擦抵抗の両方とも、水路床勾配 θ が大きくなるに伴って、解析モデルの各項バランスにしめる相対的な影響が大きくなることがわかる。質量力はCV区間における流下方向重力成分であるため、水路勾配の増加により値が大きくなる。一方、水深が減少するほど粗度による底面摩擦抵抗は大きくなる⁹⁾ため、水路床勾配 θ にともない底面摩擦抵抗も増加したと考えられる。さらに図-13(c)に示すように、本論文で考慮した底面摩擦抵抗と質量力の合力と、水圧差の比をみるとおおそ0.8~1.5となる。これより、急勾配の開水路粗面を伝播する段波現象において運動量のバランスを考える場合、底面粗度による抵抗力と重力方向成分による質量力は無視し得ない成分であることがわかる。

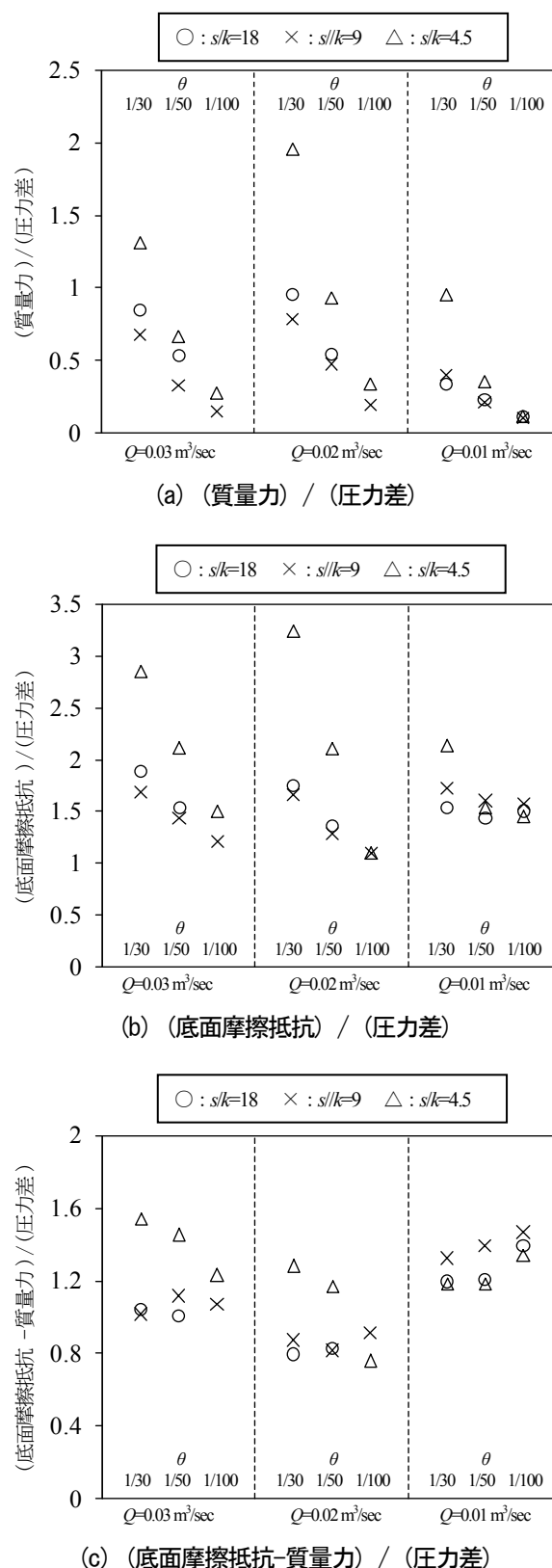


図-13 運動量保存式の各項比較

5. 結 論

本論文では、運動量則をベースとして底面摩擦抵抗と水路床勾配の影響を陽に取り入れた解析モデルを構築し、室

内水理実験により解析モデルにおける底面摩擦抵抗則の検討を行った。得られた主な成果を以下に列挙する。

- (1) 開水路粗面を伝播する段波の伝播速度をあらわす式を解析的に導いた。得られた式中には、底面粗度による摩擦抵抗と重力方向成分による質量力が考慮されている。
- (2) 室内水理実験により、底面摩擦抵抗をモデル化した。得られた抵抗モデルは、定常流に対する既往の栈粗度抵抗を拡張する形で定式化されている。抵抗モデルにおける代表速度としては、段波通過後の流速が適確である。
- (3) 運動量保存式において底面摩擦抵抗と質量力の項を水圧差の項と比較した結果、両者はほぼ同一オーダーとなり、水路床に大きな粗度をもつ河道において段波現象を考える際、底面摩擦抵抗は無視し得ない成分であることがわかった。

【謝辞】本研究を遂行するにあたり、神戸大学の藤田一郎教授、道奥康治教授、さらには土木学会都賀川水難事故調

査団の団員各位には、いろいろな観点からご助言・ご協力いただきました。また、査読者の適切な指摘によって論文が洗練されました。以上、ここに記して謝意を表します。

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, pp.14-18, 土木学会水工学委員会, 芝浦工業大学, 2009.03.04.
- 2) Simpson, J.E.: *Gravity currents in the environment and the laboratory*, Second edition, Cambridge University Press, 244p., 1997.
- 3) Huppert, H.E.: Gravity currents: a personal perspective, *J. Fluid Mech.*, vol.554, pp.299-322, 2006.
- 4) Simpson, J.E.: 前出2), pp.147-155.
- 5) Simpson, J.E. and Britter, R.E.: The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, *J. Fluid Mech.*, Vol.94, pp.477-495, 1979.
- 6) 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.
- 7) 土木学会: 水理公式集, pp.297-298, 1985.

(2010年3月9日 受付)