

第Ⅱ部門

親水整備が施された急勾配都市小河川における出水時の段波伝播に関する実験

神戸大学大学院 学 生 員 ○門田 朗

神戸大学大学院 正 会 員 宮本 仁志

1. はじめに

筆者らは既報¹⁾において、2008年7月28日午後に神戸市の都賀川で発生した水難事故に関して、河道内での突然の水位上昇を伴う濁流を水理学的に理論解析した。その結果、この現象は、1)流出が河道に時間的に集中することにより生じる、2)上流側へ伝播しようとする負の段波が出水時の流速が大きいために下流に押し流されることで発生する、と判断した。本報では、この結果を今後の啓発活動や危険度評価につなげるために、水理実験によって2)の状態での段波形状や伝播速度、理論モデルにおける底面摩擦係数などを検討した。

2. 理論モデル¹⁾の概要

図-1に理論解析モデルの概要を示す。現象の定式化に際しては濁流の伝播速度 C で動く移動座標系で考える。図-1に示す[0]-[1]断面間のコントロールボリューム(CV)において運動量保存式と質量保存式を立て、連立させて解くと伝播速度 C に関して次式が得られる。

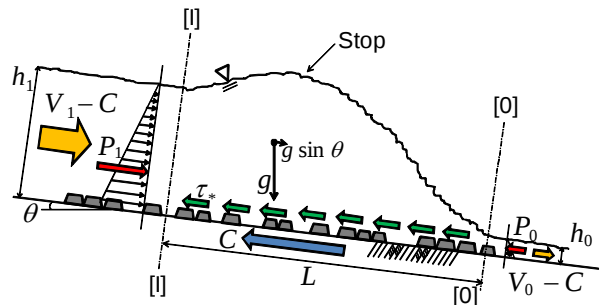


図-1 濁流伝播現象の解析モデルの概要

$$C = \frac{\Delta h}{\Delta h + c_f L \eta} V_1 \pm \frac{\sqrt{\eta}}{\Delta h + c_f L \eta} \sqrt{g \bar{h} (\Delta h + c_f L \eta) (\Delta h \cos \theta + K L \sin \theta) - c_f L \Delta h V_1^2} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$: 濁水通過前後の水位変化量、 h_0, h_1 : それぞれ CV 区間前後の水深、 $\eta = h_0 / h_1$: それらの比、 $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$: 平均水深、 V_1 : 濁水通過後の平均流速、 θ : 河床勾配、 c_f : 底面摩擦係数、 K : CV 区間の形状に関する補正係数、 g : 重力加速度、 L : 濁流の水位変化区間(CV 区間)の長さであり、下添字の 0・1 はそれぞれ濁流前・後の物理量を表す。

さらに上述のように、上流側への負の段波伝播として現象を考察すると式(1)の負の符号が選択され、突然の水位上昇を伴う濁流の発生する条件は、以下で定義されるフルード数 Fr_p が 1 を超えるときになる¹⁾。

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

3. 水理実験

実験では長さ 8m、幅 60cm の可変勾配式の長方形断面開水路を用いた。段波の形状や伝播速度を可視化計測するため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。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抵抗として、栈粗度を 2cm 間隔で設置した。

表-1 水理実験 条件

case	Q	θ	h_1	h_0	Δh	η	$\bar{h}$
	m^3/s		m	m	m		m
A-1	0.045	1/30	0.04	0.02	0.02	0.45	0.03
A-2	0.045	1/50	0.05	0.02	0.03	0.43	0.03
A-3	0.045	1/100	0.05	0.02	0.03	0.42	0.03
B-1	0.015	1/30	0.03	0.01	0.01	0.50	0.02
B-2	0.015	1/50	0.03	0.01	0.02	0.45	0.02
B-3	0.015	1/100	0.03	0.02	0.02	0.45	0.02

ビデオカメラによる可視化計測は、栈粗度が設置されている 2m の区間を 40cm 毎に区切って行った。水位

変化部先端の移動速度をビデオ画像から算出して伝播速度 C を求めた。一方、平均流速 V_1 は、流量 Q を流水断面積で除することで算出した。実験値としては、段波形状がより明確に表れた 2 区間（上流側より第 3, 4 区間）の平均値を採用した。

表-1 に実験条件を示す。流量 Q を 2 段階、水路勾配 θ を 3 段階に変化させた実験を行い、それらの変化が段波形状および伝播速度におよぼす影響を考察した。

4. 結果と考察

図-2 に実験で得られた水位急変部形状の画像を、表-2 に実験結果をそれぞれ示す。図-2(a), (b)を比較すると、流量 Q の違いによって先端部の形状が明確に異なることが確認される。図-2(a)に示す Q が大きい場合には、伝播する波面の先端部は切り立っていることがわかる。後述するように、このケースではフルード数 Fr_p が 1 を超えており、突然の水位上昇を伴う濁流に相当する。一方、図-2(b)では切り立った波面先端部は確認できず、相対的に緩やかに水位が上昇するのがわかる。

表-2 より両ケースの伝播速度 C と流速 V_1 を比較する。図-2(a)に示すケースでは $C < V_1$ となっており、段波は流れに押し流される形で下流側に伝播していると考えられる。一方、図-2(b)では $C > V_1$ となり、先端の移動速度の方が早い状態になり、負の段波は上流側に伝播しているものと推察される。

切り立った波面先端部が確認される大流量の 3 ケースを対象にして(1)式より c_f を算出したところ、すべてのケースで $c_f = 0.01$ となった。これより、底面摩擦係数への θ の影響は小さいと考えられる。さらに、藤田の解析結果²⁾を用いて(1)式から c_f を算出すると 0.016 となり、本実験の値はそれより小さく評価されている。

小流量の 3 ケースでは、流れの形状変化が緩やかなため、画像からの CV 区間(L)の特定が困難であった。そこで、上述の $c_f = 0.01$ を用いて L を算出した。結果

は表-2 に示すとおりである。このとき L は大流量のケースに比べると著しく増加する。このことは、段波が流れ場を上流に向かって遡上できる条件のときの、緩やかな水位上昇の状況をよく表しているものと考えられる。

(2)式よりフルード数 Fr_p を算出した。大きい流量の 3 ケースでは $Fr_p > 1$, 小さい 3 ケースでは $Fr_p < 1$ となる。これより、理論から導き出された Fr_p は、突然の水位上昇を伴う濁流の発生を判断するのに的確なパラメータであることが、水理実験より検証されたといえる。

今後は、さまざまな流れの条件下において c_f の同定を行い、表六甲河川など急勾配都市小河川において、流出が集中した場合の河道内危険度評価を行っていく予定である。

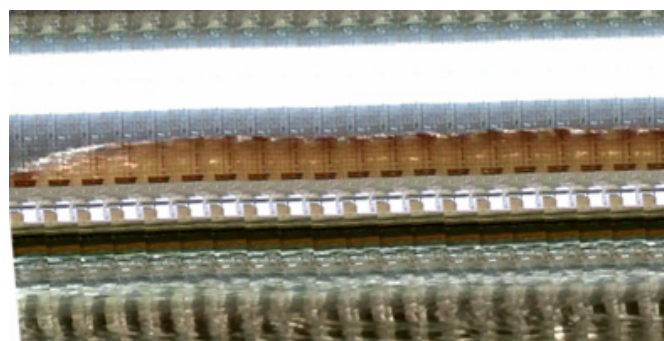
【参考文献】1): 宮本仁志, 門田 朗: 突然の濁流の発生条件について, 河川災害に関するシンポジウム, 土木学会都賀川水難事故調査団報告資料「都賀川水難事故調査について」, pp.14-18, 土木学会水工学委員会, 芝浦工業大学, 2009.03.04. 2): 藤田一郎: 事故概要および流況、ピーク流量の推定, 河川災害に関するシンポジウム, 同上, pp.1-7.

表-2 水理実験 結果

case	C	K	L	V_1	c_f	Fr_p
	m/s		m	m/s		
A-1	1.4	1.6	0.35	1.7	0.010	6.4
A-2	1.3	1.8	0.41	1.6	0.010	8.4
A-3	1.3	1.7	0.34	1.6	0.010	7.0
B-1	1.0	1.6	2.20	0.9		0.9
B-2	1.0	1.6	5.00	0.8		0.8
B-3	1.0	1.7	9.60	0.8		0.8



(a) Case A-2



(b) Case B-3

図-2 水位急変部の先端形状