

急勾配の親水整備河道における突発的集中豪雨時の段波発生に関する実験と解析

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. はしがき

2008年7月に神戸市の都賀川で発生した水難事故に関して、筆者らは土木学会の調査団活動の一環として、河道内で突然の水位上昇を伴う濁流を水理解析した¹⁾。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洪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、と結論した。本報では、この結果を今後の危険度評価に繋げるために、水理実験と理論解析により、段波形状や伝播速度、理論モデルでの底面摩擦係数、突然の濁流の発生条件などを検討した。

2. 水理実験

実験には長さ 8m、幅 60cm の可変勾配式の長方形断面開水路を用いた。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、棧粗度を 2cm 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

表-1 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

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。可視化計測は、棧粗度が設置される 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 と流水断面積から算出した。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 種類、水路勾配 θ を 3 種類に変化させ、それらの変化が段波形状および伝播速度へおよぼす影響を検討した。

3. 理論モデル¹⁾

理論モデルの概要を図-1 に示す。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)を考える。ここで考慮した力は、上下流での静水圧、CV に働く質量力および親水整備が施された底面の摩擦力である。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。

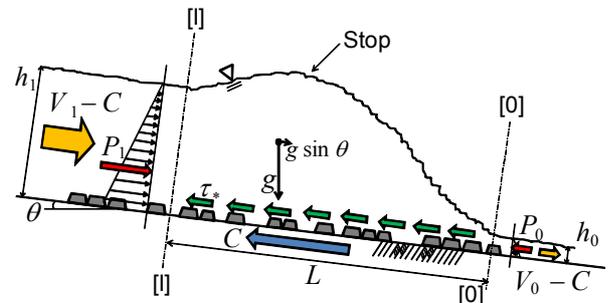


図-1 濁流伝播現象の理論モデルの概要

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

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$: 濁水通過前後の水位変化、 h_0, h_1 : それぞれ CV 区間前後の水深、 $\eta = h_0 / h_1$: 水深比、 $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$: 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⁾。

キーワード 水害, 親水, 都市小河川, 突発的集中豪雨, 段波, 水理解析

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

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

4. 結果と考察

表-2 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

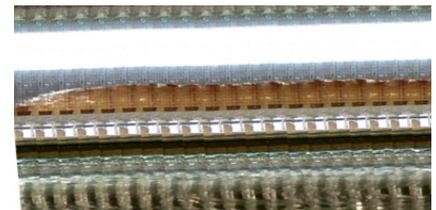
表-2 に実験結果を、図-2 に水位急変部形状の画像をそれぞれ示す。図-2(a), (b)を比較すると、流量 Q の違いにより先端部形状が明確に異なることが確認される。図-2(a)に示す Q が大きい場合には、伝播する波面の先端部は切り立つ。後述のように、このケースではフルード数 Fr_p が 1 を超えており、突然の水位上昇を伴う濁流に相当する。一方、図-2(b)では切り立った波面先端部は確認されず、相対的に緩やかに水位が上昇するのがわかる。表-2 より両ケースの伝播速度 C と流速 V₁ を比較する。図-2(a)に示すケースでは C < V₁ となっており、段波は流れに押し流される形で下流側に伝播すると考えられる。一方、図-2(b)では C > V₁ 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、底面摩擦係数への河床勾配 θ の影響は小さいと考えられる。さらに、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。一方、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。結果を表-2 に示す。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。



(a) Case A-2



(b) Case B-3

図-2 水位急変部の先端形状

図-3 は、解析結果²⁾を基にしてモデル係数を同定し、Δh と L を変化させて Fr_p の値を式(2)より算出して等値線図としたものである。この図において Fr_p < 1 の領域では急激な水位上昇を伴う濁流は発生しない。L が小さくて集中的に河道に流出するような条件であると、Δh がある程度小さくても Fr_p が 1 を超えやすくなり、突然に水位上昇する濁流が容易に発生することがわかる。突然の濁流発生を抑制するためには主に流出の集中度を表す L を大きくすればよいことがわかる。これには、河道への集中的流出を低減するように、雨水を一時貯留するなど流域対応の施策を実施することがよいと考えられる。また同一規模の降雨の場合、流域内で雨水を一時貯留することによって Δh も小さくなるのが期待され、Fr_p < 1 の領域に容易に入るようになることが考えられる。

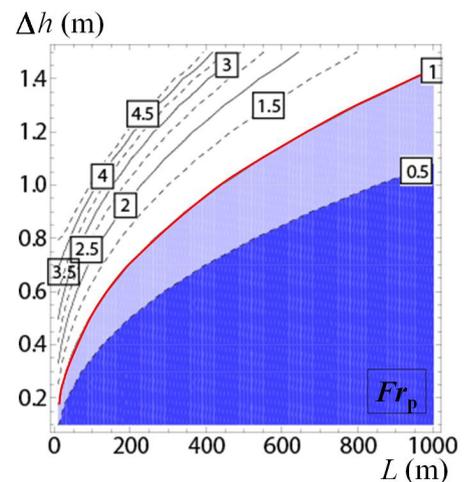


図-3 フルード数の等値線図

謝辞：本研究を遂行するにあたり、藤田一郎教授、道奥康治教授をはじめとする土木学会都賀川水難事故調査団の団員各位、国土交通省六甲砂防事務所、兵庫県、神戸市などの行政の関連各位、さらに都賀川を守ろう会の事務局各位には、ご助言、データ提供など様々な面でご協力いただきました。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「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.