

9 理想段波の伝播速度に関する検証実験

日本大学工学部 藤田 豊
日本大学工学部 安田 慎輔

まえがき

段波現象を解明することは、河川工学や砂防工学における治水に極めて重要な課題である。この種の研究は19世紀末のRitterによるDam break waveに関する理論的研究に始まり今日まで数多くの研究者によって行われてきたが、発生条件などによって現象が相違することや非線形による解析的取扱へにも限界があるなど現象の解明は未だ充分にはなされていないようであり、今後さらに多くの研究が行われる必要があると考えられる。

本研究では、理想化(モデル化)された段波に対する理論式が実際の段波に対してどの程度適用できるのかを実験的に確かめ、また、適用の際の問題点(尺の定め方、補正係数の導入)などについて検討した。さらに、ここでは先端部の不連続波面形状についても述べる。

1. 実験装置および測定方法

水路本体は、図-1に示すように幅0.2m、高さ0.3m、長さ10.5mの水路部と幅0.2m、高さ0.52m、長さ2mの貯水槽部から構成された透明アクリル樹脂製の長方形一様断面水路($\lambda = 0$)であり、水路の片側面には2cm×1cmに細かくメッシュを刻んである。また、水路下流端には初期水深 h_1 を維持するための取りはずし可能なクレスト(6種類)を設けた。段波発生装置は水路を貯水槽間に設けた鉄板製の引揚げ式ゲートである。

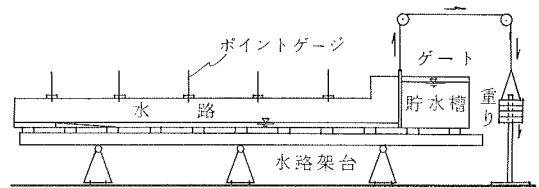


図-1 実験装置

段波はゲートと滑車を通して連結した重り(30 kgf)を自由落下(65 cm)させることによって発生させた。

測定装置は3台のドライヴカメラ(同時撮影用としてパルス発信器を使用)と16ミリカメラを用いた。実験は貯水槽内の水深を50 cmに定め、初期水深 h_1 だけを7種類に変えて行った。段波の水深等の測定はネガフィルムから1ミリまで読みとった。なお、読み取り間隔は先端部の不連続波面領域では2 cm、背面では10 cmとした。

2. 発生条件

一般に段波現象は発生条件などによって正段波と負段波に大別されるが、本研究では、上流側ゲートの急開放操作によって生ずる正段波の問題に焦点を絞った。

表-1はゲートの平均引揚げ速度や引揚げ所要時間など段波の発生条件を示しており、開放操作はほぼ一様であった。

ゲート平均引揚げ速度	1.357~1.500m/s
ゲートが水面と離れるまでの引揚げ距離	36~40 cm
ゲートが水面と離れるまでの所要時間	0.281~0.298 sec
水 位 差	39.1~49.3 cm
貯 留 量	0.2 m ³

表-1 段波の発生条件

図-2 (a), (b) はそれぞれ段波の発生時の流況を示したものである。(a) は $Q_1 = 403 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h_1 = 2.60 \text{ cm}$ の場合, (b) は $Q_1 = 400 \text{ cm}^3/\text{s}$, $h_1 = 1.59 \text{ cm}$ の場合であり, ゲート開放の瞬間を 0 秒とし時間経過に伴って進行する波面形状を示している。このより, 初期水深 h_1 が大きい場合は特に, 波面形状の乱れは顕著であったが, 流下とともにほぼ安定した形状に移行した。したがし, ドライブッドに近い状態では, 発生時から形状の乱れは少なく滑らかな形状を保って進行した。

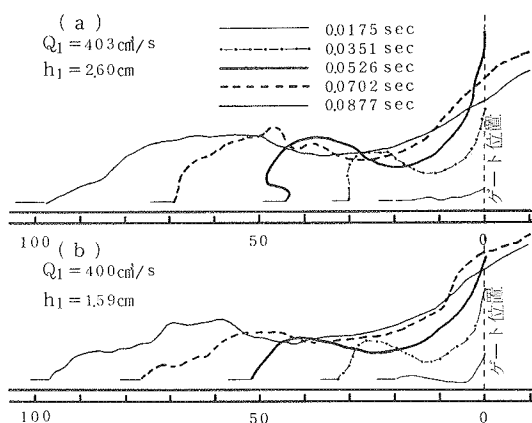


図-2 段波発生時の流況

3. h_{max} , $\bar{h}_2$, L_0 , W , W'

図-3 に示したように, h_{max} は撮影したフィルムより先端部の予連続波面形状やその曲率また, 巻き込み気泡の状態などを考慮して決めた。 L_0 は各コマ毎に先端部から h_{max} の点まで区分求積し最大のものを選りこれを基に他のコマからの等面積を先端部から除去した後のゲートからの距離であり, このを中枢部先端(仮称)とした。また L_0 点の速度を中枢部伝播速度 W とした。 W' は最先端部の速度である。 $\bar{h}_2$ は L_0 点より背面を 10 cm 20 cm ... でそれぞれ平均水深を求め, その値がほぼ安定したところで $\bar{h}_2$ と決めた。

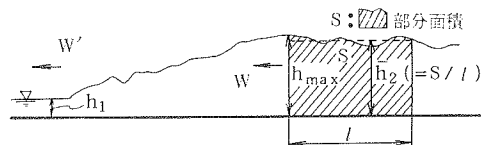


図-3 h_{max} , h_2 , L_0 の説明図

4. 結果および考察

写真-1 は初期条件 $h_1 = 10.9 \text{ cm}$, $Q_1 = 138 \text{ cm}^3/\text{s}$ における段波先端部の 9.0 m 地点を通した直後の形状をとらえた写真の一例であり, 明らかに急変非定常流である。

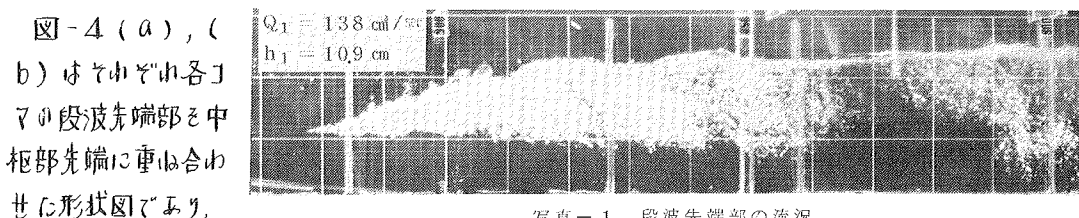


写真-1 段波先端部の流況

実線は段波先端部の予連続波面を放物面と仮定して最小自乗法によって求めた回帰二次曲線である。

これらの図より, 実際の段波先端部の形状は写真-1 の例のように予連続で不規則な波面の様相を呈しながら巻き込みなどを繰り返しながら進行するが, 全体としては各コマの先端部の形状図を中枢部先端で重ね合わせてみると平均的には放物面とみなすことができる。

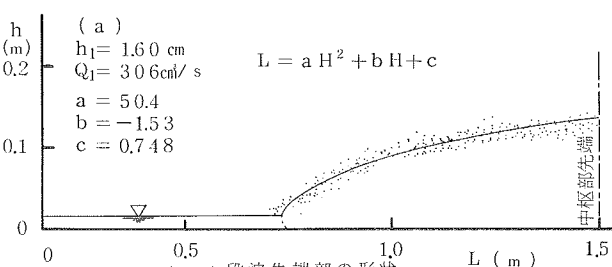
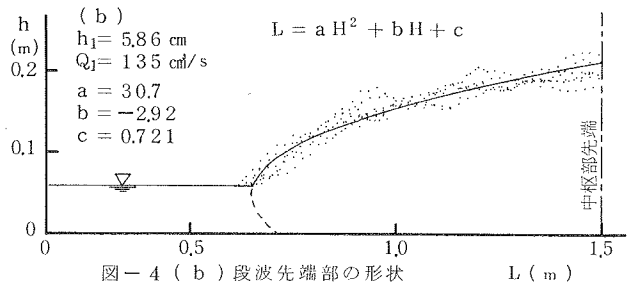


図-4 (a) 段波先端部の形状

本研究では、主に、理想段波式(1)により伝播速度を予測する場合に式中の $\bar{h}_2$ の定め方や補正係数の導入などを検討するため、上述のように、 $\bar{h}_{max}$ および $\bar{h}_2$ を決定し、これらと実測伝播速度より逆算して得られた $\bar{h}'_2$ との比をそれぞれ $k_1 = \bar{h}'_2 / \bar{h}_{max}$ 、 $k_2 = \bar{h}'_2 / \bar{h}_2$ として係数を求めた。



$$W = v_1 + \sqrt{g\bar{h}_1} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\bar{h}_2}{\bar{h}_1} \left(\frac{\bar{h}_2}{\bar{h}_1} + 1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{----- (1)}$$

図-5, 6はそれぞれ $\bar{h}_{max}$ と k_1 の関係 $\bar{h}_2$ と k_2 との関係であり、実線は最小乗法によって導いた実験式(2), (3)である。これらの図から、 k_1 、 k_2 ともそれぞれ $\bar{h}_{max}$ 、 $\bar{h}_2$ の大きさにかかわらずほぼ一定の値を示すことが認められる。しかしながら、両者を比較すると k_1 が k_2 よりもバラツキが顕著である。これは $\bar{h}_{max}$ や先端部 W' の変動幅が大きいことによる影響と考えられる。

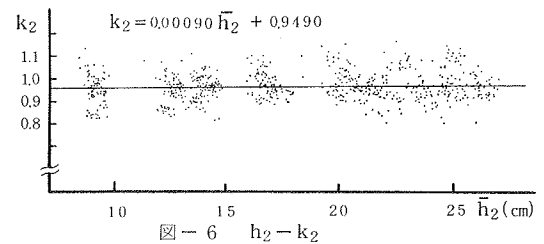
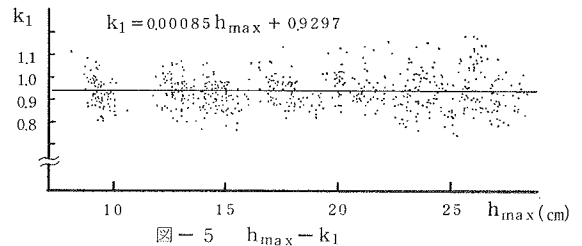


図-7は時間 T と伝播速度 W との関係であり、細線と太線はそれぞれ先端部の伝播速度 W' と中樞部先端の伝播速度 W である。これより先端部 W' は進行に伴って周期的に巻込みや上り現象などを繰り返しながら流下するために変動幅がかなり大きいことが分る。一方中樞部 W は先端部連続波面の乱れ領域を除去した地表のゲートからの距離 L_0 の速度であるので比較的安定している。したがって以降の伝播速度の実測値としては中樞部先端の速度 W を用いることとする。

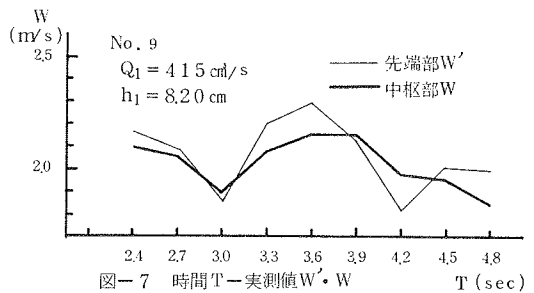
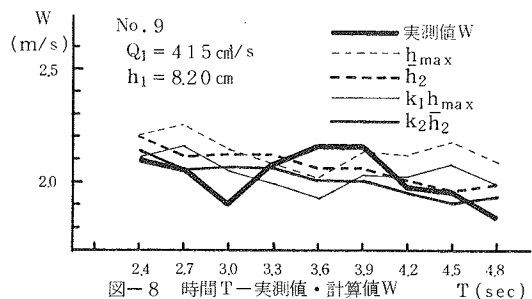


図-8は理想段波式(1)の $\bar{h}_2$ としてそれぞれ $\bar{h}_{max}$ 、 $\bar{h}_2$ 、 $k_1 \cdot \bar{h}_{max}$ 、 $k_2 \cdot \bar{h}_2$ を用いて計算した W と実測値 W とを比較した図である。これより、 $k_2 \cdot \bar{h}_2$ 、 $k_1 \cdot \bar{h}_{max}$ を用いて計算した W が実測値に比較的良好く一



致することがわかる。

図-9は波高 $\bar{h}_0$ と流下距離 L との関係であり、破線は $\bar{h}_0 = \bar{h}_{max} - \bar{h}_1$ 、実線は $\bar{h}_0 = \bar{h}_2 - \bar{h}_1$ で表わした波高である。両者とも時間経過に伴って波高が減衰する傾向を示し、特に、 $\bar{h}_{max}$ についてはその傾向が顕著であり、徐々に波形、波高とも安定した状態に移行するものと考えられる。

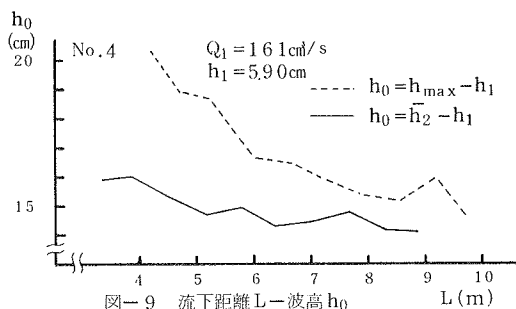


図-9 流下距離 L -波高 h_0

5. まとめ

本研究において、上流側ゲートの急開放によって生ずる段波について実験的に検討してきたが、ここに得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 段波発生時の波形の乱れなどは初期水深 $\bar{h}_1$ の大小によっていくらかは相違するもののある程度流下するとほぼ一定の形状に移行するものと考えられる。

(2) 段波先端部の予連続波面形状はほぼ放物面とみなすことができる。

(3) 実験値 $\bar{h}_{max}$ ならびに $\bar{h}_2$ は伝播速度 W 、 W' から逆算された $\bar{h}_2'$ と相関関係が認められる。

(4) R_1 および R_2 はほぼ一定となり実験式は次のとおりである。

$$R_1 = 0.9297 + 0.00085 \bar{h}_{max} \text{ ----- (2)}$$

$$R_2 = 0.9490 + 0.00090 \bar{h}_2 \text{ ----- (3)}$$

(5) 理想段波式(1)の $\bar{h}_2$ として $R_2 \cdot \bar{h}_2$ ならびに $R_1 \cdot \bar{h}_{max}$ を用いれば伝播速度を比較的確に予測できるものと考えられる。

<参考文献>

- (1) 土木学会編：水理公式集538年増補改正版
- (2) 椿原一郎：水理学Ⅱ，水理学演習(Ⅰ)，森北出版
- (3) 志村博康：前方水位のないDam Break Waveのフロントの非粘性解～ゲート急開直後に生ずる流れの研究～，農業土木学会論文集，第60号，1975
- (4) 中川・中村・市橋：段波の発生とその発達に関する研究，京大防災研年報第12号B，1969