

## Froude 数の違いに着目した蛇行水路における碎波段波の伝播特性

広島大学 学生会員 ○小林 大祐  
 広島大学 正会員 内田 龍彦

## 1. 序論

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、河川を遡上した津波が河川堤防を越水し浸水域を拡大させ、氾濫による洗掘や堤防の決壊を引き起こした。そのため、河川遡上津波の特性を把握することは、防災・減災のために重要である。既往研究において、段波は Froude 数 ( $F = \omega + V_d / (gh_d)^{1/2}$ ,  $\omega$ : 波速,  $V_d$ : 下流における流速,  $h_d$ : 下流水深,  $g$ : 重力加速度) によって形状が分類される。碎波段波の既往研究については、ダムブレイク (高  $F$ ) やタイダルポア (低  $F$ ) を対象として、多くの実験や数値計算が行われてきた。しかし、蛇行水路における検討はほとんどなく、特に水路蛇行によって変形した流速分布が、流れの抵抗に及ぼす影響について不明な点が多い。また、碎波段波において、 $F$  による流れ構造や水位変動特性の違いに関する知見が少ない。

本研究では、直線・蛇行水路における段波の基礎実験と平面 2 次元・3 次元計算を行うことで、蛇行水路における  $F$  の異なる碎波段波の伝播特性を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験方法

直線水路と蛇行水路において、ゲートの急開によって  $F$  の異なる段波を発生させた。表-1 にそれぞれの段波の実験条件を示す。

碎波段波の水位の時間変動を、サーボ式波高計を用いて測定した。実験水路と測定点配置を図-1 に示す。直線水路において 6 つの測定点、蛇行水路において 6 つの測定断面を、それぞれゲートからの距離が等しくなるように設置した。

## 3. 計算方法

平面 2 次元計算には、物理成分で表示された一般座標系における浅水流方程式<sup>1)</sup>を用いた。メッシュサイズは  $\Delta\xi$ : 2cm,  $\Delta\eta$ : 1cm とし、マンニングの粗度係数は 0.014 で与えた。3 次元計算では、OpenFOAM における二相流ソルバの interFoam<sup>2)</sup>を用いた。RANS 方

表-1 実験条件

Froude number	上流水深 $h_0$ (m)	下流水深 $h_1$ (m)
3.99	0.300	0.020
1.53	0.285	0.107

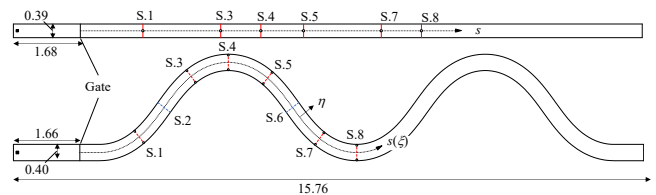


図-1 実験水路と測定点配置 (unit: m)

程式を支配方程式として、乱流モデルには非定常流解析で多く用いられている  $k-\omega$  SST-SAS<sup>3)</sup>, 自由表面解析には VOF 法を用いた。メッシュサイズは平面 2 次元計算で用いたメッシュを鉛直方向に拡張し、 $\Delta\xi$ : 2cm,  $\Delta\eta$ : 1cm,  $\Delta z$ : 1cm で与えた。

## 4. 実験・計算結果と考察

直線・蛇行水路における低  $F$  の碎波段波の波高の時間変化を図-2 に示す。直線水路における実験結果では、水位の振動が発生した。これは、波状段波と  $F$  が近いことによるソリトン分裂が発生したと考えられる。この水位振動は蛇行水路においては増幅する結果となった。この要因について、平面 2 次元計算結果から考察する。Section 1 における平面 2 次元計算結果の水位と横断方向流速の時間変化を図-3 に示す。平面 2 次元計算結果において、横断方向流速は時間的に一定とならず、水位変動の振動が発生した。これは、図-4 に示すように、低  $F$  の碎波段波の Section 1 に到達した後、横断方向の運動方程式における遠心力項と水面勾配による圧力項が時間的に釣り合わないためである。また、平面 2 次元計算結果における水位及び横断方向水面横勾配の時間変化の周期は、実験結果における周期と概ね一致する。よって、直線水路でも発生する非静水圧に起因する水位振動を増幅させる要因の一つとして、流れの 3 次元性とは関係ない横断方向水面勾配の時間変化が考えられる。

キーワード Froude 数, 碎波段波, 抵抗増加, 横断方向水面勾配の時間変化, 水路蛇行

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科 TEL 080-4339-5924

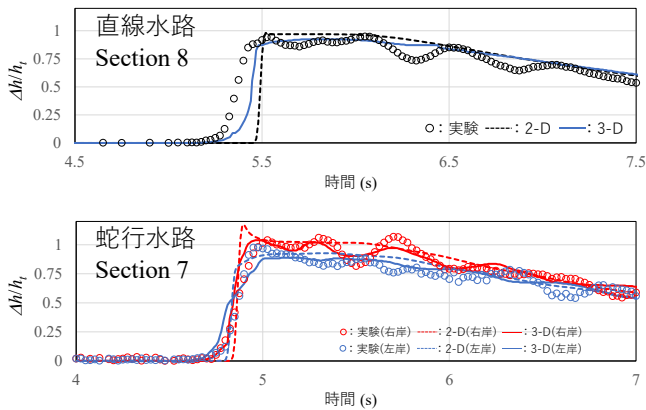


図-2 [低 F]波高の時間変化 ( $\Delta h$ : 波高,  $h_i$ : 理論解波高)

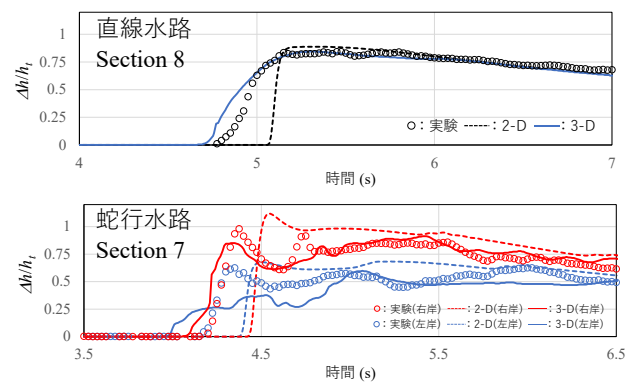


図-5 [高 F]波高の時間変化 ( $\Delta h$ : 波高,  $h_i$ : 理論解波高)

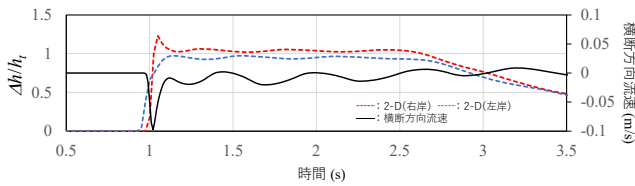


図-3 波高と横断方向流速の平面 2 次元計算結果

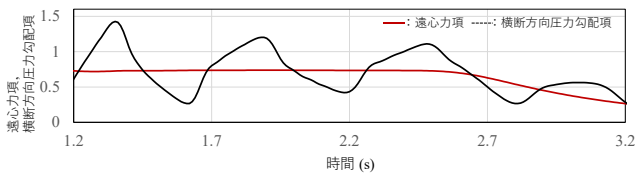


図-4 遠心力項と横断方向圧力勾配項の時間変化  
直線・蛇行水路における高 F の碎波段波の時間変動

図-5に示す. 平面 2 次元計算及び 3 次元計算は, 直線水路における実験結果を概ね良好に再現した. 一方, 蛇行水路における実験結果について, 低 F と異なり, 平面 2 次元計算は全体的に過大評価した. ここで, 直線・蛇行水路中心軸における波高と主流速の 3 次元計算結果の空間分布を図-6 に示す. この結果から, 直線水路と比べ, 蛇行水路の  $s=8.5-10.5(m)$  における範囲で主流速が大きく, 速度水頭が増加している. これは, 水路蛇行がポアフロント付近の強い流体混合を発生させたことが原因と考えられる. この速度水頭の増加は, 蛇行水路における波高の減少を引き起こす. また, 図-6 における蛇行水路の波高は直線水路と比べ, 上流部では大きく, 下流のポアフロント付近では小さい. これは, 水路蛇行によって, 底面付近に主流速方向の運動量が輸送されることで, 縦断的に抵抗が増加したことが原因と考えられる. 蛇行水路における高 F の碎波段波で生じた波高の減少と抵抗の増加は, 鉛直方向流速分布の変化に強く影響を受けるため, 図-5 における平面 2 次元計算結果は波高を過大評価したと考えられる.

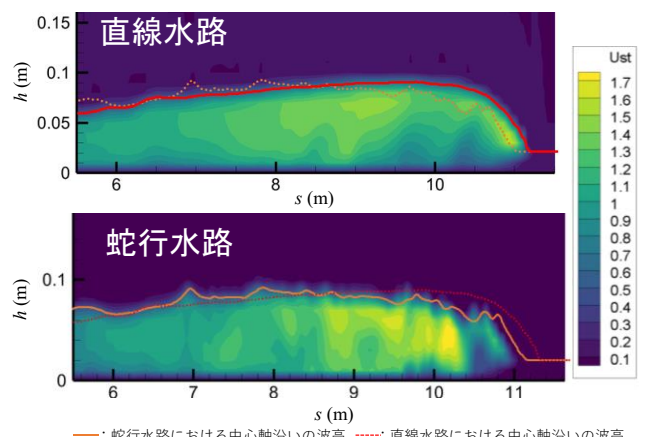


図-6 波高と主流速の空間分布 ( $s$ : 縦断距離)

### 5. 結論

本研究では, 蛇行水路における異なる F の碎波段波の伝播特性を実験と数値計算を用いて明らかにした. 低 F では, 蛇行水路において遠心力と横断方向圧力勾配の不均一性による横断方向の水面勾配の時間変化が発生することで, 直線水路と比べてソリトン分裂が増幅すると考えられる. また, 高 F では, 水路蛇行によって流速の鉛直分布が変化するため, ポアフロント付近の波高の減少と縦断的な抵抗の増加を引き起こすと考えられる.

### 参考文献

- 1) 渡辺明英, 福岡捷二, Mutasingwa, A.G., 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常 2 次元解析, 水工学論文集, 第 46 巻, p. 427-432, 2002.
- 2) Deshpande, S.S., Anumolu, L., Trujillo, M.F.: Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam, Computational Science & Discovery, Vol.5, 014016, 2012.
- 3) Menter, F.R. and Egorov, Y.: A scale-adaptive simulation model using two-equation models, AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005-1095, 2005.