

蛇行河川における碎波段波の伝播に関する実験と数値解析

広島大学

学生会員

○小林

大祐

広島大学

正会員

内田

龍彦

広島大学

フェロー会員

河原

能久

1. 序論

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、巨大津波が沿岸に来襲し河川を遡上し、水門や橋脚など河川構造物への被害を生じさせた。このような津波の被害を軽減するためには、津波の河川遡上を適切に理解する事が重要である。河川遡上津波は碎波段波と波状段波に分けられることが知られている。既往の研究において、直線水路における段波の実験や解析は数多く行われているものの、湾曲・蛇行水路における研究は少なく、特に、津波が遡上する河川内の水位によって段波の伝播特性がどのように変化するかについて不明な点が多い。本研究では、巨大津波が発生した場合には、沿岸付近で浅水変形によって碎波した波が河川を遡上する可能性が高いことから、碎波段波に着目する。基礎実験を行うことによって碎波段波の蛇行河川における伝播特性を明らかにすることと、それを適切に評価できる数値計算法の検討を目的とする。

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段波を発生させる基礎実験を行う。既往の研究において中川ら¹⁾が明らかにした段波の発生条件を参考に、2 種類の碎波段波を発生させる条件（表－1）を決定した。Type A は下流水深が Dry に近い場合における碎波段波、Type B は下流水深が十分存在する場合における碎波段波である。表－1 における Fr 数は以下の式で表現する。

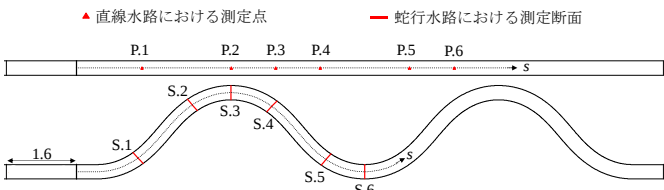
$$Fr = \frac{\omega}{\sqrt{gh_1}}$$

(1)

ここに、 ω : 直線水路における段波の波速、 g : 重力加速度、 h_1 : 初期の下流水深である。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する。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。

表－1 実験条件

Type	上流水深(m)	下流水深(m)	Fr数
Type A (下流水深がDryに近い)	0.300	0.020	4.11
Type B (下流水深が十分存在)	0.285	0.107	1.62



図－1 実験水路と測定点配置

3. 数値計算法

本研究で用いる数値計算の概要を示す。一般座標系における基礎方程式である物理成分表示の浅水流方程式を以下に示す²⁾。

$$J\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi}(\tilde{J}d\eta \cdot \tilde{U}h) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\tilde{J}d\xi \cdot \tilde{V}h) = 0$$

(2)

$$\begin{aligned} &\frac{\partial Jh\tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{J}d\eta \tilde{U}h\tilde{U}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{J}d\xi \tilde{V}h\tilde{U}}{\partial \eta} - J\tilde{J}(\tilde{V} - \tilde{U} \cos \theta^{\eta\xi})(\tilde{U}h \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \xi} + \tilde{V}h \frac{\partial \theta^{\xi}}{\partial \eta}) \\ &= J \frac{F_{\xi}}{\rho} - Jgh \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) - J\tau_{\alpha\xi} \end{aligned}$$

(3)

$$\begin{aligned} &\frac{\partial Jh\tilde{V}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{J}d\eta \tilde{U}h\tilde{V}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{J}d\xi \tilde{V}h\tilde{V}}{\partial \eta} - J\tilde{J}(\tilde{U} - \tilde{V} \cos \theta^{\eta\xi})(\tilde{U}h \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \xi} + \tilde{V}h \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \eta}) \\ &= J \frac{F_{\eta}}{\rho} - Jgh \left(\cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) - J\tau_{\alpha\eta} \end{aligned}$$

(4)

$$\tilde{J} = \frac{J}{d\xi \cdot d\eta}$$

(5)

ここに、 h : 水深、 U : ξ 方向の水深平均流速、 V : η 方向の水深平均流速、 F_{ξ} , F_{η} : ξ , η 方向の外力、 z : 水位、 τ_0 : 底面せん断力、 J : ヤコビアンである。

4. 実験結果と計算結果の比較・考察

2 種類の碎波段波における水位変動の実験結果と計算結果を比較する。

図－2 は Type A における水位の時間変化を示す。Type A の、直線水路の水位の時間変化では、P.1 において計

キーワード 浅水流方程式, 碎波段波, 伝播速度, 反射波, 衝撃波

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

算結果は実験結果と良好に一致しているが、P.6 においては、波頭部の水位を過大評価している。これは実験において、ゲート開放直後に段波が碎波する際に発生した波が側壁に反射し、それが上流へ伝播したためであると考えられる。実際に、7秒付近から計算結果より段波変位が上回っており、反射波の遡上が確認された。また、計算において、段波が通過した後の Sec.1 における Fr 数は 1 以上となり、射流であった。浅水流方程式では、この射流状態における上流方向への伝播は表現できない。一方、蛇行水路では、Sec.1 における変位は波頭部こそ概ね一致するものの、兩岸における水位はともに 4 秒付近から過小評価している。直線水路の P.1 では概ね一致しているにも関わらずこのような差異が現れたのは、蛇行水路における湾曲部において、段波が側壁に衝突することにより衝撃波が発生し、それが上流へ伝播したためと考えられる。図-3 は、蛇行水路において Type A が第 2 湾曲部を通過時に発生した衝撃波の様子を示す。段波が伝播するに連れて、側壁からの衝撃波が上流に伝播するので、Sec.6 の右岸沿いの計算結果は全体的に過大評価している。

図-4 は Type B の水位の時間変化を示す。Type B に関して、直線水路の P.1, P.6 において、計算水位は実験に対して、側壁の反射波により若干大きくなっている。また、蛇行水路においては、ソリトン分裂波のような波が現れているものの、Type A と比べ時間平均的には実験値を概ね再現できている。図-5 に示すように、Type B は Type A より伝播速度が小さいため、蛇行水路における側壁からの衝撃波の影響が小さいと考えられる。

5. 結論

蛇行水路における段波流れについて、一般座標系における浅水流方程式を用いて計算を行い、伝播特性について考察した。Type A に関しては、反射波や衝撃波の遡上の影響もあり平面二次元計算では良好に表せない結果となった。また、Type B に関しては、ソリトン分裂波のような波が発生するものの、時間平均的には実験結果を概ね再現可能であった。両者の再現度の違いには伝播速度の違いが影響していると考えられる。

参考文献

1) 中川博次, 中村重久, 市橋義臣: 段波の発生とその発達に関する研究, 京大防災研究所年報, Vol.12B, pp543-553, 1969.

2) 渡邊明英, 福岡捷二, AG Mutasingwa, 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二次元解析, 水工学論文集, Vol.46, pp427-432, 2002.

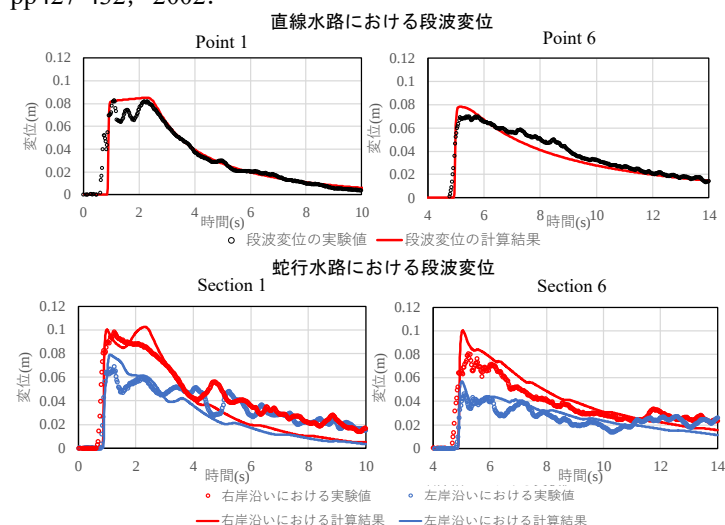


図-2 Type A (上流水深: 0.30(m), 下流水深: 0.02(m))

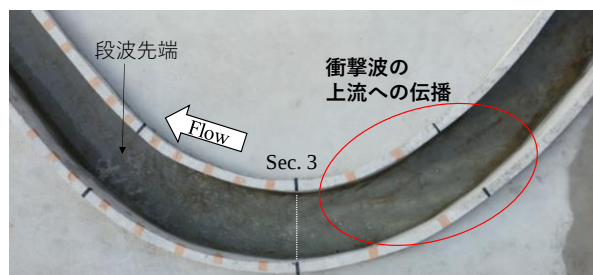


図-3 第2湾曲部における衝撃波の伝播

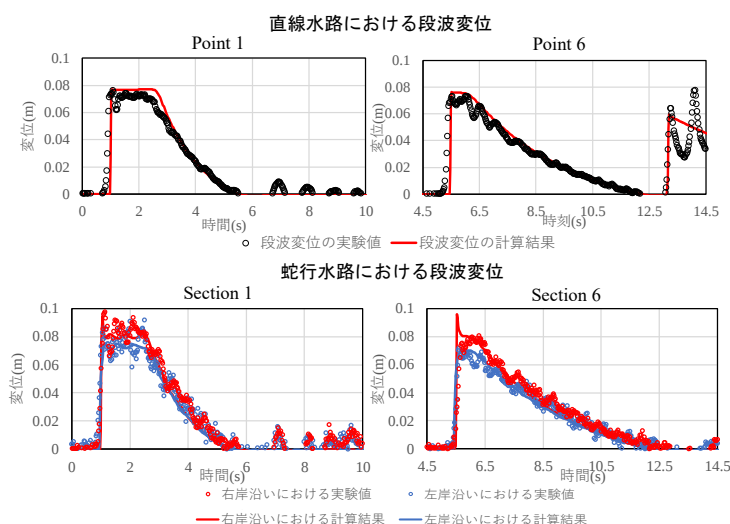


図-4 Type B (上流水深: 0.285(m), 下流水深: 0.107(m))

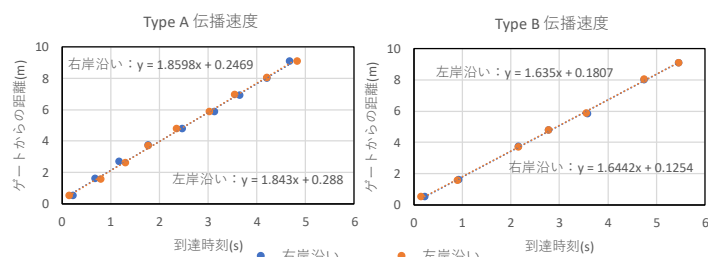


図-5 蛇行水路における段波の伝播速度