

# 蛇行水路における段波の伝播特性に関する 実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY OF TSUNAMI PROPAGATION IN A MEANDERING CHANNEL

小林大祐<sup>1</sup>・内田龍彦<sup>2</sup>・河原能久<sup>3</sup>

Daisuke KOBAYASHI, Tatsuhiko UCHIDA and Yoshihisa KAWAHARA

<sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院博士課程前期 社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 広島大学大学院准教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (同上)

The form of the tsunami run-up in rivers is divided into breaker bore and undular bore. It is important to understand the propagation characteristics of hydraulic bore in the meandering river reach in order to prevent the damage such as inundation for tsunami run-up. In this study, hydraulic bores generated by sudden gate opening are investigated in a meandering channel with the aim of clarifying the propagation characteristics of the bore, measuring the temporal variation in wave height. In the breaking bore, the wave height in a meandering channel is explained by the one-dimensional theoretical analysis of dam break flow and water surface profile in steady flow in a uniform curved channel. In the undular bore, because the wave height due to soliton fission is amplified in a meandering channel, it cannot be evaluated by the theoretical analysis.

**Key Words** : *breaking bore, undular bore, meandering, soliton fission*

### 1. 序論

津波が陸地に来襲すると、河口や運河・水路から侵入し、河川や運河・水路に沿って遡上して内陸深くまで進み、流域に被害をもたらす。その遡上距離は沿岸から数10kmにも及び、水門や橋脚など河川構造物への被害を生じさせ、河川堤防からの越水により浸水域を拡大させる。田中ら<sup>1)</sup>は、2011年3月11日に発生した東日本大震災において、地震によって発生した津波が河川を遡上し越水することで、海岸堤防を越えた津波による被害があまり大きくない地域でも流体力や局所洗掘などによる大きな被害をもたらしたことを報告している。以上の被害を防ぐためにも、津波の河川遡上を適切に理解する事は重要である。

河川を遡上する津波は、2種類の段波に分けられることが知られている<sup>2)</sup>。波頭が不連続で碎波を伴う碎波段波と、波頭がソリトン分裂している波状段波である。

碎波段波に関して、Liuら<sup>3)</sup>は、ゲート急開に伴う段波による水位と流速変動はゲートの上流と下流の水深差と下流の初期水深の影響を受けることを示し

た。また、波高が持続する時間は上流水槽の長さに依存することを示した。直線水路に比べ湾曲水路と蛇行水路における研究は少ないが、例えば以下の研究がある。後藤ら<sup>4)</sup>は、2次元解析法により段波の波高は、湾曲部では外岸が内岸と比べ高くなることを示した。伊藤ら<sup>5)</sup>は、山地蛇行河川における洪水時の段波の伝播特性について検討し、段波の遡上が横断方向に一様でないことや、側壁で段波が反射・分裂することで、複数の波が現れる事を示した。

波状段波に関して、室田ら<sup>6)</sup>は、段波変形の水理学的特性や遷移過程の分類を理論的・実験的に考察し、段波の分散は波面曲率が伝達項として作用するために発生することや、遷移過程における分散波の挙動は段波の相対波高のみで与えられることを示した。津波の河川遡上について、中村ら<sup>7)</sup>や安田ら<sup>8)</sup>の不等流を遡上する波状段波の実験や解析がある。不等流場を遡る際、波高は浅水増大により2.5倍まで水位上昇することを示した。

しかし、波状段波が蛇行水路を遡上する研究はほとんどなく、津波の河川遡上を考えるため重要と考えられる蛇行部における段波波高の増大については

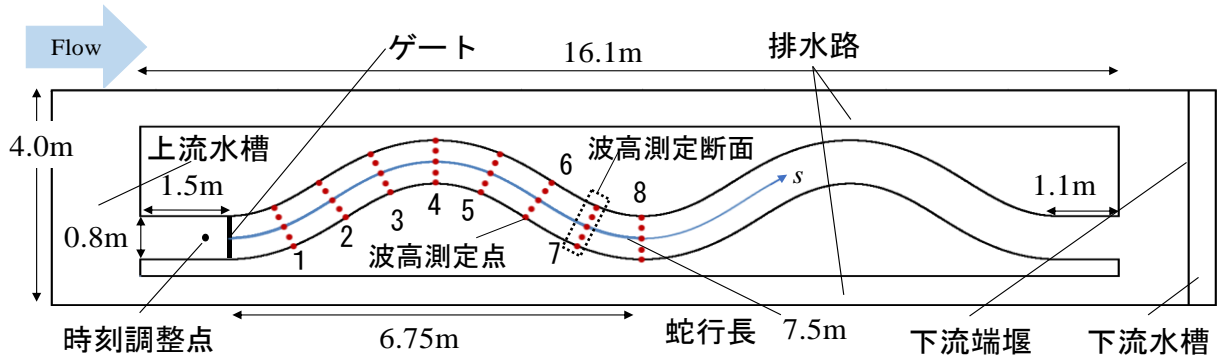


図-1 実験水路平面図

不明な点が多い。

そこで本研究では、蛇行水路における異なる段波形態の伝播特性を明らかにすることと、数値解析法の検証のための基礎資料を得ることを目的とする。

## 2. 実験方法

図-1に実験用蛇行水路を示す。実験水路は全長16.1m・幅0.8mで水路勾配は1/600である。水を上流にためる際、ゲートを閉めた後ある一定の高さまで上流水深が上昇すると、両排水路に水が流れ上流水深は一定に保たれる仕組みになっている。蛇行は式(1)のSine-generated Curveで表わされる。

$$\theta = \theta_{\max} \sin \frac{2\pi s}{L} \quad (1)$$

$\theta$ : 偏角,  $\theta_{\max}$ : 最大偏角( $\theta_{\max}=35$ ),  $s$ : 中心線軸沿いの距離 (m),  $L$ : 蛇行波長( $L=6.75$ m)である。

蛇行水路上流に位置するゲートを急開させることによって2種類の段波を発生させる。表-1に示すように、ゲートより上流と下流の水位の比<sup>2)</sup>を変えた。砕波段波と波状段波を発生させるため、下流水深は下流端にある可動堰を用いて調節する。

段波波高の測定点の配置は図-1に示した通りである。各測定点につき3回、サーボ式波高計を用いて波高を測定する。それぞれを平均した値を実験値として用いることで、精度を保っている。蛇行水路において、測定断面を8断面設ける。測定断面②⑥は最大偏角( $\theta_{\max}=35$ )の断面であり、測定断面④⑧は最小偏角( $\theta_{\min}=0$ )の断面である。ゲートより上流にて負の段波波高を計測する時刻調整点を設ける。この負の段波の計測値によって、ゲートの手動による開放のずれを調整する<sup>9)</sup>。負の段波波高計測点は1点、水位測定点は1つの断面で横断方向に右岸から0.02, 0.20, 0.40, 0.60, 0.78mの5点ずつ設けた。

## 3. 解析方法

式(2)に示すように、各測定点における各瞬間の波高の時間変化を断面平均波高とその偏差によって表す。

表-1 実験条件

	砕波段波	波状段波
上流水深 $h_0$ (m)	0.285	0.285
下流水深 $h_1$ (m)	0.107	0.147
水深比 $h_1/h_0$	0.375	0.515

$$h = \langle h \rangle + \hat{h} \quad (2)$$

ここに、 $h$ : 各測定点における段波波高,  $\langle h \rangle$ : 断面平均波高,  $\hat{h}$ : 各測定点における波高の断面平均波高からの偏差である。

### (1) 断面平均波高

断面平均波高の解析には、1次元浅水流方程式を用いた。基礎方程式は以下の運動方程式と連続式で表わされる。

$$\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial s} + g \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial s} - g(i_0 - i_f) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \langle h \rangle}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle h \rangle}{\partial s} + \langle h \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial s} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\langle h \rangle$ : 水深,  $i_0$ : 水路勾配,  $\langle v \rangle$ : 断面平均流速,  $i_f$ : 摩擦損失勾配,  $s$ : 蛇行長方向座標,  $g$ : 重力加速度である。式(3)において

$$i_0 - i_f = 0 \quad (5)$$

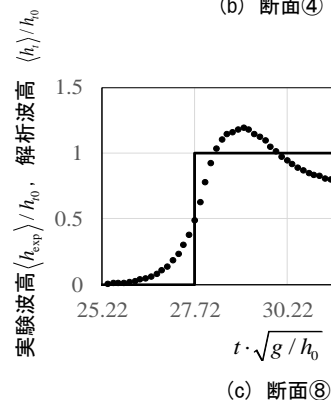
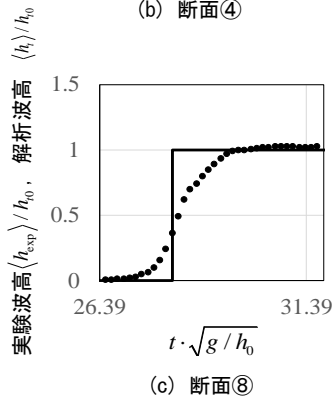
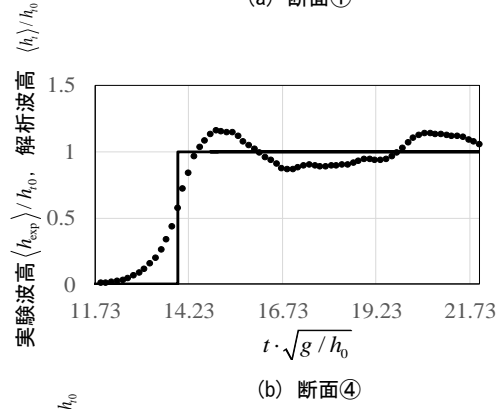
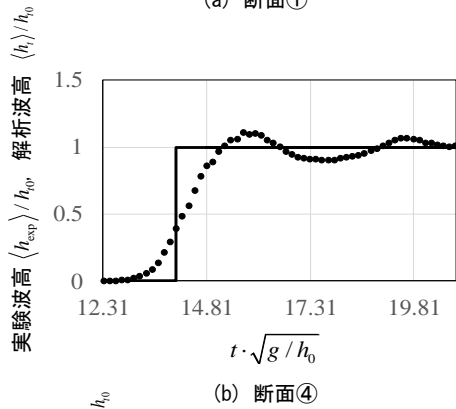
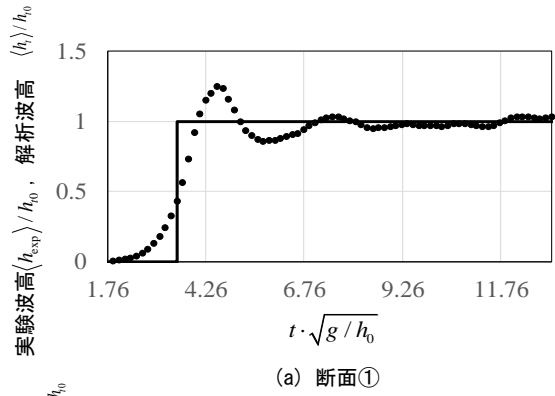
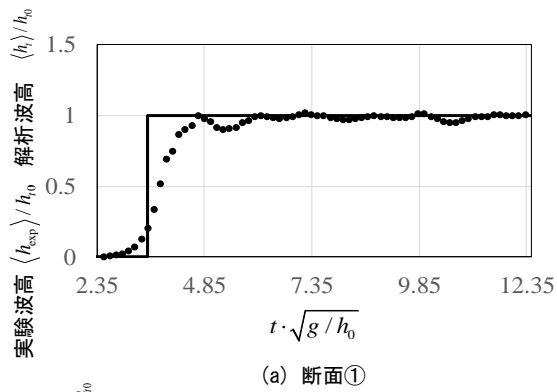
として、特性曲線法を用いた理想段波の解析解を適用した<sup>10)</sup>。

### (2) 蛇行部における横断方向の波高分布

蛇行部における横断面の波高分布の解析解を導出する。定常流で湾曲部において定常流で流速一定、静水圧分布を仮定すると、水位の横断平均水位からの偏差成分は以下の式で表される。

$$\hat{h}_t = \frac{\langle u_t \rangle^2}{g} \log(r) - \langle h_t \rangle + C \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{r_2 - r_1} \left[ B \langle h_t \rangle - \frac{\langle u_t \rangle^2}{g} \{ r_2 \log(r_2) - r_2 - (r_1 \log(r_1) - r_1) \} \right] \quad (7)$$



● 実験波高  $\langle h_{\text{exp}} \rangle / h_0$  — 解析波高  $\langle h_t \rangle / h_0$

● 実験波高  $\langle h_{\text{exp}} \rangle / h_0$  — 解析波高  $\langle h_t \rangle / h_0$

図-2 砕波段波における断面平均波高と解析波高の比較

図-3 波状段波における断面平均波高と解析波高の比較

ここに、 $C$ ：積分定数、 $r$ ：曲率半径、 $r_1$ 、 $r_2$ ：内岸、外岸の曲率半径、 $\langle h_t \rangle$ 、 $\langle u_t \rangle$ ：式(3)と(4)から導出した流速と水位の解析解、 $B$ ：水路幅である。

#### 4. 解析結果と実験結果の比較

##### (1) 断面平均波高

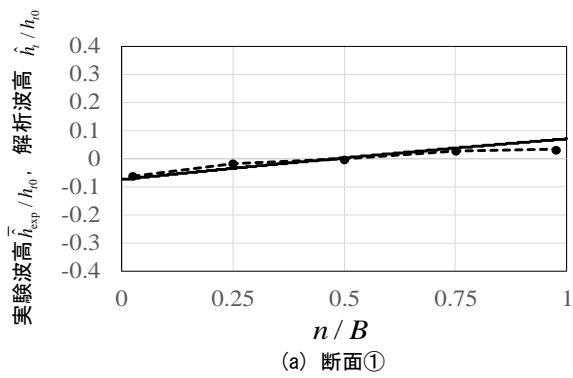
砕波段波、波状段波における断面①、④、⑧の断面平均実験波高  $\langle h_{\text{exp}} \rangle$  と解析解  $h_t$ （1次元解析のため、断面平均波高に対応）の比較をそれぞれ図-2、3に示す。縦軸は解析波高  $h_0$  で無次元化した波高  $\langle h_{\text{exp}} \rangle / h_0$ 、 $h_t / h_0$ 、横軸はゲート上流の水深と重力加速度を用いた無次元時間  $t \cdot \sqrt{g/h_0}$  としている。なお、実験結果は水路上流端の影響を受けていない

範囲の時間で示している。

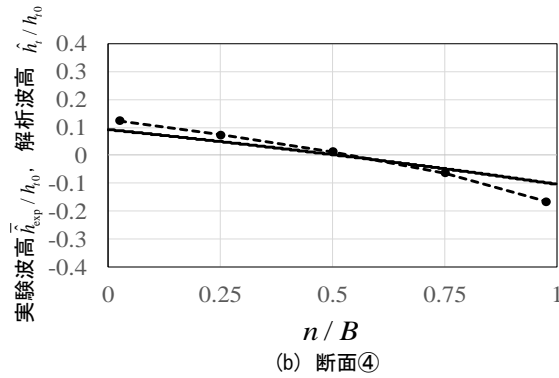
砕波段波の断面平均波高に関しては、解析波高と実測波高は概ね一致しており摩擦損失勾配の影響は小さいと考えられる。また、波状段波では、断面平均してもソリトン分裂による分散波の影響をやや残すものの、時間平均的には解析解と実験結果は概ね一致している。よって、水路蛇行の影響は、波状、砕波段波ともに断面平均波高とその伝播速度にはほとんど現れないと言える。

##### (2) 横断方向の波高分布

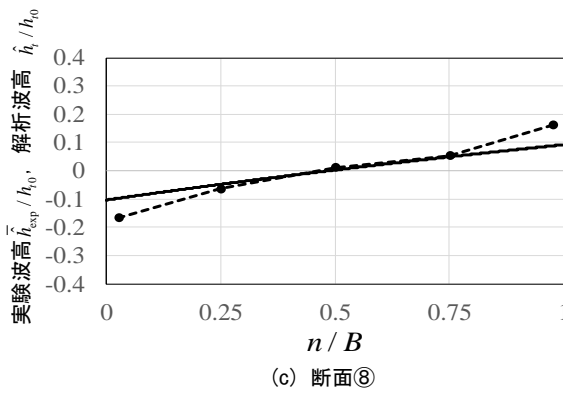
断面①、④、⑧における砕波段波、波状段波の横断方向の時間平均波高分布を、それぞれ図-4、5に示す。実験値は、式(2)で定義される断面平均波高



(a) 断面①



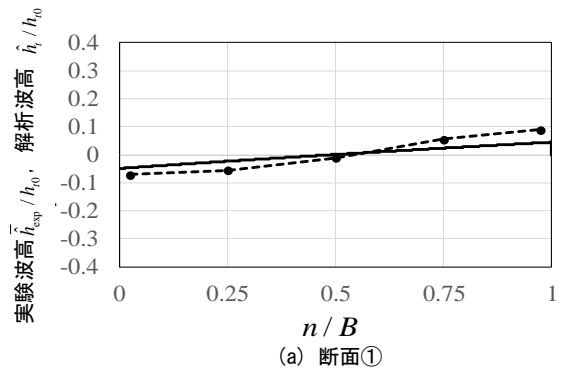
(b) 断面④



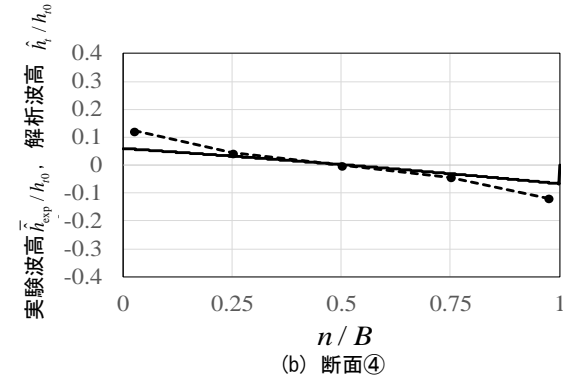
(c) 断面⑧

— 実験波高  $\bar{h}_{exp}/h_0$     -●- 解析波高  $\hat{h}_t/h_0$

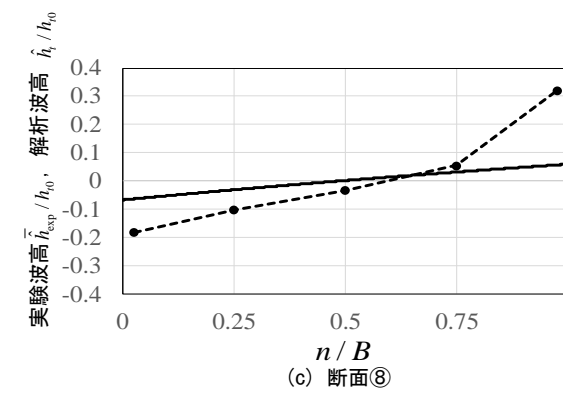
図-4 砕波段波における横断方向の波高分布と解析解波高分布の比較



(a) 断面①



(b) 断面④



(c) 断面⑧

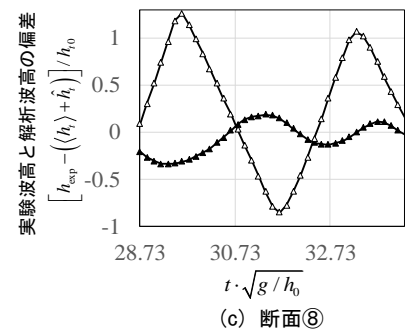
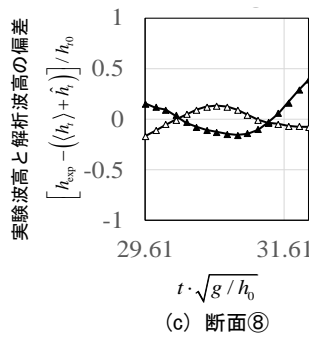
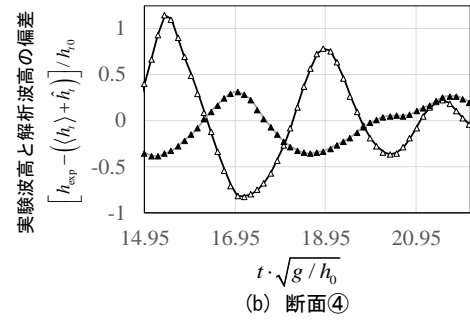
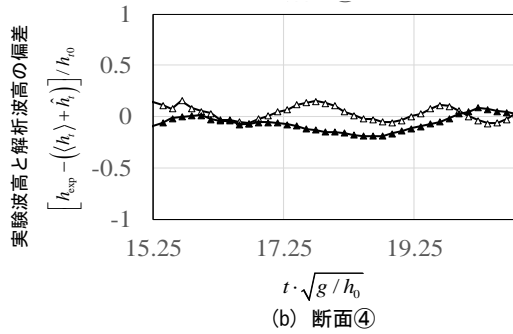
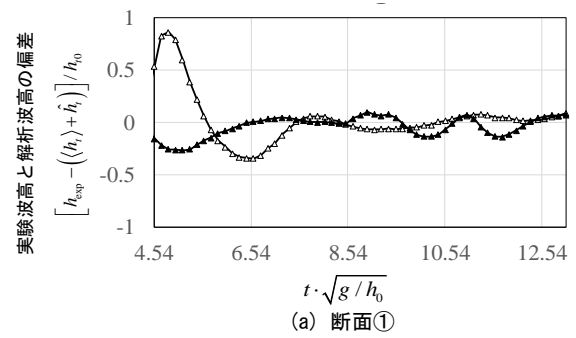
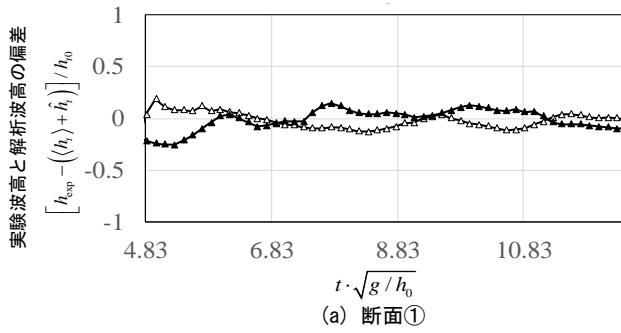
— 実験波高  $\bar{h}_{exp}/h_0$     -●- 解析波高  $\hat{h}_t/h_0$

図-5 波状段波における横断方向の波高分布と解析解波高分布の比較

からの偏差波高  $\hat{h}_{exp}$  の時間平均値  $\bar{h}_{exp}$  を、解析値は式(6)の  $\hat{h}_t$  を  $h_0$  で無次元化したものである。横軸には左岸からの距離  $n$  を無次元化した値  $n/B$  を表している。図に示すように、砕波段波の横断方向の波高分布は、一様湾曲の解析解と概ね一致しており、解析解導出の際の定常流で静水圧分布かつ流速一定の仮定の影響は小さいと考えられる。ただし、流下に伴い実験水路の勾配がやや大きくなっており、流下距離が長いと流速分布が発達すると考えられる。波状段波の波高分布は、断面⑧の外岸で実測波高が解析解よりかなり大きくなっている。これは、流下に伴い外岸際で波高が断面平均波高の2倍以上に増幅することで、1波長あたりの平均波高も解析解波高より大きくなったためである。

### (3) 1次元解析解の重ね合わせとの比較

各測定点における各瞬間の実験波高を1次元の解析解の重ね合わせで表現できるかを検討する。そのために、各測定点における各瞬間の実験波高と1次元解析解波高の重ね合わせの偏差の時間変化を考える。外岸及び内岸での偏差の時間変化を図-6, 7に示す。縦軸は各測定点における各瞬間の実験波高と1次元解析解波高の無次元化した偏差、横軸は無次元時間  $t \cdot \sqrt{g/h_0}$  を表す。砕波段波における偏差の時間変化は、流下しても最大で0.2ほどであることから、各測定点での各瞬間値は1次元解析解の重ね合わせで概ね表せる結果となった。波状段波では、内岸際の偏差は流下しても0.3ほどであるが、外岸では流下に伴い偏差が大きくなり、最大値は1を超えるようになっている。これは、ソリトン分裂が流下



△ 外岸際      ▲ 内岸際

△ 外岸際      ▲ 内岸際

図-6 砕波段波における外岸と内岸の実験値と1次元解析解波高の重ね合わせの比較

図-7 波状段波における外岸と内岸の実験値と1次元解析解波高の重ね合わせの比較

するに連れ外岸沿いで増幅するためであり、外岸際各瞬間値は1次元解析解の重ね合わせで表すことができない。

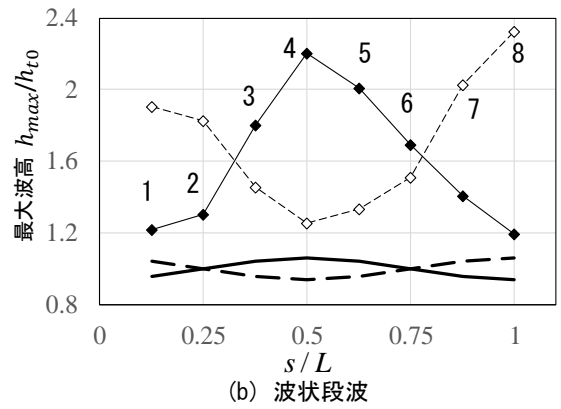
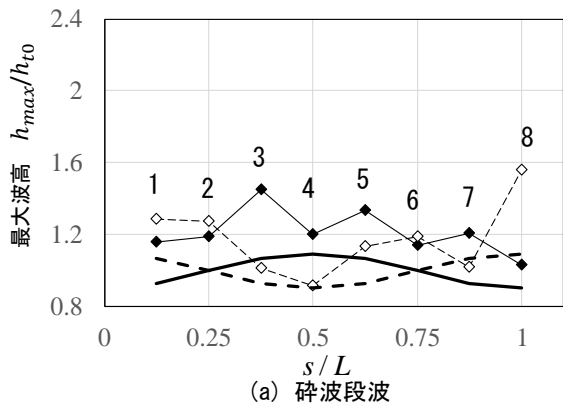
各段波について、各点の最大波高の実験値を無次元化した  $h_{max}/h_{t0}$  の縦断分布を図-8に示す。砕波段波の最大波高は、第1湾曲部では断面③で最大となり、第2湾曲において断面⑧で最大をとっている。これは側岸からの衝撃波の影響であるが、その影響は  $h_{t0}$  と比べて小さく全体的には解析解の重ね合わせで縦断分布を表せていると言える。波状段波の最大波高は最大湾曲部で最大となるが、その最大波高は解析解よりかなり大きく、流下とともに上昇する傾向にある。ここで、それぞれの測定断面を通過する波先端線を図-9に示す。波先端線は、断面中央の測定点の波の到達時刻  $t_s$  からの各測定点の到達時刻  $t_i$  (図-10) の偏差を用いて式(8)で計算することができる。

$$\delta s_i = (t_i - t_s) \cdot \frac{s_m}{t_s} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (8)$$

ここに、 $s_m$  : 各測定断面までの縦断距離(m)、 $t_s$  : 左岸から0.04(m)の波が到達した時刻(s)である。断面④や⑧では外岸際の波先端が内岸と比べ遅れている。そのため、流下に伴う分裂波の増幅に加えソリトン分裂波が断面④や⑧の外岸に衝突することで増幅し、2倍以上に最大波高が大きくなったと考えられる。

## 5. 結論

砕波段波では、断面平均した実験波高の時間変化は1次元浅水流方程式から得られた解析解と良好に一致した。さらに、時間平均した横断方向の水面形も、一樣湾曲水路の定常流における横断水面形の解で概ね説明できた。最大波高の縦断分布は、衝撃波の影響分の差異はあるが段波波高と比べて大きくな



◆ 左岸沿い(実験)    ◇ 右岸沿い(実験)    — 左岸沿い(解析)    -- 右岸沿い(解析)

図-8 最大波高の縦断分布

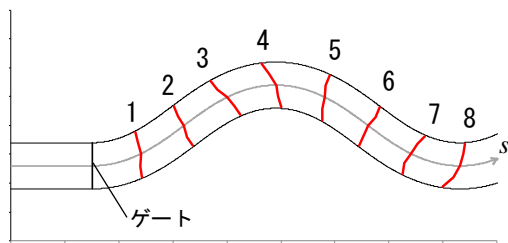


図-9 波状段波の各測定断面における波先端線

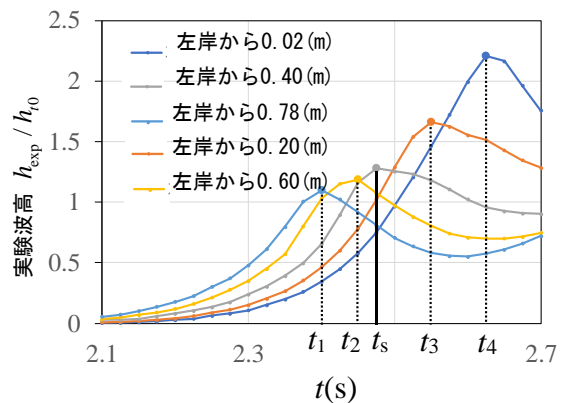


図-10 断面④での各測定点における到達時刻

く、各測定点における波高の時間変化はこれらの解析解の重ね合わせで概ね表現できることを示した。この結果は限定された条件におけるものであるが、1次元浅水流方程式の解析解と一様湾曲部の横断水面形の解の重ね合わせで概ね表現できたことは、大津波発生時の津波の河川遡上時の波高分布を広域の解析が可能な1次元手法で概略検討できることを示している。これは同時に、砕波段波が遡上する際の波高の変化は、津波氾濫解析によく用いられる平面2次元解析で表現可能な現象であると考えられる。

波状段波では、断面平均波高は解析解と概ね一致するものの、ソリトン分裂波が流下に伴って増幅することに加え外岸際への衝突により増幅するため、流下とともに最大波高は解析解の重ね合わせよりかなり大きくなることを示した。東日本大震災時においても見られたように、湾曲地形によって複雑に変形した津波は何波にもなって河川を遡上するため、大津波時においても、ソリトン分裂による波高増幅の危険性を明らかにすることは重要であり、予測手法の構築を今後の課題とする。

#### 参考文献

- 1) 田中規夫, 八木澤順治, 安田智史: 東日本大震災における津波の河川遡上と越流による被害, 埼玉大学工学部紀要, 第44号, p21-24, 2011.
- 2) 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.

- 3) Hui Liu. and Haijiang Liu.: Experimental study on dam-break hydrodynamic characteristics under different conditions, *Journal of Disaster Research*, Vol.12, No.1, 2017.
- 4) 後藤智明, 首藤伸夫: 河川津波の遡上計算, 海岸工学論文集, 28巻, pp.64-68, 1981.
- 5) 伊藤英恵, 竹林洋史, 梶原哲郎, 藤田正治, 富田邦裕: 山地蛇行河川における崩土の河川突入による段波の伝播特性, 土木学会論文集B1, Vol.70, No.4, I\_1033-I\_1038, 2014.
- 6) 室田明, 岩田好一郎: 段波の変形に関する研究, 土木学会論文集, Vol.160, pp.49-58, 1968.
- 7) 中村祐介, 安田浩保, 清水康行: 流れの遡上に伴う波高減衰に着目した波状性段波の実験的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.890-894, 2007.
- 8) 安田浩保: 不等流を遡上する波状性段波の水理実験とその数値計算, 応用力学論文集, Vol.10, pp.555-562, 2007.
- 9) 内田 龍彦, 伊藤 康, 戎 忠則, 河原 能久: 破堤氾濫流に関する基礎的実験とその二次元数値解析, 応用力学論文集, Vol.10, p911-919, 2007.
- 10) 本間仁, 安芸皎一: 物部水理学, 岩波書店, 1962.

(2019.4.2受付)