

## 1.6 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究（3）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平成 18 年～平成 22 年

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒地河川）

研究担当者：平井 康幸、安田 浩保

### 【要旨】

河道内に侵入した津波は波状段波を形成して波頭部で急激な水位上昇を生じる。この現象は、水理的には波状性長波が不等流場を遡上する現象と見なすことができる。しかし、静水中における波状段波に関する研究は多数行われてきているものの、河川のような不等流場における知見は非常に乏しい。本研究では、複断面水路の不等流場を遡上する波状段波の水理実験の数値シミュレーションを行い、低水路から高水敷の溢水氾濫が生じるにもかかわらず分散波列の形成が最大水位の決定に支配的であることを明らかにした。

キーワード：津波、河川、波状段波、水理実験

### 1. はじめに

2003 年 9 月に発生した十勝沖地震を契機として、河川を遡上する津波に対する危険性が強く認識されるようになった<sup>1)</sup>。この地震に伴い発生した津波は、河川に侵入して波状段波を形成して遡上していく様子が自衛隊により撮影された。波状段波が形成されると入射時の段波波高に比べて 2 倍程度までこれが増幅することが既往の研究により明らかにされている。このため、河川を遡上する津波を取り扱う場合、波状段波についての知見が不可欠である。しかしながら、一般に波動理論は静水中の水平床上における議論であることがほとんどであるため、河川のような不等流を遡上する波状段波に対してこれらの知見をすぐさま適用することは難しい。この問題に対し、安田<sup>2)</sup>や中村ら<sup>3)</sup>は、波状段波が単断面水路を遡上する水理実験を実施して、最大で 2.5 倍程度にまで水位が上昇することを示している。

実際の河川は複断面形状のものが多いため単純矩形断面の議論からさらに一步踏み込み、複断面河道を遡上する津波の特性を把握する事は不可欠であると言えよう。それにもかかわらず、波状段波が複断面河道を遡上する場合については未だに研究が進んでいないのが実情である。最近になり、廣瀬ら<sup>4)</sup>により、複断面の河道を伝播する波状性段波に関する水理実験が行われ、複断面の形状が伝播する入射波に対して及ぼす影響について明らかにされつつある。

実河道における河道内に侵入した津波の影響度の評価のためには、数値シミュレーションが不可欠の技術と言え、低 Fr 数領域の単断面水路を遡上する波は、鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を適用することで実現象および室内実験を 10%内外の高精度で再

現できることが明らかになっている。現状では複断面河道における波状性長波の数値シミュレーションに関する報告は過去に無く、このような知見の蓄積が求められている。

本報告では、洪水流や浅海域での津波のシミュレーションに広く用いられる浅水理論に基づく数値計算モデルにより、昨年度までに行われた複断面水路を遡上する波状性長波の室内水理実験の再現計算を実施し、その再現特性などについて議論する。

なお、本報告における数値計算用の計算格子の生成および計算結果の可視化には財団法人北海道河川防災研究センターにより開発された Ric-Nays を用いた。数値計算の演算については Ric-Nays に付属する浅水理論を支配方程式とするソルバを用いた。

### 2. 数値計算モデルの概要

#### (1) 支配方程式

本報告において行われた数値計算の支配方程式は浅水理論式である。平面 2 次元に拡張された浅水理論式は、 $x$ 、 $y$  方向それぞれの運動の式が、

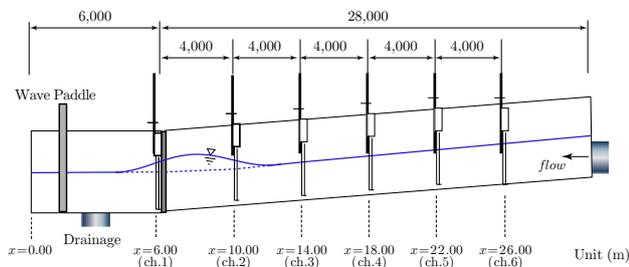
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 N}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

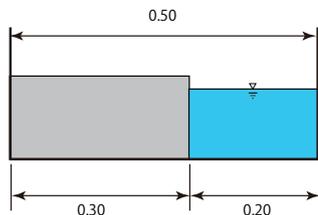
である。また、連続の式については、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

である。ここに、 $M$ 、 $N$  は  $x$ 、 $y$  方向の流量フラックス、 $D$  は水深、 $g$  は重力加速度、 $\eta$  は水位、河床のせん断力



a) 実験装置の縦断図と波高計の設置



b) 複断面化された横断形状

図-1 実験装置の概要

の表現には Manning の粗度係数を導入して  $n$  は粗度係数である。

## (2) 実施した数値計算の初期条件、境界条件

再現計算の対象となる室内実験は、図-1の a) に示したとおりの全長 34m、幅 0.5m で、水路勾配が 1/250 の矩形断面を有する水路を用いて行われた。また、同図 b) のように低水路からの高さ 0.15m、幅 0.3m の高水敷を左岸側に設置して複断面型の水路としている。この実験では、4m 間隔で容量式波高計を 6 本設置して低水路内の長波の遡上に伴う水位変動を計測した。入射波の遡上に伴い発生した溢水については直接的には計測されていないものの、前述の低水路内の水位計測によりある程度の把握が可能となっている。

今回の再現計算では、水位計測地点の最下流位置である  $x = 6.0\text{m}$  地点の ch1 から水路の最上流地点までの範囲を計算領域とし、この領域全体を  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$  間隔の staggered 格子で表現した。これらの計算格子の生成には Nays-Pre を使用した。計算時間間隔は 0.002 秒とた。

この数値計算における初期条件は不等流計算により求められた縦断水位分布とした。この不等流計算の境界条件には  $x = 6.0\text{m}$  地点の ch1 における観測水位とそのときの流量を与えた。

境界条件については、下流端の水位条件として前述の ch1 地点において観測された水位変動を与え、上流端の流量条件として実験値と同じく一定流量を与えた。計算結果の出力間隔は、0.2 秒刻みである。

## 3. 計算結果

昨年度実施された水理実験は、河川流量、入射波の波高、および入射波の周期をそれぞれ変化させて行われている。この報告では、河川流量を  $6\text{ l/s}$  と入射波の周期を 9 秒に固定し、入射波の波高のみを変化させる再現計算を行い、これらの条件に一致する実験値との比較を行った。

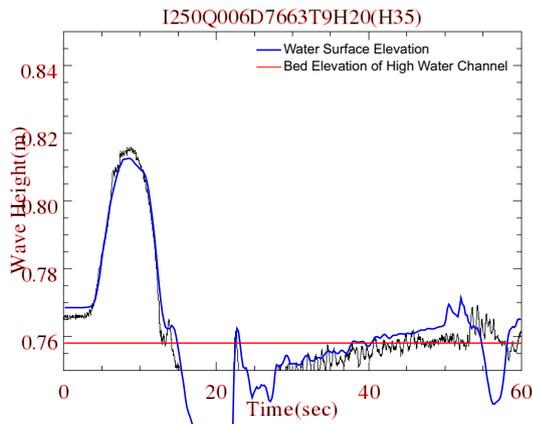
### (1) 時間波形

図-2、3 に河川流量を  $6\text{ l/s}$ 、入射波の周期を 9 秒、入射波の波高 3.5cm とした場合における  $x = 10 \sim 26\text{m}$  地点の水理実験および数値計算により得られた水位の時間変化を示した。黒線が実験値、青線が計算値、赤線が複断面の標高をそれぞれ表している。

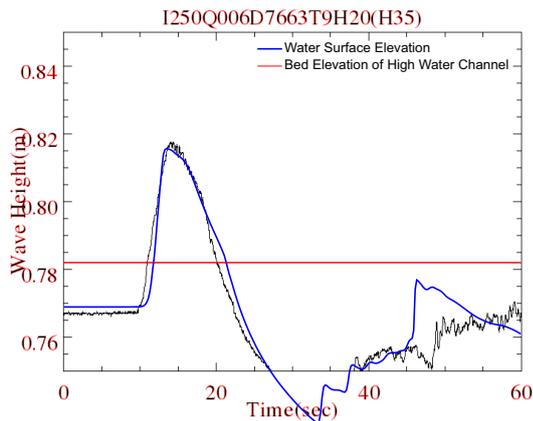
これらの図面から明らかなように、 $x = 10$  から 18m 地点までの区間においては分散波列の形成を伴うことのない入射波の侵入に伴う水位上昇、およびこれがもたらす高水敷への乗り上げ（溢水氾濫）が生じていることが分かる。その後、水理実験では  $x = 22, 26\text{m}$  地点において明瞭な分散波列が形成されている事が確認できる。少なくとも  $x = 22$  付近においても引き続き溢水氾濫が生じており、その主因は分散波列の形成に伴う水位上昇が担っている事が分かる。

実施された再現計算では、これら一連の現象のうち、 $x = 10$  から 18m 地点までの区間付近において見られた入射波の前傾化やそれに伴う高水敷への溢水氾濫を良好に再現している事が分かる。その後、分散波列の形成が次第に顕著となってくる  $x = 18\text{m}$  地点よりも上流側では、再現計算では分散波列が形成されないために実験値を大幅に過小評価することになる。ここで、注目すべき事は、水理実験では  $x = 22\text{m}$  地点付近において非常に明瞭な分散波列の形成が入射波の周期に匹敵する 10 秒ものあいだほど見られてこれに伴う溢水氾濫が生じていた一方、再現計算では分散波列が形成されずに水位の過小評価ばかりか高水敷の氾濫域についても過小評価している点である。

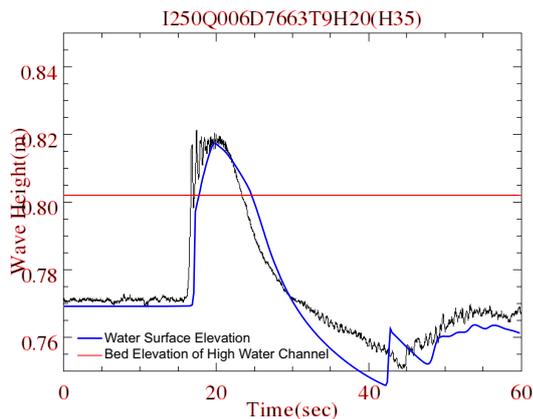
実験値では上流へ遡上するに従って波頭部における分散波列の形成が顕著になっていく様子が見られるが、再現計算の結果では波頭において分散波列を確認することはできない。分散波列の形成は、水面曲率の増大に伴って発生する鉛直方向加速度による重力加速度の補正効果にある。しかし、浅水理論ではその導出過程において水粒子の鉛直方向加速度が重力加速度に比べて微小で無視できると仮定しているため、浅水理論に基づく再現計算では分散波列が形成されないものと考えられる。これらのことから、複断面河道における津波の遡上を取扱う場合には、縦断的な水位分布の再現



a) ch2 地点、 $x = 10.0\text{m}$



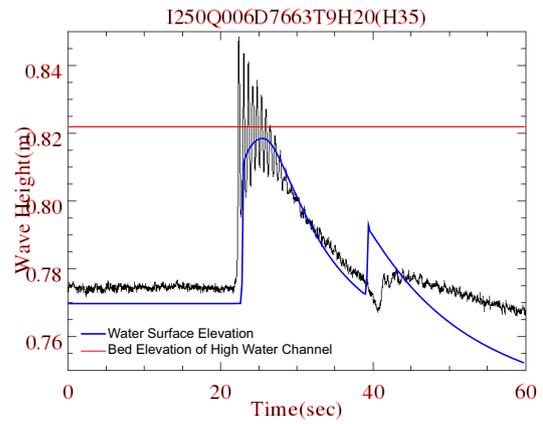
b) ch3 地点、 $x = 14.0\text{m}$



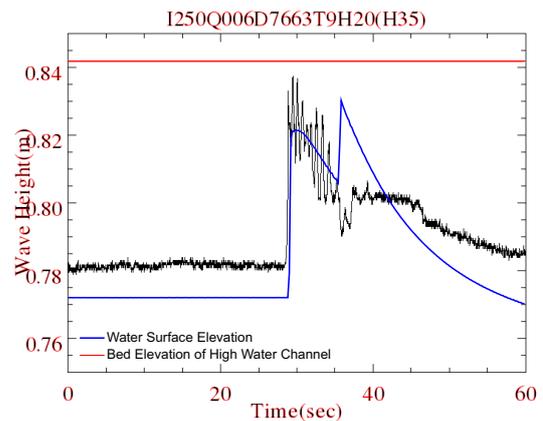
c) ch4 地点、 $x = 18.0\text{m}$

図-2 実験値と計算値の一例 (ch1~3 地点の水位の時間変化)

のみならず、溢水氾濫の評価においても鉛直方向加速度の補正項を導入した支配方程式に基づく数値計算モデルが導入される事が望ましいと言える。



d) ch5 地点、 $x = 22.0\text{m}$



e) ch6 地点、 $x = 26.0\text{m}$

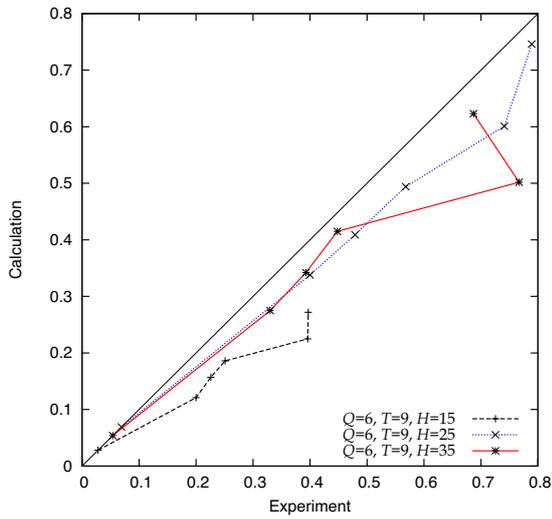
図-3 実験値と計算値の一例 (ch5、6 地点の水位の時間変化)

## (2) 波高

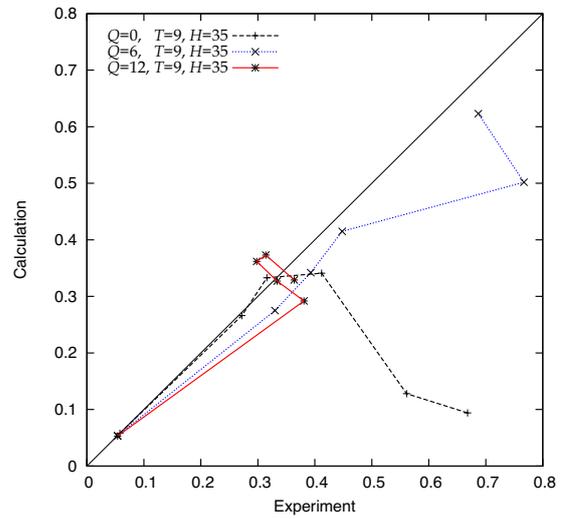
図-4 a) は、河川流量と入射波の周期を固定して入射波の波高のみを変化させた場合、図-5 a) は、入射波の周期と波高を固定して河川流量を変化させた場合における各水位観測地点における最大波高の実験値と計算値の比較を示した。ただし、ここでの波高とは各観測地点における入射前における定常水位から入射波の到達に伴う最大水位との差とし、定常水位時における各地点の水深でそれぞれ無次元化している。横軸が実験値、縦軸が計算値を表している。

このグラフから、浅水理論では分散現象が生じる以前の下流部においては比較的良好な再現が可能なもの、特に上流部における分散波列の形成が顕著となる区間では計算結果が実験値に比べて過小評価となる。浅水理論による計算結果は、いずれの区間においても最大波高を実験値よりも 50%程度もの過小評価となり、実験値と計算値の差異が最も著しい場合は 65%程度まで過小評価する計算結果を得た。

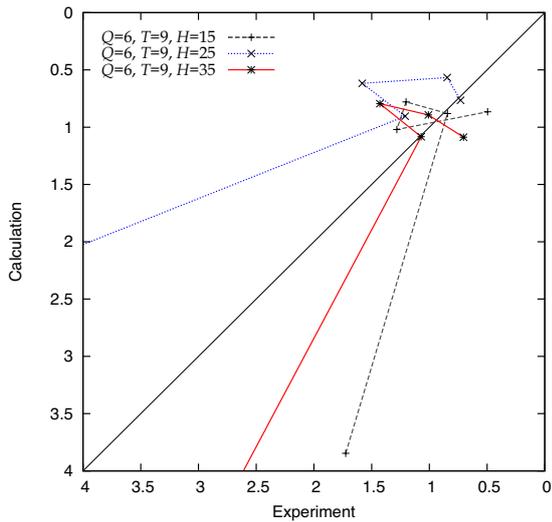
入射波は前傾化、その後分散波列の形成という変形



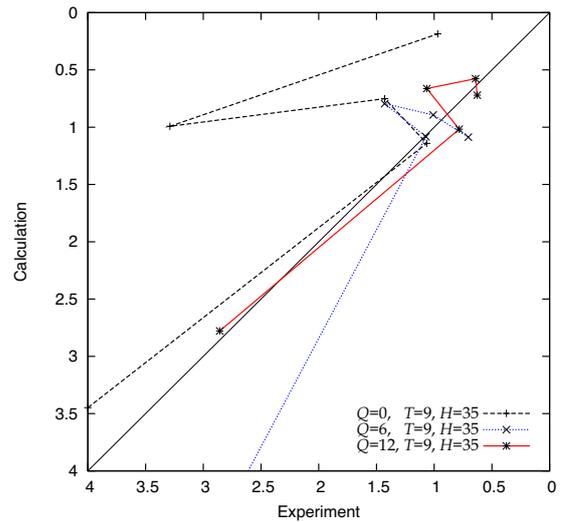
a) 最大波高



a) 最大波高



b) 波峰移動速度



b) 波峰移動速度

図-4 波高のみを変化させた場合の実験値と計算値の比較 ( $Q = 6, T = 9$ )

図-5 流量のみを変化させた場合の実験値と計算値の比較 ( $T = 9, H = 35$ )

過程を辿るが、前項で示したように上流区間では溢水状態においても明瞭な分散波列の形成を継続してこれが水位上昇の要因となっている。この現象はいずれの入射条件においても同様に発生しており、複断面河道における津波の遡上では高水敷への溢水を生じるにもかかわらず分散波列の形成は無視し得ない規模で生じ、しかもそれが最大水位の決定に対して大きな影響を与えていると言える。

### (3) 波速

図-4 b) は、河川流量と入射波の周期を固定して入射波の波高のみを変化させた場合、図-5 b) は、入射波の周期と波高を固定して河川流量を変化させた場合における各水位観測地点における波峰移動速度の実験値と

計算値の比較を示した。これらの波峰移動速度は、各水位観測点の最大波高の通過時刻を基に算出した。ただし、前述の方法で波速を算出しているため、波形の違いが若干の誤差を生んでいる可能性がある。

浅水理論に基づき得られた計算値は実験値の波速を過大評価する傾向が全体的にみられる。図-2、3に示した時間波形を見れば分かるとおり、実験値では多くの水位観測地点において分散波列の形成が確認されており、このような波形においては浅水理論では無視されている鉛直加速度項（分散項）が移流項と同程度の規模で作用するようになってくる事が知られている。物理的には波形の前傾化を招き波速を加速させる移流項と、波形の後傾に寄与する分散項の拮抗により結果的に波速が低下することから説明される。

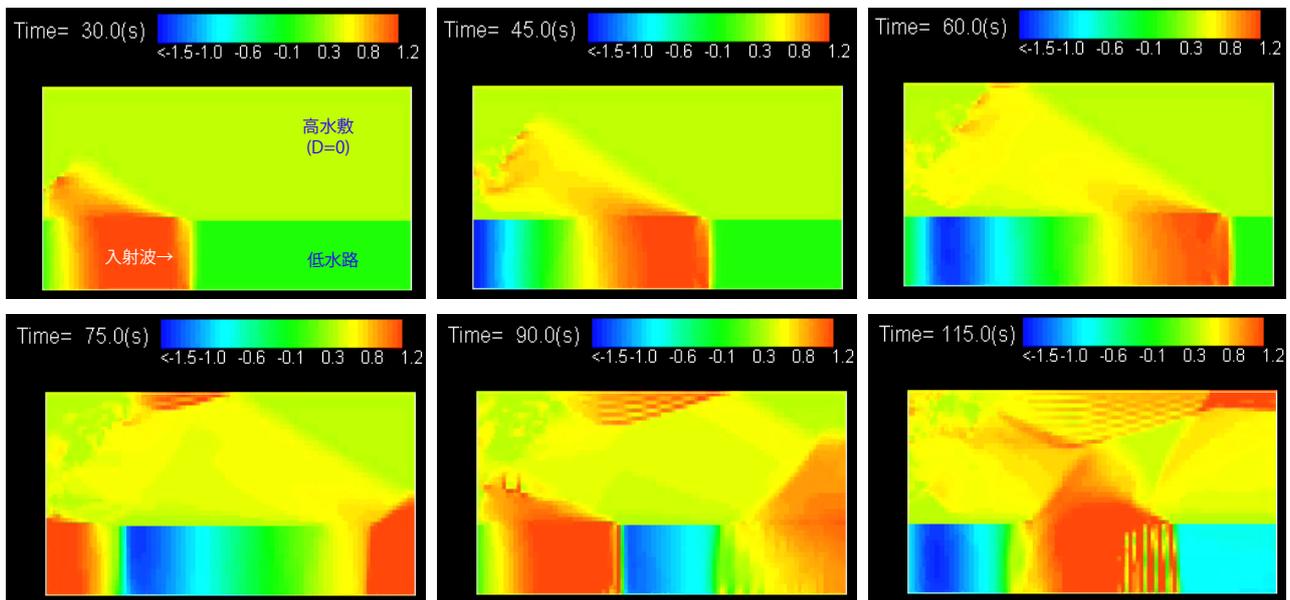


図-6 鉛直方向加速度の補正項を導入した平面2次元計算モデルによる複断面河道に侵入した津波の試験計算の一例

#### 4. おわりに

本報告では、津波に見立てた長波が複断面水路を遡上する水理現象を浅水理論に基づく数値モデルによりシミュレーションを行い、現象の水理的な特性や計算結果の再現性などについて議論した。得られた結果は以下のように要約される。

浅水理論では、複断面河川を遡上する津波でさえ分散波列の形成を伴うためにその水位上昇量や溢水氾濫を実用上求められる精度の範囲でさえ再現が困難であることが示された。特に、分散波列が形成される区間では最大水位を60%以上も過小評価してしまうことがあり得る。また、このような分散波列は高水敷への溢水氾濫を生じていながらも、波列形成は入射波周期と同程度の時間スケールで継続されて最大水位の決定要因となり続ける。そのため、複断面の実河川を津波が遡上する数値シミュレーションを行う場合は、単断面における同現象の取扱いと同様に鉛直方向加速度の補正項を有する非線形分散波理論式を支配方程式としなければならない、最大水位のみならず低水路からの溢水量や溢水域を大幅に過小評価する可能性が大きいことが示唆された。

今後は、鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を用いた二次元計算を実施し、複断面水路を遡上する波状性長波の再現精度を検証する予定である。

#### 参考文献

- 1) 安田 浩保, 渡邊 康玄, 藤間 功司: 2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川溯上, 土木学会論文集, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.

- 2) 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, 土木学会応用力学論文集, 第10巻, 2007.
- 3) 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, 第28巻, 2007.
- 4) 廣瀬 秀樹, 安田 浩保, 清水 康行, 複断面河道を遡上する津波に関する水理実験, 土木学会 第48回北海道支部技術研究発表会報告, 2007.

#### 付録 I 鉛直方向加速度の補正項を導入した平面2次元計算モデル

本報告において行われた数値計算の支配方程式は浅水理論式である。これらの式の右辺にいわゆる分散項を加える事で、弱分散性の波動現象における鉛直方向加速度の補正が可能となる。x, y 方向それぞれの運動の式は、

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{gn^2 M}{D^{\frac{7}{3}}} \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{\partial D^2}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \quad (I.1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{gn^2 N}{D^{\frac{7}{3}}} \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{\partial D^2}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \quad (I.2)$$

となり、これらが鉛直方向加速度の補正を加味した平面2次元解析用の支配方程式となる。

試験計算の結果は図-6に示すとおりで、高水敷への溢水氾濫や分散波列が形成されている様子がよく分かる。

## A STUDY ON TSUNAMI WAVE IN RIVER AND MITIGATION OF ITS DAMEGES

Tsunami that propagate against in river often form the undular bore, its wave front occur locally and rapidly wave height increasing. In the paper, numerical analysis on a compound section with current were conducted to investigate the characteristics of undular bore in non-uniform flow like natural river. The calculation results is shown the maxima water level at each section is determined the dispersive wave train surely even with inundating to high water channel.

*Key Words* : tsunami, river, undular bore, hydraulic experiments