

水門を透過する遡上津波の挙動 に関する基礎的研究

STUDY ON WAVE TRANSFORMATION OF RIVER-ASCENDING TSUNAMI TRANSMITTING ON THE SLUICE GATE

安田 浩保¹・藤間 功司²

Hiroyasu YASUDA and Koji FUJIMA

¹正会員 修士 (工学) 独立行政法人北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

²正会員 工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒 239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

When the tsunami ascend the river, it may cause the various disasters along the river, thus many river have equipped the sluice gate for prevention of the tsunami propagating in the river. If the sluice gate can not close completely, the tsunami can transmit upper side of the gate. In this paper, laboratory experiments were conducted to investigate the characteristics of the transmitting tsunami on the sluice gate. The experimental results are showed that the wave height of transmitting tsunami is governed by the opening height of the gate, is not mostly influenced by discharge. In case of opening height is low, the strong eddies generate on the part of out flow from the gate. And the eddies cause to decrease the wave height of transmitting tsunami. Furthermore, a numerical model considering the eddy loss was developed, the governing equations applied nonlinear dispersive wave theory. The computation results were compared with experiments results and the results agree with experimental results, the validity of the model was proved.

Key Words : river-ascending Tsunami, nonlinear dispersive wave theory, sluice gate, hydraulic experiments, numerical model, eddy loss

1. はじめに

海域を震源とした地震が発生すると海底の急激な隆起や沈降が起こりこれに伴い津波が発生する可能性がある。この津波による被害の危険性は沿岸部はもとより、河口部から河川へ浸入してその沿川で越流による氾濫被害や係留物の流失などの被害の危険性も考えられる。過去 50 年間に於いてさえ、十勝沖地震、チリ沖地震、日本海中部地震、北海道南西沖地震が発生し、その際に津波が河川に浸入して被害が引き起されたことが報告されている。最近では、2003 年 9 月に十勝沖で発生した M8.0 の地震に伴って津波が発生し、北海道の太平洋沿岸部の広い範囲で漁船の転覆や横倒、岸壁に停車中の自動車の流失や冠水などの被害が起きた¹⁾。十勝川では被害こそなかったもののソリトン分裂して河川を遡上する津波が観測され、それは河口からおよそ 11km の地点にまで到達した²⁾。このような河道内を遡る津波に関する研究は、岩崎・阿部^{3) 4) 5)}ら、後藤・首藤⁶⁾、Tsuji et al.⁷⁾、宮崎・史⁸⁾などによって行われてきた。

津波の被災経験地域などでは防災対策のためのゲートを設け、津波発生時にはこれを完全閉鎖することを原



図-1 ソリトン分裂を伴い十勝川を遡上する津波 (陸上自衛隊撮影・2003 年 9 月 26 日 AM6:30 頃、十勝川河口橋付近。)

則としてその沿川を防護する対策がとられている。一方、ゲートが設けられているものの閉鎖操作が遅れた場合やゲートの上流側の流量が多く完全閉鎖が難しい場合、ゲートは不完全閉鎖にならざるを得ない。ここへ津波が入射すると越流あるいはゲートの開口部を通してゲートの上流側において少なからず津波の影響が伝播することになる。

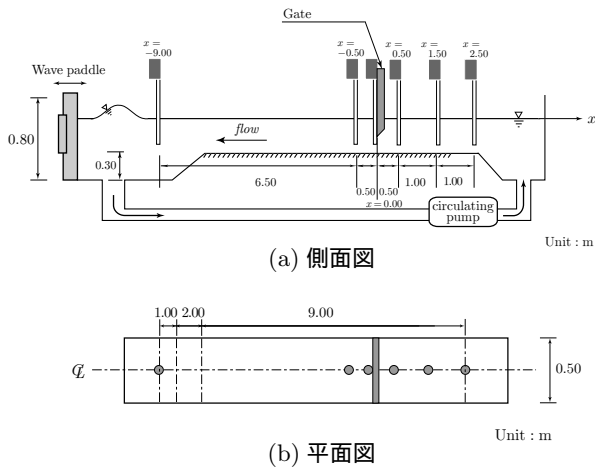


図-2 水理実験に利用した造波および水流の発生が可能な水路

表-1 ゲートを透過する津波に関する水理実験の条件

水理諸量	設定値
ゲートの開口高 a (m)	0.025, 0.050, 0.075, 0.100
河川流量 Q_{rv} ($m^3/min.$)	0.000, 0.235, 0.294
初期水深 h_0 (m)	0.13

しかしながら、このようなゲートを透過したり越流したりする遡上津波の挙動に関する研究は少ない。このうち、ゲートの天端高を超える津波がそれを越流する問題に関しては検討がなされている。その一方で、より複雑な水理現象であるゲートを透過する津波について水理的に取り扱った研究例はない。このため、本研究ではこのような津波の特性の解明、解析手法に焦点を当てて議論を展開することにした。まず、その特性を把握することを目的とした水理実験を実施した。つぎに、ゲートの通過に伴い発生する渦混合に関する損失項を考慮した非線形分散波理論を基礎とした数値解析モデルを開発し、その妥当性について検討した。

2. 水理実験

(1) 実験概要と設定した条件

ゲートを有する河川に浸入した津波がそのゲートを透過する際の特性を把握することを目的とした水理実験を、図-2 に示す水路を利用して表-1 に示した条件のもとで実施した。この水理実験の縮尺は $1/35$ である。

図-2 に示した水路は造波機と河川流を模擬した水流発生のためのポンプを備えている。実験条件に関しては、ゲートの開口高さ a と透過波および反射波の波高 $\eta(x)$ の関係のほか、これらの波が流れから受ける影響を明らかにすることを考えてゲートの開口高さ

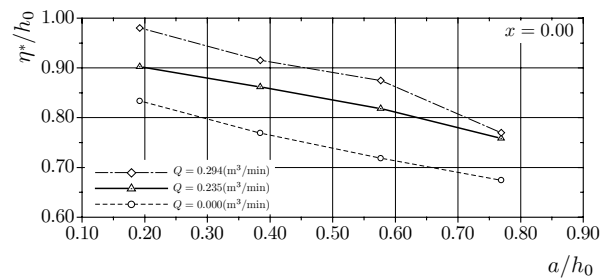


図-4 ゲート前面部 ($x = 0.00$ (m)) で発生した反射波の最大波高とゲートの開口高さの関係

量 Q_{rv} をそれぞれ変化させるように各値を設定し、合計 12 パターンの実験を実施した。ここで設定した流量の規模は、平常時の河川流を想定して Fr 数 0.050, 0.075 相当である。いずれの実験条件においても造波前の静水深 h_0 は 0.13 m で一定とし、津波に見立てた同一波形の孤立波を造波機によって発生させて入射した。各観測地点での波高の計測には図-2 のように配置した容量式波高計を利用し、その計測時間間隔は 0.05 s とした。

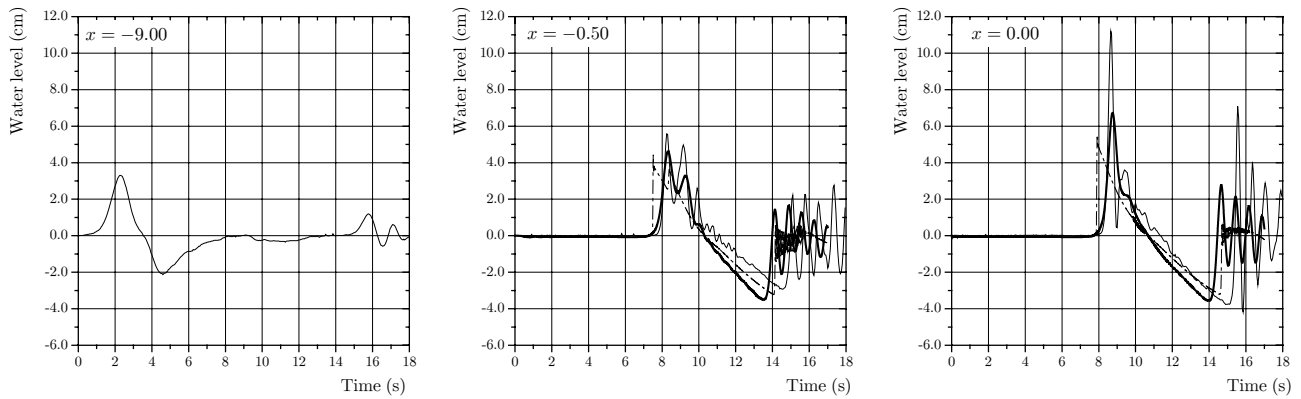
このほか、この種の数値計算で必要となる、後述するゲートの通過に伴い発生する渦混合による損失項は、ゲートの流出量式に含まれる流量係数 C の関数として考慮するようにした。数値計算の精度を確保するためにこの流量係数 C の理論解と実験値の比較を行い良好な結果を得たが、その実験方法および結果については別途報告する予定のためここでは割愛する。

(2) 実験結果

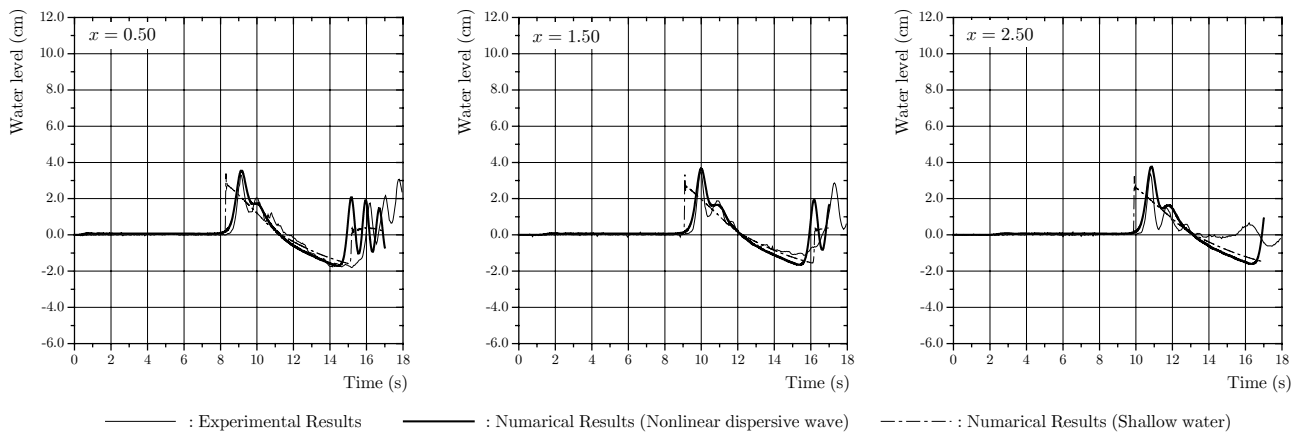
表-1 に示した 12 パターンの実験を行い、各観測地点における時間波形を得た。その一例が図-3 で、本図 (a) は $x = -9.00$ の入射波、 $x = -0.50$ の水平床部での波、 $x = 0.00$ のゲート前面部で発生した反射波、そして本図 (b) は $x = 0.50 \sim x = 2.50$ の透過波の時間波形を示している。

河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が異なる他の実験ケースに関しても同じ観測地点では同様の傾向の波形が観測された。 $x = -0.50$ 地点の波形ではソリトン分裂が観測されたが、これは入射波が $3/20$ 勾配の斜面を通過したことが原因となり発生したものである。流れの影響を受けて多少波速は異なるがいずれのケースとも波高は等しかった。一方、ゲートの直下流では著しい反射波、その上流側では透過波が発生し、いずれにもソリトン分裂を伴っていた。

a) 反射波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係
 $x = 0.00$ 地点における反射波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係について図-4 に示すとおり整理した。河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が図-3 に示したケース以外の実験ケースにおいてもその波高は流量の規模に依存して異なるものの、急激な水位の変化に伴い



(a) 入射波 ($x = -9.00$, $x = -0.50$) と反射波 ($x = 0.00$) の時間波形



————— : Experimental Results ————— : Numerical Results (Nonlinear dispersive wave) - - - - - : Numerical Results (Shallow water)

(b) 透過波 ($x = 0.50$, $x = 1.50$, $x = 2.50$) の時間波形

図-3 水理実験と再現計算の時間波形の比較 (細実線が実験値, 太実線が非線形分散波理論式による計算値, 破線が浅水理論式による計算値を表している. 本図の実験条件は, 河川流量 $Q_{rv} = 0.235(\text{m}^3/\text{min.})$, ゲートの開口高さ $a = 0.050$ (m), 初期水深 $h_0 = 0.130$ (m) である. ゲートの下流側で発生した反射波, 透過波はともにソリトン分裂が発生していることが分かる. なお, 河川流量 Q_{rv} , ゲートの開口高さ a が異なる他の実験ケースに関しても同じ観測地点では同様の傾向の波形が観測された.)

ずれの実験ケースともにソリトン分裂を生じた. そして, いずれの流量に関してもゲートの開口高さが大きくなるに従ってゲート上流側への通過流量が増加するためにその波高は減少した. 最大開口高さ $a = 0.100\text{m}$ の時に生じる波高は, 最小開口高さ $a = 0.025\text{m}$ の時のそれと比べて約 20%程度まで小さくなった. つまり, 反射波の最大波高は, 河川流量とゲートの開口高さの両者から規定されることが分かる.

b) 透過波の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係

ゲートの上流側では透過波の波高を観測するために $x = 0.50$ m, $x = 1.50$ m, $x = 2.50$ m に波高計を設置してその波高の変化を観測した. 図-5 (a) ~ (c) に各地点の最大波高 η^* とゲートの開口高さの関係を整理して示した.

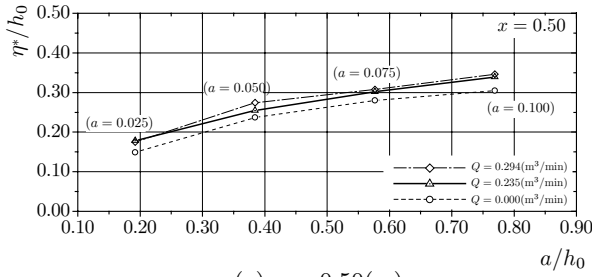
まず, 透過波の最大波高はゲート前面部の反射波の場合と異なり, 河川流量の規模の違いによる影響は小さく, ゲートの開口高さが支配的な決定要因であることが分かる.

つぎに, 各図において $a/h_0 = 0.38$ ($a = 0.050$) に着目するとその左右で現象の傾向が異なることが認められる. これはゲートの開口高さが小さいときほどゲートの通過に伴い発生する渦混合の規模が著しく大きくなり, 入射波の波エネルギーが消費されているためと考えられる. すなわち, $a/h_0 = 0.19$ ($a = 0.025$) の場合では a/h_0 がそれ以上の条件に比べ, より多くの波エネルギーが消費されたために大きな波高減衰を生じたものと推測できる.

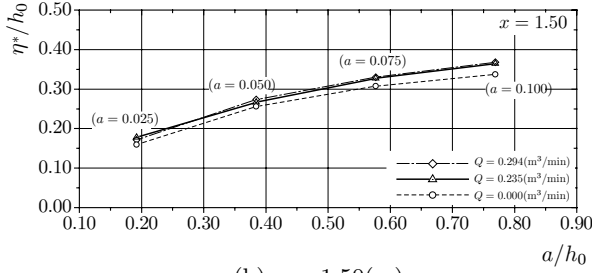
なお, 地点毎の差異について調べたが, 大きな差異はなかったことを付記しておく.

(3) ゲートの通過に伴う入射波の波高減衰率 ϵ

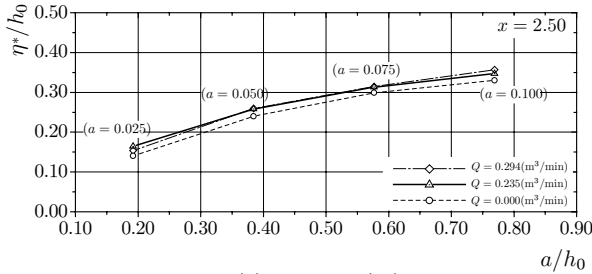
入射波の最大波高がゲートを透過するに伴いどの程度減衰するかについて調べた. ここでは, 波高減衰率 ϵ を, $x = -0.50$ における最大波高 η_I^* と 3 地点の透過波



(a) $x = 0.50(\text{m})$



(b) $x = 1.50(\text{m})$



(c) $x = 2.50(\text{m})$

図-5 透過波の最大波高とゲートの開口高さの関係

の最大波高の平均値 $\bar{\eta}_p^*$ から

$$\epsilon = \frac{\eta_I^* - \bar{\eta}_p^*}{\eta_I^*} \quad (1)$$

と定義した。この波高減衰率 ϵ は、値が大きいほどゲート通過前の波高よりもゲートの上流側に発生する透過波の波高は相対的に小さくなり、ゲートの上流側は安全であることを意味する。この波高減衰率とゲートの開口高さとの関係を整理したものが図-6 である。

この図から、ゲートの開口高さ a/h_0 が 0.20 程度の場合では入射波の波高に対する透過波の波高は 65% 程度まで減衰できることが分かる。一方、 a/h_0 が 0.75 程度の場合では透過波の波高はたかだか 20% 程度しか減衰させることができないということが見て取れる。

前項 b) で指摘したとおり、ゲートの開口高さが小さい場合ではこれが大きい場合と比べて渦混合の規模が大きくなる。図-6 から a/h_0 が 0.38 程度が境界となって双方の領域では現象の傾向が異なることが分かる。これは、本研究で対象とするような問題の数値計算を実施する場合、この影響を計算に組み込む必要性を示唆するものである。

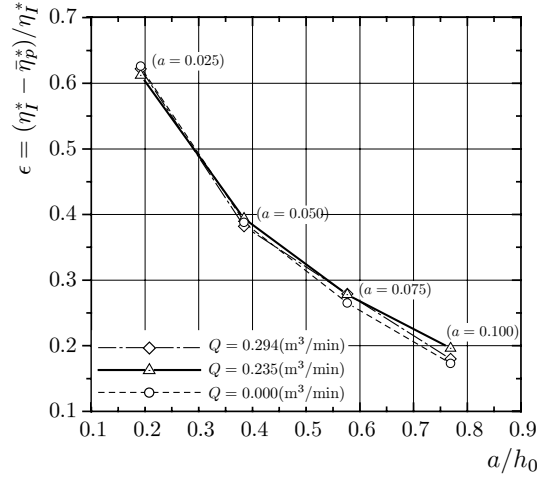


図-6 入射波の波高減衰率 ϵ とゲートの開口高さの関係 (波高減衰率 ϵ が大きいほどにゲート通過前の波高よりもゲートの上流側に発生する透過波の波高は相対的に小さくなり、ゲートの上流側は安全であることを意味する。)

3. 数値解析

(1) 数理モデル

a) 津波に関する基礎式

津波のような長波は、非線形の効果により波形勾配が次第に急峻となるように変形する。そのような変形した波形は水粒子の鉛直方向の加速度が卓越するため波数分散効果が顕著に作用するようになって、波形はいわゆるソリトン分裂を生じて波高が増幅する。本研究で実施した水理実験においても図-3 に示したように反射波、透過波のいずれに関してもソリトン分裂が発生していることが分かる。

このようなソリトン分裂を含む波動現象に適した理論として非線形分散波理論があり、これまでに Peregrine の式⁹⁾、後藤の式¹⁰⁾、Madsen-Sørensen の式¹¹⁾、Beji-Nadaoka の式¹²⁾などの様々な方程式が提案されている。安田ら¹³⁾は、本研究で扱う現象と類似である河道内で見られる段波を以下に示す断面積分型の Peregrine の式を支配方程式とすることで精度良く計算することに成功しており、本研究においてもこの式を適用することにした。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 q}{\partial t \partial x^2} \quad (3)$$

ここに、 η は水位、 t は時間座標、 q は単位幅当たりの流量、 x は空間座標、 D は全水深、 h は静水深、 g は重力加速度である。なお、一般の河川内の流れの計算に用いられ式 (3) の右辺の 3 階微分の分散項を除いた式系となる。

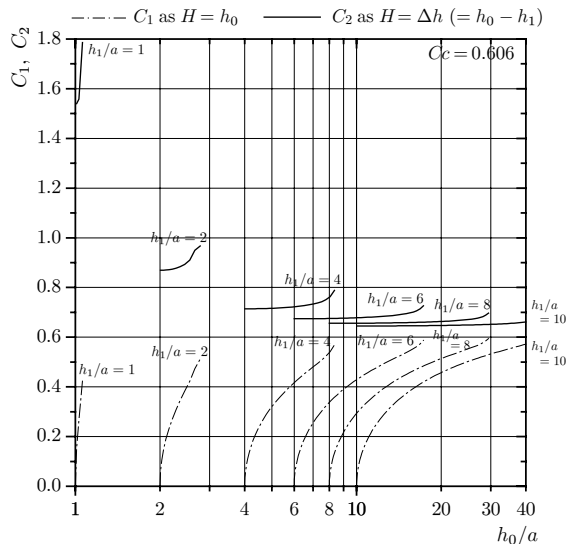


図-7 Henry と著者らが求めた流量係数 C_i の理論解 (式 (4) における H の定義によって流量係数 C の特性は大きく異なるものの、いずれの H を用いても式 (4) の算出値は完全に一致する.)

b) ゲートからの流出量式とその流量係数の特性
ゲートからの流出量は

$$q_g = C_i a \sqrt{2gH} \quad (4)$$

で与えられる¹⁴⁾。ここで、 C_i は流量係数 (ただし、 $i = 1, 2$)、 H はゲートの近傍における水深である。 H は上流側の水深 h_0 、あるいは h_0 とゲートの下流側の水深 h_1 との差 Δh のいずれかを利用することができる。Henry¹⁵⁾ は $H = h_0$ とした場合の流量係数 C_1 、著者らは $H = \Delta h$ とした場合の流量係数 C_2 の理論解を求めており、その特性は図-7 に示すとおりである。流量係数 C_i は H の定義によってその変動域は全く異なるものの、 H をいずれのように定義して q_g を求めても両者から得られる算出値は完全に一致する。

c) ゲート通過に伴い発生する渦混合損失のモデル化
ゲート通過に伴い発生する渦混合による損失項は、式 (3) の右辺に

$$-f \frac{q|q|}{D^2} \quad (5)$$

の形で考慮すればよい。ここに、 f は損失係数である。この損失係数 f は次のようにして定めることができる。まず、式 (3) に式 (5) を加え、定常、弱非線形、弱分散性を仮定すると、

$$gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -f \frac{q|q|}{D^2} \quad (6)$$

の関係が得られる。つぎに、式 (6) に適合する H を Δh とした場合の式 (4) を式 (6) に代入してこれを整理する

ことで、損失係数 f は

$$f = \frac{1}{2} \frac{D}{C_2^2 \Delta x} \quad (7)$$

のように求めることができる。ここに、 Δx は差分計算における計算格子間隔である。

(2) 数値解析法

a) 計算方法

本研究では、数値解析法に差分法を用いるものとし、その差分スキームには非線形分散波理論式の計算に最適な 2 段階混合差分法^{13) 16) 17)} を適用した。この差分スキームは、同じ時間ステップの値を陽的スキームと陰的スキームに分けて未知量を求めるものである。

まず、1 段目で連続の式と運動方程式の局所項・圧力項すなわち線形長波の式に対して陽的スキームである Staggered Leap-frog 法を用いて連続式から η を求め、次いで線形長波の式から流量の中間値 q^* を求める。つぎに、2 段目では移流項・分散項に関して陰的スキームである Double sweep algorithm を用いて流量の最終値を求める。非線形分散波理論式に対してこのスキームを適用した場合、現実の物理現象と同じように非線形効果と分散効果のバランスを維持した計算を行うことになるため、移流項に対して中央差分を用いても安定に計算できる。そのうえ、移流項も 2 次精度なことから、いずれの項も時間的にも空間的にも対称形の中央差分となるから風上差分を用いた場合よりも精度良く計算でき、数値粘性などの影響による波高減衰を抑制することができる。差分式については省略するので参考文献¹³⁾ を参照されたい。

一方、浅水理論式の計算に関しては、移流項以外に Staggered Leap-frog 法に適用し、移流項には 1 次精度の風上差分を適用して計算を実施した。

b) 初期条件および境界条件

計算の初期条件には、定常の河川流を模擬するために全ての計算格子に対して上流から下流に向かう単位幅当たりの流量 q_{rv} を与えた。上流側の境界条件には、時間ステップが更新されるごとに数値水槽の上流端に単位幅当たりの流量 q_{rv} を与えた。一方、下流側の境界条件には、水理実験で取得した $x = -9.00$ 地点における水位記録を与えた。

ゲートからの流出量に関しては、ゲートの設置位置でその上流側と下流側の水位から式 (4) を利用してこれを計算した。

ここで実施した数値計算は、非線形分散波理論式、浅水理論式のいずれとも空間格子間隔 $\Delta x = 0.02$ m、時間格子間隔 $\Delta t = 0.005$ 秒と設定して行った。

(3) モデルの妥当性

a) 水理実験と数値計算結果の比較

水理実験と数値計算結果を時間波形として比較した一例を図-3 (a), (b) に示す。図中の細実線が実験値、太実線が非線形分散波理論式の計算値、破線が浅水理論式の計算結果を示している。この図で示した実験に関する実験条件は河川流量 $Q_{rv} = 0.235(\text{m}^3/\text{min.})$ 、ゲートの開口高 $a = 0.050(\text{m})$ 、初期水深 $h_0 = 0.130(\text{m})$ である。

非線形分散波理論式の計算値は、ゲート最近部の波高が過小に評価される傾向があるが、それ以外の地点では第2波までの波高、波速ともに実験値と良く一致していることが分かる。また、河川流量 Q_{rv} 、ゲートの開口高 a が異なる他の実験ケースに関しても同じ観測地点では同様の傾向となり、概ね良好な計算結果を得ることができた。

ゲート最近部の過小評価は、この地点における流速の鉛直構造を積分型の支配方程式では十分に表現できないことが原因の一つであると考えられる。その他、ゲートからの流出量の算定式の適用範囲もこの問題の原因のひとつとなっているものと思われる。

一方、河道内の流れの計算にしばしば用いられる浅水理論式の計算値は、いずれの観測地点ともに波高は過小に、波速は過大に計算される結果となった。この種の計算を浅水理論式を用いて実施することは精度上難しく、少なくとも実用的な計算を実施する場合には非線形分散波理論式を適用しなければならないことは明らかである。

4. おわりに

これまであまり研究されてこなかったゲートを透過する津波の特性について水理実験を通して明らかにするとともに、そこから得られた知見を反映した数値解析モデルを開発した。これらの概要は下記に示すとおりである。

水理実験の結果に基づき、ゲートを透過した津波の相対的な波高減衰率について整理した。ゲートの開口高さ a/h_0 が 0.2 程度の場合では入射波の波高を 65% 程度にまで減衰させることが期待できる。一方で、 a/h_0 が 0.75 を超える場合では 20% 以下の減衰をさせるだけにとどまる。この透過波の波高はゲートの開口高さが支配的な要因となり、河川の流量から受ける影響は小さい。また、ゲートの開口高さが小さいときはゲートの通過時に著しい渦混合が発生し、この性質を積極的に利用すれば不完全閉鎖の場合でさえも入射してくる津波の波高をかなり減衰させることが期待できる。

本研究で取り扱ったような河道内における津波の数

値計算を実施する場合、鉛直方向の加速度が顕著に作用して波高増幅する。このため、その最大波高を正しく評価するためには基礎式に非線形分散波理論式を適用する必要がある。さらに、ゲートの開口高さが小さい場合の透過波の波高を正しく評価するために渦混合による損失項を考慮する必要がある。これらのことを織り込んだ本研究で開発した数値解析モデルは、ゲート前面部における波高の過小評価の問題があるものの、いずれの実験ケースに関しても精度良く再現することができた。

謝辞： 水理実験の実施にあたっては研究当時東海大学大学院生、同大学学部生であった諸君に尽力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部ホームページ：<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/>.
- 2) 安田 浩保：津波の河川遡上、平成 15 年十勝沖地震被害調査報告、北海道開発土木研究所月報特集号、2003.
- 3) 岩崎 敏夫、阿部 至雄、橋本 潔：津波の河川遡上に関する数値計算の実際、第 23 回海岸工学講演会論文集、pp.437-442, 1976.
- 4) 岩崎 敏夫、阿部 至雄、橋本 潔：河川津波の特性に関する研究、第 24 回海岸工学講演会論文集、pp.74-77, 1977.
- 5) 岩崎 敏夫、阿部 至雄、橋本 潔：湾奥に位置する河川での津波の遡上に関する数値解析、第 25 回海岸工学講演会論文集、pp.137-140, 1978.
- 6) 後藤 智明、首藤 伸夫：河川津波の遡上計算、第 28 回海岸工学講演会論文集、pp.64-68, 1981.
- 7) Tsuji, Y. and Yanuma, T. and Murata, I. and Fujiwara, C.: Tsunami Ascending in Rivers as an Undular Bore, *Natural Hazards* 4, pp.257-266, 1991.
- 8) 宮崎 知与、史 亜傑：1993 年北海道南西沖地震津波の河川遡上痕跡調査とその水位再現検討、*自然災害科学*、pp.179-189, 1997.
- 9) Peregrine, D.H.: Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815-827, 1967.
- 10) 後藤 智明：アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式、*土木学会論文集*、第 351 号、pp.193-201, 1984.
- 11) Madsen, P.A. and Sørensen, O.R.: A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2, A slowly-varying Bathymetry, *Coastal Eng.*, Vol.18, pp.183-204, 1992.
- 12) Beji, S. and Nadaoka, K.: A formal derivation and numerical modelling of the improved Boussinesq equations for varying depth, *Ocean Eng.*, Vol.23, pp.691-704, 1996.
- 13) 安田 浩保、山田 正、後藤 智明：スルースゲートの閉鎖に伴い発生する段波の水理実験とその数値計算、*土木学会論文集*、No.733/II-63, pp.89-105, 2003.
- 14) たとえば、椿 東一郎：水理学 I、森北出版、208p., 1973.
- 15) Henry, H.R.: Discussion of Diffusion of submerged jets, *Transaction, ASCE*, Vol.115, pp.687-694, 1950.
- 16) 原 信彦、岩瀬 浩之、後藤 智明：非線形分散波理論式に関する多段階混合差分スキームの提案、*海岸工学講演会論文集*、第 45 巻、pp.26-30, 1998.
- 17) 岩瀬 浩之、見上 敏文、後藤 智明：非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル、*土木学会論文集*、No.600/II-44, pp.119-124, 1998.

(2003. 9. 30 受付)