

### 1.3 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：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：吉川泰弘、阿部孝章、矢野雅昭、平井康幸

#### 【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とが近年の研究によって明らかにされてきた。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。そのため、不等流場を遡上する津波の基本的な特性を把握するための水理実験を実施し、河道内の津波規模と波高上昇率の関係を整理した。また、実験結果を再現可能な数値解析モデルの開発を行い、実河川における津波遡上現象への適用を行いその妥当性を検証した。一方、北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合には、津波による氷板の河川遡上、それに伴う氷板の河川構造物への影響が懸念される。そこで、河氷が水面上に存在する場合の津波実験を実施し、波状性津波によって引き起こされる漂流物輸送の特性を明らかにした。すなわち、波状性津波における波頭部の急激な水位上昇は、漂流物を急激に加速させることが明らかになった。以上の結果を踏まえ、不等流場を遡上する津波による水位上昇のリスクや河道内漂流物の輸送速度を低減させることを目的として、下流部に設ける遊水地を提案した。遊水地により遡上する津波を横越流させ波高と津波エネルギーを低減させる効果について、水理実験による検討を行った。その結果、遊水地の設置により津波波高の低減、津波到達時間の遅延、高水位の継続時間の低減効果が確認された。

キーワード：津波、河川遡上、波状性津波、結氷河川、水理実験、遊水地

#### 1. はじめに

2003年9月に発生した十勝沖地震、2004年のスマトラ島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>。十勝沖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には、波状段波としての特性を十分に考慮することが不可欠である。しかしながら、一般に波動理論は静水中の水平床面上において議論されることがほとんどであるため、河川のような不等流を遡る波状段波に対してこれらの知見を直ちに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た。その結果、特にFr数の大きな流れにおいて、河川水位は遡上津波により最大で2.5倍程度にまで上昇することが示され、その特性は少しずつではあるが明らかになってきていると言える。

河川における津波防災対策の現状としては、現行の河川堤防規模は、一般的な豪雨-洪水シナリオを想定して設計されているため、河道を遡上する津波に対して十分な防御効果を発揮できるかどうかは十分に検討されていない。すなわち、津波が河川を遡上することにより外水位を上昇させ、樋門などから堤内地に水が侵入して、内水氾濫を起こすことも懸念される。その上、近海で大地震が発生して津波が発生した場合には、河川堤防を始めとした河川構造物が地震動により被災している可能性があり、内水氾濫のリスクは一層高まっていることも想定される。従って、河道内を遡上する津波挙動に関する知見と、河川構造物の耐震強度を複合的に考慮した安全度評価手法の開発が喫緊の課題と言える。

その第一段階として、実河道における河道内に侵入した津波の影響度を評価するためには、数値計算シミュレーションが不可欠の技術と言える。本報告ではまず、単断面水路において、実現象で想定される範囲のFr数の流れ場を遡上する津波を再現するためには、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

ことの重要性を示し、開発した数値解析モデルは、水理実験の現象を10%内外の高精度で再現できることを示した。そして、開発した数値解析モデルを実河川に適用し、観測された水位データを元にその妥当性の検討を行った。

一方、北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合には、津波が河氷の上を流れる、あるいは津波が河氷を壊し上流へと押し上げながら流れるなど、開水時とは異なる現象が予想される。本報告では、多数の氷板が河川水面上に存在している場合の津波実験を実施し、津波遡上とそれに付随する氷板輸送の特性把握を試みた。また、入射波を固定して初期水深・結氷存在位置を変化させ、氷板の輸送速度や最大遡上距離に関する検討を行った。

上記の検討から、河川を遡上する津波やそれに輸送される漂流物の危険度は、遡上過程での波高増幅作用によって上昇することが明らかになった。そのため、本報告では河川横断構造物の被害軽減のための方策として、津波の最大波高及びエネルギーを減少させるための遊水池を提案した。遡上過程での横越流を模擬した水理実験を実施し、遊水池が存在することによる津波本体部の波高低減効果・エネルギー減衰効果について検証を行った。

## 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.
- 5) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始: 冬期間の河川における樋門の凍結状況について, 国土交通省, 北海道開発局技術研究発表会, 第53回, 2010.

## 2. 津波の河川遡上に関する水理実験と数値解析手法の開発

### 2.1 研究の目的

波状段波に関する研究は、静水場においてゲートの急開などにより段波を生じさせた場合について、Favre<sup>1)</sup>、Keulegan & Patterson<sup>2)</sup>、Johnson<sup>3)4)</sup>、Peregrin<sup>5)</sup>、室田<sup>6)</sup>や松富<sup>7)</sup>などが実施している。これらの研究によると、波頭部では局所的な水位上昇を生じる波状段波が形成され、入射時の水位に比して2倍程度にまで水位が急激に上昇することが指摘されている。ただし、このような波状段波が流れ場を遡る場合の議論にまでは至っていない。一方で、流れ場を遡る波動に関する理論解析を佐藤<sup>8)</sup>などが実施している。しかし、いずれの理論解析とも静水圧近似のもとで行われており、波状段波の形成に伴う水位上昇までは言及されていない。最近になり、安田ら<sup>9)</sup>は、ゲートが急閉された場合に生じる波状段波が疑似等流場を遡る問題に関する水理実験を実施し、波頭部における波状性に伴う水位上昇の規模は1.8倍程度にまで達することを示した。

同現象の工学的な応用事例のひとつとして津波の河川遡上が挙げられよう。2003年9月に発生した十勝沖地震津波の複数の河川への浸入と波状段波が形成されたことを契機に津波の河川遡上の危険性が認識されるようになった<sup>10)</sup>。しかし、前述までの通り、流下方向にFr数が漸変する不等流場における検討は不十分と言わざるを得ない状況にある。また、急勾配河川などの高Fr数の条件下における長波の変形に関する知見は乏しい。本研究では、このような実情を踏まえ、その第一段階として、不等流場を遡る波状段波に関する水理実験を実施してその形成に伴う水位上昇の規模を把握するとともに、同現象に関する1次元数値計算法について検討した。

## 2.2 水理実験

### 2.2.1 実験装置の概要

本研究で使用した実験装置は、図-2.1に示した全長34m、全幅0.5mの矩形断面水路である。下流端から6mの区間は固定勾配区間、そこから28mの区間は水平から1/50まで無段階に水路勾配を変化させることができる。ただし、上流端から約2mの区間には整流のための緩衝材を配置した。水路の上流端に最大給水能力が80l/sの給水機構と下流の固定勾配区間に排水機構を備え、不等流場が形成できるようになっている。固定

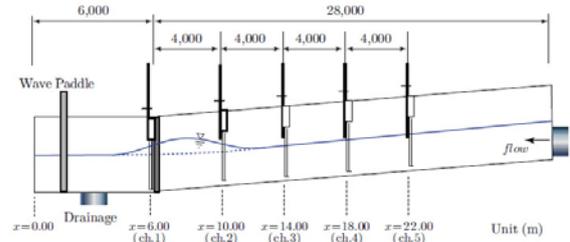


図-2.1 実験装置の概要

表-2.1 実験条件の一覧

Run	<i>i</i>	$D_M$ (m)	$q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Fr_M$	$H_T$ (m)	$T_T$ (s)
1	250	0.30	0.074	0.29	0.05	5.0
2		0.35	0.074	0.23		
3		0.40	0.074	0.19		
4		0.40	0.060	0.15		
5		0.40	0.040	0.10		
6		0.40	0.020	0.05		
7		0.30	0.000	0.00		
8		0.35	0.000	0.00		
9		0.40	0.000	0.00		
10	750	0.30	0.043	0.17	0.05	5.0
11		0.35	0.043	0.13		
12		0.40	0.043	0.11		
13		0.30	0.000	0.00		
14		0.35	0.000	0.00		
15		0.40	0.000	0.00		

勾配区間には最長周期10秒、造波可能最大水深0.8mのコンピュータ制御のパドル型造波機を備えている。

水位変化の計測は、図-2.1のとおり配置された容量式波高計（ケネック製）を用いた。計測時間間隔は0.02秒を設定した。

### 2.2.2 実験条件

実験条件は、表-2.1に示す15通りを設定した。不等流場は、河床勾配*i*に1/250、1/750の二つを設定し、この河床勾配に対して下流端水深 $D_M$ に0.30、0.35、0.40mの3つと表-2.1に示した流量 $q$ を組み合わせ形成している。また、入射波が流れから受ける影響を相対的に把握することを目的に静水時の実験も併せて実施した。

ゲート急開などによる造波では波形の再現性の保持や制御が難しいため、下流端から入射する波の造波には図-2.1内のパドル型造波機を用いた。入射波の波形は $\sin^2$ の上に凸の半周期の孤立波型とし、この波形の目標最大波高 $H_T$ を0.05m、周期 $T_T$ を5秒とした。なお、本文における周期の定義は、定常流水位が一度隆起し再び定常水位に戻るまでの時間を意味する。

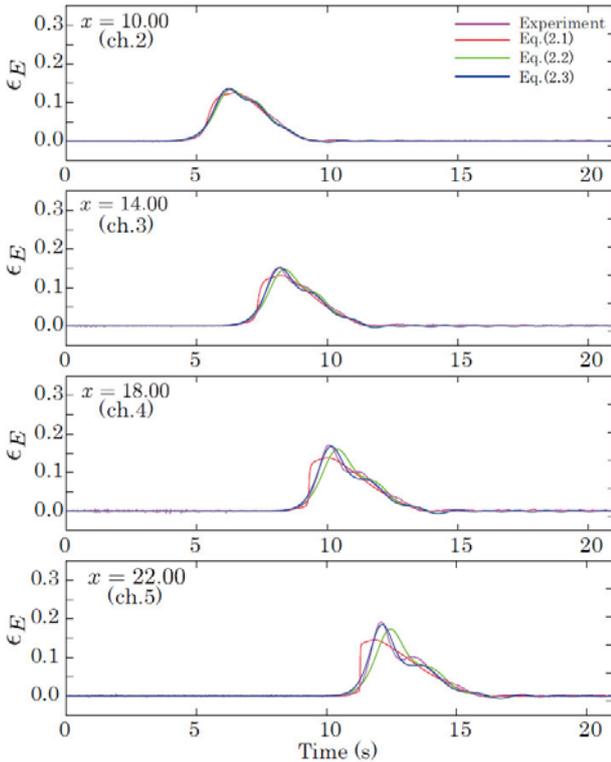


図-2.2 水理実験と数値解析による再現計算結果の時間波形図 (Run- 9 :  $i = 1/250$ ,  $q = 0.0$ ,  $D_M = 0.40$ )

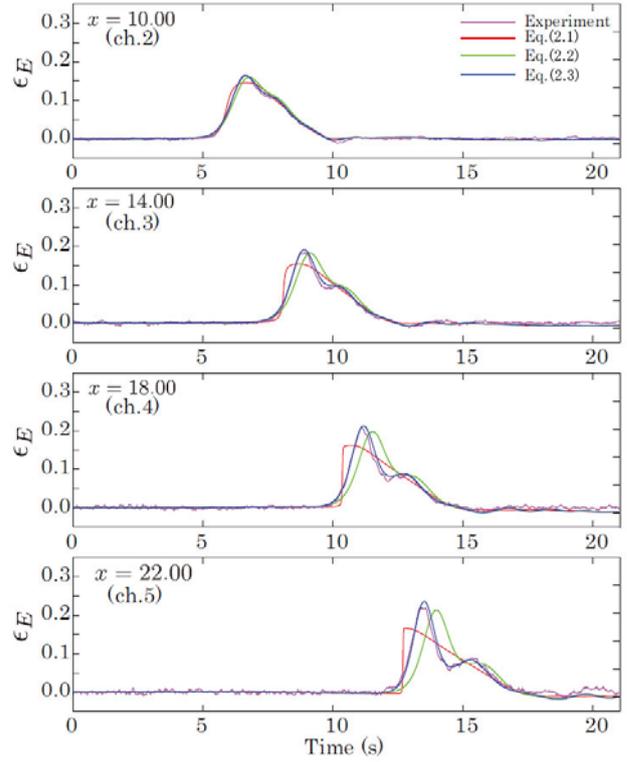


図-2.3 水理実験と数値解析による再現計算結果の時間波形図 (Run- 4 :  $i = 1/250$ ,  $q = 0.060$ ,  $D_M = 0.40$ )

今回の実験におけるManningの粗度係数は0.020～0.022である。これは各流量毎に縦断方向に4m間隔で4点の定常水位をポイントゲージで計測し、これらの縦断水位分布がそれぞれ再現できるようにManningの粗度係数を変化させる不等流計算を行い推定したものである。なお、水路底面の材質は敷設された人工芝である。

### 2. 2. 3 実験結果

実験結果のうち、時間波形としてとりまとめたもの一例が図-2.2～2.4、各計測地点における水位上昇率と初期水深および $Fr$ 数に着目して整理したものがそれぞれ図-2.5、2.6である。なお、碎波の発生については入射波の遡上を目視で追跡して確認した。その結果、全実験条件ともにいずれの計測地点においても碎波の兆候は全く見られなかった。

#### (1) 時間波形の特性

まず、入射波の遡上に伴う波形の変形であるが、実施したいずれの実験条件ともに不等流場を遡る過程において明瞭に波形が変形して、1つの波峰が2つ以上に分裂するいわゆる波数分散現象が生じた。この現象が

主な原因となり入射波の波高は上昇する。図-2.2～2.4は順に流れが強くなっている。入射時に一山だった $\sin^2$ 波は少なくとも二つ波峰を生成していることが分かる。しかも、流れが強いほどに波峰間距離は長くなる。

つぎに、入射波の遡上速度であるが、流れの影響を受けて低下する。紙面の都合で詳細は割愛するが、波速の低下は流れの影響だけでなく、分散波列の形成からも少なからず影響を受けていた。

#### (2) 波状段波への遷移に伴う水位上昇率

一般に浅水波に分類される波動現象では伝播過程において浅水変形により波高、波形がともに変化する。また、流れ場中の波動は流れの有無により波形の変形量や変形速度が大きく異なる。そこで、各地点の水位上昇率と $H_T/D(0, x)$ 、および $Fr$ 数との関係を図-2.5 a)、b)と図-2.6に示すとおり調べた。図-2.5 a)、b)はそれぞれ水路床勾配を1/250、1/750としたもので、同図中の赤、青で流量の有無を分類し、赤が流量なしの $q = 0.0$ 、青が流量ありの $q = 0.043, 0.074$ の場合の結果である。また、プロットマークは $x = 6.0 \sim 22.0$ の計測値を順に繋ぎ、その変化過程を把握できるように

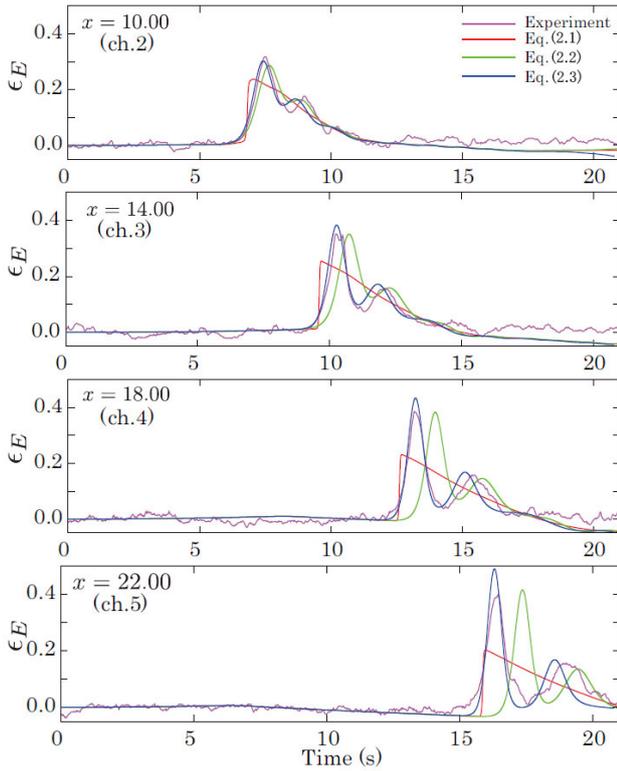
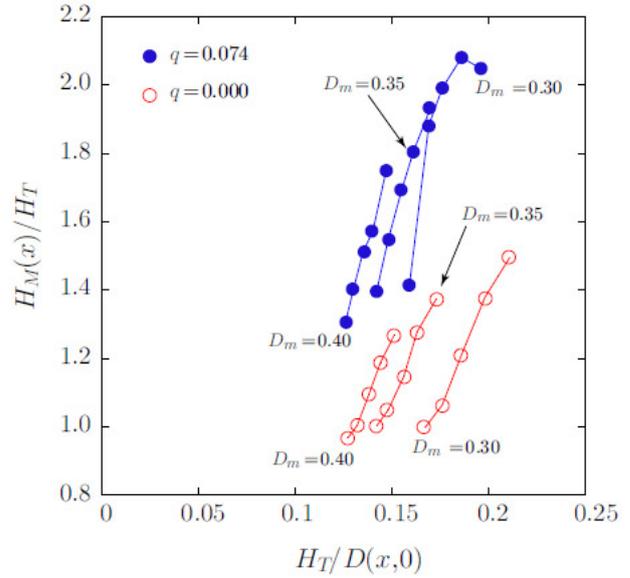


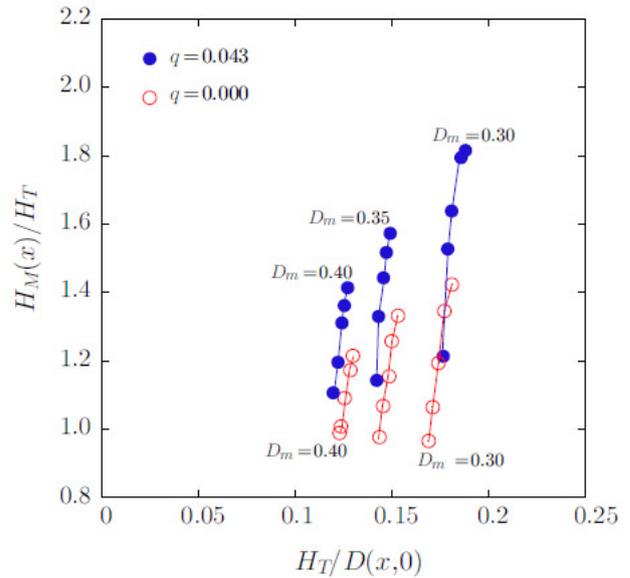
図-2.4 水理実験と数値解析による再現計算結果の時間波形図 (Run- 1:  $i = 1/250$ ,  $q = 0.074$ ,  $D_M = 0.30$ )

している。一方で、図-2.6 は各計測地点の初期水深に対する  $Fr(x, 0)$  と水位上昇率との関係を示している。これらの図における水位上昇率は  $H_M(x)/H_T$  として求めた。ここで、 $H_M(x)$  は  $\eta_M(x, t)$ 、 $\eta(x, 0)$  として算出された計測時間内における各計測地点の水位の最大変化量である。なお、同じ下流端水位  $D_M$  にもかかわらず、流量の有無により一点目の  $x = 6.0$  の値が異なるのは造波地点からここまでの間に波形が変形したためである。

これらの図のとおり、流量が無い場合における水位上昇率は少なくとも1.2程度、流量がある場合では少なくとも1.4程度、最大では2.0程度にまで達していたことが分かった。これらの結果は、浅水変形と波数分散現象の両者の重複によりもたらさせているものと考えられる。また、流れがある場合では、より短い遡上距離の間に水位上昇率が大きく変化し、Fr 数が0.35程度、初期波高水深0.15程度の水理条件ですら入射波高が2倍程度にまで達する可能性があることが示された。なお、発達から減衰に至る経過を捉えられたのは図-2.4に示した条件だけであった。他の条件は発達過程のみを捉えたものである。本研究で対象とする波



a)  $i = 1/250$



b)  $i = 1/750$

図-2.5 無次元初期水深に着目した水位上昇率

動現象の波高は流れの影響を受けて減衰が生じることがあり、これについては今後、計測区間を延長して調べる必要がある。

## 2.3 波状段波の数理モデル

### 2.3.1 支配方程式

段波の波頭部で見られる波状性は、水面の曲率が大きくなり生じた重力加速度に影響を及ぼす規模の鉛直

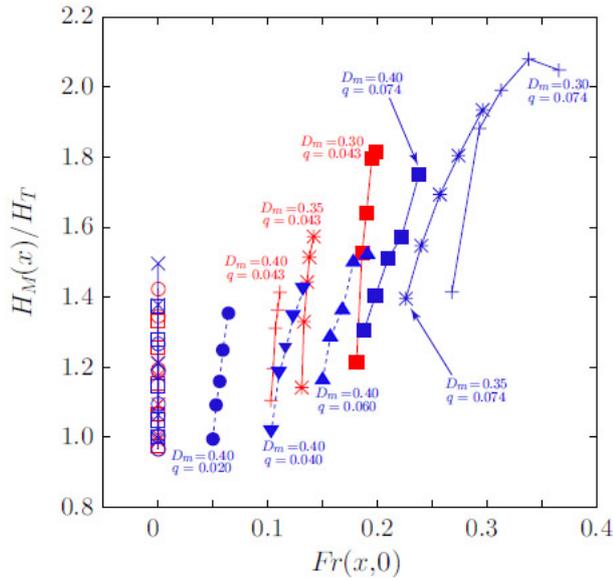


図-2.6 Fr 数に着目した水位上昇率

方向加速度がもたらすものである。このため、河川流の解析に頻用される静水圧を仮定して導かれる、

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\tau_0}{\rho} \quad (2.1)$$

と書かれる浅水理論は、同現象を理論的に正確に記述をすることができない。ここに、 $M$ は流量フラックス、 $t$ は時間座標、 $x$ は流下方向座標、 $D$ は水深、 $g$ は重力加速度、 $h$ は定常水深、 $\eta$ は水位である。この理論式に対して staggered 格子を用いた数値計算では波頭部に高波数成分が顕れる。これは打ち切り誤差によるもので、波状性を伴う段波の波高や波速ともに物理的に正しく評価することができない。

これに対して、浅水理論に鉛直方向加速度の影響を近似的に考慮した Boussinesq 系方程式がある。これまでにいわゆる修正 Boussinesq 方程式と呼ばれる方程式が数多く提案<sup>11)12)13)14)</sup>などされている。波状性段波の解析では支配方程式にこのような Boussinesq 系方程式を適用する必要がある。安田らはゲート急閉に伴い生じる波状段波の解析にあたり、積分型の Peregrine の式<sup>11)</sup>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} - \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2.2)$$

を用いることで、実用上十分な精度が得られることを示している。なお、Peregrine の式には河床勾配に関

する微分項が本来含まれているが、 $1/20$  よりも水底勾配が緩やかに場合ではその寄与度が小さいとされている。このため、本研究でも無視している。

式(2.2)は  $Ur$  数が小さい場合として導出されているため、有限振幅性が著しい場合では波高、波速ともに精度が低下する。これに対して、後藤<sup>12)</sup>は  $Ur$  数が大きい場合、すなわち有限振幅性が無視できない場合の方程式を提案している。この方程式では、式(2.2)と比べて、分散項に高次の非線形項が含まれているが、本文で対象とした水理実験では波高水深比が0.3前後であることから、これらの非線形項を無視すると、

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{D^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} - \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2.3)$$

簡便化された後藤の式を得る。連続の式は、いずれの運動の式に対しても

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

である。次章において、これらの式に基づく再現計算を実施し、その妥当性について検証する。

### 2.3.2 数値解析法

前述の方程式のうち、式(2.2)、式(2.3)の Boussinesq 系方程式の数値解析法には、計算精度と計算効率の両立および多次元解析への拡張が容易な差分スキームである2段階混合差分<sup>15)</sup>を適用した。移流項の計算は、2次精度中央差分、3次精度風上差分のそれぞれで行った。一方で、式(2.1)の数値計算は staggered Leap-frog と1次精度風上差分で行った。ただし、この計算法では段波の波頭部において高周波成分が発生し、式(2.2)、式(2.3)との波高比較などが困難となる。このため、この高周波成分の除去を目的とした4階の人工粘性項を導入している。この人工粘性項の粘性係数は、高周波成分の除去にのみ作用するように試行錯誤で選定した。

## 2.4 水理実験の再現計算

### 2.4.1 初期条件、境界条件

初期条件は、水位分布を与えるものとし、上流端からの流量の供給がある場合には不等流計算を実施して縦断的な水位分布を定めた。境界条件は、上流端境界条件として流量の供給がある場合には定常流量を与え、下流端境界条件は  $x = 6.00$  の計測波形を強制入射とし

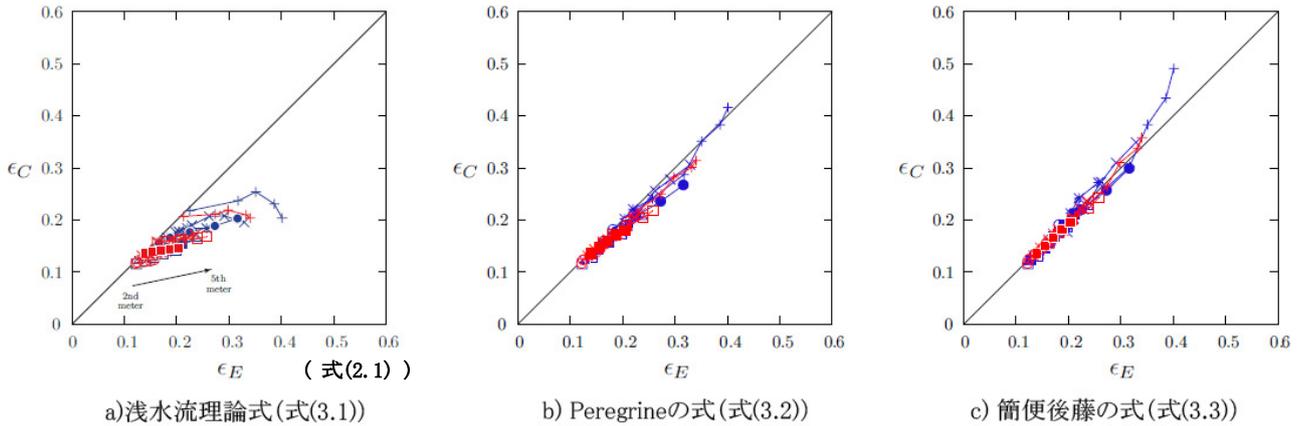


図-2.7 実験値と計算値の最大波高の比較

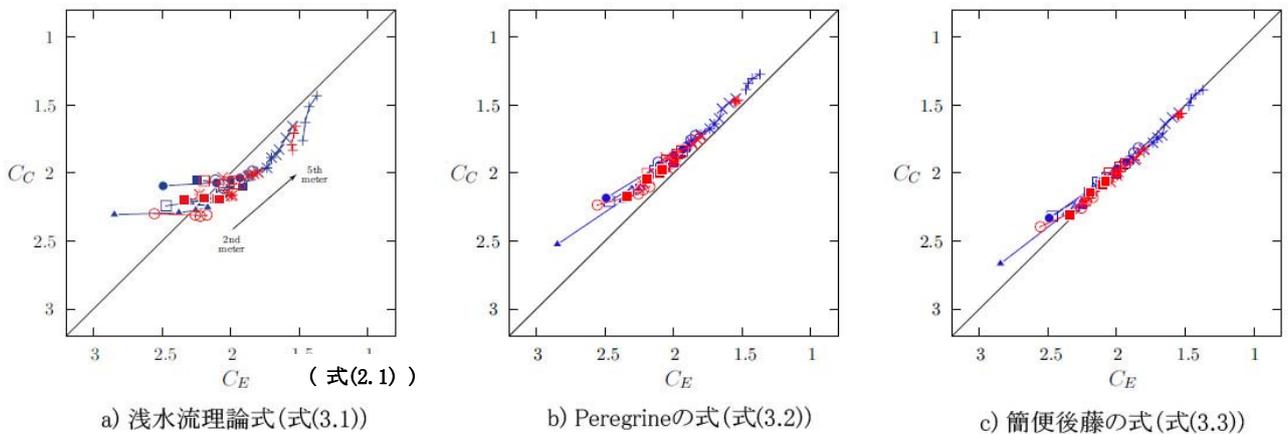


図-2.8 実験値と計算値の波峰移動速度の比較

て与えている。空間格子間隔  $\Delta x$ 、時間格子間隔  $\Delta t$  はそれぞれ0.10m、0.001 秒とした。

なお、数値計算は1つの実験条件に対し、式(2.1) と式(2.1) に前述の人工粘性を考慮した場合、式(2.2)、式(2.3) をそれぞれ2次精度中央差分、3次精度風上差分で計算した場合の合計6パターンを実施している。計算結果の比較をしたところ、式(2.1) の計算に関しては波頭部での高周波成分のみが適切に除去できていること、式(2.2)、式(2.3) の計算のいずれにおいても2次精度中央差分と3次精度風上差分では最大水位や段波の到達時間において差異はほとんど無いことが確認された。このため、図-2.2~2.4 では人工粘性を考慮した式(2.1)、3次精度風上差分を適用した式(2.2)、式(2.3) の計算結果のみを掲載した。

### 2.4.2 計算結果

3つの実験条件における実験値と計算値を時間波形

として比較したものが図-2.2~2.4 である。第一波峰は式(2.3) を適用した場合、かなりの精度で計算できることが分かる。一方で、第二波峰に関しては波高、移動速度ともに十分に再現できないことが多かった。

実施したすべての水理実験と数値解析における最大波高と波峰移動速度の比較を図-2.7、図-2.8にとりまとめた。図-2.7、図-2.8では、実験条件毎に  $x=6.0 \sim 22.0$  地点の値が左から右の順に連ねられている。青線が1/250、赤線が1/750の値を示している。

まず、最大波高に関しては図-2.7 から分かるとおり、同図a) に示した浅水理論の計算値はすべての計算条件で過小評価となることが分かる。この図から浅水変形の効果が計算されていることを見取することができるが、本研究において実施した水理実験はいずれも浅水変形だけでは説明できない水位上昇であったことが同図から理解できる。鉛直方向加速度を導入した式による計算値は、同図b)、c) に示したとおりいずれと

もかなり良好な精度で実験を再現することができるものの、同図b)の式(2.2)の計算値は、若干ながら全体的に過小評価となる傾向がある。これに対し、同図c)の式(2.3)の計算値はこの過小評価の傾向を全体にわたり改善できることが示された。ただし、図-2.4の条件に関しては伝播するに従い実験値と計算値の差異が拡大する結果となった。

つぎに波峰の移動速度については図-2.8のとおりからはから分かるようにやはり鉛直方向加速度を導入した式では実験値を良好に再現できる。同図a)に示されたとおり、浅水理論による計算値はいずれの実験条件においても全体的な傾向として早くなる結果が示された。このことは、実験値は波数分散現象の発生に伴う波速の低下が生じている一方、浅水理論の計算値ではこの物理機構が考慮されていないためであることから理解できる。同図b)に示したPeregrineの式による計算値は概ね良好であるものの、有限振幅性が考慮されていないことが原因となり、遅れ気味となった。同図c)に示した簡便後藤の式による計算値は一致しない実験条件を残しつつも全体的に精度が向上していることが分かる。

2.4.3 解析結果に基づく波状段波の考察

今回実施した水理実験において計測された波状段波の水位上昇は、浅水変形に基づくものと波数分散現象に伴う鉛直方向加速度の増大の両者が原因となっていると考えられる。このため、今度の検討の余地が残されているものの、波状性を伴う波動の解析においては少なくとも対象とする現象の波高水深比に応じた Boussinesq 系方程式が不可欠であると言える。

2.5 開発した数値解析モデルの実河川への適用

本章では、前章において開発した数値解析モデルを実河川に適用可能な形式に一般化し、更に平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震による津波の新釧路川への遡上現象へ適用を行い、その妥当性の検討を行った。

2.5.1 一般河道に拡張された提案モデルの支配方程式

連続の式は式(2.5)を、運動の方程式は式(2.6)を用いた。非線形分散波理論式は式(2.6)の右辺第一項とした。この項は、安田により提案されたPeregrineの式<sup>5)</sup>を一般河道断面へ拡張した式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial}{\partial x} (z+h) + \frac{g n^2 u^2 S}{R^{1/3}} = \frac{R^2}{3} \frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial x^2} \tag{2.6}$$

但し、 $A[m^2]$ :流積,  $Q[m^3/s]$ :流量,  $t[sec]$ :時間,  $x[m]$ :距離,  $z[m]$ :河床高,  $h[m]$ :水深,  $n[s/m^{1/3}]$ :マンニングの粗度係数,  $u[m/s]$ :流速,  $R[m]$ :径深,  $S[m]$ :潤辺。

計算方法は、従属変数を空間的に千鳥状(staggered)に配置し時間的に蛙飛び(leap-frog)に進める差分式で行った。非線形分散波理論式については、2段階混合差分法<sup>15)</sup>を適用し陰的に解いた。

2.5.2 計算条件

津波の河川遡上の計算は、詳細な観測データが存在した道東に位置する新釧路川を対象に行った。計算対象区間はKP1.0からKP11.0の計10kmをとし、2011年3月11日12時00分から3月12日12時00分の計24時間を計算対象とした。

計算河道条件は、新釧路川の2000年測量データを基にして、川幅を低水路幅、河床高を平均河床高として図-2.9、2.10に示す条件とした。なお、KP7.4からKP11.0の区間の測量データは無いため、線形で内挿補完して値を得た。計算時間間隔  $\Delta t$  は0.05秒、計算距離

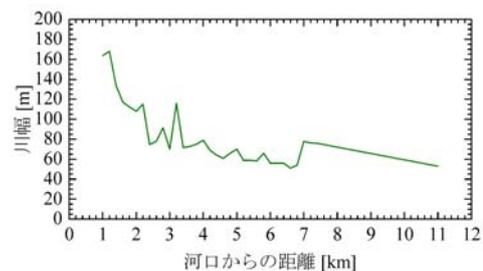


図-2.9 計算に用いた新釧路川の川幅 (2000年測量の低水路幅)

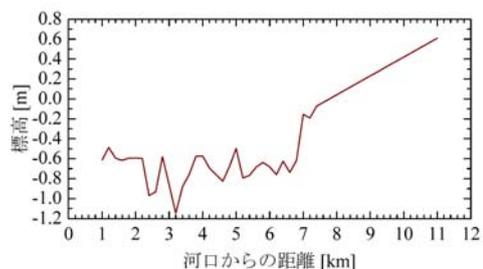


図-2.10 計算に用いた新釧路川の河床高 (2000年測量の平均河床高)

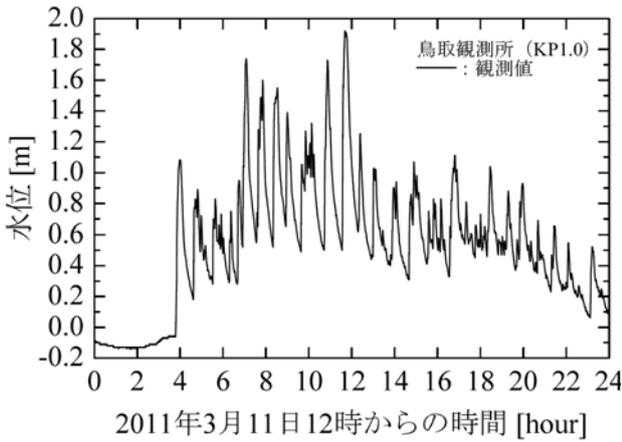


図-2.11 計算に用いた新釧路川の下流端水位

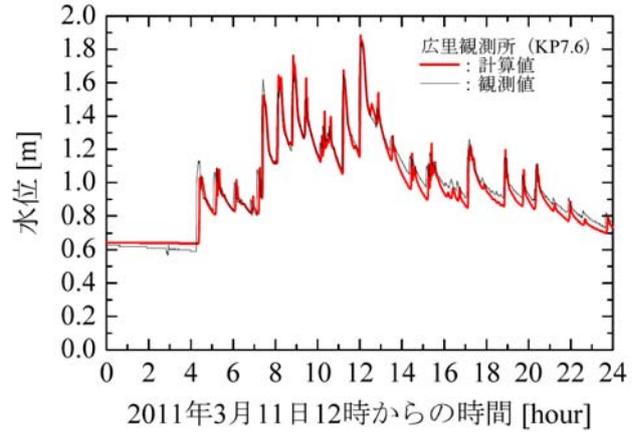


図-2.13 計算に用いた新釧路川の下流端水位

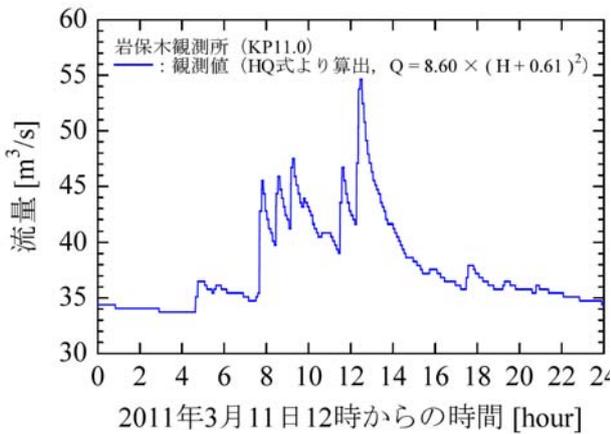


図-2.12 計算に用いた新釧路川の上流端流量

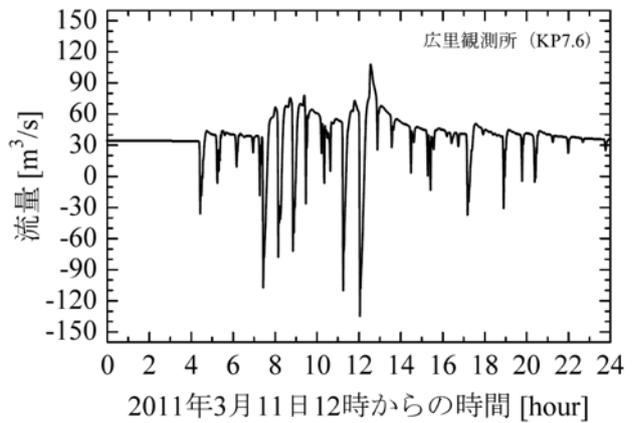


図-2.14 計算に用いた新釧路川の上流端流量

間隔  $\Delta x$  は 200m, マニングの粗度係数は 0.018 とした。上流の境界条件は 1 分毎の観測水位データを H-Q 式に代入し流量を算出して与えた。下流の境界条件は 1 分毎の観測水位データを与えた。計算に用いた境界条件を図-2.11, 2.12 に示す。

### 3.3 計算結果

新釧路川 KP7.6 に位置する 広里観測所 において、1 分毎の観測水位と計算水位を図-2.13 に示す。

図-2.13 より、計算値は観測値の水位変動を良く再現している。今回の計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約 5cm であった。

新釧路川 KP7.6 に位置する 広里観測所 における流量と流速の計算値を図-2.14 に示す。この図から、津波来襲前は順流流量  $34\text{m}^3/\text{s}$  であったが、津波来襲時では最大値でみると、順流流量  $108\text{m}^3/\text{s}$ 、逆流流量  $135\text{m}^3/\text{s}$  であり、通常時の流量の 3~4 倍の流量が流れていたことが計算結果から分かった。なお、新釧路川の豊水流量 (年間を通して 95 日間はこれを下回らない流量) は

$29\text{m}^3/\text{s}$  である。

### 2.5 おわりに

本研究により得られた結論は以下の通りである。不等流場を遡上する波状段波に関する水理実験を実施した結果、20m 程度の計測区間の範囲ですら、その最大水位変化量は、流れのない静水中においておよそ 1.4 倍、流れがある場合ではおよそ 2 倍程度まで増加することが明らかになった。

これらの実験の再現計算を 1 次元解析により行ったところ、通常の河川流の解析に適用される浅水流の式では波高は過小に、波速は過大に評価されることが示された。これに対して、鉛直方向加速度を導入した浅水理論式では波高、波速ともに良好に再現できることが分かった。つまり、波状性を伴う波動の解析におい

ては少なくとも対象とする現象の波高水深比に応じた Boussinesq 系方程式が不可欠であると言える。これは、実際的な津波の河川遡上の問題において言うなら、解析対象となる河川の平均的な水深と想定される津波の最大入射波高から採用すべき支配方程式を選択することを意味している。

また、開発した数値解析モデルを実河川への津波遡上現象に適用した。計算結果を観測所における水位記録と比較したところ、開発モデルにより水位変動の特徴を良好に再現できることが確認できた。今後も継続的に他の河川への遡上現象へ適用を行い計算精度を向上させ、より汎用的なモデルの開発を行う予定である。

### 参考文献

- 1) Favre, H. : Etude theorique et experimental des ondes de translation dans les canaux decouverts. Dunod, p. 150., 1935.
- 2) Keulegan, G.H. and Patterson, G.W. : Mathematical theory of irrotational translation waves, J. Res. Nat. Bur. Standards., Vol. 24, pp. 47. 101, 1940.
- 3) Johnson, R.S. : A non-linear equation incorporating damping and dispersion, J. Fluid Mech., Vol. 42, pp. 49. 60, 1970.
- 4) Johnson, R.S. : Shallow Water Waves on a Viscous Fluid - The Undular Bore, Phys. Fluids, Vol. 15, No. 10, pp. 1693. 1699, 1972.
- 5) Peregrine, D.H. : Calculations of the development of an undular bore, J. Fluid Mech., Vol. 25, pp. 321. 330, 1966.
- 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, 第160号, pp. 49. 58, 1971.
- 7) 松富英夫 : 移動跳水 (波状段波非) 発生条件の検討, 第33回水理講演会論文集, pp. 271. 276, 1989.
- 8) 佐藤道郎 : 不等流を遡る波の波高変化に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第242号, pp. 15. 29, 1975.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Peregrine, D.H. : Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp. 815-827, 1967.
- 12) 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.
- 13) Madsen, P.A. and Sorensen, 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.
- 14) 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.
- 15) たとえば, 後藤智明 : 2段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差, 津波工学研究報告, 第20号, pp. 13. 22, 2003.

### 3. 津波遡上に伴う氷板輸送に関する水理実験

#### 3.1 はじめに

大地震発生時に来襲する津波に関する研究はこれまで数多く行われてきているが、河川に遡上した津波の予測、及びその対策に関しては、その危険性が以前から指摘されてきたにも関わらず、未だ知見が非常に不足しているのが現状である。不等流場である河川内に浸入した津波は、波状性段波を形成しながら波頭部において急激な水位上昇が生じることが指摘されている<sup>1)</sup>。現行の河川堤防規模は、一般的な豪雨-洪水シナリオを想定して設計されているため、河道を遡上する津波に対して十分な防御効果を発揮できるかどうかは十分に検討されていないのが現状である。更に、北海道内の一部の河川は冬期間の気温の低下に伴い、河道内に河氷が形成される。**写真-3.1**は2010年チリ地震の影響を受け十勝川の氷板が揺動している様子<sup>2)</sup>である。このような結氷河川にさらに大きな津波が来襲した場合、津波はどのように遡上するのか、また津波により河氷がどのような挙動を示すのかはほとんど未解明であり、研究例も非常に少ない。実際に釧路市の春採川において、1952年3月十勝沖地震に伴う津波が結氷した春採川の河氷を壊しながら遡上したため、多数の氷板が家屋に被害を与えた事例がある。津波による氷板輸送の研究は高橋ら<sup>3)</sup>によるものがあるが、これは沿岸構造物へ遡上氷板が及ぼす影響に焦点を置いたものであり、その知見を氷板の河川遡上現象へ直ちに適用することは難しい。

そこで本研究では、河道内を遡上する津波と河道内に存在する氷板の相互作用、また氷板存在位置の水深と津波波高が氷板輸送過程及び氷板遡上距離に与える影響に関する知見の蓄積を目的として、薄い氷板が河

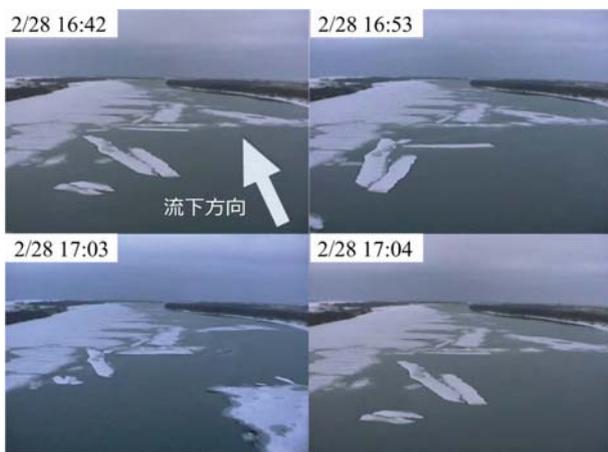


写真-3.1 十勝川における氷板揺動の様子(2010年2月撮影)

川水面上に存在する場合を想定した津波実験を実施した。そして入射波一定の条件で河道内縦断方向の氷板存在位置を変化させ、氷板輸送過程や氷板群の時系列的な拡散過程、そして最終的な遡上距離についての検討を行った。

#### 3.2 氷板を有する津波遡上実験の概要

実験水路は、全長34m、水路幅0.5m、水路勾配1/250の矩形断面を有する**図-3.1**の水路を用いた。実験条件は、上流からの流量無し、入射波の周期9秒、目標波高0.035m、造波板前の水深 $D_M=0.725, 0.80\text{m}$ とし、水路床の鋼製架台には人工芝が貼り付けられている。また水位変化を計測するため、 $x=5.0, 10.0, 15.0, 17.5, 20.0\text{m}$ 地点に容量式波高計を設置し、それぞれによる計測をCh.1~Ch.5とした。さらに実験水路の上方には2台のデジタルカメラを設置し動画撮影を行った。水路上部には下流端( $x=0.0\text{m}$ )を基準とした標定点を0.5mから1m間隔で撮影範囲内に設置しており、映像から津波や氷板の位置関係を読み取ることが可能となった。

実河川に存在する氷は、大別すると硬い氷板とその下に存在する軟らかい晶氷に分けることができる。本研究では、直接の被害につながる可能性が高いと想定される硬い氷板に着目した。そのため実験に用いた氷板は、ポリプロピレン製、1枚の厚さ $5\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ 、縦横 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、比重0.9程度である。なお、実河川においては上流からの流量が氷板輸送過程に無視できない影響を及ぼすことが考えられるが、水路実験によってその現象を再現することは困難が伴う。そのため本研究ではまず第一段階として、ごく基本的な津波と氷板輸送の相互作用を把握することを目的として上流か

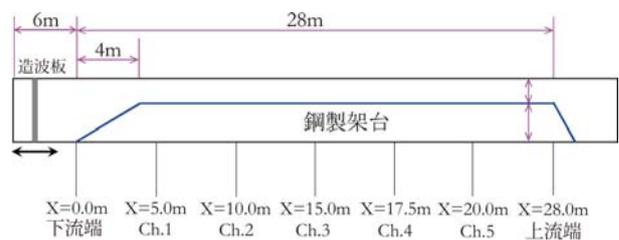


図-3.1 実験装置の寸法と波高計の設置位置

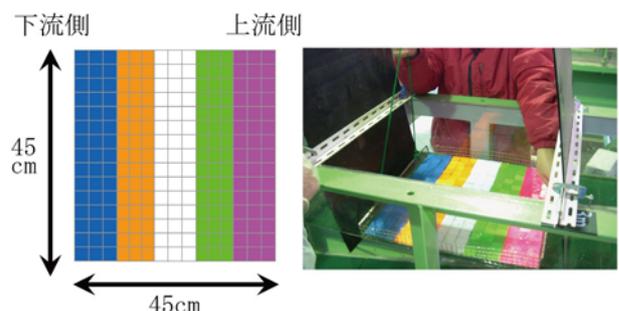


図-3.2 氷板模型の模式図と設置状況

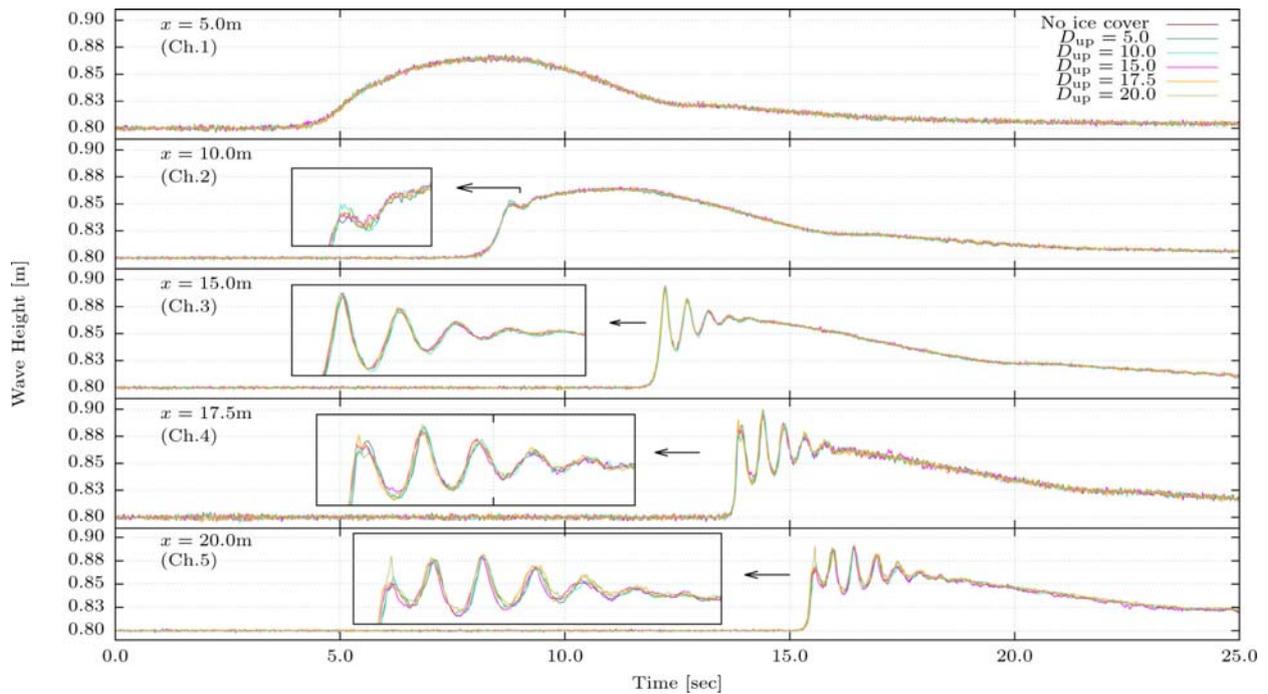


図-3.3 波高計各設置点で計測した時間波形 ( $D_M = 0.80\text{m}$ )

らの流量が無い静水中の条件とし、ほぼ同一形状の氷板模型を並べて、これを氷板群とみなした。

この氷板模型は上流側から順にピンク、緑、白、オレンジ、青に着色し、図-3.2に示すように縦15列・横15列の計225個を配置してこれらを氷板群（約45cm×45cm）とみなした。水路の下流端2m付近から21.5mまでの区間において、この氷板群の初期設置位置を50cm毎に変えて計40ケースの実験を行った。

### 3.3 実験結果

#### (1) 波高計の測定結果

まず氷板が無い場合、及び氷板群の上流側先端位置  $D_{up}$  が5.0, 10.0, 15.0, 17.5, 20.0mの各ケースについて、波高計のCh.1～5で計測された時間波形をそれぞれ図-3.3に示した。図において  $t=0.0\text{sec}$  は造波板が稼働を開始した時刻であり、 $t=25.0\text{sec}$  以降は最上流側のCh.5が水路上流端からの反射波の影響を受け始めるため図中には示していない。氷板を設置しない場合の波形は "No ice cover" として同図にプロットした。造波板によって上に凸の半周期の孤立波（津波）を発生させると、どのケースにおいても津波は水路を遡上する過程で同様の変形を起こした。すなわち、始め波峰の前後でほぼ対象だった波形は伝播しながら前傾化し、Ch.2のやや手前で一波峰だった入射波の波峰先端から新しい波峰が現れる（Ch.2）。その後も波数分散現象が継続したが、最先頭の波峰が自重を支えきれなくなることで、

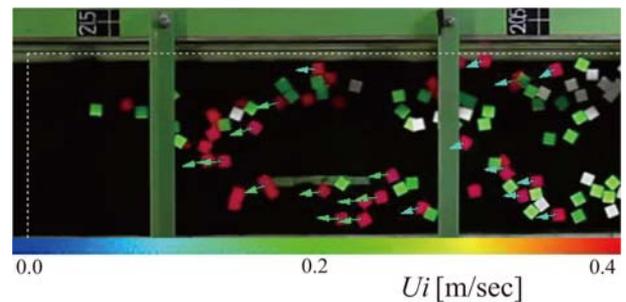


図-3.4 PTV解析で求めた氷板輸送速度 ( $t = 28.33\text{ sec}$ )

平均して約16.7m 地点で碎波を起こした。その後通過したCh.4でピークが鈍化していることから、Ch.3とCh.4の間で碎波を起こしていることが推察される。なお、この碎波現象は分散波の先頭波峰がわずかに崩れ波頭部に小さな凹凸を生じる程度のものであり、一般に沿岸部で生じる気泡を激しく混入するような碎波とは性質の異なるものである<sup>4)</sup>。Ch.4からCh.5まで移動する間には波峰のピークが減衰する様子が確認された。総じて、薄い氷板の氷板群が存在しても、また氷板が水路縦断方向のどの位置に存在していても、津波の時間波形に与える影響は非常に小さいと考えられる。言い換えると、氷板群の存在が津波の波高や波峰の移動速度に与える影響もまた小さいことがわかる。

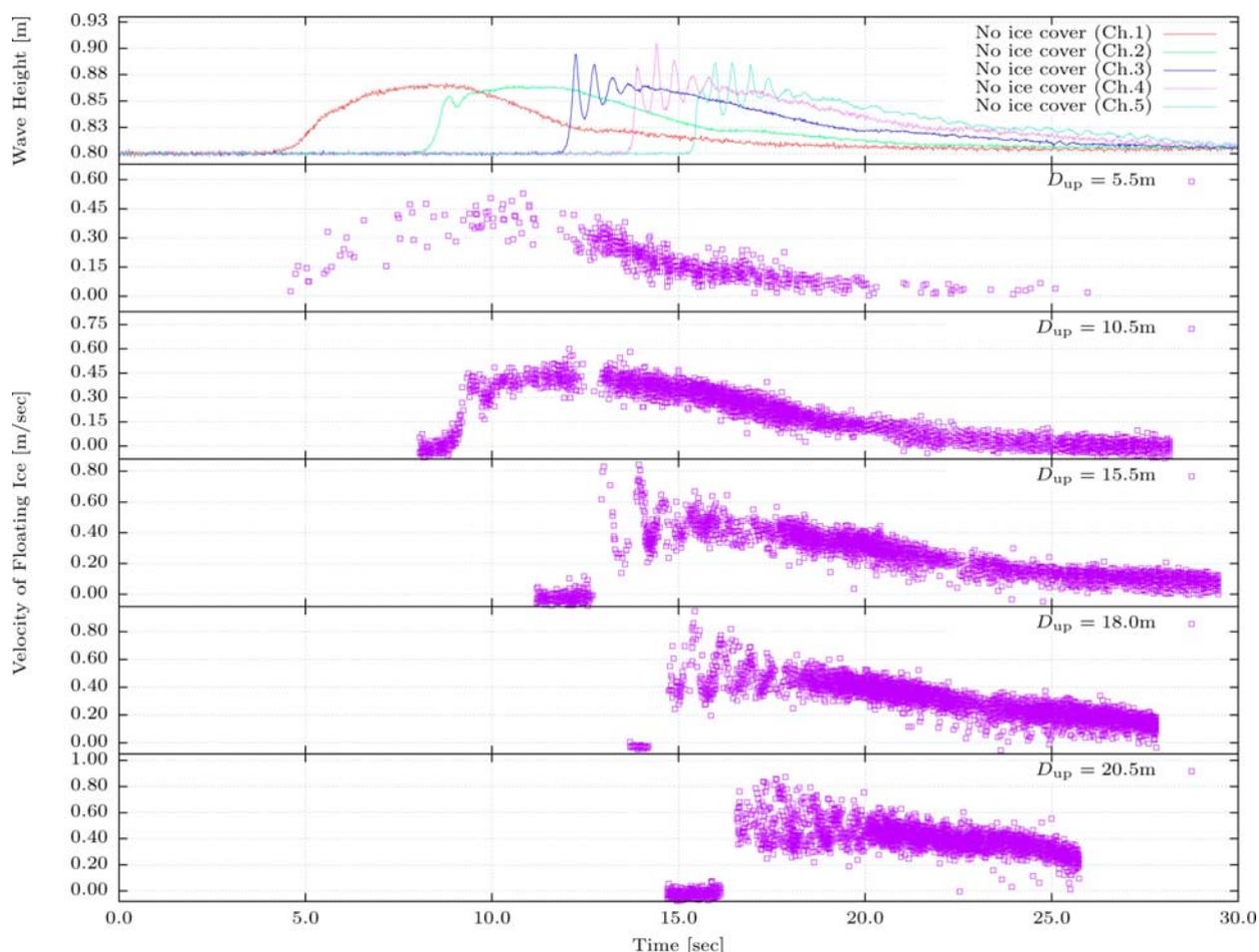


図-3.5 波氷板無しのケースの時間波形（最上段）及び、 $D_{up}$  の違いによる時系列的な氷板輸送速度の変化

## (2) PTV 解析による氷板輸送速度の検討

氷板の輸送速度  $U_i$  [m/sec] は、氷板の移動を前述の2台のカメラにて撮影・収録した後に連続画像をPTV解析することで求めた。画像解析にはDipp-Flow version 2.00（株式会社ディテクト）を用いており、同ソフトウェア上でレンズ歪み補正、時空間補正を行った。本研究では初期状態から上流側にあり、平均して遡上距離の大きいピンクに着色した氷板模型をPTV解析のトレーサー粒子とし、その速度の時系列変化を追跡した（図-3.4）。図-3.5に $D_{up}=5.5, 10.5, 15.5, 18.0, 20.5$ mの場合の、氷板群内で各氷板が持つ速度の縦断方向成分の時系列変化を示した。また比較のため、氷板無しのケースの時間波形を示した。 $D_{up}=5.5$ のケースで速度を抽出できた氷板が少ないのは、この場合の氷板同士が相対位置を変えないまま一つの大きな板の形で遡上したためである。トレーサーとなる氷板が互いに密着して周囲との色差が小さいとPTVでの解析は困難となる。途中13sec付近でトレーサーが増えるのは、この付近にある壁面の凹凸に氷板が接触し、拡散範囲が広がった

ためである。 $D_{up}$ が10.5m以上のケースでは、初期から比較的多くのトレーサーを抽出することができた。加えて氷板輸送速度の時系列変化は、津波遡上に伴う分散波形状と酷似していることがプロットから読み取ることができる。前項において、Ch.2からCh.3にかけて波数分散現象と先頭波峰の発達過程、及びCh.4～Ch.5にかけてのピーク波峰の減衰を指摘したところであるが、 $D_{up}=5.5\sim 10.5$ 、 $D_{up}=18.0\sim 20.5$ の氷板輸送速度の時系列変化にも同様の傾向を見出すことができる。氷板の輸送速度は津波波形に追従する形で変動しながら、氷板が輸送されていくものと考えられる。

## (3) 波峰移動速度と氷板拡散過程の関係

津波の伝播速度と氷板拡散過程との関係を検討するには、時系列的な波峰移動速度が必要となる。波高計のデータのみからこれを算定することは困難が伴うため、本研究では1次元不定流計算による津波遡上のシミュレーションを行い、波高計における時間波形と計算結果を比較しつつ、波峰の移動速度を簡易に求め

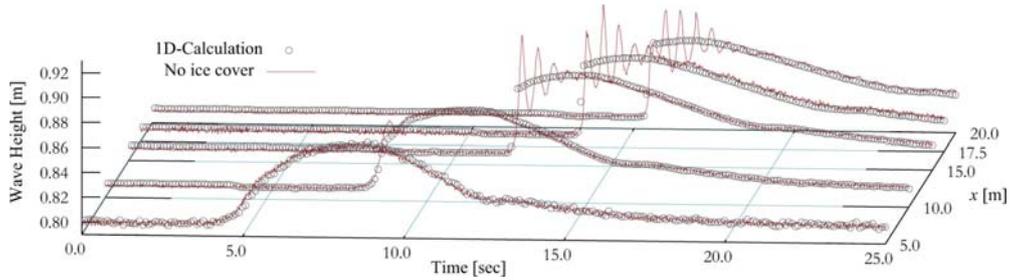


図-3.6 波氷板無しのケースの時間波形（最上段）及び、 $D_{up}$  の違いによる時系列的な氷板輸送速度の変化

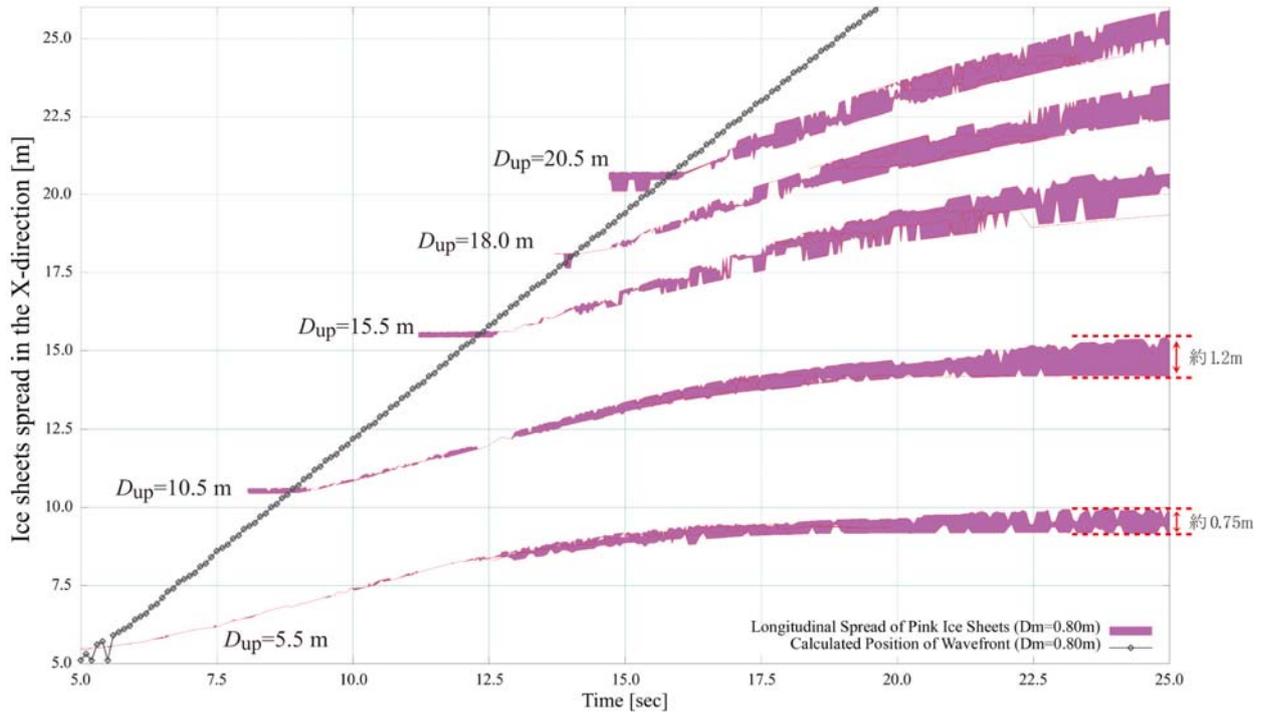


図-3.7 PTV 解析により求めたピンク色氷板模型の時系列的な拡散範囲と先頭波峰位置との比較

た。1次元計算においては、縦断的な河床標高、川幅 0.5m、粗度係数を一定値の0.014、Ch.1の波高計データを下流端境界条件として与えた。また、実現象とは異なるが、計算の安定化を図るため上流から流入量  $0.001\text{m}^3/\text{sec}$  を与えた。また計算時間間隔は0.001sec、計算点間隔は0.1m とした。図-3.6に1次元計算波形とCh.1～5の測定波形を示しているが、波数分散こそ表現できていないものの、概ね良好に波峰の移動速度を追跡できていると言える。この1次元計算によって求めた波峰の移動速度と、 $D_{up}=5.5, 10.5, 15.5, 18.0, 20.5\text{m}$  の場合における氷板拡散範囲の関係を図-3.7に示した。図より津波はほぼ等速度で遡上していることがわかるが、氷板の拡散過程は波数分散の前後で大きく異なっていることがわかる。 $D_{up}=5.5, 10.5\text{m}$  のケースでは、始め氷板群は互いに接触しながら当初の形を維持しつ

つ遡上するため拡散幅は狭いが、側壁面の摩擦等が原因で次第に拡散を起こした。本実験の水路内ではほぼ氷板遡上過程が完結したこれらのケースについて、最終的な拡散範囲はそれぞれ約0.75mと約1.2mであり、上流側 $D_{up}=10.5$ のケースの方が最終的な遡上距離も大きいことがわかる。一方で波数分散以後の氷板輸送では津波の通過直後から氷板は大きく拡散しており、かつ25.0secの段階でも $D_{up}=20.5$ のケースは図-3.5より0.20～0.35 m/sec程度の流速を持つ氷板が多い。より延長の長い実験水路を用いた場合はさらに遡上距離が延びることが予想される。

#### (4) 氷板遡上距離に関する検討

氷板群が河口域に存在するか河川上流域に存在するかの初期位置の違いによる氷板の河川遡上距離の違い、

および、津波遡上前の水深が深いか浅いかの初期水深の違いによる氷板の河川遡上距離の違いに着目し、なお、本検討のみ $D_M=0.725, 0.80\text{m}$ の2通りについて実験結果を整理した。

氷板群の上流側先端の初期位置を横軸に取り、縦軸に氷板の遡上距離を取り、**図-3.8**に示す。なお、図には入射波の砕波地点、入射波が水路の上流端に到達し反射した波が氷板群に影響を与え始める地点を示した。ドット色は、氷板の着色と同色である。**図-3.8**より、氷板群が上流に位置するほど、氷板の遡上距離は長くなり、水深が浅いほど遡上距離は長くなる。また、最大到達距離を記録した氷板の殆どは、上流側に配置したピンクであるが、砕波後には、緑、白、オレンジと逆転しているケースがみられた。

水深と氷板の遡上距離の関係について、反射波の影響を受けていないデータを用いて、横軸に水深・波長比、縦軸に氷板遡上距離・氷板幅比を取り**図-3.9**に示す。なお、 $H$  [m]は各地点の水深とし、 $L$  [m]は波長で式(3.1)から求めた。

$$L = CT \tag{3.1}$$

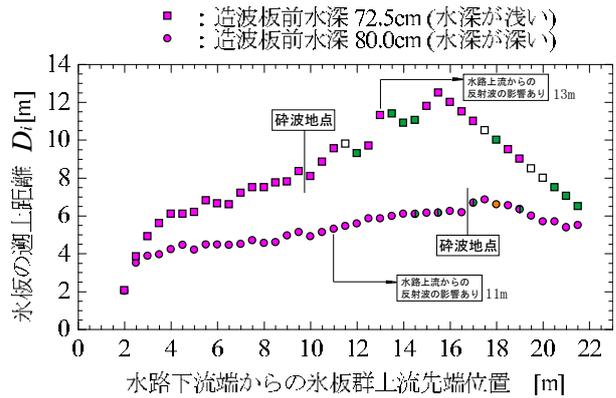
$$C = \sqrt{gH} \tag{3.2}$$

ここで、 $C$  [m/s]:波速、 $T$  [s]:周期で9、 $g$  [m/s<sup>2</sup>):重力加速度で9.8である。また、 $D_i$  [m]を氷板の遡上距離とし、 $B_i$  [m]を実験で用いた氷板の幅として0.03mを与えた。

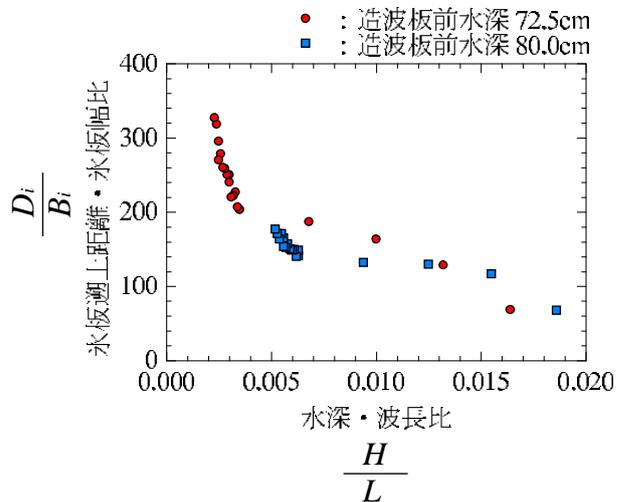
**図-3.9**より、水深・波長比が小さいほど、氷板遡上距離・氷板幅比は大きい。上流からの流れがない静水面条件における本実験において、水深が浅い地点に津波が来襲した場合、その地点にある氷板は、水深が深い地点に比べて、上流へと遡上される可能性が高いことを示唆している。しかし、河水の大きさ、津波の最大遡上距離、上流からの流れ、砕波が氷板へ与える影響などにより、この現象は異なることが推察されるが、上流からの流れがない静水面という条件においては、定性的な知見が得られた。

### 3.4 まとめ

本研究では、津波が河川を遡上し、その過程で氷板を輸送する際の波峰の移動速度と時系列的な氷板移動速度の特性についての検討を行うことを目的に、氷板模型を設置した津波遡上実験を行い、波高計による波高分析及び撮影動画を用いた画像解析を行った。その結果、薄い氷板が水面上に存在している場合は、氷板



**図-3.8** 初期水深の違いおよび氷板群の設置位置の違いによる氷板の遡上距離



**図-3.9** 水深・波長比と氷板遡上距離・氷板幅比

が津波そのものの挙動に与える影響が少ないこと、そしてそのような条件の下では氷板の輸送速度は時系列的に、津波波形と近い形で変動すること、更に定性的に氷板存在地点の水深が小さいほど、遡上距離が大きくなることが明らかになった。

なお本実験は、津波と氷板輸送に関する基礎的な知見を得るためのものであり、上流からの流量が無い静水中の条件で行っている。また、壁面摩擦や波高計の存在が流れ及び氷板拡散過程に及ぼす影響まで踏み込んだ検討はできておらず、今後実験条件の設定方法に関して継続的な検討が必要である。更に氷板が今回の実験よりも厚い場合、あるいは面積が大きい場合に対して、津波の伝播速度と氷板輸送過程の関係の変化について今後検討を加えていきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) Hiroyasu Yasuda: One-Dimensional Study on Propagation of Tsunami Wave in River Channels, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.2, pp.93-105, 2010.
- 2) 矢野雅昭, 吉川泰弘, 石谷隆始, 高橋一浩: 2010年2月28日に発生したチリ沖地震津波の結氷河川における河川遡上に関する現地観測, 寒地土木研究所月報, 第693号, 2011.
- 3) 高橋良正, 片山晃, 岡本智, 佐伯浩: 氷板の津波による陸上への遡上機構に関する実験的研究, 第10回寒地技術シンポジウム, pp.419-423, 1994
- 4) 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, 地震工学論文集, pp.890-894, 2007.

## 4. 遊水地による津波低減効果

### 4.1 はじめに

近年、太平洋、インド洋において、地震による津波の被害が確認されている。2004年スマトラ島沖地震では、アジア、アフリカ地域12カ国に被害を及ぼし、20万人以上が死者、行方不明者となり、230万人が被害を受けたといわれている<sup>1)</sup>。特にインドネシアのスマトラ島北部に位置する都市のバンダ・アチェでは、11万人の命が犠牲となり、70万人が家を失う甚大な被害であった<sup>2)</sup>。また、この津波により、ライフラインとして重要な橋梁が多数破壊されている<sup>3)</sup>。

津波対策として、大規模な被害が予想される沿岸部に、防波堤を設置するなど考えられるが、河口部では河川流水や土砂が流下するため、防波堤の設置は困難と考えられる。また、津波は河川を遡上するが、波数分裂することにより、波高が増大することが既往研究で指摘されている<sup>4)</sup>。そのため、波高が増大した津波が、落橋被害や、漂流物による橋の損傷を助長することも考えられる。また、河川を遡上する津波は、陸上を遡上する津波よりも伝播が速い。そのため、河川堤防が脆弱な場合、河道を遡上した津波が、陸上を遡上する津波よりも先に被害を及ぼす可能性がある。このような河川を遡上する津波対策として、落橋防止措置を施す他に、より効果的な対策として、津波自体の波高、エネルギーを減少させることが考えられる。波高を低減できれば、津波の遡上速度を遅延できることも考えられ、より多くの避難時間を得ることもできる。しかし、このような対策を検討した研究は十分には行われていない。

本研究の目的は、河川を遡上する津波対策として、河道下流部に遊水地を設け、遡上する津波を横越流させ、波高とエネルギーを減少させる対策を提案し、水理実験により、その効果の検討を行うことである。

### 4.2 水理実験

#### (1) 対象河川

本実験では、図-4.1に記すスマトラ島北部の都市バンダ・アチェ東部に位置する河川を対象とし、実際の橋梁位置を基に、実験水路での遊水地位置、水位測定地点の設定を行った。対象河川の河道幅、保全対象の橋梁位置を、Google Mapにより概略で把握した。その結果、堤防間の距離は約300mであり、低水路幅、片岸の高水敷幅は約100mであった。また、保全対象の

橋梁は、河川兩岸の市街地を結ぶKP3.9付近の橋梁と、そ

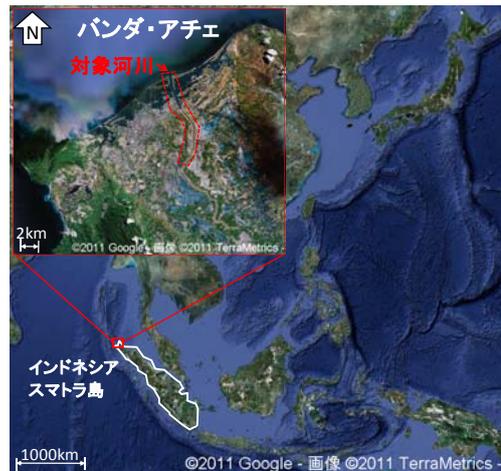


図-4.1 対象河川箇所図 (Google Map に加筆)

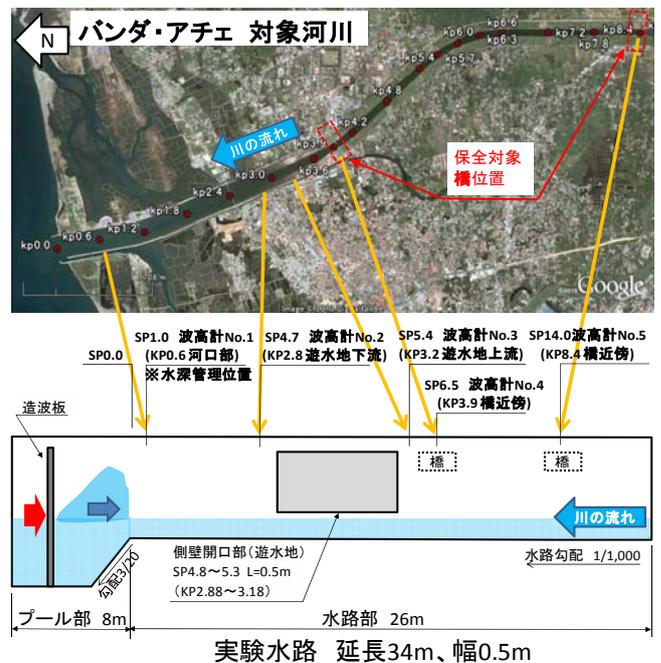


図-4.2 実験水路概要

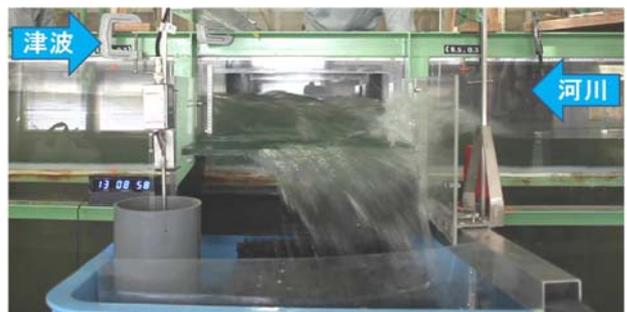


写真-4.1 水路を遡上する津波の開口部からの横越流状況

の一つ上流の KP8.4 付近の橋梁とした。なお KP (キロ

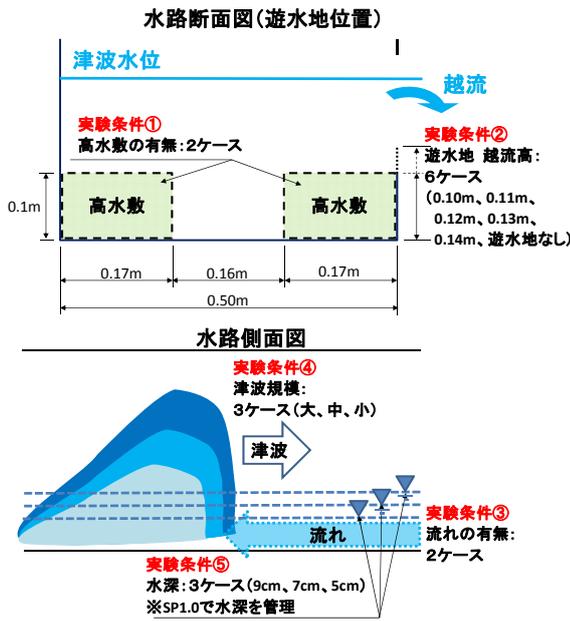


図-4.3 実験条件

ポスト) とは、河口からの距離で単位は km である。

2004 年スマトラ島沖地震において、バンダ・アチェに襲来した津波高は、海岸で 6~12m であり、海岸から 1.0~1.5km 内陸の市街地で 4~5m 程度であったことが確認されている<sup>5)</sup>。このため、本実験では、対象河川の KP3.9 付近の橋梁位置において、最大 5m の津波が襲来した場合を想定した。

(2) 実験水路

実験に用いた水路を図-4.2 に示す。水路は、全長 34m、水路幅 0.5m であり、水路部 26m、下流端のプール部 8m で構成され、水路勾配は 1/1,000 とした。実験水路における縦断方向の基準点は、プール部と水路部の境界とし、この基準点から上流方向の距離を SP (単位: m) とした。

実験水路における遊水地は、水路を遡上する津波が、水路側壁に開口部がある区間 (以下、遊水地) を通過し、横越流させることで再現した (写真-4.1)。遊水地の位置は、実験水路上で保全対象の橋梁位置 SP6.5 (KP3.9) の下流とし、実験水路の鋼製骨組みを回避し、設置区間 SP4.7 (KP2.88)~SP5.4 (KP3.18) の延長 0.5m (実物延長 300m) とした。実験水路における津波の造波は、プール部で造波板を押し出すことで行った (図-4.2)。また、遊水地への越流水は、実験水

路外の水槽に貯留し、水槽内の波高計でその量を計測した。

(3) 実験水路の縮尺

実験水路の水平方向の縮尺は、水路の幅が 0.5m であり、対象河川の堤防間の幅が約 300m であることから、 $\lambda_{xy} = 0.5m \div 300m = 1/600$  となる。一方、鉛直方向の縮尺は、1/600 では水深が小さく、粘性の影響が大きくなり、正確な結果が得られないことが考えられる。そのため、鉛直・水平方向の縮尺が異なる歪み模型とした。実験水路上の保全対象の橋梁位置 SP6.5 に造波できる最大波高は 0.1m 程度であり、これを本実験の最大の津波規模条件の波高 5m に対応させると、鉛直方向の縮尺は  $\lambda_z = 0.1 \div 5.0m = 1/50$  となる。なお、流速縮尺は、 $\lambda_v = \lambda_z^{1/2} = (1/50)^{1/2} \approx 1/7.07$  となり、時間縮尺は  $\lambda_t = \lambda_z^{-1/2} \times \lambda_{xy} = (1/50)^{-1/2} \times 1/600 \approx 1/84.9$  となる。また、後述する波高計の観測間隔 0.05 秒は、実物では  $0.05 \times 84.9 \approx 4.2$  秒となる。

津波のフルード数は式 (4.1) (4.2) に示すとおり<sup>6)</sup>、平常潮位を基準とした津波による海面変動と水深の比率で表される。つまり、鉛直方向の縮尺を満たせば、津波のフルード数を満たすことになる。

$$C = \dots \quad (4.1)$$

$$= \dots \quad (4.2)$$

$v$ : 流速、 $C$ : 波速、 $g$ : 重力加速度、 $\eta$ : 平常潮位基準での津波による海面変動、 $h$ : 水深、 $F_r$ : フルード数

(4) 測定項目

水理実験における測定項目は水路内及び水槽の時系列水位とし、波高計 (KENEK CHT4-60、測定精度  $\pm 3.5mm$ ) により測定した。測定時間の間隔は、波高計の最小測定間隔の 0.05 秒とした。波高計による水位測定地点は、水深の実験条件を管理する位置 SP1.0 (KP0.6)、保全対象の橋梁位置 SP6.5 (KP3.9)、SP14.0 (KP8.4)、遊水地上下流の SP4.7 (KP2.88)、SP5.4 (KP3.18)、そして越流水を貯留する水槽内の合計 6 箇所とした。なお、全ての波高計の測定値は、SP1.0

表-4.1 流れがある実験条件における各水深での流速

水深	高水敷なし			高水敷あり		
	流量 (m <sup>3</sup> /s)	流下面積 W=0.5m (m <sup>2</sup> )	平均流速 (m/s)	流量 (m <sup>3</sup> /s)	流下面積 W=0.16m (m <sup>2</sup> )	平均流速 (m/s)
9cm	0.0120	0.0450	0.27	0.0037	0.0144	0.26
4.5m	2.546	1.350	1.91	785	432	1.82
7cm	0.0077	0.0350	0.22	0.0025	0.0112	0.22
3.5m	1.633	1.050	1.56	530	336	1.58
5cm	0.0044	0.0250	0.18	0.0016	0.0080	0.20
2.5m	933	750	1.27	339	240	1.41

表-4.2 実験における津波の造波設定

津波規模	造波板前水深 (m)	造波板押し出し距離 (m)	造波板移動時間 (秒)	目標波高 (m)※
大	0.7	1.476	6	0.125
中	0.7	1.199	6	0.100
小	0.7	0.918	6	0.075

※目標波高は、造波板直近での値。

における水路床を基準点とした値である。

(5) 実験条件

実験条件は、①高水敷の有無の2ケース、②水路床から遊水地の越流高が異なる6ケース(10cm、11cm、12cm、13cm、14cm、越流なし)、③水路の流れの有無2ケース、④津波規模3ケース(大、中、小)、⑤水路の水深3ケース(5cm、7cm、9cm)を組み合わせ、合計216ケースの実験を行った(図-4.3)。高水敷の形状は、水路床からの高さ10cm、幅17cmとした(図-4.3上)。流れがある条件では、プール部と水路部の境界を除き等流とした。高水敷なし、水深9cm、流れありの条件での平均流速は、模型縮尺及び実物縮尺で、それぞれ0.27m/s、1.91m/s、水深7cmの条件で0.22m/s、1.56m/s、水深5cmの条件で0.18m/s、1.27m/sであり、高水敷がある条件についても同程度の流速であった(表-4.1)。水深条件を管理する位置は、流れがある条件で、等流水深が確保される極力下流の位置のSP1.0地点とした。津波規模の条件は、研究の基礎段階として、波高を変数とすることとし、造波板を一定時間内に動かす距離により変化させた。試行の結果、SP6.5において、最も波高が高くなる造波設定は、造波板の移動時間6秒、移動距離1.476m、造波板前水深0.7mとなり、これを津波\_大の条件とした。津波\_小の条件は、越流高10cm、水深5cmの条件で、遊水地へ越流が生じる大きさとし、造波板移動距離のみを変化させ0.918mとした。津波\_中の条件は、津波\_大、小の中間程度の波高となるよう、造波板移動距離のみを変化させ1.199mとした(表-4.2)。

4. 3 実験結果

4. 3. 1 津波の河川遡上における河道水理条件による応答

河道水理に関わる高水敷の有無や、流れの有無、水

発展途上国における持続的な津波対策に関する研究(3)

深の実験条件が、津波の河川遡上にどのような影響を及ぼすのか検討した。

(1) 津波規模と水深による最高水位の比較

高水敷なし、遊水地なし、流れありの実験条件の最高水位について、津波規模、水深条件の違いにより比較した。図-4.4にSP5.4の結果を代表として示す。図-4.4から、津波規模と水深の条件に比例して、最高水位が高くなることが確認できる。この傾向は、全地点で同じであった。よって、最高水位は概ね津波規模と水深に比例する傾向にあり、以降の検討では、中間の実験条件の津波\_中、水深7cmを割愛する。なお、全ての実験条件において、SP1.0~4.7の区間で碎波が確認されている。碎波とは津波の頂部が前屈形になり、崩れる状況である。

(2) 高水敷の有無による比較

流れあり、津波\_大、水深2ケース(5cm、9cm)の実験条件について、水位の時系列変化を、高水敷の有無の違いにより比較した(図-4.5)。図-4.5より、水深9cmの条件で、高水敷がある条件の方が、最高水位が低くなるが、水深5cmの条件では、最高水位が高くなる地点が確認された。また、両ケースともに津波が通過後に、ある程度高い水位が長時間継続していることが確認される。

流れあり、津波規模2ケース(大、小)、水深2ケース(5cm、9cm)の実験条件について、最高水位の縦断的な変化を、高水敷の有無により比較した(図-4.6)。

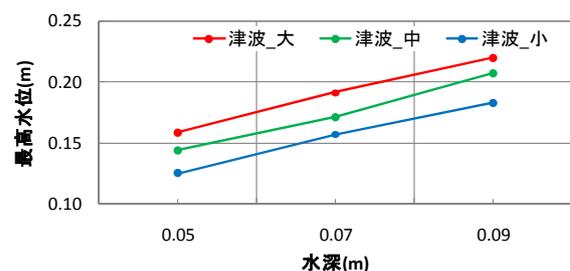


図-4.4 津波規模、水深による最高水位の比較 (SP5.4、高水敷なし、遊水地なし、流れあり)

図-4.6より、水深9cmの条件で、高水敷がある条件の

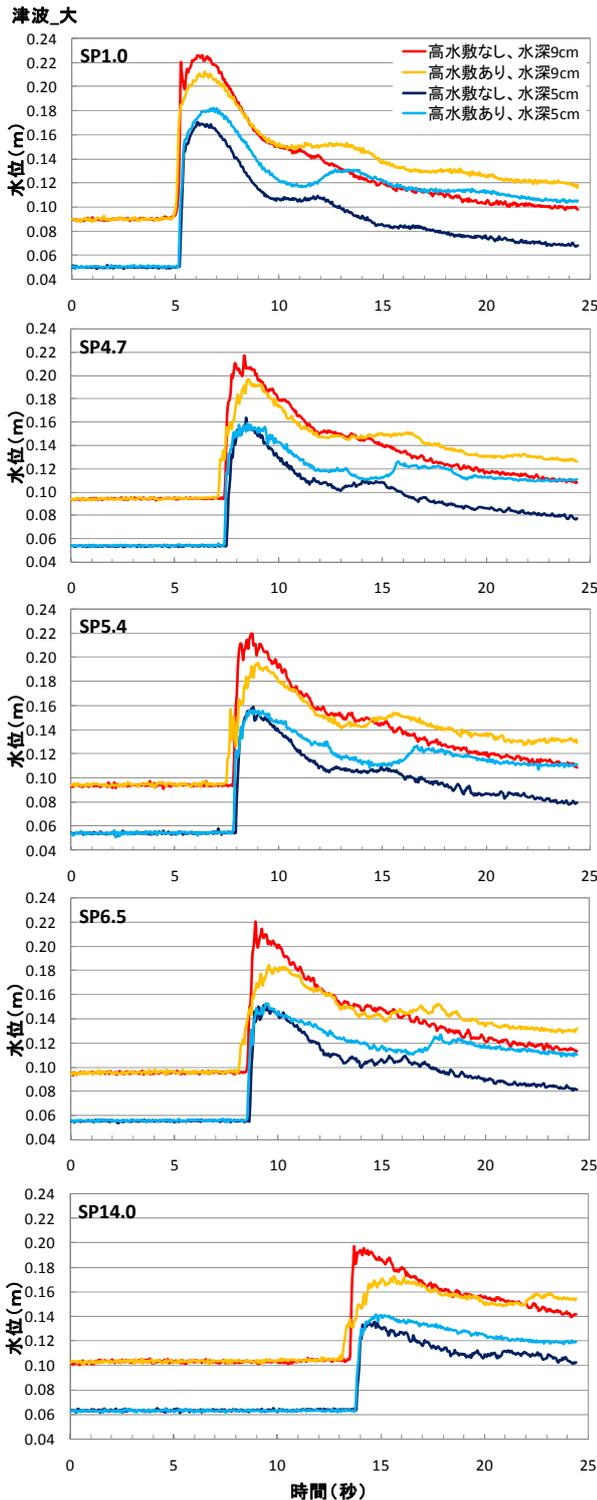


図-4.5 高水敷の有無による時系列波形の比較 (遊水地なし、流れあり)

方が、最高水位が低くなり、津波\_大、小の条件で、それぞれ1.3~3.5cm、0.3~2.5cm低下した。一方、水深5cmの条件では、最高水位が高くなり、津波\_大、小の条件で、それぞれ-0.5~1.1cm、0.4~1.0cm上昇した。本実験における、高水敷がある水深が深い条件

で、最

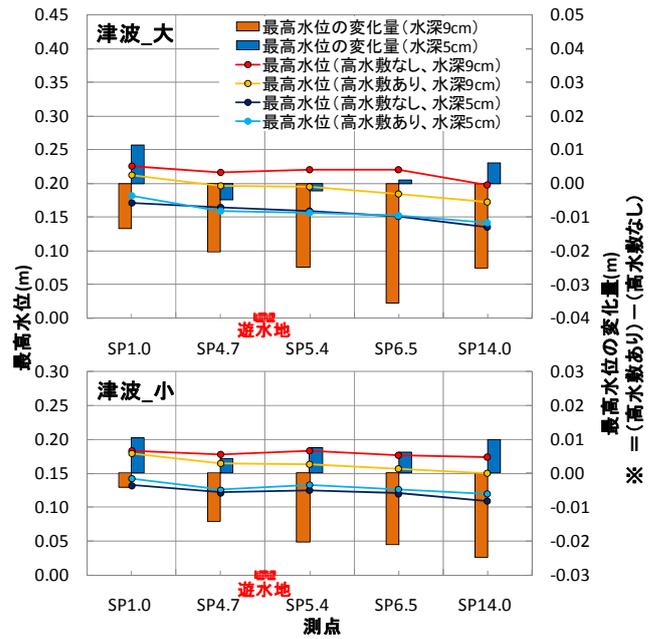


図-4.6 高水敷の有無による最高水位の縦断変化 (遊水地なし、流れあり)

高水位が低下し、水深が浅い条件で上昇した原因として、次のことが影響していることが考えられる。高水敷がある条件では、無い条件と比べ、左右岸の地盤が高い。そのため、同じ規模の津波が遡上する場合、高水敷の上に津波が乗り上げる分、水位が上昇することが考えられる。水深5cmの条件では、高水敷は河川水面の2倍の高さにあり、高水敷による地盤上昇の影響で、最高水位が上昇したものと考えられる。一方、水深9cmの条件では、高水敷は河川水面よりもさほど高い位置になく、この効果が小さかったことが考えられる。水深9cmの条件で、最高水位が低下した原因の一つとして、高水敷と低水路の流速差により生じる抵抗、高水敷の粗度が影響したことが考えられる。

なお、津波\_大、水深9cmの条件で確認された、最大3.5cmの水位低下は、実物の縮尺では1.75mの低下となり、津波\_大の水深5cmの条件で確認された、最大1.1cmの水位上昇は、0.55mの上昇となる。

高水敷がある条件の流況は、横断方向の流れがあり複雑であるため、本稿ではより基礎的な知見を得るために、以降の検討を高水敷がない条件で行う。

### (3) 流れの有無による比較

津波\_大、水深2ケース(5cm、9cm)の実験条件について、水位の時系列変化を、流れの有無の違いにより比較した(図-4.7)。図-4.7より、流れがある条件

の方が、最高水位が高くなることが確認され、また、SP

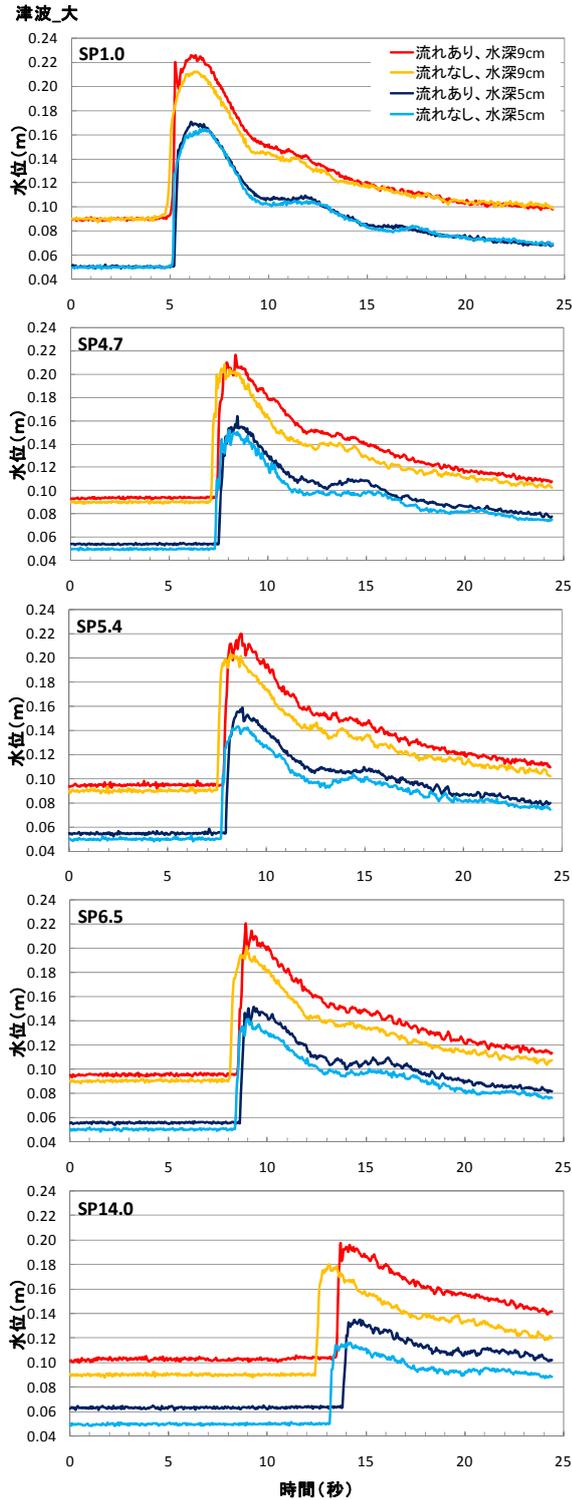


図-4.7 流れの有無による時系列波形の比較 (高水敷なし、遊水地なし)

14.0において、津波の到達時間に遅れが確認された。津波規模2ケース(大, 小), 水深2ケース(5cm, 9cm)の実験条件について、最高水位の縦断変化を、流

れの有無の違いにより比較した(図-4.8)。図-4.8より、流れがある条件の方が、最高水位が高くなること

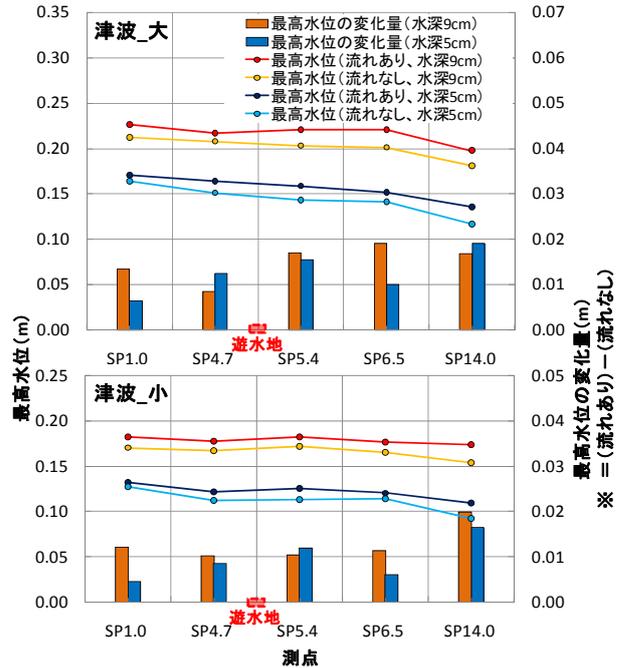


図-4.8 流れの有無による最高水位の縦断変化 (高水敷なし、遊水地なし)

が確認され、津波\_大, 水深5cm, 9cmの条件で、それぞれ0.6~1.9cm, 0.8~1.9cm上昇し、また、津波\_小, 水深5cm, 9cmの条件では、それぞれ0.4~1.8cm, 1.0~2.0cm上昇した。なお、津波\_大, 水深5cm, 9cmの条件で確認された水位上昇を実物縮尺にすると、それぞれ0.3~0.95m, 0.4~0.95mの上昇となる。

流れがある条件の方が、最高水位が上昇した原因の一つとして、流れなしの条件では、上下流で同じ水位であり、河床勾配により上流部ほど水深が浅くなるが、流れありの条件では、等流水深のため、上下流で水深が同等であることが考えられる。しかし、流れの有無で水深が変わらないSP1.0においても、流れがある条件の方が、最高水位が高くなっているため、このことは大きな原因ではないと考えられる。このため、流れの存在が最大水位の上昇に寄与していることが考えられる。以降では、津波の河川遡上時に、より危険側となる河川の流れがある条件を対象として検討を行う。

#### 4.3.2 遊水地による河川を遡上する津波の低減効果

遊水地による、河川を遡上する津波の低減効果を、津波の最高水位、到達時間、高水位の継続時間に着目して検討した。なお、前述したとおり、高水敷あり、流

れなし、津波\_中、水深 7cm の各条件は、検討に含めていない。

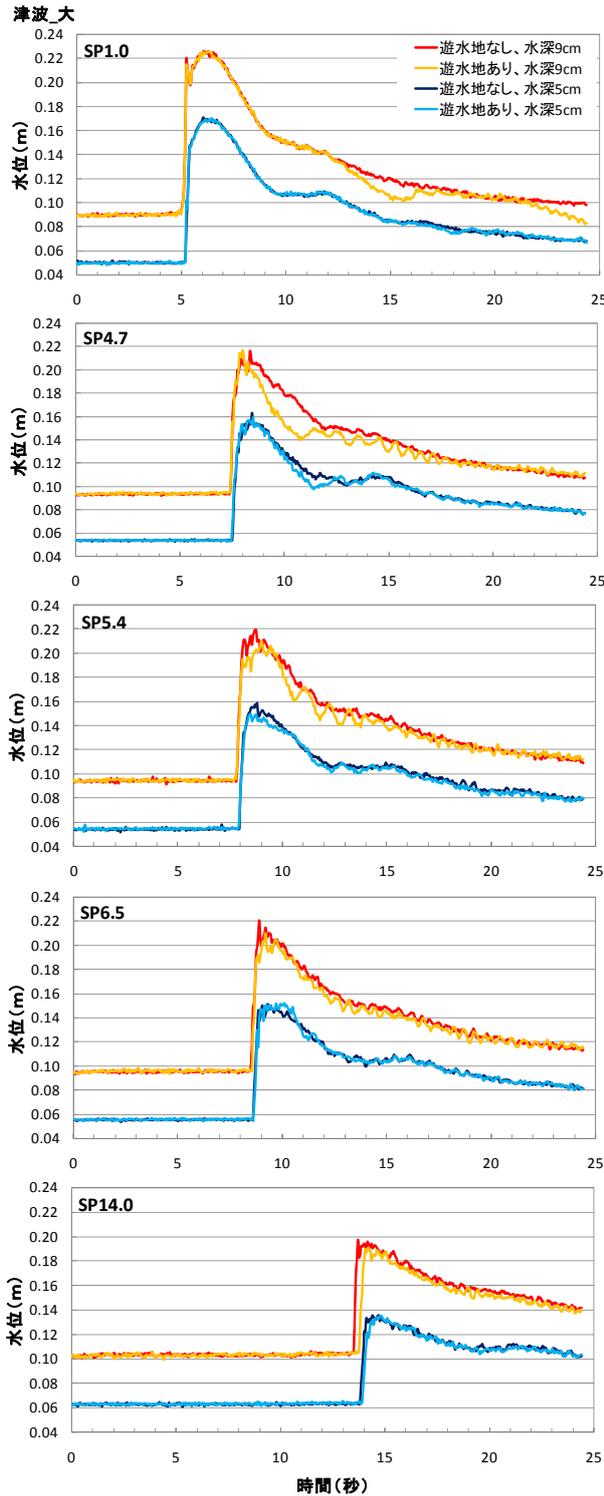


図-4.9 遊水地の有無による時系列波形の比較  
(高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

(1) 最高水位の低減効果

津波\_大、水深 2 ケース (5cm, 9cm) の実験条件に

ついて、水位の時系列変化を、遊水地の有無 (越流高

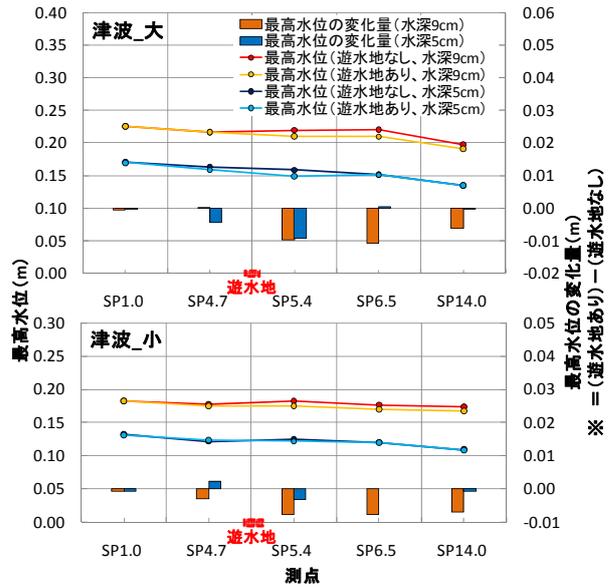


図-4.10 遊水地の有無による最高水位の比較  
(高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

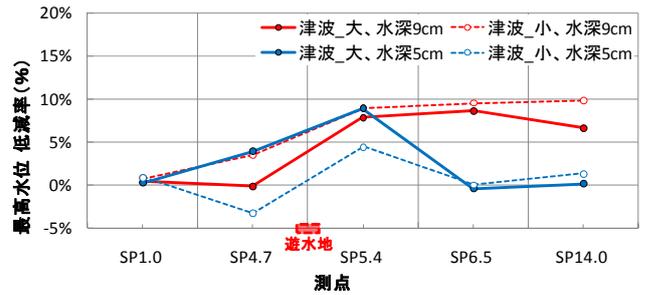


図-4.11 遊水地の有無による最高水位の低減率の縦断変化  
(高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

10cm、遊水地なし) の違いにより比較した (図-4.9)。図-4.9 より、遊水地がある条件の方が、遊水地上流の SP5.4~14.0 で、最高水位が低くなることが確認される。また、SP14.0 において、津波の到達時間に遅れが確認され、SP4.7 では、津波の高水位の継続時間に低減が確認される。

津波規模 2 ケース (大, 小), 水深 2 条件 (5cm, 9cm) の実験条件について、最高水位の縦断変化を、遊水地の有無 (越流高 10cm、遊水地なし) の違いにより比較した (図-4.10)。図-4.10 より、主に遊水地の上流で最高水位が低減されたことが確認でき、津波\_大の水深 5cm, 9cm の条件で、最高水位がそれぞれ 0.0~0.9cm、0.0~1.1cm 低減された。また、津波\_小の水深 5cm, 9cm の条件で、それぞれ 0.2~0.3cm、0.1~0.8cm 低減された。なお、津波\_大、水深 5cm, 9cm の条件での、最高水位の低減を、実物の縮尺にすると、それぞれ 0.0~

0.45m、0.0~0.55mの低減となる。

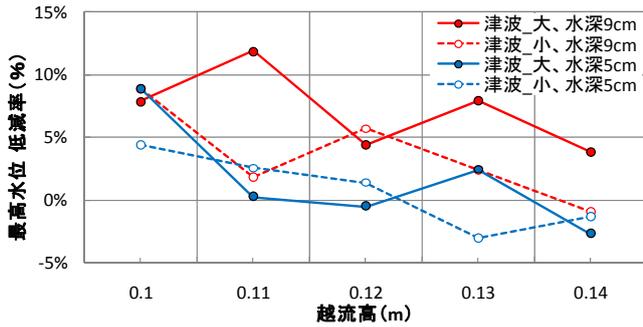


図-4.12 遊水地の越流高による最高水位の低減率の変化  
(遊水地直上流 SP5.4、高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

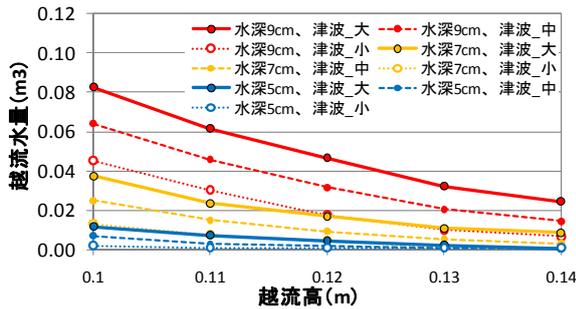


図-4.13 遊水地の越流高による越流量の変化  
(高水敷なし、流れあり)

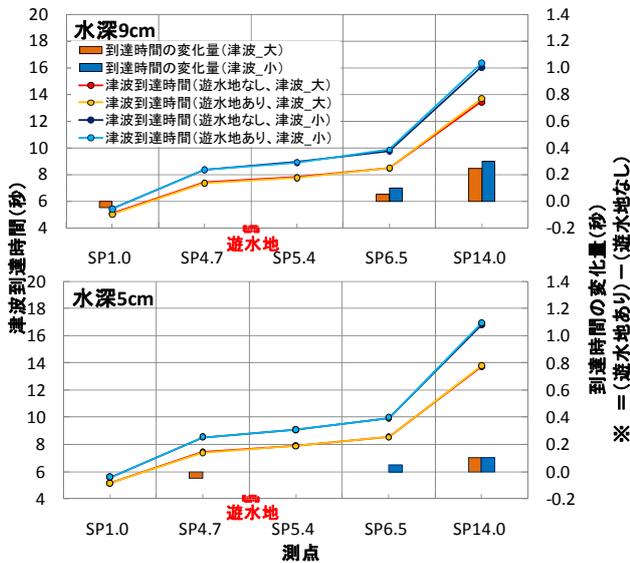


図-4.14 津波到達時間の遊水地有無による比較  
(高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

遊水地の効果により、どれだけ最高水位が低減されたか、式 (4.3) の低減率を定義して検討を行った (図-4.11)。

$$(4.3)$$

但し、 $R$  : 低減率、: 遊水地がない条件での値、:

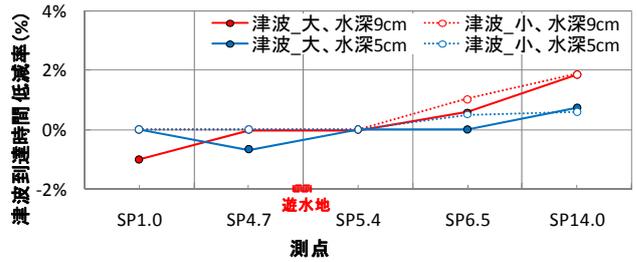


図-4.15 津波到達時間低減率の縦断変化  
(高水敷なし、越流高 10cm、流れあり)

遊水地がある条件での値である。

図-4.11 より、水深 9cm の条件では、遊水地上流の SP5.4 で最高水位の低減率が大きく上昇し、津波\_大、小の条件で、それぞれ 8%、9% となった。また、その上流の地点においても同程度の値であることが確認される。水深 5cm の条件でも、SP5.4 で最高水位の低減率が大きく上昇し、津波\_大、小の条件で、それぞれ 9%、4% となった。しかし、SP6.5 で大きく減少し、約 0% となり、SP14.0 においても同程度の値となった。よって、最高水位の低減率は、遊水地直上流で上昇するが、水深条件によっては、上流地点で再び減少することが考えられる。

遊水地直上流の SP5.4 における、最高水位の低減率の変化を、遊水地の越流高により比較を行った (図-4.12)。図-4.12 より、最高水位の低減率は、越流高 14cm の条件では -3~4% の範囲であり、越流高 10cm の条件では 4~8% であった。よって、最高水位の低減率は、概ね越流高が低くなるに伴い、高くなる傾向といえる。

遊水地への越流量を、越流高の違いにより比較した (図-4.13)。図-4.13 より、越流高が低くなるに伴い、越流量が増加する傾向にあった。これは越流高と最高水位の低減率の傾向と近いことから、遊水地への越流量が増加すると、その上流の水位低下も大きくなると考えられる。

(2) 津波の到達時間の低減効果

津波\_大、水深 2 ケース (5cm, 9cm) の実験条件について、津波の到達時間を、遊水地の有無 (越流高 10cm, 遊水地なし) の違いにより比較した (図-4.14)。図-4.14 より、遊水地がある条件の方が、津波の到達時間が遅いことが確認された。SP14.0 における到達時間の低減は、水深 9cm, 津波\_大、小の条件で、それぞれ 0.25 秒、0.3 秒であった。また、水深 5cm, 津波\_大、小の条件では、0.1 秒の低減であった。なお、遊水地によ

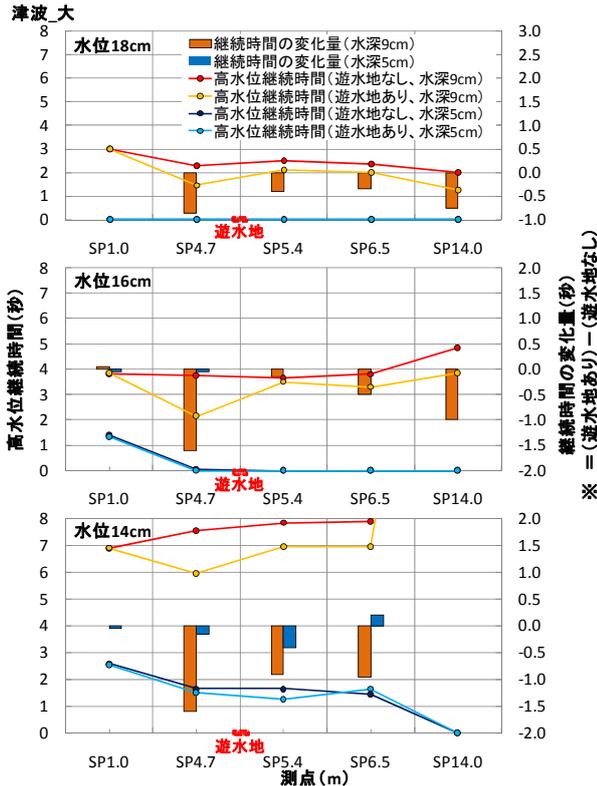


図-4.16 水位 14, 16, 18cm での高水位継続時間の縦断変化 (高水敷なし, 越流高 10cm, 流れあり)

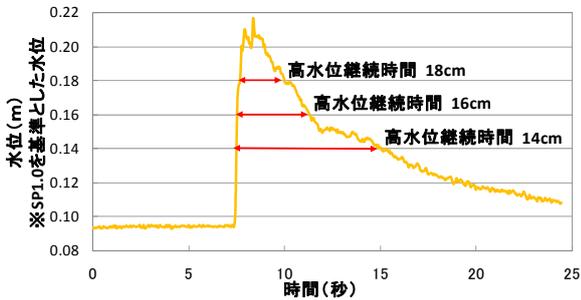


図-4.17 高水位継続時間の概念図 (水位 14cm, 16cm, 18cm)

到達時間の低減を実物縮尺にすると、水深 9cm, 津波\_大, 小の条件では、遊水地の約 5km 上流において、それぞれ 21 秒、25 秒の低減されたこととなる。

到達時間の遅れを式 (4.3) の低減率で検討すると (図-4.15)、水深 9cm, 津波\_大, 小の条件の SP14.0 における低減率は約 2% であり、水深 5cm, 津波\_大, 小の条件では、それぞれ 0.6%, 0.7% であった。

### (3) 高水位継続時間の低減効果

津波\_大, 水深 2 ケース (5cm, 9cm) の実験条件について、津波の高水位継続時間を、遊水地の有無 (越流高 10cm, 遊水地なし) の違いにより比較した (図

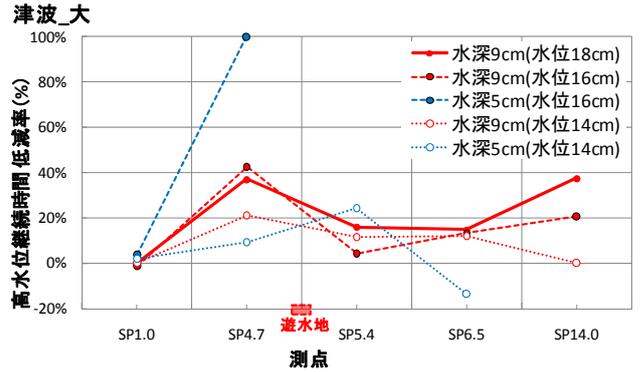


図-4.18 高水位継続時間の低減率の縦断変化 (高水敷なし, 越流高 10cm, 流れあり)

-4.16)。なお、高水位継続時間は、SP1.0 の水路床を基準とした水位 14cm, 16cm, 18cm について検討した (図-4.17)。また、高水位継続時間の算出は、最大 25 秒までとした。図-4.16 より、水深 9cm の条件で、高水位継続時間が最も低減された地点は、遊水地下流の SP4.7 であることが確認され、水位 14cm、16cm では 1.6 秒、水位 18cm では 0.9 秒低減された。また、遊水地上流の SP5.4~SP14.0 での高水位継続時間の低減は、水位 14cm, 16cm, 18cm で、それぞれ 0~0.95 秒、0.15~1.0 秒、0.35~0.75 秒であった。水深 5cm の条件で、高水位継続時間の低減が最大となる観測地点は、SP4.7 もしくは SP5.4 となり、水位 14cm では、それぞれ 0.15 秒、0.4 秒低減された。なお、低減が最大であった、水深 9cm の条件の SP4.7 における、水位 16cm の低減時間 1.6 秒を実物縮尺にすると、遊水地の 60m 下流で、136 秒の低減となる。また、同条件の SP5.4~SP14.0 における低減時間 0.15~1.0 秒は、遊水地の 60m~約 5km 上流で、7.5~85 秒の低減となる。

高水位継続時間の低減を、式 (3) の低減率で検討すると (図-4.18)、水深 9cm の条件の SP4.7 において、低減率が最大となり、水位 14cm, 16cm, 18cm で、それぞれ 21%、43%、37% の低減率となった。また、水深 9cm の条件の SP5.4~14.0 における、水位 14cm, 16cm, 18cm では、それぞれ 0~12%、4~21%、13~38% の低減率であった。なお、水深 5cm の条件の SP4.7 における、水位 16cm の低減率が 100% となっているのは、遊水地の効果により水位が低下し、16cm 以下になったためである。これらのことから、遊水地による高水位継続時間の低減は、遊水地の直下流で最大となると考えられる。この原因として、SP4.7 付近の河川を遡上する津波の流れが、上流 SP5.4 に向かうものと、遊水地に向

かうものに分かれるため、水位低下が早くなることが考えられる。

#### 4.4 まとめ

河川を遡上する津波の低減対策として、遊水地の設置を提案し、水理模型実験により、その効果を検討した。その結果、津波の河川遡上の河道水理条件に対する応答として次のことが確認された。

(1) 高水敷がある条件は、無い条件よりも、水深が深い条件で、最高水位が低下し、水深9cm、津波\_大の条件のSP1.0~14.0において、1.3~3.5cmの低下であった。また、水深が浅い条件では、最大水位は上昇し、水深5cm、津波\_大の条件のSP1.0~14.0において、-0.5~1.1cmの上昇であった。これらを実物縮尺にすると、高水敷高5m、水深4.5mの条件のKP0.6~8.4において、0.65~1.75mの最高水位の低下となり、水深2.5mの条件で、-0.25~0.55mの上昇となる。

(2) 流れがある条件では、無い条件よりも、津波の最高水位が高くなり、津波\_大、水深9cmの条件のSP1.0~14.0において、最高水位が0.8~1.9cm上昇した。これは、実物縮尺にすると、0.4~0.95mの上昇となる。

また、遊水地による津波の低減効果として、次のことが確認された。

(1) 遊水地上流で、津波の最高水位に低減が確認され、津波\_大、水深9cmのSP6.5において、最大1.1cm低減された。これは実物縮尺では、遊水地の72m上流で0.55mの低減である。また、この最高水位の低減率は9%であった。最高水位の低減率は、遊水地直上流のSP5.4で大きく上昇し、水深が大きい条件では、上流のSP14.0まで同等の低減率を維持している。しかし、水深が小さい条件では、SP6.5において低減率は約0%となった。

(2) 遊水地上流で、津波の到達時間に遅れが確認され、津波\_大、水深9cmの条件のSP14.0において0.25秒低減され、津波\_小、水深9cmの条件では0.3秒低減された。これらは実物縮尺で、遊水地の約5km上流で、それぞれ21秒、25秒の低減である。また、この津波到達時間の低減率は、ともに2%であった。

(3) 津波の高水位継続時間に低減が確認され、遊水地直下流のSP4.7で最大となり、津波\_大、水深9cmの条件の水位16cmでは、1.6秒低減された。また、同条件の遊水地の上流SP5.4~14.0では、0.15~1.0秒低減された。これらは実物縮尺では、遊水地の60m下流で136秒の低減、遊水地の60m~約5km上流で7.5~85秒の低減となる。また、これらの高水位継続時間の低減率は、それぞれ43%、4~21%である。

今後の課題として、本実験で得られた遊水地による津波の低減効果により、橋梁に作用する波力がどれだけ低減されるか検討する必要がある。また、今回の実験では変数としなかった、波長や越流部の長さについても、実験条件として検討する必要がある。

#### 4.5 おわりに

本実験で確認された、遊水地による河川を遡上する津波の低減効果として、波高の低減、津波到達時間の遅延、高水位の継続時間の低減が確認された。今回確認された低減量は劇的に大きなものではないが、緊急時においては、これらの差が被災の有無や人命に影響するケースがあると考えられる。従来のソフト、ハードの津波対策とともに、遊水地による対策を組み合わせることで、より一層、津波被害の軽減につながると考えられる

#### 参考文献

- 1) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Annual Report 2004, pp. 10
- 2) Indonesia: Preliminary Damage and Loss Assessment The December 26, 2004 Natural Disaster, BAPPENAS and The International Donor Community, 2005.
- 3) 幸左賢二ら：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，土木学会地震工学論文集，pp. 895-901，2007
- 4) 安田浩保，渡邊康玄：1次元解析法に基づく河川を遡上する津波の数値計算法，土木研究所寒地土木研究所月報第638号，pp2-9，2006.
- 5) 松富英夫ら：Banda Acehと周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題，海岸工学論文集，第52巻，pp1366-1370，2005.
- 6) 社団法人 日本港湾協会：国土交通省港湾局監修港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp238，2007.

## 5. 結論

本報告では、津波河川遡上の実用的な数値解析手法の開発と実現象への適用、冬期結氷時災害を想定した津波遡上の水理実験、そして具体的な津波被害低減方策の提案と実験による検証を行った。得られた知見をまとめると、以下の3点のようになる。

(1) 単断面水路を遡上する波状段波に関する水理実験を実施した結果、その最大水位変化量は、流れのない静水中においておよそ1.4倍、流れがある場合ではおよそ2倍程度まで増加することが確認された。この実験の再現計算を1次元解析により行ったところ、河川で一般的に用いられる浅水流方程式では波高は過小に、波速は過大に評価されることが示された。これに対し、鉛直方向加速度を導入した式では波高、波速ともに良好に再現できることが分かった。つまり、波状性を伴う津波の遡上解析を行うにあたっては、対象とする現象の波高水深比に応じて適切な支配方程式を適用することが必要であることが明らかになった。

(2) 津波遡上に伴う氷板輸送実験では、多数の氷板模型を水路内に設置して津波を遡上させ、初期水深と氷板位置を変化させながら遡上・輸送過程の違いを調べた。実験結果より、氷板が存在する河道に津波が来襲した場合、氷板の輸送速度は時間的に津波波形と非常に近い形で変動することが明らかになり、輸送特性を適切に把握するためには波状性段波の特性を考慮する必要があることが示唆された。そのため、漂流物の輸送速度を低減するためには波状性津波の波高増幅を抑制することが効果的であることが分かった。

(3) 河道内を遡上する津波の波高増幅を抑制する施設として、下流部での遊水池の設定を提案した。そして水理実験により検討を行った結果、遊水池による河川を遡上する津波の低減効果として、波高の低減、津波到達時間の遅延、高水位の継続時間の低減が確認された。緊急時においては、これらの効果により河川構造物や堤内地側の被災を免れたり、人命救済・確保のための時間的余裕が増える効果が期待される。従来のソフト、ハードの津波対策とともに、遊水池による対策を組み合わせることで、より一層、津波被害の軽減されることが期待される。

## A STUDY ON SUSTAINABLE TSUNAMI COUNTERMEASURES FOR DEVELOPING COUNTRIES

**Abstract:** When a tsunami enters a river channel, it creates undular bore propagation and causes a sudden rise in the water level at the wavefront. Many studies on undular bores that occur in still water have been performed, but few have addressed undular bores travelling against a flow. Laboratory experiments were conducted on wave propagation characteristics, ice floes transport due to undular bore tsunamis, and retarding basin to be constructed at a downstream site of a river. The following results were obtained:

- (1) Experiments were performed on undular bore propagation traveling against a nonuniform flow to investigate the water level increases when an undular bore occurs. Results were used to validate the accuracy of one-dimensional numerical calculation methods for the tsunami propagation with dispersive wave train in rivers. Furthermore, the model is applied to tsunami intrusion from the 2011 tohoku earthquake into the Shin-kushiro river.
- (2) When a river channel with ice sheets is struck by a tsunami, the fluctuations in ice-sheet transport velocity with the passage of time were found to be very similar to those of tsunami waveforms, indicating the necessity of taking the frequency dispersion effect into account in order to understand the transport characteristics appropriately.
- (3) The retarding basin reduced the run-up height of the tsunami by 9% of the maximum height of the tsunami, delayed the arrival time of the tsunami by up to 2 % of the arrival time. The duration of the tsunami's high water level was reduced by up to 43 % of the duration in the case without a retarding basin.

Keywords: tsunami run-up, river channel, undular bore propagation, frozen river, hydraulic experiment, retarding basin