

市街地を氾濫する津波の数値計算精度 に関する検討

津高 亮太¹・鳴原 良典²・藤間 功司³

¹防衛大学校理工学研究科前期課程
(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:em49055@nda.ac.jp

²防衛大学校システム工学群建設環境工学科助教 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:shigi@nda.ac.jp

³防衛大学校システム工学群建設環境工学科教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:fujima@nda.ac.jp

局所的性質の強い津波の氾濫流の挙動を予測するためには、より詳細な地形データを用いた津波の数値計算が必要となる。しかし、詳細な地形データを用いた場合の津波遡上の計算精度について検証した事例は少ない。そこで本研究は、詳細な地形データを用いた場合における浅水理論に基づいた津波氾濫解析の精度を検証するために、矩形構造物を配置した平面水槽において水理実験を行い、その再現計算により計算精度を調べた。詳細な地形データを用いた場合においても局所的な氾濫流の挙動を正確に再現することは難しいが、想定する津波の周期などのパラメータにより、 $\Delta x/\sqrt{gh_{\max}}T$ から所要の計算精度の空間格子間隔を決定することができる。

Key Words : tsunami, inundation, shallow water theory, high-resolution topographic data

1. はじめに

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、東北地方の太平洋側を中心に甚大な被害をもたらした。沿岸地域に所在する市街地に津波が氾濫し、浸水被害だけでなく、住民や家屋の流出被害、漂流物による衝突被害、地盤の液状化との総合災害の可能性もある RC ビルの転倒と多様な被害を与えた。東海・東南海・南海地震などの巨大地震の発生が懸念されており、得られた教訓事項を反映させ、国や自治体などは既存の防災計画の見直しに取り掛かっている。津波対策においても従来からの考え方を見直されつつあり、より柔軟なリスクマネジメントが求められている¹⁾。

津波の被害を見積もる一般的な手法は、数値計算により浸水深や流速などの外力を予測し、それらの外力をもとに人的・物的被害を推定する。津波被害の推定手法としては、被害事例により報告された津波高と数値計算結果から被害形態と程度を分類した首藤²⁾の手法、浸水深から津波氾濫流の流体力や流木の衝突力を推定し家屋等の被害想定を行う岡本ら³⁾の手法や、家屋被害や人的被害の程度を被害率として確率的に表現した津波被害関数による越村ら⁴⁾

の手法などが挙げられる。どのような方法を用いるにしても、数値計算による津波外力の予測精度の向上が、被害想定的高度化に大きく影響する。

陸上域における津波の数値計算は、一般的に長波近似による非線形長波方程式（浅水理論）を平面 2 次元場に適用して行われ、陸上域における市街地の構造物などの影響は、底面摩擦として取り入れることが多い。底面摩擦はマニング則に基づく抵抗項として表現され、粗度係数を土地利用区分毎に設定する⁵⁾。もしくは、家屋の面積占有率や家屋幅から等価なものを算定する方法⁶⁾などがある。いずれにせよ、構造物を抵抗として扱う従来の手法では、極めて局所的である津波氾濫流の流況を再現することは困難であった。しかし、近年レーザープロファイラなどによる高精度な計測データにより、地物の凹凸をそのまま表現した地形モデルを適用することで、氾濫水の挙動を考慮できる詳細な津波氾濫解析が可能となってきた^{7) 8) 9)}。けれども、そのような精度のよい地形データを用いた津波氾濫解析の検証事例は少ない。

そこで本研究は、一般的な手法として頻繁に用いられる浅水理論に基づいた平面 2 次元計算において、詳細な地形データを用いた場合の津波氾濫解析の精

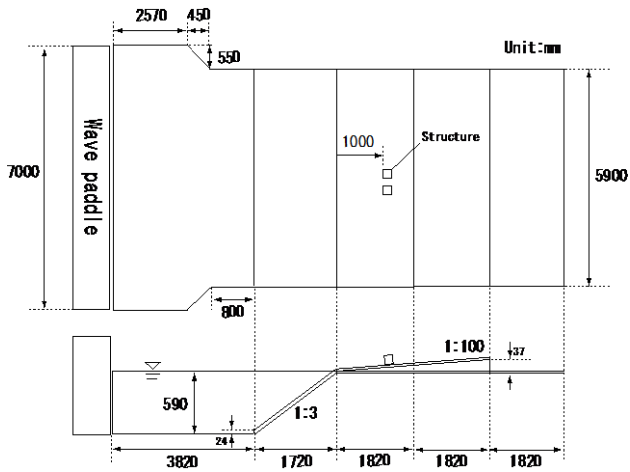


図-1 実験水槽図

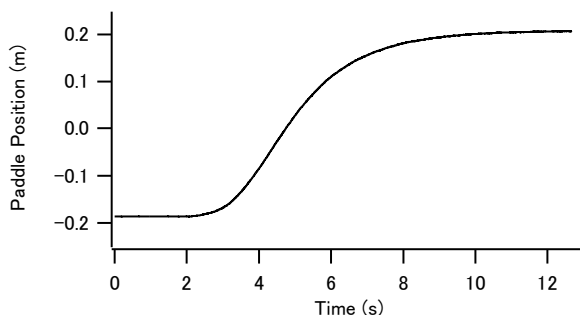


図-2 造波板の位置の時系列

度を検証した。検証方法としては、単純な建物を模擬した矩形構造物を配置した平面水槽において水理実験を行い、その再現計算により、構造物周辺での数値計算の特性と再現精度を調べた。

2. 水理実験と数値計算の概要

(1) 実験の概要

市街地を氾濫する津波を模擬するため、水理実験を行った。市街地を模擬するならば、さまざまな形状の構造物を複雑に配置し道路網を構成するように考えられる。しかしながら、市街地の形態は多種多様であるため、複雑なモデルでは一般性を欠いた議論に陥ることが予想される。そのため、本実験では、市街地を構成する主要素である建物を単純な矩形構造物でモデル化し、矩形構造物の間を街路に見立てた。

実験に用いた水槽は、図-1 のような平面水槽である。縦 7m、横 11m の大きさを有しており、海域と陸域を設けている。実験スケールは、1/100 と設定した。海域端にある一枚板のピストン型造波装置を図-2 のように変位することで、波高 5cm、周期 5s の波を 1 波入射させた。遡上した波は、汀線から 100cm の距離にある構造物模型に到達し、陸域全

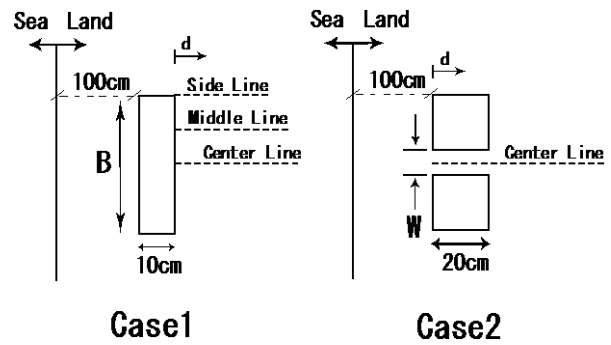


図-3 構造物模型の配置図

表-1 測定箇所

	case1				case2	
	B=20cm		B=40cm			
gage	line	d(cm)	line	d(cm)	line	d(cm)
1	side	1	side	1	center	0
2		5		5		10
3		10		10		20*
4	middle	60	middle	45		30*
5		65		50*	/	
6		70		55		
7	center	20	center	20		
8		45		50		
9		50		80*		
10		55				

*: 流速測定箇所

域に氾濫する。

構造物模型は、海岸線に面して横長な単一構造物配置する場合と、2 つの構造物の間隔を開けて配置する場合に分けた。前者は構造物周辺での流況を再現することを目的とし、後者は構造物の間での流況を再現することを目的としている。構造物の具体的な配置を図-3 に示す。ケース 1 では構造物の幅 B を 20cm、40cm の 2 種類を用い、ケース 2 では構造物の間隔 W を 4cm、8cm、12cm、16cm、20cm の 5 パターンにて配置した。構造物模型の材料には、加工した木片を使用した。

また、計測器による測定箇所を表-1 に示す。流況を把握するため、水位、浸水深および流速を測定した。水位と浸水深の測定には、高精度超音波式変位センサ（KEYENCE 製 UD-500）、流速の測定には、プロペラ式流速計（KENEK 製 V01000）を使用し、同様の実験を 5 回を行い、その平均値を実験値とした。流速の測定は、表中の*箇所でのみ測定し、計測方向は海域から陸域に向かって正、陸域から海域に向

かって負となっている。

(2) 数値計算の概要

本研究の数値計算は、後藤ら¹⁰⁾の手法を用いた。基礎方程式を式 (1)、式 (2a)、式 (2b) の非線形長波方程式（浅水理論）とし、有限差分法により離散化して数値的に解いた。差分スキームは、移流項以外に Staggered-Leap-flog 法を適用し、移流項には 1 次精度の風上差分を適用した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

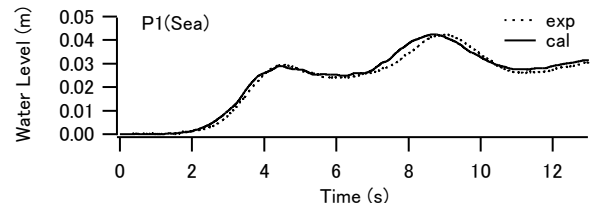
$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2b)$$

ここに、 η は水位、 M, N は線流量、 t は時間座標、 x, y は空間座標、 D は全水深、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数であり、0.010 とした。静水状態を初期条件とし、波を入射させるために造波板側の壁面境界条件に造波板の移動速度を流速として与えた。空間格子間隔 Δx について、ケース 1 の場合は、構造物を地形として表現可能な 10cm までの 6 種類 (0.5cm, 1cm, 2cm, 2.5cm, 5cm, 10cm)、ケース 2 の場合は、構造物の間が最も狭い場合の街路幅あたり少なくとも 2 格子を確保できる 2cm までの 3 種類 (0.5cm, 1cm, 2cm) とした。時間格子間隔 Δt は、 $1 \times 10^{-4} s$ とし、再現時間は 13s とした。

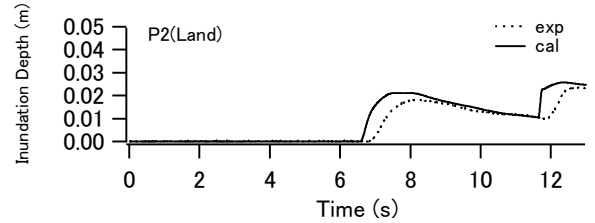
3. 再現精度の検証

(1) 通過波の再現性

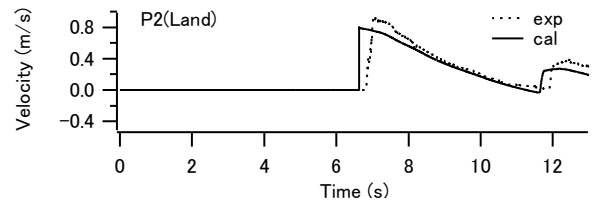
事前の検討として、構造物を配置していない状態での数値計算の再現性について調べた。海域で 4 点、陸域で 6 点を水槽中心軸上に設定し、比較検討を行った。代表点の結果として、海域では P1（造波板から 100cm）での水位と、陸域では汀線からの距離が構造物を配置した場合における前面位置と同じ距離に位置する P2（静水時の汀線から 100cm）での浸水深と流速の比較結果を図-4 に示す。実線が計算値、点線が実験値を表している。P1 での計算値は実験値とほぼ同じ値をとることから、海域での再現性は良く、実験の入射波を再現できている。P2 での計算値は、浸水深については、陸域に遡上し構造物に達するまでの間で実験値に比べて減衰が少なく、



(a) 海域 (P1) での水位時系列



(b) 陸域 (P2) での浸水深時系列



(c) 陸域 (P2) での流速時系列

図-4 通過波の実験と計算の時系列比較（点線が実験値、実線が計算値を表している。P1 は造波板から 100cm、P2 は静水時の汀線から 100cm に位置し、共に水槽中心軸上にある。また、空間格子間隔はすべて 2cm である。）

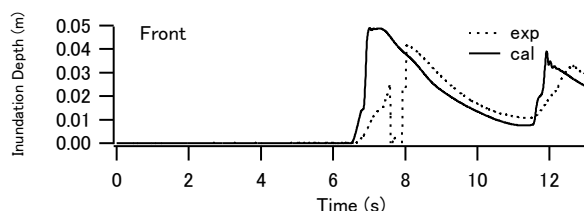
その差は最大値の比較で 1.15 倍程度であり、流速については 1 割程小さい。

(2) 構造物周辺での流況の再現

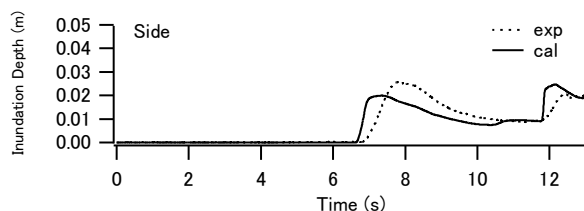
a) 構造物周りでの時系列の比較

構造物周りでの水理実験と数値計算の浸水深時系列の比較を図-5 に示す。構造物前面で 1 点、構造物側面で 1 点と構造物背後の 3 点を代表例として示している。

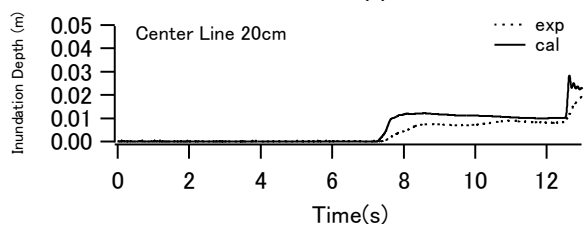
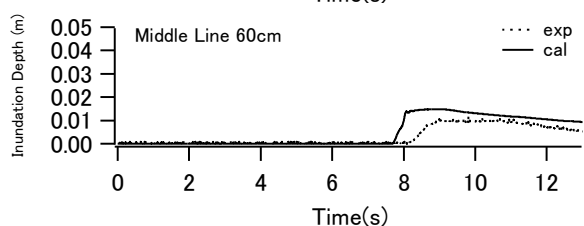
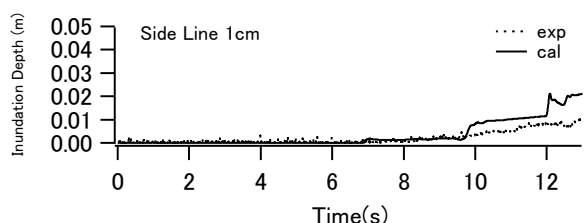
構造物前面での比較点は前面から海側へ 5cm 離れた位置にあり、通過波の陸域の比較点である P2 とは 5cm の隔たりがあるが、図-4 (b) と図-5 (a) を比べると構造物による影響が大きいことは明らかである。実験における構造物前面へ到達した波は、波先端から構造物に衝突し、後続波に被さるようになり振り返り砕波する。そのような、鉛直方向加速度が卓越する運動を本研究の数値計算では表現できないため、衝突時の浸水深に大きな差が生じている。また、実験値の急激な下降による欠損箇所は前述の運動のため、正確に浸水深を計測することは困難である。しかしながら、構造物への衝突から生じるスプラッシュ



(a) 構造物前面での浸水深時系列



(b) 構造物側面での浸水深時系列



(c) 構造物背後での浸水深時系列

図-5 構造物周辺での実験と計算の浸水深時系列比較の一例 ($B=20\text{cm}$, $dx=2\text{cm}$ の場合の結果を表している. 構造物前面と側面の比較点は, それぞれの面中央から 5cm 離れた位置にある.)

ユの影響を受けないほどに距離を置いた地点を比較点とすることは構造物周辺での流況を再現するという目的から逸れるため, 本研究においては前面から 5cm の実験値を採用している. 構造物側面での比較点も同様に側面から 5cm 離れた位置にあり, 通過波の場合とは異なり, 実験値を計算値が下回る傾向が見られた. 図-5 (c) のサイドラインの結果は構造物隅のすぐ背後に位置する点での比較結果であり,

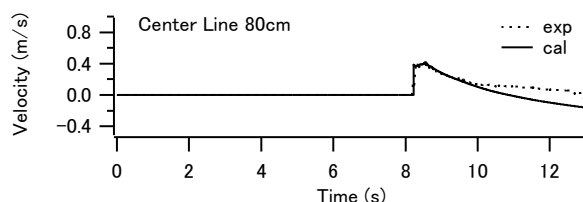


図-6 構造物背後での実験と計算の流速時系列比較の一例 ($B=40\text{cm}$, $dx=2\text{cm}$ の場合の結果を表している.)

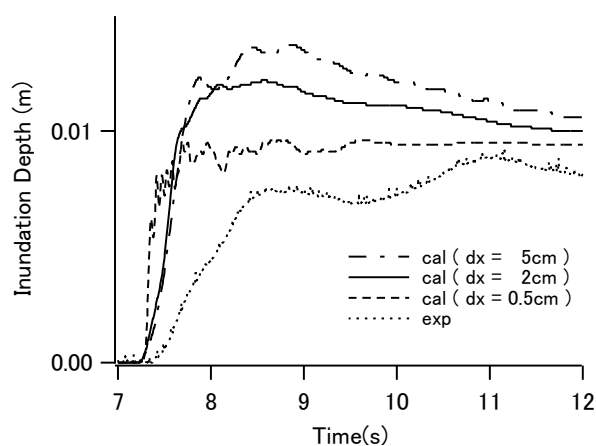


図-7 構造物背後での異なる空間格子による計算の浸水深時系列比較の一例 ($B=20\text{cm}$, Center Line 20cm)

大きさの差はあるが, 計算値は緩やかに浸水深が上昇していく流れを再現できている. また, その他の図-5 (c) の結果からも, 構造物の背後へ回り込む流れを再現できていることがわかる.

構造物背後での水理実験と数値計算の流速時系列の比較を図-6 に示す. 構造物背面での流速は, センターライン 80cm の位置で精度良く再現できている. しかし, 遡上の勢いが弱まるにつれて, 実験値から計算値は離れていく傾向がある.

構造物背後での異なる空間格子間隔による計算の浸水深時系列の比較の一例を図-7 に示す. 空間格子間隔が 5cm を 1 点鎖線, 2cm を実線, 0.5cm を破線で, 実験値は点線で表している. 空間格子間隔を小さくすると浸水深時系列の大部分で, 計算値は実験値に近づいていることが分かる. このような傾向が異なる空間格子間隔による計算の比較結果から多く見られたことから, 空間格子間隔を細かく設定すると, 計算による実験の浸水深の再現精度は向上する傾向があるといえる. しかし, 浸水深が急激に上昇し始める 7s から 8s のあたりでは, 必ずしもそうとは言えず, 空間格子間隔の小さい 0.5cm の場合の方が実験値との差が大きい. 小さい空間格子間隔の計算では, 大きな空間格子間隔による計算に比べ値の変化に敏感になる傾向にあり, 流速の場合も同様の傾向が見られた.

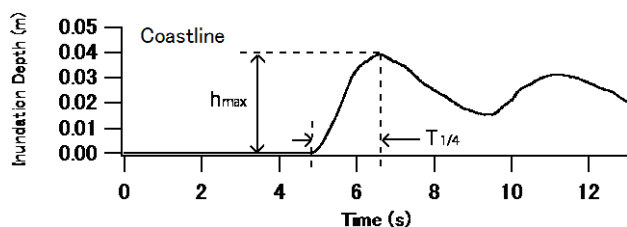


図-8 海岸線での浸水深時系列

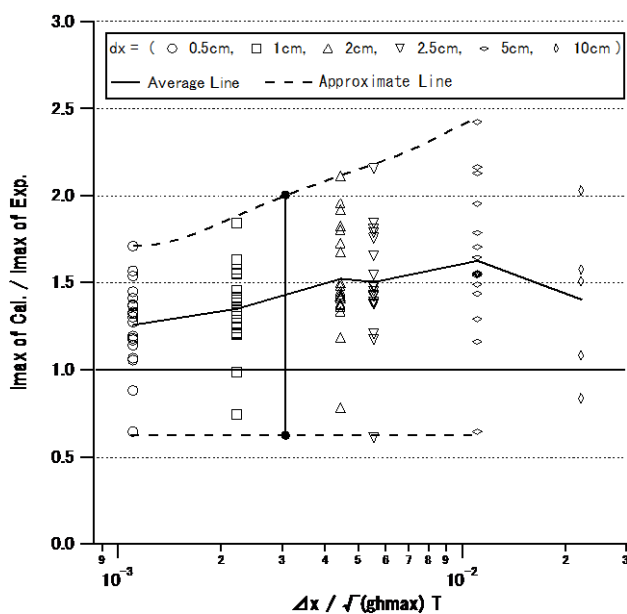


図-9 構造物周辺での最大浸水深の再現精度

b) 最大値による精度の検証

構造物周りでの数値計算による水理実験の再現精度を評価するために、最大浸水深および最大流速の比較から精度を検証した。

一様勾配斜面を遡上する津波の数値計算については、後藤ら¹¹⁾の基準がある。しかし、本研究では、地形が一様勾配でなく、さらに平面2次元問題を扱っているため適用が難しい。そこで本研究では、陸上を遡上する津波の数値計算をする際に適用することが容易な以下のような無次元パラメータを考えた。

$$\frac{\Delta x}{\sqrt{gh_{\max}} T} \quad (3)$$

ここに、 Δx は空間格子間隔、 g は重力加速度、 $h_{\max}$ は海岸線での最大水深、 T は周期である。海岸線での計算値の浸水深時系列を図-8に示す。ここでの周期は、海岸線での浸水深時系列において、立ち上がりから最初のピークに至るまでの時間を4倍したものを意味している。このように、海岸線での値をパラメータに使用することで、陸上を遡上する過程において計算精度に影響する要因と関係なく空間格子間隔を評価できる。また、後藤ら¹¹⁾の基準のように斜面勾配をパラメータに使用していないため、

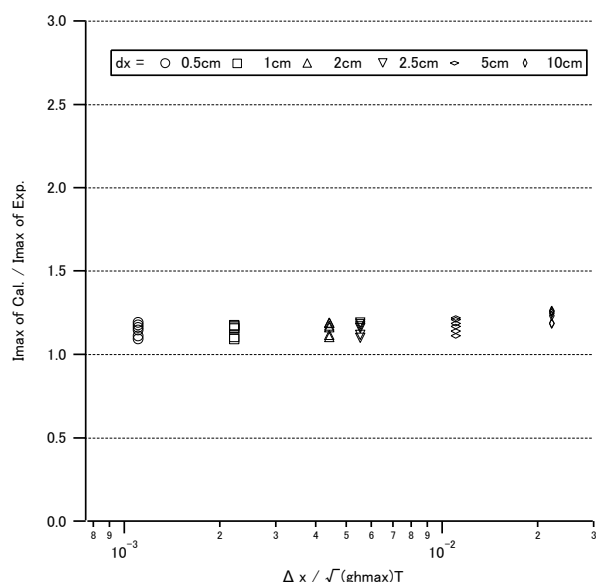


図-10 通過波の最大浸水深の再現精度

傾斜の緩いほぼ水平床のような平地においても適用ができ、実務上も都合がよい。

式(3)のパラメータを用いて、構造物周辺での最大浸水深の比較を行ったものを図-9に示す。縦軸には計算値の最大値($I_{\max}$ of Cal.)を実験値の最大値($I_{\max}$ of Exp.)で除したものをとり、横軸には式(3)のパラメータとしている。縦軸の値が1に近いほど、計算値は実験値を精度よく再現していることを表している。

構造物周辺での最大浸水深は、構造物側面での比較点などで実験値を下回っているものの、全般的に実験値を上回っている点が多く、場所によりばらつきがあることがわかる。通過波の比較結果(図-10)と比べると、その差は明らかである。しかし、空間格子間隔を小さくするにつれて大きく上回る点が少なくなり、若干ではあるがばらつきが少なくなる。各空間格子の結果を結ぶ線は、それぞれの平均値を繋いでおり、これによると10cmから5cmの間で一度上昇するが、その後は下降傾向にあり最終的に0.5cmで1.25まで下がる。各空間格子間隔の結果の上下にある点線は、精度のばらつく範囲を把握するために描いた線である。上下の点線の範囲に計算精度が収まるならば、求める精度により空間格子間隔を選定することができる。つまり、計算による最大浸水深を実験値の0.5倍から2.0倍程度の精度により求めるならば、 $\Delta x / \sqrt{gh_{\max}} T < 3.0 \times 10^{-3}$ を満たす範囲で空間格子間隔を設定する必要があると言える。このことは10cmの場合も当てはまるように見えるが、空間格子間隔の大きさの都合上、比較点が必ずしも正確に一致せず数cm程の隔たりがあり、たまたま値が小さくなっている。通過波の場合では、10cmの値が最も大きくなっていることから、必ずしも構造物周辺での最大浸水深を精度よく再現できるとは言い難い。

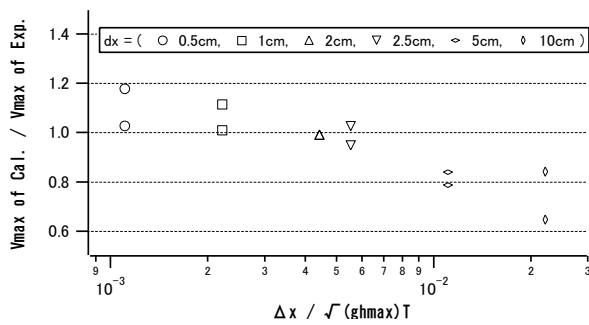


図-11 構造物周辺での最大流速の再現精度

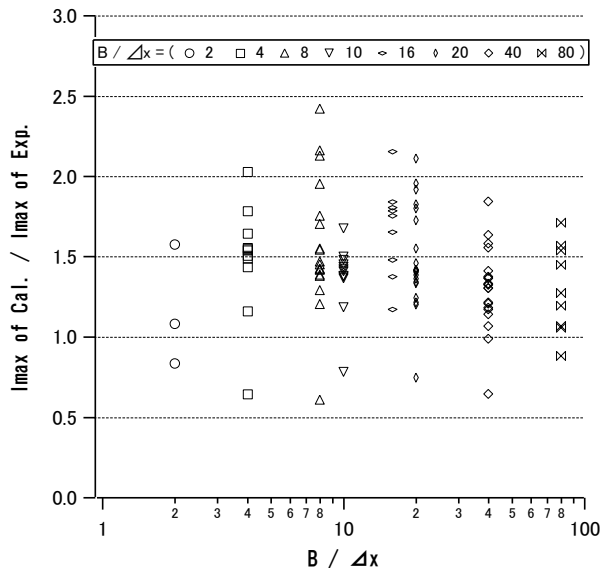


図-12 構造物幅の分割数に応じた最大浸水深の再現精度（分割数は、構造物幅を空間格子間隔で除したものである）

構造物周辺での最大流速の比較を図-11 に示す。縦軸には計算値の最大値（ $V_{\max}$ of Cal.）を実験値の最大値（ $V_{\max}$ of Exp.）で除したものをとり、横軸には式（3）のパラメータとしている。構造物周辺での最大流速は、比較する点数が浸水深に比べて少ないが、すべての点を考慮しても計算値は実験値の 0.6 倍から 1.2 倍の範囲に収まっており、精度よく再現できている。そのため、上記基準を満たすような計算を行った場合、最大流速は浸水深程度の精度を十分に期待できる。

c) 構造物幅と空間格子間隔の関係

構造物幅の分割数に応じた最大浸水深の再現精度を図-12 に示す。横軸に構造物幅 B を空間格子間隔 Δx で除した分割数を対数軸でとり、縦軸に最大浸水深の計算値を実験値で除したものとしている。陸上を遡上する津波の数値計算においては、海岸付近の地形は入り組んでいる場合が多く、少なくとも対象とする特徴的な人工構造物を 10 格子以上で近似する必要があるという報告¹²⁾があり、本研究における分割数 8 以上がそれに相当する。分割数 8 を境

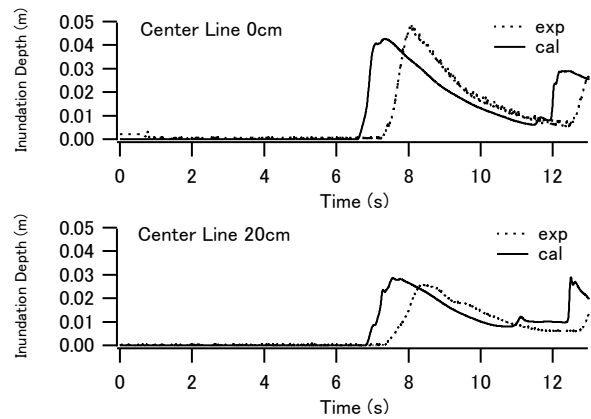


図-13 構造物間での実験と計算の浸水深時系列比較の一例（ $W=12\text{cm}$, $dx=2\text{cm}$ の場合の結果を表している。）

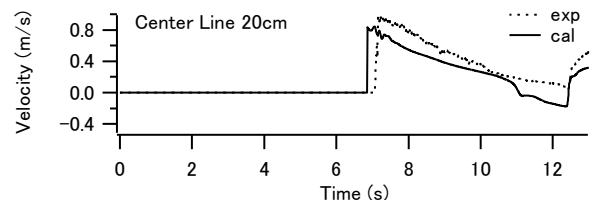


図-14 構造物間での実験と計算の流速時系列比較の一例（ $W=12\text{cm}$, $dx=2\text{cm}$ の場合の結果を表している。）

に分割数を多くしていくと、最大浸水深のばらつきは小さくなっていく傾向がある。計算値の最大浸水深を実験値の 0.5 倍から 2.0 倍程度の範囲内で計算するためには、構造物幅を 25 分割以上できる程度の空間格子間隔を設定する必要があると言える。

(3) 構造物の間での流況の再現

a) 構造物の間での時系列の比較

構造物間での水理実験と数値計算の浸水深時系列の比較を図-13 に示す。構造物間の入口で 1 点、構造物間の出口で 1 点を代表例として示している。

構造物間での浸水深時系列の比較から、構造物間の入口での浸水深は、実験値と比べ 0.5s 程度到達時間が早く、最大値は 5mm 程度小さい。構造物間の出口では、到達時間の差は入口とほぼ変わらず、最大値は実験値より 3mm 程度大きい。構造物の間を通り抜ける流れは、入口で急縮し、出口で急拡するような開水路流れの様子を呈する。そのため、実験値は入口で流れが合流し浸水深が大きくなり、出口で拡散するため浸水深が低くなると考えられる。計算値においても同様の傾向が見られるがその程度は小さく、入口での浸水深は実験値より小さくなり、出口での浸水深は実験値より大きくなる。

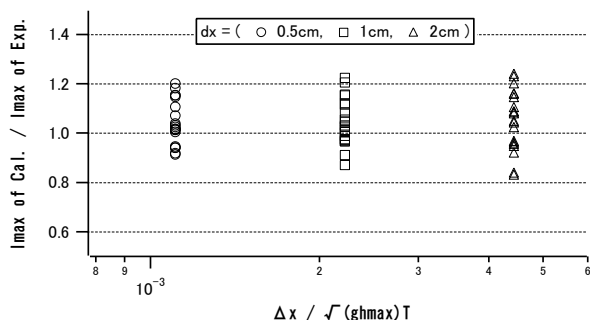


図-15 構造物の間での最大浸水深の再現精度

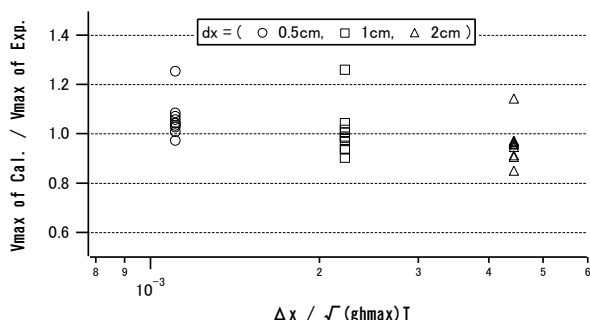


図-16 構造物の間での最大流速の再現精度

構造物間での水理実験と数値計算の流速時系列の比較を図-14 に示す。構造物間での流速時系列の比較は、構造物間の出口の点において比較しており、その傾向は通過波と同様に実験値よりも計算値は 1 割程度小さくなる。

b) 最大値による精度の検証

構造物の間での数値計算による水理実験の再現精度を評価するために、最大浸水深および最大流速の比較を行った。

構造物周辺での検討と同様に、式 (3) のパラメータを用いて、構造物間での最大浸水深の比較を図-15、最大流速の比較を図-16 に示す。構造物の間での最大浸水深は、場所によるばらつきも少なく、空間格子間隔の違いによる影響も小さい。最大流速も同様の傾向があり、ともに計算値は実験値の 0.8 倍から 1.2 倍程度に収まることから、構造物間での流況は比較的精度良く再現できると言える。

c) 構造物間隔と空間格子間隔の関係

構造物の間での分割数に応じた最大浸水深の計算による実験の再現精度を図-17 に示す。横軸に構造物間隔 W を空間格子間隔で除した分割数を取り、縦軸に最大浸水深の計算値を実験値で除したものとしている。構造物の間での分割数による最大浸水深の再現精度の変化は小さいことから、構造物間隔 W と空間格子間隔の関係から決まる分割数による最大浸水深の再現精度への影響は少ないと言える。

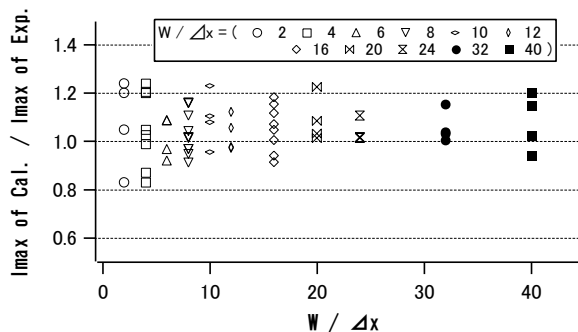


図-17 構造物間隔の分割数に応じた最大浸水深の再現精度（分割数は、構造物間隔を空間格子間隔で除したものである）

4. おわりに

詳細な地形データを用いた場合における浅水理論に基づいた津波氾濫解析の精度を、水理実験と比較することにより検証した。詳細な地形データを用いた場合においても局所的な氾濫流の挙動を正確に再現することは難しいが、求める精度により式 (3) から空間格子間隔を選定できる。すなわち、計算値を真値の 0.5 倍から 2.0 倍程度の精度で求めるならば、 $\Delta x / \sqrt{gh_{\max}} T < 3.0 \times 10^{-3}$ を満たす範囲で空間格子間隔を設定する必要がある。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」：<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashiniho/n/4/index.html>.
- 2) 首藤伸夫：津波強度と被害，東北大学津波工学研究報告，第9号，pp.101-136，1992.
- 3) 岡本慶助，松富英夫：津波氾濫流速の簡易推定法に関する基礎的研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. B2-65，No. 1，pp.296-300，2009.
- 4) 越村俊一，行谷佑一，柳澤英明：津波被害関数の構築，土木学会論文集B，Vol. 65，No. 4，pp.320-331，2009.
- 5) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998.
- 6) 油屋貴子，今村文彦：合成等価粗度を用いた津波氾濫シミュレーションの提案，海岸工学論文集，第49巻，pp.276-280，2002.
- 7) 今村文彦，藤原 誠，進藤一弥，市村 強：臨海都市域に襲来する津波の総合シミュレーション開発，海岸工学論文集，第51巻，pp.291-295，2004.
- 8) 村嶋陽一，今村文彦，竹内 仁，鈴木崇之，吉田健一，山崎正幸，松田健也：津波浸水予測における航空機搭載型レーザーデータの適応性，海岸工学論文集，第53巻，pp.1336-1340，2006.
- 9) 岩手県：岩手県地震・津波シミュレーション及び被

- 害想定調査に関する報告書（概要版），191p, 2004.
- 10) 後藤智明，小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科，52p, 1982.
- 11) Goto,C. and Shuto, N. : Numerical simulation of tsunami propagations and run-up, *Tsunamis—Their Science and Engineering*, Iida,K. and Iwasaki, T. eds., Terra Scientific Publishing,, pp.439-451, 1983.
- 12) 後藤智明，佐藤一央：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港湾空港技術研究所報告，Vol. 32, No. 2-1, pp. 3-44, 1993.

A STUDY ON NUMERICAL ACCURACY FOR TSUNAMI INUNDATION SIMULATION

Ryota TSUDAKA, Yoshinori SHIGIHARA and Koji FUJIMA

As behavior of tsunami inundation is varied by local topography and arrangement of buildings, high-resolution topographic data with several meters interval is required for accurate tsunami inundation simulation. However, the accuracy of tsunami simulation with high-resolution data is not examined enough yet. In order to verify the accuracy of tsunami simulation with high-resolution topographic data, basic hydraulic experimental results are compared with numerical results. Although reproduction of tsunami inundation behavior around structure is difficult by use of shallow water equation, the suitable spatial grid size for the tsunami prediction is able to be determined by $\Delta x / \sqrt{gh_{\max}} T$.