建物破壊を考慮した陸域遡上モデルの構築による 津波数値計算手法の高精度化

Improving Tsunami Numerical Simulation with the Time-Dependent Building Destruction Model

林 里美¹・Bruno Adriano²・Erick Mas³・越村俊一⁴

Satomi HAYASHI, Bruno ADRIANO, Erick MAS and Shunichi KOSHIMURA

Tsunami flow velocity on land is important for estimating tsunami load on structures. Numerical simulation is widely used to estimate tsunami load with flow velocity estimation. However, the simulation results have not been validated sufficiently because of the lack of observed information. In this study, through several case studies incorporating different initial and boundary conditions, authors simulated the 2011 Tohoku tsunami to discuss its verification with particular regard to tsunami inundation velocities. To better simulate tsunami inundation velocities, authors developed the tsunami run-up model with time-dependent building destruction model.

1. 序論

津波の陸上氾濫流速情報は、その流体力学的特性を把握する上で重要な要素である。また、津波による建物被害想定を高度化するためには、遡上津波力が建物の破壊において支配的であるという理由から、氾濫流速や作用波力に関連した被害予測式を利用することが望ましい。したがって、陸域を遡上する津波氾濫流速・作用波力の推定手法の高度化は、建物被害推定の精度向上において不可欠である。しかし、津波遡上速度および氾濫流速の実測例が少ないことから、津波数値計算による実地形上の流速値の推定精度は、未だに検証が不十分である。さらに、実務で用いられる被害想定手法は、津波氾濫に伴って段階的に進行する建物破壊状況が反映されないため、実際に起こりうる建物流失および抵抗力の変化に起因する流況の変化を予測・再現することができない。

本研究では、現行の津波数値シミュレーションにおける流速再現性の向上を目指した津波数値解析手法の改良を目的とする。具体的には、津波再現計算において望ましい陸域遡上計算条件（抵抗則）を検討し、建物流失被害の時空間的な発展に対応した新しい抵抗則の付与手法（以下、時間発展型合成等価粗度モデル）を提案する。

2. 陸上流速の再現に望ましい計算条件の検討

陸上域の最終計算格子間隔を10 mとして、仙台市若林区藤塚・名取市閑上・名取市小塚原（図-1 (a)）にお

表-1 本研究で使用した底面粗度係数 n_0 (小谷ら, 1998)

防潮林	0.030
田畑	0.020
その他(水域含む)	0.025

る2011年東北地方太平洋地震津波の遡上計算を実施する。特に、陸域遡上計算条件が異なる複数のシナリオ下で再現計算を行い、津波遡上速度・流速を算定する。そして、これらの実測値（Hayashi and Koshimura, 2013）を用いて現行の津波数値計算における流況再現性を評価し、解析に望ましい遡上条件および抵抗則について論ずる。

なお本研究では、Satakeら（2013）の断層パラメータを初期条件として採用した。これは、仙台平野における津波波形・浸水域・浸水深の整合性が高い波源モデルである（Satakeら, 2013；Hayashi and Koshimura, 2013）。

(1) 異なる陸域遡上計算条件の設定

津波遡上速度・流速に関する再現性に着目した既往の検討（Hayashi and Koshimura, 2013）では、土地利用状況および建物の存在を考慮した津波氾濫解析を行う必要性が指摘されている。本研究では、これらの抵抗を考慮するために合成等価粗度モデルを導入し、複数の遡上計算シナリオ（被災前・被災後条件）に基づいた検証を行う。

合成等価粗度モデルとは、構造物による抵抗をそれと等価なManning粗度係数で置き換える手法である。油屋・今村（2002）の合成等価粗度 n_{ab} は、Morison式にならない、流水に作用する力が底面摩擦力と家屋抵抗力の合力であるとして、式（1）のように導かれる。

$$n_{ab} = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times D^{4/3}} \dots\dots\dots (1)$$

1 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科
2 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科
3 正会員 工博 東北大学助教授災害科学国際研究所
4 正会員 工博 東北大学教授災害科学国際研究所

図-1 (a) 検証領域[藤塚地区(F), 閑上地区(K), 小塚原地区(Y)]における底面粗度係数分布[防潮林(0.03), 田畑(0.02), 水域含むその他(0.025)]と建物分布. (b-1) Case A, (b-2) Case Bの建物被害分布[流失(Washed-away), 残存(Surviving)]. (c-1) Case A, (c-2) Case Bの10 mメッシュ家屋占有率分布.

図-2 (a), (b) 油屋・今村(2002)の抵抗則による遡上速度の計算値[Case A, Case B]と実測値[田畑(At Rice Field), 家屋あり(At Residential Area)]の比較. (c) 今井ら(2013)の抵抗則による流速の計算値[Case A, Case B]と実測値の比較.

ここで, n_0 : 底面粗度係数, D : 水深 (m), k : 家屋幅 (m) (本稿では $k = 10$ m), θ : 家屋占有率 (%), C_D : 抗力係数 (本稿では $C_D = 1.5$) である. 本研究では, 小谷ら(1998)を参考にして, 底面粗度係数 n_0 を表-1のように設定した.

しかし, 家屋占有率 θ が大きい場合や $\theta = 100\%$ の場合は, 式(1)を適用することができない. したがって, 今井ら(2013)は合成等価粗度モデルの汎用性向上のため, 新しい合成等価粗度係数 n_{im} として式(2)を示した.

$$n_{im} = \sqrt{\frac{100 - \theta}{100} \times n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100} \times D^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, 各パラメータの諸元は式(1)と同様である(ただし, 抗力係数 $C_D = 0.5$). 本研究では, 油屋・今村(2002)および今井ら(2013)の抵抗則を用いて数値解析を実施し, 各々の流況整合性を比較することで, 陸上流速の再現に望ましい粗度係数付与手法を明らかにする.

a) Case A (被災前条件=防潮林+全建物を考慮)

津波来襲前の建物位置情報(国土交通省都市局, 2011)

および土地利用状況をGIS上で把握し, 当時の状況を表現する. 本研究では, 海岸線沿いの防潮林と全建物が存在する状況を「被災前条件」と仮定した(図-1(a), (b-1)). そして, 10 m格子あたりの家屋占有率 θ (図-1(c-1))・底面粗度係数 n_0 ・計算浸水深 D から, 合成等価粗度係数 n_{ab} および n_{im} を算定した.

b) Case B (被災後条件=残存建物のみ考慮)

「被災後条件」として, 津波来襲により全ての防潮林と一部の建物が流失した状況を定義する. 被災後の土地利用情報と建物被害情報(国土交通省都市局, 2011)に基づき, 建物の「流失」「残存」を反映させた当時の状況を把握した(図-1(a), (b-2)). そして, 10 m格子あたりの家屋占有率 θ (図-1(c-1))・底面粗度係数 n_0 ・計算浸水深 D から, 合成等価粗度係数 n_{ab} および n_{im} を算出した.

(2) 津波氾濫流速の再現性検証

上記, 複数の陸域遡上計算条件に対して実施した計算結果のうち, 津波遡上速度と流速の再現に望ましいと判断された結果について, 実測値との比較図を図-2に示す.

津波遡上速度に関しては, 油屋・今村(2002)の抵抗則を用いたケースが, 最も良好な整合性を示すことが明

らになった(図-2 (a), (b)). また, Case A (被災前条件)の再現性が高く, 構造物や土地利用状況による津波減衰効果を十分に表現できている. したがって, 津波遡上速度を再現する場合は, 油屋・今村(2002)の抵抗則かつ被災前条件下で計算を行うべきであることが分かった.

ただし, この条件下においても内陸部では未だに過大評価となり, 陸域遡上計算条件の変更のみでは実現象を再現しきれないことが明らかになった. これは, 津波の内陸侵入に伴う段階的な建物流失の効果, および津波先端部に巻き込まれる瓦礫漂流物の影響を, 従来の津波数値解析手法では考慮していないためである.

一方, 氾濫流速の再現性は, 今井ら(2013)の抵抗則の適用により向上することが分かった(図-2 (c)). 特に, 被災後条件(Case B)における計算結果が, 最も実測値と整合している. これは, 現行の津波数値計算によって, 家屋などが破壊された後の流れ場を良好に再現できることを示している. よって, 氾濫流速を再現する場合は, 今井ら(2013)の抵抗則および被災後条件の適用が望ましい.

しかしながら, 藤塚地区(F1領域)では, いずれの合成等価粗度モデルにおいても流速再現性が低下した. この原因として, 局所的かつ瞬間的に実測値と計算値を比較したことが挙げられる. 現段階では, 実測値の測定時間と同じタイミングで計算値を抽出しているが, 実現象に比べ, シミュレーション上では緩やかに流速が上昇したため, 過小評価の傾向を示したものと考えられる.

3. 時間発展型合成等価粗度モデルの構築

上記の検討から, 津波流況の再現に望ましい陸域遡上計算条件が分かり, 建物の存在・流失を考慮した抵抗則を設定する重要性が明らかになった. 特に, 被災前・被災後条件のみでは, 津波の氾濫に伴う段階的な建物破壊や抵抗力の変化を考慮できないため, 現在の粗度係数決定手法では推定精度向上に限界があることが分かった.

そこで本研究では, 高精度な数値解析手法の開発に向け, 時間発展型合成等価粗度モデルの構築に取り組む. これは, 津波の浸水状況に応じて建物を流失させることで, より実現象に近い抵抗則を逐次設定する手法である. 本稿では, 津波外力と建物被害程度の関連性について論じた既往研究や, 今次津波による実際の建物破壊状況を踏まえ, 建物構造別に流失条件の検討を行う. そして, 流失条件に基づいて建物を破壊する新しい抵抗則を数値解析に適用し, その妥当性および問題点について論じる.

(1) 建物流失手法と構造別建物流失条件の決定

津波の氾濫に伴う建物被害の拡大を再現するためには, 各計算ステップにおいて建物の流失判定を行い, 被

表-2 本研究で用いた防潮林および建物流失基準[A_c : 浸水縦断面積(m^2), h : 浸水深(m)]

	防潮林	木造建物	鉄骨造・RC造建物
左岸(仙台市)	$h \geq 4.0$	$h \geq 3.5$	$A_c \leq 6.8h$
右岸(名取市)	$h \geq 4.0$	$h \geq 2.0$	$A_c \leq 6.8h$

害状況を合成等価粗度係数として反映・更新する必要がある. 具体的には, 建物被害程度と津波外力の関連性を表す津波被害関数を導入することで, ある計算ステップにおいて流失させるべき建物棟数を決定する. そして, 建物破壊条件に基づいて流失対象となる建物を抽出する.

本稿では, 津波氾濫流況の地域特性を考慮するため, 図-1 (a)に示す解析対象領域を名取川左岸(仙台市)および右岸(名取市)に分割した. そして, 各領域に対してそれぞれ建物流失基準を定め, 家屋の破壊判定を実施した.

a) 流失限界棟数 N の算定

本研究では, Adrianoら(2014)による流失建物棟数の算定手法を採用し, 各計算ステップにおいて流失させる建物の限界棟数 N を決定した.

まず, 各計算ステップで得た浸水深分布と, 浸水深に関連した地域別の津波被害関数(越村・郷右近, 2012)を照合することで, 浸水深 1 m ごとの浸水棟数 n , およびその浸水深に対する建物流失率 P_D を把握する. そして, 条件付き確率の考えに基づいて, 同時に流失する可能性の高い棟数 N を算出し, これを流失させるべき建物棟数の限界値とした.

b) 防潮林の流失条件

時間発展型合成等価粗度モデルでは, 家屋と同様, 津波の氾濫状況に応じて, 藤塚地区・閑上地区における防潮林を流失させる. 防潮林の津波に対する効果と限界に関しては, 首藤(1985)により, 直径 10 cm 以下の樹木は浸水深 $h = 4.0\text{ m}$ に到達すると倒伏・折損することが示唆されている. したがって, 本研究では, 浸水深 $h \geq 4.0\text{ m}$ となった際に防潮林を流失させることとした(表-2).

c) 木造建物の流失条件

既往津波の現地調査結果から, 木造建物の被害程度および破壊基準は, 主に浸水深や氾濫流速と関連付けて論じることが可能である(例えば松富・首藤, 1994). 飯塚・松富(2000)は過去の事例に基づき, 津波氾濫流と建物被害程度を関連づけた被害判断基準を提案した. この基準では, 浸水深 $h = 2.0\text{ m}$, 流速 $u = 4.9\text{ m/s}$, 抗力 $F = 27.4\text{ kN/m}$ を境に木造家屋が大破するとされる.

浸水深と木造建物被害の関連性は, 今次津波においても同様の傾向が確認されている. 図-1 (a)の検証領域では, 国土交通省都市局(2011)による現地調査結果から, 左岸(仙台市)では浸水深 $h \geq 3.5\text{ m}$, 右岸(名取市)では浸水深 $h \geq 2.0\text{ m}$ にて流失棟数が急激に上昇した. した

図-3 時間発展型合成等価粗度モデルを用いた解析結果。(a) 氾濫流速の計算値(New Model)と実測値の比較。(b) 藤塚地区(F1領域)における流速時系列変化の比較。

がって、本研究では、浸水深を閾値として流失対象建物の選定を行い、抗力の降順に流失させることとした(表-2)。

d) 鉄骨造建物の流失条件

松富ら(2013)の検討から、浸水深や氾濫流速、抗力のみによって鉄骨造建物の被害程度を論じることは困難であると示されている。その一方で、浸水縦断面積と浸水深の関連性から以下の被害限界式が導かれ、破壊程度が良好に分類されることも明らかになった(松富ら, 2013)。

$$A_C = 6.8 \times h \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 A_C : 津波氾濫方向の浸水縦断面積 (m^2)、 h : 浸水深 (m) である。この式から、鉄骨造建物移動・転倒しないためには、6.8 m以上の奥行きが必要であることが分かった。以上を踏まえて、本研究では、浸水縦断面積 A_C に関連づけられた式(3)を流失基準と定め、抗力の降順に流失させることとした(表-2)。

e) RC造建物の流失条件

RC造建物の被害程度と津波外力値の関連性は、木造建物と同様、過去の津波被害調査に基づいて報告されている(例えば松富・首藤, 1994)。飯塚・松富(2000)の被害判断基準によると、RC造構造物は浸水深 $h \geq 7.0$ m、流速 $u \geq 9.1$ m/s、抗力 $F \geq 332.0$ kN/mにおいて大破する。

また、松富ら(2012)は今次津波の現地調査を通じて、

表-3 現地調査(国土交通省都市局, 2011)による建物流失率と時間発展型合成等価粗度モデルによる推定値の比較

	左岸(仙台市)	右岸(名取市)
実建物流失率	59.9%	63.6%
推定建物流失率	54.5%	35.0%

鉄骨造建物と同様、浸水縦断面積 A_C を用いたRC造構造物の破壊限界式(3)を提言した。以上より、本研究では、松富ら(2012)による建物流失基準を採用し、他構造と同じく抗力の降順に流失させることとした(表-2)。

(2) 新しい抵抗則による津波流況再現性の検証

上記の建物破壊基準を用いて時間発展型合成等価粗度モデルを構築し、津波数値計算を実施した。表-2に基づく解析結果として、氾濫流速の再現性とその時系列変化(F1領域)を図-3、建物流失率の推定値と実測値の比較を表-3、建物の推定流失被害分布を図-4(b)に示す。

図-3(a)より、氾濫流速の再現性は概ね良好であるが、藤塚地区における推定精度には依然問題があることが分かった。また、F1領域の流速時系列変化を示した図-3(b)より、時間発展型合成等価粗度モデルによる結果は、被災前条件(Case A)と被災後条件(Case B)の中間に位置することが確認されたものの、本解析では計算上の流速最高値が実測値に到達していないことが明らかになった。

この原因について考察を行うため、建物流失被害について推定結果と実被害状況を比較した(図-4, 表-3)。その結果、藤塚地区を含む名取川左岸(仙台市)では、流失と判定された建物棟数が実被害棟数の90%程度に達することが分かった。また、流失建物の分布に関しては、実現象と解析結果が概ね一致していることが確認された。しかし、閑上・小塚原地区を含む名取川右岸(名取市)では、実被害建物棟数の半数程度が残存すると推定され、被害実態と解析結果に大きな乖離が生じた。特に、内陸部の小塚原地区において推定された流失建物分布は、実現象と概ね整合することが明らかになった一方、沿岸部の閑上地区(密集住宅街)において推定された流失建物は、被害実態に反して名取川河口付近にのみ集中した。

以上の検証より、図-3にて確認された氾濫流速の過小評価は、建物破壊状況の再現が不十分であるために生じたものと考えられる。特に、建物が密接する地域において被害推定が不十分であった結果は、密集市街地における津波氾濫流況の特性、および倒壊家屋から発生した漂流瓦礫の影響を考慮する必要性を示唆している。建物が広範囲に散在する地域に比べて、市街地では津波の氾濫流況が複雑化することに加え、瓦礫化した流失建物の衝突が後方家屋の破壊原因になるなど、実際の建物被害の発生に関しては多くの不確定要素が存在する。したがっ

図-4 (a)国土交通省都市局(2011)の現地調査による建物流失被害分布[流失(Washed-away), 残存(Surviving)]. (b)時間発展型合成等価粗度モデルにより推定された建物流失被害分布.

て、今後は、密集市街地における氾濫流況を考慮した建物流失基準を設定し、漂流瓦礫による衝突力を適切にモデル化することで、建物被害推定精度および流速再現性の向上を図る。

4. 結論

本研究では、津波流況の高精度予測を可能にする津波数値解析手法の開発を目的として、氾濫流速の再現性検証を通じて適切な陸域遡上計算条件を決定し、建物破壊を考慮した新たな抵抗則付与手法を検討した。

まず、複数の陸域遡上計算条件下における数値解析結果と実測値を比較することで、津波遡上速度と流速の再現に望ましい計算ケースを選定した。その結果、遡上速度に関しては、油屋・今村(2002)の抵抗則かつ被災前条件下における再現性が最も高い一方、流速に関しては、今井ら(2013)の抵抗則かつ被災後条件下における整合性が極めて高くなった。同時に、建物の存在・破壊状況を考慮した抵抗則の設定が重要であることが明らかになった。

これを受けて、津波の浸水に伴う段階的な建物流失状況を粗度係数として逐次付与する、時間発展型合成等価粗度モデルを構築した。その結果、新しいモデルにおいて一定の妥当性は確認されたものの、一部領域では流速が過小評価されており、時間発展型合成等価粗度モデルの建物流失手法に課題があることが明らかになった。特に、密集市街地では建物流失被害の推定精度が低下しており、津波氾濫流況の特性に応じた破壊基準を設ける必要性、および瓦礫漂流物が家屋被害に与える影響を考慮する重要性が明らかになった。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(課題番号：25242035, 26・7122)および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究費の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 油屋貴子・今村文彦(2002): 合成等価粗度モデル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.
- 飯塚秀則・松富英夫(2000): 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.381-385.
- 今井健太郎・今村文彦・岩間俊二(2013): 市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_311-I_315.
- 国土交通省都市局(2011): 東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査のとりまとめについて, オンライン, www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkou-arkaibu.html, 2013年5月18日参照.
- 越村俊一・郷右近英臣(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_336-I_340.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998): 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.
- 首藤伸夫(1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.465-469.
- 松富英夫・決得元基・齋藤雅大(2013): 開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_326-I_330.
- 松富英夫・首藤伸夫(1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.246-250.
- 松富英夫・山口枝里子・直江和典・原田賢治(2012): 東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート造建物と海岸黒松の被害条件, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_351-I_355.
- Adriano, B., E. Mas, and S. Koshimura(2014): An integrated GIS-based model to evaluate the tsunami vulnerability of building using fragility function and tsunami simulation, 平成25年度土木学会東北支部研究発表会講演概要集(CD-ROM), II-74.
- Hayashi, S., and S. Koshimura(2013): The 2011 Tohoku tsunami flow velocity estimation by the aerial video analysis and numerical modeling, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.4, pp.561-572.
- Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya(2013): Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bulletin of the seismological society of America, Vol.103, No.2B, pp.1473-1492.