

釧路市街地の津波氾濫解析に基づく波圧の推定について

Investigation on Estimation of Wave Pressure Based on Analysis of Inundation Due to Tsunami in the Urban Area of Kushiro City

室蘭工業大学 〇学生員 近藤 将史 (Masashi Kondoh)
 室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による大津波により広い地域で被害が発生し、北海道の太平洋沿岸部にも大津波警報が発令され、釧路市でも新釧路川の河口部両岸地域港湾施設などで被害が発生した。このような背景から、今後は釧路市を含めた津波の被害が予想される地域で大津波が襲来し、これまでの被害想定よりもさらに深刻な被害をもたらすことが考えられ、対策が必要である。

しかしながら、津波被害の想定には高度な技術や設備の準備など多くの労力と資金が必要である。そこで本研究では内海ら¹⁾の既往研究を参考に、誰でも簡単に入手し、津波氾濫解析を行うことのできるフリーソフトウェア iRIC2.1²⁾を用いて検討を行うことを試みた。具体的には、まず2012年6月に北海道³⁾が発表した津波浸水予測図と、iRIC2.1を用いて計算された津波浸水予測図との比較を行い、iRIC2.1を用いた計算の精度を検証した上で、釧路市街地における波圧の推定を試みた。

2. 釧路市街地の概要

釧路市街地は、釧路市の中心に位置し人工的に作られた直線河川である新釧路川と釧路市の東側に位置する蛇行河川である釧路川の周辺に広がっている。また、市街地内での標高差が大きいため、海岸部近くでも場所によって津波の被害が異なるという地形特性を有する。北海道³⁾が発表した津波浸水予測図によると、釧路市では人口約18万人に対して、約12万人³⁾が被災する可能性がある。

3. iRIC2.1 Nays2D Floodによる津波氾濫解析

3.1 iRIC2.1 Nays2D Floodについて

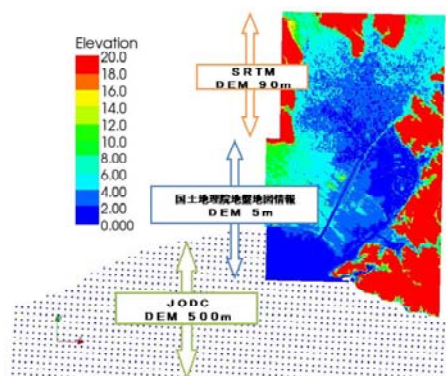


図-1 使用した地形データ

iRIC2.1は、これまでUSGS（アメリカ地質調査所）で開発してきたMD_SWMSと（財）北海道河川防災研究センターで開発してきたRIC-Naysの機能を統合した河川の流れ・河床変動解析を行うソフトウェアである。iRIC2.1ソフトウェアに含まれるNays2D Floodは地形、河川データ、河川の流入量、粗度のデータ等を入力し、氾濫流解析を行うソルバーの一つである。

3.2 計算条件

使用したデータについて、地形データは国土院基盤地図情報⁴⁾(5mDEM)、SRTM⁵⁾(スペースシャトル立体地形データ)、JODC⁶⁾(海洋地形データ)をiRIC2.1地形データに変換して使用した(図-1参照)。マニングの粗度係数については河川砂防技術基準⁷⁾、細密数値情報⁸⁾からの値を参考に、市街地を建物占有率に応じて0.04~0.08m^{-1/3}s、水域を0.015~0.025 m^{-1/3}s、湿原域を0.055 m^{-1/3}sとして与えた。新釧路川の流量は年平均流量である30m³/s、釧路川の流量は新釧路川との比流量配分で2.14 m³/sを与えた。

計算範囲は新釧路川を中心に、河口から上流へ11km、海岸部へ3km、横断方向に10kmを計算領域として約50mメッシュを設定し作成した(図-2参照)。

想定波高は2012年6月に北海道が発表した津波浸水予測図の最大水位である10.8mを与え、津波の波形は次式で与えた。

$$h(t) = (10.8) \times \sin(2\pi/360)t \quad (1)$$

ここで、 h は波高(m)、 t は計算時間(s)である。計算時間はおおよそ津波の1周期分である3,600sとした。

3.3 計算精度の検証

北海道³⁾では、東北地方太平洋沖地震の発生を踏まえて北海道沿岸における津波想定の見直しを行い、2012年6月に被害想定の再検討のための津波浸水予測図を発表している(図-3参照)。図-3によると、新釧路川河口



図-2 解析対象範囲

部から沖合 2~3km の地点に津波の第1波が地震発生から 31 分後に到達し、最大水位が 10.8m の津波が押し寄せるといった想定となっていることから、本節ではこの最高水位を想定波高として津波氾濫解析を行った。北海道想定津波浸水予測図と iRIC2.1 を用いて計算を行った最大浸水深予測図(図-4 参照)を比較し、解析精度の検証を行う。

津波氾濫解析結果を図-4 に示し北海道想定津波浸水予測図との比較を行うことで計算精度を検証する。図-3、図-4 を比較すると、図-3 では新釧路川において津波遡上が進行していくが、河道に侵入した津波の氾濫が止まり、河川からの津波の越流はほとんど見られないことが確認できるが、図-4 でも同様の結果となっていることがわかる。次に、図-3 では釧路川においては河川から右岸側へ津波が溢れ出し、右岸側の市街地に浸水が発生しているのがわかる。また、左岸側は浸水の様子が見られず、これは釧路川の左岸側には地盤高の高い地域が広がっているためであると考えられる。一方、図-4 から釧路川の右岸側が浸水している状況と、左岸側には浸水が広がっていない様子が確認できる。さらに、図-3 と図-4 の全体を俯瞰的に比較しても浸水状況のおおよその傾向を捉えていることがわかる。以上のことから、iRIC2.1 による計算結果は北海道想定津波浸水予測図における浸水範囲や最大浸水深を概ね良好に再現できていると判断でき、計算精度の検証がなされたといえる。

4. 津波波圧の算定

前節で iRIC2.1 を用いた浸水域の計算の妥当性を検証

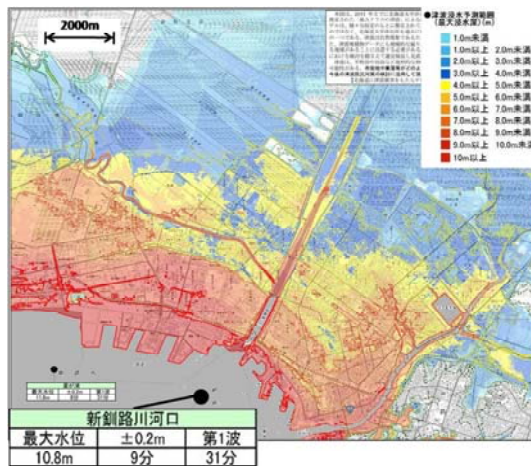


図-3 2012 年北海道想定津波浸水予測図(北海道³⁾より)

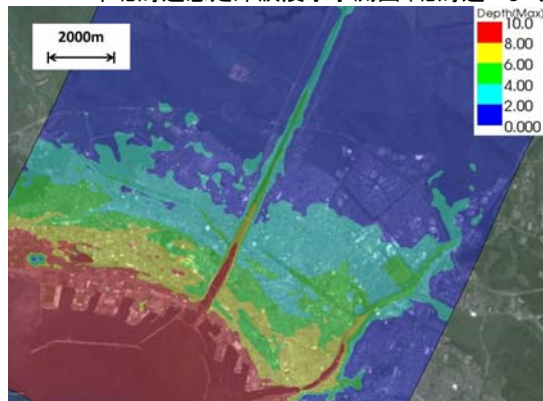


図-4 iRIC2.1 による計算結果 最大浸水深予測図

した。構造物の津波による安全性を検討するには、波圧の推定が必要である。

構造物へ作用する津波波圧に関する文献は、現在のところ沿岸に建設された堤防に関するものが多く、陸上に遡上した津波が構造物に与える影響について検討された例はまだ少ない。安全性を考慮するには静水圧だけでなく動水圧が作用することを考慮することが必要である。そこで、(1)静水圧、(2)ビルの津波耐力設計に多く用いられている朝倉らの式⁹⁾、(3)2012 年に提案された平面 2 次元津波遡上計算を用いた津波波圧算定方法である有光らの式¹⁰⁾、の 3 つの式を用いて波圧の算定を行った。

4. 1 津波波圧の算定方法

(1) 静水圧での波圧算定

静水圧の作用波圧 $p(\text{N/m}^2)$ は次式で表される。

$$p(z) = \rho g \{h - z\} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 h は浸水深 (m)、 z は作用点の位置 (m) である。

(2) 朝倉らの津波波圧算定方法を用いた波圧算定

朝倉らの式は図-5 に示すように、津波による最大遡上深水深の 3 倍の静水圧をもつ荷重として、津波のもつ衝撃力を評価するものである。これより、作用波圧 $p(\text{N/m}^2)$ は以下の式で表される。

$$p(z) = \rho g \{3h - z\} \quad (3)$$

これより、構造物に作用する水平波力 F_x は以下の式で表される。

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot 3h \cdot 3\rho gh = 4.5\rho gh^2 \quad (4)$$

ここで、 F_x は水平波力 (N)、 h は浸水深 (m)、 z は作用点の位置 (m)、 ρ は流体密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 B は受圧幅 (m) である。

(3) 有光らの津波波圧算定方法を用いた波圧算定

有光らは、朝倉らの波圧算定方法では高い防潮壁を越流する津波が作用する場合に過小評価になるとして、流速を考慮した実験を行った。構造物が存在する場合にお

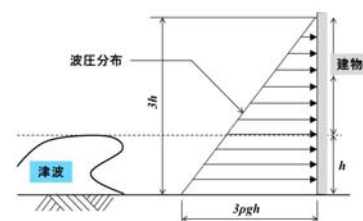


図-5 朝倉らによる津波波圧分布

表-1 構造物別の建物の荷重¹¹⁾

構造	自重+積載荷重	建築面積 16 坪の建物全体の重さ
木造 2 階建	600kg/m ²	30t
鉄骨 2 階建	750kg/m ²	37.5t
R C 造 2 階建	3,200kg/m ²	160t

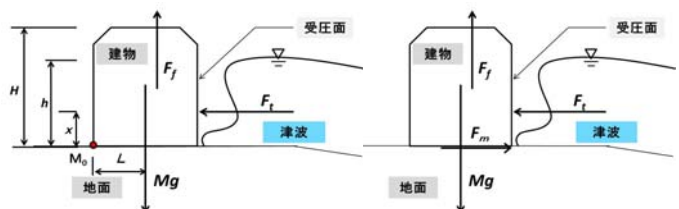


図-6 津波による転倒の模式図

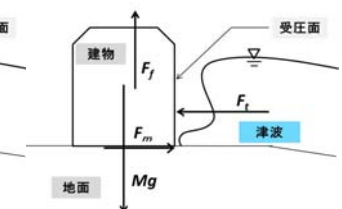


図-7 津波による滑動の模式図

いて、前面水深に応じた静水圧分布に加えて、運動量保存則に基づき水平方向流速に応じた圧力が構造物に作用するものとする。平面2次元計算により求められる構造物前面の浸水深 h_f 及び水深平均の水平方向流速 u の時系列を用いると、 $z \leq h(t)$ における作用波圧 $p(\text{N/m}^2)$ の鉛直分布の時系列は次式で表すことができる。

$$p(z,t) = \rho g \{h_f(t) - z\} + \rho u_f(t)^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ は流体密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 h_f は浸水深(m)、 z は作用点の位置(m)、 t は時間(s)である。

4. 2 転倒・滑動の試算

計算条件として津波を受ける構造物は木造2階建、鉄骨2階建、RC造2階建を設定した(表-1 参照)。今回は簡易的に波圧の算定を行ったため建物の基礎は考慮していない。建物はそれぞれ、概ね表-1 程度の荷重が建物の地盤に作用している。また、津波波圧は受圧面に垂直に作用するものとし、構造物内は浸水しないものとする。受圧幅は7.5m、建築面積16坪の建物という条件を仮定し試算した。

(1) 転倒の式

転倒の模式図を図-6 に示す。図の M_0 点を中心に転倒すると考え、 M_0 点まわりのモーメントの釣り合いより、転倒限界を求める¹²⁾。今回は津波波圧を静水圧と動水圧、浮力の3つの合力を考える。よって、以下の式を満たすと構造物は転倒する。

$$F_t \cdot x \geq (Mg - F_f) \cdot L \quad (6)$$

ここで、 F_t は津波による波圧(N)、 x は M_0 点から津波波圧の作用している点までの距離(m)、 Mg は建物荷重(N)、 F_f は浮力(N)、 L は M_0 点から建物荷重及び浮力の作用している点までの距離(m)である。

(2) 滑動の式

滑動の模式図を図-7 に示す。滑動する条件としては水平方向津波波圧と構造物と接地面の摩擦力のつり合いより次式を用いた¹³⁾。

$$F_t \geq \mu(Mg - F_f) \quad (7)$$

ここで、 F_t は津波による波圧(N)、 Mg は建物荷重(N)、 F_f は浮力(N)、 μ は摩擦係数とした。また、釧路地域の地盤は粘土質であるため、国土交通省中部地方整備局道路設計要領¹⁴⁾を参考に摩擦係数は0.5とした。

4. 3 計算結果

有光らの式の波圧は流速を考慮するため、内海ら¹⁾が検討した甚大な被害が出る7施設の中で、最も流速が大きかった釧路駅周辺の位置での津波波高、津波流速を使用した。図-8 では釧路駅周辺にある構造物、図-9 では古川終末処理場周辺にある構造物に作用する波圧と浸水深を、津波が海岸から沖合3km地点に達してからの時系列で示した。北海道³⁾想定より地震発生から46分後(図-3 参照)に浸水深が6.7mに達し、釧路駅周辺では最大浸水深が7.5mとなった。また、構造物に働く津波波圧は最大値で静水圧は約1,700kN、朝倉らの式は約15,300kN、有光らの式は約3,600kNであった。

この結果より表-2 を示す。表-2 は波圧の算定方法別で構造物が転倒限界、滑動限界に達する浸水深を試算したものである。ただし、有光らの式では津波流速を考慮する式であるため波高のみで転倒限界を求めることができない。そこで、最初に転倒限界に達した時点の波高を転倒限界波高とした。

朝倉らの式、有光らの式、それぞれについての波圧を静水圧と比較すると、朝倉らの式は静水圧の9倍である。また、有光らの式では流速が最も大きかった時点で、約2.1倍であった。共に動水圧を考慮しているが朝倉らの式は衝撃力や慣性力などの抗力を含む式として提案されているので、双方で大きな差が出たと考えられる。

また、実際の津波被害¹⁵⁾では転倒に比べて滑動での被害が非常に多くなっている。図-10、図-11 では試算結果を滑動限界に達する浸水深エリアで示す。ただし有光らの式は流速を考慮するので浸水深のみでエリア分けができないのでここでは除外した。釧路市の一般家屋の90%¹⁶⁾である木造2階建て、滑動限界の差が最も大きいRC造2階建ての図を採用した。図-10、図-11の滑動エリアで静水圧と朝倉の式に大きく違いがないことは、生起時間は異なるが滑動限界以上の範囲が類似しているためであると考えられる。

今回の転倒及び滑動についての試算結果は、簡易的なものであったため、津波の建物に与える影響を過大に評価している可能性がある。しかし、転倒限界より早く滑動限界に達しているという点で、今回の試算結果は、実際の津波被害と同様に滑動での被害が多いことを示しているといえる(表-2 参照)。

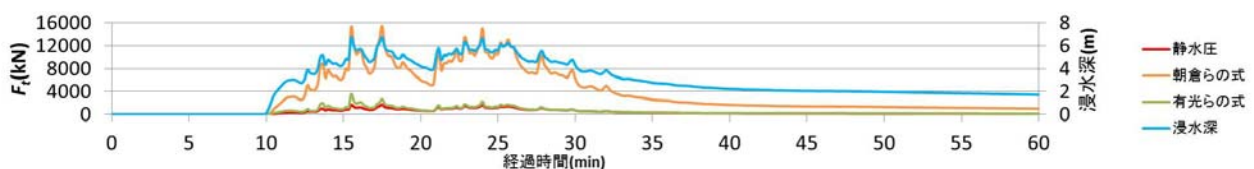


図-8 釧路駅(海岸より1.5km)地点の構造物に作用する全波力

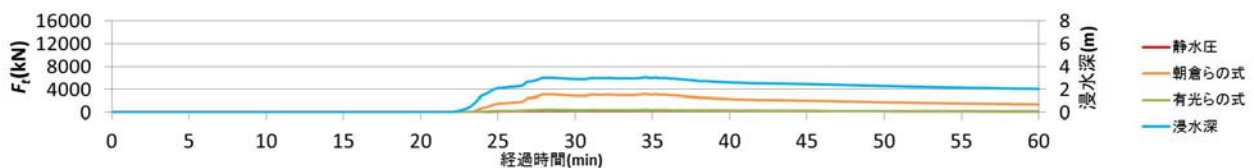


図-9 古川終末処理場(海岸より3.5km)地点の構造物に作用する全波力

表-2 計算結果

静水圧		
構造	転倒限界(m)	滑動限界(m)
木造2階建て	0.56	0.54
鉄筋2階建て	0.69	0.66
RC造2階建て	2.82	2.52
朝倉らの式		
構造	転倒限界(m)	滑動限界(m)
木造2階建て	0.53	0.44
鉄筋2階建て	0.65	0.52
RC造2階建て	1.84	1.51
有光らの式		
構造	転倒限界(m)	滑動限界(m)
木造2階建て	1.13	0.52
鉄筋2階建て	1.13	1.13
RC造2階建て	2.69	1.68

5. まとめ

本研究で得られた成果を下記に記す。

- 1) iRIC2.1 を用いて津波氾濫解析を行った結果、北海道が2012年6月に発表した津波浸水予測図と同様の結果を得られることができ、計算の妥当性を示すことができた。
- 2) 仮定の構造物を設定することで構造物に作用する波圧を推定することができた。
- 3) 転倒限界、滑動限界を試算することで、実際の津波被害調査の結果と同様な滑動での被害想定を示すことができた。

様々な条件の違いはあるが、東北地方太平洋沖地震の際は最大浸水深が3~4mの津波が襲来した地域で多くの木造構造物が流出していたが、残存している事例も少数ながら確認されていた¹⁵⁾。今後、構造物内の浸水、基礎地盤を考慮した転倒、滑動の試算を行い、家屋、公共施設などの安全性等について検討していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、有益な上限を頂いた室蘭工業大学学生の内海誠治氏、釧路港潮位データを提供して頂いた気象庁函館海洋気象台及び各種資料を提供して頂いた釧路市総務部の佐々木主幹ほか釧路市関係各位に対し、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 内海誠治, 中津川誠, 阿部孝章, 吉川泰弘, 工藤俊: 釧路市街地における津波氾濫解析と被害想定についての研究, 土木学会北海道支部, 平成24年度土木学会北海道支部論文報告集69, CD-ROM, B-32, 2013.
- 2) iRIC Project; 河川シミュレーションソフト iRIC: <http://i-ric.org/ja/>
- 3) 北海道 HP; 津波浸水予測図等について: <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/tunamisinnsuuiyosokuzu.htm>
- 4) 国土地理院基盤地図情報; 基盤地図情報ダウンロードサービス: <http://fgd.gsi.go.jp/download/>
- 5) SRTM; SRTM Data Search: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>
- 6) JODC; 海洋データ・情報の閲覧・提供サービス: http://www.jodc.go.jp/service_j.htm
- 7) 建設省河川局: 「河川砂防技術基準 調査編」H9

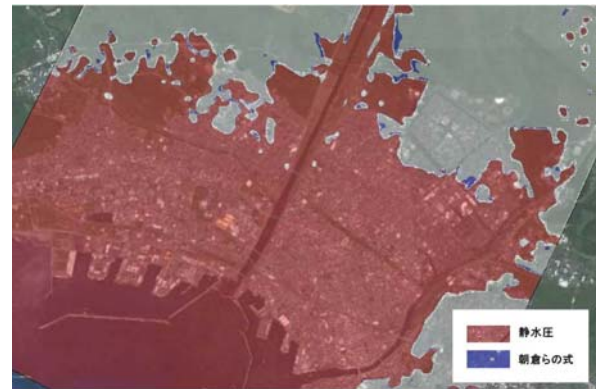


図-10 滑動限界からみた木造2階建ての流出範囲

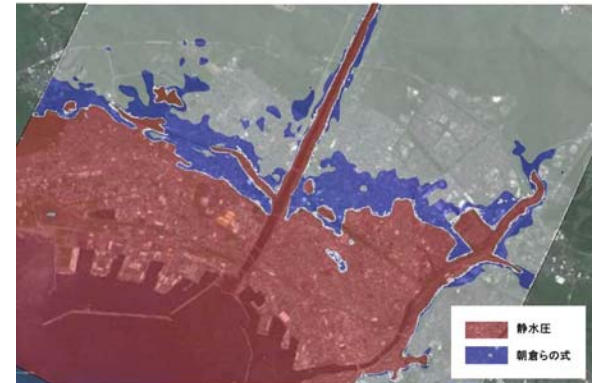


図-11 滑動限界からみたRC造2階建ての流出範囲

日本河川協会編集。

- 8) 国土地理院: 細密数値情報(10m メッシュ土地利用) 首都圏 1994 年版, 細密数値情報(10m メッシュ土地利用) 中部圏 1997 年版, 細密数値情報(10m メッシュ土地利用) 近畿圏 1996 年版。
- 9) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 海岸を越流した津波による波圧に関する実験研究, 海岸工学論文集, 第47巻, 土木学会, pp.911-915, 2000.
- 10) 有光剛, 大江一也, 川崎浩司: 平面2次元津波遡上計算結果を用いた津波波圧算定方法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol68, No2, pp.781-785, 2012.
- 11) 有限会社 ADS 計画研究所; 建物の重さ: <http://www.ads-network.co.jp/taishinsei/kozo-kagaku-01.htm>
- 12) 今村文彦: 巨大津波の被害実態と減災技術, 第24回鉄道総研講演会, 特講 1-8, 2011.
- 13) 津村浩三, 工藤仁: 津波対応住宅試設計と建物の津波被害状況, 東北地域災害科学研究, 第48巻, pp.69-74, 2012.
- 14) 国土交通省中部地方整備局: 道路設計要領, 第2章擁壁 <http://www.cbr.mlit.go.jp/road/sekkeiyouyou/>
- 15) 独立行政法人 建築研究所; 津波による建築物の被害, 6-4 被害形態と分類の考察: www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/
- 16) 釧路市 HP; 住宅・土地統計調査: <http://www.city.kushiro.lg.jp/shisei/toukei/chousakekka/0009.html>