# 釧路市を対象とした津波による構造物の安全性評価

Research on a Safety Evaluation of Structures Due to Tsunami in the Kushiro City.

室蘭工業大学	○学生員	奥山裕介 (Yusuke Okuyama)
室蘭工業大学	正 員	中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学	学生員	吉田ちあき (Chiaki Yoshida)

# 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,広い地域で写真-1<sup>10</sup>のように建物の 被害が発生した.北海道の太平洋沿岸部でも大津波警報 が発令され,釧路市において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、津波被害の想定と対策案の検討には高 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<sup>2)</sup>の既往研究を参考に、誰 でも簡単に入手でき、津波氾濫解析を行うことができる フリーソフトウェア iRIC2.3<sup>3)</sup>を用いて、釧路市街地にお ける津波被害の想定を以下の手順で行う.

- (1) iRIC2.3 を用いて計算された津波浸水予測図と 2012 年6月に北海道<sup>4</sup>が発表した津波浸水予測図を比較 し、計算精度の検証を行った。
- (2) 津波による構造物の安全性を評価するため、津波波 圧の算定、ならびに直接基礎の構造物の転倒・滑動 の検証を行った。
- (3) 直接基礎だけでなく、杭基礎を考慮した場合の構造物も検証することで、実際に起こり得る構造物の転倒・滑動の検証を行った。

## 2. 研究方法

#### 2.1 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に、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12万人が被災する可能性が ある.

2.2 津波氾濫解析と津波波圧の算定



写真-1 東日本大震災での津波による建物の被害<sup>1)</sup>

#### (1) iRIC2.3 Nays2D Flood を用いた津波氾濫解析

iRIC2.3 は、河川の流れ・河床変動解析を行うソフト ウェアである. iRIC2.3 ソフトウェアに含まれる Nays2D Flood は、地形・河川のデータ・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.

本研究における計算条件等のデータは、近藤ら<sup>5</sup>の既 往研究を参考に設定し、津波氾濫解析を行う.

#### (2) 津波波圧の算定

津波による構造物の安全性を評価するにあたり,まず 波圧の推定を行う.本研究では,近藤ら<sup>50</sup>の研究を参考 に,以下の3つの式を用いて波圧の算定を行った.

$$p(z) = \rho g h \tag{1}$$

$$p(z) = 3\rho gh \tag{2}$$

$$p(z) = \rho g h_f(t) + \rho u_f(t)^2 \tag{3}$$

ここで,(1)式は静水圧,(2)式はビルの津波耐力設計に 多く用いられている朝倉らの式の,(3)式は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<sup>つ</sup>であり,pは作用波圧(N/m<sup>2</sup>), $\rho$ は流体密度(kg/m<sup>3</sup>),gは重力加速度(m/s<sup>2</sup>), $h \ge h_f$ は浸 水深(m), $u_f$ は水平方向流速(m/s),tは時間(s)である.ま た,各式の浸水深と流速には iRIC2.3 による津波氾濫解 析で算出されたものを使用する.

## 2.3 転倒に対する検討方法

計算条件として津波波圧を受ける構造物は,木造3階 建,鉄骨造3階建,RC造3階建を想定した.さらに本 研究では,各構造形式において直接基礎の他に杭基礎を 考慮した検討を行う.今回使用する杭や構造物の設計条 件は,日本建築防災協会<sup>80</sup>の設計例を参考にした.杭に はSTK400の杭径139.8mm,厚さ6.6mmの杭を長さ 13m,16本使用する.構造物の受圧幅は8m,奥行は 5.5m,高さは9.6m,建築面積は44m<sup>2</sup>という条件を仮定 した.構造物の外観のイメージ<sup>90</sup>と杭の配置を図-1に 示す.建物の地盤には,表-1<sup>10</sup>に示す荷重が作用するこ ととする.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して試算した. 転倒の模式図を図-2に示す.図のO点を中心に転倒



図-1 建物の外観 <sup>9)</sup>と杭伏図

表-1 構造別の建物の荷重

構造形式	自重	建物面積44m <sup>2</sup> の重さ
木造3階建	900kg/m <sup>2</sup>	388kN
鉄骨造3階建	1,125kg/m <sup>2</sup>	485kN
RC造3階建	4,800kg/m <sup>2</sup>	2,071kN

すると考え, O 点まわりのモーメントの釣り合いにより 転倒限界の浸水深を求める.転倒モーメントは津波波力 と浮力,抵抗モーメントは建物自重と杭の引抜抵抗力を 考え,次式を満たすと構造物が転倒すると考える.

$$F_t \cdot x + F_f \cdot \frac{D}{2} \ge M_g \cdot \frac{D}{2} + M_p \tag{4}$$

ここで、 $F_t$ は水平方向波力(kN)、xは O 点から津波波力 の作用点までの距離(m)、 $F_f$ は浮力(kN)、 $M_g$ は建物自重 (kN)、Dは建物奥行(m)、 $M_p$ は杭の引抜抵抗力によるモ ーメント(kNm)であり、 $M_p$ の算定式を以下に示す.

$$M_p = R_{tc} n_t d_e \tag{5}$$

ここで, *R<sub>tc</sub>* は杭の引抜抵抗力(kN), *d<sub>e</sub>* は杭中心と O 点 までの距離(m), *n<sub>t</sub>* は O 点にある杭以外の杭の本数で, 今回の場合は 12 本である.また,直接基礎の構造物の 場合には *M<sub>p</sub>* は 0 とする.

(5)式で
$$M_p$$
を求めるために、 $R_{tc}$ を次式で算定する.  
 $R_{tc} = \tau_{ct} L_c \varphi + W_p$  (6)

ここで、 $\tau_{cr}$ は粘土層における最大周面摩擦力(kN/m<sup>2</sup>), *L*<sub>c</sub>は粘土層における杭の長さ(m),  $\varphi$ は杭の周長(m), *W*<sub>p</sub> は杭の自重(kN)であり、2,769N とする<sup>11)</sup>. また、今回 対象としている釧路市の市街地では粘性土の地域が多い ため<sup>12)</sup>,粘性土層のみに杭が存在すると想定して  $R_{tc}$ を 求めることとした.最大周面摩擦力  $\tau_{cr}$ は、以下の式で 算定する.

$$\tau_{ct} = \alpha_p L_f \frac{q_u}{2} \tag{7}$$

ここで、 $a_p$ は粘性土の過圧密による低減係数、 $L_f$ は杭の 細長比による低減係数、 $q_u$ は土の一軸圧縮強さ(kN/m<sup>2</sup>) であり、今回は $a_p \ge L_f$ は考慮しないため1 とした、 $q_u$ は Terzaghi-Peck 式より、以下の式で算定する.

$$q_u = 12.5N \tag{8}$$

ここで, N は周辺地盤の平均 N 値である. 今回の計算 では, 「道路土工一土質調査指針」<sup>13)</sup>を参考に, 密度が 中位の粘土層の N 値がおおよそ 4~8 であることから, 中間値である 6 を N 値として計算した.

# 2.4 滑動に対する検討方法

津波を受ける構造物の条件は,2.3 と同じものとし, 滑動の模式図を図-3 に示す.

## (1) 直接基礎の構造物における滑動に対する検討

構造物が滑動する条件は、水平方向波力と構造物と接



地面の摩擦力の釣り合いより,次式を用いた.

$$F_t \ge \mu(M_g - F_f) \tag{9}$$

ここで、 $F_t$ は津波波力(kN)、 $M_g$ は建物自重(kN)、 $F_f$ は 浮力(kN)、 $\mu$ は摩擦係数である.また、釧路地域の地盤 は粘性土であるため、国土交通省中部地方整備局道路設 計要領<sup>14)</sup>を参考に、摩擦係数は 0.5 とした.

#### (2) 杭基礎の構造物における滑動に対する検討

構造物が滑動する条件は、津波波力と杭のせん断耐力、 津波波力による曲げモーメントと杭の曲げ耐力との釣り 合いを、それぞれ以下に示す(10)式と(13)式により求め る.また、今回使用した式や計算過程は「建築基礎構造 設計指針」<sup>15)</sup>を参考にした.

まず,杭のせん断耐力との釣り合いとして,次式を満 たすと構造物が滑動すると考える.

$$F_t \ge nQ_{su} \tag{10}$$

ここで, *F<sub>t</sub>* は津波波力(kN), *Q<sub>su</sub>* は杭のせん断耐力(kN), *n* は杭の本数である. また, *Q<sub>su</sub>* は次式で算定する.

$$Q_{su} = \frac{F_s A}{k} \tag{11}$$

ここで、 $F_s$ は杭の基準せん断強度( $kN/mm^2$ )、Aは杭の断面積( $mm^2$ )、kはせん断応力度分布係数である. $F_s$ は、

$$F_s = \frac{F}{\sqrt{3}} \tag{12}$$

で算定する. F は杭の基準強度(kN/mm<sup>2</sup>)であり,今回の 場合は 0.235(kN/mm<sup>2</sup>)である<sup>16)</sup>. k は鋼管杭を用いてい るため 2.0 とした.以上より,津波波力と杭のせん断耐 力の釣り合いを求める.

さらに、杭の曲げ耐力との釣り合いとして、次式を満 たすと構造物が滑動すると考える.

$$M_t \ge M_u \tag{13}$$

ここで, *M*<sup>t</sup> は津波波力による曲げモーメント(kNm), *M*<sup>u</sup>は軸力を考慮した杭の曲げ耐力(kNm)である.

まず軸力を考慮した杭の曲げ耐力 M<sub>u</sub>を,次式により 算定する.

$$M_u = M_p \cdot \cos(\frac{\pi N_t}{2N_y}) \tag{14}$$

ここで、 $M_p$  は全塑性曲げモーメント(kNm)、 $N_t$  は杭に 作用する最大軸力(kN)、 $N_y$  は降伏圧縮限界耐力(kN)であ る. また、 $N_t$ 、 $M_p$ 、 $N_y$ については次式で算定する.

$$N_t = \frac{W}{n} + \frac{M \cdot C}{\sum c^2} \tag{15}$$

$$M_p = 4r^2 t\sigma_y \tag{16}$$

$$N_{\rm v} = 2\pi r t \sigma_{\rm v} \tag{17}$$

ここで, W は建物自重(kN), n は杭本数, M は津波波力



図-3 滑動模式図(左:杭基礎,右:直接基礎の場合)

による転倒モーメント(kNm), *C* は軸力が最大となる杭 の中心と基礎中心との距離(m), *c* は各杭と基礎中心と の距離(m), *r* は杭半径(m), *t* は杭の厚さ(m),  $\sigma_y$  は杭の 規格降伏応力(kN/m<sup>2</sup>)であり,  $\sigma_y$  は今回用いた杭では  $2.35 \times 10^5$ (kN/m<sup>2</sup>)<sup>16)</sup>, *M* は(4)式の左辺の  $F_t \cdot x$  である.

次に,津波によって杭に作用する最大曲げモーメント *M*<sub>t</sub>を算定する.*M*<sub>t</sub>の算定式を判別するため,杭の特性 値を次式により求める.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot B}{4EI}} \tag{18}$$

ここで、 $\beta$ は杭の特性値(m<sup>-1</sup>)、 $k_h$ は地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)、 B は杭径(m)、E は杭の弾性係数(kN/m<sup>2</sup>)、I は杭の断面 2 次モーメント(m<sup>4</sup>)である. $k_h$ は

$$k_h = \alpha E_0 \overline{B}^{-\frac{5}{4}} \tag{19}$$

より算定する. ここで,  $E_0$  は地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>), aは  $E_0$  の推定方法によって決まる定数(m<sup>-1</sup>),  $\overline{B}$  は無次元 化杭径である.  $\overline{B}$  では cm 単位の杭径を無次元の値とし ており,今回使用した杭の径は 139.8mm であるため,  $\overline{B}$ は 13.98 となる. また,  $E_0$ の推定方法は複数あるが, 今回は周辺地盤の平均 N 値より推定する方法を用いて

$$E_0 = 700N \tag{20}$$

より求める. N は周辺地盤の平均 N 値である.また, 周辺地盤の平均 N 値より  $E_0$ を推定する方法を用いた場 合,「建築基礎構造設計指針」<sup>15)</sup>より,粘性土の場合の  $\alpha$ は 60 である.以上から $\beta$ を計算する.

ここで、「建築基礎構造設計指針」<sup>15</sup>によると、(21) 式を満たす場合に最大曲げモーメント *M<sub>max</sub>(=M<sub>t</sub>)を*(22) 式によって算定することができる.

$$\beta L > 2.25 \tag{21}$$

ここで, *L*は杭の長さ(m)である. 今回の場合は(21)式を 満たすため, 津波波力による曲げモーメント *M*<sub>t</sub>は次式 により算定する.



$$M_{t} = \frac{\sqrt{2}}{2\beta} e^{-\frac{3}{4}} \frac{F_{t}}{n}$$
(22)

したがって,(14)式の*M*<sub>u</sub>と(22)式の*M*<sub>t</sub>から,(13)式 のとおり,津波波力による曲げモーメントと杭の曲げ耐 力との釣り合いが評価され,滑動の有無が判定できる.

## 3. 結果と考察

## 3.1 iRIC2.3 Nays2D Flood の計算精度の検証

iRIC2.3 による津波氾濫解析結果を図-4,北海道が発表した想定津波浸水予測図 %を図-5 に示し,それらを比較することで計算精度を検証する.まず北海道の津波浸水予測図では,新釧路川において津波の越流はほとんど見られない.釧路川においては河川の右岸側で津波が越流し,市街地が浸水している様子がわかる.一方,左岸側では浸水の様子が見られず,これについて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.これらの様子は iRIC2.3 での計算結果からも読み取ることができる.さらに,全体を俯瞰的に比較してもおおよその浸水状況の傾向を捉えていることがわかる.

# 3.2 津波波圧の検証

有光らの式では流速を考慮するため、内海ら<sup>20</sup>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 ったフィッシャーマンズワーフ MOO の位置での津波波 高・流速を使用して波圧を推定した.その位置は図-4 中に示した.さらに、図-6 ではフィッシャーマンズワ ーフ MOO の位置にある構造物に作用する波力と浸水深 を時系列で示した.この地点では、計算開始から約22 分後、地震発生から約53分後に最大浸水深がおよそ 7.4m になった.この地点の構造物に働く津波波力は, 最大値で、静水圧では約2,000kN、朝倉らの式では約 13,000kN,有光らの式では約5,300kN であった.この結 果から、構造物の安全性を安全側に評価するにあたり、 波力が最も大きくなる朝倉らの式によって波圧を推定す ることが好ましいと考えられる.

#### 3.3 転倒・滑動の試算結果の検証

#### (1) 転倒・滑動の試算結果

転倒および滑動の試算結果を表-2 に示す.表-2 は波 圧の算定方法と構造物の構造形式ごとに、構造物が転倒 および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が考慮されており、波 高のみで求めることができないため、最初に転倒・滑動 となる時点の波高を転倒限界・滑動限界とした.杭基礎 の構造物の滑動限界については、杭がせん断破壊および



		直接基礎		杭基礎	
		転倒限界	滑動限界	転倒限界	滑動限界
静水圧	木造	0.89m	0.79m	7.55m	6.03m
	鉄骨造	1.11m	0.96m	7.62m	6.02m
	RC造	4.06m	3.08m	8.76m	5.84m
朝倉式	木造	0.77m	0.50m	3.13m	2.01m
	鉄骨造	0.90m	0.58m	3.16m	2.01m
	RC造	2.09m	1.43m	3.49m	1.94m
有光式	木造	1.13m	0.85m	5.90m	4.09m
	鉄骨造	1.13m	0.85m	5.90m	4.09m
	RC造	3.63m	2.36m	6.57m	4.09m

表-2 波圧算定方法と構造形式別の転倒・滑動限界

曲げ破壊する浸水深のうち、より小さい浸水深を滑動限 界とした. **表-2**から、すべての波圧算定方法および構 造形式において、転倒限界より先に滑動限界に達してい ること、ならびに直接基礎の場合より杭基礎の場合の方 が転倒・滑動限界ともに小さいことがわかる.

以上より,杭基礎を用いることは転倒及び滑動の対策 として有効であると考えられ,また,津波による構造物 の被害は転倒より滑動の方が多いことが示唆される.

#### (2) 滑動限界からみた構造物の滑動範囲

図-7 に、釧路市の一般家屋の 90%<sup>17</sup>である木造の構 造物において、最大浸水深が表-2 の滑動限界に達する 領域を示す.ただし、有光らの式では流速が考慮されて おり浸水深のみで領域区分できないため、ここでは図示 していないが、図-6 から類推して静水圧と朝倉らの式 で推定された領域の中間の範囲となると考えられる.ま た、図-7 からは、杭基礎の場合のほうが直接基礎の場 合より滑動範囲が狭いことがわかる.したがって、杭基 礎を用いることは、滑動への対策として有効であること を定量的に示すことができた.

# 4. おわりに

本研究で得られた成果を下記に記す.

- iRIC2.3 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 の結果を得ることができ,計算の妥当性を示すこと ができた.
- 実際の設計例を用いた構造物を想定することで、転 倒や滑動についての安全性を構造物の基礎を考慮し て検討することができた。
- 直接基礎の構造物だけでなく、杭基礎の構造物を考 慮することで、より現実的な構造物への安全性を評 価することができた。

今回の転倒および滑動の試算結果は、転倒限界より先 に滑動限界に達しているという点で、実際の津波被害と 同様に滑動での被害が多いことを裏付けることができた. 今後は、様々な構造物や地盤などを計算条件として市街 地全体の安全性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,室蘭工業大学大学院の土 屋勉教授,(独)寒地土木研究所の阿部孝章氏には,有益 な助言をいただいた.ここに記して謝意を表する.



図-7 滑動限界からみた木造構造物の流出範囲

## 参考文献

- 独立行政法人 建築研究所;津波避難ビルの構造設 計法:東日本大震災における建築物の津波被害, http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h23/p df/bri20120309\_txt05.pdf
- 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、平成24年度土木学会北海道支部論 文報告集69巻、CD-ROM、B-32,2013.
- 3) iRIC Project;河川シミュレーションソフト iRIC: http://i-ric.org/ja/
- 4) 北海道 HP;津波浸水予測図等について: http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/tunamisinnsuiyos okuzu.htm
- 5) 近藤将史,中津川誠,阿部孝章: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,平成 25 年 度土木学会北海道支部論文報告集 70, B-42, 2014.
- 6) 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.
- 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), Vo168, No2, pp.781-785, 2012.
- 8) 一般財団法人 日本建築防災協会;津波により浸水の恐れがある地域における住宅の設計例 1: http://www.kenchiku
  - bosai.or.jp./files/2013/11/12\_tsunami08.pdf
- 9) SketchUp ;  $3D \neq \tau \neg U$  : http://www.sketchup.com/ja
- 10) 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
- 11) 日本工業規格: JIS G 3444、一般構造用炭素鋼管
- 12) 国土交通省;20 万分の1 土地分類基本調査: http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html
- 13) 日本道路協会;「道路土工一土質調査指針」:1986 年改訂版
- 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/sekkeiyouryou/
- 15) 日本建築学会;「建築基礎構造設計指針」
- 16) 日本建築学会:「鋼構造設計規準」
- 17) 釧路市 HP;住宅·土地統計調查: http://www.city.kushiro.lg.jp/shisei/toukei/chousakekka/0009.html