

再現計算による沿岸構造物の耐津波安定性の検討

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○森 昌也
山本 泰司

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波は東日本の広範囲において甚大な被害をもたらした。北海道沿岸においても住宅浸水や漁船、養殖施設の被害は生じているが、沿岸構造物の大規模な被害は生じなかった。しかしながら、今次津波以降、北海道においては想定津波の見直し作業が進められており、津波防災に関する関心が高まっている。本報告では、再現計算により今次津波の北海道太平洋沿岸における特徴について報告するとともに、津波高が大きい傾向にあったえりも岬周辺に着目して沿岸構造物の耐津波安定性について報告するものである。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、津波、沿岸構造物

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波(以下、今次津波)は東日本の広範囲の沿岸構造物に甚大な被害をもたらした。今次津波においては地震発生直後から大学や研究機関等による大規模な現地調査が実施され、津波痕跡高や施設被害状況が明らかにされてきた。沿岸構造物の被害に着目すると例えば、八木ら¹⁾は東北地方太平洋沿岸の漁港を対象として防波堤の被災パターンを整理するとともに数値計算から安定性の照査を実施している。また、有川ら²⁾は釜石の湾口防波堤を対象とした水理模型実験および数値計算から防波堤の被災メカニズムについて報告している。

北海道沿岸においても今次津波によって漁船や養殖施設等の被害は生じているが、沿岸構造物の大きな被害は生じなかった。しかしながら、今次津波以降、北海道においては想定津波の見直し作業が進められており、防潮堤等の海岸保全施設の設計に用いるレベル1津波が今後公表される予定であることから、レベル1津波に対する沿岸構造物の耐津波安定性の検討が求められる。また、平成 24 年 6 月には津波堆積物の痕跡調査を踏まえて推定された最大クラスの津波であるレベル2津波が公表されたことにより、レベル1を超える津波に対する粘り強い構造形式についての関心が高まっている。

本報告では、平面二次元の非線形長波モデルを用いた数値計算により北海道太平洋沿岸の来襲津波の特徴について報告するとともに、津波高が大きい傾向にあったえりも岬周辺を対象として沿岸構造物の耐津波安定性について報告するものである。

2. 津波計算の方法

(1) 基礎方程式

津波計算の基礎方程式には下式に示す非線形長波理論に基づく連続式と運動方程式を用いた。基礎方程式の離散化は差分法で行い、計算スキームには後藤ら³⁾と同様にスタッガード・リーブフロッグ法を採用し、移流項の差分化には一次精度の風上差分を適用した。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 η は水位変動、 h は水深、 D は全水深、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向のフラックス、 g は重力加速度、 n はマニング粗度係数を示す。

(2) 計算条件

計算領域については今次津波の波源域を含む最も広い領域 I (格子幅:2700m) から検討対象としたえりも岬周辺の領域 V (格子幅:50.0m) まで 5 段階 (2700m、900m、

300m、100m、50m) で格子幅を変化させ、各領域境界において水位と流量のネスティングを行った。座標系は平面直角座標系第 12 系としており、各計算領域の詳細は表-1 に示す。再現時間は地震発生から 6 時間とし、時間刻みは CFL 条件を満足するように各領域で設定した。本計算では海岸線での完全反射の境界条件とし、陸域への遡上は考慮していない。潮位条件は津波来襲時のえりも岬周辺の潮位条件を考慮して TP-0.3m とした。また、防波堤については線構造として与え、越流する流量については本間の越流公式により計算した。

表-1 計算領域の詳細

領域	格子幅	領域 X 軸	領域 Y 軸
I	2700m	-295650 ~ 1170450	-814050 ~ 430650
II	900m	-172350 ~ 550350	-477450 ~ 207450
III	300m	-28650 ~ 336450	-277050 ~ 68250
IV	100m	-24550 ~ 92350	-243250 ~ -155750
V	50m	46725 ~ 90575	-232775 ~ -200125

(3) 断層モデル

今次津波については、各研究機関からいくつかの断層モデルが提案されている。川崎ら⁴⁾はこれらの提案モデルに対して再現計算を行って Fujii ら⁵⁾の提案している断層モデルの再現性が最も高いことを示している。本報告においても Fujii らの提案モデルを採用することとし、提案パラメータから Mansinha and Smylie⁶⁾の方法を用いて計算した海底地盤変動量の鉛直成分を海面の初期水位分布として与えた。図-1 に上記手法を用いて計算した初期波源分布を示す。

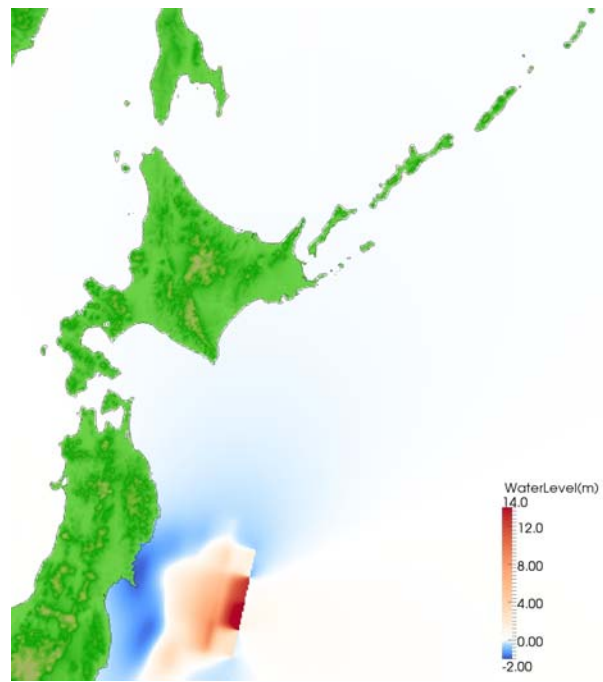


図-1 初期波源分布(領域 I :2700m格子)

3. 再現計算による今次津波の特徴

(1) 水位分布の時間変化

図-2 は今次津波の再現計算における地震発生から 120 分までの 30 分間隔の津波水位の分布を示している。地震発生から 30 分後には襟裳岬の南方約 50km 付近まで津波が到達しており、60 分後には日高から根室地方にかけて第一波の来襲による水位上昇を確認できる。90 分後においては渡島および胆振地方、120 分後には内浦湾内において水位上昇している。90 分および 120 分の水位分布を見ると太平洋沿岸では海岸線に沿って水位の高い箇所と低い箇所が交互に現れるエッジ波特有の水位分布が確認できる。図-3 は代表的な例として苫小牧沖および釧路沖の海象計の設置地点における地震発生から 6 時間までの水位の時系列変化を示している。図中の青線は観測値、赤線は 900m 格子の領域 II の計算結果を示す。計算結果は第一波の来襲を含め、観測値の傾向を概ね再現しており、本数値計算の妥当性が確認できる。両地点ともに第一波が来襲してから 6 時間経過後においても水位が振動を繰り返していることが特徴的である。これは

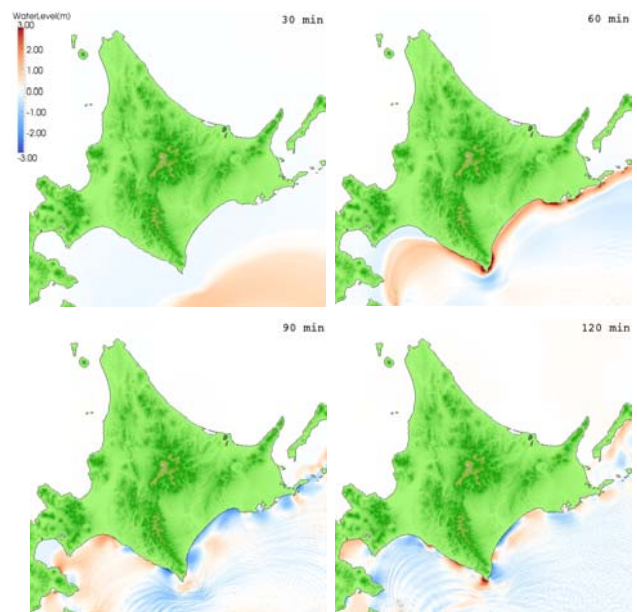


図-2 水位分布の時間変化(領域 II :900m格子)

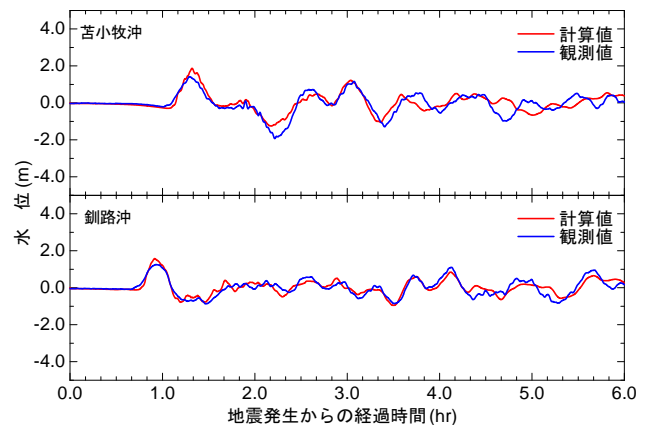


図-3 水位の時系列変化(領域 II :900m格子)

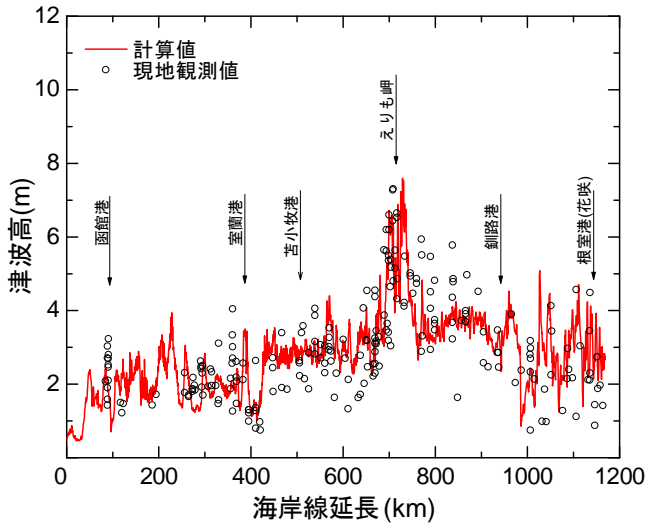


図-4 防波堤前面水位の時系列変化(領域Ⅱ:900m格子)

図-2 の水位分布において示したエッジ波の影響によるものであり、このような海岸線に沿った成分が今次津波の継続時間を長期化させ、釧路港や函館港のように地震発生から長時間経過した後に最大水位を生じさせたものと考えられる。

(2) 最大水位の海岸線分布

図-4 は松前町白神岬から根室市納沙布岬までの北海道太平洋沿岸の海岸線における最大津波高の分布を示している。図中の実線は格子間隔 900m の領域Ⅱにおける数値計算結果、プロットは東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (<http://www.coastal.jp/tjt/>) による現地調査結果(浸水高)を示している。900m 格子の計算であるため局所的な地形条件等により生じた津波高を再現出来ない箇所もあるが、概ね計算値と現地調査結果は一致する傾向にあり、本数値計算の妥当性が確認できる。津波高の分布を見ると太平洋沿岸は概ね 1~4m で推移しているが、えりも岬付近においては 6~7m の特に大きな津波高を示している。これは、首藤ら⁷⁾が指摘しているように津波の伝播速度が水深に依存するため、屈折現象により舌状に突き出した岬の先端にエネルギーが集中することにより生じたものである。次章においては特に大きな津波高を示したえりも岬周辺に着目して沿岸構造物の安定性について検討を行う。

4. 防波堤の耐津波安定性の基礎的検討

(1) 安定性の検討方法

今次津波においては、東北地方を中心として多くの沿岸構造物に甚大な被害が生じた。その中で防波堤の被災に着目すると東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会(<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/info/tunamisinsai.html>)

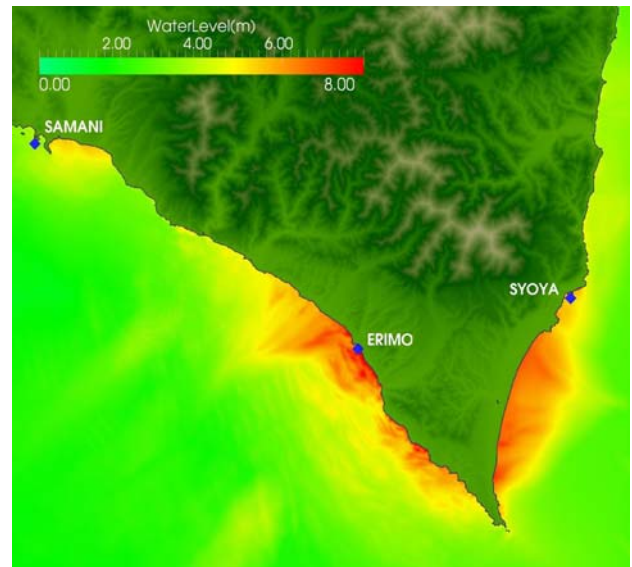


図-5 最大津波高の分布(領域Ⅴ:50m格子)

が開催され、それぞれの防波堤の被災原因の分析が行われるとともに、特徴的な被災パターンとして「越流洗掘型」、「津波波力型」、「堤頭部洗掘型」、「引波水位差型」の4種類が示された。被災パターンの中でも直接的な津波力によって防波堤が不安定となる津波波力型についてはこれまで多くの研究が行われており、例えば谷本ら⁸⁾は1983年日本海中部地震津波を再現した水理模型実験から防波堤に作用する津波波圧算定式(以下、谷本式)を提案している。谷本式における静水面の波圧強度 p_1 は下式のように表される。

$$p_1 = 2.2\rho_0 g a_1 \quad (4)$$

ここで、 a_1 は入射津波高さ、 $\rho_0 g$ は海水の単位体積重量を示しており、波圧分布については静水面下で p_1 の一様分布、波圧作用高さは a_1 の3倍、揚圧力は前端が p_1 で後端が0の三角形分布として提案している。さらに、池野ら⁹⁾はソリトン分裂が発生した場合に作用波圧が増大することを考慮して p_1 の無次元波圧強度を2.2から3.0に割増す修正法を提案している。前章において述べたように今次津波においてはえりも岬周辺において特に高い津波高を確認していることから、本報告では、様似漁港、えりも港、庶野漁港の3港を対象として防波堤の耐津波安定性を検討した。検討には領域Ⅴ(格子幅 50m)の数値計算から得られる防波堤前面の水位データを用い、前述の津波波圧算定式により安定性を評価した。対象箇所は各港の第一線防波堤とし、防波堤延長の中心位置を検討対象とした。

(2) 安定性の検討結果

図-5 は対象としたえりも岬周辺(領域Ⅴ、50m 格子)の6時間の再現計算における最大津波高の分布を示している。前章において述べたように波の屈折現象の影響により、えりも岬先端付近において特に高い津波高を

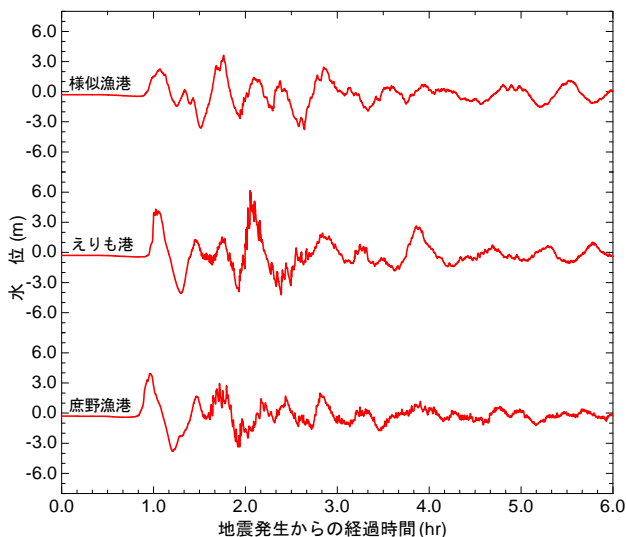


図-6 防波堤前面水位の時系列変化(領域V:50m格子)

示している。特にえりも港から庶野漁港にかけて赤色の6m以上の津波高が確認できる。前述の谷本式の静水面の波圧強度を見ると入射津波高のみの関数であることから、これらの地域の作用波圧は特に大きな値であったものと考えられる。図-6に地震発生から6時間までの各港の防波堤前面水位の時系列変化の計算値を示す。各港とも1波目または2波目において最も高い津波高を示しており、これらの作用時が最も厳しい条件であったと考えられる。ここで示した水位は防波堤前面の値であり、反射波の影響を含んでいることから、谷本ら⁸⁾と同様に数値計算から得られた前面最大水位の1/2の値を入射津波高さ a_t として安定性の検討に用いた。また、本数値計算において分散項を考慮していないため、波状段波の発生の有無は判断できないが、当該防波堤を撮影した映像などからは波状段波は発生していないことから池野ら⁹⁾の提案している波状段波による波圧割増は考慮せず、ここでは谷本式により安定性を検討した。表-2に今次津波による谷本式から求めた水平波圧合力 $P_{tsunami}$ と設計条件(風波)における水平波圧合力 P_d の比 $P_{tsunami}/P_d$ を示す。

表-2 水平波圧合力の設計条件との比較

対象箇所	$P_{tsunami}/P_d$		
	今次津波	昭和三陸津波	明治三陸津波
様似漁港	0.409	0.131	0.525
えりも港	0.631	0.425	0.866
庶野漁港	0.468	0.678	0.848

各港ともに水平波圧合力は設計条件の0.4~0.6倍程度となっており、今次津波に対して十分な安定性を有していたと考えられる。表には参考値として今次津波と同様に北海道南方に波源が位置する1933年昭和三陸津波、1896年明治三陸津波による $P_{tsunami}/P_d$ も示しているが、設計条件を上回る水平波圧合力は生じない結果となった。ただし、波状段波が発生した場合には設計条件を上回る

ことも想定されるため、さらに詳細な計算格子を用いて波状段波発生の有無について検討が必要と考えられる。

5. まとめ

本報告では東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を実施して時系列の水位分布および水位波形から典型的なエッジ波の水位波形が生じていることを確認した。さらに、津波高の海岸線分布の計算結果と現地調査結果の比較から本数値計算の妥当性を示すとともに、津波の屈折現象によってえりも岬周辺において特に高い津波高さとなっていたことを示した。また、えりも岬周辺の第一線防波堤に着目して今次津波に対する安定性の検討を行い、今次津波による水平波圧合力が設計条件の0.4~0.6倍程度であり、津波波力に対して十分な安定性を有していたことを示した。ただし、今次津波においては谷本式において安全率を満足していても、基礎マウンドが洗掘されることで堤体が不安定となる被災パターン等も報告されていることから、総合的に防波堤の安定性を評価することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 八木宏, 杉松宏一, 中山哲蔵, 西敬浩, 三上信雄, 佐々木崇之, 林健太郎(2012):東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設の被災状況とその原因について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1341-1345
- 2) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 長谷川巖, 稲垣茂樹, 佐藤正勝, 下澤治(2012):東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.826-830
- 3) 後藤智明, 小川由信(1982):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資料
- 4) 川崎浩司, 鈴木一輝, 高杉有輝, 李光浩, 中村友昭, 鈴木進吾(2012):東北地方太平洋沖地震による三陸海岸南部の津波被害と浸水計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.1, pp.381-385
- 5) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T. (2011): Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol.63(No7), pp.815-820
- 6) Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440
- 7) 首藤伸夫(2007):津波の事典, 朝倉書店
- 8) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋(1984):1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 海岸工学論文集, Vol.31, pp.257-261
- 9) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢(2005):ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol.52, No.2, pp.751-755