2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害

Damage in Port of Hachinohe Caused by the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami

富田孝史¹・廉 慶善²・熊谷兼太郎³・高川智博⁴
鈴木高二朗⁵・渡邊祐二⁶・齊藤節文⁷・佐藤正勝⁸

Takashi TOMITA, Gyeong-seon YEOM, Kentaro KUMAGAI, Tomohiro TAKAGAWA
Kojiro SUZUKI, Yuji WATANABE, Setufumi SAITO and Masakatsu SATO

The Port of Hachinohe suffered severe damage by the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami. To understand the tsunami and its-induced damage, a field survey was conducted. Further, numerical simulations were also carried out to understand propagation and inundation of the tsunami. Results of the field survey and numerical simulations indicated that the tsunami of about 8 m high hit the port, and caused inundation, various debris including shipping containers, destruction of breakwaters and sea-bottom deformation in the port. It seems that the breakwaters and coastal forest contribute to reduction of tsunami impact.

1. 序論

2011年3月11日14時46分頃に発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震は大津波を発生させた。津波は、震央から約280 km離れ、津波の波源域よりもさらに北方に位置する青森県八戸市にも来襲し、死者・行方不明者2名、浸水面積9 km²の被害を発生させた。八戸市は1964年に新産業都市に指定され、臨海部に製紙業、非鉄金属業等の基礎素材型企業が立地し、北東北最大の工業地帯である。八戸市にある八戸港は、1951年に重要港湾に指定され、1994年以降にはコンテナ輸送に対応している。

本研究は、2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港における被害の実態を現地調査と数値計算の両面から明らかにすることを目的とする。

2. 津波痕跡調査の方法と結果

来襲した津波の規模および被害を把握するため、2011

年3月17日および19日に、港湾域及びその周辺地域において、津波が引き起こした浸水によって建物等に残った水痕などの痕跡の高さを調査時刻の海面水位を基準にして測量した。測量にはレーザー距離計（レーザーテクノロジー社Impulse 200）を使用した。調査では、津波の壁面遡上によって高い痕跡になるような海に面した壁面の痕跡等を避けて、建物の内壁に残った痕跡をできるだけ対象にした。測量の後、津波第1波来襲時の天文潮位を基準にした値に補正して浸水高を算出した。

浸水高の結果を図-1および表-1に示す。八戸港の防波堤の外側に位置する市川地区工業用地および階上町大蛇地区における浸水高は8.4～8.6 mであるので、八戸港周辺には8 m程度の高さの津波が来襲したと推定される。一方、防波堤背後に位置する八太郎地区第2埠頭および八戸漁港における浸水高は各々約6.4 mおよび5.4 mである。この浸水高の低減は防波堤の効果によると考えられる。さらに、市川地区にある海岸林の背後においても浸水高が5.9 mである。なお、ここに示した浸水高は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（Moriら、2012）の他の調査チームによる結果と概ね整合している。

3. 来襲した津波の特性

八戸港に来襲した津波は、図-2に示すように、八戸港鯨検潮所において観測されている。なお、図中には後述する数値計算結果を合わせて示している。観測データによると、津波は地震発生から約40分後に引き波で始まり、海面水位は最大約0.6m下がった。その後、津波高が約2.4m、周期が約1時間の津波の第1波が来襲した。それ

1 正会員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター 副センター長
2 正会員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター 研究官
3 正会員	博(工)	国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部 主任研究官
4 正会員	博(理)	(独法) 港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター 研究官
5 正会員	工修	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋環境情報研究チームリーダー
6 正会員		国土交通省東北地方整備局塩釜港湾・空港整備事務所
7 正会員		国土交通省東北地方整備局港湾空港部港湾空港情報管理官
8 正会員		(前) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所長

図-1 八戸港およびその周辺の津波浸水高

表-1 八戸港およびその周辺の浸水高

場所	緯度	津波痕跡	浸水深 (m)	地盤高 (m)	痕跡高 (m)	訂線から の距離 (m)	信頼度
	経度	遡上ある いは浸水					
市川地区 工業用地	N 40° 34'23.7"	室内機械 の水跡	3.82	4.00	8.38	57	A
	E 141° 28'45.9"	浸水					
八太郎 第2埠頭	N 40° 33'6.47"	倉庫内壁 の水跡	2.90	2.96	6.42	118	A
	E 141° 30'6.10"	浸水					
八戸漁港	N 40° 31'37.72"	建物内壁 の水跡	2.47	2.38	5.40	90	A
	E 141° 32'7.72"	浸水					
市川地区 松林奥	N 40° 35'7.52"	家屋外壁 の水跡	3.20	2.12	5.88	296	A
	E 141° 28'11.84"	浸水					
階上町 大蛇地区	N 40° 28'27.82"	建物内壁 の水跡	2.70	5.38	8.64	72	A
	E 141° 38'44.38"	浸水					

注1) 地盤高はT.P.を基準にした値である。

注2) 痕跡高は津波第1波到達時と推定される15:22における天文潮位T.P.-0.56mを基準にした高さである。なお、第2波ピーク時の時刻は16:51と推定され、その時の潮位はT.P.-0.33mである。

に続いて、より高い津波高約4.6 m、周期約1時間の第2波が来襲した。第1波および第2波のピークは地震発生からそれぞれ約70分および125分後に出現している。さらに、気象庁の八戸検潮所では、第2波のピーク辺りの6分間以外においてデータが取れており、その記録によると第2波が最も高い津波である。

八太郎地区において津波の来襲状況を撮影した写真によると、第1波のピーク時に近い15時51分（カメラ時計による。以下、写真の撮影時刻はカメラ時計によるものとする。なお、同一カメラで撮影された地球深部掘削船「ちきゅう」の位置と同船によるAISデータとの比較によるとカメラ時計は4分程度遅れている可能性がある。）には、八太郎地区第2埠頭ではコンテナシャシーが海水に浸かる程度（約1m）浸水し、幾つかのコンテナの漂流が認められた。その時の海面水位は約T.P.+3.4mと推定される。さらに、第1波の引き波最盛時に近い16時36分では海面水位は埠頭天端から約7.8m下（約T.P.-4.2m）にあった。なお、津波到達時刻15時22分における天文潮位が約T.P.-0.56mであるので、八太郎第2埠頭周辺に來襲した第1波の押し波は約4mおよび引き波は約-3.6mとなる。第1波の引き波最盛時から第2波の押し波最盛時までの約20分間で水位が約T.P.-4.2mから約T.P.+5.9m（表-1に示した浸水高をT.P.基準に変換）まで約10m上昇したことになる。その際、八太郎北防波堤中央部の沖の水深12～13mの海域では、写真-1に示すように、津波の第2波がソリトン分裂した。

写真-1 八太郎北防波堤沖合の津波の第2波（16時24分、東北グレーンターミナル株式会社提供）

4. 被害の実態

(1) 浸水被害

図-3に八戸市により調査された2011年東北地方太平洋沖地震津波による浸水範囲、および震災以前にM8.4三陸沖北部地震とM8.6明治三陸タイプ地震による津波の浸水想定に基づいて八戸市が作成した津波ハザードマップにおける浸水範囲との比較を示す。2011年津波による浸水範囲は、事前に想定された浸水範囲と概ね一致しており、とくに市川および北沼では県道19号線、築港街では県道1号線が2011年津波および想定津波による浸水限界と一致している。

五戸川右岸の河口部近くには幅150～300m程度の海岸

図-2 港内における津波の観測波形および計算波形

図-3 津波浸水域

写真-2 海岸林に捕捉された津波漂流物

林がある。この海岸林の海側面は津波により陸側に倒れ込みながら、写真-2に示すように、数隻の漁船やその他の漂流物を捕捉していた。さらに、150m幅の海岸林の背後にある居住地区における木造家屋群では、1階部分が水没する被害が発生したが、破壊された家屋は無かった。この浸水深は3.2m（浸水高5.9m）である。木造家屋の全壊指標の浸水深2mよりも深い浸水が発生したにもかかわらず木造家屋が残った理由の一つには、海岸林により浸水時の水勢が弱められたことが挙げられる。

(2) 漂流物被害

八太郎地区第2埠頭では、前述したように第1波では約1m以上、第2波では2.9mの深さの浸水が発生した。第1波によりコンテナの幾つかは海上に流出し、陸上では写真-3 (a) に示すように3段積みコンテナが陸側に倒された。第2波が来襲した後は写真-3 (b) に示すように多数のコンテナが海上に流出した。流出したコンテナの総数は約700個である。

コンテナに加え、大小船舶の海上漂流、沈没、陸上への乗り上げが発生した。喫水が浸水深よりも浅い船舶が陸上に乗り上がる一方、喫水が深い船舶は乗り上がることはなく、写真-4に示すように岸壁に衝突した。

(3) 防波堤被害

八戸港では、東寄りからの波浪に対する静穏度確保のために八太郎北防波堤や中央第1防波堤、中央第2防波堤が整備されている（図-3参照）。津波により、八太郎北防波堤の延長3,504mのうちの1,437mにおいてケーソンが移動、転倒した。写真-5 (a) に示すように、八太郎

(a) 第1波の引き波時（16時06分）

(b) 第2波の引き波時（17時04分）

写真-3 コンテナ漂流（東北グリーンターミナル株式会社提供）

写真-4 船舶被害（八戸市提供）

北防波堤のうちのハネ部は堤頭函のみを残し、それ以外は消波ブロックを含めてケーソンが海中に水没し、数函のみが海上に見られる状態であった。東北グリーンターミナル株式会社による写真では、コンテナが第1波によって海上漂流している状況（第1波のピーク過ぎの時刻と推定される。）において残存している。一方、八太郎北防波堤の中央部の損傷箇所ではケーソンは移動したものの、多くはその一部が海面上に見える状況であった。中央部のケーソンは、写真-5 (b) と写真-5 (c) から分かるように、津波の第2波により損傷している。

中央第1防波堤および中央第2防波堤では、ともに東端部のケーソンが移動、転倒した。この損傷には後述する防波堤開口部での大規模な地形変化が影響している。

白銀北防波堤の西端部のケーソンは、津波作用によって甚大な被害は受けなかった。しかし、5月31日～6月1日の夜間にかけて来襲した高波の作用により、ケーソンが海中に倒れ込む被害が発生した。この被災には、後述する津波による堤頭部周囲の海底地盤の洗掘が影響していると考えられる。

(4) 地形変化

八戸港湾・空港整備事務所が行ったナローマルチビームによる測深調査において、図-4に示すような洗掘が防波堤堤頭部や埠頭の隅角部に認められた。海図上の水深

(a) 八太郎北防波堤の全体的な被災状況

(b) 第2波来襲前の中央部 (16時25分)

(c) 第2波来襲後の中央部 (17時03分)

写真-5 八太郎北防波堤の被災 (写真(b)および(c)は東北グリーンターミナル株式会社提供)

図-4 港内の洗掘箇所と最大洗掘深

と比較して得た洗掘深は8mを超えている。港のほぼ中央にある埠頭隅角部では約12mの洗掘が発生し、隅角部を構成する3箇のケーソンが水没する被害が発生した。

白銀北防波堤の西端部周辺において青森県八戸港管理所が実施した障害物等の確認のために水深測量によると、海図上で水深12m程度の西端部周辺において19m程度まで深くなっている箇所が認められた。

5. 数値計算

(1) 津波初期波形

津波の初期波形には、Takagawa・Tomita (2012) により提案されたものを使用した。この初期波形は、国土交通省による東北地方沿岸の6基のGPS波浪計および釧

路から仙台までの6基の沿岸波浪計、および東京大学地震研究所による釜石沖の2基、海洋研究開発機構による釧路沖の2基および気象庁による房総沖の2基の水圧式津波計による津波の観測波形を使って、逆解析から推定されたものである。推定では、断層の破壊伝播に伴って津波の初期波形も時間的に変化する効果を考慮している。

(2) 数値計算手法

津波の伝播・浸水計算を行う数値計算モデルには、STOC-ML (富田・柿沼, 2005) を使用した。このモデルは基礎式にNS方程式を使用するが、静水圧近似を適用したモデルである。計算の精度および効率性を向上させるために、計算領域をネステイングした。津波の初期波源を含む第1計算領域の格子サイズは1350mであり、岩手北部沖GPS波浪計の位置を含む第2計算領域では450m、それ以降150m, 50m, 25mと細かくしながら計算領域を接続し、八戸港全域を含む第6計算領域では5mとした。防波堤は破壊しないものとして計算を行った。

図-5に、久慈沖の水深125mにある岩手北部沖GPS波浪計で観測された津波波形と数値計算から得られた津波波形を比較する。観測波形の第1波の押し波に認められる周期5分程度の短周期変動を計算波形は再現できていないが、初期波形推定の逆解析に使用しなかった81分以降の波形を含めて概ね観測波形と良く一致している。さらに、図-2には逆解析に使用していない、港内検潮所において観測された津波波形との比較を示す。計算波形は観測波形をよく再現している。以上の比較により、数値計算で使用した津波の初期波形は、八戸港に入射した津波をよく再現するものと考えられる。

(3) 来襲津波の特徴と浸水状況の再現性

八戸に来襲した津波は、第1波よりも第2波が高くなることが、図-2に示すように数値計算においても再現されている。この津波は三陸沿岸を伝播してきた波である。

実際の津波の第2波は、第1波の引き波によって水位が約4m下がったところに高さ約8mで来襲したので、水深12~13mの海域においてもソリトン分裂したが、計算では静水圧近似を適用したモデルを使用しているため

図-5 岩手北部沖 GPS波浪計の位置における津波波形

図-6 最大津波高分布（太枠の測量値：筆者ら，細枠の測量値：津波合同調査グループ）

図-7 最大流速分布

図-8 洗掘深と最大流速の関係

にその現象は再現できていない。しかし，最大津波高は概ね再現できていると思われる。図-6に津波高の最大値分布を示す。計算でも八戸港には7 mを超える高さの津波が来襲しており，とくに市川地区では高さ8 m程度であり，現地で測量された浸水高と概ね一致している。

計算では八太郎北防波堤の損傷を考慮していないので，八太郎北防波堤のハネ部や中央部から入射する津波の遮蔽効果は実現象よりも高い。一方，それら防波堤は港内で反射した波を再度反射させる。このため，防波堤が損傷しない条件の計算値が，実際には被災した状況で発生した浸水高よりも若干高くなっている場所も認められる。

図-7に最大流速の空間分布を示す。防波堤堤頭部およ

び港の中央部にある埠頭の隅角部において10m/sを超える流速が発生している。図-8に洗掘深と最大流速の関係を示す。図中， s は洗掘深， d は水深， U_m は計算から得られた最大流速， g は重力加速度である。八太郎北防波堤の堤頭部（図中◆）では，防波堤の損傷を計算に考慮していないので，洗掘深の程度から推定される値よりも最大流速が速く，逆に八太郎北防波堤の背後に位置する東防波堤の堤頭部（▲）では，計算から得られた最大流速によって推定される洗掘深以上に洗掘が進んでいるという結果が得られた。なお，図中に示す近似式はこの2点を除いた地点の結果から得たものである。

6. 結論

主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 八戸港周辺には約7～8mの高さの津波が来襲した。三陸沿岸から伝播した第2波が最大であった。
- (2) 八太郎北防波堤は津波の第2波により損傷した。しかし，防波堤背後と外側に地域における浸水高の比較から，防波堤の津波低減効果が認められた。
- (3) 八戸港では浸水に加えて，防波堤開口部及び埠頭隅角部付近の海底地盤洗掘とそれに伴う防波堤ケーソン及び護岸の損傷，コンテナ流出の被害があった。
- (4) 沖合津波観測結果を使って逆推定した津波の初期波形に基づいて津波の伝播・浸水計算を行い，港内の検潮所で観測された津波波形や浸水域を概ね再現することができた。
- (5) 海岸林による津波被害低減効果が認められた。

謝辞：本研究の一部は，JST/JICAによる地球規模課題対応国際科学技術協力事業「津波に強い地域づくり技術の向上に関する研究」により行われた。さらに，青森県三八地域県民局地域整備部八戸港管理所，同局地域農林水産部三八地方漁港漁場整備事務所，八戸市及び東北グレーンターミナル株式会社から貴重なデータを提供頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 富田孝史・柿沼太郎（2005）：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用，港湾空港技術研究所報告，第44巻，第2号，pp. 83-98.
- Mori, N., T. Takahashi and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012): Nationwide survey of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, Issue 1, pp. 1-27.
- Takagawa, T. and T. Tomita (2012): Effects of Rupture Processes in an Inverse Analysis on the Tsunami Source of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Proc. 22nd Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Rhodes, Greece, Vol. 3, pp. 14-19.