東北地方太平洋沖地震時における防波堤による浸水低減効果検討

Breakwater Effects on Tsunami Inundation Reduction in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

富田孝史¹・廉 慶善²・鮎貝基和³・丹羽竜也⁴

Takashi TOMITA, Gyeong-Seon YEOM, Motokazu AYUGAI and Tatsuya NIWA

The effect of breakwater on reduction of tsunami inundation is investigated for the tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Numerical simulations are conducted in the Port of Kamaishi and Port of Ofunato and Port of Soma in which bay-mouth breakwaters and offshore breakwater are installed. It is confirmed that the bay-mouth breakwater in Kamaishi and offshore breakwater in Soma reduced the area of tsunami inundation and its height, although they were damaged by the tsunami. The reason why they reduced tsunami impacts is that caissons remain partly and mostly. In addition, the numerical simulation indicates that the breakwater mound has the effect on reduction of tsunami intrusion for the bay-mouth breakwater in Ofunato.

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および津波は、18,915名(2012年5月2日警察庁公告資料より)の死者・行方不明者をもたらした。特に沿岸部での津波による被害が激しかった。津波による浸水面積は、国土地理院によると青森県24km²、岩手県58km²、福島県112km²、茨城県23km²、千葉県17km²であり、平野部が多い宮城県では327km²に及んだ。この浸水面積に比例して宮城県の人的・物的被害は全国総被害の半分以上を占めた。浸水被害を低減する有効な対策は、防波堤などのハードウェア的な対策であり、今回の津波にもその効果が一部報告されている(高橋ら, 2011)。

本研究では、数値シミュレーションを実施して、東北地方太平洋沖地震津波に対する釜石港および大船渡港の湾口防波堤、および相馬港の沖防波堤の効果を検討する。

2. 対象港湾の防波堤の損傷

(1) 釜石港

釜石港の湾口防波堤は、1978年から2009年3月まで約30年をかけて完成し、明治三陸地震津波および昭和三陸地震津波を勘案して設計され、防波堤位置での設計津波高は4.8mであった。しかし、防波堤の安定性は波浪(周期13秒、波高13.3m)により決まっている。

図-1は、東北地方太平洋沖地震津波後に実施された湾口防波堤周辺のナローマルチビーム測深による海底地形図である。図中の白枠は震災後のケーソンの位置を示している。東北地方太平洋沖地震津波の作用により、北堤(同図の左側)ではケーソンが所々移動し歯抜け状態になり、南堤(同図の右側)では開口部側の半分は移動していないが陸側の半分は港内側に移動した。なお、後述する数値計算によると、防波堤前面に沿った最大津波高は11~13m程度である。

(2) 大船渡港

大船渡港は、1960年南米チリから伝播した津波により大きな被害を受けた。それを契機に、1963年から4年かけて湾口防波堤が建設された。防波堤位置での設計津波波高は6.0mであった。

図-2に東北地方太平洋沖地震津波後に実施された湾口防波堤周辺のナローマルチビーム測深による海底地形図

図-1 東北地方太平洋沖地震津波後の釜石湾口防波堤周辺の海底地形図

図-2 東北地方太平洋沖地震津波後の大船渡湾口防波堤周辺の海底地形図

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		東北地方整備局 港湾空港部 港湾計画課 海岸・環境係長
4 正会員	修(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 依頼研修員 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)

写真-1 東北地方太平洋沖地震津波後の相馬港沖防波堤

を示す。左図における中央部の黒点線枠はケーソンの元の位置、白実線枠は震災後のケーソンの位置、黒実線枠は震災後の開口部潜堤の鋼セルの位置であり、右図における点線は震災後のマウンドの形状を示す。全てのケーソンがマウンドから転落するとともに、ほとんどのマウンドもその高さの半分にまで低くなって、港外側に広がっている。なお、今回実施した数値計算によると、防波堤前面に沿った最大津波高は12~13m程度である。

(3) 相馬港

相馬港の沖防波堤は、東北地方太平洋沖地震津波によって、全181函のケーソンのうち159函が傾斜、転倒または移動した。しかし、写真-1に示すように、ケーソンの移動範囲は狭く、マウンド周辺に留まった。同写真の黒い部分が被災前の港内側マウンド幅、白枠は移動したケーソンの位置である。

3. 東北地方太平洋沖地震津波の数値計算

防波堤の津波に対する効果を検討するために、港湾空港技術研究所が開発した高潮津波シミュレータSTOC（富田・柿沼，2005）のうちの静水圧流動モデルSTOC-MLを使用して東北地方太平洋沖地震津波を対象に津波の伝播・浸水計算を実施した。

計算負荷を勘案し、震源域を包含する最外側領域から計算格子サイズを徐々に小さくするネスティング手法を用いた。港湾域の全てを含む最内側領域では航空レーザー測量成果、海図、港湾計画図および施設台帳などに基づいて作成した5m格子の水深、地形および構造物データを使用した。

初期波源の計算では、藤井・佐竹の断層パラメータVer.4.0（国土技術政策総合研究所・建築研究所合同建築物地震対応検討会議，2011）を基本としたが、釜石港および大船渡港の計算ではそれぞれの港湾の沖合にある岩手県南部沖および宮城県北部沖のGPS波浪計によって観測された津波波形、特に最大の津波高になった第1波目の津波高に合うように滑り量を1.5倍した。図-3に岩手県南部沖および宮城県北部沖のGPS波浪計設置位置にお

(a) 岩手県南部沖

(b) 宮城県北部沖

図-3 GPS波浪計の観測結果と計算結果の比較

図-4 釜石港湾口防波堤開口部付近の水位変動

図-5 滑り量を1.5倍した初期波源分布

図-6 相馬港験潮所の観測値と計算値の比較

る波形の観測値と計算値を示す。計算結果は観測結果によく一致している。さらに、図-4に釜石港の湾口防波堤の開口部付近を撮影した写真（海上保安庁提供）およびビデオ映像（国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所撮影および海上保安庁撮影）から解析した海水位と計算から得られた津波波形を比較する。同図より計算結果は実際の水位変動をよく再現していることが確認された。初期波源分布の一例として、滑り量を1.5倍した最外側領域の初期水位分布を図-5に示す。

相馬港の計算では、宮城県中部沖および福島県沖の二つのGPS波浪計の観測値および「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/>）」による相馬港周辺15地点の津波痕跡高に合うように滑り量を補正して設定した。滑り量を1.0倍、1.1倍および1.2倍した場合、相田による幾何平均Kは0.96、0.91および0.86であり、滑り量1.0倍の場合が波源断層パラメータの目安 $0.95 < K < 1.05$ を満たした。幾何標準偏差 κ は1.49、1.49および1.46であり、どの場合も目安 $\kappa < 1.45$ を満たすことができなかったが、滑り量を0.9倍に小さくすると、浸水範囲が調査結果をさらに過小評価することになった。以上のような検討を踏まえて、工学的な判断により、滑り量を1.0倍とした。相馬港内の験潮所で観測された水位変動と数値計算結果の比較を図-6に示す。同図より、計算値と観測値の良好な一致がみられた。

釜石港および大船渡港の湾口防波堤および相馬港の沖防波堤に関しては、現況（防波堤が破壊しない完成形の条件）、防波堤破壊後（防波堤が最初から破壊している状態に津波が来襲する条件）および防波堤建設前（防波堤が無い条件）の条件で数値計算を実施した。なお、大船渡港では防波堤マウンド（ケーソンがなくマウンドのみがある状態に津波が来襲する条件）とマウンド半分（ケーソンがなくマウンドが半分の高さの状態に津波が来襲する条件；破壊後）の条件での計算も行っている。また、各計算では津波来襲時の天文潮位および対象港湾の地盤沈下量を考慮している。

4. 防波堤による浸水低減効果の検討

(1) 釜石港

図-7は、釜石湾口防波堤の現況、破壊後（図-1参照）および建設前のケースでの最大浸水高および津波高分布図である。数値計算による浸水面積は、現況が 2.65km^2 （全浸水面積に対する浸水深2m以上の面積の割合：61.2%）、破壊後が 4.16km^2 （90.0%）および建設前が 4.43km^2 （91.1%）であり、湾口防波堤の存在による浸水域の低減効果が確認できる。浸水高の計算値を測量された痕跡高と比較すると、現況のケースでは少し低くなっているが、他のケースに比べると痕跡値に最も近い値となっている。一方、破壊後のケースでは計算値が高くなっている。津波来襲時に撮影された釜石港のビデオ映像からは第1波の引き波の際に湾口防波堤が破壊していることが確認できたので、数値計算における比較を勘案すると、第1波目の押し波のピーク過ぎあたりまでは湾口防波堤は粘り強く津波に耐え、それにより港内の津波高や浸水域の低減が発揮されたと推察される。防波堤がない場合では、湾奥部海岸線近傍の浸水高は15m程度にな

図-7 釜石港の最大浸水高および津波高分布（図-1参照）

図-8 大船渡港の最大浸水高および津波高分布 (図-2参照)

るのに対し、実際の浸水高は9m程度になっている。すなわち、損傷してはいるが防波堤があることによる遮蔽性によって浸水高を約4割程度低減している。

(2) 大船渡港

図-8に大船渡港の湾口防波堤の現況、防波堤マウンド、破壊後(図-2参照)および建設前のケースの最大浸水高および津波高分布を示す。数値計算から得られた浸水面積は、現況が3.74km²(全浸水面積に対する浸水深2m以上の面積の割合：74.9%)、防波堤マウンドが5.46km²(86.4%)、破壊後が6.15km²(89.1%)および建設前が6.21km²(89.2%)であり、釜石港と同様に湾口防波堤の存在により浸水範囲が狭くなっており、同図から浸水高の低減も確認できる。

防波堤マウンドのケースは建設前のケースに比べて浸水範囲や津波高の低減が認められるが、測量された痕跡高よりも高い。さらに、図-2からは、移動したケーソンは港内側にあり、マウンドは港外側に広がっている。これらのことから、大船渡港の湾口防波堤は、第1波目の押し波の作用により港内側にケーソンが移動・転倒した後に残ったマウンドにより若干の遮蔽効果があって津波

図-9 相馬港の最大浸水高および津波高分布 (写真-1参照)

による流入量が低減したと考えられる。このことは、ケーソンが移動したとしても、マウンドの天端を維持できる粘り強い構造とすることで港内への津波の侵入を低減し、浸水などの被害を軽減できることを示唆するものである。

(3) 相馬港

相馬港の沖防波堤の現況、破壊後(写真-1参照)および建設前のケースの最大浸水高および津波高分布を図-9に示す。数値計算から得られた浸水面積は、現況が5.81km²(全浸水面積に対する浸水深2m以上の面積の割合：55.1%)、破壊後が6.66km²(63.5%)および建設前が7.13km²(70.3%)であり、破壊後のケースにおいても浸水低減効果が確認できる。この低減効果は、写真-1のように多くのケーソンが津波により転倒または移動したが

マウンド周辺に留まったことから生じたと考えられる。

第1波来襲時の防波堤周辺の水位および流れ場の変化を図-10に示す。沖防波堤の南端を回折した津波は、その背後にある南防波堤によってそのほとんどが反射されている。特に、南防波堤の北側（図-9の△印）における最大津波高は、現況のケースでは10.0m、破壊後のケースでは9.8mおよび建設前のケースでは9.3mであり、沖防波堤の回折波の影響を受けて現況のケースにおいて津波高が高くなっている。このように沖防波堤によって局部的に水位が高くなるが、南防波堤の存在によってそれが陸上に及ぼす影響が低減され浸水高や浸水範囲が低減した。これは、沖防波堤と南防波堤によって多重防護されていたことを示す。

5. おわりに

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波により損傷を受けた釜石湾口防波堤、大船渡湾口防波堤および相馬港沖防波堤を対象として、それらの津波に及ぼす影響を数値計算により検討した。計算は、主に防波堤が津波により被災しない場合（現況のケース）、津波来襲前から防波堤が被災していた場合（破壊後のケース）および防波堤が存在しない場合（防波堤建設前のケース）について実施した。

各港湾において、防波堤の存在により浸水範囲および浸水高が低減され、損傷した防波堤であっても、完全に破壊されずに一部が残ったことにより建設前と比べて一定の浸水低減効果があることが確認できた。

また、大船渡港ではほとんどのケーソンが移動しても、マウンド高を維持することにより津波低減効果が発揮される可能性があることを示唆した。

相馬港では、沖防波堤による津波の低減だけでなく、港内の第2線防波堤による港内津波低減効果が確認され、多重防御の重要性を明らかにした。

津波減災には、損傷しても完全に崩壊しないように粘り強さを持たせた防波堤等の防護施設を設置することや一般防波堤であっても多重で防御することが重要であると考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、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から水深・地形データおよび防波堤損傷に関する情報の提供を受けた。また、詳細な地形データ作成において国土地理院地理調査部から海岸における3D電子地図に関する資料の提供を受けた。ここに深甚なる謝意を表する。

図-10 相馬港における津波の侵入状況（写真-1参照）

参考文献

- 国土技術政策総合研究所・建築研究所合同建築物地震対応検討会議（2011）：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）（東日本大震災），建築研究資料，第132号。
- 高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾 毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津 厚・岡本 修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路 徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎誠・泉山拓也・関 克己・廉 慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二（2011）：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231。
- 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。