

東北地方太平洋沖地震津波の再現解析と 防潮堤の効果に関する検討

武田 篤史 野村 敏雄

Simulation for the Tsunami of the 2011 Tohoku Earthquake and Study on the Effect of Seawalls on Tsunami Damages

Atsushi Takeda Toshio Nomura

Abstract

Serious damage was caused by the tsunami produced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The concept of "despite the very low frequency of occurrence, the largest class of tsunamis that can cause serious damage must be considered" is proposed. According to this concept, the tsunami overflowing the sea walls may be allowed and alternative countermeasures may be formulated such as evacuation plan against the largest class of tsunami. When creating countermeasures, understanding the effect of seawalls and evaluating the runup behavior of the tsunami after the overflow are necessary. This study simulated the tsunami of the 2011 Tohoku Earthquake using differential calculation based on nonlinear long wave theory for the area where overflow occurred, and the characteristics of the analysis were considered. The same analysis was then performed with the seawalls removed to evaluate their effect.

概要

東北地方太平洋沖地震津波によって甚大な被害が生じた。これを受けて、今後は「発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」に対しても考慮していく考え方が提言されており、最大クラスの津波に対しては、防潮堤を越流することを許容せざるを得ないとして、ソフト的な対策で対応することが示唆されている。対策を立てるためには、防潮堤の効果を適切に把握し、越流後の津波の遡上に対しても評価を行うことが重要になる。そこで、本研究では、東北地方太平洋沖地震津波において防潮堤の越流が生じた地域を対象に、非線形長波理論に基づいた差分計算による再現解析を行った。さらに、防潮堤を除去して同様の解析を行うことにより、防潮堤の効果について考察した。

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おいては、津波による被害が甚大であった。地震後、東日本大震災復興構想会議や中央防災会議などでは、津波被害の軽減を目的とした多くの議論がなされ提言等がまとめられている¹⁾²⁾。これらの提言等では、「発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」に対しては、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設等を整備するという対応を示し²⁾、防潮堤の整備を進めることとしている。一方、「発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」に対しては、住民等の生命を守ることを最優先とし、住民の避難を軸に、とりうる手段を尽くした総合的な津波対策を確立するという対応を示している²⁾。つまり、「最大クラスの津波」に対しては、津波が防潮堤を越流することを許容しソフト的な対策に頼らざるを得ないとしている。

また、内閣府に設置された南海トラフの巨大地震モデル検討会では、最大クラスの地震津波として、最高34.4m

の津波が高知県に発生する可能性を示唆しており³⁾、防潮堤のみで最大クラスの津波に対応することは非常に困難であることが考えられる。

これらのことから、最大クラスの地震津波に対して、越流後の対策についても検討していくことが重要であり、越流が起こる場合についても津波の遡上に関して、その性質を把握することが必要である。また、越流時における防潮堤の効果を把握することにより、防潮堤の適切な整備および防潮堤の効果を考慮したソフト的な対策を検討していく必要がある。

そこで、本論文においては、最初に、東北地方太平洋沖地震津波の再現解析を行い、解析の特性について考察する。解析は、国土交通省の手引き⁴⁾に示される非線形長波理論に基づいた差分計算によって行った。

次に、越流した場合における防潮堤の効果を明らかにするため、再現計算においてモデル化していた防潮堤を除去して同様の解析を行った。その解析結果と再現解析結果を比較することにより防潮堤の効果を考察した。

さらに、東北地方太平洋沖地震津波において多くの橋梁が流出し、復旧活動に多大な影響を与えたことに鑑み、防潮堤の効果が、橋梁の流出に与える影響について考察

を加えた。

2. 検討対象と解析方法

2.1 検討対象地域

解析対象は、東北地方太平洋沖地震津波により大きな被害が生じた岩手県釜石市の両石湾のうち、海岸に防潮堤を有すること、背後に橋梁を有すること、および痕跡調査結果が多くあることから、Fig. 1 に示す水海川河口付近(水海地区)とした。

釜石湾のすぐ北に位置する両石湾の湾奥は、Fig. 2 に示すように、平野部がわずかであり、それぞれ水海地区、両石地区、桑の浜地区として民家が集中している。

2.2 検討対象地域の被害

水海地区においては、水海川河口における防潮堤および水門(TP+12.0m)が設置されている(Photo 1)。周辺の痕跡高は防潮堤の高さを超えるTP+17~18mであり⁵⁾、越流による背面の洗掘が観察されるが、決壊にはいたっていない。

防潮堤から水海側に沿って上流約300mの位置には、国道45号線の鳥谷坂橋(単純鋼合成板桁橋、橋長30m、幅員

9.2m)があり、橋台背面は洗掘されたが、橋桁の流出は見られなかった⁶⁾。橋梁流出に関する検討は、鳥谷坂橋の地点における計算結果を用いることとする。

隣接する両石地区では、Photo 2 に示すように、防潮堤(天端=TP+9.3m)が倒壊しており大きな被害が生じている。

2.3 解析方法

津波遡上解析は「国土交通省:平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き⁴⁾」に示される非線形長波理論に基づいた差分計算によっている。

解析領域は、波源を包含する十分に広い範囲とし、1450mから5mまでの6段階の格子間隔により構成した。

波源の断層モデルには、Fujiiらのモデル⁷⁾を用い、Mansinha and Smylieの方法⁸⁾により、津波の初期波形を定めた。Fujiiらのモデルは、ダート(津波計)、海底津波計、GPS波浪計、海象計及び検潮所の観測された水位波形記録から本解析と同様の解析手法のインバージョンによりモーメントテンソル解を参照して、40枚の小断面を設定したものである。ただし、本検討においては、検討対象の両石湾全体における痕跡高との比較から、滑り量は1.51倍に修正している。

計算条件をTable 1 にまとめる。



Fig. 1 検討対象
Object Area



Photo 1 水海地区の防潮堤・水門
Seawalls and Water Gate at Mizumi Area

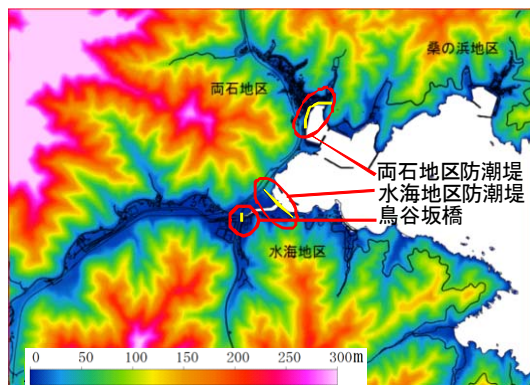


Fig. 2 5m格子範囲の地盤高分布
Distribution of Ground Elevation



Photo 2 両石地区の防潮堤転倒
Overturning of Seawalls at Ryoishi Area

Table 1 解析条件
Analysis Condition

領域	A	B~C	D~E	F
範囲	外洋	波源・三陸沿岸	岩手県沿岸	両石湾
計算格子間隔	1450m	450m~150m	50m~25m	5m
水平稼働粘性係数	100.0m ² /s	10.0m ² /s	5.0m ² /s	1.0m ² /s
計算時間間隔	$\Delta t=0.25$ (s)			
基礎方程式	非線形長波理論式			
陸側境界条件	完全反射 (100m格子以上)		浸水計算 (50m格子以下)	
海底摩擦	考慮 (n=0.025)			土地利用に合わせて設定 (n=0.02~0.05)
潮位条件	津波来襲時の推定潮位 = TP - 0.37m			
初期条件	Fujiiらのモデル (藤井・佐竹モデル Ver.4.2) ⁷⁾ ただし、滑り量を1.51倍に修正			
計算時間	地震発生後180分 (3時間)			

2.4 解析ケース

解析ケースは、転倒した両石地区の防潮堤も含めて全ての防潮堤をモデル化した「再現解析」と、再現解析から水海地区の防潮堤・水門を除去した「防潮堤なし」の2ケースとした。

3. 再現解析の結果

3.1 浸水範囲および最大水位

Fig. 3 に津波最大水位分布を示す。図中、赤線で示しているのは、原口らの調査⁹⁾による浸水範囲である。

浸水範囲については、原口らの調査結果を若干上回っている。これは、津波の先端においては、計算格子の影響が出やすいこと、建物などの影響を底面摩擦のみで表現することが困難なことなどが原因と考えられる。

最大水位については、図中の①~⑦の各点について、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの痕跡高調査結果¹⁰⁾と比較した。比較結果をFig. 4 に示す。海岸から500m程度の範囲内におけるこれらの地点においては、概ね再現できていると言える。

再現性の評価については、痕跡高さと解析による遡上高さをもとに計算する相田の幾何平均 K および幾何標準偏差 κ ¹⁰⁾が一般に用いられる。土木学会原子力土木委員会津波評価部会においては、 $0.95 < K < 1.05$ かつ $\kappa < 1.45$ を満足することを再現性の目安として示している¹¹⁾。点数としては少ないものの、①~⑦の7点における幾何平均 K は1.01、幾何標準偏差 κ は1.14であり、この目安を満たしている。ただし、本解析で用いた波源モデルは幾何平均 K が1.0に近づくように滑り量を修正しているため、ここで重要なのは、幾何標準偏差 κ が小さくおさまっていることである。

3.2 GPS波浪計との比較

Fig. 5 に岩手県南部沖(釜石沖、離岸距離約11km、水深200m、50m格子内)におけるGPS波浪計の津波高さと計

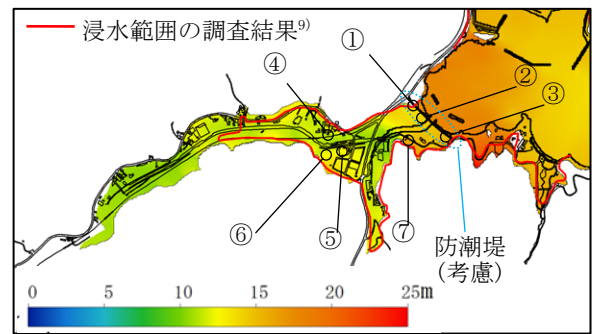


Fig. 3 津波最大水位分布
Distribution of Maximum Tsunami Elevation

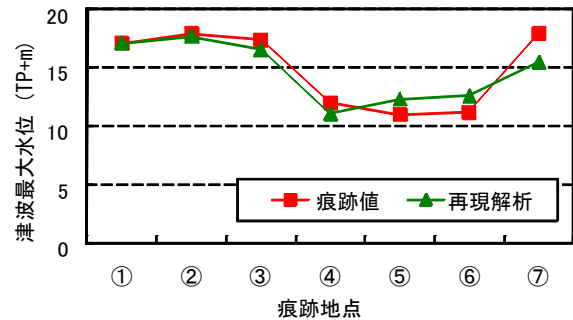


Fig. 4 最大水位解析値と痕跡高の比較
Comparison the Maximum Tsunami Elevation
Between Analytical Values and Measured Values

算値の比較を示す。GPS波浪計の観測記録データは、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものである¹²⁾。

20分近辺で棚が生じる点や、反射を含むと想定される部分なども含めて、その形状はおおむね合致していると言える。

一方で、ピークの津波高さは実測値の1.25倍となっている。波源モデルの滑り量は痕跡高との比較により修正しているにもかかわらず、沖合の波高が過大となってい

る。これは、滑り量の修正に用いた痕跡値が必ずしも全体を平均的に表わす値とは限らずローカルな条件によるせり上がりも含んでいること、海底砂の巻きみや漂流物の影響、構造物の倒壊による海底摩擦低減の影響など、多くの要因が考えられる。本検討においては各要因の影響を明らかにすることはできていないが、波源モデルを設定する際は、沖合の波高が合うように設定するか痕跡高が合うように設定するかを、その解析の利用目的に合わせて選択すべきことが示唆される。

4. 防潮堤の効果に関する検討

4.1 解析概要

水海地区においては、海岸にTP+12.0mの防潮堤や水海川の水門が整備されていたが、越流が生じ背後の水海地区は浸水した。このことは再現解析においても表現できている。

このように越流が生じた防潮堤に関して、その効果を解析的に検討した。

解析は、再現解析と同様のモデルから水海地区の海岸に整備されている防潮堤や水門を除去したものである。

4.2 浸水範囲および最大水位の比較

Fig. 6 に防潮堤なしとしたケースの対象地域における最大水位分布を示す。また、Fig. 3 に示した7点における最大水位をFig. 7 に示す。

Fig. 3 の再現解析(防潮堤あり)のケースにおいては、防潮堤位置で水位が明確に変化し、また海岸から遠ざかるにつれて水位が低下しているのに対して、Fig. 6 の防潮堤なしのケースにおいては、ほとんど水位の低下が見られない。したがって、越流を許したとしても、防潮堤によって津波の勢いは減じられることがわかる。

Fig. 7 より、防潮堤の前面にある①～③においては防潮堤の有無による差がほとんどないが、防潮堤背後の④～⑥においては防潮堤の有無によって非常に大きな差があることが分かる。⑦については、解析同士を比較すると防潮堤の有無による差は明らかであるが、痕跡値はむしろ防潮堤なしのケースに近い。この点の痕跡値は、崖面のうち窪んだ部分における浸水高であるが、ローカルな条件を5m格子では表現できなかったものと考えられる。

4.3 水位および流速の時刻歴

水海川に沿って水門から250m, 1000m, 2000mの各点における水位および流速の時刻歴波形を比較した。各点の位置は、Fig. 6 に示す。

Fig. 8 に水位の時刻歴を、Fig. 9 に流速の時刻歴を示す。流速の方向は、地点ごとに、最大流速ベクトル時の流速方向とした。

再現解析(防潮堤あり)のケースは、最大水深後にほぼ一定値となっているが、これは、引き波に対しても防潮

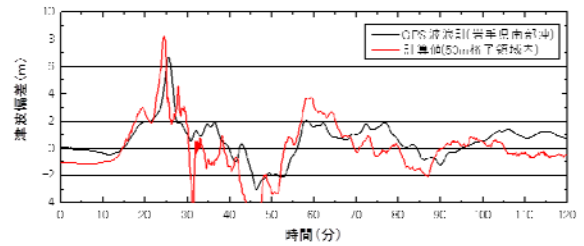


Fig. 5 解析値とGPS波源計計測値の比較
Comparison the Tsunami Elevation Between Analytical Value and Value Measured by GPS Wave Recorder

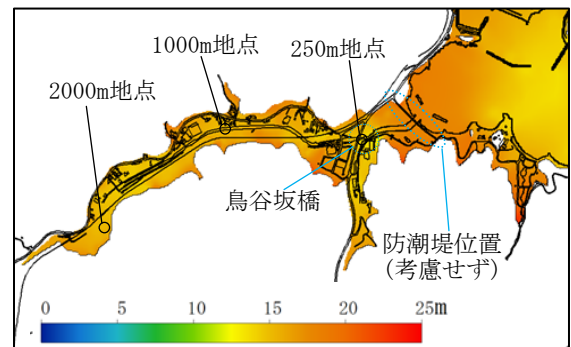


Fig. 6 津波最大水位分布(防潮堤なし)
Distribution of Maximum Tsunami Elevation (Without Seawalls)

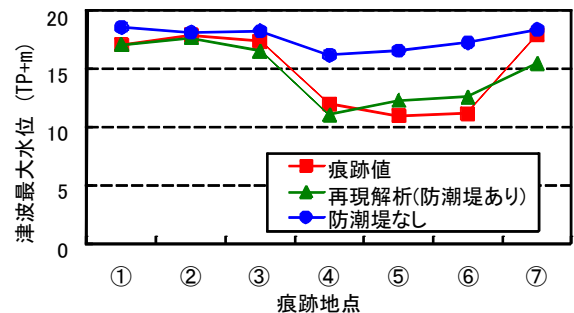


Fig. 7 最大水位解析値と痕跡高の比較
Comparison the Maximum Tsunami Elevation Between Analytical Values and Measured Values

堤が堰となり水が抜けられないためである。

再現解析(防潮堤あり)のケースの水位は、各地点の差は小さいことが分かるが、防潮堤なしのケースは、海岸から遠ざかるにつれ水位が上昇する傾向にあることが分かる。水位は、波の持つ全エネルギーから速度エネルギーを除いた位置エネルギーにより定まるが、再現解析(防潮堤あり)のケースでは、防潮堤により速度が緩められることでどの点においても速度エネルギーが支配的とならず、水位の変化が小さかったものと考えられる。一方、防潮堤なしのケースは、水門に近い点では速度エネルギーが支配的になっていたのが、1000m地点においては速度の低下に伴って水位が上昇したのと考えられる。な

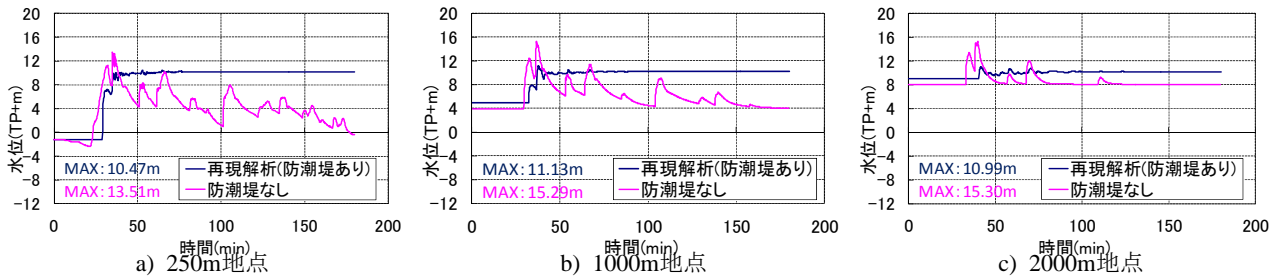


Fig. 8 津波水位時刻歴波形
Time History of Tsunami Elevation

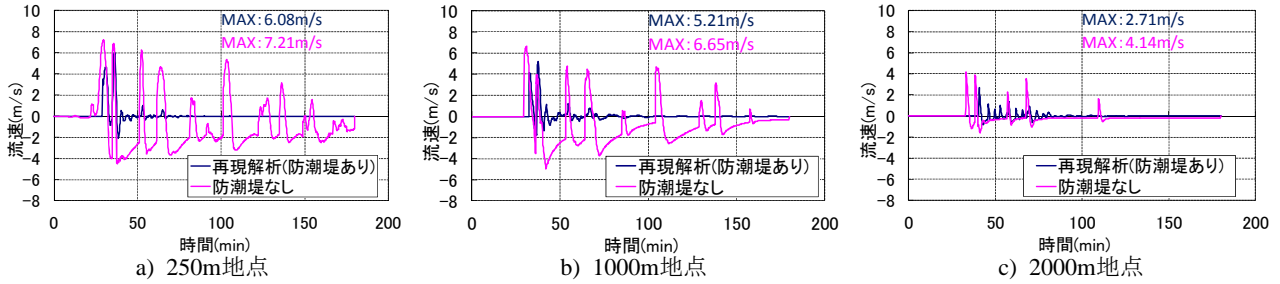


Fig. 9 津波流速時刻歴波形
Time History of Tsunami Velocity

お、2000m地点において速度低下したのは、減衰の影響が大きかったため水位の上昇にはつながらなかったものと考えられる。

両解析における最大水位まで至る時間は、250m地点ではほぼ同時であるが、海岸から離れるにしたがって防潮堤なしのケースの方が早くなっている。これは、防潮堤なしのケースの方が流速が大きいため、再現解析(防潮堤あり)のケースでは波の到達が遅れたものと考えられる。

速度は、再現解析(防潮堤あり)のケースでは短い周期で変動しているが、防潮堤なしのケースではパルス的に押し波が来て長い時間をかけて引き波が生じていることが分かる。再現解析(防潮堤あり)による短い周期の波は、防潮堤を越流したのちに防潮堤の陸側に溜められた水の振動が、反射しながら減衰している様子を示している。

4.4 橋梁の流出に対する検討

橋梁流出に対する防潮堤の効果に関しては、清水らの検討結果¹³⁾をもとに検討する。清水らの検討は実際に津波を受けた12橋を対象として、流速を6.00m/s、波高を10.0mとそれぞれ一定に仮定し、次式で表わされる桁抵抗力津波作用力比 β や死荷重上揚力比 γ を計算している。 β 、 γ はそれぞれ、耐力より作用が大きくなったときに1以下となる指標である。

$$\beta = S / F \quad (1)$$

$$\gamma = W / (p_Q \cdot B \cdot L) \quad (2)$$

$$S = \mu (W - U) \quad (3)$$

$$F = 0.5 \rho_w \cdot C_d \cdot v^2 \cdot A_n \quad (4)$$

$$p_Q = 0.4 \rho_w \cdot g \cdot (a_H - Z_I) \quad (5)$$

ここに、

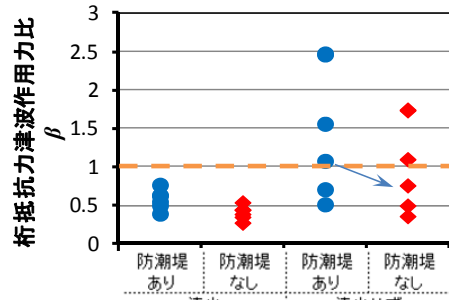


Fig. 10 防潮堤と β の関係
Influence of Presence of Seawalls on β

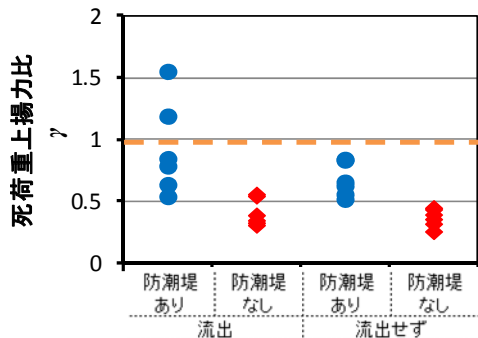


Fig. 11 防潮堤と γ の関係
Influence of Presence of Seawalls on γ

- S : 水平抵抗力
- F : 津波水平力
- W : 上部構造重量
- p_Q : 鉛直波圧
- B : 橋の総幅
- L : 桁長

μ	: 摩擦係数 (0.6)
U	: 浮力
ρ_w	: 水の密度 (1030kg/m ³)
C_d	: 抗力係数
v	: 最大流速
A_n	: 上部構造の有効鉛直投影面積
a_H	: 波高
Z_l	: 桁下高

本検討においては、再現解析(防潮堤あり)の水位と流速が清水らの検討の仮定とほぼ同一であったため、これを防潮堤ありのケースと考えた。防潮堤なしのケースは4.3に示す最大流速7.14m/sと最大水位(=波高と仮定)13.5mを用いた。これらから計算した β 、 γ により防潮堤の効果を検討することとした。

12橋に対しての β および γ をFig. 10, 11に示す。図では、12橋を東北地方太平洋沖地震津波により流出したものと流出しなかったもの(各6橋ずつ)に分けて比較している。

実際に橋梁が流出したかどうかと β の値は、必ずしも一致はしていないが、12橋の立地条件はさまざまであるため、ここでは、 $\beta=1$ を閾値として考察することとする。

β の値は、速度の2乗に反比例するため、最大流速が6.00m/sから7.14m/sと大きくなることで、 $(6.00/7.14)^2=0.70$ 倍となる。12橋中で防潮堤の影響により β の値が1を超えて変動するものは1橋のみ(Fig. 10の矢印)であったが、防潮堤ありの場合の β は0.4~2.5に分布し、そのうちの1.0~1.4の範囲にある場合は防潮堤の影響により $\beta=1$ を超えて変動する。よって、防潮堤によって流出を防げる橋梁も存在するものと考えられる。

γ の値は (a_H-Z_l) に比例するが、 Z_l は1.8~8mの間に分布している。 Z_l が大きい場合ほど防潮堤の影響が大きくなり、防潮堤の影響は β に与えるものより大きくなる。清水らの考察¹³⁾にも示される通り γ の値は必ずしも実被害と整合はしておらず検討の余地があるが、 γ は力学的性状から導いた指標であり、その指標が大きく変動することから、防潮堤の影響は大きいことが推定される。

5. まとめ

本論文においては、釜石市の両石湾水海地区を対象として、東北地方太平洋沖地震の再現解析を行い、痕跡値などの実被害と比較することでその特徴について考察を行った。

さらに、防潮堤を除去したケースとの比較により、防潮堤の効果について、検討を行った。

検討の結果、以下のことが分かった。

1) インバージョンにより波源モデルを設定すれば、非線形長波理論に基づいた差分計算によって、ある程度

の精度で観測結果を再現できることが分かった。ただし、現状の技術においては、沖合の波浪計データと痕跡値の両者ともにフィッティングすることは困難であり、解析目的によりフィッティングさせる対象を適切に選定する必要性が示唆された。

2) 本解析において、防潮堤は速度を低下させ浸水域を縮小させる効果があることが分かった。この結果、防潮堤は橋梁の流出を抑制する効果も大きいものと推定された。

謝辞

橋梁流出の検討にご協力いただいた大日本コンサルタント(株)清水氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本大震災復興構想会議：復興への提言～，(2011)
- 2) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 報告，(2011)
- 3) 中央防災会議南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会中間とりまとめ，(2012)
- 4) 国土交通省：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き，(2011)
- 5) 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/index.php>
- 6) 財団法人海洋架橋・橋梁調査会：平成23年東北地方太平洋沖地震による道路橋被害の事例，(2011)
- 7) Fujii, Y. et al.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 815-820, (2011)
- 8) Mansinha, L. et al.: The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., 61, pp.1433-1440, (1971)
- 9) 原口強，他：<http://www.jsge-map.org/tsunami>，(2011)
- 10) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション，東京大学地震研究所彙報，Vol.52, pp71-101, (1977)
- 11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，(2002)
- 12) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網NOWPHAS, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 13) 清水英樹，他：道路橋の津波による被害分析，構造工学論文集，Vol.58A, (2012)