

論文の内容の要旨

論文題目：津波氾濫予測と沿岸防災技術の高度化に関する研究

(A Study on Enhancement of Tsunami Flooding Prediction and Coastal Disaster Mitigation)

氏名： 山中 悠資

2011年に発生した東北津波(以下、東北津波)以降、沿岸域では二段階の津波規模設定に基づいた多重防御による津波防災・減災政策が推し進められている。その中でも特に、海岸堤防が担う役割は非常に重要である。百年程度の周期で発生する規模の津波による被害は完全に防ぎ、それ以上の周期で発生する規模の津波に対しても、津波に対して粘り強く抵抗することで被害の程度を低減させる機能が堤防に求められるようになった。これを実現するためには、対象地域に來襲する津波の特性や沿岸域での津波の挙動を精度良く推定することが重要である。さらに、東北津波は沿岸域で多くの堤防を破壊した。粘り強い堤防を実現するためには、それらの破壊メカニズムを分析して堤防破壊に関する知見を得ることも同様に重要である。本研究では、來襲津波の特性や沿岸域における津波の挙動及び堤防の破壊メカニズムを分析することにより、沿岸防災技術の高度化を図ることを目的とする。

1)高速津波計算システムの構築

通常來襲津波の予測には、数ある想定津波波源から対象地に最悪の被害をもたらすことが予想される波源群を抽出し、その伝播計算を行って來襲する最大津波高を推定する。津波防災計画の主体である市町村がそのような想定を個々に行う必要があるが、計算負荷の観点から全ての市町村で独自にそれを行うのは非効率である。そこで、計算負荷を低減させた高速津波計算システムを構築した。まず津波の伝播計算には解の重ね合わせが成立し、かつ波の分散性も考慮可能な線形ブシネスク方程式を基礎式として用いた。次に水位を単位量上昇させた波源(単位波源)を計算領域の各格子点に設置し、それらの伝播計算を行って計算結果をデータベース化した。そのデータベースに任意の津波の初期波源が与えられたとき、それを単位波源群の重ね合わせとして表現することにより、任意地点における水位変動を線形解の重ね合わせとして瞬時に得ることができる。さらに、実際の想定波源を対象として、通常の伝播計算で得られる結果と同計算手法で得られる結果を比較し、同

計算手法により得られる結果の妥当性を確認した。また日本海で想定されている津波波源を取り上げ、同計算手法を用いて津波想定の不確実性による沿岸域での津波挙動の変化を分析し、効率的にその分析を行えることを示した。

上述の手順に従って、日本海で発生する津波及びその沿岸域を対象とした高速津波計算システムを構築した。まず日本海では 60 個の津波波源が想定されており、それら全ての伝播計算を行ってその結果をデータベース化した。そのデータベースから、各沿岸域で生じる津波の来襲時間、最大波高及びそれが生じる時間を抽出した。次に、日本海で主要な津波断層が集中している日本海東縁部を対象にして単位波源群を設置し、それらの伝播計算を行って計算結果をデータベース化した。以上二つのデータベースを用いて、来襲する津波の波高や到達時間、任意の津波波源の伝播計算結果などを対象地点ごとに瞬時に表示することができる高速津波計算システムを構築した。これを活用することにより市町村ごとにきめ細かく来襲する津波の特性を瞬時に把握することが可能となった。

2) 海岸堤防の破壊メカニズムと沿岸域の津波の挙動

東北津波で破壊された堤防の多くは、津波の越流やそれに伴う周辺地盤の洗掘によるものであったことが報告されている。一方、岩手県大船渡市三陸町に位置する綾里湾では、来襲した東北津波の映像が残されており、映像で見られた周期 8 秒程度の短周期の水位変動(以下、短周期波)が綾里湾における堤防破壊に寄与した可能性が指摘されている。そこで綾里湾における堤防の破壊事例に基づき、堤防の破壊メカニズムとそれを引き起こした津波の特性を分析した。まず綾里湾を対象とした津波の数値計算を非線形分散波理論に基づいて行い、堤防周辺を含む湾内の詳細な津波の挙動を分析した。その結果、綾里湾奥の堤防周辺地点では、地震発生から 55 分までの間に水位が 15m を超える水位変動が二度生じていたことがわかった(以下、地震発生から 40 分までの時間帯で生じた水位変動を一波目の津波、地震発生後 40 分から 55 分までの時間帯で生じた水位変動を二波目の津波と定義する)。そのうち一波目の津波来襲時には短周期波は生成されていなかった。一方で、二波目の津波は短周期波を伴って来襲していた。またこの短周期波は津波の先端が前傾化して段波状の波形となり、それが分裂(ソリトン分裂)することによって発生していたことがわかった。次に、津波の越流による波圧が堤防に作用した場合の作用応力を推定して堤防耐力と比較したところ、津波の越流による作用応力は堤防耐力を大きく下回り、その破壊条件を満たさなかった。現地で撮影された写真から、一波目の津波が堤防を越流している時点ではそれが破壊されていないことが確認できたことから、二波目の津波による衝撃砕波波圧が堤防に作用した場合の作用応力と堤防耐力を比較した。その結果、波高が 10m 程度になると作用応力が堤防耐力を上回ることがわかり、段波状の津波と短周期波が合わさった 10m 程度の波高の津波が堤防位置に来襲していたことが数値計算から確認できたことから、二波目の津波の衝撃砕波波圧によってそれが破壊されたことがわかった。また分裂による短周期波が段波状の津波に加わることにより作用津波波圧が増大し、堤防破壊を助長していた可能性があることがわかり、分裂波の形成状況によってはそれが主要波圧となっ

て堤防を破壊する可能性があることが示唆された。

3)ソリトン分裂波の発生条件とその発生の予測

ソリトン分裂によって生じる短周期波による波圧が主要成分となって堤防を破壊する可能性があることが示されたことから、その発生可能性を考慮して津波防災計画を策定する必要がある。一方でソリトン分裂を計算上で再現する場合、波の非線形性及び分散性の考慮、さらに高解像度の計算格子点が必要なため、現在の津波の氾濫計算に一般的に用いられる非線形長波モデルと比較して計算負荷が大幅に増大する。そこで、ソリトン分裂波の発生条件を分析し、その発生を小さな計算負荷で予測できる手法を構築した。まず一次元一様勾配水路条件で非線形分散波理論に基づく津波の伝播計算を波の遡上を考慮して行った。沖側境界から周期及び波高が異なる波形を入力し、それが伝播する過程で分裂が発生するかどうかを分析した。ここで入力波形には、正弦波形のある波峰に単位高さのガウス分布の波形の波峰を一致させて乗じた波形を用いた。このガウス波形の時間スケールは可変であり、これを大きくすることによってガウス波形を一致させた波に先行する波の波高が大きくなり、先行波が後続波に干渉する場合を含めて波の分裂を分析することができる。この分析からソリトン分裂の発生条件を抽出し、さらに得られた条件を平面二次元地形に適用可能な形式に拡張した。

実際に東北津波でソリトン分裂が発生していたことが報告されている岩手県綾里湾及び宮城県仙台湾を対象として上述の条件を適用し、その適用性を確認した。特に綾里湾においては、津波が湾水振動を引き起こし、それによる波高増幅が津波の分裂を引き起こした要因の一つであることがわかった。また綾里湾の北方に位置する吉浜湾と唐丹湾に來襲した東北津波を対象として同様の分析を実施した結果、前者ではソリトン分裂が発生し、後者ではそれが発生しないことが予測された。それらを対象とした数値計算を実施した結果、予測結果と矛盾しない結果が得られることが確認できた。さらに、想定南海トラフ巨大地震津波波源により來襲する津波と太平洋沿岸域を対象として同手法を適用し、津波がソリトン分裂を引き起こして來襲する可能性が高い地域を抽出した。