

氏名	いわせ ひろゆき 岩瀬 浩之
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年9月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	津波発生域から沿岸域までの分散効果を取り入れた数値モデルの研究
指導教員	東北大学教授 今村 文彦
論文審査委員	主査 東北大学教授 澤本 正樹 東北大学教授 真野 明 東北大学助教授 越村 俊一

論文内容要旨

沿岸域に來襲する津波の挙動解析は、津波波源の位置や形状および海底や地形形状により大きく影響を受けるため、数値計算が有効な手段となっている。現在使用されている数値解析モデルにおける支配方程式の多くは、非線形長波式を支配方程式としており、浅海域における津波変形の主たる要因となる水深変化に伴う浅水変形、港湾による共振現象(反射)および島によるトラップ現象(屈折)や構造物からの越流や陸上への遡上については、実務において高い精度で解析することが可能である。ところが、1983年日本海中部地震津波における北秋田の広い沿岸域で目撃された津波のソリトン分裂(波状段波)は、非線形長波式を支配方程式とした数値解析モデルでは再現できない津波挙動の一つであると指摘されている。一つの波が複数の波に分裂するソリトン分裂は、地形効果に依らず自らの波形曲率効果により急激に津波波高が増幅することが知られており、同津波による秋田県峰浜村海岸のような直線的な海岸線を有する地形であっても10mを越える遡上高を記録する場合がある。この様に、津波のソリトン分裂は、沿岸域における津波対策を行う上で非常に重要な現象であるにもかかわらず、詳細な検討や対策が行われていない背景には、数値計算モデルの安定や精度、手法についての検討が十分でないことが挙げられる。波数分散効果を含む支配方程式を計算するためには、安定した計算を行うため陰差分法を採用しなければならない。しかし、一般的な陰差分法では収束計算による膨大な演算時間を必要としなければならない。同時に陰差分法では取り扱いの難しい格子間隔の異なる計算領域間の結合や陸上部における津波遡上先端部の処理方法に課題が残されていた。さらに、分裂によって増幅した津波の碎波による波高減衰を精度良く再現しなければ、陸上への遡上高を過大評価する恐れがあるため、津波のソリトン分裂波に適した碎波モデルを考慮する必要がある。本研究は、このような背景から、計算の安定性と

高速な演算を行うことができる新たな計算方法による津波解析モデルを提案し、理論解析、水理模型実験および事例研究から津波波源域から沿岸部までの津波伝播と変形を精度良く再現できる新たな津波解析モデルの構築を行い、その妥当性と実用性を示したものである。まず、理論解析により深海域および浅海域のそれぞれの海域において津波の伝播と変形を精度良く再現できる波数分散効果を考慮した支配方程式の検討を行った。次に、波数分散効果を考慮した支配方程式を安定かつ高速に演算できる新たな計算方法を提案し、水理模型実験との比較からこの計算方法に適した支配方程式の検討と計算方法の妥当性を示した。さらに、数値解析を使用して、深海域での津波伝播における波数分散効果の影響を検討すると共に、水理模型実験から浅海での津波のソリトン分裂に関する増幅特性と数値解析の適用範囲を明らかにした。また、ソリトン分裂波の砕波を対象とした水理模型実験を行うことにより、分裂波に対する砕波モデルの構築を行った。最後に、事例研究として、日本海中部地震津波における秋田県峰浜海岸域を対象とした津波再現計算を行い、従来の数値解析モデルでは再現ができなかった浅海域における津波の挙動について検討から、提案した数値解析モデルの妥当性と必要性を示した。

第1章の序論では、長波理論から展開される各支配方程式で説明できる津波の諸現象について整理すると共に、非線形性と波数分散性を考慮した非線形分散長波式でないとは再現できない浅海域での津波の挙動について事例を示した。さらに、非線形分散長波式を支配方程式とした津波の数値解析モデルを構築するにあたり、支配方程式、数値計算方法、津波伝播に及ぼす波数分散効果および砕波モデルなどの課題点を明らかにした。また、現在までに提案されている解析モデルの適用性についてまとめた。

第2章の分散波理論式の検討では、提案されている非線形分散長波式を対象に、深海域および浅海域における津波の伝播と変形の再現に最も適した支配方程式を理論解析から検討した。深海域における津波の挙動については、各方程式の分散関係式を導き、理論値であると考えられる微小振幅波理論の分散曲線との比較を通じて分散項を修正した Madsen-Sorensen の式(1992)もしくは Beji-Nadaoka の式(1996)が最も適していることを示した。また、浅海域における津波の挙動については、最終的なソリトン分裂波の波速と波形形状に着目し、各支配方程式の孤立波解を導き、水理模型実験と良く一致する KdV の式(1895)の孤立波解との比較を通じて断面積分型表示の Peregrine の式(1967)もしくは Madsen-Sorensen の式が最適な支配方程式であることを明らかにした。

第3章の数値解析モデルの開発では、非線形分散長波式を安定かつ高速に演算することを目的に、従来のリープ・フロッグ法を拡張した2段階混合差分法を提案した。非線形分散長波式は、従来の津波解析モデルに使用されている非線形長波式に波数分散項を付け加えた形であるため、運動の式を2つに分

割して波数分散項のみに陰差分法を適用するものである。さらに、数値誤差を抑制する誤差抑制項を考慮することによって、数値粘性による計算値の波高減衰を回避する効果があることを水理模型実験との比較から示した。また、水理模型実験との比較から 2 段階混合差分法に適した支配方程式の検討を行い、断面積分表示の Madsen-Sorensen の式が第 2 章での理論解析を含めて最も津波解析に適した支配方程式であることを明らかにした。最後に、モデル地形を利用した陸上遡上計算から、平面的な遡上計算にも容易に拡張できることを示している。

第 4 章の深海域における津波発生・伝播へ及ぼす波数分散効果と浅海域への影響では、数値解析を利用した深海域および浅海域での津波伝播に及ぼす波数分散効果について検討をした。代表的な既往津波波源を対象に、200m 水深点における水位時系列から波源域での波数分散効果について波高減衰率、周期伸張率を算出した。さらに、津波の初期波形スペクトルから波源域での波数分散効果を示す指標値の定義と閾値の設定を行い、日本海中部地震津波では、波源域でも波数分散効果が無視できないことを明らかにした。また、断層パラメータから直接指標値を算出できる近似式を導くと共に、波源域の海底地盤の立ち上がり時間が波数分散効果に与える限界時間と 60 秒程度であることを示した。最後に、日本海中部地震津波を事例とし、深海域における津波挙動が、浅海域における津波のソリトン分裂の変形過程に大きく影響を及ぼすため、同津波では、深海域から波数分散効果を考慮した数値解析が必要であることを示した。

第 5 章では、ソリトン分裂波の増幅特性と解析モデルの適用限界について検討をした。水平床の逆流場を伝播する孤立波を対象としたソリトン分裂の水理模型実験から、分裂波の波形特性を示す理論波数と形状波数を新たに導入し、分裂過程における各波数の関係を整理した。その結果、逆流の大きさ、すなわち、水深に関するフルード数に依らず、理論波数と形状波数の間に一定の関係を保ったまま分裂を行うことを明らかにした。同時に、波形勾配と波高水深比の間にも同様の関係があることを示した。また、実験値と計算値の比較から、計算値の分裂波高は波高水深比が大きくなるに従って実験値よりも過小評価する事を明らかにし、本研究で提案した解析モデルの適用限界として波高誤差を 10% 以下に抑えるには波高水深比で 0.6 まで、同じく形状波数については 3.0 程度までが限界であることを明らかにした。

第 6 章では、ソリトン分裂波の碎波モデルでは、水平床を伝播するソリトン分裂波の碎波に関する水理模型実験を通じて碎波モデルの構築を行った。碎波の数学モデルについては、片山・佐藤 (1933) と同様に拡散型の運動量減衰項とし、エネルギー減衰としての拡散係数には、南・真野 (1987) による波

速と水位に関する式で定式化を行った。同時に、第5章で示したように、波高水深比が0.6を越える範囲で波高を過小評価することを考え、砕波直前で波高の修正を行う波高修正モデルを砕波モデルと同型で導入した。まず、水理模型実験から波高水深比に関するソリトン分裂波の砕波条件として、Longuet-Higgins (1974) による理論的な孤立波の砕波条件とほぼ一致した0.83を得た。同様に、砕波終了条件として、波高水深比として0.55を得た。次に、実験値と計算値の比較を通じて、波高増幅モデルと砕波モデルのキャリブレーションを行った。最後に、一様勾配上の規則波の水理模型実験を対象に、構築した砕波モデルの適用性の検証を行い、砕波後における第1分裂波の波高や位相については良い一致を示したが、計算値の分裂が実験値に比べ過度に発生することを明らかにした。

第7章では、波数分散・砕波を考慮した新しい津波解析モデルの検討として、1983年の日本海中部地震津波を対象とした事例研究を行った。秋田県峰浜村沿岸を対象に、波源域から沿岸域までの波数分散効果を考慮した平面計算を行い、従来の解析モデルによる計算結果との比較を通じて、本解析モデルの妥当性と有効性について検討した。波源域では分散波列を再現できるように400m格子で地形近似を行い、峰浜村沿岸部ではソリトン分裂波を再現できるように6.25mの詳細地形近似とした1時間の再現計算を実施した。同時に、非線形長波式による津波の陸上計算も実施した。従来の解析モデルによる計算結果との比較により、①本解析モデルでは、浅海域で津波先端部のソリトン分裂を再現することができた。②砕波を考慮しない解析モデルは、津波波高を過大評価にするため、砕波を再現することが必要となる。③陸上への浸水範囲は、従来の解析モデルの計算結果と大きく変わらないが、海岸線上の津波波高は大きくなる。④痕跡値との比較より、本解析モデルによる計算値の方が痕跡値に一致する傾向にある。以上の結果により、従来の解析モデルに比べ、本解析モデルの妥当性と有効性を示すことができた。

第8章の結論では、本研究で得られた主要な結果をまとめ、今後の展望について示した。

以上、本研究では理論解析、水理模型実験を通じて非線形分散長波式を支配方程式した高精度の津波数値解析モデルの構築を行い、その妥当性と有効性を事例研究から検討したものである。その適用範囲は、沿岸部のみならず津波の河川遡上の再現計算にも適用が可能であり、実務への貢献にも大きな期待ができる。今後の展望としては、未だ不明な部分が多い津波のソリトン分裂波による陸上遡上や構造物への影響を検討することにより、より信頼性の高い津波防災策定の提案を行うことである。

論文審査結果の要旨

1983年日本海中部地震津波における北秋田沿岸域や2003年十勝沖地震津波における十勝川では、ソリトン分裂を起こした津波が目撃されている。このような津波は、波形曲率効果により著しく波高が増幅するため、通常より大きな波高や波力が生じると考えられ、数値解析で再現するためにはより高次の支配方程式とする必要がある。そこで本研究では、津波波源域から浅海域までの津波の伝播と変形過程を精度良く再現できる津波解析モデルの構築を目的とし、この解析モデルの妥当性を理論解析および水理模型実験を通じて行い、事例研究によって有効性を検討した。本研究は8章から構成されており、その内容を以下に示す。

第1章は序論である。

第2章では、複数の非線形分散長波式を対象に、深海域および浅海域のそれぞれに関して津波の数値計算に適した支配方程式の理論考察を行っている。深海域では、Madsen-Sorensenの式もしくはBeji-Nadaokaの式が良く、ソリトン分裂を発生するような浅海域では、断面積分型表示のPeregrineの式もしくはMadsen-Sorensenの式が有効である。数値モデルを選定する際に重要な知見となる。

第3章では、波数分散項を安定かつ高速に演算することができる2段階混合差分法の提案を行っている。水理模型実験との比較を通じて誤差抑制項の有効性を示すと共に、本差分法に適した支配方程式として断面積分表示の理論が有効であることを示した。これより、安定し精度の高い数値モデルが提案できた。

第4章では、代表的な5つの地震津波を対象に、深海域における波数分散効果の影響について検討した。深海域で波数分散効果を受けた津波が浅海域におけるソリトン分裂の生成過程に及ぼす影響を検討し、津波入射波形がソリトン分裂の発生と変形過程に大きな影響を与えた。分散波を理解するのに重要な成果となる。

第5章では、逆流場を伝播する孤立波の水理模型実験から、逆流の大きさ（フルード数）に関わらず孤立波のソリトン分裂には、本章での理論波数と形状には一定の関係があることを明らかにした。河川遡上する津波挙動を理解する上で有用な結果である。

第6章では、砕波に伴う津波の波高減衰を表現するための砕波モデルの構築を行った。ソリトン分裂波を対象とした水理模型実験から波高水深比に関する砕波開始条件および砕波終了条件を得た。また、規則波の水理模型実験との比較し、実験値と良く一致する見解を示しており、拡張性の高い砕波モデルであると判断できる。

第7章では、日本海中部地震津波にて最大遡上高を記録した峰浜村沿岸部を対象とした再現計算を行った。砕波を考慮しない解析では、沿岸部および陸上域での津波高が過大に評価されることを示した。非線形長波式による既往解析モデルでは再現ができなかった沿岸域での津波のソリトン分裂を再現することに成功した。従来の解析モデルによる結果に比べ精度の高い計算結果となった。

第8章は結論である。

以上、本研究により、津波の発生から遡上に至る過程において分散項の役割と重要性を詳細に検討でき、波形や流速を高精度で再現できる数値モデルを提案することが出来た。浅海域での砕波効果を取り入れ、波高や浸水域の過大評価を改善できた。本研究の結果は今後の津波数値解析を行う際の重要な指針となる。沿岸域のみならず河川域も対象とした津波防災分野における貢献は極めて高いものであると判断される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。