

氏名	かな やま すすむ 金 山 進
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成11年3月25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	非線形分散波モデルによる平面波浪場評価手法に関する研究
指導教官	東北大学教授 田中 仁
論文審査委員	主査 東北大学教授 田中 仁 東北大学教授 澤本正樹 東北大学教授 真野 明

論文内容要旨

第1章 序論

沿岸域での波浪変形を正確に把握することは、構造物の設計条件、周辺海域の地形変化などを検討する上で重要な課題である。波浪変形のすべての要素を正確に評価するには3次元の流体の基礎方程式を直接的に扱うことも考えられるが、計算機容量および計算効率などの実用的観点から上記の Boussinesq 方程式に代表されるように波動場の鉛直方向の特性をモデル化した平面波浪解析法が大きな役割を担うことになる。このような背景の下、本研究の目的は、十分な精度と実用性を兼ね備えた平面波浪場評価手法を構築することにある。

第2章においては、最も基本的な非線形平面波浪モデルである Boussinesq 方程式を用いて離島港湾および中規模港湾での2次干渉波までを含む波浪変形問題を検討し、その適用性および問題点を整理する。

第3章では、さらに精度の高い非線形分散波モデルに関する最近の研究をレビューするとともに精度向上の一手法として分散性に対する任意次数の近似度を有する高次長波近似モデルの一般形を提案するとともに、その可能性を検討する。

第4章では、もう一つの精度向上方針として、2次の長波近似モデルを多層連成させる方法を検討し、「非線形分散多層波動方程式」を提案するとともに、その精度の理論的検討および数値計算による検証を行う。

第5章に本研究の結論をまとめる。

第2章 弱非線形弱分散モデルとしての Boussinesq 方程式の適用性

Boussinesq 方程式は潮汐や津波以外の通常の波浪に適用できる非線形分散波動モデルのなかで最も低次の近似に基づくものである。適用範囲、精度に不十分な部分がある反面、方程式がシンプルのため数値モデル化が容易であるという利点は大きく、最近では実務レベルでも広く用いられている。ここでは、Boussinesq 方程式の特徴、精度の限界を整理する一方、実際問題への適用を通じてその有用性について照査し、Boussinesq 方程式に代表される非線形分散波動モデル

の潜在的可能性と改良の必要性と意義を確認した。

(1) Boussinesq 方程式の精度

分散性を表すパラメタ σ (相対水深の 2 乗) の 1 次のオーダーまでを考慮した長波近似モデルである Boussinesq 方程式の線形分散特性および 2 次干渉特性は相対水深 kh が概ね 1 を越えると精度が低下する。

(2) 離島漁港の長周期波災害メカニズム検討への適用

伊豆諸島八丈島の南西岸に位置する八重根漁港のサーフビート・水位上昇を伴う高波浪災害のメカニズム検討に Boussinesq 方程式を適用し、現象把握に有力なツールであることを確認した。港内静穏度解析のみでは予測できない長周期波災害に関する検討における非線形波動分散波モデルの有効性が確認できた。

(3) 中規模港湾の港内長周期波評価への適用

東京電力福島第二原子力発電所専用港湾の港内長周期変動解析に Boussinesq 方程式を適用した。離島港湾のように完全に砕波帯内に包含されることがない状況に対しても現象を概ね再現できることが確認された。また、一方では、先鋭化した波形などが完全には再現できず、改良の必要性も認められた。

第 3 章 鉛直積分型の非線形分散波モデルの精度向上

精度と実用性を兼ね備えた波浪変形評価モデル開発の足掛かりを得るため、非線形分散モデルに対する最近の研究をレビューするとともにそれらの改良手順をさらに押し進めた検討を行った。

非線形分散波モデルの精度向上については、①長波近似モデルの分散性に対する近似度を上げる方法、すなわち鉛直座標に対する高次の多項式を採用する方法 (高次長波近似モデル) と②複数モードの重ね合わせで波動場の鉛直分布特性を表現する方法 (多成分連成モデル) の系統の研究が盛んに進められている。前者の可能性を深く追求するため分散性のパラメタ σ (相対水深の 2 乗) を任意次数まで考慮できる一般化高次長波近似モデルを導出してその特性を検討した。

σ^3 まで考慮したいわば 6 次の Boussinesq 方程式は分散関係に対して極めて良好な精度が得られたが、一方では、高波数域において 2 つの成分波の波数差から生じる 2 次干渉波の正負が逆転すること、方程式が極めて煩雑になることなどの問題も抽出された。

第 4 章 非線形分散多層波動方程式の提案

高次長波近似モデルと多成分連成モデルの特徴を生かし、長波近似モデルを多層連成させると新たな高精度非線形分散波モデルを提案するとともに線形分散や 2 次非線形干渉の精度に関する理論的検討および数値シミュレーションによる検証を行った。

(1) 非線形分散多層波動方程式

静水深を多層に分割して定義される各層の平均流速 $\{u_n\}$ などの諸量を用いて流体運動の基礎方程式を表現し以下の 3 種類のモデルを提案した。

モデル I : <連続式> + <各層の運動方程式>

モデル II : <連続式> + <自由水表面での力学的条件> + <層の継ぎ目で流速が連続する条件>

モデルⅢ：<連続式>+<層上端での圧力水頭の条件>+<圧力水頭を用いた各層の運動方程式>

(2) 非線形分散多層波動方程式の精度

非線形分散多層波動方程式の線形分散特性および2次の非線形干渉特性は層数とともに Stokes 理論に安定に漸近することが確認された。

(3) 数値計算による検証

多層モデルに対する数値計算方法を開発し、①1次元非線形強分散波動場への適用、②斜め入射砕波帯内の平面波浪流況場への適用、③固定浮体による準3次元散乱波動場への適用などを通じて精度を検証した。

第5章 結論

○最も簡便な非線形分散波モデルとして位置づけられる Boussinesq 方程式は、適用範囲・精度の制約範囲内ではサーフビート・水位上昇などの2次的現象を含めた波浪変形評価において有用な手段となることが実際問題への適用を通じて確認された。したがって、精度と実用性の高い非線形分散波モデルを開発することは、従来の静穏度解析などでは評価できない中小漁港の長周期波災害の問題、波群拘束波が駆動源となる港内副振動による係留船舶動揺の問題などに取り組む上で意義が大きいことが確認された。

○非線形分散波モデルの精度向上を目的に近年盛んに研究が進められている2つの手法である高次長波近似モデルと多成分連成モデルのうち、前者の可能性を深く追求するため分散性のパラメータ σ （相対水深の2乗）を任意次数まで考慮できる一般化高次長波近似モデルを導出してその特性を検討した。

高次近似のモデルほど高い精度を有するが、一方では、高波数域において2つの成分波の波数差から生じる2次干渉波の正負が逆転すること、方程式が極めて煩雑になることなどの問題も抽出された。

従属変数が3つ（水平2方向の流速成分と水位）で十分であるという点が長波近似モデルの長所の一つであり、この利点を生かした範囲内での非線形分散波動モデル高精度化の手法の一つがここで示されたといえる。さらなる精度の向上をめざすには、多成分連成モデルにみられるように従属変数の数を増やす方向が有力であるという結論が得られた。

○いくつかの従属変数を連成させるという多成分連成モデルの発想と長波近似モデルの思想を組み合わせた非線形分散多層波動方程式を提案するとともにその精度を検討した。層数の増加とともに分散性および2次非線形性に関する精度は向上し、厳密解に対する安定した漸近を示した。また、数値モデル化も容易であり、1次元、平面2次元、準3次元の問題において適用性が確認された。これによって精度と実用性を兼備した非線形分散波モデルの開発という本研究の目的に到達することができた。

審査結果の要旨

海岸構造物の設計や周辺海域での地形変化予測と関連して、海岸工学上の実務の場において沿岸域での波浪変形予測を精度良く行うことが求められる。これまでの実務上の計算では、屈折・回折に対する線形計算と浅水砕波変形ダイアグラムを組み合わせて波浪変形を評価し、海浜流、水位上昇、サーフビート等の二次的現象の取り扱いにはラディエーションストレスの概念を導入した平均量の方程式を用いる方法が主流を占めてきた。しかし、近年の電子計算機の発達に伴い、Boussinesq モデルをはじめとする非線形分散波動モデルが実務に適用されつつある。本研究は、この様な背景の下、十分な精度と実用性を兼ね備えた平面波浪場計算法を構築することを目的としており、全6章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景を述べるとともに、既往の研究を調べ、本研究の位置づけを明らかにしている。

第2章では、まず、最も基本的な非線形平面波浪モデルである Boussinesq 方程式を用いて、離島港湾および中規模港湾での二次干渉までを含む波浪変形問題を検討し、その適用性および問題点を整理している。その結果、Boussinesq 方程式は、相対水深が概ね1を越えると精度に問題が生じるようになるものの、この範囲内で適切に用いられる限り、サーフビート・水位上昇などの二次的な現象も含めた波浪場評価に有効であることが明らかになった。これは重要な成果である。

第3章では、さらに精度の高い非線形分散波モデルとして、分散性に対する任意次数の近似度を有する高次長波近似モデルの一般形を提案するとともに、その可能性を検討している。その結果、6次の項まで考慮することにより分散関係式に関して極めて良好な精度が得られたが、一方で高波数域において二次干渉波の正負が逆転すること、方程式が極めて煩雑になることなどの問題点が抽出された。これはきわめて重要な成果である。

第4章では、もう一つの精度向上の方向として、二次の長波近似モデルを多層連成させる方法を検討し、「非線形分散多層波動方程式」を提案している。同手法は数値計算への応用が容易であり、一次元非線形強分散波動場、平面二次元波動場への適用を通じてその精度が確認された。さらに、多層方程式の特徴を生かして没水構造物を対象とした準三次元モデルとしての適用生も検討された。これは興味深い成果である。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は平面波浪場評価法について、既往の手法の限界を明らかにするとともに、新たな波浪場予測手法として二つの方向性を提示し、それぞれの得失を定量的に論じており、海岸海洋工学分野の発展に寄与するところが少なくない。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。