

称号及び氏名	博士（工学） 李 僑
学位授与の日付	平成 28 年 3 月 31 日
論文名	境界要素法に基づく波漂流力の数値計算に関する研究 ーゼロ次要素法(コンスタントパネル法)の改良ー
論文審査委員	主査 深沢 塔一 副査 山崎 哲生 副査 大塚 耕司 副査 池田 良穂 副査 坪郷 尚 副査 二瓶 泰範

論文要旨

波漂流力と波漂流モーメントは、波により浮体に作用する水平方向の定常的な力と旋回モーメントであり、解析により得られた速度ポテンシャルから算出される。算出方法としては従来より Far Field Method と Near Field Method の二つが用いられてきた。波漂流力および波漂流モーメントの Far Field Method による算出法とは、運動量保存則により浮体に作用する力やモーメントを浮体無限遠方における圧力および運動量収支の積分に置き換え、時間平均により求めることである。Near Field Method は、浮体浸水表面における流体圧力の二次成分を直接積分して、波漂流力と波漂流モーメントを算出する方法である。この方法は多浮体に対応しやすいという特徴がある。

いずれの方法においても、速度ポテンシャルの計算が重要である。速度ポテンシャルを数値的手法によって求める場合、境界要素法が広く用いられる。境界要素法を用いて速度ポテンシャルを計算する際には、適切な境界条件および Green 関数を用いて境界積分方程式を導き、速度ポテンシャルを求解することが出来る。その数値解法として、高次要素法とゼロ次要素法がある。ゼロ次要素法は中心点を代表点として、要素内で求めるべき速度ポテンシャル、法線ベクトル等の未知数を一定値と仮定する方法であり、選点法またはコンスタントパネル法とも呼ばれる。しかし、この方法によって計算された速度ポテンシャルを用いて、Near Field Method によって波漂流力と波漂流モーメントを算出する場合、境界上、特に水線上での速度ポテンシャルの計算値の取り扱い、及び速度ポテンシャルの精度の高い微分計算が難しいという問題点が挙げられる。水線上での速度ポテンシャルの取り扱いについての一つの解決方法として、流体領域に関する運動量定理から直接、定常波漂流力の相反的な表示を導き、水線上での速度ポテンシャルを積分する必要のない形に導く手法がある。しかし、この方法は水線上での速度ポテンシャルを求める必要

はなくなるが、浮体表面上での流速の法線方向微分値が必要となり、やはり浮体表面上において精度の高い微分計算が必要という問題点は依然残ったままとなる。

本研究は、Near Field Method によって波漂流力と波漂流モーメントを算出可能にするべく、ゼロ次要素法をベースにした新しい計算方法を提案する。本論文で提案する計算手法のポイントは二つある。一つ目は、ゼロ次要素法により計算された水線近傍の速度ポテンシャルと二次外挿関数により水線上での速度ポテンシャルを求めることである。二つ目は、二次外挿関数を用いて要素中心点における速度ポテンシャルの計算値を新しい評価点に外挿することにより、二次の形状関数を導入できるようにし、微分計算の準解析的な取り扱いを可能にしている点である。提案した手法の検証のため、高次要素法と従来のゼロ次要素法による波漂流力等の計算比較を行っている。本手法は高い精度で各種の流体力が評価可能であることを本研究により明らかにした。また、改良された方法を用いて、複数浮体にも適用出来るように拡張し、2 浮体問題に関して、それぞれの浮体に働く波浪強制力、波漂流力及び運動を理論的に調査した。特に、将来、実用する可能性が高い技術として注目されている Tandem 係船方式においては、2 浮体が比較的接近した状態になると考えられる事、また、2 船の接触等、重大な事故があり得る事が予想され、その人的、物的及び金銭的損害は、従来の Oil FPSO よりも大きいものとなる事が予想される。この 2 浮体の水平面での運動、特に Yaw 方向の運動に焦点を当て、波漂流力、波漂流モーメントによる水平面内運動の特性を調査した。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章は、緒論であり、本研究の背景となる浮体運動の数値解析手法の変遷と本研究の位置付け、および本論文の構成を述べている。

第 2 章において、まだ十分に検討されていない Tandem 係船方式においては、LNGFPSO とシャトルタンカーのような浮体間の動揺の様子を確認するため、船の自由度動揺確認実験を行った。実験により、2 浮体の運動、特に後方に位置する浮体の運動に注目し、その回頭運動を定性的に分析した。実験の目視観察及びビデオ映像の観察結果から、短波長域において、シャトルタンカーが過度に回頭する現象が見られた。

第 3 章は、浮体運動の解析方法としての 3 次元境界要素法に関する式展開を行った。また、境界要素法により導出した境界積分方程式の解法であるゼロ次要素法、及び、高次要素法を説明している。

第 4 章では、波漂流力と波漂流モーメントの数値計算方法である Far Field Method と Near Field Method の展開を行い、この 2 つの漂流力計算方法に関する理論、および数値計算法について説明した。これによって、ゼロ次要素法を用いて計算された速度ポテンシャルが、Near Field Method によって漂流力と波漂流モーメントを正確に計算できない理由は

①境界、特に水線での速度ポテンシャルの計算、

②正確な微分項の計算、

であることが分かった。

第 5 章は、この理由に基づき、従来のゼロ次要素法の改良を試みる。まず、ゼロ次要素法改良の基礎的な考え方を論じ、そして、改良されたゼロ次要素法の定式化を行う。改良された計算方法は「新ゼロ次要素法」と呼ぶ。この方法のコンセプトを、下記に示す。

- ・ 外挿法により、水線を含めた境界での速度ポテンシャルや法線ベクトルの計算を行う。これにより、①がクリアできると考えられる。また、計算量の増加を抑えるため、従来の計算法と同じく、各メッシュは代表点 1 点だけで計算を行う。

・複数の外挿で求めた境界での計算点を用いて、形状関数を導入することによって、微分項を計算する。

第6章は、提案された新ゼロ次要素法の計算精度を検証した。具体的な方法として、単体浮体を対象に、新ゼロ次要素法によって計算された速度ポテンシャル、波浪強制力及び波漂流力を計算し、これらの物理量をゼロ次要素法と高次要素法とで計算したものと比較検討を行った。波漂流力及び波漂流モーメントの計算結果から、従来のゼロ次要素法+Near Field Method という方法で計算した波漂流力は、一致する部分があるが、最大 60%以上の差が出ているところもある。一方、本論文で提案した新ゼロ次要素法は、ほとんど 1%以内であることが分かった。すなわち、本論文で提唱している「2 次外挿関数を用いて、ゼロ次要素法により求めた各メッシュ中心点での速度ポテンシャルと法線ベクトルを境界を含めた新しい計算点に移行し、新しい評価点を用いて Near Field Method により波漂流力及び波漂流モーメントを計算する」という概念が十分に通用することが証明されたと言える。

第7章は、多浮体を対象とした数値計算理論を説明した。第5章で単独浮体を対象とした解析手法を基に、多浮体に拡張するための定式化を行った。

第8章は、提案した多浮体を対象とした数値計算理論を用いて、Diffraction 問題において、2 浮体の数値計算及び検討を行う。特に Tandem 状態において、浮体間距離と干渉影響の関係、また、第2章で見られた回頭現象について分析を行い、以下の結果を得た。

浮体間距離を変化させる計算の結果から、いずれの浮体間距離においても、Surge 方向の波漂流力だけが生じることとなる。後方浮体 Surge 方向の波漂流力は、間隔が船長 2 倍の場合、単独浮体の場合と比べて最大 50%以上の減少が見られた。これは前方浮体による後方浮体への遮蔽影響と考えられる。2 浮体の距離が離れると、干渉影響が小さくなり、単独に近づく傾向が見取れる。また、前方浮体の Surge 方向の波漂流力は、短波長領域 ($\lambda/L=0.3\sim 1.0$) において、単独浮体の場合とほぼ同じであり、干渉による影響が小さい。

後方浮体の回転角度を変化させる計算の結果から、後方浮体を回転させても、前方浮体は Surge の波漂流力だけが生じることとなり、Sway と Yaw 方向はほぼ 0 である。また、後方浮体の Surge 方向の波漂流力については、回転により、回転角 45° までは、増加する傾向となったが、 60° では、 45° より下回る事となった。Yaw 方向の波漂流モーメントも同様の傾向が見られる。一方、Sway 方向の波漂流力は、回転角の増加により、増加することが分かる。この様な数値計算結果を用いて、第2章の実験で見られた後方浮体の回頭する現象を分析する。この回頭現象は、Yaw 方向の波漂流モーメントによって生じるものである。また、回転方向は回転角が大きくなる方向となる。従って、実験の見られた後方浮体の回頭する現象は数値計算でも同じ結果となっていることが分かる。

第9章では、本研究で得られた知見をまとめている。

以上、本論文では、ゼロ次境界要素法を用いて計算された速度ポテンシャルが、Near Field Method によって漂流力と波漂流モーメントを正確に計算できない理由を明らかにした。また、Near Field Method によって波漂流力と波漂流モーメントを算出可能にするべく、ゼロ次要素法をベースにした新しい計算方法を提案した。そして、提案した方法を用いて、複数浮体にも適用出来るように拡張した。この新しい計算方法の確立により、「ゼロ次境界要素法が Near Field Method によって波漂流力 (2 次の力) を正確に計算できない」という数値計算上の一般化された認識を覆し、ゼロ次境界要素法の新たな可能性を見つけた。

審査結果の要旨

本論文は、エネルギー資源の開発に供される海洋構造物の係留系設計等に必要な波漂流力と波漂流モーメントに関する基礎的研究である。従来、計算手法として用いられてきたゼロ次要素法の問題点であった計算精度の低さを解消する新しい手法を考案し、その手法を実際の海洋構造物の問題に適用し、以下の成果を得ている。

- (1) 従来のゼロ次要素法によって漂流力と波漂流モーメントが正確に計算できない原因が、水線位置での速度ポテンシャルの値と、その微分項の計算精度が低いことであることを明らかにした。
- (2) この原因を解消するために、外挿法を援用することにより、水線を含めた境界での速度ポテンシャルや法線ベクトルのより正確な計算を行ない、微分項を計算することによって計算精度を向上させることのできる「新ゼロ次要素法」を考案した。
- (3) 従来のゼロ次要素法を用いて Near Field Method により計算した波漂流力では、最大 60% 以上の誤差が出るが、本論文で提案した新ゼロ次要素法では、この誤差がほとんど 1% 以内になることを確かめた。
- (4) 本手法を、波浪中で前後に並んで浮かぶ 2 浮体に適用し、波漂流力および波漂流モーメントの数値計算を行い、浮体間距離が及ぼす流体力学的な影響を正確に推定できることを確かめた。また、浮体間距離によらず、前後方向の波漂流力だけが生じ、さらに後方浮体に働く波漂流力が、間隔が船長 2 倍の場合には単独浮体の場合よりも最大 50% 以上の減少することを明らかにした。

以上の成果は、従来のゼロ次境界要素法では正確に計算ができない波漂流力および波漂流モーメントを推定できる新たな計算手法を確立し、さらに同手法を実用的な問題に適用して新たな知見を得たものであり、海洋工学分野に大きく貢献するものである。また、申請者が研究者として自立して活動できる能力と学識を有することを証している。