

氏名	齋藤 武久
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第224号
学位授与の日付	平成12年9月29日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	波動場に設置された矩形断面柱体周辺の流況および波力に関する研究
論文審査委員(主査)	石田 啓(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	岡島 厚(工学部・教授) 上野 久儀(工学部・教授) 木村 繁男(工学部・教授) 由比 政年(工学部・助教授)

## 学位論文要旨

In this paper, flows around rectangular cylinders in waves and wave forces have been simulated by numerical calculations, and have been examined by experimental and theoretical studies.

The Part-1 has focused to the region in which the vortex shedding is the most important factor for wave forces acting on a rectangular cylinder. The discrete vortex method combined with BEM has been developed to simulate the wake around the cylinder, and the numerical calculations have been done in the case of a flat plate. The validity for the numerical results has been verified by the experiment using PIV (Particle Image Velocimetry). Then, the wave force equation, which is independent of Morison's equation, has been newly derived, and the method to evaluate the total wave forces acting on the cylinder has been presented and the validity of the method has been verified experimentally.

The Part-2 has focused to the region in which diffraction is the most important factor for wave forces acting on the cylinder. The flows around two rectangular cylinders with small gap and the wave forces acting on them have been simulated by using source distribution method in order to make clear the effect of the vicinity between them, and the theoretical solutions have been presented.

本論文は、波動場に設置された矩形断面柱体を対象とし、柱体周りの流況および作用波力に関して、数値解析を行い、実験および理論的考察を行ったものである。第1編では、剥離流れによる効果が、柱体への作用波力に対して支配的となる場合を対象に、剥離流れを伴う矩形柱体周りの流況解析法および波力算定法の開発を行った。さらに、波動場に設置された平板を対象に実験を行い、流況および波力の特性を明らかにすると共に、数値解析法の妥当性を確認した。第2編では、回折波による効果が、柱体への作用波力に対して支配的となる場合を対象に、矩形柱体同士の近接の伴う流況および波力特性について数値解析による考察を行うと共に、理論解の提示を行った。以下に本研究で得られた主要な知見を要約する。

### 第1編 剥離流れを考慮した矩形柱体周辺の流況および波力の算定法

#### 1-1. 離散渦法と境界要素法を組合わせた矩形柱体周辺の流況解析法の開発

剥離流れを考慮した波動場中の矩形柱体周辺における流況の数値解析法として、剥離流れによる後流域を複数の離散渦点で近似し、さらに、柱体壁面上に渦密度分布および湧き出し密度分布を用い、柱体壁面上での境界条件を用いて、柱体壁面上における積分方程式に帰着する離散渦法と境界要素法

を組み合わせた流況解析法の定式化および数値スキームの構築を行った。解析の対象として、波動場に設置された平板周りの流況解析を行い、数値解析より得られた平板周の後流渦の特性について整理した。以下に、ここで得られた主要な知見を要約する。

- (1) 剥離流れを考慮した波動場中の矩形柱体周辺における流況の数値解析法として、離散渦法と境界要素法を組み合わせた流況解析法の定式化を行った。この中で、積分方程式中に現れる不定点での影響係数を極限操作により厳密に誘導し、さらに、積分経路および積分経路上の法線方向ベクトルの向きに関する座標系の取り扱いについて詳細な整理を行った。
- (2) 離散渦法と境界要素法を組み合わせた流況解析法を用い、波動場に設置された平板周りの水平 2 次元断面内の流況解析結果より、主流反転時に平板側端から放出される渦対の形成過程として、渦放出から 1/2 周期後に渦径が最大となること、入射波周期の増大に伴い、形成される渦対の最大径が増大するといった、数値解析により得られる後流渦の特性を整理した。
- (3) 鉛直位置の違いによる水平 2 次元断面内の流況解析結果では、鉛直下方に向かう渦径の減少を表現することができた。このことは、本研究で提示した渦放出時における循環量の算定法により、波動場中の任意鉛直位置において、渦放出時の離散渦の循環が算定可能性であることを示唆するものである。なお、後述する可視化実験との比較より、計算による渦径の鉛直方向変化は実験結果と良く一致し、ここで想定した異なる鉛直位置における水平 2 次元断面解析による平板周辺の後流渦特性の把握が妥当であることを確認した。
- (4) 剥離後流域の近似に離散渦法を用いる場合、渦内の渦度の変化など、渦の内部構造の詳細を捕らえることは困難であった。しかし、剥離渦の外形および移動特性といった、後流域の基本特性の把握に対して、十分な計算結果が得られることが分かった。

## 1-2. 矩形柱体周りにおける剥離後流域の PIV 計測

波動場に設置された剥離流れを伴う矩形柱体周辺の後流域の可視化計測手法として、PIV(Particle Image Velocimetry)を取り上げ、他の画像解析による可視化手法との比較を踏まえながらその概要を述べると共に、画像解析手法、PIV システムの構成および計測精度についてまとめた。計測の対象として、波動場に設置された平板周りの流況の PIV 計測を行い、この際、鉛直位置の異なる水平 2 次元断面および水槽奥行き方向の位置が異なる鉛直 2 次元断面での計測から得られた速度ベクトル場および渦度場の時間変化に基づいて、平板周りに形成される後流渦の特性を定量的に明らかにした。なお、PIV 計測に先行して行った、水表面付近で形成される平板周りにおける後流渦の形成過程の目視による分類結果を加えている。さらに、1-1. で開発した流況解析法による数値解析結果と実験結果との比較を行い、数値解析法の妥当性を確認した。以下に、ここで得られた主要な知見を要約する。

- (1) 波動場に設置された平板周りの水表面における後流渦の形成過程には、目視により、対称および非対称な渦対の形成過程が確認された。この際、波動場に設置された円柱とは異なり、入射波周期および柱体代表長および代表流速によって形成過程の違いを分類することは困難であることが分かった。
- (2) 鉛直位置を固定した水平 2 次元断面での PIV 計測より、平板周りに形成される対称渦対に関して、対象とした実験範囲において、主流反転時に放出された渦対の径は、渦放出から 1/2 周期後に渦径が最大になること、平板前方および後方において形成過程が異なることが明らかになった。さらに、主流反転時に放出された渦対内における渦度の最大値の変化は半周期間に及び、その増減は主流反転以降の 1/4 周期を境に増加から減少へと変化することが分かった。
- (3) 異なる鉛直位置における水平 2 次元断面での PIV 計測より、対称および非対称渦対のどちらの場合においても、渦軸の鉛直方向への同軸性は保持されていることが分かった。また、微小振幅波理論による最大水粒子速度と計測された最大渦径の鉛直分布は、極めて類似した分布形状になる

ことが分かった。

- (4) 水槽奥行き方向の位置が異なる鉛直 2 次元断面での PIV 計測より、鉛直 2 次元断面内において、渦の鉛直構造を変化させるような顕著な鉛直方向への流速の混合は確認できなかった。このことは、波動場に設置された矩形断面柱体、特に、平板の場合、水平 2 次元断面の流況計測によって、基本的な流況特性の把握が可能であることを示すものである。
- (5) 1-1. で提示した数値解析法による水平 2 次元断面内での計算結果と PIV 計測による水平 2 次元断面内での実験結果は、極めて良く一致し、数値解析法の妥当性が確認された。なお、(2)から(4)の PIV 計測によって得られた知見より、1-1. の流況解析法で課した離散渦に対する仮定の妥当性が確認されると共に、水平 2 次元断面での流況解析法を用いて、波動場に設置された矩形断面柱体、特に平板周りの流況特性の把握が可能であることが明らかになった。このことは、水平 2 次元断面解析による波力解析結果の鉛直積分を用いて、全波力の評価が可能であることを示唆するものである。

### 1-3. 剥離流れを考慮した矩形柱体に作用する波力算定法の提案

波動場に設置された矩形断面柱体に作用する波力の算定式として、非非常に拡張されたブラジウスの公式に、流況解析法で定義された波動場の複素速度ポテンシャルを代入することにより、モリソン公式によらない波力式を新たに誘導した。さらに、PIV 計測による平板周りの計測結果を参考に、水平 2 次元断面解析による波力解析結果の鉛直積分を用いた全波力の算定法を提示した。また、波動場に設置された平板に作用する全波力の特性に関する波力実験を行い、平板に作用する波力特性を考究すると共に、全波力算定法に基く解析結果と実験結果とを比較することにより、全波力算定法の妥当性を確認した。以下に、ここで得られた主要な知見を要約する。

- (1) 1-1. で開発した離散渦点法と境界要素法を組み合わせた流況解析法で定義した複素速度ポテンシャルをブラジウスの公式に代入することで、柱体壁面に渦密度分布および湧き出し密度分布を用いたそれぞれの場合に対して新たに波力式を誘導し、モリソン公式によることなく、水平 2 次元断面に作用する波力を剥離渦の挙動を含んだ陽な形で提示した。
- (2) 誘導された波力式より、波動場に設置された矩形柱体に作用する抗力の発生機構には、柱体から放出された渦の循環の時間変化および循環の移動が関連すること、さらに、慣性力の発生機構には、柱体から放出された渦による影響を含んだ柱体周辺の圧力変化が関連することが分かった。なお、波力式の妥当性は既往の研究成果の実験結果との比較により確認している。
- (3) 平板に作用する全波力の特性として、入射波の変化に伴う波向き方向に作用する全波力の最大値の変化は、入射波周期の変化に比べ、波高の変化に対して大ききことが明らかになった。
- (4) 水平 2 次元断面に対する波力式の解析結果を鉛直方向へ積分し、平板に作用する全波力を求める波力の算定法を提示した。この算定法に基づく計算結果は、全波力の最大値および時間変化ともに極めて良く実験結果と一致し、ここで提示した解析法の妥当性が確認された。

## 第 2 編 矩形柱体同士の近接に伴う柱体周辺の流況および波力特性

### 2-1. 微小間隙を伴う 2 つ矩形柱体と波の相互作用による共振特性の数値解析

波動場に設置された複数の柱体同士による極端な近接が柱体周辺の流況および作用波力に与える影響を明らかにすることを目的とし、微小な間隙を伴う 2 つの矩形柱体周りの流況および作用波力に関する数値解析を行った。解析手法には、回折波による波の相互作用問題の解法として代表的な 2 次元に縮約された湧き出し分布法を用い、解析対象として、矩形断面寸法の変化、柱体断面形状の変化、柱体間の間隙幅の変化など、多くの解析を行い、微小な間隙を伴う 2 つの矩形柱体周りの流況および

作用波力特性について考究した。以下に、ここで得られた主要な知見を要約する。

- (1) 2次元に縮約された湧き出し分布法を用いた数値解析により、波動場に微小間隙を有する2つの矩形柱体が設置された場合、共振現象が間隙内部において発生することが明らかになった。なお、ここで対象としたような柱体同士の極端な近接による共振現象の確認はこれまで報告例がなく、本研究において新たに確認されたものである。
- (2) 上述の数値解析により明らかになった共振現象の共振点は、 $kL \approx n\pi (n=1,2,\dots)$ であり、入射波の波数 $k$ および矩形断面の間隙長さ方向長さ $L$ とによって記述されることが分かった。この共振特性は、入射波の波数 $k$ および矩形断面の間隙幅 $a$ とによって記述され、間隙幅方向への共振を記述する Trapped mode とは異なる性質のものである。
- (3) 以上の共振特性は、微小間隙を有する矩形柱体の場合に特有の現象であり、同様な微小間隙を有する円柱の場合には、同様な共振特性は見られなかった。
- (4) 波動場に微小間隙を有する2つの矩形柱体が設置された場合の共振点は、 $n=1$ の場合、 $kL = n\pi (n=1,2,\dots)$ に対して高周波数側、 $n=2$ の場合、 $kL = n\pi (n=1,2,\dots)$ に対して高周波数側あるいは低周波数側で出現することが明らかになった。なお、このような共振点の移動特性は、高周波数側への一方向のシフトである開口幅の狭い矩形港湾における共振点の移動特性とは異なった特徴を有するものである。
- (5) 2つの矩形柱体を一体化し、単一の柱体を想定した場合に単一矩形柱体に作用する波力と微小間隙を有する2つの矩形柱体に作用するそれぞれの波力による合力とを比較したところ、両者にほとんど差異はなかった。このため、間隙の連結を伴う矩形柱体に作用する波力は、単一矩形柱体に作用する波力によって十分評価できる。ただし、議論を線形理論の範囲に限定してはいるが、ここで確認された共振現象の発生に伴う波力の極値の出現は全体構造に対して、局所的な応力集中の可能性を示すものである。
- (6) 間隙幅を変化させた数値解析結果より、間隙幅が矩形柱体代表長の8%を超える場合、上述の共振現象は確認できず、波動場に設置された微小間隙を伴う2つの矩形柱体による共振現象は、矩形柱体同士の極端な近接に起因していることが明らかになった。

## 2-2. 漸近接合法を用いた微小間隙を伴う2つ矩形柱体と波の相互作用による共振点の理論解

開口幅の狭い矩形港湾における共振点の理論解の誘導に用いられる漸近接合法を、波動場に設置された微小間隙を伴う2つの矩形柱体の場合に発展させ、微小間隙内における共振点の理論解の誘導を行った。さらに、この理論解と2-1.の数値解析で得られた共振点の解析結果とを比較することにより、数値解析結果の妥当性を確認した。以下に、ここで得られた主要な知見を要約する。

- (1) 微小間隙を伴った2つの矩形柱体を含む波動場を、柱体外部領域、間隙両端部(2つ)および間隙内部領域の4領域に分割して、それぞれの領域における速度ポテンシャルを定義し、さらに、隣り合う領域への漸近速度ポテンシャルを8つの未知係数を含んだ形で誘導した。誘導された漸近速度ポテンシャルを各領域間で接合して得られる8つの連立方程式を解くことによって、共振点の理論解の誘導に成功した。
- (2) 上述の全近接合法による共振点の理論解に対して、間隙幅をゼロに漸近させた場合の共振点の漸近解は、 $kL = n\pi (n=1,2,\dots)$ となり、入射波の波数 $k$ および矩形断面の間隙長さ方向長さ $L$ とによって記述されることが分かった。2-1.で確認された数値解析による微小間隙内での共振点が $kL \approx n\pi (n=1,2,\dots)$ で記述され、特に、共振点は $n=1$ の場合、 $kL = n\pi (n=1,2,\dots)$ に対して高周波数側、 $n=2$ の場合、 $kL = n\pi (n=1,2,\dots)$ に対して高周波数側あるいは低周波数側に共振点がシフトすることが明らかになっている。厳密には理論解において、間隙幅を有限値とした共振点の理論値と数値解析との比較を必要とするが、共振点の理論解に対する間隙幅ゼロへの漸近解が

$kL = n\pi (n = 1, 2, \dots)$  であることは、数値解析結果から得られた  $kL \approx n\pi (n = 1, 2, \dots)$  付近における共振点の出現の妥当性を本質的に説明するものと考えられる。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に対し、8月1日に第1回学位論文審査委員会を行い、さらに、8月8日の口頭発表後に開催された第2回審査委員会において、提出論文および発表内容について検討し、以下の通り判断した。

本研究は、波動場に設置された矩形断面柱体を対象とし、柱体周りの流況および作用波力に関して、数値解析を行い、実験および理論的考察を行ったものである。第1編では、剥離流れによる効果が、柱体への作用波力に対して支配的となる場合を対象に、剥離流れを伴う平板を含む矩形柱体周りの流況解析法として、離散渦法と境界要素法を組合わせた数値解析法を開発し、さらに、モリソン公式によらない新たな波力式の提示と全波力の算定法を提案している。また、実験により平板周辺の流況および波力特性の特性を明らかにすると共に、本研究で提示した数値解析法が極めて実験結果を良く再現することを明らかにしている。第2編では、回折波による効果が、柱体への作用波力に対して支配的となる場合を対象に、矩形柱体同士の近接の伴う流況および波力特性について数値解析による考察を行い、微小間隙を伴う矩形柱体間の間隙部における新たな共振現象を確認している。さらに、漸近接合法による共振点の理論解を新たに誘導し、数値解析法の妥当性を確認している。

以上のように得られた本研究成果は、今後の波動場に設置された矩形断面柱体周辺の流況および波力特性の評価に資するところは大であり、博士(工学)論文として十分に値するものと認定する。