

学位論文題名

波動場における粘性項の効果に関する研究

(Study on Effect of Viscous Term in Water Waves)

学位論文内容の要旨

海洋のような波動場内において、まわりに構造物等が全くない場合の流体運動の問題に対しては、通常ポテンシャル流を考慮して粘性の影響を無視した解析が行われる。しかし、海洋における種々の問題には波動のみの解析の他に、多くは波動と構造物の関係あるいは漂砂現象のように波動と海底砂の関係等、波動とその対象物との因果関係を究明する問題が工学上非常に重要である。具体的には構造物に作用する波動による流体力あるいはまた、波動による海底砂および浮遊砂の移送等である。さらに浮遊砂の他に浮遊物質の移送あるいは港内における海水交流等には波動の振動流に加えて定常流の発生に関しても重要な問題として挙げられる。以上のような波動とその対象物との間に相互作用が含まれるような問題を考える上には、海底あるいは構造物等の対象物の極く近傍における流れの場の構造を明確に把握することが必要である。このことを言い換えると、対象物の極く近傍に粘性の影響により発生する境界層内における流れ構造を調べることでありと云える。

次に、境界層内の流れの解析としては、粘性が強く影響する場合の層流振動境界層については従来より多くの研究が行われ、境界層内の流れの場の線形解ならびに2次的に発生する定常流の解、いわゆる質量輸送速度等が解析的に求められている。しかし、実際の海になると、構造物の壁面上あるいは海底においては砂漣の頂部において粘性の影響によって剥離が発生するようになり、それに伴って剥離渦が形成される。そしてこのような剥離を伴う場合の振動境界層内の流れ構造を解析的に解くことはまた非常に困難である。それ故に、このような剥離を伴った流れ構造を解明するために数値解析あるいは実験的手法が用いられる。さらに、周期的に繰り返される振動流により剥離渦の形成が活発になり、境界層内の流れが十分乱れて来た場合には乱流境界層となり、このような乱流境界層については数値解析および実験的手法によっても流れの構造を解明することは困難である。また、このような乱流境界層までは境界層が発達しない、すなわち層流から乱流に移る遷移状態の場合の準乱流境界層の流れ構造についてはある程度数値解析により解明することが可能であり、実際にも準乱流境界層の形成は多く見られる。

以上の事柄を鑑みて、本論文においては、波動場内における海底の砂漣上および円柱のまわりに発生する準乱流境界層の場合を取り扱い、その境界層内の剥離渦を伴った流れ構造を解明することを主たる目的とした。そして、その目的に沿って数値解析の手法により研究を遂行した。また、剥離が内場の場合の定常流発生に関する実験等も行い、種々の有意義な結果を得た。

本論文は第Ⅰ章 総論、第Ⅱ章 波動場内に発生する定常性、第Ⅲ章 砂漣上の準乱流境界層内の流れ、第Ⅳ章 振動流中の円柱に働く流体力、第Ⅴ章 結論 により構成されている。各章はいずれも粘性の影響を受ける流れ場の問題を取り扱っている。

第Ⅰ章は本論文の目的ならびに本論文で取り扱った剥離を伴った流れ構造を究明することの意義とその結果の工学上の応用方法等について総括的に記述している。

第Ⅱ章では先ず、剥離を伴わない場合についてLonguet-Higginsの理論を紹介した。この理論は、微小振幅波の波動場における層流振動境界層内流速分布とそれに基づいて発生する定常流について、進行波の場合は質量輸送速度を、また重複波波動場の場合は定常循環流を解析的に求めたものである。しかし、その解析解をトレーサーに染料を用いた実験によって実証することは、染料が拡散することから難しいと云われてきた。そこで、本論文では中立粒子および過マンガン酸カリウムによる染料をトレーサーに用いて実験を行い、解析解と実験値が良く一致することを実証した。さらに重複波波動場においては腹と節の断面内に2次元的に流れる定常循環流を可視的に確認することが出来、Longuet-Higginsの理論が完全に実証された。

さらに実験の結果、重複波波動場において底面境界層のみならず、巾が狭い造波水槽のような両側壁の境界層の影響を受けるような場合は、3次元定常循環流を形成することを発見した。そして反射壁の前面においては、さらに複雑な3次元定常循環流が形成されることを究明した。

第Ⅲ章では、海底の砂漣を想定して、その砂漣上に発達する剥離渦を伴った準乱流境界層内の流れ構造を調べた。解析方法は砂漣の形状モデルにsine curveを用い、基本方程式には渦度方程式と流れ関数に対するポアソン方程式を使用した。また、砂漣が波長方向の場所的に周期的であると仮定して、渦度および流れ関数をフーリエ級数に展開するスペクトル法を併用し、有限差分法により数値解析を行い流れ構造を解明した。この場合の計算過程の中で渦度方程式の非線形項は渦度と流れ関数の値を使用してconvolutionの形の総和を求める必要があるが、この部分について本論文ではフーリエ変換を使用した新しい解法を開発し、計算時間の短縮を図ったことが特徴である。計算結果は流れの場の剥離の発生、剥離渦の形成状況および流線の乱れなどが良く再現され、境界層内の流れ構造を明確に見極めることが出来た。さらに砂漣のtrough上に砂移動に関連が深い定常循環流が存在することを数値解析の結果見いだされた。また、砂漣を海底の粗度と見なして、砂漣上の流れを統計的に処理して得られた渦粘性係数は時間に依存していることが分かり、時間および渦構造に無関係であることを提唱したLonguet-Higginsの理論は準乱流境界層内の流れには適合しないことが分かった。

第Ⅳ章では、円柱のまわりの剥離を伴う流れ構造について第Ⅲ章で行ったと同様の基本方程式と解析方法により数値解析により求めた。ただし、この場合は円柱に適合した等角写像により座標変換を行った。計算結果は第Ⅲ章の砂漣上の場合と同様に円柱のまわりの流れの場における剥離の発生、流れの状況および圧力場について明確に再現することが出来た。圧力場については、圧力に対するポアソン方程式を解くことにより得られる。

また、円柱のまわりに発生する定常循環流の数値解を求めたところ、剥離の発生がない

場合のStuartによるinnerおよびouter layerにおける解析解と類似した結果が得られ、本論文における数値解析法の妥当性が確認できた。さらに、円柱に垂直に作用する圧力と表面に働くせん断力とを加えて求めた流体力と、従来から使用されているポテンシャル流の場合のMorison式との比較検討を行い、剥離を伴う場合の方が最大値が大きく現れる結果を得た。そして、その原因は剥離の発生が円柱に対し負圧として働くことが詳細な数値解析の結果、解明することが出来た。

第V章は、各章においてそれぞれ得られた工学的に有意な結論を取りまとめて記述している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

波動場における粘性項の効果に関する研究

(Study on Effect of Viscous Term in Water Waves)

海洋のような波動場内においては、通常ポテンシャル流を考慮して粘性の影響を無視した解析が行われる。しかし、海洋における種々の問題には波動のみの解析の他に、多くは波動と構造物の関係あるいは漂砂現象のように波動と海底砂の関係等、波動とその対象物との因果関係を究明する問題が工学上非常に重要である。以上のような問題を考える上には、対象物の極く近傍に粘性の影響により発生する境界層内における流れ構造を調べることが重要である。

しかし、実際の海洋に多く見られるように、波動場の振動流速が次第に速くなり、ある適当な水理条件以上になると、構造物の壁面上あるいは海底においては砂漣の頂部において粘性の影響により剥離が発生するようになり、それに伴って剥離渦が形成される。そしてこのような剥離を伴う場合の振動境界層内の流れ構造を解析的に解くことは非常に困難である。

以上の事柄を鑑みて、本論文においては、波動場内における海底の砂漣上および円柱のまわりに発生する準乱流境界層の場合を取り扱い、その境界層内の剥離渦を伴った流れ構造を解明することを主たる目的とした。そして、その目的に沿って数値解析の手法により研究を遂行した。また、剥離がない場合の定常流発生に関する実験等も行い、種々の有意義な結果を得た。

本論文は第Ⅰ章 総論、第Ⅱ章 波動場内に発生する定常性、第Ⅲ章 砂漣上の準乱流境界層内の流れ、第Ⅳ章 振動流中の円柱に働く流体力、第Ⅴ章 結論 により構成されている。各章はいずれも粘性の影響を受ける流れ場の問題を取り扱っている。

第Ⅰ章は本論文の目的ならびに本論文で取り扱った剥離を伴った流れ構造を究明することの意義とその結果の工学上の応用方法等について総括的に記述している。

第Ⅱ章では先ず、剥離を伴わない場合についてはLonguet-Higginsが定常循環流の理論を

導いている。その解析解をトレーサーに染料を用いた実験によって実証することは、染料が拡散することから難しいと云われてきた。そこで、本論文では中立粒子および過マンガン酸カリウムによる染料をトレーサーに用いて実験を行い、解析解と実験値が良く一致することをはじめて実証した。さらに重複波波動場においては腹と筋の断面内に2次元的に流れる定常循環流を可視的に確認することが出来、Longuet-Higginsの理論の妥当性を実証した。

さらに実験の結果、重複波波動場において底面境界層のみならず、巾が狭い造波水槽のような両側壁の境界層の影響を受けるような場合は、3次元定常循環流を形成することを発見した。そして反射壁の前面においては、さらに複雑な3次元定常循環流が形成されることを究明した。

第Ⅲ章では、海底の砂漣を想定して、その砂漣上に発達する剥離渦を伴った準乱流境界層内の流れ構造を調べた。基本方程式には渦度方程式と流れ関数に対するポアソン方程式を使用した。また、砂漣が波長方向の場所に周期的であると仮定して、渦度および流れ関数をフーリエ級数に展開するスペクトル法を併用し、有限差分法により数値解析を行い流れ構造を解明した。この場合の計算過程の中でポアソン方程式により流れ関数を求める段階で、渦度の値を使用してconvolutionの形の総和を求める必要があるが、本論文ではフーリエ変換を使用した新しい解法を開発し、計算時間の短縮を図ったことが特徴である。計算結果は流れの場の剥離の発生、剥離渦の形成状況および流線の流れなどが良く再現され、境界層内の流れ構造を明確に見極めることが出来た。さらに砂漣のtrough上に砂移動に関連が深い定常循環流が存在することを数値解析の結果見出した。また、砂漣を海底の粗度と見なして、砂漣上の流れを統計的に処理して得られた渦粘性係数は時間に依存していることを示し、時間および渦構造に無関係であることを提唱したLonguet-Higginsの理論は準乱流境界層内の流れには適合しないことを明らかにした。

第Ⅳ章では、円柱のまわりの剥離を伴う流れ構造について第Ⅲ章で行ったと同様の基本方程式と解析方法により数値解析により求めた。計算結果は第Ⅲ章の砂漣上の場合と同様に円柱のまわりの流れの場における剥離の発生、流れの状況および圧力場について明確に再現することが出来た。圧力場については、圧力に対するポアソン方程式を解くことにより得られる。

また、円柱のまわりに発生する定常循環流の数値解を求めたところ、剥離の発生がない場合のStuartによる解析解と類似した結果が得られ、本論文における数値解析法の妥当性が確認できた。さらに、円柱に垂直に作用する圧力と表面に働くせん断力とを加えて求めた流体力と、Morison式との比較検討を行い、剥離を伴う場合の方が最大値が大きく現れる結果を得た。そして、その原因は剥離の発生が円柱に対して負圧として働くことが詳細な数値解析の結果、解明することが出来た。

これを要するに、著者は、波動場における準乱流境界層内の流れ構造を明らかにしたものであり、港湾工学及び海岸水理学に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。