

振動流と定常流との共存場における円柱周辺の流体運動に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26775

氏名	馬替 敏治
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第308号
学位授与の日付	平成18年9月28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	振動流と定常流との共存場における円柱周辺の流体運動に関する研究
論文審査委員(主査)	石田 啓(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副主査)	上野 久儀(自然科学研究科・教授), 由比 政年(自然科学研究科・助教授), 斎藤 武久(自然科学研究科・助教授), 浅野 敏之(鹿児島大学・教授)

Abstract

This thesis presents the results of numerical study on the unsteady flow fields around a circular cylinder placed in combined oscillatory plus steady flows. The corresponding fluid forces acting on the cylinder are also examined. The following items are mainly described in this thesis.

- (1) A numerical study using the Navier-Stokes equation in a generalized curvilinear coordinate system is performed for a circular cylinder in two-dimensional combined symmetric oscillatory plus steady flow, two-dimensional combined asymmetric oscillatory plus steady flow and three-dimensional combined symmetric oscillatory plus steady flow.
- (2) Several flow regimes around a circular cylinder in combined symmetric oscillatory plus steady flow are well predicted. The effects of coexisting current ratio V_r and KC number on the vortex shedding patterns and flow regime transition are clarified.
- (3) In the wide range of $0 \leq KC \leq 20$, the effects of the asymmetric velocity variation induced by cnoidal waves on the vortex motion and the fluid forces are investigated. The structures of the wake vortices are described in detail, and the dependence of the maximum fluid force on the flow asymmetry is clarified.
- (4) Several flow regimes around a circular cylinder in combined cnoidal waves plus steady flows are well predicted. The influence of asymmetric parameter, velocity ratio between oscillatory and uniform flow components, and KC number are explained.
- (5) For combined symmetric oscillatory plus steady flow, detailed descriptions are given of the three-dimensional structures of the horseshoe and lee-wake vortices. The bottom shear stress is also analyzed and the correspondence between the development processes of the vortices and the bottom shear stress is discussed.

[論文要旨]

本論文では、河川や海洋中に設置される構造物の部材として最も基本的な円柱に働く流体力およびその周辺の流況特性を解明することを目的として、底面上に直立した円柱周辺での流体運動を、一般曲線座標系に変換された Navier-Stokes 方程式を使用して2次元のおよび3次元に数値解析し、流体場に関する工学的および流体力学的な検討を行った。河川、海岸および海洋における流れ環境を考慮して、波動成分とともに流れ成分が付加された共存場として、対称振動流と定常流の平行、直交および斜交共存場、一様流と非対称振動流の平行共存場における円柱周辺の流体運動、さらに振動流と定

常流の平行、直交および斜交共存場における直立円柱底面付近の流体運動について系統的に数値解析を進めた。本論文は6章で構成され、第1章では、研究の背景と目的、第2章では、数値解析法、第3章から第5章では、解析結果および考察、第6章では、結論を述べた。以下に本論文の解析結果から得られた結論を要約する。

第3章 対称振動流と定常流の斜交共存場における2次元流体場の数値解析

一様流速の振動流速振幅に対する相対速度比を V_r で表して、振動流と定常流の平行、直交および斜交共存場中に設置された円柱周辺の流体場の数値解析を行った。後流渦の形成・放出の挙動および流体力の変動パターンを解析し、流況と流体力との関連、交差角の変化が渦流れパターンおよび流体力の大きさや卓越方向に及ぼす影響について詳細な検討を行った。本解析条件Stokes数 $\beta = 200$ 、 $2 \leq KC \leq 10$ 、 $0 \leq V_r \leq 1$ の下で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 定常流と正弦振動流の平行、直交および斜交共存場において、KC数および共存流の相対流速 V_r の違いによる後流渦の発生・消滅過程の変化および特徴的な渦放出パターンを捉え、共存場における円柱周辺の基本的な流況特性を明らかにした。

すなわち、 $V_r = 1$ で、 $KC = 2$ の場合、平行共存場では、振動周期の途中で円柱下流に発生した双子渦は定常流に従って移動し、相互干渉しないで減衰消滅するため、渦放出はなく、流れ場は x 軸（主流方向）に対して上下対称である。斜交共存場では、円柱下側で発生する渦のみが形成・移流する過程が見られる。直交共存場では、個々の渦は非常に弱い、円柱下側の渦が発達するので、流れ場は上下非対称となる。 $KC = 8$ の場合、平行共存場では、振動流が定常流と同方向に作用する前半周期に、1周期毎に交互に円柱斜め上方または斜め下方に3つの渦が発生・放出される流況パターンとなる。斜交共存場では、円柱右斜め下方に1周期あたり後流渦が2つ放出される。直交共存場では、1周期あたり4つの小さな渦が発生し、円柱の左右に形成された後流渦が定常流に従って流下し、円柱下方に渦列が形成される。

- (2) 上述の渦放出パターンの変化に対応する振動方向流体力および直交方向流体力の時間変化を解析し、KC数および交差角の異なる共存場における流体力の振幅や卓越方向等の変動特性と渦の挙動との関係を見出した。

すなわち、 $KC = 2$ の場合、平行共存場では、定常流が共存しても流れ場は振動流のみの場合と同様に、 x 軸対称であるため、振動直交方向の流体力はゼロである。斜交共存場では、円柱上側においても渦の発生段階で見られる低圧部が生じるが、振動流成分が反転するときには渦はすでに消滅しているため振動直交方向流体力は後半周期の変化はゼロである。直交共存場では、振動直交方向流体力は主流（振動流）と2倍の周波数で周期的変動を示し、円柱下側（定常流の下流域）での弱い渦の発生に同期する。しかし、振動方向流体力と比較すると、その大きさは非常に小さく、その値は1周期を通して負である。いずれの共存場の場合も、振動方向流体力は主流と同じ振動数で余弦的な周期変動を示し、慣性力成分が卓越している。 $KC = 8$ の場合、平行共存場では、振動直交方向流体力の変動は後流渦の生成・放出に対応し、振動前半周期で2つのピークをとる。斜交共存場では、振動方向流体力、最大値は $KC = 2$ のときに比べて2分の1程度にまで落ちている。振動周期前半では振動流の時間変化に類似した時間変化を示すが、渦が放出されてしまった振動後半周期では、変化の幅はわずかである。振動直交方向流体力は振動前半周期では振動方向流体力と同じく、振動流の時間変化に類似した時間変化を示すが、振動後半では円柱下方の渦の寄与もわずかである。一方、直交共存場では、振動方向流体力は主流（振動流）と同じ周波数で、振動流速変動と類似した時間変化を示し、流体力に対しては慣性成分よりも抗力成分の寄与が卓越している。

- (3) 各共存場における流体力の最大値と KC 数および相対流速との関係について解析し、流体力変動に対する共存流速および交差角の影響について詳細な検討を行った。その結果、低 KC 数領域における流体力の最大値は交差角に依らずほぼ一定となること、KC 数や相対流速が増加するに従って、交差角の増加に伴う流体力の低下が顕著になること、さらに、直交共存場の流体力は、振動流単独の場合の流体力と同程度またはそれ以下になる場合があることを明らかにした。

第 4 章 非対称振動流と定常流の共存場における 2 次元流体場の数値解析

現実的な海象条件では、流速波形は上下非対称となり、峯の部分がより先鋭に、谷の部分がより平坦な流速変動が見られるようになる。そこで、まず、非線形のクノイド波を模擬した流速変動を有する非対称振動流場における円柱周辺の流体場を対象として体系的な数値解析を行い、渦流れと流体力変動の関連、流体力係数と KC 数および流速振幅に対する正方向流速最大値の比、すなわち流速波形の非対称性を示す非対称パラメータ A_s との関係の数値的に明らかにした。本研究で得られた主要な成果は、次のようにまとめられる。

- (1) クノイド波を模擬した流速変動の非対称パラメータ A_s を 0.5 から 0.8 まで、KC 数を 0 から 20 まで広範囲で変化させて、非対称振動流における円柱周辺の流況特性の検討を行い、KC 数が同じであっても、 A_s が増加するにつれて、水粒子の正方向移動距離が小さくなるため、渦放出が抑制されること等、 A_s および KC 数の違いによる渦放出パターンの変化を明らかにした。
- (2) 非対称振動流中の流体力変動と円柱周辺の流況特性の関連を明らかにした。また、流れ方向および直交方向の流体力の相関を解析し、その特徴を示した。
- (3) 流体力の最大値は、KC 数が小さい場合には振動流の非対称性が強まるにつれて (A_s が増加するにつれて) 大きくなり、逆に、KC 数が大きい場合には、非対称性が増すにつれて小さくなることを示した。
- (4) 流れ方向の流体力に関する Morison 式の中の抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M を最小 2 乗法により算出し、 A_s および KC 数の変化による変動特性を明らかにした。
すなわち、抗力係数は、KC=2 の場合を除いて、一般に、 A_s が大きくなるにつれて小さくなる傾向を持っている。ただし、KC=16, 20 の場合は、 $A_s=0.6$ で極大値を取る形となる。一方、KC=2 の場合は A_s が大きくなるにつれて増加する傾向が見られる。慣性力係数は全般的に、KC 数が大きくなるにつれて小さくなる。ただし、KC=2 の時は、 A_s が大きくなるにつれてわずかに減少している。また、一般に、 A_s が大きくなるにつれて、慣性力係数が増加する傾向が見られた。

次に、非対称振動流と定常流が共存する流体場中に設置された円柱周辺流体場に対する数値解析を行い、流況および流体力特性について、Stokes 数 $\beta=200$ 、 $V_r=-0.5\sim 0.5$ 、 $A_s=0.5\sim 0.75$ 、 $KC\leq 20$ の条件下で解析を行なった。本研究で得られた主要な成果は、次のようにまとめられる。

- (1) クノイド波の流速波形を模擬した非対称振動流と一様流の平行共存場を考え、 V_r および KC 数の違いによる渦放出パターンの変化や対応する流体力変動の特性等、一様流成分が付加されることによる影響を明らかにした。

すなわち、 $V_r=0$ 、 $+0.5$ の場合は、渦対が一つ放出されるが、 $V_r=-0.5$ の場合には、渦対が一つとその他に渦が二つ放出される。振動方向流体力に着目すると、 $V_r=0$ では、正から負に転じ、後半周期ではほぼ 0 であり、 $V_r=+0.5$ の場合は、常に正となるのに対して、 $V_r=-0.5$ の場合には、 $t/T=6/20$ 以後は、多少の変動があるものの -0.5 前後の値をとる。一方、直交方向流体力は、 $V_r=0$ では前半周期で渦の発生に応じて正負の値をとり、後半周期ではほぼ 0 である。 $V_r=+0.5$ のときは

- 1 周期に渡って負になるのに対して、 $V_r = 0.5$ の場合には、渦の発生に応じて正・負の値をとる。
- (2) 非対称振動流と一様流の共存場においては、一様流の大きさのみでなくその作用方向が重要であり、逆流共存場 ($V_r < 0$) と順流共存場 ($V_r > 0$) では、最大流体力の値が 2 倍程度まで変化し得ることを示した。
- (3) 振動方向流体力の最大値は、主に流速の最大値に依存し、 V_r の値とともにその値も増加することを示した。一方、揚力に関しては、場合により、流速の最大値に加えて、一定強度を有する流れの継続作用時間を考慮する必要があることを示した。

第 5 章 対称振動流と定常流の共存場における 3 次元流体場の数値解析

Navier-Stokes 方程式を移動一般曲線座標系に変換した解析モデルを用いて、振動流と定常流の平行、直交および斜交共存場中に設置された直立円柱底面付近の 3 次元流体場に関する数値解析を行った。馬蹄形渦や後流渦の発生・発達過程および底面せん断力に対する交差角度、KC 数および流速比 V_r の影響について検討した。本解析条件 Stokes 数 $\beta = 775$ 、交差角度 $\alpha \leq 90^\circ$ 、 $KC \leq 20$ 、 $V_r \leq 1.5$ の下で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 平行共存場の場合、振動流と定常流が同方向に作用する前半周期において馬蹄形渦が円柱上流域で発生・発達し、振動流成分が逆流する後半周期になると馬蹄形渦は上流方向に移動し、消滅する。つまり、半周期おきに大規模な馬蹄形渦が発生・消滅する。直交共存場の場合、馬蹄形渦は定常流に対する円柱の上流側面を左右に移動しながら存続する。斜交共存場の場合は、前半周期には平行共存場と同様に馬蹄形渦が発生・成長し、後半周期には渦は円柱側面に回り込むように移動する。周期の初め前後で、馬蹄形渦が一旦消滅するのが斜交共存場の特徴である。馬蹄形渦の存在時間は交差角度の増加につれて長くなるものの、渦径や剥離点距離は減少する。後流渦については、放出される渦の数は増加するものの、個々の渦の強度は低下する傾向にある。
- (2) 交差角度に関わらず底面せん断力は定常流のベクトルに対してほぼ対称に分布する。平行共存場の場合、1/4 周期間に馬蹄形渦および後流渦下において底面せん断力は最大にまで増大し、馬蹄形渦が半径方向に拡大する間にその影響下の底面せん断力は急激に減少する。後半周期は新たな渦の発達がないために、底面せん断力の局所的な増加はない。平行や斜交共存場の場合、円柱前面から側面にかけて、馬蹄形渦および縮流に起因する底面せん断力が集中し、直交の場合は、定常流を受ける円柱側面でせん断力は一様に分布する。後流域では、直交共存場の底面せん断力が広範囲で増加する。
- (3) 振動流の振幅が比較的小さい低 KC 数域では、馬蹄形渦や後流渦はあまり発達しないため、底面せん断力は主流の縮流下において最大となる。従って、この底面せん断力の最大値は、交差角度にあまり依存しない。高 KC 数の場合の最大底面せん断力は、馬蹄形渦および後流渦の運動に依存し、その渦強度は交差角度の増加に伴い低下するから、底面せん断力の最大値は交差角度の増加につれて減少する。振動流に対する共存場の底面せん断力の増幅率は流速比とともに上昇し、平行共存場の上昇率が最も高い。振動流と同程度の定常流が共存する場合の増幅率は 1.3~1.8 程度である。

学位論文審査結果の要旨

提出学位論文に対して各審査委員が個別に審査を行った後、第1回論文審査委員会を開催し、審査方針を決定するとともに、論文内容の検討を行った。さらに、平成18年8月2日に実施された口頭発表の後に、第2回論文審査委員会を開催し、提出論文および発表内容について慎重に審議した結果、以下のように判定した。

本研究は、振動流および定常流の共存場に設置された円柱周辺の流体場を数値的に解析し、種々の渦流れ現象や作用流体力の特性について詳細な検討を行ったものである。本研究では、まず、対称振動流と定常流の斜交共存場における2次元流体場の解析を行い、波・流れの交差角や共存する流れの相対強度の変化が円柱周辺の流況・流体力特性に及ぼす影響を体系的に解析して、その特性を明らかにしている。次に、非対称振動流と定常流の共存場を対象に、2次元解析を系統的に実施し、流れ条件の変化による渦放出パターンの変動や対応する最大流体力の特性について、工学的に有意義な知見を得ている。さらに、底面付近における3次元共存場の解析を実施して、馬蹄形渦や後流渦を含む複雑な渦の内部構造や底面せん断力の特性を明らかにしている。

以上の研究成果は、海岸構造物周辺の流体運動に関する貴重な学術的知見を与えるとともに、今後の海岸構造物設計の高度化に大きく貢献し得るものであり、その工学的価値も高い。以上のことから、本審査委員会は本論文が博士（工学）に値すると判断した。