

外 22-42

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

長大橋非定常空気力の数値予測に関する基礎的研究

A fundamental study on numerical prediction of  
unsteady aerodynamic forces for long-span bridges

申 請 者

黒田 眞一

Shinichi Kuroda

2003年 1月



現在、長大橋のフラッタを推定する方法としては、全橋模型を用いた風洞実験、全橋模型を用いたフラッタ解析および橋桁部分模型を用いた風洞実験、2次元橋桁模型を用いたフラッタ解析が挙げられるが、このうち、全橋・橋桁部分模型を問わずフラッタ解析を行うには、そのインプットデータの一つとして非定常空気力が必要である。平板翼については、ポテンシャル流れを仮定したTheodorsenの非定常空気力の理論解が存在するが、橋梁断面の場合、その形状の複雑さから理論解は存在せず、そもそもポテンシャル流れの適用も疑問視されるため、一般には、部分模型を用いて風洞実験から非定常空気力を求めることが行われている。フラッタ解析は既に確立された技術と言えるが、この非定常空気力を求める部分(風洞実験)が現在でも最も時間・費用のかかる部分となっている。

一方、近年の急速な計算機性能の向上とともに流れの数値計算が航空などの分野を中心として大きな進歩をとげてきた。将来、橋梁断面の非定常空気力が流れの数値計算により精度よく求まるようになれば、橋梁のフラッタ解析もその半実験的な性格を脱することができ工学的な意義は大きい。また、流れの数値計算は全物理量が全ての時間・空間で得られるので、流れの様子を可視化することも実験に比べ非常に容易であるという長所を持ち、流れの面から断面形状を改良し耐風安定性を向上させることに貢献する可能性もある。ただし、これら数値計算の実用化は、それが現実の流れ場を適切に再現していることが条件であることは言うまでもなく、それを確かめるためには、まず第一に実験で計測された非定常空気力との比較を行わなければならない。

本研究では、比較的計算負荷の小さい2次元 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation)コードを作成し、これを長大橋桁断面(およびそれらに関連する断面)に作用する非定常空気力の予測に適用した。その結果、近年ほとんどの長大橋で採用されている偏平一箱桁断面だけでなく、将来の超長大橋で採用が検討されている分離2箱桁断面についても、基本形状についてはあるが、本解析コードにより非定常空気力が精度よく予測できることが示された。

本研究は5章からなり、構成は次の通りである。

第1章は「序論」であり、研究の背景・目的および概要について述べている。

第2章は、本研究で用いた計算手法について述べたものである。まず、一般座標を用いた非圧縮性粘性流れの基礎方程式の導出を示し、次に、それらの数値計算法について述べた。計算法は、差分法を基礎とし、対流項の離散化には高次精度の風上差分を用いた。時間積分には2次精度の陰解法を用い、時間方向の陰的離散化から生ずる代数方程式の解法には近似因子化を施さない線緩和法を用いた。数値計算上の頑丈さを向上させるために境界条件も全て陰的に取り扱った。乱流の効果はレイノルズ平均した方程式を用いることにより考慮した。レイノルズ応力の方程式の導出などを示し乱流のモデル化について述べた。乱流モデルの選択に関しては、橋梁断面上で一般に流れの剥離や再付着が生じることを勘案し壁関数を用いるモデルを除外して考え、低レイノルズ数モデルの中から工学的応用を考える上で普遍性の高い $k-\omega$  SSTモデルを選んだ。 $k-\omega$  SSTモデルは基本的に

$k-\varepsilon$ モデルと  $k-\omega$ モデルのハイブリッドモデルであることから、まず両モデルについて説明し、その後、 $k-\omega$  SST モデルがどのように構成されるかについて述べた。

第3章では本解析コードの検証結果について述べた。まず、層流の計算により、流れ解析コード自体の検証を行った。①正方キャビティ内流れでは、 $Re = 10,000$ の流れに関して流速分布、フローパターンともに Ghia らの結果と非常によく一致する結果が得られた。②円柱まわりの流れでは、まず、円柱始動直後の流れに関し剥離長さの時間発展とフローパターンを Coutanceau らの実験結果と比較し、よく一致することを確認した。③ $Re = 200$ の円柱まわりの流れでは、抗力係数・ストローハル数が実験結果とよく一致することを確認した。 $Re = 105$ の円柱流れでは、カルマン渦の様子を Taneda の実験と比較した。

次に、 $k-\omega$  SST モデルが適切にコード化されていることを確認するために乱流の計算を行った。①本解析コードは平板乱流境界層の特性を精度よく再現し、②NACA4412翼型の失速角でのケースに対しては  $k-\omega$  SST モデルの開発者である Menter の結果と一致した結果が得られることを確認した。③2次元非対称ディフューザ流れおよび2次元バックステップ流れへの適用からは、 $k-\omega$  SST モデルが従来の2方程式モデルに比べ、剥離・再付着を伴う流れに対して有効であることが確認できた。

第4章では、第2章で構築され、第3章で検証された本解析コードを非定常空気力の予測に適用した。まず、本解析法が振動振幅の大きさに制限を受けず有限振幅の問題にも適用可能であることを示すために、大振幅で運動する翼型まわりの流れの計算を行い、実験結果と比較した。これは、将来、非定常空気力の非線形性が考慮されるようになるであろうことを視野に入れて実施されたものである。一定の角速度で急激に回転する翼型まわりの流れでは、無次元角速度により流れの様子が劇的に変化し、最大揚力係数もそれに伴い変化する。本解析コードによる計算は、Walker らによるこれら実験結果の特性をよく再現していた。大振幅でピッチング運動する翼型まわりの流れの解析は、ヒステリシス効果を良好に捉えられるかどうかを確認するために実施した。本解析結果は McAlister らの実験結果のヒステリシス・ループを精度よく再現した。

近年の長大橋で採用されている偏平箱桁断面に対する適用性については、Matsuda らが実施した偏平六角形一箱桁断面に関する非定常圧力・非定常空気力の計測結果と本解析コードによる計算結果を比較することにより検討した。本解析結果は Matsuda らの実験結果をよく再現し、本解析コードの偏平六角形断面への適用性を示した。また、強制加振法による非定常空気力の計測では、計測結果から付加質量の効果が抜け落ちてしまうが、このような実験結果との比較は、計算においても実験と同様に、別途静止流体中で運動する物体（桁）のシミュレーションを行い、結果として得られる空気力を元の有風時の計算結果の空気力から差し引くことにより可能となることを示した。

次に、耐風工学の分野で構造基本断面と考えられている矩形柱断面への本解析

コードの適用性を示すために、上島らの実験と比較した。幅(B)・高さ(D)比  $B/D$  が 5, 8, 10 および 20 の矩形柱の非定常空気力係数のうち、 $B/D=5$  の矩形柱の  $C_{L\eta}$  の実部と  $C_{L\theta}$  の虚部について計算結果と実験結果が低振動数側で相違することを除けば、どの矩形柱のどの非定常空気力係数に関しても計算結果と実験結果はよく一致していた。非定常圧力分布特性に関しても Matsumoto らの実験と同様な結果が得られた。計算結果の非定常圧力分布特性と流れの可視化とにより、 $B/D=5 \sim 20$  矩形柱の非定常空気力特性が、前縁付近での剥離バブルの物体(矩形柱)の運動に伴う非定常な変化によって決定されていることが確認された。

将来の超長大橋への適用が検討されている 2 箱桁断面まわりの流れに関しては、重合格子法 (Chimera Grid Scheme) を用いた解析コードを開発し、それを適用した。新たに開発した Chimera コードの検証は、円柱および偏平六角形断面まわりの流れの計算結果を単一格子による計算結果と比較することにより行った。2 箱桁断面の計算対象としては 2 種類の断面を取り上げた。一つは、偏平六角形断面の中央部を取り除いた断面(長大橋 2 箱断面と呼ぶ)であり、もう一つは端部を半円形状とした基本形状 2 箱断面である。この基本形状 2 箱断面は本解析コードの検証を目的として考案されたものであり、風洞実験も新たに実施された。

長大橋 2 箱断面への適用から以下のことが分かった。2 箱桁断面のように流れに対して直列に配置された物体まわりの高  $Re$  数流れに対し、 $k-\omega$  SST モデルの生成項を修正して用いることは適當ではない。このような流れ場に対してはモデルの生成項を修正せずに用いるべきである。長大橋 2 箱断面に関して Matsuda らが実施した非定常圧力計測結果と本解析コードによる結果との比較によれば、下流側断面において予測精度が満足すべきものでなかった。

基本形状 2 箱桁断面への適用からは次のことが分かった。上流側断面の後縁より下流の領域では、非定常計算によるレイノルズ応力の方が乱流モデルによりモデル化されたレイノルズ応力よりも圧倒的に大きく、等方性のモデルである  $k-\omega$  SST モデルを用いているにもかかわらずトータルなレイノルズ応力は非等方な分布となっている。全ての空気力係数について、本解析コードによる結果と実験結果は非常によく一致した。非定常圧力分布の比較でも、計算結果と実験結果はよく一致していた。

以上、第 4 章では、長大橋桁断面に関連した多くの断面について、本解析コードによる非定常空気力の予測を試みた。長大橋 2 箱断面(偏平六角形断面の中央部を取り除いた断面)については、下流側桁で非定常圧力特性が計算と実験で異なる結果となったが、その他の断面については本解析コードにより非定常空気力が精度よく予測されることが確認された。特に、2 箱桁断面については、従来、数値計算による非定常空気力の予測精度が低いとされてきたので、今回、2 箱桁断面としては始めて、ここで用いた基本形状 2 箱断面の非定常空気力が非常に精度よく予測されたことの意義は大きい。本解析の有効性を示すものと考えられる。

第 5 章は、「結論」として各章の総括と今後の課題について述べた。