

升給22-41

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 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 3 月

長大橋の耐風安定性を検討する方法としては、現在でも3次元全橋弾性模型を用いた風洞実験によるのが最も信頼性が高いとされている。しかしながら、3次元全橋模型の風洞実験を実施することはコスト面から考えて困難である。その代替として、従来より橋桁の部分模型を用いた風洞実験が行われてきた。特に、長大橋の耐風設計では、フラッター現象に対する評価が焦点であった。現在、長大橋のフラッター現象を推定する方法としては、全橋模型を用いた風洞実験、全橋モデルを用いたフラッター解析および橋桁部分模型を用いた風洞実験、2次元橋桁モデルを用いたフラッター解析などがあるが、全橋モデル・橋桁部分モデルに関わらずフラッター解析を行うには、その入力データの一つとして非定常空気力が必要となる。フラッター解析は既に確立された技術とみなせるものの、この非定常空気力を風洞実験で求める部分が現在でも最も時間と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の性能向上とともに、流れの数値計算が航空などの分野を中心に大きな進歩をとげている。将来、橋桁断面の非定常空気力が流れの数値計算を用いて精度よく求まるようになれば、橋桁のフラッター解析もその半実験的な性格を脱することができると考えられる。また、流れの数値計算は物理量が時空間で求められるため、流れの様子を可視化することも実験に比べて容易であるという長所を持つ。このため、流れの面から橋梁の断面形状を改良でき、耐風安定性を向上させることが可能な状況にある。

このような現状に鑑み、本研究では、比較的計算負荷の少ない2次元RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation)コードを作成し、これを長大橋の橋桁断面に作用する非定常空気力の予測に適用することを目指としている。その結果、近年多くの長大橋で採用されている偏平1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、開発した解析コードにより非定常空気力の基本的性状が精度よく予測できることを明らかにしている。

本研究は5章から構成されている。

第1章の「序論」では、研究の背景・目的および概要について述べている。

第2章「計算手法」では、まず、一般座標を用いた非圧縮性粘性流れの基礎方程式を導出し、次に、それらの数値計算法について述べている。計算方法としては、差分法を基礎に、対流項の離散化に高次精度の風上差分を用いている。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ている。さらに、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ている。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考慮し、壁関数を用いるモデルを除外し、低レイノルズ数モデルの中から、工学的に普遍性の高い $k-\omega$  SSTモデルを選んでいる。 $k-\omega$  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ので、両モデルの特徴について説明した後、 $k-\omega$  SST モデルの構成方法について述べている。

第 3 章「解析コードの検証」では、開発した解析コードの検証結果について述べている。

まず、層流の計算により、流れの解析コード自体の検証を行っている。正方キャビティ内流れの解析では、レイノルズ数  $Re = 10,000$  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ている。円柱まわりの流れの解析では、円柱始動直後の流れに関し剥離長さの時間的变化とフローパターンを Coutanceau らの実験結果とよく一致する結果が得られている。レイノルズ数  $Re = 200$  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していることも確認している。

次に、 $k-\omega$  SST モデルが適切に解析コードの中に反映されていることを確認するために乱流の計算を実施している。開発した解析コードは平板乱流境界層の特性を精度よく再現し、NACA4412 翼型の失速角についての計算例では  $k-\omega$  SST モデルの開発者である Menter の結果と一致する結果が得られている。2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に関する計算例では、 $k-\omega$  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を明らかにしている。

第 4 章「長大橋非定常空気力の数値予測」では、第 2 章で構築され、第 3 章で検証された解析コードを非定常空気力の予測に適用している。解析コードが振動振幅の大きさの制限を受けない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、実験結果と比較している。一定の角速度で急激に回転する翼型まわりの流れの解析においても、解析コードによる計算は、Walker らによる実験結果の特性を精度よく表現している。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、大振幅でピッチング運動する翼型まわりの流れの解析においても、解析結果は McAlister らの実験結果とよく一致する結果が得られている。

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、松田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、解析結果が松田らの実験結果とよく一致していることを確認するとともに、開発した解析コードの偏平六角形断面への適用性を明らかにしている。

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、その適用性を検証している。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ている。計算対象として取り上げた断面は、偏平六角形断面の中央部を取

り除いた長大橋 2 箱断面と、端部を半円形状とした基本形状 2 箱断面との 2 種類である。このうち、基本形状 2 箱断面は解析コードの検証を目的として考案されたものであり、風洞実験も実施されている。

長大橋桁断面に関連した多くの断面について、解析コードによる非定常空気力の予測を試みた結果、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開発した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確認されている。特に、2 箱桁断面については、従来より、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いたので、2 箱桁断面として始めて、基本形状 2 箱断面の非定常空気力が精度よく予測できたことの意義は大きく、開発された解析コードの妥当性を示すものとして評価できる。

第 5 章「結論」では、各章の総括と今後の課題についてまとめている。

以上を要するに、本論文は  $k - \omega$  SST 乱流モデルを用いて 2 次元 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation) コードを作成し、この解析コードが長大橋の補剛桁断面に作用する非定常空気力の予測に適用できることを示したものである。本研究によって、長大橋および将来建設予定の超長大橋の補剛桁の耐風安定性の検討に繋がる数値計算手法の構築が行えたことは橋梁工学および耐風工学の発展に大きく寄与するものと考えられる。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。

2003 年 2 月

#### 審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	依田照彦
副査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	鮎川 登
	早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	関根正人
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	太田 有