

氏 名	キム 金 起 ナム 男
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2842 号
学位授与の日付	平 成 19 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 社 会 基 盤 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	長大橋桁のフラッター特性及び安定化に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 松 本 勝 教 授 杉 浦 邦 征 准教授 白 土 博 通

論 文 内 容 の 要 旨

旧タコマ橋の落橋の原因となったフラッター現象は発散振動であり、その発生が構造物を直接破壊に至らしめる危険な現象であるため、フラッターの制御が長大橋設計の上で最重要課題となる。そのため、フラッターの発生機構の解明及び効率的なフラッター制御法についての検討を目的とした研究は数多くなされてきた。

本研究の背景を最初に述べれば次のようである。従来より、フラッター解析には複素固有値解析方法が用いられた。複素固有値解析では、運動方程式を行列表示し固有値問題として解くことにより、フラッター特性を求めることができる。この方法はフラッターの発現風速を正確に求めることができるため、フラッターの安定性についての議論には用いることができるが、一方で、フラッター発生メカニズムなどは明らかにされていないため、安定化機構の議論を行うには不十分である。そこで、松本ら（1995）は連成フラッター発生機構に基づいたStep-By-Step解析を提案した。この手法は振動モード間の連成作用を逐一計算する手法であり、最終的なフラッター振動数や対数減衰率に対する各非定常空力係数の寄与などが明らかにされている。さらに、松本ら（2005；2006）はStep-By-Step解析を用い、各種構造基本断面及び長大橋桁断面における連成フラッター分枝のスイッチング特性を明らかにし、実験的にも確認している。Step-By-Step解析と複素固有値解析より得られたフラッター発現風速は一致するが、フラッター発現前後の風速域では減衰や位相の解に差が生じることや解が収束しないなど、重要な検討項目として残されてきた。この様な問題に対し、近年松本ら（2007）は、2自由度バネ支持実験により両者の解を比較し、Step-By-Step解析に検討を加え新たにStep-By-StepⅡ解析法を提案し、長大橋桁断面を対象に連成フラッター発生機構、及び安定化機構に関して考察を行ってきた。

一方、振動系の応答を時間軸で評価するためには、時刻歴解析が必要となる。本研究で取り上げた有理関数近似を用いた時刻歴解析に関しては、航空工学分野で提案されて以来、近年、Chen et al. (2000)、勝地ら（2005）などにより研究がなされてきたが、これらはフラッター発生風速の推定の観点から複素固有値解析の結果との比較、及び有理関数近似の精度に着目した研究では、時刻歴フラッター解析手法及びその結果に関しては十分な考察は行われていない。

このような問題点を踏まえて、本研究では、Step-By-StepⅡ解析と風洞実験により確認された連成フラッター分枝のスイッチング特性、及び高風速域におけるダイバージェンス特性に関して有理関数近似を用いた時刻歴フラッター特性とStep-By-StepⅡ解析の結果との比較・検討して考察を行った。本論文は全6章より構成されており、それぞれ以下のような内容について論じる。

第1章では、長大橋梁におけるフラッター現象及び安定化の必要性について述べた。また、フラッター安定化のため、主な検討項目である連成フラッター分枝の特性に関する松本ら（2005；2006）の研究結果を述べると共に、本研究で取り上げた有理関数近似を用いた時刻歴フラッター解析法に関する研究動向、及びこの手法を用いた本研究での検討項目（分枝のスイッチング特性、ダイバージェンス）について述べたものである。

第2章では、ねじれフラッター、連成フラッター、ガスト応答、渦励振などの空力振動現象に関する過去の主な研究を振

り返り、振動する物体表面に作用する非定常圧力と表面圧力を断面全体に渡って積分することによって求められる非定常空気の表現方法を示した。また、2自由度フラッター解析法（複素固有値解析、Step-By-Step解析）における数学的な定式化、分枝の定義、解析の流れなどについて比較・検討した。

第3章では、本研究で用いた風洞システム及び模型について述べた。まず、たわみ・ねじれ2自由度バネ支持実験及び強制加振実験のための $B/D=5, 8, 10, 20$ 矩形断面と鉛直板付 $B/D=20$ 矩形断面に関する幾何形状、風洞実験システム（風洞システム、計測器、強制振動実験及び自由振動実験システム、静的空気力及び非定常空気力の測定方法）などについて概説した。

第4章では、本研究の主テーマである有理関数による時刻歴解析におけるフラッター分枝特性を議論するための比較としたStep-By-Step解析法について考察を加え、その特性をとりまとめた。近年、松本ら（2005；2006；2007）により行われてきた、連成フラッター分枝のスイッチング特性と連成フラッターの安定化機構に関する研究結果を述べた。特に、Step-By-Step解析及び複素固有値解析の解の違いに着目し、どちらがよりの確に実現現象を表しているのかを確認するため、自由振動実験による検証及び実験結果を基にした両解析手法の検討を行った。また、Step-By-StepⅡ解析による分枝のスイッチング特性及び各種橋梁断面のフラッター特性の把握により、連成フラッター発生機構の解明とその安定化策を検討した。検討の結果、Step-By-Step解析では調和振動を仮定していたが、Step-By-StepⅡ解析では初期振動として減衰振動を仮定するとこにより、分枝の差異はあるものの複素固有値解析の解に一致し、たわみ・ねじれ両方の運動方程式を厳密に満たす解が与えられた。また、Step-By-StepⅡ解析により非定常空気力係数の従属性を考慮すれば、たわみの空力減衰項 H_1^* と従属性を有する H_3^* の制御よりも、ねじれの空力剛性項 A_3^* と従属性を有する A_1^* の制御の方が、フラッター安定化に対して効率的であることが確認された。

第5章では、Step-By-StepⅡ解析の結果より確認された連成フラッター特性のうち、特にフラッター発生風速域付近での分枝のスイッチング特性、及び高風速域におけるダイバージェンス特性に着目し、時刻歴フラッター特性と解析手法について考察を行った。得られた結果として、パワースペクトル（PSD）解析により卓越する振動数成分から分枝を定義することはできないということが明らかになった。また、複素固有値解析との比較により、本研究で適用した時刻歴解析は周波数領域の複素固有値解析の解析結果を時間軸で再現したものであるのが確認された。一方、各種構造基本断面に関する時刻歴解析の結果、高風速域で振動系が成立しない変位応答が得られた。この風速域は、Step-By-StepⅡ解析における動的なダイバージェンスの発生風速域とほぼ一致した。

第6章では、前述した第4章と第5章で得られた主な結論を総括して本論文の結論を示した。今後の研究課題としては、連成フラッターの発生機構に基づいた時刻歴フラッター解析手法の開発、Step-By-StepⅡ解析のねじれ分枝で発生するダイバージェンスを時刻歴解析において再現できるのかについての検討の必要性などを指摘した。

論文審査の結果の要旨

本研究では、Step-By-StepⅡ解析と風洞実験により確認された連成フラッター分枝のスイッチング特性、及び高風速域におけるダイバージェンス特性に関して有理関数近似を用いた時刻歴フラッター特性とStep-By-StepⅡ解析の結果との比較・検討して考察を行った。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 時刻歴解析より得られたたわみ及びねじれ変位応答に対するパワースペクトル（PSD）解析の結果、低風速域では、たわみ応答、ねじれ応答の両応答に、複素固有値解析で得られるたわみ分枝及びねじれ分枝の振動数成分が見られた。しかし、高風速域では、両応答において、複素固有値解析のねじれ分枝に相当する振動数成分のみが示される。これは、時刻歴応答においては、複素固有値解析の両分枝の振動数成分が含まれているが、風速の上昇に伴って複素固有値解析で得られるたわみ分枝の空力減衰が大きくなり、PSD解析ではそれに相当する振動数成分が検出されないためであると考えられる。卓越する振動数成分から分枝を定義することは困難であるため、このような傾向を分枝のスイッチング現象とは断定はできない。時刻歴解析において複素固有値解析のねじれ分枝の振動数成分のみが卓越的な振動数成分として得られる風速域は、Step-By-StepⅡ解析において得られるねじれ分枝からたわみ分枝へのスイッチングする風速域とほぼ一致する。

2. 複素固有値解析の両分枝の解析結果を用い、時刻歴応答を生じさせ、両分枝の時刻歴応答を重ね合わせた波形に対し、

PSD解析を行った結果、有理関数近似を用いた時刻歴解析より得られた時刻歴変位応答のPSD解析結果と同様に、低風速域では、複素固有値解析のたわみ分枝及びねじれ分枝の振動数成分が見られ、高風速域では複素固有値解析のねじれ分枝に相当する振動数成分のみが見られる傾向を示している。したがって、本研究で適用した時刻歴解析は周波数領域の複素固有値解析の解析結果を時間軸で再現したものであるといえる。

3. 各種構造基本断面に関する時刻歴解析の結果、高風速域で振動系が成立しない、ダイバージェンスのような変位応答が得られた。この風速域は、Step-By-StepⅡ解析における動的なダイバージェンスの発生風速域とほぼ一致している。したがって、時刻歴解析を用い、ダイバージェンスの発生風速を推定することができるといえる。

以上、本論文は、有理関数近似を用いた時刻歴解析をベースにし、各種構造基本断面及び橋桁断面を対象に連成フラッター現象における分枝のスイッチング特性、及びダイバージェンス特性について考察したものであり、連成フラッターの機構を時間軸から詳細に検討を加え、その特性を明らかにし、今後の長大橋梁の対フラッター安定性を考究したもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。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る。また、平成19年8月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。