

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Thinzar Hnin
論文題目	Aerodynamic instability of tall structures with complex corner shapes (複雑な角部形状を持つ塔状構造物の空力不安定性)		
(論文内容の要旨)			
<p>長大橋梁における塔部は、高層でスレンダーな構造をしているため、空力振動の発生が懸念されることから、耐風安定性の確保は重要な課題である。特に、架設中においては、フリースタANDING状態になるため、発散振動であるギャロッピングが発現する可能性もあり、空気力学的には極めて不安定である。本論文では、長大橋梁における塔構造物の耐風性を高めるために、塔断面の四隅に設けられる隅切り等の角部形状に着目し、空力振動現象、特にギャロッピングに関する現象解明を試みている。ただし、隅切り断面は、既に明石海峡大橋等の長大橋の塔に採用されており、角部形状の制振効果を比較検討する研究ではない。ギャロッピングの基本的なメカニズムは、準定常的に説明が可能であるが、その発現時には構造物から放出されるカルマン渦との間に空力的な干渉があることが古くから指摘されている。本論文では、角部形状を様々に変化させることで、渦放出特性を制御し、ギャロッピングと放出渦との間における空力干渉現象を解明することを目的としている。さらに、実在する複雑な形状の塔状構造物の耐風安定性に関する検討も行っており、詳細な形状が不明な既存構造物の耐風性評価法を示している。本論文は全7章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景、関連する先行研究ならびに研究目的、本論文の構成を述べている。特に、ギャロッピング不安定性と物体から放出される渦に関して解説すると共に、本研究で解決すべき具体的な課題を挙げている。また、本研究で使用した様々な角部形状について、その意図を詳細に述べている。</p> <p>第2章では、研究手法について説明している。本研究で実施した各種風洞実験について、実験に使用した断面辺長比 1.5 の矩形断面模型と交換可能な各種角部形状を説明すると共に、定常ならびに非定常空気力の計測方法や自由振動応答実験法等について説明している。さらに、実験時に変化させた各種パラメータや無次元量、実験結果を示すために必要な空気力等を定義している。また、複雑形状をもつ高層塔状構造物まわりの流れや表面圧力を求めるための数値流体解析手法についても解説している。</p> <p>第3章では、断面辺長比 1.5 の矩形断面ならびに6種類の角部形状を取り付けた、計7種類の断面模型に対して、風洞実験において静止時に作用する空気力を計測し、基本的な空力特性を明らかにしている。角部形状を変更した場合、矩形断面と比べて、静的空気力係数が大幅に減少すること、さらにはカルマン渦の放出強度を表す指標である変動揚力係数(構造軸)が迎角0度において、63%から最大90%まで減少することが明らかとなった。この結果は、これらの様々なカルマン渦放出強度を持つ断面を用いることで、カルマン渦とギャロッピングの空力干渉問題を議論できる可能性を示唆している。一般にギャロッピングの発現風速は、カルマン渦放出無次元周波数であるストロハル数の逆数以上になることが知られているが、本断面ではカルマン渦放出強度が低減すると共に、ストロハル数は増加していることを明らかにしている。また、レイノルズ数依存性が顕著に現れる断面があることも指摘しており、実務上の問題にも言及している。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Thinzar Hnin
<p>第 4 章では、迎角 0 度の状態における、ギャロッピング不安定性と渦間の空力干渉について議論している。前述の各断面を用いて、ばね支持自由振動実験から振動応答、強制加振実験から非定常空気力を計測し、併せて前章で得られた静的空気力から準定常空気力を算出し、それらを比較検討することで現象解明を実施している。前章の結果から、カルマン渦放出強度が低減されている断面においては、ストロハル数は増加していることから、その逆数は小さくなるため、ギャロッピング発現風速が低下することが予想されたが、実際は比較的カルマン渦放出強度が大きい断面では予想通りギャロッピング発現風速はストロハル数の逆数となるが、カルマン渦放出強度が小さい断面では、より高風速側で発現することが明らかとなった。より詳細に検討すると、カルマン渦放出強度が最も大きい矩形断面では、①カルマン渦とギャロッピングが干渉し、発現風速はカルマン渦によって決定されること。少しカルマン渦強度が低減された断面においては、②カルマン渦と自己励起渦が干渉すること。さらに、カルマン渦がほぼ放出されていない断面においては、③自己励起渦とギャロッピングが干渉し、発現風速は自己励起渦で決定されるという、カルマン渦放出強度に応じて 3 種類の空力干渉現象があることを解明した。</p> <p>第 5 章では、迎角がある場合、すなわち風に対して上下非対称になっている状態におけるギャロッピング不安定性について検討している。矩形断面他、迎角 0 度においてカルマン渦放出強度が大きい断面について、迎角をつけた際にカルマン渦放出が抑えられている迎角を対象とした。結果的には、前章の迎角 0 度の状態において見られた 3 種類の空力干渉現象が確認され、同様の分類が可能であることが明らかとなった。また、上下非対称状態におけるギャロッピング不安定性は、高風速域においても準定常空気力での説明が困難なケースがあることが判明し、今後の課題となっている。</p> <p>第 6 章では、実在する高さ 129m の複雑形状をもつ高層構造物（仏像）を対象に、設計図書がなく正確な形状が不明な構造物の耐風性を評価する手法の検討を行っている。まずは、地上型 3 次元レーザースキャナを用いて、構造物の複雑な形状を精密に捉えることに成功している。さらに、そのデータを用いて数値流体解析を実施し、様々な風向を持つ強風に対して、その構造物のもつ空力特性を明らかにすることが可能となっている。その結果、複雑形状を持ち、かつその詳細な構造が不明な構造物についても、より経済的に耐風性を検討する方法を示しており、発展途上国等における既存構造物の耐風性を照査する場合や、構造物の維持管理方法を検討する場合にも応用が可能と思われる。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、長大橋梁における塔構造物の耐風性を高めるために、塔断面の四隅に設けられる隅切り等の角部形状に着目し、空力振動現象、特にギャロッピングに関する現象解明を試みている。角部形状を様々に変化させることで、渦放出特性を制御し、ギャロッピングと放出渦との間における空力干渉現象を解明することを目的としている。さらに、詳細な形状が不明な実在塔状構造物に対する耐風安定性の評価法に関する提案も行っている。得られた主な成果は次の通りである。

1. 断面辺長比 1.5 の矩形断面ならびに 6 種類の角部形状を取り付けた、計 7 種類の断面モデルにおいて、角部形状を変更した場合、矩形断面と比べて、静的空気力係数が大幅に減少し、さらにはカルマン渦放出強度を表す指標である変動横力係数が迎角 0 度において、63%から最大 90%まで減少する。さらに、本断面ではカルマン渦放出強度が低減すると共に、ストロハル数は増加している。
2. カルマン渦放出強度が低減されている断面においては、ストロハル数は増加していることから、その逆数は小さくなるため、ギャロッピング発現風速が低下することが予想されたが、実際は比較的カルマン渦放出強度が大きい断面ではギャロッピング発現風速はストロハル数の逆数となるが、カルマン渦放出強度が小さい断面では、より高風速側で発現する。
3. さらに、ギャロッピングの発現風速付近において、カルマン渦放出強度が最も大きい矩形断面では、①カルマン渦とギャロッピングが干渉し、発現風速はカルマン渦によって決定される。少しカルマン渦強度が低減された断面においては、②カルマン渦と自己励起渦が干渉する。さらに、カルマン渦がほぼ放出されていない断面においては、③自己励起渦とギャロッピングが干渉し、発現風速は自己励起渦で決定されるといった、カルマン渦放出強度に応じて 3 種類の空力干渉現象がある。
4. 迎角がある場合、すなわち断面形状が風に対して上下非対称になることによって、カルマン渦放出が抑えられている場合には、ギャロッピングの発現風速付近において、同様の 3 種類の空力干渉現象が現れる。上下非対称状態におけるギャロッピング不安定性は、高風速域においても準定常空気力での説明が困難なケースがあることが明らかとなり、本現象の解明は今後の課題である。
5. 複雑形状を持ち、かつその詳細な構造が不明な構造物について、地上型 3 次元レーザースキャナを用いて、構造物の形状を測定し、そのデータを用いて数値流体解析を実施することによって、より経済的に耐風性を検討する方法を提案した。その方法を用いれば、発展途上国等における既存構造物の耐風性を照査する場合や、構造物の維持管理方法を検討する場合にも応用が可能である。

以上より本論文は、塔状構造物におけるギャロッピング不安定性と渦との間における空力干渉現象を解明すると共に、耐風設計に応用できる重要な知見も示しており、学術上、実務上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、令和 6 年 2 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。