

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Dao Minh Thu
論文題目	Aerodynamic Performance of Cables with Spiral Protuberances in Strong Winds (強風下におけるスパイラル突起付きケーブルの空力特性)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>斜張橋の長径間化に伴いケーブル斜材は長くなり、かつ構造減衰も小さいことから、空力振動が発生することが知られており、耐風設計上の課題となっている。一般には、ダンパー等による機械的な制振対策が取られることが多いが、ケーブル外側のポリエチレン管の表面形状を工夫することで、空気力学的な制振対策も既に実装されている。本論文では、近年開発されたスパイラル突起付きケーブルを対象として、その抗力低減ならびに空力振動を抑制する効果を空気力学的に解明することを目的としている。表面に 12 本の螺旋状突起を設けた本ケーブルは、通常の平滑円断面ケーブルに比べて、極めて低いレイノルズ数領域で抗力低減が発生することが報告されているが、そのメカニズムは明らかにされていない。また、単独状態で降雨時に発生するレインバイブレーションについては、その発生原因である水路の形成を阻害する効果があることは確認済みであるが、降雨を伴わない空力振動ならびに並列状態におけるウェイク振動に対する振動抑制効果は未解明であり、本論文の課題となっている。併せて、平滑円断面ケーブルにおけるウェイク振動のさらなる現象解明も試みており、新しい知見を示している。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を述べている。特に、橋梁用ケーブルにおける空力不安定現象と本研究で対象としたスパイラル突起付きケーブルについて解説すると共に、本研究で解決すべき具体的な課題を挙げている。さらに、本論文の構成について説明している。</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、実験に使用したケーブル模型、空気力や表面圧力の計測方法、自由振動応答実験法等について説明すると共に、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。さらに、空力不安定性を議論するために使用する複素固有値解析手法についても解説している。</p> <p>第 3 章では、スパイラル突起付きケーブルが平滑円断面ケーブルに比べて、極めて低いレイノルズ数域で抗力低減、すなわち臨界レイノルズ数に達する理由について、静的空気力測定実験ならびに表面圧力測定実験の結果より考察している。臨界レイノルズ数に達する直前の亜臨界域では、突起から流れが剥離し、非定常な剥離バブルが形成され、層流境界層から乱流境界層へ遷移することは並行突起付きケーブルと同様であるが、突起が螺旋状であるため、スパン方向に剥離点が不連続に変化している。したがって、流れの非定常性と剥離点のスパン方向変化の複合的な効果により、渦放出が抑えられ抗力低減が発生したものと結論づけている。さらに、臨界レイノルズ数域では、螺旋状突起が境界層を誘導するようなフェンスのような働きをすることで、剥離点が下流側にシフトさせる働きがあることを明らかにした。また、超臨界域では、流れのパターンが変化せず、抗力係数が低いまま維持されるとしている。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Dao Minh Thu
<p>第 4 章では、単独ケーブルで発生する空力振動現象、特に降雨を伴わない状態で発生する可能性があるドライステート・ギャロッピングについて、風向偏角を変化させて準定常的に空力特性を議論している。その結果、偏角が 30 度～40 度において、空力正減衰の低減が確認されたが、負減衰とはならず、ドライステート・ギャロッピングの発生可能性は低いことを明らかにした。</p> <p>第 5 章では、並列ケーブルにおけるウェイク振動について、まずは平滑円断面ケーブルを用いて、自由振動実験ならびに強制加振時の非定常空気力と圧力計測の結果から、その現象解明を試みている。ケーブルが接近している場合、すなわち水平間隔が 3D 以下 (D: 断面直径) で鉛直間隔が小さい時には、下流側ケーブルが上流側ケーブルの後流域を横切ることや 2 物体間に発生するギャップフローによるヒステリシス特性によって、鉛直 1 自由度のウェイクギャロッピングが発生することを明らかにした。さらに、水平間隔が 5D 以下で鉛直間隔が 1.5D 以下程度になると、上流側ケーブルから放出された渦が下流側ケーブルに衝突することで、水平振動モードと鉛直振動モードが連成し、2 自由度連成フラッターが発生することを解明した。</p> <p>第 6 章では、スパイラル突起付きケーブルを並列ケーブルに用いた場合に、ウェイク振動に対してどのような制振効果があるのかについて、第 5 章と同様の方法を用いて検討を行っている。ケーブルが近接の場合には、超臨界レイノルズ数領域において、平滑円断面ケーブルの場合に同等の風速域で見られたようなウェイクギャロッピングは確認されなかった。これは後流域の幅が狭くなることで、後流域の空力干渉が抑えられ、ギャップフローも抑制されたことが理由であることを明らかにした。一方、亜臨界レイノルズ数領域や臨界領域では、平滑円断面ケーブルと同様にギャップフローが発生することから、ウェイク振動の発現が確認されている。しかし、実際の橋梁においては、スパイラル突起付きケーブルの場合、臨界レイノルズ数領域に対応する実風速は極めて低く、耐風設計上問題になることはなく、風洞実験でのみ確認できる現象であることが判明した。さらに、ケーブル間隔が少し大きくなった場合においても、第 3 章で説明した通り、渦放出が抑えられているため、上流側ケーブルから放出された渦が下流側ケーブルに衝突することもなく、2 自由度連成フラッターが発現する可能性はないことが明らかとなった。以上より、スパイラル突起付きケーブルは、並列ケーブルにおけるウェイク振動に対して制振効果が高いと結論づけている。</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。さらに、スパイラル突起付きケーブルの実橋梁への適用を考えた際の空気力学的な有効性を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、斜張橋ケーブルとして開発されたスパイラル突起付きケーブルの空力特性、特に抗力の低減効果と各種空力振動現象に対する制振効果について、通常の平滑円断面ケーブルの空力現象とも比較しながら、現象解明を試みたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. スパイラル突起付きケーブルにおいては、臨界レイノルズ数に達する直前の亜臨界域では、突起から流れが剥離し、非定常な剥離バブルが形成され、層流境界層から乱流境界層へ遷移することに加えて、突起が螺旋状であることから、スパン方向に剥離点が不連続に変化している。流れの非定常性と剥離点のスパン方向変化の複合的な効果により、渦放出が抑えられ、抗力低減が発生したと考えられる。さらに、臨界レイノルズ数域では、螺旋状突起が境界層を誘導するような働きをすることで、剥離点が下流側にシフトさせる働きがある。また、超臨界域では、流れのパターンが変化せず、抗力係数が低いまま維持される。
2. 単独ケーブルにおいては、準定常的な検討からドライステート・ギャロッピングの発生する可能性は低い。
3. 並列ケーブルにおけるウェイク振動について、一般の平滑円断面ケーブルにおいては、ケーブルが接近している場合、すなわち水平間隔が $3D$ 以下 (D : 断面直径) で鉛直間隔が小さい時には、下流側ケーブルが上流側ケーブルの後流域を横切ることや2物体間に発生するギャップフローによるヒステリシス特性によって、ウェイクギャロッピングが発生する。さらに、水平間隔が $5D$ 以下で鉛直間隔が $1.5D$ 以下程度まで離れると、上流側ケーブルから放出された渦が下流側ケーブルに衝突することで、2自由度連成フラッターが発生する。
4. スパイラル突起付きケーブルが並列状態の場合、特に近接配置において、超臨界レイノルズ数領域において、ウェイクギャロッピングは発生しない。これは後流域の幅が狭くなることで、後流域の空力干渉が抑えられ、ギャップフローも抑制されたことによる。一方、亜臨界レイノルズ数領域や臨界領域では、ウェイク振動の発現が確認されているが、実際の橋梁においては、臨界レイノルズ数領域に対応する実風速は極めて低く、耐風設計上問題にはならない。さらに、ケーブル間隔が大きくなった場合においても、渦放出が抑えられているため、上流側ケーブルから放出された渦が下流側ケーブルに衝突することもなく、2自由度連成フラッターが発現する可能性はない。以上より、スパイラル突起付きケーブルは、並列状態におけるウェイク振動に対しても制振効果が高い。

以上より本論文は、スパイラル突起付きケーブルの空力特性を解明した上で、実際の斜張橋への適用に向けた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1月16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。