

京都大学	博士（工 学）	氏名	Mohd Raizamzamani bin Md Zain
論文題目	Aerodynamic Instabilities of Twin Cables of Cable-stayed Bridge under Wind Actions （強風下における斜張橋並列ケーブルの空力不安定性）		
（論文内容の要旨） 斜張橋では、主塔から斜めに張られたケーブルが桁部を支えているが、この斜ケーブルが風によって振動することが橋梁の設計上ならびに維持管理において問題となる。一般にケーブルは減衰が小さいため、振動が発生しやすい構造である。特に、本研究で対象としている並列ケーブルでは、二本のケーブルが近接して張られることで、風下側のケーブルに大きな振動が発生することが知られている。風上側の物体の影響で、風下側の物体が振動するような現象はウェイク振動と呼ばれ、古くから知られている現象にも関わらず、励振力が大きいため制振が困難であり、より詳細な現象解明と制振法の開発が望まれている。 本論文は、斜張橋ケーブルが並列に配置された際に強風下で下流側ケーブルに発生するウェイク振動に対して、自励振動であるフラッター現象もしくは上流側ケーブルによって乱された気流による強制振動の両面から、ウェイク振動の分類ならびに現象の解明を行うことを目的としている。さらには、ウェイク振動の空力減衰を調査することで、制振に必要な構造減衰を算出し、耐風設計への応用を提案している。本論文は全 8 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。 第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を紹介している。 第 2 章では既往の研究をレビューすることにより、並列ケーブルで発生する可能性のある空力振動現象を 2 円柱の 2 次元的な振動現象として整理している。ケーブル間隔が狭い領域では鉛直振動が卓越するウェイクギャロッピング、比較的広くなると水平方向の応答も大きくなるウェイクインデューストフラッターが発現するとされているが、その境界は曖昧であり、両者を統一的に現象解明した研究はないことを示している。 第 3 章では研究手法、特に風洞実験手法について説明している。2 円柱の配置を水平中心間隔 W と鉛直中心間隔 S で定義し、$S=0$ となるケースを Tandem 配置、それ以外を Staggered 配置と呼び、配置で空力振動特性を整理することを提案している。 第 4 章では、風洞内に上流側円柱模型を固定、下流側円柱模型を鉛直水平 2 自由度支持した状態で、下流側模型の応答を計測し、並列ケーブルのウェイク振動特性を風洞実験により検討した。その結果、従来のウェイクギャロッピングやウェイクインデューストフラッターという分類ではなく、励振メカニズムに立脚し、1 自由度鉛直振動、2 自由度同相連成振動、2 自由度逆相連成振動の 3 種類に分類し、水平間隔・鉛直間隔によってそれぞれの現象が発生する境界を明確にすることに成功した。 第 5 章では、第 4 章で検討した 2 自由度連成振動が非定常な応答を示すことに対して、その振動機構の解明を 2 種類の方法で試みている。すなわち、下流側円柱模型に作用する非定常空気力に基づくフラッター解析により説明するアプローチと、上流側模型から放出された渦等による気流の乱れに伴う強制振動であるという観点に立ったバフエッ			

京都大学	博士（工学）	氏名	Mohd Raizamzamani bin Md Zain
ティング解析の両面から、現象解明を実施した。その結果、上流側ケーブルによる気流の乱れに起因した強制空気力は、下流側ケーブルに作用しているものの極めて小さく、2自由度連成振動は基本的には2自由度連成フラッターとして説明できることが明らかとなった。非定常な応答を示す理由としては、気流の乱れによって自励空気力が非定常な挙動を示すことが理由として挙げられている。 第6章では、第5章において2自由度連成振動を示すウェイク振動のメカニズムは、バフエッティングではなく2自由度連成フラッターであると説明したが、実際には気流の乱れによるバフエッティング応答も多少含まれていると考えられる。そこで、バフエッティングによる応答評価において重要な、ケーブル軸方向の気流特性変化やコヒーレンス特性を調査し、応答評価の精緻化に向けた方向性を示している。 第7章では、ウェイク振動を制振することを目的に、風洞実験においてウェイク振動の空力負減衰を計測し、制振に必要な構造減衰を求めた。その結果、ダンパー等で構造減衰を増加させることで制振可能なケーブル配置ならびに制振に必要な付加減衰量を明らかにした。ケーブル水平間隔 W がケーブル径の3倍程度の Tandem 配置で発生する1自由度鉛直振動は、付加減衰では制振できないことが明らかとなった。ただし、ケーブル間隔をケーブル径の4倍以上にすると、単独ケーブルで発生することが知られているレインバイブレーションの制振に必要なスクルートン数を与えることによって、ウェイク振動も制振できる可能性を示している。また、ケーブル水平間隔 W がケーブル径の8倍から9倍程度の Staggered 配置において発生する2自由度連成振動については、ダンパーの効きが悪い可能性を示唆している。これらの結果は、今後の斜張橋の耐風設計に重要な知見と考えられる。 第8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。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、斜張橋並列ケーブルの下流側ケーブルで発生するウェイク振動現象について、二円柱模型の配置を様々に変化させた風洞実験によって、その振動メカニズムを解明するとともに、制振に必要な構造減衰についても検討を加え、合理的な耐風設計法を提案することを目的としたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 従来のウェイクギャロッピングやウェイクインデューストフラッターという分類ではなく、励振メカニズムに立脚し、1自由度鉛直振動、2自由度同相連成振動、2自由度逆相連成振動の3種類に分類し、水平間隔 W ・鉛直間隔 S によってそれぞれの現象が発生する境界を明確にした。
2. 水平間隔 W がケーブル径の 2.5 倍から 9 倍の Tandem 配置において発生する 1 自由度鉛直振動、 W がケーブル径の 2.5 倍から 3.5 倍付近の Staggered 配置において発生する 2 自由度連成振動は、従来のウェイクギャロッピングであることが明らかとなった。また、水平間隔 W がケーブル径の 2.5 倍から 9 倍の Staggered 配置において発生する振動現象は、鉛直方向 1 自由度ならびに水平方向 1 自由度実験では発生しないため、従来のウェイクインデューストフラッターに対応する 2 自由度連成振動であることが明らかとなった。
4. ウェイクインデューストフラッターに対応する 2 自由度振動は、基本的には 2 自由度連成フラッターで説明できることが明らかとなった。非定常な応答を示す理由は、上流側模型から放出された渦等による気流の乱れに伴うバフエッティング応答によるものではなく、気流の乱れによって自励空気力が非定常な挙動を示すことが理由であることを解明した。
5. 水平間隔 W がケーブル径の 3 倍付近の Tandem 配置ならびに Staggered 配置において発生するウェイク振動は、ダンパー等で構造減衰を付加する方法では、制振が困難であることが明らかとなった。一方、水平間隔 W がケーブル径の 4 倍以上の Tandem 配置で発生する 1 自由度鉛直振動は、通常の単独ケーブルのレインバイブレーションを制振する程度のスクルトン数（質量減衰パラメータ）を付加することで、制振が可能であることが明らかとなった。
6. 水平間隔 W がケーブル径の 8 倍から 9 倍程度の Staggered 配置で発生する 2 自由度連成振動は、ダンパーの効果があまり期待できないことも明らかとなった。

以上より本論文は、斜張橋並列ケーブルにおいて発現するウェイク振動の発生機構とその制振対策を示しており、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、平成 30 年 7 月 26 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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。