

京都大学	博士（工学）	氏名	王 嘉奇
論文題目	Aerodynamic performance of bluff bodies with openings on side surface (側面開口部を設けたブラフボディの空力特性に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>近年、コンクリート箱桁橋のウェブを蝶形の薄型パネルに置き換えたバタフライウェブ橋と称する橋梁形式が採用されることがある。バタフライウェブ橋では、橋軸直角方向からの風に対して、風が桁内部を通過するため、空力特性が通常の箱桁橋とは異なることが予想される。本研究では、側面に開口部を設けた新しい橋梁桁断面の空力特性を風洞実験により明らかにすると共に、一般のブラフボディにおける側面開口部の空力不安定現象への影響を解明することを目的に、より単純な矩形断面を用いた詳細な検討を行っている。本研究で対象としている空力振動現象は、自己励起型渦励振、鉛直1自由度フラッターであるギャロッピング、ねじれ1自由度フラッターであるが、特にギャロッピング不安定性に着目している。また、橋梁が並列に設置された際の空力振動特性における側面開口部の影響についても考察している。</p> <p>本論文は全6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、本研究の動機と目的を述べている。バタフライウェブ橋をはじめ、本研究で対象としている構造形式を説明すると共に、空力特性を検討する必要性を述べている。さらに、本論文の構成を紹介している。</p> <p>第2章では、研究背景として本研究で対象としている自己励起型渦励振、ギャロッピング、ねじれフラッターに関する既往の研究を取りまとめている。特に、ギャロッピング不安定性について、ブラフボディの断面辺長比、カルマン渦、接近流の乱流等との関係を詳細に解説している。さらに、本研究で実施した風洞実験の手法ならびに空力特性を表す各種係数について説明している。</p> <p>第3章では、橋梁の一箱桁断面における側面開口部の有無が空力振動特性に及ぼす影響を解明することを試みている。対象とした橋梁断面は、断面辺長比 $B/D=3.24$ (B: 桁幅、D: 桁高) とより扁平な $B/D=5$ のバタフライウェブ橋断面である。前者は比較的スパン長の短いエクストラード橋、後者はよりスパン長の長い斜張橋に適用される桁断面である。風洞実験の結果より、まず両断面共、側面開口部は渦の形成を阻害し、自己励起型渦励振を安定化させることを明らかにしている。断面辺長比 $B/D=3.24$ の断面に正迎角をつけた状態においては、ギャロッピングが発生することが予想されるが、側面開口部を設置することで発現風速は上昇し、安定化することを示している。また、側面開口部はカルマン渦放出を弱める傾向にあることも指摘している。一般に、カルマン渦を弱めるとギャロッピングは不安定化する傾向にあるが、側面開口部は剥離流れの断面上下面への再付着を促進するため、ギャロッピングが安定化すると説明しており、より詳細は第5章で議論している。ねじれフラッターについては、$B/D=3.24$ 断面では側面開口部の効果がないにもかかわらず、$B/D=5$ 断面においては安定化効果があることが判明したが、この差異については断面辺長比によってねじれフラッターの発生メカニズムが変化することから説明することに成功している。</p>			

第4章では、断面辺長比 $B/D=3.24$ のバタフライウェブ橋断面が並列に設置された際の鉛直方向の空力安定性について、側面開口部の有無の効果を検討している。固定された下流側断面は、上流側断面の自己励起型渦励振に影響を及ぼさないが、ギャロッピングについては不安定化させる効果があることを示している。その場合、下流側断面に設置された側面開口部は上流側断面の応答特性には影響しないが、上流側断面自身に設置された側面開口部は両空力振動共、安定化に働くことを明らかにしている。また、固定された上流側断面から放出された渦によって、下流側断面の渦励振応答は増幅されるが、ギャロッピング応答は抑制されることも示している。同様に、上流側断面に設置された側面開口部は下流側断面の応答には影響せず、下流側断面自身に設置された側面開口部が渦励振応答を抑制することも明らかにしている。すなわち、並列橋においては、側面開口部を設けた桁断面自身の空力振動を抑制する効果はあるが、もう一方の断面には空力的な影響は小さいことを解明している。

第5章では、より一般的なブラフボディにおける自己励起型渦励振とギャロッピングに対する側面開口部の影響を調査する目的で、断面辺長比 $B/D=2$ の矩形断面の側面を開口することにより、空力安定化効果を確認すると共に現象メカニズムの考察を行っている。まず、開口部のパラメータとして、開口率 OR (Opening-area Ratio) と開口部の大きさを表す RER (Repeating Element-size Ratio) の二つを定義したところ、空気力学的特性については開口率 OR で説明できることを明らかにしている。自己励起型渦励振については、開口率 OR が大きくなるほど応答振幅が小さくなることを示している。またギャロッピング発現風速も、開口率 OR が大きくなるにしたがって上昇し、安定化することを明らかにしている。この側面開口部の効果は、一般にギャロッピング発現風速はカルマン渦放出周波数であるストロハル数の逆数で決まることに着目し、開口率 OR が大きくなるとストロハル数が低下することから説明できることを明らかにしている。ギャロッピング不安定性を議論するもう一つのパラメータとして、その励振力を表す空力負減衰がある。この空力負減衰の絶対値が、開口率 OR が75%になるときに最大値をとり、励振力が最大となることを示している。PIV解析による流れの可視化を実施したところ、開口率 OR が75%までは、 OR の増加と共に前縁から剥離した時間平均流れが後縁により接近することから励振力が大きくなること、さらに OR を増加させると剥離流れの再付着が始まり、空力減衰が正となることでギャロッピングが発生しなくなることを解明している。この開口率 OR の増加に伴う剥離流れの変化は、 OR の増加と共にみかけの断面辺長比が大きくなること、すなわち断面が扁平になる効果と同じと捉えることで説明が可能となり、上述のストロハル数の変化、さらには抗力係数、変動揚力係数の変化も説明に成功している。さらに、この開口率 OR の増加に伴い剥離流れが物体上下面に接近する現象は、物体内部を通り抜ける流量が増加することが原因であることを明らかにしている。

第6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。

氏名	王嘉奇
----	-----

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、バタフライウェブ橋のような側面開口部をもつブラフボディに着目し、その側面開口部が空力振動応答特性に及ぼす効果の現象解明を目的として、各種風洞実験を実施して検討を行ったものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 側面開口部がある一箱桁断面においては、自己励起型渦励振の応答を減少、ならびにギャロッピング発現風速を上昇させる安定化効果があることが明らかとなった。ねじれフラッターについては、断面辺長比によって発生メカニズムが異なるため、空力安定化を示す場合と示さない場合があることが判明した。
2. 一般に並列橋の場合には、下流側断面は、上流側断面の自己励起型渦励振には影響を及ぼさないが、ギャロッピングについては不安定化させる効果がある。一方、上流側断面から放出された渦によって、下流側断面の渦励振応答は増幅されるが、ギャロッピング応答は抑制されることも明らかとなった。並列橋における側面開口部の効果は、側面開口部を設けた桁断面自身の空力振動を抑制する効果はあるが、他方の断面には空力的な影響は小さい。
3. より一般的なブラフボディとして、断面辺長比 $B/D=2$ の矩形断面を用いて側面開口部の空力振動現象への効果を検討するために、開口部のパラメータとして、開口率 OR (Opening-area Ratio) と開口部の大きさを表す RER (Repeating Element-size Ratio) の二つを定義したところ、空気力学的特性については開口率 OR で説明できることが明らかとなった。
4. 自己励起型渦励振については開口率 OR が大きくなるほど応答振幅が小さくなること、ギャロッピング発現風速も開口率 OR が大きくなるにしたがって上昇し、安定化することが明らかとなった。開口率 OR が大きくなるとストロハル数が低下するために、ギャロッピング発現風速が上昇したものと考えられる。
5. 開口率 OR が 75% のときに、ギャロッピングの励振力が最大となることが判明した。これは開口率 OR が 75% のときに、前縁から剥離した時間平均流れが後縁に最も接近することから、励振力が最大になったためと考えられる。
6. 開口率 OR の増加に伴う剥離流れの変化は、物体内部を通り抜ける流量が増加することが原因である。その結果として、みかけの断面辺長比が大きくなること、すなわち断面が扁平になる効果と同じと捉えることで現象説明が可能となる。

以上より本論文は、ブラフボディの側面に開口部を設置することによって空力振動応答が安定化する現象の解明に成功しており、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2年2月19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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降