

京都大学	博士 (工学)	氏名	Robby Permata
------	---------	----	---------------

論文題目	Flutter Stabilization of Long Span Suspension Bridges with Slender Deck - Study on the Improvement of Aerodynamic Properties from Unsteady Pressure Characteristics Point of View - (偏平桁を有する長大吊橋のフラッター安定化 - 非定常圧力特性からみた空力性能改善に関する研究 -)		
------	--	--	--

(論文内容の要旨)

長大橋の上部構造の安全性は、桁の変形のしやすさに由来して地震に対する安全度が増す半面、固有振動数が低下するため風によるすべての動的現象の発現風速が低下し、より耐風安全性の確保が困難となる。また、構造物自身の自重が増加するため相対的に交通荷重の影響が小さくなる。したがって長大橋の安全性は自重を支えるに十分な構造を有し、かつ風による動的現象に高い安定性をもつ構造形態が要求される。学位申請者の研究は、風に起因する動的現象のうち、限界風速が設計風速を十分に上回ることが要求され、設計上最も安定性が要求されるフラッター現象を対象に、高い安定性を有する桁断面形状の開発を目的とするものである。

長大橋のフラッター制御は、構造減衰付加等の機械的制御に比べて桁形状の変更による発生空気力の制御がより効果的である。学位申請者は、桁の振動に伴い発生する自励空気力をさらに桁表面の非定常圧力へ分解し、より高い耐フラッター性能を有するために求められる非定常圧力を、断面前縁部付近の局所的桁形状変化から実現することを実験的に試み、優れたフラッター安定性を示す桁形状を見出すに至った。さらに、橋梁全体の構造特性の観点から、開発された桁形状の有利性についても検討がなされており、実橋梁への適用性とともな同様のアプローチによる桁形状開発の発展性・有効性が示されている。

以下、学位申請論文の構成および各章の内容を示す。

第1章では研究背景、課題設定と本研究の目的、論文の構成が述べられている。

第2章ではフラッターを含む代表的な動的空気振動現象を挙げ、その発生機構を概説するとともに、橋梁のスパン長大化について将来の展望を示している。さらに古典的フラッター理論を概説し、本研究で議論される非定常空気力、非定常圧力の数学的記述、定義を明示している。

第3章では、非定常空気力を用いたフラッター解析法として複素固有値解析法(CEV)ならびに step-by-step 解析法(SBS)を紹介し、前者が純粋な数値解法であるのに対し、後者はフラッター発現に至る物理的プロセスに立脚することを示し、数理・物理機構の観点から両者の対比が述べられている。さらに連成フラッター限界風速算定式として実務でも用いられる Selberg 式が、桁断面形状によっては評価精度が必ずしも良好ではない例を示し、その適用の限界を明らかにしている。また、末尾には従来の研究により耐フラッター性能向上のために開発された桁形状と空力的特徴に関する情報がとりまとめられている。

第4章では本研究の中心をなす部分であり、フラッター制御の鍵となる非定常圧力特性として、断面前縁部に形成される剥離バブルに起因する低圧部と、その位置における圧力変動と桁の変位との位相差に着目し、その制御法として桁に開口部を設ける方法(slot)と、凹部を設け多孔床版で被覆する方法(porous cavity)を提案している。本章では、元の桁形状として、空力データが豊富に得られており、そのフラッター性能が平板や薄翼にほぼ等しい偏平矩形断面( $B/D=20$ 、 $B$ :幅員、 $D$ :桁高)を用い、上述の2種類の形状変化を施した桁のフラッター安定化効果について風洞実験にもと

京都大学	博士（工学）	氏名	Robby Permata
<p>づく検討が展開されている。なお、実際の風向を考慮し、slot および porous cavity は桁断面の中心に関して上下流対称設置を基本としている。</p> <p>その結果、slot 設置により非定常空気力が大きく変化すること、slot 設置位置と大きさによっては非定常空気力係数 <math>A2^*</math>（ねじれ変位速度に起因する空力モーメント項）の変化がねじれフラッター発生につながる可能性があること、逆に適切な位置への slot 設置はフラッター安定性能を大幅に向上させることが明らかにされている。とくに前縁部付近の開口部設置により、元の偏平矩形断面から非定常圧力が大きく変化し、開口部より上流側の桁表面の非定常圧力と開口部より下流側の非定常圧力が互いに逆相で変動することが明らかとなり、両者の相殺効果により非定常揚力の絶対値が低減し、フラッター安定性に必要な <math>A1^*</math>（鉛直たわみ速度に起因する空力モーメント項）の絶対値低減に大きく寄与することが示されている。また、適切な位置への開口部設置は、開口部より上流側の桁表面の非定常圧力と桁全体のねじれ変位との位相差を制御し、<math>A2^*</math>を安定化の方向へ変化させることに成功し、最適桁形状では元の偏平矩形断面に比べてフラッター限界風速を 3.52 倍以上に大幅に向上させることを見出している。前縁部近傍への porous cavity 設置も非定常圧力の絶対値低減に効果的であることが確認される反面、そのフラッター性能は元の偏平矩形断面とほぼ同等であることが示されている。</p> <p>第 5 章では、前章で示されたフラッター安定化方向への <math>A1^*</math>、<math>A2^*</math>の制御をより小規模な slot 設置で実現する可能性を調査するため、前章の slot 設置に加えて桁の前後縁部へのフェアリング、および付加平板（winglet）設置によるフラッター安定化効果について実験を通じた議論が展開されている。結果として、フェアリング設置により前縁部付近の流れが変化すること、および winglet 設置により、それ自体に作用する付加的空気力の効果が無視できないことから、<math>A2^*</math>を安定化方向に変化させる効果が確認された一方、<math>A1^*</math>の絶対値を増加させることとなり、フラッター安定化効果は限定的であることが示されている。</p> <p>第 6 章では、長大スパンを有する吊橋の補剛桁への偏平箱桁の適用可能性について有限要素法による構造解析を通じた数値的検討が行われている。その結果、応力や変形等の静的応答は偏平箱桁の導入による変化は顕著ではなく、むしろ偏平化により桁、ケーブル重量を若干低減することが可能であることが示されている。また、偏平箱桁の利用は鉛直たわみとねじれの固有振動数比の低下を招き、フラッター性能の低下が指摘されている。しかし、第 4 章で開発された slot 設置の最適桁形状の導入により空力的な安定性増加が期待できること、および前後援部近傍の slot 設置は 2 箱桁に比べ高い振動数比が実現できることなどの優位性を明らかにしており、本研究で新たに開発された最適桁形状には実用性が十分備わっていることを示している。</p> <p>第 7 章では以上の一連の研究で明らかとなった項目と今後の研究課題が述べられ、本研究の結論としてとりまとめられている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、優れたフラッター安定性を示す長大橋の桁形状を見出すことを目的に、桁の振動に伴い発生する自励空気力をさらに桁表面の非定常圧力へ分解し、より高い耐フラッター性能を有するために要求される非定常圧力を、断面前縁部付近の局所的桁形状変化から実現することを実験的に試みたものである。さらに橋梁全体の構造特性の観点から、開発された桁形状の有利性についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 偏平矩形断面の左右対称位置に配置する slot の幅、設置位置を変化させ、フラッター安定性に優れた形状を選定した。得られた最適桁形状 (Model 4A) はフラッター安定性の判断基準となる  $A2^*$  が負、および  $A1^*$  の絶対値が小であることを満足しており、高い安定性を示すことが明らかとなった。
2. Model 4A の安定化効果は、断面前縁側の slot によるものであり、前縁端部箱桁と断面中央箱桁の側面非定常圧力が互いに逆位相で変動する結果、 $A1^*$  の絶対値低減効果の実現されていること、さらに中央箱桁前縁部の非定常圧力が  $A2^*$  を負値に留める効果をもつこと、によるものと判断された。
3. 一方、porous cavity の設置は非定常圧力の振幅を低減させる効果が確認されたものの、断面のフラッター性能は元の偏平矩形断面とほぼ同等であった。
4. 前述の  $A1^*$ 、 $A2^*$  の制御をより小規模な slot 設置で実現する可能性を調査するため、slot 設置に加えて桁の前後縁部へのフェアリング、および付加平板 (winglet) 設置によるフラッター安定化効果について調査した結果、フェアリングの非定常圧力の位相制御効果、および winglet の付加減衰効果により  $A2^*$  を安定化方向に変化させる効果が確認された一方、上記の制御効果は  $A1^*$  の絶対値を増加させることとなり、フラッター安定化効果は限定的であった。
5. 偏平箱桁の長大吊橋への適用可能性について構造的検討を行った結果、応力や変形は顕著ではなく、むしろ偏平化により桁、ケーブル重量の低減が可能であることが明らかとなった。さらに slot 設置により空力的な安定性が増すこと、ねじれと鉛直たわみの固有振動数比は、2 箱桁より高くなり構造的にも安定化効果が期待できることが明らかとなった。

以上より本論文は、耐フラッター性能に富む長大吊橋の補剛桁形状に新たな可能性を示すものであり、学術上、實際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 26 年 6 月 23 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。