

トラス補剛桁のねじりフラッタに及ぼす添加物の影響

Effect of an Appendage on a Torsional Flutter of a Stiffening Girder

小林紘士* 畑中章秀**

By Hiroshi Kobayashi and Akihide Hatanaka

In this study, torsional flutter characteristics of truss stiffening girder with an appendage were studied. Torsional flutter was stabilized by an appendage installed appropriately.

A mechanism of stabilization of torsional flutter by an appendage was studied through a flow-visualization (smoke wire method). It was found that the reduction of the separated region by an appendage stabilized torsional flutter.

1. まえがき

長径間の吊橋の補剛桁には、トラス補剛桁が多用される。トラス補剛桁は、ねじり1自由度のフラッタが問題となることが多い。トラス補剛桁は、トラス弦材部分の複雑な構造に加えて、検査路や送電線などの公共添加物が設置される場合があり、それらはフラッタの発生に少なからぬ影響を及ぼすことが知られている。

トラス補剛桁に生じるフラッタの基本的特性を理解するために種々の研究がなされている。中村、吉村ら¹⁾は、トラス補剛桁の床版部分の断面形状を変化させた実験を行い、トラス補剛桁に生じるフラッタは床版の断面形状により①連成フラッタ、②ねじりフラッタ、③①と②の中間型のフラッタに分類されるという結論を得ている。成田、佐藤ら^{2), 3)}は、ねじり振動時の非定常空気力を測定することにより、①橋床幅の大きさによる影響、②高欄、地覆、グレーチングの設置等による影響、③弦材部分の充実率による影響などについて詳細な調査を行っている。植田⁴⁾は、トラス補剛桁に生じるフラッタを連成フラッタとねじりフラッタの中間タイプの準曲げねじれフラッタであるとし、可視化および圧力測定からフラッタの発生要因として、準定常効果と流れの遅れによる寄与を指摘している。

フラッタの安定化対策としては、ねじりフラッタの主要因が床版部分にあるという観点から、①床版の断面形状を剝離の少ない翼断面などにする⁵⁾、②床版にグレーチングや鉛直スタビライザ⁶⁾などを取

* 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒603 京都市北区等持院北町56-1)

** 工修 立命館大学 日本学術振興会特別研究員

り付けるなど処置が取られる。

一方、トラス補剛桁に生じるフラッタは、主構弦材の配置や送電線、検査路などの添加物の設置によりフラッタ限界風速が大きく変化する。久保ら⁷⁾は、主構上弦材からの剝離流とフラッタの関係について詳細な調査を行っている。添加物の影響については、設置位置の微妙な変化によりフラッタ特性が大きく変化するという報告⁸⁾があるが、その影響について詳細な調査を実施した研究例はみあたらない。現段階では、添加物の設置位置を種々変化させて、試行錯誤的に最もフラッタ特性のよい設置位置を求めている。

著者らは、下弦材や公共添加物とねじり1自由度フラッタ特性の関係について調査を実施してきた⁹⁾。その結果、下弦材および添加物ともにねじりフラッタの特性に大きく寄与し、特に添加物の設置位置によってはフラッタを安定化できることが分かった。本論文では、上述の研究成果を踏まえて、パネ支持応答および可視化実験を実施し、添加物の影響について考察を行った。さらに耐風性を考慮した添加物の設置方法および位置について若干の検討を加えた。

2. 実験概要

トラス補剛桁を図1に示すように床版、主構上弦材、主構下弦材にモデル化する。弦材には、15X15(mm)の角材を用いた。モデルの長さは700mmである。実際のトラス補剛桁は、鉛直材、斜材、横構、対

傾構があるが、本研究では可視化を含めた基礎的なデータを得ることを目的とするので、便宜上上下弦材以外の部材を取り除いたモデルを用いた。

添加物としては、橋梁の管理路、電力、水道のための設置路などがあり、様々な断面形状を有している。本研究ではそれらの添加物のひとつに着目し、さらに簡単のために15X15mmの角材でモデル化した。添加物の取り付け位置は、床版の断面中央を原点としてXY座標〔気流方向をX軸、気流直角方向をY軸（下向きを正）〕で示した。

モデルはねじり1自由度支持とし、回転中心は図1に示す点に固定した。無風時の模型振動の対数減衰率は、風洞試験要領に $\delta_s=0.03$ を標準として掲げられている。しかし、本実験は、トラス補剛桁のねじりフラッタに及ぼす添加物の影響に関する基礎的な調査を行うことを主たる目的としている。このため、より現象が顕著に現れるように極小対数減衰率 $\delta_s=0.01$ に設定した。

添加物の影響を調べるために、スモークワイヤー法により強制的に加振させた模型の断面周りの流れの可視化を行った。流れの可視化では、フラッタが発生する付近の風速である無次元風速 $Vr=6.5$ の風速を対象として実験を行った。風洞風速を $U=1.55\text{m/s}$ 、加振振動数を $f_r=0.75\text{Hz}$ とした。迎角は $\alpha=+3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ とし、加振振幅を $\pm 3^\circ$ として正弦的に加振させた。強制振動時の流れの可視化は、振動の1サイクルの1/4周期ごとのフローパターンのストロボ撮影を実施した。図2に示すように振動変位の①、②（最

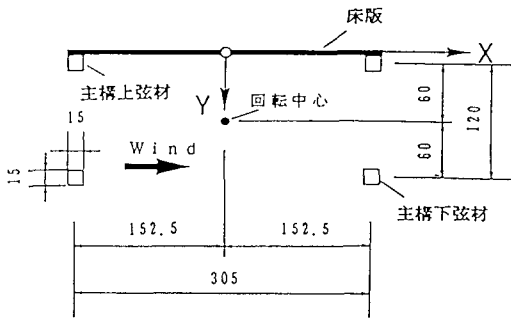


図1 トラス補剛桁のモデル化

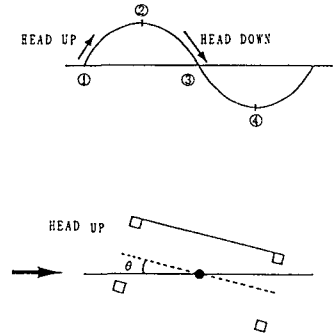


図2 気流の撮影時刻

大頭上げの状態)，③，④（最大頭下げの状態）の状態で撮影した。

3. 実験結果および考察

3. 1 添加物の設置にともなうねじりフラッタの変化

まず、フラッタ応答に対する添加物の影響を際立たせるために、下弦材を取り去った模型を用いて添加物位置を種々変化させた応答実験を行った。添加物位置を変化させた実験は、 $V_r=4.0$ および 6.25 の風速を対象として行い、添加物を設置しない場合の床版のみの応答と比較した。その結果を図3に示す。図3(a)は、下弦材を取り去ったモデルの応答を示したものである。迎角 $\alpha=0^\circ$ の応答を示している。図の横軸は、無次元風速 $V_r=V/f_T B$ （ V :風洞風速、 f_T :ねじり固有振動数、 B :模型幅）であり、縦軸は、ねじり倍振幅 2ϕ （deg）（数分間の応答振幅の最大値）である。 $V_r=4.0$ は、フラッタの開始風速 V_{er} に相当し、 $V_r=6.25$ は、フラッタが発生している風速域である。図3(b)は、添加物位置の変化による応答の変化を示したものである。添加物（角材）位置は、図左側の矢印で示す $Y=47.5\sim 127.5\text{mm}$ のレベルで、 X 方向には上下流の上弦材の範囲とした。黒く塗りつぶした領域は、 V_{er} が低下した領域を示している。

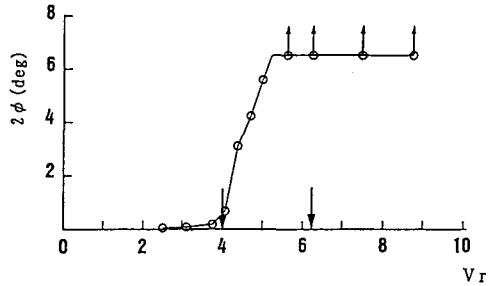
左下がりの斜線の部分は、 V_{er} が増大もしくは $V_r=6.25$ の時の振幅が十分小さくなった領域を示している。右下がりの斜線は、応答のほとんど変化のない領域である。

次に、下弦材を取り付けた模型を用い、添加物の影響を調べた。図3での実験結果から、 $Y=67.5$ 以下の位置に添加物を設置したときに、 V_{er} が低下する傾向が認められたことから、 $Y=67.5$ に固定して X の位置を変化させた実験を行った。その結果を図4示す。図中の $\sim$ は、ハードフラッタのリミット振幅を示している。迎角を $\alpha=0^\circ, \pm 3^\circ$ に設定した。以下のそれぞれの迎角における応答特性について述べる。

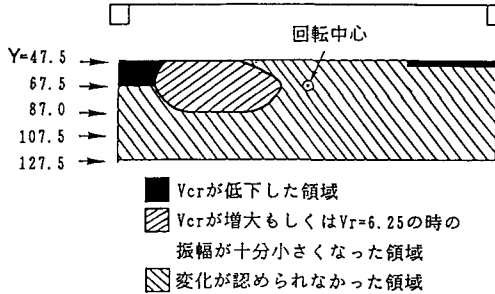
(1) $\alpha=0^\circ$ の応答

角材を設置しない場合には、 $V_r=4$ を越えるあたりからフラッタの発現が認められる。その後風速を上げても十分大きな振幅を維持するが、 $V_r=12$ を越えると風速とともに振幅が低下する傾向が認められた。

$X=-75$ および 0 の位置に角材を設置した場合には、フラッタの発生は認められなかった。 $X=75$ および 150 の位置に角材を設置した場合には、ある特定の風速域でのみ振動の発生が認められる。渦励振と類似した応答特性を示しているが、文献10)に示される渦励振の発生風速よりも高風速で振動が生じている。この振動の発生要因が明確でないので、本論文では高風速まで大振幅の振動が持続する振動と区別せずに



(a) 迎角 0° における下弦材の無いモデルの応答



(b) 角材の設置にともない応答が変化した領域

図3 下弦材の無いモデルの
応答に及ぼす添加物の影響

フラッタと呼ぶこととする。

(2) $\alpha = +3^\circ$ の応答

フラッタの発生する風速は角材の設置位置により若干変化するのみである。

(3) $\alpha = -3^\circ$ の応答

角材の設置位置によりフラッタ特性が大きく異なる様子がうかがえる。特に、 $X = -75$ の位置に角材を設置した場合にはフラッタの発現が認められなかった。それ以外の位置に角材を設置した場合には、角材を設置しない場合と比べてフラッタの発生風速が低下している。また、角材に設置位置によってはある特定の風速域でのフラッタの発現あるいはソフトフラッタとハードフラッタの発現が交互に現れるなど複雑な応答特性を示している。

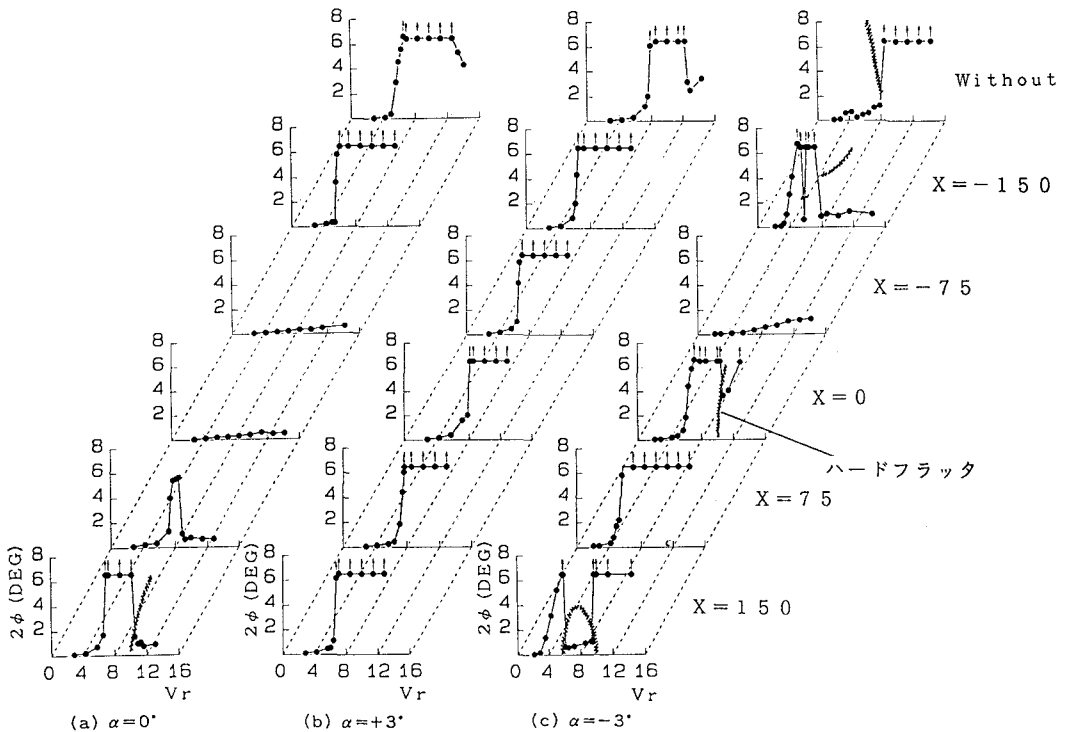


図4 添加物の設置位置によるフラッタ特性の変化

3. 2 添加物の設置による静的空力モーメントの変化

静的空力モーメント曲線が負の勾配となる迎角範囲と自励振動の発生した迎角範囲がほぼ一致するという実験報告¹¹⁾がある。そこで、先に示した角材の設置位置によるねじりフラッタの変化と角材の設置による静的空力モーメントの変化の関連性について調査した。図5に角材の設置位置を変化させたときの静的空力モーメント係数 $C_M (=M / (1/2 \rho U^2 B^2))$ を示す。 $X = -150$ の位置に角材を設置した場合を除けば、空力モーメント係数は、ほぼ同じ値である。いずれのケースも空力モーメントの勾配は0または正の値となっている。

以上より、本実験に使用したモデルに発生するフラッタは、静的空力モーメント曲線の負の勾配に起因したものではないと言える。

3. 3 模型周辺流れの可視化実験結果

図6(a)～(c)に迎角 0° 、 $+3^\circ$ および -3° における振動時の断面周りの可視化写真のスケッチを示す。床版の上面および下面において前縁から剝離した流れが模型の運動とともに下流側に流下している様子がうかがえる。迎角が $+3^\circ$ の場合には、床版上下面ともにほぼ同じ剝離バブルが認められる。また迎角が -3° の場合には、床版上面にはバブルはほとんど認められず、床版下面には剝離バブルが認められる。

吉村、中村^{12), 13)}は、ねじりフラッタが発生するような失速型断面にみられる特徴的なインディシャル応答は、姿勢変化に基づく剝離バブルの発生と成長に起因するものであり、ねじりフラッタの発生原因はこの剝離バブルによる非定常空気の発生にあることを指摘している。上述の可視化の結果は、吉村らが指摘したねじりフラッタの発生要因と類似した傾向を示している。

図7(a)～(c)は角材を $X=-75$ の位置に設置したときの迎角 0° 、 $+3^\circ$ および -3° における振動時の断面周りのフローパターンを示したものである。迎角 0° および -3° のフローパターンをみると、角材がない場合にみられた床版下面における剝離バブルは、角材の設置により小さくなっ

ていることが分かる。 $X=-75$ の位置に角材を設置した時にみられるフラッタの安定化は、角材を設置することにより床版下面における剝離バブルの成長が抑えられるためではないかと考えられる。橋桁の中央分離帯を充腹構造にすることにより剝離バブルの後方への成長が抑えられて、その結果ねじりフラッタが抑制されるという研究報告¹⁴⁾があるが、本実験のケースもそれと同様の制振メカニズムであると考えられる。

一方、迎角 $+3^\circ$ の場合には、角材を設置しても断面周りのフローパターンにあまり大きな変化が認められない。迎角 $+3^\circ$ においては角材の影響が少ないので、角材の設置位置によらずフラッタが発生するものと考えられる。

以上のことから、本実験に使用したモデルに発生したフラッタには、前縁からの剝離バブルの寄与が大

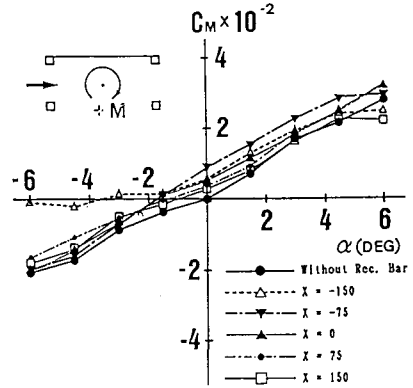


図5 添加物の設置位置による
静的空力モーメント係数の変化

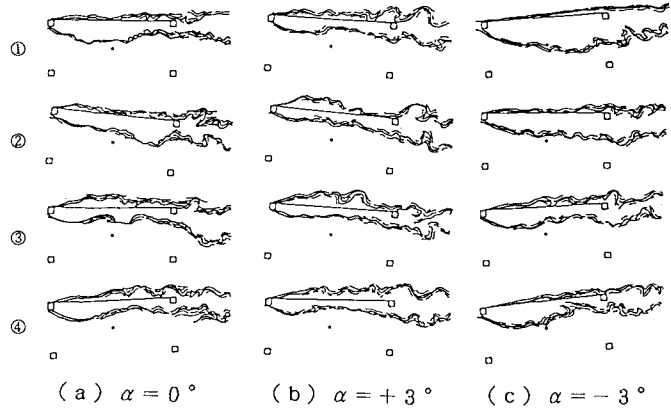


図6 振動時の模型の断面周りのフローパターン
(添加物なし, $V_r=6.5$)

さいものと考えられる。

3. 4 バッフルプレートによる
気流制御

前節において、添加物を設置することにより剥離バブルの後方への成長が妨げられ、ねじりフラッタの発生が抑制されることを示した。図8に示すようなプレート（バッフルプレート）を用いれば、より望ましい方向に気流を制御することが容易になされることが考えられる。すなわち、バッフルプレートを剥離渦の成長を妨げるような位置および角度に設置する方がより積極的

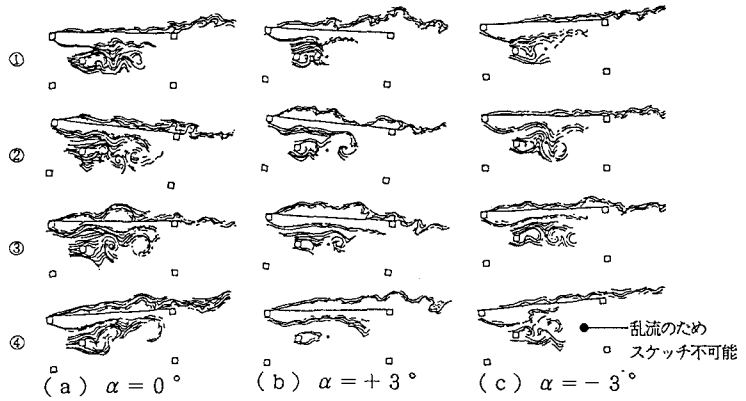


図7 振動時の模型の断面周りのフローパターン
(添加物あり, $X=-75$, $Y=67.5$, $V_r=6.5$)

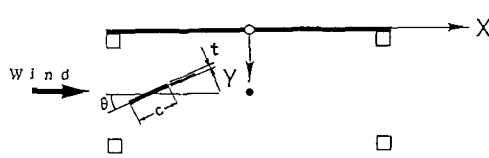


図8 バッフルプレートの断面寸法
および設置位置の定義

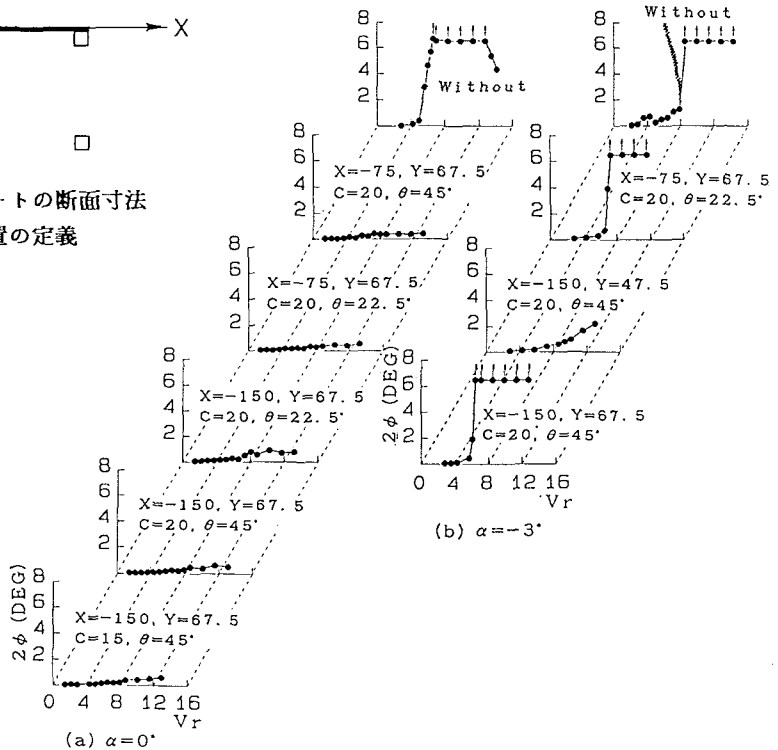


図9 バッフルプレートによる制振効果

に耐風性を向上させることが出来るものと思われる。

そこで、**図8**のようなプレート（以下、バッフルプレートと称す）をモデルに設置した場合のフラッタ特性を調査した。実験では、プレートの幅、角度および設置位置を変化させた。プレートの板厚は 1.5mm である。

迎角 $+3^\circ$ の場合は、床版下面に角材を設置してもフラッタ特性にあまり大きな影響を及ぼさなかったことから、床版上面における剝離バブルが迎角 $+3^\circ$ のフラッタの発生に大きく貢献しているものと考えられる。同様に、バッフルプレートを床版下面に設置してもあまり大きな制振効果は期待できないものと考えられる。したがって、迎角 $+3^\circ$ のケースを省き、迎角 0° と -3° について実験を行った。

図9に実験結果を示す。迎角 0° の場合には、角材による添加物では $X=-150, Y=-65$ の位置でフラッタが発生したが、バッフルプレートではフラッタの発現は認められなかった。迎角 -3° の場合には設置位置によってはフラッタの発現が認められ、むしろ角材よりも制振効果が少ない結果となった。バッフルプレートの設置、角度には最適位置があるものと思われる。可視化などの実験により調査していく必要があるものと思われる。

4. 結論

本研究では、トラス補剛桁のねじり1自由度フラッタに着目して添加物の影響を調べた。その結果以下の結論を得た。

- 1) トラス補剛桁に生じるねじり1自由度フラッタは、添加物の設置位置により大きく変化する。
- 2) 添加物の影響は迎角 0° および -3° において顕著にみられ、 $+3^\circ$ の時にはあまり大きな影響は認められなかった。迎角 0° および -3° においては、添加物の設置によりフラッタが完全に収まったケースがみられた。
- 3) 添加物を設置位置によって剝離バブルの後方への成長が妨げられ、ねじりフラッタが抑制される。ただし、迎角 $+3^\circ$ の場合は、角材を設置してもあまり大きな影響がないので、フラッタは抑制されない。
- 4) 本研究に用いたモデルに発生する1自由度フラッタの発生には前縁からの剝離渦の寄与が大きい。
- 5) 角材の代わりにバッフルプレートを用いてみた。迎角 0° においては、バッフルプレートの設置によりフラッタが抑制された。 -3° の迎角では、バッフルプレートを設置してもフラッタが発現するケースが認められた。

謝辞 本研究は、平成 3年度卒研究生小川寛一君、酒井三千流君、平成 4年度卒研究生青山祐之君、森本洋之君の協力の貢献によるところが大である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村泰治、吉村健：吊橋断面の2自由度フラッタについて，土木学会論文報告集，第226号，pp13-20，1974
- 2) 成田信之、佐藤弘史：補剛トラスを有する吊構造の耐風性におよぼす橋床の影響，第6回風工学シンポジウム論文集，pp381-386，1980
- 3) 佐藤弘史、成田信之、山本邦夫：トラス補剛桁の非定常空気力の及ぼすトラス充実率の影響，第37回土木学会年次学術講演会，I-239，1983
- 4) 植田利夫：長大橋の耐風制振に関する研究，第3章，大阪大学学位論文，1990
- 5) 秋山春樹、樋上琇一：翼床版による吊橋の耐風安定化，第32回土木学会年次学術講演会，I-126，

1978

- 6) Ueda, T., Yasuda, M., Nakagaki R.: Mechanism of Aerodynamic Stabilization for Long-Span Suspended Bridge with Stiffening truss-Girder, International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Its Application, pp477-484, 1988, Kyoto
- 7) 久保喜延、加藤九州男、重広正治、宮田利雄、伊藤学：吊橋補剛桁の部材配置による耐風特性，pp237-242，第5回風工学シンポジウム，1978
- 8) 香川佑次、植田利夫、北島彰夫、北原俊男、桜井孝：トラス補剛吊橋の架設時および完成時の耐風応答，第7回風工学シンポジウム論文集，pp287-294，1982
- 9) 畑中章秀、小林紘士：トラス補剛桁に生じるねじりフラッタ基本的特性，第47回土木学会年次学術講演会，I-232，1992
- 10) 白石成人、松本勝：充腹断面の渦励振応答特性に関する研究，土木学会論文報告集，pp37-50，第322号，1982
- 11) 宮田利雄、岡内功：吊橋の風による自励振動に関する一考察，土木学会論文報告集，pp19-34，第173号，1970
- 12) 吉村健、中村泰治：インディシャル応答による橋梁断面のねじりフラッタの研究，土木学会論文報告集，pp33-40，第264号，1977
- 13) 吉村健、中村泰治：橋梁断面のインディシャル運動時の流れの観察と圧力分布の測定，第32回土木学会年次学術講演会，I-104，1977
- 14) 吉村健、中村泰治：中央分離帯による橋桁のねじりフラッタの防振について，第33回土木学会年次学術講演会，I-115，1978

(1992年9月21日受付)