

超長大箱桁形式吊橋の耐風安定性に関する解析的および実験的研究

Analytical and Experimental Study on Aerodynamic Stability of Super Long Span Suspension Bridge with Streamlined Box Girders

大野 克紀
Katsunori OHNO

川田工業(株)技術開発本部技術研究室

内海 靖
Yasushi UCHIUMI

川田工業(株)技術開発本部技術研究室主幹

田巻 嘉彦
Yoshihiko TAMAKI

川田テクノシステム(株)開発部開発二課

宮地 真一
Shin-ichi MIYACHI

川田工業(株)技術開発本部技術研究室主幹

This paper deals with the aerodynamic stability of a super long span suspension bridge with streamlined box girders. In order to improve aerodynamic stability, the authors investigated two countermeasures: the cross stay system, and open grating. The outline of this paper is as follows:

1) A series of direct flutter FEM analyses through the use of measured aerodynamic forces on the bridge deck were carried out in order to understand the optimal cross stay location for improving aerodynamic stability.

2) Two dimensional wind tunnel experiments were carried out in order to understand differences in the aerodynamic stability of structures with different types of grating, and the porosity of gratings.

It was found from the analytical and experimental results that these two countermeasures were effective to improve aerodynamic stability.

Key words: suspension bridge, aerodynamic stability, cross stay, open grating

1. はじめに

現在、わが国の各地において、海峡横断道路プロジェクトが構想されており、この中には、既往の実績を上回る規模の超長大橋が含まれている場所もある。これらの超長大橋の建設を実現するためには、耐風安定性の確保は当然のことながら、経済性に優れたものが必要不可欠であることは言うまでもない。このような状況下で、経済的な耐風安定化策として、ケーブルシステムをはじめとする構造的対策^{1)~4)}や、桁形状、開口化等の空力的対策^{5)~7)}が数多く検討されている。これらの種々の検討においては、補剛桁断面として流線形の偏平箱桁形式を対象としているものが最近多くなっている。これは、従来のトラス補剛桁を適用して耐風安定性を確保する場合、経済性の面で大きな課題が生じると考えられることによるものである。そこで、本研究においても、偏平箱桁断面を有する超長大吊橋を対象に、桁の板厚を増加してねじれ剛性を高める以外の、より経済的な手法による耐風安定性の確保を目的として検討を行った。以下に、本研究で着目した耐風安定化策および検討内容を示す。

① 構造的対策として、鉛直クロスステイに着目し、耐風安定性に及ぼす効果と最適な設置位置について、連成フラッター解析を実施することにより検討を行った。著者らは、これまでに、作用させる空気力として

平板翼の空気力を使用した検討⁸⁾を実施しているが、より詳細な検討を行うために、今回は、対象とした補剛桁断面の実測空気力を使用した。

② 空力的対策として、開口部オープングレーチング化に着目し、グレーチングの種類および充実率を変化させた場合の耐風安定性に及ぼす影響を、風洞実験を実施することにより検討を行った。開口位置については、著者らがこれまでにに行った、高欄や地覆のない非常に偏平な断面についての検討⁹⁾から、良好な結果の得られた桁断面中央部とした。

2. 対象とした橋梁

本研究では、図1に示すような中央支間長2500mの超長大吊橋を検討の対象とした。対象とした橋梁の補剛桁基本断面を図2に、基本諸元を表1に示す。表1からわかるように、本橋では使用鋼重量の低減を図ってより経済的な超長大吊橋が実現できるよう、①補剛桁として箱桁形式の採用、②ケーブルのサグ比を1/9、③ケーブルの許容応力度も明石海峡大橋の82kgf/mm²から100kgf/mm²に変更することになっている。なお、ケーブルのサグ比を1/10、ケーブルの許容応力度82kgf/mm²とした場合のケーブル重量 W_c は $W_c \div 17.0$ tf/m/Br.であり、サグ比を1/9、許容応力度を100kgf/mm²に変更することによってケーブル重量は $W_c = 11.0$ tf/m/Br.まで低減したこ

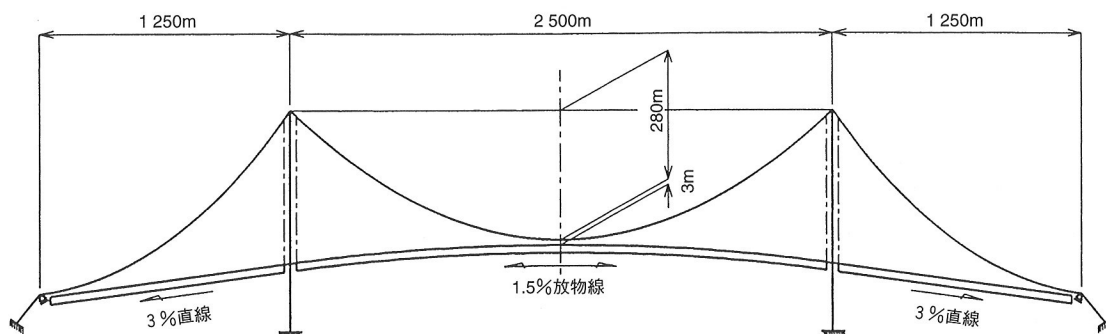


図1 対象とした超長大吊橋

表1 対象橋梁の基本諸元

支間割	1 250m+2 500m+1 250m	
サゲ比	1/9	
ケーブル間隔	35.5 m	
ケーブル許容応力度	100 kgf/mm ²	
死荷重	ケーブル	11.0 tf/m/Br. (14.1 tf/m/Br.)
	吊構造部	24.0 tf/m/Br. (28.0 tf/m/Br.)
	合 計	35.0 tf/m/Br. (42.1 tf/m/Br.)
補剛桁剛性	面内断面2次モーメント	12.0 m ⁴ /Br.
	面外断面2次モーメント	160.0 m ⁴ /Br.
	ねじれ定数	26.0 m ⁴ /Br.
極慣性モーメント	ケーブル	350 tf・s ² ・m/m/Br.
	吊構造部	340 tf・s ² ・m/m/Br.
	合 計	690 tf・s ² ・m/m/Br.

注) カッコ内は、明石海峡大橋の値を示す。

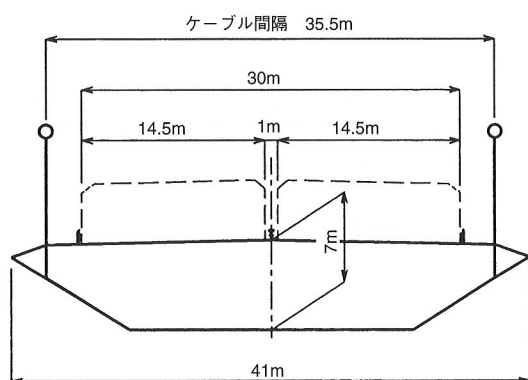


図2 補剛桁基本断面

とを付記しておく。

3. 鉛直クロスステイに関する検討

本章では、構造的対策としての鉛直クロスステイに着目し、連成フラッター解析を実施することにより、対象とする桁断面の実測空気力を作用させた場合の、鉛直クロスステイの効果および最適設置位置についての検討結果を述べる。なお、鉛直クロスステイを実際の吊橋に適用する場合、当然のことながら建築限界にも考慮しなければならないが、本研究では鉛直クロスステイの最適位置を詳細に把握できるように、設置位置を側径間のアンカレイジ側端部から中央径間の中央部まで変化させて解析を実施するものとした。

(1) 解析手法

本研究での連成フラッター解析には、基本となる連成空気力を加えた運動方程式を直接解く方法、つまり直接法による立体骨組みフラッター解析¹⁰⁾を使用した。作用させる空気力としては、図2に示す桁断面について一様流中の風洞実験から算出した測定空気力（水平風を作用させた場合の非定常空気力、提供：本州四国連絡橋公団）を使用した。また、桁とケーブルの横たわみ振動に伴う抗力（桁の抗力係数は $C_D=0.75$ 、ケーブルの抗力係数は $C_{DC}=0.7$ と仮定）とケーブルの鉛直たわみ振動に伴う揚力は考慮するものとしたが、有風時における横たわみについては無視するものとした。

解析モデルは、中央支間2 500mを20 等分、側支間

1 250 mを10 等分した魚骨モデルを使用した。

(2) 両効き鉛直クロスステイに対する検討

本節では、鉛直クロスステイが両効き状態（圧縮・引張に抵抗）の場合についての検討結果を述べる。図3に側径間および中央径間の鉛直クロスステイの設置位置とフラッター発現風速（本章に示すこれ以降のフラッター発現風速は、構造対数減衰率を $\delta=0.02$ とした場合の値を示す）の関係を示す。横軸が鉛直クロスステイ設置位置、縦軸がフラッター発現風速を示しており、図中の x は塔側から鉛直クロスステイまでの距離を、 L_s および L はそれぞれ側支間長、中央支間長を示す。図3から、側径間のみに設置した場合には、設置前に $V_F=57$ m/sであったフラッター発現風速が、 $x/L_s=0.5$ 付近に設置することにより $V_F=62$ m/s程度まで上昇していることがわかる。また、中央径間のみの場合は、 $x/L=0.3$ なる位置に設置すれば、 $V_F=70$ m/s程度まで上昇することがわかる。次に、この結果を踏まえて、側径間と中央径間に同時に設置した場合についても解析を行い結果を図3にプロットした。一つは、中央径間側の設置位置を $x/L=0.3$ に固定し側径間側の設置位置を変化させた場合で、もう一つは、側径間側の設置位置を $x/L_s=0.5$ に固定し中央径間側の設置位置を変化させた場合である。図3からわかるように、前者の場合、側径間の設置位置を $x/L_s=0.1\sim0.2$ とした場合に最大の $V_F=71$ m/s程度のフラッター発現風速となっているが、この風速は中央径間のみに $x/L=0.3$ なる位置

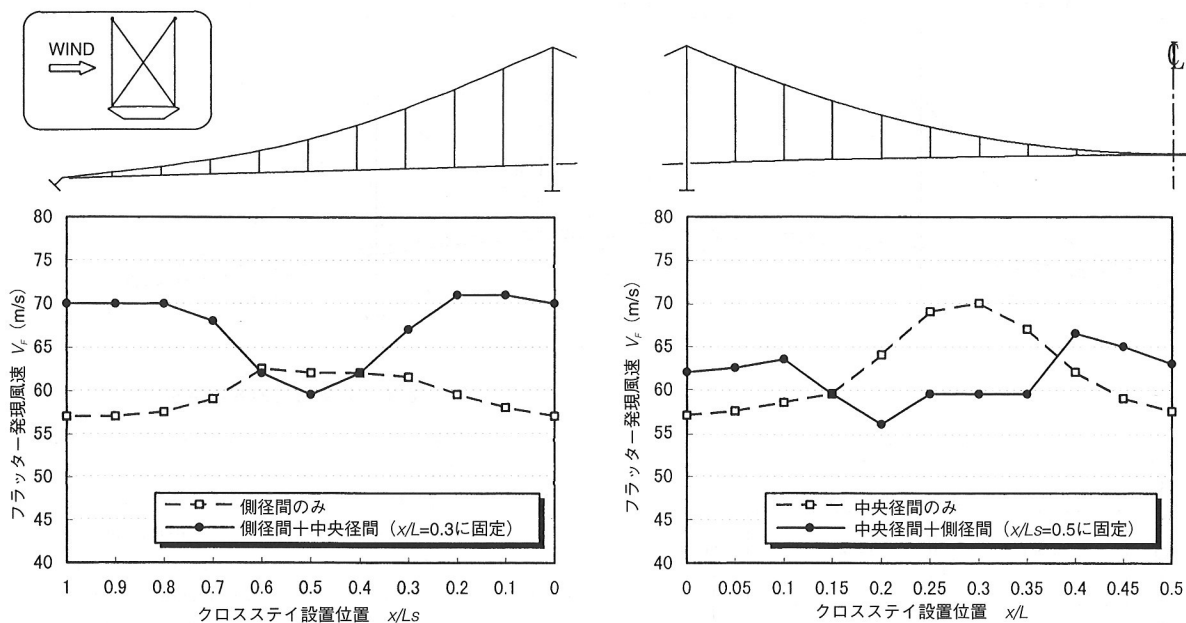


図3 両効き鉛直クロスステイ設置位置とフラッター発現風速の関係

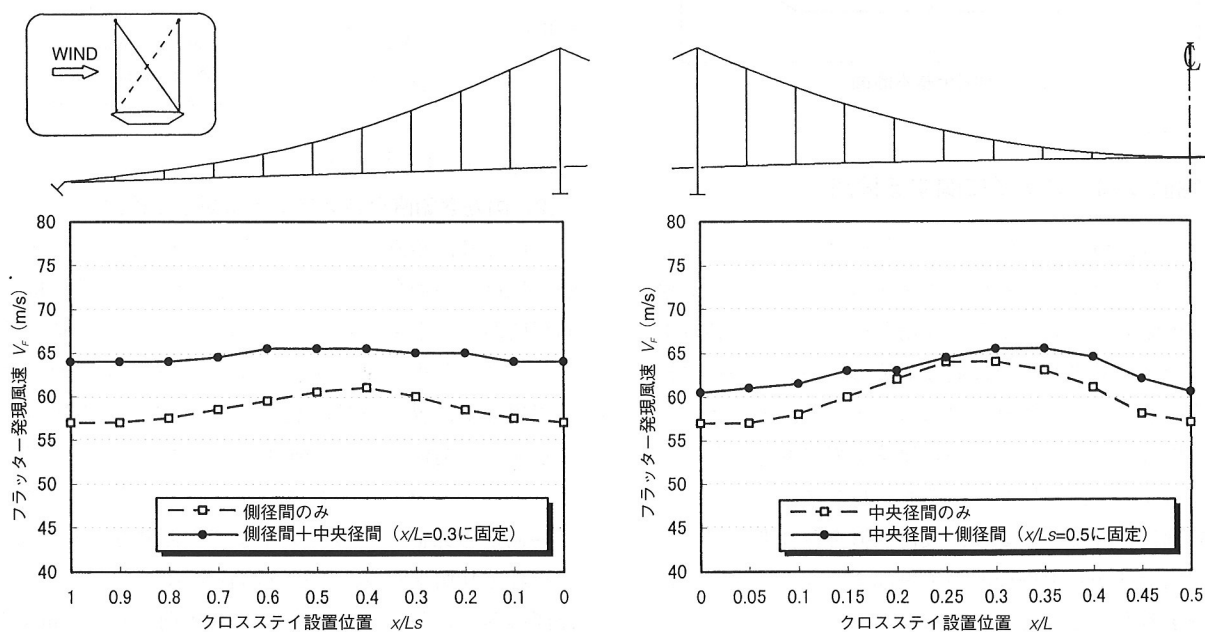


図4 片効き鉛直クロスステイ設置位置とフラッター発現風速の関係

に設置した場合と同程度の結果である。さらに、 $x/L_s=0.4 \sim 0.6$ では、側径間だけに設置した場合よりもフラッター発現風速が低くなる結果となっている。後者の場合については、中央径間の設置位置を $x/L=0.4$ とした場合に最大のフラッター発現風速 $V_f=66.5 \text{ m/s}$ が得られているものの、この値は、中央径間だけに $x/L=0.3$ なる位置に設置した場合の値 $V_f=70 \text{ m/s}$ を下回る結果である。また、側径間の場合と同様に、 $x/L=0.15 \sim 0.35$ では中央径間だけに設置した場合よりも低いフラッター発現風速となっている。すなわち、今回対象とした超長大吊橋において、両効きの鉛直クロスステイを設置する場合、側径間の鉛

直クロスステイは不要で、中央径間だけに $x/L=0.3$ なる位置に設置すればほぼ最大のフラッター発現風速が得られることがわかった。

(3) 片効き鉛直クロスステイに対する検討

前節では、鉛直クロスステイを両効き状態（圧縮・引張に抵抗）としていたが、本節では、有風時において一方のステイ張力が抜けた場合も想定し、片効き状態（引張のみに抵抗）の場合について同様の検討を行った。図4に検討結果を示すが、図3と比較すればわかるように、側径間のみ、あるいは、中央径間だけに設置した場合の結果をみると、効果的な設置位置は両効き鉛直クロス

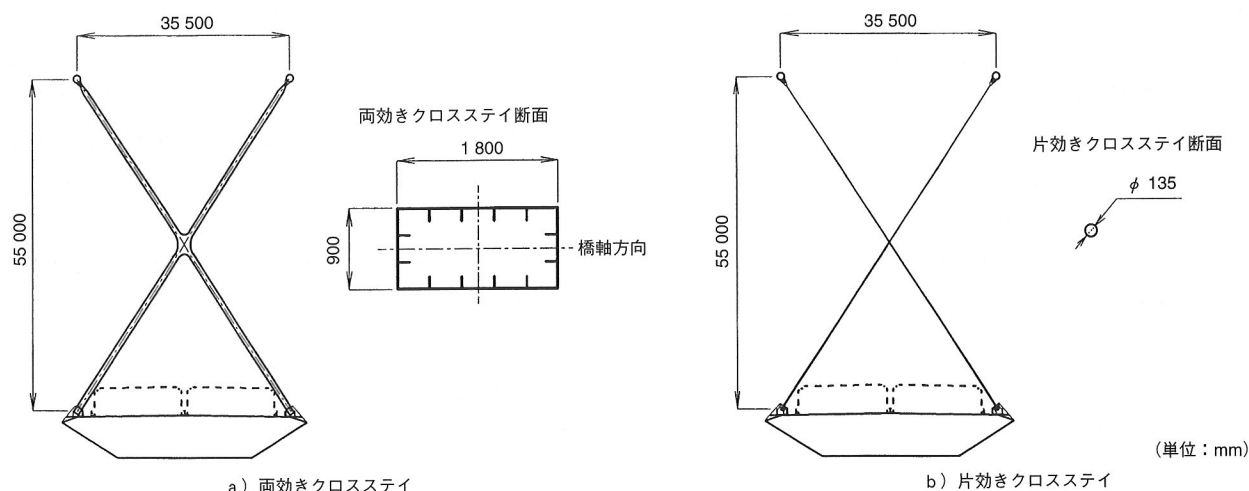


図5 鉛直クロスステイ概略構造図

テイの結果と同様である。ただし、フラッター発現風速の最大値は低下しており、中央径間のみに $x/L=0.3$ なる位置に設置した場合で $V_F=64$ m/s（両効き鉛直クロスステイでは $V_F=70$ m/s）となった。一方、側径間と中央径間に同時に設置した場合の結果をみると、両効き鉛直クロスステイの結果と異なり、いずれの位置に設置した場合でも、側径間あるいは中央径間に単独で設置した場合のフラッター発現風速を下回る結果にはなっていない。ここでの、フラッター発現風速の最大値は、中央径間の $x/L=0.3$ と側径間の $x/L=0.5$ なる位置に設置した場合の $V_F=65.5$ m/sであるが、中央径間のみに $x/L=0.3$ なる位置に設置した場合とさほど差はない結果となった。

(4) 鉛直クロスステイの概略構造

上述の検討結果から、今回対象とした超長大吊橋における鉛直クロスステイの最適位置は、両効きと片効きのどちらの場合も、中央径間側については、 $x/L=0.3$ 付近であることがわかった。ここでは、実際の橋梁に採用する場合を考えて、暴風時（基本風速 $U_{10}=46$ m/s）の静解析を行い、鉛直クロスステイの概略構造を検討した。両効きクロスステイとしては梁部材を、片効きクロスステイとしてはケーブル部材を想定した。図5に検討の結果得られた各クロスステイの概略構造を示す。ここでの鉛直クロスステイは、中央径間の $x/L=0.29$ なる位置（主塔から725m離れた位置）に設置した場合である。図5に示すように、両効きクロスステイとしては1,800 mm×900 mm程度の鋼製箱断面が、片効きクロスステイとしてはφ135 mm程度のケーブル部材が、必要となることがわかった。

4. 開口部オープングレーチング化に関する検討

本章では、空力的対策として開口部のオープングレーチング化に着目し、風洞実験を行うことにより耐風安定性に及ぼす影響を検討した。開口部は、図2に示す基本断面の中央14.5 m部分（中央帯と上下各3車線のうち中

央側1車線部分）であり、この部分に充実率が50%，60%，70%の2種類のオープングレーチング（図6に示すような金網で作製したGタイプおよび薄板に円形の孔をあけたHタイプ）を設置した状態を対象とした。

(1) 風洞実験の概要と実験ケース

本研究で使用した風洞は、当社所有の水平回流式ゲッチング型風洞（幅2.0 m×高さ2.5 m×全長15.0 m）であり、実験模型としては縮尺1/71の2次元剛体部分模型（模型長1,620 mm）を使用した。対象とした実験ケースを表2にまとめる。比較対比を目的として、開口部を設けな

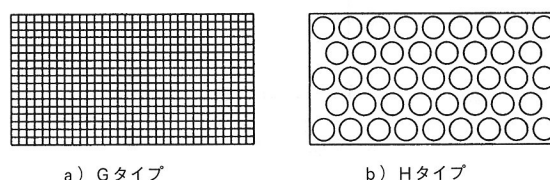


図6 オープングレーチングの種類

表2 対象とした実験ケース

実験ケース名	開口パターン
AD (基本断面)	WIND
W1L1	WIND
W1L1/50G W1L1/50H	WIND
W1L1/60G W1L1/60H	WIND
W1L1/70G W1L1/70H	WIND

い基本断面(AD)と開口部にグレーチングを設置せず完全開口した断面(W1L1)についても実験を実施した。

(2) 渦励振特性

一様流中のばね支持実験で得られた、迎角 α と渦励振の振動振幅の関係を図7に示す。図7から、 $\alpha=0^\circ$ の場合、基本断面AD(図中●記号)には渦励振が発現していないものの、完全開口のW1L1(図中○記号)では、片振幅で100 mm程度のたわみ渦励振と片振幅で1.7°程度のねじれ渦励振がそれぞれ発現していることがわかる。これは、開口化によって基本断面が比較的ずんぐりした2つの箱断面に分離されたことに起因すると考えられる。一方、オープングレーチング化を施したすべてのケースにおいて有意な渦励振の発現は認められなかった。また、 $\alpha=-3^\circ$ の場合、ADでは片振幅で500 mm程度のたわみ渦励振が、また、W1L1で片振幅2.1°ものねじれ渦励振がそれぞれ発現しているのに対し、オープングレーチング化を

施したすべてのケースでは渦励振が発現していない。これに対し、 $\alpha=+3^\circ$ の場合、ADで片振幅1.2°、W1L1で0.9°のねじれ渦励振が、また、オープングレーチング化を施した全てのケースでも片振幅で1.0°~1.2°のねじれ渦励振が発現する結果となっている。それゆえ、今回の実験では、 $+3^\circ$ の傾斜風が橋桁に作用した場合、 $\alpha=0^\circ$ や $\alpha=-3^\circ$ で認められたオープングレーチングの渦励振に対する制振効果は期待できないと考えられる。しかしながら、オープングレーチング化を施した全ケースのねじれ渦励振の発現風速域は基本断面ADとほぼ同じであったことから、フェアリング形状を変更することによって渦励振を制振できる可能性が高いと思われる。

(3) 連成フラッター特性

本研究では不安定なリミットサイクルの有無にかかわらず、ねじれの振動振幅が1°になった風速を連成フラッター風速と定義した。迎角が $\alpha=-3^\circ$ 、 0° 、 $+3^\circ$ で一様流

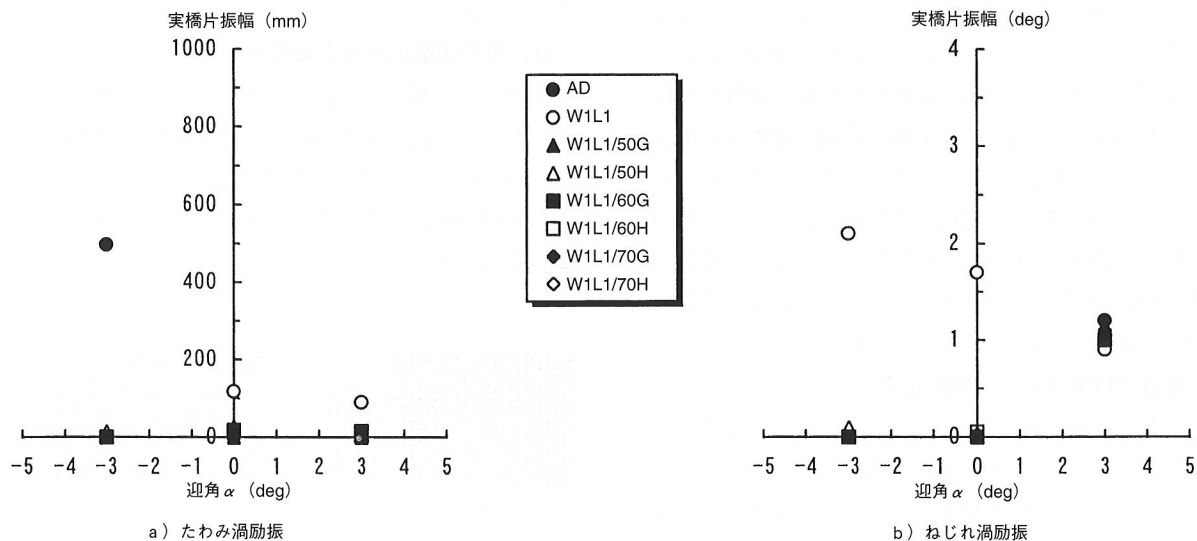


図7 渦励振特性

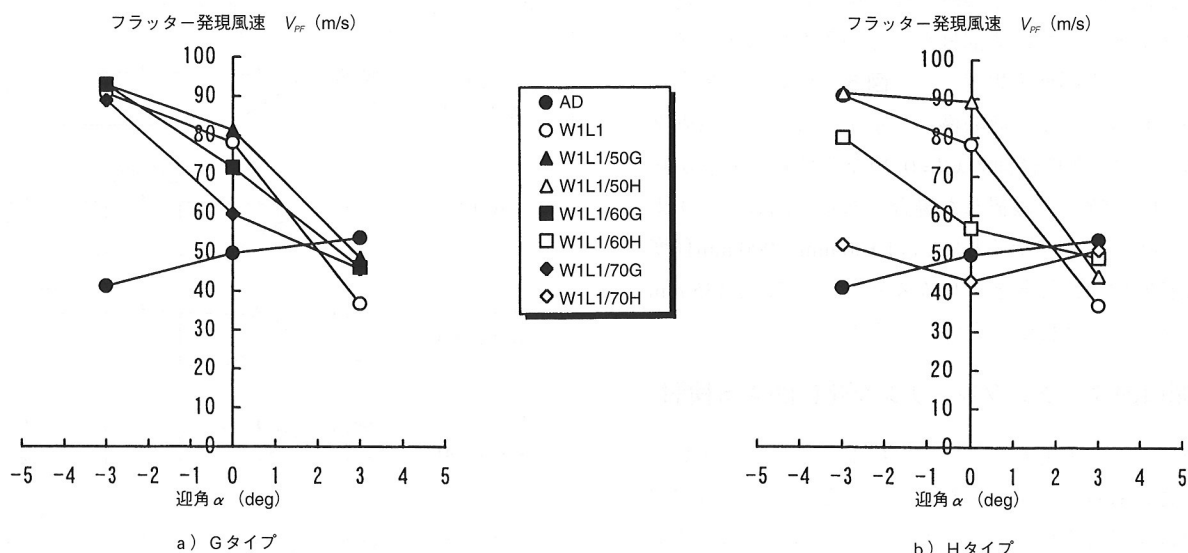


図8 連成フラッター特性

中状態のばね支持実験で得られた $V_{PF}-\alpha$ （連成フラッター風速 V_{PF} と迎角 α の関係）を図8に示す。図8からわかるように、基本断面AD（図中●記号）の発現風速は迎角によって幾分異なるものの、 $-3^\circ \leq \alpha \leq +3^\circ$ の迎角範囲では50 m/s前後の比較的低い風速域から連成フラッターが発生している。また、オープングレーチングを金網で作製したGタイプの結果をみると、充実率の小さいW1L1/50 G（図中▲記号）、W1L1/60 G（図中■記号）、W1L1/70 G（図中◆記号）の順に連成フラッター特性が向上しており、特に、W1L1/50 Gでは、 $-3^\circ \leq \alpha \leq +3^\circ$ の迎角範囲で完全開口したW1L1（図中○記号）よりもさらに連成フラッター風速が高くなっていることがわかる。

一方、図8 a)と図8 b)の $\alpha = -3^\circ$ および $\alpha = 0^\circ$ の結果を比較すればわかるように、Hタイプの連成フラッターは、上述のGタイプと比べ、充実率によって特性が大きく変化している。具体的に記述すれば、 $\alpha = -3^\circ$ および $\alpha = 0^\circ$ の迎角では、W1L1/70 Hの方がW1L1/70 Gよりも若干高い連成フラッター風速を示しているものの、充実率が60 %の場合には、W1L1/60 Gの方がW1L1/60 Hよりも、また、充実率が70 %の場合には、W1L1/70 Gの方がW1L1/70 Hよりも、それぞれ連成フラッター風速が明らかに高くなっている。すなわち、空力特性のみに着目した今回の実験では、Gタイプの方がHタイプよりも優れた連成フラッター特性を示すことが確認できた。このように、オープングレーチングの形状の差異によって連成フラッター特性が変化したのは、オープングレーチング部を通過する両者の流れが微妙に変化し、流れの位相遅れ特性に差異が生じたためと考えられる。これについては今後の検討課題としたい。

5. おわりに

本研究では、中央支間2 500 mの偏平箱桁断面を有する超長大吊橋を対象に、経済的な手法による耐風安定性の確保を目的とし、構造的対策としての鉛直クロスステイ、および、空力的対策としての開口部オープングレーチング化に着目して検討を行った。その結果、これらの耐風安定化策は、今回対象とした超長大吊橋において、耐フラッター性を向上することが可能な手段となり得ることを確認できた。今後も、より経済的な超長大橋の開発を目指して、さらなる研究を進めていく所存である。

最後に、本研究は、建設省土木研究所、本州四国連絡橋公団、(財)土木研究センターおよび民間企業8社による共同研究「耐風性および経済性に優れた超長大橋の開発」の一環として行われたことを付記しておく。

本研究においては、近畿大学の米田昌弘助教授に、当社在職中に多大なるご指導をいただきました。また、本研究での連成フラッター解析にあたっては、横浜国立大

学の宮田利雄教授と山田 均助教授が開発されたプログラム¹⁰⁾を使用させていただきました。紙面を借りてここに厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 大谷康史・北川 信・金崎智樹・勝地 弘：長大吊橋のフラッター限界風速に対するクロスハンガーの改善効果に関する検討，土木学会第50 回年次学術講演会講演概要集，I -688，pp.1376～1377，1995年9月．
- 2) 佐々木 誠・久保喜延・山口栄輝・坂田隆博：中央連結ケーブル方式による超長大橋の耐風特性，構造工学論文集，Vol.42A，pp.841～846，1996年3月．
- 3) 風間浩二・久保田 浩・宮崎正男・荒居祐基：ケーブルステイ方式による超長大吊橋の耐風安定性に関する研究，第14回風工学シンポジウム論文集，pp.467～472，1996年12月．
- 4) 村上琢哉・武田勝昭・高尾道明：超長大3 本ケーブル吊橋のメインケーブル断面積比がフラッター特性に及ぼす影響，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，I -B53，pp.404～405，1997年9月．
- 5) 山口浩二・鈴木周一・北原俊男・武内隆文・宮崎正男・風間浩二：箱桁の渦励振・連成フラッター特性に及ぼす開口部とフェアリングの効果，第9 回風工学シンポジウム論文集，pp.217～222，1986年12月．
- 6) 山口浩二・岩屋勝司・池ノ内昌弘・井上浩男：超長大吊橋2 箱桁断面の空力特性に関する実験的考察，第9 回風工学シンポジウム論文集，pp.229～234，1986年12月．
- 7) 佐藤弘史・荻原勝也・松藤洋照・鳥海隆一・日下部毅明・嶋本栄治・星加益朗：開口部付き箱桁を有する超長大橋の耐風性に関する検討，第14回風工学シンポジウム論文集，pp.407～412，1996年12月．
- 8) 米田昌弘・大野克紀・田巻嘉彦・木村公男：超長大吊橋の連成フラッター特性に及ぼす鉛直ならびに傾斜クロスステイの効果について，構造工学論文集，Vol.43A，pp.713～724，1997年3月．
- 9) 米田昌弘・大野克紀・田巻嘉彦・木村公男・宮地真一：主桁部に開口化を施した超長大箱桁形式吊橋の連成フラッター特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.43A，pp.945～954，1997年3月．
- 10) 宮田利雄・山田 均・太田博文：立体骨組み解析法による横たわみしたトラス補剛吊橋の曲げねじれフラッター解析，土木学会論文集，第404号／I -11，pp.267～275，1989年4月．