

論文・報告

3000m級吊橋の静的特性と連成フラッター特性に 及ぼす各種ケーブルシステムの効果について

Comparison of Different Cable Systems on the Static and
Coupled Flutter Characteristics of a 3 000m Class Suspension Bridge

野村 國勝*
Kunikatsu NOMURA

中崎 俊三**
Shunzo NAKAZAKI

米田 昌弘***
Masahiro YONEDA

木村 公男****
Kimio KIMURA

大野 克紀*****
Katsunori OHNO

This paper deals with the static and coupled flutter characteristics of a 3 000m class suspension bridge with respect to three different types of cable system. Static analysis and eigenvalue calculations are carried out to understand static and dynamic properties. Coupled flutter oscillation is also investigated by complex eigenvalue analysis of three dimensional frame model. It is found from the results of complex eigenvalue analysis that a 40% increase in the critical wind velocity for both crossed hangers system and mono-cable system may be expected in comparison with conventional parabolic main cables system under the condition that the logarithmic decrement of the modal damping is equal to 0.02.

Keywords : suspension bridge, cable system, static properties, flutter analyses coupled flutter

1. まえがき

完成すれば世界最大となる中央支間長1 990mの明石海峡大橋は、その建設が現在急ピッチで進められているが、一方で、明石海峡大橋を上回る規模の超長大吊橋案がすでに国内外において計画されつつある。このような超長大吊橋の設計にあたっては、風荷重による静的変形特性はもちろんのこと、耐フラッター性がきわめて重要な検討項目となる。

周知のごとく、吊橋は中央支間長の増加とともに固有振動数が低下し、また、暴風時の水平たわみ量も急激に増大する。したがって、超長大吊橋の耐風安定性を確保することは、従来規模の吊橋に比べてはるかに厳しい問題であると認識されている。ところで、1 500m級程度までの従来規模の吊橋では、ねじれフラッターが耐風性を支配する振動現象となる場合が多かったのに対し、2 000m級以上の超長大吊橋では、曲げとねじれが連成するいわゆる連成フラッターが耐風性を支配する振動現象となる。それゆえ、明石海峡大橋を上回る2 500m級や3 000m級の超長大吊橋を実現させるためには、連成フラッターの発現風速を照査風速以上に高めるための工夫がきわめて重要なこととなり、今までにも、箱桁断面の上下にエアーギャップを設ける方法、2つの吊橋を並行に配置し

て吊橋構造部を横桁で結合するTwin Suspension Bridge案、質量を付加して吊橋の重量を増加させる方法、二重構造の鋼製箱桁断面内に高流動性コンクリートを充填して剛性効果と質量効果の両方を期待する方法、TMDを設置する方法、アクティブフラップなどによる能動的制御など、連成フラッターの発現風速を向上させるための数多くの提案がなされている。

一方、吊橋のケーブル構造を従来の2本ケーブル方式からモノケーブルとする案¹⁾やクロスハンガーを設置する案²⁾なども、耐風安定性を向上させる手法として古くから提案されている。しかしながら、著者らの知るかぎり、モノケーブル案やクロスハンガー案などを採用した場合の固有振動特性の詳細は、必ずしも明確にされているとは言えず、また連成フラッターに対する効果も、Selbergの簡易式を適用した検討で済まされているようである。

ところで、明石海峡大橋の全橋模型風洞試験³⁾や立体骨組みフラッター解析結果⁴⁾によれば、明石海峡大橋の連成フラッター振動波形は曲げとねじれの対称1次モードだけでなく、曲げの低次対称モードも含んだ、多自由度モード波形となっていることが報告されている。したがって、吊橋のケーブルシステムとしてモノケーブル案

*川田工業㈱取締役技術本部長 **川田工業㈱技術本部長大橋部部長 ***川田工業㈱技術本部振動研究室室長

****川田工業㈱技術本部長大橋部技術開発課係長 *****川田工業㈱技術本部長大橋部技術開発課

やクロスハンガー案などを採用した場合の連成フラッター特性を、より詳細にかつ適切に評価するためには、Selbergの簡易式による従来の検討では不十分であり、非常空気力に基づく立体骨組みフラッター解析を実施する必要があるものと言える。

モノケーブル案やクロスハンガー案は、吊橋全体系の構造特性を変更する手法の一つに位置づけられるものである。それゆえ、これら各種ケーブルシステム案が連成フラッターの発現風速を確実に向上させる手段の一つになり得ることが確認されれば、必要に応じ、エアーギャップを設ける空力的対策やTMDあるいはアクティブフラップなどによる能動的制御などとの併用効果も、さらに期待できることとなる。したがって、モノケーブル案やクロスハンガー案などの各種ケーブルシステムについての詳細な検討は、2500m級以上の超長大吊橋の実現可能性を探る有用な研究テーマの一つに位置づけられるものと思われる。そこで、著者らは、中央支間長3000mの超長大吊橋を対象として、静的特性と固有振動特性ならびに連成フラッター特性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果を詳細に検討することとした。

2. 対象とした超長大吊橋モデルとケーブルシステム

本研究では、図-1に示すような支間長3000mなる超長大吊橋を検討対象の基本系（後述するTYPE-Oに対応）とする。対象吊橋の基本条件を表-1に示す。なお、超長大吊橋を設計するにあたっては補剛桁に作用する風荷重の低減を図ることも重要であることから、ここでは明石海峡大橋の箱桁検討案⁵⁾を参考にして、図-2に示すような桁高7mの流線形箱桁を想定している。対象とし

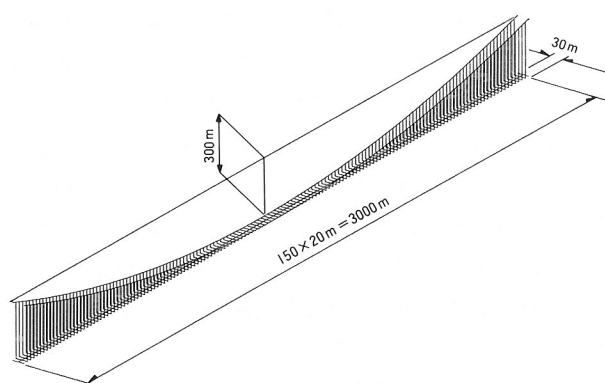


図-1 基本吊橋モデル（従来の2本のケーブル方式）

表-1 対象吊橋の基本条件

項目	条件
形式	単径間吊橋
支間長	3000m
サグ比	1/10
幅員構成	第1種第3級4車線
ケーブル間隔	30m
ハンガー形式	鉛直ハンガー

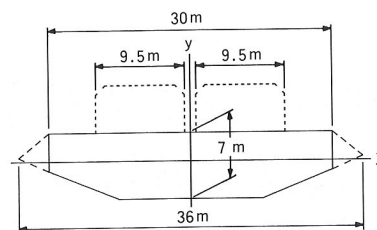


図-2 補剛桁断面

表-2 基本系吊橋モデル（2本ケーブル方式）の構造諸元

重量	ケーブル	tf/m/Br.	18.0
	吊構造部	tf/m/Br.	19.5
	合計	tf/m/Br.	37.5
重量慣性モーメント	吊構造部	tf・m ² /m/Br.	2100
	ケーブル	tf・m ² /m/Br.	4050
	合計	tf・m ² /m/Br.	6150
剛性	面内断面2次モーメント	m ⁴ /Br.	11.0
	面外断面2次モーメント	m ⁴ /Br.	110.0
	ねじれ定数	m ⁴ /Br.	22.0
ケーブル断面積		m ² /Br.	2.0

た基本系吊橋モデルの構造諸元を表-2に示す。

ところで、吊橋の構造特性は、タワー剛性やサグ比あるいは支間長比などによっても変化することが知られているが⁶⁾、これらをすべてパラメータとした場合にはきわめて多くの解析を実施する必要が生じる。そこで、著者らは、本研究の第1段階における主目的を、各種ケーブルシステムを採用した場合の定性的効果の把握に置き、サグ比については既往の実績から1/10に固定するとともに、また側径間のない最も単純な単径間吊橋を検討対象としたことを付記しておく。

ケーブルシステムについては、従来の2本ケーブル方式であるTYPE-Oに加え、図-3に示すようなクロスハンガー方式であるTYPE-C、ならびにモノケーブル方式であるTYPE-Mの3タイプに着目することとした。ここに、クロスハンガー方式とモノケーブル方式の支間中央部におけるケーブルと桁のクリアランスは、建築限界等を考慮して30mに設定している。なお、予備検討において、(橋軸方向に)斜めハンガーの有利性がほとんど認められなかったので、ハンガーは鉛直ハンガーとした。また、モノケーブル方式のメインケーブルに関する構造諸元は、従来形式におけるメインケーブルの2本分の値を有するものとし、さらにクロスハンガー方式では、断面積が0.001m²なるクロスハンガー（弾性係数は1.4×10⁷tf/m）を20m間隔ごとに設置するものとしている。

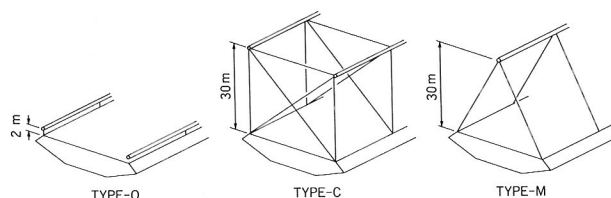


図-3 検討するケーブルシステム

3. 静的特性に及ぼす効果

従来の2本ケーブル方式(TYPE-O), クロスハンガー方式(TYPE-C), モノケーブル方式(TYPE-M)のそれぞれについて, 風荷重載荷時におけるケーブルと補剛桁の面外変位および補剛桁の面外曲げモーメントを計算することとした。NASTRANによる計算結果を図-4に示す。

ここに, 解析モデルとしては図-1に示した主桁部が $150 \times 20\text{m} = 3\,000\text{m}$ なるモデルを, また計算に用いた風荷重は, 本州四国連絡橋耐風設計基準⁷⁾に基づき, 基本風速 V_{10} を $V_{10} = 40\text{m/s}$ として算出した表-3に示す値を採用している。図-4より, ハンガー長の違いに起因し, TYPE-CとTYPE-Mの支間中央部における補剛桁の面外変位と面外曲げモーメントにはTYPE-Oと比べ若干の差異が認められるものの, それぞれのケーブルシステムでの補剛桁に作用する面外曲げモーメントの最大値は, $1.5 \times 10^4 \text{tf} \cdot \text{m}$ (応力度にして $2\,000 \text{kgf/cm}^2$)程度とほぼ等しくなっており, 暴風時の許容応力度の割増しを考慮す

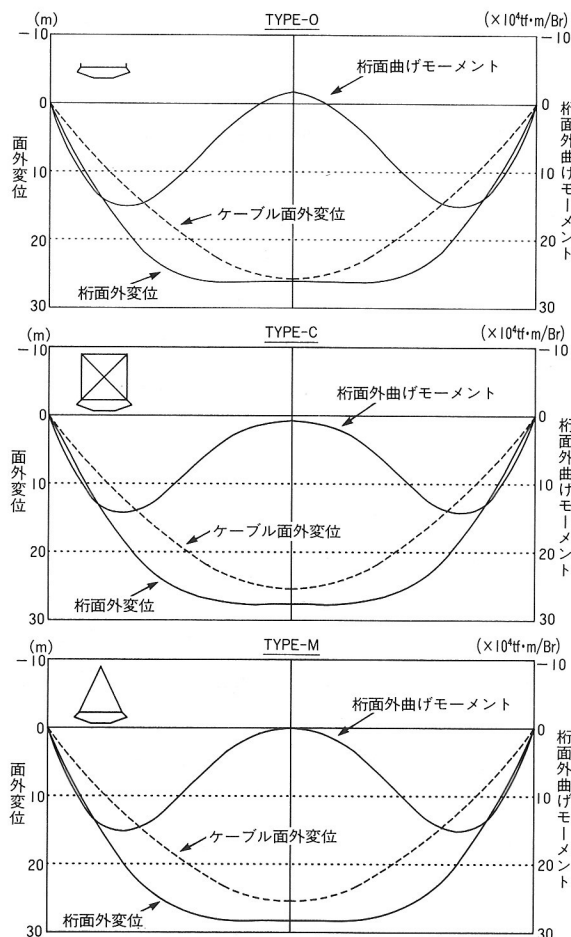


図-4 風荷重による面外変位と桁面外曲げモーメント

表-3 風荷重強度

項目	設計風速 (m/s)	抗力係数 C_o	投影面積 ($\text{m}^2/\text{m}/\text{Br.}$)	風荷重 ($\text{tf}/\text{m}/\text{Br.}$)
ケーブル	71.0	0.7	3.0	2.0
ハンガー	71.0	0.7	2.6	
補剛桁	62.0	0.8	7.0	

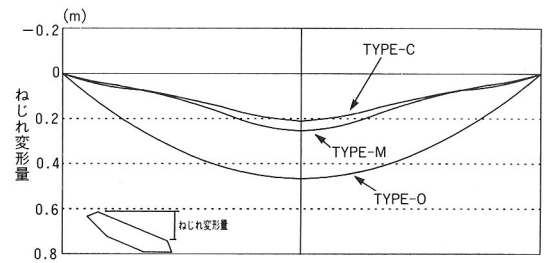


図-5 ねじれ荷重満載時の補剛桁のねじれ変形

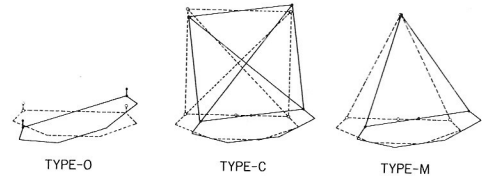


図-6 ねじれ変形状態

れば, 断面構成も十分可能であるものと言える。なお, 風荷重載荷時での支間中央部における補剛桁のねじれ角度は, TYPE-Oでは最大で $-7.6 \times 10^{-3}^\circ$ と, ほとんど無視できる程度であったのに対し, TYPE-Cでは最大で -4.1° , TYPE-Mでは最大で -5.4° の頭下げのねじれ変形が生じていたことを付記しておく。

次に, 本州四国連絡橋上部構造設計基準⁸⁾に基づいて算定した等分布ねじれ活荷重 $9.0 \text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}/\text{Br.}$ (最大偏載荷時)を補剛桁に満載し, 吊橋全体系のねじれ剛性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果について検討することとした。NASTRANを用いて計算したねじれ活荷重満載時における補剛桁のねじれ変形量を比較して図-5に示す。

図-5より, クロスハンガー方式であるTYPE-Cとモノケーブル方式であるTYPE-Mのねじれ変形量は従来の2本ケーブル方式であるTYPE-Oに比べて約1/2程度にまで減少し, 吊橋全体系のねじれ剛性が大幅に増加する結果となっていることがわかる。これは, 図-6に示した支間中央部における変形状態からもわかるように, クロスハンガーを追加したり, モノケーブルシステムを採用してハンガーと桁とで三角形を構成した場合, 補剛桁がねじれ変形する際には面外変位が必ず連成することとなり, その結果, 補剛桁の重量に起因した復元力が吊橋全体系のねじれ剛性に寄与するためと考えられる。

4. 固有振動特性に及ぼす効果

支間長 $3\,000\text{m}$ なる単径間吊橋モデルを対象として, 固有振動特性に及ぼす各種ケーブルシステムの効果について検討することとした。NASTRANによる固有振動解析によって得られたTYPE-OとTYPE-C, ならびにTYPE-Mの各ケーブルシステムに対する代表的な解析結果を, 表-4に示す。この解析結果から, 事前においても容易に予想されるように, 鉛直たわみ振動にはケーブ

表-4 固有振動解析結果

ケーブルシステム	振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)	等価重量 (tf/m/Br.)	等価重量慣性モーメント (tf・m ² /m/Br.)
TYPE-O	3次	鉛直逆対称1次	0.064	39.97	—
	5次	鉛直対称1次	0.089	38.11	—
	12次	ねじれ対称1次	0.166	—	6 145
	14次	ねじれ逆対称1次	0.187	—	6 896
TYPE-C	3次	鉛直逆対称1次	0.064	39.95	—
	5次	鉛直対称1次	0.089	38.07	—
	6次	面 外	0.106	—	422 247
	7次	面 外	0.118	—	56 000
	10次	面 外	0.133	—	134 080
TYPE-M	3次	鉛直逆対称1次	0.064	39.94	—
	5次	鉛直対称1次	0.089	38.05	—
	6次	面 外	0.106	—	372 738
	7次	面 外	0.116	—	52 258
	10次	面 外	0.135	—	124 152

ムの差異による影響が認められなかったので、以下ではねじれ振動に着目して考察することとする。

図-7～9には、各ケーブルシステムのねじれおよび面外卓越振動モードのうち、代表的なものを示した。まず図-7から、従来の2本ケーブル方式であるTYPE-Oで

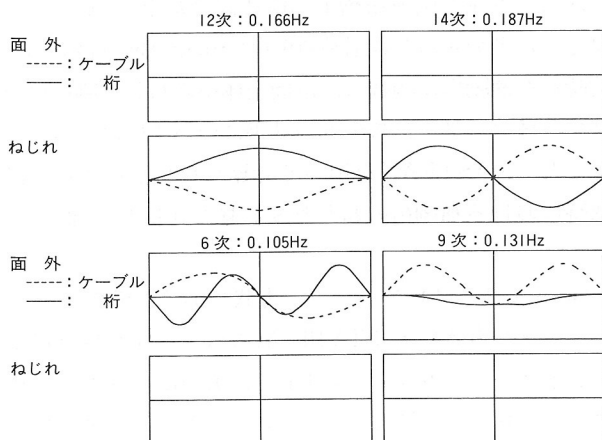


図-7 振動モード (TYPE-O)

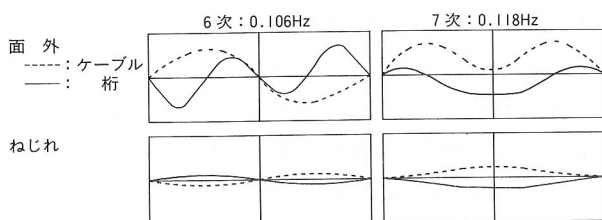


図-8 振動モード (TYPE-C)

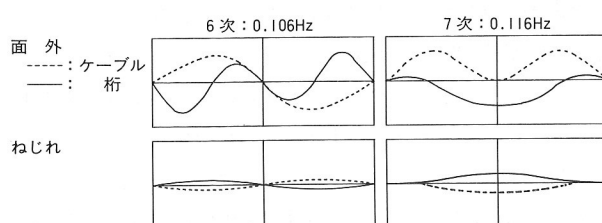


図-9 振動モード (TYPE-M)

は、従来から一般に知られているように桁やケーブルの面外振動成分を伴わないねじれ振動モードが、また、主桁のねじれ振動成分を伴わない桁やケーブルの面外振動モードが、それぞれ出現していることがわかる。これに対し、クロスハンガー方式であるTYPE-Cおよびモノケーブル方式であるTYPE-Mでは、図-8, 9からもわかるように明確な桁のねじれ振動は存在しないものの、桁やケーブルの面外振動が卓越するすべてのモードにおいて、桁のねじれ振動成分が連成する結果となっている。

したがって、表-4からもわかるように、面外卓越振動モードについて主桁に着目した等価極慣性モーメントの値はきわめて大きな値を示すこととなるが、一方で、これらのねじれ振動成分を伴った面外卓越モードの固有振動数は、従来形式 (TYPE-O) のねじれ振動数に比べて小さくなっている。すなわち、クロスハンガー方式やモノケーブル方式を採用した超長大吊橋では、明確な桁のねじれ振動は存在しないものの、一方で、桁のねじれ変形を伴った面外卓越振動が低次モードから数多く出現することとなり、連成フラッターも従来方式に比べて複雑な特性を呈するようになると総括できよう。

5. 連成フラッター特性に及ぼす効果

連成フラッターの発現風速は、その他の諸元が同じで極慣性モーメントのみが増加した場合には上昇し、ねじれ振動数のみが小さくなった場合には低下することが、一般に知られている。しかしながら、前章に示したように、クロスハンガー方式であるTYPE-Cとモノケーブル方式であるTYPE-Mには、桁のねじれ振動成分を伴った数多くの面外卓越振動モードが低次モードにおいて存在することから、その耐フラッター特性を詳細に検討するにあたっては、Selbergの簡易式による検討では不十分であり、連成フラッター解析が必要となる。

立体骨組みフラッター解析には、固有振動モードを組み合わせる方法 (モード組み合わせ法)⁹⁾と、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 (直接法)⁴⁾とがある。モード組み合わせ法は、直接法に比べ、大きな計算容量を必要としないが、超長大吊橋の解析にあたって考慮すべきモード次数についての定量的指標が与えられていないこともあり、本解析では直接法による立体骨組みフラッター解析を実施することとした。

なお、連成フラッター解析にあたっては、平板翼の非定常揚力と非定常空力モーメントのみを補剛桁に作用させるものとし、桁とケーブルの横たわみ振動に伴う抗力ならびにケーブルの鉛直たわみ振動に伴う揚力は考慮していない。また、簡単のため、有風時における横たわみの影響についても無視することとした。ここに、桁とケーブルの横たわみ振動に伴う抗力ならびにケーブルの鉛

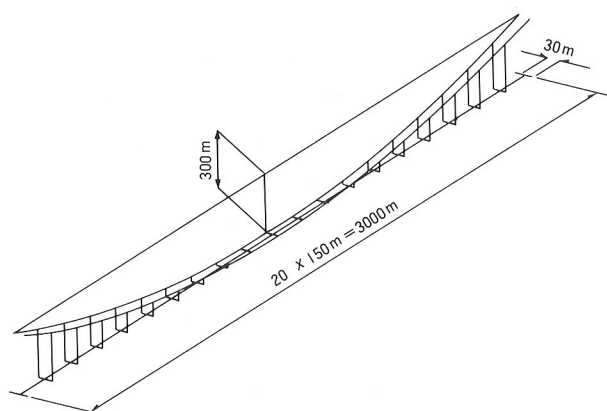


図-10 連成フラッター解析モデル (TYPE-O)

直たわみ振動に伴う揚力を無視した解析は、一般に設計にとって安全側の結果を与えるものである。

連成フラッターの解析は、計算時間の短縮を考え、主桁部を $20 \times 150\text{m} = 3000\text{m}$ に分割したモデルを用いて実施することとした。ただし、換算振動数 k が $k=1000$ なる場合(ほぼ無風状態に対応する)に得られた連成フラッターに関与する低次モードの振動数は、前章に示した固有振動解析結果とほぼ一致することを事前に確認している。

参考までに、従来形式であるTYPE-Oに対する連成フラッター解析モデルを図-10に示す。ここに、鉛直ハンガーの断面積やクロスハンガー方式におけるクロスハンガーの断面積は、図-1に示した $150 \times 20\text{m} = 3000\text{m}$ なるモデルの合計値と等しくなるように割増することとしている。TYPE-O (従来形式)とTYPE-C (クロスハンガー方式)ならびにTYPE-M (モノケーブル方式)の3タイプについて、連成フラッター解析によって算出した風速と空力減衰の関係 ($V-\delta$ 図)をそれぞれ図-11~13に示す。

これらの図において、空力減衰が正から負になる風速が、構造減衰を無視した場合のフラッター発現風速に対応する。本研究で対象としたような支間長 3000m なる超長大吊橋の構造減衰については、議論の余地があるものと思われるが、ここでは充腹桁を有する吊形式橋梁の値として一般に採用されることの多い $\delta=0.02$ なる構造対数減衰率を仮定することとした。

$\delta=0.02$ なる構造対数減衰率を有すると仮定した場合、および構造減衰を無視した場合の連成フラッター発現風速を表-5に示す。表-5より、クロスハンガー方式とモノケーブル方式の連成フラッター発現風速は、従来方式に比べ、構造減衰を無視した場合には1割程度の増加しか期待できないものの、 $\delta=0.02$ なる構造対数減衰率を仮定した場合には、いずれの方式も4割程度も上昇する結果となっていることがわかる。これは、図-11~13からわかるように、クロスハンガー方式とモノケーブル方式を採用した場合には、従来の2本ケーブル方式に比べ、

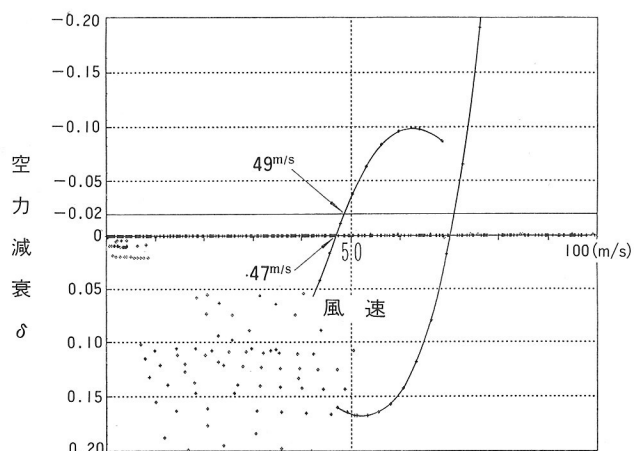


図-11 風速-空力減衰グラフ (TYPE-O)

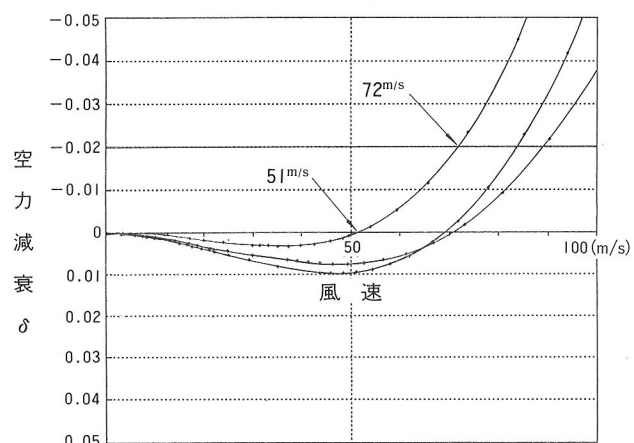


図-12 風速-空力減衰グラフ (TYPE-C)

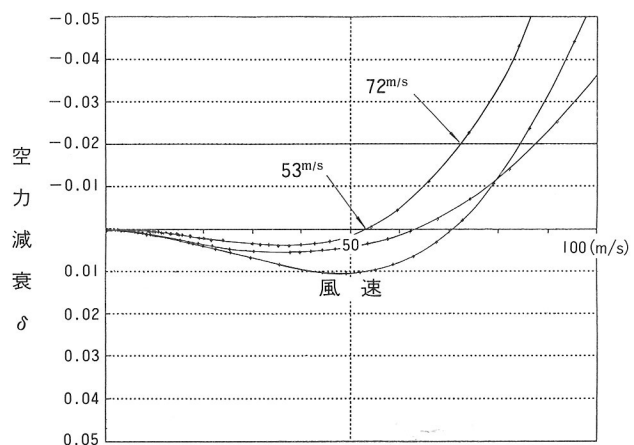


図-13 風速-空力減衰グラフ (TYPE-M)

表-5 連成フラッターの発現風速

	連成フラッターの発現風速	
	構造対数減衰率 δ	
	$\delta=0$	$\delta=0.02$
TYPE-O	47m/s	49m/s
TYPE-C	51m/s	72m/s
TYPE-M	53m/s	72m/s

等価極慣性モーメントの増加に伴って連成フラッターの励振力がきわめて小さくなったことに起因する。

なお図-14～16には、構造減衰を無視した場合のそれぞれのケーブルシステムに対する、フラッターモードを示す。ここではフラッター発生時における鉛直、面外およびねじれ振動成分を固有周期の1/4ステップごとに示した。これらの図からも、従来方式では主桁やケーブルの面外振動を伴わない連成フラッターが出現しているのに対し、クロスハンガー方式とモノケーブル方式では面外振動を伴った連成フラッターが発現していることが理解できよう。

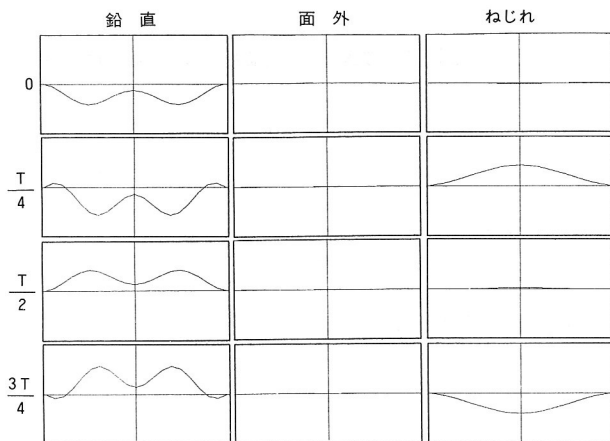


図-14 桁のフラッターモード図 (TYPE-O)

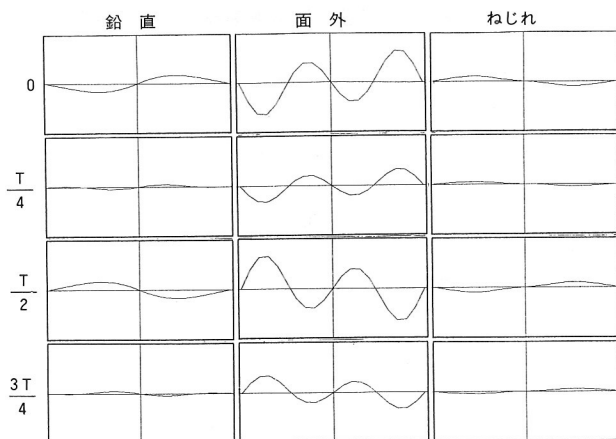


図-15 桁のフラッターモード図 (TYPE-C)

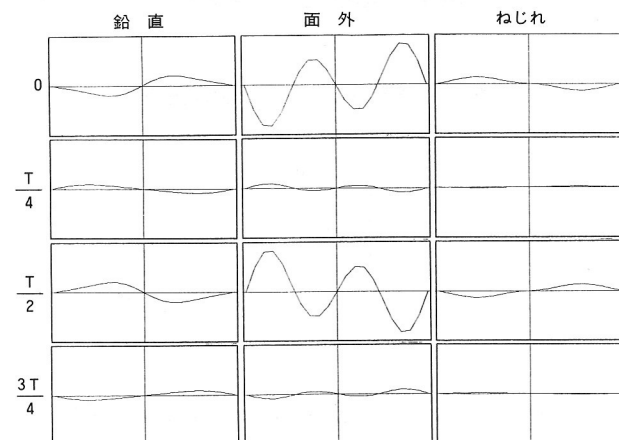


図-16 桁のフラッターモード図 (TYPE-M)

6. まとめ

以上の検討結果より、ケーブルシステムとしてのクロスハンガー方式とモノケーブル方式のそれぞれは、超長大吊橋の連成フラッター発現風速を上昇させる有効な一手段になり得るものと言えよう。ただし、本研究は、側径間のないサグ比1/10なる単径間吊橋に限定した検討であることから、今後は支間長比やタワー剛性ならびにサグ比などもパラメータとした解析、さらには有風時における横たわみの影響を考慮した連成フラッター解析なども実施し、連成フラッター特性に及ぼすクロスハンガー方式とモノケーブル方式の有効性について、より詳細な研究を進めていく予定である。本研究が、今後の超長大吊橋の耐風安定性の検討に対し、有用な資料になることを心より願う次第である。

最後に、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⁴⁾を使用させていただきました。両先生には、本研究を実施するにあたり貴重なご助言も賜り、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) Fritz Leonhardt : Brücken - Ästhetik und Gestaltung-, Deutsche Verlags-Anstalt, 1982.
- 2) 亀井 浩・落合重俊・福田孝一・阿部喜久・西島晃・東 親佑：対角ステイを有する吊橋の研究，住友重機械技報，Vol.17, No.47, pp.13～41, 1969年8月。
- 3) 宮田利雄・保田雅彦：明石海峡大橋の耐風性に関する大型風洞試験，構造工学論文集，Vpl.39A, pp.861～874, 1993年3月。
- 4) 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。
- 5) 土木学会 本州四国連絡橋耐風研究小委員会作業班：本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書，1985年3月。
- 6) M.Yoneda and M. Ito : Parametric Analyses of Natural Frequencies of Lower Vibration Modes of Suspension Bridges, Proc. of JSCE, No.380/I-7, pp.243～246, April, 1987.
- 7) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準 (1976)・同解説，1976年3月。
- 8) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1989年4月。
- 9) 田中 洋・山村信道：長大橋梁の非定常空気力係数による連成フラッター解析，第11回風工学シンポジウム論文集，pp.61～66, 1990年12月。