

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

米田昌弘*・木村公男**・大野克紀***・中崎俊三****・野村国勝*****

By Masahiro YONEDA, Kimio KIMURA, Katsunori Ohno, Shunzo NAKAZAKI and Kunikatsu NOMURA

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 analyses 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 analyses 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.

1. まえがき

完成すれば世界最大となる中央支間長1990m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。

周知の如く、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、1500m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、2000m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2500m級や3000m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¹⁾、2つ

* 工博 川田工業株式会社技術本部振動研究室長 (〒550 大阪市西区北堀江1-22-19)
 ** 工修 川田工業株式会社技術本部長大橋部係長 (〒114 東京都北区滝野川1- 3-11)
 *** 川田工業株式会社技術本部長大橋部 (同 上)
 **** 工修 川田工業株式会社技術本部長大橋部部長 (同 上)
 ***** 工修 川田工業株式会社技術本部長 (同 上)

の吊橋を並行に配置して吊構造部を横桁で結合するTwin Suspension Bridge案²⁾、質量を付加して吊橋の重量を増加させる方法^{3)・4)}、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⁵⁾、TMDを設置する方法⁶⁾、アクティブフラップなどによる能動的制御^{7)・8)}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⁹⁾やクロスステイを設置する案^{10)・12)}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、著者らの知る限り、モノケーブル案やクロスステイ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⁸⁾。ところで、明石海峡大橋の全橋模型風洞試験¹³⁾や立体骨組みフラッター解析結果¹⁴⁾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2次以降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やクロスステイ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、非定常空気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ステイ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、エヤ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ステイ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。その結果、超長大吊橋の耐風設計を実施する上できわめて有用な知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

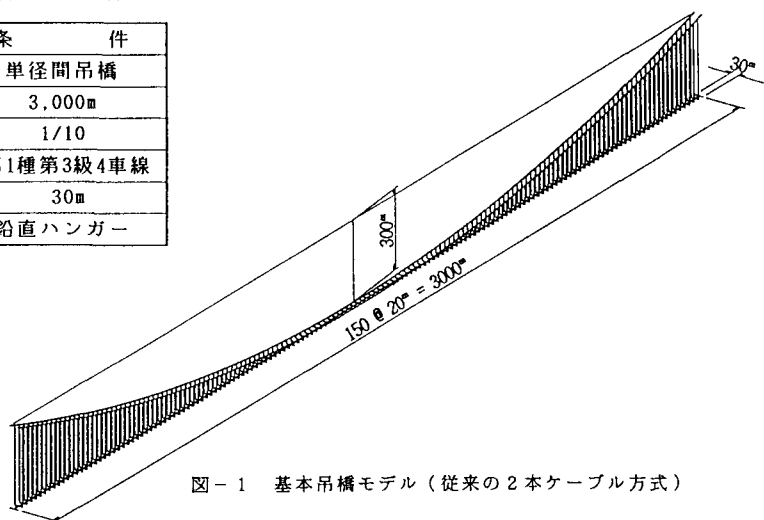
2. 対象とした超長大吊橋モデルとケーブルシステム

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-0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¹⁵⁾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¹⁶⁾、これらをすべてパラメーターとした場合にはきわめて多くの解析を実施する必要がある。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-0に加え、図-3に示すようなクロスステイ方式である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、クロスステイ方式とモノケーブル方式の支間中央部におけるハンガー長は、建築限界等を考慮して30mに設定している。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、クロスステイ方式では断面積が 0.001m^2 なるクロスステイ（弾性係数は $1.4 \times 10^7 \text{tf/m}$ ）を20m間隔ごとに設置するものとしている。

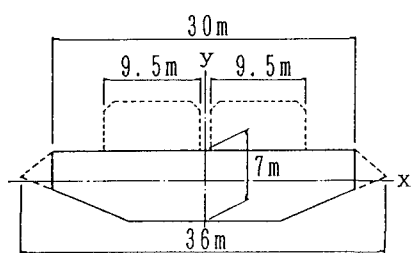
表－１ 対象吊橋の基本条件

項 目	条 件
形 式	単径間吊橋
支 間 長	3,000m
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



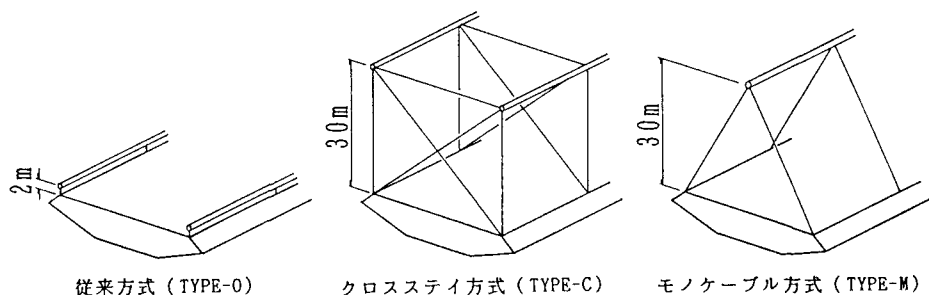
図－１ 基本吊橋モデル（従来の２本ケーブル方式）

表－２ 基本系吊橋モデル（２本ケーブル方式）の構造諸元



図－２ 流線形箱桁断面

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



図－３ 対象としたケーブルシステム

3. 静的特性に及ぼす効果

従来の2本ケーブル方式 (TYPE-O), クロスステイ方式 (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@20m=3000m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¹⁷⁾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15万 $\text{tf}\cdot\text{m}$ (応力度にして $2000\text{kgf}/\text{cm}^2$) 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¹⁸⁾に基づいて算定した等分布活荷重 $9.0\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m}/\text{Br.}$ なるねじれ荷重 (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, クロスステイ

表-3 風荷重強度

項 目	設計風速 (m/s)	抗力係数 C_D	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	1.2
ハンガー	71.0	0.7	2.6	
補 剛 桁	62.0	0.8	7.0	2.0

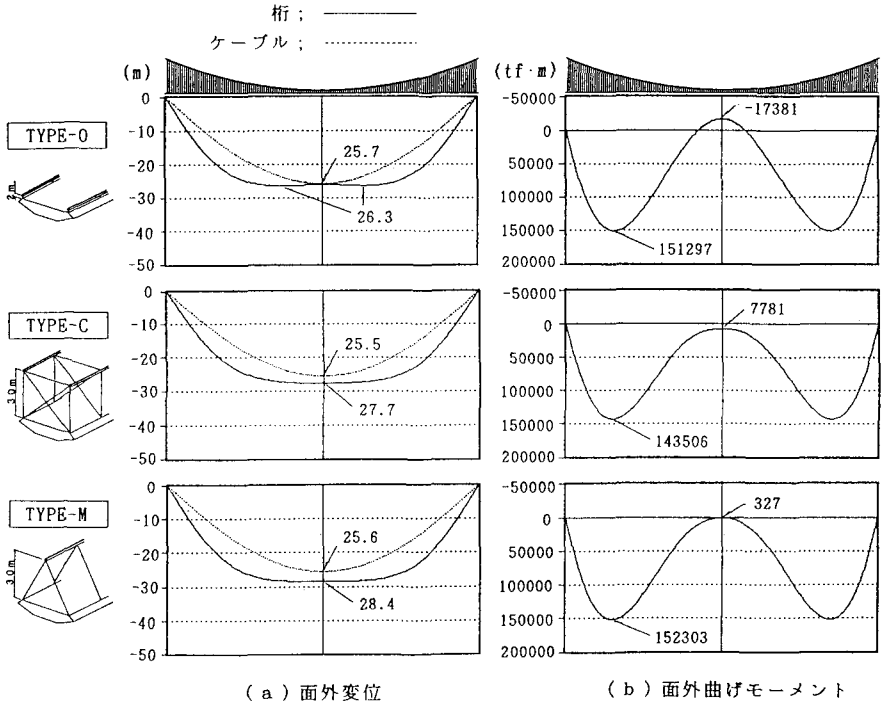


図-4 風荷重を載荷した場合の解析結果

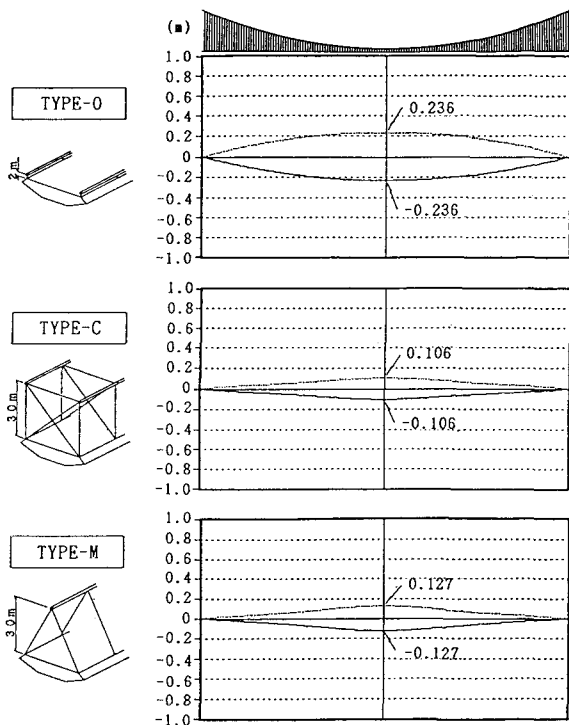


図-5 ねじれ荷重（最大偏載荷時）を満載した場合のねじれ変形

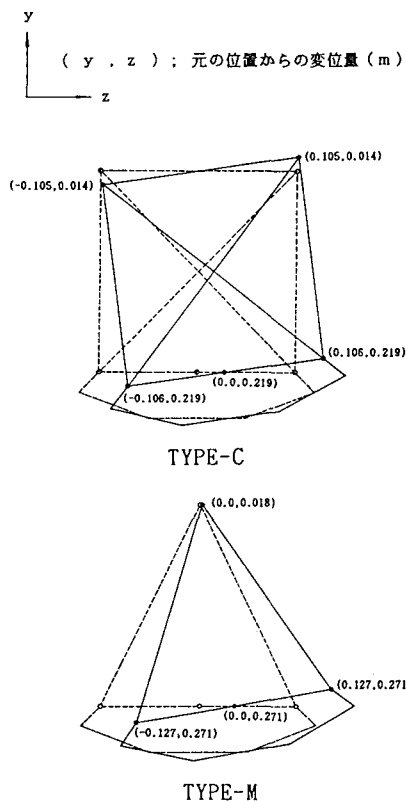


図-6 ねじれ荷重（最大偏載荷時）を満載した場合における支間中央部の変形状態

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-0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、クロスステイを追加したり、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面外方向の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3000m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-0とTYPE-CならびにTYPE-Mの18次までの固有振動数を表-4に、また、それぞれのケーブルシステムに対する代表的な固有振動モードを図-7～図-9に示す。なお、ここに示した固有振動解析結果は、図-1に示したような主桁部を150@20m=3000mに分割したモデルに対して算出されたものである。これらの結果から、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ルシステムの差異による影響が認められないことが理解できよう。それゆえ、以下ではねじれ振動に着目して考察することとする。

まず、図-7から、従来の2本ケーブル方式であるTYPE-0では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、クロスステイ方式である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、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を計算すれば表-5に示すように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-0）のねじれ振動数に比べて小さくなっている。すなわち、クロスステイ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思括できよう。

表-4 固有振動数

振動次数	固有振動数 (Hz)		
	TYPE-0	TYPE-C	TYPE-M
1 次	0.031	0.031	0.031
2 次	0.053	0.052	0.052
3 次	0.064	0.064	0.064
4 次	0.073	0.075	0.073
5 次	0.089	0.089	0.089
6 次	0.105	0.106	0.106
7 次	0.130	0.118	0.116
8 次	0.130	0.130	0.130
9 次	0.131	0.130	0.130
10 次	0.135	0.133	0.135
11 次	0.158	0.156	0.158
12 次	0.166	0.167	0.167
13 次	0.168	0.187	0.194
14 次	0.187	0.198	0.198
15 次	0.198	0.204	0.207
16 次	0.203	0.233	0.233
17 次	0.221	0.237	0.240
18 次	0.234	0.268	0.268

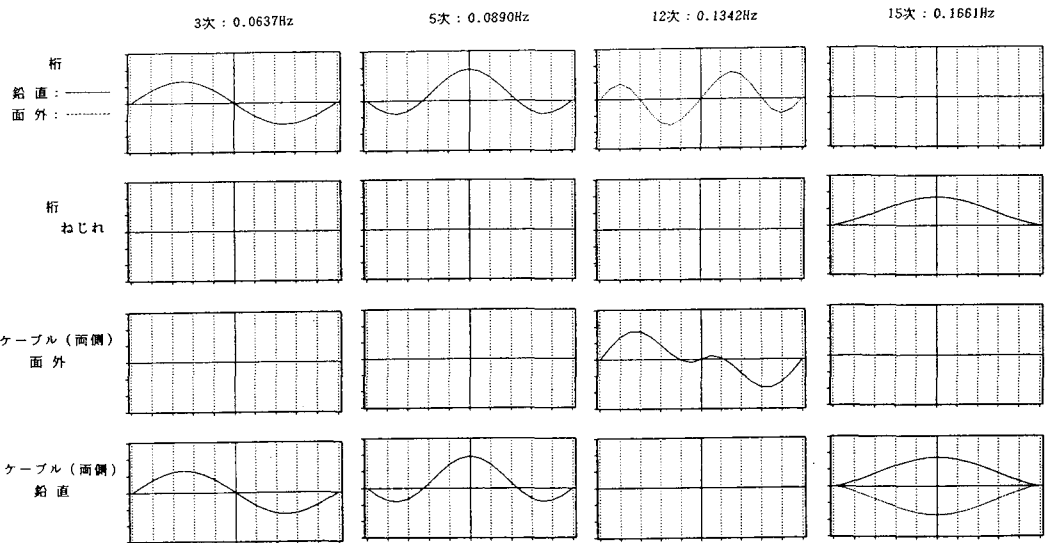


図-7 従来方式（TYPE-0）に対する固有振動解析結果の一例

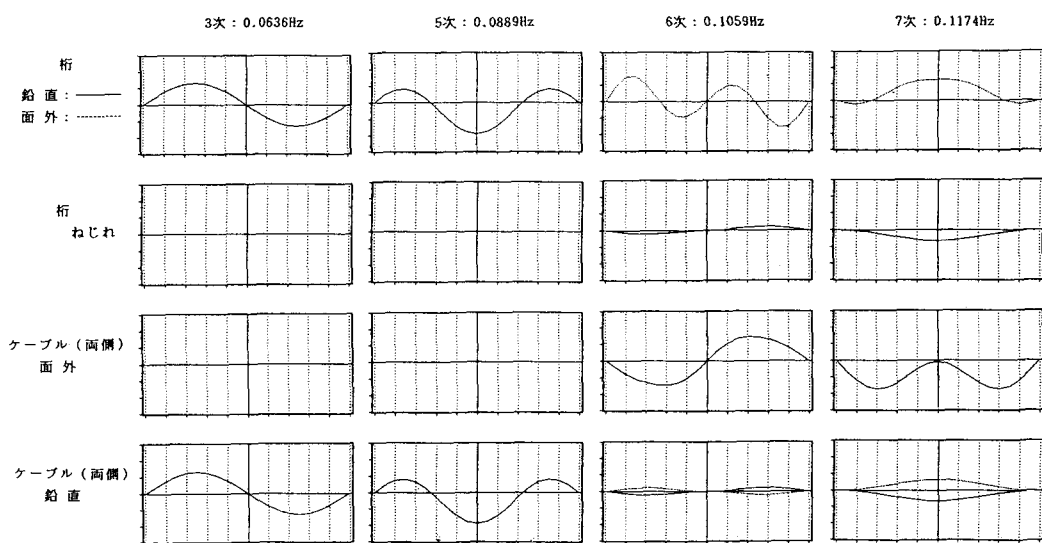


図-8 クロスステイ方式 (TYPE-C) に対する固有振動解析結果の一例

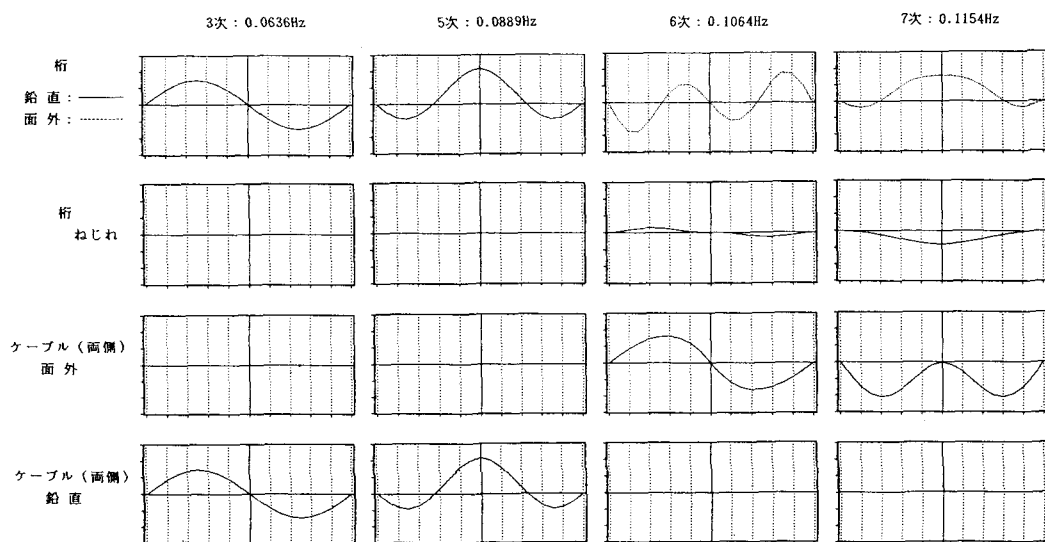


図-9 モノケーブル方式 (TYPE-M) に対する固有振動解析結果の一例

表-5 各振動モードの等価重量と等価重量慣性モーメント

ケーブルシステム	振動次数	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-0	3 次	0.064	39.97	—
	5 次	0.089	38.11	—
	12 次	0.166	—	6145
	14 次	0.187	—	6896
TYPE-C	3 次	0.064	39.95	—
	5 次	0.089	38.07	—
	6 次	0.106	—	422247
	7 次	0.118	—	56000
	10 次	0.133	—	134080
	13 次	0.187	—	54192
TYPE-M	3 次	0.064	39.94	—
	5 次	0.089	38.05	—
	6 次	0.106	—	372738
	7 次	0.116	—	52258
	10 次	0.135	—	124152
	13 次	0.194	—	42507

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、クロスステイ方式である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）¹⁹⁾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）¹⁴⁾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

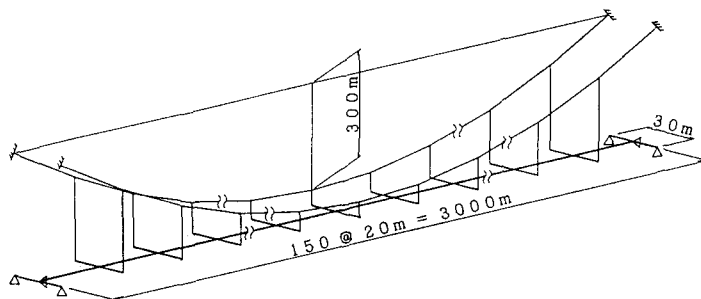


図-10 連成フラッター解析で使用了モデル（従来方式）

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@150m=3000m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とその振動数は、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-0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ステイ方式におけるクロスステイの断面積は、図-1に示した150@20m=3000m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-0(従来形式)とTYPE-C(クロスステイ方式)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～図-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

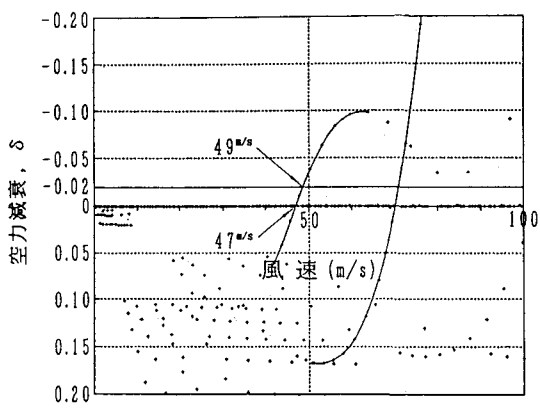


図-11 従来方式 (TYPE-0) の $V-\delta$ 曲線

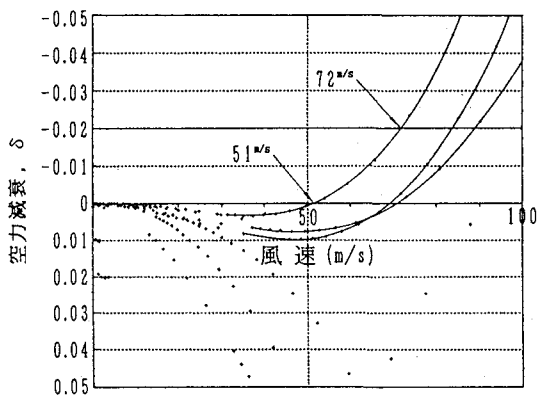


図-12 クロスステイ方式 (TYPE-C) の $V-\delta$ 曲線

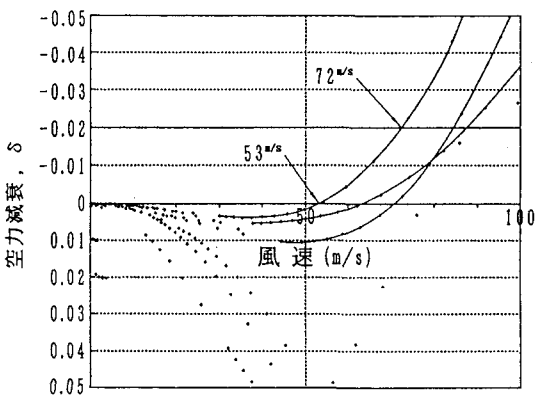


図-13 モノケーブル方式 (TYPE-M) の $V-\delta$ 曲線

表-6 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-0	47 m/s	49 m/s
TYPE-C	51 m/s	72 m/s
TYPE-M	53 m/s	72 m/s

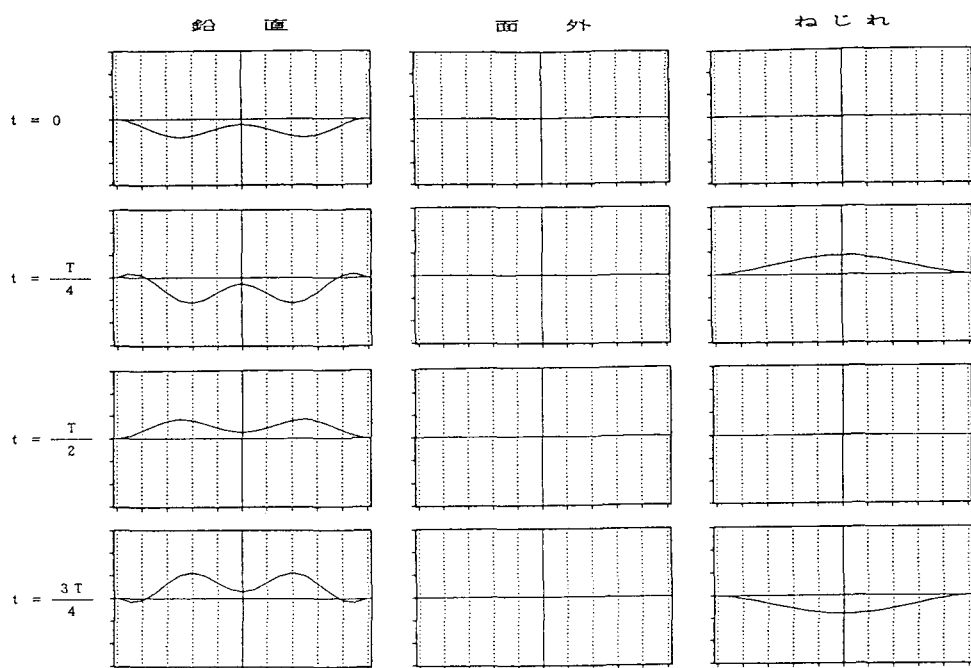


図-1 4 従来方式 (TYPE-0) のフラッターモード ($\delta=0$, $V_{cr}=47\text{m/s}$)

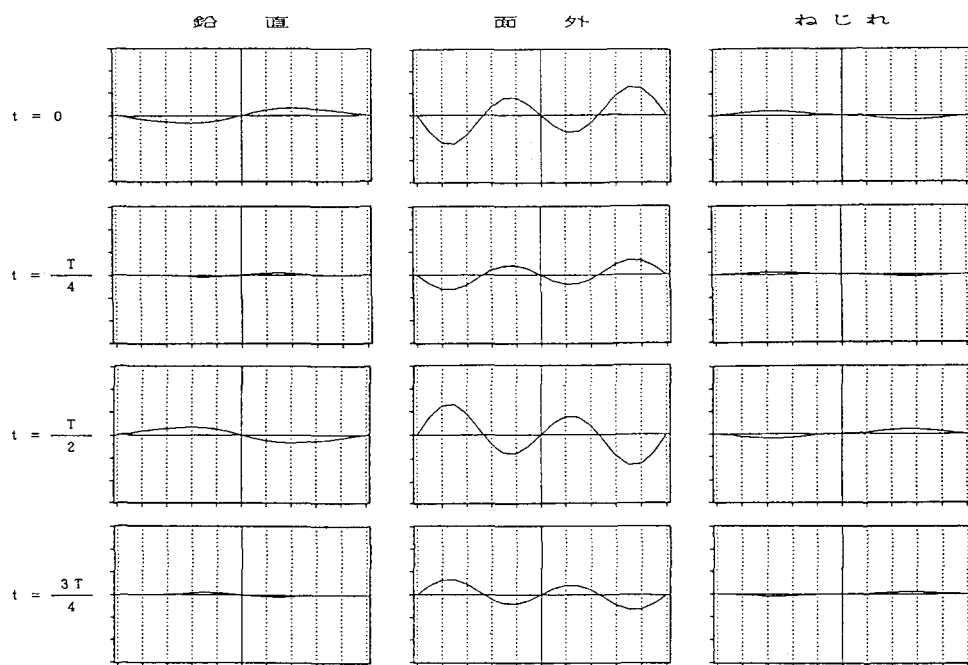
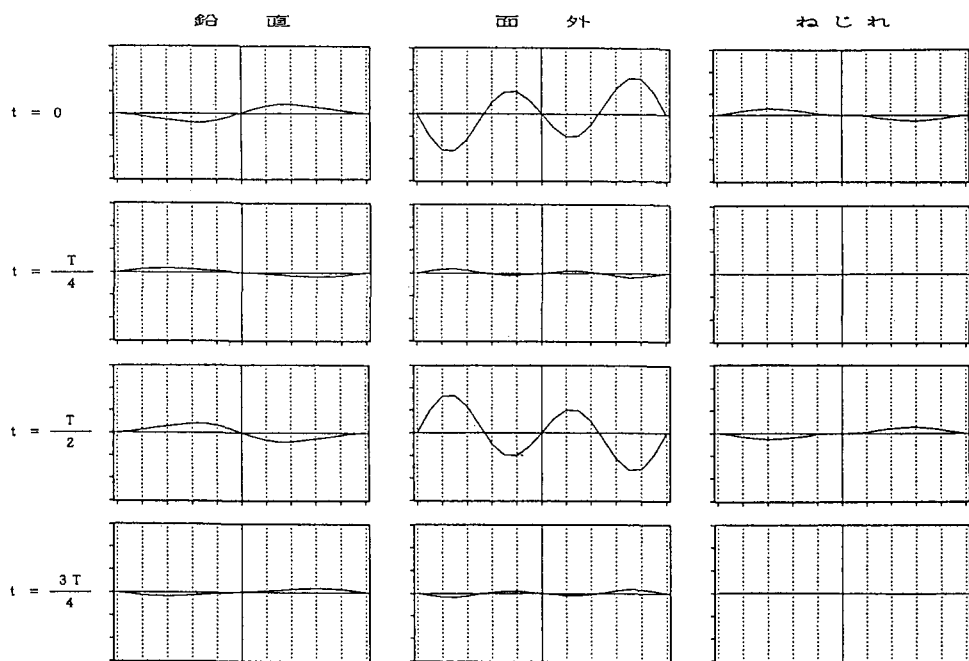


図-1 5 クロスステイ方式 (TYPE-C) のフラッターモード ($\delta=0$, $V_{cr}=51\text{m/s}$)



図－１６ モノケーブル方式（TYPE-M）のフラッターモード（ $\delta=0$ ， $V_{cr}=53\text{m/s}$ ）

一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－６に示す。表－６より，クロスステイ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～図－１３からわかるように，クロスステイ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，等価極慣性モーメントの増加にともなって連成フラッターの励振力（空力減衰）がきわめて小さくなったことに起因する。なお，図－１４～図－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が，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，クロスステイ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。

6. まとめ

本論文は，超長大吊橋の実現可能性を探ることを目的として，流線形箱桁断面を有する支間長3000mの単径間吊橋モデルを対象に，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について検討したものである。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 従来の2本ケーブル方式とクロスステイ方式ならびにモノケーブル方式について，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した結果、補剛桁に作用する面外曲げモーメントの最大値は15万tf・m(応力度にして2000kgf/cm²)程度とそれぞれほぼ等しく、暴風時の許容応力度の割増しを考慮すれば、断面構成も十分可能であることが言えた。また、等分布活荷重9.0tf・m/m/Br.なるねじれ荷重(最大偏載荷時)を補剛桁に満載した結果、クロスステイ方式とモノケーブル方式のねじれ変形量は、従来の2本ケーブル方式と比べて1/2程度にまで減少し、吊橋全体のねじれ剛性が大幅に増加する結果が得られた。これは、従来の2本ケーブル方式においてクロスステイを追加したり、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面外方向の復元力が吊橋全体のねじれ剛性に寄与するためと考えられる。

(2) 流線形箱桁断面を有する従来の2本ケーブル方式では、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が、それぞれ出現する。これに対し、クロスステイ方式やモノケーブル方式を採用した場合、明確な桁のねじれ振動は出現しないものの、一方で、連成フラッターの発現に關与する桁のねじれ変形を伴ったケーブルや桁の面外卓越振動が低次モードから数多く出現する。さらに、これらの桁のねじれ変形を伴った面外卓越振動モードの等価極慣性モーメントはきわめて大きく、したがって、クロスステイ方式やモノケーブル方式の耐フラッター特性の検討にあたっては、Selbergの簡易式では不十分であり、立体骨組みフラッター解析を実施する必要がある。

(3) 直接法による立体骨組みフラッター解析を実施した結果、クロスステイ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た。これは、クロスステイ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、等価極慣性モーメントの増加にともなって連成フラッターの励振力(空力減衰)がきわめて小さくなったことに主として起因するものと考えられる。

以上の検討結果より、ケーブルシステムとしてのクロスステイ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、作用空気力も平板翼の非定常空気力を用い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ーとした解析、さらには流線形箱桁断面に作用する非定常空気力の適用や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ステイ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、超長大吊橋の耐風安定性を検討する実務技術者にとって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¹⁴⁾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) 奥川淳志：ランタオ連絡橋計画，道路，pp.67～70，1992年1月。
- 2) Richardson, J.R.: The Development of the Concept of the Twin Suspension Bridge, National Maritime Institute, NMI R125, August, 1981.
- 3) Yoneda, M. and M. Ito: Effects of Dead Weight on Aerodynamic Stability of Long-Span Suspension Bridges, Proc. of JSCE, No.368/I-5, pp.135～145, April, 1986.

- 4) 野村国勝・中崎俊三・前田研一・成田信之：流線形箱桁形式吊橋の補剛特性に及ぼす自重の影響に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第1巻，pp.457～464，1993年7月．
- 5) 中村俊一・森園康之・長井正嗣・藤野陽三：合成補剛桁を有する超長大吊橋の提案，橋梁と基礎，Vol. 26，No.12，pp.37～42，1992年12月．
- 6) 延藤 遵・藤野陽三・伊藤 学：橋桁の連成フラッターに対するT.M.D.の制振効果について，土木学会論文集，第398号／I-10，pp.413～416，1988年10月．
- 7) 小林紘士・永岡 弘：吊橋のフラッターの能動的制御，第11回風工学シンポジウム論文集，pp.103～106，1990年12月．
- 8) M.A.Astiz and E.Y.Andersen：On Wind Stability of Very Long Spans in Connection with a Bridge across the Strait of Gibraltar, Proc. of The 2nd Symposium on Strait Crossings, Trondheim (Norway)，pp.257～264，June，1990．
- 9) Fritz Leonhardt：Brücken -Ästhetik und Gestaltung-，Deutsche Verlags-Anstalt，1982．
- 10) Klaus H. Ostenfeld：Innovative Structural Systems for the Gibraltar Strait Crossing Project, IASS-CSCE International Congress, Toronto, pp.231～242，July，1992．
- 11) 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．
- 12) 保田雅彦・鈴木周一：超長大吊橋の構造特性と耐風安定化構造の一考察，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，pp.686～687，1992年9月．
- 13) 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．
- 14) 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．
- 15) 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．
- 16) Yoneda, M. 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．
- 17) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準（1976）・同解説，1976年3月．
- 18) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1989年4月．
- 19) 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．

（1993年9月16日受付）