

補剛桁剛性に着目した吊橋の連成フラッター発生に関する研究

PARAMETRIC STUDY ON THE CRITICAL FLUTTER MODE OF A SUSPENSION BRIDGE

宮田利雄* 山田均** 矢野一正***

By Toshio Miyata, Hitoshi Yamada and Kazumasa Yano

According to recent studies on coupled flutter occurrence of full suspension bridges their critical natural flutter modes do not always develop from the normal fundamental torsional natural mode. When the critical wind speed for the flutter instability must be investigated by the usual wind tunnel test using 2 dimensional sectional model, it is a very serious problem related to essential wind tunnel test technique. This paper presents results of parametric studies in rigidities of the suspended deck and the key feature of a suspension bridge in the critical flutter occurrence is discussed. Besides change of the natural mode of a suspension bridge under the aerodynamic force was also intensively studied as the wind speed.

1. まえがき

中央径間長が2000m級を越える長大吊橋では、ねじれの振動数、曲げとねじれの振動数比の低下などの理由により、曲げねじれフラッターが現実的な風速で発生し、耐風安全性のキーとなりうる。著者らが実施してきた種々の状況および条件を考慮した曲げねじれフラッターに関する複素固有値解析¹⁾²⁾³⁾では、吊橋の状況によっては、従来の簡易解析法において選択されていた曲げ、ねじれの固有モードの組合せと、発達し最も低い風速で発生するフラッター振動モードとが食い違うことがあるということ、微妙な吊橋間の特性差により選択されるフラッター発現の過程も異なることがあることを報告してきた。

フラッター解析の過程では、風速に対応して得られる固有振動モードは、風速が上昇するにつれ、鉛直曲げ、横曲げ、ねじれの各成分が複雑に影響しあい変化し、フラッター発生時の振動モード形は、無風時の振動モード形とは大きく変化する。したがって、限界となるフラッターモードの選択のメカニズムについては、その要因となるべきものは明確にできていない。

例えば、古い明石海峡大橋検討案において、補剛桁が箱桁のものとトラス桁のものとにフラッター解析を行った結果では、トラス桁の場合は横たわみ卓越のねじれモード(ケーブルの横たわみと連成している)が発達し、フラッター限界風速を与えるのに対し、箱桁の場合は通常、固有値解析で最低次のねじれモードと

*	工博	横浜国立大学工学部	教授	(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)
**	工博	横浜国立大学工学部	助教授	(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)
***		横浜国立大学工学部	大学院学生	(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)

して選出される純ねじれの固有振動モード（ケーブルの横たわみ連成はほとんど見られない）を起点とし、その分枝で空気力によりフラッターの発生がみられ限界風速を与えていた。違いは少なからずあるように見えるが、これら二つの形式（箱桁、トラス桁）では、実際の補剛桁の形式は大きく異なっているものの、解析モデル上での大きな相違点は、桁とケーブルの諸剛性と、桁高の違いからくる桁のせん断中心とハンガー取り付け点の相対的な位置関係の2点にすぎない。横曲げ振動とねじれ振動との連成の度合は後者に依存しているが、フラッター解析を実施するとこの相対的な位置関係（モデル上構成されるV形の梁の深さ：図1）はフラッター振動数を変化はさせるが、フラッターに発達する固有振動モードの風速に対する変化の過程には影響は小さいようで、フラッター発生固有振動モード選択に関しては、むしろ桁の剛性特性が関与していることが示唆されている³⁾。

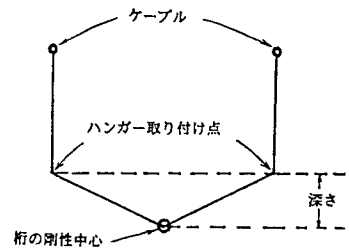


図1 モデル化した桁の断面構成

そこで本研究では、明石海峡大橋の設計案の1つであった箱桁案と最近の設計案のトラス案の補剛桁の剛性に着目し、各剛性を数値として比較したときに双方で大きな違いのみられた横曲げ剛性を変化させ、フラッター解析を行いフラッターの風速に対する発生状況の変化、及びモード選択の状況の検討を行なった。

2. 解析手法について

解析手順は一連の報告^{1) 2) 3)}で示した方法を踏襲しており、要約すると次のようになる。

- ① 吊橋全体系は、補剛桁の剛性を代表し桁の剛性中心に位置する梁と、ハンガー取り付け点と剛性中心を相対的な位置関係に保つための剛性の大きい梁、曲げ剛性を持たないハンガー及び主ケーブル、さらに力学的にモデル化した主塔バネモデルで構成された三次元骨組みモデルとする。
- ② 平板翼に作用する非定常揚力、モーメントを補剛桁の鉛直曲げ、ねじれ振動に伴う非定常揚力、モーメントとして作用させる。
- ③ 換算振動数 k をパラメーターとして、複素固有値解析を行う。各振動モードにおいて、仮定した1つの k に対して、風速 U 、複素固有振動数 $f = f_R + i f_I$ がそれぞれ決まり、 $k = \infty$ に相当する無風時の状態で得られる固有振動モードを起点として、複素固有振動数の動き方を考慮しながらフラッターが発生すると判断できるまでの状況を追跡する。

解析ケース	桁剛性 ($\times 10^8 \text{ t m}^2 / \text{Br.}$)			剛性の比 (ねじれ剛性：横曲げ剛性)
	ねじれ	横曲げ	鉛直曲げ	
①	1. 1 7	5 6. 4	4. 3 8	約 1：4 8
②	1. 1 7	3 1. 0	4. 3 8	約 1：2 6. 5
③	1. 1 7	2 8. 2	4. 3 8	約 1：2 4
④	1. 1 7	1 4. 1	4. 3 8	約 1：1 2
⑤	1. 1 7	2. 8 2	4. 3 8	約 1：2
⑥	1. 1 7	1. 4 1	4. 3 8	約 1：1

表1 桁剛性諸元、剛性比

3. 解析モデルについて

解析モデルには、明石海峡大橋のトラス補剛桁設計案の内の1つの案を基本に目的に沿う形で変更を与えた三次元骨組みモデルを用いた。構造系の全体のレイアウトは設計案通りとし、径間長はケーブルについて960m+1990m+960mであり、ケーブルサグ比は中央径間で1/10を使用している。桁の剛性は、基本としたトラス桁案に対し桁の横曲げ剛性をねじれ剛性について表1に示すように変え、剛性関係変化に対するフラッター変化の状況を追跡することとした。なお、解析ケースの内、剛性③はトラス桁案の剛性関係であり、剛性⑤はほぼ箱桁案の剛性と等しい値を設定している。

4. 解析結果の検討

報告されているフラッター解析は¹⁾²⁾³⁾、より実際に近い解析モデルを設定し、より合理的なフラッター限界風速を求めようとするものであったが、今回の研究では固有値解析による起点となる固有振動モードが、どのように変化し発達してフラッターモードとなるのか、そのフラッター固有モード選択の状況と剛性パラメータの影響を明確にすることに重点をおき解析を行った。

1) 固有値解析結果

まず、各解析条件を与えて立体骨組みモデルを用い固有振動解析を行った。これは空気力の影響の無い無風時の振動特性を条件毎に把握するためであり、フラッター発達の起点となる状況を把握するしその後の検討の基礎とするためでもある。得られた固有振動モードの内、曲げねじれフラッター発達に影響が大きいと思われる、桁のねじれを含んだ固有振動モードを、各解析ケース毎に図2. 1A(表1の剛性①)、図2. 2A(表1の剛性②)、図2. 3A(表1の剛性③)、図2. 4A(表1の剛性⑤)に示す。なお、表1で剛性関係が④、⑤、⑥の場合ではフラッター発生時の風速に対する変化が類似しているため、剛性⑤(箱桁案の剛性)で以下代表して示すこととする。ここで各場合ともに、横たわみ自由度卓越のねじれ対称一次固有振動モードを[TH1]、横たわみ卓越のねじれ逆対称一次固有振動モードを[TH2]、そして通常、ねじれの最低次モードとして二次元部分模型試験で従来選択されている純ねじれの対称一次固有振動モードを[TT]とし、以下これらの略称で呼ぶこととする。

全ての場合を通じて、ねじれは桁の横たわみと連成しており、鉛直たわみとの連成は全くみられない。固有振動モードを個別に見ると、固有振動モード[TH1]、[TH2]は桁の横たわみに付随して生じたようなねじれ振動であり、ケーブルの横たわみとも大きく連成している。また、固有振動モード[TT]は、純ねじれ振動であるためケーブルの鉛直たわみとのみ大きく連成し、横たわみとの連成は小さい。各固有振動振動数については、純ねじれモード[TT]は全ての解析ケースでねじれ剛性に違いはないため、ほぼ同じ値(0.161~0.162Hz)であるが、横たわみ振動を含む固有振動モード[TH1]、[TH2]の固有振動数は当然のことながら横たわみ剛性の与え方で異なってくる。

解析ケース別に特性をみていくと、まず基本となったトラス桁案の剛性を持つ剛性③の場合では、固有振動数の低い方から横たわみ卓越固有対称振動モードの[TH1]、純ねじれの固有逆対称振動モードの[TT]、横たわみ卓越固有振動モードの[TH2]の順で現われる。横曲げ剛性がトラス桁案の1割増の剛性②の場合でもほとんど同様の特性を示しているが、2倍の横曲げ剛性を持つ剛性①の場合では、ねじれ剛性に比べて相対的にかなり横曲げ剛性が大きいので、横たわみ卓越のねじれ固有振動モード[TH1]が純ねじれの固有振動モード[TT]よりも高い振動数で発現している。また、横曲げ剛性を1/10倍にし、ほぼ箱桁案の剛性と等しくした剛性⑤の場合では、横曲げ剛性が大きい剛性①、剛性②、剛性③の場合で横た

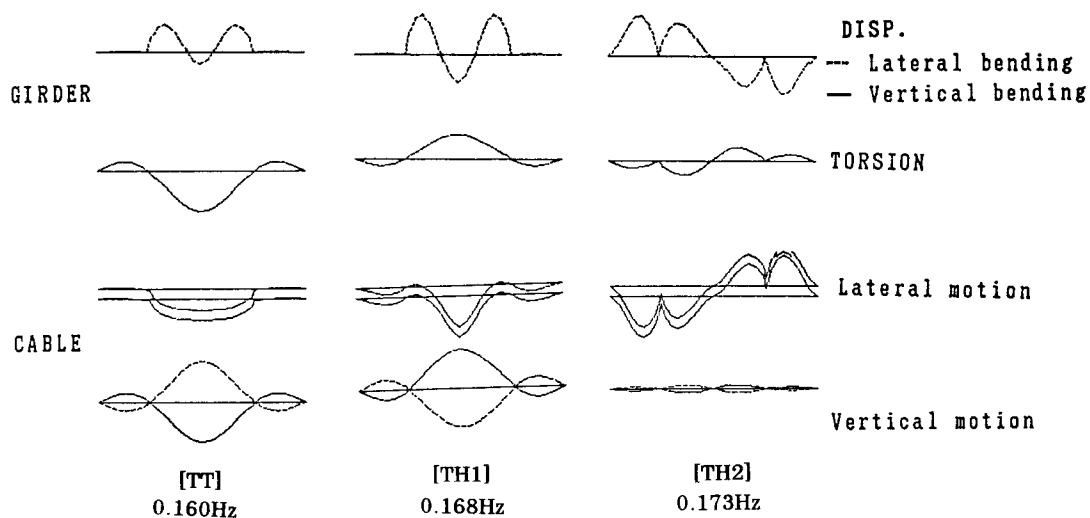


図 2. 1 A 剛性①の場合のねじれを含む固有振動モード形

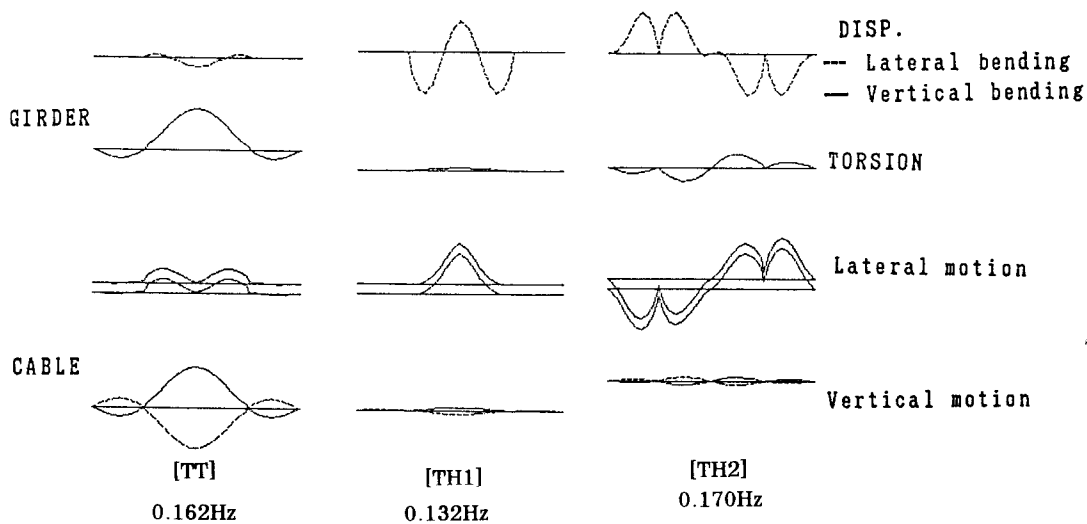


図 2. 2 A 剛性②の場合のねじれを含む固有振動モード形

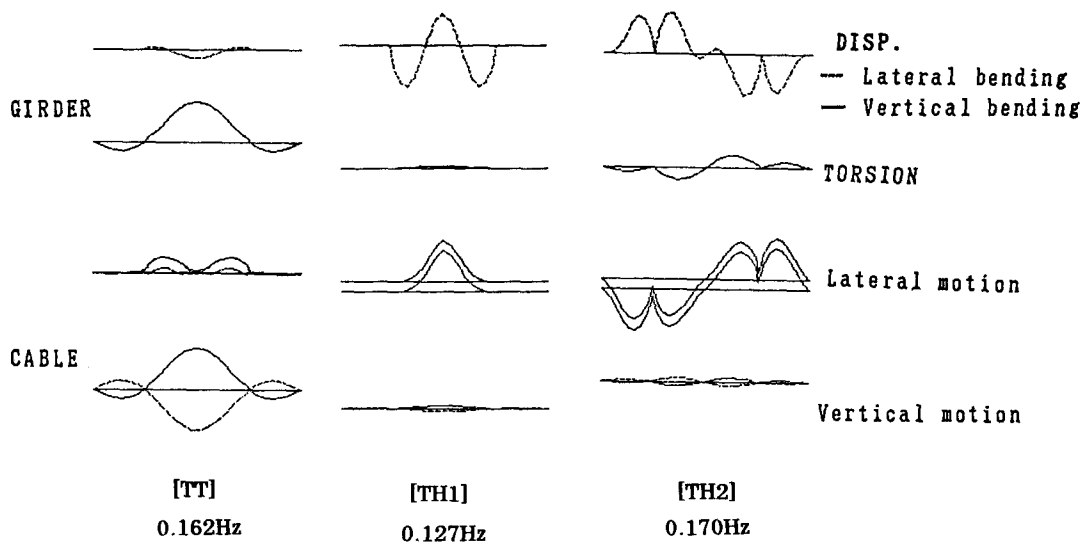


図 2. 3 A 剛性③の場合のねじれを含む固有振動モード形

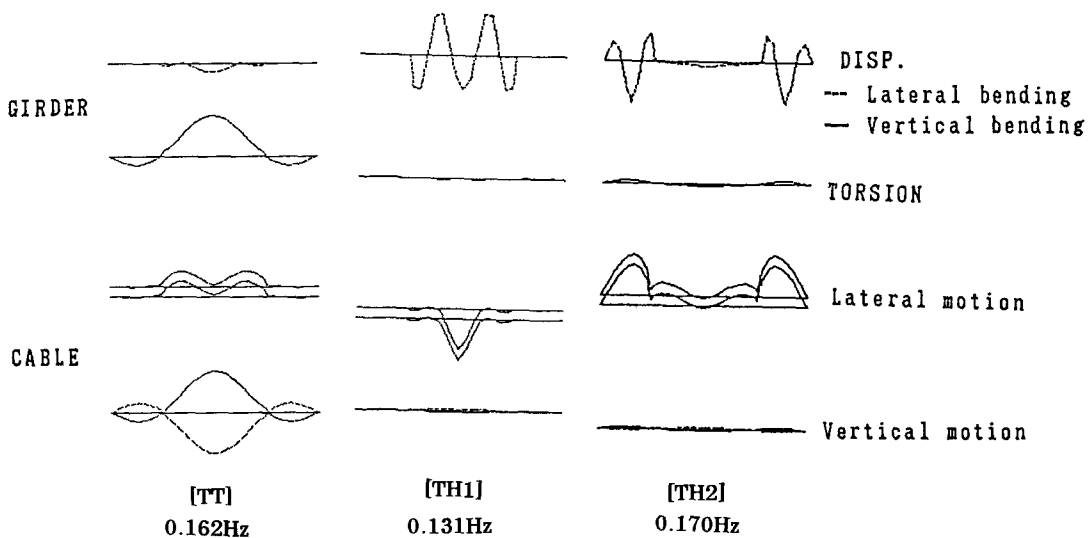


図 2. 4 A 剛性⑤の場合のねじれを含む固有振動モード形

わみ卓越のねじれ対称1次固有振動モード〔TH1〕ではねじれ成分はほとんどみられず、さらに高次の横たわみ対称2次のモードにおいてはじめて有意に認められた。これは、横たわみ剛性とねじれ剛性の相対的な大きさの違いによって現われた特性差と考えられる。

2) フラッター解析結果

従来の方法を踏襲して得られた解析結果であるフラッター限界風速と、それを与える起点モードは、表2に示す通りである。フラッター限界風速は桁剛性が異なっているにもかかわらず、全ての解析ケースとともに約74m/sで等しく、それを与えるフラッター固有振動数とともに約0.122Hzであった。本研究では解析対称とした三次元骨組みのレイアウトは全体及び詳細部分も剛性の違いによらず共通のものをを用いており、三次元骨組み桁断面のレイアウトを変更して解析を行なった結果³⁾と併せ、空気力の状況にもよるとは思われるが、平板翼空気力を使用する本フラッター解析法では、骨組みレイアウトはフラッター固有振動数の値に影響が大きく、さらにフラッター固有振動モードも後述のように大きく差もなく、フラッター固有振動数、フラッター固有振動モードおよび空気力が同一であればフラッター限界風速も当然のことながら同一になることになりフラッター発生の特性を決めるために大きな影響を持つことが伺える。

図2.1B、図2.2B、図2.3B、図2.4Bは、各解析ケースでの風速に対する複素固有振動数虚部の変化を示している。表1に示している剛性④、剛性⑤、剛性⑥の関係を与えた場合は、類似した変化を示しているの、剛性⑤の場合で代表している。これらの図と表2から、トラス桁案の剛性に近い剛性②菜場合と剛性③の場合のみが起点固有振動モード〔TH1〕の分枝で最低のフラッター限界風速を与え、他の場合では純ねじれ固有振動モード〔TT〕を起点とする分枝がフラッター発生に結びつくことが分かる。

この違いをフラッターの発生する場合のフラッターモードⅠ(図3.1)とフラッターに発達しないフラッターモードⅡ(図3.2)の概ね2つの状況で示されるフラッター発生時あるいはフラッター非発生時の複素固有振動モードを時刻毎に表現した振動状況図と共に詳しくみていくことにする。剛性②および剛性③の場合では、図2にある無風時にはねじれ成分がわずかであった横たわみ卓越ねじれ固有振動モード〔TH1〕が、風速の上昇と共にしだいに横たわみ成分は抑えられ、ねじれ成分が卓越し、ねじれと鉛直たわみが連成した図3.1で示しているような曲げねじれフラッターに発達する。それに対し、無風時には横曲げ振動の連成しない純ねじれ固有振動モード〔TT〕の分枝では、風速の上昇と共に横たわみが卓越し、ねじれモードであったものが横たわみ振動モードの連成が増え(図2.2B、図2.3Bにおいては風速軸に漸近していく)、図3.2で示すような複素固有振動モードとなりフラッター発生は高風速まで抑えられる。

解析ケース	剛性の比 (ねじれ剛性： 横曲げ剛性)	フラッターの 起点固有振動 モード	起点固有振動モ ードの固有振動 数 (Hz)	フラッター限界 風速 (m/s)	フラッター発生 時の固有振動数 (Hz)
①	約1：48	TT	0.160	74.0	約0.122
②	約1：26.5	TH1	0.132	74.0	
③	約1：24	TH1	0.127	73.0	
④	約1：12	TT	0.162	74.0	
⑤	約1：2	TT	0.162	74.0	
⑥	約1：1	TT	0.161	73.0	

表2 フラッター限界風速、フラッター限界風速を与える起点モードとフラッター発生時の固有振動数

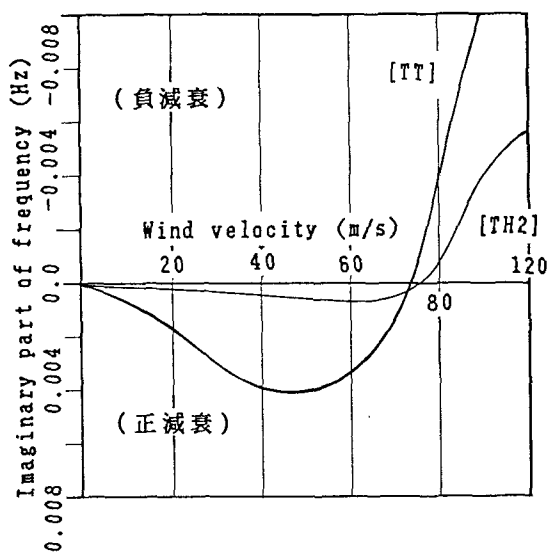


図 2. 1 B

風速 - 複素振動数虚部の関係 (剛性①)

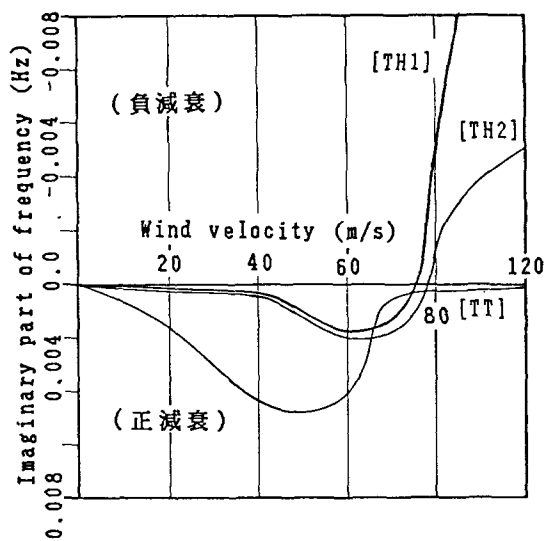


図 2. 2 B

風速 - 複素振動数虚部の関係 (剛性②)

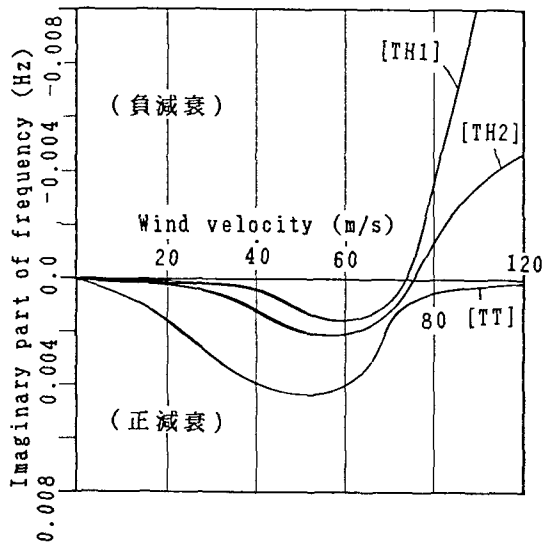


図 2. 3 B

風速 - 複素振動数虚部の関係 (剛性③)

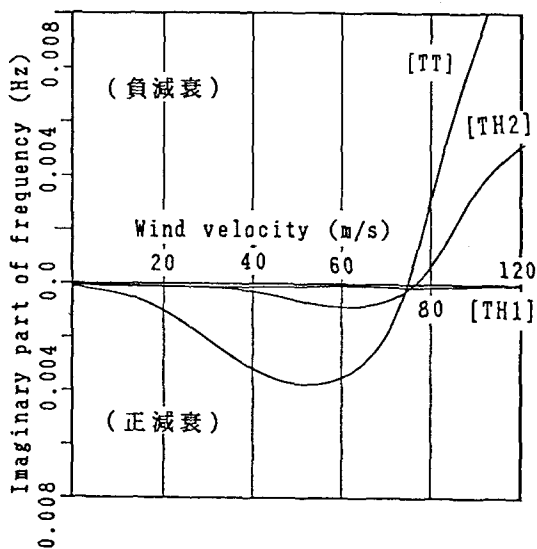


図 2. 4 B

風速 - 複素振動数虚部の関係 (剛性⑤)

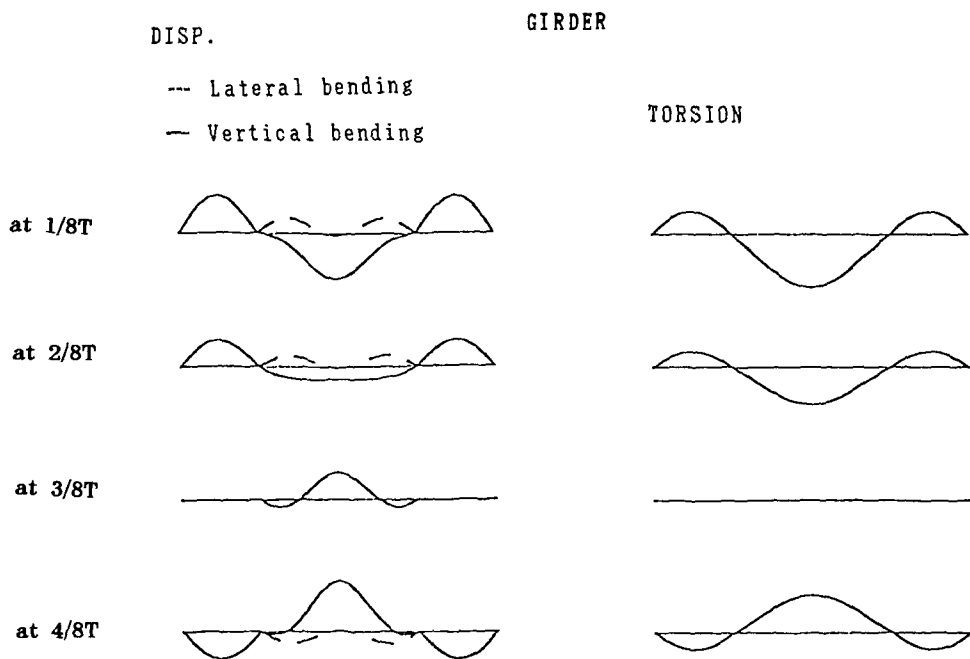


図 3. 1 フラッター発生時の振動状況

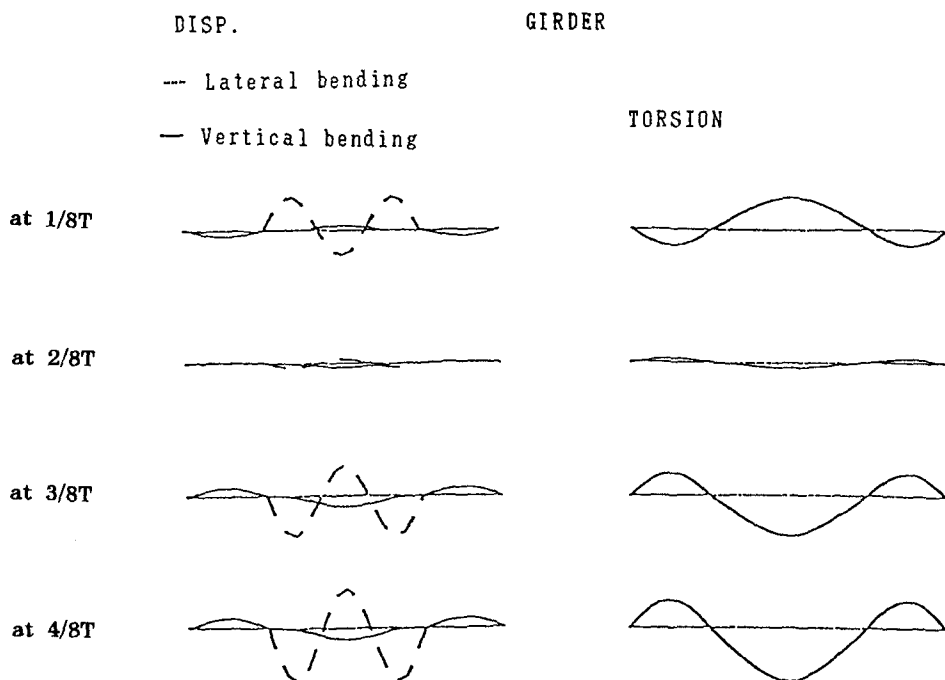


図 3. 2 非フラッター発生時の振動状況

一方、横たわみ剛性の小さい剛性④、剛性⑤、剛性⑥の場合では、横たわみ振動卓越ねじれ固有振動モード〔TH1〕は風速が上昇しても横たわみモードのままフラッター発生に至らないが、純ねじれ固有振動モード〔TT〕ではそのまま鉛直たわみ振動との連成が強まり、フラッター発生に至り、剛性②および剛性③の場合にもフラッター限界風速時に得られた物と同じフラッターモードⅠの振動状況となる。

横曲げ剛性の非常に大きい剛性①の場合では、横たわみ振動卓越ねじれ固有振動モード〔TH1〕のねじれ成分が発達してその分枝でフラッター限界風速が得られるのは、剛性②および剛性③の場合と同様であるが、この場合では〔TH1〕は固有振動数は相対的に高いため、これより低い固有振動数の純ねじれ固有振動モード〔TT〕分枝で最低のフラッター限界風速が与えられている。

以上のように各剛性の解析ケースについてかなり異なるフラッター発生の状況は、無風時固有振動特性とフラッター発達状況により説明がつく部分が多いが、剛性②、剛性③の場合で高風速時までフラッター発生が見られなかった純ねじれ固有振動モード〔TT〕分枝で剛性①の場合では横たわみ卓越ねじれ振動モードに変化せず、フラッターモードⅠに発達したことである。剛性④～⑥の場合では横たわみ剛性が小さくそもそもねじれとの連成が少ないために〔TH1〕分枝でのフラッター発生は難しいと考えられるが、剛性の状況としては逆のねじれ剛性に比べて約4.8倍の横曲げ剛性を持つ剛性①の場合ではより横たわみ剛性の小さい剛性②および③に比べてそれらのケースでは横たわみが発生しフラッターに至らなかった純ねじれ固有振動モード〔TT〕分枝での横たわみ振動の発生は抑えられフラッターモードⅠに近い状況が高風速まで持続し易いと思われる。図2.2Bと図2.3Bをよく比べてみると、横曲げ剛性の大きい剛性②（図2.2B）のほうが〔TT〕分枝の変化が負減衰の領域により近くなっている。この傾向があるとすれば、さらに横たわみ剛性が大きくなると、剛性①の場合のように〔TT〕分枝は横たわみ剛性を増すことにより低風速でフラッターに至ることもあり得るとみることができる。横たわみ振動卓越の逆対称ねじれ固有振動モードである〔TH2〕分枝では解析ケースを問わず、同一の風速、振動数でフラッターが発生しており、〔TH1〕分枝とは異なる特性を示すが無風時固有振動モードでも解析ケースを問わずほぼ同一の特性を示しており、この理由でフラッター限界風速に差が生じなかったと解釈できる。

5. 結論

長大吊橋の補剛桁の各剛性の関係、特に横曲げ剛性に着目して、明石海峡大橋の設計案の1つを取り上げ立体骨組みフラッター解析を行い、特に横たわみ剛性に着目し剛性の与え方によりによりフラッターへ各固有振動モードから発達する状況を検討した。その結果を整理すると、次のようになる。

- 1) 解析対称とする骨組みモデルの桁断面としてのレイアウト（桁の剛性中心とハンガー取り付け点との相対位置）は、フラッター発達起点固有振動モード選択に関与は小さく³⁾、骨組みモデルのレイアウトが同一であると最終的には同一のフラッター限界風速が得られるようである。
- 2) フラッターに発達する起点となる固有振動モード選択には、桁剛性、特にねじれ剛性と横曲げ剛性の比が重要なパラメータとなる。同一の桁断面のレイアウトを持つ三次元骨組みを対称とした本研究では、フラッターの発達した経緯を問わず同一のフラッター固有振動数、フラッター固有振動モードでフラッター限界風速が与えられた。
- 3) フラッター発達の起点モード選択は、横たわみとねじれの値としての剛性比がおおよそ1:20～1:30程度の場合、通常、最低時のねじれ固有振動モードとみられる純ねじれ固有振動モード殻の分枝はフラッター発生が抑えられ、わずかにねじれを含む横たわみ振動卓越のねじれ対称一次固有

振動モードがフラッター限界風速を与える分枝となる。本研究で対象とした明石海峡大橋のトラス補剛桁案はこの場合に当てはまる。この剛性比よりも小さい場合、また大きい場合でも、フラッターに発達するのは純ねじれ固有振動モード分枝であり、横たわみ卓越のねじれ対称一次固有振動モード分枝はフラッターに至りにくい。

謝辞

本研究の一部は本州四国連絡橋公団からの援助を受け実施した。ここに、深謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 宮田、山田、岩崎：吊橋立体骨組み解析による曲げねじれフラッター推定に関する検討、第十回風工学シンポジウム論文集、pp289-284、昭和63年12月。
- 2) T.Miyata and H.Yamada: Coupled flutter estimate of a suspension bridge, Journal of Wind Engineering No.37, pp485-492、昭和63年10月。
- 3) 宮田、山田、矢野、西山：超長大吊橋の曲げねじれフラッターモード選択に関する一考察、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集I、pp830-831、平成元年10月。

(1989年10月2日受付)