

【討議・回答】

中嶋俊三 共著
山口宏樹

「モード空力減衰に着目した暴風時質量付加型吊橋のフラッター特性」への討議・回答

(土木学会論文集, No.625/I-48, 1999年7月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

勝地 弘(横浜国立大学)

Hiroshi KATSUCHI

1. はじめに

標記論文は、モード空力減衰に着目して長大スパン吊橋のフラッター特性を論じたものであり、その中で卓越寄与モードを特定するとともに、その寄与メカニズムについて固有振動モードの変化の面から考察するなど、長大吊橋のフラッター解析事例の1つとして非常に興味深い内容である。また、暴風時質量付加型吊橋というユニークなアイデアで超長大スパン吊橋の実現を目指そうとしており、今後の超長大橋プロジェクトの現実に向けても貴重な知見を提供するものと考えられる。

しかしながら、原論文では、複数モードによるフラッター解析(ここでは、マルチモードフラッター解析という)によって、卓越寄与モードを特定し、固有振動モードとの関連でフラッター特性(フラッター風速)の変化を論じることに重点がおかれているように見受けられ、暴風時質量付加型吊橋固有の構造的特性との関連が不明確なように思われる。また、これまでに報告されているマルチモードフラッター解析結果とは少し異なる知見も得られているように思われることから、以下の討議を申し入れるものである。

2. 討議

(1) フラッター解析における複数モードの扱いについて

P.124, 左, 第2パラグラフで著者らは、「従来の簡易計算では無視される鉛直たわみ対称3次モードが、超長大吊橋のフラッターでは重要となることがわかる。」と述べている。

長大橋のフラッター解析,特にマルチモード解析に関しては,Scanlan¹⁾がその理論的定式化を行い,日本においても,少なくともここ10年ほど前から活発に研究(例えば,樋上ら²⁾,宮田ら³⁾,田中ら⁴⁾,松本ら⁵⁾)

がなされ,著しい発展が見られた。また,明石海峡大橋の全橋模型風洞実験によって,実験的にもマルチモードフラッターが観測⁶⁾され,解析的にも説明できることが確認された^{6),7)}。文献7)においては,明石海峡大橋を対象にマルチモードフラッター解析を行い,鉛直たわみ,ねじれの最低次モードに加えて,鉛直たわみの対称2次,3次,水平たわみの対称2次モードが卓越寄与することが述べられており,鉛直たわみ対称3次モードに関しては原論文と同様の結果となっている。さらに,米国においても,Scanlanの成果を踏まえ,マルチモード解析の有効性が確認されている⁸⁾。

したがって,まず第1に,「従来の簡易計算では,…」に関して,マルチモードフラッター解析が容易に一般的となった現在では,基本2モードしか考慮でない簡易計算(Selberg式あるいはBleichの手法など)に言及することは適切ではないと思われる。さらに,「…鉛直たわみ対称3次モードが,超長大吊橋のフラッターでは重要となることがわかる。」は,文献7)との研究成果とは一致するものの,一成果を一般化することは困難であると思われる。

(2) フラッター解析での卓越寄与モードについて

討議者は(1)で述べたように,文献7)において明石海峡大橋を対象として,フラッターへのモードの寄与度合いを調べている。図-1は,明石海峡大橋のフラッターに対して重要であると判断された6モード⁶⁾と1次から25次までのモードを用いたフラッター解析で得られた各モードの寄与率(複素固有ベクトルの絶対値)を比較したものである。また,表-1はその6モードを対象にそれぞれのモードがフラッターに対してどのように寄与しているか(安定化,不安定化)を,モードの組合せを変えてフラッター風速を調べたものである。

まず,図-1より,明石海峡大橋のフラッターに関

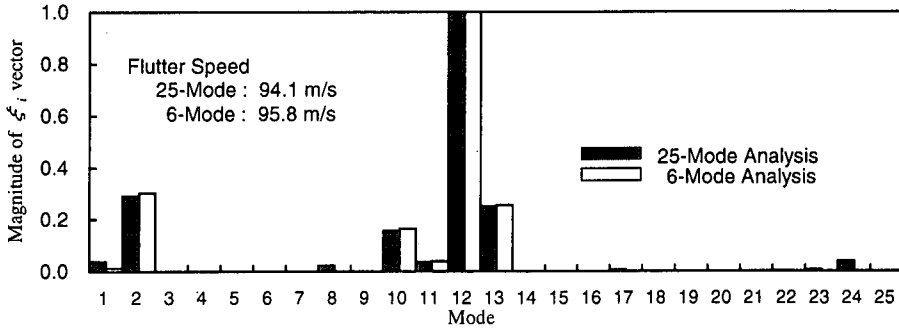


図-1 25モード解析と6モード解析におけるモード寄与率の比較⁷⁾

表-1 6モードのフラッターへの寄与率⁷⁾

Case	Mode						Flutter Speed (m/s)
	1	2	10	11	12	13	
1	0.0685	0.2447	0.2241	0.0638	1.0	0.2438	79.1
2	—	0.2558	0.2173	0.0686	1.0	0.2340	80.4
3	0.1461	—	0.3416	0.1650	1.0	0.2785	96.1
4	0.0848	0.2818	—	0.0862	1.0	0.2467	84.2
5	0.0733	0.2577	0.2174	—	1.0	0.2353	81.0
6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	—	N.D.	> 135
7	0.0540	0.2142	0.1734	0.0480	1.0	—	73.9
8	—	0.2699	—	—	1.0	—	82.0
9	—	0.2328	0.1914	—	1.0	—	76.3
10	—	0.2233	0.1827	0.0497	1.0	—	74.9

N.D.: not determined.

(注) 図-1の6-Mode Analysisでのフラッター風速95.8m/sと表-1の6モード解析(Case1)での79.1m/sが一致しないのは、静的変形を考慮しない、するの違いである⁶⁾。

しては、6モード、中でもモード2(鉛直たわみ対称1次)、モード10(鉛直たわみ対称2次)モード11(水平たわみ対称2次)、モード12(ねじれ対称1次)、モード13(鉛直たわみ対称3次)が卓越していることが判る。さらに、表-1より、モード10はフラッター風速を低下させ、逆にモード13は上昇させていることが判る。モード13、すなわち鉛直たわみ対称3次モードがフラッターを安定化させていることは原論文と同じ結果となっている。

以上の結果を踏まえた上で、原論文の質量を付加しない状態ではなぜ鉛直たわみ対称2次モードが卓越してこないのだろうか。一般的に、あるいは原論文の図-17に示された質量付加後の振動モード形から判断すると、鉛直たわみ対称3次だけが連成して、対称2次が連成しないというのは、話が単純ではないように思える。原論文では、各モードの空力減衰を調べたとあるが、図に出されていない鉛直たわみ対称2次モードの空力減衰はどの程度であったのか定量的に明らかとさせていただきたい。さらに、質量付加後($\Delta M = 20, 30 \text{ t/m}$)のケース1では鉛直たわみ対称2次モー

ドが連成し、フラッターを安定化させる結果となっている。質量付加前にはこのような鉛直たわみ対称2次モードが存在しないのであろうか。質量付加前と付加後の固有振動モードの違いについても明らかとさせていただきたい。また表-1にも示すように明石海峡大橋の例では、鉛直たわみ対称2次モードはフラッターを不安定化させる結果となっており、原論文の結果(空力減衰が正)とは逆である。この点についても、何か気付いた点があれば明らかとさせていただきたい。

(3) 質量付加ケース2におけるフラッター風速低下に対する水平たわみモードの影響について

質量を付加していった場合、ケース2でフラッター風速が低下した理由として、原論文の図-16, 17, および p.129左, 第2パラグラフにあるように、水平たわみ3次モードが負減衰として作用することがあげられている。それではなぜケース2で水平たわみ3次モードが寄与して、ケース1では寄与しないのか、また質量を付加しない状態でもこの水平たわみ3次モードはなぜ寄与しないのか。要するに、質量付加に伴

う固有振動モードの変化に全てが集約されると思われるが、原論文には顕著でなかった成分についての明記がなされていないので、質量付加前、質量付加後のケース1, 2でそれぞれ水平たわみ3次のような卓越寄与モードがどのように変化しているのかを明らかにしていただきたい。その際、振動モードの形、大きさに加えて固有振動数の順序、近接度もモード連成に対して重要となると思われるので、各ケースでのモードの変化と固有振動数の変化を合わせて明らかとしていただきたい。このような固有振動モードの変化を質量付加（およびそのパターン）と関連させて議論することで、付加質量型吊橋のフラッター特性、さらには構造的合理性がさらに理解され得ると思われる。

参考文献

- 1) Scanlan, R.H. : The Action of Flexible Bridges under Wind, I: Flutter Theory, *J. of Sound and Vibration*, 60(2), pp.187-199, 1978.
- 2) 樋上琇一, 松田一俊, 鈴木俊彦: 長大吊橋の多自由度フラッター解析, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.357-362, 1992.
- 3) 宮田利雄, 山田均, 河藤千尋: 長大橋梁の連成フラッター解析法の比較検討, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp.

345-350, 1992.

- 4) Tanaka, H., Yamamura, N. and Shiraishi, N. : Multi-Mode Flutter Analysis and Two & Three Dimensional Model Tests on Bridges with Non-Analogous Modal Shapes, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, JSCE, No. 471/I-24, pp.35-46, 1993.
- 5) 松本勝, 陳新中: フラッターにおける諸モードの寄与について, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 40A, pp.1025-1030, 1994.
- 6) 勝地弘, 宮田利雄, 北川信, 佐藤弘史, 樋上琇一: 明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.383-388, 1994.
- 7) Katsuchi, H., Jones, N. P., Scanlan, R. H. and Akiyama, H. : A Study of Mode Coupling in Flutter and Buffeting of The Akashi-Kaikyo Bridge, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng.*, JSCE, No. 598/I-44, pp.21-36, 1998.
- 8) Jain, A., Jones, N. P. and Scanlan, R. H. : Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-Span Bridges, *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol.122, No.7, pp. 716-725, 1996.

(1999.9.30受付)

▶ 回答者 (Closure) ————— 中崎俊三 (大日本コンサルタント) ・ 山口宏樹 (埼玉大学)
Shunzo NAKAZAKI and Hiroki YAMAGUCHI

1. はじめに

従来ない吊橋形式の耐風安定性の検討を解析的方法で行なう場合、フラッター発現風速を正確に把握することに留意するのはもちろん重要であるが、さらに、フラッター発生メカニズムなどの耐風特性を解明することも重要である。

筆者らは、海水などの質量を暴風時に一時的に付加する暴風時質量付加型吊橋について、最適質量付加位置を選定し試設計を行なってその経済性を確認した¹⁾。その中で、質量付加パターンによっては、付加強度を大きくすると却ってフラッター発現風速が低下することもあるという結果が得られた。原論文は、この低下の原因解明がより有効な質量付加方法の選定に繋がると考え、吊橋のモード毎の空力減衰寄与により考察を行なったものである。

しかし、討議者の指摘にもあるように、質量付加による固有振動特性の変化からの考察が十分でなかったため、ここに補足し回答を行う。

2. 討議について

(1) フラッター解析における複数モードの扱いについて

筆者らは、暴風時質量付加型吊橋のフラッター発生メカニズムを検討する前に、質量付加前、すなわち、従来型吊橋の検討を行なった。

これは、モード毎の空力減衰寄与という耐風検討手法を、暴風時質量付加型吊橋だけでなく研究事例の多い従来型吊橋にも適用することより、その手法の適用性を調べるためと、従来型吊橋との比較により質量付加によるフラッター特性をより明確にするためである。

原論文は、従来型吊橋については既往の論文と同様な結果が得られたことを再確認したものである。しかし、「文献…と同様に、鉛直たわみ対称3次モードが重要であるという結果が、本論文の検討条件の基に得られた」と討議者が指摘したように既往論文との関係を述べ、結果の一般化を避けるのが適切であった。

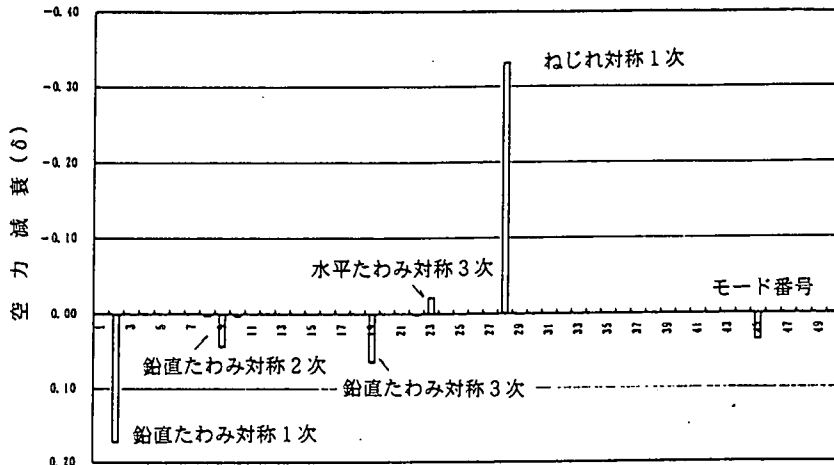


図-1 側径間比1/2におけるモード毎の空力減衰寄与

表-1 吊橋各ケースの鉛直たわみ対称2次モードの比較

従来型吊橋(質量付加前)		質量付加型吊橋(付加質量 $\Delta M=30t/m$)	
側径間比: 1/3	側径間比: 1/2	質量付加ケース 1	質量付加ケース 2

(2) フラッター解析での卓越寄与モードについて

① 従来型吊橋における鉛直たわみ対称2次モードの寄与について

原論文で対象とした従来型吊橋に対する鉛直たわみ対称2次モードの空力減衰寄与度は皆無でなく、絶対値の大きさを考慮したモードの50次中、8番目であり、鉛直たわみ対称1次モードの0.0266に対して約1/100の0.000231と非常に小さかった。そのため、原論文の図-4においては、このモードを主要モードとして加えなかった。

フラッターに対する卓越寄与モードは、主桁の非定常空気力特性で異なる²⁾が、橋の振動特性でも異なると思われる。原論文は、中央径間長2500mの吊橋に対して主桁の非定常空気力として平板のものを適用し、側径間比を1/3(既往吊橋の平均的な値)として検討を行なったものである。

図-1は、参考までに、原論文で対象とした吊橋に対して、側径間比のみを明石海峡大橋と同じ1/2に変更した場合の空力減衰寄与を新たに解析したものである。これによると、鉛直たわみ対称2次モードの空力減衰寄与度は、絶対値の大きさが4番目にあり、鉛直たわみ対称1次モードの約1/4と原論文の側径間比1/3の場合より大きくなった。

以上より、原論文の従来型吊橋で鉛直たわみ対称2次モードがフラッターにほとんど寄与しなかったの

は、側径間比の大きさ、すなわち、吊橋のたわみ剛性の変化がその要因の一つとして影響したものと考えられる。

② 暴風時質量付加吊橋における鉛直たわみ対称2次モードの空力減衰寄与について

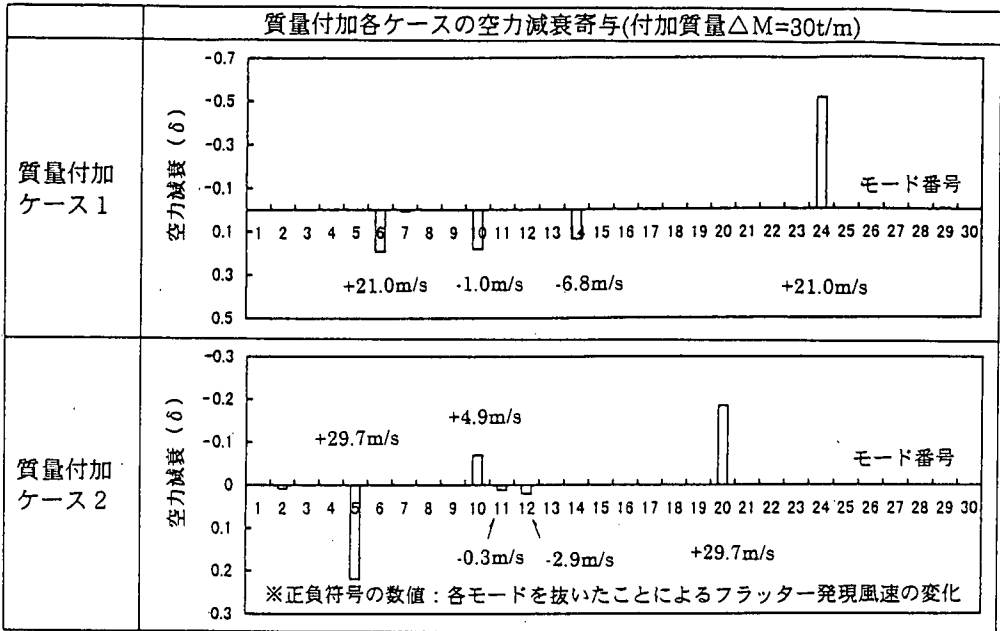
質量を付加することにより、このモードの影響が大きくなったのは、①と同様に橋の振動特性が変わったためと思われる。すなわち、中央径間に対する質量付加は、中央径間中央付近に集中しており(原論文、図-2参照)、これが振動モードに影響したと考えられる。

表-1は、従来型吊橋(①で述べた側径間比1/2の場合も示した)、暴風時質量付加型吊橋(ケース1、2)の鉛直たわみ対称2次モードの比較を示す。これより、質量付加型のケース1が、その他のケースに比べて中央径間中央の縦距比(1/6L点付近のピーク値に対する比)が最も小さい。逆に、従来型吊橋の側径間比1/2の場合、中央径間中央の縦距比は最も大きい。

このような振動モード特性変化が、空力減衰寄与に影響したと考えられる。フラッターに対する安定化についても、このようなモードの変化が影響したと考えられる。

なお、モード空力減衰寄与の正負とフラッターの安定化との関係については、次に補足する。

表-2 空力減衰の正負とフラッターの安定化



(注) 主要モードのモード図は、表-3参照

一補足一 モード空力減衰寄与の正負符号とフラッター安定化との関係

原論文では、モード空力減衰寄与の正負符号とフラッター安定化との関係については、詳しく検討しなかったのここ補足する。

原論文では、どのケースにおいても鉛直たわみ対称1次モードは正の減衰を示した。したがって、正減衰のこのモードが存在しなければ、符号の意味からフラッター発現風速は低下するものと、一見、考えられる。

しかし、このモードが存在しなければ対称モードの曲げねじれフラッターが発生しなくなる(主桁の非常空力特性が平板の場合)ので、このフラッターが最初に発生するケースでは、その次のフラッターが生じ、結果としてフラッター発現風速は上昇することになる。

すなわち、フラッター時の空力減衰寄与の正負符号(全モード合計するとゼロになる)は、フラッターの安定化を、直接、意味するものではなく、考慮したモード間の空力減衰寄与の関係を示すものと思われる。したがって、正減衰を示すからといって、そのモードを抜いたフラッター発現風速は必ずしも低下するとは限らないと考えられる。

表-2は、質量付加時における各モードの空力減衰を示し(原論文の図-16の付加質量 $\Delta M=30t/m$ 時)、かつ、各モードを抜いた場合のフラッター発現風速の変化を数値(+：上昇、-：下降)で示したものであ

る。この場合、鉛直たわみ対称1次(6次、あるいは5次)だけが、空力減衰寄与の符号とフラッター安定化との関係が逆なケースになっている。ちなみに、側径間比を1/2にした場合、鉛直たわみ対称2次モードは正減衰を示した(図-1参照)が、このモードを抜いた解析を行なうとフラッター発現風速は上昇し、討議者が示した明石海峡大橋の結果と一致した。

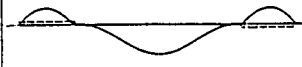
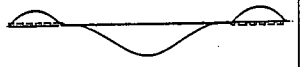
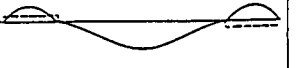
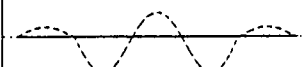

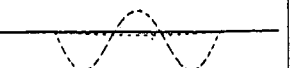
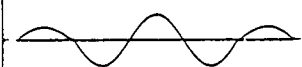
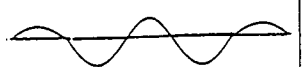
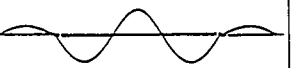


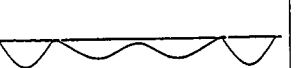
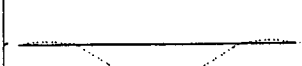
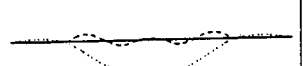
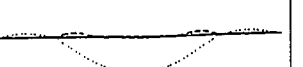
(3) 質量付加ケース2におけるフラッター風速低下に対する水平たわみモードの影響について

原論文は、ケース2において(付加質量 $\Delta M=30t/m$ の時)、水平たわみ3次モード(水平たわみ対称2次モード、表-2のケース2のモード番号10)の空力減衰寄与が負になり、それを抜いたフラッター解析を行った結果、フラッター発現風速が上昇したのでこのモードがフラッター発現風速を低下させたものと結論付けたものである。

これを、質量付加前後での固有振動特性(次数番号、振動数、モード形)の変化から何か得られないかみることにする(表-3参照)し、表-3より、以下のことが伺える。

- ①各モードの次数番号に変化がみられる。
- ②鉛直たわみ対称1次(VS1)については、質量付加ケース2の振動数の低下が顕著であり(原論文、図-11参照)モード形状もフラットである。
- ③水平たわみ3次モード(H3)については、質量付加によりねじれモードが連成し、側径間が変位しない。

表-3 吊橋各ケースの振動数・モードの変化

	従来型吊橋(質量付加前)	質量付加型吊橋(付加質量 $\Delta M=30t/m$)	
	側径間比: 1/3	質量付加ケース 1	質量付加ケース 2
VS1	6次, $f=0.0754\text{Hz}(1.00)$ 	6次, $f=0.0777\text{Hz}(1.03)$ 	5次, $f=0.0657\text{Hz}(0.87)$ 
H3	10次, $f=0.1028\text{Hz}(1.00)$ 	7次, $f=0.0974\text{Hz}(0.95)$ 	10次, $f=0.0985\text{Hz}(0.96)$ 
VS2	11次, $f=0.1081\text{Hz}(1.00)$ 	10次, $f=0.1102\text{Hz}(1.02)$ 	11次, $f=0.1128\text{Hz}(1.04)$ 
VS3	18次, $f=0.1518\text{Hz}(1.00)$ 	14次, $f=0.1437\text{Hz}(0.95)$ 	12次, $f=0.1396\text{Hz}(0.92)$ 
TS1	24次, $f=0.1808\text{Hz}(1.00)$ 	24次, $f=0.1894\text{Hz}(1.05)$ 	20次, $f=0.1870\text{Hz}(1.03)$ 

(注) VS1: 鉛直たわみ対称1次, H3: 水平たわみ3次
 VS2: 鉛直たわみ対称2次, VS3: 鉛直たわみ対称3次
 TS1: ねじれ対称1次

橋軸方向変位モード: - - - -
 鉛直たわみモード: ————
 水平たわみモード: - - - -
 ねじれモード: ······

モードの変化が大きい。

④鉛直たわみ対称2次 (VS2) については、表-1にも示したように質量付加ケース1の中央径間中央のモード縦距が質量付加前に比べて小さい。鉛直たわみ対称3次 (VS3) は、質量付加によりケース1, 2とも、中央径間中央のモード縦距が大きくなっている。これらのモードは、表-2に示すようにフラッターに対して安定化を示している。

⑤ねじれ対称1次 (TS1) については、質量付加により水平たわみモードが連成している。

以上のように、質量付加や付加方法で固有振動特性が変化していることがわかった。

次に、表-4は、付加質量30t/m時において、質量付加ケース1のデータを質量付加ケース2のデータ(質量, 振動数, モード形状)に部分的に置き換えることにより、各々の違いがフラッターにどのように影響するか調べたものである。ただし、振動数およびモードを変更する際は、表-3の主要5モードのみを対

象としている。

表-4より、以下のことが言える。

①フラッター発現風速 V_f について: 振動数のみケース2とした場合 (CASE-3) とモードのみケース2とした場合 (CASE-4) ではフラッター発現風速は低下せず、振動数とモードの両方が、ケース2の時 (CASE-2, 5) のみ低下する。また、質量変化による影響は小さい (CASE-2, 5)。

②フラッター振動数 f_f : 振動数がケース1の場合 (CASE-1, 4) 0.120程度であり、ケース2の場合 (CASE-2, 3, 5,) 0.096程度である。この大きさは、フラッター発達分岐の起点モードに影響されているようである。

③水平たわみモードの連成: 振動数かモードのいずれか一方が、ケース2であれば水平たわみモードが連成する (CASE-2~5)。これから、ケース2の振動数とモードは、各々、水平たわみモードが連成する特性を有すると考えられる。

表-4 ケース1のデータを部分的にケース2に置き換えた場合のフラッターへの影響 (○:あり)

CASE	1	2	3	4	5
ケース2の質量		○			
ケース2の振動数(主要5モード)		○	○		○
ケース2のモード(主要5モード)		○		○	○
フラッター発現風速 V_f (m/s)	86.0	80.0	85.5	85.8	80.3
フラッター時振動数 f_f (Hz)	0.124	0.095	0.096	0.119	0.096
水平たわみモードの連成		○	○	○	○
フラッター発達分岐の起点モード	VS3	HS3	HS3	VS3	HS3

ここに、VS3は、鉛直たわみ対称3次モード、HS3は、水平たわみ3次モード(対称2次モード)である。また、各CASEの内容は、以下の通りである。

CASE-1: ケース1の場合である。

CASE-2: ケース2のデータとしたものである。

CASE-3: 振動数のみケース2とし、その他は、ケース1としたものである。

CASE-4: モードだけをケース2としたものである。

CASE-5: CASE-2に対し、質量のみケース1としたものである。

④フラッター発達分岐の起点モード: 振動数が、ケース1なら鉛直たわみ対称3次モードが起点となり(CASE-1, 4)、ケース2なら水平たわみ3次モードが起点となる(CASE-2, 3, 5)。振動数の変化が影響しているようである。

以上より、質量付加ケース1から質量付加ケース2への耐風特性の変化は、振動数とモード形の両方に变化があって始めて生じたと言える。中でも、水平たわみ3次モードは、ケース2においてフラッター発達分岐の起点モードであることから、ケース2において特有なモードに位置付けられ、その負減衰性がフラッターに関与したものと考えられる。

3. おわりに

今回、振動数やモード形変化によるフラッターへの影響を検討した結果、暴風時質量付加型吊橋の耐風特性をより理解することができた。

従来型吊橋の検討においては、側径間比がフラッタ

ーに対する支配モードに少なからず影響し、暴風時質量付加型吊橋の検討においては、振動数やモード形の変化とそれに伴うフラッター発達分岐の起点モードの変化などが、耐風安定性に影響するという結果が得られた。

このような知見を得ることができたのは、討議者の問題提議によるものであります。討議者に、紙上を借りて感謝致します。

参考文献

- 1) 中崎俊三, 山口宏樹: 暴風時質量付加型超長大吊橋の検討と試設計, 土木学会論文集, No.584/I-42, pp.295-305, 1998.1.
- 2) 松本勝, 陳新中: フラッターにおける諸モードの寄与について, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.40A, pp.1025-1030, 1994.3.

(2000. 2. 28受付)