

## I - 343

## 三次元有限要素モデルによる長大斜張橋のフラッター解析

名古屋工業大学 正 岩本政巳 東京大学 正 藤野陽三  
長岡技術科学大学 正 長井正嗣

1. まえがき 斜張橋は近年長大化、マルチケーブル化の傾向にあり、その振動特性も複雑さを増している。例えば、主桁の重心とせん断中心の差や縦断勾配の影響によりその水平、ねじれ振動間に連成が生じる<sup>1)</sup>。また、マルチケーブル化（本数の増加、ケーブル長の多様化）はケーブルの固有振動数を広範囲に分布させ、これにより主桁とケーブルの振動が内部共振を起こす<sup>2)</sup>。複雑化する斜張橋の動特性、耐風性を検討する上で、構造系を忠実に再現した三次元有限要素モデルによる数値シミュレーションは有効な手段であると考ええる。本研究では建設中の長大斜張橋、多々羅大橋（中央径間長：890m、ケーブル総数：168）を例題として取り上げ、ケーブル振動をも考慮した三次元有限要素モデルを用いてそのフラッター特性を調べた。

2. 解析方法 ここで用いるフラッター解析プログラムは、長井らにより開発された斜張橋構造解析プログラム<sup>1)</sup>をベースにしている。この構造解析プログラムの特徴は、一般化したモード座標表示のケーブル振動を考慮できること、初期断面力による桁の幾何剛性およびケーブルサグの影響を考慮できるよう振動方程式の定式化に線形化有限変位理論を用いていること等である。フラッター解析手法は、斜張橋の振動がケーブルは単なる伸び材として挙動し、桁、塔全体が振動する全体振動と各ケーブルのみが振動する局部振動からなるとする、全体・局部振動アプローチに基づく。局部（ケーブル）振動と同様に、全体振動についても有限要素モデルより振動方程式を立てたのち、それを構造解析より得られた基本振動モードを用いて一般化している。すなわち、モーダル解析法を用いている。フラッター特性に及ぼす桁の水平・ねじれ連成振動（非定常抗力）およびケーブルの影響を調べるため表1に示す4ケースで解析を行った。解析条件は以下のとおりである。

・フラッター解析に用いる基本振動モードは、全体振動では表2に示す10モード、局部ケーブル振動では面内、面外の各最低次モードとする。ただし、構造減衰は無視する。

・非定常空気力の算定においては、桁の揚力、空力モーメントには平板翼理論を、桁の抗力およびケーブルの抗力、揚力には準定常理論を各々使用する。空気力の定式化は文献3を参考にした。

表1 解析ケース

| ケース | 考慮する振動  | 考慮する空気力      |
|-----|---------|--------------|
| 1   | 全体振動のみ  | 桁の揚力、モーメントのみ |
| 2   |         | 桁の全空気力       |
| 3   |         | 桁、ケーブルの全空気力  |
| 4   | 全体、局部振動 | 桁、ケーブルの全空気力  |

なお、表2中のモード10、13では桁の水平・ねじれ連成振動が生じている。また、ケーブルの固有振動数は0.24～0.96Hzに分布している。

3. 解析結果 得られたフラッター発振風速およびフラッターモード分岐の起点モードを表3に

まとめる。図1、2にはケース2、3におけるフラッターモード分岐の風速-減衰曲線およびモード寄与率を示す。図2のモード寄与率は全体で1となるよう各モード成分の累積をとっている。

ケース1、2のフラッターモード分岐はともにねじれ対称1次モードを起点としており、また同様の分岐経路をたどっている。フラッター発振風速もほぼ一致している。この場合、桁のねじれ振動成分により発生する非定常抗力はフラッターモードに対して大きな影響を及ぼしていないといえる。両ケースとも風速74m/s付近でフラッターモード分岐と2P面内1次モード分岐の振動数が接近しており、この2つのモード分岐間に干渉が生じている（図1a））。これにより、フラッターモード分岐の2P面内1次モード

表2 フラッター解析に用いる全体振動モード

| 番号 | モード形状   | 固有振動数 (Hz) |
|----|---------|------------|
| 2  | 水平対称1次  | 0.0890     |
| 3  | 鉛直対称1次  | 0.2276     |
| 4  | 水平逆対称1次 | 0.2647     |
| 5  | 鉛直逆対称1次 | 0.2739     |
| 6  | 鉛直対称2次  | 0.3512     |
| 7  | 鉛直逆対称2次 | 0.4196     |
| 8  | 3P面内1次  | 0.4201     |
| 9  | 2P面内1次  | 0.4294     |
| 10 | ねじれ対称1次 | 0.4586     |
| 13 | 水平対称2次  | 0.6042     |

注：2P、3Pは各々生口島側、大三島側塔を示す。

成分が一時的に増大している（図2a））。その後鉛直対称1次モード成分が卓越し、連成フラッターに至る。

ケース3のフラッターモード分岐はケース1、2とは異なり、2P面内1次モードを起点としている。ケーブルに加わる非定常空気力により、2P面内1次モード分岐の空力減衰はケース2に比べ大きく、ねじれ対称1次モード分岐のそれと比較的近い。そのため、風速74m/s付近で両モード分岐の振動数が近づくとともに減衰も非常に接近し（図1b））、その後両モード分岐間で主要モード成分の逆転が生じている（図2b））。ただし、フラッター発振風速に関してはケース2との差は1%未満であった。

ケース4のフラッター発振風速はケース3のそれより10%程度高い。また、フラッター時のモード寄与率を見ると全体の約50%がケーブルの振動成分で占められている。このことより、ケーブル（局部）振動と全体振動との内部共振により、マルチケーブルがマルチプルTMDとして挙動していると考えられる。なお、このケースでは狭い振動数域に多数のモードが存在するため、フラッターモード分岐の経路を特定するに至っていない。この点については現在検討中である。

最後に、多々羅大橋の諸元は（株）長大の森園氏に提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

**参考文献** 1)長井正嗣ら：ケーブルにモード座標を用いた桁・ケーブル系の固有値および応答解析、構造工学論文集、Vol.38A、pp.63-72、1992。 2)増川淳二ら：ケーブルの線形・非線形内部共振に着目した斜張橋の動特性と耐風応答、土木学会年次学術講演会概要集、pp.668-669、1993。 3)宮田利雄ら：立体骨組み解析法による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。

表3 フラッター発振風速

| ケース | フラッター発振風速 (m/s) | 起点モード   |
|-----|-----------------|---------|
| 1   | 115.6           | ねじれ対称1次 |
| 2   | 115.9           | ねじれ対称1次 |
| 3   | 116.5           | 2P面内1次  |
| 4   | 128.7           | —       |

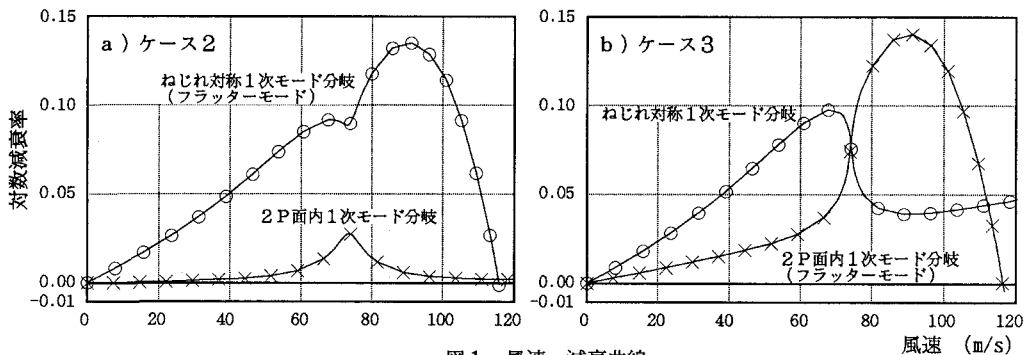


図1 風速-減衰曲線

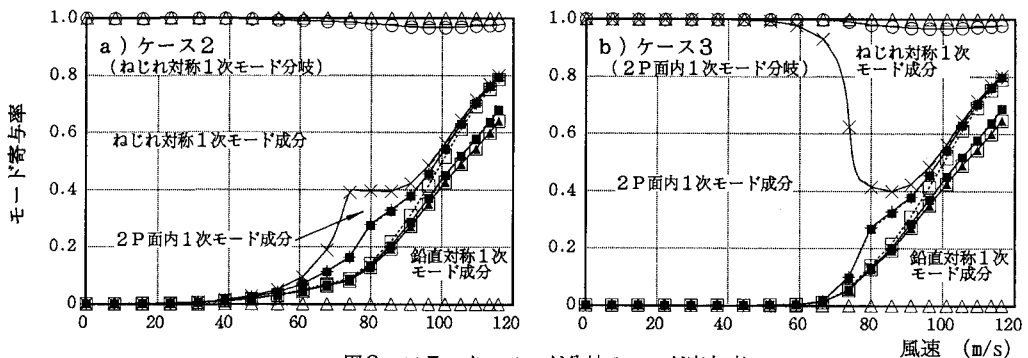


図2 フラッターモード分岐のモード寄与率

△—△ 水平対称1次 □—□ 鉛直対称1次 ▲—▲ 水平逆対称1次 ■—■ 鉛直逆対称1次  
 □—□ 鉛直対称2次 ■—■ 鉛直逆対称2次 +—+ 3P面内1次 ×—× 2P面内1次  
 ○—○ ねじれ対称1次 △—△ 水平対称2次