

埼玉大学工学部 正員 山口 宏樹  
新日本製鉄 加藤 竜

1. はじめに 斜張橋はその長支間化に伴い、風による振動問題がますます重要となり、関連の研究が精力的に進められている。しかし、動的耐風性照査に必要なモード減衰比は相変わらず経験的に仮定されているに過ぎない。このような観点から、著者らは斜張橋の振動減衰能の理論的評価法に関する研究を進め、既往の実橋振動実験データからの考察によって減衰の連成モード依存性などを指摘するとともに、エネルギーに基づくモード減衰の理論的推定法の可能性について検討を加えたり。本研究ではこれを受け、減衰データの得られている生口橋を一例として、固有値解析から減衰評価に必要なモードエネルギー比を算出し、その特性を考察した。同時に、実減衰データとの対応により減衰推定法の可能性を詳しく検討した。

2. エネルギーに基づく減衰評価 これまでの研究により、モード特性の把握がモード減衰評価の鍵となること、また桁、タワー、ケーブルの各部材の減衰性がモード減衰に明確に寄与することが明らかとなっている。そこで、各部材の減衰性がロスファクター $\eta$ で与えられるとし、散逸エネルギーのポテンシャルエネルギーに対する比というモード減衰比の定義を用いて斜張橋のモード減衰を次式で表す。

$$\xi = \eta_g \frac{V_g}{U} + \eta_t \frac{V_t}{U} + \eta_c \frac{V_c}{U} \quad (1)$$

ここで $V/U$ はモードの全ポテンシャルエネルギー $U$ に対する各部材でのひずみエネルギー $V$ の比である。また、添字 $g, t, c$ はそれぞれ桁、タワー、ケーブルを意味する。

3. モードエネルギー解析 斜張橋のモード減衰評価には桁、タワー、ケーブルの連成性の把握が重要であることから、ケーブルの振動を考慮した斜張橋の立体固有振動解析を行った。その際、文献2)にあるように、ケーブル単体のモードを用いた縮約法により、解析モデルの自由度を大幅に低減する工夫をしている。解析に用いたケーブル単体の採用モードは面内、面外それぞれ1次のみである。次に、得られた固有ベクトルと各要素の剛性マトリクスから、各モードに対する各要素でのひずみエネルギーを算出したが、幾何剛性マトリクスにより初期応力によるポテンシャルエネルギーをも求めている。なお、固有値解析の精度は、固有振動数について文献3)での実験値および解析値と比較し、十分であることを確認している。

4. 生口橋のモードエネルギー特性 図1に、例として、鉛直たわみ対称1次、逆対称1次モードのモード形状および、ひずみエネルギー分布を示す。対称1次ではケーブルの横振動が連成しておらず、ケーブルは大きなひずみエネルギーがもたらされるが、逆対称1次ではケーブル連成が認められるものの、ひずみエネルギーは小さくなっているなどの特徴がある。

図2には、各振動モードの総モードエネルギーにおける各構成要素(桁、タワー、ケーブル)の寄与率を示した。要素のひずみエネルギー評価の精度については確認しきれていないため、定量的な議論は難しいが、遊動円木振動でタワーのひずみエネルギーが支配的であること、横たわみ振動では桁をタワーがほぼ同程度の寄与率であることなど、定性的には妥当な値が得られているものも多い。しかし、ねじれ振動でタワーのエネルギーが支配的であるなど、すぐには理解し得ない結果もあり、今後エネルギー評価精度の詰めを行う必要があると考えている。

4. 理論的減衰評価法の妥当性検討 次に、減衰評価式(1)の妥当性を検討した。上述のように、評価式右辺に現れるエネルギー比は各構成要素について求められている。また、実橋での振動実験により、モード減衰が表1のように求められている<sup>3)</sup>。これらの値を式(1)に代入することで、各構成要素のロスファクターに対する関係式がいくつか求められ、そのうち3つを組み合わせることで、3つのロスファクターが推定できることになる。その結果を図3に示す。横軸は3つの条件式の組み合わせケースであり、縦軸はロスファクターである。桁、タワー、ケーブルのロスファクターがそれぞれ、ほぼ一定の値で求められており、減衰評価式が妥当であるかのように見える。しかし、ケーブルのロスファクターが負値になるなど(既往

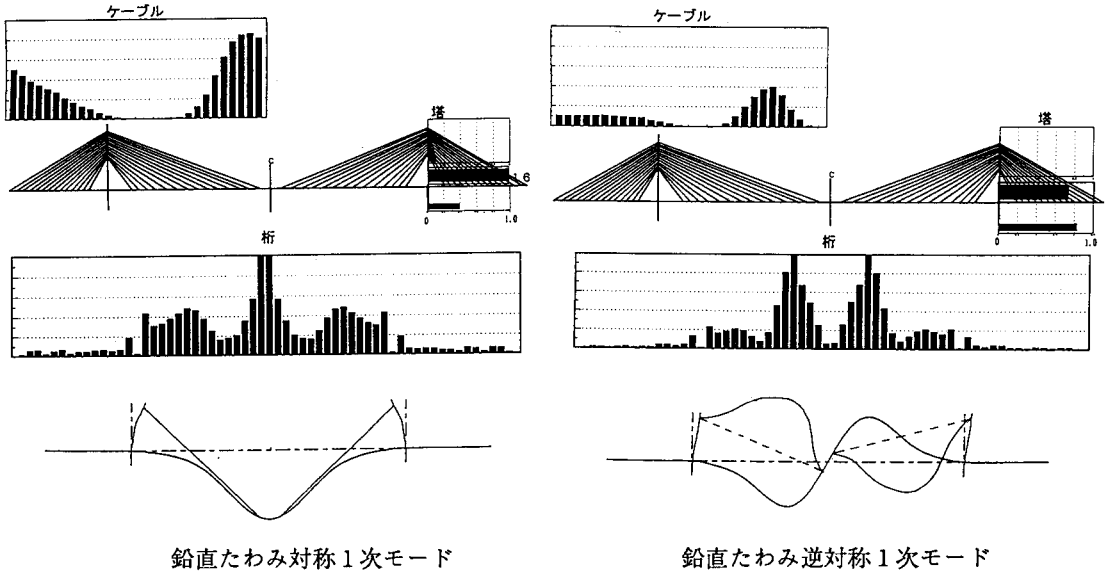


図1 生口橋の振動モードとモードひずみエネルギー分布

の研究では、ケーブルのロスファクターは0.06程度とされている）、必ずしも良い結果とはなっていない。各要素のエネルギー評価精度の問題が影響しているように思われる。

5. まとめ 生口橋を例に、斜張橋のモードエネルギー特性を調べ、モード減衰との対応を見ることで減衰評価法の妥当性の検討を行った。ひずみエネルギーの解析精度に問題が残るため、依然として定性的議論に止まるものの、モードエネルギーに基づく斜張橋の理論的減衰評価の可能性は十分にあるものと考えている。今後、解析精度を詰めた上で、他の多くの斜張橋について同様の解析を行っていく予定である。

参考文献 1) 例えば、山口：斜張橋および斜張橋ケーブルの振動減衰に関する2, 3の考察, 土木学会48回年講, pp.792-793, 1993. 2) 川畑：ケーブルにモード座標を用いた斜張橋の動的応答解析, 長岡技術科学大学修士論文, 1992. 3) 藤原他：マルチケーブル複合構造形式斜張橋の固有振動特性, 構造工学論文集, 39A, pp.831-839, 1993.

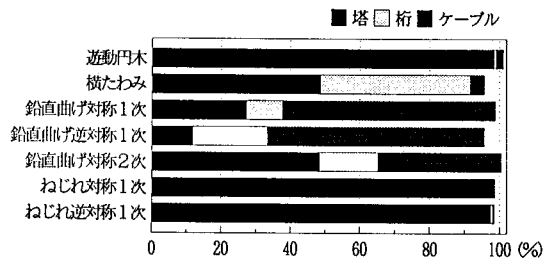


図2 モードエネルギーにおける寄与率

表1 生口橋のモード減衰（実測値）

| モード          | 対数減衰率<br>(文献)  | モード減衰比             |
|--------------|----------------|--------------------|
| 鉛直曲げ対称1次モード  | 0.018          | 0.00286            |
| 鉛直曲げ逆対称1次モード | 0.020          | 0.00318            |
| 鉛直曲げ対称2次モード  | 0.031          | 0.00493            |
| ねじれ対称1次モード   | 0.038          | 0.00605            |
| ねじれ逆対称1次モード  | 0.019<br>0.022 | 0.00302<br>0.00350 |

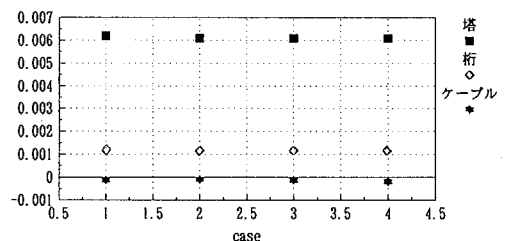


図3 各構成要素のロスファクター（推定値）