

常時微動計測に基づく鋼橋の減衰同定とエネルギー的減衰評価法の適用

Damping identification based on ambient vibration measurement
and energy-based damping estimation of a steel bridge

河原井耕介¹, 山口宏樹², 松本泰尚³, 吉岡勉⁴

Kosuke Kawai, Hiroki Yamaguchi, Yasunao Matsumoto, Tsutomu Yoshioka

¹ 埼玉大学大学院修士 2 年, 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

² 工博, 埼玉大学大学院教授, 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³ PhD, 埼玉大学大学院准教授, 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴ 博士(工学), 大日本コンサルタント(株), 保全エンジニアリング研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

In many researches about vibration-based damage detection of the structure, one of modal parameters, damping ratio, was shown to be a reliable indicator for damage detection of steel bridges with local damages. There is, however, a problem of accuracy in experimentally indentifying the modal damping ratio, and its theoretical evaluation becomes important to assure the damage detection. This paper shows the experimental modal analysis of a steel langer bridge by ERA (Eigensystem Realization Algorithm) with EMAC (Extended Modal Amplitude Coherence) for more accurate damping identification. Furthermore the energy-based damping estimation method is applied for theoretically analyzing the modal damping ratios of the bridge.

Key Words: vibration measurement, ERA, EMAC, energy-based damping estimation

キーワード: 振動計測, ERA, EAMC, エネルギー的減衰評価

1. はじめに

日本では, 戦後復興から経済発展の過程で, 全国に多数の橋梁が整備されてきた. その建設時期は, 特に高度経済成長期に集中しており, 近年, それらの橋梁において, 老朽化による弊害が顕在化している. 特に, 2007 年の木曾川大橋の鋼トラス橋斜材破断に端を発して多数の鋼橋で老朽化による部材の損傷が報告されている¹⁾.

このような状況の中, 橋梁の損傷を効率よく検知しようと, 振動計測を利用した損傷同定の方法が様々研究されてきた^{2), 3)}. 振動による損傷同定のための指標としては, 固有振動数, モード形状, モード減衰比等の振動特性が考えられる. 中でも, 吉岡らの研究⁴⁾では, 鋼トラス橋の局所的な損傷に対して, モード減衰比が敏感である可能性が示されている. しかし, モード減衰比は, 一般に同定精度が低く, また振幅依存性などにより変動することが知られている. そのため, 現状では一定の信頼性を持って減衰比により構造物の状態を評価することは

簡単ではない. その原因として, 実構造物の減衰の理論的な評価が困難なことがあげられる.

そこで, 本研究では以下の 2 つの目的を設定した. 1 つは, 常時微動計測を利用した実験モード解析により, 精緻な減衰同定を行うこと, 2 つ目に, 減衰の理論的な評価の試みとして, 実験モード解析の対象橋梁に対してエネルギー的減衰評価法⁵⁾の適用を試みることとした. 実験モード同定は, 高精度モード同定法である ERA (Eigensystem Realization Algorithm)⁶⁾ 解析により行った. その際, 同定の精緻化のための指標の一つとして, 同定結果の評価指標である EMAC (Extended Modal Amplitude Coherence)⁷⁾ を用い, 考察を行っている. 最後に, エネルギー的減衰評価法による, 理論モード解析を利用した減衰解析を行った.

2. 対象橋梁の概要と理論モード解析

吉岡らの研究⁴⁾で鋼トラス橋の局所的損傷がモード減

衰比で捉えられたことを念頭に、トラス橋と同様に多数の部材からなる鋼ランガー橋を研究対象とした。初めに、対象橋梁についてその概要を示した後、理論モード解析を行って橋梁の振動特性を把握する。この解析結果を基に、実験モード同定結果の考察を行うと共に、エネルギー的減衰評価による減衰解析を行うこととなる。

2.1 橋梁概要

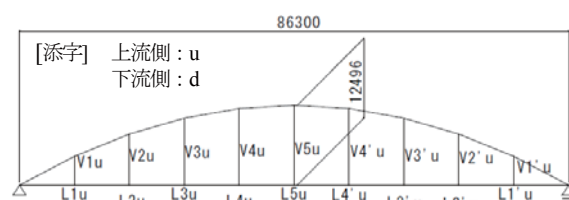
研究対象とした橋梁は、9 径間の鋼箱桁橋と 3 径間の単径間鋼ランガー橋の、全 12 径間からなる全長 810m の橋梁の内の鋼ランガー橋 1 径間（支間長 86.3m、有効幅員 17.5m）である（図-1）。竣工は 1971 年である。支承は鋼製のピン支承、ピンローラー支承であり、鉛直材は H 型断面、アーチリブは箱型断面となっている。橋梁の状態は、特別目立った損傷、劣化等は見られず、比較的健全な状態と考えられる。

2.2 理論モード解析による鋼ランガー橋の振動特性

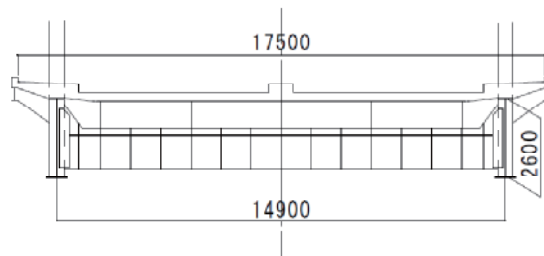
(1) 解析モデルの概要

対象橋梁の有限要素モデルを作成し、固有値解析を行って、鋼ランガー橋の振動基本特性の把握を行った。解析モデルを図-2 に示し、その詳細を以下に列記する。

- 1) 対象橋梁を立体骨組みモデルとして有限要素法で離散化している。寸法等は竣工図を基に決定し、竣工時の理想的な状態として、モデル化した。
- 2) 各部材は全て梁要素でモデル化した。格点間は、鉛直材のみ分割し、その長さに応じて、5 ～ 15 要素に分割した。その他の部材は、格点または部材同士の接合点以外には節点を設けず、その節点間での分割はしていない。
- 3) RC 床版の剛性については、ヤング係数比 7 として、橋軸方向の剛性を縦桁に、橋軸直角方向の剛性を、縦桁と交差し、横桁と並行して設置した梁要素に、それぞれ付加している。床版の質量は、設計図面中の重量表を参考に、橋軸方向に 9.67ton/m として与えている。
- 4) 各部材の質量は材料特性として鋼材の密度 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を与えている。
- 5) 鋼材のヤング係数は 200GPa としている。
- 6) 境界条件は、振動時の可動支承での動摩擦力を考慮し、支承位置にばね要素を置き、弾性支持とした。バネ定数は $3.3 \times 10^6 \text{ kN/m}$ である。これは、各支点の死荷重時鉛直反力 3300kN、動摩擦係数 0.05、水平変位 0.05mm に対応している。ここでの水平変位は供用時振動計測での変位振幅である。
- 7) 鉛直材 V5u、V2d、V2'd に道路灯が設置されている。その質量は、60kg の質量要素として、道路灯設置位置に付加している。
- 8) 橋脚や基礎は、上部工の供用時振動に与える影響は小さいと考え、モデル化していない。



(a) 側面図



(b) 断面図



(c) 鉛直材、アーチリブの断面

図-1 対象橋梁の一般図（単位 mm）

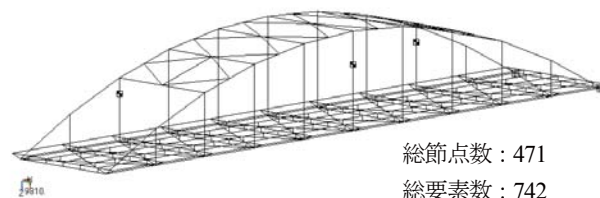


図-2 解析モデル

このモデルに対して、通常の固有値解析と、死荷重時を考慮して、非線形解析による自重つり合い状態に関する固有値解析を行った。なお、使用した解析ソフトウェアは汎用有限要素プログラム Femap with NX Nastran v10.2 である。

(2) 鋼ランガー橋の振動特性

解析結果を以下に示す。振動モードは、主に 2 つに分けることが出来る。1 つは、図-3(a), (b), (c) に示すような、橋梁全体が曲げ振動をする全体モード、もう 1 つは、図-3(d) の様な、一部の部材の振動が卓越する局所的なモードである。理論的には、局所モードが全体モードに連成したモードがさらに存在するが、ここでは、実験同定結果との比較を念頭に、鉛直方向の全体曲げ振動、ねじれ振動モードと、鉛直材の曲げ振動モードに着目して考察を行った。

表-1 理論モード解析結果と実験モード同定結果の比較

モード	実験同定 (ERA 解析)		理論解析 (死荷重なし)		理論解析 (死荷重考慮)		理論解析 (死荷重なし, $\mu=0.009$)	
	振動数 (Hz)	減衰比	振動数 (Hz)	実験との 差 (%)	振動数 (Hz)	実験との 差 (%)	振動数 (Hz)	実験との 差 (%)
1 鉛直逆対称 1 次	1.44	0.0320	1.36	5.6	1.34	6.9	1.36	5.6
2 鉛直対称 1 次	1.83	0.00885	1.91	-4.4	1.90	-3.8	1.84	-0.5
3 ねじれ対称 1 次	2.90	0.00585	2.45	15.5	2.78	4.1	2.45	15.5
4 鉛直対称 2 次	3.13	0.0138	3.07	1.9	3.06	2.2	3.05	2.6
5 V5u 鉛直材卓越	8.29	0.00183	7.28	12.2	8.12	2.1	7.28	12.2
6 V5d 鉛直材卓越	8.47	0.00120	7.65	9.7	8.52	-0.6	7.64	9.8

表-1 に、後に示す実験同定結果と理論解析結果の比較を示す。死荷重を考慮しない理論解析の振動数では、実験同定との差が大きいモードもあるが、死荷重を考慮することにより、鉛直材の横振動が卓越するモードおよびねじれモードで、実験同定値との振動数の差が大きく縮まっている。死荷重時軸力に基づく幾何剛性により、局所部材の剛性が高くなることの影響が確認できると言えよう。また、V5 鉛直材横振動卓越モードについては、道路灯の付いている V5u 鉛直材の卓越モードの振動数が道路灯のない V5d 鉛直材の振動数と比べて、下がっていることが確認できる。

後述するように、エネルギー的減衰評価法による減衰解析の際、可動支承での摩擦減衰を評価するための動摩擦係数 μ を 0.009 と仮定した。この時の解析結果も表-1 に合わせて示した。前述の解析結果（死荷重なし）と比較すると、鉛直対称 1 次モード等、モードによっては多少の振動数変化が見られる。可動支承での摩擦力の変化が固有振動数に与える影響である。

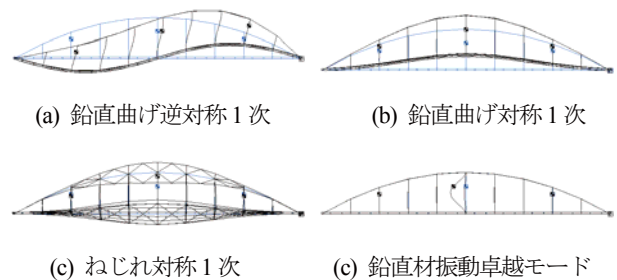


図-3 理論モード形状



図-4 交通状況

3. 実験モード同定と減衰同定精緻化の検討

対象橋梁に対して、供用中の振動の 15 点同期計測を行った。図-4 に見られるように、対象橋の交通量は多く、交通により定常的に加振されている状況であった。振動の計測は、13 点の加速度とともに、2 つの可動支承の水平変位も同期をとって計測した。得られたデータから ERA 解析によりモード同定を行うと共に、モード減衰比に着目して、その変動要因や、同定の精緻化について検討を行った。

3.1 ERA 解析による実験モード同定

(1) 供用時常時微動計測

対象橋梁の供用中の振動計測を行った。加速度計の設置位置は図-5 の通りである。橋梁の全体振動を捉えるために、床版上に 9 点の加速度計を設置し、鉛直材の曲げ振動を捉えるために、局所振動や連成振動の可能性のある鉛直材 4 本について、アーチ面内方向の加速度を計測

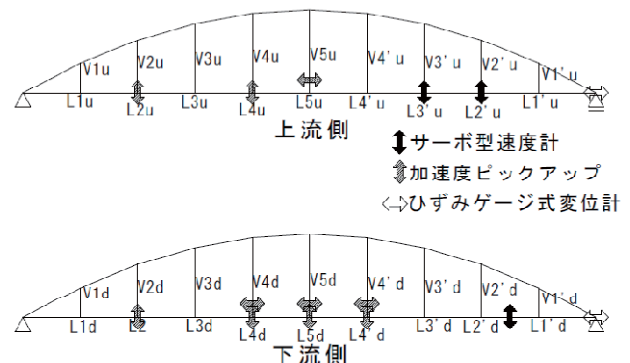


図-5 計測点配置

した。なお、所有している加速度計の種類と数量の制約から、サーボ型速度計と圧電型加速度計を併用した。また、同時に可動支承の水平変位も計測した。使用した計測機器を表-2 に示す。計測のサンプリングレートは 100Hz とし、10 分間の連続計測を 5 回行った。モード同

表-2 計測機器一覧

機器	型式	メーカー	仕様
圧電型加速度計	PV-87	リオン	測定範囲： $\pm 400\text{m/s}^2$ 圧電感度：アンプ別 応答周波数：1～3000Hz
アンプ	UV-06A	リオン	2ch/台
多チャンネル用 モジュール	SCXI-1000	NI	最大4モジュール収納可
計測ソフトウェア	LabVIEW	NI	
サーボ型速度計	VSE-15D	東京測振	測定範囲： $\pm 0.1\text{m/s}$ 圧電感度：0.1V/m/s 応答周波数：0.2～100Hz
サーボ型用測定器	SPC-51A	東京測振	16ch/台、16bit 1～3ch：アンプ内蔵 4～16ch：ジャンクション ボックス併用

注) NI: National Instruments

定に適用した ERA は、入力として自由振動波形が必要となる。そこで、計測と同時に、橋面上の交通状況をビデオカメラで撮影し、通過車列が途切れた後の波形を抽出した。合計 50 分間の計測データから、10 個の自由振動を抽出している。解析に用いた波形の例を図-6 に示す。

(2) ERA によるモード同定法

本研究では、多点同期計測からのモード同定法として ERA (Eigensystem Realization Algorithm) ⁶⁾ を用いた。ERA は、構造物を 1 つのシステムとして考えて、そのシステム同定を行う手法である。同定されたシステムから、固有振動数、モード形状、モード減衰比等の振動特性を算出する。

一般に、実測データに対する単純な ERA 解析の結果は、計測誤差等に起因する偽のモードが多数含まれる。そこで、同定結果を評価し、信頼性の高い同定モードを抽出する必要がある。ERA は解析対象システムの次数、即ち対象構造物の自由度を変化させながら振動特性の算出を繰り返す。そこで、システム次数の変化に対して安定して同定されるモードを、信頼性の高い同定として抽出する方法が考えられている。その際、同定結果を比較する指標としては、MAC* (Modal Assurance Criteria) や、振動数差などが利用される。これらとは別に、ERA による同定結果自体の評価指標として MAC (Modal Amplitude Coherence) がある。また、減衰比の値によって、不自然なものを取り除くことも行われる。本研究では ERA による実橋梁のモード同定スキームとして、吉岡ら ⁴⁾ が整理している方法を採用する。ただし、本研究では、MAC に代わる評価指標として、EMAC (Extended Modal Amplitude Coherence) ⁷⁾ の利用を検討した。なお、解析には支承変位波形も含めて 15 点の多点 ERA 解析を行っている。

(3) モード同定結果

ERA 解析から得られたモードを固有振動数、モード

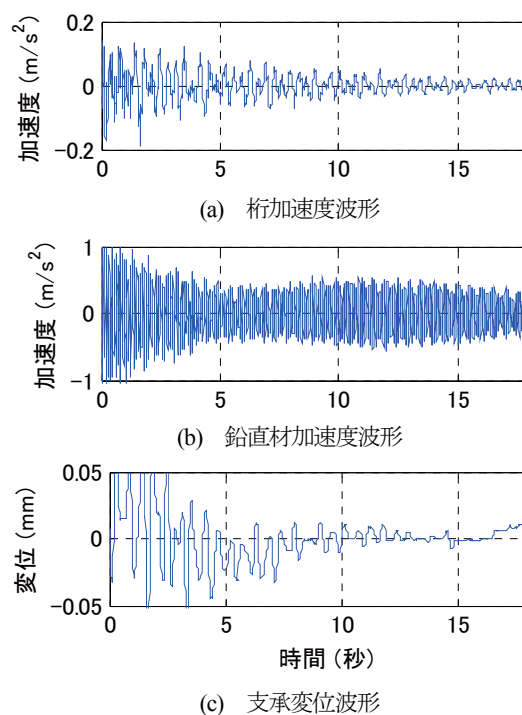


図-6 供用時振動計測波形

減衰比と共に、図-7 に示す。ここに示したのは同定されたモードの一部である。各モードとも、1 つ以上の自由振動波形で同定されており、その内 1 つの同定を例示したものである。全体モード、鉛直材横振動卓越モードが安定して同定されている。鉛直材横振動卓越モードについても、理論解析結果と同様、道路灯の有無の違いにより、上下流側間の V5 鉛直材で振動数に差が出ている。

ここに示したものより高次のモードでは、理論モード解析、実験モード解析共にモードが非常に複雑になり、モードの整理が簡単ではなくなる。本研究では、エネルギー的減衰評価による減衰解析の適用検討のため、精度良く同定されていると考えられる、図-7 の 6 モードを検討対象とした。

3.2 減衰同定精緻化の検討

(1) 減衰変動要因の考察

ERA 解析によるモード減衰比同定値は、自由振動ごとにばらつきがみられる。そこで、計測データから減衰の変動要因について振幅依存性を中心に検討を行った。

橋梁全体振動モードについて、複数の自由振動波形から同定されている鉛直曲げ対称 1 次、ねじれ対称 1 次モードに着目して検討を行う。これらのモード減衰比を桁振動の鉛直方向最大変位点のモード実振幅に対してプロットしたものを図-8 に示す。このグラフから、モード減衰比とモード実振幅の間に、若干ではあるが正の相関がみられる。しかし、図-8 (b) からわかるように、振幅が小さい領域では、モード減衰比の変動が大きくなっている。モード実振幅が小さいことから、誤差等の影響も

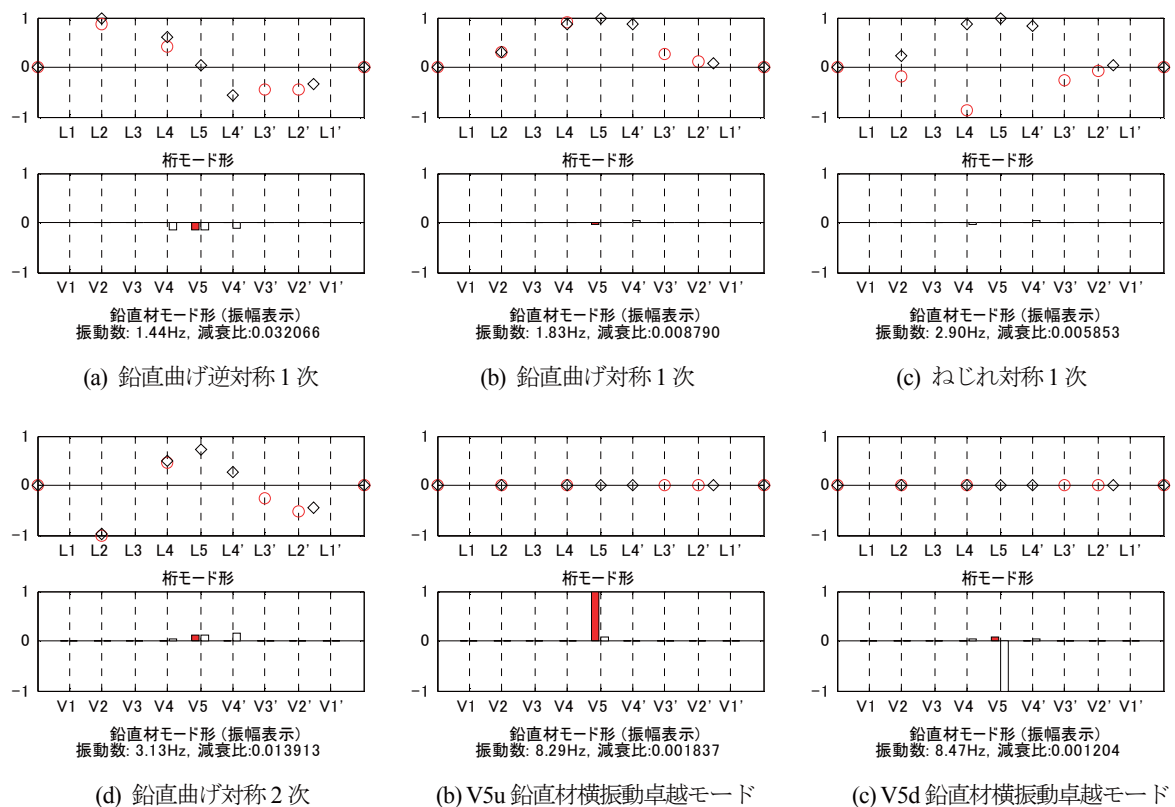
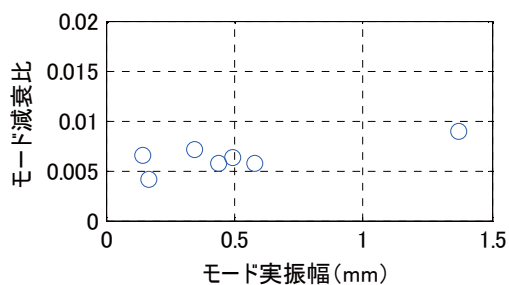


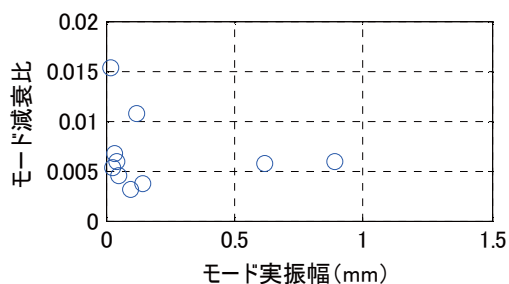
図-7 実験同定モード (○ : 流側, ○ : 下流側)

考えられるが、振幅以外の減衰要因の存在も否定できない。ここで挙げたような全体振動モードに対しては、比較的支承変位が大きく、その影響も大きいと考えられる。そこで、同定した支承のモード実振幅とモード減衰比の関係を図-9 に示す。図-8 よりもプロットの数が減って

るが、これは、振幅の小さな幾つかの自由振動では、支承の変位が計測されていなかったため除外した結果である。これを見ると、やはり若干ではあるが、支承モード実振幅との間に正の相関がみられる。よって、全体振動モードに対して、支承での減衰が影響していることが

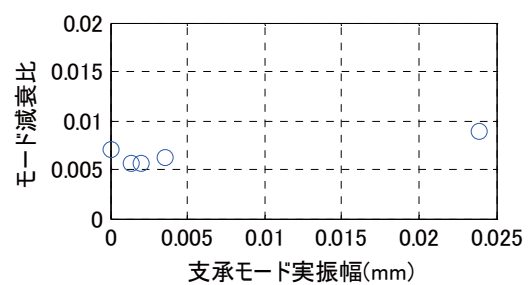


(a) 鉛直曲げ対象1次モード

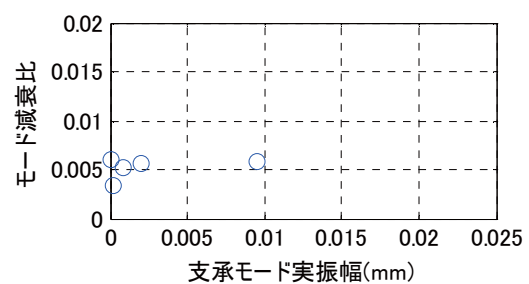


(b) ねじれ対称1次モード

図-8 全体モード減衰比の振幅依存性



(a) 鉛直曲げ対称1次モード



(b) 鉛直曲げ対称2次モード

図-9 全体モード減衰比の支承振幅依存性

分かった。

ここでは、振幅との関係について考察したが、より詳細な減衰要因の考察のためには、エネルギー的減衰評価による減衰解析が必要となる。

(2) EMAC を利用した減衰同定の精緻化

ERA による同定結果は、1つの入力に対しても、システム次数によって変動する。その中で、同定値をどのように決めるかは減衰の精緻化のために重要な問題である。これまでは、吉岡らのモード同定スキームにより同一モードとして同定された同定値群の平均値をとって同定値としていた。しかし、図-10 に示すように、このような同定値群も、システム次数の変化に対して大きく変化している場合がある。このような場合、より安定した同定、即ち、システム次数に対するプロットが直線的になっている範囲の同定がより信頼性が高いと考えることが出来る。

そこで、MAC に代わり、EMAC により、同定の抽出を行うことを考える。図-10 は、MAC が 0.9 以上でスクリーニングしたものと、EMAC が 0.2 以上でスクリーニングした結果を重ねたものである。EMAC の方が精度指標としてより厳しく、特に減衰比に関してより安定した同定値を抽出できることがわかる。これより、EMAC は、より安定した減衰同定値を抽出するという意味で、MAC より有効であると考えられる。

4. エネルギー的減衰評価法適用の検討

以上で整理した理論解析結果と実験モード同定結果を利用して、エネルギー的減衰評価法による簡易的減衰解析を試みた。ここでは、その概要と結果を示し、その妥当性について考察する。

4.1 エネルギー的減衰評価法の概要⁵⁾

エネルギーの散逸に起因する n 次モード減衰比 ξ_n は、振動 1 周期の間に散逸されるエネルギーを考えることで、式(1)で定義される。

$$\xi_n = \frac{D_n}{4\pi U_n} \quad (1)$$

ここで、 D_n は 1 周期での散逸エネルギー、 U_n は振動系の持つポテンシャルエネルギーである。この D_n は、様々な減衰要因によるものであり、各要因を整理してモデル化し、要因別の散逸エネルギーを推定して積み上げることで D_n を捉え、モード減衰比を評価しようとするのがエネルギー的減衰評価法である。本研究の対象橋梁の減衰要因には以下のものが考えられる。なお、風による減衰は小さいと考え、本研究では考慮しないこととする。

- 各部材の材料における材料減衰
- 部材間の接合部でのエネルギー散逸
- 可動支承での摩擦力による摩擦減衰

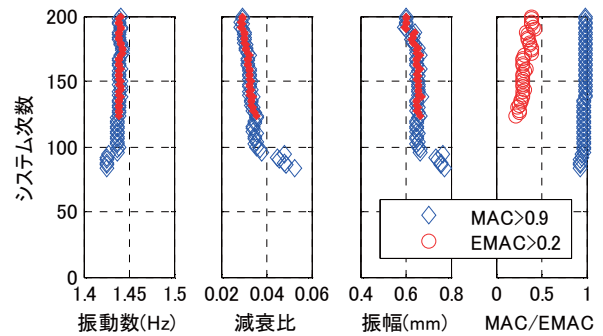


図-10 MAC, EMAC によるスクリーニングの比較

各要因の減衰エネルギーのモデルは山口らの研究⁵⁾を参考に以下のように考える。なお、ここでは簡便のため、部材間の接合部でのエネルギー散逸を独立して考えることはせず、材料減衰と一括して考えることとした。

(1) 材料減衰

材料減衰は、部材の変形に伴って、材料内部で消費されるエネルギーであり、その減衰エネルギー D_n は、変形の際のひずみエネルギー V_n に比例し、式(2)で表わされる。

$$D_n = 2\pi\eta V_n \quad (2)$$

この時の η はロスファクターと呼ばれ、材料の減衰性を表わす。本研究では、簡単のために、対象橋梁をアーチ部、桁部、鉛直材の 3 つの部分に分けてそれぞれに 1 つずつ、ロスファクター η_a , η_g , η_v を考える。即ち、橋梁全体を 3 つのグループに分けて、グループごとの材料減衰を考えることとする。この時、ロスファクターは、各グループ内の接合部でのエネルギー減衰も加味したものとなり、アーチ部、桁部については、横構や床版などの影響を、鉛直材については、上下端の接合部の影響を、それぞれ含めたものとなる。

(2) 可動支承での摩擦減衰

非保存力である動摩擦力による仕事があるまま散逸エネルギー D_n になるとして、式(3)でモデル化する。

$$D_n = 4\mu_s A_s R \quad (3)$$

ただし、 μ_s は可動支承の動摩擦係数、 A_s は可動支承の振幅、 R は支承での鉛直反力である。本研究では、既往の研究⁹⁾でのローラー支承の動摩擦係数を参考にしつつ、後述するように試行錯誤的に $\mu_s = 0.009$ を仮定した。

4.2 鋼ランガー橋の減衰解析

(1) エネルギー的減衰解析

以上をもとに、減衰エネルギーを評価し、減衰解析を試みる。評価に必要なアーチ部、桁部、鉛直材のひずみエネルギー V_a , V_g , V_v 、および支点反力 R は、前掲の理論解析により求めた値を使う。第一段階として、死荷重を考慮しないケースの解析結果を用いることとし、ポテンシャルエネルギーとしてひずみエネルギーのみを考

え、死荷重に起因した部材軸力によるポテンシャルエネルギーは考慮していない。ただし、解析結果は正規化されたモードについてのものであるため、実験同定モード振幅に対応させてエネルギーを補正している。一方、可動支承のモード振幅 A_s については、同様に補正した支承の理論モード変位と、実験モード同定による支承のモード実振幅が大きく異なるため、実験同定値を用いることとした。なお、鉛直材振動卓越モードに対しては、支承変位のモード実振幅が 10^{-4} mm程度とノイズに埋もれるレベルであり、解析では可動支承の振幅 A_s を0とした。

以上より、アーチ部、桁部、鉛直材、可動支承それぞれの減衰エネルギー $D_{a,n}$ 、 $D_{g,n}$ 、 $D_{v,n}$ 、 $D_{s,n}$ は式(4)のようになる。ただし、 $D_{s,n}$ は2つある可動支承での減衰エネルギーの合計として評価する。

$$D_{a,n} = 2\pi\eta_a V_{a,n} \quad (4a)$$

$$D_{g,n} = 2\pi\eta_g V_{g,n} \quad (4b)$$

$$D_{v,n} = 2\pi\eta_v V_{v,n} \quad (4c)$$

$$D_{s,n} = 2 \times 4\mu_s A_s R \quad (4d)$$

以上を式(1)に代入して整理すると、式(5)に示す線形方程式が得られる。このとき、 $D_{s,n}$ に関しては、前述の通り $\mu_s = 0.009$ を仮定して求めることができるので、既知変数として考えている。

$$\begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{8\mu_s A_{s,1} R}{4\pi U_1} \\ \vdots \\ \frac{8\mu_s A_{s,N} R}{4\pi U_N} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{2\pi V_{a,1}}{4\pi U_1} & \frac{2\pi V_{g,1}}{4\pi U_1} & \frac{2\pi V_{v,1}}{4\pi U_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{2\pi V_{a,N}}{4\pi U_N} & \frac{2\pi V_{g,N}}{4\pi U_N} & \frac{2\pi V_{v,N}}{4\pi U_N} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_a \\ \eta_g \\ \eta_v \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 N は考慮するモードの数である。式(5)から、最小2乗法により未知係数であるロスファクター η_a 、 η_g 、 η_v を推定し、その結果を式(4)に代入することで、各要因の減衰エネルギーを知ることができる。なお、本論文で考慮したモードは、表-1に示した6モードである。また、エネルギーの計算には2章において述べた、支承の摩擦係数を0.05と仮定したモデルを用いている。

(2) 減衰解析結果

減衰解析の結果によって同定された各減衰パラメータの推定値を表-3に示す。既往の研究⁹⁾によれば、実験条件等によってばらつきが大きいながら、鋼材のロスファクターとして0.0003～0.0024が与えられている。表-3の値は、この範囲内か若干大きな値となっている。これは、各ロスファクターに接合部の減衰の影響も加味されていることを考えれば、妥当な値であると考えられる。また、3つを比較すると、桁のロスファクターが比較的大きな値となっており、床版の減衰の影響が現れていると考えられる。

このように同定された減衰パラメータを用いて、エネルギー的減衰解析によって推定されるモード減衰比を実験値と比較したものが表-4である。鉛直逆対称1次モ

表-3 パラメータ推定結果

パラメータ	推定値
アーチ部ロスファクター η_a	0.00166
桁部ロスファクター η_g	0.00531
鉛直材ロスファクター η_v	0.00311

表-4 推定減衰比

モード		減衰比		誤差 (%)
		実験値	推定値	
1	逆対称1次	0.0320	0.0162	-49.5
2	対称1次	0.00885	0.00761	-14.0
3	ねじれ1次	0.00585	0.00474	-19.0
4	対称2次	0.0139	0.0319	129.6
5	V5u卓越	0.00183	0.00157	-14.3
6	V5l卓越	0.00120	0.00163	35.9

ード、鉛直対称2次モードでやや誤差が大きいが、他のモードでは10%～20%程度の誤差に収まっており、ある程度実測と整合する結果が得られたと考えられる。

次に、モード毎の部分ごとのひずみエネルギー分布を図-11に示し、最後に要因別減衰比分布を図-12に示す。なお、図-12との比較のために、図-11には支承の項目も入れている。まず、ひずみエネルギーの分布について簡単に考察する。図-11の結果はアーチ構造の特性から理解することができる。すなわち、アーチリブ全体が同一方向に変位する対称1次のモードでは、アーチに軸線方向の大きな直応力が作用し、大きなひずみエネルギーを持つが、他のモードでは曲げ変形が主で、大きな軸力は作用せず、ひずみエネルギーは小さい。後者では、代わって桁が変形に抵抗し、大きなひずみエネルギーを持つ。

以上を踏まえて、図-12に示した要因別減衰比分布について考察する。まず、支承変位が大きい鉛直曲げモード（図-12(a), (b), (d)）で支承の影響が大きいことが分かる。全体モードに対して次に影響が大きいのは桁での減衰である。アーチと鉛直材での減衰が小さいのは、ロスファクターが桁と比較して小さいことから理解される。また、ねじれ対称1次モード（図-12(c)）は、全体モードの中で減衰が最も小さいが、これは、可動支承の変位が小さく、支承での減衰が小さいことによると考えられる。一方、鉛直材横振動卓越モード（図-11, 12(e), (f)）では、当然、ひずみエネルギーは鉛直材に集中し、鉛直材での減衰が大きな値となっている。

本研究では、鋼ランガー橋に対するエネルギー的評価による減衰解析の一例を示した。しかし、本解析では、以下に挙げるような仮定、簡易化を含んでいる。

- 部材接合部でのエネルギー散逸を接合部材の材料減衰に含めている
- 死荷重に基づく初期軸力によって生ずる振動ポテンシャルエネルギーを考慮していない

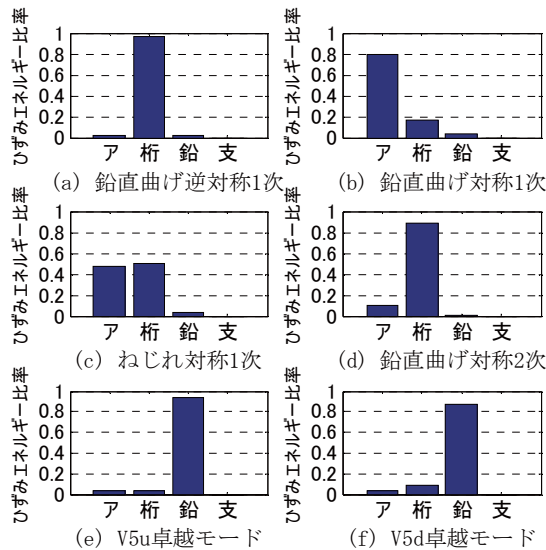


図-11 各モードのひずみエネルギー分布
(ア：アーチ部，桁：桁部，鉛：鉛直材，支：支承部)

- 可動支承の摩擦係数の決定には恣意的な部分も含まれ、また、理論解析との整合性が十分ではない。

以上のように、本研究における減衰解析は必ずしも十分に信頼性が確保されていない。減衰評価式 (5)や、仮定するパラメータの値の変化に対して、減衰パラメータの推定値は敏感に変化し、負値で推定されたケースもあり、本論文では、可動支承の動摩擦係数を適切に仮定し、物理的に妥当と考えられる解析結果のみを示している。したがって、解析モデルの精度の向上等さらなる検討が不可欠であるが、本研究で、鋼橋に対するエネルギー的減衰評価法による減衰解析の一例を示したことは、減衰変化からの損傷同定に向けて、減衰の理論的評価の可能性を示す上で有用であると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 鋼ランガー橋に対して、理論モード解析を行い、3種類のモードの存在を整理した。
- 2) 鋼ランガー橋に対して供用時振動計測を行い、ERAを適用して減衰の精緻な同定を試みた。同定の精度指標としてMACとEMACを比較し、EMACの方がより安定した同定を抽出できることを示した。
- 3) 実験同定結果の考察から、対象橋梁の全体振動モードのモード減衰比について、振幅依存性、および支承変位振幅に対する依存性が見られた。
- 4) 理論モード解析と実験モード同定の結果を利用してエネルギー的減衰評価による減衰解析を行い、減衰の理論的評価の可能性を示した。本解析は仮定や簡略化を含んだものであり、今後、さらなる検討が必要である。

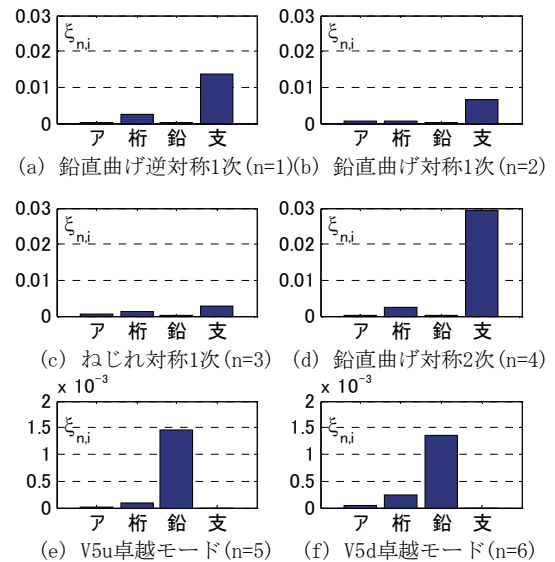


図-12 各モードの減衰比分布

参考文献

- 1) 山田健太郎：木曾川大橋の斜材の破断から見えるもの、土木学会誌，Vol.93，No.1，pp.29-30，2008.1.
- 2) Jeong-Tae Kim, Jae-Hyung Park, Byung-Jun Lee：Vibration-based damage monitoring in model plate-girder bridge under uncertain temperature conditions, Engineering Structures, 29 (2007), pp.1354-1365, 2006.10.
- 3) R.O.Curadelli, J.D.Riera, D.Ambrosini, M.G.Amani：Damage detection by means of structural damping identification, Engineering Structures, 30 (2008), pp.3497-3504, 2008.2.
- 4) 吉岡勉，伊藤信，山口宏樹，松本泰尚：鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価，土木学会論文集A，Vol.66，No.3，pp.516-534，2010.
- 5) 山口宏樹，高野晴夫，小笠原政文，下里哲弘，加藤真志，加藤久人：斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見つばさ橋への適用，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.217-227，1996.7.
- 6) Jer-Nan Juang, Richard S. Pappa：An Eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.9-10.
- 7) Richard S. Pappa, Kenny B. Elliott：Consistent-mode indicator for the Eigensystem realization algorithm, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.16, No.5, pp.852-858, 1993.9-10.
- 8) J. Zhang, R. J. Perez, E. J. Lavernia：Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials, Journal of Materials Science, 28, pp.2395-2404, 1993.
- 9) 加藤京子：文献レビュー 免震建築「揺れに耐える」から「揺れをのがす」へ，情報管理，Vol.43 (4)，pp.332-342，2000.7.