

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月10日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656113

研究課題名（和文）供用時微動計測に基づく構造健全度評価に向けた、減衰変化同定の精緻化

研究課題名（英文）Accuracy improvement of damping-change identification for structural health monitoring based on ambient vibration measurement

研究代表者

山口 宏樹 (YAMAGUCHI HIROKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50134474

研究成果の概要（和文）：鋼トラス橋、鋼ランガー橋における供用時微動計測を行って計測の最小化に関する有用な知見を得るとともに、高精度振動計測データベースを構築した。また、鋼ランガー橋のデータを用いて減衰解析を行い、エネルギー的評価法における減衰のモデル化法、減衰パラメータの推定法、振動数・モード形とモード減衰に対する model updating を段階的に行う2段階法について検討して、モード減衰比を精緻に同定できることを示した。

研究成果の概要（英文）：The ambient vibration measurements of steel truss bridge and steel Langer bridge were conducted to study a possibility of minimizing the number of sensors as well as to have highly accurate database of bridges' ambient vibration data. The energy-based damping analysis with the two-step model updating was also conducted for the data of Langer bridge, and it was concluded that the proposed method can improve the accuracy of damping identification for structural health monitoring.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	0	1,900,000
2010年度	600,000	0	600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学，構造健全度，供用時微動計測，モード減衰同定，ERA，wavelet 変換，エネルギー的減衰評価

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 橋梁の維持管理体系の基本である近接目視点検は、損傷程度のカテゴリや対策要否の判定結果がばらついたり、見えない部位の損傷は検知できないという問題があるだけでなく、見た目の損傷劣化を積み上げただけでは、路線のサービス水準を落してまで緊急に補修補強する判断がなかなか下せないという問題を有する。したがって、損傷劣化した部材

や橋梁の実際の振る舞いである振動を計測し、健全度を評価する方法が、このような問題を有する点検・診断を補う手法として注目されている。供用時微動モニタリングに基づく社会資本ストックの構造健全度評価を実用化するには、(a)簡易で高精度な計測システムを実現した上で、(b)計測データから構造物の状態を精緻に同定し、その有用性を実証する必要がある。(a)、(b)ともに国内外での研究

開発が精力的に進められつつあるものの、土木構造分野における対応は立ち遅れており、本研究の主題である、減衰変化からの健全度評価にあっては研究が殆ど進んでいない。損傷劣化による振動減衰変化に着目し、減衰の非線形性や時変性といった減衰メカニズムをも考慮した減衰同定を model updating により行おうとする試みは萌芽的である。

(2) 研究代表者らは橋梁の実験/理論モード解析・モード同定を精力的に進め、損傷がもたらす減衰変化は比較的大きく健全度評価への適用の可能性が高いことを実橋レベルで示した（構造工学論文集，土木学会，Vol.54A, pp.199-208, 2008）。しかし、減衰を安定して同定することが難しく、その原因が明確でないこと等、問題点も数多く指摘してきた。さらに、構造減衰のエネルギー的評価法を提案して、その妥当性を実橋振動実験データに基づき検討してきており、減衰理論に精通している。本研究は、このように、研究代表者が長年取り組んできた理論的減衰評価と実験モード同定に関する研究成果を活用して難題に取り組もうとする、極めて挑戦的なものである。

(3) 老朽化が進む社会資本ストックをいかに維持管理し、社会の持続可能な発展に貢献するかは土木工学分野の最重要課題の一つである。2007年に顕在化した、供用後40～45年の既存鋼トラス橋の一連の損傷は、社会基盤構造物の健全度評価の難しさの一面を露呈したわけで、従来からの、エキスパートによる目視点検等を補う構造健全度評価手法の確立が望まれている。実際、国土交通省は2008年5月、道路橋の予防保全に向けた有識者会議により5つの方策を提言、その一つに信頼性を高め、労力・コストを軽減する技術開発の推進が謳われている。この意味において、本研究が成功した場合、橋梁を代表とする社会基盤構造物の維持管理技術におけるブレークスルーに繋がる。

## 2. 研究の目的

(1) 土木構造物に生ずる、疲労や劣化等に起因した累積損傷と地震等の過大な荷重作用に起因した突発損傷を区別し、それらの損傷を供用中構造物の微動モニタリングによって検出し構造健全度を評価する方法論を、減衰変化同定に特化して展開する。具体的な研究目的は以下の通りである。

① 高感度センサーの導入により電気ノイズや外部からの誘導ノイズの影響を小さくするとともに、センサー配置を最適化して供用時微動計測をシステムとして精緻化・最小化すること。

② 高精度モード同定法を供用時微動データに適用した場合でも、減衰については安定した同定がなされない原因を、エネルギー的減衰理論との対比で明らかにすること。

③ 構造減衰の非線形性・時変性に着目し、wavelet 解析により瞬時減衰同定を行うとともに、model updating 法を併用、減衰メカニズムを考慮して構造物の減衰変化同定を精緻化すること。

④ 供用時微動計測による減衰同定がどの程度の精度で行い得るかを明確にし、同定された減衰変化から構造物の健全度評価が可能であることを定量的に結論すること。

(2) 土木構造物に生じた損傷による症状の一つとしてモード特性の僅かな変化を捉えようとする試みがなされて久しいが、減衰メカニズムの多様さや複雑さ等から、減衰変化による構造健全度評価は極めて難しい問題として敬遠されてきた。本研究により、減衰同定の不安定性の要因および供用時微動計測からの減衰同定の精度が明らかにされ、結果として減衰変化に基づく構造健全度評価の可能性が示されるわけで、構造工学的意義は極めて大きい。

## 3. 研究の方法

(1) 供用時微動計測システムの最小化に関する研究と実構造物の常時微動連続計測

① 供用時微動計測の精緻化・最小化に関する研究：電気ノイズや外部からの誘導ノイズの影響を少なくして、微小振動を精度良く計測できる高感度圧電型加速度センサーを導入し、実構造物の常時微動多点計測を行ってその基本特性を得るとともに、計測の精緻化・最小化に関するシステム検討を行う。

② 実構造物での常時微動の連続計測とデータベースの構築準備：鋼トラス橋、鋼ランガー橋を対象として、実構造物の供用時微動を連続的に3次元多点計測し、高精度実測データベースを構築する。

(2) モード減衰変化同定の精緻化に関する研究と常時微動連続データへの適用

① ERAによる時不変系減衰同定誤差に関する研究：振動データに対して高精度モード同定法 ERA を、相関関数法、RD法とともに適用し、時不変系として同定したモード減衰値の安定性について Stabilization Diagram を求めて詳細に検討する。

② wavelet 解析による時変系減衰同定に関する研究：構造減衰の非線形性・時変性に着目し、時間的に変動し得るモード減衰の同定を wavelet 解析によって行い、同定値の安定性、精度、および時間変動性につき、エネルギーに基づく減衰理論との対比から検討して、減衰変化同定の精緻化に向けた基礎デ

ータを得る。

(3) 高精度供用時微動計測データからの高精度減衰同定法、および減衰変化からの構造健全度評価の可能性に関する検討

① 高精度供用時微動計測データに対して、減衰メカニズムを加味した model updating 法の併用法を検討する。

② 上述の供用時微動計測システムの最小化、ならびにモード減衰同定の精緻化に関する研究成果を踏まえて、供用時微動計測による減衰同定がどの程度の精度で行い得るかを明確にするとともに、同定された減衰変化からの構造物の健全度評価の可能性について結論を得る。

#### 4. 研究成果

(1) 通常の有線加速度センサーに加えて、高感度加速度センサーと無線データ収録器の組み合わせ、および光学式変位計を用いて、鋼ランガー橋である刀水橋を対象に供用時微動計測を実施し、計測の精緻化・省力化の可能性を検討した。また、鋼トラス橋である最上川橋を対象として行った供用時微動計測のデータを用いて ERA 解析をシステムティックに行い、斜材連成振動モードの減衰同定精度に及ぼす測点数の影響を調べて、計測の最小化に関する知見を得た。

(2) 鋼トラス橋、鋼ランガー橋における供用時微動計測データを整理してデータベース化を行った。また、そのデータを用いてエネルギー的評価法に基づく減衰解析を行い、減衰パラメータの推定に当たっては、実験同定や理論解析に含まれる誤差の影響を抑えるために、入力データとなる同定モードの数を増やすことが望ましいことを示す等、計測の最小化に関する有用な知見を得た。

(3) 鋼トラス橋の供用時微動計測データに対して、wavelet 変換に基づく瞬時モードパラメータ同定法を適用し、時不変系として同定した振幅依存減衰値の安定性について詳細に検討して、減衰変化同定の精緻化に関する一つの可能性を示した。

(4) 減衰を扱う際の基本となる実験モード解析において、ERA を利用したモード同定スキームに新たな安定性指標 EMAC を採用し、MAC よりも安定した同定が可能となることを実橋供用時微動データに対して示す等、EMAC を利用した減衰同定の精緻化を行った。一例として、図 1 に鋼ランガー橋の特定モードにつき、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を示す。

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。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 より有効であると結論される。

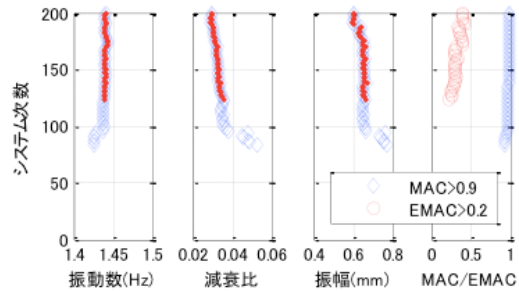


図 1 EMAC によるスクリーニング精度

(5) 鋼ランガー橋に対して、エネルギー的評価法における減衰のモデル化、減衰パラメータの推定法、振動数・モード形とモード減衰に対する model updating を段階的に行う 2 段階法について検討し、鋼ランガー橋のモード減衰比を良好に推定することが出来た。その際、振動によっては減衰要因が変化し得ること、振動レベルに対して支承での減衰の有無は敏感に反応する可能性があること等が明らかとなった。一例として、図 2 に減衰解析で用いた理論振動モード、図 3 に減衰解析で得られたモード減衰比の推定値、図 4 に減衰解析で得られた要因別減衰比分布と減衰パラメータ推定値 (ロスファクター: 鋼アーチリブ  $\eta_a$ , コンクリート床版を含む桁  $\eta_g$ , 鋼鉛直材  $\eta_v$ , 支承摩擦係数  $\mu_s$ ) をそれぞれ示す。

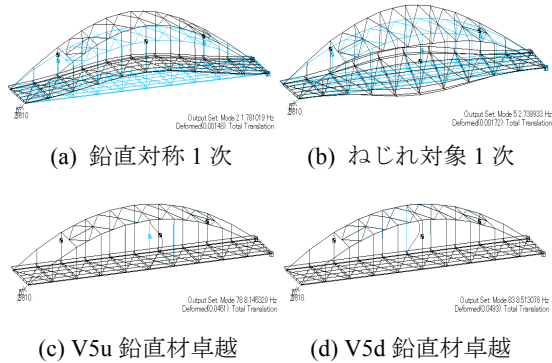


図 2 減衰解析に用いた理論振動モード

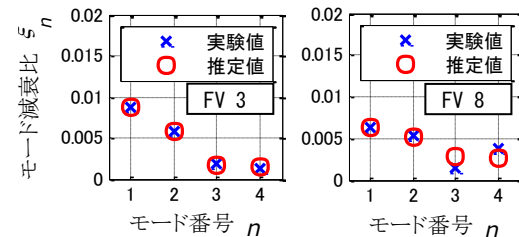
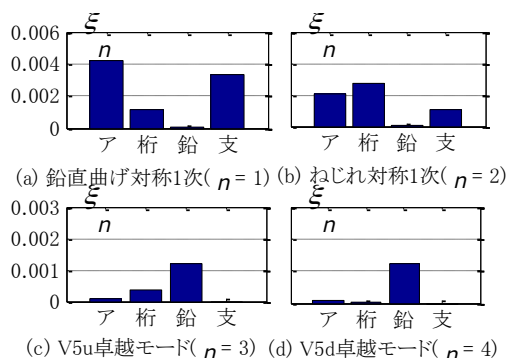


図 3 モード減衰比推定結果



$\eta_a = 0.0082, \eta_g = 0.0077, \eta_v = 0.0048, \mu_s = 0.005$   
 図4 要因別減衰比分布とパラメータ推定値

(6) 斜材破断の補強前後で振動計測が行われている、鋼トラス橋に対しても減衰解析を試みた。減衰要因は上弦材、桁、斜材の内部減衰（ロスファクター $\eta_u, \eta_g, \eta_d$ ）、支承摩擦減衰である。ただし、本橋梁では可動支承の変位が計測されていないことから、支承変位振幅 $A_{s,n}$ として FEM 解析によるモード成分を桁振動の実振幅で補正したものをを用いている。図5に示したように、減衰比の推定値は大きな誤差を持っている。鋼ランガー橋での計測から、支承変位は、FEM 解析でのモード成分とは大きく異なることが考えられ、その影響が大きいと考えられる。

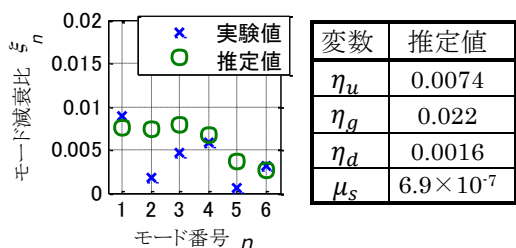


図5 損傷斜材を有するトラス橋の減衰推定

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- 1) 河原井耕介, 山口宏樹, 松本泰尚, 吉岡勉: 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, 土木学会・橋梁振動コロキウム 2011 論文集, 査読無し, pp. 114-121, 2011.
- 2) 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 A, 査読有り, Vol.66, No.3, pp.516-534, 2010.
- 3) Yoshioka T., Yamaguchi H., Matsumoto Y.: Structural health monitoring of steel

truss bridges based on modal damping changes in local and global modes, Proc. of 5th World Conf. on Structural Control and Monitoring, 査読有り, CD, No.167, 2010.

[学会発表] (計7件)

- 1) Matsumoto Y., Yamaguchi H., Yoshioka T.: Relation between changes in the modal properties and structural changes in an existing steel truss bridge, Int. Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering (Keynote Paper), 2012年3月19日, University of Ruhuna, (Sri Lanka).
- 2) 佐藤達也, 河原井耕介, 山口宏樹, 松本泰尚, 高橋眞. 吉岡勉: 鋼ランガー橋における振動計測を利用した損傷同定の基礎的研究, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7~9日, 愛媛(愛媛大学).
- 3) Yoshioka T., Takahashi M., Yamaguchi H., Matsumoto Y.: Damage assessment of truss diagonal members based on frequency changes in local higher modes, The 12th EASEC, 2011年1月26~28日, Hong Kong (China).
- 4) 吉岡勉, 山口宏樹, 高橋眞, 松本泰尚: 打撃試験によるトラス斜材の振動数変化の検出と FEM 解析による分析, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1~3日, 札幌(北海道大学).
- 5) Matsumoto Y., Yamaguchi H., Yoshioka T.: A field investigation of vibration-based structural health monitoring in a steel truss bridge, IABSE-JSCE JC on Advances in Bridge Eng. II, 2010年8月8~10日, Dhaka (Bangladesh).
- 6) 伊藤信, 吉岡勉, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材連成振動とモード減衰変化に基づく構造健全度評価, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月2~4日, 福岡(福岡大学).
- 7) 熊谷 啓, Gull Jawad Hussan, 山口宏樹, 福岡 崇, 磯崎正則: 大型多導体送電線の風による異常振動の解析, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月2~4日, 福岡(福岡大学).

[その他]

アウトリーチ活動

山口宏樹: 橋をゆらす? ゆれで橋の健康診断, キッズ・ユニバーシティ・さいたま, 埼玉大学, 2011年12月28日(さいたま市教育委員会との連携により, 市在住の小学校5・6年生200人に対して, 知的好奇心を刺激し学問への憧れを抱く学びの機会を提供することを目的として実施された).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 宏樹 (YAMAGUCHI HIROKI)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：50134474

### (2) 研究分担者

松本 泰尚 (MATSUMOTO YASUNAO)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：90322023

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

吉岡 勉 (YOSHIOKA TSUTOMU)  
大日本コンサルタント株式会社・保全エンジニアリング研究所・係長  
河原井 耕介 (KAWARAI KOUSUKE)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・博士前期課程学生