

鉄道鋼橋桁で発生する高次部材振動におけるモード減衰比の同定 Identification of mode damping ratio in high-order local member vibration generated in a steel railway bridge girder

元木 宏志朗 (大阪大学) 松岡 弘大 (鉄道総研) 貝戸 清之 (大阪大学)
櫛谷拓馬 (鉄道総研) 小林裕介 (鉄道総研)
Koshiro MOTOKI, Osaka University
Kodai MATSUOKA, Railway Technical Research Institute
Kiyoyuki KAITO, Osaka University
Takuma KUSHIYA, Railway Technical Research Institute
Yusuke KOBAYASHI, Railway Technical Research Institute
E-mail: k.motoki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

The reciprocity theorem and multipoint hammering test can reveal the steel bridge member high-order local vibration modes over 100 Hz. However, modal damping ratio could not identify by existing method. This study proposed a method using the multipoint hammering and ERA and the experimental results clarified the modal damping ratios for high-order vibration modes of an actual steel bridge member.

1. はじめに

鉄道橋の振動問題の多くは列車通過時に生じる。特に鉄道橋上にレール継目が存在する場合には、レール継目通過時に生じる衝撃力が鉄道橋に作用し、100Hzを超えるような高周波の振動および応力が生じる場合も報告されている。このような観点から、高周波振動に寄与する高次部材振動モードの同定と疲労との関係が議論されているが、特に高次部材振動モードのモード減衰比についてはほとんど未解明となっている¹⁾。これまで、数値解析などで慣例的に用いられてきた Rayleigh 減衰の場合、高周波のモード減衰比が高く設定される場合が多いが、実構造物も同様の傾向を示すかは未解明である。100Hzを超えるような高周波振動に寄与する高次部材振動モードの減衰比によっては、列車通過時の応力変動の繰り返し回数が増えることが想定されるため、累積疲労への影響が懸念される。このような観点から、本研究ではこれまで実証事例が少ない鋼橋の高次部材振動モードのモード減衰比を同定する方法論の構築を主目的とする。

100Hzを超えるような高周波領域の振動モードは、一般的に複雑な振動モード形を有するため、その同定には膨大な数の計測点が必要とされる。これに対して、近年、相反定理を用いて、計測点を増やす代わりにインパルスハンマを各点で加振する手法²⁾が開発されている。既存手法では相反定理により得られる伝達関数のピークから高次部材振動モードの固有振動数および振動モード形を同定するが、伝達関数に基づく手法では、計測位置によりピーク振動数が異なる場合に、モード減衰比の同定が困難となる。

以上を踏まえ、本研究では、既存の多点加振と相反定理によるモード同定法を改良し、固有振動数と振動モード形に加え、モード減衰比の同定を可能とする。具体的には、相反定理により得られる各加振点での伝達関数を逆フーリエ変換により時間領域に再変換し、模擬的に多点計測された自由振動を生成する。これらを入力として Eigensystem Realization Algorithm (ERA) 法³⁾により、モード減衰比を含めた高次部材振動モードの振動特性を同定する。また、本研究では提案手法を実際の鋼鉄道橋ウェブ部材に適用するとともに、既存手法により得られる高次部材振動モードの同定結果と比較することで、提案手法の精度と有効性について検証した。その上で、提案手法により得られた対象橋梁の高次部材振動モードの減衰比の傾向を分析した。

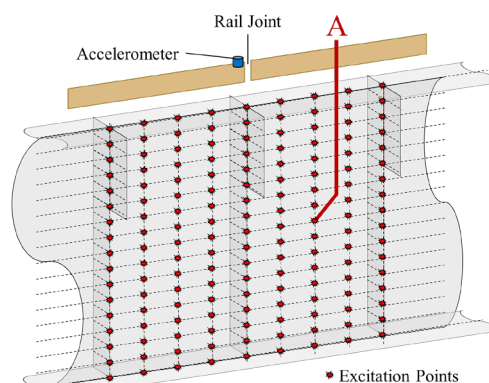


Fig. 1 Excitation and measurement points arrangement.

2. 計測手法

本研究では、レール継目を有する支間長約 10m、桁高 1.5m の上路鋼桁を対象とした。600mm 間隔の補剛材で区切られた領域のうち、レール継目直下の補剛材を挟む 2 パネルのウェブ部材を対象に多点加振による加振力と加速度の計測を実施した。Fig. 1 にウェブ部材の加振点および加速度計の測定点の配置を示す。

加振力スペクトル $F_m(\omega)$ を加速度スペクトル $A_l(\omega)$ で除した伝達関数アクセラランス $G_{lm}(\omega)$ は、式(1)で表せる。

$$G_{lm}(\omega) = \frac{A_l(\omega)}{F_m(\omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{-\omega^2 \cdot \phi_{lr} \phi_{mr}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i \cdot 2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (1)$$

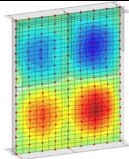
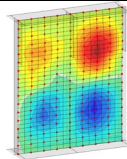
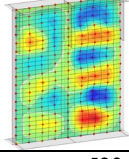
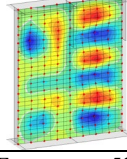
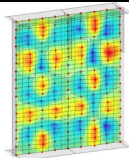
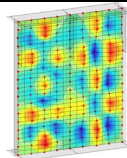
ζ_r および ω_r はそれぞれ r 次のモード減衰比と固有円振動数、 i は虚数単位、 ϕ_{lr} はモードベクトルを並べたモード行列 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_r, \dots, \phi_N]$ の (l, r) 成分、 N は最大モード次数を表す。相反定理により伝達関数に式(2)が成り立てば、多点加振単点計測を単点加振多点計測に変換できる。

$$G_{lm}(\omega) = G_{ml}(\omega) \quad (2)$$

これにより、レール継目位置の加速度を計測し、ウェブの縦 17 点×横 9 点、計 153 点をインパルスハンマで加振し、模擬的にレール継目加振時のウェブの多点アレイ計測を再現した。既存手法は、これらの伝達関数の包絡線ピークを読み取り、固有振動数と振動モード形を同定する。

本研究では、モード減衰比を同定するため、Eigensystem Realization Algorithm (ERA) 法を活用する。ただし、ERA 法は入力として多点計測された自由振動が必要である。こ

Table 1 Identification results of three example modes

Mode: Web vertical 2 nd & horizontal 1 st per a panel	
Existing method	Proposed method
	
Frequency: 144 Hz	Frequency: 144.9 Hz
Damping Ratio: -	Damping Ratio: 1.78 %
Mode: Web vertical 6 th & horizontal 1 st on a panel	
Existing method	Proposed method
	
Frequency: 523 Hz	ERA Frequency: 522.4 Hz
Damping Ratio: -	Damping Ratio: 0.63 %
Mode: Web vertical 5 th & horizontal 3 rd per a panel	
Existing method	Proposed method
	
Frequency: 1022 Hz	Frequency: 1025.1 Hz
Damping Ratio: -	Damping Ratio: 0.07 %

ここで、相反定理により得られた伝達関数 $G_{mi}(\omega)$ の逆フーリエ変換が単位加振力作用時の各点での自由振動となることを利用する。すなわち、多点加振により得られた伝達関数の逆フーリエ変換により、模擬的に多点計測された自由振動を生成し、ERA法の適用を可能とする。本研究では、相反定理により求めた153点の伝達関数を逆フーリエ変換し、ERA法を適用した。

Fig. 2に得られた伝達関数の例として、Fig. 1の点Aを加振した際のレール継目部の加速度から算出した伝達関数を示す。Fig. 3にこの伝達関数を逆フーリエ変換して算出した自由振動波形の例を示す。この処理を153点の加振で得られたすべての伝達関数に適用し、ERA法により固有振動数、振動モード形、およびモード減衰比を同定した。なお、インパルスハンマの加振力スペクトルは、2kHzまでで十分な加振力(最大値の1/10以上)を有することを確認している。

3. モード同定結果

Table 1に既存手法および提案手法により同定した固有振動数と振動モード形の例を示す。振動モード形の振幅はコンター(緑を0、赤と青が正と負最大)により示す。100Hz以上の3つの振動モードの固有振動数および振動モード形は、いずれも両手法で良好に一致する。したがって、自由振動の生成に相反定理で得られた伝達関数の逆フーリエ変換を利用でき、提案手法は少なくとも既存手法と同等の精度を有することを確認できる。提案手法では上記の固有振動数と振動モード形に加え、モード減衰比を同定できる利点を有する。Table 1に3つの振動モードのモード減衰比を示すが、いずれも設計で利用される2%を下回る。モード減

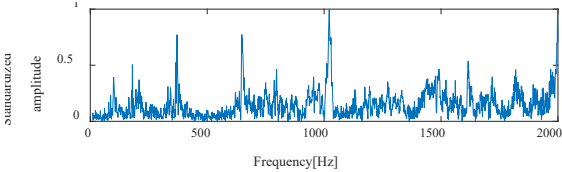


Fig. 2 Measured transfer function spectrum.

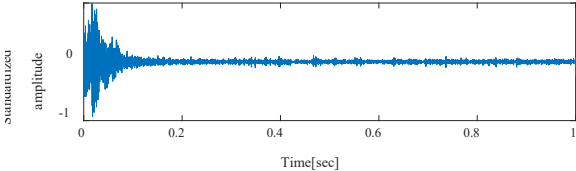


Fig. 3 Produced free vibration response by inverse Fourier transformation of transfer function.

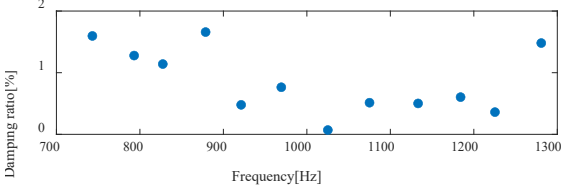


Fig. 4 Relation between damping ratio and frequency.

衰比の傾向を把握するため、700~1300Hzで同定された振動モードのモード減衰比と固有振動数の関係を分析した。

Fig. 4に提案手法で同定した固有振動数とモード減衰比の関係を示す。なお、ここでは同定結果の信頼性の観点から、可観測性に関するMAC値が0.95以上のモードのみを示す。少なくとも、対象橋梁のモード減衰比は、Rayleigh減衰のように高周波数帯で増大することではなく、900Hzを超える振動数帯の振動モードではモード減衰比が1%を下回る場合も存在することを確認できる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 多点加振と相反定理を利用し、伝達関数の逆フーリエ変換に介して多点計測された自由振動を生成し、これらを入力としたERA法により、高次振動モードのモード減衰比を含む振動特性同定法を提案した。
- 実鋼橋のウェブ部材に提案手法を適用した結果、提案手法は高次部材振動モードの複雑な振動モード形を既存手法と同様の精度で同定できることに加え、モード減衰比を同定可能であることを示した。
- 提案手法により同定された対象鋼橋ウェブのモード減衰比は高周波ほど小さくなる傾向を示し、900Hzを超えると1%以下となる場合も存在した。

参考文献

1) 金島篤希, 井上太郎, 蒲原浩平, 松岡弘大, 小林裕介 : レール継目の衝撃が上路鈹桁の補剛材上下端の応力性状に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. A67, pp. 566-577, 2021.

2) 櫛谷拓馬ほか : 多点加振と相反定理に基づく鋼鉄道 I 桁橋の高次部材振動モードの同定, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.25, pp.53-60, 2021.

3) Juang, J. N. and Pappa, R. S. : 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.