

線形システムモデルのパラメータに着目した異常診断

京都大学大学院 学生員 ○伊勢本 遼
京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
神戸大学大学院 フェロー 川谷 充郎

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に多くの中小スパン橋梁が建設されており、劣化・老朽化が問題となることが予想されている。それに伴い、大量の中小スパン橋梁の異常診断を行うためには簡易で迅速な手法が必要となる。通常、構造物においては、部材の損傷・劣化はその質量、減衰や剛性等の材料特性、固有振動数や減衰比等の振動特性の変動として現れることから、振動モニタリングによる構造物の異常診断は有効であると報告されている¹⁾。

筆者らは、中小スパン橋梁を対象とした振動モニタリングにおいて、AR モデルにより推定された車両－橋梁連成系の橋梁振動特性に着目した異常診断の可能性について検討を行っている²⁾。しかしながら、AR 次数の決定に問題を抱えており、本研究ではその問題を解決するために、線形システムモデルのパラメータに着目した異常診断の可能性を検討する。健全な模型桁および損傷度の異なる2種類の模型桁を用いた車両走行実験において、提案する手法の可能性の検討を行う。

2. 実験概要

2.1 対象橋梁 実験に使用する模型橋梁は、Fig. 1に示すようなH型鋼桁である。構造諸元をTable 1に示す。橋梁に与える損傷は、Damage section Iとして、橋梁L/4-L/2間の左右のフランジに等間隔にスリットを3箇所与える損傷と、Damage section IIとして、3L/4-L間の左右フランジの下を最大で20.0mm斜めに削り取る損傷の2ケースである。損傷による曲げ剛性は、Damage section Iにおいて11%、Damage section IIにおいて23%低下している。損傷シナリオは、模型橋梁がDamage section Iのみ持つ場合(D1)、Damage section IとDamage section IIともに持つ場合(D2)の2シナリオとする。

2.2 走行シナリオ 健全時、損傷シナリオD1およびD2において、車両走行による振動計測を行う。観測点として、模型桁でのL/4、L/2、3L/4の3点に加速度計を設置する(Fig. 1参照)。車両速度、車両種類による異常診断への影響を考慮して、質量(M)およびバウンス振動の固有振動数(f)の異なる3種類の車両を使用し(Table 2参照)。車両速度についてはS1=0.93m/sとS2=1.63m/sの2ケースを考慮する。これらは、曲げ1次モードの振動数が2.69Hzの支間長40mの桁橋を想定すると、それぞれ22.4km/hと43.5km/hに相当する。健全時、損傷シナリオD1およびD2においてTable 2に示す6シナリオの計測を行う。

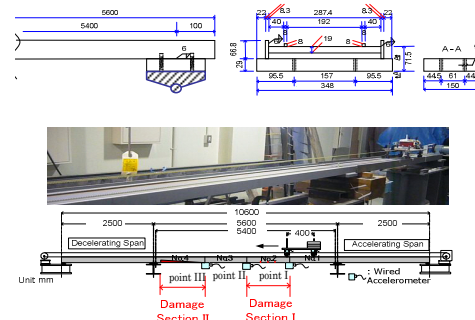


Fig. 1 Experimental girder

Table 1 Structural properties of model girder

Span length	540 cm
Young's modulus	2.1×10^5 N/cm ²
Unit weight	7.8×10^{-2} N/cm ³
Area of section	66.97 cm ²
Moment of inertia of Area	57.66 cm ⁴

3. 線形システムモデルのパラメータによる異常診断

筆者らは、線形システムモデルであるARモデルによる推定振動数および減衰定数の変化に着目した異常検知の可能性について検討を行っている²⁾。しかし、AR次数を推定結果から決定しており、最良線形予測子ではなく、あいまいな部分がある。もちろん、FPE (Final Prediction Error) やAIC (Akaike Information Criterion) といった最適AR次数の決定法はあるが、本研究のように交通振動に適用した場合、Fig. 2示すように車両－橋梁連成系における橋梁振動特性とは無関係な数値的な解まで数多く推定される。これにより、モニタリング対象の振動特性の抽出が困難となる。そこで本研究では、ARモデルのパラメータに着目したDSF (Damage-Sensitive Feature)³⁾を用いて異常診断の可能性の検討を行う。まず、次式を用いてDSFの感度解析を行う。

Table 2 Scenarios of laboratory moving vehicle test

Scenario	Type of vehicle	Speed
1	V1 (M=21.6kg, f=2.93Hz)	S1=0.93m/s
2	V1 (M=21.6kg, f=2.93Hz)	S2=1.63m/s
3	V2 (M=21.6kg, f=3.76Hz)	S1=0.93m/s
4	V2 (M=21.6kg, f=3.76Hz)	S2=1.63m/s
5	V3 (M=25.8kg, f=3.03Hz)	S1=0.93m/s
6	V3 (M=25.8kg, f=3.03Hz)	S2=1.63m/s

キーワード 異常診断, 線形システムモデル, 交通振動, ヘルスモニタリング

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 工学研究科社会基盤工学専攻 TEL075-383-3421

$$DSF = \begin{cases} |a_1| & (j=1) \\ \frac{|a_1|}{\sqrt{\sum_{i=1}^j a_i^2}} & (j=2,3,4\dots) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 a_i は AR 係数を示している。考慮する次数 j を増やし、分母を変化させ DSF の感度解析を行う。なお、最適 AR 次数の決定方法として AIC を用いる。例として Fig. 3 に健全時、損傷シナリオ D1 および D2 におけるモデルの次数と AIC との関係を示す。図中に併記している p は最適 AR 次数を示している。これにより、最適な AR モデルを構成することができる。

それぞれの考慮する次数 j において、point II (L/2) における DSF の平均値の a) 健全時と損傷シナリオ D1 との残差、b) 健全時と損傷シナリオ D2 との残差を Fig. 4 に示す。これより、 $j=3$ であるとき、残差が大きい。すなわち、3 次までの AR 係数を考慮するとき、損傷による DSF の変化が最も大きい。よって本研究では 3 次まで考慮し異常診断の可能性について検討を行う。

測点、車両速度、車両種類別に検討を行った結果、DSF の値は測点と車両速度に影響することが分かった。そこで、本研究では、測点、車両速度別に検討を行う。Fig. 5 に測点、車両速度別の DSF の結果を示す。なお、図中の点線は健全時、損傷シナリオ D1 および D2 における DSF の平均値を示している。車両速度が S1 (0.93m/s) のとき、point I (L/4) および point III (3L/4) では損傷による DSF の平均値に明確な変化はないが、point II (L/2) では DSF の平均値は損傷度が上がるにつれて増加する傾向を示している。車両速度が S2 (1.63m/s) のときは、全ての観測点において DSF の平均値は損傷度が上がるにつれて増加する傾向を示している。

4. まとめ

本研究では、AR モデルにより推定された車両-橋梁連成系の橋梁振動特性を用いる異常診断における問題点を提起し、その問題を解決するために、線形システムモデルのパラメータである AR 係数を用いた DSF に着目し異常診断の可能性の検討を行った。DSF の平均値は損傷度が上がるにつれて増加する傾向にあり、線形システムモデルのパラメータに着目した DSF により異常診断が可能であることが分かった。今後は、分母だけでなく分子も変化させ DSF の感度解析を行い、損傷に敏感なパラメータの検討を行う。

【参考文献】1) Q. W. Zhang: Statistical damage identification for bridges using ambient data, Computers and Structures, pp. 476-485, 2007. 2) 川谷, 他: 模型桁車両走行実験における橋梁振動特性推定と異常診断, 土木学会第65回年次学術講演概要, I-521, 2010. 3) K. Krishnan Nair, et al.: Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure, J. of Sound and Vibration 291, pp.349-368, 2006.

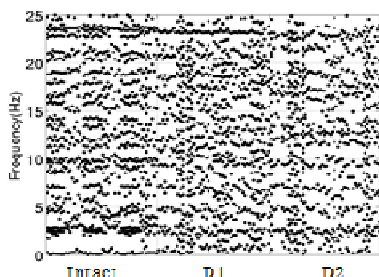


Fig. 2 Estimated frequencies by AR model (optimal AR model)

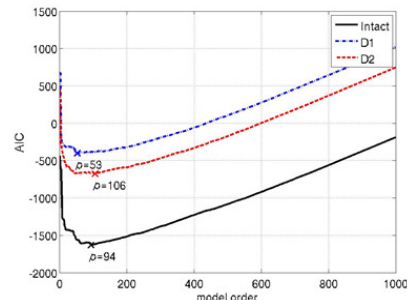
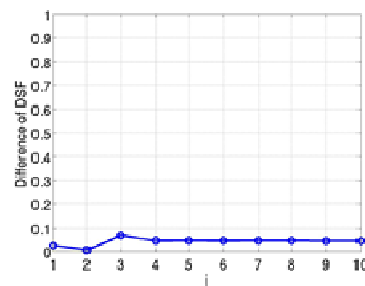
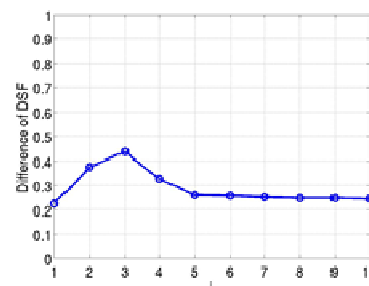


Fig. 3 AIC with respect to model order (p =optimal AR order)



a) Intact vs D1



b) Intact vs D2

Fig. 4 Difference of DSF with respect to the order of AR coefficient

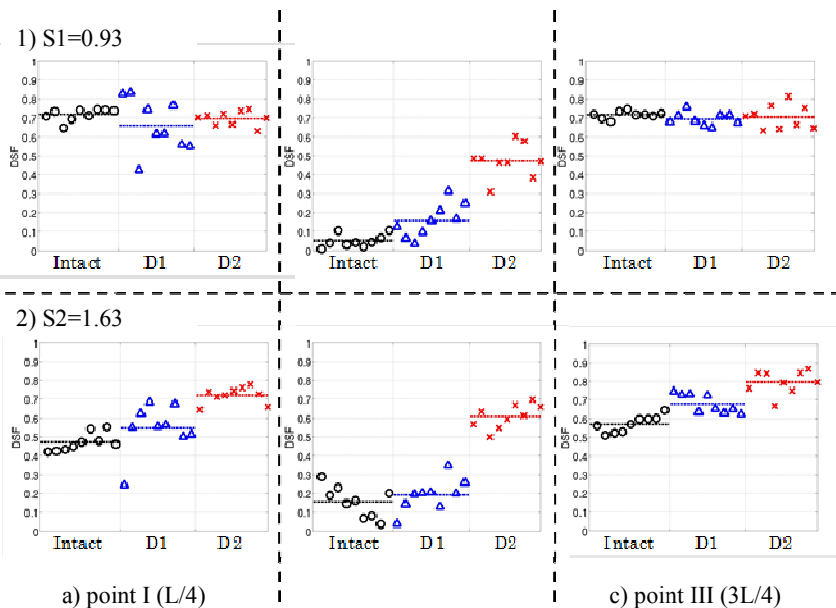


Fig. 5 Variation of DSF according to different damage patterns, speeds and observation points