

中小スパン橋梁の振動モニタリングに着目した模型走行実験と多次元 AR モデルの適用

神戸大学大学院 フェロワー 川谷 充郎
神戸大学大学院 学生員 ○郝 婕馨

神戸大学大学院 正会員 金 哲佑
長崎大学工学部 フェロワー 岡林 隆敏

1. はじめに 既存施設の維持管理には構造物の劣化に関する将来予測、補修の意思決定を行ううえで、現状の構造物の健全度の評価が必要不可欠であり、適切なアセットマネジメントを行う上でも健全度評価は大変重要なテーマとなっている。通常、構造物においては、部材の損傷や劣化はその質量、減衰や剛性等の材料特性、固有振動数、減衰比や振動モード等の動特性の変動として現れる。したがって、振動モニタリングによる構造物の健全度評価は有効であると報告¹⁾されている。一方、地方自治体の財政を考えれば、散在しているローカル線の中小スパン橋梁までを含んだ振動モニタリングは難しい状況になっており、モニタリングの精度を少し犠牲にしても低コストで容易に橋梁の状態が把握できる手法があれば有用であると考えられる。振動モニタリングにおいて常時微動を用いる方法は、得られる情報の制限が大きい観測するだけなので比較的成本は安い。しかし中小スパン橋梁の場合、長大橋とは違い、風による常時微動の計測は容易ではない。一方、中小スパンの橋梁では車両の走行が主な震動源であり、橋梁の交通振動データを用いることが可能であれば効率が良い²⁾。本研究では、中小支間橋梁の交通振動データを用い、多次元 ARMA モデル³⁾による橋梁振動特性同定の可能性を損傷前後の模型桁の室内走行実験により検討する。

2. 多次元 ARMA モデルの構成³⁾ 外力が作用する構造物の運動方程式の状態方程式は次のように表される。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t); \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t); \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_b^{-1}\mathbf{K}_b & -\mathbf{M}_b^{-1}\mathbf{C}_b \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_b^{-1}\mathbf{I} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{M}_b , \mathbf{C}_b , \mathbf{K}_b , \mathbf{I} はそれぞれ質量、減衰、剛性およびユニットマトリクスを表し、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルである。

式(1)を離散化し可観測変換された状態方程式は、

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}(k) + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{f}(k); \mathbf{y}(k) = \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}(k) \quad (3)$$

となる。式(3)を多次元 ARMA モデルとなる差分方程式で表現することができる。また、多次元 ARMA モデルは無限な多次元 AR モデルで表すことができるが、ここでは近似的に p 次の AR モデル (式(4)) として考える。

$$\mathbf{y}(k) + \sum_{s=1}^p \mathbf{G}_s \mathbf{y}(k-s) = \mathbf{e}(k) \quad (4)$$

式(4)の両辺に $\mathbf{y}(k)$ をかけ数学的平均を求め、AR モデルの係数ベクトル \mathbf{G} と共分散行列に関する Yule-Walker 方程式を誘導することができる。本研究では Yule-Walker 方程式より可観測変換された状態方程式の係数行列 $\hat{\mathbf{A}}$ の要素である $\mathbf{G}_1 \dots \mathbf{G}_p$ を算出し、係数行列 $\hat{\mathbf{A}}$ の固有値解析を行うことにより、固有値と固有ベクトルを同定する。

3. 模型実験概要 模型橋梁走行実験装置を利用し、車両走行による模型桁の振動計測を行う。模型桁は、支間長 40.4m の実橋をモデル化した支間長 5.4m の H 型鋼桁である (Fig.1)。実橋上の様々な車両や走行パターンを勘案し、実験では振動特性の異なる 2 種類の模型車両 (V1($f=2.88\text{Hz}$), V2($f=3.86\text{Hz}$)) を使用する。また、模型車両の走行速度は、0.93m/s と 1.63m/s の 2 パターンとする。これは、支間長 40.4m、固有周期 0.42 秒の橋梁での 20km/h、40km/h に相当する速度である。観測

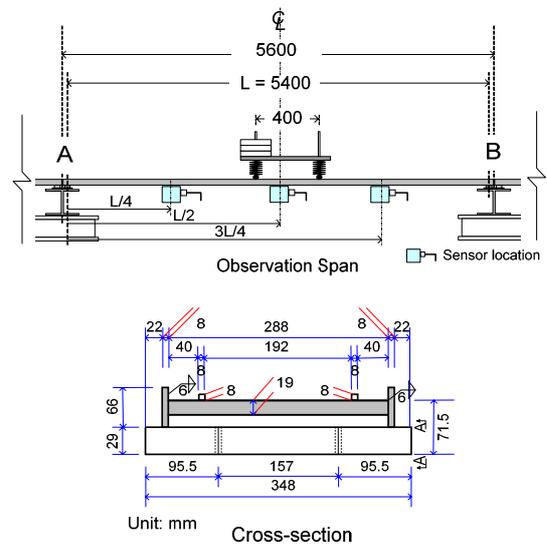


Fig. 1 Experimental girder



Fig. 2 Damaged girder with saw-cuts

キーワード：多次元 AR モデル、橋梁交通振動、振動特性推定、模型橋梁走行実験、損傷実験

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 TEL 078-803-6278 FAX 078-803-6069

点として、模型桁の L/4, L/2, 3/4L の 3 点に加速度計を取り付け (Fig.1 参照), サンプリング間隔は 0.01 秒で計測する. なお, 模型桁の L/4 と L/2 の間にソーカットを入れた損傷桁 (Fig.2) を対象に損傷時の振動計測を行う. 測定された加速度は速度に変換し同定に利用する. 損傷前後の速度応答の例として, 走行速度 0.93m/s の模型車両 V1 が計測桁に進入し, 桁を退出するまでの L/4 測点での速度波形を Fig.3 に示す. 車両の種類と走行速度のそれぞれのケースに 3 回ずつ, 合計 12 回の計測を行ったが, 健全時と損傷時ともに計測欠損が 1 回発生し, 振動特性同定には 11 の計測データを用いることとする.

4. 振動特性の推定結果 計測データに基づき多次元 AR モデルによる振動特性の同定を行う. 損傷前後の模型桁を対象とした推定固有振動数と減衰定数の平均値をそれぞれ Fig.4 および Table 1 に示す. Fig.4 および Table1 の FV は自由振動実験より得られた振動特性であることを, AR は多次元 AR モデルにより推定された結果であることを表す. 健全時の多次元 AR モデルによる振動数の推定結果を見ると自由振動実験より推定した振動数に比べ 1%~15%の誤差で推定しており, 損傷時の場合は 8%~12%の誤差範囲での推定結果になっている. 特に 1 次振動数については, 車両の上下振動である 3Hz 近傍の推定結果になっている. 推定減衰定数の場合, 自由振動波形より算定した結果との誤差が 24% (健全時 1 次モード) と 80% (損傷時 1 次モード) となっており, 減衰定数の推定精度は振動数の推定精度より劣る結果となっている.

次に損傷前後の推定振動特性の変化に着目する. 損傷により 1 次と 3 次モードに関する推定振動数が 9% 程度小さくなっており, 損傷による振動数が下がる一般的な知見に従う結果となっている. しかし, 2 次モードに関しては逆に 10% 程度振動数が増加しており, 具体的な原因は現時点で不明確で検討を進めている. 減衰定数の場合, 1 次と 3 次モードに関して 200% 以上の増加の結果となっている. 一方, 2 次モードに関しては損傷により 5% 程度の増加で, 他のモードの減衰定数の変化に比べわずかな増加を示している. 最後に損傷前後の模型桁の推定モード図と損傷前後のモードの相関を表す MAC (Modal Assurance Criterion) 値とともに Fig.5 に示す. モード形状および MAC 値からは, 損傷より 1 次モードの変化が他のモードに比べ大きいことが分かる.

5. まとめ 多次元 AR モデルを用いて車両走行振動より中・小支間橋梁を想定した模型桁の損傷前後の振動特性推定を試みた. 交通振動は非定常性があるため, 車両の上下振動と近い振動特性を持つ模型桁の振動特性の推定を多次元 AR モデルより推定するのは容易ではないが, 今回の検討より橋梁健全度の 1 次的なスクリーニング手法として適用可能であると考えられる. ただし, 一般的な結論に至るためには, 更なる検討が必要である. 今後中小スパンの実橋での適用を試みる予定である.

【参考文献】 1) S.W. Doebling, et al.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-3070-MS,1996.
 2)川谷, 郝, 金, 藤本, 岡林: 多次元 ARMA を用いた車両走行実験応答による橋梁振動特性の推定, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 1-087, 2007. 9.
 3)カク, 晝, 岡林, 中: 多次元 ARMA モデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 1-495, 2006. 9

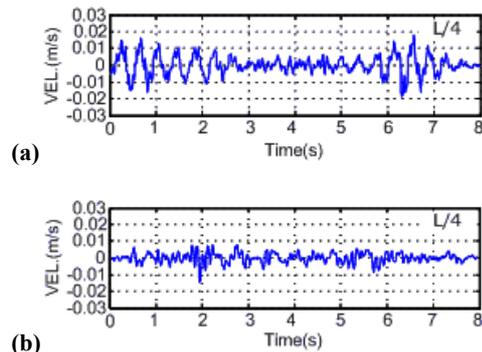


Fig.3 velocity responses at L/4 observation point: (a) intact; and (b) damaged

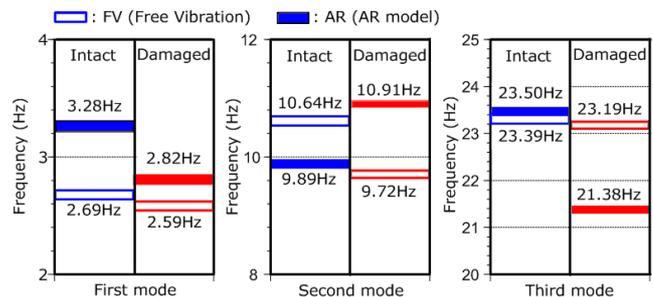


Fig.4 Identified fundamental frequencies

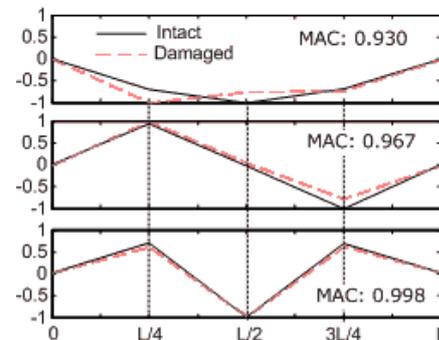


Fig.5 Identified mode-shapes of intact and damaged girder with MAC value

Mode	Intact		Damaged	
	FV	AR	FV	AR
First	0.05	0.038	0.07	0.128
Second	-	0.050	-	0.052
Third	-	0.008	-	0.028