

トラス橋の斜材破断が走行車両の振動特性におよぼす影響の数値的検討

筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 ○石川 幹生

筑波大学システム情報系 正会員 山本 亨輔

1. 研究背景

現在日本には多数の橋梁が存在し、橋梁の保全が今後の日本の課題である。しかし、膨大な数の橋梁をすべて点検するためには多くの費用や技術者が必要となり、実施は困難である。そのため、全橋梁に対してスクリーニングを行う必要がある。本研究ではスクリーニングの手法として、橋梁上を走行する車両の応答振動から橋梁健全度を判定する方法について検討した。既往の研究^[1]では健全度判定の指標として、橋梁の推定モード形状を表す空間特異モード角 (SSMA) が提案されてきた。しかしその有効性やメカニズムについては十分に解明されていない。本研究では、数値計算を用いて SSMA の有効性について検討した。

2. モード形状推定手法

一般に、モード解析理論で想定される橋梁振動の計測値は、固定点で得られるものである。一方、車両振動から推定される橋梁振動は、車両走行に伴って計測位置が時間変化する移動計測点での計測値である。そこで、本研究では基底関数を導入し、移動計測点 $x = \tilde{x}(t)$ での計測値 $\tilde{y}(t)$ から、仮想した固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ での推定値 $\hat{y}(t_s)$ を求める。図 1 に内挿の概念図を示す。

k 次のモード形状関数を $\phi_k(x)$ 、基準座標を $q_k(t)$ とおくと、橋梁変位振動は(1)式のように求められる。

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (1)$$

ここで、 n は考慮する最大モード次数である。(1)式より、移動計測点 $x = \tilde{x}(t)$ における橋梁変位は

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(\tilde{x}(t)) q_k(t) \quad (2)$$

と表される。車上計測点数を $n = 2$ としたとき、等しい数の固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ における k 次のモード形状関数を \hat{A}_{jk} として以下のように表す。

$$\hat{A}_{jk} = \phi_k(\hat{x}_j) \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

つづいて、 $\phi_k(x)$ を基底関数によって離散化する。基底関数 $N_j(x)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) を用いて、 k 次のモード形状関数 $\phi_k(x)$ は近似的に次式のように表すことができる。

$$\phi_k(x) = \sum_{j=1}^n a_{jk} N_j(x) \quad (4)$$

ここで、基底関数が、 $N_j(\hat{x}_j) = 1$ 、かつ、 $N_j(\hat{x}_i) = 0$ (ただし、 $i \neq j$) となる性質を示すとき、 $a_{jk} = \hat{A}_{jk}$ である。本研究では、基底関数としてラグランジュ関数を用いた。

固定計測点は橋梁を等間隔に分割する点とする。このとき、近似したモード形状 $\phi_k(x)$ を行列で表すと、

$$\begin{bmatrix} \phi_1(\tilde{x}_1(t)) & \phi_2(\tilde{x}_1(t)) \\ \phi_1(\tilde{x}_2(t)) & \phi_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(\tilde{x}_1(t)) & N_2(\tilde{x}_1(t)) \\ N_1(\tilde{x}_2(t)) & N_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表すことができる。移動計測点の座標を代入して得られる基底行列を $\mathbf{N}(t)$ 、モード形状行列を $\tilde{\Phi}(t)$ とすると、次式が得られる。

$$\tilde{\Phi}(t) = \mathbf{N}(t) \hat{\mathbf{A}} \quad (6)$$

ここで、(2)式に(6)式を代入すると

$$\tilde{y}(t) = \mathbf{N}(t) \hat{\mathbf{A}} \mathbf{q}(t) \quad (7)$$

となる。車両後輪が \hat{x}_1 を通過してから ($t = t_1$)、前輪が \hat{x}_2 を通過するまで ($t = t_m$) を内挿の定義領域とする。(7)式の両辺に $\mathbf{N}^{-1}(t)$ をかけると、移動計測点での計測値から固定計測点での推定値を求めることができる。

$$\mathbf{N}^{-1}(t) \tilde{y}(t) = \hat{\mathbf{A}} \mathbf{q}(t) \quad (8)$$

次に、(8)式で求まる固定計測点での推定値を特異値分解し、モード形状を推定する。固定計測点での推定値を m 列並べた行列を $\mathbf{M} (\in \mathbf{R}^{n \times m})$ とすると

$$\mathbf{M} = [\mathbf{N}^{-1}(t_1) \tilde{y}(t_1) \cdots \mathbf{N}^{-1}(t_m) \tilde{y}(t_m)] \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = [\hat{\mathbf{A}} \mathbf{q}(t_1) \cdots \hat{\mathbf{A}} \mathbf{q}(t_m)] \quad (10)$$

$$\mathbf{M} = \hat{\mathbf{A}} \mathbf{Q} \quad (11)$$

となる。特異値分解は $n \times m$ 行列に対して適用可能であるから、(11)式の \mathbf{M} に対して特異値分解を適用し、

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (12)$$

と分解できる。ゼロ行列となる部分を省略すると、 $\mathbf{U} (\in \mathbf{R}^{n \times n})$ 、 $\mathbf{V} (\in \mathbf{R}^{n \times m})$ は直交行列 (ただし、 $\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I}$ 、 \mathbf{I} : 単位行列)、 $\mathbf{\Sigma} (\in \mathbf{R}^{n \times n})$ は特異値を対角成分にもつ対角行列である。また、 $\mathbf{\Sigma}$ の対角成分を大きなものから順に並べると、 \mathbf{U} 、 $\mathbf{\Sigma}$ および \mathbf{V} は一意に求められる。このうち \mathbf{U} の 1 列目の成分が推定 1 次モード形状の値

キーワード 車両応答分析, 橋梁振動, スクリーニング

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

となるが、本研究では $n=2$ であるから、その値の比を空間特異モード角 (SSMA) として、橋梁健全度判定の指標とする。すなわち、 \mathbf{U} の i 行 j 列の成分を U_{ij} として、以下のように表す。

$$SSMA = \tan^{-1} \left(\frac{U_{21}}{U_{11}} \right) \quad (13)$$

3. 検討方法

本研究では、四輪車を剛体バネモデルで、トラス橋を有限要素の棒材でそれぞれモデル化し、車両の応答振動を数値計算により求めた。作成した橋梁モデルの概観を図 1 に、橋梁および車両モデルのパラメータを表 1、表 2 に示す。床板のパラメータは、表の値を要素分割数に応じて割った値を使用した。路面凹凸を考慮するために、ISO 基準で Extra Good となる路面凹凸をモンテカルロシミュレーションにより生成した。SSMA の算出には、車両の左側の車輪の加速度を使用した。

4. 検討結果とまとめ

検討結果の一例として、トラス部材を 1 つずつ破断させたときの SSMA の変化を調べた。破断させたトラス部材の番号を図 2 に、結果を図 3 に示す。結果から、SSMA は車両走行側の部材の損傷に対して感度が高いことや、破断させる部材によって健全時の SSMA との大小関係は異なっていること、トラス構造の対になっている部材(1 と 2、3 と 4 など)をそれぞれ破断させたとき SSMA はよく似た変化を示すことがわかる。車両走行側の部材損傷に対して SSMA の感度が高いことに関しては、車両に近い部材の損傷が車両の振動に対してより大きく影響するためと考えられる。

本研究の結果から、SSMA は橋梁健全度判定の指標として一定の有効性があることがわかった。しかし、損傷位置によって SSMA の感度が変化することや、破断させる部材によって変化のしかたが異なることなど、実用化には多くの課題が残っている。それらのことを踏まえ、今後は SSMA の性質や損傷検知のメカニズムについてさらに検討していく予定だ。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (若手研究(B), 課題番号 25820200) によって実施した。ここに記し謝意を表する。

参考文献

[1] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.320-331, 2013

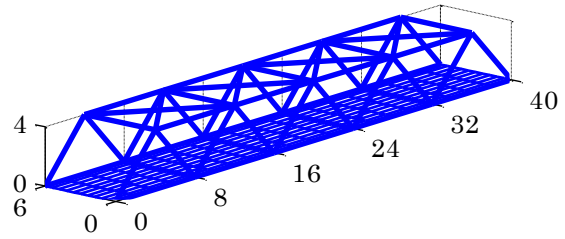


図 1 トラス橋モデル

表 1 橋梁モデルのパラメータ

トラス部材	密度	7800[kg/m ³]
	断面積	0.02[m ²]
	ヤング率	200 × 10 ⁹ [Pa]
	せん断弾性係数	78 × 10 ⁹ [Pa]
	断面二次モーメント	1.0 × 10 ⁻⁴ [m ⁴]
	断面二次極モーメント	1.0 × 10 ⁻⁶ [m ⁴]
床板	縦方向要素分割数	20
	横方向要素分割数	10
	密度	2400[kg/m ³]
	厚さ	0.4[m]
	ヤング率	25 × 10 ⁹ [Pa]
	ねじり剛性	1.1 × 10 ⁹ [Pa · m]
	縦方向断面二次モーメント	0.03[m ⁴]
	横方向断面二次モーメント	0.2[m ⁴]

表 2 車両モデルのパラメータ

車体質量	18000[kg]
車体慣性モーメント(ピッチ方向)	65000[kg · m ²]
車体慣性モーメント(ロール方向)	15000[kg · m ²]
車輪上減衰定数	10000[kg/s]
車輪上バネ定数	1000000[kg/s ²]
車輪質量	1100[kg]
車輪下減衰定数	30000[kg/s]
車輪下バネ定数	3500000[kg/s ²]
長さ (重心-車輪間)	1.875[m]
幅 (重心-車輪間)	0.9[m]

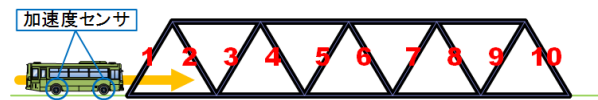


図 2 橋梁部材番号

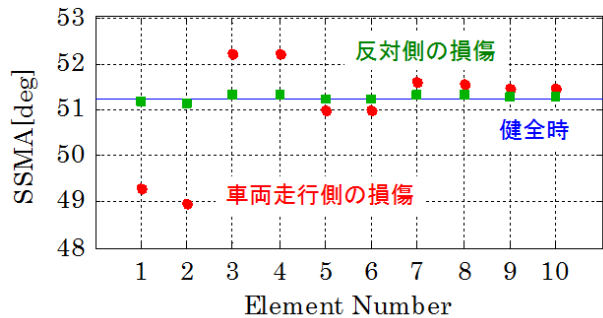


図 3 トラス橋部材破断箇所と SSMA