

車両応答分析によるトラス橋部材損傷に対する感度の数値的検討

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

本研究では、橋梁スクリーニングのうち車両応答分析に着目し、橋梁健全度判定の指標として提案されている空間特異モード角(SSMA)について、数値計算を用いてその有効性を調査した。

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が、車両振動から推定される橋梁振動は車両走行に伴って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。

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

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

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。

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

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。求めたモード形状行列 $\hat{\mathbf{A}}$ のうち 1 次のモード形状に着目し、比をとって角度として表したものを空間特異モード角(SSMA)とした。

$$SSMA = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{A}_{21}}{\hat{A}_{11}} \right) \quad (9)$$

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。路面凹凸は 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。

4. 検討結果と考察

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破断に対して大きく反応することや、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よく似た変化を示すことがわかる。このことについてより詳しく調べるために、車両走行側の番号3の部材について損傷を部材の剛性低下で模擬し、剛性低下率を変化させてSSMAを変化の様子を調べた。結果を図4に示す。結果から、SSMAは剛性の低下に対して変化が小さく、部材が破断するような構造的な変化に対して変化が大きいことがわかる。このことから、トラス構造の対になっている部材を破断させたときSSMAの挙動が似た傾向を示したことについては、トラス構造として機能しなくなる部分は同一であるためと考えられる。

5. まとめ

本研究の結果から、SSMAは橋梁損傷検知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、損傷させる部材によって変化のしかたが違ったり、部材が破断するまでは変化が小さいことなど、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である。

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

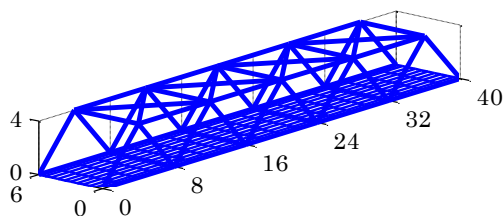


図1 トラス橋モデル概観

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]

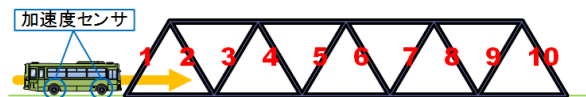


図2 橋梁部材番号

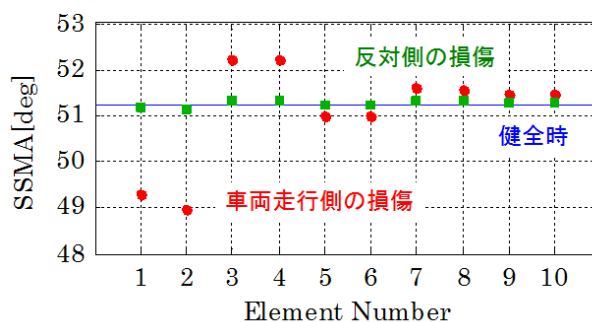


図3 破断部材とSSMA

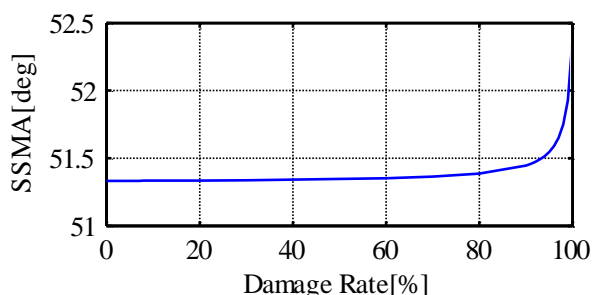


図4 部材剛性低下率とSSMA