

交通振動解析と GA を用いる橋梁の損傷同定手法の開発

Development of damage identification approach to bridges using traffic-induced vibration analysis and GA

北海道大学工学部	○学生員	呉 潤植 (Yoon-shik Oh)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	何 興文 (Xingwen He)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
神戸大学大学院工学研究科	フェロー	川谷充郎 (Mitsuo Kawatani)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された多くの構造物の劣化・老朽化が進行し、橋梁を含む社会基盤施設に対する維持管理への関心は高まっている。一般に橋梁の検査は、目視を主体とした全般検査が実施されている。また目視し難い変状を把握するために、衝撃振動試験による評価手法も導入されている。しかし、これら伝統的な手法は多くの技術者と多大なコストを要し、簡単に実施できない。今後の少子高齢化や技術継承への課題を踏まえると、膨大な構造物を少ない技術者でより効率的にメンテナンスしていく必要があり、新たな視点からの実用的な健全度評価の一次抽出手法が求められている。

構造物の健全度が何らかの要因によって損なわれた場合、損傷した部材の剛性や減衰性能、場合によっては質量が変化し、走行荷重下で健全な構造物と異なる振動特性が現れる。こうした構造物が発信する情報を把握することより、健全度評価に活用できる。車両走行による振動の測定は比較的容易で、これらの振動データを適切に利用し橋梁の健全度を把握できれば、効率的なヘルスマニタリング手法になると考えられる。

橋梁の振動応答を利用し健全度評価を行うために、現在構造同定の代表的なパラメトリック手法等では、自由度の大きな構造については逆解析の誤差等によって同定そのものが困難である。そこで本研究では、近年工学的問題への応用が著しいソフトコンピューティング理論を取り入れ、実測応答から逆解析により構造の損傷を同定する方法ではなく、交通振動順解析による健全度評価手法の構築を目指す。具体的には、想定し得る損傷パターンを入力して順解析により構造応答を計算し、これを実測値と比較することにより、損傷パターンすなわち橋梁の損傷部位及びその程度を推定する。

2. 同定手法

前節で説明した手法を実用かつ効率的なものにするために、次のように橋梁-走行車両連成振動解析手法とソフトコンピューティング理論を応用する。

1) 一回の振動解析自体が膨大な計算コストを要するため、実用において簡単に実施できない。そのために本研究では、入出力を対応づける学習によって構造応答を同定できるニューラルネットワーク (Neural Network、以下 NN) を構築する。構築に際し、模型実験や実測の代わりに、橋梁-車両連成解析手法による橋梁振動応答のシミュレーション結果を用いる。すなわち、解析による構造の応答値をネットワークの学習における教師デー

タとして用いる。そのために、実応用に際し、信頼性の高い交通振動解析手法を構築し、橋梁振動解析結果と実測値との整合性を十分に確保する必要がある。

2) 構築した NN をツールとして、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、以下 GA) による最適化手法を用いて構造部材の損傷パターンを特定する。具体的には構造物の部材損傷パターンを GA における個体群 (人口) とし、構築した NN から出力した構造物の応答と実測値との差を目的関数に設定する。目的関数が最小つまり推定した応答と実測値が最も近い場合の損傷パターンが、求める解である。

3. 橋梁と車両連成振動解析

本研究では第一段階の基本検討として、構想した橋梁健全度評価手法の適用性を検証するために、最も簡単な2自由度車両モデル及び桁橋モデルを用いる。2自由度車両モデルを図-1、桁橋モデルを図-2に示す。

図-1において、 z_j 及び θ_j は車体の上下及び回転振動を表し、 w_j 及び I_j は車体の重量及び回転慣性モーメントである。また、 k_j 及び c_j はサスペンション構造に相当するばね定数及び減衰係数を表す。橋梁と車両との連成振動の定式化について、次のように示す。

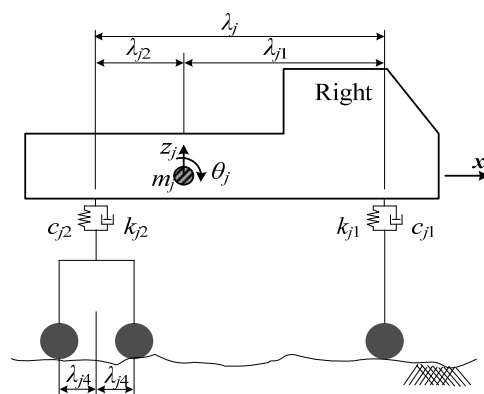


図-1 車両モデル

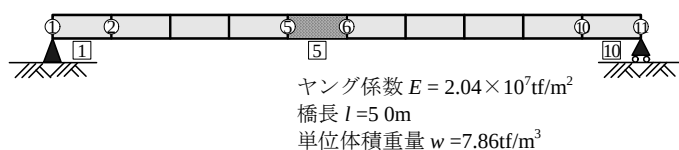


図-2 橋梁モデル

3.1 車両の振動方程式

車体上下振動(Bouncing)

$$m_j \ddot{z}_j + \sum_{l=1}^{lx(j)} v_{jl}(t) = 0 \quad (1)$$

車体回転振動(Pitching)

$$I_j \ddot{\theta}_j + \sum_{l=1}^{lx(j)} (-1)^l \lambda_{jl} v_{jl}(t) = 0 \quad (2)$$

$$v_{jl}(t) = k_{jl} \left\{ z_j + (-1)^l \lambda_{jl} \theta_j - \frac{1}{kx(l)} \sum_{k=1}^{kx(l)} w_{jlk} \right\} + c_{jl} \left\{ \dot{z}_j + (-1)^l \lambda_{jl} \dot{\theta}_j - \frac{1}{kx(l)} \sum_{k=1}^{kx(l)} \dot{w}_{jlk} \right\} \quad (3)$$

ここで、 j は車両の番号を表す。 l と k は、車体とばね下に関する変数で、 $l=1,2$ はそれぞれ車体の前後を表し、 $k=1,2$ はそれぞれのばね下における前後軸を表す。ここで、 $lx(j)$ は j 両目の車両におけるばね下質量の数を表す関数である。 $kx(l)$ はばね下質量の関数で、そのばね下質量における輪軸数を表す。また、 $v_{jl}(t)$ は車体とばね下質量を連結するばねの伸張によって発生する力を表す（伸張は正とする）。

w_{jlk} は床板の変位と路面凹凸による車輪の変位で、以下のように表す。

$$w_{jlk} = w(t, x_{jlk}) + z_0(x_{jlk}) \quad (4)$$

ここで、 $w(t, x_{jlk})$ と $z_0(x_{jlk})$ はそれぞれ車輪と床板との接触点における床板の変位と凹凸を表す。

$$w(t, x_{jlk}) = \Psi_{jlk}^T(t) \mathbf{w}_b \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{w}_b$ は、橋梁有限要素モデルの変位ベクトルである。 $\Psi_{jlk}(t)$ は分配ベクトルであり、輪重を要素の節点に分配する役割を持つと同時に、線形補間に基づき節点変形から要素任意位置の変形を求めることができる。はり要素の場合、 $\Psi_{jlk}(t)$ は以下のように表現することができる。

$$\Psi_{jlk}(t) = \{0; \dots; 0; \psi_{n,jlk}; \psi_{n+1,jlk}; 0; \dots; 0\}^T \quad (6)$$

また輪重 $P_{jlk}(t)$ は次の式で計算される。ここで、 m_j , m_{jl} は、それぞれ車体、ばね下の質量で、 g は重力加速度である。

$$P_{jlk}(t) = -\frac{1}{kx(l)} g \left\{ \left(1 - \frac{\lambda_{jl}}{\lambda_j} \right) m_j + m_{jl} \right\} + \frac{1}{kx(l)} v_{jl}(t) \quad (7)$$

上記の定式化により、各式を展開・代入すると、全車両の振動方程式は次の形で得られる。

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{w}_v = \mathbf{F}_v$$

ここに $\mathbf{M}_v$, $\mathbf{C}_v$, $\mathbf{K}_v$ および $\mathbf{F}_v$ はそれぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスおよび外力ベクトル項であり、 $\mathbf{w}_v$ は全車両の自由度からなる変位ベクトルである。

3.2 橋梁の振動方程式

有限要素および橋梁振動の理論に基づき、一般的な橋梁振動方程式は次式のようになる。

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{w}_b = \mathbf{F}_b \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{M}_b$, $\mathbf{C}_b$ 及び $\mathbf{K}_b$ は、それぞれ質量、減衰、及び剛性マトリクスを表し、 $\mathbf{F}_b$ は外力ベクトルである。ここで、 $\mathbf{C}_b$ はRayleigh減衰を用い、以下の式で求める。

$$\mathbf{C}_b = p_1 \mathbf{M}_b + p_2 \mathbf{K}_b$$

$$p_1 = \frac{2\omega_{b1}\omega_{b2}(h_{b1}\omega_{b2} - h_{b2}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2} \quad p_2 = \frac{2(h_{b2}\omega_{b2} - h_{b1}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2} \quad (9)$$

ここで ω_{b1} と ω_{b2} は橋梁モデルの 1 次と 2 次固有円振動数で、 h_{b1} と h_{b2} は対応する減衰定数である。外力ベクトル $\mathbf{F}_b$ は以下の式で求める。

$$\mathbf{F}_b = \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^{lx(j)} \sum_{k=1}^{kx(l)} \Psi_{jlk}(t) P_{jlk}(t) \quad (10)$$

橋梁の変位ベクトル $\mathbf{w}_b$ は、固有振動ベクトルと一般化座標で表すと、

$$\mathbf{w}_b = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i = \Phi \mathbf{q} \quad (11)$$

$\mathbf{q}$ は一般化座標で、マトリックス Φ は固有ベクトル ϕ_i で構成される。

$$\mathbf{q} = \{q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n\}^T \quad (12)$$

$$\Phi = \{\phi_1 \quad \dots \quad \phi_i \quad \dots \quad \phi_n\} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1i} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & & \phi_{2i} & & \phi_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{m1} & \dots & \phi_{mi} & \dots & \phi_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\phi_i = \{\phi_{1i}, \phi_{2i}, \dots, \phi_{mi}\}^T \quad (14)$$

ここで、 m は橋梁モデル全自由度の数で、 n は考慮される最高モード次数である。 $\mathbf{w}_b$ を橋梁の振動方程式に代入すると、(15)式になる。両辺に Φ^T を乗じると(16)式で表される。

$$\mathbf{M}_b \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_b \Phi \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_b \Phi \mathbf{q} = \mathbf{F}_b \quad (15)$$

$$\Phi^T \mathbf{M}_b \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{C}_b \Phi \dot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{K}_b \Phi \mathbf{q} = \Phi^T \mathbf{F}_b \quad (16)$$

そこで、固有ベクトル直交性を利用すると、一般座標に関する橋梁振動方程式は、次のようになる。

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = F_i \quad (17)$$

上記のすべての式を用いて代入し展開すると、さらに詳細式が得られ、計算機プログラム作成に用いられる。

3.3 振動解析手法

前節で示したように定式化を行い、振動系である車両との連成振動方程式を、Newmark's β 法を用いて動的応答解析を行う。このとき、 $\beta=1/4$ とし、各時間間隔における収束判定は $1/1000$ とする。今回の解析において橋梁モデルは、2主桁道路橋のI型断面主桁の諸元を有する単純支持桁橋とし、図-2に示しているように11節点、10要素でモデル化している。車両は1台とし、速度は60km/hとする。車両モデルの諸元を表-1に示す。

3.4 損傷前後の振動解析結果

桁橋の車両走行による加速度時刻歴結果を、図-2で示した桁橋モデルの6番目の節点について、図-3に示す。この結果を健全時のデータとする（以下、健全時と称する）。また、図-2の要素5の曲げ剛性を40%低減させたときの6番目の節点における加速度時刻歴応答を図-4に示す。この結果を橋梁が40%損傷したものとする（以下、40%損傷時と称する）。健全時と40%損傷時の図-3における各節点の最大加速度を表-2に示す。

結果の比較より、40%損傷時では健全時に比べ最大加速度が増加した。これは部材剛性が低下したことが原因である。よって、作成した橋梁－車両連成振動解析プログラムでは、入力する曲げ剛性を変化させることにより、損傷を表現することができた。また、加速度時刻歴応答は健全時と損傷時に差異が現れ、次で説明するGAモデルの損傷推定の指標となり得る。

表-1 車両モデルの諸元

Definition	Notation	Value
sprung mass including payload	m_j	17.87 t
front unsprung mass	m_{j1}	0.4 t
rear unsprung mass	m_{j2}	1.6 t
moment of inertia of sprung mass	I_j	55.532 t・m
spring constant of front suspensions	k_{j1}	68.2 tf/m
spring constant of rear suspensions	k_{j2}	543.7 tf/m
damping coefficient of front suspensions	c_{j1}	1.2 tf・s/m
damping coefficient of rear suspensions	c_{j2}	2.84 tf・s/m
distance between front and rear axles	λ_j	4.0 m
distance between front suspension and body centroid	λ_{j1}	2.95 m
distance between rear suspension and body centroid	λ_{j2}	1.05 m
1/2 distance of tandem axles	λ_{j4}	0.68 m

表-2 橋梁最大加速度(gal)

節点番号	1	2	3	4	5	
健全時	2.3	96.5	135.0	116.9	130.9	
40%損傷時	3.8	142.1	195.2	146.9	167.2	
節点番号	6	7	8	9	10	11
健全時	141.1	143.5	113.5	134.5	92.8	2.4
40%損傷時	205.8	150.1	119.2	183.1	139.8	3.7

表-3 遺伝子列と離散値パラメーター

遺伝子列	000	001	010	011	100	101	110	111
EI低下率(%)	0	10	20	30	40	50	60	70

4. GAによる損傷パターンの同定

遺伝的アルゴリズム(GA)は近年、探索・学習・最適化の技術的手法として、工学分野で注目されている。GAは自然界における生物の遺伝・進化の過程を繁殖・淘汰、遺伝子の交叉、及び突然変異等のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え、それを最適化手法として用いようとするものである。また、GAは得られた解の評価が可能であれば最適解を求めることができ、従来の最適化手法のように解の微係数、あるいは感度解析をする必要がない。工学的問題には最適解が必ずしも明確ではないが、評価は可能であるという問題は多数存在する。多数の離散値を有する最適化問題にGAを応用することは非常に有用であると考えられている^{1)~3)}。そこで本研究では、GAを利用して部材損傷の程度およびその箇所の推定を行う。次にその具体的な手法を示す。

4.1 損傷シナリオ

本研究では、桁橋中央部(図-2、節点6)における加速度時刻歴応答結果を利用し、実測値と解析値の差が最小となる損傷パターンを見つけることで損傷推定を行う。ここで、事前に橋梁－走行車両連成振動解析により得られた結果を実測値と想定して用いることとする。実測値として想定するデータは、要素5を10%損傷(以下、Case1)、20%損傷(以下、Case2)、要素3を10%損傷(以下、Case3)、要素3を10%損傷させたものとする。Case1、Case2は、最もたわみが大きく損傷しやすい要素5に着目し、損傷状態によって収束世代数を比較する。また、Case3は測定位置(節点6)と損傷箇所(要素3)が離れている所の損傷を本研究で構築するモデルでも特定できるか検証するために設定した。

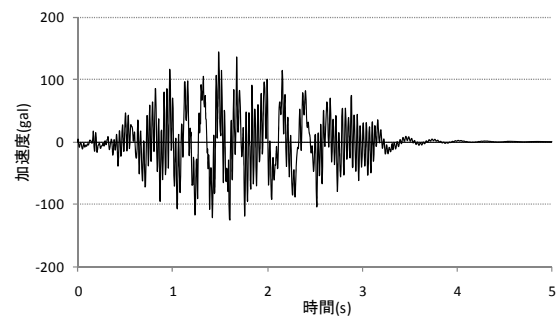


図-3 加速度時刻歴応答(健全時)

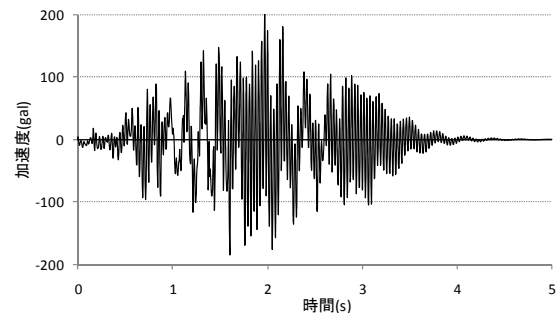


図-4 加速度時刻歴応答(5番要素40%損傷時)

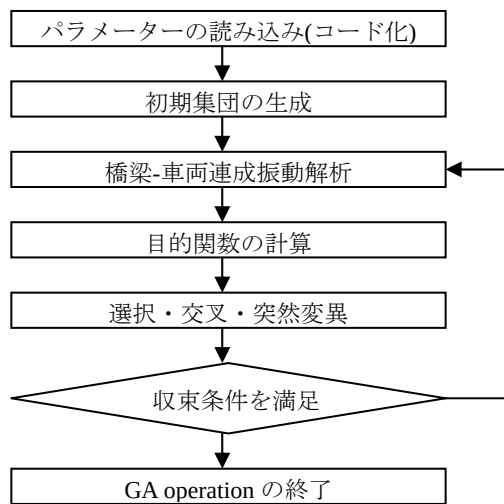


図-5 同定の流れ

表-4 損傷同定結果

	Case1		Case2		Case3	
要素番号	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	10	10
4	0	0	0	0	0	0
5	10	10	20	20	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
収束世代数	6		188		49	

4.2 GA手法

作成したGA解析モデルのフローチャートを図-5に示す。このモデルでは、参考文献で推奨されている値をキャリブレーションにより決定した、交叉率60%, 突然変異率3.3%, 初期集団個体数を50のGAモデルを用いる。図-2の橋梁モデルの曲げ剛性を離散値パラメーターとして扱い、それぞれ3ビットの遺伝子列によってコード化し同定を行う。遺伝子列と離散値パラメーターを表-3に示す。

表-3において、上段の遺伝子列に対し、下段に示す数値（離散値）が橋梁-車両連成振動解析プログラムにおける要素の剛性EI低下率として入力されるよう設定した。また、GAにおいては目的関数 $F(x)$ がしばしば問題となるが、本研究では実験値と解析値との2乗差の平均値が最小となることを想定し、式(18)で表す関数を用いて適応度を評価する。

$$F(x) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t [f(i) - f'(i)]^2 \quad (18)$$

ここで、 $f(i)$ は橋梁中央の実測値の加速度時刻歴応答であり、 $f'(i)$ は前節で示した連成振動解析の解析値である。 i は車両走行中の各時間ステップを表わしている。交叉は2点交叉法を用いる。収束条件はGAモデルの最適化の精度に影響する。そこで、キャリブレーションを行った結果、世代における最良個体の目的関数の値が 10^{-6} になったときに収束するものとした。

4.3 損傷同定結果

前節までの解析手法により計算を行ったところ、表-4のような結果が得られた。

Case1、Case2、Case3ともに実測値と同じ損傷パターンにおいて収束した。Case1とCase2の結果から、損傷が大きくなるほど収束するまでの世代数が多くなっていくことが確認できる。これは損傷が大きくなるほど解の候補が多くなっていくことが原因であると思われる。しかしCase2も比較的簡単な損傷状態であるのに対して収束世代数がCase1に比べかなり多かった。Case3からは観測位置と損傷部位が離れていても本研究で構築したモデルで特定できることが分かった。

今回は収束条件をキャリブレーションにより目的関数が 10^{-6} 以下となるときに収束と判定したが、条件を 10^{-6} 以上にしたときは、損傷程度が大きいと収束しないことがあった。一方、収束条件を過剰に小さい値にしてしまうと、求めたい解をGAモデルで推定できているが収束しないという結果に陥るケースがある。そのために、今後は、収束条件の設定についても検討する必要があると考える。また、精度向上が必要であれば、ビット数を増し離散値パラメーターを細かくする必要がある。そして損傷個所が複数個所に分布している場合の損傷の推定に関しても高い精度を出せるように改良する必要があると思われる。

5. まとめ

本研究では橋梁-車両連成振動解析プログラムを構築すると共に、GA最適化手法を用いて、交通振動順解析手法による橋梁構造物の損傷推定手法の適用可能性を検討した。その結果、簡単な構造および車両モデルを用いた場合、提案した手法は高い精度で橋梁における損傷部位の位置およびその程度を特定することが可能であった。

今後、より詳細なモデルを用いた損傷推定、またそれに伴う計算容量の増加を解消するためのニューラルネットワークシステムの構築を行っていく必要がある。

参考文献：

- 1) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社出版。
- 2) 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平: パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版。
- 3) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書。