

GA を用いた交通振動応答による橋梁損傷同定法の開発

Development of bridge damage identification approach based on traffic-induced vibration using GA optimization

北海道大学工学部	○学生員	西島康崇(Yasutaka Nishijima)
北海道大学大学院工学研究院	正員	何興文(Xingwen He)
北海道大学工学院	学生員	細川俊彦(Toshihiko Hosokawa)
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. まえがき

我が国では、急激な道路交通需要の増大に対応して、高度経済成長期に大量の道路橋が建設された。今後、建設後 50 年を超えるストックの更新がピークを迎え、膨大な更新費用が発生することが予想される。更新時期を平準化し、更新費用を最小化することが橋梁の維持管理における課題となっている。その前提として現状の橋梁の健全度評価は非常に重要であるが、その管理を行っている地方自治体は予算制約や技術者不足により、十分な点検を行っていない。このような背景を踏まえ、目視等による従来の方法の比べ経済的かつ、少ない技術者でも大量のストックに対応できる効率的な健全度評価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。車両走行による振動は、加速度計を用いることで比較的容易に測定することが出来る。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ことが知られている。

現在の構造同定における代表的なパラメトリック手法等では、部材数が多く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、この逆解析による問題を回避すべく、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試みる。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。

順解析による損傷同定手法の開発については、著者らは一連の研究を行っており、損傷箇所が少ない場合について、損傷同定が可能であることを数値解析より示している。しかしながら、実構造物で計測された振動応答を用いて損傷同定を行うために、室内模型実験により開発した手法の妥当性・適用可能性を検証する必要がある。そこで、本研究では写真-1 に示す室内橋梁模型とリモコン車両を用い、損傷シナリオを設定して走行実験を行った。本論文では、この走行実験結果を再現するために用いる数値モデルの開発進展について報告する。

2. 研究手法

まず、橋梁-車両連成解析を用い、橋梁の加速度応答を求めるプログラムを開発する。室内模型実験において想定しうる損傷状態を入力し、それぞれに対応した解析値を擬似実測値として出力する。次に、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プログラムを開発する。具体的には構造物の部材損傷パターンを GA における個体群とし、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。

本論文では、実験で使用した模型車両をモデル化し、初期開発段階として単純梁に簡略化した橋梁モデルとの連成振動解析により、損傷同定の有効性を確認する。

3. 橋梁と車両連成振動の定式化

本論文では、室内模型実験の完全な再現を実現していないが、それらを意図して簡略化した 3 自由度車両モデルを図-1、桁橋モデルを図-2 にそれぞれ示す。



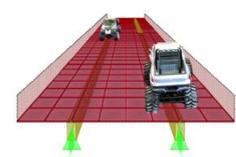
(a) 走行実験の様子



(b) 損傷部位の支承



(c) 橋梁模型モデル



(d) 連成解析イメージ

写真-1 室内走行実験の概要

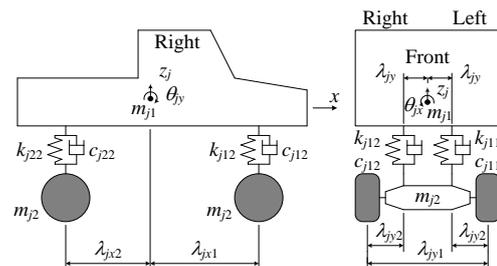


図-1 3 自由度車両モデル

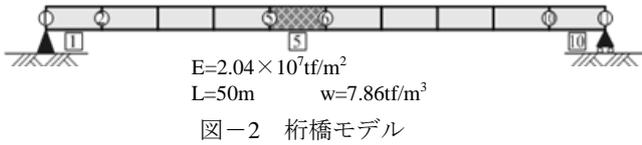


図-2 桁橋モデル

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 は枕ばねの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。

3.1 車両の振動方程式

Bouncing of the body (上下振動)

$$m_j \ddot{z}_j + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 v_{jlm}(t) = 0 \quad (1)$$

Rolling of the body (x 軸周りの回転振動)

$$I_{jx} \ddot{\theta}_{jx} - \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{jy} v_{jlm}(t) = 0 \quad (2)$$

Pitching of the body (y 軸周りの回転振動)

$$I_{jy} \ddot{\theta}_{jy} + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^l \lambda_{jx} v_{jlm}(t) = 0 \quad (3)$$

$$v_{jlm}(t) = k_{jlm} \left\{ z_j + (-1)^l \lambda_{jx} \theta_{jy} - (-1)^m \lambda_{jy} \theta_{jx} - w_{jlm} \right\} + c_{jlm} \left\{ \dot{z}_j + (-1)^l \lambda_{jx} \dot{\theta}_{jy} - (-1)^m \lambda_{jy} \dot{\theta}_{jx} - \dot{w}_{jlm} \right\} \quad (4)$$

ここで、 j は車両の番号を表す。 l と m は、車体に関する変数で、 $l = 1, 2$ はそれぞれ車体の前後車軸（サスペンション）を表し、 $m = 1, 2$ はそれぞれ車両の左右側を表す。 Y, z は車両モデル図で用いている右手直交座系の三方向を表す。 $v_{jlm}(t)$ は車体と車軸を連結するばねの伸張量（正とする）によって発生する力を表す。 w_{jlm} は接地点における橋梁床版の変位と路面凹凸による車輪の変位で、以下のように示す。

$$w_{jlm} = w_z(t, x_{jlm}) + z_0(t, x_{jlm}) \quad (5)$$

上記 $w_z(t, x_{jlm})$ はそれぞれ y と z 方向の床版の変位で、 $z_0(x_{jlm})$ は車輪接地点における路面凹凸を表す。

$$w_z(t, x_{jlm}) = \Psi_{jlm}^T(t) \mathbf{w}_b \quad (6)$$

ここで、 $\Psi_{jlm}(t)$ 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。

$$\Psi_{jlm}(t) = \{0; \dots; 0; \psi_{p,jlm}; \psi_{p+1,jlm}; 0; \dots; 0\}^T \quad (7)$$

また水平および鉛直方向の輪重はそれぞれ次の式で計算される。ここで、 g は重力加速度である。

$$P_{jlm}(t) = -\frac{1}{2} g \left\{ \left(1 - \frac{\lambda_{jxl}}{\lambda_{jx}} \right) m_j + m_{jl} \right\} + v_{jlm}(t) \quad (8)$$

上記の定式化により n 各式を展開・代入すると、車両振動方程式のマトリクス形が得られる。

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{w}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{w}_v = \mathbf{f}_v \quad (9)$$

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る。

3.2 橋梁の振動方程式

橋梁モデルの振動方程式は、有限要素法および *D'Alembert* 原理に基づき、次式で表される。

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{w}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{w}_b = \mathbf{f}_b \quad (10)$$

$\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b$ および \mathbf{K}_b は、それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、および剛性マトリクスである。

ここで、 \mathbf{C}_b は以下の式で求める。

$$\mathbf{C}_b = p_1 \mathbf{M}_b + p_2 \mathbf{K}_b \quad (11)$$

ここで、

$$p_1 = \frac{2\omega_{b1}\omega_{b2}(h_{b1}\omega_{b2} - h_{b2}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2}, \quad p_2 = \frac{2(h_{b2}\omega_{b2} - h_{b1}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2} \quad (12)$$

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、

$$\mathbf{f}_b = \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 \Psi_{jlm}(t) P_{jlm}(t) \quad (13)$$

ここで、 $P_{jlm}(t)$ は輪重で、 $\Psi_{jlm}(t)$ は分配ベクトルである。

橋梁の変位ベクトル \mathbf{w}_b は、固有振動モードで表すと、

$$\mathbf{w}_b = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i = \Phi \cdot \mathbf{q} \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{q} は一般化座標で Φ は固有ベクトル ϕ_i で構成される。

$$\mathbf{q} = \{q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n\}^T \quad (15)$$

$$\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \phi_{m1} & \dots & \dots & \phi_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

m 自由度の数で、 n 考慮す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、

$$\mathbf{M}_b \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_b \Phi \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_b \Phi \mathbf{q} = \mathbf{f}_b \quad (17)$$

両辺に Φ^T を乗じると

$$\Phi^T \mathbf{M}_b \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{C}_b \Phi \dot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{K}_b \Phi \mathbf{q} = \Phi^T \mathbf{f}_b \quad (18)$$

$$\text{ここで、} \Phi^T = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & \dots & \phi_{m1} \\ \phi_{12} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \phi_{1n} & \dots & \dots & \phi_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

固有ベクトルの直交性を利用すると、

$i \neq j$ の際

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M}_b \boldsymbol{\varphi}_i = 0, \quad \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{K}_b \boldsymbol{\varphi}_i = 0, \quad \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{C}_b \boldsymbol{\varphi}_i = 0$$

$i = j$ の際、

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M}_b \boldsymbol{\varphi}_i = M_i, \quad \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{K}_b \boldsymbol{\varphi}_i = K_i, \quad \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{C}_b \boldsymbol{\varphi}_i = C_i$$

$$\text{ここで、} \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{f}_b = f_i \quad (20)$$

とすると、橋梁振動方程式は以下のような式となる。

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = f_i \quad (21)$$

上記車両および橋梁の振動方程式を連立させると、次の形となる。* は、車両の影響を入れる橋梁のマトリクスを表す。これを逐次数値積分を用いて振動応答を求める。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b^* & \mathbf{0} \\ \text{Sym.} & \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{w}}_b \\ \ddot{\mathbf{w}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^* & \mathbf{C}_{bv} \\ \text{Sym.} & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{w}}_b \\ \dot{\mathbf{w}}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b^* & \mathbf{K}_{bv} \\ \text{Sym.} & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_i \\ \mathbf{w}_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_v \end{Bmatrix} \quad (22)$$

3.3 橋梁一車両連成振動解析

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、逐次積分法である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、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 損傷前後の橋梁振動応答

車両が桁橋を通過した際に、図-2 で示した橋梁モデルの中央にある6番目節点について、健全時および5番要素の曲げ剛性を30%低減させた場合の加速度時刻歴応答結果をそれぞれ図-3に示す。

結果の比較より、30%損傷時では健全時に比べると、加速度の最大値が増加していることが分かる。これは橋梁部材の剛性が低下したことが原因である。橋梁損傷時の動的応答は健全時のものと差異が現れ、損傷推定の指標となり得ると考えられる。

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を推定を行う。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、室内模型実験で得られた実測値を用いて、開発した手法を検証することを目的としている。しかし、手法開発における初期検討として、現段階では事前に橋梁一走行列車連成振動解析により得られた結果を疑似実測値として用いることとする。疑似実測値として想定するデータは、要素5を10%損傷(以下、Case1)、30%損傷(以下、Case2)、要素2を10%損傷(以下、Case3)、要素2を30%損傷(以下、Case4)、要素5を10%損傷、かつ、要素2を10%損傷(以下、Case5)、要素5を10%損傷、かつ、要素2を10%損傷(以下、Case6)させたものとする。Case1、Case2では、計測点に最も近い要素5に着目し、損傷状態による収束世代数を比較する。また、Case3、Case4では測定位置(節点6)と損傷箇所(要素2)が離れている場合を、Case5、Case6では2カ所同時に損傷がある場合を想定し、本研究で開発した手法の有効性を検証する。

4.2 GAアルゴリズム

作成したGAでは、参考文献3)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10%、初期集団個体数を50の単純GAモデルを用いる。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-2に示す。ここで、上段の遺伝子列に対し、下段に示す数値

表-1 車両モデルの諸元

区分	定義	記号	単位	値
車両諸元	車体質量	m_{j1}	kg	1.11
	輪軸質量	m_{j2}	kg	0.36
	x軸周りの慣性モーメント	I_{jx}	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}$	0.01598
	y軸周りの慣性モーメント	I_{jy}	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}$	0.02961
	ばね定数	c_{ilm}	kN/m	8.889×10^{-3}
	減衰定数	k_{ilm}	kN·s/m	4.500×10^{-4}
寸法	前輪から車体重心までの距離	λ_{jx1}	cm	22.86
	後輪から車体重心までの距離	λ_{jx2}	cm	22.86
	サスペンションから車体重心までの距離	λ_{jy}	cm	10.0
	車輪からサスペンションまでの距離	λ_{jy2}	cm	2.0
	輪軸長さ	λ_{jy1}	cm	24.0

(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曲げ剛性の低下率として入力されるように設定した。また、GA においては目的関数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(23)で表す関数を用いて適応度を評価する。

$$F(x) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t [f(i) - f'(i)]^2 \quad (23)$$

表-2 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

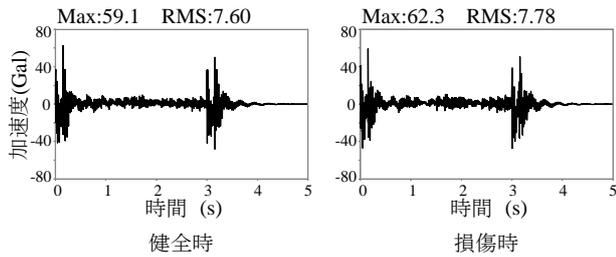


図-3 加速度時刻歴応答

表-3 同定結果

要素番号	Case1		Case2		Case3	
	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	10	10
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	10	10	30	30	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	11		17		22	

要素番号	Case4		Case5		Case6	
	実測値	解析値	実測値	実測値	実測値	実測値
1	0	0	0	0	0	0
2	30	30	10	10	30	10
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	10	0	30	0
6	0	0	0	10	0	10
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	12		56		204	

ここで、 $f(i)$ は橋梁中央部 (図-2、節点6) の擬似実測値の加速度時刻歴応答であり、 $f'(i)$ は連成振動解析の解析値である。 i は列車走行中の各時間ステップを表す。交叉については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大きく影響する。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および損傷シナリオにより計算を行ったところ、表-3のような結果が得られた。

Case1からCase4は、実測値と同じ損傷パターンにおいて収束し、同定手法の有効性を示した。しかし、Case5、Case6について、正しい解に収束しなかった。これは損傷の程度や数が大きくなるほど、解の候補が多くなることが原因であると思われる。また、Case3、Case4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、Case2において最も近い値に収束しなかった。一方、収束条件を過剰に小さい値にしまうと、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可能性がある。そのために、今後複雑な構造および車両モデルを用いる際に、収束条件の設定について細心に検討する必要があると考える。また、精度向上のために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。

5. あとがき

本論文では室内模型実験を再現するための橋梁-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有効性を検討した。その結果、損傷個所が少ない場合、提案した手法は高い精度で橋梁における損傷部材の位置およびその程度を特定することが可能であった。

しかしながら、本論文では実測値として、あらかじめ橋梁-車両連成振動解析によって得られた疑似実測値を用いている。実際の計測値には様々な要因によるノイズが入るため、本論文で仮定した状況が実構造物の損傷状態を完全にモデル化するまでには至っていない。また、損傷個所が複数ある場合、損傷同定が出来ないという問題がある。よって、今後は早急に手法の精度を向上させ、模型実験への適用を試みる予定である。

参考文献:

- 1) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム、産業図書
- 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) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎、オーム社出版局
- 4) L.デービス: 遺伝的アルゴリズムハンドブック、森北出版
- 5) 金哲佑、川谷充郎: 単一車両による橋梁振動データを用いた橋梁の健全度評価