

交通振動応答を用いた橋梁損傷同定手法の適用可能性検証

Evaluation of a developed damage detection approach using traffic-induced vibration response of the bridge

北海道大学大学院工学院 ○学生員 細川俊彦(Toshihiko Hosokawa)
 北海道大学大学院工学研究院 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

現在、橋梁をはじめ様々な社会インフラの老朽化問題が深刻になりつつある。国土交通省によると、建設後 50 年以上経過した社会インフラの割合について、2011 年度と 2031 年度を比較すると、道路橋に関して 9%から 53%に増加すると推計されている¹⁾。そのため、老朽化に従い橋梁の健全度検査が重要となってくる事が考えられる。一般的に橋梁構造物健全度の検査には、目視や打音試験等の方法が用いられているが、少子高齢化とそれに伴う人材不足や社会的に公共事業への予算縮減傾向の中では、それらの手法を用いていくことはコスト的に困難になることが予想される。そのため、経済的かつ効率的な新しい橋梁構造物の健全度評価方法の開発が求められている。

構造物の健全度が何らかの要因により損傷した場合その部材の剛性や減衰性能等が変化し本来のものとは異なる振動特性が現れる。そのような特性を把握し適切に利用することにより効率的なヘルスマニタリング手法を開発できると考えられる²⁾。また、鉄道においても、振動モニタリングによる健全度評価は有用であると報告されている³⁾。列車走行による鉄道振動の測定は比較的容易で、鉄道事業者だけでなく沿線自治体も含め、多数かつ継続的に実施されている状況にある。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。

現在の構造同定に用いられるパラメトリック手法では自由度の大きさにより逆解析過程において大きな誤差が生じる問題点があるため、実用化が困難である。本研究では、ソフトコンピューティング理論の応用による交通振動順解析による一次健全度評価手法を構築していくことを目的とする。具体的には想定される損傷パターンを入力して順解析によって構造応答を計算し、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. 研究手法

本研究において上述されるような手法開発のために橋梁 - 走行列車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) 手法構築に際して本研究では模型実験や実測の代替として、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。これは理想化した条件であり、実測値を用いる妥当性検証の前段階としての適用可能性検討を行う。

2) 構築したプログラムにより出力された橋梁振動応答を使用し、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、出力した構造物の応答とシミュレーション結果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-列車連成振動解析手法

本研究では、手法開発における解析で新幹線列車及び鉄道橋梁を想定する。最初の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、まず簡単な単純桁橋モデルを解析対象とする。車両については、15 自由度の新幹線列車モデルを用いる。車両モデルを図-1、橋梁モデルを図-2にそれぞれ示す。さらに車両の変数や諸元についてそれぞれ表-1 と表-2 に示す。

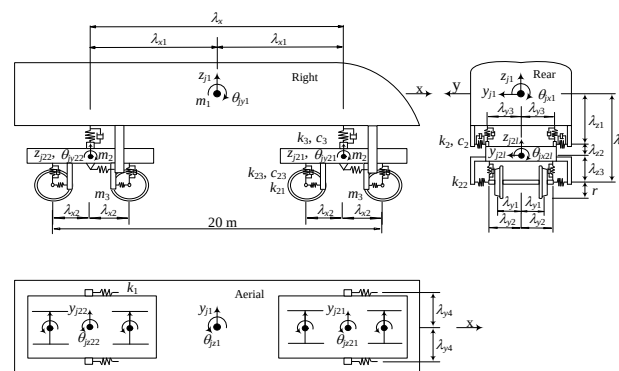


図-1 15 自由度車両モデル

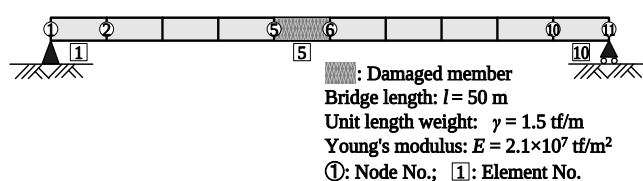


図-2 橋梁モデル

表一 15 自由度列車モデル各変数

Definition	Notation
Lateral translation of car body	y_1
Sway of front bogie	y_{21}
Sway of rear bogie	y_{22}
Bouncing of car body	z_1
Parallel hop of front bogie	z_{21}
Parallel hop of rear bogie	z_{22}
Rolling of car body	θ_{x1}
Axle tramp of front bogie	θ_{x21}
Axle tramp of rear bogie	θ_{x22}
Pitching of car body	θ_{y1}
Windup motion of front bogie	θ_{y21}
Windup motion of rear bogie	θ_{y22}
Yawing of car body	θ_{z1}
Yawing of front bogie	θ_{z21}
Yawing of rear bogie	θ_{z22}

表二 15 自由度列車モデル諸元値

Notation	Value
m_1	315.76kN
m_2	30.11kN
m_3	8.37kN
I_{x1}	483.123kN・m ²
I_{y1}	24648.881kN・m ²
I_{z1}	24648.881kN・m ²
I_{x2}	28.537kN・m ²
I_{y2}	40.447kN・m ²
I_{z2}	40.447kN・m ²
k_1	5000kN/m
k_2	176.4kN/m
k_3	196.0kN/m
k_{21}	17500kN/m
k_{22}	4704kN/m
k_{23}	1176kN/m
c_2	39.2kN・s/m
c_3	25.6kN・s/m
c_{23}	39.2kN・s/m
λ_c	12.5m
λ_x	17.5m
λ_{x1}	8.75m
λ_{x2}	1.25m
λ_{y1}	0.7m
λ_{y2}	1.0m
λ_{y3}	1.23m
λ_{y4}	1.42m
λ_z	0.97m
λ_{z1}	0.5m
λ_{z2}	0.37m
λ_{z3}	0.1m
r	0.43m

3.1 車両の振動方程式

a) 車両本体に関する振動方程式

車両本体の水平振動(y_1),鉛直振動(z_1),ローリング振動(θ_{x1}), 縦揺れ振動(θ_{y1}),ヨーイング振動(θ_{z1})に関する方程式は、それぞれ(1)～(5)に示す。

$$m_1 \ddot{y}_1 - \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m v_{jylm}(t) = 0 \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 v_{jzlm}(t) = 0 \quad (2)$$

$$I_{x1} \ddot{\theta}_{x1} - \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y3} v_{jzlm}(t) - \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{z1} v_{jylm}(t) = 0 \quad (3)$$

$$I_{y1} \ddot{\theta}_{y1} + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^l \lambda_{x1} v_{jzlm}(t) = 0 \quad (4)$$

$$I_{z1} \ddot{\theta}_{z1} + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{l+m} \lambda_{x1} v_{jylm}(t) + \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y4} v_{jzlm}(t) = 0 \quad (5)$$

上記の式中において、 $l=1, 2$: 車両の前後の台車 ; $m=1, 2$: それぞれの車両の左右側 ; j : 車両の番号 ; $v_{jdm}(t)$, $v_{jym}(t)$, $v_{jzm}(t)$: それぞれ対応方向のバネの伸びによって生じた力を表す。

b) 前後の台車に関する振動方程式

車両本体の水平振動(y_2),鉛直振動(z_2),ローリング振動(θ_{x2}), 縦揺れ振動(θ_{y2}),ヨーイング振動(θ_{z2})に関する方程式は、それぞれ(6)～(10)に示す。

$$m_2 \ddot{y}_{j2} + \sum_{m=1}^2 (-1)^m v_{jylm}(t) - \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m v_{jylkm}(t) = 0 \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{z}_{j2} - \sum_{m=1}^2 v_{jzlm}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 v_{jzlkkm}(t) = 0 \quad (7)$$

$$I_{x2} \ddot{\theta}_{x2} - \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{z2} v_{jylm}(t) + \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y3} v_{jzlm}(t) - \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{z3} v_{jylkm}(t) - \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y2} v_{jzlkkm}(t) = 0 \quad (8)$$

$$I_{y2} \ddot{\theta}_{y2} - \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^k \lambda_{z3} v_{jylkm}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^k \lambda_{x2} v_{jzlkkm}(t) = 0 \quad (9)$$

$$I_{z2} \ddot{\theta}_{z2} - \sum_{m=1}^2 (-1)^m \lambda_{y4} v_{jzlm}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{k+m} \lambda_{y2} v_{jzlkkm}(t) + \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 (-1)^{k+m} \lambda_{x2} v_{jylkm}(t) = 0 \quad (10)$$

上記の式中において、 $k=1, 2$: 後方台車の前後の車軸 ; $m=1, 2$: それぞれの台車の左右側を表す。また、 $v_{jdlkm}(t)$, $v_{jylkm}(t)$, $v_{jzlkkm}(t)$: それぞれの関係する方向のバネの伸長により発生する力 ; w_{jdlkm} , w_{jylkm} : y, z 方向における車輪とレールとの接触点におけるレールの動的変位を表す。

3.2 橋梁の振動方程式

橋梁の強制振動方程式はD'Alembertの原理に基づき以下のようになれる。

$$\tilde{M}_b \ddot{\tilde{w}}_b + \tilde{C}_b \dot{\tilde{w}}_b + \tilde{K}_b \tilde{w}_b = \tilde{f}_b \quad (11)$$

$\tilde{M}_b, \tilde{C}_b, \tilde{K}_b$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクスを表す。また $\tilde{f}_b$ は外力ベクトル、 $\tilde{w}_b$ は橋梁の節点変位ベクトルを表す。減衰マトリクス $\tilde{C}_b$ は質量マトリクスと剛性マトリクスの線形関係により以下のように計算されると仮定する。

$$\tilde{C}_b = p_1 \tilde{M}_b + p_2 \tilde{K}_b \quad (12)$$

p_1, p_2 は以下に示す。

$$p_1 = \frac{2\omega_{b1}\omega_{b2}(h_{b1}\omega_{b2} - h_{b2}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2} \quad (13)$$

$$p_2 = \frac{2(h_{b2}\omega_{b2} - h_{b1}\omega_{b1})}{\omega_{b2}^2 - \omega_{b1}^2} \quad (14)$$

上記の式で ω_{b1}, ω_{b2} は橋梁モデルの 1 次と 2 次の固有円振動数、 h_{b1}, h_{b2} は対応する減衰定数である。

外力ベクトル $\tilde{f}_b$ は以下のように記述する。

$$\tilde{f}_b = \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 \left\{ \tilde{\Psi}_{jylkm}(t) P_{jylkm}(t) + \tilde{\Psi}_{jzlk m}(t) P_{jzlk m}(t) \right\} \quad (15)$$

ここで、 $P_{jylkm}(t), P_{jzlk m}(t)$ は列車の輪重、 $\tilde{\Psi}_{jylkm}(t), \tilde{\Psi}_{jzlk m}(t)$ は分配ベクトルである。

3.3 橋梁一車両連成振動解析

前節で示された定式化により、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。今回、 $\beta=1/4$ とし各時間間隔における収束判定を $1/1000$ とする。また図-2 に示しているように橋梁モデルは 11 節点、10 要素にモデル化している。車両は 1 台とし、速度は 60km/h とする。

3.4 損傷前後の振動解析結果

桁橋を車両が通過したときの最大加速度を、表-3 に示す。それぞれの数値は各節点で得られた最大加速度を表しており、ここに示す表-3 のデータを健全時のデータとする。

また、表-4 に示すデータは橋梁の要素 1、要素 2、要素 3 がそれぞれ 40% 剛性を低下させた場合に車両が通過した際の最大加速度を示している。これら 2 つの結果を比較すると、40% 損傷時では健全時に比べ加速度の数値が変化することがわかる。この結果より橋梁における健全時と損傷時では応答に変化が生じることが考えられる。また、損傷の有無により変化が生じることから次章で説明される GA モデルの損傷推定の指標となりうる。

表-3 健全時橋梁最大加速度 (gal)

節点1		節点2		節点3		節点4		節点5			
29		114		67		115		112			
節点6		節点7		節点8		節点9		節点10		節点11	
79		116		161		89		257		46	

表-4 40%損傷時橋梁最大加速度 (gal)

節点1	節点2	節点3	節点4	節点5	
16	112	93	78	103	
節点6	節点7	節点8	節点9	節点10	節点11
76	113	175	92	223	38

4. GA による損傷同定

遺伝的アルゴリズム(以下 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・遺伝子の交叉および突然変異等のプロセスを簡単な数値モデルに置き換え、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、評価が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⁴⁾⁶⁾。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。次に具体的方法について説明する。

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、事前に橋梁一走行列車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 30% 損傷(以下、Case1)、要素 2,5 を 30% 損傷(以下、Case2)、要素 2,5,9 を 30% 損傷(以下 Case3)、要素 3 を 10% 損傷と要素 5,9 を 30% 損傷させたもの(以下 Case4)、要素 1,3 を 10% 損傷と要素 5,9 を 30% 損傷させたもの(以下 Case5)とし、損傷の複雑化に伴い損傷同定結果にどのような影響が生じるか検討する。

4.2 GA アルゴリズム

作成した GA アルゴリズムに基づいてプログラムを作成し解析を行う。本研究における GA 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 1000 の GA モデルを用いる。今回、損傷同定における初期収束を防ぐために染色体の個体数を 50 から 1000 に増加させ⁷⁾、またエリート戦略を用いた選択方法を一部改良して検証した。また、図-2 の橋梁モデルの曲げ剛性を離散値パラメータとして扱い、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。なお、使用する橋梁モデルの曲げ剛性の変化で損傷度を表現するものとする。遺伝子列と離散値パラメータを表-5 に示す。表-5 において、左側の遺伝子列に対して右側に示す数値(離散値)が橋梁一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(16)の関数を用いて適応度を評価する。

$$F(x) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t [f(i) - f'(i)]^2 \quad (16)$$

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1点交叉、2点交叉、一様交叉を用いる。収束条件はGAモデルの最適化の精度に影響するため、キャリブレーションを行った結果より世代における最良個体の目的関数の値が 10^{-5} になったときに収束するものとする⁹⁾。

4.3 損傷同定結果

検証の結果を表-6に示す。Case1の結果からGAを用いた損傷同定方法で損傷の推定が可能であることがわかる。また、Case2やCase3の結果から損傷箇所が複数箇所である場合でも損傷同定は可能である。特に、著者らの既往研究では複数損傷は2箇所までが限界であったが今回初めて3か所以上の同定が実現した。さらに、Case4から複数種類の損傷同定が可能である。しかし、2種類の損傷を複数想定したCase5では同定が収束せず、同定は不可能であった。

5. まとめ

今回の検証からGAを用いた損傷同定法が橋梁の損傷同定に有効であるという結果が得られた。特に、3か所以上の損傷同定が実現したことは、プログラムにおけるGAの染色体数の増加等の改良が有効に作用したものと考えられる。具体的には3か所損傷モデルの同定において問題となっていた早期収束が改善されたことが同定実現の要因であると思われる。しかし、収束世代数の結果を比較すると必ずしも損傷の数によって収束世代数が増加するというわけではないとわかる。損傷の数によって単純に同定への負荷が増大するというのではなく、損傷による振動の状態により同定の負荷は左右されるものと思われる。また、2種類の損傷が3か所の場合は同定が可能であったが、4か所では結果が収束せず、解を得ることができなかった。これは振動状態が複雑であること以外にも単純GAプログラムそのものに限界があることが要因としてあげられ、さらに高度なGAアルゴリズムの適用が必要である。

本研究の今後の方向性の一つとして、今回の検証結果をふまえ、GAを用いた現在の方法を改良または変更していくことが求められる。また、現状の損傷同定では想定した損傷が部材の剛性を低下させただけのものであり、より実際の橋梁損傷に近い状態を再現するために損傷の定義そのものを設定することが必要になると思われる。具体的には損傷の種類や状態によって点数を設定し、その点数によって橋梁の損傷状態を想定するという方法が考えられる。

表-5 離散値/パラメータ

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

表-6 同定結果

要素番号	Case1		Case2		
	実測値	解析値	実測値	解析値	
1	0	0	0	0	
2	0	0	30	30	
3	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	
5	30	30	30	30	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	
収束世代数	3		75		
Case3		Case4		Case5	
実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
0	0	0	0	10	-
30	30	0	0	0	-
0	0	10	10	10	-
0	0	0	0	0	-
30	30	30	30	30	-
0	0	0	0	0	-
0	0	0	0	0	-
0	0	0	0	0	-
30	30	30	30	30	-
0	0	0	0	0	-
64		99		収束せず ^a	

参考文献：

- 1) 社会資本の老朽化対策会議（国土交通省）会議資料（国土交通省 2013年1月21日）
- 2) Doebling, S.W.et al.: A summary review of vibration-based identification methods, Shock and Vibration Digest, Vol.205 (5), pp.631-645, 1998.
- 3) 吉田幸司, 関 雅樹, 曾布川竜, 西山誠治, 川谷充郎：鉄道高架橋の部材剛性低下による振動特性への影響評価, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.447-458, 2005.3.
- 4) 伊庭齊志：遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社出版局.
- 5) 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.
- 6) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム, 産業図書.
- 7) 三木光範, 廣安知之, 勝崎俊樹, 森隆史：分散遺伝的アルゴリズムにおける多様性を考慮した世代交代モデルの効果, The science and engineering Doshisha university, Vol.45, No.3, November 2004