

交通振動解析を用いる鉄道橋梁健全度評価手法の開発

北海道大学大学院工学研究科 山田雄太（研究当時） 北海道大学大学院工学研究院 ○正会員 何 興文
 北海道大学大学院工学研究院 F 会員 林川俊郎 神戸大学大学院工学研究科 F 会員 川谷充郎
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された多くの橋梁構造物の劣化・老朽化に対し、実用的な健全度評価手法が必要となっている。そこで、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おり、列車走行による鉄道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。しかし、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試みる¹⁾²⁾。具体的には、想定し得る損傷パターンを入力して交通振動の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. 研究手法

考案した手法¹⁾を実用かつ効率的なものにするために、次のように橋梁一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) 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) を構築する予定である。構築に際し、模型実験や実測の代わりに、橋梁一走行列車連成解析手法による高架橋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。しかし、本論文において簡単なモデルを用い、提案手法の妥当性を検討する段階にあるため、NN の構築は省略とする。

2) 遺伝的アルゴリズム (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. 橋梁一走行列車連成振動解析

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 自由度列車モデル及び単純支持桁橋モデルを用いる。2 自由度列車モデルを図-1、桁橋モデルを図-2 にそれぞれ示す。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す。橋梁モデルについて、図-2 に示している東海道新幹線における代表的な諸元を有する鋼桁橋を想定し、11 節点、10 要素でモデル化している。車両は 16 両、速度は 270km/h とし、定式化や車両諸元等の詳細は既往の研究に参照されたい²⁾。

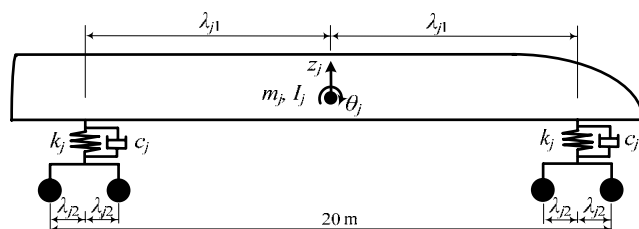


図-1 2 自由度列車モデル

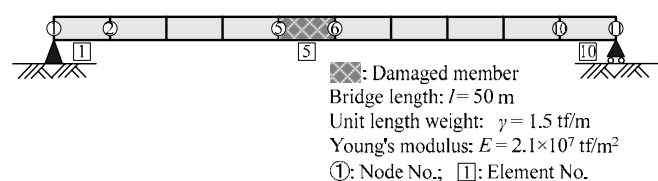


図-2 桁橋モデル

3.1 損傷前後の振動解析結果

桁橋を車両が通過したときの加速度時刻歴応答結果を、図-2 で示した桁橋モデルの 6 番目節点について図-3 に示す。このときの結果を本研究では健全時のデータとする (以下、健全時)。また、図-2 の要素 5 の曲げ剛性を 30% 低減させたときの 6 番目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 30% 損傷したものとする (以下、損傷時)。健全時と損傷時の図-2 における各節点の最大加速度を表-1 に示す。結果を比較すると、損傷時では健全時に比べると最大加速度が全体的に増加した。これは橋梁部材の剛性が低下したことが原因である。よって、開発した橋梁一走行列車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可能である。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。

キーワード：鉄道橋、健全度評価、連成振動解析、ソフトコンピューティング

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目北大大学院工学研究院 TEL: 011-706-6172

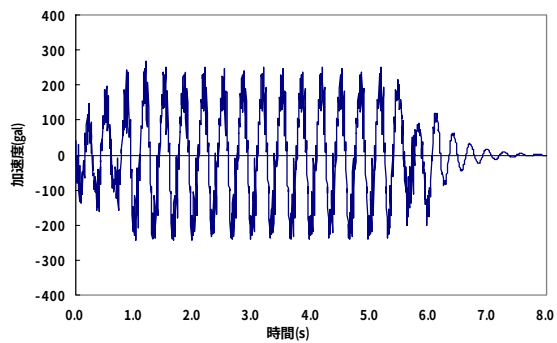


図-3 加速度時刻歴応答(健全時)

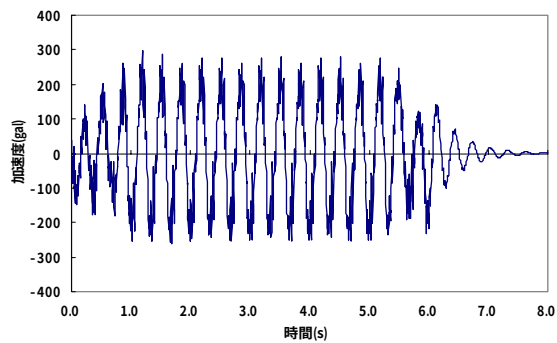


図-4 加速度時刻歴応答(損傷時)

表-1 各節点の最大加速度

	節点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最大加速度 (gal)	健全時	52.58	168.83	181.68	207.30	239.25	266.69	242.62	211.07	202.59	249.83	60.30
	損傷時	43.51	155.51	195.67	225.30	259.54	296.32	273.77	219.00	216.12	206.72	49.27

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

表-3 同定結果

	要素番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Case1	実測	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
	解析	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
Case2	実測	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0
	解析	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
Case3	実測	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	解析	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. GA による損傷パターンの同定

本研究では、GA³⁾を利用して橋梁部材の損傷の程度およびその箇所の推定を行う。具体的には、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特定を行う。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 11%損傷(以下、Case1)、46%損傷(以下、Case2)、要素 1 を 11%損傷(以下、Case3)させたものとする。

4.1 GA 最適化アルゴリズム

本モデルでは、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³⁾。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う。遺伝子列と離散値パラメーターを表-2 に示す。表-2 において、上段の遺伝子列に対し、下段に示す数値(離散値)が橋梁一走行列車連成振動解析プログラムにおける要素の曲げ剛性(EI)低下率として入力されるよう設定した。また、目的関数(OBJ)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(1)で表す関数を用いて適応度を評価する。

$$OBJ = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \{f(i) - f'(i)\}^2 \tag{1}$$

ここで、 $f(i)$ は橋梁中央部(図-2、節点 6)の仮想実測値の加速度時刻歴応答であり、 $f'(i)$ は前章で示した連成振動解析の解析値(図-2、節点 6)である。 i は解析における列車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。

4.2 損傷同定結果

前節までの解析手法により収束計算を行ったところ、表-3 のような結果が得られた。Case1、Case2、Case3 ともに実測値と最も近い値を与える損傷パターンにおいて収束した。簡易的なモデルを使用しているとはいえ、本研究で用いる手法、目的関数によって損傷程度、箇所を十分に推定できることが確認できた。

5. まとめ

本研究では橋梁一走行列車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、橋桁モデルおよび 2 自由度列車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。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決するための NN システムの構築を行っていく必要がある。

参考文献

1) 何 興文他：交通振動解析を用いる鉄道橋梁健全度評価手法の開発，土木学会 64 回年次学術講演会講演概要集，I-121，2009.9。
2) 山田雄太他：交通振動解析を用いる鉄道橋梁健全度評価手法の開発，土木学会北海道支部論文報告集，A-44，2010。
3) 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎，オーム社出版局，1994。