

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2008 ~ 2009
 課題番号： 20760307
 研究課題名 (和文) 橋梁-列車連成振動解析とソフトコンピューティング手法を用いた鉄道高架橋の損傷推定
 研究課題名 (英文) Damage identification of railway viaducts using train-bridge interaction analysis and soft computing methods
 研究代表者
 何 興文 (HE XINGWEN)
 北海道大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号： 20454605

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、列車走行による高架橋の振動応答により、橋梁部材の損傷を推定する手法の開発を目的とし、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用い、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を特定する基本的な損傷推定アルゴリズムを構築した上で、実橋梁の諸元に基づく単純支持桁橋モデルおよび平面列車モデルを用いてその適用可能性を検証した。

研究成果の概要 (英文)：

Under the backgrounds that the maintenance of infrastructures becomes increasingly important in developed countries, this research is intended to establish a structural identification approach to the health monitoring of railway viaducts using train-induced vibration data. In this approach, possible damage patterns are assumed in advance and the bridge responses are simulated using a developed train-bridge interaction analysis procedure. If the calculated responses due to a certain damage pattern are identical to the recorded ones, then the damage can be identified. To make the proposed approach practicable to actual structures, soft computing methods are introduced to simplify and optimize the identification process. As a result of this research, the feasibility of the proposed approach is confirmed using simple models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

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，ヘルスマニタリング，遺伝的アルゴリズム，ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

近年、鉄道高架橋等を含む重要な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。2007年8月の米国ミネアポリス市の橋崩落事故は、橋梁構造物に対する維持管理への警鐘を鳴らしている。日本においても、高度経済成長期に建設された多くの構造物の劣化・老朽化への対応が急務となっている。特に供用し40年以上を経過した新幹線高架橋構造物は、日本社会経済活動の大動脈となっており、今後も機能を維持しながら継続的に供用される必要がある。一般に鉄道橋梁の検査は、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。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。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。

2. 研究の目的

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的とする。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。

3. 研究の方法

考案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。

a) 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、本研究ではまず、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、申請者が開発した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。橋梁振動解析結果はすでに実測値との整合性が確認できているので、構築したシステムは実構造物にそのまま応用できる。ただし、開発の初期段階において適用性検討に用いる橋梁と列車モデルは非常に単純なもので計算量が少ないため、NNの応用は省略するものとした。

b) 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、求めている解である。

4. 研究成果

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、まず簡単な平面桁橋モデル (Fig.1 参照) および 2 自由度列車モデル (Fig.2 参照) を用い、走行列車一橋梁連成振動解析手法を構築した。解析手法の詳細は比較的複雑なもので、ここで省略する。そして構築した手法に基づき、振動系である車両との連成振動方程式を、Newmark's β 逐次積分法を用いて計算機プログラムを開発し、動的応答解析を行う。

今回の解析での橋梁モデルは、Fig.1 に示している平均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 1 両とし、速度は 60km/h とする。

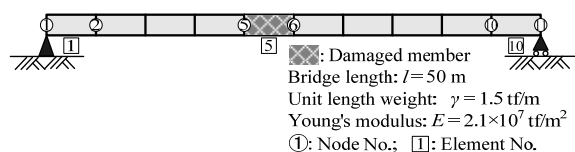


Fig. 1 Simple girder bridge model

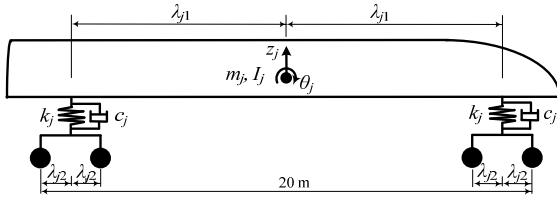


Fig. 2 Two-DOF bullet train car model

Table 1 Definition of gene strings

Gene string	Damage degree (%)
000	0
001	10
010	20
011	30
100	40
101	50
110	60
111	70

(1) 損傷前後の橋梁振動応答

車両一両が桁橋を通過した際に、Fig.1 で示した桁橋モデルの6番目の節点について、健全時 (Intact) および要素5の曲げ剛性を28%低減させた場合 (damaged, 28%損傷時と称する) の加速度および変位時刻歴応答をシミュレーションした。ここで、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とする。結果の比較より、28%損傷時では健全時に比べると最大加速度および変位が増加することが確認できた。橋梁の動的応答は健全時と損傷時に差異が現れ、損傷推定の指標となり得ることが分かる。

(2) 損傷シナリオ

本研究では、桁橋中央部(Fig.1, 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-走行列車連成振動解析により得られた損傷結果を擬似実測値として用いることとする。擬似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。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、前者は目視で判断できないような損傷、後者は比較的大きな損傷を想定し、本研究で構築した手法の有効性を示す。また、Case3は測定位置と損傷箇所が離れていても本研究で構築するモデルで特定可能かどうかを検証するために設定した。

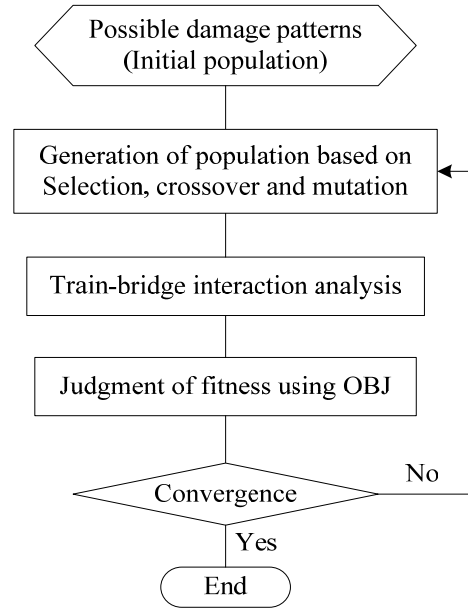


Fig. 3 Flow-chart of GA algorithm

(3) GA アルゴリズム

作成したGA解析モデルのフローチャートをFig.3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をTable 1に示す。ここで、上段の遺伝子列 (Gene string) 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曲げ剛性の低下率 (Damage degree) 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 (OBJ) 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(1)で表す関数を用いて適応度を評価する。

$$OBJ = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \{f(i) - f'(i)\}^2 \quad (1)$$

ここで、 $f(i)$ は橋梁中央部(Fig.1, 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わしている。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。

Table 2 Identification results by GA

		Case1	
Elem. No.	Pseudo-Measured	Analysis	
1	0	0	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	11	10	
6	0	0	
7	0	0	
8	0	0	
9	0	0	
10	0	0	
		Case2	
Elem. No.	Pseudo-Measured	Analysis	
1	0	0	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	46	50	
6	0	0	
7	0	0	
8	0	0	
9	0	0	
10	0	0	
		Case3	
Elem. No.	Pseudo-Measured	Analysis	
1	11	10	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	
5	0	0	
6	0	0	
7	0	0	
8	0	0	
9	0	0	
10	0	0	

(4) 損傷同定結果

前述 GA アルゴリズムにより収束計算を行った結果、Table 2 のような結果が得られた。Case1, Case2 および Case3 と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。これにより、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と目的関数により損傷箇所およびその程度を十分に推定できることが確認できた。

収束時間の検討

収束までに GA モデルにおいて Case1 は 13 世代、Case2 は 157 世代、Case3 は 12 世代を要した。これらの差は損傷が大きな値であるほど、局所解に陥りやすいことが原因であると考えられる。また、GA のパラメーター（個体数、交叉率、突然変異率）を変化させると 10~30 世代程であるが収束までに要する時間が変化する。GA においてはパラメーターの設定が収束の可否、時間に大きく影響するといえ、最適なものを設定する必要がある。

収束精度の検討

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) 結論

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。今後の実用化に向け、より現実に近い詳細な三次元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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Xingwen He, Toshiro Hayashikawa, Mitsuo Kawatani and Takashi Matsumoto: Feasibility Estimation of A Bridge Health Monitoring Approach Using Train-Bridge Coupled Vibration Analysis Procedure, Proc. of the Tenth Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges (JSSB-JK10), Aug. 2009. (Accepted)
2. Xingwen He, Mitsuo Kawatani, Toshiro Hayashikawa, Hitoshi Furuta, and Takashi Matsumoto: Development of a health monitoring approach to railway viaducts using direct analyses of train-bridge interaction, Proc. of the International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2009), pp.588-591, Nov. 2009.
3. Xingwen He, Toshiro Hayashikawa, Takashi Matsumoto, Mitsuo Kawatani and Hitoshi Furuta: Development of a bridge health monitoring approach using train-bridge interaction analysis and GA optimization, Proc. of the Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2010), July 2010. (Accepted and In Press)

[学会発表] (計 2 件)

1. 何 興文・林川俊郎・川谷充郎・松本高志 : 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, 福岡大学.
2. 山田雄太・何 興文・林川俊郎・川谷充郎・松本高志 : 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年次技術研究発表会論文集, A-44, 2010. 1, 札幌コンベンションセンター.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

何 興文 (HE XINGWEN)

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 20454605

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし