

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月21日現在

機関番号： 10101

研究種目： 若手研究（B）

研究期間： 2010～2011

課題番号： 22760336

研究課題名（和文）交通振動順解析を用いた橋梁ヘルスマニタリング手法

研究課題名（英文）Bridge health monitoring using traffic-induced vibration analysis

研究代表者

何 興文 (HE XINGWEN)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号： 20454605

研究成果の概要（和文）：

本研究では、車両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用いて、工学的に想定し得る損傷パターンを入力と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。そして、実橋梁の諸元に基づく橋梁モデルおよび平面と立体車両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）：

This research is intended to establish a structural identification approach to the health monitoring of viaducts using traffic-induced vibration data. The possible damage patterns of the bridge are assumed according to theoretical and empirical considerations at first. Then, the running vehicle-induced dynamic responses of the bridge under a certain damage pattern are calculated employing a developed vehicle-bridge interaction analysis procedure. When the calculated response is identical to the recorded one, this damage pattern will be the solution. However, owing to the large number of damage patterns, it is difficult to identify the exact solution. Therefore in this approach, the optimization method of Genetic Algorithm is applied to identify the damage pattern. As a result of this research, the feasibility of the proposed approach is confirmed using numerical models.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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： 健全度評価, 損傷同定, 連成振動解析, 鉄道橋, 道路橋, ヘルスマニタリング, ソフトコンピューティング, 遺伝的アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

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。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。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、効率的な健全度評価手法になると考えられる。

2. 研究の目的

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、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、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手法である遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA) およびニューラルネットワーク (Neural Network, 以下 NN) を取り入れ、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および大型ダンプトラックによる交通振動を利用し、橋梁の損傷同定を行うことを想定する。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 自由度列車モデルと自動車モデル (Fig.2 と Fig.3 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。さらに、構築した手法の実車両による適用可能性を検証するために、三次元の 15 自由度列車モデル (Fig.4 参照) による損傷同定も行う。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。

本研究での橋梁モデルは、Fig.1 に示すような平均的な諸元を有する鋼桁の鉄道橋および道路橋を想定し、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 以内の低速とする。

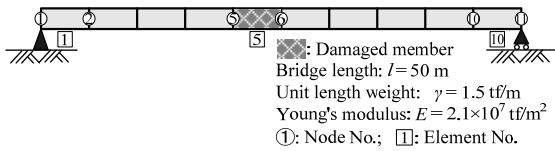


Fig. 1 Simple girder bridge model

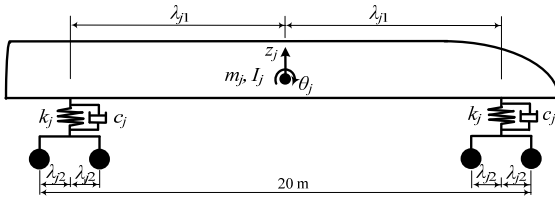


Fig. 2 Two-DOF bullet train car model

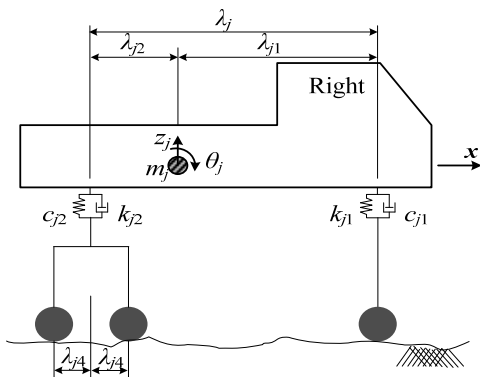


Fig. 3 Two-DOF dump truck model

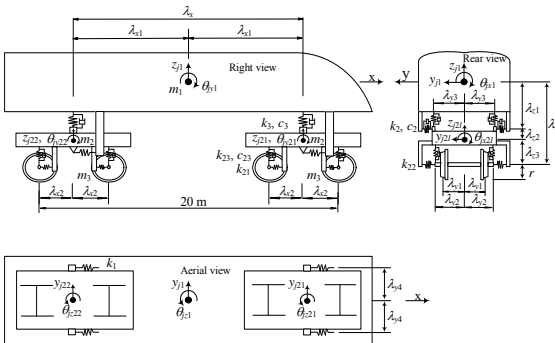
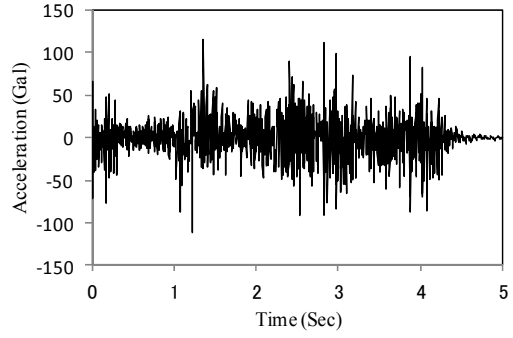


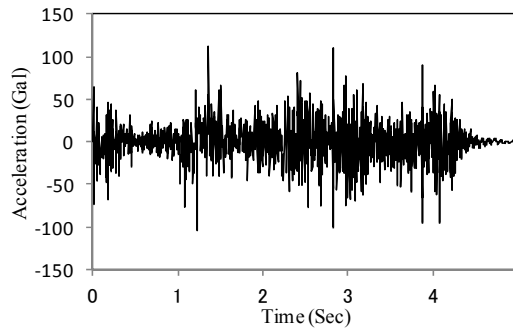
Fig. 4 15-DOF bullet train car model

(1) 損傷前後の橋梁振動応答

15 自由度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 30%低減させた場合 (damaged, 30% 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。損傷前後の加速度応答図を Fig.5 に、各節点における加速度応答値を Table 1 にそれぞれ示す。ここで、



a) before damage



b) 30% damage of element 5

Fig.5 Acceleration responses of the bridge

Table 1. Acceleration variation due to damage

Node No.	Max acc (Gal) before damage	Max acc (Gal) after damage
1	30	29
2	101	114
3	66	67
4	114	115
5	115	112
6	81	79
7	141	116
8	151	161
9	93	161
10	253	257
11	46	46

橋梁一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、30%損傷時では健全時に比べるとすべての節点における最大加速度および変位が変動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。

Table 2 Definition of gene strings

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

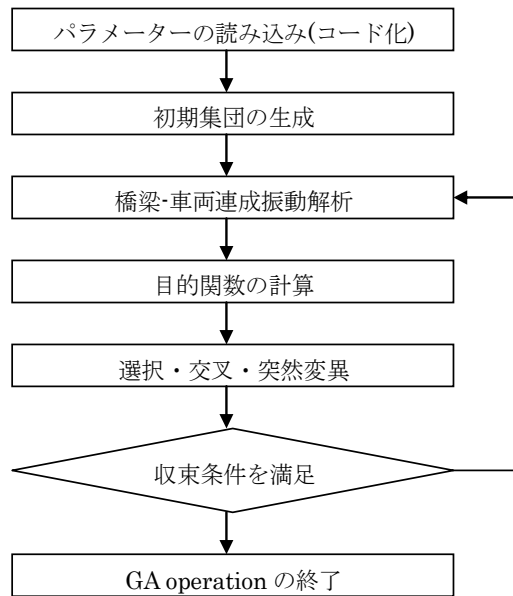


Fig.6 Flow-chart of GA algorithm

(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-走行車両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。本報告では、実車両の挙動を正確に表現できる 15 自由度列車モデルを用いた検証結果を例に報告する。

擬似実測値として想定する損傷ケースは、要素 5 を 11% 損傷 (以下, Case1), 31% 損傷 (以下, Case2), 要素 1 を 11% 損傷 (以下, Case3), そして要素 2 と 5 をともに 11% 損傷 (以下 Case4) 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

Table 3 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	31	30
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
Case4		
Elem. No.	Pseudo-Measured	Analysis
1	0	0
2	11	10
3	0	0
4	0	0
5	11	10
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0

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。さらに Case4 は、複数箇所の損傷同定が可能かどうかを確かめる。

(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.6 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 2 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) が橋梁一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。

(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 3 のような結果が得られた。Case1, Case2, Case4 および 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。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。

(5) 結論

本研究では橋梁一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, 簡単な構造および三次元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橋梁モデルを用いた損傷推定手法の構築が必要になる。その際, 次の諸問題が想定され, 適切に対応する必要があると予想される。

1) 実構造物の部材数が多く, 損傷程度も考えると, 損傷パターンが複雑で膨大になるが, 実際の橋梁の損傷箇所・程度については, 経験的に実務者は把握しており, また工学的

あるいは力学的にもある程度予想できる。あり得る損傷パターンの効率的な設定するために, 事前に実際の橋梁損傷箇所・程度を把握する必要がある。

2) 実際の交通振動において, 車両重量や速度, 路面凹凸の影響, さらに計測データにおける周辺環境の影響 (ノイズ) などの不確実性が存在し, 実応用に向けてこれらの影響を十分に検討し考慮する必要がある。

3) 本論文で用いた加速度振動応答だけで損傷パターンを区別できなくなる可能性がある。その場合, 振動応答に加え, 周波数応答特性などより複雑な目的関数を設計する必要がある。

4) 計算量が膨大になりパソコンでの計算は現実的でなくなる可能性があり, より効率的な計算方法の開発や適用の必要性がある。

5) 損傷推定精度を高めるために, より高度な GA 手法の適用が必要である。

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5件)

1. 何興文, 川谷充郎, 林川俊郎, 古田均, 松本高志: 振動解析とGA最適化手法を用いた橋梁損傷同定法の適用可能性検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.19, pp.631-636, 2011.
2. Xingwen He, Mitsuo Kawatani, Hitoshi Furuta, Toshiro Hayashikawa, Chul-Woo Kim and Takashi Matsumoto: Feasibility Estimation of A Bridge Health Monitoring Approach Using Train-Bridge Coupled Vibration Analysis Procedure Proc. of The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11plus), CD-ROM, pp. 4305-4314, Seoul, Korea, 2011.
3. Xingwen He, Mitsuo Kawatani, Toshiro Hayashikawa, Hitoshi Furuta and Takashi Matsumoto: A bridge damage detection approach using train-bridge interaction analysis and GA optimization, Proc. of The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Procedia Engineering (Elsevier Ltd.), Vol.14, pp. 769-776, 2011.
4. 何興文, 林川俊郎, 川谷充郎, 松本高志: 振動解析とソフトウェアによる橋梁損傷同定法の開発, 鋼構造年次論文報告集, Vol.18, pp. 425-430, 2010.
5. Xingwen He, Toshiro Hayashikawa, Mitsuo Kawatani and Hitoshi Furuta, Takashi Matsumoto: 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), pp.748-753, 2010.

[学会発表] (計3件)

1. 細川俊彦, 何興文, 林川俊郎, 川谷充郎, 松本高志: 交通振動応答を用いた鉄道橋梁損傷同定手法の構築, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集, 第68号, A-2, 2012. 2, 北海道立道民活動センター.
2. 吳潤植, 何興文, 林川俊郎, 川谷充郎, 松本高志: 交通振動解析とGAを用いる橋梁の損傷同定手法の開発, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文報告集, 第67号, A-7, 2011.2, 苫小牧工業高等専門学校.
3. 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65回年次学術講演会講演概要集, I-190, 2010. 9, 北海道大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[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 助教
研究者番号: 20454605

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし