

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 正会員 ○何 興文 北海道大学大学院 フェロー 林川俊郎
 神戸大学大学院 フェロー 川谷 充郎 北海道大学大学院 正会員 松本高志

1. 研究背景 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、鉄道橋梁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。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、衝撃試験に至っては、列車が運行する状態では実施できない。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により、健全度評価に活用できる¹⁾。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²⁾。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. 交通振動順解析手法による健全度評価の理論構築 現在研究されている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進む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、交通振動の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およびその程度を推定する。この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予定である。

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。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。そのために、最終的に実構造物への応用に際し、信頼性の高い交通振動解析手法を構築し、橋梁振動解析結果と実測値との整合性を十分に確保する必要がある。

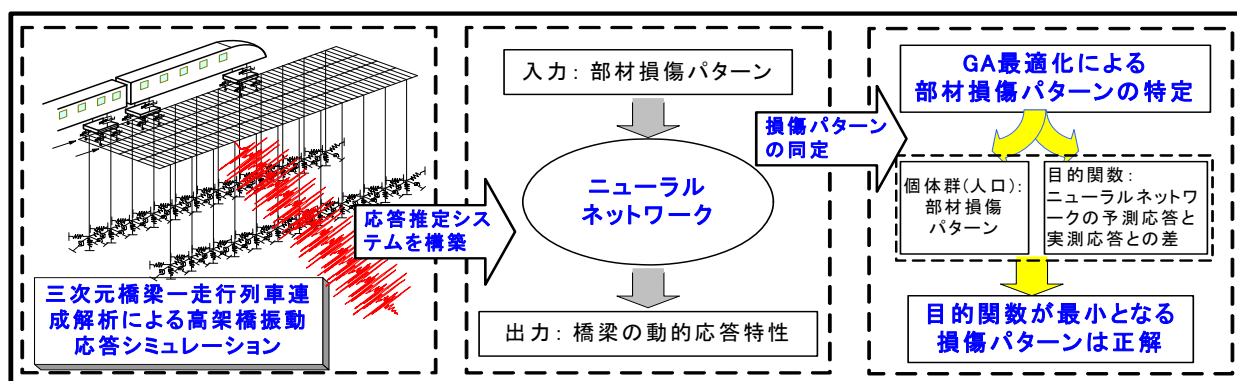


Fig. 1 Total image of health monitoring approach using vibration analysis and soft computing methods

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科環境創生工学専攻 TEL: 011-706-6172

2) 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。全体的な手法のイメージについて Fig.1 に示す。

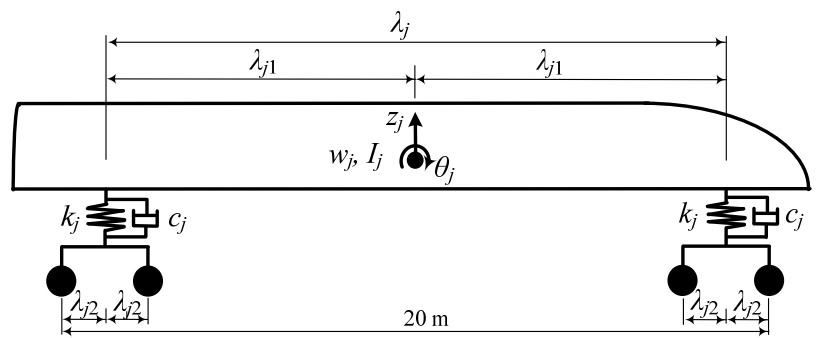


Fig.2 2-DOF bullet train car model

3. 2 自由度車両モデルによる連成振動定式化 本研究では、手法開発における解析で新幹線列車および鉄道橋梁を想定する。第一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、まずもっとも簡単な 2 自由度列車モデル (Fig.2 参照) および桁橋モデルを用いる。Fig.2 において、 z_j および θ_j はそれぞれ車体の上下および回転振動を表し、 w_j および I_j はそれぞれ車体の重量および回転慣性モーメントである。また、 k_j および c_j は枕バネのばね定数および減衰係数を表す。橋梁と列車との連成振動の定式化について、以下で簡単に示す。

a) 車両の振動方程式

$$\text{上下振動(Bouncing): } m_j \ddot{z}_j + \sum_{l=1}^2 v_{jl}(t) = 0 ; \quad \text{回転振動 (Pitching): } I_j \ddot{\theta}_j + \sum_{l=1}^2 (-1)^l \lambda_{jl} v_{jl}(t) = 0$$

$$\text{ここで、} v_{jl}(t) = k_j \left\{ z_j + (-1)^l \lambda_{jl} \theta_j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 w_{jlk} \right\} + c_j \left\{ \dot{z}_j + (-1)^l \lambda_{jl} \dot{\theta}_j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \dot{w}_{jlk} \right\}$$

ここで、 j は車両の番号で、 l と k は、車体と台車に関する変数で、 $l = 1, 2$ はそれぞれ車体の前後、 $k = 1, 2$ はそれぞれの台車における前後軸を表す。また、 $v_{jl}(t)$ は車体と台車を連結する枕ばねの伸張を正として発生する力を表す。 w_{jlk} はレールの変位と路面凹凸による車輪の変位で、 $w_{jlk} = w(t, x_{jlk}) - z_0(x_{jlk})$ 、ここで、 $w(t, x_{jlk})$ と $z_0(x_{jlk})$ はそれぞれ車輪とレールとの接触点におけるレールの変位と凹凸を表す。また、列車の輪重 $P_{jlk}(t)$ は、次の式で計算される。

$$P_{jlk}(t) = \frac{1}{4} w_j + \frac{1}{2} w_{jt} + w_{jw} + \frac{1}{2} v_{jlk}(t), \quad \text{ここで、} w_j, w_{jt} \text{ および } w_{jw} \text{ は、それぞれ車体、台車および輪軸の重量である。}$$

b) 橋梁の振動方程式

有限要素および振動理論により、形式によらず一般的な橋梁振動方程式は次のようになる。式において、 M_b 、 C_b および K_b は、それぞれ質量、減衰、および剛性マトリクスを表し、 F_b は外力ベクトルである。

$$M_b \ddot{w}_b + C_b \dot{w}_b + K_b w_b = F_b, \quad \text{ここで、} F_b = \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \Psi_{jlk}(t) P_{jlk}(t)$$

ここで、 $P_{jlk}(t)$ は輪重で、 $\Psi_{jlk}(t)$ は輪重を要素の節点に分配する分配ベクトルである。 h は車両の数を表す。モード法を適用すると、橋梁の変位ベクトル w_b は、固有振動ベクトルと一般化座標で表すと $w_b = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i = \Phi \cdot q$ 、ここで、 q は一般化座標で、マトリクス Φ は固有ベクトル ϕ_i で構成される。 w_b を橋梁の振動方程式に代入すると、

$$M_b \Phi \ddot{q} + C_b \Phi \dot{q} + K_b \Phi q = F_b, \quad \text{両辺に } \Phi^T \text{ を乗じると、} \Phi^T M_b \Phi \ddot{q} + \Phi^T C_b \Phi \dot{q} + \Phi^T K_b \Phi q = \Phi^T F_b$$

固有ベクトル直交性を利用し、 $\phi_i^T M_b \phi_i = M_i$ 、 $\phi_i^T K_b \phi_i = K_i$ 、 $\phi_i^T C_b \phi_i = C_i$ 、 $\Phi^T F_b = f_i$ とすると、一般座標に関する橋梁振動方程式は、次のようになる： $M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = f_i$

上記のすべての式を用いて代入し展開すると、さらに詳細式が得られ、計算機プログラム作成に用いられる。

4. まとめ 本概要では、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た鉄道橋梁健全度評価手法を構想し、その理論体系を提示した。さらに 2 自由度列車モデルによる連成振動の定式化を行った。

参考文献：

- 1) Doebling, S.W. et al.: A summary review of vibration-based identification methods, Shock and Vibration Digest, Vol.205 (5), pp.631-645, 1998.
- 2) 吉田幸司ら：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.