交通振動解析を用いる鉄道橋梁健全度評価手法の開発

Development of a health monitoring approach to railway bridges using train-induced vibration direct analysis

北海道大学大学院工学研究科	学生員	山田雄太	(Yuta Yamada)
北海道大学大学院工学研究科	正会員	何 興文	(Xingwen He)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	林川俊郎	(Toshiro Hayashikawa)
神戸大学大学院工学研究科	F 会員	川谷充郎	(Mitsuo Kawatani)
北海道大学大学院工学研究科	正会員	松本高志	(Takashi Matsumoto)

1. はじめに

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.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 に容易で,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, 効率的なヘルスモニタリング手法になると考えられる.

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.

2. 研究手法

前節で説明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-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.全体的な手法のイメージについて,図-1に示す.

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-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,実応用に際し,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.

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,求める解である.



図-1 研究イメージ

3. 橋梁と列車連成振動定式化

本研究では,手法開発における解析で新幹線列車及び 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,最 も簡単な2自由度列車モデル及び,桁橋モデルを用いる. 2 自由度列車モデルを図-2,桁橋モデルを図-3 に示す. 図-2 において, *z*_j及び θ_jは車体の上下及び回転振動を表 し, *w*_j及び *I*_jは車体の重量及び回転慣性モーメントであ る.また,*k*_j及び *c*_jは枕バネのばね定数及び減衰係数を 表す.橋梁と列車との連成振動の定式化について,次の ように示す.

3.1 車両の振動方程式

上下振動(Bouncing of car body)

1

$$n_j \ddot{z}_j + \sum_{l=1}^2 v_{jl}(t) = 0 \tag{1}$$

回転振動 (Pitching of car body)

$$I_{j}\ddot{\theta}_{j} + \sum_{l=1}^{2} (-1)^{l} \lambda_{j1} v_{jl}(t) = 0$$
⁽²⁾

$$v_{jl}(t) = k_j \left\{ z_j + (-1)^l \lambda_{j1} \theta_j - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 w_{jlk} \right\} +$$
(3)

$$c_{j}\left\{\dot{z}_{j}+\left(-1\right)^{l}\lambda_{j1}\dot{\theta}_{j}-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{2}\dot{w}_{jlk}\right\}$$

ここで, *j* は車両の番号, *l* と *k* は,車体と台車に関する 変数, *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_{ik} はレール変位と路面凹凸による車輪の変位を表す.

$$w_{iik} = w(t, x_{iik}) - z_0(x_{iik})$$
(4)

(4)式の $w(t,x_{jlk})$ 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 $P_{ilk}(t)$ は,(5)式で計算される.

$$P_{jik}(t) = \frac{1}{4} w_j + \frac{1}{2} w_{ji} + w_{jw} + \frac{1}{2} v_{jik}(t)$$
(5)



図-2 車両モデル

ここで, *w_j*, *w_{ji}*及び *w_{jw}*は, それぞれ車体, 台車及び 輪軸の重量である.

3.2 橋梁の振動方程式

有限要素及び振動理論により,形式によらず一般的な 橋梁振動方程式は(6)式のようになる.(6)式において, *M_b*,*C_b*及び*K_b*は,それぞれ質量,減衰,及び剛性マト リクスを表し,*F_b*は外力ベクトルである.

$$\boldsymbol{M}_{b} \ddot{\boldsymbol{w}}_{b} + \boldsymbol{C}_{b} \dot{\boldsymbol{w}}_{b} + \boldsymbol{K}_{b} \boldsymbol{w}_{b} = \boldsymbol{F}_{b}$$
(6)

$$\boldsymbol{F}_{b} = \sum_{j=1}^{h} \sum_{l=1}^{2} \sum_{k=1}^{2} \boldsymbol{\Psi}_{jlk}(t) P_{jlk}(t)$$
(7)

ここで, P_{jik}(t)は輪重で, Ψ_{jik}(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(8)式となる.

$$\boldsymbol{w}_{b} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\varphi}_{i} \boldsymbol{q}_{i} = \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{q}$$
(8)

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、(9)式になる.両辺に ϕ^T を乗じると、(10)式で表わされ、

$$\boldsymbol{M}_{b}\boldsymbol{\Phi}\ddot{\mathbf{q}}+\boldsymbol{C}_{b}\boldsymbol{\Phi}\dot{\mathbf{q}}+\boldsymbol{K}_{b}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q}=\boldsymbol{F}_{b}$$
(9)

 $\boldsymbol{\Phi}^{T}\boldsymbol{M}_{b}\boldsymbol{\Phi}\ddot{\mathbf{q}}+\boldsymbol{\Phi}^{T}\boldsymbol{C}_{b}\boldsymbol{\Phi}\dot{\mathbf{q}}+\boldsymbol{\Phi}^{T}\boldsymbol{K}_{b}\boldsymbol{\Phi}\mathbf{q}=\boldsymbol{\Phi}^{T}\boldsymbol{F}_{b}$ (10)

上記の式に固有ベクトル直交性を利用し,

$$\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{M}_b \boldsymbol{\varphi}_i = M_i$$
, $\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{K}_b \boldsymbol{\varphi}_i = K_i$, $\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{C}_b \boldsymbol{\varphi}_i = C_i$, $\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{F}_b = f_i$

とすると,一般座標に関する橋梁振動方程式は,(11)式 のようになる.

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i = f_i \tag{11}$$

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.



図-3 橋梁モデル

	定義	記号	単位	値
	車両重量	W _v	kN	321.616
	前方及び後方台車重量	w_t	kN	25.862
		W_{w}	kN	8.845
	車体回転慣性モーメント	I_{v}	kN• s ² • m	2512.628
	ばね定数	k	kN/m	90.410
	減衰定数	С	kN• s/m	4.405
	台車の中心までの距離		m	17.500
幾何特性	ばね位置から台車の中心までの距離	1	m	8.750
	1/2 輪軸間距離	2	m	1.250

表-1 車両の構造特性





表-2 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	健全時	-27.61	-140.3	-60.45	-75.96	-76.16	-48.07	-61.21	-84.51	-51.74	-94.08	-19.35
(gal)	25%損傷時	-26.85	-142.3	-56.42	-85.21	-76.70	-50.69	-57.11	-84.05	-52.91	-93.88	-19.21

3.3 橋梁 - 車両連成振動解析

前節で示したように定式化を行い,振動系である車両 との連成振動方程式を,Newmark's β 法を用いて逐次積 分をして動的応答解析を行う.このとき, $\beta=1/4$ とし, 各時間間隔における収束判定は 1/1000 とする.

今回の解析において橋梁モデルは,図-3 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.車両モデルの諸元を表-1 に示す.

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加速度時刻歴応答結果を, 図-3 で示した桁橋モデルの6番目の節点について,図-4 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,健全時と称する).また,図-3の要素 5 の曲げ剛性を 25%低減させたときの 6 番目の節点にお ける加速度時刻歴応答を図-5 に示す.この結果を橋梁 が 25% 損傷したものとする (以下, 25% 損傷時と称す る).健全時と 25%損傷時の図-3 における各節点の最大 加速度を表-2 に示す.結果の比較より,25%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, 作成した橋梁 - 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 ことができた.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.

3.5 計算コスト

本研究において,ニューラルネットワークを用いて計 算コストの短縮を図ることを構想しているが,橋梁-走 行列車連成振動解析に用いたモデルが簡易的なものであ るため,現段階では省略することとする.しかし,今後 解析モデルをより詳細にするに従って発生する膨大な解 析計算コストを解消するために,ニューラルネットワー クシステムを構築する必要がある.

4. GA による損傷パターンの同定

遺伝的アルゴリズム(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,及び突然変異等のプロセスを簡単 な数理モデルに置き換え,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,評価は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³⁾⁻⁵⁾.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.次にその具体的な手法を示す.

4.1 損傷シナリオ

本研究では,桁橋中央部(図-3,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, 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できるか検証するために設定した.

表-3 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
(%)	0	10	20	50	40	50	00	70



図-6 フローチャート

表-4 解析結果

	Ca	se1	Ca	se2	Case3		
節点 番号	実験	解析	実験	解析	実験	解析	
1	0	0	0	0	11	10	
2	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	
5	11	10	46	50	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0		

4.2 GA 解析モデル

作成した GA 解析モデルのフローチャートを図-6 に 示す.このモデルでは、参考文献³⁾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.図-3 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 ーターを表-3 に示す.表-3 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-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(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(12)で表す関数を用いて適応度を評価する.

$$OBJ = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{t} \{f(i) - f'(i)\}^2$$
(12)

ここで, f(i)は橋梁中央部(図-3, 節点 6)の仮想実測値 の加速度時刻歴応答であり,前節で示した連成振動解析 の解析値(図-3,節点 6)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.

4.3 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-4 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.

(1) 収束時間

収束までに GA モデルで 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 影響するといえる.今回は参考文献³⁾で推奨する値をキ ャリブレーションにより決定したが,今後のモデルの変 更に伴い,その都度最適なものを設定する必要がある. (2)収束精度

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 後は,収束条件の設定についても検討する必要があると 考える.また,精度向上が必要であれば,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. まとめ

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,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.

参考文献:

- 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.
- 3) 伊庭斉志:遺伝的アルゴリズムの基礎,オーム社出版局.
- 4)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.
- 5) 北野宏明:遺伝的アルゴリズム,産業図書.