車両応答の統計分析に基づく橋梁損傷検知法

Bridge assessment based on statistical analysis of the response of a vehicle passing over the bridge

山本亨輔*・利波立秋**・大島義信***・金哲佑****・杉浦邦征****・川谷充郎*****

Kyosuke Yamamoto, Tatsuki Toshinami, Yoshinobu Oshima,

Chul-Woo Kim, Kunitomo Sugiura and Mitsuo Kawatani

*修士, 京都大学大学院博士後期課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

** 神戸大学大学院博士前期課程, 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

*** 工(博), 京都大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**** Ph.D., 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***** 工博, 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

This study focuses on the vehicle acceleration response as a source of estimating bridge's health condition, since it contains bridge profile information and a change of the bridge profile caused by bridge damage can be detected from change of statistical vehicle response. The wavelet coefficient is used as a damage index. To increase the possibility of detecting the damage, the kurtosis of the index is adopted. By observation from a laboratory experiment, it is found that kurtosis of vehicle response is a sensitive index for bridge damage.

Key Words: Bridge Health Monitoring, Vehicle response analysis, wavelet transform, Kurtosis, Vehicle-Bridge interaction

キーワード: 橋梁ヘルスマモニタリング, 車両応答分析, ウェーブレット変換, 尖度, 車両-橋梁相互作用

1. はじめに

膨大な数の橋梁を効率良く維持管理するためには、一律に橋梁の点検を実施するのではなく、大まかに橋梁の状態を把握した上で、損傷の可能性のある橋梁に対してのみ順次詳細点検を実施して行くといった方策が必要である。このようなスクリーニング技術を実現するためには、簡易かつ迅速に橋梁の状態を把握できる技術が必要である。Yang ら¹⁾は橋梁振動計測におけるセンサー設置の労力を減らすため、車両の加速度応答から橋梁の固有振動数を抽出する手法を提案している。このような車両応答に基づく手法は、省力性と迅速性に優れ、スクリーニング技術への利用が期待できる。しかし、橋梁の固有振動数に着目した場合、固有振動数は局所的な損傷に対する感度が低いため^{2),3)}、橋梁の健全性評価においては高い推定精度が必要となる。さらに、車両応答のスペクトルは、移動による影響を受ける上、車両の固有振動数や路面凹凸に応じた周波数成分なども卓越振動数として生じるため、橋梁の固有振動数を正確に見出すのが難しい。Yang & Chang は EMD 法を利用して、精度良く高次固有振動数を

推定する手法^{4),5)}の開発を進めているが、損傷による変化と比較して十分な推定精度が保証されるような手法の開発には至っていない。利波ら⁶⁾、杉浦ら⁷⁾も模型を用いて同様の検討を行っているが、橋梁の異常検知には至っていない。

一方、以上のような周波数分析によるアプローチに対し、近年時間周波数分析を用いた検討が行われている。Xiang ら⁸⁾は、車両応答に対し時間周波数領域でのパワースペクトルを算出し、それに基づき損傷検知のための新しい指標を提案している。ここでは、車両に加振機を加えることで、コンクリート橋梁のひび割れ検知が可能であることが示されている。しかし、分解能の制約が厳しいことに加え、路面凹凸を考慮していないといった課題も残している。また Nguyen ら⁹⁾は、ひび割れを複数持つ橋梁に対して、走行車両の振動応答にウェーブレット変換を適用し、ひび割れ深さの推定が可能であることを示した。しかし、Zhu ら¹⁰⁾が示したような損傷位置推定の可能性については検討を行っておらず、また路面凹凸も考慮していない。

路面凹凸が車両応答に及ぼす影響については、川谷ら¹¹⁾の研究が詳しい。基本的には、路面凹凸によ

り車両が影響を受ける領域は低周波である場合が多く、高周波に着目すれば路面凹凸の影響を除去できる可能性がある。ウェーブレット係数を用いた既往の研究^{9), 10)}では、そのほとんどが高スケールに着目している。しかし、高スケールは低周波帯成分を抽出することに相当するため、路面凹凸の影響を強く受けるという課題が残されている。

一方、著者らは¹²⁾高周波帯に対応する低スケールのウェーブレット係数に着目し、数値シミュレーションに基づいた検討を行っている。その結果、車両応答の低スケールのウェーブレット係数は橋梁損傷に対して敏感であり、路面凹凸の影響を受けにくいことが明らかとなった。しかし、ここでの検討は簡易な数学モデルを用いた数値シミュレーションによるものであるため、実測値によってその有効性を確認する必要がある。実測値では、高周波帯に多くの誤差（ノイズ）が含まれる。そのため、高周波帯で橋梁振動を評価するにあたっては、ノイズに対する何らかの処理が必要であると考えられる。

時系列データのノイズ処理に対しては、現在まで様々な手法が提案されている¹²⁾⁻¹⁵⁾。そのうち、統計的手法に着目した研究では、時系列データの尖度（kurtosis）に着目し、機械設備の異常診断を行っている¹⁵⁾。尖度は信号の非ガウス性、平均周りへの集中の度合いを表す指標であるため、異常診断においては機械設備の定常状態からの「ずれ」を異常と判断することになる。橋梁構造物を通過する車両の応答においては、損傷部位付近での応答は、健全部での応答と比較して統計的に逸脱している可能性がある。そのため、ノイズの多い高周波帯の応答であっても、尖度を用いたノイズ処理により損傷を見出せる可能性がある。

よって、本研究では模型車両と模型橋梁を用いた車両－橋梁連成振動実験を実施し、実験で得られた車両応答データの高周波帯を統計分析することで、模型桁の局所的な「異常」の検出を試みる。また、模型桁橋面には、実際の路面凹凸を模擬した凹凸を設けている。ここでは、高周波帯の抽出法としてウェーブレット変換に着目し、高周波帯の尖度から桁内での差異を見出すことを行う。

2. 損傷検知の考え方

本研究における損傷検知の考え方は、桁内の部分的な変化により生じた走行車両加速度応答の変化を、高周波帯の統計的特徴から検知することである。

まず、橋梁上を通過する車両のバネ上加速度およびバネ下加速度から、連続ウェーブレット変換により高周波帯の成分を抽出する。具体的には、低スケールでのパワーを求めることになる。次に、時間軸で求められたパワーを空間軸に変換し、それを橋梁上で等間隔に分割する。最後に、それぞれの区間で

の尖度を求め、区間ごとの尖度の差異から異常を判断する。つまり、一回の走行で得られる応答から、各区間での尖度を比較し、他を大きく逸脱した尖度を有する区間を「異常」すなわち損傷個所を含む部位と判断する。

3. 車両応答の分析手法

3.1 ウェーブレット変換

本研究では、高周波帯の抽出法として、連続ウェーブレット変換を利用する。

今、車体加速度を $\ddot{z}(t)$ とすれば、 $\ddot{z}(t)$ の連続ウェーブレット変換（CWT）は、定義により以下のように与えられる¹³⁾。

$$Wz(a, b) = \frac{1}{\sqrt{b}} \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{z}(t) \psi^* \left(\frac{t-a}{b} \right) dt \quad (1)$$

ここで a はシフト、 b はスケールと呼ばれる。 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれる時間関数である。

$(\)^*$ は複素共役を表す。マザーウェーブレットには次式(2)で表される複素マザーウェーブレットを用いる。

$$\psi(t) = \frac{d^4}{dt^4} \{C_4 \exp(-t^2 - it)\} \quad (2)$$

ここで、 C_4 は $\psi(t)\psi^*(t) = 1$ となるように定める。複素ウェーブレットを用いたのは、時間周波数領域で得られるパワースペクトルが滑らかになり、橋梁損傷や路面の異常とは無関係にピークが生じるのを防ぐためである。これにより、損傷に由来するピークの判別が容易になると期待できる。また、本研究ではスケールを周波数に対応させ、さらに車両速度を用いて時間およびシフトを橋梁位置と対応させる。

マザーウェーブレット $\psi(t)$ の中心周波数を F_c 、 $\ddot{z}(t)$ の観測サンプリングレートを F_s とするとスケール b を疑似周波数 f に置き換えることが出来る¹²⁾。

$$b = \frac{F_c}{f F_s} \quad (3)$$

式(1)に式(3)を代入し、車両の走行速度を v 、時間を t とし、走行位置を $\tilde{x} = vt$ とすれば、車両応答のウェーブレット係数が次式(4)より求まる。

$$Z(x, f) = C_z \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{z} \left(\frac{\tilde{x}}{v} \right) \psi^* \left(\frac{f F_s (\tilde{x} - x)}{F_c v} \right) d\tilde{x} \quad (4)$$

ただし、ここで C_z は次式(5)のように定めた。

$$C_z = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{f F_s}{F_c}} \quad (5)$$

すなわち、ある帯域に着目し、損傷時の $Z(x, f)$ に生じている変化を見出す。ただし、 $Z(x, f)$ は複素数となるので、 $Z(x, f)$ そのものではなく、式(6)で表され

るパワーを用いる。

$$P(x, f) = Z(x, f)Z^*(x, f) \quad (6)$$

以降では特に断りのない限り、CWT 結果とは $P(x, f)$ を指すものとする。

車両応答に対する路面凹凸の影響は高周波数帯で比較的小さくなることから、出来るだけ高周波数帯の $P(x, f)$ を用いることがのぞましい¹²⁾。そこで、本論文では着目するスケールを 1 とした。今回は計測時のサンプリングレートが 100Hz であるため、スケール 1 に対応する疑似周波数 50Hz 以下の高周波成分を抽出したことに相当する。

3.2 尖度の利用

次に、時間軸上の車両応答を空間軸に変換し、空間上に等分割した区間毎に統計量を求める。本論文では、統計量として尖度に着目する。

今、空間領域で一定間隔に計測値 $s(x)$ が得られているとする。ここで、 x は車両の位置を表す。また、車両が橋梁上を通過する時に得られる全データの個数を N とする。このとき、各データに対応する空間上の座標は、 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ と表すことができる。

次に、橋梁区間を m 等分割し、その第 n 区間目に含まれるデータの平均値を μ_n 、分散を σ_n とする。このとき、第 n 区分目に含まれるデータの尖度は式(7)で得られる¹⁶⁾。

$$\kappa(n) = \sum_{i=(n-1)\frac{N}{m}+1}^{n\frac{N}{m}} \frac{\{s(x_i) - \mu_n\}^4}{\frac{N}{m} \sigma_n^4} - 3 \quad (7)$$

尖度は 4 次統計量であるが、分散で正規化されているので無次元量である。

尖度は確率分布の非ガウス性を測る時にしばしば用いられる指標で、信号の異常検知においても感度の高い指標として利用が進められている¹⁷⁾。ガウス分布の尖度は 0 で、ガウス分布より鋭く裾の広い確率分布を持つ時、尖度は 0 より大きくなり、なだらかな分布を持つ時は 0 より小さくなる特徴がある。例えば、ラプラス分布の尖度は 3、一様分布では -1.2 をとる。また、定義より必ず -3 以上となる。

車両振動の高周波帯に対応するウェーブレット係数が橋梁損傷に反応した場合¹²⁾、そのサンプル分布の裾で変化が生じると考えられる。後述するように、今回の模型実験では路面凹凸に段差が設けられており、これが強いピークを生じるため、視覚的には損傷前後の有意な差を高周波成分に見出すことが難しい。そのため、高周波成分の変化を客観的に捉える指標が必要となる。尖度は式(7)の定義から分かるように特に信号のサンプル分布の裾で変化が生じる時に敏感に反応する性質がある。したがって、尖度の利用により段差や路面凹凸の高周波成分に左右されることなく橋梁損傷を検知できる可能性がある。

4. 模型車両走行実験

4.1 実験諸元

本論文では、模型橋梁上を走行する模型車両の応答を計測する。橋梁損傷時では、模型橋梁の部材断面を一部切断した上で、模型車両を走行させている。

実験で用いた模型橋梁の各断面寸法および模型桁上に導入した路面凹凸を図—1 に示す。今回は他の研究での実験との兼ね合いから a, b, c, e, f, g 点上に段差を設けた。左右のレールに導入した路面凹凸は同じ大きさである。模型橋梁の諸元を表—1 に示す。車両は図—2 に示すようなレール上を走行する。左右のレール上には実測値に基づいた路面凹凸を導入した。凹凸はポリウレタン樹脂を積層させることで再現した。また、図—2 に示すように橋梁の出入り口にはひずみセンサーを用いた車両通過確認スイッチを設けた。これにより車両加速度の時刻歴のデータを走行位置に応じた振動データとすることが出来る。

橋梁損傷は図—1(a)に示す cd 間の桁下端を長さ 700mm、幅 5mm を切り取ることで表現した。これは実橋の損傷としては、RC 橋梁の中央部に生じた剥落を伴う全面ひび割れ等に相当しており、重篤なレベルの損傷である。しかし、模型橋梁を自由振動させ固有振動数を計測したところ、表—2 に示すように、損傷前の 1 次固有振動数 2.66Hz に対し損傷後は 2.61Hz とほとんど変化は見られなかった。

車両については既往の研究⁷⁾を参考に異なる車両 V1, V2, V3 を速度 S2, S2a, S3 で走行させる計 9 ケースを実施した。模型車両のパラメータを表—3 に、走行速度を表—4 に示す。また、模型車両の写真を図—3 に示す。車両応答としては前軸バネ上、前軸バネ下、後軸バネ上の 3 点の加速度波形を計測した。S3 は速度 1.63m/s でこれは支間長 40m の橋梁において速度 40km/h に相当する。

なお、模型橋梁と模型車両、レール上の路面凹凸の寸法は実橋計測で得られた周波数特性に基づいて設計してある。

模型車両走行実験の様子を図—4 に示す。今回は各ケースにつき 5 回の走行実験を行い、車両バネ上とバネ下の加速度を測定した。なお、計測に当たってはサンプリングレートを 100Hz とした。

4.2 走行実験の結果分析

まず、実験結果の走行回ごとの再現性について検討する。一例としてケース V1S2 (車両 V1, 速度 S2 = 1.63m/s) における健全時と損傷時の加速度応答を図—5 に示す。計測は 5 回行っているが、ここでは識別しやすいように 3 回分の結果のみを示す。

図—5(a), (c)より、バネ上加速度に着目した場合、健全時および損傷時において、それぞれ走行回ごと

(a) 模型橋梁の概要と路面凹凸

(b) 模型橋梁の桁端部寸法

(c) 桁断面とレールの寸法

(d) 支点

図一1 模型橋梁各部の寸法

表一 模型橋梁のパラメータ

スパン長	[mm]	5400
ヤング率	[N/mm ²]	2.06×10^5
単位質量	[kg/mm ³]	7.8×10^{-3}
断面積	[mm ²]	6656
断面 2 次モーメント	[mm ⁴]	556700

表二 模型橋梁の自由振動時の固有振動数

		健全時	損傷後
1 次の固有振動数	[Hz]	2.66	2.61
2 次の固有振動数	[Hz]	10.6	10.5
3 次の固有振動数	[Hz]	23.8	23.3

図二 路面凹凸と車両走行レール

表三 模型車両のパラメータ

		V1	V2	V3
質量	[kg]	21.6	21.6	25.8
	(前軸)	5.7	5.7	5.7
	(後軸)	15.9	15.9	20.1
減衰	[kg/s]	0.057	0.056	0.061
	(前軸)	0.057	0.056	0.061
	(後軸)	0.059	0.052	0.064
バネ剛性	[N/m]	2.00	3.54	3.42
	(前軸)	2.00	3.54	3.42
	(後軸)	3.72	6.60	9.54
固有振動数	[Hz]	2.93	3.71	2.93

表四 模型車両の走行速度

		S2	S2a	S3
走行速度	[m/s]	0.93	1.16	1.63

図三 模型車両

図四 模型車両走行実験の状況

図—5 模型車両加速度応答 (V1S2) の計測ケース毎の結果

図—6 模型車両加速度応答 (V1S2) の損傷前後での比較

の再現性が高いことが分かる。これは他のケースでも同様であることを確認した。

一方、図—5(b), (d)より、バネ下加速度に着目した場合、健全時および損傷時のいずれにおいても、走行回ごとに異なる結果が得られており、走行回ごとの再現性が低いことがわかる。バネ下加速度では、路面状態の影響を直接的に受けるため、走行回ごとのランダムな境界条件の変化などに影響を受けやすく、走行回ごとの再現性が低いと考えられる。

次に、損傷前後での加速度応答の比較を行う。その一例を図—6に示す。バネ上加速度に着目すると、損傷前後での差異を見出すことが難しいことがわかる。一方、バネ下加速度に着目すると、損傷前後での結果が異なっているものの、走行回ごとの再現性

表—5 車両加速度の RMS, 期待値, 分散の例 (V1S2)

	健全時		損傷時	
	RMS	期待値 /分散	RMS	期待値 /分散
バネ上 加速度	6.23	-0.0497 0.861	5.42	-0.0178 0.518
バネ下 加速度	15.5	-0.690 33.3	16.0	-0.354 38.9

が低いために、損傷による影響を判断することができない。同様のケースについて加速度波形の RMS と期待値および分散を表—5 に、サンプル分布を図—7 に示すが、損傷前後で有意な変化を見出すには至らなかった。これは他のケースについても同様で

(a) 前輪バネ上

(b) 前輪バネ下

図—7 模型車両加速度応答 (V1S2) のサンプル分布

(a) 前輪バネ上

(b) 前輪バネ下

図—8 模型車両の加速度応答のパワースペクトル

(a) 前輪バネ上

(b) 前輪バネ下

図—9 模型車両の加速度応答の CWT 結果

ある。以上より、バネ上加速度およびバネ下加速度の時系列データそのものに着目した場合、橋梁損傷による影響を見出すことは困難であるといえる。

次に、周波数領域における損傷前後の差異について検討する。図—6 に示したデータに対し周波数分析を行い、パワースペクトルを求めたものを図—8 に示す。図—8(a)より、時間領域での分析同様、バネ上加速度については、損傷前後での変化を確認することが難しいことがわかる。一方で、図—8(b)より、バネ下加速度については損傷前後で異なる結果が得られている。しかし、バネ下は走行回ごとの再現性が低く、走行回によるばらつきが大きいために単にピークの位置や大きさを比較するだけでは、損傷による影響を見出すことが困難である。

次に、加速度応答の高周波帯に着目する。同じデータに対し、高周波帯に着目した CWT 結果を図—9

に示す。ここでは、マザーウェーブレットのスケール b を 1 とし、そのパワーを空間軸に変換して表示している。ただし、走行回ごとの再現性については、ここでも、バネ上の再現性が高く、バネ下の再現性は低い結果が得られている。図より、バネ上加速度およびバネ下加速度のいずれのパワーにおいても、段差通過時にピークを生じることが確認できる。これは、段差通過時には衝撃的な応答が発生し、高周波成分のピークとなって表れやすいためと考えられる。しかし、バネ下応答の CWT 結果では走行ごとにこれらのピークの大きさがばらつくため、単純に CWT を比較するだけでは損傷の有無を判断できない。一方、走行回ごとの再現性の高いバネ上応答においては、損傷箇所におけるピークの大きさが損傷前後で異なることが確認できる。しかし、これらのピークの高さは走行回ごとに異なるため、路面凹

凸や段差、ノイズなどの影響が含まれていると考えられる。そのため、この結果を用いた場合でも橋梁損傷を判断することは難しい。

このようにピークの大きさや位置で評価する単純な分析手法では様々な因子による影響が処理できず、有意な変化を見出すことが困難である。したがって、これらの結果の高次統計量を用いて、客観的に特性変化を評価する必要がある。

そこで、加速度応答そのものに対して統計的手法を適用し、損傷前後での差異を検討する。図—10 および図—11 は、それぞれ模型車両のバネ上、バネ下加速度の尖度を示す。ただし、本研究では全ての結果について分布傾向を比較検討するため、走行ケースごとに最大値が1.0となるように正規化を行った。また、計測は各ケース5回行っているが、ここでは5回分の尖度の平均値を示している。最下段のALLはこれら全ての結果（9 ケースにつき各5回ずつ、合計45回分）の平均を示す。

まず、再現性の高いバネ上加速度応答に着目する。図—10 より、いずれの走行ケースでも、尖度が0～L/8 区間（進入区間）で大きくなっていることがわかる。これは車両が橋梁に進入する時の衝撃による影響と考えられる。健全時の分布は、進入区間で尖度が大きくなっているものの、区間ごとの差異を判断することが難しい。一方、損傷時の分布では、損傷区間である3L/8～4L/8 区間で値が若干大きくなる傾向を示すものの、進入区間での値が最も大きくなっているため、損傷検知の精度が必ずしも高いとはいえない。

次に、再現性が低いバネ下加速度応答に着目する。図—11 より、いずれの場合でも7L/8～L 区間での値が大きくなっていることがわかる。これは、車両が橋梁から退出するときの衝撃による影響と考えられる。バネ下加速度の尖度の分布からは、損傷位置において明確な差異を確認することができない。

以上より、バネ上加速度応答の尖度では、ケースによっては損傷個所で若干の差異を確認できるものの、端部での影響を受けやすく、高い検出精度は得られなかった。一方、バネ下応答加速度の尖度では、退出時の衝撃による影響を受けやすいほか、損傷位置での明確な差異を見出すことができなかった。

最後に、高周波帯に着目して尖度を比較する。図—12 および図—13 には、それぞれバネ上およびバネ下の走行回ごとのスケール1のCWT結果を求め、その尖度を区間ごとに求めた結果を示している。ただし、各ケースで得られた尖度は5回分の平均を示している。また最下段のALLは合計45回分の平均である。

まず、バネ上のCWT結果の尖度（図—12）は加速度の尖度（図—10）と比べると、進入区間（0～L/8 区間）での値がより強調され、損傷部での値の変化が見出し難くなっていることがわかる。これは、

CWTにより衝撃力に含まれる高周波成分が強調されていることに加え、バネ上には高周波帯の成分が含まれにくく、損傷による変化を捉えることができなかったためと考えられる。

次に、バネ下のCWT結果の尖度（図—13）に着目する。健全時の尖度の分布では、区間ごとの差異が多少確認できるものの、区間ごとの大きな差を見出すことができない。一方、損傷時の尖度の分布からは、損傷位置を含む区間において、ケースV3S3を除いて明らかに尖度が高い値を示す傾向が確認できる。健全時の分布と比較しても、有意な差として確認できるため、この差異は損傷によるものと判断することができる。

以上のように、バネ下加速度の高周波帯の尖度に着目すれば、橋梁損傷検知の可能性があると考えられる。ただし、走行ケースによって検出の精度は変化する。車両バネ下には強制変位の一部として橋梁振動が入力されることから、損傷情報を見出しやすい橋梁振動の高周波成分が励起され、車両に伝わることで損傷検知に必要な条件であると考えられる。即ち、高周波帯に着目して変化を確認する場合、橋梁振動そのものに高周波成分が励起されている必要がある。ケースによっては、橋梁の高周波帯が励起されていないなど、車両振動の高周波帯に変化が生じにくい種々の理由が考えられる。実際、橋梁側の振動データを周波数分析したところ、精度の低かったV3S3は3次固有振動数周辺の高周波成分が他の場合と比べて小さいことを確認している。一方、精度の良いケースでは橋梁振動において高周波成分が卓越していた。励起される振動によって本手法の損傷検知精度は変化するが、各周波数帯の振動がどのレベルで励起されるかは車両、橋梁、路面の周波数特性と走行速度により決まる複雑な相互作用システムとなっているため、最高精度の条件設定を現場計測において見出すことは困難である。したがって、条件を変えた上で平均化することが最も精度を高める方法となる。すなわち、図—10 最下段ALLに示すように、各種特性を有する車両を複数回走行させ、その平均により変化を判断することが望ましいと考えられる。これは、「異なる車両を用いることがより望ましい」となるため、実務上でも利便性が高いと期待できる。

今後は、損傷個所で尖度が大きくなるメカニズムと変動因子の解明をさらに詳細に行うとともに、検出精度が高まる条件について明確にしていきたい。

5. まとめ

本研究では、橋梁上を通過する車両の高周波帯の応答に着目し、その統計的特徴から損傷位置の評価を行った。ここでは、高周波帯の抽出方法としてウェーブレット変換を利用し、また統計的特徴として

(a) 橋梁が健全な場合 (b) 橋梁に損傷がある場合
図一10 車両バネ上加速度の各走行位置での尖度

(a) 橋梁が健全な場合 (b) 橋梁に損傷がある場合
図一11 車両バネ下加速度の各走行位置での尖度

(a) 橋梁が健全な場合 (b) 橋梁に損傷がある場合
図一12 車両バネ上加速度の CWT 結果の尖度

(a) 橋梁が健全な場合 (b) 橋梁に損傷がある場合
図一13 車両バネ下加速度の CWT 結果の尖度

尖度を用いた。

模型橋梁と模型車両を用いた実験結果より、車両応答の波形、パワースペクトル、また高周波帯のパワーそのものに着目した場合には、損傷による明確な差異を見出すことができなかった。また、応答波形の統計的特徴に着目した場合でも、その差異は明確ではなかった。これに比べ、高周波帯のパワーの統計的特徴に着目した場合には、損傷位置の明確な差異を確認することができた。また、高い検出精度を目指すには、各種特性を有する車両を複数回走行させ、その平均により変化を判断することが望ましいと考えられる。これは、異なる車両の利用が前提となる実務上でも利便性が高いと期待できる。

今回は、高周波帯の効果的なノイズ処理法として、統計的特徴量に着目し、その可能性について基本的な検討を行った。そのため、損傷の種類も一つに限定した。今後、より多くの損傷パターンに適用し有効性を確認するとともに、高い精度を得るための条件やメカニズムを解明する予定である。特に、今回は中央付近の橋梁損傷を対象としたが、既往の研究より振動による感度が低いとされる橋梁端部の損傷についても検討する必要がある¹²⁾。また、実際の損傷に対しての感度なども実車両を通じて検討し、車軸の前後での違いなど適用条件による感度分析も行う予定である。また、実測データに基づく意思決定手法を構築して、本研究での提案手法をどのように実際のマネジメントに取り入れて行くかについても検討が必要である。

参考文献

- 1) Y.-B. Yang, C.W. Lin, J.D. Yau: Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.272, 471-493, 2004.
- 2) Yong Xia, Hong Hao, James M. W. Brownjohn and Pin-Qi Xia: Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol.31, pp.1053-1066, 2003.
- 3) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性, *土木学会論文集*第 380 号 / I -7, 355-364, 1987.
- 4) Y.B. Yang, K.C. Chang: Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, *Journal of Sound and Vibration*, 322, pp.718-739, 2009.
- 5) Y.B. Yang, K.C. Chang: Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: Parametric study, *Engineering Structures*, 31, pp.2448-2459, 2009.
- 6) T.Toshinami, M.Kawatani and C.W. Kim: Feasibility investigation for identifying bridges fundamental frequencies from vehicle vibrations, *Bridge maintenance, safety, management and life-cycle optimization*, IABMAS 2010, pp.317-322, 2010.
- 7) 杉浦邦征, 北垣啓, 山口隆司, 北田俊行, 橋本国太郎: 走行車両応答による橋梁の固有振動数の推定に関する模型実験, *土木学会年次学術講演概要集*, 1-291, 2009
- 8) Zhihai Xiang, Xiaowei Dai, Yao Zhang and Quihai Lu: The Tap-Scan Damage Detection Method for Beam Structures, *Advances Interaction & Multiscale Mechanics*, pp.541-553, 2010.
- 9) Khoa Viet Nguyen, Hai Thanh Tran : Multi-cracks detection of a beam-like structure based on the on-vehicle vibration signal and wavelet analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 329, pp.4455-4465, 2010.
- 10) X.Q. Zhu, S.S. Law: Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history, *International Journal of Solids and Structures*, 43, pp.2299-2317, 2006.
- 11) 川谷充郎, 小林義和, 高森和恵: 曲げとねじりを考慮した単純桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析, *土木学会論文集* No.570 / I-40, pp.231-238, 1997.
- 12) 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 車両応答の時間周波数解析に基づく橋梁の損傷検知法, *Vol.57A*, pp.637-645, 2011.
- 13) Wavelet Toolbox 概説書, The MathWorks, Inc., 2009.
- 14) 金哲佑, 川谷充郎: 単一車両走行による橋梁振動データを用いた橋梁の健全度評価, *鋼構造論文集*, 第 15 巻第 58 号, pp37-46, 2008.
- 15) 余語厚文, 北村正, 稲垣直樹: ウェーブレット・パケット変換による音声信号の雑音除去, *名古屋工業大学紀要* 52, 161-164, 2001.
- 16) 佐藤充朗, 岸憲史, 樽松明: ウェーブレット変換による音声信号からの雑音除去, *電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会講演論文集*, 95, 1995.
- 17) 村田昇: 入門独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2004.

(2011 年 3 月 8 日 受付)