

影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用

Analysis of axle position information from strain history data with long influence lines

坂柳 皓文*, 佐々木 栄一**, チャンペン・ティーラポン***, 鈴木 啓悟****,
石川 裕治*****, 山田 均*****, 勝地 弘**
Hirofumi Sakayanagi, Eiichi Sasaki, Chanpheng Theeraphong, Keigo Suzuki,
Yuji Ishikawa, Hitoshi Yamada, Hiroshi Katsuchi

*横浜国立大学大学院, 環境情報学府環境システム学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

**博 (工), 横浜国立大学大学院准教授, 工学研究院 (同上)

***博 (工), 横浜国立大学大学院准教授, 環境情報研究院 (同上)

****工修, 東京工業大学大学院, 土木・環境工学専攻 (〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*****工修, (株) NTT データ, 第一公共システム事業本部 (〒135-6033 東京都江東区豊洲 3-3-3)

*****工博, 横浜国立大学大学院教授, 環境情報研究院 (同上)

In this study, in order to analyze axle weights accurately, a method using time-frequency analysis was applied to detect axle position information from strain history data with relatively long influence lines. The axle position information includes the number of axles, spacing of axles, and axle position at a moment. This method can improve accuracy of analysis results of axle weights by Weigh-In-Motion and reduce the number of strain sensors in a monitoring system. Furthermore, it can be adopted to analyze vehicle types or velocity. In this study, the method using time-frequency analysis was demonstrated for the case of orthotropic steel deck system.

Key Words: monitoring, strain, influence line, axle

キーワード: モニタリング, ひずみ, 影響線, 車軸

1. はじめに

近年, 橋梁をはじめとするインフラストラクチャーの維持管理が重要視されている. 橋梁などの道路構造物などに対し, 維持管理を効果的に行うためには, 対象構造物の環境, 特に構造物上を通行している車両荷重を継続的に把握することが重要となる. 現在までに種々の車両重量分析システムが開発されており, 代表的な車両重量分析手法として Weigh-In-Motion¹⁾⁻¹⁰⁾が挙げられる. これは橋梁上を車両が通過した際に発生する橋梁部材の応答から, 荷重の大きさを逆解析し, 車両荷重を算出する手法で, 簡便かつ安価に利用でき, 道路上に機材を設置する必要がないという利点がある.

鋼橋を対象とした Weigh-In-Motion に着目すると, その車両重量分析では, 以下に示す 2 つの種類のひずみ情報を単独あるいは組み合わせて利用する¹⁾⁻¹⁰⁾.

①: 影響線長の長いひずみ履歴データ (桁橋の下フランジや鋼床版構造の横リブなど)

②: 影響線長の短いひずみ履歴データ (鉛直スティフナーや鋼床版構造の縦リブなど)

②の方のデータでは, 車軸通過に伴うひずみ波形のピークが明瞭に現れるため, 同一車線上の複数個所で計測されたデータから車両速度の検知にも用いられる^{1), 2)}が, 橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けやすいため, ②のデータだけでは Weigh-In-Motion の精度の確保に限界がある. 逆に, ①のデータは橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくい, 車軸の通過によるひずみ波形のピークが明瞭に見られず, Weigh-In-Motion に必要な車軸通過時刻について, 別のデータ情報から取得する必要がある. 例えば, ②のデータから速度を検出し, 車両の橋軸方向位置を算出する方法が取られるが, 橋梁通過中の走行車両の速度変動に対応しづらいなど, 車両通過時刻の精度は十分とはいえない. また, この場合, 少なくとも, 各車線に 3 チャンネル (重量分析用 1 チャンネル, 速度検知用 2 チャンネル) のひずみデータの取得が必要となる. そこで新たな解析方法として, 影

響線長の長いデータ（種類①のデータ）から直接的に車軸通過時刻の情報を得るプロセスを導入できれば、橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくく、速度検出による車両軸位置の推定を行う必要もなくなるため、より高精度で、最小各車線1チャンネルの少数システムとなり、極めて有効な手段となる。

本研究では、①のデータから、時間-周波数解析を行い、車軸情報を検出することによって車軸重量算出を高精度化する手法を提案する。本研究では時間-周波数解析の1つであるウェーブレット解析を適用する。提案する手法は影響線長の長い部材を有する桁構造などのほかの橋梁にも適用できる可能性もあるが、ここでは、対象構造を鋼床版構造とした。これは近年、鋼床版構造において疲労損傷が多く報告され問題となっており、さらに鋼床版構造は局所的な疲労損傷が問題となるために車両重量ではなく、特に車軸重量の高精度な検出が求められているためである。鋼床版構造においては横リブのひずみ波形が影響線長の長いタイプ①のデータ、縦リブのひずみ波形が影響線長の短いタイプ②のデータに当たり、横リブの影響線長はおおよそ15mである。本研究では影響線長の長い横リブひずみ波形からの車軸情報検知し、それを利用して車軸重量を分析する手法を示す。さらに、本研究では、車軸情報分析の応用として、タンクローリーなど我が国で走行している殆どの車種について、車軸間隔等のデータを格納した車両辞書データベース¹¹⁾を利用して自動的に車種を判別するとともに、軸間距離のデータから速度を分析する手法についても検討する。

2. 車軸位置情報の分析手法

2.1 時間-周波数解析

一般に、車両通過に伴って横リブ下フランジで測定されるひずみ波形には複数の周波数成分が含まれている。それを解析するためには周波数解析が適しているが、車軸位置を求めるためには、当然ながら時刻歴情報が必要となる。そこで、時刻歴情報を失わずにひずみ波形を解析するために時間-周波数解析を行うこととした。

本研究では時間-周波数解析として、連続ウェーブレット解析を用いた。ウェーブレット解析は1980年台から発展した手法で、それまでの時間-周波数解析手法であった短時間フーリエ解析よりも時間分解能と周波数分解能を良く両立させることが可能となる。特に本研究ではひずみ波形の車軸通過に伴う微係数の不連続を検出するため、窓関数を畳み込む必要のある短時間フーリエ解析よりもウェーブレット解析のほうが適している。連続ウェーブレット変換は(1)式で定義される。

$$W_{\psi} f(a, b) = \int f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

W_{ψ} はウェーブレット係数であり、 $f(x)$ は計測された信号、 $\psi_{a,b}$ はマザーウェーブレット、 a はスケール、 b はトランスレーションである。また、スケール a は周波数の逆関数である。再構成は(2)式で定義される。

$$f(t) = \iint W_{\psi} f(a, b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (2)$$

次に、マザーウェーブレット $\psi_{a,b}$ はスケール a およびトランスレーション b の値と基本ウェーブレット ψ によって決まり、(3)式で表せる。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

ここで $|a|^{-1/2}$ は異なるスケール間のエネルギーを正規化するために付与される係数である。式よりマザーウェーブレットの形状、位置は変数 a 、 b によって決まることが分かる。スケール a はマザーウェーブレットの幅を決め、トランスレーション b はマザーウェーブレットの信号上の位置を決める。スケール a の値が小さいほどより高周波領域を照査し、値が大きいほど低周波領域を照査することになる。

最後に基本ウェーブレットの条件として(4)式を満たすことが必要となる。

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

2.2 実測波形への適用

連続ウェーブレット解析においては変換に用いる基本ウェーブレットを適切に選択することが重要となる。本研究では、図-1に示す逆双直交ウェーブレットを用いることとした。図-1(a)は分解用、図-1(b)は再構成用のウェーブレットである。このウェーブレットはコンパクトサポートをもち、厳密な再構成を可能とする特徴を持っている。また線形位相であり、周波数によって位相がゆがむということもないことから、車軸通過による僅かなひずみ波形の変化を捉えるのに適していると考えられる¹²⁾。

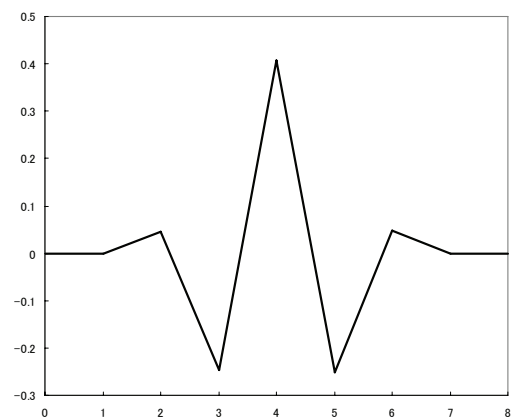


図-1(a) 分解用 逆双直交ウェーブレット (rbio2.4)

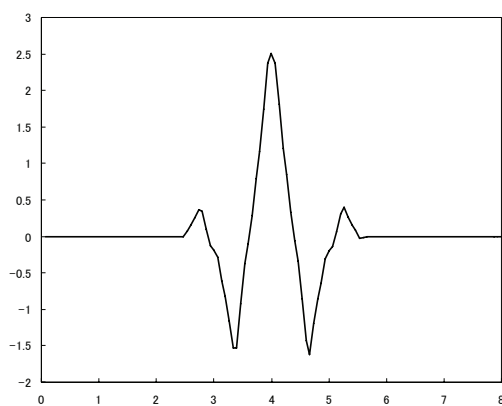


図-1(b) 再構成用 逆双直交ウェーブレット (rbio2.4)

次に、実際に実測波形を用いて適用性を検討する。対象としたのは SFRC 合成鋼床版を適用した橋梁で測定された、横リブ下フランジ下面のひずみ波形である。なお、サンプリング周波数は250Hzである。

図-2 に対象とする横リブのひずみ波形を示す。このひずみ波形は、軸数が3つであることが既知という状態で計測した車両であり、ひずみ波形から得られる軸情報と照合する。同じ車両の通過に伴って計測された縦リブ下面のひずみ波形も図-3 に示す。図-2 の横リブでの波形では3軸車であることは確認できないが、図-3 では、車軸通過に伴う3つのピークが明瞭に確認でき、この車両の軸数が3つであることを示している。

図-2 に示す横リブのひずみ波形に対して、前述のように、連続ウェーブレット変換を行うと、図-4 のような係数群(曲面)が得られる。図-4 において、特定のスケールを選び、横軸を時間として、時刻歴のグラフにしたものが図-5 である。切り出すスケールは15 とした。図-5 からは図-3 と同様の時刻間隔で3つの頂点が確認できる。図-2 に示す横リブのひずみ波形は、3つの車軸による影響線形状の波形が合成されたものと考えられ、それぞれの波形のピーク位置がセンサ位置での車軸通過時刻としてひずみ波形に情報として含まれている。本研究で適用している方法は、このピーク位置を時間-周波数解析(連続ウェーブレット変換)により特定するものである。ここでの検討でわかるように、影響線長の長いひずみ波形からもひずみセンサ位置での車軸時刻を特定することが可能と言える。

ただ、この方法では、係数群から取り出すスケールを適切に選定する必要がある。既往のコンクリート橋の検討¹²⁾ではサンプリング周波数512Hzでスケール16を選定している。本研究においても、鋼床版構造を対象として、サンプリング周波数が250Hzで15程度というスケールを適用している。例えば、図-6 に示すように、図-4 の係数群から24と比較的大きなスケールの部位を取り出したグラフを示す。大きなスケールを選定した場合、前輪の情報は正しく検出できるが、車軸間隔の短い後輪

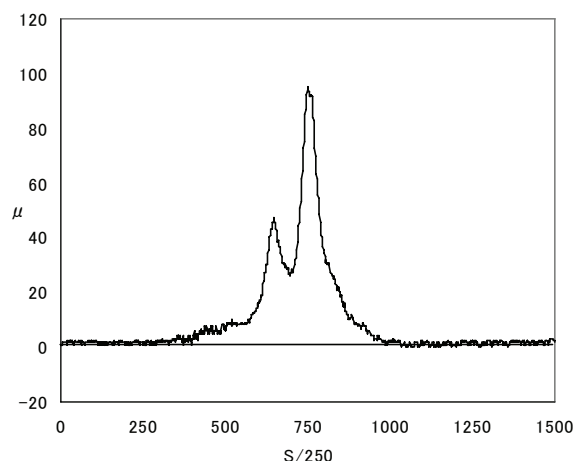


図-2 計測した横リブひずみ波形

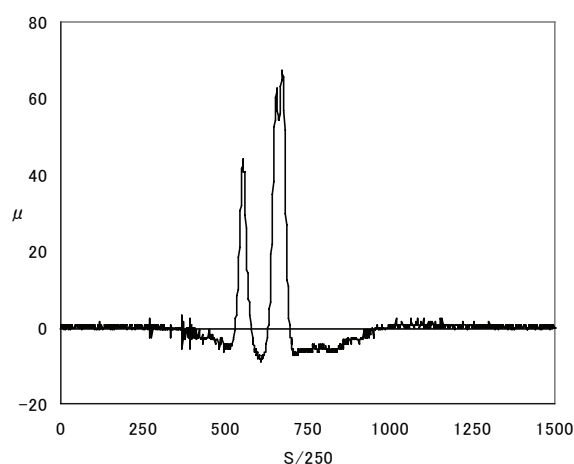


図-3 計測した縦リブひずみ

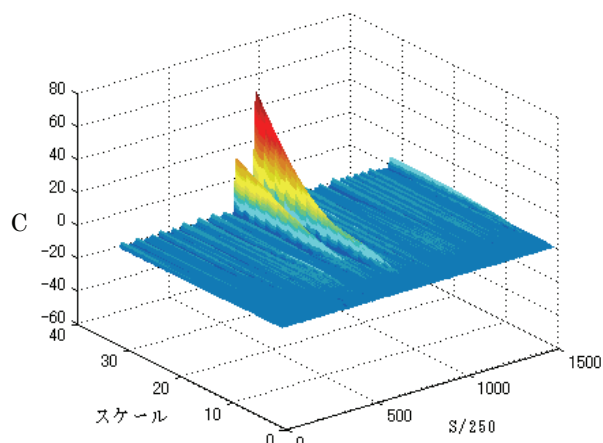


図-4 ウェーブレット係数

2軸の分解能が鈍るといったことが生じる。以下、本研究では、スケールとして、15程度の値を利用する。

図-7、図-8 には、それぞれ4軸車両、5軸車両の通過による横リブの実測波形を解析した結果を示す。この波形は解析に要する時間を短縮するため、ダウンサンプリングを行い、サンプリング周波数を125Hzとしている。そのため、ウェーブレット解析に用いるスケールも6

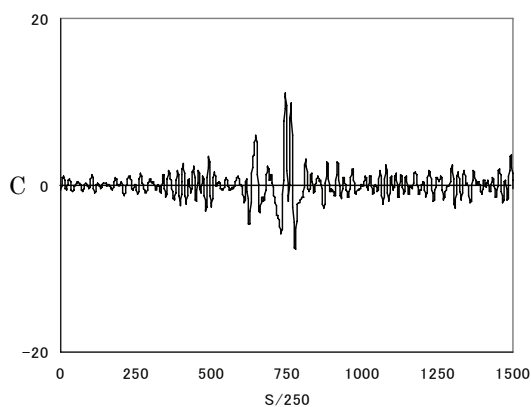


図-5 特定スケールでの係数（スケール 15）

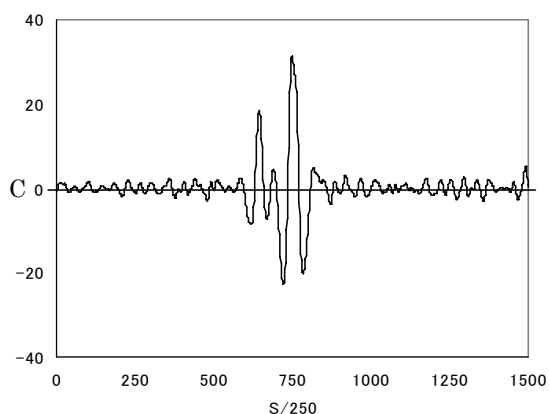


図-6 比較的大きいスケールでの係数（スケール 24）

(250Hz で 12 相当) とした. 図の点線はウェーブレット係数から得られた車軸通過時刻であり, 図-7 が 4 軸, 図-8 が 5 軸車両であると検出できていることがわかる.

3. 車軸情報分析結果を利用した車軸重量分析とその精度

ここでは, 以上述べてきた車軸情報分析手法を利用して, その結果を用いて車軸重量分析を行うとともに, その精度について検証する. 本章では車軸重量算出には小林, 三木ら^{1),2)}の Weigh-in-Motion で用いられている方法を適用しており, 車軸重量算出において必要となる速度情報に関しては 2 箇所の縦リブセンサーから得ている.

車軸重量の算出に用いたのは, 静止時の重量と車軸間隔を計測して, 各車軸の間隔 (表-1) と静止時の軸重および車両総重量 (表-2) が既知の状況で走行させたトラック通過時の横リブ下フランジでの計測波形である (図-9). 図-9 中の縦線は, 図-9 の波形を連続ウェーブレット変換して求めた係数 (図-10) より得た車軸通過時刻を示している. 表-1 に連続ウェーブレット変換で求めた車軸通過間隔を停止時に計測した軸間隔および縦リブ波形から求めた軸間隔と比較した表を示す. 連続ウェーブレット変換により求めた間隔と計測間隔を比にして比較すると (表-1), 各々の間隔の比において近い値を

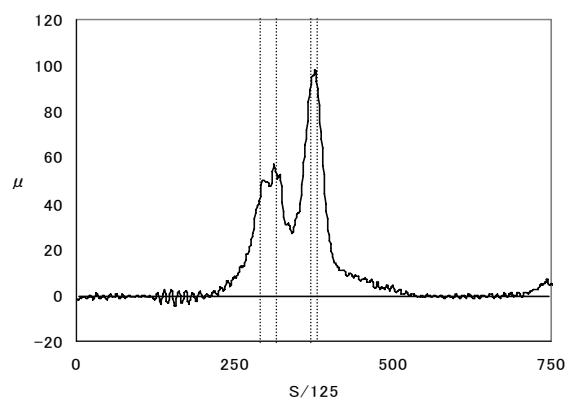


図-7(a) 横リブ計測波形

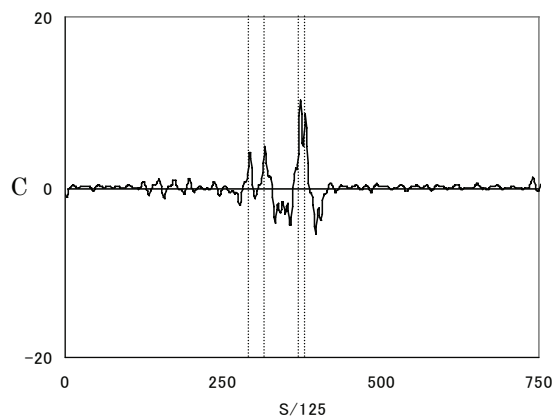


図-7(b) ウェーブレット係数（スケール 6）

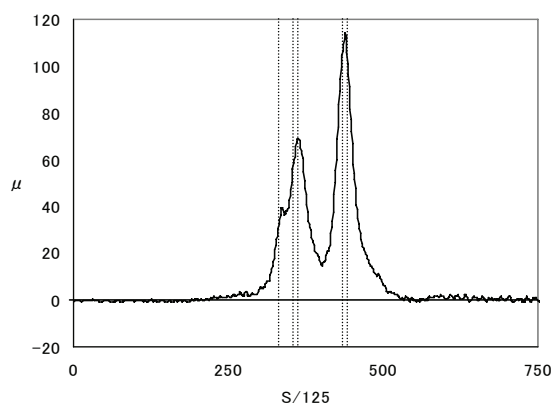


図-8(a) 横リブ計測波形

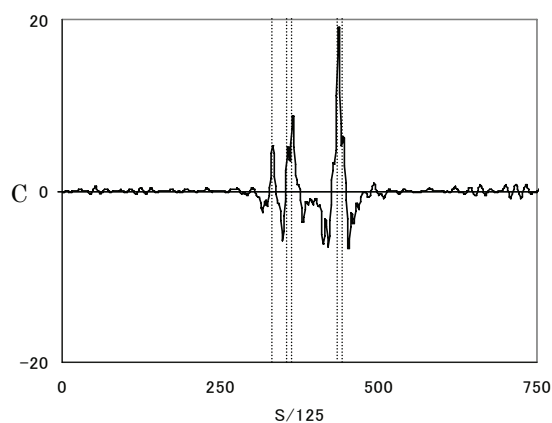


図-8(b) ウェーブレット係数（スケール 6）

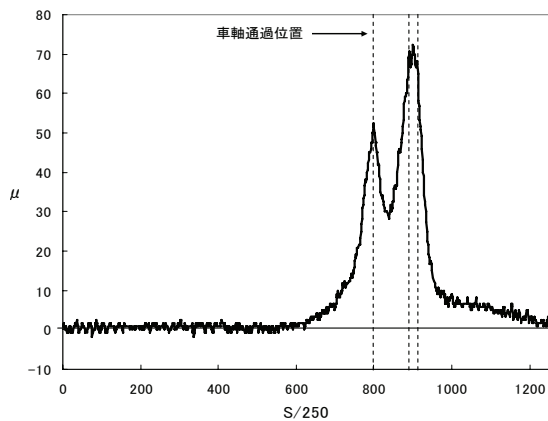


図-9 横リブのひずみ波形と車軸通過時刻

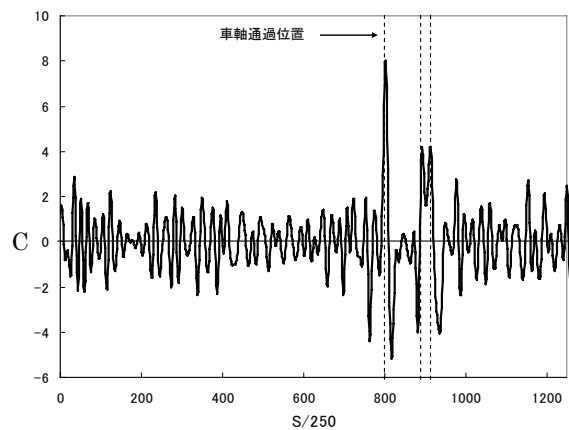


図-10 横リブひずみ波形の wavelet 係数

表-1 軸間隔比の比較

	1 軸-2 軸目	2 軸-3 軸目	1 軸-3 軸目
軸間隔計測値	0.816	0.184	1
本研究手法	0.805	0.195	1
縦リブ	0.838	0.162	1

表-2 軸重算出結果

	1 軸目	2 軸目	3 軸目	総重量
停止時 重量計測値	6.25	7.205	7.205	20.66(t)
	6.25	14.41		
Weigh-In-Motion 本研究手法	7.259	9.196	4.284	20.74(t)
	7.259	13.48		
Weigh-In-Motion 従来手法	7.16	5.270	5.510	17.94(t)
	7.16	10.78		

表-3 車両辞書データベース例

	1 - 2 軸間	1 - 3 軸間	1 - 4 軸間
3 軸車 大型トラック	5870 (mm)	7070 (mm)	
3 軸車 大型ダンプ	3200 (mm)	4520 (mm)	
4 軸車 大型トラック	1850 (mm)	6230 (mm)	7430 (mm)
4 軸車 タンクローリー	3160 (mm)	10650 (mm)	12050 (mm)

示している。また、縦リブから得られる軸間隔比との比較でも近い値を示しているため、本研究の手法で求めた軸間隔の精度は高いと言える。次に表-2 に、本研究の手法で車軸通過時刻を検出し軸重算出した結果（以下、本研究手法と呼ぶ）を、静止時の車軸および車両総重量を事前に計測した結果（以下、計測値と呼ぶ）、さらに 2 箇所の縦リブの波形から速度を求めて通過時間を推定した従来の手法で車軸通過時刻を検出した結果（以下、従来手法と呼ぶ）を合わせて示す。表-2 で計測値と本研究手法での算出値と比較してみると、各軸の値には静止

時と差異があるが、全体の重量は一致した値を示している。走行時の軸重のバランスは、静止時と異なるとされており、本研究手法では走行中の車両重量を求めている。このことが表-2 の差異に影響しているものと考えられる。一方、従来手法では、既往の研究などから車両総重量精度として±5～10%以下であることが指摘されているが、表-2 では総重量が計測値と比べて 10%程度小さく算出されている。本研究の手法では、同じ波形から、精度良く車軸通過時刻を検出するとともに全体の重量を計測値に近い値が算出していることから、本研究の手法の精度が高いことがわかる。

4. 車軸情報分析結果の車種判別および通過速度検出への応用

車軸検知から車軸重量まで算出するプロセスはこれまでで述べたが、検知した車軸情報からは、通過車両について車軸重量以外の情報も導き出せると考えられる。ここでは、重量算出以外の用途に車軸情報分析結果を利用する応用例として、本研究では通過車両の車種判別、車両通過速度検出への適用手法を示す。車種判別では、タンクローリーなど我が国で走行している殆どの車種について、車軸間隔等のデータを格納した車両辞書データベース¹²⁾を利用し、さらにそのデータベースに格納された軸間距離のデータから速度を分析する。

4.1 車両辞書データベース

本研究では、現在道路上を通行している様々な車両を整理・分類し、車軸間隔等の情報をデータベース化した石川ら¹²⁾の車両辞書データベースを利用した。表-3 にデータベースに格納されている軸間隔情報の例を示す。データベースには 1 軸目の車軸を起点とした時の各車軸までの距離が格納されている。本研究では車両データとしては、3 軸車と 4 軸車のものとして、それぞれ 96 種、28 種の車種を格納したデータベースを利用した。

4.2 車両辞書データベースを用いた車種判別手順

横リブの実測ひずみ波形を連続ウェーブレット解析することによって得られた各軸の通過時間から車軸間の時間の比を求め、車軸間隔の比、例えば1軸-2軸間の距離と2軸-3軸間の距離の比を求める。その比はベクトルとして(1軸-2軸間の距離, 1軸-3軸間の距離)というベクトルで表し、これを正規化し単位ベクトルとする(ベクトルA)。一方、車両辞書データベースから得られる全ての車種の軸間隔の比も同様に正規化した単位ベクトル(ベクトルB)で表す。その上でこれら2つのベクトルの内積を取り、その値から車種の判別を行う。求めた内積値は2つのベクトルのなす角 θ のコサイン値となり(下記(5)式)、軸位置情報と車両データベースの車軸間隔が似ていれば0から1の範囲でより1に近い値を示す。車両辞書ファイルに格納されている車種のうち、このコサイン値が最も大きいものを該当車種とする¹²⁾。

$$\cos \theta = \frac{A \cdot B}{|A||B|} = A \cdot B \quad (5)$$

4.3 速度検知方法

横リブの実測波形のみでは、得られる車軸間隔情報は時間間隔の比率である。しかし、前述の車種判別によって車種を特定することができれば車軸間隔の距離情報を得ることが出来る。従って横リブの実測ひずみ波形を連続ウェーブレット解析することによって得られた車軸間隔を、横リブ実測波形上での車軸の時間間隔を除

すことにより車両の速度を検知することが可能になる。

5. 実測データへの本研究で開発した分析手法の適用例

本研究では、影響線長の長いひずみ波形(横リブひずみ波形)から連続ウェーブレット解析することによって得られた車軸通過時刻、車軸間隔から、車軸重量、車種、車両通過速度を一括して取得できる手法を提案した。本研究で提案した方法は、リアルタイムで分析可能であるが、最後に、複数の実測横リブひずみ波形の分析結果を例として示す。図-11に示す8つのひずみ波形から表-4のような分析結果が得られる。なお、表-4には、従来法により2箇所の縦リブの波形から求めた速度も参考までに示し、車種判別に用いた内積の最大値も示している。従来法においての速度検知の精度も必ずしも十分ではないが、本研究手法と同様の結果を示している。内積値については全ての車両が最も内積値の高い車種で0.99以上の値を示しており、車種判別はできていると考えられる。軸数についても、全てのケースについて、縦リブひずみ波形のピークの数と一致していたことを確認しており、縦リブでのひずみ波形を用いなくても、軸数などの情報が1チャンネル横リブの波形データから検出可能である。なお、ここで示す結果は、サンプリング周波数は125Hzにダウンサンプリングしているため、スケールとしては6(250Hzで12相当)を用いた。

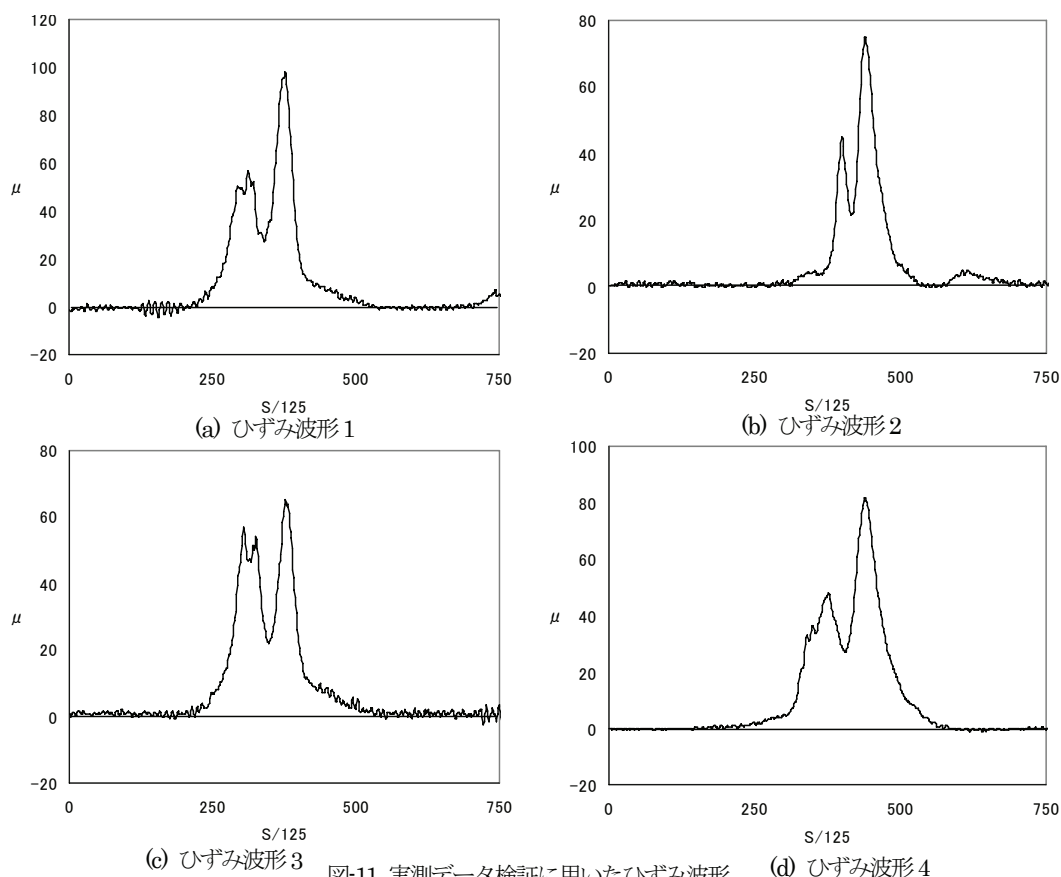


図-11 実測データ検証に用いたひずみ波形

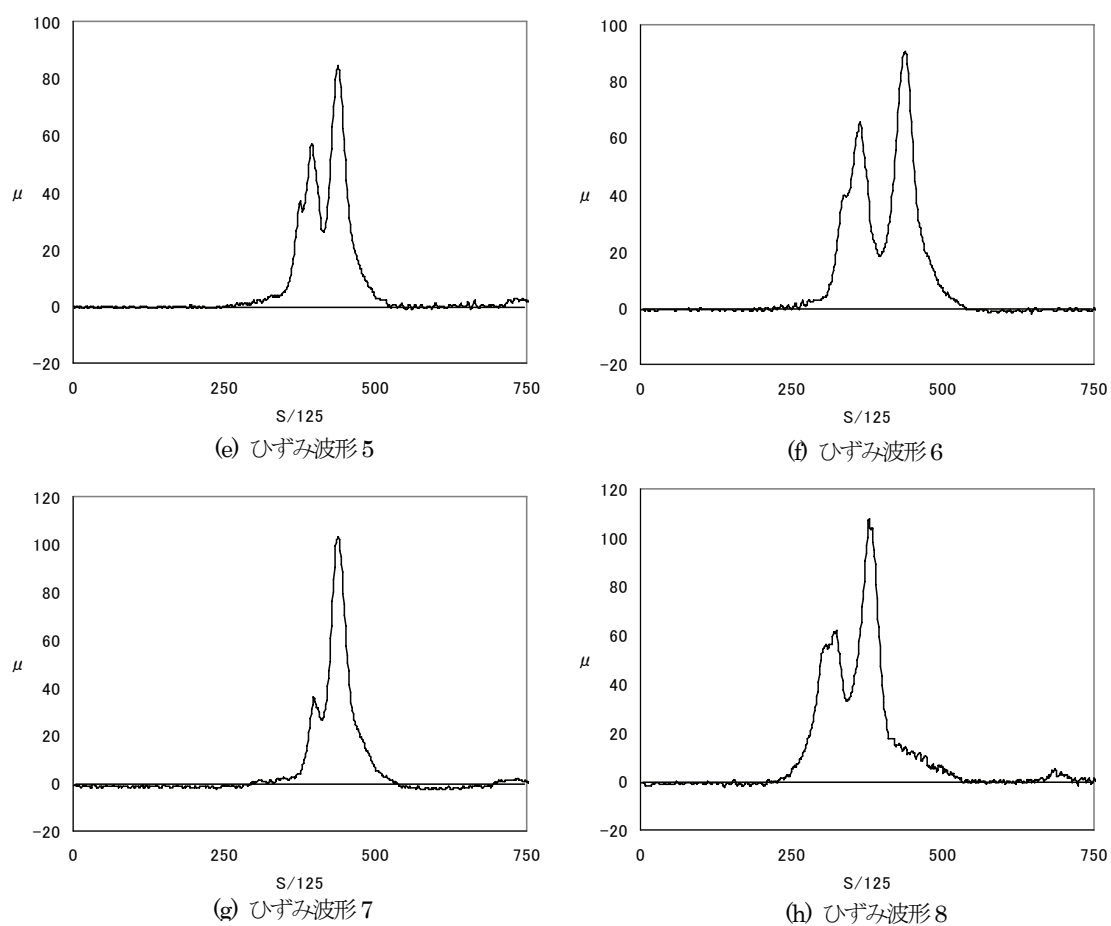


図-11 実測データ検証に用いたひずみ波形 (つづき)

表-4 分析結果の例

解析データ	車軸数	車両 重量 (tonf)	最大 内積値	車種	速度(km/h) (本研究手法)	速度(km/h) (従来手法)
	車軸重量(tonf)					
ひずみ波形 1	4	19. 21	0. 9997	大型タンクローリー	61. 62	62. 61
	3. 79, 2. 64, 8. 83, 3. 95					
ひずみ波形 2	3	20. 38	0. 9999	大型トラック	67. 69	68. 60
	5. 27, 2. 99, 12. 12					
ひずみ波形 3	4	29. 11	0. 9995	大型タンクローリー	68. 63	64. 00
	8. 15, 7. 24, 4. 61, 9. 11					
ひずみ波形 4	4	28. 59	0. 9997	大型タンクローリー	52. 65	44. 31
	3. 46, 8. 08, 4. 09, 12. 96					
ひずみ波形 5	4	29. 32	0. 9988	大型タンクローリー	75. 31	68. 57
	3. 20, 8. 84, 9. 14, 8. 14					
ひずみ波形 6	4	29. 32	0. 9995	大型タンクローリー	48. 85	53. 33
	2. 10, 10. 20, 3. 70, 13. 32					
ひずみ波形 7	3	23. 48	0. 9999	大型トラック	67. 69	60. 00
	3. 14, 10. 64, 9. 70					
ひずみ波形 8	4	38. 74	0. 9998	大型タンクローリー	67. 78	57. 60
	8. 03, 8. 01, 6. 70, 16. 00					

6. 結論

本研究では、影響線長の長いひずみ波形から、時間 - 周波数解析を用いて車軸情報を分析する手法およびその応用を提案し、鋼床版構造の横リブでのひずみ実測波形を実例として検討を行った。本研究の結論は、以下のようである。

- ① 時間周波数解析、特に連続ウェーブレット解析を用いた車軸通過時刻の検知は可能である。ただし、検知に使用するスケールは適切に選択することを必要とする。本研究では、スケールを15程度とした。
- ② 連続ウェーブレット解析を用いた車軸検知から得られる車軸通過時刻を従来の車軸重量算出計算に適用した結果、高い精度が得られ、時間 - 周波数解析による車軸通過時刻検知は車軸重量計算にとって有効であることが分かった。
- ③ 連続ウェーブレット解析を用いた車軸検知から得られる車軸通過時刻分析結果を用いることにより、車種判別、さらには車両速度検知の分析が可能となる。

以上より、影響線長の長い橋梁部材のひずみ波形から、車両の車種、重量、速度を求めることが可能である。本研究の手法を用いれば、Weigh-In-Motionに必要な車両の速度、車軸位置をひとつの影響線長の長いひずみ波形から求めることが可能となり、従来のWeigh-In-Motionよりもセンサ数を減らし、さらに簡便かつ適用範囲の広いWeigh-In-Motionシステムを構築することができると考えられる。

参考文献

- 1) 三木千壽, 村越潤, 米田利博, 吉村洋司: 走行車両の重量測定, 橋梁と基礎, Vol. 21, No. 4, pp. 41-45, 1987. 4.
- 2) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 第772号/I-69, pp. 99-111, 2004.
- 3) 小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博: 支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 743-753, 2003. 3.
- 4) 松尾一志, 山口栄輝, 内藤靖, 河村進一: 垂直補剛材を用いた走行車両の重量推定, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol. 60, pp. 1-062, 2005.
- 5) 深津伸, 小塩達也, 山田健太郎, 富田直樹: プレートガーダー橋の縦桁を用いた長期間交通荷重モニタリング, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol. 56, pp. 322-323, 2001.
- 6) 新海英昌, 山田健太郎, 小塩達也, 矢島正美, 水野良浩: ワーレントラスの垂直材を用いた自動車荷重の推定, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol. 54, pp. 736-737, 1999.
- 7) 小塩達也, 山田健太郎, 小林直人, 水野良浩: 鋼I桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発, 構造工学論文集, Vol. 47, pp. 1083-1091, 2001.
- 8) 小塩達也, 山田健太郎, 貝沼重信, 小幡敏幸, 古市亨: 鋼床版縦リブを用いた輪重推定, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol. 52, pp. 666-667, 1997.
- 9) 山口栄輝, 松尾一志, 河村進一, 小林裕介, 森昌文, 百田国廣, 西之原達志: 2 径間連続鋼桁橋を用いたBWIMの精度, 応用力学論文集 vol7, pp. 1135-1140, 2004.
- 10) 石尾 真理, 中谷昌一, 玉越 隆史, 中洲 啓太: 影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol. 57, pp. 1447-1448, 2002.
- 11) 竹本健一, 石川裕治, 宮崎早苗, 佐々木栄一, 三木千寿: ひずみセンサと定点カメラによる車種判別手法, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006), 2006. 7.
- 12) Pranesh Chatterjee, Eugene O'Brien, Yingyan Li, Arturo Gonzalez: Wavelet domain analysis for identification of vehicle axles from bridge measurement, Computers and Structures vol84, pp. 1792-1801, 2006.

(2007年9月18日受付)