

PC 桁橋における非接触 Bridge Weigh-in-Motion の試み

Contactless bridge weigh-in-motion using PC-girder bridges

小塩達也[†], Eugene O'Brien*, Susan Taylor**
Tatsuya Ojio, Eugene O'Brien, Susan Taylor[†]博 (工), 名城大学准教授, 理工学部環境創造学科 (〒468-8602 名古屋市天白区塩釜口 1-501)*Ph. D., Professor, School Of Civil Engineering, University College Dublin
(Richview, Newstead Block B, Belfield Dublin 4, Ireland)**Ph. D., Professor, School of Natural and Built Environment, Queen's University Belfast
(David Keir Building, Stranmillis Road, Belfast, Northern Ireland)

Weigh-in-Motion measures vehicle load on roadway without stopping traffic. Bridge Weigh-in-Motion (BWIM) uses bridges as a weight scale. The advantages of BWIM are its invisibility to drivers, low cost and simple installation. This study tested a potential of "Contactless Bridge Weigh-in-Motion" without any sensor in bridge. A digital high-speed camera captured bridge deflection by long distance lens, and another camera captures passing vehicle on road surface. Gross vehicle weight is calculated by influence area method by integration of deflection time history and estimated vehicle speed by traffic image. The accuracy of the BWIM system was under 20% for test vehicles with known gross vehicle weight.

Key Words: Bridge Weigh-in-Motion, motion capturing, contactless measurement
キーワード: Bridge Weigh-in-Motion, 画像測定, 非接触計測

1. はじめに

道路上の自動車荷重は、道路構造物や舗装の疲労の要因の一つであり、これらを適切に監視・管理することは道路システムの持続性を保つために重要である。監視・管理すべき項目としては、道路上の適切な使用の観点では、各種法令による軸重・総重量の基準値の超過状態、構造物の耐荷力の観点からは、主として単独または、荷重列としての荷重の最大値、疲労の観点からは、軸重や総重量の頻度分布、といった項目が考えられる。路面に埋め込まれたセンサーで道路上の自動車荷重をその走行を妨げずに測定するシステムは Weigh-in-Motion (以下、WIM) と呼ばれる。一方で、橋梁を「はかり」として用い、橋梁の応答値から走行車両の荷重を求める方式は Bridge Weigh-in-Motion (以下、BWIM) ¹⁾²⁾ と呼ばれている。BWIM は WIM に比べ、設置コストや維持コストが比較的安価に済むことから、既設路線での荷重測定の方法として有効であると考えられる。BWIM の計算方式は

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: tojio@meijo-u.ac.jp

様々なものがあるが、いずれの手法も荷重に対する応答値として橋梁部材のひずみに着目し、ひずみゲージを用い複数の測定点での時刻歴ひずみ応答を処理し走行車両の荷重を推定することになる。現在では、連続測定を処理することで、車種別台数や総重量頻度分布といった、自動車荷重に関する詳細な情報が得られるまでになっている。

本研究は、これらの既往の手法とは異なる新しい試みとして、画像情報のみから BWIM を構成することを検討した。たわみの測定方法としては、橋梁のたわみに伴う橋梁局部の動きを遠望から高速度カメラで撮影し、画像解析によりたわみの時刻歴波形を取得することとした。自動車荷重の計算方式は処理の簡便性を考え、小塩らが開発した影響面積法 ³⁾ を用い、この計算に必要な車両の通過速度は同時に撮影した橋面の動画像から推定した。

この手法を既設の PC 桁橋に適用し、道路管理者が行う過積載取り締まり業務と平行して主桁のたわみおよび橋面の道路状況の撮影を行なった。道路管理者が選定した検査対象車両について、車両通過時のたわみ波形と走行速度から車両総重量を算出、取り締まり業務による測

定データと、提案する手法による計算結果を比較し、荷重および速度の推定精度について検証した。

2. 測定方法

2.1 測定機材およびたわみ測定方法

(1) 測定機材

橋梁の微小なたわみを橋梁から離れた位置からカメラで撮影するためには、たわみ測定位置をできるだけ拡大し、1画素あたりの撮影寸法を小さくしなければならない。本研究では、低コストで長い焦点距離を得る方法として、バードウォッチング等で用いられる、フィールドスコープをデジタルカメラの望遠レンズとする手法⁸⁾を用いた。また、カメラの安定性確保と、視準位置へカメラを向けるための正確な微動操作ができるよう、中古のトランシットを改造し、鏡筒上部にカメラおよびレンズ一式を装着できるようにアタッチメントを製作した。三脚はアルミ製と比較して温度膨張が少なく振動を吸収しやすいとされる木製のものを用いた。使用するカメラは高速動画撮影モードを持ち、コンパクトデジタルカメラの中では明るいレンズを持つ Panasonic Lumix FZ-200 を選定した。組み立てた状態での撮影機材を写真-1に示す。計算上のシステムの焦点距離（合成焦点距離）は35mm版カメラに換算すると最大で8,400mmとなる。

(2) たわみの測定方法

動画像内における「動き」の追跡は、一般には「モーションキャプチャリング (Motion Capturing)」と呼ばれ、多種多様な分野で実務的に行われ、モーションキャプチャリングに特化した市販ソフトウェアも販売されている。本研究では、桁橋の一部の特徴点を撮影し、市販のモーションキャプチャソフト（ソフト名：PV-Studio2D, 株式会社OAサイエンス）を用いて追尾することで特徴点の座標の時刻歴を算出することとした。

このソフトウェアの出力値の座標系は、画像サイズを基準とした値であり、これから実際のたわみ量を得るには、距離の次元への変換が必要である。従来、動画像を

用いた構造物の変位計測では、マーカーまたはターゲットと呼ばれる、既知の大きさを持ち、コントラストが大きな被写体を測定対象に貼付して、画像解析により撮影フレームごとのマーカーの位置を追尾する手法が用いられる^{9) 10)}。マーカーの大きさが既知であれば、撮影画像の1ピクセルあたりの実際の大きさを知ることができ、マーカーの動きを実際のたわみに置き換えることができる。しかしながら、本研究では構造物へのマーカーの設置ができないため、次のようにして相対座標値を変位に変換した。

① 視準距離と画像寸法の間をカメラのズーム倍率ごとに実験室等であらかじめ測定する。

② 現地測定時に、カメラから被写体までの距離をレーザー距離計で測定し、①で得られている関係から現地で撮影されている箇所の寸法を計算して、ソフトウェアからの出力値を実際のたわみ値に換算する。

視準距離と画像寸法の関係の例を図-1に示す。この例ではズームレンズ位置のカメラ内の表示は24倍（このカメラでの最大ズーム位置）の際の撮影画像の縦のサイズを示している。なお、本研究で用いたカメラのズームレンズはステッピングモーターにより駆動されている。1倍～24倍のといったズーム倍率の表示がされるものの、実際のステップ数は24段階ではなく、各倍率表示の間で数段階のステップがあり、ズーム可動域の端部（この場合はテレ端）でないと、実際のレンズ位置にばらつきが生じる場合があることを確認している。（例：23倍表示の場合、22.5～23.5に相当する位置）このようにして算出された変位はカメラの視準方向を法線とする面内に投影される被写体の動きとなる。厳密なたわみを測定するには、被写体に対して水平位置にカメラを設置するか、カメラの視準角度を考慮するなどの必要があり、また、レンズによる画像のひずみについても考慮することが求められるが、本研究ではマーカーが設置できないことと、BWIMのための測定であり、橋梁の絶対的なたわみ値の精度を必要としないことから、これらの考慮は行っていない。



写真-1 カメラ・レンズおよび固定装置

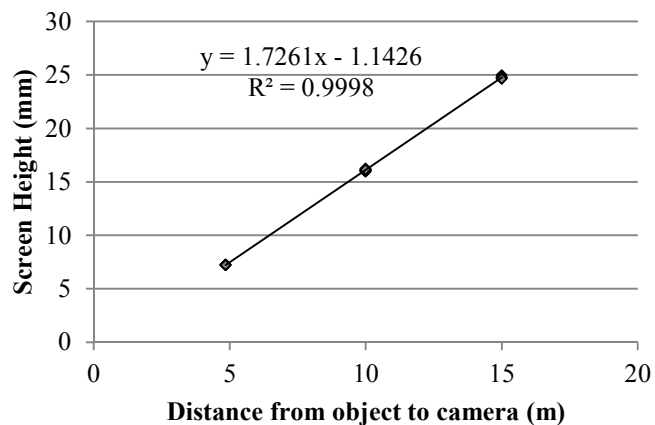


図-1 視準距離に対する撮影範囲の高さ (ズーム倍率表示: 24倍)

(3) カメラ間の同期

本研究では橋梁のたわみの時刻歴波形に加えて、もう一台のカメラで橋面上の画像を撮影して車種の確認や車両速度の推定に用いる。変位用・橋面用の2台のカメラは、外部制御用端子で、撮影開始・停止を外部信号から行うが、事前検討の結果、2台のカメラに同時に制御信号を送っても最大0.1秒の同期ずれが生じることが判明した。そのため、カメラの前に白色LEDを配置し、撮影を開始した数秒後にこれらを同時に発光させて画像内に写りこませ、発光した画像により同じフレームを判定できるようにした。LEDを使用したのは電圧印加から発光までの時間がきわめて短いためである。撮影はフレームレート120fpsの高速動画モード(解像度1280×720画素)で行なった。

2.2 影響面積法によるBWIM

本研究では、BWIMの計算方式として影響面積法⁵⁾を用いた。ここにその計算方法の概略を示す。ある橋梁部材の応答値に着目する。N個の軸重 w_i ($i=1\cdots N$)を持つ車両1台のみが橋梁上を移動した場合の部材応答波形は、各軸が単独で走行した場合の波形の重ね合わせで表現される。その部材応答値の影響線を $f(x)$ 、先頭軸の載荷位置を x とし、先頭軸に対する各軸の相対位置を l_i ($i=1\cdots N$)とすると、部材の応答波形は、先頭軸の載荷位置の関数として式(1)のように示すことができる。

$$R(x) = \sum_{i=1}^N w_i f(x-l_i) \quad (1)$$

ここで、応答波形の積分値を影響面積と呼ぶこととする。影響面積は式(2)ようになる。

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^N w_i f(x-l_i) dx \quad (2)$$

これを变形すると、次式のようになる。

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) dx = \sum_{i=1}^N w_i \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-l_i) dx \quad (3)$$

ここで、積分の項の中身を見ると、先頭軸の位置を基準とした各軸の影響線であり、軸間距離だけ遅れているだけのものの、影響線の積分値は同じである。つまり、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x-l_i) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (4)$$

したがって、式(3)は次のように变形できる。

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) dx = \left(\sum_{i=1}^N w_i \right) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (5)$$

すなわち、応答波形を積分した値は、走行する軸重の合計、つまり車両総重量に比例することを示している。ただし、ここでの応答波形は先頭軸の位置の関数であり、これを測定で得られる時刻歴の波形に置き換える。

車両の走行速度を一定値 v とした場合、 $t=0$ で先頭軸が影響線に到達したとして、 $x(t)=vt$ で表すことができることから、 $dx=vdt$ となる。これより式(5)は車両の走行速度 v ならびに車両の総重量

$$GVW = \sum_{i=1}^N w_i \quad (6)$$

を用いて、

$$A = v \int R(t) dt = GVW \cdot \int f(x) dx \quad (7)$$

と变形できる。したがって、車両走行時の部材の時刻歴波形を積分してその車両の走行速度を乗じた値は、車両総重量に比例する。実際の測定においては、たとえば既知の車両総重量 GVW_c を持つ車両をある速度で走行させ、車両総重量に対する影響面積値 A_c を求めておく。一般車両に対しては、その車両の走行速度と部材応答値の時刻歴から求めた影響面積 A からその車両の車両総重量 GVW が求められる。

$$GVW = \frac{A}{A_c} GVW_c \quad (8)$$

この方法の特徴的な点は、影響線を解析や実測で求める必要がないことである。既知荷重に対する影響面積があらかじめ得られれば、測定対象車の速度と測定点の時刻歴応答波形だけから車両総重量を求めることができる。また、測定する応答値は主桁のひずみ、たわみなど、車両ごとに応答する応答値であれば良い。

3. PC桁橋を用いた検証実験

3.1 測定橋梁

英国の北アイルランドDown州、Loughbrickland村の南、ダブリンとベルファストを結ぶ高速道路A1上にあるLoughbrickland橋で検証試験を行った。この橋梁は支間19m、幅員約32m、斜角68.3度の単純PC桁橋であり、桁高1.0m、1.2m間隔で並べられたPC桁27本と200mmのRC床版で構成される。車線はインターチェンジのための合流車線と本線の走行・追い越し車線の合計6車線を持ち、村内へのアクセス道路をまたぐ跨道橋となっている。この橋梁のすぐ南には埋め込み式のWIMがあり、また、A1の本線上北には過積載取り締まりに用いる計量所(Weigh Station)がある。測定対象橋梁の外観を写真-2に、図-2に撮影状況の概略図を示す。北行き走行車線を測定対象とし、左輪荷重下にあるPC桁(橋梁端部から約10m)の支間中央下部(路面上約7m)を路下道路の歩道部分から撮影した。たわみ状況の撮影にあたり、光量を補うため、750Wのピンスポットライトで撮影箇所を照らしている。撮影対象部位を写真-3に示す。これは下フランジ下面に取り付けられた6角穴付ボルトの頭部分である。カメラの高さは約1.5m、カメラの仰角は



写真-2 Loughbrickland 橋

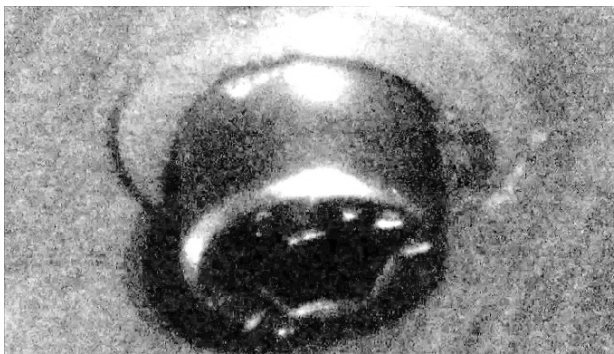


写真-3 たわみ測定の撮影対象部位

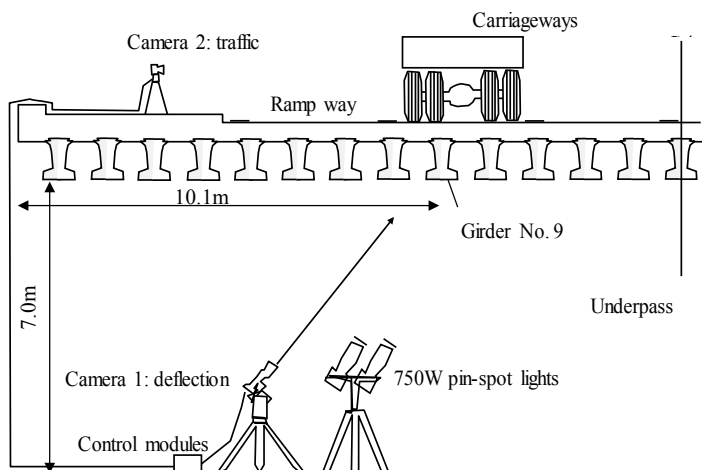


図-2 測定状況



写真-4 DVA による取締りの状況

約 44 度, カメラと被写体間の距離はレーザー距離計の測定で 7.85m である. これによる撮影範囲はおおよそ $22 \times 12.4\text{mm}$ となる. これから計算した, たわみの分解能は 1 画素あたり約 0.017mm となる. なお, モーションキャプチャソフトはサブピクセル単位での追跡を行っているため, 画素あたりのたわみ分解能よりも小さいサブピクセル単位の変位の出力が行われる. また, 被写体とカメラが同じ高さにないため, 画面上の被写体の鉛直方向の動きは厳密な意味での鉛直たわみではない.

3.2 測定対象車両

本研究では, 北アイルランドの Driver and Vehicle Agency (DVA, 運転免許局) による過積載車両の検査業務と連携して測定を行った. DVA のパトロール車が本線上で検査対象車両を走行中に選定してドライバーに通知, 本線上の WIM ならびに測定橋梁を通過後, 本線脇の計量所に誘導し, 車両サイズ, 軸重, 車両総重量を停止状態で検査する. 車両誘導の様子を写真-4 に示す. BWIM を行う車線は走行車線のみとし, 同時乗荷の無い状態, すなわち橋梁上で北行きの走行車線に大型車両 1 台のみが走行しているケースを対象とした. 検査対象となった車両のうち, 撮影期間中に観測できた 8 台の一般車両について, 車両走行速度および車両総重量を推定し, WIM データおよび計量所での測定データと比較した.

3.3 測定結果

(1) 走行速度および影響面積

分析対象の車両画像のホイール部分をモーションキャプチャソフトで追跡し, 橋梁への入退出を判定, 得られた橋梁上の走行時間から走行速度を推定した. 追跡モードはカラートラッキング (色追跡法) とした. 具体的には, 橋面画像での測定径間の出入口の座標を求めておき, 車両前軸のホイール部分を追跡した時刻歴波形から, ホイールが橋梁端部を横切るまでのフレーム数を計数, 橋梁上の走行時間 (フレーム数 \times 撮影時間間隔 (1/120 秒)) から走行速度を求める. 8 台の車両について, 推定した走行速度を WIM による走行速度と比較したものを図-3 に示す. WIM で得られた走行速度を正とすると, 光線の具合でホイール部のコントラストが悪いケースで誤差が 11% (車両 No.4), その他のケースではおおよそ 3% 以下の推定精度となった.

写真-3 に示した撮影対象部位に対し, コントラストが高い点をモーションキャプチャソフトで追跡, 座標値の時刻歴として出力させ, 縦方向の座標出力値を図-1 に示した関係式からたわみ量に換算した. 追跡モードはカラートラッキング (色追跡法) とした. 8 台の車両のたわみの時刻歴波形を図-4 に示す. たわみの値は座標値を変換したものであるため, 進入・退出時のたわみ値の平均を 0 点としている. いずれの波形も若干の振動成分が見られるが, 波形の主な成分は移動荷重による影響

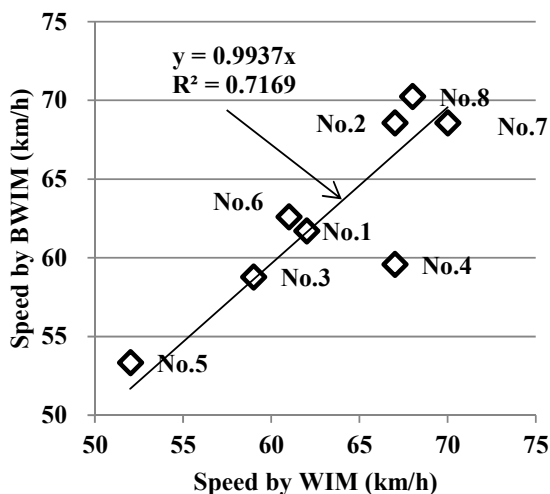


図-3 走行速度の推定結果

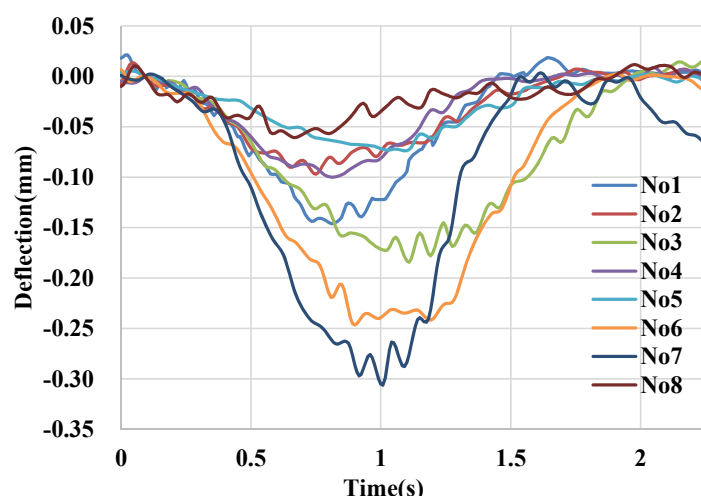


図-4 たわみの時刻歴波形

表-1 各車両の計算結果

No.	車種	計量所 車両 総重量 (kN)	WIM		画像計測 最大たわみ (mm)	BWIM		単位荷重 あたりの 影響面積 (mm ² /kN)
			車両 総重量 (kN)	走行速度 (km/h)		走行速度 (km/h)	影響面積 (mm ²)	
1	4軸セミトレーラー	163	141	62	-0.154	61.7	1883.1	11.53
2	5軸セミトレーラー	145	133	67	-0.099	68.6	1510.2	10.44
3	5軸セミトレーラー	274	243	59	-0.186	58.8	2870.7	10.50
4	3軸貨物車	124	100	67	-0.100	59.6	1160.5	9.35
5	2軸貨物車	93	85	52	-0.138	53.3	908.2	9.75
6	5軸セミトレーラー	341	298	61	-0.232	62.6	3447.1	10.11
7	6軸セミトレーラー	407	346	70	-0.300	68.6	3831.4	9.42
8	2軸貨物車	47	40	68	-0.051	70.2	468.5	9.91
							平均値	10.13

線成分であると考えられる。また、桁の浮き上がりは見られなかった。これらの波形について橋面画像および波形形状から判定した進入・退出時間を区間とし積分操作を行ない、積分値に車両走行速度を乗じることで影響面積を求めた。表-1 に各車両について計算したたわみの最大値、走行速度、影響面積、単位荷重あたりの影響面積を示す。WIMによる車両総重量の数値はすべて計量所で静的に計量した値を下回っているが、これは、WIMの荷重センサーの調整に不備があったためと判明している。そこで、本研究ではWIMのデータは走行速度のみ用い、車両総重量については計量所の値とのみ比較することとする。

図-5 に車両総重量と影響面積の関係を示す。影響面積はおおむね総重量に比例しており、式(7)の関係が確認できる。なお、8台のそれぞれの最大たわみ値0.051mm~0.300mmに対する画素は3~17画素となり、画面上でのわずかな変化により車両総重量の違いが捉えられていることになる。この理由としては画像解析がサブピクセル単位で行なわれていることと、影響面積が波形の積分値をもとにしていることによるものと考えられる。

(2) 車両総重量

既往のBWIMの手法¹⁷⁾では、1台の既知荷重を複数回走行させ、各回の校正値の平均を求めることで校正が行なわれる。複数回走行を行なう理由は、同じ車両が走行しても種々の要因で応答値にばらつきが生じるためである。また、この場合のBWIMの推定精度は、その既知荷重に対する推定値のばらつきで評価される。一方、本研究では既知荷重として一般車両の実測データを用いるため、同じ車両の複数回走行によるばらつきを評価することができない。そこで、8台すべてを既知荷重として、単位重量あたりの影響面積の平均値を求め、その値と各車両の影響面積を比較することで車両総重量を推定した。図-6 に静的に測定した車両総重量と影響面積から推定した車両総重量の関係を示す。また、それぞれの車両の車両走行速度(WIMによる値)に対する誤差率を図-7に、車両総重量(DVAによる値)に対する誤差率を図-8に示す。もっとも推定精度が悪いケースは車両No.1であり、約+15%の誤差があるが、このケースの走行速度の推定精度は+0.4%であった。一方で、速度の誤差が+11%と大きかったNo.4の車両では、車両総重量の推定

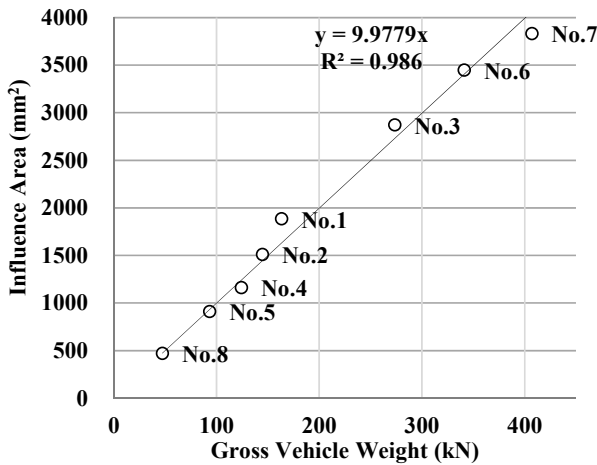


図-5 車両総重量と影響面積

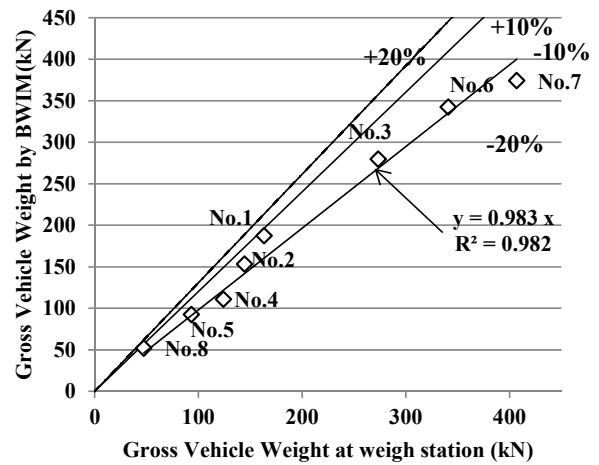


図-6 車両総重量の推定結果

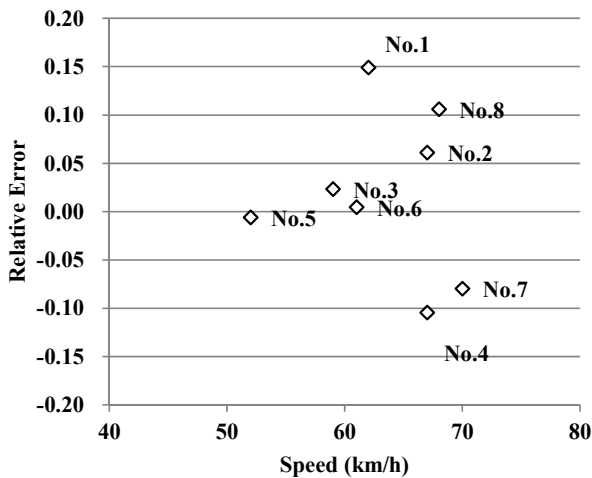


図-7 車両走行速度に対する誤差率

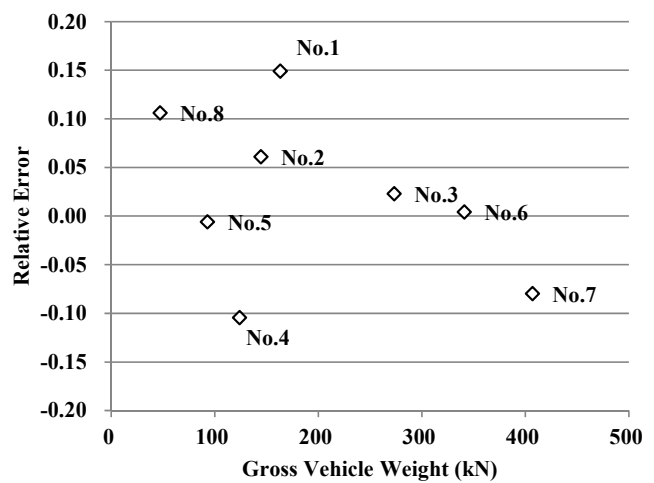


図-8 車両総重量に対する誤差率

誤差は-5%である。推定誤差が生じる要因としては、一般的には車両の振動や橋梁の振動による動的な効果や、速度の推定誤差が考えられているが、本研究では走行速度の違いによる推定精度の変化は見られなかった。よって、8台の車両を既知荷重として校正した場合、車両総重量 50kN~400kN、車両走行速度 50km/h~70km/h の範囲において、おおむね 15%程度の精度で車両総重量が推定できており、これは筆者らが鋼 I 桁橋の増設縦桁で行った影響面積法による測定⁹⁾と同程度の精度が得られたことになる。

4. まとめ

本研究では、既往の BWIM の手法とは異なる新しい試みとして、画像情報のみから BWIM を構成することを検討した。橋梁にセンサーを設置せず、デジタルカメラにより橋梁のたわみを非接触で測定、同時に撮影した橋梁面画像から走行車両の走行速度を推定し、影響面積法を用いて車両総重量を求める手法について、PC 桁橋での検証を行った。8台の車両を既知荷重として校正した結果では、15%程度の精度で車両総重量を推定できることが明らかになった。

本研究で示した手法は、得られる情報は既存の手法に対して限定的なものであり、路面上において目視で計測対象車両を選定し、車両ごとに撮影・分析を行うような調査方法が望ましい。これは、例えば少ない交通量の路線での短時間の限定的使用、たとえば地方自治体が管理する道路での過積載車両の調査などに適しているものと考えられる。

謝辞

現地測定作業および DVA との連携作業に際し、Queen's University Belfast の Ciran Doherty 助手、University College Dublin の博士課程学生 Ciran Carey 氏に多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Moses, F.: Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 105, No. TE3, pp. 233-249, 1979.
- 2) 松井繁之, El-Hakim : RC 床版のひび割れの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集,

Vol.35A, pp.407-418, 1989.

- 3) 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, pp.41-45, 1987.
- 4) 小塩達也, 山田健太郎, 貝沼重信, 小幡敏幸, 古市亨: 鋼床版部材を用いた走行車輪の軸重推定, 構造工学論文集, Vol.44A, 1141-1151, 1998.
- 5) 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.47A, pp.1083-1091, 2001.
- 6) 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, 743-753, 2003.
- 7) 小塩達也, 山田健太郎, 小塚正博: PC 桁橋を用いた支点反力法による Bridge Weigh-in-Motion の検討, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.709-714, 2018.
- 8) デジスコ倶楽部: <http://www.digisco.com/index.html>
- 9) 岡重嘉泰, 海老原学, 川谷充郎, 金哲佑, 三谷欣也: 家庭用デジタルビデオカメラを用いた橋梁の応答振動数特性, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, I-456, pp.911-912, 2010.
- 10) 志岐和久, 伊藤幸広, 石橋孝治, 内田慎哉, 松田浩, 出水亨, 木村嘉富: 正方形マーカーを用いた橋梁のたわみ計測法, 実験力学, Vol.12, No.4, pp.375-382, 2012.

(2018年9月21日受付)

(2019年2月1日受理)