交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム

Weight Analysis System for Low-speed Vehicles with Automatic Vehicle Identification Function of Traffic Situations

鈴木啓悟*・佐々木栄一**・三木千壽***・山田均****・高岡愛*****・宮崎早苗*****

Keigo SUZUKI, Eiichii SASAKI, Chitoshi MIKI, Hitoshi YAMADA, Ai TAKAOKA and Sanae MIYAZAKI

*工修 東京工業大学大学院, 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 博(工) 横浜国立大学大学院准教授, 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

***工博 東京工業大学大学院教授, 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

****工博 横浜国立大学大学院教授, 環境情報研究院 (同上)

*****横浜国立大学大学院, 環境情報学府環境システム工学専攻 (同上)

*****博(工)(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)

This paper proposes a method to achieve Weigh-In-Motion during traffic congestion. By analyzing strain data, the characteristics of strain during traffic congestion are acquired. This system judges traffic condition on the bridge from the time history of the minimum strain and the picture information. The picture information provides location of the vehicle. In addition, the obtained picture is used to presume the type of a car. Linear interpolation between the analyzed axle locations enables to make a similar influence line to the polynomial approximation. Finally, weight of the car traveling in slow speed is calculated.

Key Words: Weigh-in-Motion, traffic congestion, real-time monitoring, picture information

キーワード: BWIM, 渋滞, リアルタイムモニタリング, 画像情報

1. はじめに

現存する全橋梁の約 40%は高度経済成長期に建設されており, 現在供用中の多くの橋梁に様々な損傷が発生している。特に鋼橋においては, 疲労が主要な損傷の一つとなっている。疲労損傷の場合, き裂が発生するまで損傷の発生を判断することが難しく, また発生した場合でも, そのき裂がある程度のレベルまで進展するまでは発見されない可能性がある。

このような損傷を早期に発見し, 対策を講じるためには, 原因となる大型車両の重量と通行量を常時把握し, その結果を維持管理業務に活用することが有効であると考えられる。また, 疲労損傷が生じた場合, その要因となる交通荷重データが定量的かつ客観的に得られていれば, その後の補修や補強などの対策を採るうえで, 重要な指標を与えることが期待できる。これまでに交通荷重を得るための手段として, 軸重計の敷設¹⁾や Bridge Weigh-in-Motion(BWIM)などが採られている。軸重計は自動車専用道路の料金所前に設置され, 通行する車両の重量を軸重毎に把握している。この手法は重量車両の流入量を的確に得ることは可能であるが, その後の分岐や合流に伴って通行車両量に変動が生じ, 各橋梁における交通荷重を特定することが難しい。これに対し, BWIMは,

対象とする橋梁において直接応答を計測することによって交通荷重を得る手法である。よって, 分岐や合流が多い自動車専用道路や, 一般道路などの橋梁の重量測定にも有効であるといえる。

1979 年に Moses ら²⁾によって提案された BWIM は, 活荷重によって生じる部材のひずみから車両重量を逆推定する手法である。その構築が簡便であり, 測定される車両重量の精度が比較的高い^{3,5)}ことから, その有用性が認識されている。わが国ではまず三木ら⁶⁾によって桁橋においてのその有効性が実証された。その後も小塩らが縦桁に生じるひずみを用いた手法⁷⁾を提案し, また支点反力に生じるひずみ⁸⁾から各軸重を推定する手法を提案した。松井ら⁹⁾は RC 床版下面のひび割れ開閉幅を利用し BWIM を構築した。また小林ら³⁾は全自動リアルタイム BWIM を提案し, そのシステムが単純桁, 連続桁橋, さらに鋼床版構造での適用が可能であることを実証した。

しかしながら, BWIM は渋滞時や車両停止時などの速度条件において, その適用が不可能となる。これは BWIM のアルゴリズム上で必要となる軸位置の把握が困難となるためであり, このような速度条件で BWIM を履行するためには, 軸位置の特定する手法の改善が必要である。

本研究では三木らにより提案されている BWIM を改良し, 全速度条件に適用可能な車両重量測定手法を提案す

る。この手法は交通状況に応じて処理方法を通常BWIMと低速走行時BWIMとに使い分ける。低速走行時BWIMは渋滞または停止した状態をひずみデータより自動判別し、画像データを用いることにより軸の時刻歴を得る。そのうえで影響線を得られた時刻歴に従って時間軸上で伸縮させることによって車両重量の計算を行う。

実測データを用いた例として、慢性的に渋滞や停車の発生する一般国道246号の大坂橋と首都高速道路3号線においてその適用を試みた。

2. 渋滞時・停車時のBWIMにおける課題

小林ら³⁾が提案したリアルタイム全自動処理のBWIM手法は、測定されるひずみから数分間毎に最頻値を求め、その最頻値を測定ひずみから差し引くことにより、活荷重ひずみと温度変動によるひずみを分離している。そのうえで、得られた活荷重ひずみを影響線長の短い部材を使用することにより、軸位置の推定を行っている。車両がBWIMの測定対象域に進入した際、影響線長の短くかつひずみ応答が鋭敏な部材には、軸通過時刻と同期したひずみピークが得やすい。各レーン直下の橋軸方向に離れた2箇所のこのような部材のひずみを用いて各軸の進入時刻と退出時刻を得ている。この進入と退出の時間差から速度を算出し、通過車両の速度を一定と仮定したうえで用いている。

車両の通過速度が低下またはゼロとなったときの問題

点として、(1)ひずみのピークが時間軸上で鈍くなり、通過時刻の判定が難しくなる、(2)速度が加減速に伴い変動し、仮定した橋軸上軸位置と実際の軸位置との誤差が大きくなる、等が挙げられる。

これらの問題点を解決するために、まず、ひずみ履歴に着目した交通状況を判別する手法を構築し、その上で画像処理を用いた車両位置推定手法を提案する。本研究が対象とする車両は20t以上の重量車両とし、低速走行時の速度を0km/h-30km/hとして車両重量を計算する。

3. 渋滞時・停車時自動判別機能

3.1 交通状況に着目したひずみ履歴の特徴

車両通行速度がひずみ応答に及ぼす影響は、時刻歴上のひずみ値の傾きに見られる。単純支持タイプの桁橋である大坂橋において、主桁下フランジのひずみ応答のうち、通常時の応答を図-1に、重量車両が低速走行をしている場合の応答を図-2に示す。通常時の重量車両通過時は5秒程度の短い時間幅でのひずみ変動が生じ、そのピークがはっきりしている。これに対して、低速走行時は100秒程度の時間幅にひずみ変動が生じており、そのピークが比較的鈍い。重量車両の応答におけるピークの明瞭さと、時刻歴上のひずみ応答の裾野の広さが相違点として挙げられる。

図-1 通常時の主桁下フランジひずみ応答

図-2 渋滞時の主桁下フランジひずみ応答

図-3 区間内最小値の取得

図-4 分割間隔 10 秒, 閾値 15 のパターン

図-5 分割間隔 5 秒, 閾値 15 のパターン

3.2 実橋梁での渋滞・停止状態判別

渋滞・停車時の時間帯を抽出するイメージを図-3 に示す。まず、5 秒または 10 秒間ごとのひずみデータに区切る。次に各区間のひずみ値の最小値を抽出し、隣の区間同士で最小値の差分をとり、比較する。そして最小値の変化量が閾値を超えた場合、その区間で渋滞または停止などの状態が発生したとみなし、また最小値の変化量がマイナスとなり、ひずみに変動が生じる前の値となった時点で、その区間で渋滞などが終了したとみなす。図-3 の例では、時刻 24 秒で記録した最小値から、時刻 100 秒に至るまでの各区間の最小値は増加しているが、その後減少に転じ、時刻 110 秒付近での最小値は 24 秒で記録した最小値とほぼ同じ値となっている。よって時刻 24 秒から 110 秒の間を渋滞・停止状態と判断する。

この概念を基に構築した交通状況自動判別プログラムを、実際の国道 246 号大坂橋(鋼鉄桁単純支持)における約 3 時間分のひずみデータを用いて、閾値の設定に関して検証を行った。精度の検証方法としては、表-1 に示した閾値とひずみデータファイル(100 秒間)の分割数をパラメータとし、合計 8 パターンについて渋滞している時間帯を判定した。その結果とビデオで撮影された渋滞の時間帯の整

表-1 閾値、分割間隔のパターン

分割間隔 (秒)	閾値 (μ)				
	10	7	10	15	20
5	7	10	15	20	

合性を評価事項とした。

一例として渋滞または停止が生じた時間帯で閾値 15 のケースを図-4、図-5 に示す。帯グラフ内のグレー表示の時間帯は低速走行状態であることを示している。図中上段は交通状況自動判別プログラムによる結果を示し、下段は実際にビデオによって、撮影し、渋滞または停止の時間帯を確認した結果を示している。上段で判別された時間帯が下段の結果を網羅していれば、正解といえる。

ファイル分割間隔が短いほど、より渋滞と判別する時間帯が多くなったが、実際は渋滞状況に至っていないケースが多く、ビデオ撮影と交通状況自動判別プログラムの結果との整合が低くなった。この傾向は他の閾値の場合でも同様の傾向が見られた。この理由として、分割間隔が 5 秒程度の場合は、車両の連行などにより、活荷重応答が生じている時間が単体車両の場合と比較して、長くなった影響によるものと考えられる。

閾値による判定結果の差異を表-2、表-3 に示した。表

表-2 閾値 10 による判定結果

レーン 4 (閾値 10)		プログラムで 判別された渋滞		抽出率 (%)
		有り	無し	
ビデオで 確認した渋滞	有り	15	0	100
	無し	13		
整合率 (%)		54		

表-3 閾値 15 による判定結果

レーン 4 (閾値 15)		プログラムで 判別された渋滞		抽出率 (%)
		有り	無し	
ビデオで 確認した渋滞	有り	15	0	100
	無し	4		
整合率 (%)		79		

内の抽出率はビデオで確認された渋滞の時間帯に対して、プログラムで判別した渋滞の時間帯が合致した回数の割合を示す。また整合率はプログラムで判別した状態の回数に対して、ビデオで確認した渋滞の回数の割合を示している。抽出率は 10μ の場合と 15μ の場合で両方とも 100% であり、両パターンとも問題は見られなかった。整合率に関しては、閾値が 15μ と設定したときの方が良好であった。 10μ と設定した場合には、大型重量車両より通行量が多い乗用車や重量の軽い事業用車などの連行などの現象を、渋滞と判定してしまったものと思われる。紙面の都合上レーン 4 の結果などを代表して示したが、この傾向は他の全ての結果にも見られた。

以上の結果から、10 秒分割、閾値 15μ が大坂橋の交通状況自動判別プログラムには適しているといえる。

4. 車両重量解析システム

4.1 交通状況自動判別機能を導入した車両重量解析

本システムでは、交通状況を判別し、それぞれに適応した車重算出方法を選択することができる。図-6 に交通状況自動判別機能を導入した車両重量分析システムの処理フローを示す。

図-6 処理フロー

まず、常時測定している下フランジのひずみデータを監視し、大型車検知のために設けたトリガー機能によって、予め設定した 20μ のトリガー値を越えた時の画像を撮り、保存する。なおトリガー値は各ひずみの測定点ごとに設定している。

ひずみデータより渋滞・停車時として判別された場合、保存されている画像を後述する大型車両有無判別を実行する。車両が存在する場合は 1 秒毎の車両位置情報を取得し、さらに補間したうえで、車両重量計算を行う。渋滞・停車時でないとして判別された場合は、軸検知用のひずみ測定値から車両の位置情報を推定し、通常の BWIM を実行する。後者のケースでは画像情報を BWIM に使用しないが、通行車両のデータベース作成や、違法過積載車両の取り締まり等に活用することが期待できる。

4.2 画像を用いた車軸位置推定法

本システムでは、新たな解析技術として画像からの車両情報取得¹⁾を行っている。まず、画像による車両有無判別方法について述べる。大型車両の存在判別を行う際に処理手法の例を図-7 (写真) に示す。画像は道路に設置されたビデオカメラから取得する。カメラの撮影範囲のうち、車線ごとに撮影する枠を予め定めておく。撮影された画像からその車線の背景のカラー画像を差し引くことで、車両

図-7 車両有無判別 (画像処理法)

図-8 車種判別処理

部分が赤く表示される（図中ではグレーの部分）処理を行い、その後、画面を占める赤色の割合によって、その車線上の車両の有無が判別される。

車両有無判別により車両が存在すると判別された画像は、その後、車両位置情報を取得するための処理がなされる。車線ごとに定められた枠で撮影・抽出された画像をグレースケールの画素値を行列ベクトルとみなし、内積を利用して辞書画像との類似度を算出する。この計算によって得られるコサイン値の最も高いものが、抽出画像に移っている車種に最も近いと判断できる。図-8に処理の一例を示す。6種類の辞書画像を用意し、トレーラーの画像を入力した場合、類似度はトレーラーが 0.71 と最も適合する可能性の高い車種として算出されている。

車種が特定できれば、その車種について予め入力してある情報から車軸数、車軸間の距離の情報を取得できる。そのうえで、橋軸方向位置の画像枠から橋梁上における車両の有無、車種判別を行い、先ほどの車軸数、車軸間距離をもとに、橋梁上における車軸の位置情報を得る。

4.3 車両重量測定の概要

(1)測定橋梁

渋滞・停車時の BWIM を慢性的に渋滞が発生する首都高速道路3号線の三軒茶屋付近を対象として試みた。図-9に測定した橋梁の側面図および平面図を示す。本研究で測定した橋梁はコンクリート床版を有する鋼単純桁形式で6本の主桁からなる。車線数は4、橋長は29.8mである。

(2)測定位置と測定方法

車両重量測定用のひずみセンサを橋梁中央の主桁下フランジに配置した。車軸の進入と退出の時刻を得るために、鉛直スティフナに各車線2センサずつ配置した。これを4車線分合計12CHとした。用いたセンサは電気ノイズや通行車両の無線による影響が小さいFBGひずみセンサである。FBGセンサは光ファイバセンサであることから、長

(a) 側面図

(b) 断面図

(c) 断面詳細図

図-9 測定橋梁とゲージ配置

距離の測定が可能である。また一本のファイバで多点同時計測が可能のため、各センサが一筆書きで接続され、配線が煩雑にならない。よって首都高速道路のような連続高架橋を有し、かつ現場での測定小屋の設置位置が限られるようなケースでの多点連続測定には、特に有効である。本システムではデータ測定周波数を125Hzとしている。

車両重量測定を行うことを目的として、軸重が概知の車両を通行させ、主桁下フランジ中央部のひずみに対する多項式近似した影響線を予め算出している。この影響線を用いて低速時の車両重量推定を試みた。

4.4 低速走行時のBWIM

低速走行時のBWIMは、画像情報から時刻歴上で離散的に得られる軸位置から各時刻の影響値を算出したうえで、各軸、各時刻の影響値を補間する。そして測定ひずみとカーブフィッティングして、車両重量を算出する。

現段階において、画像情報による軸位置取得は可能であるものの、連続的な処理に関しては構築段階である。それゆえ本研究では1秒おきに画像取得そして処理を行い、軸

図-10 対象車両と通行状況

図-11 影響線

位置を算定していると仮定して、BWIMを行った。

(1) 離散データの補間

実データを用いて、離散データの補間を行い、BWIMの計算を試みる。対象橋梁区間の上り走行車線を約13秒かけて通過（平均時速約11km/h）した大型2軸車両を対象とした。この車両の前には乗用車が数台ほぼ同じような速度で走行している（図-10）。計算の前処理として車両進入直前の段階で、ひずみ値をゼロ値にオフセットしている。この処理には測定された値に含まれる温度によるドリフト分を差し引く目的があるのと同時に、乗用車による影響を差し引いている。画像情報から各軸の位置を約1秒おきに10点取得したことを仮定し、その時刻歴に合わせて軸の履歴に対応した影響線を時間軸上に配置した。図-11に1軸目の時刻歴に対応した影響線を示す。図中丸印は1秒おきに読み取った点を意味しており、それを結ぶ点線は丸印の間を線形補間したものを示している。連続的な影響線である実線と比較すると、ほぼトレースできていることがわかる。

各軸に対する影響線を軸重倍し、足し合わせたものが逆推定されるひずみ履歴となる。この逆推定されるひずみ履歴は、最小2乗法を用いて実測値の履歴との誤差2乗和が極小となるように計算される（カーブフィッティング）。図-10に最小2乗法を用いたカーブフィッティングの結果を示す。(a)に示した通常のBWIM手法と比較して、(b)に

(a) 通常BWIMのフィッティング

(b) データ補間を行った場合のフィッティング

図-12 BWIM カーブフィッティング

示した1秒おきに位置を取得し、データ補間した手法は計算値ひずみが滑らかではないものの、通常BWIMと近い計算値の形状を示しており、計算結果の差異も微小であった。計算値は最小二乗法を用いてその時刻歴上での実測値との面積差が最も小さくなるように計算される。ピーク値が実測値と比較して、計算値が小さくなった理由としては、車両の進入時の時刻が実際よりも若干早く、また退出時の時刻が実際よりも若干遅かったことから計算値ひずみが時刻歴上で広がってしまったものと考えられる。

(2) 重量車両の車両重量測定

4軸車両で、対象橋梁区間の下り走行車線を約17秒かけて通過（平均時速約8km/h）した車両（図-13）を対象とした。画像から各軸の位置を1秒おきに読み取り、その時刻歴に合わせて、線形補間した影響線を時間軸上に配置した。図-14に最小二乗法でカーブフィッティングしたBWIMの結果を示す。1秒おきに得た位置情報を用いても、対象車両の速度条件上では、実ひずみ履歴によくフィッティング出来ていることが見て取れる。この結果は算出された車両重量が実重量にかなり近いことを示している。時速約8km/hで通行している場合1秒おきの軸位置取得からでも、

図-13 対象車両と通行状況

図-14 BWIM カーブフィッティング (データ補間)

表-4 算出された渋滞車両の重量

	重量
軸 1	7.86tf
軸 2	2.33tf
軸 3	7.06tf
軸 4	10.21tf
合計	27.46tf

実ひずみの時刻歴と非常に近い計算値ひずみの時刻歴を算出することが出来ている。また、BWIM 対象域への車両の進入、退出のタイミングも良好に測れたことがこの結果に至った要因の一つであると考えられる。

算出された軸重と車両重量は表-4 に示した。

5. まとめ

研究では、ひずみデータ、画像情報の両方を解析することによる、渋滞時にも適用可能な BWIM の手法を提案した。単純桁橋におけるひずみ実測データを用いて、この手法の有効性を検討した。以下にその結果得られた知見を述べる。

- 対象橋梁では渋滞判定プログラムの閾値として 15 μ 、データ分割時間間隔を 10 秒と定めることが適している。これにより渋滞時・停車時のひずみ波形を判別することが可能となる。

- 抽出画像・辞書画像ともに画素値を値とする行列ベクトルの内積を計算することにより、抽出画像の車両を辞書内の車両に推定することができる。
- 通常時 BWIM と渋滞・停車時 BWIM を比較すると、渋滞・停車時 BWIM の画像からの車両位置情報が 10 点取得した場合に、算出される重量の差異は極めて小さい。
- 画像からの位置を 1 秒おきに取得することにより、平均時速約 8km/h で走行する大型車両の重量の活荷重ひずみに十分フィッティングする計算値を得ることが可能である。

6. 今後の課題と展望

低速走行時に速度が 20km/h を越えるような場合で、かつ今回の例のように短いスパンの橋梁を対象とする場合、1 秒間隔での軸位置情報取得が 4 点以下になる可能性があり、不十分となり得る。実ひずみの頂点にある程度フィッティングさせるためには 8 点程度は必要と考えられ、その車軸位置情報を得るためには、連続画像処理による位置情報算出間隔を 0.5 秒以下となるシステムを構築する必要があるといえる。また画像からの車種特定で大型車両が連行して通行している場合に、後方の車両の認識が難しくなることから、カメラの位置を出来るだけ高く設置することを注記したい。

謝辞

本研究は、JST (科学技術振興機構) 独創的シーズ展開事業「鋼構造道路橋のリアルタイムモニタリング・診断システム」の一環として実施したものであり、事業展開のためのフィールド提供および道路管理者としての知見に基づいた貴重なアドバイス等の多大なるご協力を賜っている西東京管理局長和泉公比古氏はじめとした首都高速道路(株)各位との共同研究による成果の一部をまとめたものである。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 時田英夫, 永井政伸, 三木千壽: 交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価, 土木学会論文集, 第 794 号/I-72, pp.55-65, 2005.7.
- 2) Moses, F.: Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, Proceedings of ASCE, Vol.105, No. TE3, pp.233-249, 1979.
- 3) 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. 10.
- 4) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一: FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学

論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003.

- 5) 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.
- 6) 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, 1987-4, pp.41-44
- 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 vol47, pp. 1083-1091, 2001.
- 8) 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.
- 9) 松井繁之, Ahmed El-hakim: RC 床版のひびわれの開閉
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.
- 10) 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.
- 11) 三木千壽, 鈴木啓悟, 加納隆史, 佐々木栄一, 石田稔,
高森博之: 鋼床版の疲労への SFRC 舗装による予防補強
とその健全性モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol.62,
No.4, pp.950-963, 2006.

(2008 年 4 月 14 日 受付)