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. Liner 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<sup>®</sup>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<sup>20</sup>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<sup>35)</sup>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<sup>60</sup>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<sup>70</sup>を提案し,また支点反 力に生じるひずみ<sup>80</sup>から各軸重を推定する手法を提案し た.松井ら<sup>90</sup>は RC 床版下面のひび害れ開閉幅を利用し BWIM を構築した.また小林ら<sup>30</sup>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<sup>3</sup>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20tf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-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(鋼鈑桁単純支持)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

		閾値(µ)			
分割間隔	10	7	10	15	20
(秒)	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 (%)
ビデオで	有り	月り 15		100
確認した渋滞	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 有り 無し		抽出率 (%)
ビデオで	有り	15	0	100
確認した渋滞	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 10 µ の場合と 15 µ 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 15 u と設定したときの方が良好であっ た. 10 µ 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.



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 11)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





(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 計測が可能なため,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



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



(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	衰−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

- 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/1-72,pp.55-65,2005.7.
- 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.
- 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.
- 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)