

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

小林裕介¹・三木千壽²・田辺篤史³

¹学生会員 工修 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (現・財団法人鉄道総合技術研究所)
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²フェロー会員 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)

³学生会員 工修 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

鋼橋の主要な損傷の一つである疲労は、交通荷重によるダメージの長期的な蓄積が原因である。このため、効果的な維持管理には長期にわたって交通荷重をモニタリングすることが不可欠である。この交通荷重を測定する手法に Weigh-In-Motion がある。しかしながら、従来の Weigh-In-Motion は一時的な交通荷重の測定に用いられるのみで、長期間継続してモニタリングできるようなシステムとなっていない。本研究では、全自動かつリアルタイムに車両重量を算出することによって、長期にわたって継続的に交通荷重を遠隔モニタリングすることのできる全自動 Weigh-In-Motion システムを構築した。さらに、このシステムを一般国道の 3 橋梁に適用し、長期間継続して交通荷重のモニタリングを行い、その特性について分析した。

KeyWords : *Weigh-In-Motion, long-term, traffic load, monitoring, bridge maintenance*

1. はじめに

橋梁などの道路構造物や舗装に対する維持管理を効果的に行う上で、交通荷重の特性を継続的に把握することは極めて重要である。例えば、各路線の交通荷重の特性が分かれば、限られた維持管理費の中でどの路線に対して優先的にその費用を投入すればよいのかを判断できる。さらに、より一層効果的な維持管理計画の策定をするためには、これまでの交通荷重の変動から今後の動向を予測することが重要であり、長期間継続して交通荷重をモニタリングすることが不可欠である。しかしながら、交通荷重に関する実態調査は、国土交通省や各公団で行われてはいるものの^{1),2)}、数ヶ月にわたる長期の実態調査としては、東名高速道路において実施された報告例^{3),4)}以外には殆どない。

交通荷重を測定する手法として、車両が橋梁上を通過した時に生じる橋梁部材の応答から、逆解析によって車両重量を算出する Weigh-In-Motion (以下、W.I.M.) が 1970 年代に Moses⁵⁾によって提案されている。この W.I.M. は軸重計と比べると非常に簡易で、かつ安価にシステムを構築できるという利点がある。また、車両が走行している状態でその重量を測定す

ることができるため、交通流を乱すことがなく、測定に必要となるセンサは橋梁の下面に設置することから、その存在を運転者に気付かれることがないといった利点もある。

我が国でも、これまでにさまざまな橋梁部材の応答を利用した W.I.M. が考案されている。筆者ら⁶⁾は、車両重量を算出するための橋梁部材の応答として主桁下フランジのひずみを利用した W.I.M. システムを構築している。また、松井・EL-Hakim⁷⁾は RC 床版下面のひび割れ開閉幅を利用し、小塩らは縦桁に生じるひずみ⁸⁾や支点反力⁹⁾を利用し W.I.M. システムを構築している。いずれも実橋梁に適用してそれらの有用性を示しているが、長期にわたって継続的に交通荷重をモニタリングするためには、データの取得や解析処理、システムの安定性などに課題が残されている。

長期間継続的に交通荷重をモニタリングする場合、膨大な数の車両についてその重量を算出するため省力化が必須であり、ひずみの測定から荷重算出までの過程を全自動とする必要がある。また、絶え間なく通過する車両の重量をすべて算出するためには、早い処理速度が求められる。

重量算出をリアルタイムに自動で処理するために

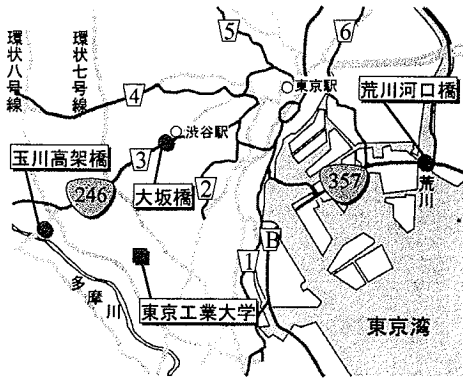


図-1 対象橋梁の位置

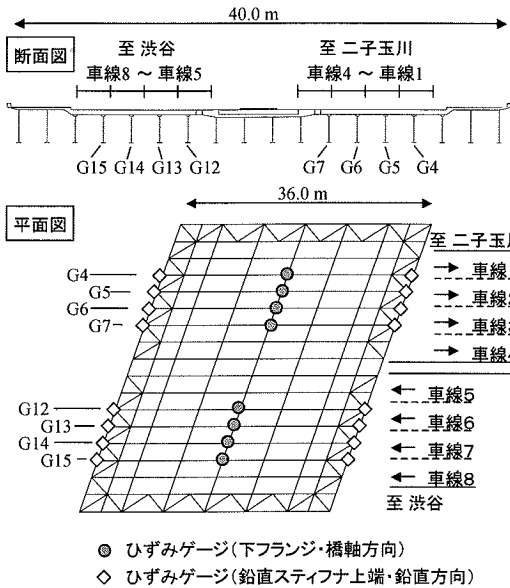


図-2 大坂橋の断面図・側面図とひずみゲージ位置

は、橋梁の温度による変形の影響の検出や、車両の走行位置の検知を自動化させるアルゴリズムの開発が不可欠である。本研究では、この問題を解決するアルゴリズムを提案し、東京都内の主要幹線道路に位置する3橋梁を対象として、長期にわたって交通荷重をモニタリングできるリアルタイム全自動処理W.I.M.システムを構築した。さらにこのシステムで、長期にわたって継続して交通荷重モニタリングを行い、その特性を分析した。

2. 対象橋梁と測定システム

(1) 対象橋梁とセンサ設置位置

本研究では大坂橋、玉川高架橋、荒川河口橋の3

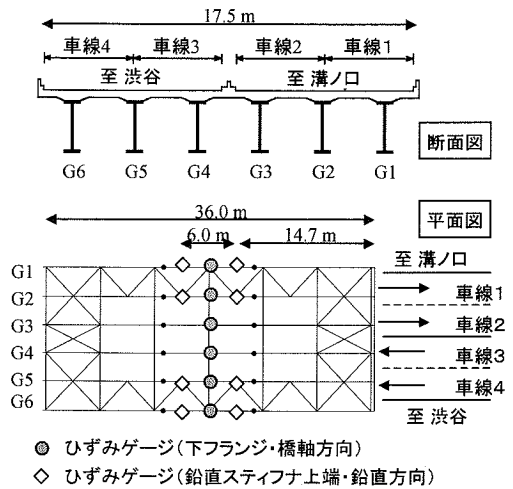


図-3 玉川高架橋の断面図・側面図とひずみゲージ位置

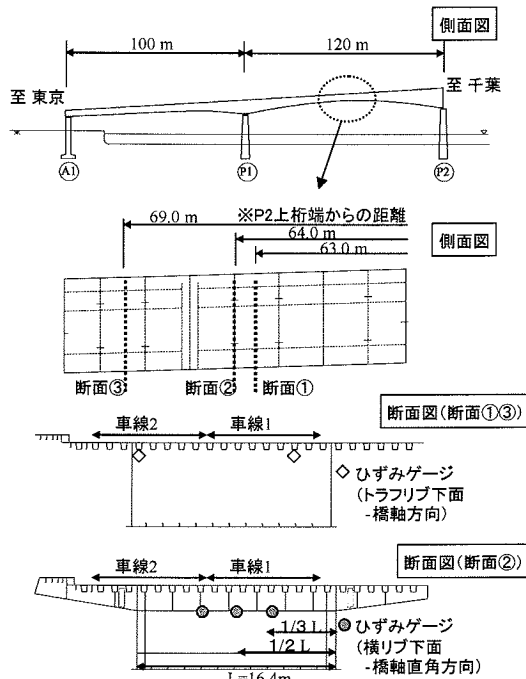


図-4 荒川河口橋の側面図・断面図とひずみゲージ位置

橋を対象としてシステムを構築した。各橋梁の位置を図-1に示す。

大坂橋は一般国道246号の渋谷の近くに位置している。図-2に大坂橋の平面図と断面図およびひずみゲージの設置位置を示す。本橋は1964年に完成し、RC床版を有する18主桁プレートガーダー橋であり、片側4車線の対面交通となっている。ひずみゲージは主桁G4~G7とG12~G15の支間中央下フランジと、同主桁の両桁端における鉛直スティフナ上端に

貼付した。W.I.M.の重量算出には主桁下フランジで測定されたひずみを用い、重量算出に必要な車軸位置の算出には鉛直スティフナで測定されたひずみを用いる。

玉川高架橋は大坂橋と同じ一般国道 246 号の二子玉川に位置している。大坂橋と同じ路線上で交通荷重をモニタリングすることを目的としている。図-3 に玉川高架橋の平面図と断面図およびセンサの設置位置を示す。本橋は 1978 年に完成し、RC 床版を有する 6 主桁プレートガーダー橋であり、片側 2 車線の対面交通となっている。ひずみゲージは全主桁の支間中央下フランジと、主桁 G1, G2, G5, G6 の 2 箇所の鉛直スティフナ上端に貼付した。大坂橋と同様に、W.I.M.の重量算出には主桁下フランジで測定されたひずみを用い、車軸位置の算出には鉛直スティフナで測定されたひずみを用いる。

荒川河口橋は一般国道 357 号の荒川に架かる橋梁で、1996 年に完成した 2 径間連続鋼床版桁橋である。図-4 に荒川河口橋の側面図と断面図およびセンサの設置位置を示す。本橋は上下線が別々の橋梁となっており、首都高速湾岸線を挟んでその両側にそれぞれ位置している。本研究では、このうち下り線の橋梁を対象としている。なお、車線数は 2 となっている。ひずみゲージは、図-4 に示す断面①と③のトラフリブ下面に 2 箇所ずつと、断面②の横リブ下面に 3 箇所貼付した。W.I.M.の重量算出には横リブで測定されたひずみを用い、車軸位置の算出にはトラフリブ下面で測定されたひずみを用いる。

(2) 測定と処理システム

W.I.M.の解析に必要なひずみは、各橋梁においてすべて 100Hz で常時測定されている。測定されたひずみは測定後すぐに光通信を利用して東京工業大学の研究室まで生データのまま転送される¹⁰⁾。研究室内ではワークステーションが 3 橋それぞれに対して一台ずつ設置されており、そのワークステーション上で転送データの受信、データの表示、W.I.M.の解析、結果の保存が行われる。W.I.M.の解析は 3 章に示す手法によってデータを受信後すぐに自動で行われる。なお、解析にはプログラムを使用しているが、解析処理の高速化のため、プログラムにはコンパイラ型言語である C 言語を用いた。

3. 全自動 W. I. M. システムの提案

(1) W. I. M. の解析フロー

本システムでは、ひずみの測定から車両重量の算

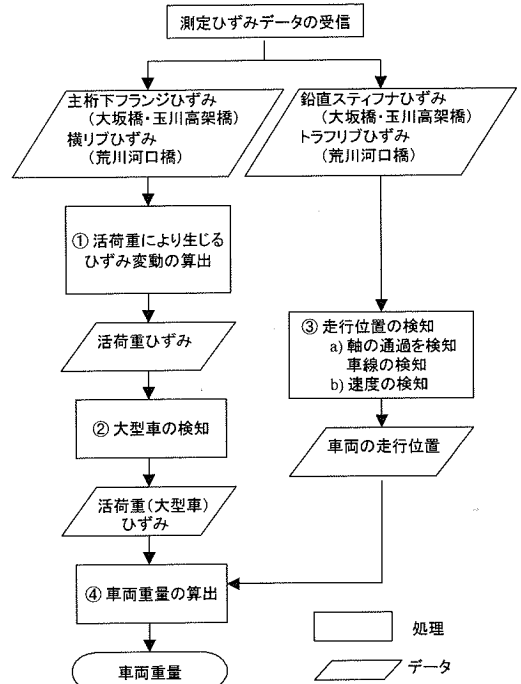


図-5 Weigh-In-Motion における重量算出フロー

出までリアルタイムかつ全自動で処理している。W.I.M.の解析では、各車軸位置における影響線縦距にそれぞれの軸重を乗じて重ね合わせて再現したひずみ変動と、実測のひずみ変動との誤差が最小となるように、車両重量を算出する⁹⁾。つまり、車両重量は実測のひずみ変動と車軸位置および影響線から算出される。影響線は予め算出しておいたものを利用するが、車両が橋梁上を通過した時のひずみ変動と車軸位置については、車両が通過する度に算出する必要がある。車両重量が算出されるまでの処理フローを図-5 に示す。以降、各項目の処理手法について示す。

(2) 活荷重により生じるひずみ変動の抽出

橋梁部材での測定されたひずみには、活荷重によって生じるひずみ（以降、活荷重ひずみ）と、温度変化によって橋梁が変形したために生じるひずみ（以降、温度ひずみ）¹¹⁾⁻¹³⁾との 2 つの成分が含まれている。W.I.M.の解析では、活荷重ひずみの変動から車両重量を算出するため、測定値から活荷重ひずみの成分だけを抽出する必要がある。

温度ひずみは温度の日変動や季節変動に伴って変動するため、活荷重ひずみと比較すると極めて長周期的な変動である。このことから、活荷重ひずみと温度ひずみの分離にはローパスフィルターを用いることが考えられる。しかし、本システムではリアル

タイムに交通荷重をモニタリングすることを目的としているため、測定ひずみが転送された後、即座に活荷重ひずみを得る必要があり通常のローパスフィルターは使えない。

ローパスフィルターの種類としては、IIR フィルター、FIR フィルターなどが考えられる¹⁴⁾。しかし、IIR フィルターでは時間的な位相差が生じること、FIR フィルターではそのフィルター特性により実時間処理ができない等、いずれもリアルタイム処理に適用することができない。

本システムでは活荷重ひずみと温度ひずみを分離する手法に、測定ひずみの頻度分布における最頻値を利用するものを考案した。ここで、測定ひずみの頻度分布作成方法を図-6 に示す。測定ひずみはデジタルの離散データである。この離散ひずみデータが、あるひずみの階級幅に何個含まれているかを計数して頻度分布を作成する。

玉川高架橋において、晴れの日に主桁 G1 下フランジの支間中央で測定された 24 時間のひずみを図-7 (a) に、この測定ひずみデータにおける午前 4 時から 2 分間のデータとその頻度分布を図-7 (b) に示す。24 時間のひずみ変動を見ると、温度変化による長い周期の変動の上に活荷重によるひずみ変動が重なっていることが分かる。しかし、数分程度の間では通常、温度変化は殆どないため、温度ひずみの変動は無視できるほど小さく温度ひずみが一定値として扱える。つまり、活荷重ひずみの変動がなければ、測定ひずみは一定値となり、たとえ活荷重ひずみの変動があったとしても、それ以外の部分では一定となっていることから、100Hz で測定されているひずみ値の頻度分布を作成すると、図-7 (b) のようにその時間における温度ひずみの値で最頻値が得られることとなる。

この手法により温度ひずみを 1 分に 1 度算出し、測定ひずみからその温度ひずみを差し引きすることにより、活荷重ひずみを常時算出している。図-7 (a) に示される 24 時間の測定ひずみから、活荷重ひずみと温度ひずみに分離した結果を図-7 (c) に示す。

同位置で日射のない日に測定された 24 時間のひずみ変動を図-8 (a) に、この測定ひずみを活荷重ひずみと温度ひずみに分離した結果を図-8 (b) に示す。日射の有無にかかわらず、測定ひずみから低周波成分である温度ひずみを分離し、活荷重ひずみを算出できていることが分かる。

以上のような頻度分布の最頻値を利用した分離手法は、その処理過程に頻度分布の作成、最頻値の抽出しかない。このため、位相差がなく実時間処理が可能であり、リアルタイムでの処理を目的としてい

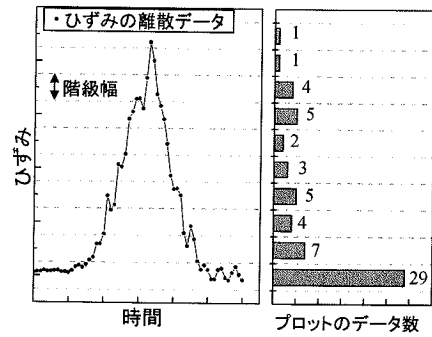
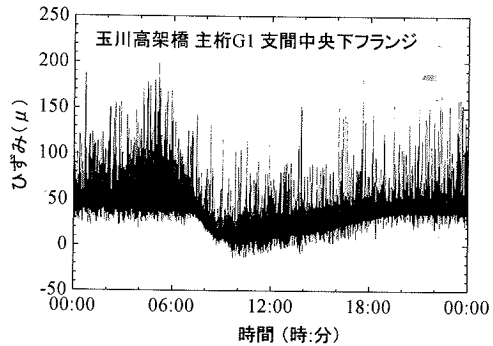
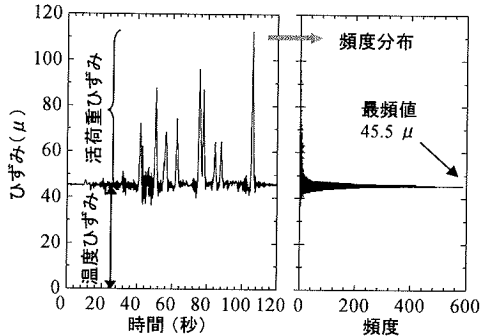


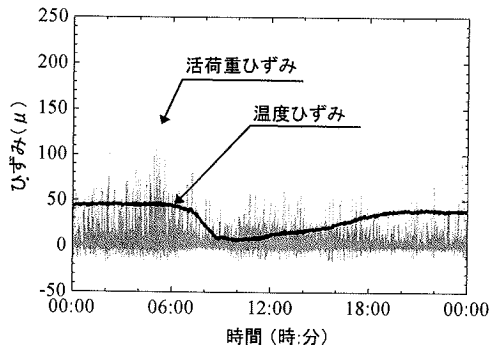
図-6 測定ひずみの頻度分布作成



(a) 主桁G1支間中央下フランジにおける測定ひずみ(24時間)

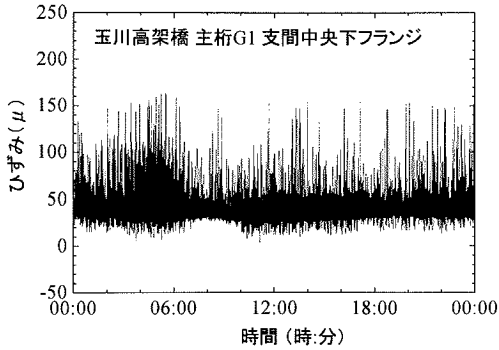


(b) 主桁G1支間中央下フランジにおける測定ひずみ(120秒)とその頻度分布

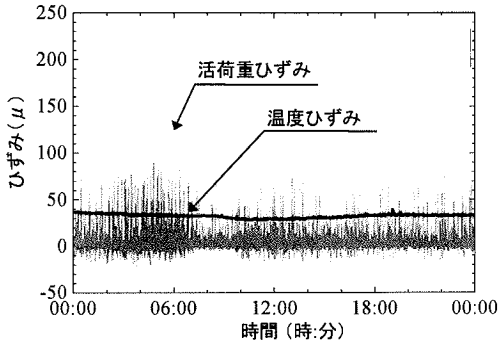


(c) 活荷重ひずみと温度ひずみの分離

図-7 活荷重によるひずみ変動の算出(晴れ)



(a) 主桁G1支間中央下フランジにおける測定ひずみ(24時間)



(b) 活荷重ひずみと温度ひずみの分離

図-8 活荷重によるひずみ変動の算出(曇り)

る本モニタリングのようなシステムに非常に有効である。

(3) 大型車両の検知

本研究では、特に 20tf 以上の大型車を対象として、重量を算出している。常時測定されているひずみから、大型車が通過した時の波形を抽出するために、本システムではトリガー機能を設けた。この機能は、活荷重ひずみが、予め設定したトリガー値を越えた時にデータを抜き出すものである。なお、このトリガー値は、影響線を算出するために実施した走行試験の結果から、20tf の大型車が検知できるように各ひずみの測定点に対して設定した。したがって、W.I.M.の重量算出に用いる各ひずみの測定点ごとにトリガー値は異なっている。

大型車が連行した場合にもそれらによって生じたひずみ変動の全てが抽出できるように、抽出するデータの時間幅を変動させている。図-9 に示すようにひずみの値がトリガー値を越える数秒前から、ひずみの値がトリガー値を下回ってから数秒後までを抜き出している。

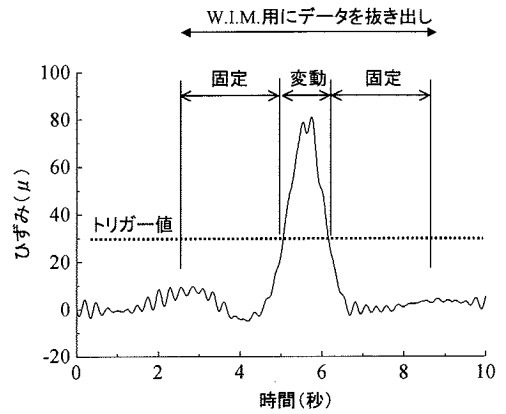


図-9 大型車検知のためのトリガー監視機能

(4) 通過車両の走行位置・走行車線の自動検知

通過車両の橋梁上での走行位置は、車線と橋軸方向の位置によって表せる。このうち橋軸方向の位置は、車両が橋梁上の基準位置を通過した時刻と車両の速度から、以下の式によって算出している。

$$x = x_0 + v \times (t - t_0) \quad (1)$$

ここで、 x は橋梁上における車軸の位置、 t は時刻、 x_0 は橋梁上の基準位置、 t_0 は車軸が基準位置を通過した時刻、 v は車両の速度を示す。車軸の位置 x を算出するには、車軸が基準位置を通過した時刻 t_0 と車両の速度 v を検知する必要がある。

本システムでは、車軸が基準位置を通過した時刻と車線の判定は、大坂橋と玉川高架橋では主桁の鉛直スティフナ（鉛直方向ひずみ）を、荒川河口橋では床版下面のトラフリップ（橋軸方向ひずみ）を利用した。これらの部材では、その直上を車軸が通過した時のみひずみが生じるため、車軸が通過したことを検知するのに適している。車両の速度の算出については次節に示す。

図-10 に玉川高架橋において橋梁上を車両が通過した際の、主桁 G1 と G2 の鉛直スティフナに貼付したひずみゲージで測定されたひずみ変動を示す。車両が直上の車線を通過した時にのみ圧縮ひずみが生じており、このひずみ変動のピークを検知することで、車軸が基準位置つまり鉛直スティフナの直上を通過した時刻を検知することができる。また、各車線に対応させて測定点を設けることによって、どの測定点でひずみが生じたかを検知すれば、車両の走行車線についても判定することができる。

本システムでは全自動処理を目的としているため、ひずみ変動のピークについてはコンピュータによる自動検知とする必要がある。図-11(a) に示す玉川高

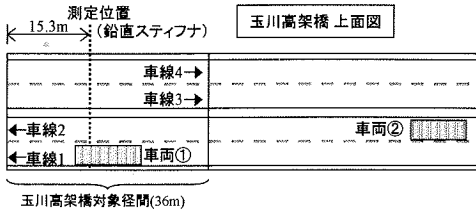
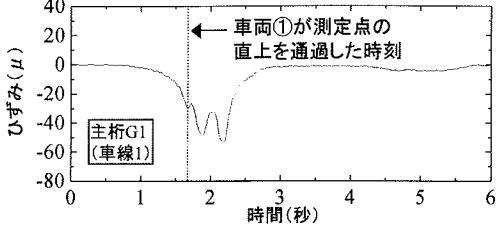
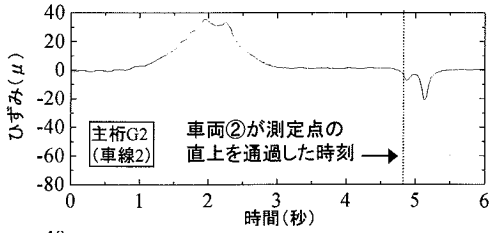


図-10 走行車線と基準位置通過時間の検知

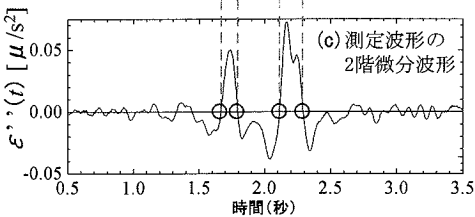
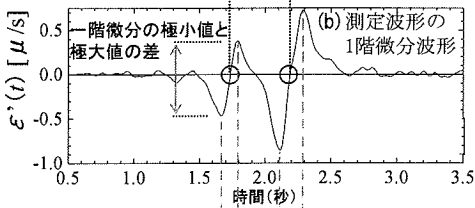
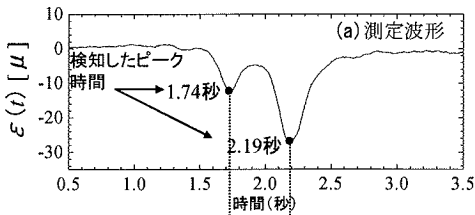


図-11 ひずみ波形のピーク検知

架橋の鉛直スティフナで測定されたひずみを例にとり、以下に自動ピーク検知手法を示す。なお、図-11 (a) は 2 軸車が通過した時の測定ひずみ波形である。

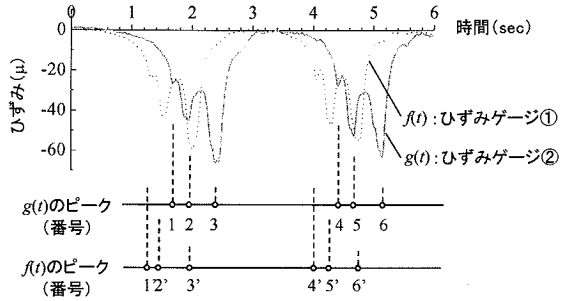
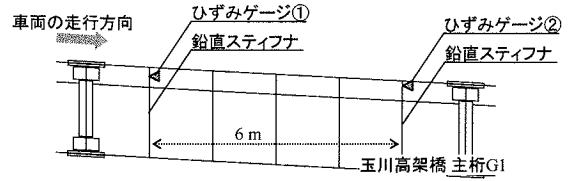


図-12 ひずみ波形の時間差による速度算出

- ①測定ひずみ(図-11(a))の1階微分波形(図-11(b))、および2階微分波形(図-11(c))を算出する。
- ②2階微分波形が0となる箇所から、測定ひずみの1階微分における極小点の値を求める。
- ③測定ひずみの1階微分において、②で求めた極小点以降で最初に極大となる点の値を②と同様に求める。
- ④②と③で求めた極小値と極大値の差が設定値以上であれば、その極小点と極大点の間で0となった時間が、車両の軸が鉛直スティフナの直上を通過した時間となり、1.74秒および2.19秒が求まる。

(5) 通過車両の走行速度

橋梁上での通過車両の軸位置を算出するために必要な、通過車両の速度について、その算出方法を示す。本システムでは速度の算出にも、鉛直スティフナおよびトラフリブでの測定ひずみを用いている。図-2～図-4に示すように、大坂橋・玉川高架橋では同じ主桁上にある2箇所の鉛直スティフナに測定点を設け、荒川河口橋では同一トラフリブ上に2箇所の測定点をおき、車両がそれら2箇所の直上を通った時間差から、通過車両の速度を算出する。

玉川高架橋における主桁G1の2箇所の鉛直スティフナで測定されたひずみ波形を図-12に示す。ここで、ひずみゲージ①で測定されたひずみ波形を $f(t)$ 、ひずみゲージ②で測定されたひずみ波形を $g(t)$ とすると、 $f(t)$ におけるピーク時間と $g(t)$ におけるピーク時間の差を求めればよい。但し、コンピュータに自動で計算させるためには、 $f(t)$ におけるピーク時間と $g(t)$ におけるピーク時間との対応、例えば $f(t)$ におけるピーク1'と $g(t)$ におけるピーク1が対応している、

といったことを予めコンピュータに認識させる必要がある。このピーク時間の対応は、人間の目で見た場合は、波形の形状を参考として迷うことなく対応を取ることができる。しかしながら、コンピュータにピーク時間のデータだけを与えた場合、その対応を取る処理は非常に煩雑となる。

そこで、本システムではこのピークの時間を利用せず、ひずみ波形の形状に着目して車両が2箇所の測定点の直上を通過した時間差を算出することとした。いま、2箇所のスティフナで測定されたひずみ波形 $f(t)$ と $g(t)$ が相似形であると仮定すると、式(2)で示される相関関数における $C(\tau)$ が最大となる時の τ が、2つの波形の時間的なずれ量となる¹⁵⁾。

$$C(\tau) = \int f(t-\tau) \cdot g(t) dt \quad (2)$$

図-12の2つのひずみ波形から算出した $C(\tau)$ を図-13に示す。 $C(\tau)$ の最大値より、2箇所の測定点を通じた時間差が0.37秒と求まる。2箇所の測定点間の距離が6mであることから、この時の車両の通過速度は16.2m/secとなる。但し、図-12では車両が2台連行しているが、このような場合では2台の速度を同じと仮定して算出している。ここで、ピーク時間の差から2台の車両の速度を算出し、相関関数で算出した速度と比較した。その結果、1台目が15.9m/sec、2台目が16.4m/secであり、本システムで採用した相関関数を用いて算出した速度16.2m/secが十分な精度であることが確認できた。

(6) 重量算出

重量の算出には、大坂橋と玉川高架橋ではそれぞれ図-2と図-3に示す支間中央下フランジで測定されたひずみを、荒川河口橋では図-4に示す横リブ下面で測定されたひずみを用いる。車両重量は、このひずみ波形とこれまでに得られた車両の走行位置の情報から、影響線を利用して算出される^{9),10)}。解析に必要な影響線は、予め重量が既知な試験車を用いた走行試験から算出している^{9),10)}。試験車は荷台に錘を載せた3軸トラックで、前輪5.61tf、後輪第1軸7.81tf、後輪第2軸7.54tfである。

本システムの重量算出精度を検証するため、走行試験で得られたひずみ波形から試験車重量を推定した。但し、走行試験では車両を複数回走行させており、精度の検証には、影響線を算出したひずみ波形とは別のひずみ波形を用いている。結果を表-1に示す。いずれの橋梁においても、試験車重量20.96tfに対し算出重量の平均は±0.5tf以下、分散は0.7以下と精度良く算出できており、本システムの解析精度が十分であることを確認できた。

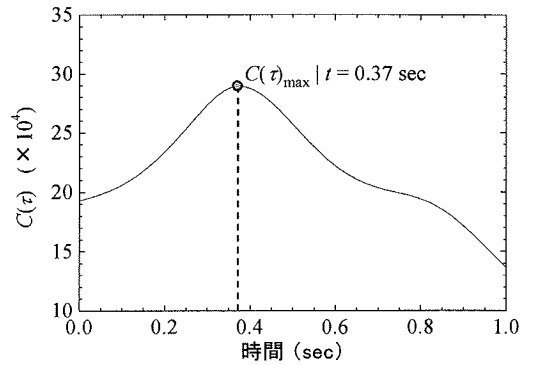


図-13 相関関数による時間差の算出

表-1 W.I.M.の精度 (試験車重量の算出)

	試験回数	平均重量(tf)	分散
大坂橋	31	20.57	0.53
玉川高架橋	25	21.22	0.69
荒川河口橋	9	20.57	0.65

試験車重量 20.96

4. 交通荷重の特性

本研究では、構築したW.I.M.のシステムを用いて、3橋で交通荷重のモニタリングを継続的に実施している。本章では、2002年9月から現在までの結果について考察する。ここでは、特にモニタリング期間における交通荷重の変動、および3橋での交通荷重の特性の違いについて着目した。なお、本システムでは20tf以上の大型車両を対象としている。

(1) 交通量

図-14に3橋梁における交通量の変動を示す。3橋梁とも平日・土曜日・休日で交通量が大きく異なっている。また、モニタリング期間を通して、そのばらつきはあるものの、交通量が変化のない傾向を示していることが分かった。

表-2に、警視庁が実施した交通量調査(平成13年11月実施)の結果¹⁶⁾と、本モニタリングから得られた20tf以上の車両についての日平均通過台数と昼間(7時~19時)平均通過台数を示す。また、測定台数における日平均通過台数に対する昼間平均通過台数の割合、大型車台数における20tf以上の台数の割合についても表-2中に示す。但し、大坂橋については交通量調査の結果が昼間交通量のみであったため、日交通量については記載していない。なお、交通量調査における大型車は、最大積載量5tf以上の大型貨物車、大型特殊車、大型バスを表す。参照した交通量調査の地点は、大坂橋については大橋交

表-2 交通量比較

		交通量調査(警視庁実施)			モニタリング-20tf以上		
		交通量 [台/日]	大型車台数 [台/日]	大型車 混入率[%]	測定台数 [台/日]	測定台数の 日交通量に対する 昼間交通量[%]	大型車台数に対する 測定台数の割合[%]
大坂橋	全車線	(47,027)	(5,239)	(11.1)	648 (320)	49.4	(6.1)
	上り	(23,513)	(2,726)	(11.6)	268 (133)	49.6	(4.9)
	下り	(23,514)	(2,513)	(10.7)	380 (187)	49.2	(7.4)
玉川高架橋	全車線	64,399 (37,592)	6,307 (3,095)	9.8 (8.2)	1,603 (531)	33.1	25.4 (17.2)
	上り	33,542 (20,464)	3,266 (1,659)	9.7 (8.1)	732 (212)	29.0	22.4 (12.8)
	下り	30,857 (17,128)	3,041 (1,436)	9.9 (8.4)	871 (319)	36.6	28.6 (22.2)
荒川河口橋	全車線	58,339 (34,660)	12,851 (7,624)	22.0 (22.0)	測定対象外	---	---
	上り	28,679 (16,073)	6,108 (3,490)	21.3 (21.7)	測定対象外	---	---
	下り	29,660 (18,587)	6,743 (4,134)	22.7 (22.2)	1,955 (1,225)	62.7	29.0 (29.6)

※()内は昼間交通量

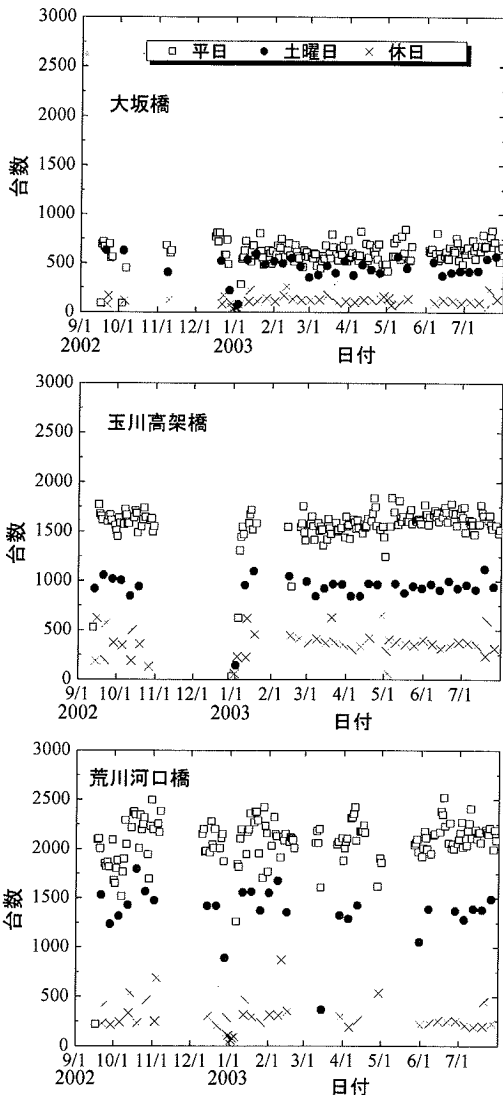


図-14 3橋の交通量の変動

差点(橋梁との距離 100m), 玉川高架橋については同橋梁上, 荒川河口橋については舞浜(橋梁との距離約 1km)である。

本モニタリングで測定された 20tf 以上の日交通量は、大坂橋で 648 台(昼間交通量は 320 台で大型車の 6.1%), 玉川高架橋で 1603 台(大型車の 25.4%), 荒川河口橋の下り線で 2048 台(大型車の 30.4%)であった。

大坂橋と玉川高架橋は同一路線である一般国道 246 号に位置し、2 橋の距離はわずか 10km ほどである。この 2 橋における昼間の大型車の混入率は、大坂橋が 11.1%, 玉川高架橋が 8.2%で、大坂橋の方が約 3%高いが、大型車台数に対する 20tf 以上の車両の割合は大坂橋が 6.1%, 玉川高架橋が 17.2%で、玉川高架橋の方が約 11%も高い。これは図-1 に示されるように、大坂橋と玉川高架橋との間では、主要幹線道路である環状七号線と環状八号線が一般国道 246 号と交差しており、この路線からの流入・流出によるものと考えられる。このことから、ある路線において交通荷重をモニタリングする際、幹線道路が交差する路線である場合は、その交差点の前後にモニタリングポイントを設けることが望ましいと言える。

路線の異なる玉川高架橋と荒川河口橋の下り線について比較すると、交通量は両橋梁とも約 3 万台であるが、大型車の日交通量は荒川河口橋が 6743 台、玉川高架橋が 3041 台で荒川河口橋の方が 2.1 倍多く、本モニタリングで測定された 20tf 以上の車両については、荒川河口橋が 2048 台、玉川高架橋では 871 台で荒川河口橋の方が 2.3 倍多い。

以上のように、路線が同一でも主要な幹線道路を横切ると交通荷重特性が異なること、路線が異なると交通量が同じでも大型車混入率が大きく異なることが確認できた。

(2) 重量分布

モニタリング期間を通じた重量別頻度の変動を3橋についてそれぞれ図-15に示す。結果は、1ヶ月の日平均(平日)で示している。また、重量の上位95%が含まれる階級値と等価荷重を、図-15中の表に示す。等価荷重とは、式(3)で示される重量の3乗平均値の3乗根のことで、変動する交通荷重と同等の疲労損傷度を与える一定の荷重を表す¹⁷⁾。

$$W_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n W_i^3}{n}} \quad (3)$$

ここで、 W_{rmc} は等価荷重、 W は車両重量、 n は測定された車両台数を表す。各橋梁とも重量分布、上位95%の階級値および等価荷重にほとんど変動がないことが分かる。

3橋での重量分布の比較を行った。図-16に、2003年7月における3橋の重量の相対頻度分布を示す。3橋での分布形状がほぼ一致している。また、図-15中に示した上位95%の階級値は52.5~55.5tf、等価荷重が概ね33~35tfで殆ど差が無いことが分かる。つまり、3橋における20tf以上の車両については、通過台数はそれぞれ異なるが、重量ごとの構成比率、上位95%の階級値、等価荷重などの特性は3橋で同様であるということが言える。

(3) 重量(50tf以上)車両の走行

道路構造物や路面舗装に多大なダメージを与えるような、特に重量の重い車両について検討を行った。

a) 重量車両の検証

図-15の重量頻度分布を50tf以上について拡大したものを図-17に示す。各橋梁において、かなりの数の50tf以上の重量車両が走行していることが分かる。

これらの重量車両の走行を実際に確認するため、玉川高架橋において交通荷重のモニタリングと同時に交通のビデオ撮影を行った。撮影は、大型車交通量が比較的多く、かつ交通が渋滞していない明け方の6時から1時間実施した。なお、測定された重量と撮影された車両との整合性を得るために、ビデオの時計をW.I.M.システムの時計に同期させた。図-18に、撮影中に測定された50tf以上の車両の写真と、支間中央の主桁下フランジで測定されたひずみ波形を示す。車両は2台が運行しており、算出重量は1台目が61.2tf、2台目が72.6tfで、2台とも荷台に建設資材を積載した6軸のセミトレーラーであった。

b) 最大荷重

本モニタリング期間中に計測された最大荷重は、大坂橋で103.7tf、玉川高架橋で123.2tf、荒川河口橋で99.0tfであった。

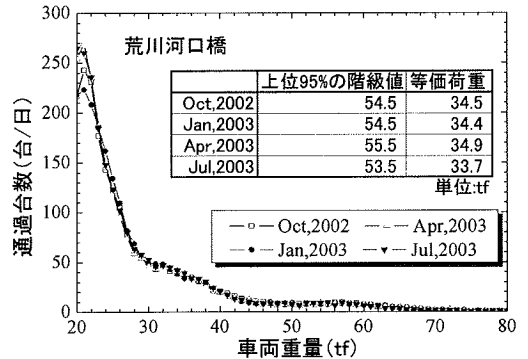
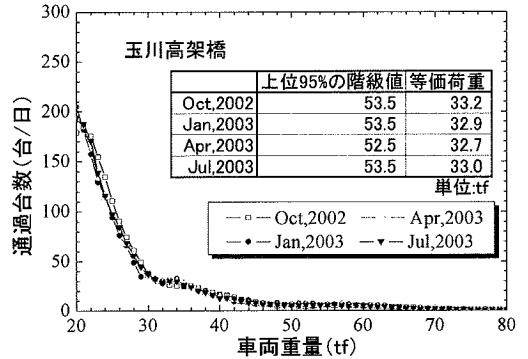
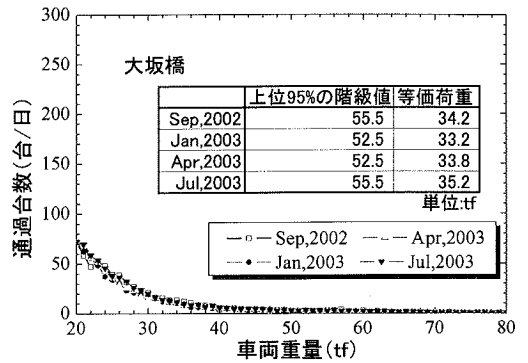


図-15 重量頻度分布の年変動

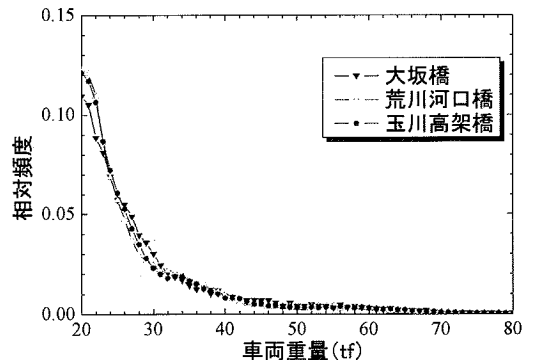


図-16 重量相対頻度分布の比較

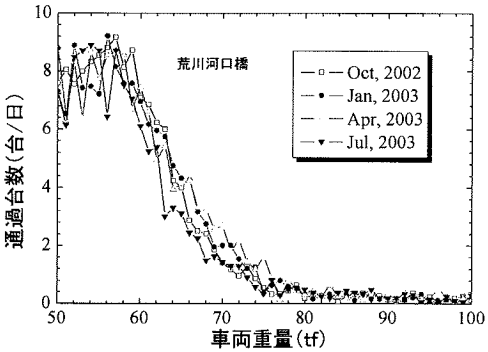
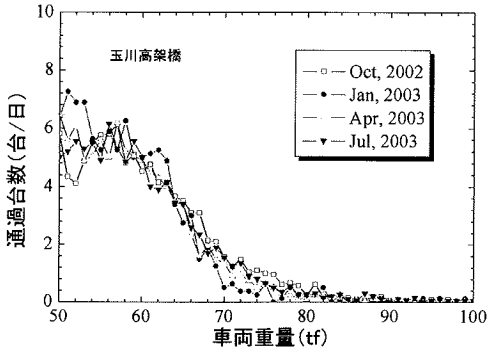
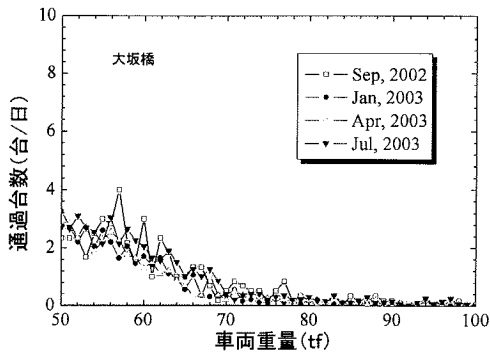


図-17 重量頻度分布 (50tf以上)

本システムでは、鉛直スティフナもしくはトラフリップで測定されたひずみ波形から車軸の通過を検知しており、連続して通過した車軸どうしの時間差と走行速度から車軸間隔を算出し、車両の車種について推定することができる。

図-19 に荒川河口橋で記録された 99.0tf の車両によって生じたトラフリップにおけるひずみ波形を、表-3 に車軸どうしの時間間隔と走行速度から算出した軸間隔を示す。この軸間隔と、トラックメーカーの車両カタログに記載されている各車両の軸間隔を比較したところ、荒川河口橋で最大荷重を記録した車両は、図-19 中に示したトラッククレーンが最も近い車両であった。比較結果を表-3 に示す。

このトラッククレーンは、車両総重量が 98.0tf (台

車両① セミトレーラ(6軸) 算出重量 61.2tf



車両② セミトレーラ(6軸) 算出重量 72.6tf

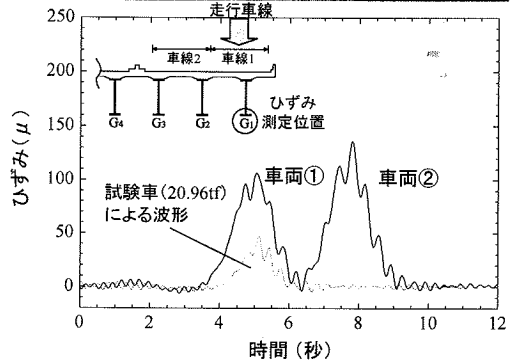
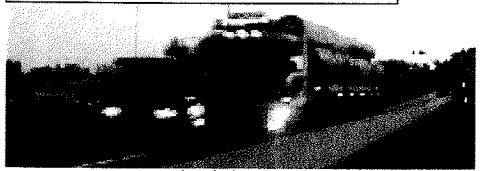


図-18 ビデオ撮影による重量車両の検証

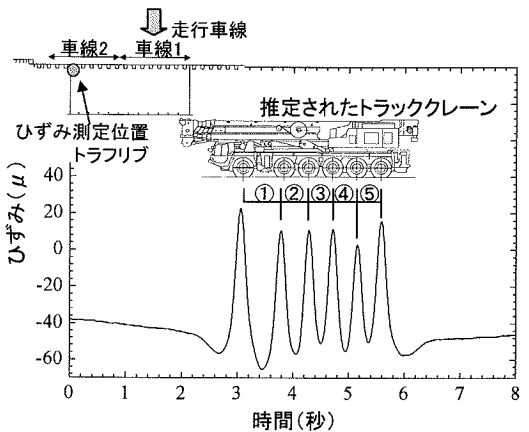


図-19 トラフリップのひずみ波形による軸間隔算出

表-3 軸間隔からの車種推定

	総重量 (tf)	軸間隔(m)				
		①	②	③	④	⑤
測定値	99.0	2.81	1.96	1.62	1.73	1.66
推定された トラッククレーン	98.0	2.85	1.70	1.75	1.65	1.70

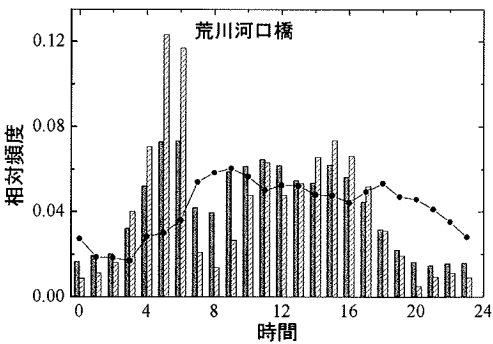
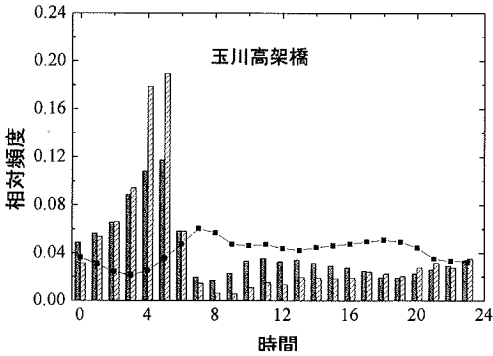
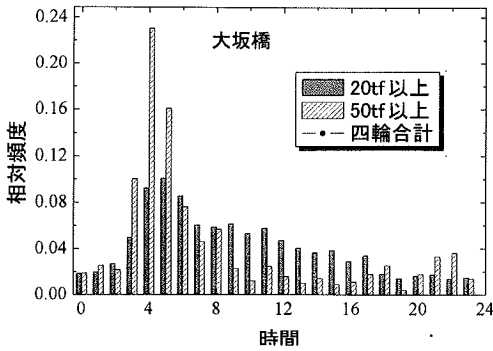


図-20 時間帯別通過台数の相対頻度

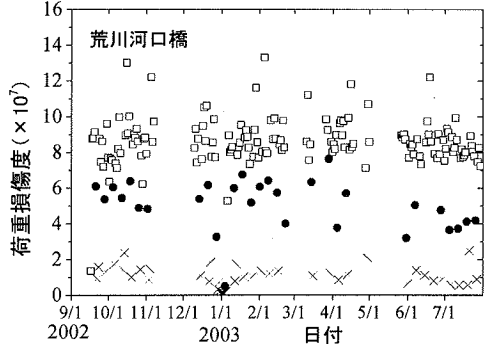
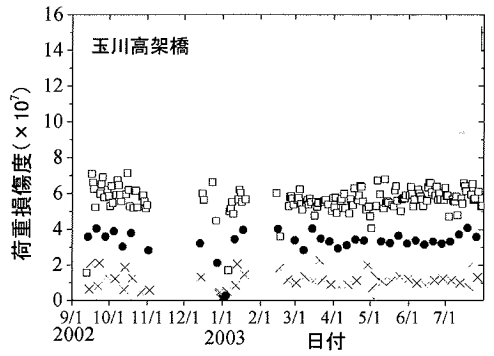
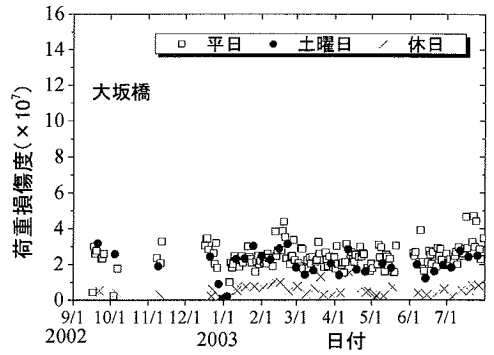


図-21 荷重損傷度

車 49.0tf, 旋回体+ブーム 49.0tf) で、公道を走行する場合には、旋回体及びブームを別送し、台車のみで走行しなければいけないことが法律で定められている。しかしながら、測定重量から旋回体とブームを台車に載せたまま走行していたことが分かる。本システムはリアルタイムで車両重量を算出することができるため、このような違反車両の取締まりにも活用できる。

c) 時間帯別通過台数

図-20 に、50tf 以上、20tf 以上の車両について、2003 年 7 月の平日における時間帯別通過台数の相対頻度分布を示す。また、交通量調査による四輪合計（二輪車および軽車両を除く車両の合計）の時間帯別通過台数も同図に示す。但し、大坂橋については交通量調査のデータが昼間交通量のみであったため、グ

ラフからは省いた。玉川高架橋と荒川河口橋では、四輪合計と 20tf 以上の車両の分布が大きく異なっていることが分かる。特に四輪合計は 8 時前後にピークがあるのに対し、20tf 以上の車両では 4 時から 6 時頃にピークがあり、大坂橋でも 20tf 以上の車両については 4 時から 6 時にピークがある。これは、大坂橋と玉川高架橋の国道 246 号と荒川河口橋の国道 357 号では、8 時前後の通勤時間帯に交通量が集中するが、20tf 以上の車両はその時間帯を避けてより早い時間帯に通行するためと考えられる。

50tf 以上の重量車両については、大坂橋と玉川高架橋では 4 時から 5 時台にかけて、荒川河口橋では 5 時から 6 時台にかけて、交通量が際立って多いことが分かる。

(4) 疲労損傷への影響

ここでは、交通荷重の疲労に対する厳しさについて検討する。交通荷重の疲労損傷の累積への寄与は、以下の式で示される荷重損傷度^{17),18)}によって評価する。この荷重損傷度は交通量の関数であり、交通自体の特性値である。

$$D_w = W_{rmc} \times n \quad (4)$$

ここで、 D_w は荷重損傷度を、 W_{rmc} は等価荷重を、 n は測定された車両台数を表す。

3橋の荷重損傷度を図-21に示す。結果は一日あたりの荷重損傷度を示している。但し、本測定では重量が20tf以上について計測しているため、算出される等価荷重は相対的な評価となる。

荒川河口橋と玉川高架橋では、平日と土曜日と休日とで荷重損傷度に明らかな差が認められ、大坂橋でも平日・土曜日と休日とで荷重損傷度に差が見られる。また、この平日・土曜日・休日ごとの荷重損傷度は、各橋梁の交通量と同様にモニタリング期間を通して、ばらつきはあるもののほぼ変化のない傾向を示している。

3橋の中では、荒川河口橋の荷重損傷度が最大で、平日については大坂橋の3倍程度であった。このことから、大坂橋と玉川高架橋のある国道246号よりも、荒川河口橋のある国道357号の方が、疲労に関して厳しい状況にあると言える。国道246号では玉川高架橋における平日の荷重損傷度が大坂橋の2倍で、同じ路線でも区間により異なることが分かった。

5. 結論

本研究では、長期にわたって継続的に交通荷重をモニタリングするために、全自動かつリアルタイムのW.I.M.システムを構築した。このシステムでは、以下の新しい技術を用いた。

- ① 測定ひずみに含まれる温度変動によって生じるひずみを算出し、活荷重によるひずみ変動を常時得ることのできるシステムとした。また、温度ひずみの算出に、測定ひずみにおける頻度分布の最頻値を利用することによって、処理の高速化を図った。
- ② W.I.M.の解析に必要な橋梁上における車両の走行位置を、プレートガーダー橋では主桁の鉛直スティフナにおける応答ひずみから、箱桁橋では床版下面のトラブリブにおける応答ひずみから算出することを可能にした。また、その算出過程では、車両が通過した際のひずみ波形のピークを、波形の2階微分を利用して検知し、橋軸方向に離れている2箇所の測定点を通過した時間差を、相

関関数を用いて検知したことにより、その過程を自動化することができた。

構築したW.I.M.のシステムを一般国道にある大坂橋、玉川高架橋、荒川河口橋に適用し、20tf以上の大型車を対象として、交通荷重を長期にわたって継続してモニタリングした。本モニタリング期間から得られた各橋梁における交通荷重の特性を以下に示す。

- ① 長期間継続して交通荷重をモニタリングしたことにより、3橋における交通量、重量頻度分布、荷重損傷度に大きな変動の傾向がないことを確認した。
- ② 大坂橋と玉川高架橋は同一路線に位置しているが、2橋の間で交差する幹線道路からの交通の流入・流出により、大型車台数に対する20tf以上の車両の割合は2倍以上異なり、同一路線でもモニタリング地点を複数設置しなければいけないケースを確認した。
- ③ 本モニタリング期間において計測された最大荷重は、大坂橋で103.7tf、玉川高架橋で123.2tf、荒川河口橋で99.0tfであった。荒川河口橋で計測された最大荷重は、トラックレーンであることが推定でき、旋回体およびブームを載せたままの違法な走行であることが分かった。
- ③ 3橋とも午前8時頃に交通量のピークがあり、20tf以上の車両はその時間帯を避けて4時から6時頃に多く通行する。50tfを越える重量車両は明け方の5時台に特に集中する。
- ④ 3橋における荷重損傷度の調査から、一般国道246号よりも、一般国道357号の方が疲労にとって厳しい環境にあることを示した。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：橋梁に生じる応力の実態調査研究，第23回建設省技術研究発表会，1969。
- 2) 阪神高速道路公団：阪神高速道路における活荷重実態調査と荷重評価のための解析，1984。
- 3) 石井孝男，篠原修二：東名高速道路の交通荷重測定と荷重特性について，土木学会論文集，No.453/V1-17，pp.163-170，1992。
- 4) 石井孝男，井口忠司，篠原修二：東名高速道路における通行車両の連行特性，土木学会論文集，No.492/V1-23，pp.29-46，1994。
- 5) Moses, F. : Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979.
- 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，Vol.21, No.4, pp.41-45, 1987。

- 7) 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.407-417, 1989.
- 8) 小塩達也, 山田健太郎, 小林直人, 水野良由 : 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.A, pp.1082-1091, 2001.
- 9) 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.49.A, pp.743-753, 2003.
- 10) 三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林裕介 : 光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.31-40, 2001.
- 11) 西川和廣, 山本悟司, 鹿嶋久義 : 温度変化に伴う橋梁の挙動に関する計測結果の分析, 土木学会第 47 回年次学術講演回概要集, I-449, pp.1074-1075, 1992.
- 12) 小林裕介, 三木千壽, 出野麻由子, 齊藤勝晶 : 合成桁橋梁の健全度モニタリングを目的とした温度変形挙動の検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.979-985, 2002.
- 13) 小林裕介, 古庄龍悟, 三木千壽 : 鋼床版箱桁橋梁の温度変形挙動について, 第 57 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, 57 巻, pp.1443-1444, 2002.
- 14) イブ・トーマス, 中村尚五 : デジタル信号処理, 東京電機大学出版局, 1999.
- 15) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 16) 交通量統計表, 警視庁交通部, 2001.
- 17) 三木千壽, 館石和雄, 杉本一朗 : 道路橋の疲労照査のための活荷重に関する一考察, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.63-68, 1991.
- 18) 玉越隆史 : 道路橋示方書 (鋼橋編) の疲労設計の考え方, 第 6 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.11-21, 2003.

(2003. 10. 14 受付)

LONG-TERM MONITORING OF TRAFFIC LOADS BY AUTOMATIC REAL-TIME WEIGH-IN-MOTION

Yusuke KOBAYASHI, Chitoshi MIKI and Atsushi TANABE

Long-term cumulative damage by traffic loads causes fatigue problems which are primary defects in steel bridges. For this reason, it is necessary to monitor the traffic loads continuously for effective maintenance. In order to measure the traffic loads, the system called W.I.M.(Weigh-In-Motion) has been used. However, the conventional W.I.M. has not been a system which can continuously monitor the traffic loads for a long term.

In this study, the remote monitoring system of automatic real-time W.I.M. was developed. This system was applied to three existing bridges. The traffic loads on the bridges has been monitored continuously for long term and the characteristics of the traffic loads were analyzed.