

2 径間連続鋼桁橋を用いた BWIM の精度

Accuracy of BWIM Using Two-Span Continuous Steel Girder Bridge

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⁺⁺⁺⁺
 Eiki Yamaguchi, Kazushi Matsuo, Shinichi Kawamura, Yusuke Kobayashi, Masafumi Mori, Kunihiro Momota, Tatsushi Nishinohara

*Ph. D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

**九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

***博士 (工学) 呉工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒737-0004 広島県呉市阿賀南2-2-11)
 (現 徳山工業高等専門学校)

⁺修士 (工学) 東京工業大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
 (現 (財) 鉄道総合技術研究所)

⁺⁺国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所 (〒813-0043 福岡県福岡市東区名島3丁目24-10)
 (現 国土交通省道路局高速国道課)

⁺⁺⁺国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所 (〒813-0043 福岡県福岡市東区名島3丁目24-10)
 (現 (財) 道路保全技術センター九州支部)

⁺⁺⁺⁺国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所 (〒813-0043 福岡県福岡市東区名島3丁目24-10)

For constructing a good maintenance scheme of an existing bridge, the methods for estimating the weights of heavy trucks are needed and Bridge Weigh-In-Motion (BWIM) has attracted many researchers. For the accuracy of this method, the usage of a short simply-supported straight steel bridge is preferred. However, the highway of our interest does not have steel bridges except the one that is a continuous skew plate-girder bridge. Because of this, we first investigate the accuracy of BWIM carefully when applied to this bridge: we use three trucks of known weights and carried out 5 different patterns of running test. Each pattern comprises multiple cases with different running conditions. Using strains obtained in this running test, we conduct BWIM and estimate truck weights. It is found that the error of a truck weight is less than 5% when a single truck is running while it can be up to 11.7% when two trucks are running. The influence of the number of data points on the accuracy of WIM is also studied. From a practical point of view, this much of error is acceptable. The usage of a continuous skew steel-plate-girder bridge for Bridge Weigh-In-Motion can be justified.

Key Words: BWIM, traffic loads, continuous steel girder bridge, skew bridge

キーワード: BWIM, 交通荷重, 連続鋼桁橋, 斜橋

1. はじめに

既設橋の維持管理を的確に遂行するには、大型車両の総重量や通行頻度を把握することが重要である。そのためには、交通流を乱すことなく、簡便に走行車両の総重量を計測する技術 (Weigh-In-Motion) が必要であり、種々の検討が行われてきている¹⁾。中でも、Moses²⁾が提案した橋梁の変形挙動から車両重量を推定する BWIM (Bridge Weigh-In-Motion) は、他の WIM システムに比して低コストであり、我が国でも技術開発が進められている³⁾⁻⁸⁾。

BWIM で精度良く車両総重量を推定するためには、変形挙動が複雑でない、重車両が同時走行する確率が低い、活荷重に感度良く反応するなどの条件を満たす橋梁の利用が望ましい。すなわち、短スパンで直橋の単純鋼桁橋が理想的と考えられる。しかしながら、諸般の事情から、こうした条件をすべて満足する橋梁を使用できない場合も多い。実際、九州北部地方の主要幹線道路である国道 201 号の福岡市近辺の交通荷重把握に際して、BWIM に利用できそうな橋梁は、斜橋で 2 径間連続鋼桁橋の篠栗橋のみであった。少なくとも著者らの知る限りにおいて、こ

の種の橋を用いたBWIMの精度が子細に検討された例はない。そこで、本研究では、この2径間連続鋼桁橋（篠栗橋）を用いたBWIMの精度について検討を加えた。ここでは、その結果を報告する。

2. 車両重量算定法

本研究では、文献3)、6)のBWIM手法を用いることとした。以下に、その概要を示す。

2.1 基本概念

本手法は、橋梁上の走行車両によって生じるひずみ応答（橋軸方向の直ひずみ）から、走行車両重量を推定するものである。

ある時間 t に橋梁上の地点 x_n に車軸が位置している場合を考える。このとき、測定点 i に生じるひずみ $\varepsilon_i(t)$ は次式で表せる。

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_A} A_n I_i(x_n(t)) \quad (1)$$

N_A は橋梁上にある車軸数、 A_n は車軸 n の重量、 I_i は測定点 i のひずみ影響線関数である。

このように算出されるひずみ $\varepsilon_i(t)$ と、対応するひずみの実測値 $\varepsilon_i^*(t)$ との差の二乗和は次式のようになる。

$$E = \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_S} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (2)$$

N_S は測定されたひずみデータの総数、 N_M は測定点の個数、 Δt はデータのサンプリング時間間隔を表す。式(2)の二乗和 E を最小にする A_n の値が求めるべき重量となる。具体的には、式(2)の停留条件 $(\partial E / \partial A_n = 0)$ を満たすような A_n を求める。式(1)、式(2)から理解されるように、最終的に解くべき方程式は、 A_n を未知数とする連立1次方程式となる。

この重量推定法が機能するには、各測定点の影響線、ならびに各測定時間の車両走行位置が既知でなければならない。影響線関数の求め方については2.2節、車両走行位置の同定法については2.3節で説明する。

2.2 影響線関数

影響線関数には d 次の多項式を用いる。すなわち、次の関数形を仮定する。

$$I_i(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_d x^d \quad (3)$$

この関数の係数 a_i は、重量が既知の車両を用いた

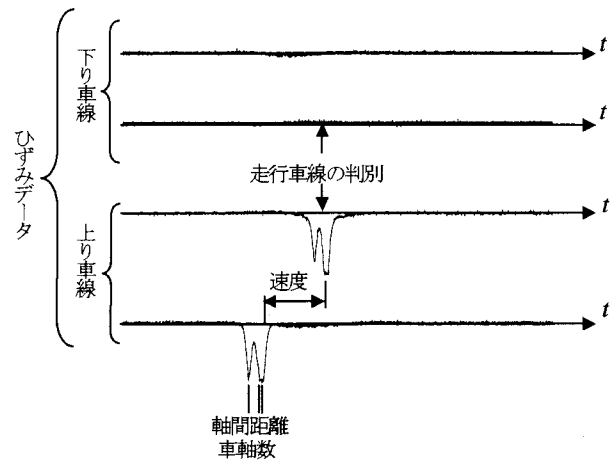


図-1 垂直補剛材の時系列ひずみ

車両走行試験を行い、その測定値であるひずみ $\varepsilon_i^*(t)$ を用いて次のように決定する。

式(3)の影響線関数を用いれば、既知の軸重 A_n が x_n に位置している際、測定点 i で生じるひずみ $\varepsilon_i(t)$ は式(1)で算出される。このひずみの計算値 $\varepsilon_i(t)$ と実測値 $\varepsilon_i^*(t)$ との差の二乗和は次のようになる。

$$F = \sum_{j=1}^{N_S} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (4)$$

式(3)の多項式の係数は、式(4)の二乗和 F が最小になるよう定める。すなわち、式(4)の停留条件 $(\partial F / \partial a_i = 0)$ を満たす係数 a_i を求めることになる。

2.3 車両走行位置

垂直補剛材上部には、その直上を車軸が通過すると鉛直方向の大きな直ひずみ（圧縮）が発生する。したがって、車両進行方向に並んだ2本の垂直補剛材でひずみを計測すれば、これらの垂直補剛材上を車両が通過する時間のずれから、車両の走行速度を知ることができる。また、各車線下の垂直補剛材上部のひずみを計測すれば、車両が通過した車線、車軸数および軸間距離といった情報が得られる。図-1には、2車線の橋梁で、各車線ごとに2本の垂直補剛材でひずみ計測を行った例を示している。

このように、垂直補剛材上部のひずみ計測を行うことにより、計測点直上の車両通過時間、走行車線、走行速度といった情報が得られ、任意時間の車両走行位置の同定が可能となる。

3. 篠栗橋と測定概要

本研究のBWIMで使用した篠栗橋の概要を図-2に示す。この図からわかるように、篠栗橋は5主桁を有する2径間連続の鋼鈑桁橋であり、片側1車線

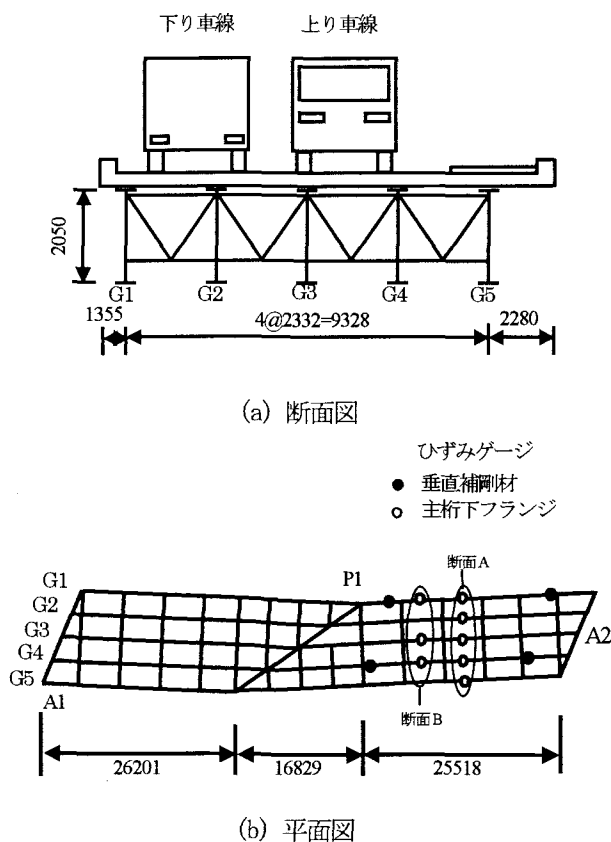


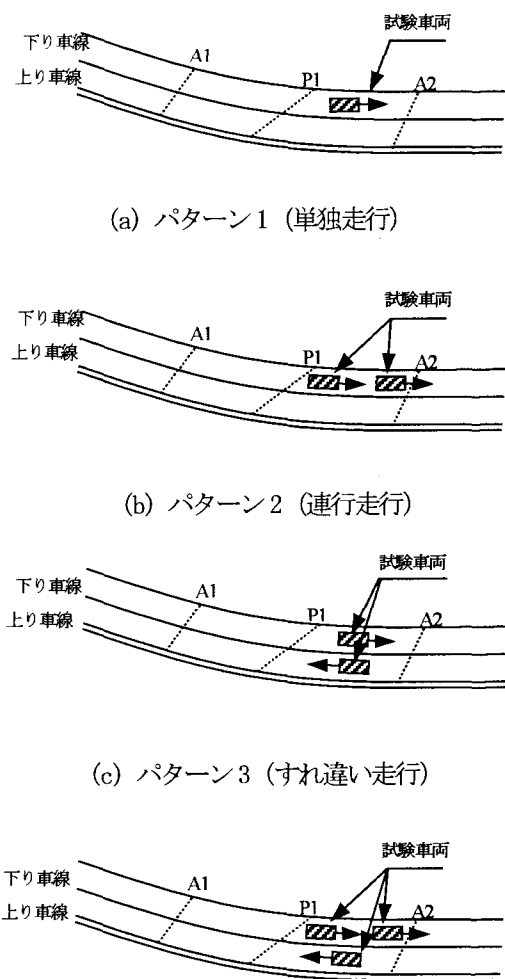
図-2 篠栗橋 (単位: mm)

の対面交通となっている。歩道は片側だけに設けられており、G5 主桁の上に位置している。図-2(b)の平面図からわかるように、この橋梁の軸線は折れ線状になっている。またこれは河川を跨ぐ斜橋であり、川の流れとの関係で、P1 橋脚上の斜角は特に小さくなっている。そのため、同じ車軸についている2個のタイヤが支点を越える時間にもずれが生じ、複雑な載荷条件となる。

図-2(b)には、ひずみ計測位置も示している。白丸位置ではひずみゲージが主桁下フランジに取り付けられ、黒丸位置では垂直補剛材上部にひずみゲージが取り付けられる。前者は橋軸方向の直ひずみ、後者は鉛直方向の直ひずみを測定するためのものである。2.3 に記したように、垂直補剛材の直ひずみからは車軸数、走行車線、走行速度が求められる。これらの情報から、式(1)の x_n が算定される。また、主桁下フランジで計測されるひずみは、式(2)、式(4)の ε_i^* に該当する。通常はある断面の直ひずみを計測し、それをもとに重量推定を行うが、本研究では、推定精度を検討するため、断面 A に加えて、可能な範囲で断面 B においても測定を行った。

4. 車両走行試験

本研究では、軸重、軸間距離が既知の試験車両 A~C



(d) パターン 4 (連行かつすれ違い走行)

図-3 車両走行試験

- パターン 1: 試験車両 1 台の単独走行
- パターン 2: 試験車両 2 台の連行走行
- パターン 3: 試験車両 2 台のすれ違い走行
- パターン 4: 試験車両 2 台の連行かつ試験車両 1 台とのすれ違い走行
- パターン 5: 一般交通流内での走行

の 3 台を用いて車両走行試験を行った。車両総重量は、試験車両 A が 20.35tf、試験車両 B が 20.00tf、試験車両 C が 16.39tf である。車両走行パターンとして、次の 5 種類を採用した。パターン 1~4 については、図-3 で図解している。

この車両走行試験では、走行速度による影響を調べるための試験も取り込んだ。また、上下車線の試験車両を入れ替えた試験も実施した。パターン 1~4 においては、同一条件での試験を 3 回ずつ繰り返し、パターン 5 では、上下車線の一般交通流に、各 5 回ずつ試験車両を混入させた。表-1 に、実施した車両走行試験をまとめて示す。なお、パターン 1~4 の

表-1 車両走行試験

パターン	速度 (km/h)	試験車両	試験回数
1	30, 50, 70	A	18
1	30, 50, 70	C	18
2	30, 50, 70	A+C	18
3	50	A, B	6
4	50	B+C, A	6
5	-	A	10
			計 76

※ 試験車両：A+C=試験車両 A と C の連行走行，
B+C=試験車両 B と C の連行走行

走行速度は目安であり，パターン 5 の走行速度は試験時の一般交通流に合わせたものとなる．表-1 にも示しているが，車両走行試験の回数は合計で 76 回に上る．

試験の性質上，パターン 1~4 では走行試験時に，一般車両が橋梁上を走行しないようにした．具体的には，パターン 1~4 の車両走行試験は交通の少ない深夜に実施し，交通が途切れた時間を狙って試験車両をスタートさせ，さらに一般車両の進入を防ぐための車両を走行させることで，一般車両の混入を制御した．

5. 車両総重量の推定

パターン 1 の単独走行試験結果をもとに，2.2 節に記した方法で影響線関数を定めた．パターン 1 の中にも多くの車両走行試験があるが，いずれの試験結果を用いても影響線関数に大きな差は認められなかった．そのため，試験車両 A，走行速度 50km/h，の試験結果を用いて影響線関数を定めた．また，影響線をもとに作成したひずみ波形と，車両走行試験で測定されたひずみ波形との一致具合などから，影響線関数には 11 次の多項式を採用することとした．なお，歩道下に位置する G5 主桁のひずみ測定値は他の主桁に比して小さいため，以下の車両総重量の推定には使用しなかった．

まず断面 A のひずみ測定値のみを用いて，重量推定を行った．

図-4 に，50km/h で走行する試験車両 A，C の車両総重量を BWIM で推定した結果を示す．縦軸が推定車両総重量，横軸が試験車両の総重量（既知）である．この図には，誤差が 5% の範囲も示しているが，総重量の大きさにかかわらず，のべ 12 台の推定車両総重量すべてが誤差 5% 以内に収まっている．

図-5 には，走行速度の影響を示す．これは，試験車両 A，C をそれぞれ 30km/h，50km/h，70km/h で

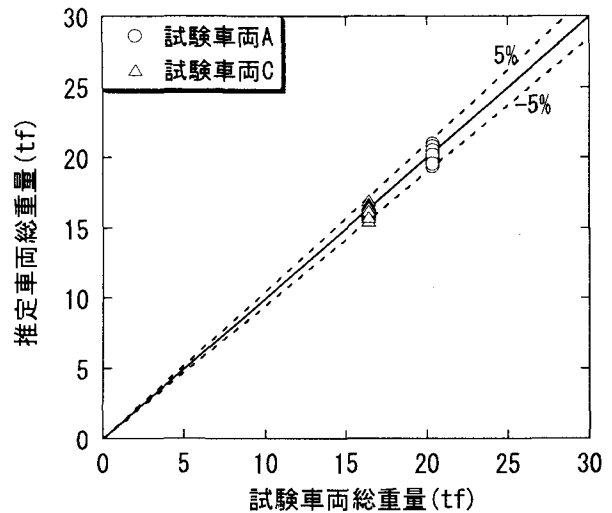


図-4 推定車両総重量
(パターン 1：走行速度 50km/h)

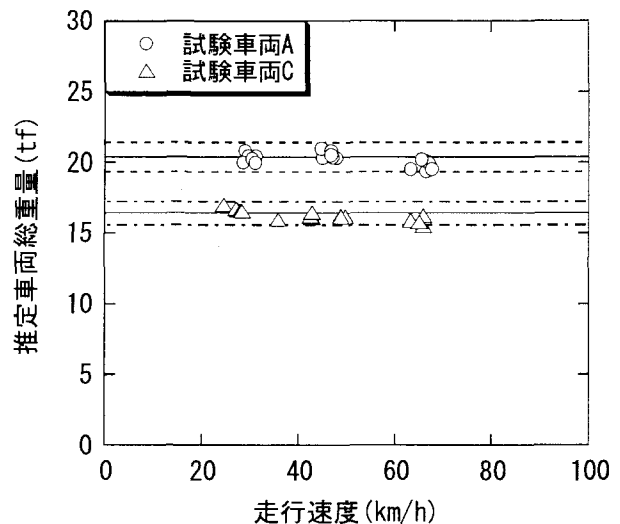


図-5 推定車両重量 (パターン 1：走行速度の影響)

単独走行させた際の車両総重量の推定結果である．速度指定を行ったものの，試験車両 C の 50km/h 走行時に，速度のばらつきが目立つ．しかしながら，図-5 を見れば，走行速度にかかわらず，車両総重量の推定結果は良好である．70km/h 走行の試験車両 C の 1 台で 5.4% の誤差が生じているが，これ以外ではすべて 5% 以内の誤差に収まっている．

パターン 2~4 における車両総重量の推定結果を図-6~8 に示している．パターン 2 (連行走行) では，車両総重量の推定をのべ 36 台について行ったが，誤差が 10% を越えたのはそのうち 2 台 (最大誤差 11.0%) のみ，パターン 3 (すれ違い走行) ではのべ 12 台の推定総重量のうち 1 台 (誤差 11.7%) のみで誤差が 10% を越えた．またパターン 4 (連行

表-2 車両総重量推定値の最大誤差

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
断面A	4.9	11.0	11.7	10.5
断面A +断面B	8.9	8.4	8.8	7.7

単位 (%)

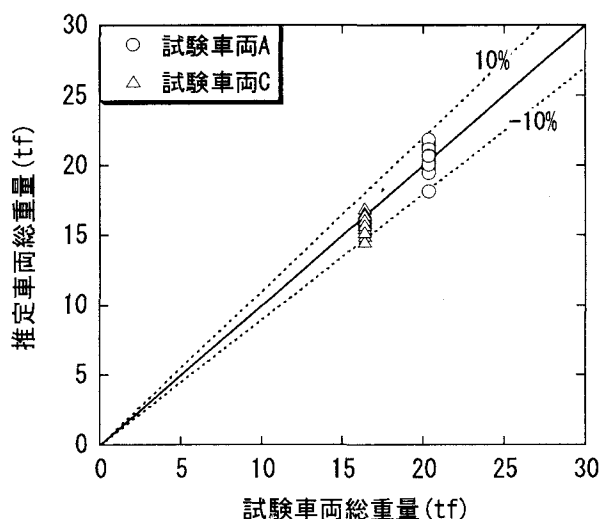


図-6 推定車両総重量 (パターン2)

かつすれ違い走行)では18台の推定総重量のうち1台(誤差10.5%)のみで誤差10%を超えた。このように、走行車両が複数台の場合にも良好な結果が得られた。

試験車両を一般交通流に混入させたパターン5のひずみ測定結果例(G3主桁、垂直補剛材)を図-9に示す。図-9(a)が上り車線混入時、図-9(b)が下り車線混入時である。この図には、試験車両のみならず、重量の大きい一般車両の車両総重量を推定した結果も示している。図中に記しているように、この場合の試験車両総重量と推定値の誤差は、上り車線混入時に6.5%、下り車線混入時に0.5%であった。また、図-9には、車両総重量推定値と影響線から算出した主桁下フランジ(G3)のひずみ波形計算値も示しているが、上下車線いずれの混入時においても測定値と良く一致しており、試験車両総重量だけでなく、一般車両の総重量についても妥当な結果が得られていると考えられる。

他の一般交通流混入時の車両総重量の推定結果も、すべて10%以内の誤差であった。これより、一般交通流においても、車両総重量を精度よく推定できることが確認された。

次いで、断面Bの直ひずみ測定結果も合わせて用い、車両総重量の推定を行った。それで得られた

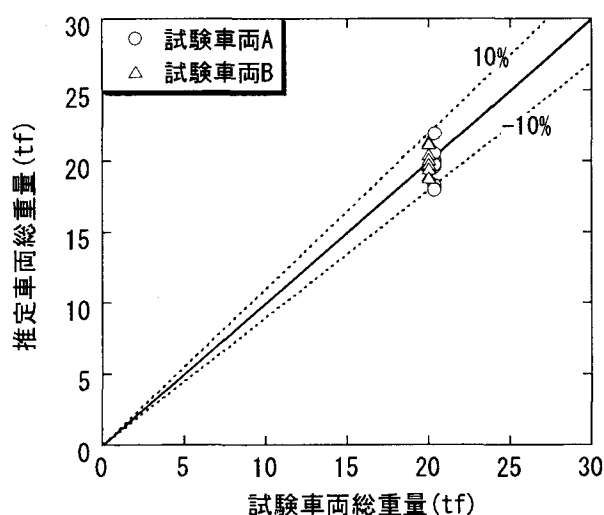


図-7 推定車両総重量 (パターン3)

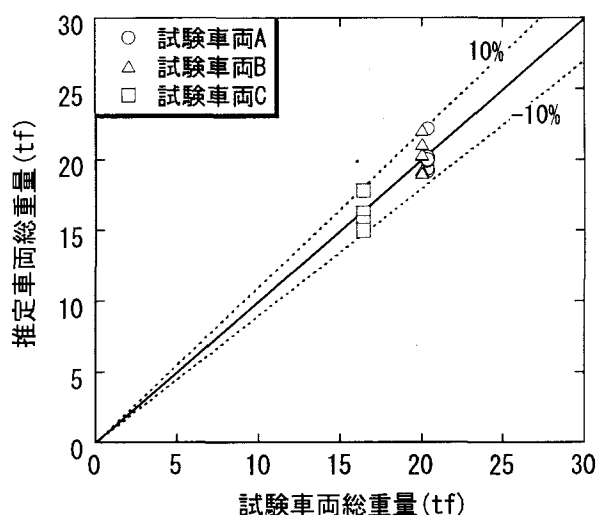
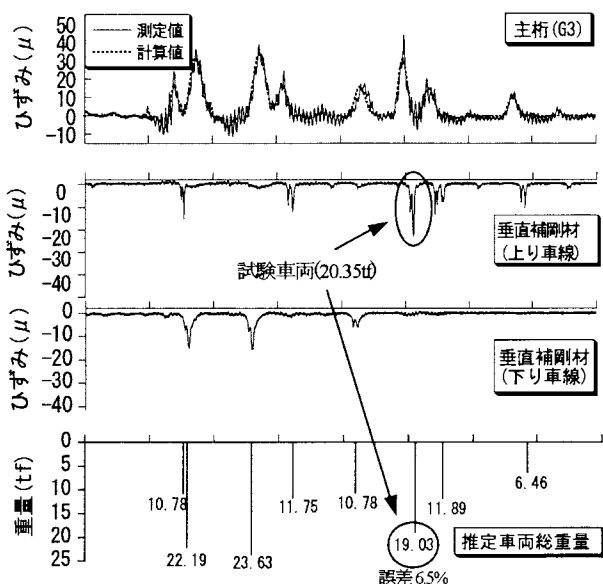


図-8 推定車両総重量 (パターン4)

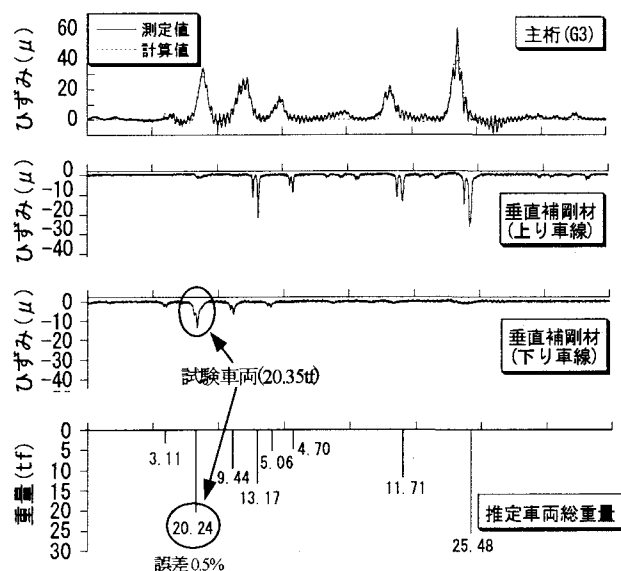
最大誤差を表-2にまとめている。これを見ると、断面Bの測定結果を取り組むことで、パターン2~4においては精度が向上しているものの、パターン1では逆に精度が低下している。その結果、4パターン間での最大誤差の違いは減少し、ほぼ同程度の最大誤差となっている。また、このことは、本橋では、複数車両走行時には2断面の計測結果、単独車両走行時には断面Aのみの計測結果を用いることで、車両総重量の推定精度向上が可能であることを示している。

6. まとめ

斜橋で2径間連続の構造形式を持つ鋼鉄桁橋梁(篠栗橋)にBWIMを適用し、車両総重量の推定精度を検討した。そのために、5パターン、計76回の



(a) 上り車線混入



(b) 下り車線混入

図-9 ひずみと推定車両総重量

車両走行試験を行った。その結果、走行速度にかかわらず、単独車両走行時の誤差は5%以内、連行走行時やすれ違い走行などの複数車両走行時の誤差も最大で11%程度であることが明らかになった。

2断面(断面A, B)での計測結果を用いた車両総重量の推定も行った。その結果、複数車両走行時の推定誤差は減少したが、単独走行時の誤差は増加した。これは、篠栗橋においては、複数車両走行時には2断面の計測結果、単独車両走行時には断面Aのみの計測結果を用いることで、車両総重量の推定精度向上が可能であることを示している。

以上のことより、本橋のように斜橋で2径間連続の構造形式を有する橋梁を用いても、BWIMで実用上十分な精度で車両総重量を推定できると判断される。今後、大量のデータにも対応できるようBWIMシステムの自動化を行い、長期観測によって国道201号の交通荷重の実態を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) 宮村善保：車両の動荷重計測手法(WIM)の開発と欧米の状況，道路，1999-2，pp. 50-53，1992年。
- 2) Mose, F.: Weigh-In-Motion system using instrumented bridges, Transportation Engineering

Journal of ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233-249, 1979年。

- 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，87-4，pp. 41-45，1987年。
- 4) 松井繁之，El-Hakim, A.：RC床版のひび割れの閉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年。
- 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年。
- 6) 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年。
- 7) 池田勝平，米田昌弘，木村剛，枝元勝哉：GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する基礎的研究，土木学会第57回年次学術講演概要集，pp. 1101-1102，2002年。
- 8) 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，土木学会第57回年次学術講演概要集，pp. 1447-1448，2002年。

(2004年4月16日受付)