

GA を適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究

A Traffic Load Monitoring System on Highway Bridges using Genetic Algorithm

米田昌弘*, 枝元勝哉**

Masahiro YONEDA*, Katsuya EDAMOTO**

- * 工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)
* 博士(工学) 川田工業株式会社技術開発室 室長 (〒321-3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 122-1)

Heavy traffics cause fatigue damages in members of bridge. For rational maintenance of bridge structures, it is necessary to know the frequency of trucks and their weight. This paper describes a new monitoring system using genetic algorithm (GA) to estimate gross weight of truck passing on bridges in service. The simulation analyses based on the genetic algorithm are performed for various types of truck model passing on a simply supported bridge. Based on these results, it was found that the new method based on genetic algorithm could be acceptable for identification of gross weight of truck passing on highway bridges in service.

Key Words : maintenance, genetic algorithm, monitoring system, identification

キーワード：維持管理，遺伝的アルゴリズム，モニタリングシステム，同定

1. まえがき

建設事業をとりまく社会経済情勢が大きく変化する中で，建設市場もかつてないほどの大きな構造変化に直面している．公共工事に対するコスト削減は社会的に大きな要請となっており，新規事業に対してはこれまでのような右肩上がりの増加を見込むことはできない．しかしながら一方で，コスト削減の状況下にあっても，これまでに蓄積された膨大な社会資本を正しく機能させるためには，今までもまして適正な維持管理が必要である．

ところで，交通量の増加と車両の大型化は，環境振動問題のみならず，活荷重応力も大幅に増大させることから，平成 5 年 11 月には活荷重応力の低減を目的として設計荷重が B 活荷重 (TL-25) に変更された．しかしながら，総重量 245kN (=25tonf) 以上の過積載車が橋梁上を通行する場合も多く，橋梁交通荷重を正しく把握することは，橋梁構造物を維持管理する上できわめて重要な作業であると強く認識されている．橋梁交通荷重を推定する技術として，橋梁上を走行する車両によって生じる橋梁部材の応答値から車両荷重を推定するシステム “Bridge Weigh-in-Motion (BWIM)” が知られている．BWIM は米国で道路橋の疲労損傷が著しくなったのをきっかけに Moses¹⁾ によって提案されたものであり，わが国でも Moses の

手法を基本とした西川ら²⁾の研究や三木ら³⁾の研究，コンクリート床版のひび割れを用いる松井らの研究⁴⁾，小塩・山田らの研究^{5)~7)}など，数多くの研究者によってそれぞれ有用な手法が提示されている．

これらの手法の中でも，橋梁の縦リブに貼付したひずみゲージの応答波形から，橋梁交通荷重を推定する小塩・山田らの計測システムはすでに実在橋梁にも適用されており，一連の研究成果は高く評価されている．しかしながら，小塩・山田らの手法は縦リブにひずみゲージを貼付することから，その適用は縦リブを有する橋梁に限定される．一方，鋼主桁橋は施工の省力化，工費の節減をはかるため，従来の多主桁形式から少数主桁形式へと移り変わりつつあるが，少数主桁橋（合理化橋）では縦リブが存在しないことから，小塩・山田らの手法では橋梁交通荷重を推定できない．このような状況のもと，縦リブが存在しない少数主桁橋にも適用できる，簡便で実用性の高い橋梁交通荷重を計測できるシステムの開発が実務技術者から強く望まれていた．

そこで，著者らは GA（遺伝的アルゴリズム）を適用して，少数主桁橋にも適用できる，従来よりも簡易で経済的な橋梁交通荷重の推定法を提案し，実用化に向けた基礎的な研究を実施することとした．具体的には，単純桁橋の中央点に設置したピックアップによって，車両が橋梁に進入してから退出するまでの時刻歴

応答（加速度を電氣的に積分した変位波形あるいはひずみから算出したモーメント波形）を計測し，GA を適用して橋梁交通荷重を推定しようとするものである。したがって，GA を適用する方法は，他の方法と比較して使用ピックアップ数が非常に少なく，計測作業の簡素化や低コスト化の観点からもきわめて有用な手法であると考えられる。

橋梁交通荷重の推定に GA を適用する手法を検討した結果，GA を適用すれば，特別な装置を利用なくとも車両速度を算出でき，車両の総重量や等価軸距も十分な精度で推定できる可能性を提示できたことから，ここにその検討結果を報告する。なお，単純桁橋以外の橋梁形式であっても，事前に計算した影響値を利用すれば，単純桁橋と同様の取り扱いが可能である。また，実際の橋梁では過積載車が併走する走行状態もあり得るが，一般的には単独走行する場合は最も多いことが知られている。それゆえ，本研究では，単純桁橋梁上を 1 台の車両が走行する場合を対象として GA の適用性を検討することとした。

2. 予備検討時における車両速度の検出

従来のシステムと同様に，橋梁交通荷重を GA で推定する場合にも車両速度が必要となる。小塩・山田らは，間隔のわかっている 2 断面で計測した応答波形の時間差から車両速度を検出している。また，西川らは，入口側と出口側の床版下面に貼付したひずみゲージのピーク応答から車両速度を検出している。一方，スピード違反を取り締まるための車両速度検出装置が橋梁に設置されている場合，この車両速度検出装置を利用することも考えられる。また，最近では比較的安価な速度検出装置も開発されていることから，これらの装置を利用すれば比較的容易に車両速度を検出できるものと考えられる。

ところで，上述したような車両速度検出法に加え，橋梁に進入してから退出するまで車両速度が一定であると仮定すれば，以下のようにしても車両速度 V を検出できるものと考えられる。

今，図-1 に示すように橋長 50m の単純梁上を 2 軸車（前輪荷重 $P_1 = 49.000\text{kN}$ ，後輪荷重 $P_2 = 196.000\text{kN}$ ，軸間距離 $a_{12} = 4.0\text{m}$ ）が速度 60km/h で通行する場合を想定し，橋の中央点である 25m 地点で，前輪が橋梁に進入してから後輪が退出するまでの応答波形が図-2 に示すように計測できたとする。応答波形には静的成分と動的成分が存在するが，フィルター処理や波形の平均化処理を施せば，図-3 に示すように静的成分のみを抽出することが可能である。図-3 の静的な波形成分において，0.25 秒付近に折れ曲がり認められるが，これは前輪荷重 P_1 が橋梁に進入した後に後輪荷重 P_2 が進入したことに起因するものである。この折れ曲がり点の生じた時間 T_1 を検出できれば，2 軸車の車両速度 V は，

$$V = L / (T - T_1) \quad (1)$$

で推定できることになる。ここに， L は橋長， T は前輪荷重 P_1 が橋に進入してから後輪荷重 P_2 が退出するまでの時間である。また，良好なデータが計測できれば，折れ曲がり点数から車両の軸数が，また，その時の応答値から概ねの軸重と軸間距離を推定することも十分に予想される。

なお，本章で示した手法を採用しなくとも，その後の検討で，車両速度をパラメーターとした解析を実行すれば車両速度の推定は十分に可能であること，また，軸数が未知量であっても車両重量を十分に同定できることがわかった。これらの検討結果については 5 章（実用化に向けた検討）で詳述するが，GA を適用し

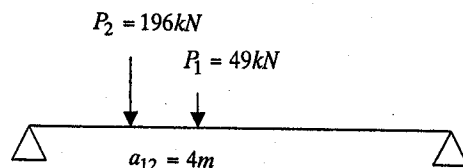


図-1 2軸車を対象とした予備検討モデル

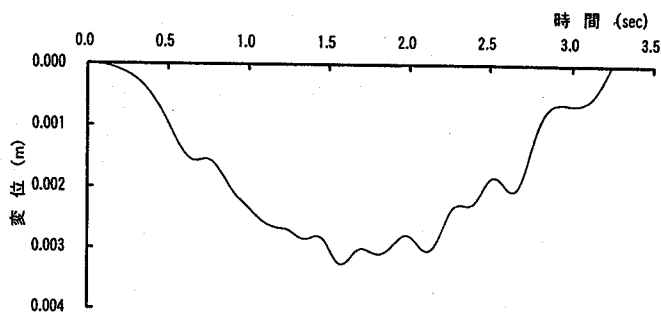


図-2 25m 地点での変位応答波形

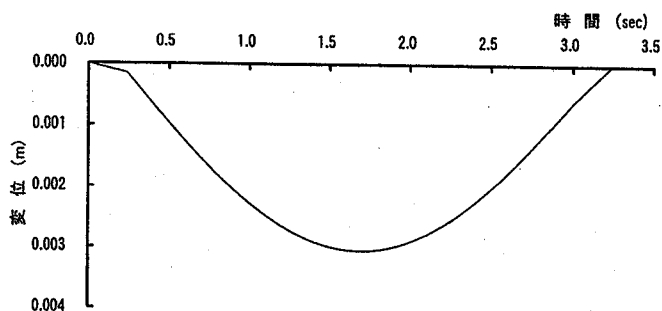


図-3 25m 地点での変位応答波形（静的成分）

表-1 予備検討例1 (CASE-D3) での条件

推定する諸元	P ₁ , P ₂ , a ₁₂	
個体数	100 個	
世代数	300 世代	
交叉 (1 点交叉) 確率	0.50	
突然変異確率	0.03	
選択方法	ルーレットルール	
推定諸元の設定範囲 (真値の±50%)	P ₁	24.5kN~73.5kN
	P ₂	98.0kN~294.0kN
	a ₁₂	2.0m~6.0m
使用する計測値 (先頭 車が 15m, 20m, 25m を通行する時の変位)	y _{15m}	0.00202234m
	y _{20m}	0.00264119m
	y _{25m}	0.00301004m

た橋梁交通荷重の推定法に関する研究は今までに実施されておらず、読者にとっては本研究の検討過程を忠実に提示した方が理解しやすいと思われる。それゆえ、3 章と 4 章では、本章に示した手法で車両速度と軸数を算出できたという条件下で、GA による適用結果を示すこととした。

3. 2 軸車を対象とした予備検討

本章では、橋長 50m の単純梁上を 2 軸車 (前輪荷重 $P_1 = 49.000kN$ 、後輪荷重 $P_2 = 196.000kN$ 、軸間距離 $a_{12} = 4.0m$) が速度 60km/h で通行する場合を想定し、GA による橋梁交通荷重の推定法について以下に示す 2 つの予備的な検討を実施するものとした。

(1) 予備検討例 1

橋の中央点である 25m 地点 (最も大きな応答値が得られる地点) に設置したピックアップによって、すでに示した図-2 の静的変位成分 (時刻歴波形) が得られたとする。2 章のいずれかの手法で車両速度が検出できれば、この静的変位成分 (時刻歴波形) から、前輪荷重 P_1 が橋梁に進入してから 0.900 秒後の 15m 地点 (後輪荷重 P_2 は $15m - 4m = 11m$ 地点)、1.200 秒後の 20m 地点 (後輪荷重 P_2 は $20m - 4m = 16m$ 地点)、1.500 秒後の 25m 地点 (後輪荷重 P_2 は $25m - 4m = 21m$ 地点) に到達した時刻での応答値を抽出できる。そこで、ここでは、まず、これら 3 つの変位を既知量 (測定値) として、前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} を GA によって推定するものとした。本文ではこの検討ケースを CASE-D3 と記す。なお、GA を適用する際の未知量は軸重と軸間距離 (それぞれ 1 染

表-2 予備検討例1 (CASE-D3) の推定結果

	P ₁ (kN)	P ₂ (kN)	a ₁₂ (m)	P ₁ +P ₂ (kN)
GA による推定値	35.917	208.632	3.744	244.549
真 値	49.000	196.000	4.000	245.000

表-3 予備検討例1 (CASE-D3) の推定荷重を作用させた場合の変位応答

	応 答 変 位 (m)		
先頭車の載荷位置	15m	20m	25m
GA による推定値	0.00202243	0.00264109	0.00301011
真 値	0.00202234	0.00264119	0.00301004

色体当たりのビット長は 24 ビット) である。また、GA の適用にあたっては、軸数を既知とし、表-1 に示すように、個体数を 100、世代数を 300、交叉 (1 点交叉) 確率を 0.50、突然変異確率を 0.03 に設定した。GA で算出された 300 世代目の最適値を真値 ($P_1 = 49.000kN$ 、 $P_2 = 196.000kN$ 、 $a_{12} = 4.000m$) と比較して表-2 にまとめる。ただし、最適値とは、次式で定義した目的関数 J_{GA} の逆数 (適応度関数) が最大となる個体である。

$$J_{GA} = \sum_{i=1}^n |R_{c,i} / R_{m,i} - 1.0| \quad (2)$$

ここに、 $R_{c,i}$ は解析値にキャリブレーション (対象橋梁での解析値と実測値の差異を補正する係数) を乗じた応答、 $R_{m,i}$ は計測された応答、 n は GA で利用するデータ個数であり、検討ケース CASE-D3 では $n=3$ となる。表-2 より、GA で推定した前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} は、真値と比べて若干の相違が認められ、十分な精度で推定しているとは言いがたい。ただし、前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 の合計値 (総重量) は $244.549kN$ と推定されており、真値の $245.000kN$ と非常に良く一致していると言える。なお、GA で算出された $P_1 = 35.917kN$ 、 $P_2 = 208.632kN$ 、 $a_{12} = 3.744m$ を用いて、前輪荷重 P_1 が 15m 地点、20m 地点、25m に到達 (後輪荷重 P_2 は 11m 地点、16m 地点、21m に到達) した時刻での変位を算定すれば、表-3 に示す結果が得られた。この表より、GA で算出された $P_1 = 35.917kN$ 、 $P_2 = 208.632kN$ 、 $a_{12} = 3.744m$ は所定の変位条件をほぼ満足しており、工学的には与えられた変位条件を満足する解の一つであることがわかる。

本節の CASE-D3 では、橋の中央点 (25m 地点) 1

ヶ所で測定された 3 つの変位データを使用していたが、使用する変位データ数を 1 つ（前輪荷重 P_1 が 25m 地点を走行した時の変位を用いる CASE-D1）と 6 つ（前輪荷重 P_1 が 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m 地点を走行した時の変位を用いる CASE-D6）についても、同様に GA を適用して前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} を推定してみた。その結果、1 つの変位データを用いた CASE-D1 では $P_1 = 35.897\text{kN}$, $P_2 = 208.573\text{kN}$, $a_{12} = 3.722\text{m}$ ($P_1 + P_2 = 244.470\text{kN}$)、6 つの変位データを用いた CASE-D6 では $P_1 = 35.937\text{kN}$, $P_2 = 208.691\text{kN}$, $a_{12} = 3.752\text{m}$ ($P_1 + P_2 = 244.628\text{kN}$) となり、3 つの変位データを使用した場合とほぼ同じ結果が得られたことを付記しておく。

(2) 予備検討例 2

前節では、25m 地点（応答値が最大となる中央点）における静的変位成分（時刻歴波形）が得られたものとして GA を適用したが、ここでは測定量として 25m 地点における曲げモーメントにも着目するものとした。なお、曲げモーメントは、25m 地点の主桁に貼付したひずみゲージの測定値をもとに構造力学の初等理論を適用すれば算出できる。

まず、曲げモーメントのみを既知量として GA を適用し、前輪荷重 P_1 ($P_1 = 49.000\text{kN}$) と後輪荷重 P_2 ($P_2 = 196.000\text{kN}$) および軸間距離 a_{12} を推定することとした。この検討ケースを CASE-M3 と記し、GA の適用条件を表-4 にまとめる。ここで採用した適用条件は、計測する応答が変位から曲げモーメントに変更になった以外は、CASE-D3 の表-1 と同じ条件を採用している。GA による推定結果を表-5 に示す。表-5 と表-2 を比較すればわかるように、曲げモーメントに着目しても、変位に着目した CASE-D3 と同じく、前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} は、真値と比べて若干の相違が認められ、十分な精度で推定しているとはいえない。ただし、前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 の合計値は 245.010kN と推定されており、変位量に着目した場合と同様に、真値の 245.000kN と非常に良く一致していると言える。

次に、変位と曲げモーメントの両方に着目して GA を適用することとした。この検討ケースを CASE-D3M3 と記す。なお、CASE-D3M3 の適用条件を表-6 に示すが、着目する物理量を変位と曲げモーメントとした以外は、表-1 および表-4 と同じである。GA による推定結果を表-7 に示す。表-7 からわかるように、GA では $P_1 = 48.128\text{kN}$, $P_2 = 196.882\text{kN}$, $a_{12} = 3.985\text{m}$, $P_1 + P_2 = 245.010\text{kN}$ と推定されたが、これらの推定量は真値 ($P_1 = 49.000\text{kN}$, $P_2 = 196.000\text{kN}$,

表-4 予備検討例 2 (CASE-M3) での条件

推定する諸元	P_1, P_2, a_{12}	
個体数	100 個	
世代数	300 世代	
交叉 (1 点交叉) 確率	0.50	
突然変異確率	0.03	
選択方法	ルーレットルール	
推定諸元の設定範囲 (真値の $\pm 50\%$)	P_1	24.5 kN~73.5kN
	P_2	98.0kN~294.0kN
	a_{12}	2.0 m~6.0 m
使用する計測値 (先頭車が 15m, 20m, 25m を通行す る時の曲げモーメント)	M_{15m}	1445.5 kN・m
	M_{20m}	2058.0 kN・m
	M_{25m}	2670.5 kN・m

表-5 予備検討例 2 (CASE-M3) の推定結果

	P_1 (kN)	P_2 (kN)	a_{12} (m)	$P_1 + P_2$ (kN)
GA による推定値	34.359	210.651	3.723	245.010
真 値	49.000	196.000	4.000	245.000

表-6 予備検討例 2 (CASE-D3M3) での条件

推定する諸元	P_1, P_2, a_{12}	
個体数	100 個	
世代数	300 世代	
交叉 (1 点交叉) 確率	0.50	
突然変異確率	0.03	
選択方法	ルーレットルール	
推定諸元の設定範囲 (真値の $\pm 50\%$)	P_1	24.5kN~73.5kN
	P_2	98.0kN~294.0kN
	a_{12}	2.0 m~6.0 m
使用する計測値 (先頭車が 15m, 20m, 25m を通行す る時の変位)	y_{15m}	0.00202234 m
	y_{20m}	0.00264119 m
	y_{25m}	0.0030100 4m
使用する計測値 (先頭車が 15m, 20m, 25m を通行す る時の曲げモーメント)	M_{15m}	1445.5 kN・m
	M_{20m}	2058.0 kN・m
	M_{25m}	2670.5 kN・m

表-7 予備検討例 2 (CASE-D3M3) の推定結果

	P_1 (kN)	P_2 (kN)	a_{12} (m)	$P_1 + P_2$ (kN)
GA による推定値	48.128	196.882	3.985	245.010
真 値	49.000	196.000	4.000	245.000

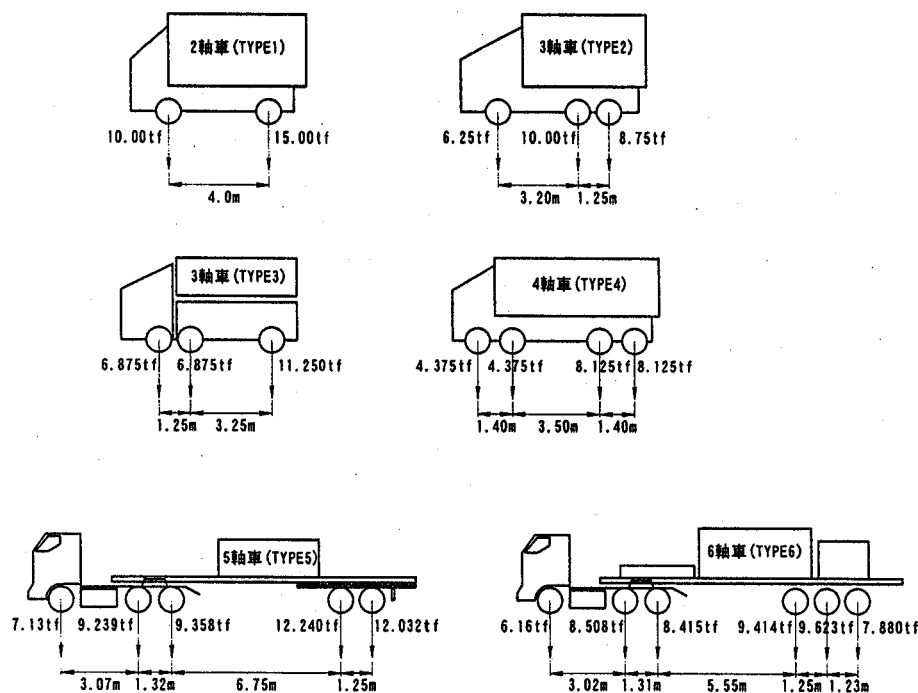


図-4 TYPE-1～TYPE-6 の車両モデル

$a_{12} = 4.000m$, $P_1 + P_2 = 245.000kN$) と非常に良く一致していると言える。ただし、CASE-D3M3 の結果のみから、測定量として変位と曲げモーメントを併用すれば、総重量のみならず各軸重をも常に正しく推定できると断言するのは早計である。すなわち、初期条件をほぼ満足する多数の荷重と軸距の組み合わせの中から、真値に近い結果がたまたま抽出された可能性があることに留意する必要がある。

以上に述べた予備検討結果より、GA を適用すれば、軸重と軸間距離の推定は困難であるものの、橋梁上を移動する車両の総重量を十分な精度で推定できる可能性があるものと推察された。しかしながら、実際には、2 軸車のみならず 3 軸車や 4 軸車さらにはセミトレーラーなど多種多様な大型車が橋梁を通行する。また、2 軸車であっても、前輪と後輪の軸重比率が変化した場合についても検討が必要であろう。そこで、次章では、2 軸車のみならず 3 軸車や 4 軸車さらにはセミトレーラーなどの車両を想定し、GA による橋梁交通荷重の推定法についてその妥当性を検討するものとした。

4. 多軸車を対象とした予備検討

(1) 車両モデルと等価軸距

前章の検討結果を踏まえ、本章では、図-4 に示した 6 つの車両 (TYPE-1～TYPE-6) が橋長 50m の単純桁橋を通行する場合を想定し、GA による交通荷重推定の適用性について検討するものとした。なお、

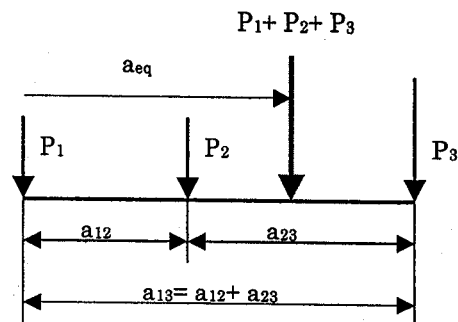


図-5 等価軸距の定義

TYPE-1～TYPE-4 はトラック類に対応したものであり、すべてのタイプで総重量を 245.000kN に設定した。また、TYPE-5 と TYPE-6 はセミトレーラーを想定したものであり、ここでは総重量を 490.000kN に設定した。

3 章の予備検討結果より、変位と曲げモーメントを併用した CASE-D3M3 では、総重量のみならず個々の軸重と軸距を正しく推定できたが、軸数が増加するにしたがって、推定すべき軸重と軸距も増加することから、中央点で計測した変位と曲げモーメントを併用しても、個々の軸重と軸距を正しく推定するのは難しくなると考えられる。そこで、個々の軸重と軸距を正しく推定できなかった場合にも総重量は非常に高い精度で推定できるとの前章の知見を踏まえ、ここでは個々の軸重と軸距から算定した等価軸距を評価指標に加えることとした。ここに、等価軸距とは、図-5 に示すように、荷重列を一つの集中荷重に置換した場合

表-8 TYPE-1~TYPE-6 車両の軸重と軸距

(a) 軸重と総重量

タイプ	軸 重 (kN)						総重量 (kN)
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	
TYPE-1	98.000	147.000	—	—	—	—	245.000
TYPE-2	61.250	98.000	85.750	—	—	—	245.000
TYPE-3	67.375	67.375	110.250	—	—	—	245.000
TYPE-4	42.875	42.875	79.625	79.625	—	—	245.000
TYPE-5	69.874	90.542	91.708	119.952	117.915	—	490.000
TYPE-6	60.368	83.378	82.467	92.257	94.306	77.224	490.000

(b) 軸距と等価軸距

タイプ	軸 距 (m)					等価軸距 (m)
	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	
TYPE-1	4.000	—	—	—	—	2.400
TYPE-2	3.200	4.450	—	—	—	2.837
TYPE-3	1.250	4.500	—	—	—	2.369
TYPE-4	1.400	4.900	6.300	—	—	3.885
TYPE-5	3.070	4.390	11.140	12.390	—	7.098
TYPE-6	3.020	4.330	9.880	11.130	12.360	7.193

表-9 TYPE-3 の車両に対する推定結果

ケース	軸 重 (kN)			軸 距 (m)		総重量 (kN)	等価軸距 (m)
	P ₁	P ₂	P ₃	a ₁₂	a ₁₃		
D1M0	52.185	76.342	114.297	1.588	3.183	242.824	1.997
D0M1	50.695	75.029	124.705	0.796	5.262	250.429	2.859
D3M0	76.499	71.530	97.040	1.724	4.714	245.069	2.370
D0M3	67.238	37.348	140.375	1.248	3.796	244.961	2.366
D3M3	76.518	71.256	97.294	1.722	4.713	245.068	2.372
真 値	67.375	67.375	110.250	1.250	4.500	245.000	2.369

表-10 CASE-D1M0 の推定精度

タイプ	総 重 量 (kN)			等 価 軸 距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	241.864	245.000	-1.280%	1.288	2.400	-46.334%
TYPE-2	244.490	245.000	-0.208%	2.714	2.837	-4.336%
TYPE-3	242.824	245.000	-0.888%	1.997	2.369	-15.703%
TYPE-4	245.137	245.000	+0.056%	3.862	3.885	-0.592%
TYPE-5	574.172	490.000	+17.178%	9.828	7.098	+38.462%
TYPE-6	298.136	490.000	-39.156%	10.306	7.193	+43.278%

表-11 CASE-D0M1の推定精度

タイプ	総重量 (kN)			等価軸距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	240.962	245.000	-1.648%	2.022	2.400	-15.750%
TYPE-2	243.628	245.000	-0.560%	2.713	2.837	-4.371%
TYPE-3	250.429	245.000	+2.216%	2.859	2.369	+20.684%
TYPE-4	242.129	245.000	-1.172%	3.635	3.885	-6.435%
TYPE-5	507.062	490.000	+3.482%	7.700	7.098	+8.481%
TYPE-6	535.129	490.000	+9.210%	8.694	7.193	+20.868%

表-12 CASE-D3M0の推定精度

タイプ	総重量 (kN)			等価軸距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	244.079	245.000	-0.376%	2.384	2.400	-0.667%
TYPE-2	244.941	245.000	-0.024%	2.837	2.837	+0.000%
TYPE-3	245.069	245.000	+0.028%	2.370	2.369	+0.042%
TYPE-4	245.078	245.000	+0.032%	3.886	3.885	+0.026%
TYPE-5	485.120	490.000	-0.996%	7.079	7.098	-0.268%
TYPE-6	497.311	490.000	+1.492%	7.254	7.193	+0.848%

表-13 CASE-D0M3の推定精度

タイプ	総重量 (kN)			等価軸距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	245.000	245.000	+0.000%	2.400	2.400	+0.000%
TYPE-2	245.000	245.000	+0.000%	2.838	2.837	+0.035%
TYPE-3	244.961	245.000	-0.016%	2.366	2.369	-0.127%
TYPE-4	245.000	245.000	+0.000%	3.885	3.885	+0.000%
TYPE-5	489.980	490.000	-0.004%	7.098	7.098	+0.000%
TYPE-6	490.010	490.000	+0.002%	7.196	7.193	+0.042%

表-14 CASE-D3M3の推定精度

タイプ	総重量 (kN)			等価軸距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	245.323	245.000	+0.132%	2.417	2.400	+0.708%
TYPE-2	245.225	245.000	+0.092%	2.849	2.837	+0.423%
TYPE-3	245.069	245.000	+0.028%	2.372	2.369	+0.127%
TYPE-4	245.010	245.000	+0.000%	3.885	3.885	+0.000%
TYPE-5	491.019	490.000	+0.208%	7.124	7.098	+0.366%
TYPE-6	490.078	490.000	+0.016%	7.196	7.193	+0.042%

表-15 測定誤差の検討 (TYPE-3 車両の CASE-D0M3)

測定誤差			等価軸距		総重量	
15m 地点	20m 地点	25m 地点	推定値	誤 差	推定値	誤 差
0%	0%	0%	2.366m	-0.127%	244.961kN	-0.016%
-5%	-5%	-5%	2.369m	0%	232.750kN	-5.000%
-10%	-10%	-10%	2.369m	0%	220.500kN	-10.000%
-5%	-5%	+5%	4.134m	+74.504%	270.108kN	10.248%

の作用位置（前輪から測った軸距）である。したがって、図-5中に記した記号を用いれば、3軸車の等価軸距 a_{eq} は次式で算定される。

$$a_{eq} = \frac{P_2 \times a_{12} + P_3 \times a_{13}}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (3)$$

参考までに、TYPE-1～TYPE-6の軸重、軸距、総重量および等価軸距を表-8にまとめる。なお、等価軸距と総重量が正しく算出されれば、大型車両のカタログ値などと照合することによって車種の特定は可能であると考えられる。

(2) 推定結果と考察

まず、TYPE-3の車両が橋長50mの単純桁橋を通行する場合を想定し、GAによる荷重推定を試みることにした。なお、GAの適用にあたっては測定値が必要となるが、ここでは25m地点に設置したピックアップにより、車両が橋梁に進入してから退出するまでの時刻歴波形（変位と曲げモーメント）が既知であるものとした。検討ケースはCASE-D1M0（前輪荷重 P_1 が25m地点に到達した時の変位のみを用いた場合）、CASE-D0M1（前輪荷重 P_1 が25m地点に到達した時の曲げモーメントのみを用いた場合）、CASE-D3M0（前輪荷重 P_1 が15m地点、20m地点、25m地点に到達した時の変位を用いた場合）、CASE-D0M3（前輪荷重 P_1 が15m地点、20m地点、25m地点に到達した時の曲げモーメントを用いた場合）、CASE-D3M3（前輪荷重 P_1 が15m地点、20m地点、25m地点に到達した時の変位と曲げモーメントを併用した場合）である。GAによる推定結果を表-9に示す。ただし、GAの適用にあたっては、表-6の条件を採用した。表-9より、CASE-D1M0、CASE-D0M1、CASE-D3M0、CASE-D0M3のみならず、CASE-D3M3（変位と曲げモーメントを併用したケース）でも、軸重と軸間距離（軸距）を正しく推定していると言い難い。しかしながら、TYPE-3に対しては、ケースによって推定精度は異なるものの、比較的精度良く総重量と等

表-16 6軸車モデルの設定範囲

個体数	200 個	
世代数	300 世代	
交叉（1点交叉）確率	0.50	
突然変異確率	0.03	
選択方法	ルーレットルール	
推定諸元 の設定範囲	P_1	29.4kN～196.0kN
	$P_2 \sim P_5$	0.0 kN～196.0kN
	P_6	49.0kN～196.0kN
	a_{12}	1.0 m～13.0 m
	$a_{13} \sim a_{16}$	3.0 m～13.0 m

価軸距を推定していると言える。

そこで、その他の車両タイプに対しては、総重量と等価軸距に着目し、各ケースの推定精度を検討することとした。その結果を表-10～表-14に示す。これらの結果より、CASE-D1M0とCASE-D0M1では推定誤差が極端に大きな車両タイプが認められ、実用に適していないと言える。これに対して、CASE-D3M0、CASE-D0M3、CASE-D3M3ではいずれの車両タイプに対してもきわめて精度良く総重量と等価軸距を推定できていることがわかる。

5. 実用化に向けた検討

3章と4章の検討では、橋梁を通過するまで車速が2章で述べた方法で計測されており、かつ、測定値には計測誤差が存在しないものとしていた。また、各車両の軸数を既知量として、車両の総重量と等価軸距を推定していた。そこで、本章では、GAの実用化に向けた可能性を探るべく、測定値に誤差が存在した場合の影響とモデル化する軸数の差異による影響、さらには車両速度を未知量とした場合のそれぞれについて検討するものとした。

表-17 6軸車モデルを採用した場合の推定結果 (CASE-D0M3)

タイプ	総重量 (kN)			等価軸距 (m)		
	推定値	真 値	精 度	推定値	真 値	精 度
TYPE-1	244.951	245.000	-0.000%	2.398	2.400	-0.083%
TYPE-2	244.980	245.000	-0.000%	2.837	2.837	0 %
TYPE-3	245.000	245.000	0 %	2.368	2.369	-0.042%
TYPE-4	244.971	245.000	-0.012%	3.885	3.885	0 %
TYPE-5	489.990	490.000	-0.002%	7.098	7.098	0 %
TYPE-6	490.010	490.000	+0.002%	7.193	7.193	0 %

表-18 980kN 車両に対する推定結果 (CASE-D0M3)

		980kN 車	490kN 車
軸 重 (kN)	P ₁	138.072	86.897
	P ₂	173.999	105.321
	P ₃	150.930	130.703
	P ₄	170.020	67.355
	P ₅	161.710	10.721
	P ₆	185.543	89.013
推定値	総重量(kN)	980.274	490.010
	等価軸距(m)	7.193	7.193
真 値	総重量(kN)	980.000	490.000
	等価軸距(m)	7.193	7.193

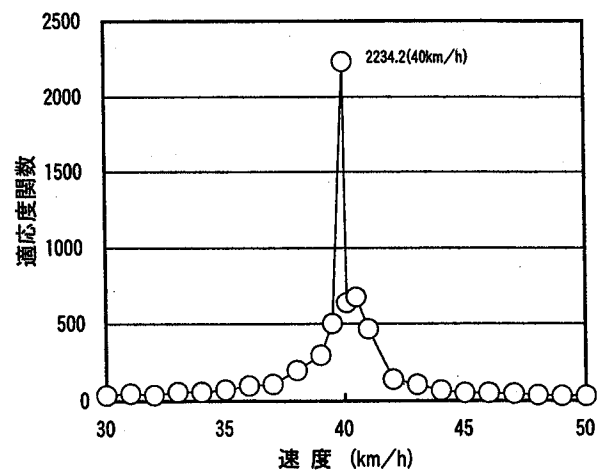


図-6 車両速度と適応度関数の関係

(1) 測定値に誤差が存在した場合の影響

小塩・山田らの計測システムの推定誤差は 5%～10%程度である^{5)～7)}。また、西川らの計測システムでは、推定誤差の最大は±20%程度である⁴⁾。そこで、他の計測システムの推定誤差を参考に、計測値に 5%～10%の誤差が存在した場合を想定し、GA を適用する手法の推定精度について検討した。TYPE-3 車両の CASE-D0M3 (前輪荷重 P_1 が 15m 地点、20m 地点、25m 地点に到達した時の曲げモーメントを用いた場合) を対象とした検討結果を、表-15 にまとめる。表-15 より、すべての測定値に同一の誤差 (-5%あるいは-10%) が存在した場合、等価軸距はほぼ正しく算出されるのに対し、総重量は測定誤差に相当する重量 (たとえば、-5%の誤差を有する場合は、 $-0.05 \times 245 \text{tonf} = -12.25 \text{kN}$) だけ小さく算出されることがわかる。また、前輪荷重 P_1 が 15m 地点と 20m 地点に到達した時の測定誤差がそれぞれ-5%、25m 地点に到達した時の測定誤差が+5%であった場合には、等価軸距は 4.134m と大きく異なるものの、総

重量は 270.108kN と+10%程度の誤差で算出されていることがわかる。それゆえ、GA の適用にあたっては測定誤差を最小にする努力は必要であるものの、若干の誤差を有する場合にも総重量は工学的に許容される範囲で算出できるものと考えられる。

(2) モデル化する軸数の差異による影響

2 章で述べたように、車両が橋梁に進入してからの応答波形から軸数を推定することは可能である。しかしながら、たとえば TYPE-6 車両のように、 P_2 と P_3 の間隔および $P_4 \sim P_6$ の間隔がそれぞれ非常に小さい場合、車両を 3 軸車と判定する可能性がある。そこで、TYPE-6 車両を 3 軸車としてモデル化し、CASE-D0M3 (前輪荷重 P_1 が 15m 地点、20m 地点、25m 地点に到達した時の曲げモーメントを用いた場合) を対象として等価軸距と総重量を推定することとした。その結果、等価軸距として $a_{eq} = 7.193 \text{m}$ (真値は $a_{eq} = 7.193 \text{m}$)、総重量として $W = 490.010 \text{kN}$ (真値は $W = 490.000 \text{kN}$) が算出されたが、これらの推定値

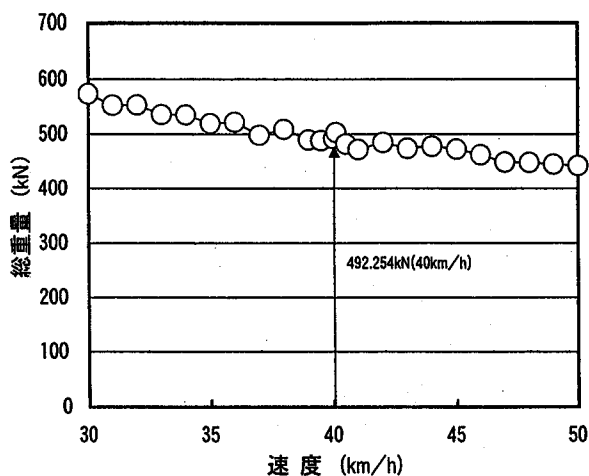


図-7 車両速度と総重量の関係

は真値と非常に良く一致している。それゆえ、軸間距離の非常に小さな軸重についてはモデル化する軸数を低減させても、等価軸距と総重量の推定結果は大きく変化しないものと考えられる。

一方、GA を適用する車両モデルの軸数を固定しても比較的精度良く等価軸距と総重量を推定できれば、GA を適用する手法も有用な橋梁交通荷重推定法の一つになりえるものと言える。そこで、表-16に示した適用条件のもとで6軸車両モデルを適用し、TYPE-1~TYPE-6車両(2軸車~6軸車)の等価軸距と総重量を推定することとした。CASE-D0M3(前輪荷重 P_1 が15m地点、20m地点、25m地点に到達した時の曲げモーメントを用いた場合)に対する推定結果を表-17にまとめる。表-17より、本研究で採用したTYPE-1~TYPE-6車両に対しては、6軸車両モデルに固定してGAを適用しても $\pm 0.1\%$ 以内の誤差で、各車両の等価軸距と総重量を推定できることがわかる。それゆえ、車両が橋梁に進入してからの応答波形から軸数を算定しなくとも、適切な適用条件を選定して多軸車モデルを採用すれば、十分な精度で任意軸数車両の等価軸距と総重量を推定できるものと考えられる。

なお、小塩・山田らの実測結果によれば、980kN(=100tonf)にも達する超過積載車が橋梁上を走行する場合もあるようである。そこで、TYPE-6車両(総重量は490kN)の各軸重を2倍して総重量を980kN(=100tonf)とした車両に対しても、表-16の適用条件を採用して等価軸距と総重量を推定することとした。その結果を表-18に示す。参考までに、この表には総重量490kNのTYPE-6車両に対する結果も併記している。表-18からわかるように、各軸重を2倍して総重量を980kN(=100tonf)とした場合、軸重の推定値は単純に2倍となっていない。しかしながら、

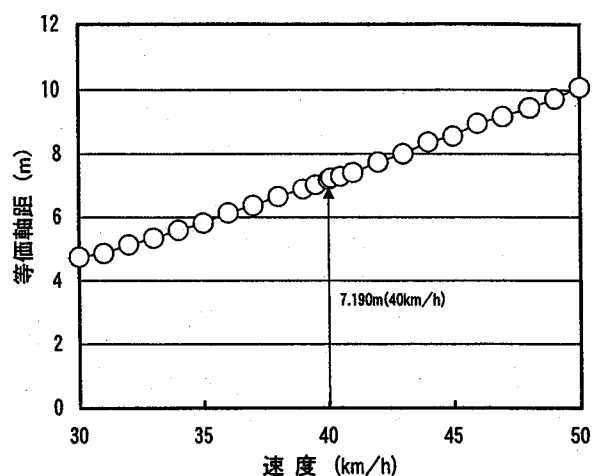


図-8 車両速度と等価軸距の関係

等価軸距と総重量の推定値は真値と非常に良く一致しており、表-16の適用条件を採用すれば980kNの超積載車に対してもGAによる荷重推定法を適用できるものと考えられる。

(3) 車両速度を未知量とした場合の適用性

ここでは、6軸車のTYPE-6車両が40km/hで走行する場合を想定する。ピックアップを設置した25m地点(中央点)での変位応答から静的成分を抽出すれば、車両が橋梁に進入してから t_1 、 t_2 、 t_3 秒後における静的変位は容易に得られる。 t_1 、 t_2 、 t_3 は任意に設定できるが、ここでは、 $t_1=1.35\text{sec}$ 、 $t_2=1.80\text{sec}$ 、 $t_3=1.25\text{sec}$ に設定することとする。なお、車速は40km/hであることから、これらの設定値は車両の前輪が15m地点、20m地点、25m地点に到達した場合の変位を既知量としたケース(CASE-D3M0)を意味している。

ところで、実際には、車両速度は不明である。そこで、車速を30km/h~50km/hの範囲で変化させてGAを適用し、それぞれの車速における適応度関数の最大値を算定することとした。その結果を図-6に示す。なお、GAの適用にあたっては表-16の適用条件を採用している。

図-6より、適応度関数は40km/hで走行させた場合に最大の値(2234.2)を呈していることがわかる。また、図-7と図-8から、この場合の総重量は492.254kN(真値は490.000kN)、等価軸距は7.190m(真値は7.193m)となっており、きわめて高い精度で総重量と等価軸距を推定できていることがわかる。したがって、車両速度が未知量であっても、車両速度をパラメーターとしてGAを適用すれば、橋梁上を走行する車両の速度、総重量、等価軸距を十分な

精度で推定できると考えられる。なお、車両速度が大きく変動する場合には、適応度関数に明確なピークが認められない可能性もある。この問題については今後の検討課題としたい。

6. まとめ

本論文は、GA（遺伝的アルゴリズム）を適用して少数主桁橋にも適用できる、従来よりも簡易で経済的な橋梁交通荷重の推定法を提案したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 橋長 50m の単純梁上を 2 軸車（前輪荷重 $P_1 = 49.000kN$ ，後輪荷重 $P_2 = 196.000kN$ ，軸間距離 $a_{12} = 4.0m$ ）が速度 60km/h で通行する場合を想定し、GA による橋梁交通荷重の推定法について検討した。その結果、GA で推定した前輪荷重 P_1 と後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} は、真値と比べて若干の相違が認められるものの、車両の総重量は真値と非常に良く一致した。

(2) 2 軸車のみならず 3 軸車や 4 軸車さらにはセミトレーラーなどの 6 軸車を想定して、GA による橋梁交通荷重の推定法について検討した。その結果、いずれの車両タイプに対しても、総重量と等価軸距をきわめて精度良く推定できることがわかった。

(3) TYPE-3 の 3 軸車を対象として、計測値に誤差が存在した場合の推定精度について検討した。すべての測定値に同一の誤差（-5%あるいは-10%）が存在した場合、等価軸距はほぼ正しく算出されるのに対し、総重量は測定誤差に相当する重量（たとえば、-5%の誤差を有する場合は、 $-0.05 \times 245tonf = -12.25kN$ ）だけ小さく算出されることがわかった。それゆえ、GA の適用にあたっては測定誤差を最小にする努力は必要であるものの、若干の誤差を有する場合にも総重量は工学的に許容される範囲で算出できるものと考えられる。

(4) 以上は、車両速度と軸数を既知とした検討であったことから、実用化に向けた可能性を探るべく、モデル化車両を 6 軸車に固定して YPE-1~TYPE-6 車両（2 軸車~6 軸車）の等価軸距と総重量を推定した。その結果、6 軸車両モデルに固定して GA を適用しても、 $\pm 0.1\%$ 以内の誤差で各車両の等価軸距と総重量を推定できることがわかった。それゆえ、車両が橋梁に進入してからの応答波形から軸数を算定しなくとも、適切な適用条件を選定して多軸車モデルを採用すれば、十分な精度で任意軸数車両の等価軸距と総重量を推定できるものと考えられた。

(5) 車両速度を未知量とした場合の適用性を検討するため、TYPE-6 車両（6 軸車）を対象として、車両速度を 30km/h~50km/h の範囲で変化させて適応度関数を算出した。その結果、真値と等しい 40km/h で走

行した場合に最も大きな適応度関数値が得られた。また、この場合の総重量は 492.254kN（真値は 490.000kN）、等価軸距は 7.190m（真値は 7.193m）と推定され、きわめて高い精度で総重量と等価軸距を同定できた。したがって、車両速度が未知量であっても、車速をパラメーターとして GA を適用すれば、橋梁上を走行する車両の速度、総重量、等価軸距を十分な精度で推定できると考えられる。

本論文で提案した GA による橋梁交通荷重の推定法は、使用するピックアップ数が 1~2 個程度でも適用できる可能性が高く、従来手法と比べてきわめて安価な方法と考えられる。本研究で、GA を適用する有用性を十分に提示できたと考えられることから、今後は早急に計測システムの構築を図り、実際の橋梁交通荷重に適用する実用化研究を実施していく所存である。本論文が、橋梁の維持管理に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) Moses, F. : Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Proc. Of ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233 ~ 249, January, 1979.
- 2) 西川和廣, 村越 潤, 宮崎和彦 : 橋梁を用いた車両重量の計測 (WIM) システムの開発, 土木技術資料 38-1, 1996.
- 3) 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 9 月.
- 4) 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 年 3 月.
- 5) 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両の輪重推定, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1141~1151, 1998 年 3 月.
- 6) 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 3 月.
- 7) 小塩達也, 山田健太郎, 深津 伸 : BWIN による大型車両の実体調査と橋梁の疲労損傷度評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1055~1062, 2002 年 3 月.

(2002年9月13日受付)