

遺伝的アルゴリズムを適用した Bridge Weigh-in-Motion システム

Development of Bridge Weigh-in-Motion System using Genetic Algorithm on Highway Bridges

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 deals with a new bridge weigh-in-motion 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 highway bridges. Based on these results, it was found that the new bridge weigh-in-motion 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

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従来の 200kN ($\approx 20\text{tonf}$) から 250kN ($\approx 25\text{tonf}$) に変更された。しかしながら、総重量 245kN ($\approx 25\text{tonf}$) 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問題になり始めたのを契機に Moses¹⁾によって提案されたものであり、わが国でも数多くの研究者によってそれぞれ有用な手法^{2)~7)}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 I 桁橋は施工の

省力化や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、遺伝的アルゴリズム（以下、必要に応じて GA と記す）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すでにスタートさせている⁸⁾。

ところで、たとえどのような手法であっても橋梁交通荷重を推定する際にはキャリブレーション値（実測値と推定値の比または実測値と解析値の比を表す補正係数）が必要である。キャリブレーション値を求める場合、車両走行試験から算出した影響面積を利用する推定手法^{2), 3), 6)}では交通止めを必ずしも必要としないが、その他の手法では対象橋梁に対して交通止めを実施し、諸元の明確な試験車両を橋梁上に停車させて静的変位や静的ひずみを計測する必要があった。また、実際、著者らの先の論文でも、事前に静的載荷試験を行うものとし、キャリブレーション値は既知であるとしていた。しかしながら、交通止めを実施するためには特別な許可が必要であり、変位計の設置やひず

みゲージの貼付は一般に煩雑な作業をとまなう。これに対し、GA（遺伝的アルゴリズム）を適用する手法では、一般車両の通行が途絶えた時に、試験車両を一定速度で走行させればキャリブレーション値を算出できる可能性がある予想される。そこで、本研究では、GA を適用した Bridge Weigh-in-Motion システムの構築を図るため、車両諸元が既知の大型車両を走行させた場合の動的応答量を計測し、GA を適用してキャリブレーション値を算出する手法について検討することとした。その結果、交通止めをとまなう静的載荷試験を実施しなくても、GA を適用すれば、キャリブレーション値を容易にしかも精度良く算出できるとの知見が得られた。

著者らはすでに、GA を適用すれば、特別な装置を利用し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があることを先の論文で示唆しているが、対象とした橋梁は単純桁形式のみであり、車両速度の算出も TYPE-6 車両（総重量 490kN のセミトレーラー）に限定されていた。そこで、本研究では、単純桁形式のみならず、連続桁形式橋梁をも対象とし、TYPE-1～TYPE-6 のすべての車両について GA を適用した Bridge Weigh-in-Motion システムの妥当性と有用性についてさらに詳細な検討を実施することとした。加えて、一般的には単独走行状態が最も多いが、大型車両が併走する場合についても GA の適用可能性を検討した。このように、GA を適用した Bridge Weigh-in-Motion システムに関して新たな解析結果を提示することは、今までにもまして適正な維持管理が要求される現在、実務技術者にきわめて有用な情報を提供するものと考えられる。すなわち、本論文は、遺伝的アルゴリズムを適用した Bridge Weigh-in-Motion システムの構築を図り、その有用性をより詳細に検証するため、著者らの既往研究⁸⁾をもとに、新たな解析データならびに知見を加味して再構成したものである。

2. 遺伝的アルゴリズムを適用した推定法

(1) 提案した手法の概要

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程で起こる自然淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的仕組みを模擬した手順のことで、具体的には、仮想生物（個体）を想定し、コンピュータ内でその遺伝子（染色体）を 0 と 1 の 2 進数列で表示（本研究では一つの未知量を 24 ビットで表示）する。そして、遺伝的仕組みを模擬したプログラムで仮想生物（個体）を何世代にもわたって進化させ、環境に最も適合する個体を探索し、その遺伝子（染色体）から最適解を求めようとするものである。

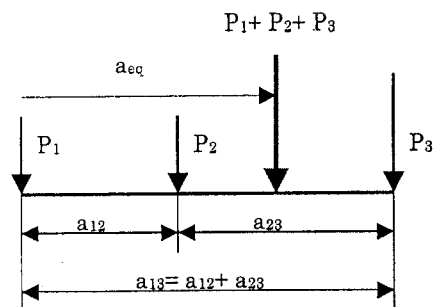


図-1 等価軸距の定義

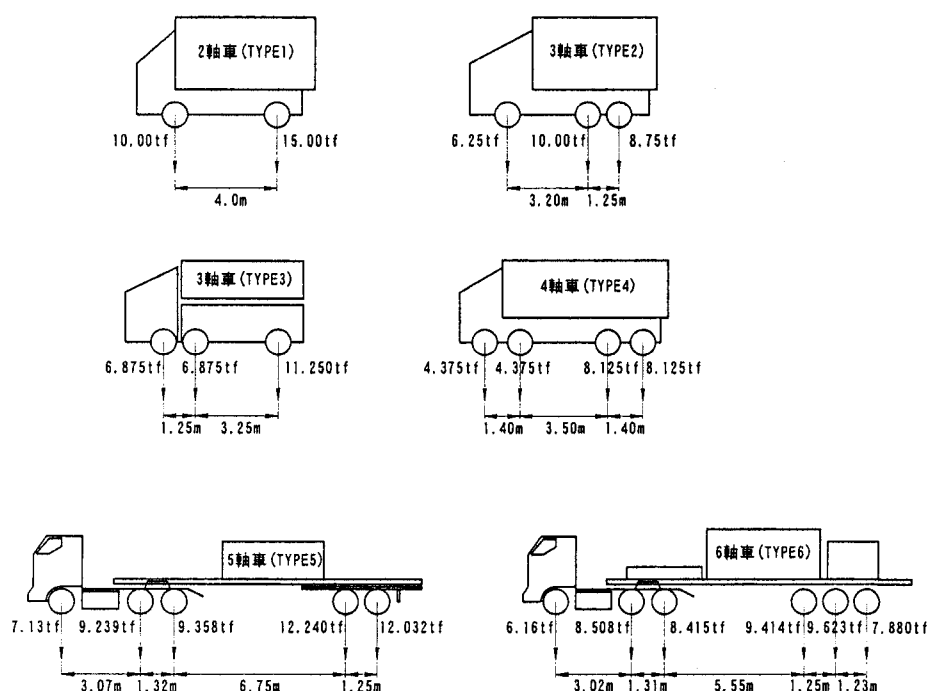
遺伝的アルゴリズムを適用して橋梁交通荷重を推定する場合、軸重と軸間距離（たとえば、2 軸車であれば、前輪と後輪の軸重 P_1 , P_2 および軸間距離 a_{12} ）から構成された一つの個体（ P_1 , P_2 および a_{12} はそれぞれ 24 ビットで表示されていることから、この場合の一つの個体は 24+24+24 ビットで構成されている）が環境に適合する程度（ a_{12} だけ離れた軸重 P_1 , P_2 によって生じる応答の解析値と実測値が一致する程度）は、次式で定義した目的関数 J_{GA} の逆数（適応度関数）で評価される。

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

ここに、 CAL はキャリブレーション値、 $R_{c,i}$ は解析値、 $R_{m,i}$ は計測された応答、 n は GA で利用する計測データの個数である。なお、先の論文では単純桁形式のみを対象としていたことから、解析値は単純梁の解析解（はり理論による解析解）を用いて算出していたが、本研究では、コンピュータ内で影響線解析（影響値は事前にマトリックス構造解析を実施して算定）を実施して算出することとした。

(2) 推定する車両諸元

橋梁上にはトラック類のみならずセミトレーラーなど様々な軸数を有する重交通車両が走行する。GA を適用してそれぞれの軸重と軸間距離を推定した場合、総重量は非常に高い精度で推定できるものの、個々の軸重を正しく推定するのは困難である⁸⁾。これは、計測値を満足する軸重と軸間距離の組み合わせが幾つも存在するためである。それゆえ、GA を適用して橋梁交通荷重を推定する場合には、個々の軸重と軸距から算定した等価軸距を評価指標として採用する必要がある。ここに、等価軸距とは、図-1 に示すように、荷重列を一つの集中荷重に置換した場合の作用位置（前輪から測った軸距）である。したがって、図-1 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。



図－2 TYPE-1～TYPE-6 の車両モデル

表－1 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

$$a_{eq} = \frac{P_2 \times a_{12} + P_3 \times a_{13}}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (2)$$

参考までに、本研究で対象とした TYPE-1～TYPE-6 車両を図-2に示す。ここに、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 に設定している。TYPE-1～TYPE-6 の軸重、軸距、総重量および等価軸距を表-1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。

(3) キャリブレーション値の算出

一般に、実橋における実際の剛性は解析で用いる剛性よりも大きく、計測値は解析値よりも幾分小さな値を呈する場合が多い。それゆえ、GA を用いた手法を適用する場合にも、事前にキャリブレーション値（補正係数）CAL を算定する必要がある。

影響面積を利用しない手法では、対象橋梁に対して交通止めを実施し、諸元の明確な試験車両を橋梁上に停車させて静的変位や静的ひずみを計測する必要がある。しかしながら、交通止めを実施するためには特別な許可が必要であり、変位計の設置やひずみゲージの貼付は一般に煩雑な作業をとまなう。

これに対し、具体的には 3 章（単純桁橋に対する数値計算例）と 4 章（連続桁橋に対する数値計算例）で述べるように、GA を適用する手法では、一般車両の通行が途絶えた時に、諸元の明確な試験車両を一定速度で走行させれば容易にキャリブレーション値を算出でき、従来の手法と比べて事前の準備作業の観点からもきわめて有用な手法である。

(4) 走行位置と走行速度

ここでは説明を容易にするため、主桁間隔が 5.70m の 2 主桁橋があり、中央点の上流側と下流側に加速度計を設置したものとする。加速度計では加速度を計測することになるが、電氣的に 2 回積分してフィルター処理すれば、車両走行にともなう静的変位を算定することができる。

もし仮に、車両が橋の幅員中央部を走行したとすれば、鉛直たわみ変形のみが生じ、ねじれ変形は生じることではない。これに対し、車両の走行位置が幅員中央部から離れるにしたがって、当然のことながら、鉛直たわみ成分に加え、ねじれ成分も生じることになる。参考までに、図-3には橋の中央部および左右の主桁上（±2.85m の位置）を車両が走行した場合の桁中央点における静的最大変位を示す。この図から、車両の走行位置は上・下流側のピックアップから算出したね

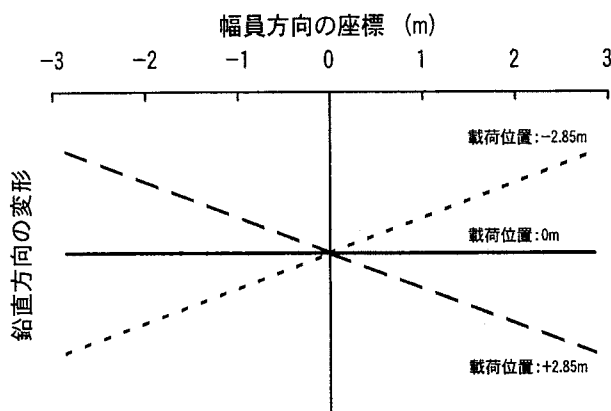


図-3 車両載荷位置と鉛直変位の関係

じれ角から容易に算定できることがわかる。したがって、キャリブレーション値を算出するための車両走行試験時に、車両走行位置とねじれ角の関係を把握しておけば、一般車両の走行位置を把握できると言える。また、図-3において、左右の主桁上を車両が走行した場合にも、上・下流側のピックアップで計測した静的変位の平均値は橋の中央部を車両が走行した場合の値に等しくなっていることがわかる。このことは、対称性を有する橋梁に GA を適用する場合、式(1)中の $R_{c,i}$ （解析値）は平面骨組構造モデルの影響線解析を実施すれば算出できることを意味している。

たとえどのような手法であっても橋梁交通荷重を推定するには車両の走行速度が必要であり、従来の手法では交通荷重を算出するためのピックアップとは別のピックアップを車両速度検出用として設置する必要があった。これに対し、GA を適用する手法でも車両の走行速度が必要となるが、車両速度を算出するための専用ピックアップは不要で、車両の走行速度をパラメータとして GA を適用すれば、3 章と 4 章で述べるように車両の走行速度を算出することができる。このことも、GA を適用する手法の大きな利点であり、橋梁交通荷重を推定する有用な手法であると考えている。

3. 単純桁橋に対する数値計算例

(1) 2 軸車を用いたキャリブレーション値の算出

対象とした橋梁は、橋長が 50m で断面 2 次モーメントが $I=1.388\text{m}^4$ の単純梁である。試験車として用いた車両は図-2に示した TYPE-1 の 2 軸車両であり、まずはじめに、前輪荷重 P_1 、後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} はそれぞれ $P_1 = 49.000\text{kN}$ 、 $P_2 = 196.000\text{kN}$ 、 $a_{12} = 4.0\text{m}$ と正確に計測されたものと仮定する。この TYPE-1 車両（試験車両）を 60km/h の速度で走行させ、橋梁に進入してから退出するまでの鉛直変位を橋の中央点で計測する。応答波形には静的成分と動的成

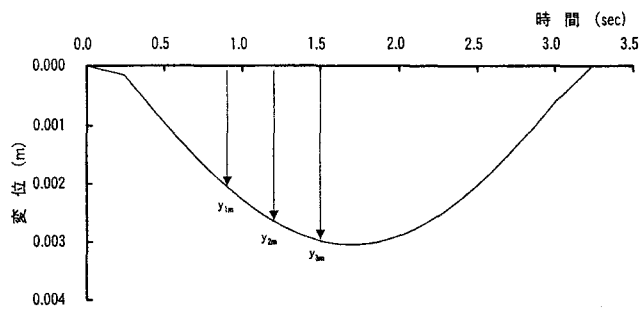


図-4 静的変位応答波形
(TYPE-1 車両が走行した場合)

表-2 誤差がない場合の適用条件
(TYPE-1 車両)

推定する諸元		P_1, P_2, a_{12}
個体数		2 個
世代数		1 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	98.0kN
	P_2	147.0kN
	a_{12}	4.00m

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-4 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。

今、前輪荷重 P_1 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成分の計測値を y_{1m}, y_{2m}, y_{3m} 、解析値を y_{1c}, y_{2c}, y_{3c} とする。一般に、実橋の剛性は解析で用いる値よりも大きいことから、計測値は解析値よりも幾分小さな値を呈する場合が多い。したがって、キャリブレーション値 (補正係数) を CAL と表示すれば、

$$\left. \begin{aligned} y_{1m} &= CAL \times y_{1c} \\ y_{2m} &= CAL \times y_{2c} \\ y_{3m} &= CAL \times y_{3c} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と表される。ここに、キャリブレーション値は以下の検討を実施して決定されるが、本章の解析ではキャリブレーション値の正解値を $CAL = 0.90$ に設定することとした。

試験車両の走行速度を 60km/h に設定しても実際には幾分変化する。そこで、走行速度を 58km/h, 59km/h, 60km/h, 61km/h, 62km/h と仮定し、未知量であるキャリブレーション値を 0.8 から 1.2 まで変化させて、それぞれのキャリブレーション値に対応する適応度関数を求めることとした。なお、本ケースでは前輪荷重 $P_1 (= 49.000kN)$ 、後輪荷重 $P_2 (= 196.000kN)$ 、

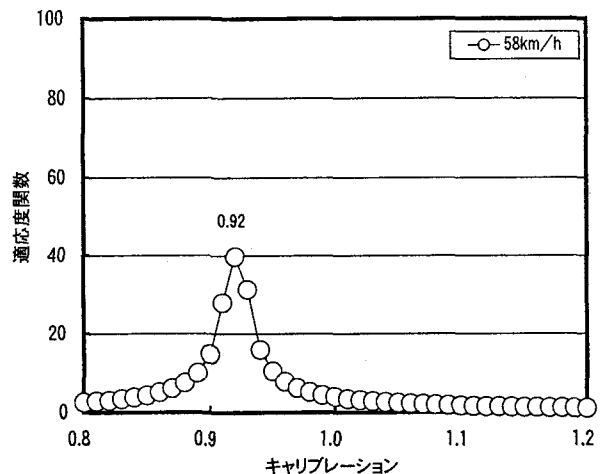


図-5 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-1 車両, 単純桁, 58km/h)

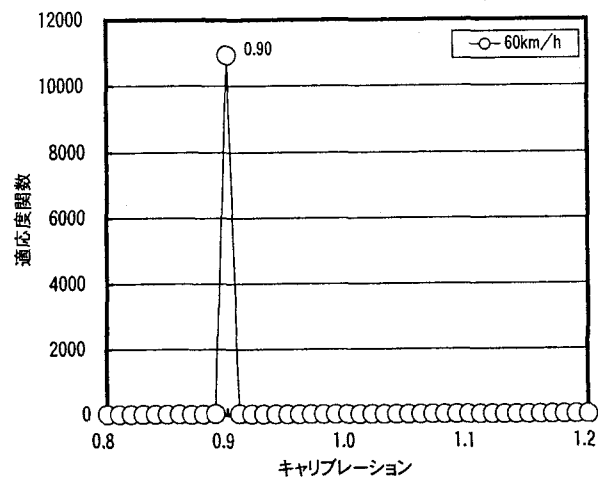


図-6 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-1 車両, 単純桁, 60km/h)

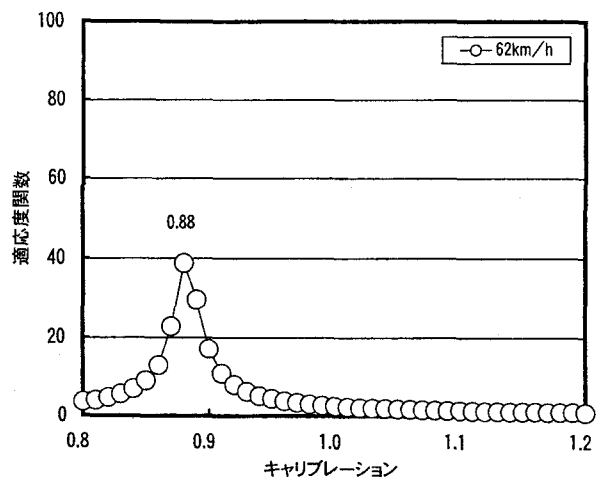


図-7 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-1 車両, 単純桁, 62km/h)

表－3 キャリブレーションの算出値（誤差がない場合，TYPE-1 車両，単純桁）

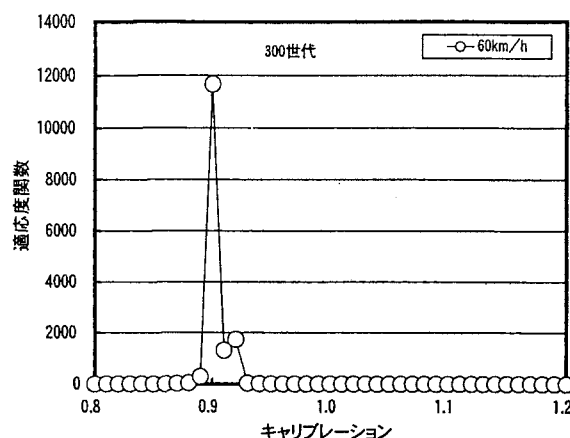
車 速	適応度関数	キャリブレーション
58 km/h	39.7	0.92
59 km/h	81.2	0.91
60 km/h	10939	0.90
61 km/h	77.2	0.89
62 km/h	38.8	0.88

表－4 $\pm 2.5\%$ の誤差を考えた適用条件（TYPE-1 車両）

推定する諸元		P_1, P_2, a_{12}
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	95.55kN～100.45kN
	P_2	143.325kN～150.675kN
	a_{12}	3.90m～4.10 m

軸間距離 $a_{12}(=4.0\text{m})$ が正確に計測されたものと仮定していることから，GA の適用にあたっては 2 軸車両を使用し，適用条件は表－2 に示すように個体数を 2，世代数を 1 に設定している．走行速度が 58km/h，60km/h，62km/h の場合に得られたキャリブレーション値と適応度関数の関係を図－5～図－7 に示す．また，それぞれの走行速度に対応する適応度関数とキャリブレーション値を表－3 にまとめる．これらの結果から，目標値である 60km/h で走行した場合には $CAL = 0.90$ と正しいキャリブレーション値が算出されていることがわかる．また，目標速度の 60km/h に対して実際の走行速度が 58km/h と 62km/h であってもそれぞれ $CAL = 0.92$ ， $CAL = 0.88$ のキャリブレーション値が算出されていることがわかる．

以上の検討では，試験車（TYPE-1 の 2 軸車両）の前輪荷重 P_1 ，後輪荷重 P_2 および軸間距離 a_{12} が正確に計測されたものと仮定していた．しかしながら，いくら厳密に計測しても，軸重や軸間距離には若干の計測誤差が含まれる可能性がある．そこで，前輪荷重 $P_1(=49.000\text{kN})$ ，後輪荷重 $P_2(=196.000\text{kN})$ ，軸間距離 $a_{12}(=4.0\text{m})$ に $\pm 2.5\%$ の誤差があるものとし，表－4 に示す条件のもとで GA を適用することとした．一例として，車両速度が 60km/h に対するキャリブレーション



図－8 キャリブレーションと適応度関数の関係（TYPE-1 車両，単純桁，60km/s， $\pm 2.5\%$ の誤差）

表－5 キャリブレーションの算出値（ $\pm 2.5\%$ の誤差がある場合，TYPE-1 車両，単純桁）

車 速	適応度関数	キャリブレーション
58 km/h	50.7	0.93
59 km/h	121.8	0.93
60 km/h	11670	0.90
61 km/h	107.5	0.90
62 km/h	49.3	0.88

ン値と適応度関数の関係を図－8 に示す．また，適応度関数が最大となるキャリブレーション値を表－5 にまとめる．表－5 から，適応度関数の最大値は 60km/h の場合に生じ，キャリブレーション値は $CAL = 0.90$ と正確に算出されていることがわかる．また，この時の等価軸距と総重量の推定値はそれぞれ 2.401m，245.24kN であり，真値である 2.400m，245.00kN と非常に良く一致する結果となっている．なお，その他の走行速度に対応するキャリブレーション値は 0.88～0.93 であり，適応度関数の値はさほど大きくないものの，実務上は十分な精度でキャリブレーション値を推定できるものと言える．

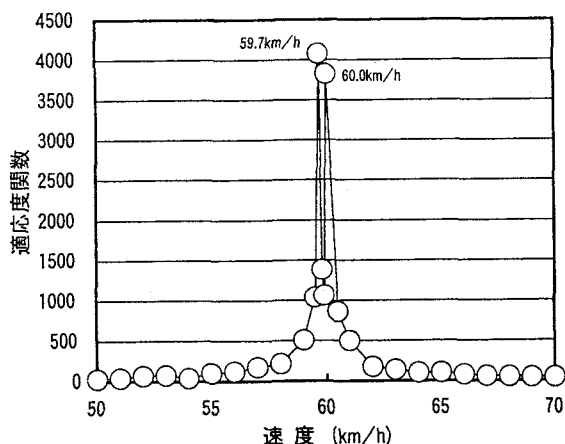
(2) 車両荷重の算出

キャリブレーション値 CAL を設定できたことから，任意車両が走行した場合の等価軸距と総重量を推定することとした．対象とした車両は TYPE-1～TYPE-6 であり，60km/h で橋長 50m の単純桁橋を走行するものとする．

GA を適用するにあたっては，6 軸以下のすべての車両に対応できるように表－6 に示す条件を設定するものとした．したがって，TYPE-1 車両を対象とした場合にも，キャリブレーション時に使用した 2 軸車両

表－6 6軸車モデルの適用条件

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 ～P ₅	0.0 kN～196.0kN
	P ₆	49.0kN～196.0kN
	a ₁₂	1.0 m～13.0 m
	a ₁₃ ～a ₁₆	3.0 m～13.0 m

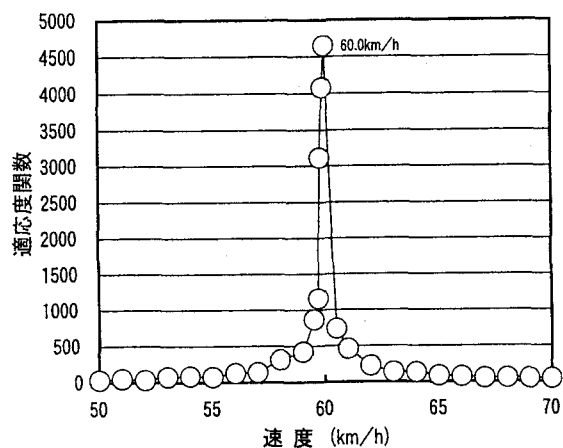


図－9 走行速度と適応度関数の関係（CAL=0.9, TYPE-1 車両, 単純桁）

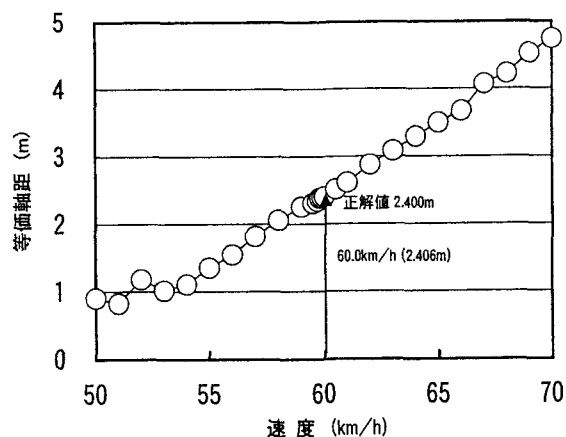
表－7 推定値と真値の比較
（TYPE-1 車両, 単純桁）

	推定値		真 値
	59.7 km/h	60.0 km/h	
等価軸距	2.375m	2.406m	2.400m
総重量	247.59kN	245.68kN	245.00kN

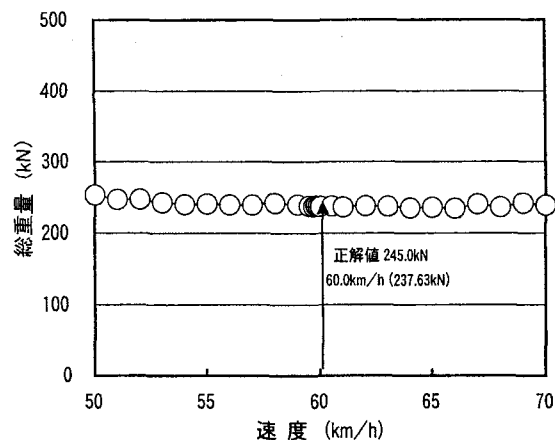
と推定するパラメータ（本節でのパラメータは 6 つの軸重と 5 つの軸距）が異なっていることに留意が必要である。TYPE-1 車両について、キャリブレーション値を正確な $CAL = 0.9$ に設定した場合の車両速度と適応度関数の関係（300 世代目の最適結果）を図－9に示す。図－9 から、59.7km/h と 60.0km/h にそれぞれ明確なピークが認められるものの、車両速度をほぼ正しく推定していることがわかる。また、表－7 からわかるように、等価軸距と総重量は、59.7km/h で 2.375m と 247.59kN、60.0km/h で 2.406m と 245.68



図－10 走行速度と適応度関数の関係
（CAL=0.93, TYPE-1 車両, 単純桁）



図－11 走行速度と等価軸距の関係
（CAL=0.93, TYPE-1 車両, 単純桁）



図－12 走行速度と総重量の関係
（CAL=0.93, TYPE-1 車両, 単純桁）

表－8 推定値と真値の比較
(TYPE-2～TYPE-6 車両, 単純桁)

		推定値	真 値
TYPE-2	等価軸距	2.845 m	2.837 m
	総 重 量	248.11 kN	245.00 kN
TYPE-3	等価軸距	2.379 m	2.369 m
	総 重 量	246.76 kN	245.00 kN
TYPE-4	等価軸距	3.884 m	3.885 m
	総 重 量	246.60 kN	245.00 kN
TYPE-5	等価軸距	7.049 m	7.098 m
	総 重 量	482.11 kN	490.00 kN
TYPE-6	等価軸距	7.127 m	7.193 m
	総 重 量	489.78 kN	490.00 kN

kN のように推定されており, いずれも TYPE-1 車両の真値である 2.400m, 245.00kN と非常によく一致している。

次に, キャリブレーション値 CAL の厳密な値は $CAL = 0.9$ であるが, キャリブレーション値の算出過程で誤差が含まれ, $CAL = 0.93$ と評価した場合についても GA の適用性を検討することとした。表－6 に示す条件を採用して得られた, 車両速度と適応度関数の関係 (300 世代目の最適結果) を図－10 に示す。図－10 から, この場合には 60.0km/h のみに明確なピークが認められ, 車両速度をほぼ正しく推定していることがわかる。また, 図－11 と図－12 からわかるように, 等価軸距と総重量の推定値は 2.406m, 237.63kN となっており, いずれも TYPE-1 車両の真値である 2.400m, 245.00kN と比較的によく一致している。なお, 結果は省略するが, 補足的に実施したその他の計算結果を考慮すれば, キャリブレーション値 CAL の誤差は, たとえば上の例で言えば, $245.00\text{kN} \times 0.90/0.93 = 237.10\text{kN}$ のように, 総重量の推定値に影響することを付記しておく。

以上は, TYPE-1 車両に対する検討結果であったことから, TYPE-2～TYPE-6 車両についても同様の検討を実施することとした。GA による推定値 (300 世代目の最適結果) と真値の対比結果を表－8 に示す。この表から, たとえどのような車両であっても GA を適用すれば, 非常に高い精度で橋梁交通荷重を推定できると言える。

4. 3 径間連続桁橋に対する数値計算例

(1) 6 軸車を用いたキャリブレーションの算出

3 径間連続桁橋であってもキャリブレーションの算定にあたっては 2 軸車両や 3 軸車両を用いる場合が多

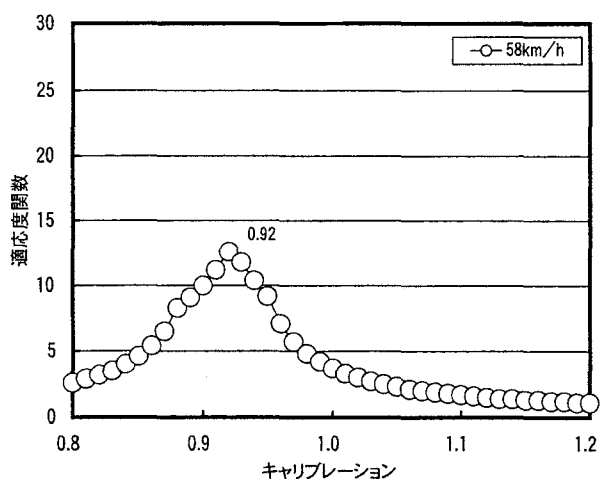
表－9 誤差がない場合の適用条件
(TYPE-6 車両, 連続桁)

個体数	2 個	
世代数	1 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	60.368kN
	P ₂	83.378kN
	P ₃	82.467kN
	P ₄	92.257 kN
	P ₅	94.306kN
	P ₆	77.224kN
	a ₁₂	3.020 m
	a ₁₃	4.330m
	a ₁₄	9.880m
	a ₁₅	11.130m
	a ₁₆	12.360m

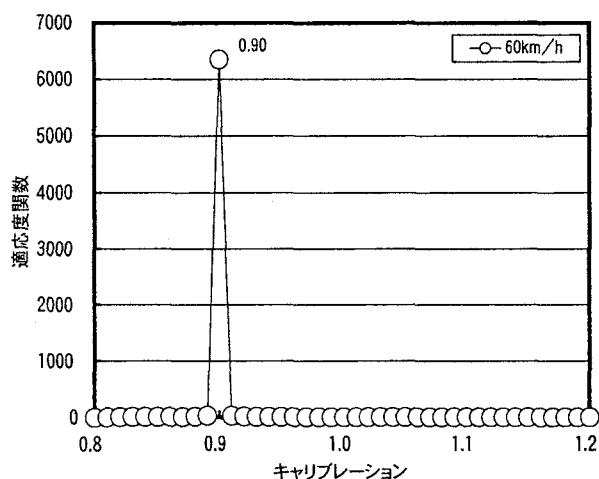
いと考えられるが, ここでは図－2 に示した TYPE-6 車両を試験車両としてキャリブレーションを算出することとした。なお, 対象とした 3 径間連続桁橋は 40m+50m+50m であり, 断面 2 次モーメントとねじれ定数はそれぞれ 1.0m^4 を仮定した。

単純桁橋と同じく, 前輪荷重 P_1 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成分 (フィルター処理や波形の平均化処理を施した変位成分) の計測値を y_{1m}, y_{2m}, y_{3m} , 解析値を y_{1c}, y_{2c}, y_{3c} とする。また, TYPE-6 車両のすべての軸重と軸間距離が表－1 に示したように正確に計測されたものと仮定する。

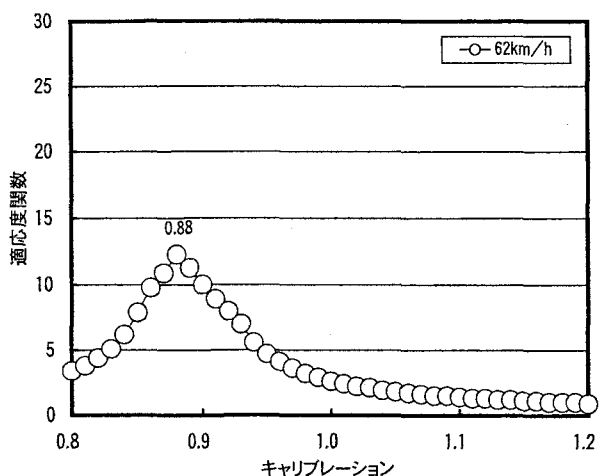
試験車両の走行速度を 60km/h に設定しても実際には幾分変化することから, 走行速度を 58km/h, 59km/h, 60km/h, 61km/h, 62km/h と仮定し, 未知量であるキャリブレーションを 0.8 から 1.2 まで変化させて, それぞれのキャリブレーションに対応する適応度関数を算出することとした。なお, 本ケースでは 6 つの軸重と 5 つの軸間距離が正確に計測されたものと仮定していることから, GA の適用条件は表－9 に示すように個体数を 2, 世代数を 1 に設定している。走行速度が 58km/h, 60km/h, 62km/h の場合に得られたキャリブレーションと適応度関数の関係を図－13～図－15 に示す。また, それぞれの走行速度に対応する適応度関数とキャリブレーションを表－10 にまとめる。これらの結果から, 3 章で提示した単純桁橋の場合と同様に, 走行試験の目標値である 60km/h で走行した場合には $CAL = 0.90$ と正しいキャリブレーション



図－１３ キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 58km/h)



図－１４ キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 60km/h)



図－１５ キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 62km/h)

表－１０ キャリブレーションの算出値（誤差がない場合, TYPE-6 車両, 連続桁）

車 速	適応度関数	キャリブレーション
58 km/h	12.6	0.92
59 km/h	25.0	0.91
60 km/h	6353.9	0.90
61 km/h	24.9	0.89
62 km/h	12.3	0.88

表－１１ ± 2.5 % の誤差を考えた適用条件
(TYPE-6 車両)

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	58.859kN～61.877kN
	P ₂	81.291kN～85.466kN
	P ₃	80.409kN～84.525kN
	P ₄	89.954kN～94.560kN
	P ₅	91.944kN～96.667kN
	P ₆	75.293kN～79.155kN
	a ₁₂	2.945m～3.096m
	a ₁₃	4.222m～4.438m
	a ₁₄	9.633m～10.127m
	a ₁₅	10.852m～11.408m
	a ₁₆	12.051m～12.669m

ションが算出されていることがわかる。また、目標速度の 60km/h に対して実際の走行速度が 58km/h と 62km/h であったとしてもそれぞれ $CAL = 0.92$, $CAL = 0.88$ のキャリブレーションが算出されていることがわかる。

次に、試験車（TYPE-6 の 6 軸車両）の軸重 $P_1 \sim P_6$ と軸間距離 $a_{12} \sim a_{16}$ に ±2.5% の誤差があるものとし、表－１１に示す条件で GA を適用することとした。車両速度が 58km/h, 60km/h, 62km/h に対するキャリブレーションと適応度関数の関係を図－１６～図－１８に示す。また、適応度関数が最大となるキャリブレーションを表－１２にまとめる。表－１２から、適応度関数の最大値は 60km/h の場合に生じ、キャリブレーションは $CAL = 0.90$ と正確に算出されていることがわかる。また、この時の等価軸距と総重量の推定値はそれぞれ 7.180m, 489.43kN であり、真値である 7.193m, 490.00kN と非常に良く一致する結果となっ

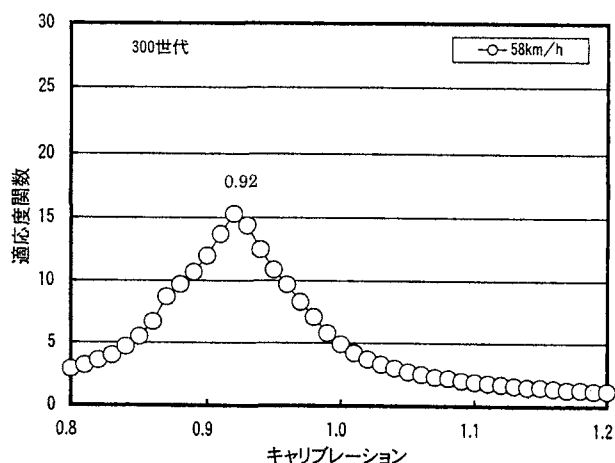


図-16 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 58km/s, $\pm 2.5\%$ の誤差)

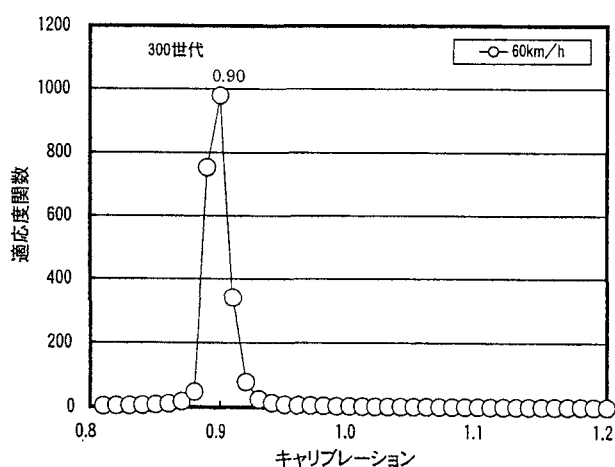


図-17 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 60km/s, $\pm 2.5\%$ の誤差)

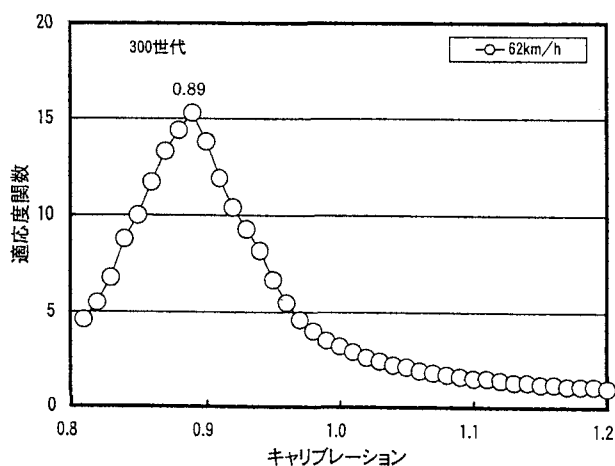


図-18 キャリブレーションと適応度関数の関係
(TYPE-6 車両, 連続桁, 62km/s, $\pm 2.5\%$ の誤差)

表-12 キャリブレーションの算出値 ($\pm 2.5\%$ の誤差がある場合, TYPE-6 車両, 連続桁)

車 速	適応度関数	キャリブレーション
58 km/h	15.3	0.92
59 km/h	43.4	0.90
60 km/h	979.4	0.90
61 km/h	52.9	0.90
62 km/h	15.3	0.89

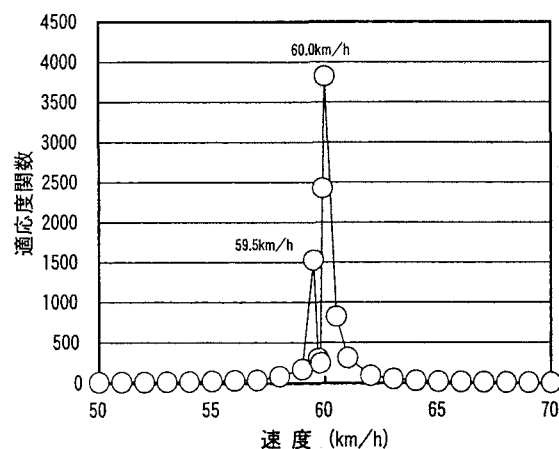


図-19 走行速度と適応度関数の関係 (CAL=0.9, TYPE-6 車両, 連続桁)

ている。なお、その他の走行速度に対応するキャリブレーションは 0.89~0.92 であり、適応度関数の値はさほど大きくないものの、3 径間連続桁橋であっても実務上は十分な精度でキャリブレーション値を推定できるものと言える。

(2) 車両荷重の算出

キャリブレーション CAL を設定できたことから、任意車両が走行した場合の等価軸距と総重量を推定することとした。対象とした車両は TYPE-1~TYPE-6 であり、60km/h で橋長 40m+50m+50m の連続桁橋を単独走行するものとする。なお、GA を適用するにあたっては、6 軸以下のすべての車両に対応できるように表-6 に示した条件を設定するものとした。

TYPE-6 車両について、キャリブレーションを正確な CAL = 0.9 に設定した場合の車両速度と適応度関数の関係 (300 世代目の最適結果) を図-19 に示す。図-19 から、59.5km/h と 60.0km/h にそれぞれ明確なピークが認められるものの、車両速度をほぼ正しく推定していることがわかる。また、表-13 からわかるように、等価軸距と総重量は、59.5km/h で 7.178m と 505.60kN、60.0km/h で 7.159m と 487.66kN のように推定されており、いずれも真値である 7.193m、490.00kN と非常によく一致している。

表-13 推定値と真値の比較
(TYPE-6 車両, 連続桁)

	推 定 値		真 値
	59.5 km/h	60.0 km/h	
等価軸距	7.178m	7.159m	7.193m
総重量	505.60kN	487.66kN	490.00kN

表-14 推定値と真値の比較
(TYPE-1~TYPE-5 車両, 連続桁)

		推 定 値	真 値
TYPE-1	等価軸距	2.407 m	2.400 m
	総重量	245.29 kN	245.00 kN
TYPE-2	等価軸距	2.793 m	2.837 m
	総重量	250.58 kN	245.00 kN
TYPE-3	等価軸距	2.354 m	2.369 m
	総重量	246.21 kN	245.00 kN
TYPE-4	等価軸距	3.827 m	3.885 m
	総重量	244.70 kN	245.00 kN
TYPE-5	等価軸距	7.099 m	7.098 m
	総重量	494.56 kN	490.00 kN

なお、結果は省略するが、キャリブレーション値 CAL の誤差は、単純桁橋の場合と同様に、総重量の推定値のみに影響する結果が得られた。

以上は、TYPE-6 車両に対する検討結果であったことから、TYPE-1~TYPE-5 車両についても同様の検討を実施することとした。GA による推定値 (300 世代目の最適結果) と真値の対比結果を表-14 に示す。この表から、3 径間連続桁橋であっても、GA を適用した Bridge Weigh-in-Motion システムを適用すれば、非常に高い精度で橋梁交通荷重を推定できると言える。

(3) 車両が 2 台併走する場合の検討

前節までの検討では、車両が橋梁上を単独走行する場合が最も多いことに着目し、橋梁上を 1 台の車両が走行する場合を対象として GA の適用性を検討した。しかしながら、実際の橋梁では大型車両が併走する走行状態もあり得ることから、ここでは簡単な併走状態を対象として GA の適用性を検討することとした。

対象とした橋梁は、3 径間連続桁橋 (40m+50m+50m) であり、上り線側橋梁と下り線側橋梁が別々に架設され、それぞれが 2 車線以上を有するものとする。それゆえ、上り線側橋梁と下り線側橋梁のいずれの橋梁であっても 2 台以上の併走状態が可能であるが、ここでは 2 台の併走状態を想定する。着目した 2 台の車両の組み合わせは、TYPE-1 車両と TYPE-2 車両であり、2 台の車両は車頭間隔が 0m、60km/h

の車速で別車線を走行すると仮定した。なお、GA を適用するにあたっては、ここでは前節までと同じく表-6 に示した条件を採用するものとした。GA を適用した結果、推定値 (300 世代の中で最も大きな適応度関数を示した最適値) は等価軸距が 2.553m、総重量が 493.7kN と算出されたが、これらの値は TYPE-1 車両と TYPE-2 車両を 1 台の車両と見なして式(2)から算出した等価軸距の 2.619m、総重量である 490.0kN と概ね等しい値となっている。しかしながら、たとえ走行速度が一定であっても TYPE-1 車両と TYPE-2 車両に車頭間隔を与えた場合には必ずしも十分な推定精度が得られない場合もあった。これは、単独走行状態に対する表-6 の適用条件を採用したことにより起因するものであり、今後は併走状態を想定した GA の適用条件について検討する必要があると考えている。

5. 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検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 単純桁橋および 3 径間連続桁橋を対象として、車両諸元が既知の大型車両を走行させた場合の動的応答変位を用いてキャリブレーション値 (実測値と解析値の比を表す補正係数) を算出する手法を検討した。その結果、交通止めをとともなう静的載荷試験を実施しなくても、GA を適用すれば、非常に高い精度でキャリブレーション値を容易に算出できるとの知見が得られた。
- (2) キャリブレーション値 CAL の真値が $CAL = 0.9$ であっても、キャリブレーション値の算出過程で誤差が含まれ、 $CAL = 0.93$ と評価した場合についても GA の適用性を検討した。その結果、キャリブレーション値 CAL の誤差は総重量の推定値に影響するが、総重量の推定誤差は -3% ($0.90/0.93 \times 100 = 97\%$) 程度であり、GA を適用した橋梁交通荷重の推定法は実務において十分に適用できることがわかった。
- (3) 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、走行速度のみならず、総重量と等価軸距を数%以内の誤差で推定できることがわかった。

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 2 個程度でも適用できる可能性が高く、ピックアップ数が 2 個程度では十分

な推定を行えない従来手法と比べてきわめて安価な方法であると考えられる。本研究で、過積載車が橋梁上を単独走行する場合については GA を適用する有用性と簡便性を十分に提示できたと考えているが、一方で大型車両が併走する場合については更なる検討が必要であることもわかった。それゆえ、今後は大型車両の併走状態についても対応すべく、研究を継続する所存である。

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.
- 8) 米田昌弘, 枝元勝哉 : GA を適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.755~765, 2003 年 3 月.

(2003 年 9 月 12 日受付)