

遺伝的アルゴリズムを用いた 舗装体の弾性係数の逆解析

亀山修一¹・姫野賢治²・丸山暉彦³・笠原 篤⁴

¹ 学生会員 工修 長岡技術科学大学博士課程 材料工学専攻 (〒 940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

² 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (〒 060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³ 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 建設系 (〒 940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

⁴ フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部土木工学科 (〒 006 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目)

本研究は生物集団の進化過程に着想を得た遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、FWD によって得られた舗装表面たわみから舗装構成層の弾性係数を逆解析する手法を開発したものである。まず多層弾性理論によって算出される舗装表面のたわみを入力条件として与え、本手法による逆解析を行ったところ、十分な精度で舗装体の弾性係数を推定できることが確かめられた。また、実際にFWDによって測定されたアスファルト舗装とコンクリート舗装のFWDデータについても本手法を適用して逆解析をおこなった。その結果、従来の逆解析手法では適切な解が得られなかったケースにおいても良好な弾性係数を推定できる場合のあることが分かった。

KeyWords : pavement layer moduli, FWD, backcalculation, genetic algorithm, crossover, mutation

1. はじめに

近年、舗装の構造評価、維持修繕設計のために非破壊試験が注目され、種々の試験法が開発されてきた。これらの試験法は、①ベンケルマンビームのように舗装表面に静的な荷重を与えたとき、②ダイナフレクトのように周期的荷重を与えたときの他に、③衝撃荷重を与えたときに生じる舗装の表面たわみを測定する方法に分類される¹⁾。FWD (Falling Weight Deflectometer) はこの内③の非破壊試験法に用いられる装置であり、舗装表面に重錘を落下させたときに生じるたわみを載荷板近傍の数箇所で測定する装置である。最近では、測定値の精度が高いこと、測定が迅速に行えることなどから世界的にも非破壊試験にはFWDを用いることが主流となっており、我が国でも現在20台ほど稼働している。

測定されたFWDたわみから舗装構造を評価する方法としてはいわゆる逆解析法が広く用いられている。これは測定された舗装表面たわみから間接的にその舗装を構成する「現場での層弾性係数」(以下単に逆解析弾性係数と称する)を推定するものであり、この種の研究は世界的に活発に行われている^{2),3)}。逆解析の手法としては、測定された表面たわみと多層弾性論等から得られる計算たわみの残差平方和を評価関数とし、これを最小にする逆解析弾

性係数を推定する残差最小化法が広く用いられている。評価関数の最適化手法としては、ガウス・ニュートン法⁴⁾、カルマンフィルター⁵⁾、ベイズ法⁶⁾など様々な手法が採用され、その有効性と限界などが報告されている。

しかしながら、実測値を逆解析する場合、層弾性係数の初期値の与え方によっては、工学的に意味をなさないような解が得られる場合も見受けられる⁷⁾。この原因としては、仮定した舗装構造の層厚、ポアソン比などと実際の舗装構造とのモデル誤差や、測定誤差等の影響を挙げることができる^{8),9)}。その他逆解析において用いられている最適化手法にも起因していると考えられる。

逆問題を扱う場合、その問題が適切であるかどうかは、得られる解に対して、解の存在性、解の唯一性、解の安定性の3要件がすべて満足していなければならない¹⁰⁾。しかしながら、本研究のような逆問題においては、計算たわみと表面たわみの残差平方和の極小値はその最小値だけではなく、検索空間に多数存在し解の唯一性が保証されないことが著者らの研究により明らかとされている⁷⁾。したがって、従来用いられているガウス・ニュートン法等を採用した逆解析手法では、入力時に設定する層弾性係数の初期値によっては、局所解、すなわち残差平方和の最小値ではない極小値に陥ってしまう可能性があると考えられる。

本研究ではこのように解の唯一性が保証されないような逆問題の最適化手法として、最近注目されている生物集団の進化過程に着想を得た、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : 以下 GA と称する)¹⁰⁾に着目し、逆解析への適用を検討した。

さらに、実際に FWD によって測定されたアスファルト舗装とコンクリート舗装の表面たわみについて GA を適用して逆解析をおこない、ガウス・ニュートン法による逆解析結果との比較検討をおこなった。

2. 遺伝的アルゴリズムを応用した逆解析

GA とはランダムに生成した仮想生物の適応度を算出し、適応度の低い個体を淘汰し、残った適応度の高い個体だけに、交叉、突然変異などの遺伝子オペレーターを作用させ、次世代の集団を形成させるという過程を繰り返すものである。

一つの個体は m 層からなる舗装構成層の各層の弾性係数 E_j ($j = 1, 2, \dots, m$) を遺伝子として持つものとした。GA では遺伝子を 0, 1 で表現するバイナリ法が広く用いられているが、本研究では遺伝子を実数で表現することとした。これは、遺伝子を実数で表現することで使用するコンピュータのメモリを節約することができ、より広い範囲の検索を短時間で行うことができる上、安定した解が得られると報告されていることによる¹²⁾。本研究に用いた GA の流れを図-1 に、各段階の説明を以下に示す。

(1) 入力条件

ガウス・ニュートン法等を用いた従来の逆解析法では、入力値として、各舗装構成層の層厚、ポアソン比、表面たわみ、収束条件の他に、各舗装構成層の弾性係数の初期値が必要となる。しかし、GA を適用した逆解析では、ランダムに生成された遺伝子を持つ個体を初期集団として用いるため、弾性係数の初期値を必要とせず、各舗装構成層の弾性係数の上限値と下限値、つまり工学的に弾性係数が存在すると推定される範囲を入力値として与える。この範囲を大きく設定すると、検索範囲が広くなり、収束までに時間がかかる反面、小さく設定すると、局所解に陥る可能性が高くなる。

舗装厚、ポアソン比も遺伝子として表し、GA により最適化することも可能であるが、この場合、検索空間がさらに広い範囲にわたり、解を得るまでに莫大な時間がかかるため、これらは固定値とし、各舗装構成層の弾性係数のみを最適化することとした。

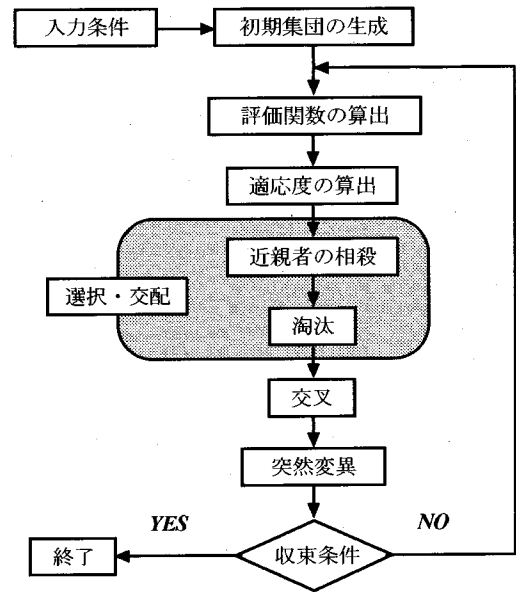


図-1 遺伝的アルゴリズムの流れ

(2) 初期集団の生成

入力値として各舗装構成層の弾性係数 E_j が存在する範囲を設定し、この範囲内の弾性係数を遺伝子として持つ個体をランダムに生成した。個体数 n が少ないほど計算に要する時間は短縮されるが、逆に少なすぎると、遺伝子の多様性が失われるため、局所解に陥ったときに、そこから脱出することが困難になる。適切な個体数は最適化する問題によって異なり一定の規準は存在しないが、一般的に 50 ~ 150 の個体数で十分であると言われていることから¹³⁾、本研究では計算時間を考慮して個体数を 50 個とした。

(3) 評価関数の算出

各個体の遺伝子として表現された各層の弾性係数と設定した層厚、ポアソン比から多層弾性理論解析プログラム (ELSA)¹⁴⁾によって順解析をおこない、舗装表面のたわみを算出し、測定された FWD たわみと計算たわみから重み付き残差平方和を式(1)によって求め、評価関数 R_i とした。

$$R_i = \sum_{k=1}^N \sqrt{w_k \left(d_{ik}^{(c)} - d_{ik}^{(m)} \right)^2} \quad (1)$$

ここで、

R_i : 個体 i の評価関数 ($i = 1 \sim n$)

k : たわみの測定位置 ($1 \sim N$)

w_k : 測定位置における重み

$di_k^{(c)}$: 計算たわみ

$di_k^{(m)}$: 測定たわみ

なお、 w_k は 0mm 以上 600mm 未満のセンサーでは 5、それ以上のセンサーでは 2 とした。

(4) 適応度の算出

GA は集団を進化させ、適応度が最良となる個体を抽出するアルゴリズムであるため、本問題のような最小値検索問題を扱う場合には、これを最大値検索問題へと変換する必要がある。したがって、式(2)によって評価関数 R_i から適応度 F_i を求め、最大値検索問題に変換した。

$$F_i = U - R_i \quad (2)$$

ここで、 U の値としては、適応度が負とならないように、 R_i の最大値をとることが理想的であるが、前もってこの値を得ることはできないため、それまでの繰り返し過程において得られた R_i の最大値を U とした。しかしながら、 U の値によっては淘汰圧が働かず、最適な遺伝子が抽出されない場合があるため、 U の値を検索の進行に応じて変えることで淘汰圧の制御を自動化するスケールリングウィンドウを採用した¹⁵⁾。本研究ではスケールリングウィンドウサイズを 8 とし、過去 8 世代中の評価関数 R_i の最大値を U とした。

(5) 選択・交配

得られた適応度に応じて、次世代の個体の生成に参加できる個体を集団から選択し、交配させる。現在まで、選択・交配方法にはルーレット戦略¹¹⁾、ランク戦略¹⁶⁾、エリート保存戦略¹⁷⁾など多くの方法が提案されている。

本研究で採用した選択・交配方法は、まず集団中の個体を適応度の大きい順にソートし、次に適応度が下位の個体を一定の割合で淘汰して消滅させ、適応度が上位の個体を交配させて生成された個体に置き換える方法である。この手法は、収束が速い反面、検索の進行に伴い集団内の最良の適応度を示す個体と似た遺伝子を持つ個体が多数生成されることから、局所解に陥りやすいという欠点を有する。このため、これらの最良個体と似た遺伝子からなる個体を相殺し、遺伝子が一様化するのを防いだ後、適応度が下位の個体を一定の割合で淘汰した¹⁸⁾。 i 世代から $i+1$ 世代の個体が生成される手順を図-2 に示す。

a) 近親者の相殺

適応度の高い個体だけから子孫を生成すると、検索が進行するにつれて各個体の遺伝子は似たものとなり、一様な個体が集団が占められるようになる。したがって、後述するような交叉、突然変異などの遺伝子操作をおこなっても、生成される遺伝子は一様化し、局所解から抜け出ることが難しくなる。そこで、集団内において最良の適応度 F_i を

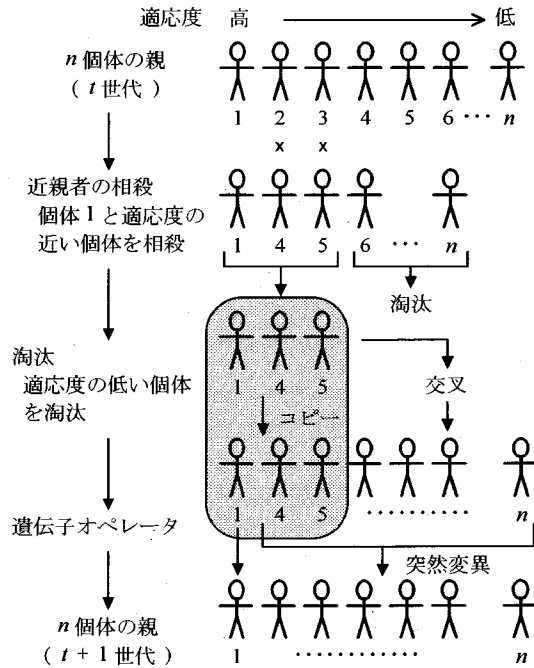


図-2 次世代の個体の生成方法

示す個体と似た遺伝子を持つ個体を相殺し、集団内の遺伝子に多様性を持たせた。この際、相殺するか否かの基準は最良個体の評価関数 R_i によって決まり、検索の進行に応じて変化するものとした。つまり、検索の初期段階においては、相殺判定の基準を緩やかなものとし、相殺される個体数を少なくする一方、検索が進行するにつれて、次第に判断基準を厳格にして遺伝子の多様性を保った。

b) 淘汰

近親者の相殺を経て選択された集団内において、適応度の低い個体を淘汰率 S ($0 \leq S \leq 1$) に基づいて淘汰した。これにより、集団内の個体数は $n(1-S)$ に減少する。本研究では淘汰率を 0.6 とした。

淘汰により減少した集団は、生き残った適応度の高い個体間で交配させて生成される子によって補われる。万が一、近親者の相殺によって多くの個体が消滅し、個体数が $n(1-S)$ 以下になった場合は、淘汰は行わないものとした。

(6) 交叉

交叉に用いる個体は集団中からランダムに 2 個選択し、これらの親が 1 つの子を生成するものとした。この際、親は何回でも子孫の生成に参加できるものとした。

本研究では遺伝子を実数として表現しており、一般的に知られているバイナリ法の交叉方法を用いることができないことから、Wright らによって開発された GENOCOP ver 2.0 に採用されている交叉方法を採用した¹⁹⁾。この方

法による子孫の生成過程を式(3)に示す。

$$x_k^{t+1} = r \cdot (x_j^t - x_i^t) + x_i^t \quad (3)$$

ここで、

- x_k^{t+1} : $t+1$ 世代の個体 k の遺伝子ベクトル
- r : 0~1 の乱数
- x_j^t : t 世代の個体 j の遺伝子ベクトル ($1 \leq j \leq n$)
- x_i^t : t 世代の個体 i の遺伝子ベクトル ($1 \leq i \leq n$)

ただし、

$$i \neq j, R_i \leq R_j$$

しかしながら、式(3)で得られる $t+1$ 世代の遺伝子 x_k^{t+1} は入力条件において設定した弾性係数の範囲を逸脱する可能性がある。この場合、拘束条件を満たすまで r の値を変えて新しい遺伝子を生成し、それでも適当な遺伝子が生成されない場合は、これらの親同士の交叉をあきらめ、異なる親を選択して子孫を生成するものとした。

(7) 突然変異

突然変異は遺伝子の選択、交叉で生成された個体の遺伝子に多様性を持たせ、集団が局所解に陥ったときに、そこから脱出する可能性を高める効果がある。

しかしながら、本問題のように検索範囲が広い場合、局所解近傍まで検索が進行すると、突然変異によって得られる個体の大部分が局所解よりも適応度が低い個体となり、淘汰されてしまうため、突然変異の効果が期待できなくなる。そこで、突然変異によって生成される遺伝子の範囲を検索の進行、すなわち評価関数 R_t の減少に応じて制限する Non-Uniform Mutation を採用した²⁰⁾。

t 世代の個体 S_k^{t+1} の遺伝子 v_k に突然変異を作用させた遺伝子 v_k^{t+1} は次式で表される。

$$v_k^{t+1} = \begin{cases} v_k + \Delta(t, UB - v_k) & (a=0) \\ v_k + \Delta(t, v_k - LB) & (a=1) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、

- UB : 弾性係数の上限値
- LB : 弾性係数の下限値
- a : ランダムな2進数 (0 or 1)

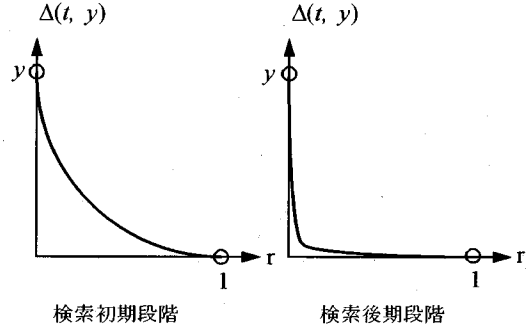


図-3 検索の進行による $\Delta(t, y)$ の変化²⁰⁾

式(4)で用いられる関数 $\Delta(t, y)$ は式(5)で表される。

$$\Delta(t, y) = y \cdot \left(1 - r \left(1 - \frac{R_{best}}{R_{conv}} \right)^b \right) \quad (5)$$

ここで、

- r : 0~1 の乱数
- R_{best} : t 世代における評価関数の最良値
- R_{conv} : 評価関数の収束値
- b : システムパラメータ

図-3に示すように関数 $\Delta(t, y)$ は R_{best} が減少し、 R_{conv} に近づくにつれ、0 近傍の値をとる確率が増加する。つまり、検索の初期段階においては、検索空間の広範囲にわたって一様に突然変異が生じる。一方、 R_{best} が R_{conv} に近づく後期段階では、突然変異により生成される遺伝子を非均一化し、最良個体の遺伝子近傍に遺伝子が生成されるように制御することで、突然変異の効率を高めている。

ここで、 b は突然変異の非均一化の度合いを決定するパラメータであり、過去の事例²⁰⁾から $b=5$ とした。

(8) 収束判定

以下の2条件のいずれかを満たした場合、収束したと判定した。

条件1: 集団内の最良個体の評価関数 (R_{best}) が設定した値、 R_{conv} 以下になった場合。

条件2: 最大世代数 (G_{max}) に達した場合。

本研究では R_{conv} を 10^{-6} m に、 G_{max} を 1000 に設定した。

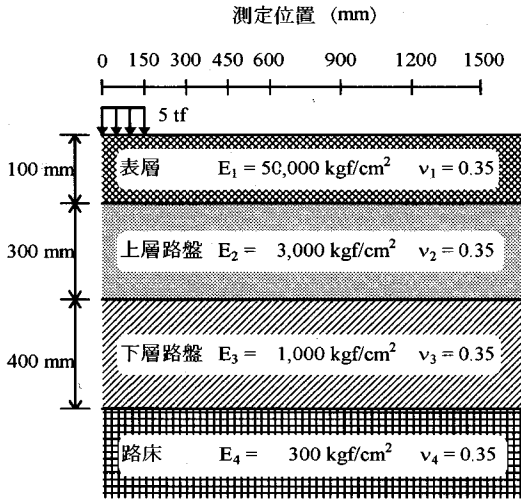


図-4 舗装構造 (4層モデル)

3. 計算たわみを用いた逆解析

(1) 入力条件

図-4のような層厚、弾性係数、ポアソン比を持つ4層構造の舗装体を仮定した。舗装表面に5 tf(49 kN)荷重が作用したときの載荷板中心点と、半径方向に300、450、600、900、1200、1500 mm離れた位置における7点の表面たわみをELSAによって算出し、逆解析の入力たわみとした。得られたたわみを表-1に示す。表-2に示した弾性係数の上限値、下限値、ポアソン比、層厚を入力条件とし、逆解析を30セット実行した。

(2) 逆解析結果

得られた逆解析結果の中で、収束に至るまでの世代数が最大、最小、そして平均値に最も近い値を示した結果を表-3に示す。

収束に至るまでの世代数は42~593とかなりばらついた結果となったが、得られた逆解析弾性係数は標準偏差が十分小さく、その平均値は図-4で仮定した層弾性係数とほとんど一致しており、適切な逆解析弾性係数が得られた。次に、これらの逆解析結果における世代数の増加と集団内の最良個体の評価関数 R_i の関係を図-5に示す。

世代数の増加に伴い、 R_i は減少していくが、ある程度探索が進行すると、 R_i が更新されない世代が継続しており、局所解に陥っている。特に世代数が最大となる場合にはこの傾向が顕著であり、 R_i が更新されない世代が長く続いている。しかしながら、探索が進行するにつれて再び R_i が

表-1 逆解析に用いた計算たわみ

		載荷板中心からの距離 (mm)						
		0	300	450	600	900	1200	1500
たわみ	(μm)	836.5	643.4	564.0	503.1	414.0	348.9	298.1

表-2 逆解析の入力条件

	弾性係数 (kgf/cm^2)	ポアソン比	層厚 (mm)
表層	$1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$	0.35	100
上層路盤	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$	0.35	300
下層路盤	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$	0.35	400
路床	$1.0 \times 10^1 \sim 1.0 \times 10^3$	0.40	—

表-3 逆解析結果

	世代数	時間 (s)	E_1 (kgf/cm^2)	E_2 (kgf/cm^2)	E_3 (kgf/cm^2)	E_4 (kgf/cm^2)
最小	42	639	48520.8	2924.2	974.9	299.1
最大	593	8829	51360.9	3079.8	1028.9	301.2
平均	239	3779	50174.4	2991.4	1005.1	300.0
標準偏差	142	2226	850.5	45.9	15.6	0.6

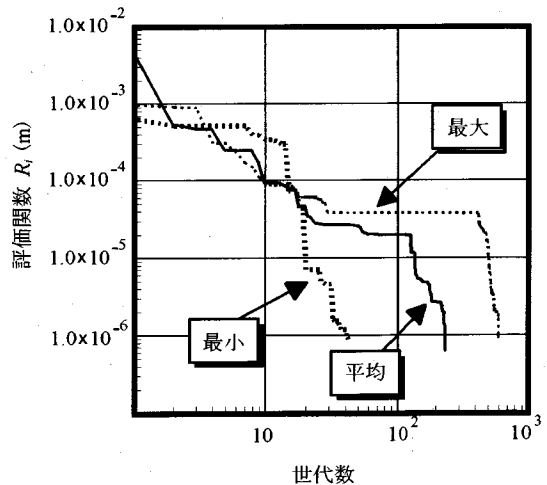


図-5 世代数と最良個体の評価関数 R_i の関係

減少し始め、収束に至ることから、仮に逆計算過程において局所解に陥った場合でも、そこから脱出することが可能であると言える。したがって、GA は舗装体の弾性係数の逆解析のように解の唯一性が保証されない問題にとって有効な手法であると言えよう。

4. 逆解析の実測データへの適用

従来、FWD たわみから舗装体の層弾性係数を逆解析する手法としてはガウス・ニュートン法が広く用いられており、逆解析プログラムとしては LMBS²¹⁾や BALM²²⁾がある。これらの逆解析プログラムを用いて測定された FWD データを逆解析すると、弾性係数の初期値の与え方によっては解が得られなかったり、得られたとしても工学的に不適当な解が求まることがあった。ここではこのような場合に GA を用いた逆解析がどのような挙動をとるかを調べるため、アスファルト舗装、コンクリート舗装において測定された FWD データを用い、ガウス・ニュートン法による逆解析結果と比較することを試みた。

(1) アスファルト舗装の逆解析

a) 解析条件

アスファルト舗装のデータとしては1993年3月に建設省土木研究所大型走行試験路において行われた第2回 FWD 共通試験のデータを用いた。逆解析には同一地点において7回測定した FWD データを用いた。測定データを付録として表-11 に示す。舗装構造は表-4 に示すような層厚、ポアソン比を持つ4層構造とした。通常、LMBS では、弾性係数の初期値には解析者が妥当と判断する値を入力する。ここでは各舗装構成層に使用されている材料を考慮し、表-4 に示すような初期値を設定した。LMBS における収束条件としては、残差平方和の最小値 R_{conv} を 10^{-6} m、残差平方和の増分の最小値を 10^{-10} m に設定した。また、最大繰り返し計算数を1000回とし、これ以内に収束条件を満たさない場合は、1000回までの繰り返し計算において得られた評価関数 R_i の最小値を与える逆解析弾性係数を解と見なした。

b) 逆解析結果の比較

LMBS による逆解析の場合、5番目の測定たわみから推定された逆解析弾性係数は表-5 に示されているように明らかに異常な値となった。このとき、得られた逆解析弾性係数から算出される R_i が他の測定と比べて大きいことから、得られた解は局所解であり、これよりも小さな R_i を持つ解が存在する可能性が高い。

一方、表-6 に示すように GA によって逆解析をおこなった場合、解を得るまでの計算時間は LMBS の約 50 倍必要となった。しかしながら、推定された逆解析弾性係

表-4 逆解析の入力条件(アスファルト舗装)

		LMBS	GA
表層	弾性係数 (kgf/cm ²)	50,000	1.0×10 ⁴ ~ 2.0×10 ⁵
	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚 (mm)	90	90
上層路盤	弾性係数 (kgf/cm ²)	3,000	1.0×10 ² ~ 1.0×10 ⁴
	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚 (mm)	140	140
下層路盤	弾性係数 (kgf/cm ²)	1,000	1.0×10 ² ~ 1.0×10 ⁴
	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚 (mm)	220	220
路床	弾性係数 (kgf/cm ²)	100	10 ~ 1.0×10 ³
	ポアソン比	0.40	0.40
	層厚	—	—

表-5 LMBS による逆解析結果(アスファルト舗装)

	反復回数	評価関数 R_i m	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
1 st	13	2.8378×10 ⁻⁵	30294.3	3601.6	243.6	618.8
2 nd	84	2.6168×10 ⁻⁵	33682.3	3378.9	260.0	620.8
3 rd	10	3.7569×10 ⁻⁵	36165.0	3135.6	293.1	587.2
4 th	10	2.7554×10 ⁻⁵	38805.7	3232.9	253.9	613.0
5 th	80	4.7378×10 ⁻⁵	78089.1	158.9	9345.6	577.4
6 th	10	3.3573×10 ⁻⁵	35085.2	3402.6	282.0	594.8
7 th	12	2.4385×10 ⁻⁵	40995.7	3032.7	264.9	613.5
平均	34	3.2771×10 ⁻⁵	43803.8	2723.6	1783.3	601.1
標準偏差	37	8.6968×10 ⁻⁵	17000.0	1264.3	3704.8	17.2

表-6 GA による逆解析結果(アスファルト舗装)

	反復回数	評価関数 R_i m	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
1 st	1000	1.9090×10 ⁻⁵	33028.5	3263.7	259.2	613.2
2 nd	1000	1.7058×10 ⁻⁵	36614.6	3034.8	280.1	611.1
3 rd	1000	2.2158×10 ⁻⁵	37026.0	3064.2	294.8	586.8
4 th	1000	2.1118×10 ⁻⁵	42215.2	2868.6	270.6	607.5
5 th	1000	1.9383×10 ⁻⁵	42344.4	2779.4	295.0	589.9
6 th	1000	2.1867×10 ⁻⁵	36724.6	3228.5	289.3	592.8
7 th	1000	1.6756×10 ⁻⁵	44271.6	2700.7	281.0	608.4
平均	1000	1.9633×10 ⁻⁵	38889.3	2991.4	281.4	601.4
標準偏差	0	2.2920×10 ⁻⁶	4075.3	216.8	13.2	11.1

数の R_i はすべての測定において LMBS より小さくなっており、より測定たわみに近いたわみを与える逆解析弾性係数が得られた。さらに、LMBS において異常な解が得られた 5 番目の測定においても、 R_i が LMBS よりも小さくなる逆解析弾性係数が得られた。その結果、推定された逆解析弾性係数の標準偏差は LMBS による逆解析結果よりも小さくなり、より安定した解を示している。

次に、LMBS において、初期値の設定の仕方が逆解析結果にどのような影響を与えるのかを検討するために、初期値を表-4 に示す GA と同じ範囲内でランダムに 50 セット発生させて逆解析を行った。この結果、設定した初期値によっては収束しなかったり、収束したとしても工学的に不適当と考えられる解も見受けられた。また、得られた解の評価関数 R_i の最小値と GA による R_i の両者を比較すると、1 番目～7 番目の全てのケースにおいて、GA により得られた R_i の方が小さくなった。

c) GA における評価関数の推移

GA による逆解析結果の代表として、2 番目、5 番目、6 番目の逆解析における最良個体の評価関数 R_i の推移を図-6 に示す。5 番目の逆解析結果では、世代数の増加に伴い R_i が緩やかに減少していくが、2 番目、6 番目の結果では R_i が更新されない世代が漸次的に現れるため、解を検出するまでにより多くの世代が必要となる。このとき、局所解に陥っていると考えられるが、検索の進行につれ R_i が再び減少し、最大世代数までには R_i が十分小さくなる逆解析弾性係数を推定していることから、仮に局所解に陥った場合でも、世代交代が進むことで局所解から脱出することができる。

なお、今回の解析では両逆解析結果とも最大世代数 G_{max} 以内に評価関数が収束値 R_{conv} 以下となる解を得ることができなかった。これは実測値に含まれる測定誤差や仮定した舗装構造と実構造とのモデル誤差の影響と考えられる。

(2) コンクリート舗装の逆解析

コンクリート舗装はアスファルト舗装と比べ FWD によって測定される舗装の表面たわみは小さくなり、測定誤差がより大きく逆解析弾性係数に影響を与える。

このような舗装体を LMBS によって逆解析した場合、弾性係数の初期値によっては収束しなかったり、収束したとしても工学的に解釈できないような解が求まるなど、アスファルト舗装の場合と比べ逆解析がより困難な場合があった²³⁾。そこで、実際に 10 tf (98 kN) 荷重を加えたときに測定されたコンクリート舗装の表面たわみを LMBS と GA の両者によって逆解析し、得られる逆解析弾性係数を比較した。

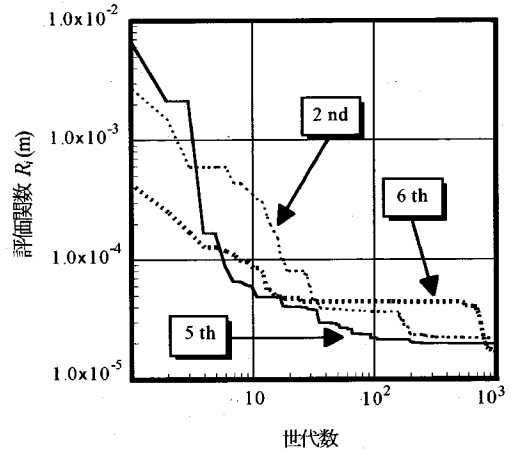


図-6 世代数と最良個体の評価関数 R_i の関係 (アスファルト舗装)

表-7 逆解析の入力条件(コンクリート舗装)

	LM BS		GA
	ケース1	ケース2	
弾性係数 (kgf/cm ²)	350,000	300,000	$1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^6$
表層			
ポアソン比	0.17	0.17	0.17
層厚 (mm)	322	322	322
弾性係数 (kgf/cm ²)	3,000	3,000	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$
上層路盤			
ポアソン比	0.35	0.35	0.35
層厚 (mm)	110	110	110
弾性係数 (kgf/cm ²)	2,000	2,000	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$
下層路盤			
ポアソン比	0.30	0.30	0.30
層厚 (mm)	118	118	118
弾性係数 (kgf/cm ²)	1,000	1,000	$10 \sim 1.0 \times 10^4$
路床			
ポアソン比	0.50	0.50	0.50
層厚	—	—	—

a) 解析条件

逆解析には 1995 年 5 月 9 日、鹿島道路 (株) 機械センター内において測定されたデータを用いた。測定は午前 10 時から午後 10 時までの 12 時間にわたって、2 時間毎に、同一地点で行ったものである。8 回重錘を落下させたときに測定されたたわみの平均値を入力たわみとし、LMBS と GA によって逆解析を行った。入力たわみを付録として表-12 に示す。LMBS においては、コンクリート層の弾性係数の初期値を $350,000 \text{ kgf/cm}^2$ ($34,300 \text{ MPa}$)、 $300,000 \text{ kgf/cm}^2$ ($29,400 \text{ MPa}$) の 2 通りに設定し、逆解析に与える影響を検討した。LMBS と GA の入力条件を表-7 に示す。なお、LMBS における収束条件はアスファルト舗装の場合と同様に設定した。

b) 逆解析結果の比較

従来、コンクリート舗装の設計では、コンクリート層の弾性係数を350,000 kgf/cm²程度として用いることが一般的であることから、まずコンクリート層の弾性係数の初期値を350,000 kgf/cm²に設定し、LMBSによる逆解析を行った。この場合、路床の弾性係数 E₄ の標準偏差は比較的小さくなるが、下層路盤の弾性係数 E₃ の弾性係数が特に大きく変動し、得られた逆解析弾性係数を直接比較することが困難であった。さらに、表-8 中の 18:00、22:00 の場合のように工学的に解釈できないような解が求まった。

コンクリート舗装において測定される FWD データを逆解析する場合、推定される逆解析弾性係数はコンクリート版の温度勾配に影響を受けると言われている²⁴⁾。このことから、コンクリート層の弾性係数の初期値のみを 300,000 kgf/cm² と小さく設定し、LMBS により逆解析を試みた。結果を表-9 に示す。得られた逆解析弾性係数はコンクリート層の弾性係数の初期値を 350,000 kgf/cm² とした場合とは異なる結果となった。また、いずれの時間帯においても、得られた逆解析弾性係数は設定した弾性係数の初期値近傍の値となっていることから、初期値周辺の局所解に陥っている可能性が高い。

一方、GA によって逆解析を行った場合、計算時間は繰り返し計算 1 回につき LMBS の約 3.2 倍必要となるが、表-10 のように LMBS で得られたいずれの解よりも評価関数 R_i が小さくなった。また 12:00 ~ 16:00 とその他の時間帯では推定される逆解析弾性係数に差が生じており、コンクリート版の温度勾配による影響が確認できる結果となった。また、GA はガウス・ニュートン法とは異なり、弾性係数の初期値を明確に設定する必要がないことから、得られる解が初期値に影響されることはなく、より安定した逆解析弾性係数を推定することができる。

5. 結論

本研究によって得られた結論は以下の通りである。

- 舗装体の層弾性係数の逆解析に遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した。
- 適当な層厚、ポアソン比、層弾性係数を持つ 4 層構造を仮定し、多層弾性理論によって算出される舗装表面のたわみを入力たわみとし、GA による逆解析をおこなった結果、仮定した弾性係数と非常に近い逆解析弾性係数を推定することができた。
- 実際に測定されたアスファルト舗装とコンクリート舗装の FWD データについて、GA とガウス・ニュートン法を用いて逆解析をおこなった結果、GA を適用した逆解析はガウス・ニュートン法と同様に舗装体の層弾性係数を推定できることが分かった。さらに、ガウス・ニュートン法では解が得られなかつ

表-8 LMBS による逆解析結果
(E₁ の初期値 : 350,000 kgf/cm²)

時刻	反復回数	評価関数 R _i m	E ₁ kgf/cm ²	E ₂ kgf/cm ²	E ₃ kgf/cm ²	E ₄ kgf/cm ²
10:00	1000	6.4379×10 ⁵	369727.0	3285.6	2245.6	1072.5
12:00	1	2.6022×10 ⁵	350090.1	2948.6	2012.4	620.8
14:00	58	2.7277×10 ⁵	349806.6	1068.3	604.8	587.2
16:00	27	4.1695×10 ⁵	349315.0	3037.4	2081.6	613.0
18:00	183	1.3907×10 ⁵	327895.1	1695.1	1019280.8	974.4
20:00	922	5.3093×10 ⁵	344415.8	2053.2	1257.2	1223.6
22:00	166	1.3172×10 ⁵	356731.7	2421.3	1213407.9	1052.1
平均	337	3.4221×10 ⁵	349711.6	2358.5	320127.2	1045.1
標準偏差	432	1.9548×10 ⁵	12610.9	803.2	546799.4	86.0

表-9 LMBS による逆解析結果
(E₁ の初期値 : 300,000 kgf/cm²)

時刻	反復回数	評価関数 R _i m	E ₁ kgf/cm ²	E ₂ kgf/cm ²	E ₃ kgf/cm ²	E ₄ kgf/cm ²
10:00	103	1.3009×10 ⁴	315517.2	1158.1	1176.3	1018.0
12:00	46	4.0449×10 ⁵	304390.9	2343.9	1790.4	1003.1
14:00	19	2.5923×10 ⁵	301891.9	2465.2	1975.0	1001.0
16:00	203	6.0870×10 ⁵	308938.3	2193.1	1597.1	1009.5
18:00	67	1.1997×10 ⁴	306766.5	1927.8	1607.8	1010.3
20:00	318	9.0415×10 ⁵	322142.5	1442.9	1479.3	1152.3
22:00	593	4.7423×10 ⁵	394631.1	1239.3	1620.8	1266.9
平均	193	7.3591×10 ⁵	322039.8	1824.3	1606.7	1065.9
標準偏差	205	4.0504×10 ⁵	32747.5	541.4	248.7	103.8

表-10 GA による逆解析結果

時刻	反復回数	評価関数 R _i m	E ₁ kgf/cm ²	E ₂ kgf/cm ²	E ₃ kgf/cm ²	E ₄ kgf/cm ²
10:00	1000	2.5400×10 ⁵	408122.3	3022.4	2536.7	1181.3
12:00	1000	2.5402×10 ⁵	346232.6	3013.4	2133.2	1013.4
14:00	1000	2.5780×10 ⁵	316153.7	2619.2	1925.9	987.2
16:00	1000	2.4284×10 ⁵	353797.2	2708.9	2087.0	1068.7
18:00	1000	1.9306×10 ⁵	374668.2	2822.1	2339.8	1193.5
20:00	1000	1.6148×10 ⁵	389409.8	3488.3	2452.4	1289.2
22:00	1000	1.9724×10 ⁵	426575.0	3365.4	2812.1	1332.0
平均	1000	2.0214×10 ⁵	396652.2	3494.5	2508.9	1230.4
標準偏差	0	3.8564×10 ⁶	39428.7	807.8	335.3	139.2

たり、得られたとしても工学的に意味をなさないような解が求まった場合でも、GA によって逆解析をおこなうと、適切な逆解析弾性係数を推定することが可能であると考えられる。

- ガウス・ニュートン法をコンクリート舗装に適用した場合、設定する弾性係数の初期値によって得られる解が大きく影響される場合があるが、GA では初期値を明確に設定する必要がないため、より安定した逆解析弾性係数を推定することができると考えられる。

6. おわりに

遺伝的アルゴリズム(GA)は舗装体の弾性係数の逆解析のように解の唯一性が保証されないような逆問題に対し、

有効な手法であることが確認できた。しかしながら、評価関数が十分小さくなるような良好な解を得るためには、従来使われているガウス・ニュートン法を適用した逆解析法よりも長い計算時間を必要とする。

したがって、現段階では、GA を適用した逆解析はガウス・ニュートン法などの従来用いられていた方法では解が得られなかったり、得られたとしても工学的に意味をなさない解が求まったケースについて適用することが有効であろう。

謝辞:本研究で用いた FWD によるアスファルト舗装の測定データは FWD 研究会から提供して頂いたものであり、ここに感謝の意を表します。またコンクリート舗装に関するデータは鹿島道路 (株) によって測定されたデータを使用させて頂きました。併せて感謝の意を表します。

付録：アスファルト舗装とコンクリート舗装の FWD データをそれぞれ表-11、表-12 に示す。

表-11 アスファルト舗装の FWD たわみ (μm)

	荷重 (kgf)	載荷板中心からの距離 (mm)								
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	2500
1 st	4989	1096	901	764	591	463	294	193	149	75
2 nd	4987	1077	888	751	586	454	288	193	48	75
3 rd	4986	1078	892	757	593	460	294	212	51	78
4 th	4980	1069	892	755	589	462	295	193	50	77
5 th	4985	1070	891	757	591	463	293	206	53	77
6 th	4991	1068	886	750	589	461	293	209	51	77
7 th	4983	1064	886	754	585	457	293	193	48	78

表-12 コンクリート舗装の FWD たわみ (μm)
(たわみは 8 回測定の平均値)

時刻	荷重 (kgf)	載荷板中心からの距離 (mm)									
		0	200	300	450	600	750	900	1200	1500	2000
10:00	10000	221.4	215.1	210.4	204.6	193.5	185.6	180.6	163.1	143.7	117.1
12:00	10000	262.3	253.2	242.5	240.0	223.5	216.1	211.0	188.4	168.3	135.4
14:00	10000	274.7	265.2	255.9	251.1	235.1	225.1	218.0	195.1	175.3	140.7
16:00	10000	252.4	240.5	234.0	231.2	213.1	207.1	201.1	181.7	160.5	129.3
18:00	10000	231.3	219.5	213.9	208.1	193.2	187.8	181.6	162.9	144.6	116.6
20:00	10000	217.7	206.9	200.0	193.2	179.7	174.8	168.8	152.1	133.0	108.3
22:00	10000	203.1	199.6	190.3	184.0	172.0	166.5	162.2	145.4	129.0	103.5

参考文献

- 1) 笠原篤, 岳本秀人, 伊藤保彦, 古川真男: フォーリング・ウェイト・デフレクトメータについて, 舗装, Vol.20, No.6, pp.15-23, 1985.
- 2) Bush III, A. J. and Baladi, G. Y.: *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of moduli*, ASTM special technical publication; 1026, ASTM publication code number 04-010260-08, ASTM, 1989.
- 3) von Quintus, H. L., Bush III, A. J. and Baladi, G. Y.: *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of moduli: Second Volume*, ASTM special technical publication; 1198, ASTM publication code number 04-011980-08, ASTM, 1989.
- 4) Inoue, T. and Matsui, K.: Structural analysis of asphalt pavements by FWD and backcalculation of elastic layered model, *3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol.1, pp.425-434, 1990.
- 5) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 拡張カルマン・フィルタによる舗装の逆解析, 第25回土質工学会研究発表会, pp.1835-1836, 1990.
- 6) 三瓶辰之, 松井邦人, 井上武美: 舗装構造の逆解析における各種手法の比較, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.237-240, 1992.
- 7) 亀山修一, 姫野賢治, 丸山暉彦, 笠原篤: 舗装体の弾性係数の逆解析における解の唯一性に関する研究, 1995年度土木情報システム論文集, Vol.4, pp.75-82, 1995.
- 8) 井上武美, 松井邦人, 三瓶辰之: 舗装の逆解析において層弾性係数の推定に影響を及ぼす因子とその影響度の検討, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.177-185, 1991.
- 9) Matsui, K., Inoue, T. and Sanpei, T.: Reflection of Model and Measurement Errors on Stiffness Estimates, *7th International Conference of Asphalt Pavement, Performance*, Vol.2, pp.263-276, 1992.
- 10) 久保司郎: 計算力学と CAE シリーズ 10, 逆問題, 培風館, 1992.
- 11) Gordberg, D.E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- 12) Gordberg, D.E.: Real-Coded Genetic Algorithms, Virtual Alphabets, and Blocking, *University of Illinois at Urbana-Champaign, Technical Report No.90001*, 1990.
- 13) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- 14) 姫野賢治: パソコンによる舗装の多層弾性構造解析, アスファルト, Vol.32, No.161, pp.65-72, 1989.
- 15) Schraudolph, N. N.: A User's Guide to GAUCSD 1.4, *Computer Science & Engineering Dept.*, UCSD, 1992.
- 16) Baker, J. E.: Adaptive Selection Method for Genetic Algorithms, *Proceeding 1st International Joint Conference on Genetic Algorithms*, 1985. *University of Michigan, Dissertation Abstract*
- 17) De Jong, K. A.: An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, *Doctoral dissertation, International*, 36(10), 5140B, 1975.
- 18) Deb, K. and Goldberg, D. E.: An Investigation of Niche and Species Formation, *Proceeding 3rd International Conference on Genetic Algorithms*, 1989.
- 19) Wright, A. H.: Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, in Rawins, G.(Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms, First Workshop on the Foundations of Genetic Algorithms and Classifier Systems*, Morgan Kaufmann Publishers, Los Atlos, CA, pp.205-218, 1991.
- 20) Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 2nd Extended Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1994.
- 21) Himeno, K., Maruyama, T. and Hayashi, M.: The use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements, *Proceedings of 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol.1, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, pp.401-410, 1990.
- 22) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.107-114, 1990.
- 23) Himeno, K., Kasahara, A., and Sugawara, T.: Structural Evaluation of Roller Compacted Concrete Pavements Based on FWD Deflection Data, *3rd International Conference on Bearing Capacity of Road and Airfields*, Vol.1, pp.559-566, 1990.
- 24) Choubane, B. and Tia, M., "Analysis and Verification of Thermal Gradient Effects on Concrete Pavement", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.121, No.1, pp.75-81, 1995.

(1996. 3. 28 受付)

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO THE BACKCALCULATION OF PAVEMENT LAYER MODULI

Shuichi KAMEYAMA, Kenji HIMENO, Teruhiko MARUYAMA
and Atsushi KASAHARA

FWD is one of the nondestructive test equipment used for evaluation of pavement structural adequacy, which is usually aided by some backcalculation method of pavement layer moduli. Application of the genetic algorithms (GA) to the backcalculation of pavement layer moduli is discussed in this paper.

It is found that layer moduli of pavement structure can be estimated properly by the backcalculation technique based on GA, and the obtained solutions are more stable than those of the conventional backcalculation methods.

Finally, the new backcalculation technique based on GA is applied to the deflection basins measured by FWD in an actual pavement in situ, showing that it gives more reasonable solutions than those by the conventional techniques.