

I-6 コンクリート舗装の層弾性係数の逆解析への遺伝的アルゴリズムの適用 Application of Genetic Algorithms to the Backcalculation of Concrete Pavement Layer Moduli

○姫野賢治*

Kenji Himeno

亀山修一**

Shuich Kameyama

丸山暉彦***

Teruhiko Maruyama

笠原 篤****

Atsushi Kasahara

【抄録】 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。

【Abstract】 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. GA is a relatively new optimization technique and is based on the process of natural selection, peculiar to the evolution of creatures.

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.

【キーワード】 FWD, 逆解析, 逆解析弾性係数, 遺伝的アルゴリズム, 解の唯一性

【Key Word】 FWD, Backcalculation, Backcalculated Moduli, Genetic Algorithms, Uniqueness

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荷重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差の自乗和を評価関数とし、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。評価関数の最小値を求めるために、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

* 北海道大学 工学部土木工学科(〒060 札幌市北区北14条西8丁目, TEL:011-706-6205)

** 長岡技術科学大学 建設系(〒940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1, TEL:0258-46-6000)

*** 長岡技術科学大学 建設系(〒940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1, TEL:0258-46-6000)

**** 北海道工業大学 土木工学科(〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目, TEL:011-681-2161)

差等の影響を挙げることができるが^{9),9)}, 其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, 評価関数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にされている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, すなわち評価関数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)¹¹⁾に着目し, 逆解析への適用を検討した。

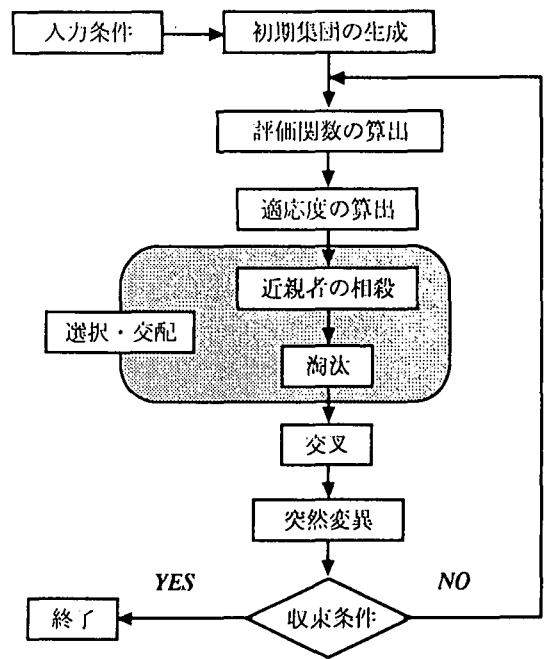


Fig.1 遺伝的アルゴリズムの流れ

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Fig.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, 舗装構成各層の層厚, ポアソン比, 表面たわみ, 収束条件の他に, 舗装構成各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, 舗装構成各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, 舗装構成各層の弾性係数のみを最適化することとした。

(2) 初期集団の生成

入力値として舗装構成各層の弾性係数 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, そこから抜け出すことが困難になる。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たことから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の差の重みつき自乗和を式(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
- 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 は各たわみセンサーの精度により決定した.

(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リングウィンドウを採用した¹⁵⁾。本研究ではスケー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。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。この方法は、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⁾。1 世代から $t+1$ 世代の個体が生成される手順を Fig.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、一様な個体で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、相殺を判定する判断を緩やかなものとし、検索が進行するに

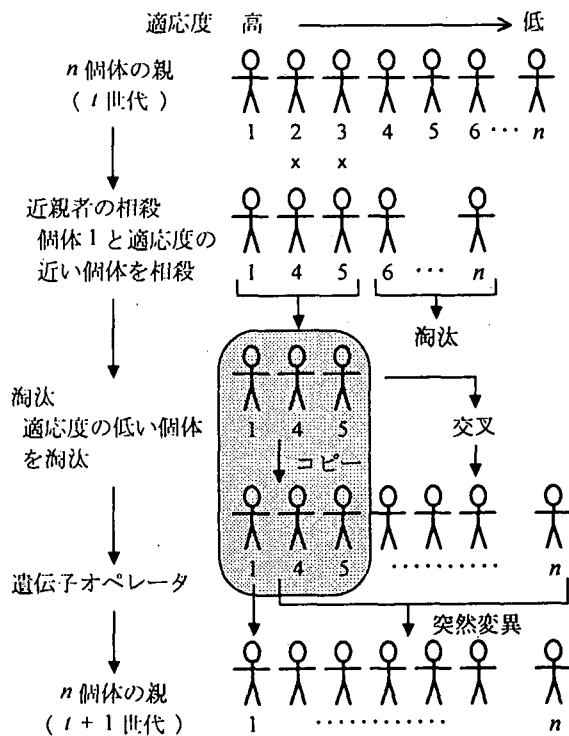


Fig.2 次世代の個体の生成方法

つれて、次第に判断基準を厳格にして遺伝子が一様化することを防いだ。

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、近親者の相殺により多数の個体が消滅し、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。

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

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、そこから抜け出せ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、そ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' は次式で表される:

$$v_k' = \begin{cases} v_k + \Delta(t, UB - v_k) & (a=0) \\ v_k + \Delta(t, v_k - LB) & (a=1) \end{cases} \quad (4)$$

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)

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

Fig.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

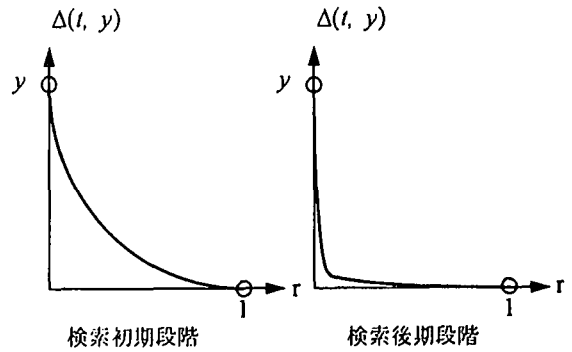


Fig.3 検索の進行による $\Delta(t, y)$ の変化²⁰⁾

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、突然変異の効果を高めている。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、 $b=5$ 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 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。

3. 計算たわみを用いた逆解析

(1) 入力条件

Fig.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 Table 1 に示す。Table 2 に示した弾性係数の上限値、下限値、ポアソン比、層厚を入力条件し、同一条件の下で GA による逆解析を 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、そして最も平均値に近い値を示した結果を Table 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も十分小さく、その平均値は Fig.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_t の関係を Fig.5 に示す。

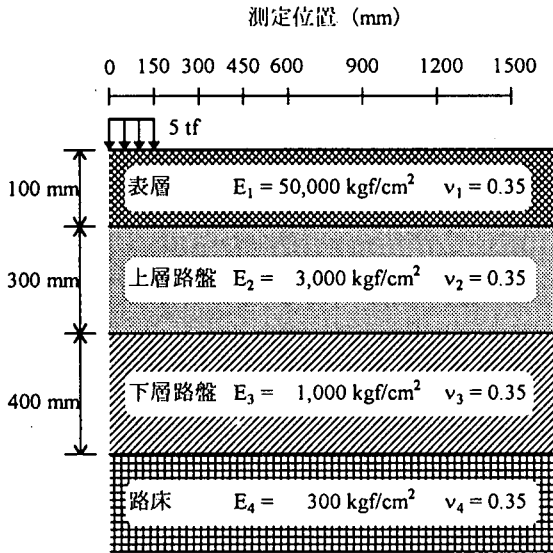


Fig.4 舗装構造 (4層モデル)

世代数の増加に伴い、 R_i は減少していくが、ある程度検索が進行すると、 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、検索が進行するにつれて再び R_i が減少し始め、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、世代交代が進むことにより、脱出することが可能であると言える。したがって、GA は本問題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. 実測値を用いたコンクリート舗装の逆解析

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。舗装体の層弾性係数の逆解析においては、評価関数の極小値が検索空間に多数存在するため、ガウス・ニュートン法等により逆解析を行った場合、初期値によっては評価関数の極小値、すなわち局所解に陥ることがある⁷⁾。このような解の唯一性が保証されない逆問題に GA を用いた場合、どのような挙動をとるかを検討するため、現場において測定されたコンクリート舗装の FWD データを用い逆解析を行い、ガウス・ニュートン法による結果と比較した。

Table 1 逆解析に用いた計算たわみ

	載荷盤中心からの距離 (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

Table 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	—

Table 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

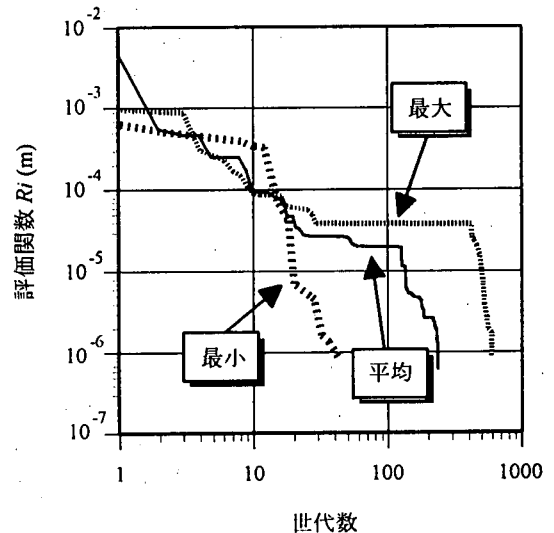


Fig.5 世代数と最良個体の評価関数 R_i の関係

Table 4 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)	載荷盤中心からの距離 (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

(1) 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の測定たわみの平均値を入力たわみとしてLMBSとGAによって逆解析を行った。入力たわみをTable 4に示す。

LMBSにおいては、入力するコンクリート層の弾性係数の初期値を350,000 kgf/cm² (34,300 MPa)、300,000 kgf/cm² (29,400 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Table 5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。

(2) 逆解析結果

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。結果をTable 6に示す。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、Table 6中の18:00、22:00のように工学的に解釈できないような解が求まった。このとき得られた評価関数は他の時間帯と比べ大きな値となっていることから、局所解に陥っていると考えられる。

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、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と若干小さく設定し、LMBSにより逆解析を行った。得られた結果をTable 7に示す。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

Table 5 逆解析の入力条件 (コンクリート舗装)

		LMBS		GA
		ケース1	ケース2	
表層	弾性係数	350,000	300,000	1.0x10 ⁴ ~2.0x10 ⁶
	ポアソン比	0.17	0.17	0.17
	層厚 (mm)	322	322	322
上層路盤	弾性係数	3,000	3,000	1.0x10 ² ~1.0x10 ⁴
	ポアソン比	0.35	0.35	0.35
	層厚 (mm)	110	110	110
下層路盤	弾性係数	2,000	2,000	1.0x10 ² ~1.0x10 ⁴
	ポアソン比	0.30	0.30	0.30
	層厚 (mm)	118	118	118
路床	弾性係数	1,000	1,000	10~1.0x10 ⁴
	ポアソン比	0.50	0.50	0.50
	層厚	—	—	—

※弾性係数の単位はkgf/cm²

Table 6 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	6.4379x10 ⁻⁵	369727.0	3285.6	2245.6	1072.5
12:00	1	2.6022x10 ⁻⁵	350090.1	2948.6	2012.4	620.8
14:00	58	2.7277x10 ⁻⁵	349806.6	1068.3	604.8	587.2
16:00	27	4.1695x10 ⁻⁵	349315.0	3037.4	2081.6	613.0
18:00	183	1.3907x10 ⁻⁵	327895.1	1695.1	1019280.8	974.4
20:00	922	5.3093x10 ⁻⁵	344415.8	2053.2	1257.2	1223.6
22:00	166	1.3172x10 ⁻⁵	356731.7	2421.3	1213407.9	1052.1
平均	337	3.4221x10 ⁻⁵	349711.6	2358.5	320127.2	1045.1
標準偏差	432	1.9548x10 ⁻⁵	12610.9	803.2	546799.4	86.0

いることに加え、評価関数も大きいことから、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、Table 8のようにLMBSで得られたいずれの解(Table 6, Table7)よりも評価関数 R_i が小さくなった。また日中の12:00~16:00におけるコンクリート層の逆解析弾性係数は午前、夜間における逆解析弾性係数と比べると若干小さな値となり、コンクリート版の温度勾配による影響が確認できることから、得られた逆弾性係数は工学的に妥当であると言える。

10:00, 16:00, 22:00の逆解析結果における評価関数の推移をFig.6に示す。いずれの場合も50世代以内には十分小さな評価関数に到達しており、それ以後最大世代数1000世代に至るまで評価関数はほとんど更新されない。なお、今回の解析では両逆解析結果とも最大世代数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。

このように、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)を適用することができた。
- 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。
- ガウス・ニュートン法によりコンクリート舗装の弾性係数を逆解析した場合、得られる解は設定する弾性係数の初期値によって影響され、初期値周辺の局所解が得られる場合がある。しかしながら、GAでは初期値を明確に設定する必要がないため、初期値に影響されることはない。また、仮に局所解に陥った場合でも、遺伝子オペレータの作用によって、脱出することが可能である。舗装体の層弾性係数の逆解析のような解の唯一性が保証されない逆問題にとってはGAは有効な手法である。

6. おわりに

遺伝的アルゴリズム(GA)は本研究のような、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

Table 7 LMBSによる逆解析結果
(E_1 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

Table 8 GAによる逆解析結果

時刻	世代	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

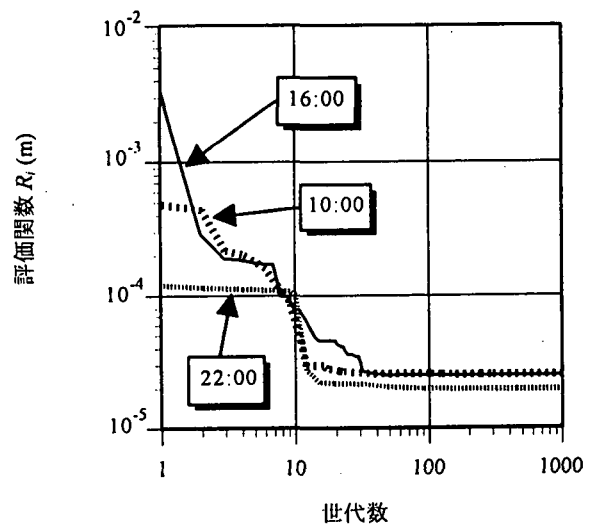


Fig.6 世代数と最長個体の評価関数 R_i の関係

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る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：本研究で用いたコンクリート舗装のFWD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。ここに感謝の意を表します。

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・ウエイト・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・フィルター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) 危山修一, 姫野賢治, 丸山研彦, 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*, September, 1990.
- 13) 伊庭齊志: 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.
- 17) De Jong, K. A. : An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, *Doctoral dissertation, University of Michigan, Dissertation Abstract 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) Zbigniew Michalewicz, : *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, pp559-566, 1990.
- 24) FWD 研究会: FWD に関する研究