

FWDセンサー位置が逆解析弾性係数に及ぼす影響

亀山修一¹・松井邦人²・笠原 篤³・姫野賢治⁴・丸山暉彦⁵

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

²正会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

⁴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)

⁵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)

FWD測定によって得られる舗装の表面たわみから逆解析によって舗装構成層の弾性係数を推定する場合、逆解析弾性係数は測定誤差とモデル誤差の影響を受ける。本研究では測定誤差の弾性係数に対する感度を計算し、測定誤差の影響が最小となるようなたわみの最適センサー位置を遺伝的アルゴリズムによって求めた。また、得られたたわみセンサー位置の妥当性を検証するために、シミュレーションおよびFWDの実測データを用い逆解析を行った。その結果、たわみセンサー位置を適切に選択することにより、推定される逆解析弾性係数の標準偏差をかなり減少することが可能なり、測定たわみにより合致するようなたわみを与える逆解析弾性係数が推定できることが分かった。

Key Words : FWD, backcalculated, backcalculated moduli, genetic algorithms, measurement error, sensitivity analysis, sensor locations

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、舗装表面に重錐を落下させたときに生じるたわみを載荷版近傍の数箇所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²⁾。

測定された表面たわみから舗装体の層弾性係数(逆解析弾性係数)を推定するには逆解析が用いられる。舗装体の層弾性係数の逆解析に関する研究は世界的に活発に行われている³⁾⁴⁾。逆解析は通常、測定された表面たわみと線形多層弾性論から得られる計算たわみの差の自乗和を評価関数として選定し、これを最小にする層弾性係数を決定するという一種の最適化問題として扱われる。それにはガウス・ニュートン法⁵⁾が広く用いられている。

逆解析に影響を及ぼす因子としては、仮定した舗装構造と実構造とのモデル誤差(層厚、ポアソン比等)や測定たわみに含まれる測定誤差、載荷板の荷重分布、および最適化手法等が挙げられる。著者らはこれらの因子が逆解析弾性係数に与える影響について検討してきた⁶⁾⁷⁾。その結果、FWDによって測定される表面たわみに含まれる測定誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響を軽減するには、測定回数とたわみセンサーの個数を増加させる必要があることその他に、たわみセンサーの設置位置も重要な因子であることを示した⁸⁾。

本研究では逆解析弾性係数に影響を及ぼす因子の内、測定誤差のみを対象とし、その影響を最も受けにくいたわみセンサー位置、すなわち最適なたわみセンサーの位置を遺伝的アルゴリズム⁹⁾によって求めた。また、モンテカルロシミュレーションを用いてたわみセンサー位置が各舗装構成層の逆解析弾性係数に与える影響を検討し、遺伝的アルゴリズムによって得られた最適センサー位置の妥当性を検証した。さらに、FWDのセンサーを従来用いられている位置と遺伝的アルゴリズムにより得られた最適位置に設定し、実際の舗装体でFWD試験を行い、推定される逆解析弾性係数について検討した。

表-1 ELSAにより算出した各測定の表面たわみ

測点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
測定位置(mm)	0	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
たわみ(μm)	514	411	377	346	318	293	272	253	236	221	207	195	184
測点	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
測定位置(mm)	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
たわみ(μm)	174	165	156	148	141	135	129	123	118	113	109	105	101
測点	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	—
測定位置(mm)	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	—
たわみ(μm)	97	94	91	88	85	82	80	77	75	73	71	69	—

2. 解析条件

解析に用いた舗装構造は3層構造とした。各層の層厚、ポアソン比、弾性係数を図-1に示す。たわみセンサーの設置範囲は載荷版中心点から半径方向に2000mm離れた点までとし、センサーは50mm間隔で設置できるものとした。ただし、載荷版中心点から50mm, 100mm, 150mmの点は載荷版の半径内にあり、たわみを測定することができないことから対象外とした。その結果、センサーを設置できる箇所(測定候補点と称する)は38点となる。舗装体表面に5t荷重が作用したとき、各測定候補点に生じるたわみを多層弾性論解析プログラム(ELSA)¹⁰⁾によって算出した。結果を表-1に示す。

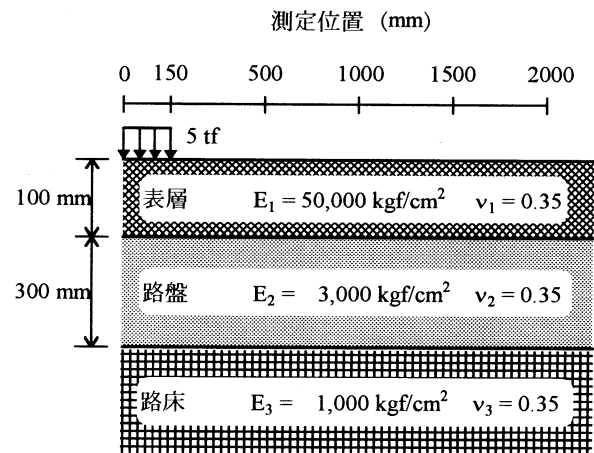


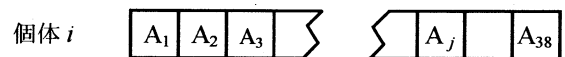
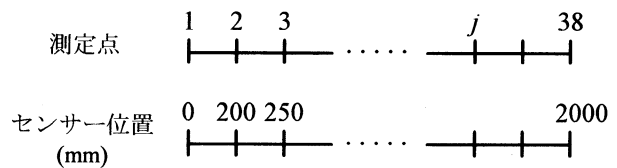
図-1 舗装構造(3層構造)

3. 遺伝的アルゴリズムによる 最適センサー位置の抽出

最適たわみセンサー位置を求める方法として遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms : GA)を採用した。GAとは自然界における生物集団の進化過程に着想を得たものであり、優れた遺伝子を持つ個体同士を交配し、より優秀な遺伝子を持つ個体を生成するという過程を繰り返す手法である。

(1) 遺伝子の表現型

仮想生物集団内の一個体は0～2000mmの範囲の測定候補点を遺伝子として持つものと仮定する。図-2に示すように、一つの個体は38個の遺伝子を持っている。各遺伝子は0または1の2進数で表現され、遺伝子が1となるとき、その位置においてたわみが測定されるものとする。一つの個体の遺伝子配列に含まれる1の個数、すなわちたわみセンサーの個数は入力時に設定するものとする。現在使用されているFWD装置のセンサー数のほとんどが10個以下であることから、本研究ではセンサー数を5～10個に設定した。このような遺伝子を持つ個体に図-3に示すような操作を行い最適な遺伝子を持つ個体を抽出する。各段階についての説明を以下に示す。



ここで A_j は $\begin{cases} 0 \cdots \text{測定しない} \\ 1 \cdots \text{測定する} \end{cases}$

図-2 遺伝子の表現方法

(2) 初期集団の生成

入力時に設定したセンサー数に応じて遺伝子(0 or 1)をランダムに発生させ、これらを遺伝子として持つ個体を n 個生成し、初期集団とする。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の問題によって異なりその基準は存在しないが、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¹¹⁾、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

今、 M 層からなる舗装構造においてFWD測定を行い、 N 個の測点において表面たわみを測定したとする。測定データから逆解析によって層弾性係数を推定する場合の最適化手法としてガウス・ニュートン法が広く用いられている。これは式(1)のように、測点 i における測定たわみ u_i と多層弾性論により得られる計算たわみ z_i の差の自乗和で表される評価関数を設定し、これを最小にする層弾性係数を求めるものである。

$$f = \sum_{i=1}^N \sqrt{w_i} (u_i - z_i)^2 \quad (1)$$

ここで、

- f : 評価関数
- i : たわみの測定点(1~ N)
- w_i : 重み係数
- z_i : 計算たわみ
- u_i : 測定たわみ

各測点におけるたわみの測定誤差はランダムであり、測点間に相関はないと仮定すると、逆解析弾性係数のたわみ測定誤差に対する感度は式(2)によって表される⁶⁾。

$$\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial E_j} \frac{\partial z_i}{\partial E_k} \right) \lambda_{jl} = \frac{\partial z_l}{\partial E_k} \quad (2)$$

$$(l = 1, \dots, N) \quad (k = 1, \dots, M)$$

ここに、 $\lambda_{jl} = \frac{\partial E_j}{\partial u_l}$ であり、 j 層の弾性係数の測点 l のたわみ誤差に関する感度である。

各測点のたわみの真値を u_{0l} 、誤差を Δu_l とすると、 j 層の弾性係数 E_j はすべての測点における誤差の影響を受けることから、

$$E_j(u_0 + \Delta u) = E_j(u_0) + \sum_{l=1}^N \frac{\partial E_j}{\partial u_l} \Delta u_l \quad (3)$$

$$(j = 1, \dots, M)$$

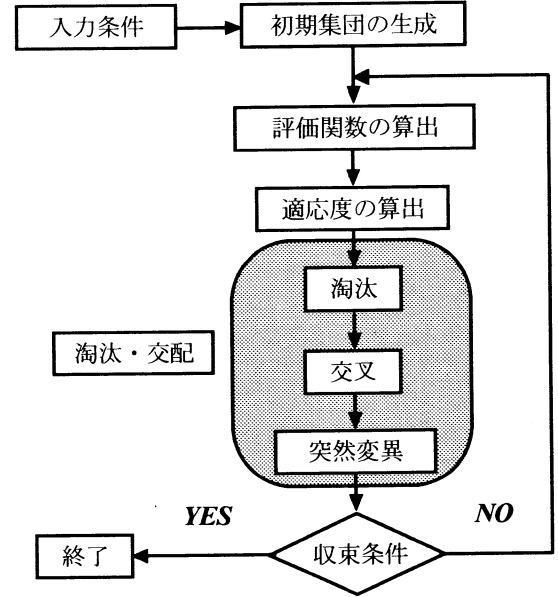


図-3 遺伝的アルゴリズムの流れ

ここで、

$$u_0 = (u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0N})^T$$

$$\Delta u_0 = (\Delta u_{01}, \Delta u_{02}, \dots, \Delta u_{0N})^T$$

と書くことができる。

測点 i のたわみの分散を σ_i^2 ($i = 1, \dots, N$)とすると、 R 回測定したときの平均たわみの分散は σ_i^2/R であることから、式(3)より、逆解析弾性係数の共分散マトリックスは式(4)のように書くことができる。

$$\left[\sigma_{EE}^u \right] = \left[\frac{\partial E}{\partial u} \right]^T \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \sigma_1^2/R & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix} \left[\frac{\partial E}{\partial u} \right] \quad (4)$$

ここで、

$$\left[\frac{\partial E}{\partial u} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial u_1} & \frac{\partial E}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial E}{\partial u_M} \\ \frac{\partial E}{\partial u_1} & \frac{\partial E}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial E}{\partial u_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial E}{\partial u_N} & \frac{\partial E}{\partial u_N} & \dots & \frac{\partial E}{\partial u_N} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \sigma_1^2/R & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2/R & & & 0 \\ & \sigma_2^2/R & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix}$$

この共分散マトリックスの対角和を評価関数 J とした。

$$J = \text{Trace} \left(\left[\sigma_{EE}^u \right] \right) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial E_j}{\partial u_i} \right)^2 \left(\frac{\sigma_i^2}{R} \right) \quad (5)$$

ASTMによると¹²⁾、FWDのたわみセンサーの測定精度は $2\mu\text{m}$ 以下あるいは指示値の2%以下と規定されている。本研究ではすべてのセンサーで測定されるたわみの標準偏差 σ_i を $2\mu\text{m}$ で一定と仮定し、(5)式から各個体の評価関数 J を計算した。

(4) 適応度の算出

GA は最大値検索を基本とするアルゴリズムであるため、最小値を検索する場合には式(6)によって評価関数 J を適応度 F に変換し、 F の最大値を検索する問題に変換する。

$$F = U - J \quad (6)$$

U の値の決定には、スケーリングウィンドウ¹³⁾を採用し、検索の進行に応じて U を変化させる。本研究ではスケーリングウィンドウサイズを10とした。

(5) 遺伝子操作

個体を適応度の大きい順に並べ替え、適応度の低い個体を淘汰率に応じて消滅させる。この操作により減少した個体は、残った適応度の高い個体を交配させ、新しい個体を生成することで補われる。なお、今回の解析では淘汰率を0.6に設定した。その後、以下に示すような、交叉および突然変異により新しい個体を生成した。

a) 交叉

淘汰を経て生き残った個体の中から、個体をランダムに2個選択する。これらの個体を親とし、図-4に示すような一様交叉¹⁴⁾を適用して、新しい個体(子孫)を生成する。この際、親は何回でも子孫の生成に参加できるものとする。通常、一様交叉では2つの親から2つの子孫を生成するが、本研究では親が交叉に参加する機会を増やすために、1つの子孫を生成することとした。

b) 突然変異

交叉によって新しく生成した個体の遺伝子を突然変異率に応じて反転させる。突然変異は淘汰および交叉によって均一化しがちな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。なお、突然変異率は0.1に設定した。

(6) 収束判定

設定した最大世代交代数 $G_{\max}$ 内において得られる最良個体の遺伝子を解とする。2000世代以降、評価関数の減少が見られなかったことから、 $G_{\max}$ を2000世代とした。

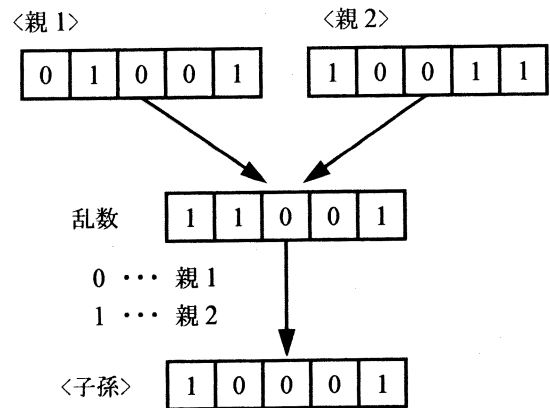


図-4 一様交叉方法

4. 最適たわみセンサー位置

センサー数を5～10個に設定し、評価関数が最小となるたわみセンサー位置をGAにより求めた。センサー数と最適たわみセンサー位置の関係を図-5に、評価関数との関係を図-6に示す。図-5は最適センサー位置が載荷版中心点、200～400mm、および1000～1200mmの3領域に分布することを示している。センサー数を増加させると、200～400mmと100～1200mmの範囲内においてのみ測点が増加し、この範囲以外の測点は生じない。また、センサー数の増加に伴い最適センサー位置の評価関数が減少することが図-6から分かる。これはセンサー数が増加することにより、推定される逆解析弾性係数の精度が向上することを意味する。センサー数が10個と7個の場合について、それぞれ図-7、図-8に示すようなセンサー位置を設定し、計算される評価関数を比較した。ここでCase 1, Case 3はたわみセンサーを載荷版中心点から200mm毎に配置しており、Case 2(0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000mm)およびCase 4(0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200mm)は従来のFWD測定において一般に用いられているセンサー位置である。センサー数を10個とした場合における各センサー位置の評価関数を図-7に、センサー数を7個とした場合における各センサー位置の評価関数を図-8に示す。

これらの図より、従来用いられているCase 2, Case 4のようなたわみセンサー位置の評価関数は、センサーを等間隔に配置するCase 1, Case 3と比べると小さな値となるが、最適センサー位置と比較した場合、評価関数はかなり大きな値となることが分かる。したがって、最適センサー位置におけるたわみから推定される逆解析弾性係数のばらつきはCase 1～Case 4のようなセンサー位置から得られる逆解析弾性係数のばらつきより小さくなると推測される。

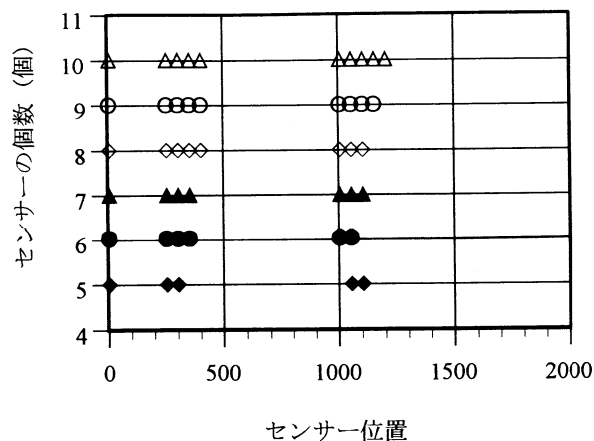


図-5 最適センサー位置

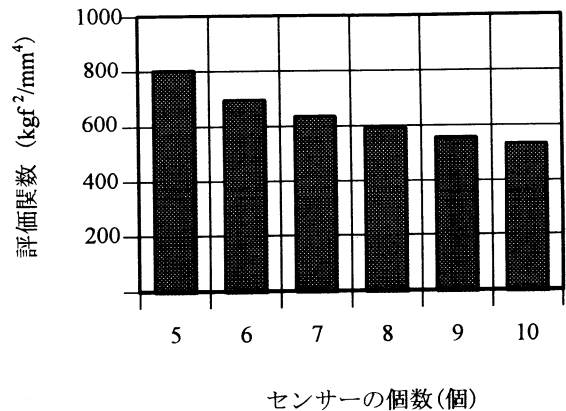


図-6 センサーの個数と評価関数の関係

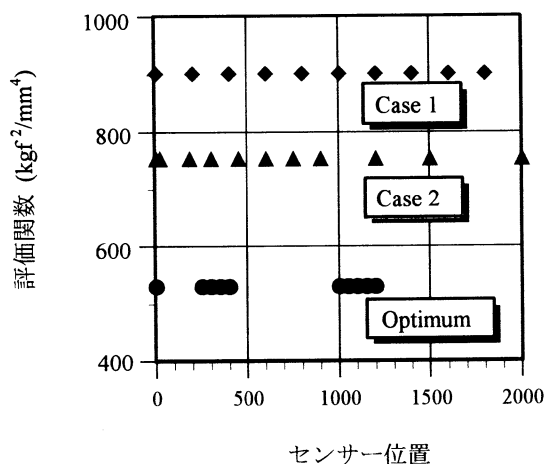


図-7 測定位置と評価関数の関係(10点測定)

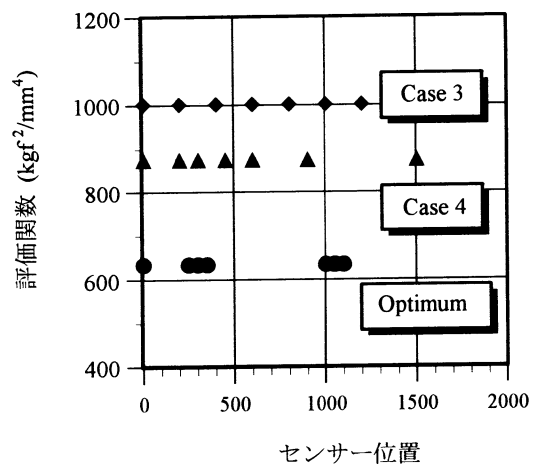


図-8 測定位置と評価関数の関係(7点測定)

5. モンテカルロシミュレーションによる 最適センサー位置の検証

最適センサー位置におけるたわみから推定される逆解析弾性係数の標準偏差と、他のセンサー位置から得られる逆解析弾性係数の標準偏差を比較し、最適センサー位置の妥当性を検証するためにモンテカルロシミュレーションを用いて逆解析をおこなった。

前述したように $2\mu\text{m}$ をそれぞれの測点におけるたわみの母集団の標準偏差(σ_t)と考えることにする。測定たわみの平均値の期待値は母平均であり、分散は、 σ_t^2/R (R は測定回数)で与えられる。従って平均たわみの標準偏差は図-9 のように測定回数の増加に伴って減少する⁸⁾。

シミュレーションを行うに当たり、測定たわみは正規分布に従うと仮定する。センサー数を 10 個に設定し、測定回数を 1 ~ 10 回と変動させたときの最適センサー位置および Case2 のセンサー位置(図-7)のたわみを ELSA で算出した。これらの値がたわみの平均値、その標準偏差が図-9 の測定回数に対応する値となるように 100 組のたわみデータを作成した。得られたデータを測定たわみとし、逆解析プログラム(LMBS)¹⁵⁾により逆解析弾性係数を推定した。LMBSでは評価関数 f として、式(1)に示したような、FWD による測定たわみと多層弾性論により得られる計算たわみの差の自乗和を採用しており、ガウス・ニュートン法によって評価関数 f が最小となる層弾性係数を求めている。

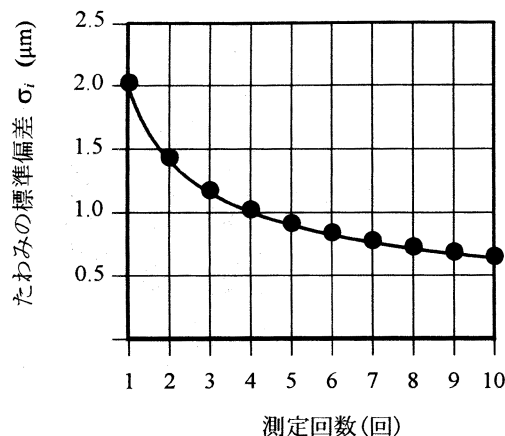


図-9 たわみの標準偏差と測定回数

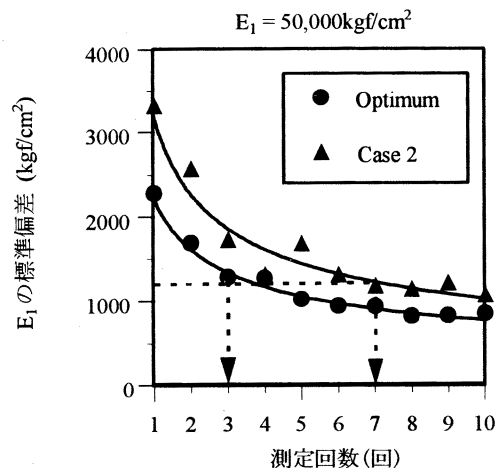


図-10 測定回数と E_1 の標準偏差の関係

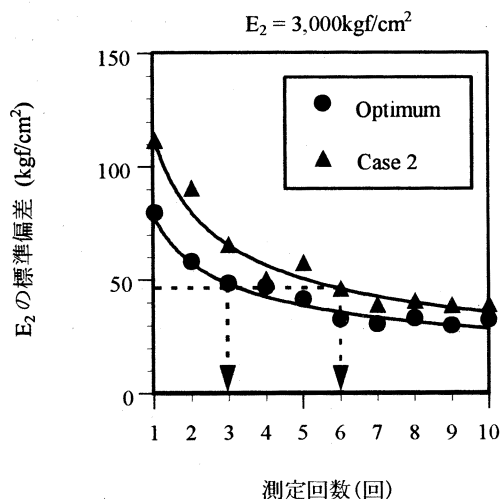


図-11 測定回数と E_2 の標準偏差の関係

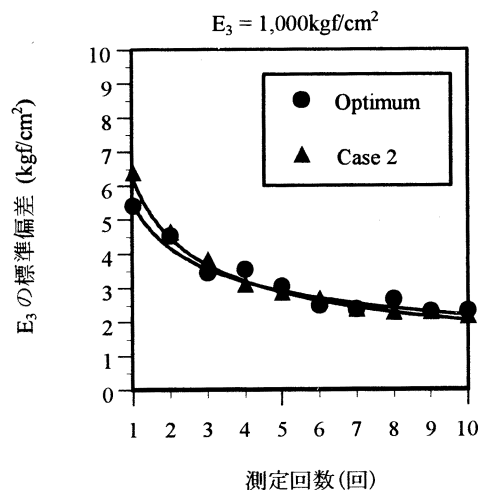


図-12 測定回数と E_3 の標準偏差の関係

測定回数と表層の逆解析弾性係数(E_1)の標準偏差の関係を図-10に、路盤の逆解析弾性係数(E_2)の標準偏差との関係を図-11に、路床の逆解析弾性係数(E_3)の標準偏差との関係を図-12に示す。図-10、図-11から、たわみセンサーを最適な位置に設置することにより、表層と路盤の逆解析弾性係数の標準偏差がCase 2よりも小さくなることが分かる。センサーを最適位置に設定し、測定回数を3回とした場合に得られる標準偏差と同等の標準偏差を得るためには、たわみセンサー位置をCase 2とした場合、 E_1 の推定には7回、 E_2 の推定には6回もの測定が必要となる。このことは、より少ない測定回数で同精度の逆解析弾性係数が推定できることを示している。また、最適センサー位置とCase 2の両者のたわみから推定される逆解析弾性係数の標準偏差は E_1 において最もその差が大きくなっており、 E_3 においてはほとんど差がない。

したがって、たわみセンサー位置を適切に選択することにより、舗装体の弾性係数の逆解析において、しばしば問題となる表層の逆解析弾性係数(E_1)のばらつきを低減することが可能となる。

6. 実測データによる 最適センサー位置の検証

FWDのセンサーを従来広く用いられている位置と最適位置の2通りに設定し、実際の舗装構造においてたわみを測定した。測定は1996年5月、北海道工業大学内のアスファルト試験舗装において、コマツFWDを用いておこなった。最適センサー位置を求めるに当たり、舗装構造を最下層にベドロックを持つ4層構造と仮定した。また、 $E_1 \sim E_3$ には、著者らが過去に測定した同じ月のFWDデー

タから得られた逆解析弾性係数を用いた¹⁶⁾。解析に用いた舗装構造を図-13に示す。各舗装構成層の層厚、ポアソン比、層弾性係数を入力条件とし、GAによって最適センサー位置を求めた。なお、実験に用いたFWD装置のセンサー数は6個であり、センサーを設置できる最小間隔が100mmであったことから、たわみセンサーの設置範囲を0～2000mm、センサー数を6個、センサーの設置間隔を100mmとした。得られた最適センサー位置と過去の測定に用いられたセンサー位置(以後従来位置と称する)を表-2に示す。

試験舗装上に設けた測点において、センサーをこれら2通りの位置に設置し、それぞれの場合について、重錘を20回落下させ(5tf荷重)、舗装の表面たわみを測定した。センサーを最適位置と従来位置に設定したときに測定されたたわみの平均値および標準偏差を、それぞれ表-3、表-4に示す。これらの測定結果から、センサー位置が載荷板から離れるにしたがって、たわみの標準偏差が小さくなることがわかる。また、最適センサー位置と従来センサー位置に共通であるセンサーのたわみ(D_0 , D_{900})を比較した場合、最適センサー位置の D_0 が従来センサー位置の D_0 と比べ若干大きな値を示している。しかしながら、測定たわみ D_0 , D_{900} の標準偏差はほとんど同じであることから、最適センサー位置と従来センサー位置におけるたわみの測定誤差は同程度であると見なすことができる。

次に、表-3、表-4に示した測定データをLMBSによって逆解析し、各舗装構成層の弾性係数を推定した。逆解析に用いた各層の弾性係数の初期値、層厚、ポアソン比は図-13に示す通りとした。なお、最下層(ベッドロック)の弾性係数 E_4 は 10^6 kgf/cm^2 に固定した。最適センサー位置の逆解析結果を表-5に、従来センサー位置の逆解析結果を表-6に示す。

最適センサー位置と従来センサー位置の逆解析結果を比較した場合、路床の逆解析弾性係数 E_3 はほとんど同じ値となったが、表層および路盤の逆解析弾性係数 E_1 , E_2 は異なった値となった。しかしながら、逆解析弾性係数の標準偏差は E_1 , E_2 , E_3 の全ての場合において、最適センサー位置の逆解析結果の方が小さくなった。また、得られた解の評価関数 f の平均値は従来センサー位置では $1.41 \times 10^{-4} \text{ m}$ であるのに対し、最適センサー位置では約4分の1となる $3.32 \times 10^{-5} \text{ m}$ となった。

したがって、FWDたわみセンサーを適切な位置に設置することにより、得られる逆解析弾性係数のばらつきを低減できるだけでなく、評価関数 f が小さくなる解、すなわち、測定たわみにより合致するようなたわみを与える層弾性係数を推定することが可能である。

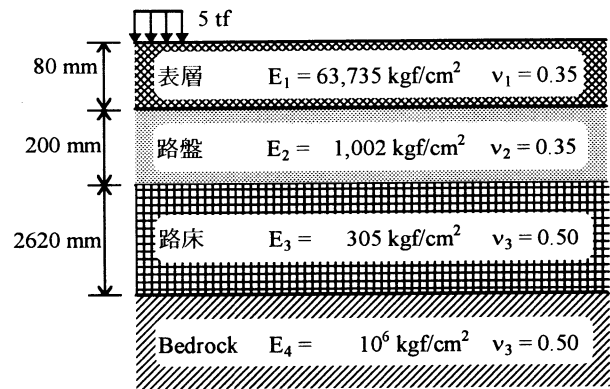


図-13 舗装構造

表-2 実験に用いたFWDセンサー位置

載荷板中心からの距離(mm)	
最適位置	0, 500, 700, 800, 900, 1000
従来位置	0, 300, 600, 900, 1200, 2000

表-3 最適センサー位置の測定たわみ(μm)

	D_0	D_{500}	D_{700}	D_{800}	D_{900}	D_{1000}
平均値	163.7	77.7	48.6	36.7	32.9	22.9
標準偏差	2.4	1.2	1.0	0.7	0.4	0.6

表-4 従来センサー位置の測定たわみ(μm)

	D_0	D_{300}	D_{600}	D_{900}	D_{1200}	D_{2000}
平均値	150.8	111.0	62.1	30.9	18.3	14.9
標準偏差	2.7	2.9	0.9	0.5	0.4	0.3

表-5 逆解析結果(最適センサー位置)

	評価関数 f (m)	E_1 (kgf/cm²)	E_2 (kgf/cm²)	E_3 (kgf/cm²)
平均値	3.32×10^{-5}	55122.2	392.3	285.9
標準偏差	4.16×10^{-6}	3018.6	49.5	5.9

表-6 逆解析結果(従来センサー位置)

	評価関数 f (m)	E_1 (kgf/cm²)	E_2 (kgf/cm²)	E_3 (kgf/cm²)
平均値	1.41×10^{-4}	45888.2	943.2	253.2
標準偏差	2.33×10^{-6}	6259.4	164.0	2.3

8. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- FWDによって測定されるたわみの測定誤差を一定と仮定し、測定誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響が最小となるセンサー位置、すなわち、最適センサー位置をGAによって求めた。
- モンテカルロシミュレーションを適用し、最適センサー位置とそれ以外のセンサー位置におけるたわみから逆解析弾性係数を推定した。最適センサー位置から推定される表層および路盤の逆解析弾性係数の標準偏差は他のセンサー位置から得られる逆解析弾性係数の標準偏差と比べかなり小さくなることが分かった。
- センサーを最適位置と従来使われている位置の2通りに設定し、実際の舗装体においてFWD測定をおこなった。最適センサー位置から得られた逆解析弾性係数の標準偏差は従来位置から得られた逆解析弾性係数の標準偏差よりも小さくなった。さらに、最適センサー位置における測定データから得られた解の評価関数 f は従来位置の評価関数の約4分の1程度となった。

このように、GAを用いることによって、短時間で最適センサー位置を求めることが可能である。また、最適センサー位置で測定されたたわみを逆解析することによって、推定される層弾性係数のばらつきを低減することができるのに加え、測定たわみにより合致するようなたわみを与える層弾性係数を推定することが可能である。したがって、全てのFWDは、舗装構造に応じた最適センサー位置においてたわみを測定する必要がある。

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) FWD研究会: FWDに関する研究(その2), 1995年
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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
- 6) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 弾性多層構造の逆解析におけるモデル誤差・測定誤差に対する感度, 土木学会論文集, No.454/III-20, pp.11-17, 1992.
- 7) 松井邦人, 佐藤直俊: 逆解析弾性係数におよぼす荷重分布と層間滑りの影響, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.333-336, 1992.
- 8) 松井邦人, 笠原篤, 岡田貢一: 逆解析弾性係数係数に対するたわみと構造モデル誤差の影響, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.55-62, 1995.
- 9) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- 10) 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.
- 11) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- 12) ASTM: The Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, D4694-87
- 13) Schraudolph, N. N.: A User's Guide to GAUCSD 1.4, *Computer Science & Engineering Dept.*, UCSD, 1992.
- 14) 安居院猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1994.
- 15) 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, pp.401-410, 1990.
- 16) Ishitani, M., Himeno, K., Kasahara, A.: Seasonal Variations in Bearing Capacity of Asphalt Pavements, *Preprint*, Transportation Research Board, 71st Annual Meeting, 1992, paper No. 920301.

EFFECT OF FWD SENSOR LOCATIONS ON BACKCALCULATED LAYER MODULI

Shuichi KAMEYAMA, Kunihiro MATSUI, Atsushi KASAHARA,
Kenji HIMENO and Teruhiko MARUYAMA

When layer moduli are backcalculated from a set of surface deflections measured by FWD, it has been known that the backcalculated moduli are affected by measurement errors as well as model link error. This paper presents a genetic algorithm based method that minimize the effect of measurement errors on the moduli.

To confirm the validity of the method presented herein, layer moduli are backcalculated by using Monte Carlo simulation and a set of measurement locations which is different from the optimal set. Finally, this paper examines how sensor locations affect to backcalculated layer moduli using FWD data measured on test road.